

## September



## CONTENTS

## 巻頭言 ..... 播磨 尚朝 02

## 研究解説

重力波と多極子 ..... 田中 貴浩 04

クラスター多極子理論と反強磁性体の  
異常ホール効果 ..... 鈴木 通人 06新しい多極子伝導現象：反強磁性体で現れた  
室温巨大異常ホール効果 ..... 中辻 知 12

## 研究交流のすすめ

もっと気軽に使ってみよう放射光 ..... 中尾 裕則 16

放射光施設（P F）のP型課題を利用して ..... 井原 慶彦 19

中性子散乱を使ってみませんか？ ..... 佐藤 卓 20

SPRING-8で実験してみませんか？ ..... 藤森 伸一 24

## 研究成果紹介

UPt<sub>3</sub>における非共型超伝導 ..... 柳瀬 陽一 28非クラマース系PrRh<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>の  
異方的な磁場温度相図 ..... 井澤 公一 30超強磁場中性子回折により明らかになった  
URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の磁場誘起非整合磁気秩序 ..... 野尻 浩之 32

スピン軌道結合系における光学選択則 ..... 柳 有起 35

Polymorphism, Giant Phonon Softening,  
and Strong-Coupling Superconductivity ..... 野原 実 37Emergent electronic phenomena in  
all-carbon  $\pi$ -electron systems  
– from aromatic hydrocarbons to  
Mott insulating quantum spin liquids ..... Kosmas Prassides 39

## 研究会報告／会議報告／滞在記

トピカルミーティング 研究会報告 ..... 中西 良樹 42  
「局在多極子と伝導電子の相関による新現象」強相関多極子系の超伝導： $t$ と $d$ の共通項を探る  
..... 野原 実 / 青木 大 44

C O 1 トピカル・ミーティングに参加して ..... 御領 潤 46

International Conference on  
Strongly Correlated Electron Systems ..... 松田 達磨 48  
(SCES2017) 会議参加報告(速報)

滞在記もといブラハ滞在のすすめ ..... 齋藤 開 49

Extending collaboration between  
Charles University and J-Phys partners  
..... Klára Uhlířová / Tim Verhagen 52

Ames滞在記 ..... 比嘉 野乃花 54

アイオワ州立大学物理学学科の紹介と  
Amesへの誘い ..... 古川 裕次 56ローマ大学サピエンツァ校滞在記  
〜分光法による新超伝導体の電子状態解明〜 ..... 水口 佳一 58

## 若手紹介

Zhaoming Tian ..... 59

Arvind Maurya ..... 60

石塚 淳 ..... 61

田端 千紘 ..... 62

柳 有起 ..... 63

飛田 豊 ..... 64

船島 洋紀 ..... 65

一研究者のことば ..... 鬼丸 孝博 67

2017年4月からの領域関連行事 ..... 68

事務局からのお知らせ ..... 69



J-Physics

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

# 大学で研究すること

播磨 尚朝

領域代表 神戸大学大学院理学研究科 教授

「J-Physics：多極子伝導系の物理」も発足より2年を経過して、6月初めには約100ページの中間評価報告書を取りまとめましたが、このニュースレターが出版される頃は中間評価のヒアリングも無事に終わっていることと思います。中間評価に向けて、4月から5月にかけて3回のトピカルミーティングが開催されましたが、そこで紹介された研究成果は中間評価報告書を取りまとめる上でとても参考になりました。また、「拡張多極子」や「奇パリティ多極子」というキーワードが普通に使われて議論が行われており、本領域の問題意識が多くの人に共有されていることを強く認識できて大変心強く感じました。今後の領域活動としては、これらの成果をまとめた形で領域外、特に海外に向けて発信して行くことも重要になります。このニュースレターが出版される頃に開かれる国際ワークショップ「J-Physics 2017: International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena」もその活動の1つです。

今回の国際ワークショップについては、1月から招待講演者の選考を行いました。そこで決めた招待講演者へ招待メールを送ったところ、幸いにも多くの方から参加を快諾していただきましたが、残念なことに何名かからは断りのメールが届きました。断りの理由のほとんどが「学期が始まっていて授業をしなければならない」ということでした。招待講演者の方々なので、研究者としてはいずれも著名な方です。ですから、と言うのはやや変な言い方ですが、このような理由での断りには少なからず驚きを覚えました。私も大学に勤める身ですので、大学では授業を含めて様々な校務をこなしながら研究を行っています。研究の時間はある程度は融通が利くとして、研究会や国際会議が授業と重なっている場合が困りものです。(いやいや、困りものと言っては学生に申し訳ありません)

私たちのような基礎研究を行なっている研究者は、大学を含む学校だけでなく、いわゆる研究所などにもいます。民間も含めて研究所というのは、その設置目的があり研究内容が明確になっていると思います。では、研究所などに属さない大学の教員が行う研究内容は、どのように決まっているのでしょうか。これについては、教員自身が決めていると考える人がほとんどではないかと思います。教員に限って、研究内容を自分自身で決められるというのは、特権的であるとも言えますが、それに伴う義務が授業などであると感じている人が多いと思います。それでは、海外の研究者が招待講演を授業のために断るのは、それが義務だからなのでしょう。確かに義務であるから、という一面もあると思いますし、そのように説明を受ける場合が多いのですが、私はそれ以上の意味があるように感じています。

授業の中でも、例えば、大学院の講義や大学院生の指導に関することですと、日常的な研究活動に直接関係しています。日々行われている研究の内容や成果を学生に還元することは、十分に意味のあることだと思いますし、当然、多くの大学で行われていることだと思います。しかしながら、大学ではあまり専門性の高くない授業などの担当もあります。例えば、多極子伝導の研究を進めることが力学の授業に何らかの影響を及ぼすとはなかなか思えません。ところが、全く関係ないとも言い難いと感じています。うまくは言えないのですが、研究と教育の両方をこなすことがお互いの幅を広げている、とでも言えるのでしょうか。実際に研究会などでの雑談の折に、ふと、お互い

の授業での工夫の話、例えば、慣性抵抗の教え方などの話をするのは楽しいことです。「斜方晶系という訳語はわかり難くないか」とか、「"ハニカム格子"という用語はブラベー格子じゃないから混乱するだろうなあ」ということを考えるのも、基礎的な事柄を教える機会があることと無縁ではないでしょう。こういうことは、自身の研究発表に少なからず影響を及ぼしていると思います。

とは言え、講義や実験の授業を受け持つとなるとレポートや試験の採点なども伴いますので、数が増えれば、それに応じて研究に使える時間は少なくなります。もともと、授業負担（負担と書くとマイナスのイメージを持てますが）は大学や職階などによっても大きく異なっているのが実状でしょう。一般に国立大でも規模の小さな大学の方が負担は多く、また私学などではより負担が多いと考えられていると思います。負担が少ない方が、研究に使うことができる時間は多くなるでしょう。負担が多い中で研究時間を確保し、さらに研究集会などへ参加する都合をつけるというのは、簡単なことではありません。正直なところ、授業負担はあまり多くない方が良く考える人の方が多いでしょう。この辺は難しいところですね。また、最近の傾向だと思いますが、国立大では様々な"改革"が行われていて、授業以外の校務の量がかなり増えているように思います。それもこれも、国民の税金を使っているから必要なことだ、と捉えがちですが、"改革"のために、教育と研究のバランスが崩れてしまっただけは、学生にとっても良くないことではないかと思っています。

さて、国際会議と授業の関係に話を戻しましょう。7月にプラハで開催された強相関電子系国際会議（SCESと略される）での話です。SCESは25年以上続いている国際会議で、3年に一度の磁性国際会議（ICM）の時はその中に組み込まれますが、それ以外の年は独立に、ほぼ毎年開催されています。大きな国際会議の多くは7月中旬から8月までの間に行われます。欧米の多くの大学の夏休みが重なる時期がこの頃であるからだと思います。（夏休み期間が日本と欧米で異なるというのが、最近流行りのクォーター制やギャップタームを生み出す背景でもありますね）SCESは比較的大きな国際会議（今年の参加者は約900名）ですが、開催時期はまちまちです。これまで日本での開催は、9月上旬（1992年仙台）、8月下旬（1999年長野）、8月中旬（2013年東京）でしたが、大学院の入試などと重なり、都合がつかずに参加できなかった国内の研究者もいたと記憶しています。インドや中国での開催は、気候も考慮して1月や5月ということもありました。

そのSCESを2019年は岡山で開催することになりました。開催時期としては、会場確保の都合もあり、7月最終週と9月最終週を候補としました。気候のことは別としても、開催する側としては9月最終週の方が都合が良いのですが、欧米の研究者は7月最終週の方が出席しやすいのは明らかです。会議開催は国際諮問委委員会で決めるのですが、そこでの圧倒的な意見は「みんなが都合の良い時期なんてないのだから、主催者が都合の良い時期に開催するのがいい」という意見ばかりで9月最終週開催への反対意見はありませんでした。開催時期が問題にならずに、ホッとしたのですが、そこには日本の大学の授業期間への理解も感じられました。大げさかもしれませんが、大学で研究することの意義と難しさを共有している、そんな感じが嬉しくなりました。

SCES2019は2019年9月24日から28日の期間で開催します。この新学術領域の最終年度にあたるので、その前の週には領域主催の国際会議を神戸で開催する予定です。一方で、来年2018年のサマースクールと試料育成に関する国際ワークショップは6月末の開催としました。国内からの出席については工夫が必要となりますが、この時期なら来日できるという海外の研究者もいます。自分たちの大学での研究と教育のバランスと同じように、海外の研究者のそれにも配慮して、国際交流や国際的な情報発信を行っていきたいと思っていますので、ご理解をどうぞよろしくお願いいたします。



## 重力波と多極子

田中 貴浩

京都大学大学院A理学研究科物理学第二分野 天体核研究室 教授

米国の重力波レーザー干渉計LIGOにより連星ブラックホール(BH)合体からの重力波検出の一報が世界を駆け巡ってから、一年余りが経過したが、その興奮は未だ冷めやらない。BHかどうかは重力波の波形の解析からわかった。質量が軽ければ中性子星である可能性があるが、その場合同じ振動数帯では重力波の振動数の時間変化がより遅くなる。また、合体の瞬間の振動数が高すぎて検出器の感度の低い領域になる。検出された波形は短い時間で振動数が変化して、合体後に波が収束する様も捉えられている。これは、大質量の連星合体である動かぬ証拠である。質量が大きい高密度天体はBH以外には考えにくい、BHでない可能性は0ではない。

さて、重力波と多極子の関係を簡潔に述べるには、電磁波との類推を与えるのが都合がよい。電磁放射は通常は主として電気双極子放射である。それがもっとも効率のよい放射機構だが、必ずしも電気双極子放射しかないというわけではなく、高次の多極子放射もあれば、磁気多極子による放射もある。ただ、単極子放射が存在しないことと、高次のモーメントによる放射効率下がるため双極子放射が主となる。単極子放射が存在しない理由を電荷の保存により、孤立系では電気単極子の時間変化がないために、単極子放射が起こらないとも説明される。

同様のことが重力波についても言える。重力波は主として質量四重極放射により放射されるが、高次の多極子も存在する。電気多極子に対応するものは質量多極子、磁気多極子に対応するものは、カレント多極子と呼ばれる。あるいは、偶パリティモード、奇パリティモードと呼ぶことも多い。なぜ、四重極からかという問いへの最も簡単な答えは、重力の場合には質量双極子モーメントの時間変化は重心の時間変化を意味するが、孤立系では重心運動に振動成分が現れないため、質量双極子放射は存在しない。カレント双極子が存在しない理由は、角運動量保存に対応する。

一般相対論も一般座標変換という変換に対して不変な、ゲージ理論の一種と考えられる。平坦な時空からの微小な摂動として線形化すれば、電磁気学と酷似している。Lorenzゲージ条件を課せば、ソースがない場合のベクトルポテンシャルに対する方程式は

$$\square A_\mu = 0 \quad (\square \text{は } d' \text{ Alembert 演算子})$$

のように書ける。これとまったく同様にして、重力場の摂動の方程式も添え字を二つ伴った変数(つまりテンソル)  $\psi_{\mu\nu}$  (～計量の摂動)に対して

$$\square \psi_{\mu\nu} = 0, \quad (1)$$

のように書かれる。背景時空として(平坦な時空なら当然満たされる)球対称性を仮定すると、これらの方程式を球面調和関数で展開すると方程式が分離する。変数がベクトルやテンソルであるため、通常の球面調和関数ではなく、ベクトルやテンソルの球面方向の添え字を伴った調和関数を用いることで、方程式を分解するのがわかりやすい。例えば、ベクトルの調和関数は通常の球面調和関数  $Y^{lm}(\theta, \varphi)$  をもちいて、 $Y_i^{(e)lm}(\theta, \varphi) := \partial_i Y^{lm}(\theta, \varphi)$  や、 $Y_{ij}^{(o)lm}(\theta, \varphi) := \varepsilon_{ij} \partial_j Y^{lm}(\theta, \varphi)$  によって構成される。ここで、 $i, j$  は  $\theta, \varphi$  で張られる2次元の座標、 $\varepsilon_{ij}$  は2次元の完全反対称テンソルである。このように調和関数で展開すると球対称性から  $l, m$  の値と  $\varepsilon_{ij}$  が含まれるか否かでモード

が完全に分類され、 $l, m$ 、および、パリティの異なるモードは方程式の中で混ざり合わない。

ベクトルポテンシャル $A_\mu$ の場合には、もともと4成分だが、ゲージ自由度がひとつと、拘束条件がひとつ存在するため、ふたつの変数が消去され、物理的な自由度として2成分が残る。このような単純な数勘定は $l \geq 1$ に対しては正しい。しかし、 $Y_i^{(e)lm}$ や $Y_i^{(o)lm}(\theta, \varphi)$ の定義が微分を含むことから、これらのベクトルの調和関数は $l=0$ の球面上で一様な場合には存在しない。したがって、 $l=0$ のモードにはそもそも物理的に波として伝播する自由度が存在しない。先に、単極子の時間変化がないから単極子放射が起きないと説明したが、そもそも $l=0$ の単極子には波として伝播する自由度が存在しないのである。重力の場合も同様である。 $\psi_{\mu\nu}$ の成分の数は10だが、座標変換の自由度が4成分、対応する拘束条件も4成分あり、物理的な自由度の数は各 $l, m$ に対して電磁波と同じふたつずつである。重力の場合にはテンソルの球面調和関数を使うが、その構成には2階微分を使う。そのため、 $l=0, 1$ の両方が消え、それらのモードには伝播する自由度が存在しない。

さて、今回検出が報告されたLIGOイベントに話を戻す。通常、(1)式にソースを加えた方程式を解くと $l$ の小さなモードが選択的に励起される。電荷の運動で電磁放射が起こると同様に、物体の運動で重力波放射が起こる。このとき、物体の運動の典型的な速度を $v$ 、光速を $c$ とすると、放射される重力波のエネルギーフラックスは $\propto (v/c)^{2l+6}$ という $l$ 依存性をもつ。つまり、物体の運動が光速に比して十分遅いとき、 $l$ の大きなモードへの放射は抑制される。一方、BH連星の合体の最終段階では、速度は光速に比べ小さくないため、 $l=3$ の八重極放射なども全く無視できるわけではない。そうは言うものの、四重極放射が主要な放射であることに変わりはない。

LIGOで観測された重力波がBH同士の合体なのかという問に戻るが、合体に至る過程で放出される重力波波形は、連星を構成する天体の質量や自転が同じならば、およそ同じ波形で区別できない。したがって、合体した天体がBHか否かは、質量が大きいからBHに違いないという一般相対論に基づく推測の域を出ない。一方、GW150914の場合、約60倍の太陽質量のBHが合体後に形成されたとされるが、この天体がBHであると断言できるか？ 定常なBH自身は何も放射をしないが、周辺に物質があれば、それらがBHに降着する際に特徴的な電磁波信号を発する可能性がある。しかし、BH同士の合体では、降着する物質の存在はあまり期待できない。そこで注目されるのは、BH自体の励起状態である。BHに安定な励起状態は存在しないが、特徴的な振動数と減衰率をもつ振動が合体の際に励起されると期待され、BH準固有振動と呼ばれる。合体後に形成されるBHは回転しているため、もはや球対称な背景時空上の摂動としては扱えない。にもかかわらず、奇跡的にこの励起も $l, m$ をラベルとしたモードに分離できる。このとき、同じ $l$ でも $m$ が違えば、異なる振動数と減衰率を与える。連星合体に際し、 $l=2, m=2$ の準固有振動が卓越すると考えられ、この励起が予測通りに観測されれば、合体後に形成された天体がBHである強い証拠となる。GW150914では、この励起らしきものが観測されているが、予測どおりの振動数と減衰率だと言うには観測誤差が大きすぎる。

2019年には日本のKAGRAも重力波観測を開始する予定である。今後の観測網の充実で、準固有振動の確認により適したイベントの発見に期待がかかる。さらに、中性子星などの天体自身が持つ四重極モーメントの影響が重力波によって観測されることも期待される。伴星からの潮汐力による変形で天体が四重極モーメントを持つのである。変形の程度は中性子星の構造に依存するため、中性子星を構成する核密度の物質の状態方程式に関する情報をもたらし、核物理の進展にも貢献すると考えられる。また、これまでの一般相対論の検証実験は弱い重力場にほぼ限られていたため、重力波は重力理論の検証にも新しい知見をもたらす。例えば、スカラー電荷のような、BHや中性子星が一般相対論の予言と異なる多極子を持つ理論に新たな制限を与えることが期待される。



# クラスター多極子理論と 反強磁性体の異常ホール効果

鈴木 通人

理化学研究所 創発物質科学研究センター 研究員

## 1. はじめに

J-Physicsの主要テーマの一つである拡張多極子は、物性物理で実空間における電荷・磁化密度の連続的な角度分布を特徴づける量として使われてきた多極子モーメントを、より広い意味での空間におけるより多様な物理オブジェクトの分布を特徴づける量へと拡張する概念であると考えている。本稿で紹介するクラスター多極子理論では、原子の磁化密度の連続的な角度分布を特徴づける磁気多極子モーメントを、結晶中の離散的・周期的な磁気構造を特徴づける量へと拡張している[1]。磁性に由来するマクロ物性の発現の有無は磁気構造の持つ磁気点群対称性に支配されるが、本理論で導入する新しい秩序パラメータによって、これらのマクロ物性を引き起こす磁気的自由度を対称性の議論を超えて決定することができる。著者らの最近の研究では、この理論を使って反強磁性体の異常ホール効果を引き起こす秩序パラメータを同定し、中辻らの実験グループによって報告された $\text{Mn}_3\text{Z}$  (Z: Sn, Ge)の反強磁性相における異常ホール効果[2,3,4]の発現機構を明らかにしている[1]。クラスター多極子と異常ホール効果については、最近、固体物理に解説を書いたので[5]、ここではあまり厳密な事柄にこだわらず、理論の根本にある考えや意義を中心に説明していきたい。

この研究の主要な成果は、大きくは以下の2つに集約される。

- ・結晶の磁気点群対称性の破れを特徴づける秩序パラメータセット（クラスター多極子の磁化）の導入。
- ・反強磁性体の異常ホール伝導度が高次のクラスター多極子による磁化と相関することを示した。

以下では、クラスター多極子を考えるきっかけとなった異常ホール効果を対称性の観点から議論し、クラスター多極子によるマクロな磁化の考えを述べた後、 $\text{Mn}_3\text{Z}$ の異常ホール効果とクラスター多極子の磁化の関係について見ていきたい。

## 2. 対称性の破れと異常ホール効果

強磁性体の異常ホール効果は、磁化に垂直な電場を掛けることで磁化と電場に垂直な方向に電位差が生じる現象である。物質に固有(Intrinsic)な異常ホール伝導度の線形応答関数は、バンド構造のトポロジーと密接な関係を持つベリー曲率によって、

$$\sigma_{\alpha\beta} = -\frac{e^2}{h} \int d\mathbf{k} \sum_n f(\epsilon_n(\mathbf{k}) - \mu) \Omega_{n,\alpha\beta}(\mathbf{k}) \quad (1)$$

と表されることが知られ、異常ホール効果は電子構造のトポロジーの観点からも多くの研究がなされている[6, 7]。異常ホール効果は磁化と相関を持つ現象であると考えられていたが、近年の第一原理計算による研究で反強磁性体における異常ホール効果の発現が予言され[8,9]、最近になって中辻らの実験グループによって $\text{Mn}_3\text{Z}$  (Z: Sn, Ge)のほとんど磁化を持たない反強磁性秩序相で巨大な異常ホール効果が発見されたことで、再び大きな注目を集めている [2,3,4]。

異常ホール効果の発現と磁気対称性の関係については、異常ホール伝導度の線形応答関数の変換性を計算

することで、磁気点群と有限になる異常ホール伝導度の対応が表にまとめられている[10, 11]。このため、与えられた磁気構造のもとで異常ホール効果が有限になるかどうかは、磁気構造の属する磁気点群を調べ、これらの表との対応をみれば判定できることになる。一方で、異常ホール効果をはじめとするマクロ物性の発現の有無は、対象となる系が有している対称性で決まるのではなく、破っている対称性によって決まるので、どのような対称性とその物性の発現を禁止するかを見る方が、物性の発現と対称性の関係をより系統的に理解することができる。論文では、異常ホール伝導度をブリルアンゾーンにおけるベリー曲率の分布という電子構造レベルの微視的な観点から議論し、異常ホール効果の発現と対称性の破れとの関係を明らかにしているので、以下にその概略を述べる[1]。

(1)式から、異常ホール伝導度はベリー曲率（の占有バンドの和）の波数空間における分布によって決まることがわかる。このため、対称性によって異常ホール伝導度の発現が禁止される場合、ベリー曲率の波数空間における分布に、対称性による制約が生じるはずである。ベリー曲率は仮想磁場とも呼ばれ、 $(\Omega_{n,yz}, \Omega_{n,zx}, \Omega_{n,xy}) \equiv (\Omega_n^x, \Omega_n^y, \Omega_n^z)$ とベクトル形式で定義し直すと、波数空間のスピンのように、回転操作や空間反転操作に対して軸性ベクトルの変換性を持ち、また、時間反転に対してはその向きを反転させる。ここで、波数空間におけるスピンの占有バンド和の波数積分がマクロな双極子磁化になり、ベリー曲率の占有バンド和の波数積分が異常ホール伝導度であることを考えると、マクロな双極子磁化が有限になって良い条件と、異常ホール伝導度が有限になって良い条件が対称性の面で同じであることがわかる。つまり、マクロな双極子磁化の発現を禁止する対称性が存在すると、波数空間におけるベリー曲率の分布が波数積分によって打ち消し合うような対称性を持ち、異常ホール効果の発現が禁止される。そして、このような対称性が全て破れた時に生じる、ベリー曲率の波数空間におけるある種の非対称性が異常ホール伝導度となって現れるのである。ここで重要な点は、この異常ホール効果の発現機構では、磁気構造が同じ対称性の破れを引き起こすのであれば、双極子磁化は必ずしも必要ではないということである。4節で議論するように、 $\text{Mn}_3\text{Z}$ の非線形磁気構造は、このような、異常ホール効果の発現に双極子磁化を必要としないケースに当たり、双極子磁化では異常ホール効果を引き起こす対称性の破れを特徴づけられないので、高次のクラスター多極子の磁化という考えを導入するのである。

### 3. クラスター多極子とその磁化

前節で述べたように、マクロな物性は、それらを禁止する特定の対称性の破れによって発現するため、秩序相の物性の発現機構を秩序に伴う対称性の破れを特徴づける量である秩序パラメータに求めるのは自然である。異常ホール効果や電気磁気効果のような磁性体に特有のマクロ物性の発現は、磁気構造の対称性を特徴づける磁気空間群の対称操作から、並進操作を無視して得られる磁気点群によって決まる。このため、これら磁性体のマクロ物性を引き起こす磁気的自由度の特徴づける量としては、磁気秩序による磁気点群対称性の破れを特徴

づける、いわばマクロな秩序パラメータを構築する必要がある。このような秩序パラメータが、以下で説明するクラスター多極子の磁化である。

クラスター多極子自体の発想は単純である。物性で原子サイト周りの磁化密度分布を特徴づける（通常の）磁気多極子は原子サイトの磁気点群対称性の破れを反映する量であり、原子サイトの属する点群の既約表現によって分類することで、破る対称性との対応が明確になる[12]。この磁気多極子による解析を原子集合上の磁気配列に拡張しようとした時、原子集合が点群対称性を持っていれば、磁気配列が破る磁気点群対称性を特徴づける量が作れるであろうことは容易に想像できる。これには、通常の磁気多極子が原子周りの磁化ベクトル $\mathbf{m}(\mathbf{r})$ によって、

$$\mathbf{M}_{lm} \equiv \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} \int d\mathbf{r} \nabla(r^l Y_{lm}^*(\theta, \phi)) \cdot \mathbf{m}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

と定義されるのに対して、クラスター多極子では点対称操作によって結びつく $N_{\text{atom}}$ 個の原子集合(原子クラスター)上の磁気配列 $\{\mathbf{m}_i\}$ を

$$\mathbf{M}_{lm} \equiv \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} \sum_{i=1}^{N_{\text{atom}}} \nabla_i (|\mathbf{R}_i|^l Y_{lm}^*(\theta_i, \phi_i)) \cdot \mathbf{m}_i \quad (4)$$

とすれば良いであろう。この時、(4)式を表1のように原子クラスターの属する点群の既約表現で分類することで、原子クラスター上の磁気配列による磁気点群対称性の破れとの対応が明確になる。しかし、結晶中で等価な原子は点対称操作の他に並進操作によっても結びついているため、結晶の磁気配列を(4)式で計算しても、磁気点群対称性の破れを反映した量にはならない。このため、結晶中の磁気構造が破る磁気点群対称性を反映した量とするために、その並進自由度を如何に扱うかという問題が生じる。

クラスター多極子理論では、結晶中の磁気構造に対してクラスター多極子を定義する土台となる原子クラスターを適切に設定することでこの問題を解決している。大雑把なアイデアとしては、結晶中で点対称操作のみで結びつく磁気ユニットセル中の原子集合を一つの原子クラスターとし、その原子集合と並進操作を介した対称性で結びつく他の原子集合を別のクラスターとして扱う。そして、それぞれの原子クラスター上の磁気配列を特徴づけるクラスター多極子の和を取ること、クラスター間をつなぐ並進操作分の自由度を無視してしまう。この結晶中の原子クラスターの設定は、磁気構造の持つマクロな秩序パラメータを構築する際の肝となる部分であるが、一般的な定義については本論文や固体物理の解説を参照して頂くとして[1, 5]、次節で、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の非線形磁気構造について、クラスター多極子の磁化の計算を本論文とは少し違った観点から説明する。

|          | 既約表現     | クラスター多極子                                                  |
|----------|----------|-----------------------------------------------------------|
| $\ell=1$ | $A_{2g}$ | $J_z \equiv M_{10}$                                       |
| (磁気双極子)  | $E_{1g}$ | $J_x \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(-M_{11} + M_{1-1})$        |
|          |          | $J_y \equiv -\frac{i}{\sqrt{2}}(M_{11} + M_{1-1})$        |
| $\ell=2$ | $A_{1u}$ | $Q_{3z^2-r^2} \equiv M_{20}$                              |
| (磁気四極子)  | $E_{2u}$ | $Q_{x^2-y^2} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(M_{22} + M_{2-2})$ |
|          |          | $Q_{xy} \equiv \frac{i}{\sqrt{2}}(M_{22} - M_{2-2})$      |
|          | $E_{1u}$ | $Q_{zx} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(-M_{21} + M_{2-1})$     |
|          |          | $Q_{yz} \equiv -\frac{i}{\sqrt{2}}(M_{21} + M_{2-1})$     |
| $\ell=3$ | $A_{2g}$ | $T_z^\alpha \equiv M_{30}$                                |
| (磁気八極子)  | $E_{1g}$ | $T_x^\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(-M_{31} + M_{3-1})$ |
|          |          | $T_y^\gamma \equiv -\frac{i}{\sqrt{2}}(M_{31} + M_{3-1})$ |
|          | $E_{2g}$ | $T_{xyz} \equiv \frac{i}{\sqrt{2}}(M_{32} - M_{3-2})$     |
|          |          | $T_z^\beta \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(M_{32} + M_{3-2})$   |
|          | $B_{2g}$ | $T_x^\zeta \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(-M_{33} + M_{3-3})$  |
|          | $B_{1g}$ | $T_y^\zeta \equiv \frac{i}{\sqrt{2}}(M_{33} + M_{3-3})$   |
|          |          |                                                           |
|          |          |                                                           |

表1:  $D_{6h}$ 点群で分類された磁気多極子モーメント[1]

#### 4. Mn<sub>3</sub>Snの磁気構造とクラスター多極子の磁化

図1にMn<sub>3</sub>Snの結晶構造と磁気構造を示す。Mn<sub>3</sub>Snの磁気秩序は秩序ベクトル $\mathbf{q}=\mathbf{0}$ によって特徴づけられるため、磁気ユニットセルと結晶のユニットセルは同じである。Mn<sub>3</sub>Snの結晶構造は非共型空間群 $P6_3/mmc$  ( $D_{6h}^{4h}$ , No. 194)に属するが、この空間群から純粋な点対称操作だけを取り出すと点群 $\bar{3}m1$  ( $D_{3d}^5$ )が得られる。この点対称操作を全て満たす点として、図1の原点1をとると、ユニットセル中でこれらの点対称操作を通して結びつく図2上段のMnクラスター1が得られる。さらに、Mnクラスター1に $c$ 軸回りの2回回転操作 $C_{2z}$ と並進 $\boldsymbol{\tau}=(0,0,c/2)$ による連続操作 $\{C_{2z}|\boldsymbol{\tau}\}$ を施すとMnクラスター2が得られる。

これは、Mn<sub>3</sub>Snの属する空間群 $P6_3/mmc$ が共型空間群 $P\bar{3}m1$ によって $P6_3/mmc=P\bar{3}m1+\{C_{2z}|\boldsymbol{\tau}\}P\bar{3}m1$  ( $\boldsymbol{\tau}=(0,0,c/2)$ )と分解できることに対応しており、空間群 $P6_3/mmc$ の、並進を介する対称操作から得られるその他のMn原子クラスターは全てこの2種類のどちらかになる。これらの原子クラスター上の磁気配置を見ると、全ての磁気モーメントが同じ大きさを持っていれば、各原子の磁気モーメントの総和が0になりランク1のクラスター多極子が0である。また、磁気四極子は反転対称性が破れている場合のみ有限になるが、磁気配置が反転対称性を持っているため、ランク2のクラスター多極子も全て0である。実際、それぞれの原子クラスター上の磁気配列に対して(4)式からクラスター多極子を計算すると、有限になる最低次数のクラスター多極子はランク3のクラスター八極子である。さらに表1から $D_{6h}$ 点群の既約表現で分類されたクラスター多極子を計算すると、Mnクラスター1と2は $D_{6h}$ 点群の対称性より低い $D_{3d}$ 点群に属するため、その磁気配置が $D_{6h}$ 点群の異なる既約表現に属する $T_x^\gamma$ と $T_{xyz}^\gamma$ という2つのクラスター多極子で特徴づけられる。これら2つの原子クラスターの原点を同一視して重ね合わせると、図2下段に示す $D_{6h}$ 点群に属する仮想的な原子クラスターが得られ、この仮想クラスター上の磁気配置のもとで有限になるクラス

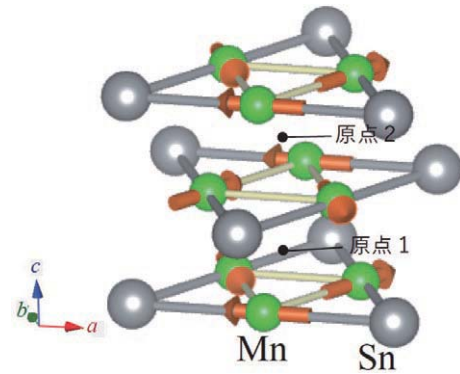


図1：Mn<sub>3</sub>Snの結晶構造と磁気構造

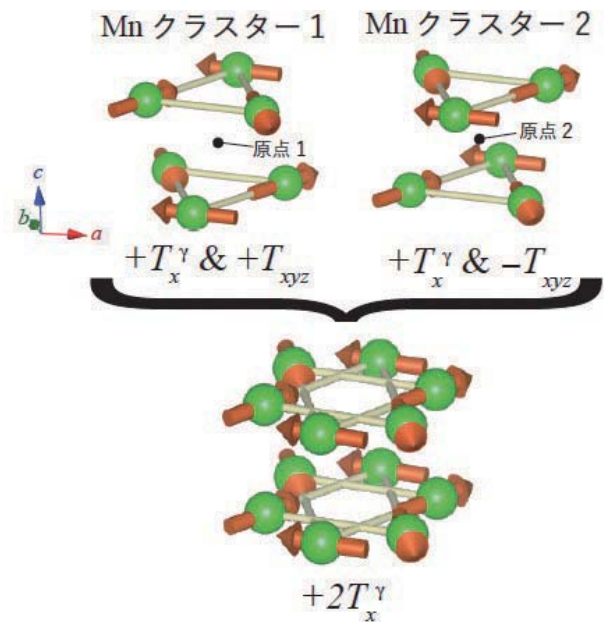


図2：(上段) Mn<sub>3</sub>Snの磁気構造に対する原子クラスターとクラスター多極子。(下段) 2つの原子クラスターの原点を同一視した仮想原子クラスターとそれから求まるクラスター多極子の磁化。

ター八極子 $T_8$ が、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の反強磁性構造の磁化に当たる。マクロな秩序パラメータであるクラスター多極子の磁化を得るためにクラスター1とクラスター2のクラスター多極子を足し合わせるという操作は、この原子クラスターの原点の同一視に当たる。表1から、このクラスター八極子 $T_8$ はクラスター双極子と同じ $E_{1g}$ 表現に属し、 $x$ 軸方向の磁化を表すクラスター双極子 $J_x$ と同じ対称性の破れを引き起こすため、 $x$ 軸方向の強磁性秩序と同じ異常ホール伝導度の反対称成分 $\sigma_{yz}$ を誘起することになる。

## 5. 強磁性体・反強磁性体の異常ホール効果とクラスター多極子の磁化

こうして、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の反強磁性相で異常ホール効果を引き起こす磁気的自由度を特徴づける秩序パラメータとして、クラスター八極子 $T_8$ が得られたが、クラスター多極子を用いると、強磁性体と反強磁性体で発現する異常ホール効果を同じ枠組みで議論することができる。これを見るため、第一原理計算に基づいて、クラスター双極子 $J_z$ (つまり $z$ 軸方向の磁化)をマクロな秩序パラメータとするbcc-Feの強磁性状態とクラスター八極子 $T_8$ をマクロな秩序パラメータとする $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の反強磁性状態に対する異常ホール伝導度の計算を行い(計算の詳細は本論文[1]参照)、それぞれのマクロな磁化との相関をプロットした(図3)。磁化がゼロのときには時間反転対称性があるために異常ホール伝導度は当然ゼロであるが、そこから秩序パラメータが増えるに従って異常ホール伝導度が増加し、あまり大きな秩序パラメータに対しては値が小さくなるという振る舞いが双方に見られる。この異常ホール伝導度の振る舞いの起源を見るために、異常ホール伝導度が大きな値を取る秩序パラメータと、異常ホール伝導度が小さくなっている大きな秩序パラメータを持つ状態とで状態密度を比較してみる。この時、bcc-Feの強磁性状態に対しては、スピンアップとダウンの成分を計算し、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の反強磁性状態に対しては、逆符号の磁気八極子によって特徴づけられる時間反転ペアの磁気配置に対する状態密度成分を見る。異常ホール伝導度が大きな時には、両方のスピン成分がフェルミ準位上にあるが、秩序パラメータが大きくなると片方の成分の寄与が大きくなっていることがわかる。図3ではさらに、ベリー曲

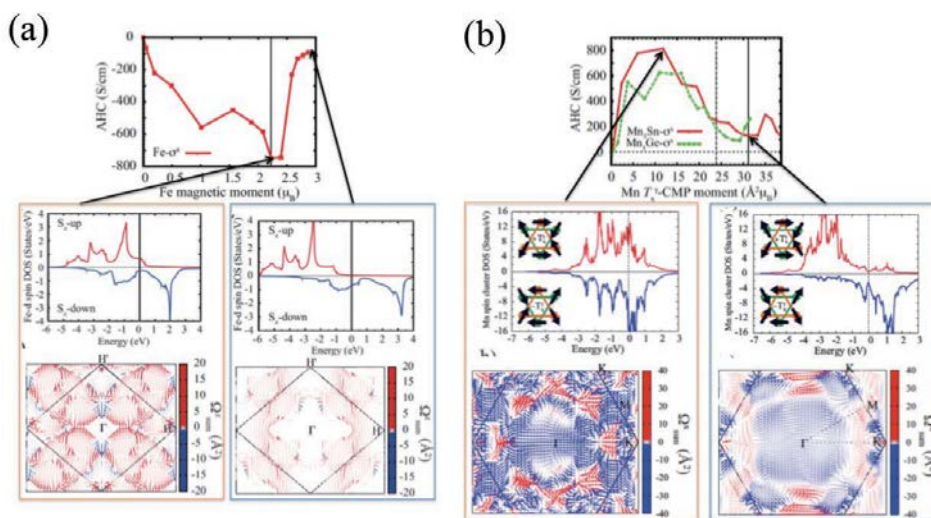


図3：(a)bcc-Feと(b) $\text{Mn}_3\text{Z}$ の異常ホール伝導度(上段)、状態密度のスピン成分(中段)、ベリー曲率のバンド和のブリルアンゾーン((a)は $k_y=0$ 面, (b)は $k_z=0$ 面)における分布(下段)。

率（のバンド和）の波数空間におけるベクトルの分布を示している。ベクトルは、異常ホール伝導度に寄与するベリー曲率の成分によって色付けされており、赤が正の寄与、青が負の寄与を示す。これらの色付けの分布を見ると、秩序パラメータが比較的小さいときも大きいときも、2節の最後で述べたベリー曲率の非対称性によって、一方の符号を持つベリー曲率が大きな領域を占めているが、ベリー曲率の強度そのものに明らかな強弱の差があることがわかり、異常ホール伝導度の大きさの違いがベリー曲率の波数空間における非対称性の度合いの差異でなく、強度の違いによって生じていることがわかる。

## 6. 終わりに

本稿では近年の出版論文をもとにクラスター多極子と異常ホール効果の関係について解説を行った。本研究は、中辻氏からの情報提供をもとに、 $\text{Mn}_3\text{Z}$ の反強磁性相における異常ホール効果の発現機構の解明に向けて研究をスタートし、J-Physicsという土壌の中で個人的に興味を抱いていた拡張多極子という考えを具現化する試みと融合して生まれた研究成果である。クラスター多極子の磁化は磁気構造の磁気点群対称性を反映した秩序パラメータであるため、磁気点群対称性によってその有無が支配される電気磁気効果、ネルンスト効果、マルチフェロイックなどを対象に同様の議論を行うことが可能であり、広い応用範囲を持つと考える。また、磁気構造を定量化する量とも捉えられ、上記の物性現象と相関を示すことから、磁性体の物質設計を機械学習によって行う際の記述子としての応用が期待でき、今後、こういった方向での研究も進めていく予定である。

最後に、本研究は共同研究者の是常隆、越智正之、有田亮太郎各氏らの協力なくしては論文の出版という形にまで至らなかったであろう。また、実験による $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の異常ホール効果の論文出版前から様々な情報を提供して頂いた中辻知氏や、研究過程で何度も有益な議論をして頂いた楠瀬博明氏らに感謝します。

- 
- [1] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, R. Arita **95**, 094406 (2017)
  - [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature (London) **527**, 212 (2015).
  - [3] N. Kiyohara, T. Tomita, and S. Nakatsuji, Phys. Rev. Appl. **5**, 064009 (2016).
  - [4] A. K. Nayak, J. E. Fischer, Y. Sun, B. Yan, J. Karel, A. C. Komarek, C. Shekhar, N. Kumar, W. Schnelle, J. Kübler et al., Sci. Adv. **2**, e1501870 (2016).
  - [5] 鈴木通人、五宝建、播磨尚朝、固体物理、掲載予定
  - [6] M. Onoda and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 19 (2002)
  - [7] T. Jungwirth, Q. Niu, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. Lett. **88**, 207208 (2002)
  - [8] H. Chen, Q. Niu, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. Lett. **112**, 017205 (2014)
  - [9] J. Kübler and C. Felser, Europhys. Lett. **108**, 67001 (2014)
  - [10] W. H. Kleiner, Phys. Rev. **142**, 318 (1966)
  - [11] M. Seemann, D. Ködderitzsch, S. Wimmer, and H. Ebert, Phys. Rev. B **92**, 155138 (2015)
  - [12] H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 064710 (2008)

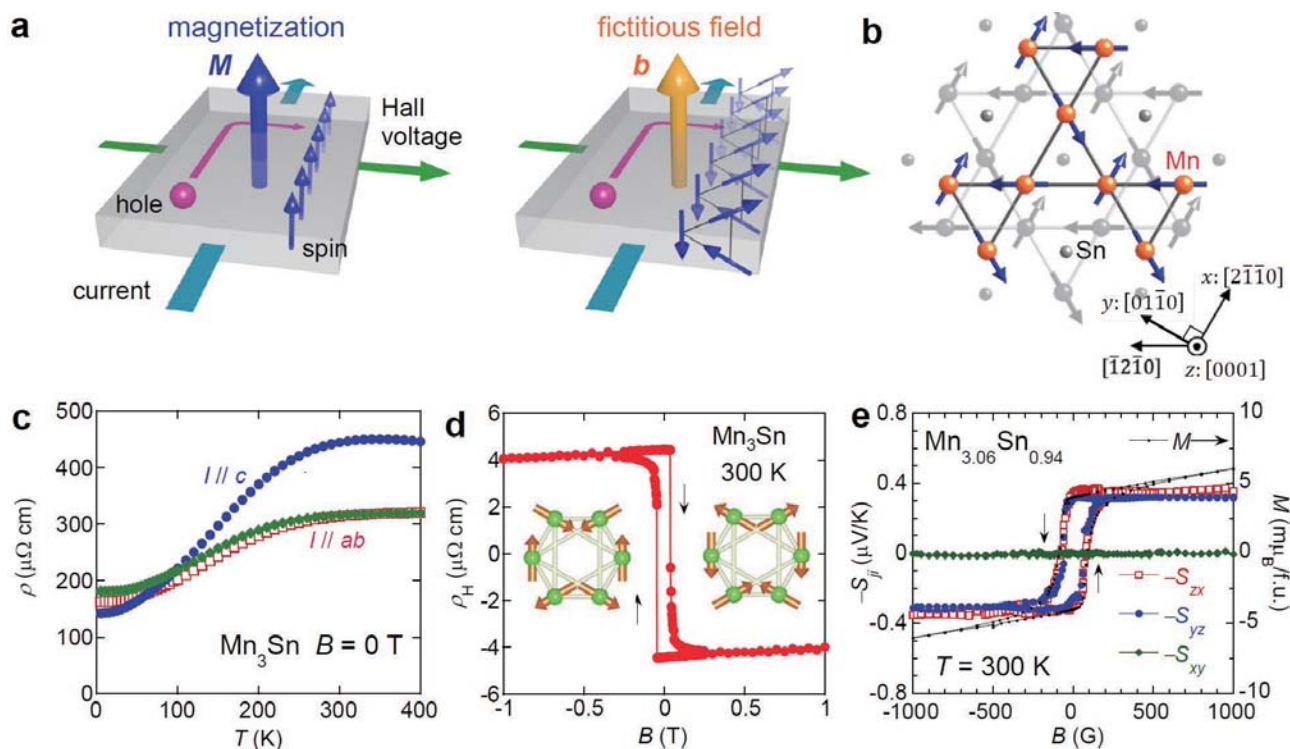


## 新しい多極子伝導現象： 反強磁性体で現れた 室温巨大異常ホール効果

中辻 知

東京大学 物性研究所 新物質科学研究部門 教授

19世紀の後半にEdwin Hallによって発見されたホール効果[1]は、磁場に比例する正常ホール効果と、磁化に比例する異常ホール効果の和、 $\rho_H = R_0 B + R_S M$ として経験的に記述されてきた(図1a)[2]。特に後者の異常ホール効果は、これまで強磁性体においてのみ観測され、一般に磁化を持たない反強磁性体やスピン液体では報告例がなかった。一方、21世紀に入って、異常ホール効果の理論的な理解が進み、その起源が伝導体の持つ運動量空間のトポロジカルな特徴である、ベリー曲率(占有されたバンドのベリー曲率の和、仮想磁場)によるということが明らかになった[3]。この理解に基づくと、確かに強磁性体の場合は磁化に比例して大きなベリー曲率を持つが、必ずしも大きなベリー曲率を有するには磁化が必要ではない。実際、強磁性体以外の様々な磁性体での異常ホール効果の理論的な予言がなされてきた[4-7]。一方、我々はスピン液体において磁化を必要としない異常ホール効果を実験的に発見して以来[8]、反強磁性体での可能性を追究してきた。ここでは、最近、実験的に見出された反強磁性体における異常ホール効果(図1a)について簡単に解説する[9-11]。最近の総説については[12]も参照されたい。



**a**, 強磁性体における自発磁化 $M$ に比例した異常ホール効果(左図)とベリー曲率(仮想磁場 $b$ )に比例した反強磁性体 $Mn_3Sn$ における異常ホール効果(右図)。 **b**,  $Mn_3Sn$ の結晶及び磁気構造。カゴメ格子の各頂点に位置するMnは磁気モーメント(青矢印)を有し、120度構造を示す。Mn原子の作る積層カゴメ格子の2層を取り出して示しており、**d**の挿入図に示す拡張磁気八極子が強的に揃っている様子が分かる。 **c**,  $Mn_3Sn$ の電気抵抗の温度依存性(面間方向:青、面内方向:緑、赤)。 **d**,  $Mn_3Sn$ における室温でのホール抵抗率の磁場依存性。挿入図:磁場の符号反転とともに積層三角形による八面体上の6つのMnスピンの作るクラスター(拡張)磁気八極子も符合を変える。 **e**, ネルンスト係数 $S_{ji}$ (右)と面内磁化 $M$ (左)の室温での磁場依存性。ネルンスト係数 $S_{ji}$ においては異方性も示す。

図1 bに示すのは、今回取り上げる反強磁性体 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ の結晶及び磁気構造である。この系はMnが面内でカゴメ格子を有しており、それがc軸方向に積層した結晶構造を持つ。図1 cに示すように、電気抵抗の温度依存性は室温付近で飽和し、特にc軸方向の成分は高温で昇温とともに減少する。これは非常に強い磁気的な非弾性散乱の存在を意味し、平均自由行程は室温で格子間隔程度とbad metalの様相を示す。この強い電子間相互作用を反映してMnは $3 \mu_B/\text{Mn}$ と大きな磁気モーメントを有し、カゴメ格子に基づく幾何学的フラストレーションのために、430 K以下において120度構造を形成する[13,14]。さらに、この系において昔から非常に微弱な弱強磁性と、その起源が（局在した）軌道モーメントに基づく可能性が知られていた[15]。我々はこの点に着目し、この弱強磁性が（系全体に遍歴した）軌道モーメントの可能性があること、それゆえに、異常ホール効果を発現する可能性を考えて実験を行った。また、この弱強磁性は外部磁場とカップルして、反強磁性の副格子モーメントを反転することも知られており、この点もホール効果の検出に非常に重要となることが予想された[13,14]。実際に単結晶を作製してホール効果を測定した結果が図1 dである。興味深いことに、室温で明瞭にホール効果の符合反転が見える。また、その反転磁場は100 G程度であり、それまでに中性子実験で分かっていた反強磁性の副格子の反転に対応している。強磁性体において一般に知られている異常ホール係数 $R_s$ の標準的な値を用いて、この系の弱強磁性によるモーメント $3 \text{ m} \mu_B/\text{Mn}$ （図1 e）から単純に期待される異常ホール効果の大きさを見積もると、 $0.01 \mu\Omega\text{cm}$ 程度となる。これは図1 dで見られる実験値 $4 \mu\Omega\text{cm}$ に比べて、二けた小さい。すなわち、ゼロ磁場で現れている大きな異常ホール効果は、弱強磁性では説明できない。また、我々の別の測定から正常ホール係数は $0.0003 \text{ cm}^3/\text{C}$ 程度であることがわかっており[9]、これから単純に測定値を再現するには少なくとも100 T以上の外部磁場が必要となる。これは、運動量空間に存在するベリー曲率の大きさの評価を与える。

果たして、このような大きなベリー曲率はどのように現れるのであろうか？そもそも、異常ホール効果は、系が「巨視的に」時間反転対称性を破ることが必要条件である。もちろん、通常のcollinearな反強磁性体においても各磁性原子の磁気モーメントは時間反転対称性を局所的に破っている。しかし、この時間反転に加えて結晶の持つ対称性である並進や回転を同時に行う操作に対して不変である。すなわち、collinearな反強磁性体は巨視的な時間反転対称性を有する。大変興味深いことに、最近の鈴木、是常、越智、有田の理論によると磁気多極子の強的な秩序を持つ反強磁性体では、巨視的な時間反転対称性を破るため、その運動量空間にベリー曲率が有限に残りうることが示された（図1 d挿入図）[16]。この理論はこれまでの反強磁性体における異常ホール効果の主流であったスカラーカイラリティの理論[3-6]も内包する一般性を有する。実際、この多極子の理論によると、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ は各ユニットセル内に磁気八極子とみなせる6つの最近接スピンの作る磁気クラスターを有し、それが系全体で強的に配列した $Q=0$ の秩序を形成しているとみなすことができる（図1 d挿入図及び図1c）。一方、この拡張磁気八極子の強的な秩序は運動量空間における有限のベリー曲率の存在を意味するが、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$ ではそれが

確かに大きくなりうるということが理論的にわかってきた[16]。重要な点は、この系は磁気多極子伝導系と呼べる以下の特徴を持つ。すなわち、フェルミエネルギー  $E_F$  における9割以上の状態はこの拡張磁気八極子を作る Mn の 3d 電子からなること、また、 $E_F$  近傍において通常の磁気双極子でなく、この磁気八極子の正負の状態間に Exchange Splitting が発現していることである。その詳細は本ニュースレターに掲載の鈴木氏らによる解説を参照されたい。

さらに、我々が実験を進めている最中に、この物質のフェルミ面近傍でベリー曲率の源とみなせるワイル点が存在し、この系は低励起としてワイル粒子を持つことが理論的に予言された[17,18]。もしワイル点が  $E_F$  近傍に存在するのであれば、その近傍で大きなベリー曲率を持つことになる。さらに、この  $E_F$  近傍のベリー曲率に比例する量が異常ネルンスト係数である。この系において、異常ネルンスト効果を実際に測定してみると磁化から経験的に期待される値に比べて数ケタ大きな値 ( $S_{ji} \sim 0.3 \mu\text{V/K}$ ) を持つことを見出した (図 1 e)。これは反強磁性体における異常ネルンスト効果の初めての観測例となる[19]。これら  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の異常ホール効果や異常ネルンスト効果の符合の変化は、図 1 d の挿入図に示すように、磁場により磁気八極子を符合反転させることによって生じる運動量空間のワイル点の分布の変化によると考えられる (図 1 d,e)。また、強的な磁気八極子の秩序は、対称性の観点からこの反強磁性体に磁気光学効果[20]やスピホール効果[21]が現れることを意味している。実際、筆者らはこれらの観測に成功しており[20,21]、特に磁気カー効果が反強磁性体で初めて現れることを見出し、それを用いて磁気八極子ドメインの可視化にも成功している[20]。また、スピホール効果においては、従来知られているものとは質的に異なる界面現象が現れることが明らかになってきている[21]。さらに今後は、このような静的な測定のみならず、磁気八極子のダイナミクスを制御することで、電流やスピン流の誘起など様々な新しい多極子伝導現象が興味深いテーマとなる。

最近になって、スピントロニクス分野において反強磁性体が大きな脚光を浴びてきている[22-24]。一般に反強磁性体には様々な多極子伝導体が含まれる。我々の見出した室温での磁気八極子伝導現象は、他の多極子伝導系との接合界面においても様々な新しい効果をもたらすことが期待される。磁気多極子を有した反強磁性体における磁気多極子ドメイン壁の電流駆動の可能性も非常に興味深く、さまざまなスピントロニクスへの展開があるであろう。また、上記の巨大な異常ネルンスト効果はエネルギーハーベスティングの観点からも重要である。これらについては、今後機会があればご紹介したい。このように多極子伝導系に現れる新しい量子現象はその新規性はもとより他の分野へのさまざまな波及効果を持つため、今後もその開発はますます重要になると期待される。

以上の研究は肥後友也、富田崇弘、M. Ikhlas、有田亮太郎、鈴木通人、是常隆、物性研究所大谷グループらとの共同研究である。また、本研究の遂行にあたっては、本新学術領域研究の領域代表の播磨先生、事務担当の網塚先生を初め多くの領域メンバーの方々に、様々な点でご相談やご支援をいただいている。ここに深く感謝いたします。

- 
- 1) E. H. Hall: Proc. Phys. Soc. Lond. 4, 325–342 (1880).
  - 2) C. L. Chien, and C. R. Westgate: The Hall Effect and its Applications (Plenum, 1980).
  - 3) N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, A. H. MacDonald, and N. P. Ong: Rev. Mod. Phys. 82, 1539–1592 (2010).
  - 4) R. Shindou, and N. Nagaosa: Phys. Rev. Lett. 87, 116801 (2001).
  - 5) G. Metalidis, and P. Bruno: Phys. Rev. B 74, 045327 (2006).
  - 6) I. Martin, and C. D. Batista: Phys. Rev. Lett. 101, 156402 (2008).
  - 7) H. Chen, Q. Niu, and A. H. MacDonald: Phys. Rev. Lett. 112, 017205 (2014).
  - 8) Y. Machida, S. Nakatsuji, S. Onoda, T. Tayama, and T. Sakakibara: Nature 463, 210–213 (2010).
  - 9) S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo: Nature 527, 212–215 (2015).
  - 10) N. Kiyohara, T. Tomita, and S. Nakatsuji: Phys. Rev. Applied 5, 064009 (2016).
  - 11) A. K. Nayak, et al.: Sci. Adv. 2, e1501870 (2016).
  - 12) 中辻 知 応用物理 第86巻 No. 4, P. 310–314 (2017).
  - 13) T. Nagamiya, S. Tomiyoshi, and Y. Yamaguchi: Solid State Commun. 42, 385–388 (1982).
  - 14) S. Tomiyoshi, and Y. Yamaguchi: J. Phys. Soc. Jpn. 51, 2478–2486 (1982).
  - 15) L. M. Sandratskii and J. Kubler, Phys. Rev. Lett. 76, 4963 (1996).
  - 16) M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, and R. Arita: Phys. Rev. B 95, 094406 (2017).
  - 17) J. Kübler, and C. Felser: EPL 108, 67001 (2014).
  - 18) H. Yang, et al.: New J. Phys. 19, 015008 (2017).
  - 19) M. Ikhlas, T. Tomita, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, D. Nishino-Hamane, R. Arita, Y. Otani, and S. Nakatsuji, Nature Phys. Doi:10.1038/NPHYS4181 (2017).
  - 20) T. Higo et al., preprint (2017).
  - 21) M. Kimata et al., preprint (2017).
  - 22) T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley, and J. Wunderlich: Nat. Nanotech. 5, 231–241 (2016).
  - 23) V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, T. Moriyama, T. Ono, Y. Tserkovnyak: arXiv. 1606.04284.
  - 24) P. Wadley, et al.: Science 351, 587–590 (2016).



## 中尾 裕則

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 准教授

# もっと気軽に使ってみよう放射光

外部の研究施設での実験を検討する場合、今の研究に対して施設で得られると期待される成果と利用する上での手間を天秤にかけて決めているかと思います。しかしながら、放射光の利用に対する障壁は、昔と比べてかなり低くなっています。これは、放射光施設が国内に何ヶ所もある状況となり、施設側が新規ユーザーに入ってもらって“どんどん”利用してもらえるように努力するようになったためです。結果として、以下にも説明しますように、案外簡単に、しかも申請してから実際に実験するまで短期間で実施できる制度が、整備されてきております。また、放射光を使って期待する信号が見えるか見えないか、それは実際に実験しないとわかりません。その意味でも、是非一度利用するのが良いと思います。その結果、当初の期待とは違う大発見があるかもしれません。ここで紹介する高エネルギー加速器研究機構の放射光研究施設[Photon Factory (PF)](図1)は、放射光を利用するための専用の放射光リングとして、1982年以降利用されております。ご存知のように、90年代後半にはSPring-8が建設され、硬X線領域ではSPring-8でないと観ることが難しい研究もありますが、



図1: 35歳の放射光施設の外観。右手奥が、筑波山(標高 887m)。実験の合間に登山は、如何でしょうか。天気良ければ東京スカイツリーも見えるようです。

大抵の研究はPFでも可能です。また軟X線領域の光の強度は、PFの方が強く、PFならではの特徴を持った研究が展開されております。

次に利用方法です。一般には年2回、5月と11月に「G型課題」と呼ばれる申請ができます。審査の結果、採択されると2年間有効で、年3回あるビーム利用期間ごとに、各ビームラインにビームタイムを申請することで利用が可能です。SPring-8の場合に、採択時にビームタイムまで決まっているのとは、対照的です。これに対して、初めて利用される方や、新規の研究をいち早くできるように整備されてきたのが、「P型課題」です。P型課題は、随時受付ておりますので、思い立ったら何時でも申請が可能です。ただし、上述のように1年に3期間あるビームタイムの配分時期は決まっており、申請時期によっては実験のチャンスを逸するかもしれません。必ず、利用したいビームライン担当の方と事前に相談ください。以下に、PFで申請可能な課題が説明されています。

<http://www2.kek.jp/imss/pf/use/proposal/categories.html>

ちなみに、放射光施設はコンビニと同じく24時間営業です。ベテランユーザーは、夜寝られるようなスケジュールで実験を実施されますが、初心者は次の日の朝に会うとウサギの目になっていることがあります。実験計画は、事前に綿密に立てましょう。

最後に、PFでどんな実験ができるかを紹介します。とはいえ、放射光を利用した研究は多岐に渡ります。ここでは、著者の関係する実験装置群を紹介します。なお、全般的にどんなビームラインがあるのかは、

<http://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/bl/>  
を参照ください。

新規物質を合成すると、その結晶構造を知りたいですし、物性測定で異常を見つけると、その異常に対応した構造変化があるのかわからないのかは、必ず押さえておきたい情報です。放射光を利用して簡便に構造決定可能なのが、BL-8A, 8Bです。(図2) 粉末試料でも、単結晶試料でも、大きなイメージングプレート(IP)を利用した測定装置で、広い逆格子空間を一挙に測定することが可能で、電子密度まで求める精密構造解析が行われています。また、吹き付け装置で低温から高温での測定が可能です。当ビームラインでは、1-2日のビームタイムが一般的です。

多極子は、J-Physicsの中の重要な電子自由度ですが、放射光を用いた多極子の観測には、共鳴X線散乱の手法が良く用いられます[1]。この共鳴X線散

乱は、BL-4C, 3Aの4軸回折計(図3)を用いて実験が行われており、ビームタイムは最低3日は必要な実験が多いです。

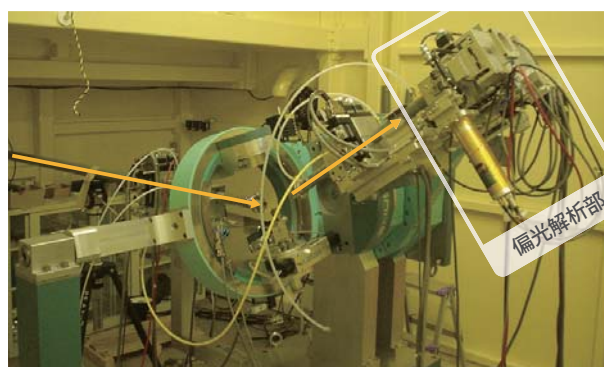


図3：4軸回折計。試料からの散乱X線を、偏光解析装置を利用して、 $\sigma, \pi$ 散乱成分に分解している様子。

またBL-3Aには、超伝導磁石搭載冷凍機を搭載した2軸回折計(図4)があり、低温は約2 Kまで、磁場は7.5Tまでの実験が実施可能です。この装置を用

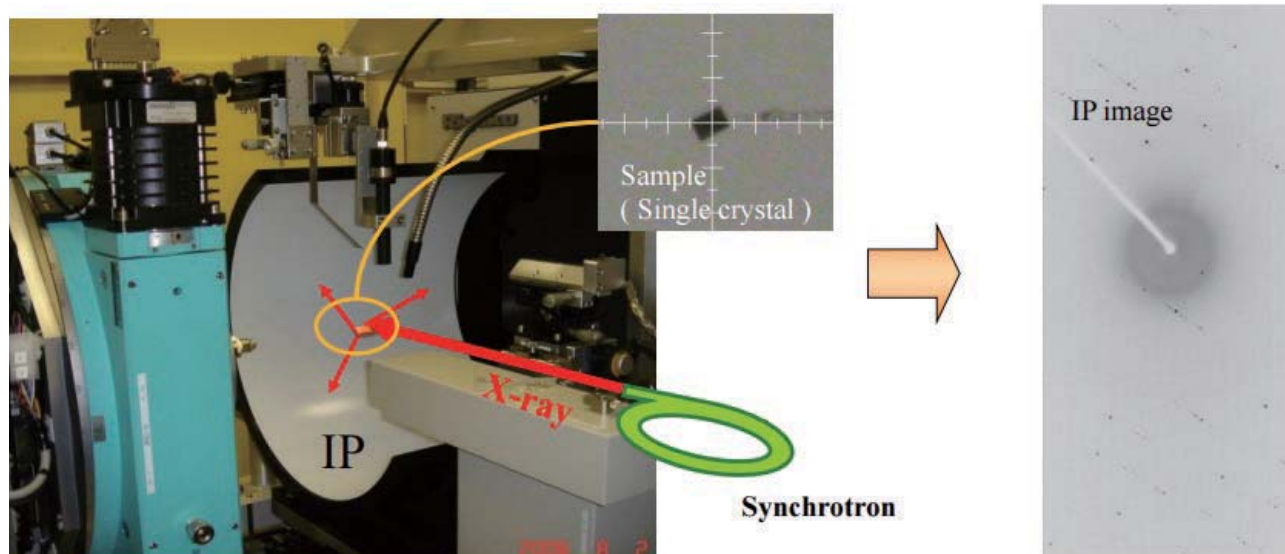


図2: (左) BL-8の大型IP回折計。放射光を試料に照射して、白い色のIPで測定。(右) 単結晶からの回折パターンの例。

[1] T. Matsumura et al, J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 021007.

いた多極子の研究例としては、CeB<sub>6</sub>の磁場誘起磁気八極子の観測[2]が良く知られています。

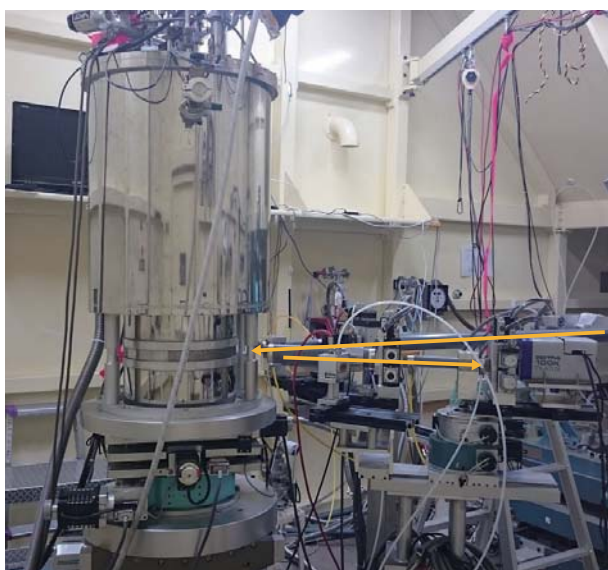


図4：超伝導磁石搭載冷凍機と2軸回折計。この装置の磁場印加方向は鉛直方向。また、この実験では入射X線と出射X線の位置が近く、高角側で格子変化を2次元X線検出器が利用して観測していたものと推測されます。

さて上述のビームラインでは、硬X線(5-18 keV)を利用した共鳴X線散乱実験が、実施されております。共鳴X線散乱では、原子の吸収端のエネルギーを利用し、遷移に関わる電子状態を調べます。例えば希土類元素では、 $L_{2,3}$ 吸収端が $2p \rightarrow 5d$ 遷移に対応し、 $5d$ 電子状態を捉えるのに適しています。(ちなみに、 $L_{2,3}$ 吸収端で四極子遷移を利用すると八極子、十六極子といった高次多極子を検出することができます。)一方、 $M_{4,5}$ 吸収端は、 $3d \rightarrow 4f$ 遷移であり、直接 $4f$ 電子状態を検出することができ、磁気散乱も非常に強く観測されます。同様の事が $3d$ 遷移金属系でも

言え、 $L_{2,3}$ 吸収端の $2p \rightarrow 3d$ 遷移において、非常に強い共鳴磁気信号が観測されます[3]。また、硬X線・軟X線の広いエネルギーを利用することで、試料を構成している元素ごとの共鳴X線散乱が行えるようになり、混成した軌道状態の新しい観測法としても期待されます。このような背景もあり、著者らは軟X線領域での共鳴X線散乱の装置開発、それらを用いた研究を進めております。

また関連して、ウラン化合物の粉末X線回折を $M_{4,5}$ 吸収端で測定したところ、中性子磁気散乱のような強い磁気信号が観測されました。J-Physicsではウラン化合物の研究も多いものの、国内での中性子散乱実験ができない状況です。磁気構造が調べたくなったときには、ぜひ思い出してください。

さて、「ちょっと放射光、使ってみよう。」と思っていただけでしょうか。もし、気になったら、連絡頂ければと思います。

連絡先：hironori.nakao@kek.jp

なお、このニュースレターが皆様のお手元に届くころは、今年のPFのビームタイムは配分済みです。1月－3月の期間のビームタイムが、最速で利用可能なものとなります。是非、検討頂ければと思います。

[2] T. Matsumura et al., Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 017203.

[3] Y. Yamasaki et al., J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 023704; Y. Yamasaki et al., Phys. Rev. B **92** (2015) 220421.



## 放射光施設(PF)のP型課題を利用して

井原 慶彦

北海道大学大学院 理学研究院 講師

学会で大型放射光施設を利用した美しい実験結果を目の当たりにすると「ああ、こんなデータをとってみたいなあ」とか、「こんな手法があるんだったら、自分の試料についても測定をしてみたいなあ」と夢見ることがあります。しかし、実際に思い描いた実験を実現しようとする、どんな手続きが必要なのか？誰に相談したらよいのか？または、どんな実験技術を身に付けておかなければならないのか？などといった疑問がわいてきて、つい二の足を踏んでしまいます。特にこれまで放射光施設を利用する機会に出会わなかった研究者にとっては、放射光施設での実験は敷居の高いものです。高エネルギー加速器研究機構ではこのような放射光実験初心者のためにP型課題という“敷居の低い”利用制度が準備されています。

今回、私はこのP型課題に申請し実際にPhoton Factory (PF)での実験を行いました。放射光実験に関してはまさに素人で、見学以外で放射光施設に足を踏み入れたことはありませんでしたし、X線を使った実験も学部3年生向けの実験授業でシリコン基板のラウエ写真を撮ったことがある程度でした。その程度の予備知識であるにも関わらず、4 Kまでの構造解析をやりたい!と思い立ち、J-Physicsの領域全体会議の懇親会で中尾先生と同じテーブルでビールを飲んだことをきっかけにPFでの構造解析実験を実現するまでのプロセスをご紹介します。

具体的な手続きの進み方を右図にまとめました。申請をしたタイミングがPFのビームタイム(10月-12月)決定の直前だったため、申請書を提出してからたった5カ月弱で実験を実現することができました。また、技術的なサポート体制も非常に整っており、

どのような物質に対して、どのような測定を希望しているかを相談すると、どのビームラインをどれくらい使うとよいのか、どのような準備が必要なのか、などを丁寧に教えていただけます。実際の実験時にも試料やクライオスタットのセッティングを手伝ってもらったり、回折計の基本的な操作方法を教えてもらったりと、手厚いサポートを受けることができたため、放射光初心者の私でも無事目的の実験を行うことができました。

今になって振り返ってみると、申請前に感じていた放射光実験への敷居は放射光施設ではなく自らの気持ちの中にあっただように思います。この小さなステップは、やりたい実験を相談することで簡単に取り去ってもらえました。放射光実験への欲望が心の片隅にあるときには、まず相談をすることで、新たな道が開けるのではないのでしょうか。

末筆ですが、今回P型課題への申請を勧めてくださった中尾先生、また丁寧なサポートをしてくださった佐賀山先生、熊井先生、そして懇親会で相談のきっかけをあたえてくれたJ-Physicsの関係者の方々に感謝いたします。

- 5月27日 ..... 中尾先生に相談  
(J-Physics全体会議懇親会)
- 7月中旬 ..... ビームライン担当(佐賀山先生)と  
実験の詳細について打ち合わせ
- 7月21日 ..... P型課題申請書を提出
- 8月中旬 ..... ビームタイム決定  
課題採択通知
- 9月下旬 ..... 旅費申請
- 12月2-6日 ..... PFにて実験



## 中性子散乱を使ってみませんか？

佐藤 卓

東北大学 多元物質科学研究所 教授

数ある大型施設利用型の研究手段の中でも中性子散乱は敷居が高いと考えられているのではないのでしょうか。中性子散乱実験が可能な施設数はかなり少なく、国内に限って言えばほぼJ-PARC一択となっています。海外に目を向けても主要国に1,2施設程度となっており、それほど選択肢は多くありません。また、大きな試料が必要だと考えられているところも敷居を高くしている要因だと思われます。加えて、最近の施設はどこもかなり厳密な課題審査制度を導入しており、なかなか課題が通らないというのも要因でしょう。2,3度続けて落ちちゃうと出す気なくなっちゃいますよね。

しかしながら、中性子散乱では未だ他の手法ではなかなか得ることができない貴重な情報が得られることも確かです。特に磁性・強相関系研究においては中性子磁気弾性散乱および非弾性磁気散乱がもたらす磁気構造および磁気励起スペクトルに関する情報は極めて有用です。皆様も「バルク測定だと反強磁性だけど長周期構造かな？」とか、「結晶場分裂、だいたいわかるんだけど、やっぱり直接観測して確認したいな」とか、気軽に中性子が使えたらやってみたいということは多々あるのではと想像します。

そこで、本稿では、これまで中性子をあまり使用されてこなかった主に若い人を対象に、どのような装置を選べば良いか、またビームタイムを（比較的無理なく）ゲットする方法等、出来るだけ実践的な内容を記したいと思います。ただ、あくまで個人的な経験に基づいたものですので、以下の情報が（色々な意味で）役に立たなかった場合はどうぞご容赦ください。

### 中性子散乱施設の選び方

中性子散乱法には大きく分けて原子炉から得られる連続中性子を用いる方法と加速器駆動型中性子源から得られるパルス中性子を用いる方法があります。前者は古くから使用されてきた方法で、多くの場合入射中性子を単色化（エネルギー選別）し試料に当てます。そして試料から出てきた散乱中性子の方向、エネルギーを分析（選別）することで散乱関数 $S(Q, \hbar\omega)$ に関する情報を得ます。この方法は、例えば多くの実験室に備え付けられているであろう、粉末X線回折計と（散乱線のエネルギー分析を行わないことを除けば）同じ仕組みであり、大変理解しやすい方法です。その意味で、入門にはうってつけなのですが、如何せん $(Q, \hbar\omega)$ 空間を1点ずつ測定するため効率が悪く、実験に時間がかかってしまいます。しかも、現在国内では研究用原子炉が停止しており、この手の実験を行うには海外施設を使用するしかありません。

一方、パルス中性子法では中性子の飛行時間でエネルギー情報を得ます。従って、回折計等の $Q$ 情報だけが必要な測定に対してはエネルギー選別がまったく必要ありませんし、非弾性散乱でも入射、散乱中性子いずれかのエネルギー情報を中性子の飛行時間から得ることができますので、エネルギー選別は一度だけです。この結果、中性子束を有効活用できます。また、散乱中性子エネルギー選別の必要がない場合、検出器配置の自由度が格段に大きくなり大面積検出器を設置することが可能になりますが、この結果一度に多くの $Q$ 空間の測定が可能で、さらに国内には世界最大規模のパルス中性子施設

|               | 国内                                                                      | 海外                                                                              |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|               | パルス中性子                                                                  | 原子炉                                                                             |
| 構造解析（粉末）      | iMateria(J-PARC) 産業利用中心<br>SHRPD(J-PARC) 超高分解能<br>NOVA(J-PARC) 本来は全散乱装置 | ECHIDNA(ANSTO) 定番装置<br>BT-1(NIST) 定番装置<br>HB-2A(ORNL) 定番装置                      |
| 構造解析（単結晶）     | SENJU(J-PARC) ToF回折計（極端環境）                                              | HB-3A(ORNL) 4軸回折計（カメラ）                                                          |
| 磁気散漫散乱        |                                                                         | D7(ILL) 偏極解析可能<br>DNS(FRM-II) 偏極解析可能                                            |
| 非弾性(極低エネルギー)  | DNA(J-PARC) 国内唯一の背面反射装置                                                 | HFBS(NIST) 1 $\mu$ eV 分解能<br>EMU(ANSTO) 1 $\mu$ eV 分解能                          |
| 非弾性(低エネルギー)   | AMATERAS(J-PARC) ディスクチョッパ型                                              | MACS(NIST) 超大強度<br>CTAX(ORNL) 三軸分光器                                             |
| 非弾性(中・高エネルギー) | HRC(J-PARC) 高分解能<br>4SEASONS(J-PARC) 大強度                                | HB-1(ORNL) 三軸分光器<br>HB-3(ORNL) 三軸分光器<br>BT-7(NIST) 三軸分光器<br>TAIPAN(ANSTO) 三軸分光器 |
|               |                                                                         | Wish(ISIS) 単結晶、偏極も<br>POWGEN(ORNL) 磁気散乱は苦手かも                                    |
|               |                                                                         | IRIS(ISIS) 背面反射(PG)<br>BASIS(ORNL) 背面反射(Si)                                     |
|               |                                                                         | LET(ISIS) ディスクチョッパ型<br>CNCS(ORNL) ディスクチョッパ型                                     |
|               |                                                                         | MERLIN(ISIS) チョッパ型<br>ARCS(ORNL) チョッパ型<br>SEQUOIA(ORNL) チョッパ型                   |

Table 1: 個人的な観点からリストアップした中性子分光器群

J-PARCがありますので、その意味でも比較的使用しやすいと言えるでしょう。難点は装置が大型化ブラックボックス化しておりなかなか簡単な理解が難しいこと、さらには、データが巨大で解析に大きな計算機が必要なことでしょうか。この辺りは将来の改善を望むところでもあります。

### 中性子散乱装置の選び方

中性子を用いた実験にはエンジン内部の透視からCP対称性の破れまで多岐に渡りますが、J-Physicsの皆様のご興味の対象は磁気構造・磁気励起スペクトルでしょう（たぶん）。試料はおそらく単結晶か粉末（多結晶）でしょう（たぶん）。このような境界条件で装置を（かなり個人的な趣味に基づいて）リストアップしてみます。Table 1をご覧ください。こうやって並べて見るとかなりの数がありますね。詳しくはそれぞれの施設のホームページ（文献[1]）をご参照ください。目的別に複数の装置がリストされていますし、世の中にはもっとたくさん

同種の装置があります。この中から一つを選ぶとなるとそれだけで目が回りそうです。しかし、基本的には得られる情報は同じですので、私のオススメは付き合いやすい装置責任者がいる装置を（線源の種類にかかわらず）選ぶことです。

### ビームタイムの取り方

近年世界のほとんどの施設は年2回の課題公募をしているようです。J-PARCを例にとると、2017年度は2016年10月17日～11月7日が前期(2017A期)、2017年5月17日～6月7日が後期(2017B期)の課題申請時期でした。申請書は英文で記入する必要がありますが、論文ではありませんので、出来るだけわかりやすく簡潔に書けば英文で問題になることは少ないと思われます。また、万が一不採択の場合に海外の施設にすぐに申請できる点も英文申請書の良いところですね。課題申請書には大きく分けて 1)サイエンスの重要性と解決したい点; 2)中性子散乱実験内容; 3)ビームタイム等の見積が必要です。1)は問題

ないと思いますが、初めて申請される方は 2), 3) は悩まれるのではないのでしょうか? その場合はぜひ申請希望装置の責任者に相談するのが良いでしょう。装置責任者にとってはユーザーが良い実験を行い良い論文が出ることが何よりの成果ですので、実験内容やビームタイム見積りに関して親切に教えてくださいことと思います。特に希釈冷凍機やマグネット等、大型の試料周辺機器(試料環境と呼ばれます)が必要な場合は、事前によく相談されるのが良いでしょう。装置ごとに色々な制限があります。また、申請書にはサンプルができているか(できていなければいつ頃できるか)の確認欄があると思います。これは、ビームタイムが配分されたにもかかわらずサンプルができず実験が流れてしまうという不幸なケースを排除するためのものです。もしすでにサンプルができていれば、サンプルの写真を申請書に載せるのは思いの外効果的です。ところで、なぜか日本のレフリーは減点法的に採点することが多く、結構細かいところをみて点数を落としてきたりします。(そんな細かいこと突っ込まれても、とか、それは常識でしょう、とか思うところで減点されたり...) その点、海外の施設は基本的にポジティブに受け取ろうとしてくれることが多いような気がします。もちろん、単に統計的なばらつきかもしれません。ともかく、日本で落ちても海外で通ることはよくありますし、逆もまたよくあります。このあたり(判断すべき結果がすでに提示されている論文レフリーとは異なり、未来を予想し判断しなければならないという)実験課題レフリー制度の限界を感じますね。私がここで言えることは2,3度落ちてもめげずに出そう!ということです。

## 実験の実際

さて、首尾よくビームタイムが取れたら実験です。ここで大事なことは、中性子散乱が放射線実験であるということです。所属大学で放射線作業従事者登録はお済みですか?お済みでなければお早めに。J-PARCでは従事者登録証明を提出しないと実験ができません。加えて、施設での安全教育等もあります。多くは事前にweb上で受講可能ですので、早めに受講されるのが良いでしょう。試料や(もしあれば)持ち込み実験装置の安全審査も必要です。これらも装置責任者と連絡を取りながら早めに終わらせるのが良いでしょう。また、J-PARCでは東海村にKEKの宿泊施設があり、格安で宿泊できます。ただ、研究会等と重なると部屋が取れないこともあります。こちらもお早い目にご予約されるのが良いでしょう。これらの作業のほとんどはweb上で可能で、とても簡単です。

海外施設での実験もほとんどJ-PARCと変わりはありませんが、飛行機のチケット、ビザ等に注意が必要でしょうか。ゴールデンウィークや夏休み期間など、日本のハイシーズンに実験がアサインされた場合、とんでもない値段のチケットしかないことがありますので。

準備(特に装置責任者との打ち合わせ)がしっかりできていれば、あとは試料をもって施設にゴーです。国内の場合この作業はそれほど難しくありませんが、海外ですと、近年の安全意識の高まりから飛行機に色々を持ち込むのが大変です。しかしながら、今の所、中性子用の単結晶試料の機内持ち込みで問題になったことはほとんどありませんので、ご安心を。むしろ、接着剤等可燃物は機内持ち込みどころ

か預け入れ荷物にも入れることができませんので、現地で試料をアラインしようというときは装置責任者に接着剤等を準備してもらわなければなりません。実験が始まれば、日頃蓄えた知識と体力を総動員して実験を成功に導きましょう。最近は多くの装置制御が自動化されていますので、一昔前のようにビームタイムが始まったら一睡も出来ないということはありませんが、それでも実験中は何が起ころかわかりませんので、体調を整えて実験に望まれるのが良いでしょう。

#### 実験が終わって

実験が終わったら論文だ!と、思いきや、中性子の場合はデータ解析が結構厄介です。原子炉中性子源の装置で得られたデータは(特殊な場合を除き)比較的素直に解析が可能です。パルス中性子分光器では現在イベントデータと呼ばれる、中性子検出イベントの時間と位置を全てのイベントに対して記録する方法が主流で、このためデータ量が観測中性子数に比例することになり極めて大きくなります。このイベントデータを手元で解析することは(中性子のプロでもない限り)容易ではありませんので、中性子実験施設に滞在中にぜひいわゆるヒストグラムデータに変換して持ち帰ることをお勧めします。ヒストグラム化さえ終わってれば、例えば NIST の DAVE [2] 等で可視化することが容易ですので、簡単に解析が可能です。なお、英国 ISIS や米国 ORNL/SNS

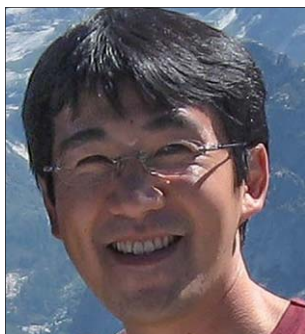
等のパルス中性子施設では、イベントデータの解析のため大型の計算機をユーザーに開放しています。従って日本に戻ってからイベントデータを再解析しようと思った場合それは可能です。J-PARC ではそのようなサービスはまだないのですが、これは是非実現して欲しいところですね。

#### 最後に

徒然なるままに中性子の利用法を書いてみましたが、こうやってまとめて見ると思いの外複雑で我ながらびっくりしています。やはり中性子の敷居は高いのかもしれない、と思いつつも、若い方々に少しでも中性子を試そうと思って頂けることを切に祈っております。その際、この駄文が何かのお役に立つならばこれ以上の喜びはありません。ご意見・ご質問等なんでもご連絡ください。

連絡先: taku@tohoku.ac.jp

[1] 各施設のホームページは J-PARC (<http://j-parc.jp>), ORNL (<http://www.ornl.gov>), NIST (<http://www.ncnr.nist.gov>), ISIS (<http://www.isis.stfc.ac.uk>), ILL (<http://www.ill.eu>), FRM-II (<http://www.frm2.tum.de>), ANSTO (<http://www.ansto.gov.au>) です。  
[2] ヒストグラム化されたデータファイル (spe形式) を読む一つの方法は NIST の DAVE を使用することです。  
(<https://www.ncnr.nist.gov/dave/>)



## SPring-8で実験してみませんか？

藤森 伸一

日本原子力研究開発機構 主任研究員

### 1. はじめに

J-Physicsニュースレター編集部より、「若い研究者や学生の方が、SPring-8での実験を検討する際に参考になる記事を書いてほしい」という依頼を受けて、実は大変困ってしまいました。というのも、確かに私は長年SPring-8で実験をしています、基本的にJAEA専用ビームラインを利用して、課題申請方法も含めた利用形態は、ユーザーが実験をする共用ビームラインとはかなり異なっています。しかも私の主な実験手法は軟X線領域のスペクトロスコピーですので、硬X線領域の研究が中心であるSPring-8では少数派に属しています。ましてや、極めて多種多様な実験が行われているSPring-8を網羅的に紹介するということは、完全に私の能力を超えています。一度は断りかけたのですが、「ゆるい記事でも構わないので」という編集担当M氏の強い押しに負けて、SPring-8での実験や余談（むしろこちらが中心になってしまいました）について少々書いてみたいと思います。

### 2. SPring-8について

SPring-8は世界最大規模を誇る放射光施設ですが、特に蓄積電子のエネルギーが8 GeVと非常に高く、また光源としてアンジュレータなどの挿入光源が標準的に用いられており、高輝度放射光を利用することが大きな特徴です。高い蓄積電子エネルギーを反映して、基本的には硬X線領域（およそ4 keV以上）の放射光利用に向いている施設ですが、軟X線用に特化したアンジュレータによって、軟X線領域（1 keV以下）でも高輝度軟X線を利用することができます。（ちなみに現在軟X線領域に特化した先端的な放射光施設が世界中で競争的に建設されており、軟X線

領域におけるSPring-8のアドバンテージは失われつつあります。東北放射光計画がこの領域をカバーしようとしています、もしこの計画が進まなければ、一時は世界のトップを走っていた日本はこの分野で完全に取り残されることでしょう。）SPring-8にはさらに赤外線やガンマ線を利用できるビームラインもあり、光エネルギー領域は大変幅広くなっています。もちろん実験手法も分光から回折、イメージングなど多岐に渡っており、この場で網羅的にレビューするのは私の乏しい能力ではとても不可能です。その代わりに、SPring-8のビームライン一覧[1]および利用事例のホームページ[2]を紹介いたしますので、是非ご活用ください。ちょっと古い資料もありますが、実験の計画を立てる上で参考になる情報が見つかると思います。また、放射光学会というコミュニティがあり、毎年1月に年会を開催しています。放射光を用いた最新の研究成果が報告されるので、どのビームラインでどんな実験が行われているか一目瞭然です。関係者も一堂に会しますので、同時にネゴや人脈作りもできてしまいます。特に学生の方の参加費は大変リーズナブルに設定されていますので、一度参加されることをお勧めいたします。（ちなみに懇親会は毎回大変豪勢なのですが、いつも文科省の役人や政治家のスピーチが入ります。常に最新の大型施設を必要とするこのコミュニティならではのようです。）SPring-8のビームラインは課題申請を通じて利用できる共用ビームラインと、各研究機関が占有する専用ビームラインの二種類がありますが、ほとんどの専用ビームラインも外部課題を受け入れる仕組みをそれぞれ独自に持っています。我々JAEAの専用ビー

ムラインBL22XU（硬X線領域）とBL23SU（軟X線領域）の場合は、ナノテクノロジープラットフォーム[3]を通じて外部課題を受け付けております。思い付きでも構いませんので、アイデアをお持ちの方は私に是非相談してください。ちなみにビームラインの後ろについているXU, SUなどの略称はビームラインの光源の特性を表しています。Xは硬X線領域、Sは軟X線領域を意味しており、Uはアンジュレータ(undulator)が光源であることを意味しています。その他、白色光を発生させるbending magnetを表すB、さらにガンマ線領域に及ぶ高エネルギー放射光を発生させるwigglerを示すWなどもあります。

SPring-8は兵庫県の播磨地方に位置しており、アクセスはJR相生駅または姫路駅からとなります。相生駅からバスに乗ると延々と田舎道を進むので、初めて訪れた時はだんだん心細い気持ちになりますが、急坂を登ってトンネルを過ぎると突然視界が開けて、近代的な「播磨科学公園都市」が現れます。バスはさらに公園都市内をあちらこちらに走り回り、どこに連れて行かれるのかと不安になってきた頃ようやくSPring-8に到着します。標高約300 mの高原に位置しており見晴らしが良く、市街地と比べて涼しく空気も澄んでいるので、特に都市部から来られた方はこの環境を気に入るようです。宿泊設備も大変充実しており、皆さんが出張時に良く使う某ビジネスホテルよりは広くて快適です。広大な所内移動用に自転車も貸し出してくれます。食堂は大学生協レベルですが、朝昼晩、休日でも常に営業しているのは日本の施設ならではのです。売店も併設されており、食品・雑貨だけでなく理研やSPring-8のノベル

ティも買うことができますが、営業時間は限られているので注意が必要です。最寄りコンビニは公園都市の麓にあるため、車でしかアクセスできません。（何も考えずに自転車ですべて下ってしまい、帰りに地獄を見るユーザーが時々いるようです。）

### 3. 課題申請の実際

皆さんもご存知の通り、SPring-8を利用するには課題申請書を提出して審査を受ける必要があります。一般課題は、例年12月上旬と6月上旬の年二回申請を受け付けています。スケジュール等詳しくは、User informationのページ[4]をご覧ください。また、博士後期課程の方を対象とした「大学院生提案型課題」というカテゴリーもあり、審査基準は一般課題と同じですが、採択されると旅費や消耗品費が支援されます。課題申請をするときは、ビームライン担当者など、対象のビームライン関係者に相談するところから始めることが基本になると思います。もちろんメール等で問い合わせる方法もありますが、J-Physicsの方々に関係ありそうなビームラインの担当者は、物理学会や様々な研究会に参加していることが多いと思いますので、その機会をとらえて気軽に相談してみることをお勧めします。特に、放射光学会年会に参加するのは非常に有効だと思います。基本的にビームライン担当者は新規ユーザーの獲得に積極的で、（私が知っている範囲では）そんなに気難しい方はいませんので怖がらなくても大丈夫です。ビームライン担当者と実験の実現可能性や技術的問題点、またどの程度のビームタイムや人員が必要であるかなどを検討したうえで準備すると、課題申請書により説得力が出るのではないかと思います。ちなみに、博士前期

課程の方々に対しては、夏の学校や秋の学校といった機会を設けているのですが、実習担当者との交流から具体的な課題申請に繋がる場合もありますので、是非一度参加されることをお勧めします。

#### 4. SPring-8における光電子分光実験

私の専門は光電子分光ですので、SPring-8における光電子分光実験について少し詳しくお話ししたいと思います。光電子分光は少し敷居が高い実験のように見えますが、最近は装置も使いやすいように整備されており、試料を合成した方が自分で測定に来ることも多くなりました。この状況が進むと、私のような光電子分光屋は将来食いつぱぐれるのではないかと不安になるのですが、自分で育成した試料をお持ちの方は、ぜひ一度ご自身で実験をしてみることをお勧めします。実際に実験してみると、光電子データを理解する上での「勘所」が身に付くと思います。特に $h\nu=7-10\text{ keV}$ 程度の入射光を利用した硬X線光電子分光はバルク敏感で表面処理が不要な場合もあり、データ解析方法やその解釈についても比較的確立しているのでお勧めです。価電子帯スペクトルからは状態密度、内殻スペクトルの化学シフトからは価数の情報などを得ることができます。共用ビームラインとしてはBL47XUなどで行うことができます。

私が行っているような軟X線領域の光電子分光は、硬X線光電子分光と比べるとサンプル取り扱いを含む実験技術やデータ取り扱いに若干の煩雑さを伴いますが、それも慣れの問題の範囲内だと思います。軟X線領域では、例えば共鳴光電子分光の利用が可能で、価電子帯における遷移金属 $d$ 軌道や希土類 $f$ 軌道の寄与を選択的に導出することが可能です。また、

角度分解光電子分光を行ってバンド構造やフェルミ面を得ることも可能ですが、少し専門的になりますので、メンバーに一人ぐらいは経験者が入っていた方が良いでしょう。光電子分光屋にとってsample growerは神様のような存在ですので、少し声をかけるだけでも喜んで協力すると思います。共用ビームラインとしてはBL25SUなどがあります。

#### 5. Beamtime @ SPring-8

晴れて課題が採択されると、今度は実際の実験となります。SPring-8は昼夜構わず稼働しているので、ユーザーはデータのために24時間（以上）戦い続けなければなりません。勢いだけで数日間の実験をしようとすると途中で燃料切れを起こしますので、時には息抜きをしつつ、また途中で何か楽しみを入れながら進めましょう。以下、長年の試行錯誤から編み出した、私なりのビームタイム中のリフレッシュ方法や過ごし方を少しご紹介したいと思います。

##### ○リング棟内をウォーキング

深夜にリング棟をゆっくり歩いて一周すると、目も覚めて気持ちも整理されてきます。また、意外な人とばったり出会って話がはずんだりもします。外周通路を歩くと、鹿が草を食んでいたりと、ウサギが跳ね回っているのが見えたりして、すさんだ心も癒されます。（ただし最近近隣でクマが目撃されたので、外に出る際は気を付けましょう。）一周回って帰ってきたころには、煮詰まってしまった実験に対しても、新たな気持ちで取り組むことができるでしょう。

##### ○night shift対策

night shiftになった場合に一番困るのが、「眠らなければならないのに眠れない」という問題です。

こんな時は、寝る前に湯船につかりましょう。湯船にゆっくりつかると、気持ちも落ち着いて自然と眠くなります。宿舎のお風呂でもいいのですが、SPring-8周辺にはゆったりと足を伸ばせる公共浴場がいくつかあります。近場では ①道の駅新宮 ②国民宿舎新宮荘 ③佐用の湯 ④あかねの湯、といったところがあります。場所によっては畳敷きの広い休憩場所が併設されていますので、そこでのんびりと昼寝をしてみうのもお勧めです。

#### ○外食に出かける

過酷な実験が続くときの楽しみはやはり外食です。学生の多い筑波などと比べると、SPring-8の外食事情はちょっと厳しくなりますが、車さえあれば実はいろいろ良いお店があります。本当は教えたくない隠れ家的な場所もあるのですが、以下、J-Physicsの皆様のために私の手の内を大公開致します。

#### ①千本本陣（新宮）

自然に囲まれた築300年の立派な建物で、蕎麦のコース料理をいただくことができます。外国人のゲストが来たときは必ず連れて行きます。SPring-8とは時間の流れが全く違います。一度は行く価値あります。

#### ②手打ち蕎麦処森下（相生）

相生方面から登ってくる途中にある蕎麦のお店です。こちらもコース料理があり、味も見た目もなかなか良いです。内装も凝っていて小ざれいなお店なので、外国人受けも良いです。

#### ③壺枚乃絵（たつの）

自家焙煎のコーヒーが感動的においしい趣のある喫茶店です。ここのコーヒー目当てに遠方からも客が来るそうです。コーヒー豆も量り売りしてくれますので、少し意外なSPring-8土産としていかがでしょうか。

#### ④そうめんの里（たつの）

言わずと知れた揖保乃糸の総本山です。ちょっと遠いのが難点ですが、売店も大変充実しています。近くにある和菓子の「大黒屋」は地域の名店ですので、ついでに立ち寄るのがおすすめです。

#### ⑤将（たつの）

大変おいしいうどんのお店です。ちょっと遠いですが、私はこのうどんが一番好きです。実験中長い待ち時間がある時はぜひ。

#### ⑥豊源（上郡）

台湾料理（中華料理）のお店です。ランチメニューが豊富で安い上に量も多く、お得感があります。学生さんなど若い方を連れて行くのに最適です。

その他、近隣の佐用町には名物ホルモンうどんの有名店がたくさんありますし、牡蠣の時期は日生の牡蠣お好み焼きを食べに行くという贅沢も可能です。いかがでしょうか。最後食べ物で釣ろうとしている感がありますが、これだけでもSPring-8に来て実験を試みたくなったのではないのでしょうか？ 以上取り留めなく書いてしまいましたが、SPring-8を使う何かのきっかけになれば幸いです。

---

[1] SPring-8 ビームライン一覧 [http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/whats\\_sp8/facilities/bl/list/](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/facilities/bl/list/)  
[2] SPring-8利用事例ページ <http://www.spring8.or.jp/ja/science/academic/>  
[3] ナノプラットフォームページ [http://www.kansai.qst.go.jp/nano/nano\\_01.html](http://www.kansai.qst.go.jp/nano/nano_01.html)  
[4] SPring-8 User information <https://user.spring8.or.jp/>



## UPt<sub>3</sub>における非共型超伝導

柳瀬 陽一

京都大学 理学研究科 准教授

異方的超伝導あるいは重い電子系の研究に関わったことがある方でUPt<sub>3</sub>という超伝導体を知らない方は少ないだろう。多種多彩なエキゾチック超伝導を示す重い電子系物質群の中でも特に多くの興味を引きつけてきた超伝導体である。その発見は1984年と古く、その数年後に発見された多重超伝導相(図1)は、現在でも希少な多成分秩序変数を持つ超伝導体であることを明確に示している。その秩序変数の解明に向けて長年の努力が行われてきた結果、現在ではE<sub>2u</sub>表現の2成分秩序変数が実験結果とよく整合することが知られている[1]。他に、スピン軌道相互作用が弱いことを仮定する混合表現の理論[2]があるが、私達が相図を計算する限りでは実験結果と合わないようである[3]。

UPt<sub>3</sub>の発見当初から様々な研究が行われたため、当時の技術で出来る研究は大抵すでに行われている。すなわち、新たに研究を始めるためには何らかの技術革新が必要である。実験研究としては、低温磁場回転測定の結果が注目を集めたことが記憶に新しい[4,5]。近年の理論研究では、(1)結晶の対称性を精密に考慮した理論、(2)トポロジカル超伝導の理論、に大きな進展があったので、それらを生かしてUPt<sub>3</sub>の理論研究を行った。前者に関して、私達は「局所的な空間反転対称性がない超伝導」の研究を2010年から行ってきた[6]。その特徴は副格子依存型の反対称スピン軌道相互作用を通じて現れるが、非共型結晶ではそれが特に強く働くことが分かっている[7]。そして、UPt<sub>3</sub>の結晶構造をよく見てみると、局所的な空間反転対称性がなく非共型な空間群P6<sub>3</sub>mmc (No.194)に属している。また、奇パリティ超伝導はトポロジカルに非自明

な性質を示すことが珍しくない。ここまで来るとUPt<sub>3</sub>の研究を行うことはごく自然な流れのようにも思われる。結果として明らかとなったUPt<sub>3</sub>の知られざる素性を以下に列挙する。

### 1. 非共型対称性に守られた超伝導ギャップノード[8]

現在様々な分野において非共型結晶の研究が行われているが、超伝導におけるその始まりはNormanの研究(1995年)に遡る[9]。「奇パリティ超伝導体には安定なラインノードは存在しない」というBlountの定理があるが、その例外として非共型対称性に守られたラインノードが存在しうることを示したものである。一方、E<sub>2u</sub>表現の理論として知られるSaulsの理論[10]で示されたラインノードはNormanの理論に該当しない。すなわち、「存在しないはずのラインノードがあり存在するはずのラインノードがない理論」がこの分野では長く用いられてきたのである。この深刻な問題は、結晶の対称性を精密に考慮した2副格子モデルにより容易に解決した。まず、Saulsの理論に現れるラインノードは超伝導秩序変数のp-f混成によって消失する。そして空間反転対称性の局所的な破れにより生じる副格子依存型反対称スピン軌道相互作用によりNorman型のラインノードが現れる。先駆者であるMicklitz-Normanもこのように簡単なモデルで示されるとは考えていなかったようである。

### 2. B相の非共型ワイル超伝導[8]

ワイル超伝導とは、トポロジカル電荷(ワイル電荷)によって保護されたポイントノードを持つ超伝導体のことを指す。3次元のカイラル超伝導体や強磁性超伝導体はその典型例であり、それぞれURu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>や

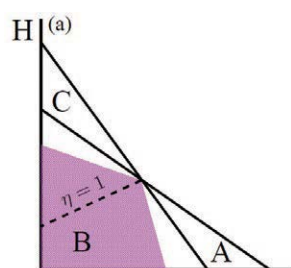


図1：UPt3の多重超伝導相図（[8]より引用）

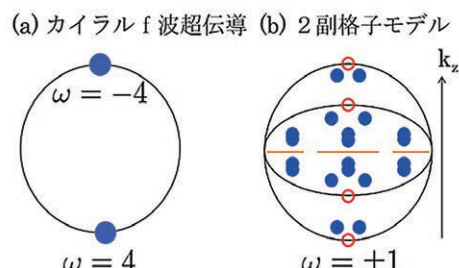


図2：波数空間におけるワイル点の分布

UCoGe, URhGeなどが候補物質である。ワイル半金属の超伝導における対応物であり、トポロジカル表面状態であるマヨラナークやトポロジカル応答である熱ホール効果も注目を集めている。

当初からUPt<sub>3</sub>のB相がワイル超伝導の候補であることも知られていたが、Saulsの理論に従うと図2(a)のようにフェルミ面の北極と南極にのみワイル電荷4のワイル点が見れる。しかし、上述の2副格子モデルによると図2(b)のようにワイル電荷1のワイル点が多く見れる。Saulsの理論に出てくる「非現実的なラインノード」が無数のポイントノードに化けた結果である。多バンド構造を考慮すると最大で104個のワイル点が見れる。そのとき状態密度を計算すると、実はラインノード的な振る舞いをする。ポイントノードも100個あるときと2個のときでは振る舞いが定性的に異なるのである。これまで実験的に観測されたラインノード的振る舞いは多数のワイル点に由来すると思われる。

また、Sauls流のカイラル f 波超伝導ではB相全体がワイル超伝導相になるが、実際にはB相の中でトポロジカル相転移が起こる。図1のピンク色の領域

がワイル超伝導相であり、その相境界と点線上( $\eta=1$ )でトポロジカル相転移が起こる。すなわちB相には4種類のトポロジカルに異なる超伝導相が含まれている。

### 3. A相のメビウス型トポロジカル超伝導[11]

近年、トポロジカル絶縁体／超伝導体の分類学が活況を呈しているが、なかでも最近の話題は非共型結晶対称性に守られたトポロジカル相である。ユニットセルの長さより小さい並進操作を含むグライド操作や螺旋操作の固有値は、ブリルアンゾーンの周期ではなくその2倍、3倍などの長い周期を持つ。そのため波数空間にメビウスのような構造が現れ、新奇なトポロジカル相が可能になるのである。そのようなメビウス型トポロジカル絶縁体の候補としてKHgSbとCeNiSnが提案されており、KHgSbに対しては実験的証拠も得られている。一方、メビウス型トポロジカル超伝導に関してはこれまで理論的提案がなかった。今回、塩崎謙氏の協力を得て、UPt<sub>3</sub>のA相がまさにメビウス型トポロジカル超伝導となっていることを示すことが出来た。今後の実験的検証が期待される。

[1] R. Joynt and L. Taillefer, Rev. Mod. Phys. 74, 235 (2002).  
 [2] K. Machida, T. Nishira, and T. Ohmi, J. Phys. Soc. Jpn. 68, 3364 (1999).  
 [3] S. Takamatsu and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 063706 (2013).  
 [4] Y. Machida et al., Phys. Rev. Lett. 108, 157002 (2012).  
 [5] S. Kittaka et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 024707 (2013).

[6] 吉田智大, 丸山大輔, 柳瀬陽一, 固体物理 49, 9-24 (2014).  
 [7] S. Sumita and Y. Yanase, Phys. Rev. B 93, 224507 (2016).  
 [8] Y. Yanase, Phys. Rev. B 94, 174502 (2016).  
 [9] M. R. Norman, Phys. Rev. B 52, 15093 (1995).  
 [10] J. A. Sauls, Adv. Phys. 43, 113 (1994).  
 [11] Y. Yanase and K. Shiozaki, Phys. Rev. B 95, 224514 (2017).



## 非クラマース系 $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ の 異方的な磁場温度相図

井澤 公一

東京工業大学 理学院 教授

|                                      |                                                                           |                                                                             |                                                                        |                                                                              |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>吉田 太地</b><br>東京工業大学<br>理学院 (当時)   | <b>町田 洋</b><br>東京工業大学<br>理学院                                              | <b>島田 祐樹</b><br>広島大学大学院<br>先端物質科学研究科                                        | <b>長澤 直裕</b><br>広島大学大学院<br>先端物質科学研究科                                   | <b>鬼丸 孝博</b><br>広島大学大学院<br>先端物質科学研究科                                         |
| <b>高畠 敏郎</b><br>広島大学大学院<br>先端物質科学研究科 | <b>Adrien Gourgout</b><br>Universite Grenoble Alpes,<br>CEA, INAC-PHELIQS | <b>Alexandre Pourret</b><br>Universite Grenoble Alpes,<br>CEA, INAC-PHELIQS | <b>Georg Knebel</b><br>Universite Grenoble Alpes,<br>CEA, INAC-PHELIQS | <b>Jean-Pascal Brison</b><br>Universite Grenoble<br>Alpes, CEA, INAC-PHELIQS |

非クラマース系Pr化合物 $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ の低温輸送係数の実験から、温度・磁場相図とともに、これまで実験的には明らかではなかった非クラマース二重項のもつ四極子自由度と特異な遍歴電子状態との関係に関する重要な知見を得ることができたのでここに紹介したいと思います。

強相関電子系では、電子のもつ電荷、スピン、軌道といった内部自由度に由来した多種多様な物理現象が見られます。特に希土類化合物やアクチノイド化合物などの $f$ 電子を含む元素からなる物質群( $f$ 電子系)において、重い電子、磁気秩序、非フェルミ液体(NFL)的挙動、非従来型超伝導などの興味深い現象が数多く見出されてきました。これらの現象の多くは、 $f$ 電子のスピン自由度にその起源を持ち、伝導電子との混成( $c$ - $f$ 混成)により電子が遍歴性を獲得してゆく中で発現していると考えられます。実際、それらは $c$ - $f$ 混成強度を横軸、温度を縦軸にとったドニアック相図と呼ばれる普遍的な相図に基づいた議論により統一的に理解されてきました。

一方、電子には電荷、スピン以外に、軌道の自由度が存在します。 $f$ 電子系では、スピン軌道相互作用が強いため、軌道自由度はスピンと合わせて多極子として表現され整理されますが、この多極子(軌道)自由度が本質的に活性な場合に、スピン自由度の場

合同様に $c$ - $f$ 混成によってどのような電子状態が実現するのか、そしてそれらはどのように理解すれば良いか、またドニアック描像のような普遍的な描像で理解可能か、など、非常に興味深い問題が考えられます。しかし、それらは、これまでほとんど明らかにされてはいませんでした。

最近、我々のグループは、電気四極子の自由度が活性なPr化合物 $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$ の極低温高磁場環境下における輸送係数の測定を行い、その結果をもとに磁場・温度相図を明らかにしました[1]。図1に示すように相図内の最低温付近で、これまで報告されている反強四極子秩序(AFQ)状態[2]に加え、新奇的重い電子(HF)状態、磁場誘起結晶場一重項(FIS)状態が存在すること、さらにそれらの高温側にNFL状態が広い磁場領域に広がっていることを明らかにしました。また、このNFL状態が、磁気量子臨界点近傍に見られるものとは異なり、2チャンネルアンダーソン格子モデル[3]でよく記述されることを見出しました。これらの特徴は、関連物質である $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$ においても見られる[4]ことから、四極子自由度が活性な系に共通した特徴であると考えられます。

さらに我々は、得られた相図、およびそこに見られる4つの特異な電子状態の示す輸送現象が、磁場方向に対する異方性も含めて $f$ 電子の結晶場基底状態

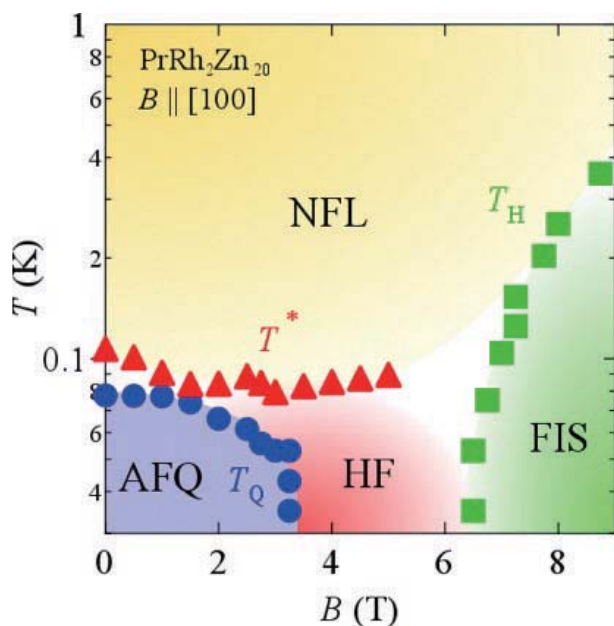


図1：本研究で明らかとなった磁場・温度相図。広い磁場範囲で非フェルミ液体(NFL)的挙動が現れたのち、低温で反強四極子秩序(AFQ)状態、新奇重い電子(HF)状態、磁場誘起結晶場一重項(FIS)状態が実現する。 $T_Q$ はAFQ転移温度、 $T^*$ および $T_H$ はそれぞれNFL状態からHF状態およびFIS状態へのクロスオーバー温度。

である非クラマース二重項の磁場によるエネルギー分裂幅 $\delta(B)$ により決まっていることを初めて突き止めました。これは、それぞれの電子状態に見られる「遍歴的」性質が、その対極にある「局在的」性質により決まっていることを明確に示しており、この系のもつ遍歴性と局在性の二面性が新奇物性の発現に重要な役割を果たしていることがわかります。また、このことは、この系における電子状態が $\delta(B)$ により統一的に整理できる可能性を示唆しています。そこで我々は、四極子自由度により創出される新奇物性

の統一的理解には、スピン自由度の場合に議論されていたドニアック描像ではなく、別の枠組みが必要であること、そしてそのための概念的な相図を提案しました。これにより、四極子由来の新奇物性の発見や磁気双極子で成功をおさめてきたドニアック描像のような、多極子の物理における普遍的描像の確立など、今後の四極子自由度により創出される電子物性研究の展開を期待します。

- [1] T. Yoshida, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 044711 (2017).
- [2] T. Onimaru, *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 184426 (2012).
- [3] A. Tsuruta and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 114714 (2015).
- [4] T. Onimaru, *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 075134 (2016).



## 超強磁場中性子回折により明らかになった $\text{URu}_2\text{Si}_2$ の磁場誘起非整合磁気秩序

野尻 浩之

東北大学 金属材料研究所 教授

|                                   |                                   |                                    |                                            |                                          |                                           |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>木原 工</b><br>東北大学<br>金属材料研究所 助教 | <b>青木 大</b><br>東北大学<br>金属材料研究所 教授 | <b>桑原 慶太郎</b><br>茨城大学<br>理工学研究科 教授 | <b>W. Knafo</b><br>LNCMI-Toulouse,<br>CNRS | <b>F. Duc</b><br>LNCMI-Toulouse,<br>CNRS | <b>F. Bourdarot</b><br>INAC, CEA-Grenoble |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|

$\text{URu}_2\text{Si}_2$ において遍歴・局在の2重性ならびに多極子自由度が絡みあって現れる隠れた秩序相(HO)や磁場誘起反強磁性秩序相(FIAO)について長年研究が積み重ねられて来た。最近ではHOについて高次の多極子秩序が議論され多くの進展があるが、40 T近い強磁場が必用なFIAOの研究は実験手段の制約が大きく、秩序変数の直接観測という決定打が欠けていた。しかしながら、ここ数年の強磁場中性子回折技術の進展によりFIAOの中性子回折に成功し、秩序相の磁気波数を決定する事が可能になった。本稿ではこれまでの研究でわかったFIAOの振る舞いについて簡単に紹介する。

磁性体において様々な波数の磁気相関が競合するとき、それらを反映した複雑な構造の磁気励起を示す。温度、磁場、圧力によって、フェルミ面、格子、電子相関を変調すると、異なるモード間のバランスが変わり、あるモードが凝縮して磁気秩序が生じる。 $\text{URu}_2\text{Si}_2$ においては、整合反強磁性に関わる波数 $Q_c=(0, 0, 1)$ の他に非整合な $Q_{ic}=(0.6, 0, 0)$ のモードがあり、HO相での $Q_{ic}$ の温度変化、高圧下で $Q_c$ の安定化と $Q_{ic}$ の不安定化による $Q_c=(1, 0, 0)$ の反強磁性秩序の出現、圧力と正反対の磁場依存性の3点が確立している[1]。 $Q_c$ が多極子秩序を反映するあるいは付随したものとの立場を取れば、これらは、HOとFIAOの競合を示すものと考えられる。なお、 $(0, 0, 1)$ と $(1, 0, 0)$ の励起エネルギーは同じである。

強磁場中性子回折実験はまずRh 4%置換試料に

ついて行われ、 $Q_a=(2/3, 0, 0)$ の変調がc面内に存在する事が確定した。この波数は一様磁化が飽和の1/3をもつ事とも合致しており、磁化から得た $0.6\mu_B/\text{U}$ という磁気モーメントの値と中性子回折の強度も矛盾がなく、強磁場相が大きな磁気モーメントを持つことが確定した[2]。この結果を踏まえて、磁気励起の結果を見直すと、17 Tまでの中性子非弾性散乱の磁場依存性の外挿において $Q_c$ と $Q_{ic}$ 間の準位交差が35 T付近において生じる点があらためて注目される。これを考慮するとRh 4%のFIAOは、 $Q_{ic}$ が磁場中で凝縮して格子への整合効果によってイジング的なup-up-down型の磁気秩序を示すものと解釈出来る。もう一点重要なことは、磁気秩序の波数がa軸方向の変調であり、c軸方向の変調ではない点であり、これは、この系の対称性を考える上で非常に重要な実験事実である。なお、この実験では、c面内における $Q_a=(2/3, 0, 0)$ と $Q_b=(0, 2/3, 0)$ の非等価性は観測されていない。

一方、非ドープの $\text{URu}_2\text{Si}_2$ のFIAOでは2つの相II, IIIの存在が磁化測定等で確立しており、それぞれの相の一様磁化は、Van-Vleck項を差し引くと飽和の0.35ならびに0.61となる[3]。この他に電気抵抗でV相が提案されているが、磁化等との対応はない。この系の強磁場中性子回折実験を行ったところ $Q_a=(0.6, 0, 0)$ の非整合磁気秩序を示す事が明らかになった[4]。この0.6という波数が非整合なのかRh 4%と同様に整合なのかを調べるために、 $(0.2, 0, 0)$ から $(0.8, 0, 0)$ までの主要な波数を調べたところ、磁気ピークによる強

度が見られるのは $Q_a=(0.6, 0, 0)$ のみであった。もし、FIAO相がイジング系でよく見られる矩形波的な整合長周期構造であれば、そのフーリエ成分が寄与する他の磁気波数にも相応の磁気回折強度が期待される。また、 $(1, 0, 1)$ のような強磁性成分を反映する波数において同様に磁気回折強度が現れなければならない。これらの考察から、見出されたFIAOは、非整合のサイン波的な変調をもつスピン密度波的なものである事が示唆される。このような非整合な磁気秩序は、非弾性中性子散乱で見出された波数と符号している一方で、酒井らによるNMRの結果とは完全に符合しない[5]。この食い違いは、スピン密度波の場合

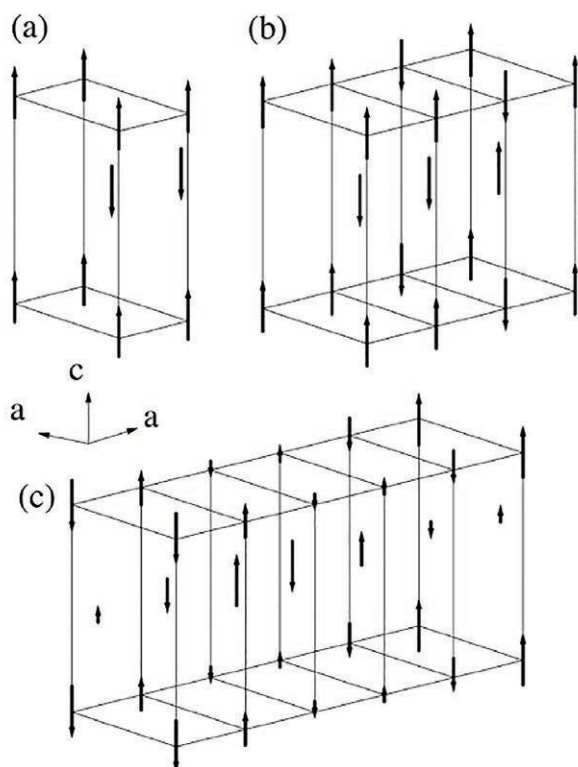


図1 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>で現れる3の磁気構造。(a)整合反強磁性、(b)  $Q_a=(2/3, 0, 0)$ 整合構造、(c)  $Q_a=(0.6, 0, 0)$ 非整合密度波構造。

のNMRスペクトルが独特の形状を示すことを踏まえると無視は出来ない。

中性子回折の結果の解釈のために技術的に踏まえておくべき点として、この実験では、原子炉の単色中性子を用いて、散乱角を固定して逆格子空間の1点での強度の磁場依存性を測定する。そのため、散乱の僅かな異方性や長周期変調の重畳などブラッグピークの詳細プロファイルの観測は出来ない。実際に、 $a^*$ および $c^*$ 方向のピークの半値全幅はそれぞれ0.05 r.l.uならびに0.01 r.l.uであったので、これより長周期の副次的な変調があっても区別は出来ない。もし、このような変調があれば、NMRスペクトルとの矛盾を理解する事が可能になると期待される。ブラッグピークのプロファイルを精査するためには、パルス中性子を用いて白色ラウエ法による回折実験を行う必要がある、現在実験を進めているところである。

今回の一連の実験から、Rh 4%と非ドーブの両者ともFIAOの磁気変調はc面内でa軸(ないしはb軸)に沿った変調であり、前者は整合の $(2/3, 0, 0)$ 、後者は非整合の $(0.6, 0, 0)$ であることが明らかになった。この中間のRh 2%についても、パルス中性子を用いて測定したところ、 $(2/3, 0, 0)$ の整合磁気ピークはない事が確認された。この結果も踏まえると、URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>系のFIAOは、磁気散乱に見られる整合ゆらぎモード $Q_c=(0, 0, 1)$ と非整合な揺らぎモード $Q_{ic}=(0.6, 0, 0)$ の競合によって引き起こされる現象であり、僅かなRhドーブにより、 $Q_{ic}$ が整合波数にロックされる事が明らかになった。これらの結果は、HOとFIAOが互いに競合しており、それらの秩序に伴う波数が異なっていることを示している。

|         | Rh 0%       | Rh 2%        | Rh 4%       |
|---------|-------------|--------------|-------------|
| 波 数     | (0.6, 0, 0) | ×(2/3, 0, 0) | (2/3, 0, 0) |
| 磁化/飽和磁化 | 0.35(II相)   | 0.33(II相)    | 0.33(II相)   |
|         | 0.61(III相)  | 0.61(III相)   |             |
| 強磁性成分   | 無し          | —            | 有り          |

表1 FIAOの波数と磁化, ×は観測されなかったことを示す.

最後に, 今回の実験で謎として残されている実験事実について触れる. 良く知られているように, 強磁性的な磁気秩序があれば, 核散乱に磁気散乱が重畳する. 低温で磁化が飽和した状態では, 自発的な強磁性ではないが, 同様となる筈である. しかしながら, 非ドーブ $\text{URu}_2\text{Si}_2$ においては, 強磁性成分が見出されてないという実験事実がある. 核散乱に対して磁気散乱は弱いという点を踏まえても, Rh 4%においては, 強磁性成分による増強が磁化1/3の状態でも観られていることからして, 実験上の問題ではないことは明らかである. 強磁場下の輸送現象の測定からは, 飽和以上の電気抵抗の温度変化はフェルミ流体的な振る舞いを示すとされており, この系の磁化の飽和が局在的描像での磁化の反転ではなく, フェルミ面の大きな変化を伴った転移として理解する必要があるかも知れない. この点は, RhドーブによるFIAO相の波数と変調構造の顕著な変化の理解でも同様に重要であり, 非整合磁気揺らぎの起源とフェルミ面と

の対応, ならびに, 各相の競合における多極子自由度の役割を理解することが次の課題である.



図2 今回の実験に用いた持ち運び型のパルス磁場電源と40Tの中性子コイルインサート. これらを海外の中性子施設まで空輸して実験を行った.

- [1] F. Bourdarot *et al.*, Phil. Mag. **94**, 32-33 (2014) 3702.
- [2] K. Kuwahara, K. *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 216406.
- [3] K. Sugiyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **59** (1990) 3331.
- [4] W. Knafo *et al.*, NATURE COMMUNICATIONS (2016) 13075
- [5] H. Sakai, H. *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 236401.



## 柳 有起

明治大学 理工学部 博士研究員

## スピン軌道結合系における光学選択則

物質に外場を加えると系の対称性・電子状態を反映した様々な応答が観測される。電子秩序が生ずると自発的対称性の破れによって外場応答は常磁性状態から大きく変化するが、近年、空間反転対称性を破る奇パリティ多極子秩序下における応答が注目を集めている [1-3]。最近、速水らはスピン・電荷・軌道・バレー自由度<sup>1</sup>を含むミニマル模型である蜂の巣格子<sup>2</sup>上 2 軌道模型を調べ、多彩な奇パリティ多極子秩序の可能性、及び秩序下における電気 (電流) 磁気効果について明らかにした。電気磁気効果は静的応答であるが、動的応答にも空間反転対称性の破れを反映した物理が現れることが期待される。そこで、本研究では同模型の光学応答について調べたのでその結果について以下で簡単に紹介する [4]。

蜂の巣格子は大域的には空間反転対称性を持つ格子であるが、反転中心は格子点からずれた場所に位置しているため比較的単純な電子秩序で空間反転対称性が破れる。ここでは、図 1(b), (c) に示すような秩序ベクトル  $\mathbf{q} = \mathbf{0}$  の電荷秩序 (CO)、z 方向の反強スピン秩序 (zSO) を考える。CO が実現すると時間反転対称性 ( $\theta$ ) は保たれるが、空間反転対称性 ( $I$ ) とそれらの組み合わせの対称性 ( $I\theta$ ) は破れる。一方、zSO では、 $I\theta$  は保持され、 $I$  と  $\theta$  が失われることになる。このような対称性の破れを反映し 1 電子状態は

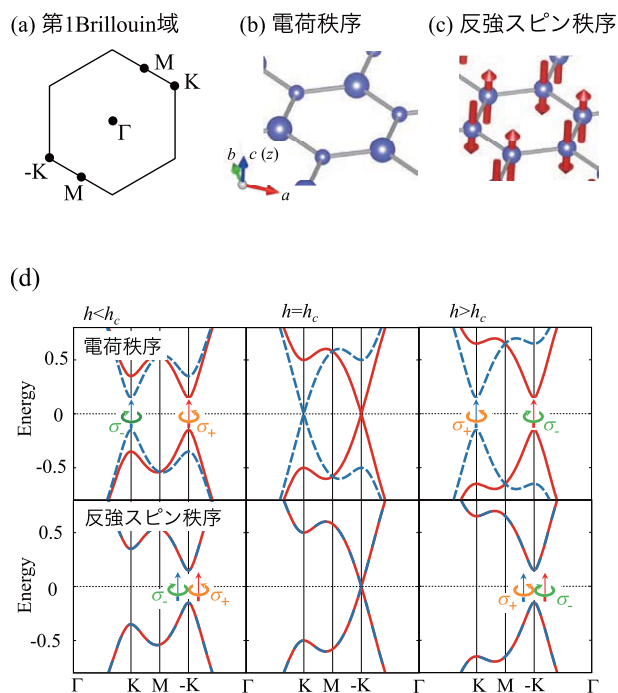


図1: (a) 蜂の巣格子に対する第1Brillouin域。(b) 電荷秩序、(c) 反強スピン秩序の模式図。(d) 秩序下における電子構造。赤(青)線は上(下)向きスピンの電子のエネルギーバンドを表す。また、円偏光の光による励起を付記しており、 $\sigma_{+(-)}$ は右(左)偏光を、赤(青)矢印は上(下)向きスピンの電子の励起を表す。

図1(d)のように変化する。CO状態ではエネルギーバンドのスピンの縮退が解ける(スピン分裂)が、zSO状態ではスピンの縮退は保ちつつ、K点と-K点におけるバンドギャップの大きさに差異が生じる(バレー分裂)。

上述の1電子状態の変化は系の光学的性質に顕

<sup>1</sup> 蜂の巣格子に対する第1Brillouin域におけるK点と-K点の自由度 [図1(a)参照]。

<sup>2</sup> Landauによる2次相転移の理論は対称性の議論に基づくもので局所的秩序変数によって特徴付けられる。しかしながら、自発的対称性の破れを伴わないにも関わらず、整数、分数量子ホール相のように他の物質相と明確に区別される量子相が存在する。これらの量子相はトポロジカル相と呼ばれ、Chern数などのトポロジカル数が非自明な値を持つことが知られている。本稿で紹介している模型ではスピンホール伝導度(=スピンChern数)がトポロジカル相を特徴付ける。また、トポロジカル数の変化によって記述される相転移をトポロジカル相転移と言い、相転移時に励起ギャップが閉じることが特徴である [図1(d)中図参照]。

<sup>3</sup> zSO状態は $\text{MnPX}_3$  ( $X=\text{S, Se}$ ) の反強磁性状態に対応している [6]。

著な影響を与え、円偏光の光によるスピン・バレー選択的励起を可能にする。常磁性状態では右(左)周りの円偏光の光に対し、K点と-K点両方のバレーにおける上(下)向きスピンの電子が励起されるため、スピン選択的な励起は可能であるがバレー選択的な励起はできない状況になっている。他方、CO状態では電子状態の変化に伴い、右(左)周りの円偏光で、-K点(K点)における上(下)向きスピンの電子のみを励起できるようになり、スピンだけでなくバレーに関しても選択的な励起が可能となる[図1(d)左上参照]。zSO状態に対してもほとんど同様のことが言えるが、CO状態とは異なる対称性・電子状態の変化を反映し、光学選択則も異なったものとなる[図1(d)左下参照]。

また、興味深い特徴として分子場の大きさ $h$ を変化させると $h=h_c=\lambda/2$  ( $\lambda$ :スピン軌道相互作用)を境に光学選択則が突然変化すること、それと同時にトポロジカル相転移<sup>2</sup>が生じる点が挙げられる。CO状態について見てみると $h<h_c$ のときの光学選択則は先述の通りであるが、 $h>h_c$ のときは右(左)周りの円偏光で、K点(-K点)における下(上)向きスピンの電子のみを励起できるようになる[図1(d)右上参照]。尚、スピンホール伝導度を計算すると $h<h_c$ のとき $\sigma_{sh}=2$ 、 $h>h_c$ のとき $\sigma_{sh}=0$ となり、 $h=h_c$ でトポ

ロジカル相転移が起きていることが確認される。

以上で紹介したように空間反転対称性をはじめとする様々な対称性の破れによって、常磁性状態とは異なる光学応答が可能になることが分かった。尚、結晶自体が空間反転対称性を破っている単層MoS<sub>2</sub>の常磁性状態でスピン・バレー選択的励起の可能性は以前に指摘されていたが[5]、本研究では空間反転対称性を持つ結晶でCO状態を実現することで同様の状況が可能になることを示している<sup>3</sup>。また、トポロジカル相転移に伴う光学選択則の変化は電場下のシリセンにおいて可能性が初めに指摘されたが[7]、本稿で紹介したように外場を掛けずとも、電子秩序による内部場で同様の現象を誘起できる。このように電子間相互作用による自発的対称性の破れを考慮することで、空間反転対称性を有する系を含む広い物質群を対象としたスピン・バレートロニクス応用が考えられる。今後の物質探索に期待したい。

尚、本研究は明治大学の楠瀬博明氏との共同研究に基づくものである。

[1] N. A. Spaldin, M. Fiebig, and M. Mostovoy, J. Phys.: Condens. Matter **20**, 434203 (2008).

[2] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, Phys. Rev. B **90**, 081115(R) (2014); J. Phys.: Condens. Matter **28**, 395601 (2016).

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

[4] Y. Yanagi and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083703 (2017).

[5] D. Xiao, G.-B. Liu, W. Feng, X. Xu, and W. Yao, Phys. Rev. Lett. **108**, 196802 (2012).

[6] X. Li, T. Cao, Q. Niu, J. Shi, and J. Feng, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **110**, 3738 (2013).

[7] M. Ezawa, Phys. Rev. B **86**, 161407(R) (2012).



# Polymorphism, Giant Phonon Softening, and Strong-Coupling Superconductivity

野原 実

岡山大学 異分野基礎科学研究所 教授

工藤 一貴

岡山大学 異分野基礎科学  
研究所 准教授

山田 芳明

岡山大学 異分野基礎科学  
研究所 修士2年

竹内 貴亮

岡山大学 異分野基礎科学  
研究所 修士2年

木村 拓海

岡山大学 異分野基礎科学  
研究所 修士2年

井岡 賢志

岡山大学 異分野基礎科学  
研究所 修士2年

化学組成が同一で結晶構造が異なる現象を polymorphism (多形) と呼びます。単体の多形は allotrope (同素体) です。また  $\alpha$ -SiC と  $\beta$ -SiC のように、基本的な結合と配位関係は変わらず積層の周期だけが変わり、従って対称性が変わったものは polytypism (多型) です (岩波理化学辞典より)。

今回紹介する  $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  は3つの polymorphism を示します。第一は  $\text{CeMg}_2\text{Si}_2$  型 ( $P4/mmm$ ,  $D_{4h}^1$ , No. 123), 第二は  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型 (空間群  $I4/mmm$ ,  $D_{4h}^{17}$ , No. 139), 第三は  $\text{CaBe}_2\text{Ge}_2$  型 ( $P4/mmm$ ,  $D_{4h}^7$ , No. 129) と  $\text{CeMg}_2\text{Si}_2$  型が交互に積層した名無しの型です。図1に示すように  $\text{CeMg}_2\text{Si}_2$  型と  $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型では Pd と As の配位関係が異なります。前者では  $\text{PdAs}_4$  が平面四角形を、後者では  $\text{PdAs}_4$  が四面体を形成します。これらが辺を共有しながら PdAs 伝導層を形成します。 $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  を普通に合成すると安定相の  $\text{CeMg}_2\text{Si}_2$  型しか得られません。この試料が約 3.5 K で弱い超伝導を示すことが報告されました。零抵抗は示すが、マイスナー効果や比熱の飛びが観測されなかったわけです。僅かに存在する別の多形のひとつが超伝導を示していると予想されましたが、 $\text{CeMg}_2\text{Si}_2$  型が極めて安定で、超伝導相の同定は困難を極めました。紆余曲折の末、山田君たち修士2年の4人組によって、 $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型を単相で合成するためのレシピが出来上がり、 $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型構造の  $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  が 3.5 K で超伝導を示すことが明らかになりました[1]。

$\text{BaPd}_2\text{As}_2$  とは異なり、 $\text{CaPd}_2\text{As}_2$  と  $\text{SrPd}_2\text{As}_2$  は

polymorphism を示さず、 $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型の構造しか取りません。それぞれ 1.27 K と 0.92 K で超伝導を示すことが知られていました。 $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  の超伝導転移温度  $T_c = 3.5$  K は、低いとはいえ、 $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$  型の化合物の中では異常に高い値です。ただし、超伝導発現機構が異なる  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  などの鉄系超伝導体は除外します。 $T_c$  が高い理由を明らかにすることは、超伝導物質の開発の役に立つはずです。そのヒントは比熱測定から得られました[1]。3つの化合物の電子比熱係数  $\gamma$  は 6.1–6.5 mJ/mol·K<sup>2</sup> であり、フェルミ準位での電子状態密度がほとんど同じであることが分かりました。一方でデバイ温度  $\Theta_D$  は、 $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  だけが著しく低い値 144 K でした。 $\text{CaPd}_2\text{As}_2$  と  $\text{SrPd}_2\text{As}_2$  は、それぞれ 276 と 298 K でした。さらに  $T_c$  での比熱の飛び  $\Delta C/\gamma T_c$  は  $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  では 2.3,  $\text{CaPd}_2\text{As}_2$  と  $\text{SrPd}_2\text{As}_2$  では 1 程度でした。以上より、 $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  においては音響フォノンがソフト化し、その結果、電子格子相互作用が増強され、強結合超伝導が発現したものと考えられました。すなわち、フォノンのソフト化によって  $T_c$  が高くなったと言えます。フォノンのソフト化は、 $\text{BaPd}_2\text{As}_2$  が構造相転移直前であることを示唆しています。実際、Pd を同族の Ni に置換した  $\text{BaNi}_2\text{As}_2$  は 130 K で構造相転移を示します。 $T_c$  は低く 0.6 K です。P をドーブすると構造相転移が抑制され、 $T_c$  が 3.3 K まで上昇します。ここでもフォノンの巨大なソフト化が観測されています[2]。

なぜBaPd<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の構造は不安定なのか。Polymorphismと関係しているのではと想像しています。BaPd<sub>2</sub>As<sub>2</sub>におけるThCr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>型構造は準安定相であり、安定相へ転移したいという構造不安定性が内在していると考えられます。このようにpolymorphismに着目してソフトフォノンを持つ物質を探しだし、ソフトフォノンを制御することで、より高い温度で超伝導を示す強結合超伝導体の設計が可能であるように思われます。

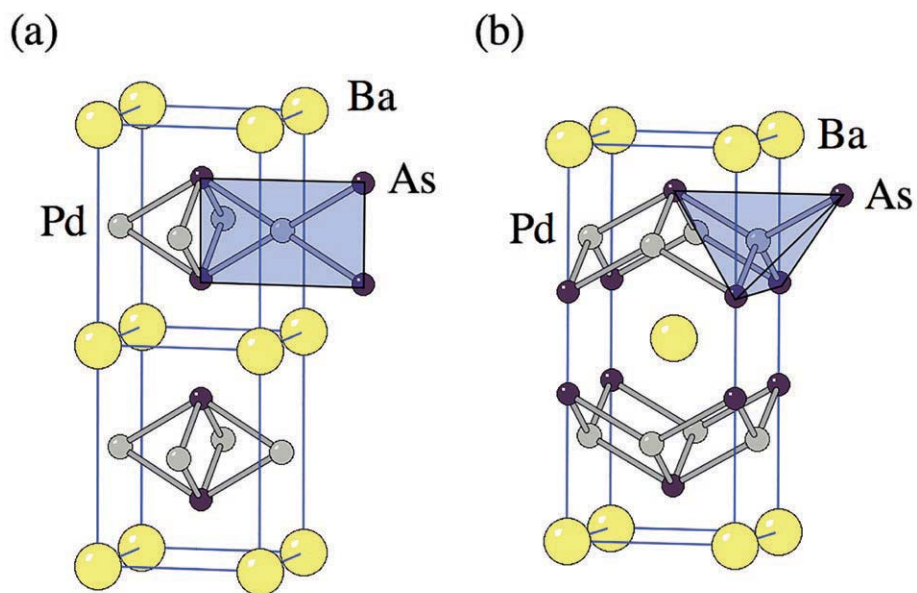


図1. BaPd<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の2つの多形 (a) CeMg<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>型と (b) ThCr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>型。

- [1] K. Kudo, Y. Yamada, T. Takeuchi, T. Kimura, S. Ioka, G. Matsuo, Y. Kitahama, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 063704 (2017).  
[2] K. Kudo, M. Takasuga, Y. Okamoto, Z. Hiroi, and M. Nohara, Phys. Rev. Lett. **109**, 097002 (2012).



## Emergent electronic phenomena in all-carbon $\pi$ -electron systems – from aromatic hydrocarbons to Mott insulating quantum spin liquids

Kosmas Prassides

WPI-Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University, Professor

Y.Takabayashi *et al.*,  $\pi$ -electron  $S = 1/2$  quantum-spin-liquid state in an ionic polyaromatic hydrocarbon, *Nature Chemistry* **9**, 635-643 (2017).

F.D.Romero *et al.*, Redox-controlled potassium intercalation into two polyaromatic hydrocarbon solids, *Nature Chemistry* **9**, 644-652 (2017).

In our search for novel conducting and magnetic functionalities, we have been exploring the electronic properties of materials in which the active components of the extended structures are  $\pi$ -electron open-shell molecular units. These systems crystallize in architectures of varied dimensionality that range from 1D to 3D and encompass molecular metals and superconductors, such as organic charge-transfer salts and the alkali fullerides, which provide the highest  $T_c$  (38 K) together with molecular magnets, including quantum-spin chains and ladders.

In particular, the interest in all-carbon  $\pi$ -electron systems was recently revived by the claim that alkali intercalation of a polyaromatic hydrocarbon (PAH), the five-membered-ring picene  $C_{22}H_{14}$ , led to a superconductor with  $T_c = 18$  K, but of unknown composition and structure. Superconductivity was similarly claimed for alkali-intercalated PAHs with three (phenanthrene,  $C_{14}H_{10}$ ) and seven (1,2:8,9-dibenzopentacene,  $C_{30}H_{18}$ ) aromatic rings ( $T_c = 5$  and 33 K, respectively) [1]. Despite the resulting strong research activity, there has been no progress beyond these initial reports because the complex reactivity of alkali metals with PAHs has precluded the

identification of any phases in this family of materials: compositions and crystal structure have remained unknown. All fields in condensed matter physics need structure-property-composition relationships to advance, and, put simply, the total absence of structure-composition information has prevented any meaningful progress beyond claims of function without any means to think about them. Structures are needed, and, even before this, controllable synthetic protocols with which to tackle the space of metal-PAH compounds.

The two papers reported new approaches towards the synthesis of well-characterized crystalline alkali metal PAH solids [2]. Two complementary “soft chemistry” routes (reduction in solution, and solid state reaction with a redox-controlled reducing agent) that avoid destruction of the PAH molecules during their reaction with reducing agents were developed: this had not been possible with the “brute force” metal-plus-PAH routes used before universally in the literature. As a result, it is now possible both to access crystalline metal PAH (phenanthrene, picene, pentacene) solids with a variety of molecular packing motifs and varying molecular oxidation states, and to retain the close

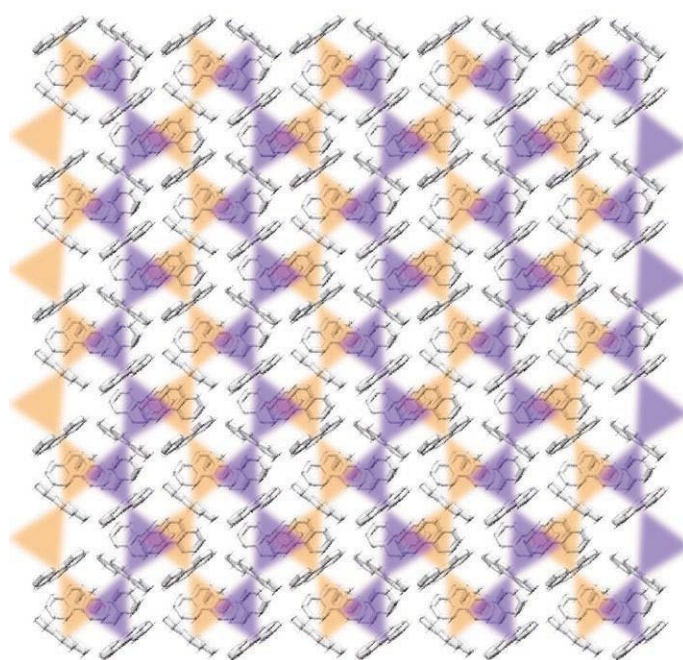


Fig. 1. Crystal structure of  $\text{Cs}(\text{C}_{14}\text{H}_{10})$  ( $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$  = phenanthrene). Basal plane ( $ab$ ) projection of the structure emphasizing the parallel stacking of individual quasi-1D molecular tubes perpendicular to the plane. Zigzag  $\Delta$ -chains of  $(\text{C}_{14}\text{H}_{10})^{\bullet-}$  ions from neighboring tubes run along the  $b$  axis. Differently colored (blue, golden) chains are displaced along the  $c$  axis.

intermolecular contact required for a functional electronic response.

Of special interest turned out to be the binary salts of phenanthrene with cesium,  $\text{Cs}(\text{C}_{14}\text{H}_{10})$  and  $\text{Cs}_2(\text{C}_{14}\text{H}_{10})$ , which contain the phenanthrene radical mono- and di-anions, respectively. Analysis of the structural and electronic properties complemented by first-principles calculations established both materials as multi-orbital strongly correlated Mott insulators — a rare phenomenon in molecular electronic materials beyond high-symmetry fullerenes [3]. In particular, the dianion salt,  $\text{Cs}_2(\text{C}_{14}\text{H}_{10})$  is a low-spin,  $S = 0$  system with an orbitally polarized insulating state, which adiabatically connects to a band-insulating state.

On the other hand, the  $S = \frac{1}{2} (\text{C}_{14}\text{H}_{10})^{\bullet-}$  radical anions in  $\text{Cs}(\text{C}_{14}\text{H}_{10})$  are incorporated into a magnetic network of Heisenberg antiferromagnetically coupled spiral magnetic tubes that gives rise to an unprecedented frustrated 3D magnetic topology. Coupling between neighboring tubes via corner-sharing triangular units leads to a complex highly frustrated 3D spin topology of unequal-leg spin chains that run along the crystallographic  $c$  axis and corner-sharing  $\Delta$ -chains that run along the  $b$  direction. The absence of long-range magnetic order down to 1.8 K ( $T/J \approx 0.02$ ;  $J$  is the dominant exchange constant) renders the compound an excellent candidate for the long-sought spin -  $\frac{1}{2}$  quantum-spin liquid (QSL), here arising purely

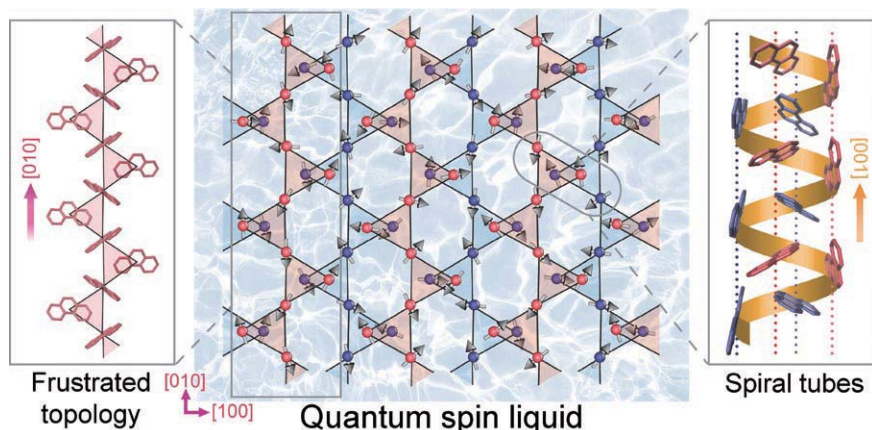


Fig. 2. Cooperative electronic properties that arise purely from carbon  $\pi$ -electrons can lead to unconventional superconductivity and quantum magnetism. New packing architectures are now established in two cesium-intercalated polyaromatic hydrocarbons, Cs(C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>) and Cs<sub>2</sub>(C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>) (C<sub>14</sub>H<sub>10</sub> = phenanthrene), both strongly-correlated multi-orbital Mott insulators. The frustrated 3D magnetic topology in Cs(C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>) also renders it a spin- $\frac{1}{2}$  quantum spin-liquid candidate.

from carbon  $\pi$  electrons.

To date, QSL behavior has been rare and its possible emergence in frustrated systems is dominated by antiferromagnetically coupled spin- $\frac{1}{2}$  Cu<sup>2+</sup> d<sup>9</sup> ions adopting Kagome magnetic topologies [4] and by 2D edge-sharing triangularly arranged spin- $\frac{1}{2}$  molecular pairs in organic charge-transfer salts close to the Mott boundary [5]. More recent examples include arrangements based on d<sup>1</sup> ions — Kagomé networks of V<sup>4+</sup> in an oxyfluoride and of Cr<sup>5+</sup> in Ca<sub>10</sub>Cr<sub>7</sub>O<sub>28</sub> with a complex frustration mechanism that involves both ferromagnetic and antiferromagnetic couplings [6]. Therefore, Cs(C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>) emerges as a rare example of a spin- $\frac{1}{2}$  molecular quantum AFM with a frustrated 3D-interlinked exchange network based

uniquely on carbon  $\pi$ -electron states. Experiment here shows the absence of a transition to an ordered state even at temperatures much lower than the scale defined by the strength of magnetic interactions,  $J/k_B \approx 80$  K, and consistent with a large frustration parameter,  $f = J/T_N$  (lower limit,  $f \approx 50$ ). At the same time, the spin susceptibility approaches zero exponentially at low temperatures, which implies that the ground state has a zero spin and is separated from the first excited state by an energy gap,  $\Delta \approx 30$  K. The electronic behavior of Cs(C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>) is therefore compatible with that of a 3D gapped QSL ground state as supported by the evaluated topology and strength of several different isotropic exchange couplings.

[1] R. Mitsuhashi *et al.*, Nature **464**, 76 (2010); X. F. Wang *et al.*, Nature Commun. **2**, 507 (2011); M. Xue *et al.*, Sci. Rep. **2**, 389 (2012).

[2] R. Valentí and S. M. Winter, Nature Chem. **9**, 608 (2017).

[3] R. H. Zadik *et al.*, Science Advances **1**, e1500059 (2015).

[4] M. Fu *et al.*, Science **350**, 655 (2015); Y. Okamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 033701 (2009).

[5] Y. Shimizu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 107001 (2003); T. Itou *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **19**, 145247 (2007); T. Isono *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 177201 (2014).

[6] F. H. Aidoudi *et al.*, Nature Chem. **3**, 801 (2011); C. Balz *et al.*, Nature Phys. **12**, 942 (2016).

# トピカルミーティング 研究会報告

## 「局在多極子と伝導電子の相関による新現象」

中西 良樹

岩手大学 大学院工学研究科 准教授

A01（世話人：中辻知）主催、標記研究会が2017年4月17日～18日、物性研究所にて開催された。年度はじめにも関わらず関東地方は最高気温が30℃近くまで上昇。研究会が行なわれているセミナー室には季節外れの冷房が入る場面も見られた。年度始めということで参加者数はのべ約40名と幾分小規模。いつも研究会で利用している大講義室とは異なり、発表者と聴衆者の距離が極めて近い第5セミナー室で実施された。距離が近いためであろう、発表中にも聴衆者から盛んに質問が入り、「双方向かつ効果的」な意見交換、情報共有が深く且つ活発に出来た研究会であった。A01の使命は $d$ 及び $f$ 電子が形成する局在多極子と伝導電子の相関効果から創出される新規量子現象の探索とその異常電子状態を解明することにある。本研究会では最近の成果と未解決の問題整理を行うため、具体的にPrベース籠状物質1-2-20系、YbAlB<sub>4</sub>系、Yb系準結晶、中間価数希土類化合物を主なトピックスとして、2日間にわたり実験及び理論の講演が7セッションの構成（講演数：30-40分講演6件、25分講演8件、合計14件）で設定された。簡単に研究会についてレビューする。詳細は以下のプログラムを参照して頂きたい。Prベース籠状物質1-2-20系については電気輸送特性に関する共通理解と課題を整理した。特に鶴田・三宅モデルによってPrT<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>（T：Ir, Rh）に加え、（T=Ti, V）でも広い圧力範囲で電気抵抗の温度変化を説明できることを示した。さらにこの系で出現する低温秩序相が一樣ではなく、多重相で構成されていることを実験（NMR、超音波、比熱測定、中性子散乱）で明らかにし、服部らが理論（XY model with Z<sub>3</sub>

anisotropy）研究でPrT<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub>系の低温多重相の解釈を試みた。Prの非クラマース2重項がエネルギー的に良く孤立した系で、複雑な低温秩序相が出現することは極めて興味深い。今後、この低温秩序相への関心が高まり多角的なアプローチでその起源が明らかにされることであろう。更にYb、Sm、Euを中心に価数揺動状態と重い電子系、量子臨界性に関する講演があり、重い電子系形成過程の多様性、深遠さを改めて感じる事となった。研究当初、価数揺動状態と重い電子系は相反する別のスキームとして分類されていたのに対し、両者がその特性を損なうことなく密接に相関して異常電子状態を形成していることを最近の実験結果は如実に示しており、価数の揺らぎ自身が重い電子系形成に強く関与していることをYbAlB<sub>4</sub>の研究を通して我々は実感することとなった。改めて本分野が日進月歩で目紛しく発展していることを物語っている。

価数揺動状態に関する進展については、最近の準結晶研究も特筆に値する。本系は原子配置が特殊な等比数列的規則性（準周期性）をもち結晶と類似した回折像が得られるが、その回転対称性は結晶で許されないものである。原子配置が特殊ゆえにBloch電子は存在せずバンド理論が適用できない。周期性によりコヒーレンスが系全体に形成される通常結晶とは発現機構を異にすると考えられている。特にTsai-typeのクラスター構造をもつAu-Ge-Yb近次結晶ではYbの $f$ 電子が局在と遍歴の中間状態をとり、中間価数のYbの揺らぎに起因した非従来型の磁性、異常金属相を呈する。その一方で空間周期性をもつ通常結晶同様、量子臨界点近傍で超伝導の発現が



確認され一気に関心が高まった。注目すべき点は、この量子臨界現象が常圧で生じるとともに、広い圧力範囲にその臨界性が広がっている。強相関伝導系の観点から準結晶、および局所的に準結晶と同じ構造をもつ近次結晶について、今後広く研究展開していくものと思われる。このセッションで、 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>系は見方を変えると準結晶であるという報告（指摘）がなされ、常圧、ゼロ磁場で量子臨界性を示す両者の共通性が強調された。

本研究会では期せずして発見に繋がった興味深い実験結果についても報告された。天然鉱物に存在する結晶構造ウルマナイト型化合物の一つEuPtSiの中間層に関するものである。ウルマナイトはパイライトに類似した結晶構造であるが、大きく異なる点は結晶反転対称性の破れたカイラル構造を有することである。磁性を担うEu<sup>2+</sup>の磁気モーメントは $J=7/2$ と大きく、MnSiと同じ四面体構造を成している。この系の磁化、比熱測定に関して磁場印加方向を変えて詳細に測定し、温度磁場相図を作成することで秩序相内に奇妙な相転移が現れることを明らかにした。温度磁場相図内におけるこの相の形状から、先行研究であるMnSiのスカームイオン構造（ナノ超構造）を強く連想させる。極最近、その強い中性子吸収性で磁気構造の決定が極めて難しいと認識されていたEu系化合物の一部で中性子回折実験が行われ始めてきた。（実験測定技術も日進月歩に向上している。驚くべきことである。）こうした特異な相がウルマナイト化合物のEu系でなぜ観測されたか？微視的な実験手段によってEuPtSiの中間層の全貌が明らかになる日もそう遠くはないことであろう。

以上、本研究会の講演内容について振り返り、概観した。

初日の講演後、かしわエクスプレス「柏の葉キャンパス駅」前の三井ガーデンホテル柏の葉内にあるイタリアンレストラン「コメスタ」にて懇親会が開催された。お店の謳い文句同様「アットホーム」な雰囲気研究以外の話題にも花が咲いた。年度始めの多忙な時期に束の間の楽しいひとときを参加者で共有できた。

最後に、日本物理学会春季大会が終了して間もない年度始めの多忙な時期に、俯瞰的、包括的視点から深く双方向的に議論が出来るコンパクト研究会をセッティング準備して頂いた世話人の中辻様、研究室の皆さん、そして受付から珈琲ブレイクの用意、事務的な業務を全てして頂いた秘書の菱沼有美さん、鈴木まり子さんに心から感謝申し上げます。次の研究に繋がる活発な議論ならびに課題を鮮明化した重要な研究会だったと振り返って感じます。



# 強相関多極子系の超伝導： $f$ と $d$ の共通項を探る

野原 実

岡山大学異分野基礎科学研究所 教授

2017年5月11日、12日の二日間に渡って、B01研究、D01研究合同のトピカルミーティングが、東北大学金属材料研究所の講堂で行われました。「強相関多極子系の超伝導： $f$ と $d$ の共通項を探る」と題して、B01とD01の計画研究、公募研究の代表者を中心に、これまでの成果と今後の計画について合計20件の発表がありました。参加者は32名でした。研究がスタートして計画研究は2年弱、公募研究は1年という短い期間ですが、スピン軌道結合、J、多極子といったJ-Physicsのキーワードが織り込まれたバラエティに富んだ発表が行われました。物質開発に重点を置いている本新学術の特徴を反映して、新物質開発や純良単結晶育成についての発表も行われました。今年度から新たに評価委員になられた上田寛先生（豊田理研）も参加され、貴重なコメントをいただきました。研究者間での研究交流の促進を期待して、金研強磁場センターの見学も希望者に対して行われました。プログラムは以下のとおりです。

## 5月11日（木）

播磨 尚朝（神戸大）

スピン軌道結合三題漸：三方晶Biの構造、 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ のパリティ混成転移、 $\text{U}_3\text{Ni}_3\text{Sn}_4$ のフェルミ面

柳瀬 陽一（京都大）

磁気多極子の分類学と  
多極子誘起エキゾチック超伝導

服部 一匡（首都大）

シングルのイオン異方性をもつ  
 $S=1$ 一次元近藤格子模型の横磁場中相図

青木 大

東北大学 金属材料研究所 教授

池田 浩章（立命館）

多軌道超伝導体における  
電子軌道の対称性とギャップ構造

野原 実（岡山大）

$4d$ および $5d$ 遷移金属化合物における超伝導

岡本 佳比古（名古屋大）

$\beta$ パイロクロア酸化物 $\text{CsW}_2\text{O}_6$ の金属絶縁体転移

宮坂 茂樹（大阪大）

Ni, Pdダイカルコゲナイドにおける電子状態、  
構造相転移、超伝導

阿部 伸行（東京大）

ハニカム構造を有する反強磁性体の物性応答

水口 佳一（首都大）

$\text{BiS}_2$ 系超伝導の発現条件と  
同位体効果検証に向けた進捗

中川 剛志（東北大）

Emergent properties in strongly-  
correlated carbon-based molecular materials

秋光 純（岡山大）

Desperate struggle to find the  
superconductivity in the two-dimensional  
irridates  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$

## 5月12日（金）

青木 大（東北大）

アクチノイド化合物の超伝導

野島 勉（東北大）

$3d$ 電子系電場誘起超伝導体の磁場中輸送特性

神戸 振作（原子力機構）

ウランウムカルコゲナイトの物性



(休憩)

野尻 浩之 (東北大)

URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の磁場誘起強磁場相

松田 達磨 (首都大)

BiS<sub>2</sub>系超伝導体における物性異常及び  
強相関電子系 Sm化合物における最近の研究

藤森 伸一 (原子力機構)

光電子分光から見たウラン化合物超伝導体の  
5f 電子状態

井澤 公一 (東工大)

熱伝導率で見るU<sub>1-x</sub>Th<sub>x</sub>Be<sub>13</sub>の  
準粒子低エネルギー励起と超伝導ギャップ構造

大貫 惇睦 (琉球大)

BCS超伝導だが、ちょっと変わった振る舞い  
(Zr<sub>2</sub>Co, CuS<sub>2</sub>, CuSe<sub>2</sub>, CeRu<sub>2</sub>等を例にして)

石田 憲二 (京都大)

京大・石田グループの現状報告  
(U 系、Ce系超伝導体について)



## C01 トピカル・ミーティングに参加して

御領 潤

弘前大学 理工学部 准教授

研究計画班C01は「拡張多極子の動的伝導」メイン・テーマとしています。今回のトピカル・ミーティングは「拡張多極子研究の進展と課題」というタイトルで、2017年5月20日(土)と21日(日)の2日間に渡り弘前大学理工学部にて開催されました。

前日19日の晩には、早めに弘前入りされた方たちで集まり、事前意見交換会が開催されました。物理屋の通性と言えるのですが、研究会が始まる前から皆さんウォーム・アップに余念がなく、物理談義に花が咲いておりました。この日はちょうど青森市内で行われる医学系(でしたか?)の学会と日程が重なってしまい、道中、飛行機や新幹線が非常に混んでいたそうで、後述する桜やねふた祭り以外の時期なのにと、意外に感じました。

そして迎えた初日の20日は快晴で、暑いくらいの天気になりました。実はそれまで津軽地方は曇りがちのぐずついた天気が続いておりましたが、参加者のみなさんの熱気でどこかへ吹き飛んで行ってしまった風情でした。岩木山の頂も顔をのぞかせ、その様子が集合写真にも納められています(弘前大のグラウンドで撮ったものですが、別に遊んでいたわけではありません)。C01網塚代表による包括的なレビューおよびUNi4Bの電気磁気効果の検出に関する最近の進展のお話を皮切りに、招待講演3件を含む13件の講演が行われました。講演者全員に対して30分の時間が割り当てられていました。研究会の前に送られてきたメールには、もし持ち時間が余ったら早めにしゃべり終わってもよろしい、というアナウンスがありましたが、やっぱりいいですか、みなさん時間を目一杯使って話しておられました。質疑

応答もあまり時間を気にせず十分に行われ、四角張らない雰囲気で行う研究会の利点を十二分に果たしていたと思います。そして日中のセッションだけに限らず、夜に開催された意見交換会においても、深夜に至るまで熱い議論が繰り上げられたことは言うまでもありません。

2日目、最終日の21日は午前中にセッションが行われ、引き続き招待講演1件を含む5件の発表が行われました。開始前にはいくぶん疲れた気配がただよっておりましたが、講演が始まるとそんな空気はどこかへ行ってしまい、前日同様時間にとらわれない熱心な議論が繰り上げられました。最後の締めくくりは播磨領域代表のお話で、秋の国際学会以降のプロジェクト後半戦へ向けて檄を飛ばしておられました。

短い研究会でしたが、J-Physicsが重い電子系の伝統を引き継ぎつつ、他の分野との融合や新たな計算手法・実験技術などを幅広く積極的に取り込み、物性・物質科学の新局面を切り出そうとしている動きを目の当たりにすることが出来ました。こうしたエキサイティングな働きに貢献出来るように、私たちも後半戦へ向けて弘前から尽力して参ります。

今回の研究会では弘前でお迎えする立場、という心づもりでおりましたが、結局私がやったのは昼と夜のセッションの会場を押さえたくらいで、諸々の準備は網塚代表はじめ北大の方々が全部取り仕切って下さり、まことに恐縮しております。写真も招待講演者の柳澤達也さん(北大)が撮ってくださったほどでした。コーヒー・ブレイクの準備なども、こちらの研究室のメンバーで前もって相談していたら、網塚代表が弘前大学生協のケータリング・サービスを



既に手配して下さっていたことを聞き、自分の大学にそんなサービスがあるのも知らず赤面致しました。

紙面がまだだいぶ余っている様子ですので、少し弘前についてご紹介させていただきます。私は着任するまで弘前とは縁もゆかりもなく、当初は右も左もわからずじまいでしたが、ここでの暮らしも5年目に入り多少は見聞きして覚えました。弘前の看板は写真でもご紹介している岩木山や白神山地、そして城です。特に満開のときの城の桜は圧巻で、人出は例年200万人に登ると言われています[1]。時期は4月の下旬から月末にかけてです。桜のすぐ後、街の周辺では白いりんごの花が可憐に咲き誇ります。夏の風物詩はねぶた祭りです。同時期に青森市のねぶた祭りや（「ぶ」ではなく「ぶ」）、五所川原市で立佞武多（たちねぶた）祭りも盛んに行われます。立佞武多はまだ見に行ったことがなく、今年あたり訪れてみようかと考えています。桜やねぶたの様子などを見ると、地方の文化・伝統を引き継いで行こうとする津軽の人々の熱意には、並々ならぬものがあると感じさせられます。そして、秋は周辺の山地の紅葉、冬は津軽平野一面の雪景色と寒さを堪能出来ます。

しかし、意外と雪が少ない年もありました。

他に特筆すべき点では、温泉が至る所で湧いており、市内の銭湯でも温泉が楽しめます。有名な酢ヶ湯温泉も弘前からすぐですが、地元の人たちは酢ヶ湯などには行かずに、天然で湧き出ているのを見つけて楽しむのだとか。確かに山の中を車で走っていると、妙なところに駐車してあるのをたまに見かけます。温泉か、あるいは山菜採りでも楽しんでいるのでしょう。ただし、熊には十二分の注意を払った方が良さそうです。

今回の研究会も含め、おかげさまでこれまでいろいろな方々にご訪問いただいております。深く感謝致しております。まだお越しになられていない方々、すでにお越し下さった方々も是非また、遠路はるばると恐縮ではありますが、足をお運びいただければ大変光栄です。

[1] [https://sp.jorudan.co.jp/hanami/rank\\_visitor.html](https://sp.jorudan.co.jp/hanami/rank_visitor.html)



## International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017) 会議参加報告(速報)

松田 達磨

首都大学東京 准教授

強相関電子系の国際会議SCESが今年はチェコのプラハにて開催されました[1]。本会議のChairmanは、長年ウラン化合物をはじめとして強相関電子系の研究に精力的に携わってこれ、また本新学術領域とも関係が深いカレル大学のVladimir Sechovsky 教授が務められました[2]。Clarion Congress Hotel Pragueを会場として Opening 前日夕方の Welcome Party も含めると7月16日から21日の六日間に渡る会議でした。Closingでは今後の関連国際会議の開催地に関する情報も発表されましたので、ここでは速報としてそれらのことを含めて会議の様子をごく簡単に報告させて頂き、詳細な内容については次号に譲りたいと思います。

実質五日間、毎日朝の8時半から夕方の6時までみっちりプログラムが組まれており、午前中前半は plenary session で、毎日最新のトピックスに関する Review Talkが行われ、その後、より詳細なキーワードをもとに4つのparallel sessionへと分かれ、夕方に poster sessionが設けられておりました。毎日200件近いポスター発表が行われておりました。プラハという魅力的な観光地でありつつ、なかなか気の抜けないプログラムに、若干頭を悩まされました。参加者数は、Openingで発表されたところによると、当初500人程度を予想していたとのことですが、それを大幅に上回る904人の参加登録があったとのこと、実際の会場もびっしりと人が入っており、熱気にあふれておりました。参加者には、会議期間中の交通機関のパスが用意され、また昼食のみならず会場の休憩スペースや議論を行うスペースに、飲み物や軽食が常に潤沢に提供

されるなど、質の高い「おもてなし」に驚かされました。ホストであるカレル大学のスタッフのみならず、現在カレル大学に滞在されている北大の網塚研の学生やスタッフの方々、また東北大金研の本多氏等の献身的な運営への寄与も印象的でした。

Closingでは、まず実験及び理論のまとめとして Jacques Flouquet 氏と Jozef Spalek 氏のそれぞれ対照的スタイルによる印象的な講演で総括が行われました。その後、Toronto大の Stephen R. Julian 氏より、来年サンフランシスコにおいて開催される International Conference on Magnetism (ICM2018)[3]の案内が行われ、最後に2019年のSCES開催地の発表が本領域代表の播磨氏より行われました。2019年の開催地については、国際諮問委員会のメンバーで議論が重ねられ、会議期間中に決定されたとのこと。当初2019年に開催を予定していた国が諸事情により開催できなくなったということで、急遽日本での開催を打診され、最終的にSCES2019は岡山にて開催されることが決定したそうです。2019年は本領域研究の最終年度にあたっているタイミングでもありますが、いずれにせよ国内外の多くの関係者の参加とともに会議が盛り上がることを今から期待する次第です。最後に、本報告を書くにあたり Sechovsky 氏にコンタクトをとったところ、メッセージを頂きましたので記載いたします。

「日本から非常に多くの方に参加して頂き、また多大なるご協力とともにSCES2017を成功に導いて頂き感謝いたします。岡山での会議が、SCES2017と同様素晴らしい会議になるようお手伝いできれば幸いです。」

[1] <http://www.sces2017.org> [2] J-Physics NewsLetter #01 [3] <http://www.icm2018sf.org>



## 滞在記もといプラハ滞在のすすめ

齋藤 開

北海道大学大学院理学院 物性物理学専攻 博士課程3年

昨年4月より、J-Physicsの国際活動支援班、若手研究者相互派遣事業とC01計画研究からの支援でチェコ共和国、プラハはカレル大学に滞在する機会をいただきました。研究テーマは $\text{UNi}_4^{11}\text{B}$ の単結晶育成で、ドイツ、ブラウンシュヴァイク工科大学のS. Süllo教授のグループを含めた3か国連携を進めることも目的の一つでした。手厚い支援と補助を得て当初予定の3か月の後も、さらに延べ5か月間滞在し共同研究を進めてまいりました。私のプラハ滞在后押し、支援してくださった播磨代表、網塚教授をはじめJ-Physicsの当該事業関係者の皆様、受け入れて面倒をみてくださったV. Sechovský教授、K. Uhlířová先生をはじめとしたカレル大学数物理学部凝縮系物理学科の皆様へ、この場を借りて厚く感謝を申し上げます。

今回は滞在記の依頼を頂きましたが、皆様の多くはこの7月にプラハを訪れたばかりかと思うので、内容はプラハ滞在を検討する際に一助となることを志向したものにいたします。

カレル大学編

Sechovský教授の研究室(Group of Magnetic Studies、以下、研究室)では主として単結晶育成と評価、X線と中性子を用いた測定が行われています。対象物質は広く強相関電子系で、多くはf電子系金属間化合物で基礎物理に近いですが、最近は磁気形状記憶合金のような応用に向けたテーマも扱っています。可能な単結晶育成手法はflux法(大気炉3基)、Bridgman法(1基、他1基立ち上げ中)、Czochralski法(3極アーク炉1基、超高真空炉1基)、Floating Zone法(光学炉1基、近タレーザーに換装予定)があります。試料評価の設

備としては、粉末/単結晶用のX線ディフラクトメータが直ちに使用できるものだけでも5台、表面の元素比や分布を観察できる走査型電子顕微鏡と原子間力顕微鏡が各1台(SEMは別施設にも1台、1台購入予定)あり、迅速な評価が可能となっています。これらの設備はプラハ中心部に近いKe Karlovuにあります。

Troja地区にある低温測定施設は $^4\text{He}$ の液化機を備えており、MPMS(7T)、PPMS(9T, 14T)、希釈冷凍機(9T, 20T、故障中)があります。PPMSは $^3\text{He}$ 、オーブン、磁化・交流磁化(VSM、ACMS、Hallプローブ)、熱膨張(キャパシタンス、歪みゲージ)、電気抵抗、熱伝導率、静電容量、弾性定数、原子間力・磁気力顕微鏡のオプションを備えています。また、必要に応じてチェコ科学アカデミーのPPMSなどの装置を借りることができます。こちらのPPMSは利用者が十分でないようで、私も延べ1か月ほどお借りしました。このほか各装置に挿入可能な5種の高圧セルもあるそうです。

周囲の研究所との連携については、例えば、フランス、グルノーブルの中性子線施設、ILLには多くの学生が自分の育成した試料を持って、中長期で実験に行っています。これはチェコがILLの運営に参画しており、ビームタイムを取りやすいためだそうです。研究室は積極的に海外の研究者受け入れを行っており、学生も含め英語でのコミュニケーションで困ることはありません。また、長期のチェコ滞在ではよくビザ申請が大きな障壁となります。すべての書類をチェコ語で用意する必要があり、到着後に出頭する公的機関では殆ど英語が通じません。ですが、彼らはこのことも取得のプロセスもよく把握しているた

め、親切丁寧にサポートをしてくれます。Sechovsky 教授曰く「日本人はいつでもウェルカム」だそうですので、興味のある方はまずコンタクトをとることをお勧めします。

私もはじめのうちは、博士課程の学生だった M. Vališka さんに装置のオペレーションなどをつきつきりて教えてもらいました。常についてもらうことは彼にとって大きな負担になると思い、必死に教わった結果、3週間ほどで使ったことのある装置については自由に使ってよい、との許可をもらいました。そこからは FZ 炉を中心に精力的に使用させていただき、なんとか単結晶育成に成功することができました。試料育成にあたってトータルで使用した U の量は 100 g を下りません。自由に研究を進めさせてくださった研究室の皆様には感謝の言葉ありません。

#### 食生活編

海外に滞在する上で問題となってくるのが食事です。チェコの料理は概して肉+主食が基本で、野菜は飾り程度、ビールにあわせるためか味はやや濃いめです。味は良いので短期の滞在では満足度が高いと思いますが、長期滞在で毎食この生活をするのは体調管理の観点からよろしくないと思います。プラハでは足を病んでいる方を多く見かけるのですが、私はその一因としてこの食生活があるのでは、と睨んでいます。良い研究は良い生活から、ということで、チェコでの滞在時は自炊して野菜や果物を摂ることをお勧めします。以下ではチェコでよくみる食品について簡単に紹介します。

野菜の種類はそこまで多くありません。乾燥した気候のためか、果菜、葉茎類はどれも皮が固いです、

一方で根菜類と可食部が地中で成長する種は味がよいように思います。人参、玉葱、蕪、じゃが芋などはとても美味しいので、これらを使ったスープはよく作りました。果菜類では、パプリカ、トマト、茄子、胡瓜あたりは間違いがありません。葉茎類はアスパラ、にんにく、長葱あたり。特ににんにくは、近郊が生産地だそうです、確かに質が良くおいしいです。キャベツ一玉 3 kg など基本的にサイズが大きいので、一人での滞在では手が出せない野菜が幾つもありました。

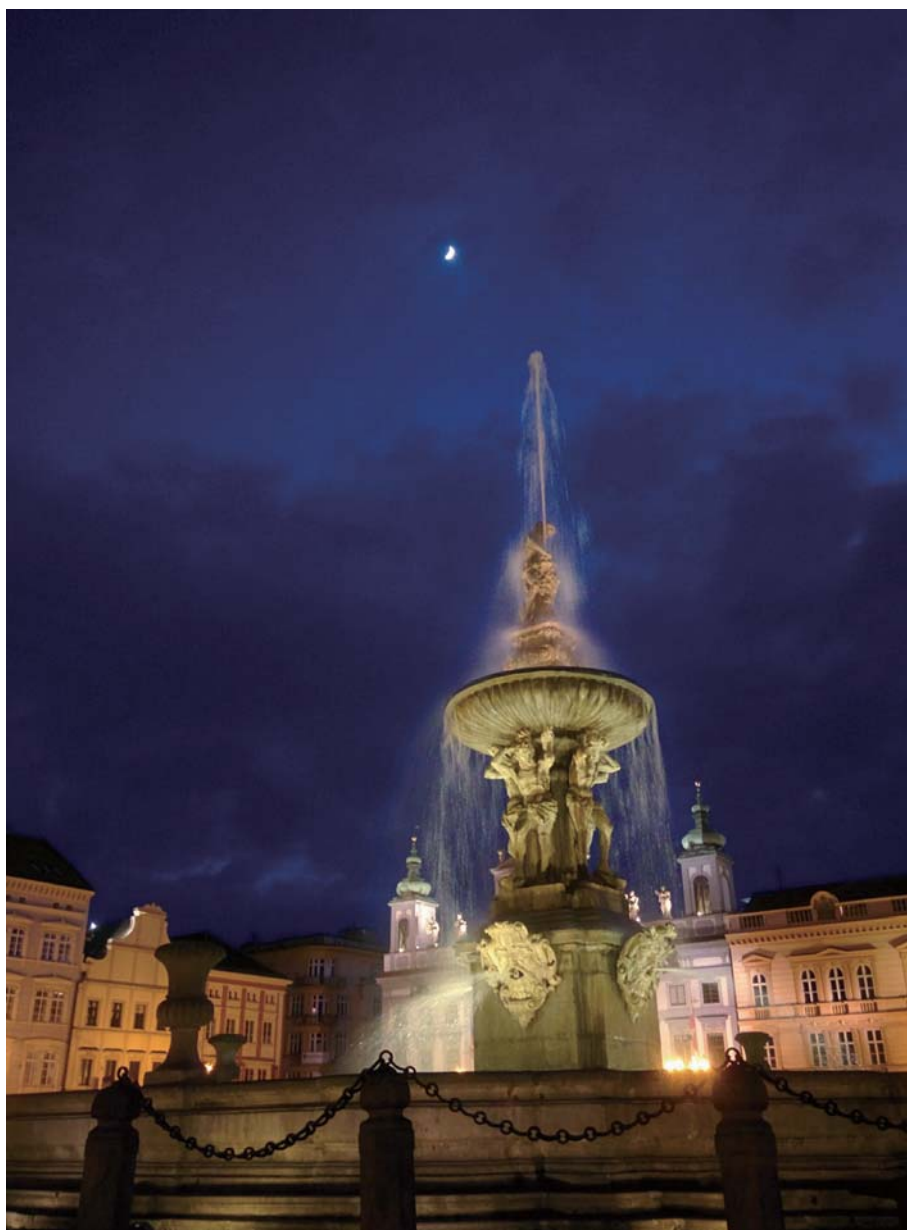
主食はパン、米、クネドリーキという独特な蒸しパン、パスタ（基本的に茹ですぎ）、豆です。クネドリーキは中身のない饅頭のようなものですが、パン、肉類、ほうれん草、香草、芋が入ったり、練りこまれたりした変わり種もあります。どれも、主菜に大量にかけられたソースで食べます。パンはやや酸味の効いた黒いパンが主流です。パスタは茹ですぎです。豆はペースト状になるまで煮込まれたものが多いです。

肉類はターキー、鶏、豚、牛が主です。時々、猪などのジビエを見ることがあります。味はどれも良好ですが、牛は他に比べるとやや割高に感じます。魚はお店に並んではいますが、高価で美味しくありません。

ビールは日本のものに近いラガービールが多いように思います。アルコール度数は 4% ~ 6% 弱が多く、幅があります。チェコには 400 近い醸造所があり、それぞれが独自に醸しています。スーパーで購入可能なビールはこのうちごく一部です。ミニ醸造所のビールは多種多様で、飲むには取り扱いのあるレストランやパブを探すことになります。多くの醸造所が参加するビアフェスティバルを覗いてみるのもよいでしょう。

価格は、物価が上がり続けているという話ですが、それでも日本より大抵のものは安いです。外食だと一食+ビール一杯で1000円前後、観光地だと1500円前後、ビールは0.5lで200円からが多いです。スーパーで買う場合は、例えば、玉葱は60円/kg程度、黒パンは75円/550g、ビールは0.5lで40～120円が多いです。

滞在の以前は、20年前のプラハ情報をよく聞いていたため、なかなか不安のある中で派遣されてきました。ですが、実際はうまく観光地化されており、町の人々は親切で、若い人を中心に英語はかなり通じます。滞在中に危険や不自由を感じたことはなく、初めて海外に滞在する場所としてはかなり難易度の低い地域だ、との印象に変わりました。J-Physicsの若手海外派遣事業に申請を予定されている方はプラハを受け入れ先の候補の一つに加えてみてはいかがでしょうか。





## Extending collaboration between Charles University and J-Phys partners

**Klára Uhlířová and Tim Verhagen**

Charles University, Czech Republic, Faculty of Mathematics and Physics, postdoc

**prof. Hiroshi Amitsuka**

Hokkaido University

**prof. Hideki Tou**

Kobe University

**Dr. Yusuke Kousaka**

Hiroshima University

In May 2016 we had accepted the invitation from prof. H. Amitsuka to visit several Japanese universities and the JPS meeting in Kanazawa. The main motivation of our stay was to extend the collaboration between Charles University and different Japanese Universities with emphasis on the younger generation scientists. Besides visiting the group of prof. Amitsuka from Hokkaido University, which we had had intensive collaboration with before, we wished to initiate a collaboration with the group of prof. H. Tou from Kobe University in the field of NMR studies and with the group of Dr. Y. Kousaka from Hiroshima University to get experience with his new laser-diode floating zone furnace for growing single crystals.

Our stay started on Saturday August 20 in Kobe. We were kindly welcomed by prof. Tou and accommodated in a traditional futon guesthouse. The first Sunday, we spent by getting used the Japanese time zone and sightseeing in Kobe including its scenic night view over the city from Mt. Maya. On Monday we arrived to the university, where we were welcomed by prof. Tou and prof. Harima and introduced to their colleagues and students. Because our stay at Kobe University was very short, we discussed the strategy of measuring structural phase transition in  $\text{LaPd}_2\text{Al}_2$  single crystals, sample we had

brought from Prague, using NMR. Besides that, our interested was focused on the laboratory of prof. E. Ohmichi, who presented us how they measure magnetic properties of small crystals using micro cantilevers.

Two days later we moved to Hokkaido University, where we met both new and familiar faces. Our time at Hokkaido University was in sign of preparation for the JPS meeting in Kanazawa, fruitful discussions about both our running and future projects and getting experience with for us new experimental techniques. We performed ultrasonic measurement on  $\text{LaPd}_2\text{Al}_2$  single crystals to study the structural phase transition complementary to the NMR studies in Kobe. In Sapporo, we spent almost three weeks during which we experience the everyday working life and some nice evenings with our colleagues and students. In the weekends we enjoyed sightseeing in Sapporo, Otaru, and Hakodate. To the view from Mt. Maya in Kobe, we could add other amazing scenic views, Mt. Moiwa and Mount Hakodate, especially at sunset, very popular places.

After three weeks, we left the beautiful Hokkaido University Park Campus to attend the JPS meeting in Kanazawa. We had got the opportunity to present our work and to meet and discuss it with colleagues from other, mostly Japanese universities, especially during

poster sessions. Because the JPS meeting took us to a place we would probably never visit ourselves, we tried to find some time for sightseeing. We enjoyed the Kanazawa Castel Park with a fine tea in a traditional tea house.

From Kanazawa, we continued to Hiroshima University. Using the advantage that we traveled during weekend, we stopped in Kyoto and Himeji, beautiful places we have often remembered with a cup of Uji tea, our best souvenirs: tea from Kyoto and teacups from Himeji. When we arrived to Higashihiroshima, Dr. Y. Kousaka and his students took care of us. It was also our pleasure to meet prof. Takabatake, a long-time friend of our colleague, prof. Sechovsky. Although we heard already the first day, that Higashihiroshima was well-known for excellent sake breweries (and visited few of them shortly), we spent most of the time in the laboratories. Our main goal was getting experience with the laser-diode floating zone furnace, because we wished to purchase similar apparatus to our crystal growth laboratory in Prague. Together with dr. Kousaka and his student, we performed several growth experiments and we had to conclude that it would really be worth to have such system in Prague. After one year, we are glad to say, that we have obtained funding for purchasing this furnace and we hope to exchange experience in growing different materials in the future.

Our last visit was again in Kobe where we made a



short stop before going to Kansai Airport and finally back to Prague.

In the end, we would like express gratitude to the J-physics project and to all the groups we visited for their hospitality and friendliness, which went beyond the scientific duties. We spent wonderful six weeks in Japan during whose we met new colleagues, have performed useful experiments, and got opportunity to learn about Japanese culture and cuisine. From time to time we remember our stay with a cup of Sencha or home-made onigiri.



# Ames滞在記

比嘉 野乃花

琉球大学大学院理工学研究科 NMR物性研究室 博士後期課程3年

與儀 護 琉球大学 理学部 准教授

古川 裕次 アイオワ州立大学 エイムス研究所 教授

2016年10月5日から12月28日までの約3ヶ月間、アメリカ合衆国アイオワ州のAmes市にある、アイオワ州立大学・Ames研究所に滞在しました。今回受け入れを快諾していただいた古川裕次先生とは、同年8月に高野山で行われた「J-Physics：若手夏の学校」で初めてお会いしました。懇親会の場で意気投合し、その場で今回の海外派遣制度への応募を決めました。Ames研究所の詳細は、古川先生が別記事で紹介していますので、私は滞在時の生活や様子を書き記したいと思います。

古川先生の研究室では核磁気共鳴（NMR）を用いた研究を行っています。写真にあるように、アメリカ人と中国人のPhDの学生と、中国出身のポスドク、インドからのビジターがおり、（アジア寄りですが）多国籍な研究室であることを新鮮に思いました。月曜日には隔週でミーティングを行い、研究の様子と関連する論文を学生やポスドクが持ち回りで発表を行っていました。研究室では2台の9 T、1台の7.5 Tの超伝導マグネットと1 Tの電磁石を所有しており、ピストンシリンダーを用いた圧力の実験や、希釈冷凍機を用いた極低温までの測定が出来ます。初めの1ヶ月はポスドクの実験の手伝いをして、その後は私の予定していた実験を行いました。実験には主に9 Tのマグネットを使っていました。通学後すぐにトランスファーをして、その液体Heを使ったらその日の

実験は終わるという方式をとっていたので、平日は朝10時頃には全員登校していて、夕方18時頃には帰るという生活でした。休日でも大学に入れないということはなく、実験することができます。今回の滞在中に研究を行ったヘリカル構造をとる反強磁性体 $\text{EuCo}_2\text{As}_2$ と $\text{EuCo}_2\text{P}_2$ の論文がPRBに採択されたので、是非そちらも御覧ください [1,2]。また、研究室では頻繁に実験している学生とその試料合成に関わる方々との議論が行われていました。横のつながりのある充実した研究が行える環境であることを感じました。

Amesの気候としては、冬は寒く大雪が降ると聞いていました。しかし、滞在中は何故かとても暖かく（11月に20度越え）、大雪や寒い日も少なかったため快適に過ごせました。その中でも、起きたら一面雪景色だったこともあり、沖縄ではめったに見られない真っ白な地面に足跡を付けて歩き回ったり、結晶で降ってくる雪を観察したりもしました。11月にThanksgiving Dayという祝日があり、大学も休みになるため、研究室の学生と他州へ行く計画を立てていました。しかし、大雪と重なってしまい断念することになり、残念に思ったことを今でも思い出します。その日はスーパーやバスなどのサービスも全て休みになるため、むしろいい機会だと気持ちを切り替えて実験していました。

[1] Q.-P. Ding, N. Higa, N. S. Sangeetha, D. C. Johnston, and Y. Furukawa, Phys. Rev. B **95** 184404 (2017)

[2] N. Higa, Q.-P. Ding, M. Yogi, N. S. Sangeetha, M. Hedo, T. Nakama, Y. Onuki, D. C. Johnston, and Y. Furukawa, Phys. Rev. B **96** 024405 (2017)



左：古川研の学生，右：古川先生、比嘉、與儀先生

アイオワ州立大学の周りには飲食店等が立ち並んではいますが、娯楽施設が多いわけでは無く、どちらかというと田舎です。歩いていると街中や大学構内に野生のリスやうさぎが活発に活動していました。通学途中で鹿を見たこともあります。観光地と呼べる場所もあり無いとのことでしたが、州都デモインにあるアイオワ州議会の見学や、PRAIRIE LEARNING CENTERでアイオワの地理を学んだり野生のバイソンを見に行ったりして、アイオワの歴史や地理についても学ぶことができます。それでもやはり行くところはあまり無いので、研究するためにはとてもいい環境です。

夏の学校に始まり海外研究から帰ってくるまでの約5ヶ月間、不安に思うことも有りました。入国の際、審査に5時間かかり飛行機の乗り換えに間に合わないかと冷や冷やしたり、帰りの飛行機が飛ばず空港で航空券を取りなおして一泊延長したりと、日常会話もおぼつかないなか対処しないとイケないこともありました。研究や日常生活、文化の違いなど、このような経験が出来たこと喜ばしく思います。私の場合は、夏の学校の懇親会で海外派遣のお話を頂きましたが、このような機会はいつ、どこで得られるかわかりません。少しでも海外での研究に興味のある人が居たら、積極的にこのような機会を得て、経験して欲しいと思います。

最後になりますが、今回受け入れてくれた古川先生とご家族には公私共々気にかけて頂きました。イベントや食事に呼んで頂いたおかげで、楽しく過ごすことができました。ありがとうございます。また、海外派遣に快く送り出してくれた指導教員の

與儀先生、急だったにも関わらず測定試料を提供して頂いた琉球大学の辺土先生、仲間先生、大貫先生やアイオワ州立大学のD. C. Johnstonには、この場を借りて感謝の意を表したいと思います。また、海外派遣の機会を頂いた新学術領域J-Physicsの播磨尚朝代表をはじめとする関係者の皆様にもこの場を借りてお礼申し上げます。後日、古川先生との打ち合わせの場を設けて頂き、更に有意義な議論を行い論文としてまとめることができました。ありがとうございます。夏の学校で頂いた「高野くん」は今でもお守りです。



PRAIRIE LEARNING CENTER にて



## アイオワ州立大学物理学科の紹介と Amesへの誘い

古川 裕次

アイオワ州立大学 エイムス研究所 教授

私の所属するアイオワ州立大学は、米国アイオワ州エイムズ市（人口6万人ぐらいの小さな大学街）にある総合大学で、現在36000名程度の学生が在籍しております。アイオワ州といっても皆さんよくご存じ無いかもしれませんが、“大都会”シカゴのあるイリノイ州の西隣の州です。ちなみに、エイムズからシカゴまでは車で6時間ぐらいの距離です。アイオワ州立大学の物理学科は、1858年の大学創立の12年後の1870年に設立されており、1939年にAtanasoff-Berryコンピュータとよばれる世界で初めてのデジタルコンピュータが作られたところとしても知られています。現在の物理学科は、45名の教員と6名の講師、16名のサイエンティスト、及び35名程度のポスドクが在籍しており、物性や素粒子、原子核、高エネルギー物理、宇宙物理、さらには生物物理などの研究が行われています。物性研究グループは理論・実験家を含めて18名の教員、10名のサイエティストにより構成されており、物理教室の中でも大きなグループとなっています。物性グループの横のつながりは非常によく、常にグループ間で共同研究が行われています。試料合成の専門家である、P. C. Canfield氏やD. C. Johnston氏のグループで作成された試料を、電気抵抗、帯磁率、あるいは比熱測定などを行うとともに、回折実験グループのA. Goldmann氏やR. McQueeney氏によりX線や弾性・非弾性中性子散乱の実験、A. Kaminski氏によりARPES、R. Prozorov氏のグループによるトンネルダイオード共鳴法を用いた磁場進入長などの測定、私のグループによる核磁気共鳴、あるいは、S. L. Bud'ko氏によるメスバウワー分光やM. Tringides氏によるSTM、J. Wang氏

のフェムト秒パルスレーザーなどの様々な測定が行われ研究が展開されています。また、主にバンド計算を行っているB. Harmon氏やK. M. Ho氏をはじめとして、強相関電子系を中心に理論的研究を行っているR. Flint氏やP. Ortho氏との議論も活発に行われています。

大学構内には、マンハッタン計画のためウランの精製を行っていた国立Ames研究所が併設されています。Ames研究所は、米国エネルギー省（DOE）の管轄する米国内に17ある研究所のうちのひとつで、物質科学を中心とした研究を展開しています。2011年に準結晶の研究でノーベル化学賞を受賞されたD. Shechtman教授も所属されています。物理学科の物性関係者の多くの教員は、Ames研究所の研究プロジェクトのメンバーとして参加しており、兼任という形でAmes研究所に所属しております。この繋がりは“研究費”という観点においても非常に重要で、私の場合、現在の研究費のほとんどはDOEのプロジェクトによって賄われています。

ご存知とは思いますが、アメリカの場合、研究費の殆どが人件費に使われます。Ames研究所の場合、ポスドク一人雇うのに年間約1000万円、大学院生一人に500万円ほどかかります。この金額すべてが、給料というわけではなく、Ames研究所のオーバーヘッドや医療保険料（アメリカの医療保険はとても高い!）、院生の場合は授業料も含んだ合計となります。従って、学生やポスドクを雇って研究を行うには、それなりの予算を取ってこないといけません。一方、院生の立場で見えますと、研究室に所属すれば、教官の研究費により授業料や医療保険代が支払われ、

さらに給料（Ames研究所で月2000ドル程度）も支給れることになります。日本の場合と比較すると、学振などで給料をもらえる方を別とすれば、多くの大学院生はほぼ無給で研究をし、さらに、授業料も支払わなければなりませんので、アメリカの大学院生の条件はかなり良いように思えます。大学院進学を希望している学部生の方、アメリカの大学院も考えてみては如何でしょうか。また、現在、大学院生やポストクの皆さん、短期間でも海外で研究を行ってみるのも非常に良い経験となると思います。J-Physicsには3ヶ月間の海外派遣プログラムがあります。そのプログラムを活用されてみてはいかがでしょうか？ 学生曰く、Amesは研究するのにとても良い所だそうです（ほかにすることが無いというのが理由とのこと）。興味のある方は、ぜひご連絡ください。Amesでお待ちしております。





## ローマ大学サピエンツァ校滞在記 ～分光法による新超伝導体の電子状態解明～

水口 佳一

首都大学東京 理工学研究科 准教授

2016年7月～8月にローマ大学サピエンツァ校（以下、ローマ大）物理学科のSaini教授の研究室に滞在しました。Saini教授とは、鉄系超伝導研究（私の博士課程時代）から共同研究を続けており、最近では $\text{BiS}_2$ 系超伝導体や新規熱電材料の局所構造・電子状態の解明を行っています。また、首都大学東京とローマ大はMOUを締結しており、今回はローマ大および首都大からのサポートを受けて滞在了。実は、ローマ大に滞在するのは初めてではなく、2014年にサバティカルを利用して3か月程滞在了。馴染みの街ですので、今回の滞在ではローマ観光はほどほどに、放射光施設と実験室に入り浸りました。

ローマ大は創立700年以上の歴史ある大学であり、エンリコ・フェルミが在籍したことでも知られる大学です。キャンパスはいくつかありますが、私の滞在した物理学科は、ローマの中央駅であるRoma Termini駅から徒歩10分ちょっとのキャンパスにあります。ローマの街は観光地が密集しており、地下鉄に少し乗るとコロッセオやスペイン階段、トレビの泉といった日本人にも人気のスポットにいつでも行けます。しかし、前述のとおり、今回の滞在では放射光実験に加え、ラボで光電子分光を体験したため、朝から夜まで（時には土曜日）実験でした。Sainiグループ大学院

生のParisさん（X線吸収の達人）と、Saini研に滞在中だった岡山大の脇田さん（光電子分光の達人）にサポートしていただいた結果、一つの論文にまとめることができました。

今回の滞在では、卒研生の陣野君が発見した超伝導体 $\text{Eu}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{FBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ の一連の多結晶試料を持参しました。前のニュースレターで紹介させていただいた通り、 $\text{Eu}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{FBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ はSe置換により超伝導が発現します。この起源をX線吸収分光(XAS)と光電子分光(XPS)により解明することが研究目的でした。滞在中にスペインのALBAとフランスのESRFに滞在中、実験を行いました。結果として、本系のSe置換はEuの価数揺動を抑制する効果があり、またSe置換によりBi(S,Se)伝導面内の局所乱れが抑制され、超伝導が発現することを見出すことができました[Y. Mizuguchi et al., PRB 95, 064515 (2017)]。

8月になると、Parisさんはバカンスのためリゾート地の島へいってしまいました。脇田さんと相談した結果、ローマ近郊のティヴォリにあるヴィッラ・デステに観光に行くことにしました。約500個の噴水があるデステ家の別荘です。Saini教授からは「ロマンチックな場所だから、男二人でいかない方がいい。」と言われましたが、美しい庭園を、男二人で満喫できました。



図・ローマ大物理学科ビル前で記念撮影。地上階の展示スペースには若かりし頃のエンリコ・フェルミの写真などがあります。学長ビル前には知恵の神様ミネルヴァ像。観光で訪れたティヴォリのヴィッラ・デステ。



博士研究員の紹介

## Zhaoming Tian

ex-project research fellow, ISSP University of Tokyo

所属研究室代表者

中辻 知 東京大学 物性研究所 教授

I'm a project research fellow in Nakatsuji lab in ISSP, University of Tokyo from 2016.04~2017.03. My research interest includes the discovery an single crystal growth of geometric frustrated magnets, multiferroic materials, and new exotic phenomena under high magnetic field. During staying in ISSP, my research mainly focused on single crystal growth and physical property of pyrochlore iridates.

Supported by the "J-Physics" project, my research work is to discover non-trivial phenomena of emergent states in the pyrochlore iridates with all-in/all-out magnetic domain, main research topic is "Magnetic Field inversion asymmetric response of All-in/All-out domain in Pyrochlore  $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  single crystal", the results is below:

Pyrochlore iridate  $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  with unusual all-in/all-out (AIAO) magnetic ordering undergoes two magnetic phase transitions at  $T_N \sim 32$  K and  $T_{Nd} \sim 15$  K corresponding to the magnetic order of Ir and Nd spin sublattice, respectively. I conduct on research on magnetic field inversion asymmetric behavior of AIAO domain in temperature region ( $T_{Nd} < T < T_N$ ), based on the magnetoresistance and magnetostriction measurement with  $B // [111]$  direction. Using a field cooling procedure into the low temperature phase ( $T < T_{Nd}$ ), single AIAO domain state is produced, then isothermal field dependent magnetoresistance ( $MR$ ) and magnetostriction ( $MS$ ) exhibit an unusual field inversion asymmetric behavior in temperature

region ( $T_{Nd} < T < T_N$ ), contrast to the symmetric magnetoresponse below  $T_{Nd}$ . An asymmetric magnetic domain reversal mechanism might underlie the asymmetric  $MR$  and  $MS$  behavior, driven by the exchange coupling between the AIAO domain and its domain wall after FC process. we remark that the magnetic field response for  $MR$  and  $MS$  shed light the physics of AIAO order in agreement with the AIAO predictions.

During the research work in ISSP, university of Tokyo. I'm very impressive on the group meeting and learned a lot through discussing with our collaborators. We can do a lots of training for experimental techniques and carry out the attractive research topics.



B01: 遍歴多極子による新奇量子伝導相

博士研究員の紹介

## Arvind Maurya

IMR, Tohoku University, Oarai center

所属研究室代表者

青木 大 東北大学 金属材料研究所 教授

I joined the Actinide lab, Institute for Materials Research (IMR), Tohoku University, Oarai center in May, 2016. Before that, I was a PhD scholar at Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India. My research interest is single crystal growth of *f*-electron systems and exploration of magnetism and correlated electron behavior exhibited by them. At Oarai, I have been involved in crystal growth of uranium and thorium compounds, study of their bulk physical properties, with an emphasis on the Fermi surface properties by means of de Haas-van Alphen (dHvA) effect. In addition to research work, I enjoyed the rich culture of ocean front town of Oarai, composed of local festivals, shrines, and anime characters.

The potential gradient set by the absence of inversion symmetry in a crystal introduces antisymmetric spin orbit coupling, lifting the spin-degeneracy of the Fermi surfaces in the material. Such an effect can be experimentally observed by quantum oscillation techniques, like the dHvA effect. Band structure calculations, in tandem with the dHvA effect has potential to establish the three dimensional Fermi surface topography, as well as band and momentum resolved electron effective mass.

We have successfully grown the single crystal of  $\text{U}_3\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  by the Bridgeman method, which

crystallizes in  $\text{Y}_3\text{Au}_3\text{Sb}_4$ -type non centrosymmetric cubic cell in the space group *I*-43d (#220). The bulk physical properties of magnetization, heat capacity, and electrical resistivity are in conformity with previous studies done on polycrystalline samples. Low residual resistivity ( $\sim 1 \mu\Omega \text{ cm}$ ) and high residual resistivity ratio ( $\sim 300$ ), indicated high crystal quality, which is also reflected in sharp Laue spots in the single crystal x-ray diffraction.

$\text{U}_3\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  is a moderate heavy fermion paramagnetic system with Sommerfeld coefficient,  $\gamma$ , of  $95 \text{ mJ/U-mol K}^2$ . A marginal dependence of the dHvA frequencies on orientation of the crystal with respect to applied magnetic field indicated the presence of Fermi surfaces with spherical topology. This was further confirmed by the band structure calculations performed by Prof. Harima. Theoretically, as large as 12 Fermi surfaces are expected in  $\text{U}_3\text{Ni}_3\text{Sn}_4$ . The multitude of the Fermi surfaces is partially due to the spin orbit coupling, which leads to only small gaps between them in *k*-space, and henceforth conditions for magnetic breakdown are easily met, which is demonstrated by large number of split peaks in the frequency spectrum of dHvA oscillations. The temperature dependence of the dHvA oscillations reveal cyclotron effective masses ranging from 7 to  $35 m_0$ .

[1] E. Bauer and M. Sigrist: *Non-Centrosymmetric superconductors* (Springer, Heidelberg, 2012) Lecture Notes in Physics, Vol. 847.

[2] T. Takabatake et al., J. Phys. Soc. Jpn. 59, 12 (1990).

## 博士研究員の紹介

## 石塚 淳

京都大学 理学研究科 特定研究員

## 所属研究室代表者

## 柳瀬 陽一

京都大学 理学研究科 准教授



今年度より博士研究員として本領域に参加しております京都大学の石塚と申します。この度は参画の機会をいただき感謝しております。以下で研究内容など簡単に自己紹介をいたします。

私は、これまで新潟大学の野義章教授の下で、多軌道強相関電子系のバンド繰り込み効果や超伝導について研究しておりました。最近まで取り組んでいたのが鉄系超伝導体FeSeと呼ばれる物質の超伝導発現機構についてです。この物質は圧力を掛けることや、薄膜化することでネマティック相転移（より一般には $O_{x2-y2}$ 四極子秩序）が壊れて $T_c$ が一桁も変化するところが興味深い点です[1,2]。とりわけ鉄系超伝導体では、磁性相と四極子秩序相との関係性が指摘されておりますが、FeSeはあたかも両者が独立に存在するような温度—圧力相図を示しています（図1a）[1]。

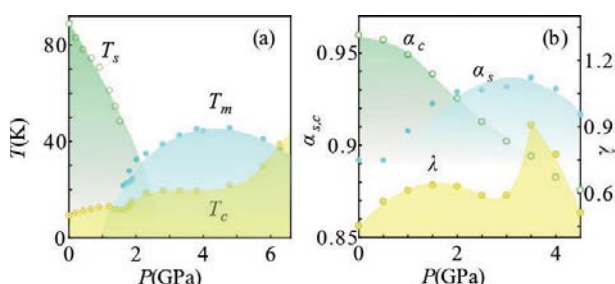


図1. (a) FeSeの温度—圧力相図。(b) 数値計算で得られたストナー因子 $\alpha$ 、超伝導固有値 $\lambda$ の圧力依存性。 $\alpha$ と $\lambda$ は転移温度の指標と解釈することができる。

この実験に触発され、我々は最近、圧力下の第一原理計算に基づいた有効モデルの解析を行い、実験の

相図を定性的に説明する相図を得ました[3]。高压で安定となる磁気秩序の起源はSe原子がFe面から離れることによるバンド分散変化で説明することが可能で、LaFeAsPでPをOに置換する効果[4]と基本的には同様です。低压で安定となる四極子秩序の起源は、現在論争が続いております。超伝導の圧力依存性としては、数値計算によって二重ドーム構造が得られまして、ギャップ構造は低压でホール面、高压で電子面の一部にノードが入りかけるnodal-s波です。

また、鉄系超伝導体LaFeAsO<sub>1-x</sub>H<sub>x</sub>では大域的な空間反転対称性の破れた相が見つかっています[5]。この相はFeとAsが逆方向に変位するもので、これを自然に説明する最低次の多極子は奇パリティの電気八極子なので、現在これによる機構を検討しています。すなわち、Fe副格子に位相反転した電気四極子が乗ることで電気八極子とみなすことができ、Asが電荷勾配によって対称点からずれる仕組みです。この奇パリティ多極子は電子格子相互作用と横軌道感受率の結合によって起こります。また、鉄系と同じ構造を有するBaMn<sub>2</sub>As<sub>2</sub>においても大域的な空間反転対称性を破る磁気十六極子の可能性が理論的に予言されております[6]。

このように鉄系研究の側面からも領域に関わる部分が見て取れます。今後はp、d、f電子系の奇パリティ多極子や反対称スピン軌道相互作用の繰り込み効果の研究を通して領域の研究に貢献したいと考えております。

[1] J. P. Sun *et al.*, Nat. Commun. **7**, 12146 (2016)

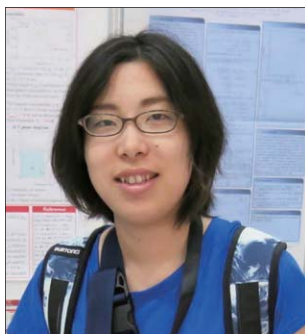
[2] Q. Y. Wang *et al.*, Chin. Phys. Lett. **29**, 037402 (2012)

[3] J. Ishizuka Ph. D thesis, Niigata University (2017)

[4] K. Kuroki, Solid State Communications **152**, 711 (2012)

[5] M. Hiraishi *et al.*, Nat Phys **10**, 300 (2014)

[6] H. Watanabe and Y. Yanase, arXiv:1705.10349



C01: 拡張多極子による動的応答

博士研究員の紹介

## 田端 千紘

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

所属研究室代表者

中尾 裕則 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

北海道大学在学中のある日、研究室の指導教官の先生が何の前置きも無しに、私含む学部4年生に尋ねました。「原子炉、行ってみたい?」どうやら研究用原子炉で中性子回折なる実験をするとのこと。4年生で特に熱心に本を読んでいた方ではなかった私は、その程度の知識しか持ち合わせていませんでしたが、何だか面白そう、と思ったので「行ってみたいです」と即答したのでした。

そうして連れて行ってもらった東海村の3号炉で、初めて見る研究のための大規模施設のスケールに圧倒され、量子ビーム実験の面白さに出会いました。その後も、SPRING-8やJ-PARC、Oak Ridge National Laboratoryなど国内外のビーム施設を訪れる多くの機会に恵まれ、研究室の先輩からは「ビーマー田端」という微妙なセンスのあだ名を頂きました。特に、最も頻繁に訪れたPhoton Factoryでは、半人前の学生でも自分の手を動かして試行錯誤しながら放射光実験ができるという貴重な環境にあり、非常に多くのことを学ぶことができたと思います。

ですから、学位取得後にPhoton Factory (PF) のある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で本領域の研究員として採用して頂いたときは、感慨深いものがありました。主な研究対象は4f,5f電子系金属間化合物で、特に局所反転対称が破れた系がターゲットです。これらの物質で期待される、金属における新奇な電気磁気効果や奇パリティ多極子を微視的にとらえることを目指しています。手法は共鳴X線散乱をメインに結晶構造解析、XMCD、X線小角散乱などを行っています。特に、中性子および $\mu$ SR実験を国内で行うことができないウラン化合物において、放射光でその物

性に迫っていきたいです。

昨年4月からPFで研究を始めてからは、放射光実験の難しさ（信号が見えないとどうしようもない、限られたビームタイムで実験を行わなければならない等）に直面する日々の連続で、なかなかうまくいかないことも多いです。特に、信号が見えない、というのが曲者で、「この物質を調べたら面白いのではないか」と思って実験をしてみても、試料からの信号がどういうわけか見えないと、先に進むことができません。学生時代は信号が見えないことで有名な $\text{URu}_2\text{Si}_2$ の隠れた秩序をメインに研究していたので、信号が見えない実験に対してある程度の耐性のようなものは持っていますが、それでも少しがっかりしてしまうことはあります。その反面、信号が見えた時の嬉しさはひとしおで、ビーム実験っていいなと思う瞬間でもあります。今後も、この嬉しい瞬間のために日々励んでいきたいです。

最後に簡単に自己紹介をいたします。出身は北海道の江別市という町です。札幌市の隣とは思えないほど大変のどかな田舎で、牧草ロール作りを間近で見ることができます。この江別市から北大がある札幌市まで、学生時代に片道15kmの自転車通学を始めたことをきっかけに、サイクリングが趣味の一つになりました。良い研究をするためにも、好きなお酒をセーブし過ぎることなく楽しむためにも、日頃の運動不足解消は重要ですから、今後も続けていきたいと思います。因みに、犬派でも猫派でもなく、鳥派です。

未熟者ではありますが、本領域での活動を通して研究者として成長し、プロジェクトに貢献していければと思っていますので、どうぞよろしくお願いいたします。



## 博士研究員の紹介

## 柳 有起

明治大学 理工学部 博士研究員

## 所属研究室代表者

楠瀬 博明 明治大学 理工学部 物理学科

平成28年4月より明治大学楠瀬博明研究室で新学術領域「J-Physics:多極子伝導系の物理」のPDとして研究に従事しています。自己紹介を兼ね、略歴・これまでの研究・現在遂行している研究について、本新学術領域との関係に触れつつ簡単に以下に述べます。

私は新潟大学で学位を取得した後、学振PDとして平成24年3月まで同大学に在籍し、鉄系超伝導体の電気四極子秩序や超伝導発現機構に関する理論研究を主に行っていました。その後、平成24年4月から1年間、東京大学物性研究所・上田和夫研究室で特任研究員を経験しました。上田研では副格子自由度を有する系における磁性や超伝導、Mott転移について研究をしていました。単位胞に複数の原子を含む系としては蜂の巣構造やジグザグ鎖構造が代表的で、本新学術領域でもこのような構造を含む系を新奇多極子秩序、超伝導の舞台として研究されている方が多数おられるようです。

平成25年4月から平成28年3月まで東京理科大学・半澤克郎研究室の嘱託助教として教育・研究に従事していました。半澤先生とは近藤半導体 $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$  ( $\text{T}=\text{Fe}, \text{Ru}, \text{Os}$ )の研究を行っていました。この物質ではCeサイトがジグザグ鎖を形成していることに起因して、反対称スピン軌道相互作用が交替的な形で存在していることが知られています[1,2]。本新学術領域の公募班として高畠先生がその効果の実験的解明に取り組んでおられます。

明治大学に着任して1年が経過した現在は、

$\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ という物質の電気磁気効果(ME効果)を研究しています。この物質が(共線的)反強磁性秩序状態でME効果を示すことは古くから知られていたのですが、最近の単結晶試料を用いた実験によって新奇な振る舞いが観測されたので[3]、その機構を理論の立場から明らかにすることを目的としています。 $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ はME効果を示す典型物質である $\text{Cr}_2\text{O}_3$ と同様、磁性イオン(Coイオン)が蜂の巣構造を形成しています。そのため、共線的反強磁性秩序が実現すると空間・時間反転対称性の両方が破れ、線形ME効果が発現します。しかし $\text{Cr}_2\text{O}_3$ とは異なり、磁気構造の対称性が低いため磁気点群による議論のみではME効果に関して少ない情報しか得られません。よって、 $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ におけるME応答の振る舞いを理解するには微視的な理論の構築が必要不可欠で、現在、楠瀬氏や北大の速水氏と共に取り組んでいるところです。

自己紹介を兼ねてこれまでの研究や現在遂行している研究について上で述べました。本新学術領域では奇パリティ多極子秩序やME効果などを包括的に理解したいと考えています。

とりとめのない文章になってしまいましたが、少しでも本新学術領域のお役に立てるように努力します。今後ともよろしくお願い申し上げます。

[1] Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 014703 (2014).[2] S. Hayami, et al., Phys. Rev. B **90**, 024432 (2014).[3] N. D. Khanh et al., Phys. Rev. B **93**, 075117 (2016); N. D. Khanh, Ph. D thesis Tohoku Univ. (2015).



C01：拡張多極子による動的応答

#### 博士研究員の紹介

## 飛田 豊

弘前大学大学院 理工学研究科 物性理論研究室

所属研究室代表者

御領 潤 弘前大学大学院 理工学研究科 准教授

### 研究履歴

2010年3月 北海道大学大学院理学院

宇宙理学専攻博士後期課程 修了 博士（理学）

2010年4月- 北海道大学大学院理学研究院 専門研究員

2012年6月- 北海道大学大学院理学研究院 学術研究員

2016年4月- 弘前大学大学院理工学研究科 研究機関研究員

### 自己紹介

2016年4月より新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」のポスドクとして、研究領域を物性物理学へと広げる決意のもと、弘前大学の御領さんの研究室でお世話になっております、飛田と申します。弘前大学に来る前は、北海道大学の素粒子論研究室に在籍しておりました。まずは自己紹介を兼ねて、これまでの研究について説明いたします。

北大では主にニュートリノに関する研究をしていました。ニュートリノはとても質量が小さいために、地球の直径程のマクロなスケールで量子論的な効果であるニュートリノ振動と呼ばれる現象を引き起こす特徴的な素粒子です。我々は更に、ニュートリノがその小さな質量によって、フェルミの黄金律への有限サイズ補正という形で大きな量子効果を引き起こす事を明らかにしました。この効果は、同じように小さな有効質量を持つ物質中の光に対しても重要となります。したがって、この補正はフェルミの黄金律が用いられている様々な分野で重要となりえます。こういった観点から、我々は現在までに高エネルギー物理学だけでなく、光合成や太陽コロナ加熱などでもこの有限サイズ補正が大きな寄与をしていることを示してきました。このように、場の量子論の基本的な問題である

ともに、自然現象や実験で重要となるような問題に興味を持って研究を進めてきました。

この度、研究分野を物性へと広げたわけですが、物性分野では実験結果による示唆や制約が素粒子よりも遥かに豊かつ厳しい事をこの1年間肌で感じました。理論分野の人間としては、実験で比較的早く確認できるというのは、やりがいがあるともに恐ろしくもあります。面白い結果を出せる様に努力を重ねていく所存です。

以下、簡単に私自身について

出身：茨城県

趣味：釣り（特に川、主なターゲット：ウナギ、タナゴ）

サッカー（プレイも観戦も）

嫌いな食べ物：野菜、

### 本領域で目指している研究テーマ等について

現在、トポロジカル項を起源とするフィードバック効果による超伝導状態の安定化や、磁場によって引き起こされるトポロジカル相転移現象の解析などに取り組んでおります。現状で扱っているのは、基礎的な問題に留まっておりますが、今後これらの結果を基として、超伝導状態だけでなく量子ホール系やスピンホール系へと拡張を行い、「J-Physics」の『J』の自由度を生かした物理を探索する事で、本領域の活動に貢献していきたいと考えております。

まだまだこの分野の知識が豊富ではありませんが、研究会やスクール等を通して学んでいき研究へと活かしていきたいと考えておりますので、どうぞよろしくお願いいたします。



## 博士研究員の紹介

## 船島 洋紀

神戸大学 大学院理学研究科 特命講師

## 所属研究室代表者

## 播磨 尚朝

神戸大学 大学院理学研究科 教授

平成28年4月より神戸大学理学研究科の播磨研究室で、新学術領域「J-Physics:多極子伝導系の物理」を主たる業務とした特命講師を拝命し、研究に従事しています。

簡単に略歴を述べますと、大阪大学にて柳瀬章氏に師事をし、学位を取得後、東京理科大学理工学部物理学科にて嘱託助教として赴任後、阪大の吉田博研究室に異動、現職に至ります。現在までは、主として、実験グループと協力して第一原理計算電子状態計算を用いて、物質のもつ熱電特性を予測・説明を行う研究を行ってきました。

熱電材料について簡単に述べさせていただきますと、実用化という意味では、熱電材料は、1953年のJ. Goldsmidによる $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ の発見を実用化の嚆矢として現在まで続く非常に歴史の長い研究分野です。長らくエネルギー変換効率が伸び悩んだ分野ではありますが、1990年代後半以降、ナトリウムコバルト酸化物系材料[1]やスクッテルダイト系材料、クラスレート系材料など新しいコンセプトに基づく多数の物質群がより高い熱電特性を持ちうる事が理論的にも実験的にも示唆され、従来の熱と電気のエネルギー変換技術に取って代わることが現実味を帯びてきました。現在、扱われている物質群は従来型の縮重化合物半導体のみならず、強相関電子系、有機材料など極めて多岐にわたります。私自身は、過去の研究にて、デラッフォサイトと呼ばれる酸化物系の $\text{CuAlO}_2$ やカルコパイライト系材料 $\text{CuGaO}_2$ や $\text{CuGaTe}_2$ などの酸化物あるいはカルコゲン系材料およびハーフホイスラー材料などを扱ってきました。また、近年特に注目されている高効率熱電材料におい

ては、電気伝導度およびゼーベック係数を向上させることも視野にいらしていますが、それと同時に rattling などを用いて格子熱伝導率を低下させる事に重きを置きます。格子熱伝導率には、フォノンの非調和項が重要な役割を果たします。第一原理計算を用いたフォノンの非調和項の計算は一般的には、非常に計算資源を多く必要とします。しかし、近年の計算機のめざましい発達により、熱電材料のターゲットとなる物質群に対しても計算ができるようになってきました[2]。そこで、このような新しい計算手法を用いて、電子の寄与する項に加えて、フォノンの寄与についても計算を行ってきました。

神戸大学に赴任して1年が経過した現在では、大きく分けて2つのテーマで研究を行っています。第一には従来から行っている強相関電子系を含む高効率熱電材料の探索を大阪大学や大阪府立大学などと共同で研究を行っています。もう一つは、 $f^1$ や $f^2$ 系の希土類化合物、たとえば $\text{RMg}_3$ や $\text{RInAg}_2$  ( $\text{R}=\text{Ce}, \text{Pr}$ ) をターゲットとして、研究を行っています。 $4f$ 電子は一般的に局在した軌道をもち、これを1電子描像であるバンド計算においては、 $\text{LDA}+U$ やLocal Orbitalを用いて記述します。当グループでよく用いる $\text{LDA}+U$ においては、電子密度行列を定義して計算を行います。前述したとおり、電子密度行列はあくまで、1電子描像に基づいた物理量であるため、Hund ruleに従って多電子状態を構成する、LS結合描像の結晶場固有状態と直接対応しません。むしろ、 $j-j$ 結合描像が与える状態に対応します。 $j-j$ 結合を用いた、議論ではこのように1電子描像に近い議論が行える反面、たとえば結晶点群が落ちた場合、その落ちた結晶点

群の特性が反映された結晶場固有状態が扱えないという問題があります。バンド計算と多体問題のモデル計算は実際の物質の電子状態について異なるアプローチを取りながら、うまく説明してきました。しかし、我々の現在テーマとしている物質はその2つの異なるアプローチの得意とする分野の狭間にあります。このような残された課題については、バンド理論と多体問題の専門家の協力が必須となります。そこで、現在は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の倉本氏と協力して、とくに $f^2$ 系を中心に今までバンド理論でうまく扱えなかった物質の電子状態の理解を目指しています。現在興味を持っていますのは、Coxによって提唱された多チャンネル近藤効果で[3]、現在議論を重ねている手法をこれらの研究へつなげたいと考えています。

以上、簡単ですが、自己紹介と過去の研究と現在取り組んでいる事について述べさせてもらいました。特に、多極子に関しては浅学の身ではありますが、J-Physicsの皆様におかれましてはこれからどうぞよろしくお願い致します。

- 
- [1] I. Terasaki, Y. Sagano and K. Uchinokura, Phys. Rev. B **56**, R12685(1997).  
[2] T. Tadano *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **26**, 225402 (2014).  
[3] L. Cox and A. Zawadowski, Advanced Physics, **47**, 599 (1998).

# 「ふっと振り返ると」

## 鬼丸 孝博

広島大学大学院 先端物質科学研究科 准教授

何の因果か分かりませんが、この企画の一番手を務めることになりました。これまで様々なところを転々としてきたという経緯もあり、このような機会をいただいたと理解しています。まだまだ若手のつもりでいるのですが、多少は歳を重ねてもきましたので、若い皆さんが進路を考えるためのヒントとなれば、うれしいです。

さて、私が磁性の研究を始めたのは、中性子散乱とメスバウアー分光を専門とする東北大学金属材料研究所の山口泰男教授の研究室でした。修士課程の研究テーマは、希土類磁性体 $\text{RB}_2\text{C}_2$ の単結晶を自ら作製し、磁化や比熱を測定して、その磁性を調べることでした。さらに、中性子散乱実験を行い、それらのデータを解析して結晶構造、磁気構造、および結晶場準位について調べました。磁性の実験的手法と解析について学ぶ貴重な機会となり、振り返ってみると、現在の私の研究手法と重なる部分が多くあります。また、Ce化合物だけでなく、Prを含む系も研究対象であったことは、その後に博士論文のテーマとなった $\text{PrPb}_3$ や現在のPr1-2-20系の研究につながっています。

修士課程を修了したのち、セラミック電子部品のメーカーに就職し、工場の製造技術に2年間携わりました。次々に投入される新製品の製造仕様を決め、24時間体制の生産ラインへのせるというものです。工程の途中で発生する様々な問題を解決し、不良品が出たらその原因を調べるのも大切な仕事でした。各工程の担当者のところや協力工場などを日夜行ったり来たりしながら情報を収集して、高い歩留まりを維持することが職務でした。民間企業で働くことによって、日本の経済がどのように回っているのかを垣間見ることができましたし、また利益を上げることの難しさも日々感じさせられました。国公立大学の教育・研究活動は、その多くの部分が税金によって支えられていますので、我が国の経済活動に対する意識を忘れてはいけないと思っています。

そうした2年間の民間企業での勤務を経て、東京大学物性研究所の榊原研究室の研究生となり、同研究室の博士課程後期に入学しました。私にとって大きな転換期となりました。会社を辞めた理由は大小いくつかありますが、基本的には、大学で研究することに対する強い憧れがありました。自分が疑問に感じたことに対して、自身のオリジナリティーを持って主体的に向き合い、好奇心に従って研究するのは、民間企業ではなかなか難しいことでしょう。大学に戻った時には、まずは自分自身ひたむきにやれるだけやってみて、あとはまわりの評価を受け入れよう、という覚悟でした。幸い、多くの方々にご支援いただき、希土類化合物 $\text{PrPb}_3$ の四極子秩序に関する研究で学位を取得しました。その後は、東京大学物性研究所の佐藤卓准教授（当時）の研究室に雇用研究員として1年半在籍した後、縁あって広島大学大学院先端物質科学研究科の高畠研究室に助手として着任しました。5年後に准教授に昇進し、現在に至っています。

まだゆっくりと振り返る時期ではない、というのが正直なところですが、自分の判断に責任を持って主体的な選択ができれば、たとえ苦労してもあまり後悔はないように思います。自分自身そうありがたいですし、好奇心に従って新しい問題に取り組む若い皆さんと一緒に研究して、お互いに成長できれば嬉しいかぎりです。

## ■ 一研究者のことは

本コーナーでは、大学や研究機関に所属する現役の研究者からのメッセージをお送りします。

どうして研究の道を進んだのか、研究者だからこそ味わうことのできる喜び、それと対をなす苦悩や葛藤など、将来の進路を考えている大学院生や博士研究員の皆さんの参考になるのではないかと、ということで企画しました。もちろん、環境は人それぞれ異なりますが、何かのヒントが含まれているかもしれません。

## 2017年10月からの領域関連行事

### 第11回物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)

J-Physics主催

日 時: 2017年11月17日 (金) ~ 18日 (土)  
場 所: 東京大学物性研究所 (千葉県柏市)  
<http://www.org.kobe-u.ac.jp/ryoikioudan/>

### トピカルミーティング (URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>、拡張多極子関連)

J-Physics主催

日 時: 2017年11月 ~ 2018年3月 (未定)  
場 所: 未定

### J-Physics領域全体会議 (成果報告会)

J-Physics主催

日 時: 2018年3月15日 (木) ~ 17日 (土)  
場 所: 東京大学物性研究所 (千葉県柏市)

### 日本物理学会 (2018年第73回年次大会)

日 時: 2018年3月22日 (木) ~ 25日 (日)  
場 所: 東京理科大学 野田キャンパス (千葉県野田市)  
<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.php>

### J-Physics領域全体会議 (後半キックオフ)

J-Physics主催

日 時: 2018年5月24日 (木) ~ 26日 (土) (予定)  
場 所: 東北大学 片平キャンパス (仙台市)

### 国際若手サマースクール・試料育成国際会議

J-Physics主催

日 時: 2018年6月24日 (日) ~ 30日 (土)  
場 所: 淡路夢舞台 (兵庫県淡路市)

### 12<sup>th</sup> PRAGUE COLLOQUIUM ON f-ELECTRON SYSTEMS

日 時: 2018年7月4日 (水) ~ 7日 (土)  
場 所: Faculty of Mathematics and Physics, Charles University (Prague, Czech Republic)  
<http://kfkf.cz/pcfes/>

### ICM2018 International Conference on Magnetism

日 時: 2018年7月16日 (月) ~ 20日 (金)  
場 所: San Francisco Marriott Marquis (San Francisco, CA, USA)  
<http://www.icm2018sf.org/>

### B01-D01合同トピカルミーティング「物質探索最前線 (仮)」

J-Physics主催

日 時: 2018年8月上旬  
場 所: 首都大学東京 南大沢キャンパス (東京都八王子市)

### 日本物理学会 (2018年秋季大会)

日 時: 2018年9月9日 (日) ~ 12日 (水)  
場 所: 同志社大学 京田辺キャンパス (京都府京田辺市)



Information

事務局からのお知らせ

## 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 #04

Physics of Conductive Multipole Systems

September

## 編集後記

本号も無事出版することができ、まずは原稿を執筆して頂いた皆様、そして編集作業に携わって頂きました皆様に深く感謝いたします。原稿の依頼は早めにとおいつつも、なるべく旬な話題を提供すること、全体のバランスを考えると、そして何より編集委員による情報収集力にかかっており、時間のかかるものだとは本号を担当させて頂いたことで改めて分かりました。今後も編集委員会としては、早めの原稿依頼を心がけてまいりたいと思いますが、皆様にも何卒ご理解を頂きますようお願い申し上げます。それと同時に是非とも、皆様にはNewsletterへの積極的な寄稿をお願いします。研究成果紹介(論文紹介)や海外滞在記等、まずはお気軽に原稿をお寄せ頂き、そのNewsletterの記事が新たな研究や交流の発展につながり、領域の活動がより活性化すればと考える次第です。

最後に、原稿をご依頼させて頂きながら気付いたのですが、実験装置や試料、風景についての写真は多々お送り頂くものの、意外にも皆様で自身の写真をあまり持っていらっしゃる方が多いと感じました。考えてみると、いわゆる「自撮り」でもしないと、なかなか残らないものかもしれません。私自身もできれば「自撮り」ではなく、日頃から研究室のメンバーでお互いにリラックスした表情や実験風景等の写真を撮っておこうと思った次第です。

(T.D.M.)



# 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4号

2017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/>