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)　J-Physics：多極子伝導系の物理　領域番号：2704

NEWS LETTER

J-Physics

Physics of Conductive Multipole Systems

#02
September

NEWS LETTER
J-Physics
Physics of Conductive Multipole Systems
#02
September

CONTENTS

巻頭言 …… 播磨 尚朝 02

研究ノート

多極子の変遷とこれから …… 楠瀬 博明 04

実験による多極子の検証の進展 …… 網塚 浩 09

公募研究班紹介

A01 …… 14

B01 …… 22

C01 …… 28

D01 …… 34

学会報告

SCES2016 …… 石田 憲二 39

平成 28 年度領域全体会議 …… 41

ポスター賞受賞者の研究紹介 …… 43

J-Physics 理論討論会 …… 楠瀬 博明 50

J-Physics 若手夏の学校 …… 野原 実 51

ボルチモアの結晶合成サマースクールに参加して …… 小林 夏野 53

神戸ミニワークショップ …… 藤 秀樹 54

領域関連行事 …… 55

事務局からのお知らせ …… 56

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

領域２年目を迎えて

播磨　尚朝
領域代表　神戸大学大学院理学研究科

「J-Physics：多極子伝導系の物理」が発足して１年余りが経過しました。今年度４月からは、新学術領域研究の特徴の一つである公募研究が活動を開始しました。また、領域全体会議、理論討論会、若手夏の学校などを開催しました。

公募研究は、今年度からの２年間と平成30年度からの２年間の２回に分けて設定されています。今回は、実験的研究10件と理論的研究８件の採択予定数に対して78件の応募があり、13件の実験的研究と10件の理論的研究が採択されました。これらの研究内容は、領域全体会議でも紹介されました。

５月に北海道大学で開催した全体研究会では、公募研究の紹介の他に、1-2-20系と呼ばれるPr化合物の最近の研究をトピカルセッションとして取り上げました。また、物質・材料研究機構の広報室長である小林隆司さんをお招きしてアウトリーチセミナーとして特別講演を行っていただきました。物性物理の研究者はアウトリーチ活動に対して苦手意識を持っている方が多いと思いますので、この講演は大変有意義だったのではないかと思います。講演後は、野原さん（項目D01計画研究代表）が、ご自身の高校への出前講義の内容について個人的に指導を受けました。小林さんには引き続き、私どもの領域のアウトリーチ活動への支援をお願いしたいと考えています。

６月には、理論討論会として、本領域研究に関連する理論的な問題点を討論する会合を明治大学で開きました。私たちの新学術領域の目指すことの一つに、従来のｄ電子系とｆ電子系の研究の融合がありますが、理論的研究はｄ電子系とｆ電子系の違いが少なく、共通認識を得やすいように思います。この研究会の討論を経て理論研究者が先導する形で２つの研究分野の融合が進んでいくことを期待しています。

今年度の最大の行事である若手夏の学校は、８月８日より５日間にわたり高野山大学で行われました。アイオワ州立大の古川先生をはじめとした15名の先生方に講義と講演をお願いしました。領域外からの学生の参加も多く、宿坊での合宿生活の中で互いの研究の交流や世代間の交流が活発に行われました。

領域の活動は、以上の様な「集う形の活動」ばかりではありません。昨年度末には、領域研究推進に大きく貢献する共用機器として、低温物性測定装置（東北大大洗）、高磁場物性測定装置（東大物性研）、1軸角度回転機構付き希釈冷凍機（神戸大）が設置されました。試運転を経て本格共用が始まりました。神戸大では希釈冷凍機の試運転を完了した4月にはお披露目を兼ねた国際ワークショップを開いています。

国際活動支援も活発に行なっています。若手の短期派遣は、米国に１名、チェコに２名、ドイツに２名、フランスに１名の計６名を行っていて、さらに米国に１名の希望を聞いています。若手の招へいは、チェコからの２名が滞在中です。この他にも、米国の試料育成に関するサマースクールに2名を派遣しました。領域設定の期間内に約30名の若手の派遣/招へいを計画しています。今後も若手からの意欲的な研究計画の応募を期待しています。派遣された若手研究者の報告会なども企画していきます。

領域として若手育成や国際活動に力を入れるのはもちろんですが、これに加えて領域内の研究交流を通じて大きな研究成果を出すことが求めれていることは間違いありません。個別の研究の進展もちらほらとは聞いていますが、いずれまとまった大きな成果を聞く機会があるでしょうから、それを楽しみにしています。

さて、国際活動に関連して少しプラハについて触れようと思います。プラハ大学と呼ばれることもあるプラハのカレル大学は、ニュースレターの第１号でセコフスキー（Sechovský）教授が寄稿しているように、私たちの新学術領域と関係が深いです。すでに、日本から２人の若手を派遣しており、プラハからは２人が日本を訪問しています。来年の７月には強相関電子系の国際会議（SCES2017）が開催されることもあり、多くの人が訪れることと思います。

今年の３月末から４月にかけて、私と青木さん（項目B01計画研究代表）がカレル大学を訪問し、セミナーなどを行いました。私は３回目のプラハ訪問です。カレル大学は神聖ローマ皇帝カレル４世が1348年に創立した歴史のある大学です。カレルはドイツ語ではカール、フランス語ではシャルル、英語ではチャールズとなり、大学の英語名がCharles Universityとなります。プラハ市内を流れるヴルタヴァ川に架かる古く有名な橋もカレル橋と呼ばれています。

市の中心部の多くの人が行き交うカレル橋のたもとに、400年以上前にヨハネス・ケプラーが住んでいた建物があります。その奥には小さいながらケプラー博物館もあるのですが、ほとんどの観光客はその存在に気がつきもせずに通り過ぎていきます。ドイツ人であるケプラーは、プラハで天体観測を行なっていたデンマーク人のティコ・ブラーエに招かれて、1599年にプラハに移住します。1601年にティコは死んでしまいますが、ケプラーは大観測家であるティコの膨大な天文学のデータを基に、ケプラーの法則を発見します。その功績か、プラハにはケプラーを冠した通りもあります。

この他、旧市街の裏通りを歩いていると、エルンスト・マッハのモニュメントに出合います。オーストリア人のマッハはカレル大学在職中に超音速の論文を発表しています。また、チューリッヒ大学の助教授を務めていたアルベルト・アインシュタインを教授として最初に招へいしたのもカレル大学です。この様に、プラハでは多くの物理学者が活躍した歴史があります。プラハの町を歩いていると、多くの物理学者を招いて学問を発展させてきた伝統の空気を感じることが出来ます。

実は、チェコの人達にこれらの物理学者の話をすると、彼らは必ずしも良い顔はしません。活躍したのはチェコ人ではないからです。カレル大学もチェコという国と同じように実は少々複雑な歴史があり、ドイツ語圏の教授を迎え入れやすい雰囲気があったようです。アジアの東の果てから見れば、ヨーロッパは一つの様に思いがちですが、プラハはスラブとゲルマンとラテンの３つの民族が交錯する地でもあります。古くから異民族＝異文化が交流し、文化を発展させてきた土地でもあるのでしょう。ウイーンなどと並んでプラハが音楽の地として有名なこととプラハで過ごした著名な物理学者がいることとは、あながち無関係ではないでしょう。

いまは、プラハは観光客であふれています。共通の言語は英語となり、さらに多くの文化圏の人たちが訪れる町になりました。観光ばかりでなく、音楽や学問の交流を目的とした人たちもたくさんこの土地を訪れていると思います。私たちの分野でも国際活動支援班による若手派遣や、来年のSCES2017などの機会を通じて、より一層と国際交流を深めて、より良いより多くの研究成果が産まれてくることを願っています。

多極子の変遷とこれから

楠瀬　博明
明治大学 理工学部　准教授

1　はじめに

本新学術領域はキーワードとして「J-Physics」と「多極子伝導系」を掲げている。前者は多分に士気高揚の意味をもつとして、本題の後者について領域全体で概念の共有を促すようなものを書きなさい、というのがニュースレター編集委員からのお達しである。

「多極子伝導系」と聞いて思い浮かべるものは人それぞれであろうし、そもそも多極子がなぜそれほど重要なのか、と思われる方もおられるかも知れない。これまで「高次」という側面を強調しすぎたために、多極子というとなにやらオタク的な雰囲気が漂い、一部のマニアの研究対象のように考えられてきたきらいもある。本小稿では、多極子という見方が電気や磁気がからむ物性現象を一般的かつ包括的に取り扱うことのできる極めて有用な概念であることをお伝えすることで、そのような見方を足がかりにして、従来の謎に迫る新たな視点と新しい物性現象の開拓に繋がるきっかけを提供できればと考えている。

2　電気磁気特性と多極子展開

固体物性とくに凝縮電子系研究の一つの醍醐味は、物質中の電子が持ち得る多様な自由度が析出する物質や現象を見出し、理解し、操ることであろう。このような動機づけのもとで、電荷偏極による誘電体、電荷の流れによる電気伝導、環状電流による磁性などの巨視的な古典電磁気学に留まることなく、電子軌道やスピンという物質中電子の基本属性を背景とした電気磁気特性の微視的な理解が進んできた。

物質中のあらゆる静的な電気磁気特性は、原理的には、スカラーポテンシャル $\phi(\boldsymbol{r})$とベクトル ポテンシャル $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})$の空間分布によって表現できるはずであり、それらの空間分布を特徴づける記述法が以下の多極子展開である。

$$\phi(\boldsymbol{r}) = \sum_{lm} a_l Q_{lm} \frac{Y_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})}{r^{l+1}},$$

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}) = \sum_{lm} \left(b_l M_{lm} \frac{\boldsymbol{Y}^{l}_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})}{r^{l+1}} + c_l T_{lm} \frac{\boldsymbol{Y}^{l+1}_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})}{r^{l+2}} \right).$$

ここで、$Y_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})$および $\boldsymbol{Y}^{l'}_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})$ $(l' = l, l \pm 1)$ は球面調和関数とベクトル球面調和関数であり、展開係数 Q_{lm}, M_{lm}, T_{lm} が多極子である[1]。a_l, b_l, c_l は多極子の規格化に応じた便宜上の係数である。この展開式から分かるように、多極子の有無が空間分布の異方性を特徴づけている。

多極子を用いた表現法が一般的に有用であることは、ミクロからマクロまで様々なスケールの現象に多極子が現れることからも分かるだろう。例えば、2015 年 9 月 14 日に LIGO で観測された重力波は四極子の波動であり、陽子の直径の 1 万分の 1 という極微の時空歪みを捉えたものである [1]。重力子が素粒子の中では比較的大きなスピン 2 を持つ点も興味深い。他方、2012 年に太陽の磁極が四極子構造に遷移しつつあることが発見され話題となっている [2]。

[1] $\nabla \cdot \boldsymbol{A} = 0$ のゲージを用いており、このゲージではベクトル球面調和関数の $\boldsymbol{Y}^{l-1}_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})$ 成分は現れない。

物理量	記号	空間反転	時間反転	備考
電荷	ρ_{e}	$+$	$+$	1
磁荷	ρ_{m}	$-$	$-$	$i\,\boldsymbol{e}_x \cdot (\boldsymbol{e}_y \times \boldsymbol{e}_z)$
トロイダル磁荷	ρ_{t}	$+$	$-$	i
座標成分	r_i	$-$	$+$	$= x,\, y,\, z$
電気多極子	Q_{lm}	$(-)^l$	$+$	極性 (真性)
磁気多極子	M_{lm}	$(-)^{l+1}$	$-$	軸性 (擬)
トロイダル多極子	T_{lm}	$(-)^l$	$-$	極性 (真性)
スカラーポテンシャル	$\phi(\boldsymbol{r})$	$+$	$+$	電気単極子 (電荷)
ベクトルポテンシャル	$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r})$	$-$	$-$	トロイダル双極子 (電流密度)
電場	$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})$	$-$	$+$	電気双極子
磁場	$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r})$	$+$	$-$	磁気双極子
球面調和関数	$Y_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})$	$(-)^l$	$+$	
ベクトル球面調和関数	$\boldsymbol{Y}^l_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})$	$(-)^l$	$+$	
	$\boldsymbol{Y}^{l\pm1}_{lm}(\hat{\boldsymbol{r}})$	$(-)^{l+1}$	$+$	

表1: 空間および時間反転に対する変換性。ランクlの多極子(テンソル)は「電荷」ρ_α (α = e, m, t) とl個の座標成分 $r_i\ r_j\ r_k$ …との積から構成される。

また、人工的な電磁媒体であるメタマテリアルでは、トロイダル多極子の観測実験が進行中である [3]。時には異なるスケールで行われている研究を眺めてみることは、ミクロな多極子の研究にとっても有益かも知れない。

多極子は空間反転と時間反転に対する性質の違いによって、電気多極子 Q_{lm}、磁気多極子 M_{lm}、トロイダル多極子 T_{lm} に分類される [2]。表 1 に関連する物理量の空間と時間反転に対する変換性をまとめた。通常の電気多極子の構成法と同じように、時空反転に対して異なる性質をもつ「電荷」ρ_α (α = e, m, t) を空間的に配置することで高次の多極子を構成できる。図 1 に示すように、多極子の変換性はそれぞれの「電荷」の変換性を用いることで求められる。

結晶中では一般に球対称性は失われるため、多極子の分類も回転群の既約表現とその成分 (lm) ではなく、点群 ($\Gamma\ \gamma$) を用いて行われる。多くの場合、時空反転に対する分類法は点群の下でもそのまま有効である。

3　非従来型多極子

ミクロな多極子自由度が秩序化することで自発的に対称性が破れて、結晶がもつ対称性とは異なる異方的な $\phi\,(r)$ や $\boldsymbol{A}\,(\boldsymbol{r})$ の空間分布が現れる。対称性の破れ方に応じて異なった電磁応答が現れるため、秩序下では無秩序相とは全く異なる物性が期待できる。強的な秩序の下では、一様な外場に対して一様な応答が生じるため、特に興味が持たれている。電気磁気応答を示すマルチフェロイクスがその代表例である [4]。

[2] 空間反転に対して軸性の電気トロイダル多極子 G_{lm} (環状に並んだ電気双極子など) というものも考えられるが、磁荷流が存在しないことを反映して多極子展開には登場しない。同様に、磁気単極子やトロイダル単極子も多極子展開の表式には現れない。

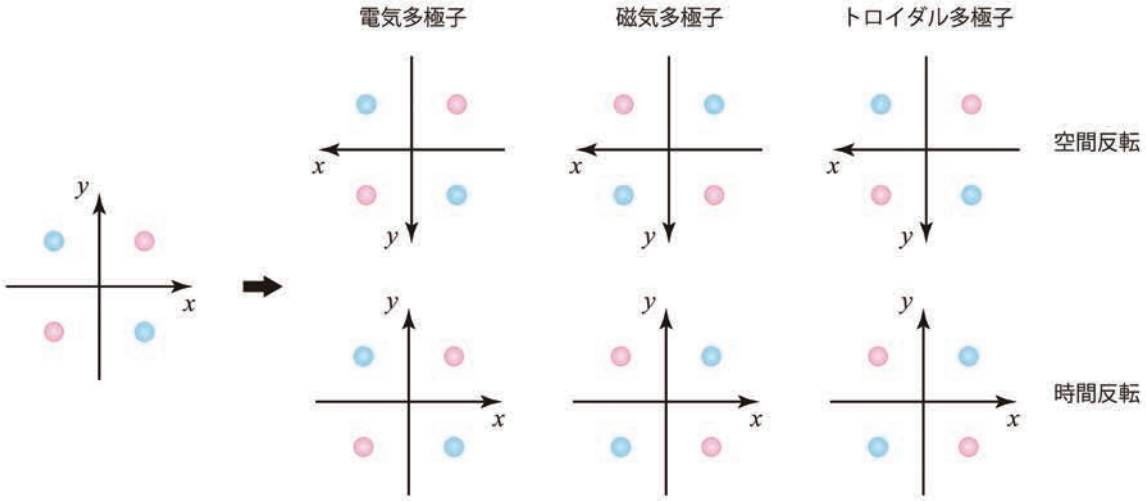


図 1: 空間および時間反転による多極子の変換の様子。赤青丸は正負の「電荷」$\rho_\alpha\,(\alpha = \mathrm{e},\ \mathrm{m},\ \mathrm{t})$を表し、表 1 の時空反転性に従って変換する。

このような微視的多極子秩序の研究では、一つの原子サイトに局在した偶パリティの多極子 (表 1 における偶数次の Q_{lm} と奇数次の M_{lm}) がこれまで主な対象であった [5]。実は、偶数次の T_{lm} も偶パリティであるが、*s-d* 軌道のように角運動量の大きさが異なる状態空間でのみ活性となるため、本格的に検討されてこなかった。さらに、空間反転対称性がない物質や蜂の巣構造の各原子位置のように反転中心ではないサイトにおいては、奇パリティの多極子 (奇数次の Q_{lm}、T_{lm}、偶数次の M_{lm}) が活性となる (図2(a))。これらの多極子はこれからの研究対象である [6]。なかでも T_{1m} は時空反転の両方に対して奇の性質をもつベクトルで、電気現象と磁気現象をつなぐ要と言える。この対称性はベクトルポテンシャルのそれと同じであり、バンド電子に対して一種のゲージ場として作用するという点も興味深い。このようなゲージ場は (スピン) ホール効果等における異常項の起源であり、スピン軌道相互作用の一つの重要な帰結である。

反転対称性のない系において超伝導が発見されたときの Saxena らの解説には “($CePt_3Si$) is the first example of a magnetic superconductor that has no mirror symmetry, an observation that will lead to a re-examination of our current understanding of these phenomena.” という記述がある [7]。多極子研究にも同様の教訓が当てはまるであろう。

一方、複数の原子からなるクラスター上に分布する電荷や磁気モーメントを組み合わせた拡張多極子 (拡がった多極子) という見方も有用である。このような見方は、パイロクロア等における磁気モノポールやスカラー (ベクトル) カイラリティの議論に既に現れていた [8]。図 2(b) に示すマルチ Q の反強磁性秩序は、拡張多極子の視点では面に垂直なトロイダル双極子の一様秩序と見なすことができる。トロイダル双極子という見方によって新しい電流磁気効果を明瞭に予見できるという御利益がある。実際に UNi_4B において、予見した電流磁気効果が見出されたとの報告があり、目下、詳細に検討中である [9]。このように、拡張多極子は一見すると従来型の秩序であるが、見方を変えることで新しい物性を予見できる場合がある。後述するが、銅酸化物高温超伝導体で話題になった遍歴秩序の反強フラックス状態 (図2(c)) は、拡張多極子の視点では反強トロイ ダル四極子秩序に分類される。その他、時折話題にのぼるスピン・ネマティック秩序は (拡張された) 電気四極子秩序の一種である。

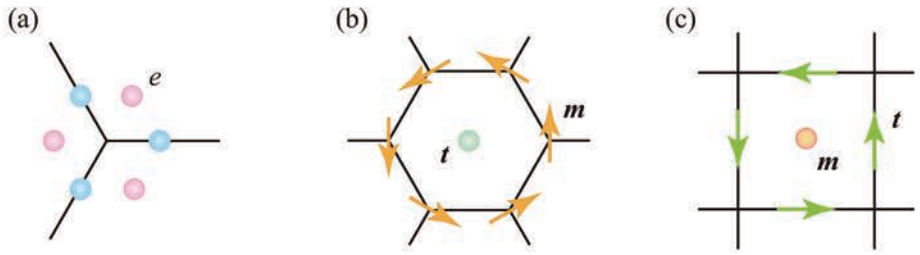


図 2: 非従来型多極子の例。(a) 奇パリティ多極子 (電気八極子)、(b) 拡張多極子 (トロイダル双極子)、(c) 遍歴系のフラックス状態 (トロイダル四極子)。

4　遍歴系の多極子秩序

次に遍歴電子系の秩序について多極子の観点から整理してみよう。一体の秩序変数に限ると電子・ホールペアの秩序変数 (一般化された密度波) は次のように表すことができる。

$$\langle a^{\dagger}_{\boldsymbol{k}-\boldsymbol{q}\mu} a_{\boldsymbol{k}\nu} \rangle = \delta_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{Q}} \sum_{\gamma} \eta_{\gamma}\, g^{(\gamma)}_{\mu\nu}(\boldsymbol{k}).$$

ここで、$\boldsymbol{Q}$ は秩序ベクトル、η_γ は既約表現 Γ の成分 γ の秩序変数の大きさ、$g^{(\gamma)}_{\mu\nu}(\boldsymbol{k})$ は形状因子 (既約表現の基底) を表す。μ, ν はスピンや軌道をひとまとめにしたラベルである。多極子は端的にいえば有限の角運動量を持った状態のことであり、遍歴系の秩序変数において角運動量が生じる原因は、軌道やスピン μ, ν と波数依存性 $\boldsymbol{k}$ に求められる。秩序変数の既約表現 Γ は、直積を $\Gamma_\mu \otimes \Gamma_\nu \otimes \Gamma_k = \sum_a \oplus \Gamma_a$ のように簡約化したとき現れる既約表現 Γ_a のいずれかである[3]。$\boldsymbol{k}$ 依存性をもつ秩序変数を超伝導の場合にならって異方的な密度波とよぶ。

例えば、$Sr_3Ru_2O_7$ で議論されている Pomeranchuk 不安定性と呼ばれる秩序は、Fermi 面の異方的な不安定性によって生じ、$g^{(\gamma)}_{\mu\nu}(\boldsymbol{k}) \propto (\cos k_x - \cos k_y)\delta_{\mu,\nu}\delta_{\boldsymbol{Q},0}$ によって表現される。一方、同じ物質で提案されている O_{22} の四極子秩序は、$\boldsymbol{k}$ 依存性のない $g^{(\gamma)}_{\mu\nu}(\boldsymbol{k}) \propto (O_{22})_{\mu,\nu}\delta_{\boldsymbol{Q},0}$ によって表される。これらの秩序は、4 回から 2 回への対称性の低下という側面を強調して (電子) ネマティック秩序と呼ばれる場合もある。このように、同じ既約表現の多極子であっても、有限の角運動量が生じる原因の違いによって、別の名称が与えられている。これらはすべて同じ既約表現 (電気四極子) に属するので、単一成分の純粋な秩序だけが生じることはないが、主要な成分がどれかによって現れる物性は異なってくる。

この他、正方格子では前述の反強フラックス状態と呼ばれる秩序も提案されている。この秩序は $g^{(\gamma)}_{\mu\nu}(\boldsymbol{k}) \propto i(\cos k_x - \cos k_y)\delta_{\mu,\nu}\delta_{\boldsymbol{Q},(\pi,\pi)}$ と表現される。因子 i から生じる位相により図 2(c)の緑矢印で示したような自発カレント (トロイダルモーメント) が生じており[4]、正方格子の中心に交替的に磁束が貫いているような状態になっている。この秩序変数は、四極子の角度依存性を持ち時間反転が奇、空間反転が偶であることからトロイダル四極子に分類される。詳しくは文献 [10] を参照されたい。

最後に、超伝導秩序について述べる。秩序変数は次のように書ける。

$$\langle a_{\boldsymbol{q}-\boldsymbol{k}\mu} a_{\boldsymbol{k}\nu} \rangle = \delta_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{Q}} \sum_{\gamma} \eta_{\gamma}\, g^{(\gamma)}_{\mu\nu}(\boldsymbol{k}).$$

[3] $\boldsymbol{Q} \neq 0$ の場合はそれほど単純ではない場合もあるだろう。既約分解の簡単な例として、SU(2) 対称性の下での二つのスピン 1/2 の合成、$D_{1/2} \otimes D_{1/2} = D_0 \oplus D_1$ がある。

[4] 正味の伝導電流が生じる訳ではない事に注意する。

軌道自由度がない場合、μ, ν は時間反転ペアの「スピン」を意味し、一重項ペアは $\sum_\gamma \eta_\gamma g_{\mu\nu}^{(\gamma)} = \Delta(\boldsymbol{k})(\mathrm{i}\sigma^y)_{\mu\nu}$, 三重項ペアは $\sum_\gamma \eta_\gamma g_{\mu\nu}^{(\gamma)} = \boldsymbol{d}(\boldsymbol{k}) \cdot (i\boldsymbol{\sigma}\sigma^y)_{\mu\nu}$ のように表されるのが一般的である。これまでの分類では、μ, ν の軌道依存性は考慮されておらず、秩序変数の対称性はスピン μ, ν と $\boldsymbol{k}$ の直積の簡約から決まる既約表現で分類されていた。実際の超伝導は多軌道からなる Fermi 面で起こる場合が多いことから、ペアを構成する粒子の軌道対称性を考慮することの重要性が指摘されており、μ, ν の軌道依存性を含めた再分類が行われている [11]。

このように、一般化された密度波と超伝導は多極子の視点で整理するとき、多くの類似点がある。ただし、注意すべき点として、密度波は様々な秩序ベクトル $\boldsymbol{Q}$ を持ち得るが、通常 $\boldsymbol{k}$ 依存性を持たないのに対して、超伝導は $\boldsymbol{Q} = 0$ の場合が一般的であり $\boldsymbol{k}$ 依存性を持つ場合が多い。強相関電子系に特徴的な局所的斥力は、超伝導チャンネルに対しては局所的斥力として作用するのに対して、密度波チャンネルでは局所的引力として作用する場合が多いという事実がこの差異を生んでいる。従って、通常の状況で起こりやすい秩序に打ち勝って非従来型の秩序を実現するには、それらに有利な相互作用構造をもつように一捻り加える必要がある。

5　おわりに

本稿では、これまでに提案されてきた様々な exotic 秩序、非従来型秩序、超伝導が多極子の観点から整理できる点を強調した。現状では、同じ既約表現に属する様々な秩序が色々な名称で独立に議論されていて、それらの間にある共通点を見落としていることも多い。対称性は、物性現象における様々な選択則を支配するため、同じ対称性のものを分類・整理することは重要では無いかと思う。J-Physics をきっかけとして、過去の提案を見直して整理してみると、新たな道が開けるのではないかと思う今日この頃である。

本稿は速水賢、求幸年両氏との共同研究に基づくものです。また、柳有起、有馬孝尚、網塚浩、柳瀬陽一、播磨尚朝各氏をはじめ多くの方々との有益な議論に感謝致します。

参考文献
[1] http://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/16/021200053/
[2] 常田佐久,「ひので」による今回の観測の意義と最近の太陽活動について (国立天文台) 2012.4.19.
[3] N. Papasimakis, V. A. Fedotov, V. Savinov, T. A. Raybould, and N. I. Zheludev, Nat. Mater. **15**, 263 (2016).
[4] 有馬孝尚,「マルチフェロイクス ― 物質中の電磁気学の新展開 ―」共立出版, (2014).
[5] 例えば、楠瀬博明,「多極子入門」物性研究 **97**, 730 (2012); Y. Kuramoto, H. Kusunose, and A. Kiss, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 072001 (2009).
[6] 速水賢, 楠瀬博明, 求幸年,「遍歴電子系における自発的な空間反転対称性の破れ ― 非従来型多極子秩序とスピン・バレー分裂、非対角応答 ―」固体物理 **50**, 217 (2015); Satoru Hayami, Hiroaki Kusunose, Yukitoshi Motome, J. Phys.: Condens. Matter **28**, 395601 (2016).
[7] S. S. Saxena and P. Monthoux, Nature **427**, 799 (2004).
[8] D. Khomskii, Physics **2**, 20 (2009).
[9] 斉藤開, 網塚浩 他, 日本物理学会第71回年次大会, 20pBL10 (2016).
[10] 柳有起,「実験家向けの多極子入門」J-Physics 若手夏の学校テキスト (2016).
[11] T. Nomoto, K. Hattori, and H. Ikeda, arXiv:1607.02716.

実験による多極子の検証の進展

網塚　浩
北海道大学 大学院理学研究院　教授

１．はじめに

本新学術領域では、スピンと軌道の結合に由来する固体中電子の様々な様相を俯瞰的にとらえた基礎学理「J-Physics」を創ることを目標としている。結晶場分裂に比べてスピン軌道結合の強い極限にあるｆ電子系では、多極子近藤効果のような、多極子に由来する異常な伝導現象が明らかになり、対極にあるｄ電子系では（特に反対称の）スピン軌道相互作用の重要性が認識されつつある。「多極子伝導」の視点から両分野の研究者が連携してこれらの統合的な理解を進めることにより、新物性・新物質の発見とともに、J-Physicsの物質観を構築することをめざしている。とはいうものの多極子の理解はこれまで主にｆ電子系分野で醸成されてきたものであり、他の分野にはなじみが薄いのが実情である。領域内でさえまだまだバリアフリーではないとの認識から、楠瀬氏と私に執筆担当が回ってきたと思う。本稿では、多極子が実験を通じてどのように理解されてきたのか、そのあらましを特にJ-Physicsに新たに参入された学生の皆さんを意識して紹介したい。

２．電気四極子秩序の発見

固体中電子の多極子の研究は、70年代後半から80年代の電気四極子秩序の研究に始まる。最初に詳しく調べられた物質はCeAg（立方晶、$Pm\bar{3}m$）である[注1]。この物質は、約16 Kで立方晶から正方晶に歪み、5.5 Kで強磁性になる。16 Kの構造変化が4ｆ電子比熱の跳びを伴う連続転移であり、同型のRAg、RCd（R: 希土類元素）やドープ系、圧力効果などに見られる5ｄ電子のバンド・ヤーン=テラー効果による1次相転移とは異質なことから、その起源が議論となった。先ず磁化率から4ｆ電子の結晶場基底状態がΓ_8四重項であると予想された。このΓ_8状態は電気四極子自由度とクラマース縮退を合わせ持つ。そこで、異なるサイトの4ｆ電子間に働く相互作用として、磁気双極子－双極子相互作用に加えて電気四極子－四極子相互作用が初めて導入され、強四極子（FQ）－強磁性の逐次転移の可能性が提案された[1]。これに続く日・独・仏の研究者を中心とする精力的な研究により、高温相の安定化には電気四極子O_2^0間の強的相互作用が本質的であり、格子振動の非調和性がそれを助けているという理解に至った。この一連の研究を通じて、電気四極子の振る舞いを調べるためには、①エントロピー、磁化の磁場・温度変化と異方性、中性子非弾性散乱といった手法から結晶場準位の分裂を特定し、さらに②弾性定数や非線形磁化率、磁気トルクの測定により、四極子間の相互作用に関する情報を得て理論と比較するといったアプローチが有効であることが確立した。特に弾性定数は、歪みに対する四極子の応答（四極子感受率）を直接測定でき、磁化率から磁気相互作用の符号と強さがわかるのと同様に、四極子間相互作用の符号と強さを求めることができる[2]。同時に四極子感受率は、結晶場分裂について磁化率と相補的な情報も与える。また、四極子間相互作用の情報は、4階のテンソル量である非線形磁化率や磁気トルクにも間接的に含まれる。図１に記すように今日までにFQ秩序を示す物質は多数みつかっている。

FQ秩序では、四極子と格子歪みの結合により、大なり小なり一様な格子変形が起きる。よって四極子間の相互作用がフォノンを媒介とする性質のものか、あるいは電子間相互作用に起因するかに応じて、協力的ヤーン=テラー効果と四極

[注1] “Quadrupole Ordering” という言葉をタイトルに掲げた最初の論文は、1980年のUO_2の研究（G. Solt and P. Erdos, Physica **102B**, 313 (1980)）である。後にこの系の秩序は反強磁性とAFQの同時秩序であることが確認されている。一方ｄ電子系分野では軌道秩序を偏極中性子散乱でとらえ、“Orbital Ordering” を論文に冠した先駆的な研究が1976年に報告されている（Y. Ito and J. Akimitsu, J. Phys. Soc. Jpn. **40**, 5 (1976).）.

[1] D.K. Ray and J. Sivardiere, Solid. State. Commun. **19**, 1053 (1976).
[2] 後藤輝孝, 固体物理 **25**, 1（1990）.

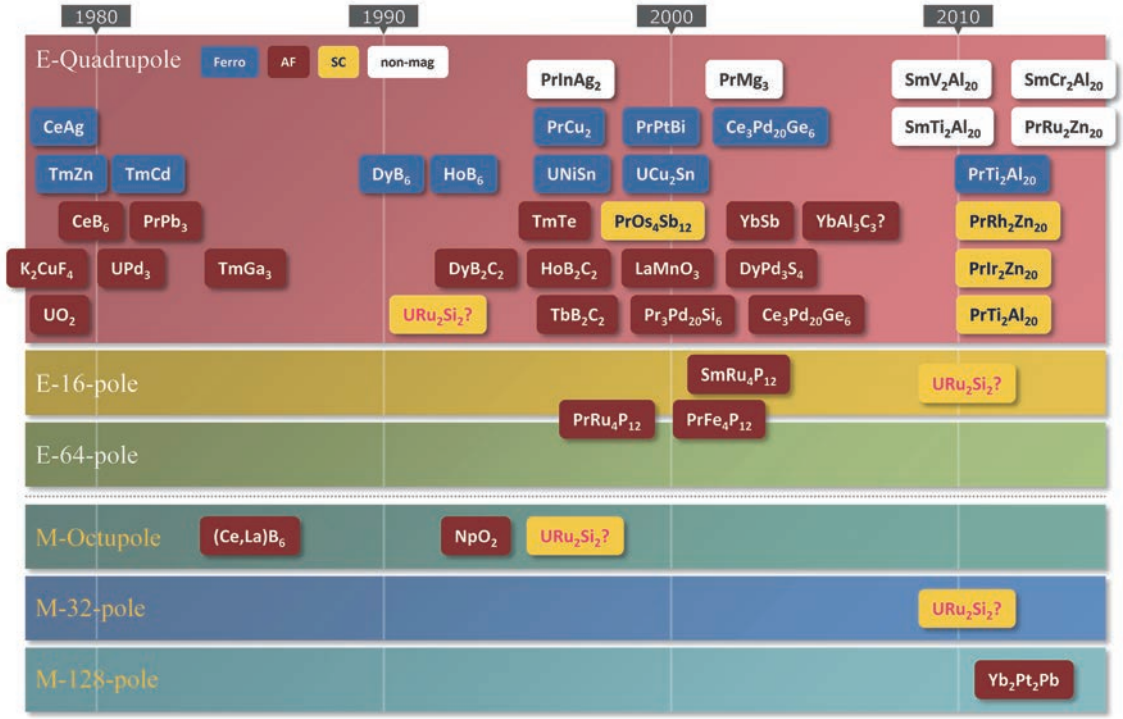


図1　多極子秩序もしくは多極子が関与する異常物性を示す主な物質を、それらが多極子の視点から研究されたおおよその時期でプロットしたもの。d電子系の軌道秩序については、マイルストーンとなったK_2CuF_4（偏極中性子回折による最初の観測例）と$LaMnO_3$（共鳴X線回折の最初の適用例）のみを記載している。磁気双極子の秩序の背後に多極子相関のある系は、ここに挙げたもの以外に多数存在する。

子秩序のどちらが本質的かを判別することになる。純粋に電気的な相互作用によって多極子秩序が起きうることは、四極子が交替配列する反強四極子（AFQ）秩序の発見によって明らかとなった。典型物質はCeB_6（立方晶、$Pm\bar{3}m$）である。この物質もΓ_8を結晶場基底準位に持ち、ゼロ磁場で約3.2 K（T_Q）と2.3 K（T_N）で相転移を示す。高温側からⅠ相、Ⅱ相、Ⅲ相と呼ばれ、T_QとT_Nの間のⅡ相が、比熱等には連続転移の証拠があるにも拘わらず、微視的測定では超格子反射も磁気反射も検出されない、いわゆる「隠れた秩序」の難問となっていた。詳細は多くの解説記事[2,3]に譲るが、磁場中での中性子回折と^{11}B核のNMRの測定、そして磁気八極子の相関を導入した理論解析が決め手となり、Γ_5型の四極子（O_{xy}, O_{yz}, O_{zx}）による秩序波数$\boldsymbol{q}$ = (1/2, 1/2, 1/2)のAFQ相であることがわかった。四極子が確定した状態に磁場をかけると、その四極子の対称性を反映した磁気双極子と磁気八極子がスピン軌道結合を通じて誘起される。ここでは、この性質を利用して隠れた秩序を「間接的に可視化」している。特にNMRの測定からは微細相互作用の主要項が磁気八極子によることが示され、本系のAFQ相の性質を記述するためには、純粋な電子間相互作用である磁気八極子間の相関が重要な役割を担うことが明らかとなった。

このような間接的検証に対し、AFQ秩序を直接確かめる実験が、1990年代後半に共鳴X線回折の手法が確立したことによって可能となった[4]。そもそもAFQ秩序では原子周りの異方的な電荷分布が交替的に並ぶのであるから、原子形状因子は副格子毎に異なっており、原理的にはこれによる禁制反射をX線回折で観測できるはずである。しかし、f軌道は閉殻の内側にあるので、通常の方法では回折強度が弱くて観測できない。一方、共鳴X線散乱では、吸収端近傍で散乱強度が著しく増大するとともに、内殻f, d電子の状態を反映して回折強度が散乱ベクトルや偏光特性に依存して変化する。これらの性質を利用して多極子を特定することができる[5]。双極子遷移過程（E1遷移）を用いれば四極子ま

[3] 榊原俊郎, 固体物理 33, 32(1998); 椎名亮輔, 酒井治, ibid. **33**, 631 (1998); 世良正文, ibid. **35**, 229 (2000); 半澤克郎, ibid. **36**, 459 (2001).
[4] Y. Murakami et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 582 (1998).
[5] 松村武, スクッテルダイト若手夏の学校テキスト (2006); 道村真司, J-Physics 若手夏の学校テキスト (2016).
[6] K. Hirota et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 2706 (2000).
[7] H. Nakao et al., J. Phys. Soc. Jpn. **70**, 1857 (2001).

で、四極子遷移過程（E2遷移）を用いれば十六極子までを測定することができる。この画期的手法は3d電子系の軌道秩序を観測するために開拓され[4]、f 電子系では正方晶DyB_2C_2（正方晶、P4/mbm）が最初の、CeB_6が二つ目の適用例となる[6,7]。ただし、この方法では実験結果から秩序変数の対称性に関する議論はできるが、遷移の中間状態に仮定を含むため、定量的な議論は今のところ難しい。一方、超高輝度のX線による非共鳴の回折実験でAFQ秩序を直接とらえるという、いわば力業の実験も、同じくDyB_2C_2[8]とCeB_6[9]を対象に行われている。こちらは原子形状因子がわかるので、秩序変数に含まれる多極子の成分を定量的に評価できる。

AFQ秩序を示す系も今日では数多く知られている（図1）。興味深い例としては$PrPb_3$（立方晶、$Pm\bar{3}m$）で確認された不整合長周期の「四極子密度波」が挙げられる[10]。多極子自由度を持った遍歴電子による秩序、まさに多極子伝導状態の生成が示唆される。これらのAFQ秩序の追究により、先にあげた①、②の手法に加えて、③一様な外部磁場や一軸性の応力で誘起される磁気双極子および様々な高次多極子を中性子散乱やNMR/NQR、共鳴X線散乱などの微視的測定で観測し、対称性に関する考察から背後にある多極子を間接的に絞り込む、さらに④放射光X線による共鳴および非共鳴X線散乱を用いて直接観測することが有効であることが確認された。

3．より高次の多極子へ

多極子の挙動を調べるには、以上①～④に加えて、⑤μSRやMössbauer効果の測定により自発的内部磁場の発生の有無を調べる、⑥偏極中性子散乱により高角まで磁気形状因子を調べることも有効であり、実際には①～⑥を駆使して研究が進められている。四極子より高次の多極子のうち、反強磁気八極子（AFO）秩序が$Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$とNpO_2（立方晶、$Fm\bar{3}m$）で確認されている。いずれもμSR測定では弱い自発的内場が検出される[11]。$Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$のⅣ相と呼ばれるAFO相（1.5 K以下）は、L_2吸収端、E1、E2両遷移の偏向解析を駆使した実験と理論の解析から、Γ_5型（$T_{x\beta}$, $T_{y\beta}$, $T_{z\beta}$）, $\boldsymbol{q}$ = (1/2, 1/2, 1/2)の秩序であることが確認された[12]。この相ではまた、弾性定数C_{44}が強いソフト化を示し、格子が[111]方向にわずかに歪むことも観測されている。よって単なるAFO相ではなく、Γ_5型のFQ秩序が同時に誘起されるAFO-FQ秩序であると考えられている。

磁気多極子は、回折強度は弱いが原理的に中性子散乱で観測可能である。高次の磁気多極子の形状因子は磁気双極子と著しく異なるため、これを観測できれば多極子を識別できる。磁気双極子の場合、形状因子は散乱ベクトルの大きさκが0のときに最大で、κの増加に伴い単調減少する。これに対し高次多極子の場合にはκ = 0のとき0で、κの増加とともに増え、極大をとって減少する。$Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$では実際にこの振る舞いが偏極中性子散乱実験によって観測され、Γ_5型AFO秩序と矛盾しないことが確かめられた[13]。一方NpO_2では、Np の$M_{4,5}$吸収端、E1遷移の共鳴X線回折[14]および^{17}O-NMRによる磁場中での情報[15]を総合して、Γ_5型のAFOとAFQ秩序が同時に生じていることが間接的に確認されている。

[8] H. Adachi et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 206401 (2002).
[9] Y. Tanaka et al., Physica B: Condensed Matter **345**, 78 (2004); Europhys. Lett. **68**, 671 (2004).
[10] T. Onimaru et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 197201 (2005).
[11] P. Santini et al. Rev. Mod. Phys. **81**, 807 (2009); and refs. therein.
[12] 楠瀬博明, 倉本義夫, 固体物理 **41**, 597 (2006).

2003年よりスタートした特定領域研究「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」とそれに引き続く新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」(2008年〜) により、高次多極子による強相関物性の理解が大きく進展した。これら二つのプロジェクトの成功にみる (今更ながらの) ポイントは、⑦多極子自由度が活性となる新物質を探索し開発することである。RT_4X_{12} (R : ランタン、アクチナイド等、T : 遷移金属、X : 第13-15族の元素) と表される充填スクッテルダイト構造の物質群 (立方晶、Im3) では、Rイオンが12個のXイオンが作る20面体構造の高対称な「カゴ」の中心にあるため、結晶場効果が小さく、4 f 電子の持つ多極子自由度が低温まで残りやすい。また4 f 電子軌道とXイオンのp軌道との混成効果が、配位子数が多い分、増強される。詳細は文献に譲る[16]が、高次多極子の新たな様相を開拓した系として$PrRu_4P_{12}$と$PrFe_4P_{12}$が挙げられる。前者は62Kで金属ー非金属転移、後者はPr系初の重い電子系物質であり、6.5Kで隠れた秩序を示す。NMRや中性子非弾性散乱等の微視的実験から、いずれの系においても低温秩序相で並進対称性は破れるが局所的な4 f 電子状態の対称性は破れていないことがわかった。例えば磁場中の中性子散乱実験では、上述のAFQ相のような振る舞いとは異なり、誘起磁気双極子が常に磁場方向を向き等方的である。様々な実験と理論的考察により、点群対称性を破らないスカラー型 (全対称Γ_1型) の十六極子もしくは六十四極子が反強的に配列する秩序と考えられている。また、Pr系で初めて見つかった重い電子超伝導体$PrOs_4Sb_{12}$では、磁場中でAFQ秩序が誘起され、またクーパー対の引力機構にも四極子の揺らぎが関与している可能性が非弾性中性子散乱実験から示唆されている。以上のPr系では、$4f^2$電子配置におけるΓ_1一重項とΓ_4三重項の擬縮退が様々な高次多極子自由度の発現を担う。この他、磁場に鈍感な重い電子状態を持つ$SmOs_4Sb_{12}$や、電荷秩序と反強磁性、スカラー型秩序の複雑な共存、競合を示す$SmRu_4P_{12}$などのSm系も注目されている。

一方、重い電子系のプロジェクトでは、PrT_2Zn_{20} (T = Ru, Rh, Ir)、PrT_2Al_{20} (T = Ti, V, Nb)のいわゆる1-2-20系 (立方晶、$Fd\bar{3}m$)が開発された。これらの物質もPrイオンがZnイオンの作るカゴ状構造に内包された環境にあり、4 f 電子の強相関効果が期待できる。4 f 電子の結晶場基底状態は、磁気双極子を持たず、四極子O_2^0、O_2^2を持つ純粋な四極子二重項Γ_3である。これらの系では、FQ、AFQ秩序とその量子相転移点近傍の非Fermi液体異常や非従来型超伝導、巨大熱電効果といった異常伝導現象が相次いで発見されている。Ce系で確立した近藤格子から「四極子近藤格子」への新たな物理の展開として、精力的な研究がJ-Physicsに引き継がれて進行している[17]。また、面白い例として反強磁性体であるYb_2Pt_2Pb (正方晶、$P4_2/mnm$) の磁化過程の異常な振る舞いが、$J_z = \pm 7/2$の基底クラマース二重項が持ち得る磁気128極子の反強的相関を仮定するとよく説明できることを示した研究もある[18]。その他、30年来の謎であるURu_2Si_2 (正方晶、I4/mmm) の隠れた秩序については、詳細は割愛するが、ほぼ全ての高次多極子秩序の可能性が提案され、未だ解決には至っていない[19]。

[13] K. Kuwahara et al., J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 093702 (2007).
[14] J.A. Paixão et al., Phys. Rev. Lett. **18**, 187202 (2002).
[15] Y. Tokunaga et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 257601 (2006).
[16] 青木勇二, 菅原仁, 佐藤英行, 固体物理 **47**, 129 (2012).
[17] 鬼丸孝博, 榊原俊郎, 固体物理 **47**, 565 (2012); T. Onimaru and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 082002 (2016).

4. 一不純物の多極子近藤効果の問題

もう一つの重要な研究の流れは、多極子による一不純物近藤効果の理解の進展である。軌道縮退を考慮した場合の近藤効果は、複数の散乱チャンネルを持つ局在スピンと伝導電子スピン間の相関効果（マルチチャンネル近藤問題）として定式化され、70年代後半から80年代にかけて理論的に詳しく調べられた。特に注目されるのは、スピン$S = 1/2$の系で、チャンネル数nが2のとき（一般には$2S = n$のとき）に繰り込み群の非自明な固定点が存在し、その周りの励起はフェルミ液体とは異なるという理論予想である[20]。例えば、比熱と磁化率は$-\ln T$で発散、電気抵抗は$T^{0.5}$に比例、そして$0.5R\ln 2$のエントロピーが絶対零度で残る。このモデルに対する現実的対応の有無が問題となったが、f^2電子配置における非クラマース2重項と伝導電子との混成効果を限られた部分空間で記述すると、2チャンネル近藤効果に対応する有効ハミルトニアンが得られることが理論的に提案された[21]。磁場に鈍感な非フェルミ液体的挙動を示すUBe_{13}に始まり、$Y_{1-x}U_xPd_3$、$Th_{1-x}U_xRu_2Si_2$等の様々なウラン希釈系、さらに$La_{1-x}Pr_xPb_3$などPr化合物の希釈系で探索が行われたが、決定打となるような全ての特徴を満たす例は得られていなかった。現在、本領域において山根氏らが研究を進めている$Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ $(x \leq 0.05)$ が、Γ_3非クラマース2重項による一不純物四極子近藤効果に関する紛れのない証拠を与えている可能性が高く、注目される[22]。

5．おわりに

以上、f 電子系分野における多極子研究のこれまでの展開を、マイルストーンとなる研究の紹介とともに実験サイドから概観した。図 1 にないものとして、局所的な（1原子上の）奇パリティの多極子がある。電気八極子や磁気四極子などである。これらは、空間反転対称性が破れている系では原理的に生じてよいものであるが、まだ見つかっていない。新物質の開発と測定手法の工夫によってこれを発見することは、本プロジェクトの重要な眼目の一つである。一方、複数原子にまたがる電荷や磁荷の分布を拡張多極子（Augmented Multipole or Spatially-Extended Multipole）としてとらえると、奇パリティ多極子を持つ系が広く存在することになるのは楠瀬氏の稿にある通りである。本プロジェクトが終了するころには、是非、よりカラフルに増補された図1の改訂版を公表したいと考えている。

[18] Y. Shimura et al., J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 103601 (2012).
[19] 網塚浩, 固体物理 **47**, 651 (2012).
[20] Ph. Nozières and A. Blandin, J. Physique **41**, 193 (1980).
[21] D.L. Cox, Phys. Rev. Lett. **59**, 1240 (1987).
[22] 山根悠、他、日本物理学会2016年秋期大会13pJD-8；本ニュースレター、H28領域全体会議ポスター賞受賞者記事.

【A01】研究課題番号：16H01059　電子の遍歴・局在双対性を考慮した重い電子超伝導の微視的理論

電子の遍歴・局在双対性を考慮した重い電子超伝導の微視的理論

大槻　純也
東北大学 大学院理学研究科　助教

バンド計算始めました。「冷し中華始めました」的に文章を書き始めてみたが、扱っているのは中華麺ではなくスパゲッティである。Ce化合物のエネルギーバンド構造を実際に計算してみて、まさにスパゲッティだなあと実感している今日この頃である。

さて、研究課題の話であるが、希土類元素やアクチナイド元素を含む重い電子系化合物では非従来型超伝導や強磁性超伝導など様々な超伝導相が確認されている。その多彩な超伝導状態の性質が研究の中心になっているが、私自身は、そのメカニズムと理論的記述に興味を持っている。重い電子状態は有効質量の逆数に対応するくり込み因子（準粒子重み）zが1よりも非常に小さいということで特徴づけられる。スペクトルの総和は1であるので、残りの部分1-zはインコヒーレント成分である（図1）。こちらが局在的な磁性を担う。通常の超伝導理論はコヒーレントな準粒子部分のみを扱っている。しかし、超伝導を引き起こす磁気揺らぎは局在成分が担うので、インコヒーレント部分を含んだスペクトル全体を考慮することなしに、準粒子間相互作用を正しく導出することはできない。これを含めて記述することができるようになったとき、本当の意味で、重い電子超伝導のメカニズムを理解することになると思う。本公募研究ではこの課題に取り組みたい。

しかしながら、言うは易しである。重い電子超伝導は理論的に扱うことが非常に難しい。「これとこれを取り込んで計算すればいいんだな」と頭ではある程度分かっていても、どのように手を動かせばよいのか分からないのがこの問題の難しさである。それが、この問題が問題として残っている所以である。

理論の難しさをもう少し具体的に言うと、磁性と超伝導、局在と遍歴、という相反する性質をひとつの理論の中でどのように共存させるかという問題である。これに関して近年、理論計算の技術的進歩が目覚ましい。これまで別々であった、磁性の発生に重要な強相関効果を扱う動的平均場理論と超伝導の形成に重要な空間揺らぎを扱う理論が融合されつつある。さらに、化合物の電子構造を扱う密度汎関数理論との垣根も取り払われようとしている。このような理論枠組みが実用的になれば、重い電子超伝導のみならず強相関電子系の理論研究全般において非常に有用であるが、残念ながら、その研究は海外に大きく先を越されてしまっている。J-Physics（この場合のJはJapan?）の期間中に、将来につながる計算技術を確立したいという意気込みである。

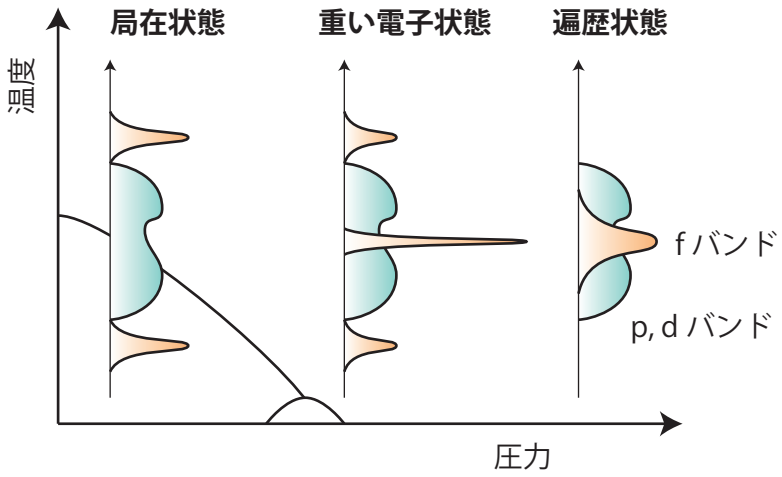


図1 重い電子系における温度・圧力相図と電子状態の概念図。

【A01】研究課題番号：16H01066　準周期構造を持つ重い電子系における価数転移

準周期構造を持つ重い電子系における価数転移の理論的研究

古賀　昌久
東京工業大学 理学院　准教授

新学術領域研究(研究領域提案型)の「JPhysics: 多極子伝導系の物理」において、我々の公募研究を採択して頂き、領域内外の皆様に感謝致します。これから二年間、「準周期構造を持つ重い電子系における価数転移」に関して研究活動を開始できることをとてもうれしく思います。まず、私の略歴について紹介しておきます。2001年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程を修了し、大阪大学、京都大学において助教として研究教育活動を行いました。2009年から東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻准教授として着任し、現在に至ります。専門は、低次元量子スピン系、強相関電子系や冷却原子系の低温物性の研究です。

次にこれから行う研究活動について紹介しておきます。2012年、準結晶Au-Al-Yb系において、帯磁率や比熱にべき発散が出現する量子臨界性がはじめて発見されました。この量子臨界性は希土類イオンYbの価数揺動と関連していることが実験的に示唆されていますが、周期性を持つ近似結晶では量子臨界性が現れていません。したがって、強相関効果と準周期性を取り扱い、価数揺動現象・価数転移を理解することが量子臨界性の解明のキーとなります。しかしながら、これら二つの効果を系統的に取り扱うことは、理論的に難しく、チャレンジングな問題となっています。準周期系における強相関効果について、実空間動的平均場近似や、その拡張した方法であるデュアルフェルミオン法を用いて取り扱い、これまでに議論されてこなかった準周期系の価数転移の理論を展開することが本公募班で行う研究の目的です。

具体的な解析として、ペンローズ格子を準周期構造として取り上げ、実空間動的平均場近似を用いて極低温物性における価数転移について系統的に調べます。周期系において詳細に調べられている価数転移と、準周期系におけるそれとの違いについて調べ、強相関準周期系における新奇量子現象について開拓します。この研究は、A01の研究テーマである価数転移を含む多極子由来の新奇量子現象に関する実験と理論の研究に密接に関連しています。本研究では、高温から低温まで精度良く計算することのできる量子モンテカルロ法を用いて解析を行い、電子構造の変化や価数転移の可能性について明らかにします。さらに、サイトに依存した近藤効果や価数揺動現象がもたらす異常金属的振る舞いや量子臨界現象について調べていきたいと考えています。どうぞ、よろしくお願いいたします。

【A01】研究課題番号：16H01069　軌道依存型混成による f 電子の秩序化と価数揺らぎの理論的研究

軌道依存型混成による f 電子の秩序化と価数揺らぎの理論的研究

椎名　亮輔
琉球大学 理学部　教授

自己紹介：

私は、神奈川県の横須賀という海に面した基地の町で幼少から学生時代を過ごしました。特に10代後半からラグビーに熱中しまして、丘の上のグランドで楕円球を追いかけて日が暮れていく毎日だったことを思い出します。ラグビーというのは、人を地面に引きずり倒してボールを奪い合う球技で、とても激しいスポーツです。一方、「ノーサイド」や「ガッツポーズはしない」など独特の精神論があり、激しさと規律の拮抗が大いなる魅力で、私は今でも熱烈なラグビーファンです。最近のゴローマル効果でのラグビー人気の復活を大変喜ばしく見ています。研究者の末端に身を置く立場となった今振り返ると、あの頃もう少し勉強しておけば、という気がしないでもないですが、やはりあれはあれで自分の原点なんだろうと思っている今日このごろです。

近況をひとつだけ。今年の3月に雪国新潟から沖縄に異動いたしました。沖縄の印象など、また別の機会にお知らせしたいと思います。今後ともよろしくお願い致します。

研究紹介：

私は、f電子系に軸足をおいて、現実物質に密着した理論的取り組みを長年進めてまいりました。そのなかで、本公募と関連する近年の成果として、スクッテルダイトRRu_4P_{12}系（R＝希土類イオン）の金属絶縁体転移の研究が挙げられます。この物質系における f 電子の多極子秩序とそれに伴うバンド・ギャップ形成は、f 電子とバンド電子の協力現象として、おそらくこれまでに類のないもので、その起源や特性を巡って多くの実験研究がなされた経緯がありました。結論から言えば、問題の鍵は、この系に特徴的なpバンドとf 電子の軌道依存型混成（pf混成）にあります。

まず、PrRu_4P_{12}に関して、pf混成による一貫した解析により、実に3桁（0.1K~100K）にも及ぶ広い温度領域で、相転移を含めた様々な現象が非常に良く再現出来ることが分かりました。そこで最近、より謎が多いとされていたSmRu_4P_{12}に関して、Smイオンの特徴を考慮したpf混成モデルに基づく解析を開始し、複雑な磁気相図が、磁性・電荷・多極子の複合秩序相として自然に理解出来ることを示しました。同時に、その有効モデルには、PrRu_4P_{12}にはない秩序変数の強い競合が見られることも明らかにしました。

これらの成果は、混成の軌道依存性が現実物質の秩序状態の解析において大変重要であることを示しております。本公募計画では、こうした軌道依存型混成を巡って、SmRu_4P_{12}の伝導特性の解析を皮切りに、CeスクッテルダイトやCeT_2X_{10}系の異常な秩序状態、SmやEu化合物など中間希土類系に特有の価数揺らぎの問題などに取り組んで行きたいと考えています。

【A01】研究課題番号：16H01071　クラスター構造をもつ準結晶における多極子伝導系の研究

クラスター構造をもつ準結晶における多極子伝導系の研究 ― 第3の固体が切り開く新しい強相関電子系 ―

出口　和彦
名古屋大学 大学院理学研究院　講師

佐藤　憲昭
名古屋大学 大学院
理学研究科　教授

石政　勉
北海道大学 大学院
工学研究院　教授

自己紹介

名古屋大学理学研究科の出口和彦と申します。今年から新学術領域研究「J-Physics: 多極子伝導系の物理」の公募研究でお世話になります。準結晶と強相関電子系の境界領域から本研究領域に少しでも寄与したいと考えています。出身は石川県の加賀百万石の田舎で、鮎釣りに全てを捧げていました。京都大学理学研究科の前野研究室でスピン三重項超伝導の研究により博士号を取得し、その後、名古屋大学理学研究科M研（佐藤研究室）で重い電子系の磁性・超伝導の研究を進めてきました。ある出会いがきっかけで、それまで知らなかった準結晶という「第３の固体」にも研究のフィールドを広げ、現在の研究に至っています。今思うと、この出会いも趣味の「釣り」が深く関係していたのかもしれません。

研究紹介

私たちは様々な機能性物質・構造素材として「結晶」または「アモルファス」という形の固体を利用しています。原子が規則正しく等差数列的に整列している結晶は携帯電話や太陽電池に使われている半導体のシリコン、宝石のダイヤモンドなどの絶縁体、金・銀・銅などの金属があります。逆にランダムに原子が並んでいるアモルファスはガラスが身近なものです。シェヒトマン博士（2011年ノーベル化学賞）によって1984年に発見された「準結晶」は原子配置が特殊な等比数列的な規則性（準周期性）をもち、結晶と似たような回折像が現れるが、その回転対称性は結晶では許されないものであり、どちらにも分類できない「第３の固体」でした。発見以来、準結晶の構造については研究が大きく進展しましたが、特殊な原子配置の規則を持つ準結晶の電子状態に起因する特有の物性、さらには電子間の斥力が重要になる強相関電子物性については未知の領域でした。

最近になってAu-Al-Yb系準結晶が強相関電子系の性質を示し、様々な物理量が低温で発散する量子臨界現象が準結晶特有の性質と深く関係して安定に現れること[1,2]、Au-Ge-Yb系では「準結晶と結晶をつなぐ物質」である近似結晶の超伝導を示すことがわかりました[3,4]。固体物理学の教科書は結晶学に始まり周期的並進対称性を前提にバンド理論を展開し、超伝導・磁性・強相関電子の物理学へと話を進めます。本研究では固体物理学の教科書の序章付近で登場する結晶の周期的並進対称性が無く、特殊な並進対称性(準周期性)をもつ準結晶の強相関電子系（f電子系・d電子系）において、今まで精力的に研究されてきた超伝導・磁性・様々な自由度に起因する秩序状態がどうなるのかという基本的な疑問に多極子伝導系としての準結晶・近似結晶からアプローチしたいと考えています。並進対称性に関係する原子配置の規則性も含めた新物質開発・新現象探索のパラダイムシフト、新しい「釣り」のフィールドの開拓を目指しています。

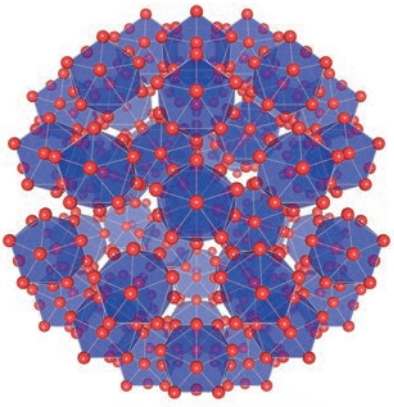


図１　Tsai型クラスターを持つ準結晶の構造モデル（希土類の正２０面体のみ表示）。

[1] T. Ishimasa *et al.*, Phil. Mag. **91**, 4218 (2011).
[2] K. Deguchi *et al.*, Nature Materials **11**, 1013 (2012).
[3] K. Deguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84,** 023705 (2015).
[4] 出口和彦，佐藤憲昭，石政勉, 固体物理 50, 497 (2015).

【A01】研究課題番号：16H01074　内殻電子分光線二色性による多極子活性基底状態および励起状態の解明

角度分解内殻光電子線二色性，発見しました

関山　明
大阪大学 大学院基礎工学研究科　教授

木須　孝幸
大阪大学 大学院
基礎工学研究科　准教授

藤原　秀紀
大阪大学 大学院
基礎工学研究科　助教

阪大基礎工の関山です。この度は，J-Physics公募研究に採択していただきありがとうございます。専門は光電子分光ですが，今回の公募研究で主に進めていくのはタイトルにあるように内殻光電子分光における角度依存性・偏光依存性測定です。これはこれまで主に混成効果を議論してきたARPESや内殻光電子分光とちょっと違うところがあり，新たな研究手法の確立と実践で本研究領域の発展に寄与できればと考えています。

内殻光電子分光による希土類化合物における混成効果の議論は1980年代から始まり，Gunnarsson & SchönhammerあるいはJo & Kotaniに代表される不純物アンダーソン模型による光電子スペクトルの解析という流れがありました。近年では我々も行ってきた準粒子バンド分散を観測するARPESがあることから，光電子のコミュニティはどちらかというと混成効果を強調して主張する議論を好む傾向があったように感じますし，我々もこれまでそこを主に考えて来ました。また，従来の光電子分光では光は「電子を励起するためのエネルギー源」としてのみ見なされてきたところがありました。ですが，光の性質をより利用しつくして，単結晶試料に対して直線偏光の方向を切り替えた測定を「角度分解（いわゆるARPESにおける波数分解ではなく，実空間における結晶軸に対する方向依存性を指します）」希土類内殻光電子分光に適用しますと，局在的な異方的4f電荷分布形状を反映して正方晶はもちろん立方晶でもスペクトル形状が偏光および光電子放出角に依存して変化することが分かりました。このような振る舞いは「結晶場を考えた３価イオン」に対する理論計算でも殆どの部分を説明でき，基底状態における4f波動関数を決定することができます。さらには，スペクトルの温度変化は結晶場励起した状態をも温度の関数として検出しますから原理的にはこの測定だけで励起状態の軌道対称性と結晶場分裂幅を決めることも可能（正直に言えば，分裂幅は中性子散乱などの情報があるとすごく助かります）ということが分かってきました。つまりは，光電子分光を用いて局在的な立場にたった実証的議論が可能になったということです。

今は後づけで上記のような説明ができるようになりましたが，最初にこの現象の発端となった$YbCu_2Si_2$におけるやや特異なYb^{3+} 3d内殻光電子スペクトル形状に気づいてからあれこれ考え試して手探りでここまでくるのに５年近くかかりました。最初の論文報告が2014年後半[T. Mori *et al.*, JPSJ **83**, 123702 (2014)]ということもあり，この実験手法を行っているのはまだ世界でも我々＋SPring-8のビームタイムで一緒に実験している共同研究者だけです。これからこの手法をスタンダードな方法として確立していく必要もありますが，このタイミングでJ-Physicsがスタートしたことは私にとっても幸運に恵まれたと思います。しばらくは基底状態のよく分かっている系とターゲットとする系の両方の測定を進めて「確かにこの系はΓ_3基底で，第一励起は** K でΓ_4だ」というような結論を研究会などで証拠として示していき，ゆくゆくは四極子オーダーによるスペクトル変化も検出していければなどと考えています。今後ともよろしくお願い致します（局在的な希土類化合物の測定大歓迎ですのでご連絡ください!）。

【A01】研究課題番号：16H01077　周期系・準周期系重い電子系に普遍的な新しい量子臨界物性の解明

周期系・準周期系重い電子系に普遍的な新しい量子臨界物性の解明

渡辺　真仁
九州工業大学 大学院工学研究院　准教授

まず自己紹介から始めさせていただきます。私の専門は物性理論で、物質科学の理論、量子多体系の理論研究をこれまで行ってきました。特に、量子ゆらぎと多体相互作用が本質的な役割を果たす系の性質の解明に興味をもって研究に取り組んでおりまして、これまで、ヘリウム３、有機化合物、遷移金属化合物、希土類化合物、アクチノイド化合物などの物質を対象に研究を行ってきました。

次に、本研究プロジェクトの内容について紹介させていただきます。

重い電子系金属$YbRh_2Si_2$やβ-$YbAlB_4$で発見された非従来型の量子臨界現象は、強相関電子系における前世紀末以来の大きな問題となっています。非従来型の量子臨界現象を統一的に説明する機構として、Ybの臨界価数ゆらぎの理論が提案されています[1,2]。

最近、非従来型の量子臨界現象の新しい側面が実験により明らかになってきました。一つは、β-$YbAlB_4$で一様磁化率が温度Tと磁場Bの比の一つのスケーリング関数で４桁以上にわたって表されるという、T/Bスケーリングの発見です[3]。もう一つは、準結晶$Yb_{15}Al_{34}Au_{51}$における上記周期結晶で観測された非従来型の量子臨界現象と共通の臨界性の発見です[4]。驚くべきことに、常圧・零磁場で量子臨界性を発現する点もβ-$YbAlB_4$と共通しており、さらに、圧力を1.6 GPaかけても臨界性が不変であることが観測されました[4]。

そこで、磁場下での臨界価数ゆらぎのモード結合理論の構築[5]、および準結晶と近似結晶の基本格子構造を構成するYb-Au-Alクラスターの理論模型の構築[6]を行い、理論解析を行いました。その結果、β-$YbAlB_4$で磁化率が零磁場極限で$T^{-0.5}$の温度依存性を示し、有限磁場下でT/Bスケーリングの振る舞いを示すことが明らかとなりました。また、Yb-Au-Alクラスターの基底状態相図においてYbの価数転移の量子臨界点が斑点状に出現し、広大な量子臨界領域が出現することがわかりました。これにより、準結晶$Yb_{15}Al_{34}Au_{51}$の圧力に対してrobustな量子臨界性が自然に説明されることがわかりました。

最近、さらに驚くべきことに、準結晶$Yb_{15}Al_{34}Au_{51}$でβ-$YbAlB_4$で観測されたものと同じT/Bスケーリングが６桁以上にわたって成り立つことが観測されました[7]。また、β-$YbAlB_4$でも圧力下のrobustな量子臨界性が観測されました[8]。これらの実験事実は、格子が周期性をもつか、準周期性をもつかに依らず臨界価数ゆらぎにより新しい普遍性クラスが形成されている可能性を示唆しており、この観点からこれらの新しい現象の機構を理論的に解明することが、本研究プロジェクトの目的です[9]。

このように、新しい実験結果と新しい理論的枠組みの構築、それに新物質が相まって、強相関電子系における新しい量子臨界物性が周期結晶のみならず準結晶までも拡がりを見せており[10]、今後の研究の発展が楽しみです。どうぞよろしくお願いいたします。

[1] S. Watanabe and K. Miyake, Phys. Rev. Lett. **105**, 186403 (2010).
[2] 渡辺真仁, 三宅和正, 固体物理 **47**, No.11 511 (2012).
[3] Y. Matsumoto ***et al.***, Science **331,** 316 (2011).
[4] K. Deguchi ***et al.***, Nature Mat. **11**, 1013 (2012).
[5] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 103708 (2014).
[6] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 083704 (2013); J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012087 (2015).
[7] K. Deguchi, JPS March meeting (2016) Symposium 21pBR-6.
[8] T. Tomita ***et al***, Science **349**, 6247 (2015).
[9] S. Watanabe and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 063703 (2016).
[10] 渡辺真仁, SPring-8/SACLA利用者情報 **21**, No.2 96 (2016).

【A01】研究課題番号：16H01080　フラストレーション系におけるスピン多極子秩序と新奇伝導の理論的・数値的研究

フラストレーション系におけるスピン多極子秩序と新奇伝導の理論的・数値的研究

坂井　徹
兵庫県立大学 大学院物質理学研究科　教授

研究内容

量子スピン系を中心とする強相関電子系を理論的・計算科学的に研究しています。最近はカゴメ格子反強磁性体や三角格子反強磁性体などのスピン・フラストレーション系で実現する量子スピン液体の性質について、京コンピューターなどのスーパーコンピューターによる大規模数値対角化により数値的に解析しています。新学術領域J-Physicsにおいては、最近注目されているスピン系の多極子秩序であるスピン・ネマティック相で起きる新しい現象を理論予測することを研究目的としています。スピン・ネマティック相というのは、スピンの方向だけが揃って、向きが揃わない新しい秩序相のことで、フラストレーション系や異方性のある系で実現することが理論的に予想されています。最近になって、いくつかのフラストレーション系で実験的に観測されて注目が集まっていますが、まだその全容が解明されておらず、本当にスピン・ネマティック相なのかどうか、あるいはどのような新しい性質が期待されるのか、物議を醸している状況です。このような状況を解決する理論を構築することが目標となります。

また、カイラリティを起源とする新しいメカニズムの超伝導を提唱することも、一つの目標と考えています。いまのところ、候補となる系として三本鎖スピンナノチューブと呼ばれる系を対象として、大規模数値解析による物質設計を検討している段階ですが、非常に単純な系なので、将来的には現実の物質でも実現可能と期待しています。

どちらかというとd電子系やπ電子系を中心に研究してきましたが、実を言うと、昔はSCR理論に基づいてウラン系のメタ磁性転移や金属・絶縁体転移の研究もしたこともありますので、ご興味のある方はお尋ねください。

自己紹介

趣味はサッカーで、歳がいもなく、観るよりもプレーする方が好きです。SPring-8の芝生のグランド（夜になると野生のシカが群れています）で、ほとんど毎日昼休みにミニサッカーをしています。ただし、慢性的に人数不足で、多くても10人くらいしか集まりません。SPring-8のビジターの方も歓迎しますので、時間に余裕のある方は、昼休みにグランドを訪ねてみて下さい。また、兵庫県立大学理学部もSPring-8と同じ西播磨の山奥にあるため、なかなか訪問してくださる人がなく、若手研究者や学生の情報交換の機会がありません。SPring-8も含めて、近くに来られる方ありましたら、セミナーや談話会で講演していただけるとありがたいです。事前に坂井(sakai@spring8.or.jp)までご一報いただけましたら、セッティングしますので、どうぞよろしくお願いします。以下はジャンク情報です。好きなチーム：阪神タイガース・鹿島アントラーズ、よく行く国：フランス（気まぐれな国民性が好きです）、好きなもの：酒・サッカー・サイエンス（坂井のSにかけてるつもり）、苦手なもの：スウィーツ。

【A01】研究課題番号：16H01082　熱流およびスピン流における多極子輸送現象の理論

熱流およびスピン流における多極子輸送現象の理論

森　道康
日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター　主任研究員

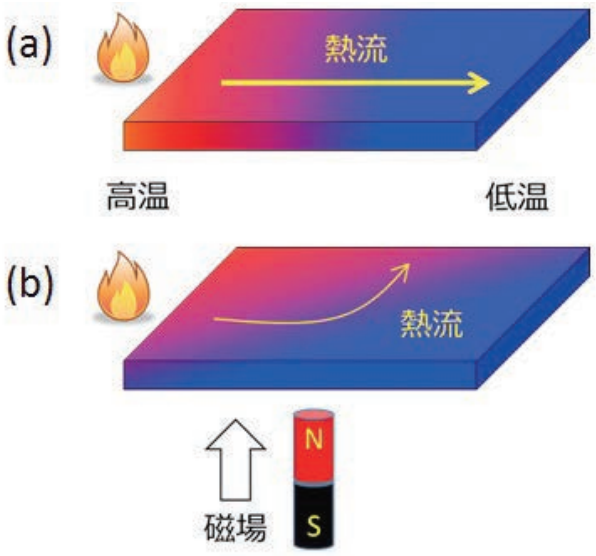
徐　卓
日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター　博士研究員

平成２８年度より『熱流およびスピン流における多極子輸送現象の理論』という課題で公募研究に加えて頂きました。本計画では、フォノンホール効果やスピンホール効果など、熱やスピンの輸送現象に関する理論研究を通して、多極子伝導系の新たな物理の開拓を目指しています。

フォノンホール効果は、熱ホール効果の一つです。フォノンによって運ばれる熱流に対して垂直に磁場をかけると、これら両方に垂直な方向に温度勾配が現れる現象です。実際に、非磁性絶縁体$Tb_3Ga_5O_{12}$で観測されています。その起源は、Tbイオンの四極子と格子ひずみとの結合にあり、磁場によるTbイオンの非クラマース二重項が解けて、フォノンの共鳴散乱が空間的に非対称になるため、あたかも熱流が磁場で曲げられたような現象が観測されるのです。このアイディアを、複数原子に渡る拡張された多極子などに拡張することで、他の系でもフォノンホール効果が観測できないか、更にはこの効果自体がもっと大きくなる条件はないかと考えています。フォノンホール効果は熱流を磁場で制御するヒントになるかもしれません。

一方のスピンホール効果は、磁気の流れであるスピン流と電流との相互変換を与える現象です。磁性体を用いた熱電発電の仕組みであるスピンゼーベック効果に不可欠のものです。スピンゼーベック効果は、強磁性体と金属の単純な積層構造に温度勾配を与えると、電位差が生じるという現象で、新しい熱電発電の仕組みだと言えます。従来の熱電素子に比べて、単純な積層構造のおかげで大面積への加工が容易である点に大きな利点があります。しかし、実用化に至るためには、金属におけるスピンホール効果が大きくなることが必要です。実験室レベルでは白金が使われていますが、より安価な材料で大きなスピンホール効果を得る必要があります。銅など安価な材料を基にした合金などを始め、最適な材料の組み合わせを探る一方、拡張された多極子を活用できないかと考えています。

上記いずれの現象にも、エネルギーの効率的利用が見え隠れしています。使われずに廃棄されている熱エネルギーを制御して再利用する、もしくは、電気エネルギーや磁気エネルギーなどの利用しやすい形態に変換することなどは、今後より重要になる社会的課題だと言えます。多極子伝導現象の物理が、エネルギー問題を解決する原動力となり、広く社会に貢献することをも期待しながら研究を進めています。



（a）熱流が高温から低温に拡散する様子。
（b）磁場によって熱流の拡散が、流れと磁場に関して非対称になった様子。

【B01】研究課題番号：16H01060　URu2Si2の強磁場磁気秩序と磁気相関の起源の解明

URu_2Si_2の強磁場磁気秩序と磁気相関の起源の解明 －空飛ぶ強磁場を用いて

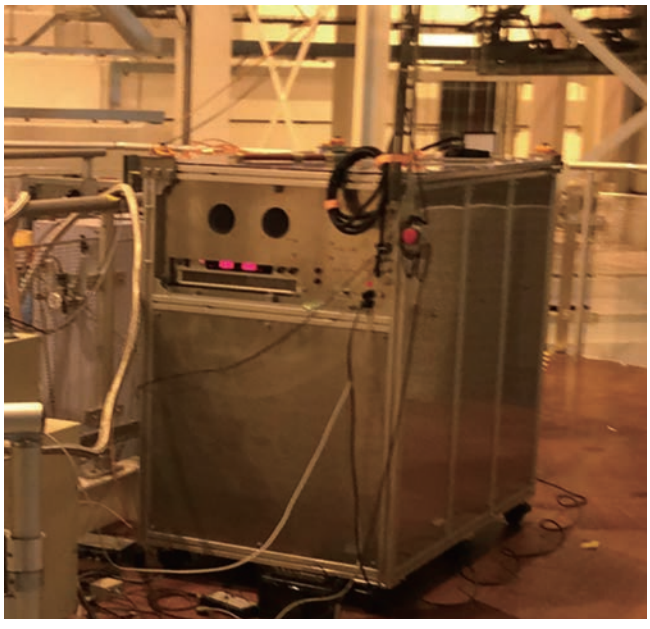
野尻　浩之
東北大学 金属材料研究所　教授

当部門は、磁性、特に強磁場に関わる磁性の研究を行っている部門であり、主な研究内容としては、強相関電子系の磁場誘起相転移現象、量子スピン系の磁性、分子磁性体の量子現象などがあげられます。研究に用いる強磁場環境としては、第１に金研の強磁場センターの定常強磁場があり、こちらでは、比熱や輸送現象、NMRなどの研究を行っています。２つめとして、部門に40テスラ用の小型のコンデンサ電源があり、ヘリウム3温度までの磁化、誘電率等に加えて高周波のESR測定を行っています。さらに３つめとして、中性子、放射光X線、X線自由電子レーザー等と小型のパルス磁場電源を組み合わせた研究を展開し、強磁場中の構造相転移や電荷秩序波等による超格子反射。強磁場中性子回折、X線吸収分光・円二色性分光などを行っています。

最近の代表的な成果としては、YBCOの電荷密度波の3次元性の発見やURu_2Si_2と関連物質の磁場中磁気構造の決定などがあげられますが、これまで主にマクロな物性測定から推測されてきた強磁場中の磁気状態や電子状態が、これらの新しい手法で直接的にわかるようになってきたことは、当研究室の大きな成果の一つです。これらの実験は国内の主要施設だけでなく、海外の放射光、中性子施設などでも行っており、" Flying magnets and Rolling Capacitor Bank" のモットーの下に、強磁場が必用な場所には、どこでも強磁場環境を持ち込めるのが強みであり、これらの装置は海外にも有償で輸出されるに至っています。本領域では、これらの実験装置群を駆使して、URu_2Si_2を中心として、遍歴と局在の２重性をリアルに捉えてゆきたいと考えております。

研究室のメンバーとしては公募中の准教授１名の他、電気化学、比熱、NMRを専門とする３名の助教と若干名の大学院生で構成されており、学生も含めて、できる限り自己完結性と協力性をバランスさせて実験を行うことを目指しています。

私自身は、学部時代の京大からはじめて、阪大、神戸大、物性研、金研、岡山大、金研と多くの場所を渡り歩き、そのたびに新しい実験の手法や、新しい研究仲間との出会いを力にして、幅広い視野で磁性の研究を進めてきました。希土類の研究１つをとっても、U系の研究、価数転移などはもちろん、ラジカルと希土類からなる分子磁石などの研究も進めており、それらの中の共通性と個性を楽しみながら研究を行っています。実験は、やってみなければ、結果はわかりません。なにか、試みたいことがあれば、確率は低くてもチャレンジしますので、ぜひお声がけ下さい。



イギリスのRutherford研究所の中性子施設に設置された小型強磁場発生装置. 強磁場中性子回折実験でURu_2Si_2の磁気波数がRhドープで顕著に変化する事を見出した。

1) Three-Dimensional Charge Density Wave Order in $YBa2Cu_3O_{6.67}$ at High Magnetic Fields, S. Gerber ***et al.***, Science 350, 6263(2015) 949.
2) Magnetic Structure of Phase II in $U(Ru_{0.96}Rh_{0.04})_2Si_2$ Determined by Neutron Diffraction under Pulsed High Magnetic Fields, K. Kuwahara ***et al.*** , Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 216406.
3) X-Ray Spectroscopies in Pulsed High Magnetic Fields: New Frontier with Flying Magnets and Rolling Capacitor Banks, Y. Narumi et al., Synchrotron Radiation News 25(2012) 12.

【B01】研究課題番号：16H01061　スピン軌道相互作用によって保護される電場誘起伝導界面の新奇超伝導物性

スピン軌道相互作用によって保護される電場誘起超伝導体の新奇物性を目指して

野島　勉
東北大学 金属材料研究所　准教授

電気二重層トランジスタを用いて実現される電場誘起2次元電子系には、その試料構造に起因する空間反転対称性の破れのため、様々なタイプの強いスピン軌道相互作用（SOI）が働きます。その結果として生じるスピンー運動量ロック現象のため超伝導状態の電子対は運動量空間で固定され、スピンと垂直方向（伝導面平行）の磁場に対して保護されることになります。またそこでの特殊なスピン状態を反映して、パリティ混成状態やFFLO 的ヘリカル状態といった新奇な超伝導現象が発現する可能性が大いにあります。これまで、$SrTiO_3$やMoS_2表面の電場誘起超伝導の上部臨界磁場が予想以上に大きいこと見出し、さらにこれらがそれぞれ*d*電子系の軌道自由度によって増強されるRashba型SOIや三角プリズム結晶構造に起因するZeeman型SOIによる、パウリ上限の増強効果であることを予見してきました。本公募研究では、領域のキーワードであるSOIが大きく影響を及ぼす超伝導現象をさらに突き詰めて理解するとともに、そこから生まれる新奇な物性を探索していきたいと考えています。

スピン―運動量ロッキングによる上部臨界磁場の上昇という物理現象は、これまで反転対称性のない重い電子系超伝導で主に議論されてきました。反転対称性の破れに起因するSOIという観念は共通でも、本研究ではそのアプローチ方法、扱う電子軌道やバンド構造が違うことから、重い電子系とは異なる視点からSOIの物理を議論することで領域に貢献したいと考えています。

現在の電場誘起超伝導を始める前は、超伝導多層膜や銅酸化物超伝導薄膜における、渦糸物理やスピン注入といった研究を行ってきました。その頃から、FFLO超伝導や超伝導体中のスピン軌道相互作用の議論は常に身近にあったのですが、なかなか現象としてめぐり合えないでいました。期せずして、これらの問題に正面から取り組めるようになったことに喜びを感じています。学生時代に極低温を目指して修行を積んだと思ったら、高温超伝導が発見されむしろ高温を目指すという激動の時代に育ったことが、現在の研究生活に大きく影響を及ぼしていると感じます。これからも領域内連携等を通して既成観念にとらわれない共同研究にも取り組みたいと思っています。

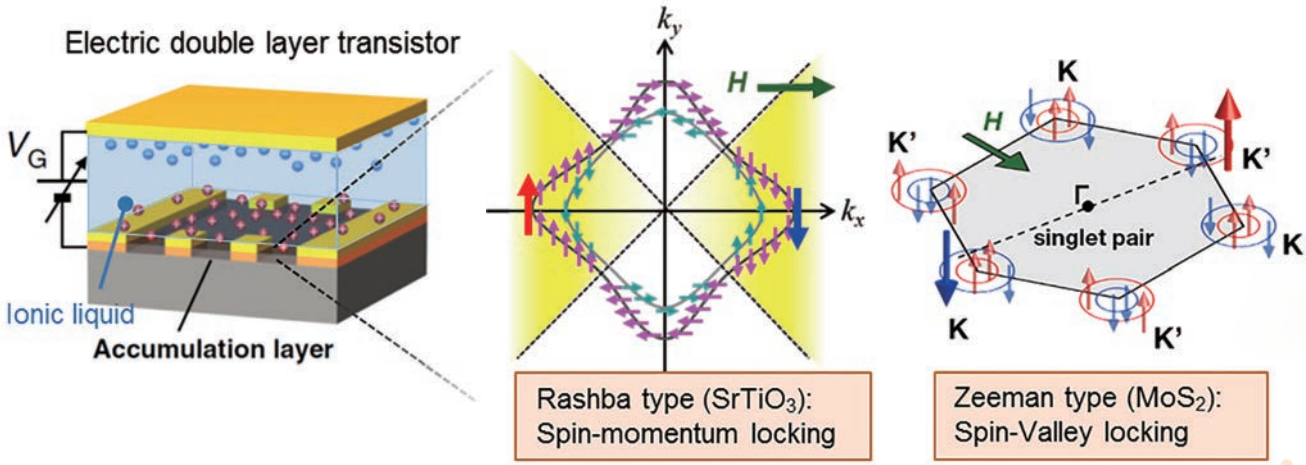


図　電気二重層トランジスタ構造とそこで発生する反対称スピン軌道相互作用による特異なスピン状態（$SrTiO_3$とMoS_2の場合）

【B01】研究課題番号：16H01078　立方晶化合物の特異なフェルミ面

立方晶化合物の特異なフェルミ面

大貫　惇睦
琉球大学 理学部　客員教授

仲間　隆男
琉球大学
理学部　教授

辺土　正人
琉球大学
理学部　准教授

竹内　徹也
大阪大学
低温センター　助教

結晶反転対称性が破れるとフェルミ面は２つに分裂し、スピンも特定の方向を向くことになる。そのため、そうゆう結晶ではスピン３重項の超伝導は起こらないと考えられていた。しかし、最近では、スピン１重項と３重項が混ざりあった超伝導があっても良いという理論が提出されている。いまのところその実験的な証拠は見出されていないが、$CeIrSi_3$や$CeRhSi_3$での正方晶の[001]方向での異常に大きな超伝導上部臨界磁場の起源は、ラッシュバ型を反映した電子のスピンの向きに垂直に磁場を印加したとき常磁性効果がはたらかないことの反映であることが明らかにされた。さらに、結晶反転対称性が破れると、磁気モーメント間にジャロシンスキー・守谷相互作用がはたらき、スキルミオンなどの興味深い磁性が発現され、研究が発展している。

反転対称性の破れた結晶は意外に多く、230の空間群のなかで138群が破れている。立方晶に限っても38群中19群に及ぶ。本研究は立方晶をとりあげ、そのフェルミ面の分裂や新たな磁性を研究しようとしている。

図１は本研究対象の一つである立方晶構造を持つ蛍石、パイライト、ウルマナイトの結晶構造を示す。鉱物として知られるパイライトの結晶構造（$Pa\bar{3}$, T_h^6, No.205）を図１(b)に示す。結晶反転対称性は存在するが、立方晶で良く存在する４回軸対称性がない。FeS_2のSとSの対の中心はNaCl構造のClに対応する。このS対の一つがSbに、FeがNiになったNiSbSはウルマナイトと言う鉱物で、結晶反転対称性の破れた構造（$P2_13$, T^4, No.198）であり、図１(c)に示す。正確には、Niは面心構造ではない。Niを削除すると、FeSi, MnSiの結晶構造となり、Sbで構成された４面体とSの４面体が入れ子になっている。パイライトのSの対を引き延ばすと図１(a)の蛍石のCaF_2（Fm3 m, O_h^5, No.225）となる。これらの結晶構造のフェルミ面の性質や磁性に着目し、以下の実験を現在行っている。

１）結晶反転対称性の破れたPdBi(UIr), $Pd_3Bi_2S_2$, $Pt_3Bi_2Se_2$, EuPtSiのフェルミ面の分裂や新しい磁性
２）パイライト型化合物$Co(S_{1-x}Se_x)_2$の強磁性の量子臨界性とメタ磁性
３）パイライト型化合物CuS_2, $CuSe_2$, $CuTe_2$のフェルミ面と超伝導
４）NaCl型化合物YBi(YSb), LuBi(LuSb)のBi-6p電子の相対論効果
５）蛍石構造$AuAl_2$, $AuGa_2$, $AuIn_2$のフェルミ面

また、Th化合物では6d電子がフェルミ面に大きく寄与するが，6d電子の大きなバンド幅と大きなスピン・軌道相互作用に注目し、結晶反転対称性の破れたTh化合物のフェルミ面の分裂も実験的に明らかにしたいと思う。

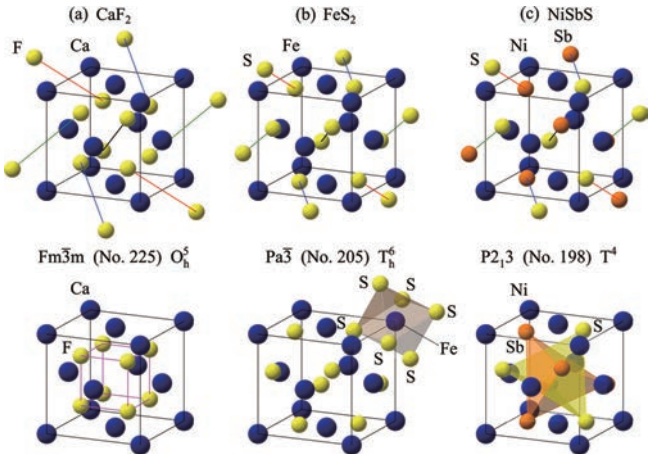


図１　立方晶 (a) 蛍石、(b) パイライト、(c) ウルマナイトの結晶構造

【B01】研究課題番号：16H01079　強磁性三重臨界点と強磁性超伝導に関する微視的理論

強磁性三重臨界点と強磁性超伝導に関する微視的理論

服部　一匡
首都大学東京 大学院理工学研究科　准教授

堀田　貴嗣
首都大学東京 大学院
理工学研究科　教授

自己紹介

２０１５年４月に，８年間所属した物性研から現在の所属に移り，はや一年が経ってしまいました．大学の近くに住んでいますが，春になるとここ多摩地区は物性研のある柏とは比較にならないほど大量の花粉が降り注ぎ，花粉症の私には大学近くの壮麗な桜並木も霞んでしまうほどです．多摩丘陵を貫く京王相模原線沿いには，何かの縁か旧阪大基礎工三宅研究室の諸先輩方が居を構えられ，東京の最果てにもかかわらず，個人的には居心地良い環境です．物性研の時のような研究ペースを維持するのは少し難しいですが，業界歴～１０年にもなればそれなりに要領良くやれよという要請もありますので，表題のテーマに関して頭と計算機を使って新しい物理を開拓したいと思っています．

URhGeにおけるリエントラント超伝導の理論

さて，表題の強磁性超伝導と三重臨界点．このトピックに関しては文献[1]による総説があり，U系強磁性超伝導体の実験についての詳細がまとめられている．私が興味を持ったのはU系強磁性超伝導体の中でも特にURhGeである．この物質とよく似た性質を示すUCoGeもあるが，UCoGeはより遍歴的で，これに対してURhGeは強磁性モーメントも0.4μ_Bを持つ．U系強磁性超伝導体に特徴的なことは，どの物質も大きなイジング異方性(//c軸)を持つことだが，URhGeではその横磁場(//b軸)への応答が非常に特徴的であり，図１のようにb軸に磁場をかけると一旦消失した超伝導が8T付近から再び現れる（リエントラント）．

文献[2]では，このリエントラント超伝導の発現機構として，イジング強磁性体に横磁場をかけた場合に，磁気モーメントが横向きに飽和する臨界磁場直上に現れるギャップレスマグノンによる引力を提案した．この引力機構は磁気モーメントが横に倒れる揺らぎであるため，三重項クーパー対のz方向のスピンS_zは$S_z=1$と$S_z=-1$が混ざり合った状態が安定化される．この理論では強磁性状態は平均場近似を基礎としているため転移は二次転移であり，最近明確になりつつある低温での一次転移[3]（このことは三重臨界点の存在を意味する）を考慮していなかった．また，転移磁場よりも低磁場側でメタ磁性転移的な磁気モーメントの急激な増大が観測されているが[1]，このことも今後の理論で考慮する必要があり，強磁性三重臨界点を記述できる微視的な模型を数値的な手法を用いて臨界点近傍の電子状態や物性の解析を行いたいと考えている．また，イジング異方性を持つ近藤格子模型に対する横磁場の効果は，これまであまり研究がなされてなかったこともあり，このような基礎的な模型の解析も行いたい．具体的には一次元模型について密度行列繰り込み群法による詳細な解析を行うことを計画している．

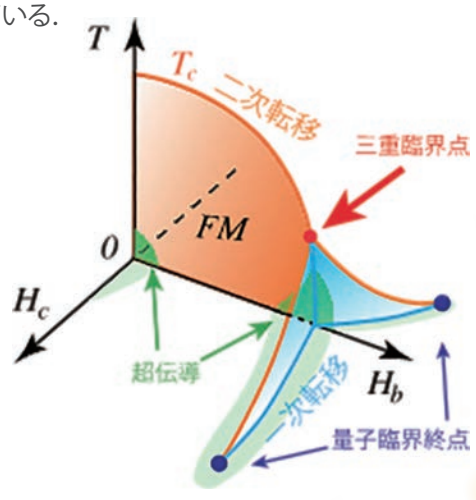


図１：URhGeの温度T–c軸磁場–b軸磁場相図の概略図．

謝辞
ここで紹介させて頂いた研究内容は東京大学物性研究所 常次宏一教授との共同研究である。

参考文献
[1] D. Aoki and J. Flouquet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 061011 (2014).
[2] K. Hattori and H. Tsunetsugu, *Phys. Rev. B* **87**, 064501 (2013).
[3] Y. Tokunaga, et al., *Phys. Rev. Lett.* **114**, 216401 (2015); *Phys. Rev. B* **93**, 201112(R) (2016).

【B01】研究課題番号：16H01081　遍歴多極子と多極子超伝導体

遍歴多極子と多極子超伝導体

池田　浩章
立命館大学 理工学部　教授

自己紹介

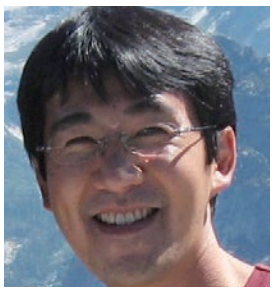
出身は和歌山県，高野山の麓，紀の川のほとりの田舎育ちです。阪大基礎工を1997年に卒業，望月＆鈴木研にて修士課程終了まで第一原理計算に基づく研究を，博士過程からは三宅研にて近藤半導体の研究に勤しみました。当時，基礎工物性のスタッフには，三宅先生初め，鈴木先生，天谷先生など物理＋酒or酒＋物理?を嗜むおおらかな先生が多く在籍され，その楽しげな物理観・人生観に随分影響されたように思います。その後，寺倉先生のプロジェクトでお世話になり，京大理の大見研の助手に着任後は，特に山田先生の薫陶を強く受けました。2014年以降，立命館大学に異動し，研究と教育の両立の難しさを味わう日々を過ごす毎日ですが，当時の基礎工物性の先生方を思い返して，おおらかな心持ちで物理を楽しみたいと思います。これからどうぞよろしくお願いいたします。

研究紹介

研究テーマである重い電子系化合物は，多自由度が複雑に絡み合った奇妙な現象を示す物質の宝庫ですが，現状，その複雑な電子状態が理論的な進展を妨げており，その理解はなかなか思うようには進んでいません。現実の物質が示す多彩で興味深い物性を統一的に理解するには，第一原理的な計算手法の発展が必須であると考えます。最近，我々のグループでは，ワニエ関数の手法を用いた低エネルギー有効模型に基づいて，多極子相関関数を第一原理的に評価することを可能にしました。URu_2Si_2においては，隠れた秩序の問題に対して新しい秩序変数を提案[1]し，$CeCu_2Si_2$においては，長年の常識に反してs波超伝導体である可能性を示唆する結果[2]を得ています。その研究課程において，主として局在の概念であった多極子を遍歴多極子として一般化しました。また，京都大学の学生である野本拓也氏とのUPt_3の研究[3]では，もっともらしい超伝導ギャップ構造が，これまで考えられてきたものと違ったE_{2u}状態であることを提案しており，さらに，そこから派生した多軌道超伝導体における群論的分類学[4]では，首都大の服部一匡氏とともに，Volovik & Gor' kov[5]やSigrist & Ueda[6]のテーブルを一般化，これまでの超伝導研究で見逃されてきたいくつかの可能性について指摘しています。

本公募研究では，これらの研究成果を踏まえ，さらに発展させる事を考えています。まず考えられるのは，電子相関の効果を取り込むことであり，重い電子状態の形成過程を記述したうえで多極子相関関数を評価するというのが本公募研究の主軸の一つです。また，群論的分類学では，多軌道電子格子系の見直しに発展しつつあり，本公募研究におけるもう一つの軸になっています。個人的には，第一原理計算の発展は本研究領域が次のステージに移るための重要なステップであると捉えており，本公募研究を通して着実な進展に寄与できれば幸いであると考えています。

参考文献
[1] H. Ikeda *et al.*, Nature Phys. **8**, 528 (2012).
[2] H. Ikeda, M.-T. Suzuki and R. Arita, Phys. Rev. Lett. **114**, 147003 (2015).
[3] T. Nomoto and H. Ikeda, arXiv:1607.02708.
[4] T. Nomoto, K. Hattori and H. Ikeda, arXiv:1607.02716.
[5] G. E. Volovik and L. P. Gor' kov, Sov. Phys. JETP **61**, 843 (1985).
[6] M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. **63**, 239 (1991).



【B01】研究課題番号：16H01084　3次元ARPESによる強相関ウラン化合物の電子状態の解明

3次元ARPESによる強相関電子系の電子状態の解明

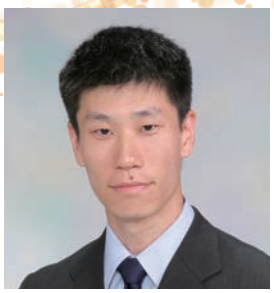
藤森　伸一
日本原子力研究開発機構　主任研究員

このたびは、J-Physicsの公募班として課題を採択して頂きまして大変ありがとうございました。2年間という限られた期間ではありますが、いろいろと新しいことに挑戦して、当領域活動に貢献してゆきたいと決意を新たにしている次第ですので、皆様どうぞよろしくお願いいたします。さて、私が所属する原子力機構(JAEA)はSPring-8に専用ビームラインを設置し、多様な物性研究を展開しております。特にBL22XU, BL23SUは非密封RIの取り扱いが可能なRI実験棟にビームラインが導入されており、非密封ウランやトリウム化合物に対する測定をすることが可能です。我々は、軟X線ビームラインBL23SUにおいて、ウラン化合物に対する光電子分光実験を2004年頃から開始しましたが、これまでの成果は、JPSJ 2016年6月号にreview paperとしてまとめる機会をいただきましたので、ご一読していただければ幸いです。

光電子分光実験の中でも、特に角度分解光電子分光(ARPES)は固体の電子状態を直接観測できる手法であり、これまでも様々な物質系、特に銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体においてその威力を発揮してきたことは皆様もご存じの通りです。一方で、*f*電子系に対するARPESではこれらの研究とは状況が大きく異なっており、いくつかの問題点が存在しています。特に、①表面層とバルクの電子状態の違いが大きい ②物質が基本的に３次元的である ③準粒子バンド幅が狭いため、分散の直接観測や定量解析が困難である、という３つの点が大きな課題です。これまで我々は特にバルク敏感性が高い軟X線放射光を利用した放射光ARPESを行うことにより、問題点①を克服しながら多くの化合物の電子状態を明らかにしてきました。今回の研究課題では、測定系の改良によって3次元電子状態を一括して測定することにより、②の問題も解決することを目指しています。特にURu_2Si_2に対してこの手法を適用することにより、今まで十分に捉えれていなかった3次元的な電子状態を明らかにすることによって、隠れた秩序状態の解明に重要な情報をもたらすことができればと考えて、準備を進めているところです。また、この手法は他の物質系にも適用可能であり、特に複雑な電子構造をもつ物質系に有効であると考えております。私自身も研究の幅を広げてゆ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。

自己紹介

私は現在SPring-8 BL23SUで光電子分光を中心とした研究を行っておりますが、大学院生時代（1993-1998）は、東北大理学部の旧「物理学第一講座」に所属していました。本多光太郎先生が初代教授を務めた由緒ある研究室ですが、私が所属した頃は四代目の佐藤繁先生が教授で、放射光や光電子分光の研究室でした。当時、東北大では*f*電子系の研究が大変活発な時期でしたので、当時のフロンティアであった5*f*電子系の分光研究がテーマでした。学位審査時の予備審査では、副主査だった小松原武美先生に何時間もコテンパンになるまで絞られましたが、辛うじて学位を得てJAEA/SP8に就職し、現在に至っています。その間、StanfordのZ.-X. Shenグループに長期滞在する機会も得て、銅酸化物超伝導体の物理の面白さを知り、なおかつ油断も隙も無い仁義なき競争の世界を垣間見ました。それと比較すると*f*電子系の研究は比較的落ち着いており、なおかつその物理は多様なので、テーマをじっくり掘り下げることができることが魅力だと考えています。



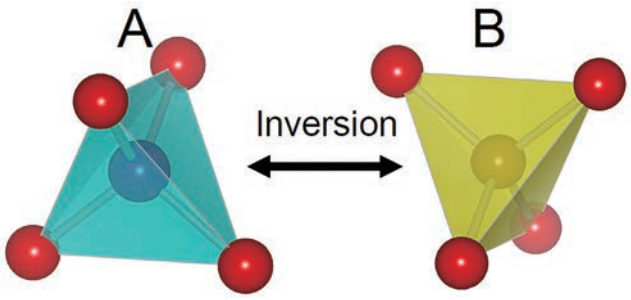
【C01】研究課題番号：16H01062　奇パリティ多極子秩序系における新奇量子伝導

奇パリティ多極子秩序系における新奇量子伝導

大串　研也
東北大学 大学院理学研究科　教授

松原　正和
東北大学 大学院
理学研究科　准教授

私は、「正四面体」に独特の魅力を感じています。正四面体は一見すると低い対称性を持っているようにも感じられるものの、実際には正八面体と同様に立方晶の対称性を持っています。群論の言葉を使って表現すると、正四面体は位数24の正四面体群T_dで特徴付けられ、これは位数48の正八面体群O_hから反転対称操作を除いた群に相当する（$O_h = C_i \times T_d$）となります。この正八面体群から失われた対称操作が反転対称性だというのが、とても面白く感じられるのです。視覚的に空間反転対称性の喪失を理解するのは簡単です。下図に示すように、ある正四面体Aに反転対称操作を施して生じる正四面体Bは、並進操作や回転操作で正四面体Aに重ね合わせることはできないことから、反転対称性が失われていることが分かります。



正四面体における反転対称性の破れ

固体中ではしばしば正四面体配位が出現し、その中心原子において局所的に反転対称性が失われています。この局所的反転対称性の破れに起因する量子物性に興味を抱き、研究を行ってきました。ささやかな成果として、スピネル型化合物$FeCr_2S_4$（FeがSに正四面体的に配位されています）における二つの現象の観測が挙げられます。

・パリティ混成により、Feイオンの原子内*d*-*d*遷移が電気双極子遷移許容となります。この遷移への共鳴効果により、大きな磁気光学効果が発現します[Ohgushi, PRB (2005).]

・次近接Feイオン間にRashba相互作用が働き、異常Hall効果が顕著な異方性を示します。これは、蜂の巣格子における「パリティ異常」を、ダイアモンド格子へ拡張することで理解できます[Ohgushi, JPSJ (2006).]。

最近の私の興味は、局所的な反転対称性の破れに起因する線形応答を超え、大局的に反転対称性が喪失した系（これは奇パリティ多極子が強的に秩序化した系と言い換えられます）で、新奇な量子物性を観測することです。正四面体を構成ユニットに含む物質群は、僅かな摂動を加えることで大局的に反転対称性を破ることができるため、こうした研究にうってつけです。実際、正四面体を構成ユニットに含むパイロクロア型酸化物にブリージング型構造歪を導入すると、*xyz*電気八極子が強的に秩序化します。この相において、伝導電子の関与する顕著な第二高調波発生が発現することを解明しました[Hirata, Ohgushi, PRL (2013).]。

新学術領域研究においては、学内のレーザーグループと協働することで、新たな奇パリティ多極子秩序を同定し、その相に特有の量子物性を開拓することを目指しています。様々な方々との議論や共同研究を望んでおりますので、どうかお気軽にお声をお掛けください。どうぞよろしくお願い申し上げます。

多極子遍歴系に対する計算物理学手法の開発：多軌道クラスター型動的平均場近似

品岡　寛
埼玉大学 大学院理工学研究科　助教

私は、博士号を東大物工で取得後、東大物性研、産総研、スイス連邦工科大学チューリッヒ校でポスドクを経験しました。スイスで、研究、スポーツ三昧の3年弱を過ごした後、2015年10月から教員として埼玉大学に勤務しています。最近は、幾何学的フラストレート磁性、4*d*、5*d*系などスピン軌道相互作用の強い系の研究を行っています[1-4]。元々、プログラミングや数値計算が好きなこともあり、最新のコンピュータアルゴリズムを使った計算物理を専門にしています。特に、動的平均場近似法、量子モンテカルロ法に興味を持っています。

今回の公募研究では、強相関電子系の理論と第一原理計算を繋ぐ仕事を行いたいと考えています。近年、密度汎関数理論 (DFT)と動的平均場近似法 (DMFT)を組み合わせた手法 (DFT+DMFT)が広く使われるようになってきました。しかし、スピン軌道相互作用が強い系の計算や、空間相関の記述は依然として難しく、新しい理論手法の開発や効率的な数値解法が必要とされています。J-PhysicsにはDMFT、バンド計算の専門家が多数参画されています。それらのネットワークを利用して、世界をリードする研究を行いたいと思います。

現在、DMFTのクラスター拡張や、DMFTから出発したダイアグラム展開(dual fermion等)と第一原理計算の融合に取り組んでいます。DMFTでは、格子系の問題を有効的な量子不純物問題にマップします。最近、私たちは、量子モンテカルロ法に基づく、効率的な計算アルゴリズムを提案しています。それを実装した量子モンテカルロ法のコードを整備中で、今夏オープンソースウェアとして公開される予定です[5]。同時に、スピネル酸化物LiV_2O_4における重い電子挙動、5d^5パイロクロア酸化物$Y_2Os_2O_7$における非自明な磁性相の起源の解明にも取り組んでいます。*f* 電子系の知識はまだ豊富ではありませんが、本領域の研究会を通して学びたいと考えています。

[1] HS et al., PRL **107**, 047204 (2011)
[2] HS et al., PRL **108**, 247204 (2012)
[3] HS et al., PRB **88**, 174422 (2013)
[4] HS et al., PRL **115**, 156401 (2015)
[5] https://github.com/ALPSCore/CT-HYB

【C01】研究課題番号：16H01070　多重量子ドット系の幾何学的対称性を利用したナノスケール多極子物性の創出

多重量子ドット系の幾何学的対称性を利用したナノスケール多極子物性の創出

古賀　幹人
静岡大学 教育学部　教授

ここでは自己紹介を兼ねて「多極子」に関わる私の研究遍歴の一端を紹介し、本新学術領域研究「J-Physics」の一員としてどのような貢献が可能であるか述べたいと思います。

「多極子」に関わるきっかけ

私がM2の頃で今でも印象に残っていますが、1993年の東北大学での物理学会で、当時新進気鋭の網塚さん（C01計画研究代表）が、ウラン希釈系の低温における不純物比熱係数・帯磁率の発散的振る舞いをコックス・モデルによって説明されていました。これがきっかけで四極子近藤効果の論文[1]を知りました。実は、非フェルミ流体なぞ出るモデルが怪しいということで、より現実的なモデルを検討することになり、博士課程での研究課題になりました。この時に多極子を導入し、5ランクまで考慮しました。しかし、非クラマース二重項がどうしても非フェルミ流体を安定にするという結果になり、途方に暮れる日々でした。現在でもこの非フェルミ流体状態の安定条件は明確ではないと思います。

「多重量子ドット系」との関わり

5年くらい前から物理学会の領域4や領域9にも参加するようになり、近藤効果を利用した量子デバイスが現実味を帯びつつあることを知りました。また、三角格子モット絶縁体における新しいマルチフェロイックスの機構[2]を検討したことがきっかけで、ループ形状の量子ドット構造体の研究に本格的に取り組むことになりました。スピン相関と電気分極の連動というマルチフェロイックスの視点を近藤効果に導入するのはまったく新しいアイデアであり[3]、本公募研究課題につながっています。

「J-Physics」での取り組み

f電子系の物理は一見複雑に見えますが、多極子で整理することによって理解が進んでいるように思えます。しかし、四極子近藤効果など多極子起源の実験的確証は現実系ではなかなか難しいようです。そこで、まだ試行的段階ですが、物理パラメーターの精密制御が期待される多重量子ドット系という舞台で、主に多極子近藤効果の実現、複数の量子状態の競合による量子臨界点の存在、さらにそれらに起因する新しい電気磁気効果の可能性を調べています。これまでに得られた多極子物性の知見をナノ・メゾ系へと発展させたいと思います。

[1] D. L. Cox, Phys. Rev. Lett. **59**, 1240 (1987).
[2] L. N. Bulaevskii et al., Phys. Rev. B **78**, 024402 (2008).
[3] 古賀幹人，松本正茂，楠瀬博明，固体物理 **48**, 227 (2013).

【C01】研究課題番号：16H01073　二次元ハニカム磁性体における特異な電流誘起磁気効果の検証

二次元ハニカム磁性体における特異な電流誘起磁気効果の検証

大原　繁男
名古屋工業大学 大学院工学研究科　教授

岸根　順一郎
放送大学
教養学部　教授

戸川　欣彦
大阪府立大学
工学研究科　准教授

松本　裕司
名古屋工業大学
工学部　助教

平成 28 年度からの C01 班公募研究として表題の研究課題を採択していただきました。本研究は、C01班のめざす、奇パリティ多極子秩序とそれによる電流誘起磁化現象を実証しようとするものです。班代表の網塚浩先生がニュースレター第一号に書かれているように、この新しい物理は理論[1-4]が先行し、実験が検証を試みている状況にあります。我々が合成している物質群が、はたして奇パリティ多極子研究の典型物質となりうるのか、緊張しながらも、これからの研究を楽しみにしています。

本研究では、三元系希土類金属間化合物$R_{0.67}T_nM_{2n+m}$ (R =希土類金属、T =遷移金属、M =土類金属Al or Ga)の物質合成をすすめています。これまでに、三方晶RNi$_3$Al$_9$(R=Gd-Lu)、RNi$_3$Ga$_9$(R=Nd,Sm, and Gd-Lu)、および、六方晶R_2Pt$_6$Ga$_{15}$ (R=La-Nd, and Sm-Lu)の単結晶育成に成功しました[5-8]。図 1 に示すように、これらの物質では希土類イオンRがハニカム構造を形成し、その中央に土類金属Mの小さな三角形が配置された層を持ちます[9]。この層は空間反転中心を持たず、C01班が取り組んでいる拡張多極子の出現に適した舞台だと考えられます。例えば、ErNi$_3$Ga$_9$はIsing型の反強磁性体であり、磁気モーメントはハニカム構造上で交互に上下を向いて並んでいると考えられます。これは拡張多極子においては磁気トロイダル八極子となります。今後、これらの二次元ハニカム磁性体を用いて、電流誘起磁化現象[2,4]を検証していきます。

最後に、研究チームの紹介をしたいと思います。紙面がつきてしまいましたので、私の自己紹介は新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」Newsletter **4(1)**, 14 (2011) を見ていただければと思います。反転中心のない磁性体における電気磁気効果については、岸根順一郎教授（放送大学）から理論的な支援を受けます。戸川欣彦准教授（大阪府立大学）とは、収束イオンビームで微細加工した試料を用いて電流磁気効果の測定を進めます。松本裕司助教（名古屋工業大学）とは、さらに新しい物質合成や各種測定など研究全般の推進を共に行います。また、ウラン化合物の合成にも取り組みたいと考えています。博士後期課程２年の二宮博樹君と１年の佐藤嵩晃君とは、苦楽を共にしながら研究していきたいと思います。他の研究室メンバーを始め、学内外に多くの共同研究者を得ています。この場をおかりして、みなさまにお礼を申し上げると共に、これからも新しい物理を共に探究する喜びを分かち合いたいと思います。

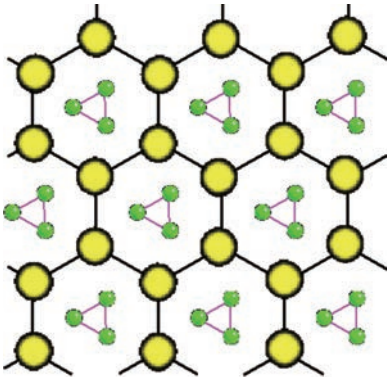


図 1 $R_{0.67}M$層のハニカム構造

[1] Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 014703 (2014)
[2] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, Phys. Rev. B **90**, 024432 (2014)
[3] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 064717 (2015)
[4] 速水賢、楠瀬博明、求幸年、固体物理 50(5), 217 (2015)
[5] T. Yamashita, R. Miyazaki, A. Yuji, S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 034705 (2012)
[6] S. Ohara, T. Fukuta, K. Ohta, H. Kono, T. Yamashita, Y. Matsumoto, and J. Yamaura, JPS Conf. Proc. **3**, 017016 (2014).
[7] T. Yamashita, S. Ohara, and I. Sakamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, SAPSA49 (2011).
[8] Y. Matsumoto, T. Ueda, and S. Ohara, J. Phys. Conf. Series. **683**, 012035 (2016).
[9] Y. Lutsyshyn, Y. Tokaychuk, V. Davydov, and R. Gladyshevskii, Chem. Met. Alloys **1**, 303 (2008).

【C01】研究課題番号：16H01076　ジグザグ鎖近藤半導体における反対称スピン軌道相互作用の効果

ジグザグ鎖近藤半導体における反対称スピン軌道相互作用の効果

高畠　敏郎
広島大学 大学院先端物質科学研究科　教授

半澤　克郎	浴野　稔一	梅尾　和則	木村　真一	横谷　尚睦
東京理科大学 理工学部　教授	広島大学 大学院 総合科学研究科　教授	広島大学 自然科学研究支援 開発センター　准教授	大阪大学 大学院 生命機能研究科　教授	岡山大学 大学院 自然科学研究科　教授

1987年に京都で開かれた低温国際会議で，私はGap Formation in a Valence Fluctuation System of CeNiSnというポスターを発表した[1)]。その当時，近藤絶縁体あるいは近藤半導体という専門用語は無かったので，Kondo semiconductorとは書いていない。これにまつわる秘話をFiskさんに昨年聞いた。彼らは当時$Ce_3Bi_4Pt_3$という化合物の電気抵抗が低温で上昇することを確かめていたが，訳が判らないので論文にはできなかった。私たちが1989年末にPhys. Rev. B.に投稿したCeNiSn単結晶の論文原稿を読んで，あわてて論文にまとめたそうである[2)]。これらの研究から，CeNiSnや$Ce_3Bi_4Pt_3$ではCeの4*f*電子状態が伝導バンドと混成してできた準粒子バンドにギャップが形成されるために，電気抵抗が半導体的に増大することが判ってきた。Fiskさんは近藤絶縁体という用語を作って流行らせたが，私たちは近藤半導体と呼んでいる。ごく最近では，メビウス近藤絶縁体という新概念も提案されている[3)]。

近藤半導体の基底状態は非磁性というのが常識であった。それは，4*f*電子状態は伝導バンドとの強い混成によって，低温では磁気モーメントを失うからである。この常識に反して，$CeRu_2Al_{10}$は27Kというかなり高い温度で磁気転移するとStrydomが2009年に発表した[4)]。その反強磁気構造が我々の試料を用いた中性子回折で決定されると同時に[5)]，同じ直方晶構造の$CeOs_2Al_{10}$はさらに高い28.5Kで秩序することが見出された[6-7)]。我々は，この系に対する5*d*電子・5*d*正孔ドープを調べ，混成ギャップの存在が特異な反強磁性秩序には必要であると提案した[8)]。

図に示す結晶構造において，Ceサイトでは直方晶の*b*軸方向に反転対称性が無い。その反強磁性構造においては，最近接のCe同士はc軸方向にジグザグ鎖を成し，Osを挟んだCe-Os-Ceは強磁性のジグザグ鎖を成している。このジグザグ鎖反強磁性秩序は，J-PhysicsのC01班が取り組んでいる「拡張多極子」の出現の舞台となりうる。具体的には，非一様な反対称スピン軌道相互作用に起因して，磁気モーメントが磁気困難軸方向に向けられることや，磁気励起スペクトルに非対称性が現れることが予言されている[9)]。そこで，我々は混成ギャップをもちながらT_Nが最高で，スピン・軌道相互作用が$CeRu_2Al_{10}$よりも強い$CeOs_2Al_{10}$に的を絞って，特異な反強磁性秩序における非一様な反対称スピン軌道相互作用の役割を明らかにすることを目的としている。

本研究チームは下記の連携研究者と研究協力者からなっている。

半澤克郎(東京理大・理工)：バンド計算と理論解析
浴野稔一(広島大学・院総科)：トンネル分光による混成ギャップと磁気ギャップの観測
梅尾和則(広島大学・自然セ)：一軸圧力下での比熱，磁化測定
木村真一(大阪大・院生命)：テラヘルツ分光による電荷ギャップの観測
横谷尚睦(岡山大・院自然)：高分解能光電子分光による異方的ギャップの観測
D.T. Adroja（RAL, ISIS）：中性子散乱とミュエスアールによる磁気励起の観測

研究協力者のD.T. Adroja博士はJSPS招聘研究者として広島大学に滞在している。7月2日に研究会を開催して，連携研究者などと進展状況を共有し，上記の問題解決に注力する計画である。

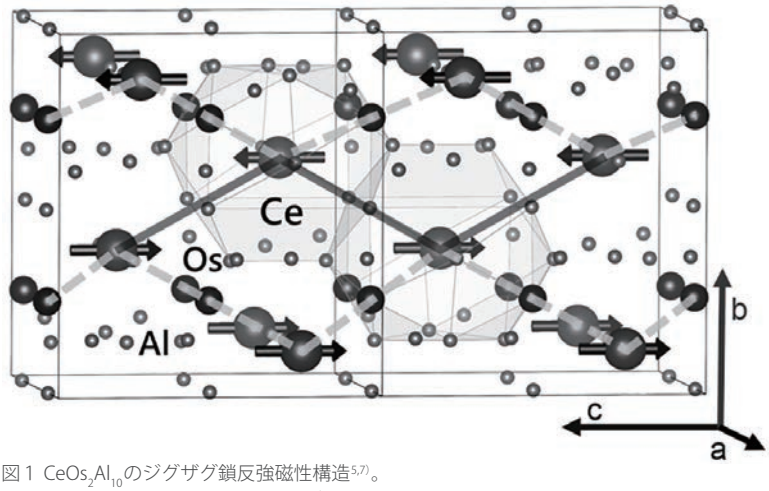


図 1 $CeOs_2Al_{10}$のジグザグ鎖反強磁性構造[5,7]。
Ceサイトには***b*** 軸方向に反転対称性が無い。
太線鎖は最近接Ce-Ce, 破線鎖はCe-Os-Ce

1) T. Takabatake, Y. Nakazawa, and M. Ishikawa, Jpn. J. Appl. Phys. **26**. Suppl. 26-3 (1987) 547.
2) M. F. Hundley et al., Phys. Rev. B **42**（1990）6842.
3) Po-Yao Chang, O. Erten, and P. Coleman, arXiv:1603.03435v1.
4) A.M. Strydom, Physica B **404** (2009) 2981.
5) D.D. Khalyavin et al., PRB **82**, (2010) 100405(R).
6) T. Nishioka et al., J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 123705.
7) D.T. Adroja et al., Phys. Rev B **82** (2010)104405.
8) J. Kawabata et al., Phys. Rev B **92** (2015)201113(R).
9) S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 064717.

【D01】研究課題番号：16H01063　Hybrid f-/p-electron molecular materials

Towards hybrid f-/p-electron molecular materials

Kosmas Prassides
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構　教授

髙林　康裕	中川　剛志	Melita Menelaou	Robert Sobota
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構　助教	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構　助手	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構　助手	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構　助手

The study of strongly correlated electron systems is at the forefront of contemporary condensed matter research because such materials, which include unconventional high-Tc superconductors and intermetallic heavy fermion systems, display remarkable electronic properties that challenge existing theory for satisfactory explanations. The Coulomb repulsion between electrons leads to correlations between the particles that oppose their natural tendency to form extended bands. A rich variety of behaviors occurs when these interactions become dominant, i.e. when the on-site Coulomb energy (quantified by the Hubbard U) is larger than that gained by delocalizing the outer electrons in the solid (measured by the bandwidth W), the electrons become localized at each lattice site and the material exhibits vanishing electrical conductivity (Mott-Hubbard insulating state).

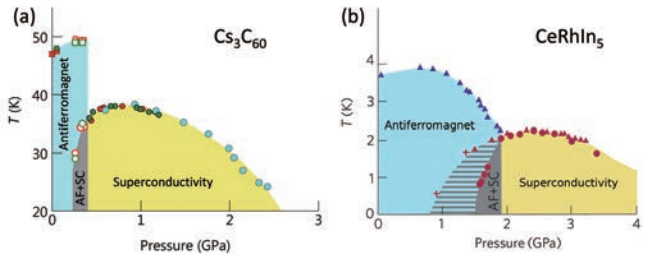


Fig. 1. Phase commonalities. (a) Schematic electronic phase diagram of A15-structured Cs3C60 showing a superconductivity dome emergence of superconductivity out of an isosymmetric long-range-ordered antiferromagnetic insulator [Takabayashi et al., Science 323, 1585 (2009)]. (b) Phase diagram of the heavy-fermion superconductor, CeRhIn5 as a function of applied pressure [G. Knebel et al., Phys. Rev. B 74, 020501 (2006)].

Another manifestation of such many-body interactions is provided by f-electron systems in which the correlations are so strong that the effective mass of the quasiparticles becomes several orders of magnitude higher than the bare electron mass, leading to intermediate valence, Kondo, and heavy fermion systems with complex electronic and magnetic behavior including unconventional superconductivity, quantum critical phenomena, and multipole order. The interplay between charge, lattice, orbital, and magnetic degrees of freedom in such systems can be tuned sensitively both chemically and physically (varying an external parameter such as pressure or magnetic field).

Recent work in our laboratory has shown that high-Tc superconductivity, defined both in terms of transition temperature and the key role played by electronic correlations, is accessible in molecular systems. In A3C60 fullerides, superconductivity competes with electronic ground states resulting from a fine balance between electron correlations and electron-phonon coupling in an electronic phase diagram (Fig. 1a) strikingly similar to that of the cuprates and the heavy fermion systems (Fig. 1b). Superconductivity at the highest Tc (38 K) known for any molecular material and with an upper critical magnetic field, Hc2 exceeding 90 T emerges from an antiferromagnetic insulating state solely by changing an electronic parameter - the overlap between the outer wavefunctions of the constituent fullerene molecules. Tc is found to scale universally in a structure-independent dome-like relationship with proximity to the Mott-insulator/metal transition, a hallmark of electron correlations.

Our research aim within the J-Physics project is to establish the field of hybrid f-/p-electron molecular

materials by synthesizing and researching molecular-based strongly correlated f-electron fullerides (Fig. 2c). Here, the presence of the electronically-active C60 anions (Fig. 2a) will be combined with mixed configuration rare earth ions (Fig. 2b) leading to properties intrinsically unattainable in comparable rare earth solids with closed shell anions. Strong correlations will dominate the electronic properties of both the rare-earth cation and the C60 anion sublattices. Our research will target the discovery of intermediate valence f-electron fullerides with complex magnetic or multipole order, new electronic states of matter such as new molecular ferromagnets, metals, unconventional superconductors, and multiple-component correlated electron systems with unpredictable electronic properties (Kondo phenomena of the f-electron sublattice co-existing with superconductivity supported by the C60-based p-electrons).

The research staff members who will contribute to the research activities are Assistant Professor Yasuhiro Takabayashi and Research Associates Melita Menelaou, Takeshi Nakagawa, and Robert Sobota. The research activity of our team consists of two integrated components: (i) establishing reproducible synthetic protocols for new materials discovery and (ii) accessing new electronic ground states through advanced structural (synchrotron X-ray, neutron diffraction) and spectroscopic (XANES, RIXS) studies and physical property (transport, magnetism) measurements of the new materials following systematic changes in chemical features and external physical parameters such as pressure.

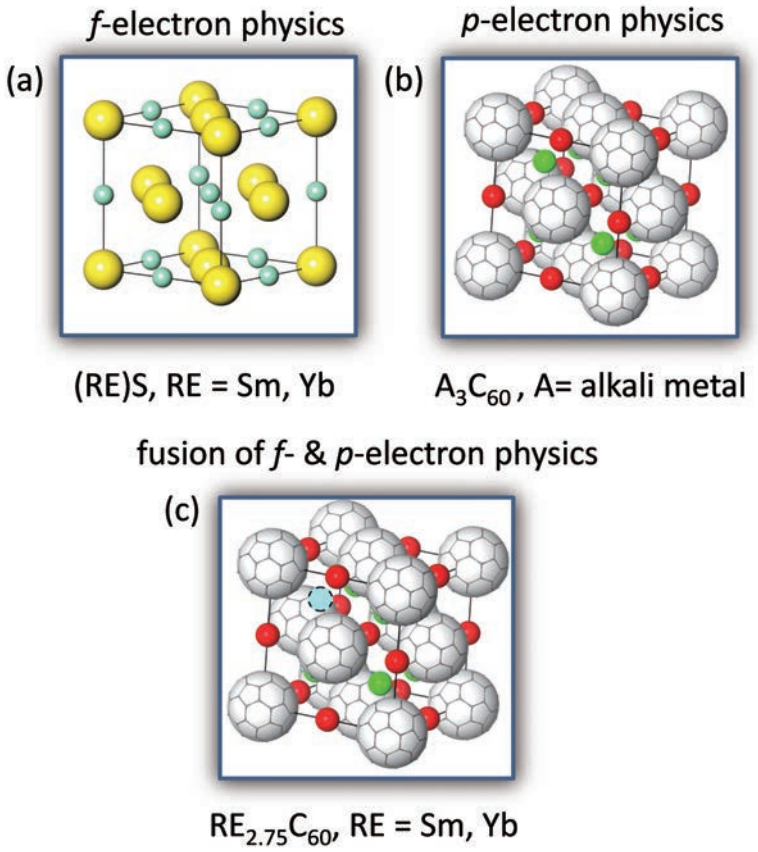


Fig. 2. Combining strongly correlated rare-earth cation and fulleride anion sublattices. Crystal structure of (a) Kondo insulators, rare-earth monosulfides, (b) face-centered cubic alkali fulleride superconductors, and (c) negative-thermal-expansion intermediate-valence rare earth fullerides [J. Arvanitidis et al., Nature 425, 599 (2003)].

【D01】研究課題番号：16H01065　3d 電子系における高次多極子に由来する非対角応答の観測

3d 電子系における高次多極子に由来する非対角応答の観測

阿部　伸行
東京大学 大学院新領域創成科学研究科　助教

有馬　孝尚
東京大学 大学院
新領域創成科学研究科　教授

研究紹介

スピン軌道相互作用は磁気異方性や傾角反強磁性、最近ではマルチフェロイクスにおける電気分極発現の起源として、3d電子系の物性発現においても重要な役割を担っている。本研究で対象とする磁気単極子や磁気四極子などの奇パリティ磁気多極子は、空間反転および時間反転に対して奇であることから、電場（磁場）を印加することによって磁化（電気分極）が発現する線形の電気磁気効果の起源として考えることができる。

線形の電気磁気効果を示す物質の特異な光学応答として方向二色性がある。この現象は光が入射する向きに依存して吸収係数や屈折率が変化する現象であり、通常は等価であるはずの物質の「表」と「裏」が明確に区別される。この時に重要な役割を果たすのが奇パリティ磁気多極子の一つであるトロイダルモーメントであり、トロイダルモーメントの向きと光の進行方向が平行か反平行かに依存して光の進みやすさが変わる。このような奇パリティ磁気多極子に由来する方向二色性は、光だけではなく他の準粒子においても同様の方向二色性、あるいは整流効果として現れる可能性がある。理論的には柳瀬によってジグザグ状の反強磁性構造、速水らによってハニカム状のネットワークにおける特殊なバンドシフトがそれぞれ予測されている。これらのバンドシフトは奇パリティ磁気多極子の秩序化による伝導電子の非相反的な進みやすさの変化を示しており、非線形伝導や光電流発生などの現象が期待される。

本研究では局所的な反転対称性の破れに伴う磁気四極子やトロイダルモーメントの秩序に由来する非線形伝導および光電流発生といった新奇現象の検出を目指し、物質探索、放射光を用いたドメイン構造の可視化、単ドメイン状態における伝導性と光電流の測定など実験的な研究を進めていきたい。

自己紹介

物質探索、強磁場下での物性測定、量子ビームを用いた計測と解析などの実験的手法によって、新しい現象の探索からミクロな原理の解明まで一貫して研究することを心がけております。研究室は東大柏キャンパスの新領域基盤棟にありますので、物性研の隣という環境を活かしつつ、他にもKEK-PFや東北大金研強磁場センターなど、結晶育成以外は外部の共同利用施設で実験をしていることが多いです。見かけた際には気軽にお声がけください。これまでは3d遷移金属酸化物を対象としたマルチフェロイクスの研究を中心に行ってきましたが、本研究課題では念願のグローブボックスも導入できましたので、酸化物以外の物質系を対象とした物質開発にもチャレンジしていきたいと思います。また、本研究領域のみなさんとの共同研究も進めていければ幸いです。よろしくお願いいたします。

【D01】研究課題番号：16H01072　多軌道強相関系としてのイリジウム化合物の新物質開拓

イリジウム化合物の新物質開拓

岡本　佳比古
名古屋大学 大学院工学研究科　准教授

山川　洋一
名古屋大学 大学院
理学研究科　助教

山影　相
名古屋大学 大学院
工学研究科　特任助教

・研究内容の紹介

電子が固体中で獲得する軌道の自由度は、新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」の研究主題である多極子の物理をはじめとして、Mn酸化物の超巨大磁気抵抗や鉄系の高温超伝導など、固体物理学において新物性・新機能を生み出す強力なソースの一つです。我々の研究課題では、様々な多軌道物質のうち、重元素の5d電子系であるIr（イリジウム）の化合物に着目し新物質開拓を行います。IrやPtなど重元素の5*d* 電子系では、1 eVに届くのではないかというような非常に強いスピン軌道相互作用と、*d* 電子ならではの強い電子相関が共存します。従って、多極子自由度に対する強相関効果を調べるための最適な舞台の一つと思います。また、空間的に広がった5*d* 軌道が主役であるため配位子場の影響が強いこと、その割には局在性が強い場合が多いことから、結晶構造の個性が電子物性に反映されやすい物質群ということもできます。例えばハニカムLi_2IrO_3において実現が予測されているキタエフスピン液体など、Irならではのユニークな電子物性が現れると期待されている極めて魅力的な物質群です。

一方、Irの化合物は、3*d* 電子系など他の遷移金属化合物と比べると既知物質の数がかなり少ないという特徴をもちます。私が約10年前に$Na_4Ir_3O_8$という物質を研究していた頃、Ir化合物に着目した理由の一つです。しかし、他の元素と比べてIrの化合物が少ない理由はないと思うので、例えば3*d* 系と比べると新物質開拓が行き届いていないのかもしれません。本課題では、連携研究者である名古屋大学理学研究科山川洋一氏、同工学研究科山影相氏による理論的な支援を得ながら、様々な合成法を駆使してIr化合物の新物質開拓を行うことにより、非従来型超伝導をはじめとする新奇物性の発見を目指します。

・自己紹介

名古屋大学工学研究科の岡本佳比古と申します。出身地は岡山県倉敷市です。東京大学新領域創成科学研究科の髙木研究室で博士号を取得しました。その後、理化学研究所ポスドク、東京大学物性研究所広井研究室の助教を経て、2014年の3月から名古屋大学工学研究科磁性材料工学研究グループ（竹中研究室）にて准教授を務めております。研究テーマは、修士学生のころから一貫して、*d* 電子系を中心とした無機化合物の物質開拓です。幾何学的フラストレート磁性体、熱電変換材料、超伝導体といった様々な興味深い物性・機能を示す新物質の開拓を目指してきました。現在も、面白い物性や、革新的な高性能材料の発見を目指して、日々研究室の学生とともに研究を行っています。専門はどちらかというと固体化学ですが、実際には固体化学と固体物理の間の中途半端なポジションで研究しております。二年間、よろしくお願いいたします。

【D01】研究課題番号：16H01075　遷移金属硫化物、砒化物の電子相関とスピンー軌道相互作用の制御による異常物性の探索

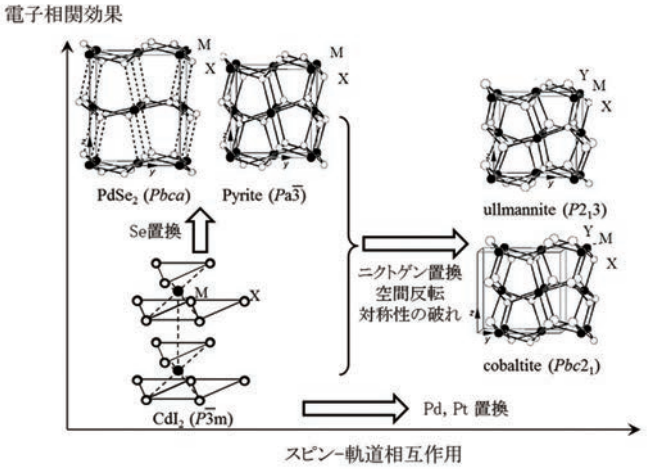
遷移金属硫化物、砒化物の電子相関とスピンー軌道相互作用の制御による異常物性の探索

宮坂　茂樹
大阪大学 大学院理学研究科　准教授

田島　節子	**中島　正道**	**田中　清尚**	**熊井　玲児**
大阪大学 大学院 理学研究科　教授	大阪大学 大学院 理学研究科　助教	分子科学研究所 極端紫外光研究施設　准教授	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所　教授

研究代表者：
　宮坂茂樹（阪大院理）研究総括、結晶育成、物性測定
共同研究者：
　田島節子（阪大院理）光学測定
　中島正道（阪大院理）結晶育成、輸送現象測定
　田中清尚（分子研UVSOR）光電子分光測定
　熊井玲児（KEK物構研）結晶構造解析

　この公募研究班では、強相関効果とスピン-軌道相互作用を、元素置換効果により化学的な見地から物質パラメーターとして制御し、これらの複数の効果に起因する新奇な物理現象（超伝導、ディラック電子など）を探索、研究していくことを目指しています。具体的には、遷移金属硫化物MX_2や砒化硫化物MXY（M=Ni,Pd,Pt、X=S,Se,Te、Y=P,As,Sb,Bi）の組成式を持つ物質系を母物質とする固溶系を研究対象とします。これらの物質系は電子構造と不可分な様々な結晶構造を取ります。その中には、ディラック電子状態が出現すると期待されるポストグラフェン物質と類似した層状MX_2構造や、スピン-軌道相互作用が本質的に重要な役割を果たす空間反転対称性が破れた結晶構造（ullmannite構造など）が含まれます。上の物質系の内、層状MTe_2を出発点として、TeをSeに置換することにより、電子相関効果を増大させることが可能であると考えています。一方、様々なMX_2のカルコゲン元素Xの代わりに、ニクトゲン元素を置換することで、結晶構造的に空間反転対称性の破れが誘起され、スピン-軌道相互作用が制御できるのではないかと期待しています。（下の研究の概念図を参照。）このような結晶構造・電子状態の制御を行い、新しい超伝導やディラック電子状態などの新機能物性の探索を行っていきます。同時に強く結合した電子状態と結晶構造の詳細を、マルチプローブ（磁気輸送現象、様々な分光測定、回折実験）により解明していきたいと考えています。



図：MX2、MXY（M=Ni,Pd,Pt）の持つ様々な結晶構造と、電子相関効果/スピン-軌道相互作用の制御に関する概念図。

　研究代表を務めます宮坂は、これまで3d遷移金属化合物を中心に、モット転移近傍の異常金属相の研究、軌道整列現象の外場制御や軌道波の研究、鉄ニクタイド系における超伝導の研究を行ってきました。この新学術領域「J-Physics」に参加させて頂きまして、今までの自身の研究とは異なる新しい興味深い物性を発見し、この新学術領域の研究に貢献していきたいと考えています。

International Conference of Strongly Correlated Electron Systems (SCES) 2016 in Hangzhou, China 会議報告

石田　憲二
京都大学 大学院理学研究科 物理学第一教室　教授

今年度のSCES2016は2016年5月8日から13日に中国の杭州で開催された。会議では2つのsummary-talkを含む7のPlenary講演、51の招待講演、60の口頭発表、317のポスター発表がなされた。また、開催者の発表によれば参加者は510名で、日本からの参加者は2割程度であった。(ちなみに一番多かったのは、開催国の中国で4割。) 以下に今回のSCES2016のプログラムを添付する。

Time	May 8	May 9		May 10		May 11		May 12		May 13	
8:15-8:30		Opening									
		Plenary I (chair: L. Yu)		Ce-115 (JD Thompson)	Th. on correlated systems I (M. Ogata)	Plenary II (NL Wang)		Superlattice & artificial structure (Kyle Shen)	5d electrons (JH Dai)	Exotic SC (Th.) (DX Yao)	Ferroics & multiferroics (M. Jaime)
8:30-8:45		Qi-kun Xue		Marc Janoschek	Naoto Nagaosa	Z-X Shen		Seigo Tarucha	Yong Baek Kim	Jorge Quintanilla	Alois Loidl
8:45-9:00											
9:00-9:15				Lin Jiao	Kun Yang			Yuji Matsuda	Xiangang Wan	Mark H. Fischer	Kee Hoon Kim
9:15-9:30		Hilbert v. Loehneysen				Kazushi Kanoda					
9:30-9:45				Ilya Sheikin	Hong Yao			Takayoshib Yamanaka	Jiajun Yan	Rong Yu	Jonathan Buhot
9:45-10:00				Daniel Mazzone	Gang Chen			Youichi Yanase	Stefano Agrestini	Aline Ramires	Xiaofang Zhai
10:00-10:30	Registration	Coffee break									
		High T_c cuprates (Exp) (S. Hayden)	M-I transition (T. Park)	SmB_6 (A. Loidl)	High-T_c cuprates (Th.) (P. Riseborough)	SC & quantum criticality I (Hv Loehneysen)	Quantum magnetism & frustration (Y. Matsuda)	Quantum phase transitions I (GM Zhang)	Noncentrosym metric materials (Y. Onuki)	SC & quantum criticality II (G. Knebel)	Kondo effect & mixed valence (C. Krellner)
10:30-10:45		Seamus Davis	Hao Tjeng	Colin Broholm	T. M. Rice	Frank Steglich	Satoru Nakatsuji	Qimiao Si	Ernst Bauer	Jinguang Cheng	Zachary Fisk
10:45-11:00											
11:00-11:15		Xing-Jiang Zhou	Jens Mueller	Lu Li	T. K. Lee	Meigan Aronson	Marcelo Jaime	Kazumasa Miyake	Srinivasan Ramakrishnan	Xin Lu	Y. Onuki
11:15-11:30											
11:30-11:45		Matthieu Le Tacon	Sven Friedemann	Suchitra Sebastian	Zheng-Yu Weng	Yosuke Matsumoto	Mingxuan Fu	Kevin Ingersent	Peter Wahl	Didier Jaccard	Filip Ronning
11:45-12:00						Michael Smidman	Christian Balz	Gertrud Zwicknagl	Yannick Klein	Jeroen Custers	Toshiro Takabatake
12:00-12:15		S. Badoux	S.R. Julian	S. Wirth	Jozef Spalek	Jorge Gavilano	Yoshifumi Tokiwa	Johann Kroha	Joel Barker	Swee K. Goh	Tao Wu
12:15-13:30		Lunch break									
								Ruthenates (S.R. Julian)	Quantum phase transitions II (M. Brando)	Plenary IV (Z. Fisk)	
13:30-13:45		Poster I (Stadium)		Poster II (Stadium)		Poster III (Stadium)		Kenji Ishida	Philipp Gegenwart	Leon Balents	
13:45-14:00											
14:00-14:15								Clifford Hicks	Kazuhiko Deguchi		
14:15-14:30										Joe Thompson (Experiments summary)	
14:30-14:45								Kyle Shen	Emilia Morosan		
14:45-15:00										Piers Coleman (Theory summary)	
15:00-15:15								Stephen Hayden	Eric Bauer		
15:15-15:30									V. Fritsch	Huiqiu Yuan (Concluding remarks)	
15:30-16:00		Coffee break									
		Fe-based SCs (JL Luo)	Topological aspects (S. Wirth)	U-compounds (A. Huxley)	Exotic SC (Exp.) (F. Ronning)	Plenary III Prize Ceremony (FC Zhang)		Electronic structure (SC Wang)	Th. on correlated systems II (S. Kirchner)		
16:00-16:15		Haihu Wen	Liling Sun	Girsh Blumberg	Guang-han Cao	Riccardo Comin (Coles Prize)		Donglai Feng	Marcus Kollar		
16:15-16:30											
16:30-16:45		Weiqiang Yu	Anne de Visser	Andrea Severing	D. T. Adroja	Hosho Katsura (Mott Prize)		Yun Zhang	Peter S Riseborough		
16:45-17:00		Zhe Wang	Jingbo Qi	S. Kittaka	J. C. Baglo			R. D. dos Reis	Pedro Ribeiro		
17:00-17:15		Carsten Honerkamp	S. Paschen	Dai Aoki	Andreas Leithe-Jasper			Jonathan Denlinger	Yukinori Ohta		
17:15-17:30		Yunkyu Bang	Tsuneya Yoshida	Fabrice Wilhelm	Yanpeng Qi	**Departure for Banquet at 5:30pm (in front of the Opera)**		Shin-ichi Kimura	Sasha Chernyshev		
17:30-17:45									A. H. Nevidomskyy		
18:00-20:00	Reception					Banquet (19:00-21:00)					

Plenary talk (38+7min) **(Opera)**
Invited talk (25+5 min) **(Mengminwei Bld)**
Oral talk (12+3 min) **(Mengminwei Bld)**

Plenary講演を除き、口頭発表は2つのパラレル・セッションで行われ、大まかに言ってd電子系、f電子系とわけてセッションが構成されている印象を持った。したがって、聞きたい講演がかぶったという参加者の方も多かったのではないであろうか。ご覧のように、Ce115、U化合物のセッション、量子臨界現象と超伝導、といった従来のセッションに加え、人工超格子や5d電子系、マルチフェロイクス等の新しい内容でセッションが構成されている。興味深かったのは、L. Balents氏によるPlenary講演で、講演タイトルである「When topology meets SCES」で、強相関物質においてトポロジカルな性質によってもたらされる新奇物性に注目が集まっている印象を感じた。この傾向がどうなっていくのか今後の動向を注視する必要はある。またF. Steglich氏による講演では、重い電子物質ではよく知られているYbRh2Si2が2mKで超伝導転移を起こすことを報告した。超伝導探索も核断熱消磁の温度域にまで広がったかと感心した。

既にこのNewsletterでも取り上げているが、来年度のSCES2017は2017年7月17日から21日の間でチェコのプラハで開催される。詳しくは下記のサイトをご覧ください。
http://www.sces2017.org/

SCES2016に参加して

真砂　全宏
京都大学大学院理学研究科物理学第一教室　博士課程1年

SCES

International Conference of Strongly Correlated Electron Systems（SCES）は固体物理学の強相関電子系の国際会議で、分野は重い電子系、非従来型超伝導、金属―絶縁体転移、トポロジカル物質など多岐にわたります。今年は中国の浙江省杭州市（Hangzhou）に位置する浙江大学（Zhejiang University）紫金港キャンパスで開催され、約440名が発表を行いました。SCESの開催は中国では今回が初めてということです。

今回は5月9日（月曜日）から13日（金曜日）の5日間が会議の本番で、毎日朝8時30分から夕方までセッションの種別ごとにいくつかの会場に分かれて行われました。1時間余の昼休みが意外に短いなど、会議の日程は初の参加となる筆者にとって少しきついものでした。11日水曜日の夜には会場を移して晩さん会が行われました。

杭州

当研究室の参加者は、関西空港から杭州までの直行便を利用するほか、伊丹―羽田―成田―杭州や、上海から陸路で杭州へ向かうなどの経路をとりました。杭州市内の空港に到着した施と真砂は、高速バスとタクシーを乗り継いで会場の近くの宿に到着しました。

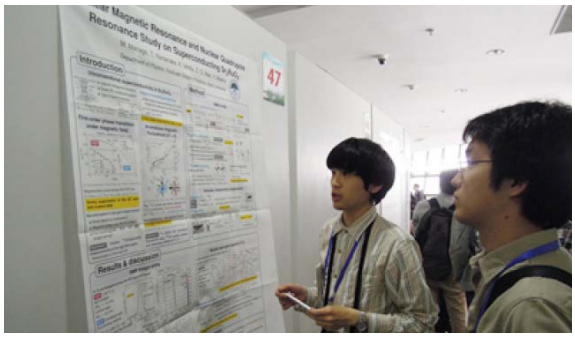
杭州は中国南東部の沿岸に位置し、亜熱帯気候です。私たちが到着した際は、雨が降って霧がかかり、蒸し暑い天気でした。会議本番の3日目以降は雨はやみ、晴れると日中の気温がさらに上がりました。それでも気候は日本と似ているところがあり、快適に過ごすことができました。

交通の便について言えば、会場は杭州市の郊外に位置して利便性が良いとは言えず、長距離の移動は事実上タクシーに限られます。タクシーでは英語が全く通じず、行き先を伝えるのにも一苦労です。その一方でタクシーの運賃は比較的安く、例えば約40 kmを走行しても日本円で3000円程度でした。食事については、会場から徒歩で行ける距離にいくつかの料理店を見つけることができ、毎晩店で夕食をとりました。やはり物価が安く、日本円で1000円程度で満腹まで食べられます。

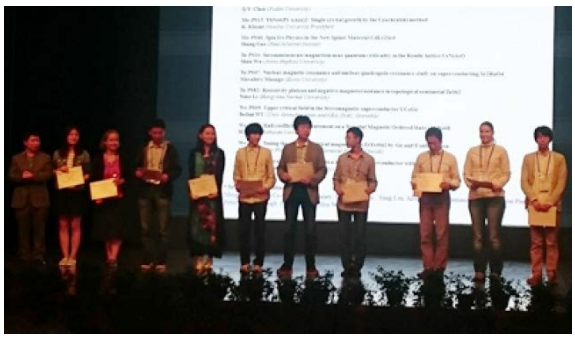
ところで杭州市は2016年9月の主要20か国・地域首脳会議（G20サミット）の開催地で、私たちが訪れた際はそれに向けた大規模な準備が進められていました。移動中に外を眺めると、新たな地下鉄路線や数多くの高層建築物の建設が行われ、工事車両が道路を行き交う様子が見られました。また、警備の強化を理由に私たちの宿が会議の直前に変更されるという思わぬ影響もありました。

筆者にとっては、初の海外での発表でしたが、無事に遂げることができました。来年も是非参加したいと思いました。

浙江大学紫金港キャンパスの正門前。手前は道路で、ここに限らず中国の道路の幅が広いのが印象に残っています。また大学のキャンパスも広く、移動に時間がかかりました。



ポスター発表を行う筆者（左）。発表内容は超伝導体Sr2RuO4の核磁気共鳴の実験結果です。



閉会式に行われたポスター賞の授賞式。筆者を含む10名が受賞しました。

西湖での記念撮影。左は北海道大学の鈴木修さんです。鈴木さんもポスター賞を受賞しました。おめでとうございます。

平成27~31年度 文部科学省 科学研費補助金 新学術領域（研究領域提案型） 領域番号：2704

J-Physics：多極子伝導系の物理　平成28年度　領域全体会議

日　時　平成28年5月26日 13:00 ～
5月28日 15:40

会　場　北海道大学
フロンティア応用科学研究棟
（札幌市北13条西8丁目）

共　催　北海道大学大学院理学研究院

5月26日（木）

オープニング

13:00 – 13:20　播磨 尚朝（神戸大理）
平成28年度のスタートにあたって

D01班

13:20 – 13:40　宮坂 茂樹（阪大院理）
遷移金属硫化物、砒化物の電子相関とスピン-軌道相互作用の制御による異常物性の探索

13:40 – 14:00　阿部 伸行（東大新領域）
3d電子系における奇パリティ多極子秩序に由来する非対角応答の観測

14:00 – 14:20　岡本 佳比古（名大院工）
六方晶イリジウムリン化物ScIrPの超伝導

14:20 – 14:40　Kosmas Prassides（東北大AIMR）
Towards hybrid f-/p-electron molecular materials

14:40 – 15:00　休憩

A01班 Part1

15:00 – 15:20　関山 明（阪大基礎工）
“角度分解” 内殻光電子線二色性による基底／励起状態における局在4f 軌道対称性の決定

15:20 – 15:40　小林 寿夫
（兵庫県大院物質理）[研究計画班]
放射光メスバウアー分光法による価数揺動関連物質の研究

15:40 – 16:00　坂井 徹（兵庫県大院物質理）
低次元量子スピン系のスピンネマティック相

16:00 – 16:20　森 通康（原子力機構先端研）
希土類ガーネットにおけるフォノンホール効果

16:20 – 16:40　休憩

A01班 Part2

16:40 – 17:00　出口 和彦（名大院理）
クラスター構造をもつ正20 面体準結晶・近似結晶の磁性と超伝導

17:00 – 17:20　渡辺 真仁（九工大）
周期系・準周期系重い電子系に普遍的な新しい量子臨界物性の解明

17:20 – 17:40　古賀 昌久（東工大理）
Valence fluctuations in the heavy fermion systems on the quasiperiodic lattice

17:40 – 18:00　佐藤 卓（東北大多元研）[研究計画班]
$PrTr_2Al_{20}$ (Tr = Ti, V) の中性子散乱

5月27日（金）

トピカルセッション：
“1-2-20 系” に関する研究の現状と課題 I

9:00 – 9:45　鬼丸 孝博（広大院先端）
$4f^2$系の非クラマース二重項を舞台としたエキゾチック多極子物性

9:45– 10:15　岩佐 和晃（茨城大フロンティアセンター）
Pr1-2-20 系における多極子自由度の中性子散乱による研究

10:15– 10:45　井澤 公一（東工大理）
輸送係数から見たPr1-2-20 系の相図

10:45 – 11:00　休憩

A01班 Part3

11:00 – 11:20　椎名 亮輔（琉球大理）
磁場中の$SmRu_4P_{12}$における磁性および電荷秩序の共存状態と伝導特性の理論

11:20 – 11:40　大槻 純也（東北大理）
電子の遍歴・局在双対性を考慮した重い電子超伝導の微視的理論

11:40 – 13:10　記念撮影・昼食

ポスターセッション

13:10 – 14:40　於1Fエントランスホール

C01班 Part1

14:40 – 15:00　高畠 敏郎（広大院先端）
反強磁性近藤半導体$CeOs_2Al_{10}$の希釈及びドープ効果

15:00 – 15:20　髙阪 勇輔（広大院理）[研究計画班]
無機キラル磁性体におけるキラルらせん磁気秩序の観測

15:20 – 15:40　大原 繁男（名工大院工）
二次元ハニカム磁性体における特異な電流誘起磁気効果の検証

15:40 – 16:00　大串 研也（東北大理）
奇パリティ多極子秩序系における新奇量子伝導の開拓

16:00 – 16:20　休憩

C01班 Part2

16:20 – 16:40　品岡 寛（埼大理）
多極子遍歴系に対する計算物理学手法の開発

16:40 – 17:00　古賀 幹人（静大教育）
近藤効果による多重量子ドット系のスピン電荷制御－ナノスケール多極子物理の創出に向けて－

B01班 Part1

17:00 – 17:20　大貫 惇睦（琉球大理）
立方晶化合物の特異なフェルミ面

17:20 – 17:40　野島 勉（東北大金研）
スピン軌道相互作用によって保護される電場誘起超伝導

懇談会

18:00 – 20:00　於ファカルティハウス・エンレイソウ内、レストラン エルム

5月28日（土）

トピカルセッション：
“1-2-20 系” に関する研究の現状と課題II

9:00 – 9:30　松本 洋介（東大物性研）
PrT_2Al_{20} (T = Ti, V)における多極子秩序と重い電子超伝導

9:30 – 10:00　松林 和幸（電通大）
PrT_2Al_{20} (T = Ti, V)における四極子秩序と超伝導の圧力効果

10:00 – 10:20　楠瀬 博明（明大理工）
非クラマースPr 1-2-20 系における四極子近藤の物理

10:20 – 10:40　休憩

B01班 Part2

10:40 – 11:00　野尻 浩之（東北大金研）
URu_2Si_2 の強磁場磁気秩序と磁気相関の起源

11:00 – 11:20　池田 浩章（立命館理工）
遍歴多極子と多極子超伝導

11:20 – 11:40　藤森 伸一 (原子力機構)
3次元ARPES による
強相関ウラン化合物の電子状態
11:40 – 12:00　服部 一匡 (首都大院理工)
強磁性三重臨界点と強磁性超伝導に
関する微視的理論
12:00 – 13:10　昼食

J-Physics アウトリーチセミナー
13:10 – 15:10
講師：小林 隆司
(物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室 室長)
「考えたこともなかった「伝える技術」
～テレビが使うあの手とこの手～」

クロージング
15:10 – 15:30　評価者によるコメント
領域代表挨拶

ポスターセッションプログラム

(5 月27 日 13:10 -14:40)

P01：山根 悠 (広大院先端)
Pr 希薄系$Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ の
非フェルミ液体的挙動
P02：藤 秀樹 (神戸大院理)
PrT_2Al_{20} における低エネルギー励起に
関するNMR による研究
P03：三宅 和正 (豊田理研)
Ce およびYb を含む重い電子系における
擬スピン自由度と多極子自由度の関係
P04：中谷 泰博 (阪大基礎工)
軟X線角度分解光電子分光による
$CeNi_2Ge_2$ の運動量依存した
重い準粒子状態
P05：金井 惟奈 (阪大基礎工)
重い電子系Yb 化合物のYb 3d 内殻
および4f 光電子スペクトル線二色性に
よる異方的4f 電荷分布の観測
P06：谷口 貴紀 (東大物性研)
$PrTi_2Al_{20}$ におけるNMR と極低温
磁化測定から見た四極子転移の研究
P07：大槻 純也 (東北大理)
Yb 系準結晶化合物の磁気揺らぎと
価数状態に関する理論
P08：藤原 秀紀 (阪大基礎工)
軟X線分光による$CeAgSb_2$ の
基底状態対称性の解明
P09：與儀 護 (琉球大理)
重い電子系化合物$YbCo_2Zn_{20}$ の
Ni 置換効果の^{59}Co-NQR による研究
P10：Ilya Sheikin (CNRS)
High magnetic fields in Grenoble for
studying heavy fermion materials
P11：徳永 陽 (原子力機構先端研)
URhGe における強磁性超伝導の
NMR による研究
P12：水口 佳一 (首都大理工)
岩塩型構造を有する
新しいBi カルコゲナイドの探索
P13：小林 夏野 (岡大基礎研)
カルコゲンを含む超伝導体の開発
P14：中村 翔太 (東大物性研)
イジング強磁性体URhGe の
困難軸 (b 軸) 方向の極低温磁化測定
P15：町田 洋 (東工大理)
UBe_{13}の非フェルミ液体的挙動に
おける圧力効果
P16：松田 達磨 (首都大院理工)
BiS_2 系超伝導体$NdO_{(1-x)}F_xBiS_2$ に
おける重い電子系的低温物性異常
P17：徐 卓 (原子力機構先端研)
Towards the control of the sign of spin Hall
effect in heavy metal alloys
P18：速水 賢 (北大理)
Emergent spin-valley-orbital physics by
spontaneous parity breaking
P19：清水 悠晴 (東北大金研)
重い電子系反強磁性超伝導体
UPd_2Al_3 における極低温磁化測定
P20：梶谷 丈 (首都大院理工)
$EuFBiS_2$ の単結晶育成と基礎物性測定
P21：梅尾 和則 (広大自然セ)
PrT_2Zn_{20} (T = Ir, Rh) の四極子転移と
超伝導転移に対する圧力効果
P22：山田 瑛 (首都大院理工)
SmT_2X_2 の純良単結晶育成と低温磁性
P23：池谷 聡 (北大院工)
SNS 接合に形成される
Majorana 束縛状態の多重縮退について
P24：佐々木 章宏 (北大院工)
2 バンド超伝導体における
奇周波数クーパー対とその磁気応答
P25：家田 淳一 (原子力機構先端研)
反強磁性体におけるスピントルクと
スピン起電力
P26：山影 相 (名大工)
線ノード・ディラック半金属および
トポロジカル絶縁体 CaAgX (X=P,As)
P27：大同 暁人 (京大理)
空間反転対称性のない系における
磁場誘起トポロジカル超伝導
P28：吉田 太地 (東工大院理工)
四極子自由度が活性な$PrRh_2Zn_{20}$の異方
的な温度・磁場相図と特異な輸送特性
P29：日高 宏之 (北大理)
カゴ状化合物MBe_{13}(M = La, Sm, U)の
低温X 線結晶構造解析
P30：人見 尚典 (京大理)
二層Rashba 系でのスピン軌道相互作用
により誘起される電気八極子秩序
P31：青山 泰介 (神戸大理)
超伝導とCDW が共存する$LaPt_2Si_2$ の
NMR による研究
P32：小手川 恒 (神戸大理)
ヘリカル磁性体CrAs の
圧力誘起超伝導と磁気相関
P33：工藤 一貴 (岡山大基礎研)
$Au_{1-x}Pd_xTe_2$ における化学ドープ誘起
構造不安定性と強結合超伝導
P34：柳瀬 陽一 (京大理)
UPt_3 における非共型超伝導と
ギャップ構造
P35：酒井 明人 (東大物性研)
T/B scaling without quasiparticle mass
divergence in $YbCo_2Ge_4$
P36：水戸 毅 (兵庫県大院物質理)
URu_2Si_2 における局在
－遍歴クロスオーバーと磁気的相関
P37：江見 直哉 (兵庫県大院物質理)
SmB_6 とLa 希釈系における
価数揺らぎとギャップ形成
P38：岸本 恭来 (神戸大院理)
$CePd_2Ga$ の単結晶育成とNMR/NQR
P39：石田 憲二 (京大理)
$CeCoIn_5$ 人工超格子のIn-NMR &
単結晶$CeCu_2Si_2$ のCu-NQR
P40：柳 有起 (明大理工)
LnT_2Al_{10} (Ln = La,Ce, T = Fe,Ru,Os) の
電子構造の理論研究
P41：松本 裕司 (名工大)
3元化合物$R_{0.67}T_nM_{2n+m}$ (R=Yb, U, T=Pt,
Ir, M=Al, Ga) の単結晶育成
P42：柳澤 達也 (北大理)
$U_{1-x}Th_xBe_{13}$ の非フェルミ流体状態
および非従来型超伝導状態における
超音波物性
P43：田端 千紘 (KEK-CMRC)
UAu_2Si_2 の低温磁性
P44：雀部 矩正 (阪府大院工)
Ce 金属間化合物の内殻X 線分光に
おける多極子秩序の理論研究
P45：鶴田 篤史 (阪大院基礎工)
Pr 1-2-20 系における非フェルミ液体と
秩序状態に対する理論的研究
P46：三浦 植幸 (北大理)
$(Th,U)Be_{13}$ における異常フェルミ液体
－正常フェルミ液体状態
P47：仲村 愛 (東北大金研)
Th_7Ni_3 とLa_7Ni_3 の超伝導
P48：角田 峻太郎 (京大理)
磁気多極子秩序と共存する超伝導状態
P49：中辻 知 (東大物性研)
カイラル反強磁性体での
巨大異常ホール効果
P50：堀金 和正 (岡大異分野)
超高圧合成法による$Sr_2IrO_{4-x}H_x$ の
結晶構造および磁気特性
P51：久我 健太郎 (理研SPring-8)
斜方晶化合物$YbCo_2Ge_4$ における
硬X 線励起Yb 3d 内殻光電子線二色性
P52：中西 良樹 (岩手大院工)
$SmTa_2Al_{20}$ の低温秩序相と基底状態
P53：三浦 章 (北大院工)
$CeOBiS_2$ の超伝導特性
P54：播磨 尚朝 (神戸大理)
Fermi surfaces in cubic pyrite-type $CoSe_2$
and chiral cubic ullmannite-type NiSbS and
PdBiSe
P55：網塚 浩 (北大理)
UNi_4B のトロイダル秩序状態における
異常Hall 効果の検証
P56：青木 大 (東北大金研)
U_6Co の純良単結晶育成と超伝導
P57：井原 慶彦 (北大理)
局在 Fe スピンを持つ有機伝導体に
おけるπ-d 相互作用効果
P58：植木 輝 (北大理)
第二種超伝導体のローレンツ力による
渦帯電効果

J-Physics：多極子伝導系の物理
平成28年度　領域全体会議　ポスター賞受賞者

領域全体会議2日目のポスターセッションでは、学生の皆さん、そして2010年以降に学位を取得された若手件研究者の方々、計29名を対象に、ポスター賞を企画しました。

「研究内容のインパクト」、「説明のわかりやすさ」、「ポスターのまとめ方の見やすさ」の３つの観点について厳正な審査を行い、優れた発表５件を選出しました。同日夜開催の懇談会で表彰式を行い、受賞者一人一人に播磨領域代表から賞状と記念品（空気清浄効果のある？竹炭コートの罠のペーパーウェイト）が贈られました。

将来が楽しみな受賞者の皆さんに、本ニュースレターにて研究内容を改めて紹介していただきました。

Emergent spin-valley-orbital physics by spontaneous parity breaking …… 44
速水　賢　北海道大学大学院理学研究院

BiS_2系新奇化合物$EuFBiS_2$の純良単結晶育成と電子状態の解明 …… 45
梶谷　丈　首都大院理工 博士後期課程2年

「Pr希薄系$Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$における非フェルミ液体的挙動」
〜〜〜 電気四極子による不純物近藤効果を捉える 〜〜〜 …… 46
山根　悠　広島大学大学院先端物質科学研究科 博士課程前期２年

磁気多極子秩序と共存する超伝導状態 …… 47
角田　峻太郎 ／ **柳瀬　陽一**　京都大学大学院理学研究科

空間反転対称性のない系における磁場誘起トポロジカル超伝導 …… 48
大同　暁人　京都大学大学院 理学研究科

中央上段左より
梶谷 丈 氏　山根 悠 氏　速水 賢 氏
中央下段左より
大同 暁人 氏　角田 峻太郎 氏

Emergent spin-valley-orbital physics by spontaneous parity breaking

速水　賢
北海道大学大学院理学研究院

近年、スピンホール効果や非従来型の超伝導などの興味深い物性の原因となることから、空間反転対称性の破れた系におけるスピン軌道相互作用の効果が興味を集めている。このような系では、奇パリティをもった結晶場とスピン軌道相互作用の絡み合いから発現する反対称スピン軌道相互作用が重要な役割を果たす。ここで、奇パリティの結晶場が存在するための必要条件は原子位置での反転中心の欠如であり、系全体の空間反転対称性の破れは必ずしも必要ではない。このような原子位置での反転対称性の破れはジグザグ鎖、ハニカム構造、ダイアモンド構造といった格子構造において見られるものであり、トロイダル秩序や磁気単(四)極子秩序といった多極子秩序の起源となりうることから注目を集めている[1,2]。しかしこうした多極子秩序のもとでどういった反対称スピン軌道相互作用が誘起され、どのような特異な電子状態や非対角応答が発現するかという研究は、ほとんど行われていなかった。

本研究において我々は、原子位置で反転中心をもたない格子系において、空間反転対称性の破れを伴う自発的な秩序形成が、格子構造に潜んだ反対称スピン軌道相互作用をどのように活性化し、物性にどのような影響を与えるかを調べた[3,4]。具体的には、電子のもつ電荷・スピン・軌道の自由度とスピン軌道相互作用を含むミニマルなモデルとして、ハニカム構造をもつ二軌道モデルを考え、可能な電荷・スピン・軌道秩序のもとで誘起される有効的な反対称スピン軌道相互作用を導出した。その結果、電子系の自発的な対称性の破れを通じて系の空間反転対称性が破れることで、隠れた反対称スピン軌道相互作用が顕在化し、電子状態や非対角応答に大きな影響を与えることを明らかにした。例えば、バンド構造におけるスピン分裂、バレー分裂、原点におけるバンドシフトといったバンド変形の原因は、秩序状態が誘起する有効的な反対称スピン軌道相互作用を吟味することで理解できることを明らかにした[図1]。また、有効的な反対称スピン軌道相互作用を顕に導出することにより、秩序状態により発現する奇パリティ多極子がどのモデルパラメタに強く依存するかを明らかにした。今回得られた方法はより複雑な多バンド系に対しても適用できるため、電荷・スピン・軌道秩序状態に潜む奇パリティ多極子の同定に多いに役立つことが期待される。

本研究内容は、楠瀬博明、求幸年各氏との共同研究であり、ここに深く感謝する。

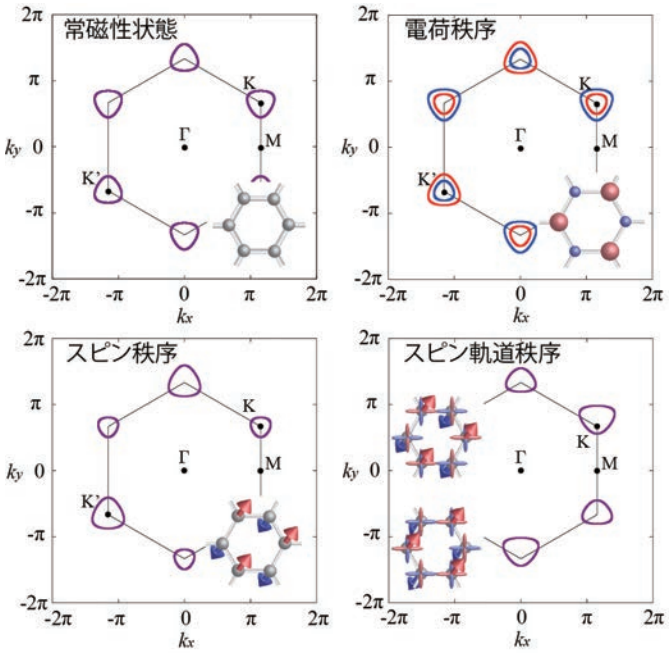


図１：常磁性状態および各秩序状態における電子状態

[1] Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 014703 (2014).
[2] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, Phys. Rev. B **90**, 024432 (2014).
[3] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, Phys. Rev. B **90**, 081115(R) (2014).
[4] S. Hayami, H. Kusunose, and Y. Motome, J. Phys.: Cond. Matter **28**, 395601 (2016).

BiS_2系新奇化合物$EuFBiS_2$の純良単結晶育成と電子状態の解明

梶谷　丈
首都大院理工 博士後期課程2年

この度、北海道大学において行われました領域全体会議におきまして、ポスター賞を頂き、大変嬉しく感じております。私は修士課程から現在に至るまで、BiS_2系の新奇超伝導物質の実験研究に取り組んでおります。この実験の一番困難だった点は単結晶育成であり、とても苦労して得られた成果のため、その成果をこのような形で評価して頂けたことは、今後の研究活動にとても励みになります。本ポスターで発表した研究内容につきまして紹介の機会を頂きましたので、以下に述べさせて頂きたいと思います。

BiS_2系層状超伝導体は、2012年に首都大の水口先生等によって発見された層状化合物です。最初に$B_4O_4S_3$および$REO_{1-x}FBiS_2$ (*RE*：希土類)が発見され、鉄系高温超伝導体および銅酸化物高温超伝導体との構造の類似性から、超伝導発現のメカニズムを研究する良い系として注目を集めております[1,2]。また、$REO_{1-x}F_xBiS_2$系は圧力応答に敏感で、静水圧を印可すると構造相転移することがわかっており、それと同時に超伝導転移温度の急激な上昇が見られる興味深い物質です[3]。さらに、最近の私達の単結晶を用いた研究では、$LaO_{1-x}FxBiS_2$系において、温度に依存して結晶構造の対称性が変化することがわかってきており[4]、私は特にこの構造相転移、あるいは本質的には電子状態の変化に伴うと思われる構造変化の可能性と、この超伝導発現のメカニズムとの関係について興味を持って実験研究を行っています。今回ポスター賞を頂くことのできた研究内容は、ブロック層にEuイオンを含むBiS_2系層状物質$EuFBiS_2$の電子状態を、純良単結晶を用いて解明しようというものです(図1)。このBiS_2系超伝導体において、超伝導発現に関わる主たるバンドは、Biの6pバンドであることがバンド計算より示されており、さらに*RE*FBiS$_2$系では*RE*の価数が２価をとる場合、基本的に絶縁体となる化合物です[5]。Eu系の場合、多結晶試料による研究報告[6]から2価と3価の混合状態となることが示唆されており、その結果キャリアがドープされ金属化し、超伝導が発現することが報告されています。また、高温領域においては、電荷密度波(CDW)転移を示唆する物性異常も報告されております。我々はEuの電子状態と超伝導特性の詳細を明らかにするため、単結晶を用いた研究にこだわって行っております。しかし、$EuFBiS_2$の単結晶育成は非常に困難であり、これまで報告はありませんでした。一つの理由は、$EuFBiS_2$の育成を狙っても$Eu_3Bi_2S_4F_4$(この物質も超伝導体)というBiS_2系化合物が安定して析出してしまい、二つの化合物が混晶で析出するケースがほとんどであったからです。この二つの化合物をいかに作り分けるか、色々な結晶育成方法を試しながら、条件を絞り込み半年ほど粘ったところ物性測定がかろうじて可能なサイズの$EuFBiS_2$単結晶の育成に成功いたしました(図1)。

この単結晶を用いた物性測定の結果、磁化測定から求められるEuの価数はほとんど2価であるにもかかわらず低温２Ｋまで磁気秩序を示さず、Eu化合物としては特異な物質であることがわかりました。また、電気抵抗測定からも、多結晶の振る舞いと異なり、半導体的振る舞いを示すことがわかり多結晶試料と様相が大きく異なることがわかってきました(図2)。そこで私達は改めてこの物質について基礎物性を明らかにすると共に、最近、La系で見られたような構造相転移が存在するかどうか、粉末X線回折実験による結晶構造の温度依存性を調べております。また、このBiS_2系は前述した通り加圧に敏感であるため、今後圧力印可によるEuの磁性の変化と輸送特性の変化、さらに超伝導発現の有無について注目した研究を行ってゆく予定でおります。

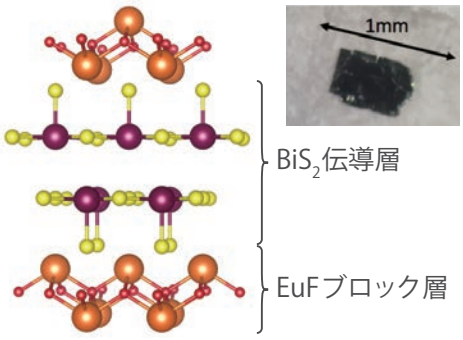


図1 $EuFBiS_2$の結晶構造と単結晶

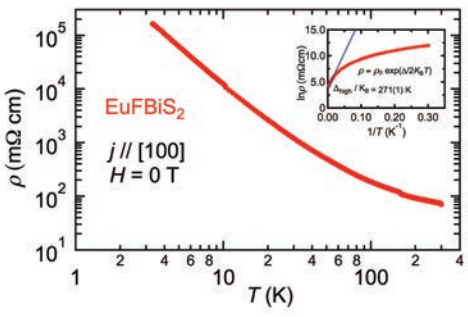


図2電気抵抗の温度依存性

[1] Y. Mizuguchi *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 220510 (2012).
[2] Y. Mizuguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jap. **81**, 114725 (2012).
[3] T. Tomita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 063704 (2014).
[4] R. Sagayama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 123703 (2015).
[5] H. Sakai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 014709 (2014).
[6] H. Zhai et al., Phys. Rev. B. **90**, 064518 (2014).

「Pr希薄系$Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$における非フェルミ液体的挙動」
~~~ 電気四極子による不純物近藤効果を捉える ~~~

山根　悠
広島大学大学院先端物質科学研究科 博士課程前期２年

4*f*電子(ホール)を1個もつCe^{3+}(Yb^{3+})を含む金属間化合物では，4*f*電子の局在スピンと伝導電子間の磁気的な交換相互作用が近藤効果を発現させ，重い電子状態，量子臨界現象，非従来型超伝導などの興味深い現象を引き起こす。一方，4*f*電子を2個もつ非クラマースイオンPr^{3+}では，磁気モーメントをもたず電気四極子を有する非磁性のΓ_3二重項が結晶場基底状態となる場合があり，四極子と伝導電子の混成による四極子近藤効果の発現が期待できる。D. L. Coxは，f^2配位の単サイトの効果である不純物四極子近藤効果を理論的に扱い，比熱を温度で割ったC/Tと電気抵抗率ρがそれぞれ$-\ln T$と$\sqrt{T}$に従う非フェルミ液体(NFL)的挙動を示し，(1/2)Rln2の残留エントロピーが生じることを予測した1)。しかし，結晶場準位の同定の困難さや原子配列の乱れ，不純物の影響などにより，未だ実験的な確証には至っていない。

そこで私は，結晶場基底状態がΓ_3二重項である立方晶$PrIr_2Zn_{20}$に着目し，そのPr希薄系$Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$の比熱と電気抵抗を測定することにした。$PrIr_2Zn_{20}$のこれまでの実験から，その四極子と伝導電子は強く混成していると指摘されていたので2)，Prを希薄にすれば不純物四極子近藤効果が生じると期待した。

$Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$ (x= 0.03)の磁気比熱を温度で割ったC_m/Tを図(a)に示す。0.15< T< 0.5 Kで $-\ln T$に比例し，さらに低温で上昇する。また，x= 0.05の電気抵抗率の3 Kからの変化量$\Delta\rho$は，(b)のように0.04< T< 0.4 Kで$\sqrt{T}$依存性を示す。これらのNFL的振る舞いは，Coxが理論的に予測した強結合の四極子近藤効果による温度依存性と符合する。Prあたりの磁気エントロピー S_mをS_m(4 K)= Rln2と仮定して求めた値を図(c)に示す。x= 0.03 のS_mはx= 1の値よりも低温側で大きく，最低温の0.08 K でも(0.3)Rln2程度にとどまる。このように，不純物四極子近藤効果を示唆する結果を得られているが，Prが希薄になるほどその異常を定量的に観測することは困難となる。今後，比熱測定装置を改良して高精度な測定を実現し，これらの異常物性のPr組成依存性を明らかにすることによって不純物四極子近藤効果を明瞭に示したい。

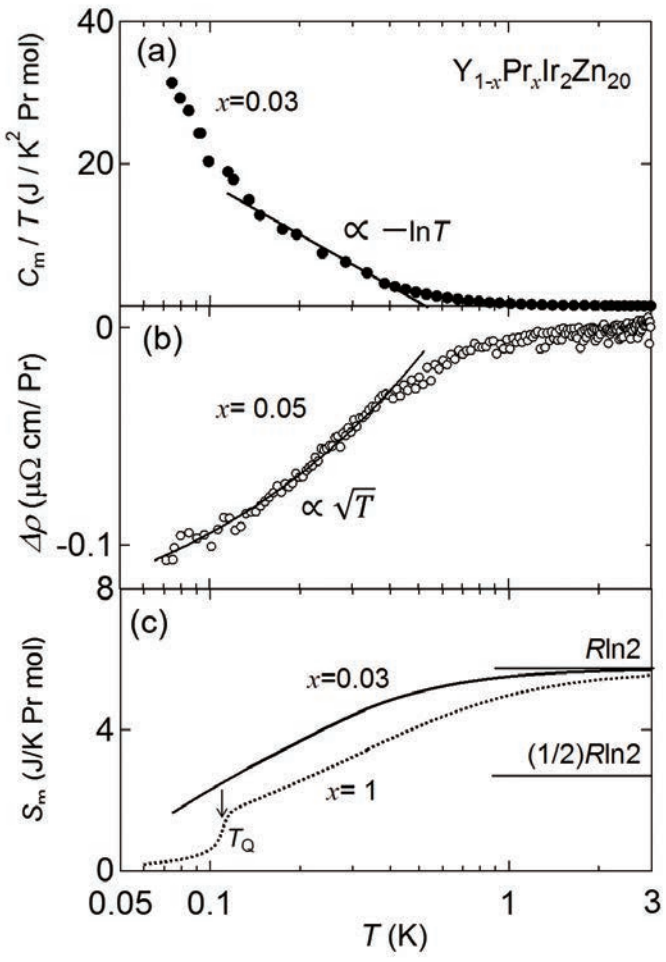


図 $Y_{1-x}Pr_xIr_2Zn_{20}$の(a) C_m/T, (b) 電気抵抗率の変化量$\Delta\rho$と(c) 磁気エントロピー S_m

1) D. L. Cox, Phys. Rev. Lett. **59**, 1240 (1987).
2) T. Onimaru ***et al.***, Phys. Rev. B **94**, 075134 (2016).

磁気多極子秩序と共存する超伝導状態

角田　峻太郎　　**柳瀬　陽一**
京都大学大学院理学研究科

空間反転対称性の破れた超伝導体は、従来のBCS 超伝導とは異なる様々な新奇超伝導状態の舞台になる。大域的に空間反転対称性が破れた系では、クーパー対が有限の重心運動量を持つFulde-Ferrell-Larkin- Ovchinnikov (FFLO)状態が極小の磁場下で安定化する[1]。しかし実際には、FFLOの秩序変数は渦糸状態に隠されてしまい[2, 3]、実験での観測は難しいと考えられている。一方、局所的に空間反転対称性が破れた系では、磁場の向きに応じてペア密度波(PDW)状態[4]や複素ストライプ状態[5]が安定化する。特にPDW状態はスピン一重項のクーパー対が主に凝縮しているにも関わらず奇パリティの超伝導という特徴を持つ。

磁場下での超伝導状態が多く議論されてきた中、近年では超伝導現象における多極子の役割が注目を集めてきている。そこで本研究では、様々な磁気多極子に誘起される新奇超伝導状態の発見を目的とし、ミニマルモデルとして「1次元ジグザグ格子」を採用して数値解析を行った。この系は局所的に空間反転対称性が破れているので、奇パリティ多極子の舞台となる。また、非共型な(らせん対称性や映進対称性を持つ)構造を持つこともこの系の特徴となっている。今回は3つの磁気多極子(磁気単極子、磁気双極子、磁気四極子)の秩序を分子場として取り入れ、その秩序と超伝導との共存を調べた。3つの多極子のイメージは図1に示されており、色の違う丸が2つの副格子、矢印は磁気モーメントを表している。単純なs波の電子間引力相互作用を仮定し、平均場理論を適用して数値解析を行った。

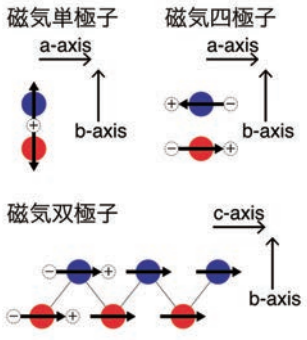


図1　磁気多極子の秩序

結果1. 磁気双極子秩序に誘起されるPDW状態

「強磁性」の状態、すなわち磁気双極子秩序のもとではPDW状態が安定化することを示した(図2)。これにより強磁性超伝導体におけるPDW状態の可能性を提案することができた。ジグザグ系で強磁性超伝導を示す候補物質としてはUCoGe、URhGe、UGe_2が挙げられる。UCoGeやURhGeでは強磁性揺らぎによるスピン三重項超伝導が多く支持されている[6-8]。しかしUGe2では、非共型な性質がより強く現れた「深い」ジグザグ構造を持つことで、スピン一重項のPDW状態になる可能性も十分高いと考えられる。

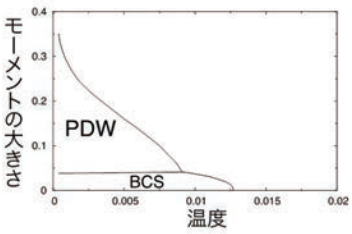


図2　磁気双極子秩序での相図

さらに、この奇パリティのPDW状態はトポロジカル超伝導になっている：(擬)時間反転対称性と粒子正孔対称性に守られたクラスBDIに属するトポロジカル数が有限になり、それに対応してマヨラナ状態が現れる。このマヨラナ状態は摂動などによる(擬)時間反転対称性の破れに対してもロバストなトポロジカル超伝導であることも示すことができた。

結果2. 磁気四極子秩序に誘起されるFFLO状態

図1のような「反強磁性」モーメントは磁気四極子に分類される。磁気四極子秩序では2枚のバンドが非対称に変形し、これによってクーパー対の重心運動量はゼロでなくなり、FFLO超伝導が実現することを明らかにした(図3)。磁場下のFFLO状態は渦糸状態に隠されてしまうが、磁気四極子の秩序によってFFLOが安定化したことで渦糸状態の問題をクリアできた。この理論的発見によって、FFLO超伝導を実験により観測することが可能になると期待される。

さらに、磁気四極子モーメントがある程度大きくなると超伝導がバンド依存することも分かった。化学ポテンシャルの値を変えることで、2枚のバンドの両方が寄与する状態と片方が寄与する状態との間でクーパー対の重心運動量が不連続に変化する1次転移が起こる。このようなバンド依存型FFLO超伝導はジグザグ格子に限った話ではなく、非共型な構造をもつ他の様々な物質でも一般的に起こりうるものである。

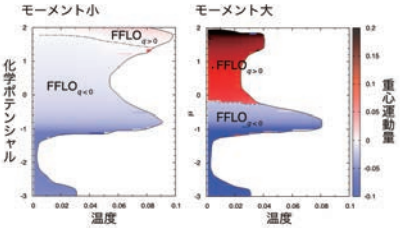


図3　磁気四極子秩序での相図

[1] D. F. Agterberg and R. P. Kaur, Phys. Rev. B **75**, 064511 (2007).
[2] Y. Matsunaga ***et al.***, Phys. Rev. B **78**, 220508 (2008).
[3] N. Hiasa ***et al.***, Phys. Rev. B **80**, 014511 (2009).
[4] T. Yoshida ***et al.***, Phys. Rev. B **86**, 134514 (2012).
[5] T. Yoshida ***et al.***, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 074714 (2013).
[6] V. P. Mineev, Phys. Rev. B **83**, 064515 (2011).
[7] T. Hattori ***et al.***, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 073708 (2014).
[8] Y. Tada ***et al.***, Phys. Rev. B **93**, 174512 (2016).

空間反転対称性のない系における磁場誘起トポロジカル超伝導

大同　暁人
京都大学大学院 理学研究科

【研究背景】

トポロジーによる物質の分類・理解の重要性が近年認識され始めています．これまで，物質（相）を分類し理解するほぼ唯一の視点はその**対称性**でしたが，絶縁体・超伝導体といった励起にギャップを持つ系が，対称性の有無のみならず電子状態における**非自明なトポロジーの有無**でも明確に分類できることが分かりました（右図）[Schnyder *et. al.*, Phys. Rev. B **78**, 195125 (2008)]．特に．非自明なトポロジーを持つ物質群，すなわち**トポロジカル絶縁体・超伝導体**が，系の端に局在したエッジ状態の存在をはじめとした興味深い物性を示すことが理論的に明らかにされ，実験的な探索が現在精力的に進められています．トポロジカル絶縁体については実験で広く確認され，トポロジカル絶縁体は現実に広く存在する物理系として確立されたと言ってよいでしょう．一方で，**トポロジカル超伝導体**は，限られた人工的な系で実験的な示唆が得られたのみであり，その候補はあまり知られていません．トポロジカル超伝導体には量子計算での応用が期待されているMajorana準粒子が現れるということもあり，現実的なトポロジカル超伝導体の理論的・実験的探索が非常に重要な課題になっています．

ある物質への理解

- ✓ 結晶対称性は？
- ✓ 自発的対称性の破れは？

（従来の視点）

- ✓ トポロジカルに非自明か？

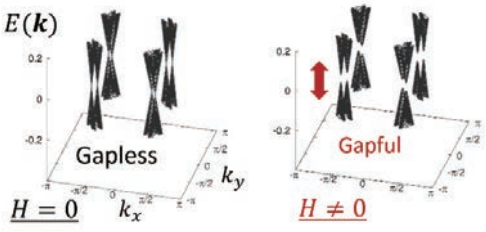
トポロジカル超伝導体は超伝導の励起スペクトルを記述するBogoliubov準粒子の波動関数が非自明な位相構造を持つことで特徴づけられます．波動関数の位相は超伝導秩序変数の位相と深く結び付いているので，秩序変数の位相が角度変化する**異方的超伝導**がトポロジカル超伝導の良い候補です．しかし，異方的超伝導体自体はd 波超伝導を中心に数多く知られているものの，**そのほとんどはノードを持つ超伝導体であり，ギャップレスな励起のために上の分類には該当しませんでした**． この点を解決するための一つの方向性として，従来の研究では有効的にフルギャップな異方的超伝導を（特にs波超伝導から）作り出すことが試みられ，一定の成功を収めてきました[Sato, Takahashi, and Fujimoto, Phys. Rev. B **82**, 134521 (2010); Mourik et. al., Science **336**, 1003 (2012)]．しかし，それらのシナリオにおいては “異方的超伝導相” は**高磁場をかけるか化学ポテンシャルを繊細に調節する**ことで実現されるために，実験的に報告があったのは半導体などの操作性の良い系に限られ，**トポロジカル超伝導体探索の舞台は未だ限られている**のが現状です．したがって，より直接的に，***ノードを持つ異方的超伝導体そのものをフルギャップにするシナリオ***が提案できれば，それはトポロジカル超伝導探索の舞台を飛躍的に広げると期待できます．

【研究結果】

我々はノードを持つ超伝導体からフルギャップのトポロジカル超伝導を得ることを目標に研究を行い，次の結果を得ました：

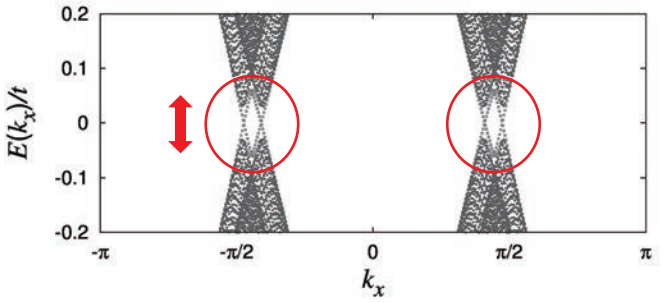
1．空間反転対称性の破れた2次元の**ノードを持つ超伝導**体（拡張s波を含む）は**低磁場下**で**フルギャップ超伝導**になる．
2．特に，異方的超伝導（拡張s波でない）であれば誘起されるギャップは大きくなる(~1K/10T)．
3．スピンシングレット超伝導ならほとんどの場合，**化学ポテンシャルの調節なし**にクラスDの**トポロジカル超伝導**になる．

この成果は，これまでトポロジカル超伝導体の候補からは外れていた ノードを持つ超伝導体のほとんどが，現実的にトポロジカル超伝導になりうることを示します．実際スピンシングレットのノードを持つ超伝導体は強相関電子系にありふれており，対応する薄膜も近年次々と実現されています．さらに，基板の上に生成された薄膜は自然に空間反転対称性を破ります．したがって，この結果は**フルギャップなトポロジカル超伝導が比較的簡単に得られる**ことを示唆するものです．現実的な候補として**銅酸化物高温**



***D+p* 波超伝導体のバルクの準粒子バンド．**
左は非磁場下，右は磁場下に対応する．磁場中ではノードが解消しギャップが開くことが分かる．

超伝導体，$CeCoIn_5$，FeSeの薄膜を提案しました．
上の結果は*d*波Rashba超伝導への提案[Yoshida and Yanase, Phys. Rev. B **93**, 054504 (2016)]をもとにしています．この提案は秩序変数と反対称スピン軌道相互作用の具体形を仮定した数値計算によるものでしたが，今回の研究で**空間反転対称性の破れと時間反転対称性の破れがうまく組み合わさることでギャップが開く仕組み**や，トポロジカル超伝導になるシナリオが明らかになりました．その結果，このシナリオは超伝導秩序変数や反対称スピン軌道相互作用の特定の形によらず，ノードのあるスピンシングレット超伝導体一般に適用できることが分かり，実際の物質への高い適用性が明らかになりました．また，2次元についての上の結果を3次元に拡張することで次の結果を得ました：



***D+p*波超伝導体のバルクエッジ対応.**
系の境界を考慮すると，フルギャップなバルク励起の中にエッジ状態が現れる．

4．空間反転対称性の破れた3次元のラインノードを持つ超伝導体は磁場下でWeyl超伝導になる．

Weyl超伝導はトポロジーによって守られたポイントノードを持つ3次元の超伝導体で，Weyl半金属の超伝導におけるアナログです．その現実的な候補として**$CeRhSi_3$,$CeIrSi_3$,$CePt_3$ Si**を提案しました．

以上の我々の結果は非自明なトポロジーを持つ超伝導体が空間反転対称性の破れた強相関電子系に広く存在することを示唆しています．ですので，トポロジカル超伝導が我々の慣れ親しんだ超伝導体で広く発見される日が来るかもしれないと，期待してよいかもしれません．[以上の成果は論文として投稿中です：Akito Daido and Youichi Yanase, **arXiv:1605.00083** (2016).]

J-Physics 理論討論会　報告

楠瀬　博明
明治大学理工学部

2016年6月4日、5日の両日、理論グループの研究会を明治大学駿河台キャンパスで行った。本新学術領域に関係する計画研究と公募研究の理論研究者が一同に集い、ブレーンストーミング的な討論により、理論研究の現状について認識を共有するとともに概念の整理や問題点の洗い出しを行い、今後の展望を見据えることがおもな目的である。

初日は、これまでの多極子研究の成果のレビュー、多極子概念の拡張の方向性と課題、局在系と遍歴系の理論の橋渡しに必要な表現法の整理について、活発な議論が行われた。また、拡張多極子、ネマティック、ベリー位相、トポロジー、結晶の対称性といった様々な視点から問題を掘り下げることで、一見複雑に見える現象の要所を押さえた見方について各自なりの手応えがあったのではないかと思う。熱ホール効果やナノ系のマルチフェロイクスといった視点の研究紹介もあり、理論研究にさらなる拡がりを期待させるものであった。

2日目は、伝導系とくに超伝導を念頭に、多自由度の役割に着目した第一原理電子状態計算ベースの多体効果への拡張の理論研究の現状と課題が議論された。各研究者独自のノウハウが着実に蓄積されており、相互交流を一層進めることで、諸外国を凌駕する堅実でオリジナリティのある多体電子状態計算手法が大きく開花する息吹が感じられた。超伝導の秩序変数についても、群論とトポロジカル不変量を両輪とする整理法が整いつつあり、UPt_3の多重相に代表される風変わりな超伝導の理解が格段に進むことを予感させた。

今回の理論討論会には、実験研究者を代表して、網塚、野原、青木、井澤の各氏に参加して頂いた。普段あまり触れることのない理論研究の舞台裏を体験して頂いた。さらに、実験研究のトピックスをご紹介いただいた他、実験研究者の立場から夢想の世界に迷い込みがちな理論研究者へ率直な提案・要望を行っていただいた。実験と理論の大変有意義な意思疎通が図れたように思う。実験と理論の間で、お互いの現場の雰囲気が感じられる意思疎通の機会を、もう少し大きな規模で若手を中心にして行うことが今後の展開に決定的に重要であろう。

研究会は自由闊達な雰囲気の中で終始活発な議論が行われ、「討論会」に相応しい会合になったのではないだろうか。本研究会で蒔かれた種が、領域全体に拡散して良い影響をもたらすことを期待する。

理論討論会プログラム

6月4日(土)

拡張多極子 1

13:30 - 13:40　楠瀬 博明 明大理工
はじめに

13:40 - 14:10　野原 実 岡山大基礎研
強相関多極子物質の開発
― 理論への期待 ―

14:10 - 14:40　椎名 亮輔 琉球大理
スクッテルダイト系にみる軌道依存型混成と多極子状態

14:40 - 15:10　楠瀬 博明 明大理工
拡張多極子と非対称スピン軌道相互作用

15:10 - 15:40　鈴木 通人 理研
拡張多極子による電気的・磁気的秩序の表現について

拡張多極子 2

16:00 - 16:30　坂井 徹 兵庫県立大物質理
スピン・ネマティック相の話題

16:30 - 17:00　古賀 幹人 静岡大教育
多極子伝導系から多重量子ドット系へ
― 近藤効果研究の新展開 ―

17:00 - 17:30　森 道康 原子力機構先端研
フォノンホール効果の起源

17:30 - 18:00　播磨 尚朝 神戸大理
パリティ対称性の破れた結晶構造とジグザグ構造の電子状態について

6月5日(日)

多極子伝導 1

10:00 - 10:40　青木 大 東北大金研, CEA-Grenoble
アクチノイド化合物の最近の研究

10:40 - 11:10　池田 浩章 立命館理工
遍歴多極子と多極子超伝導体

11:10 - 11:40　大槻 純也 東北大理
DFT+DMFT+長距離相関効果の展望

多極子伝導 2

14:00 - 14:40　服部 一匡 首都大理
多軌道系における超伝導秩序変数の分類とその応用

14:40 - 15:20　柳瀬 陽一 京大理
非共型空間群に属する系における超伝導

15:20 - 15:50　御領 潤 弘前大理工
カイラリティ・ヘリシティ・ベリー位相とJPhysics

15:50 - 16:00　播磨 尚朝 神戸大理
おわりに

J-Physics 若手夏の学校

野原　実
岡山大学異分野基礎科学研究所

日　時　平成28年8月 8日（月）13:10 ～
8月12日（金）12:30

会　場　高野山大学
（和歌山県伊都郡高野町高野山385）
天徳院（同370番地）

講義

柳 有起（明治大学）
実験家向けの多極子入門

道村 真司（埼玉大学）
共鳴X線回折実験の進歩と
多重極子秩序状態の観測

大槻 純也（東北大学）
多体効果の最前線

岡本 佳比古（名古屋大学）
物質探索のための5d遷移金属化合物の
結晶化学

橘高 俊一郎（東京大学）
磁場角度回転比熱測定による
超伝導研究

大串 研也（東北大学）
固体の量子伝導の理解に向けて

古川 裕次（アイオワ州立大学）
英語による物理の講義入門＆NMR入門

トピックス

北岡 良雄（大阪大学）
最近の高温超伝導の話題
～室温超伝導は見つかるのか？

倉本 義夫（KEK）
近藤効果が誘起する新奇電子秩序

高畠 敏郎（広島大学）
近藤半導体と私

鹿野田 一司（東京大学）
有機パイ電子系にみる強相関効果の様々

田島 節子（大阪大学）
銅と鉄の高温超伝導：いくつかのシナリオ

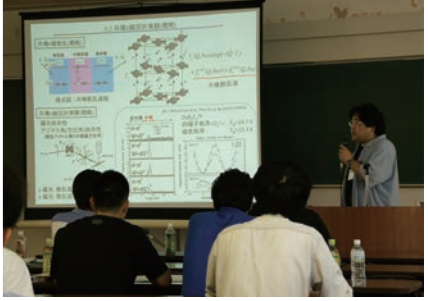
三宅 和正（豊田理研）
f^1, f^2, f^3 電子配置の重い電子状態について

大貫 惇睦（琉球大学）
純良単結晶育成のコツ

秋光 純（岡山大学、広島大学）
Quo Vadis “Superconductivity” ?

本新学術領域研究は若手育成を重要な活動のひとつに位置づけています。その目玉となる企画として本年度は「J-Physics若手夏の学校」を開催しました。f電子系とd電子系の物理が大きく進展し、遍歴多極子という新しい学理が生まれつつある今日、新たにこの分野の勉強を始めた大学院生や若手研究者は、膨大な論文を前にして、なにから手をつけてよいか戸惑うことと思います。その一助に、この若手夏の学校では、６名の気鋭若手研究者が入門から最前線までの理論と実験の講義を通して、強相関多極子の物理を俯瞰しました。高度な内容を平易な言葉で語ろうとする意欲的な講義が印象に残りました。米国の大学で活躍する古川さんによる特別講義は、今後、英語で講義をするハメになる教員だけでなく、留学や短期派遣を目指す大学院生にも役立つ話でした。また世代間の交流を意識して8名のエキスパートにトピックス講演をお願いしました。近藤効果、高温超伝導、π電子系の物理など、そもそもの問題意識を想起させる刺激的な内容でした。

参加人数82名のうち学生は41名（4年生2名、修士19名、博士20名）でした。また学生も含めて女性の参加者が11名と多く、同世代だけでなく世代を超えての女性研究者同士の交流も活発でした。宿坊である天徳院で寝食を共にする生活は、今時の学生には貴重な経験だったと思います。深夜まで語り合い、6時半に始まる勤行に毎朝参加し、講義の合間に空海の御廟がある奥の院に参拝するなど、学問的にも精神的にも刺激的な一週間でした。３日目の懇談会では、活発に質問をした大学院生（大阪大学の山神光平さん）と活発に研究交流をした大学院生（琉球大学の比嘉野乃花さん）に校長からサプライズの表彰を行いました。最終日の閉校式では、参加者一人ひとりに校長から「修了証」が手渡されました。



J-Physics in Summer
J-Physics
若手夏の学校
Photo

FOR THOSE WHO
MIGHT
NOT
KNOW

泉鏡花「高野聖」

ボルチモアの結晶合成サマースクールに参加して

小林　夏野
岡山大学　異分野基礎科学研究所

去る7月10日から15日までアメリカ・メリーランド州ボルチモアにあるJohns Hopkins University (JHU)で行われたPARADIMの1st JHU Summer School on Materials Growth and Designに参加してきました。PARADIMはPlatform for the Accelerated Realization, Analysis, and Discovery of Interface Materialsの略で、Cornell, Princeton, JHUを中心として今年発足した組織です。JHUではこの一環として単結晶などの物質合成を中心とした共同利用を始めています。今回のサマースクールはこの共同利用施設のユーザーを主にアメリカ国内の大学院生を対象として増やすことを目的としており今回の参加者にもぜひプロポーザルを、と呼びかけていました。内容は試料合成について理論・実際の合成についてで、月曜日から金曜日の5日間、午前中は朝８時半から授業を受け、午後は試料合成を実験室で行うというスケジュールでした。学生時代ですら出たことのない朝8時半からの授業は大変つらかったですが、真面目に毎日遅刻もせず頑張りました。

午後に行われた実験は5グループに分かれて行われ、フローティングゾーン(FZ)炉、ブリッジマン炉を用いた単結晶成長がそれぞれ2グループずつ、そして化学輸送法(CVT)の1グループでした。各グループに１人ずつ大学院生又はスタッフが担当として付き、グループの受講者の作業に関してアドバイスや原理の説明等、作業のサポートを行っていました。月曜日にグループで作業する内容の説明から始まり、金曜日の午後にはそのプロジェクトの結果を発表するというタイトな予定だったにもかかわらず、(Fe, Co)Siの単結晶など野心的なテーマの選択で驚きました。結果としては、グループによってある程度の結果の相違はあったものの、全てのグループで何らかの結果・知見を発表することが出来ていたので、最初から安全そうなテーマで行うよりも最終的には得るものが大きかったのではないでしょうか。特に実際に合成する際には圧倒的に失敗の方が多いので、その時の対処法をアドバイザーから学ぶという経験は初めに学ぶと後の実験に役立つと思います。(各グループのドタバタを見る限り今回の方針がどこまで意図的なのかはわかりませんが。)

写真は、ブリッジマン炉の説明を聞くグループ。左端で鈴木君が真面目にノートをとっているのが見えます。

大学院時代も含めてサマースクールのような経験は今回が初めてだったのですが、最初に思っていたよりも学ぶことも多く、知り合いも圧倒的に増えたので本当に大学院生として参加するとさらに楽しかっただろうと思います。今回の一緒に実験したグループでもエネルギー貯蔵を行う化学系の大学院生、デバイスを作っている企業から参加している人、中性子散乱用に自分で試料を合成しようとしている人など研究的にも様々なバックグラウンドの人がおり、それぞれの研究の話を話し合うだけでも面白かったです。(毎日一緒に作業したので連帯感が生まれて雑談もするようになりました。)　最終日に飲みに行った帰りに「次回のAPSで会おう！」などと皆が盛り上がっていたので、友達が増えるという単純な面でも、若い研究者の方はこのような学校などに是非参加してみてはいかがでしょうか。

J-Physics : Mini International Workshop: Physics of Strongly Correlated Electron Systems under Extreme Conditions

藤　秀樹
神戸大学大学院理学研究科　教授

2016年4月13日、14日の両日、神戸大学大学院理学研究科Z201教室にて〝J-Physics: Mini International Workshop: Physics of Strongly Correlated Electron Systems under Extreme Conditions〟を開催しました。

このWSは、神戸大学にJ-Physics共用機器である角度分解機能付き希釈冷凍機がH27年度末に導入され試運転が完了したことを機会に、その公開と強相関電子系化合物の異常物性の理解を深めることを目的に行われました。22名の参加者があり、3名の国外研究者を含め16名の招待講演が行われ、強磁性超伝導、エキゾチック超伝導、隠れた秩序、などのトピックスについて議論しました。WSは成功裏のうちに終了しました。皆様、ありがとうございました。

J-Physics:Mini International Workshop: Physics of Strongly Correlated Electron Systems under Extreme Conditions

13-Apr

13:00-13:10 H. Harima Kobe U.
Opening

Exiotic superconductors
Chair K. Ishida

13:10-13:35 M. Nohara Okayama U
Superconductivity in Transition Metal Arsenides

13:35-14:00 H. Mukuda Osaka U.
Search for valence fluctuations on superconductor $Pb_{1-x}Tl_xTe$ by ^{125}Te-NMR

14:00-14:25 H. Kotegawa Kobe U
Pressure-induced superconductivity and magnetic correlations in CrAs

14:25-14:50 Swee K. Goh The Chinese U. Hong Kong
Strong coupling superconductivity in the vicinity of the structural quantum critical point in $(Ca,Sr)_3Rh_4Sn_{13}$

14:50-15:00 break

Ce & Pr based superconductors
Chair M. Nohara

15:00-15:25 T. Onimaru Hiroshima U.
Quadrupole-driven non-Fermi liquid behavior in Pr 1-2-20 systems

15:25-15:00 K. Fujiwara Shimane U.
High-field NMR study of Ce valence state in $CeCu_2Si_2$ under high pressure

16:00-16:25 K. Ishida Kyoto U
NMR Measurements on $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ Superlattices

16:25-16:50 H. Yasuoka JAEA and MPI
Physics of Kondo Hole - NQR/NMR in $(Ce1-xLax)CoIn_5$ -

16:50-17:20 J. Flouquet CEA
Ferromagnetic superconductivity

18:30-21:00 discussion & dinner

14-Apr

U and Ce based systems
Chair K. Fujiwara

9:30-9:55 H. Tou Kobe U.
Low energy excitations of Pr and U based f^2 systems probed by NMR

9:55-10:20 T. Mito U. Hyogo
Magnetic properties and local symmetry above HO phase in URu_2Si_2

10:20-10:45 T.C. Kobayashi Okayama U
Pressure-temperature phase diagram of $CeNiGe_3$

10:45-10:55 break

Ce based system
Chair H. Tou

10:55-11:20 E. Matsuoka Kobe U.
CeRh6Ge4: the non-centrosymmetric hexagonal compound with a proximity to a ferromagnetic quantum critical point

11:20-11:45 H. Tanida Hiroshima U
Pressure effect on $CeRu_2Al_{10}$

11:45-12:10 H. Sugawara Kobe U.
Low temperature physical properties in new Ce-based compound $CePt_3P$

12:10-12:20 H. Harima Kobe U.
Closing

2016年10月からの領域関連行事

TMUシンポジウム2016「U系およびBiS2系の物理の最近の発展」

日　時：平成28年11月28日（月）13:00 ～ 18:30
場　所：首都大学東京 南大沢キャンパス11号館2階204室（八王子市）

第10回物性科学領域横断研究会

J-Physics主催

日　時：平成28年12月9日（金）～ 10日（土）
場　所：神戸大学 神戸大学六甲台第２キャンパス 百年記念館(神大会館)（神戸市）

APS March Meeting

日　時：平成29年3月13日（月）～ 17日（金）
場　所：Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, LA, USA

日本物理学会（第72回年次大会）

日　時：平成29年3月17日（金）～ 20日（月）
場　所：大阪大学 豊中キャンパス（豊中市）

μSR2017

14th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance

日　時：平成29年6月25日（日）～ 30日（金）
場　所：北海道大学 学術交流会館（札幌市）

Actinides 2017

日　時：平成29年7月9日（日）～ 14日（金）
場　所：東北大学 百年記念会館 川内萩ホール（仙台市）

SCES2017

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems

日　時：平成29年7月17日（月）～ 21日（金）
場　所：Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic

LT28

28th International Conference on Low Temperature Physics

日　時：平成29年8月9日（水）～ 16日（水）
場　所：The Swedish Exhibition & Congress Centre, Gothenburg, Sweden

日本物理学会（2017年秋季大会）

日　時：平成29年9月21日（木）～ 24日（日）
場　所：岩手大学（盛岡市）

第１回国際ワークショップ

J-Physics主催

J-Physics 2017 — International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena

日　時：平成29年9月24日（日）16:00 ～ 28日（木）12:00
場　所：八幡平ロイヤルホテル（岩手県八幡平市）

Information
事務局からのお知らせ

研究業績登録のお願い

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 15H05882 (J-Physics).
【和文】：本研究はJSPS科研費15H05882の助成を受けたものです。

計画研究の課題番号と課題名の対応は以下の通りです：
15H05882　J-Physics:多極子伝導系の物理の研究総括
15H05883　局在多極子と伝導電子の相関効果
15H05884　遍歴多極子による新奇量子伝導相
15H05885　拡張多極子による動的応答
15H05886　強相関多極子物質の開発
15K21732　J-Physics:多極子伝導系の物理の国際展開

活動成果報告のお願い

以下の情報を随時メールで事務局までお知らせください。
論文　（著者名、タイトル、雑誌名、巻号、ページ、発行年、査読の有無）
著書　（著者名、タイトル、出版社、発行年）
国内・国際学会等発表　（発表者、タイトル、発表学会等名、場所、発表年月日、招待の有無）
アウトリーチ活動　（実施者、活動内容、場所、実施年月日）

連 絡 先 J-Physics事務局：steering@jphysics.jp

NEWS LETTER
J-Physics #02
Physics of Conductive Multipole Systems
September

編集後記

新学術が発足し既に１年が過ぎ、研究も軌道に乗りかけている頃と思います。今号では、今年度より公募研究に加わった研究グループの代表者の方に紹介記事を書いて頂きました。紹介記事の依頼ではフォーマットを特に設けず、研究内容と自己紹介でおおよそA4に1ページ程度の分量でお願いしたのですが、提出されたものは分量・内容とも様々な形式のものでした。代表者の生い立ちや休日の様子などが分かるものから、そもそもの研究動機など詳しく説明したものまで内容については大変個性豊かな紹介記事となり、気楽に読めるNewsletterを目指す私にとっては大変満足しています。ただ、分量に関しても大変個性豊か(？)なものになってしまい、校正を担当して頂いた北大の渡辺さんに大変なご苦労をかけてしまったことを反省しております。(次回からフォーマットを作るようにします。)

また今号を作成する段階で、今後のNewsletterの表紙についてどのようなものにしていくかを関係者で意見交換をしました。話し合いの結果、本「JPhysics」のNewsletterでは若手研究者を中心とした「研究者の顔」をフィーチャーしたものにしたいということになりました。覚えておられる方も多いと思いますが、ちょうど「重い電子」の新学術のNewsletterの時は最新・自慢の装置が表紙を飾っていたのと対照的です。本新学術の研究会で若手研究者が活き活き発表することが「JPhysics」の成功につながると信じています。皆さんの講演中にカメラマンがシャッターチャンスを狙っていますが、気にせず講演に集中してくださいね。ご協力の程よろしくお願いします。

(K. I.)

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2号
2016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/