

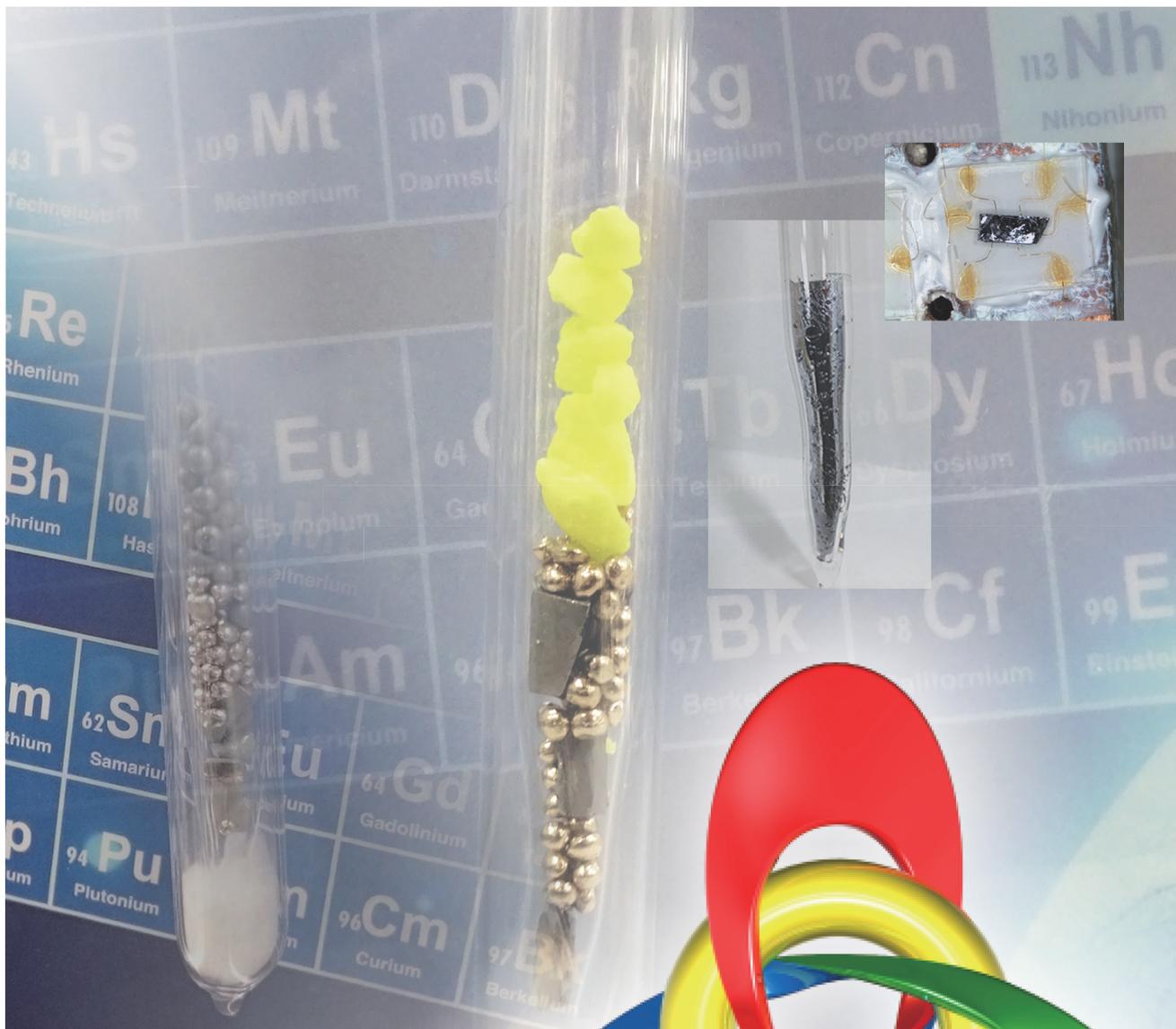
文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 H27(2015)-H31(2019) 年度

# トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア

Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, MEXT, Japan Topological Materials Science

## NEWSLETTER

No. 3



TlBiSe<sub>2</sub>

TlBiS<sub>2</sub>

February 2018

## CONTENTS

- 2 巻頭言  
中間評価を終えて / 川上 則雄 (京都大学)  
領域研究への期待 / 川村 光 (大阪大学)
- 4 今年度の計画研究トピックス  
計画研究 A01、B01、C01、D01
- 20 受賞ニュース  
第 21 回久保亮五記念賞 / 川口 由紀 (名古屋大学)  
2017 年科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞 / 横山 毅人 (東京工業大学)  
第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 4) / 米澤 進吾 (京都大学)  
第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 7) / 笠原 裕一 (京都大学)
- 24 トピックス  
Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> におけるスピン回転対称性の破れとトポロジカル超伝導 / 鄭 国慶 (岡山大学)  
キタエフ模型が生み出す量子スピン液体研究の新たな潮流 / 那須 讓治 (東京工業大学)
- 30 HOT TOPICS COOL NEWS 2017
- 31 公募研究紹介
- 49 若手励起プログラム  
太田 智明 (東京工業大学)、ゴン・ゾンピン (東京大学)、東川 翔 (東京大学)、井辺 洋平 (京都大学)、  
嶋村 奈津美 (東北大学)、吉岡 信行 (東京大学)、トラン・シュアン・チ (東北大学)、高三 和晃 (京都大学)
- 57 REP 招聘報告  
Yakov Fominov (ロシア科学アカデミー)、Lee Sungbin (韓国科学技術研究所)、  
Ilya A. Gruzberg (アメリカ・オハイオ州立大学)、Alexander Golubov (トゥウェンテ大学)、  
Ying Liu (上海交通大学 / ペンシルバニア州立大学)
- 65 JREP プログラム 報告  
深谷 優梨 (名古屋大学)、今村 征央 (京都大学)、モハメッド・オーダ (京都大学)、  
安井 勇氣 (京都大学)、ムハマド・シャーバズ・アンワー (ロンドン大学)、  
ティエンユー・リウ (ブリティッシュコロンビア大学)、池田 敦俊 (京都大学)、土師 将裕 (京都大学)
- 72 PD 紹介  
ジェームズ・ドゥ・ライユル (大阪大学)、田村 駿 (名古屋大学)、大湊 友也 (東北大学)、吉田 恒也 (京都大学)
- 76 2017 年度研究会報告  
第 3 回 TMS 領域研究会 (TopoMat2017)、第 11 回物性科学領域横断研究会、第 9 回トポロジー連携研究会、  
"YITP-PKU-TMS International School and Workshop" (TMS 第 3 回アライアンス研究会)  
"TOP-SPIN and TMS International Workshop" (TMS 第 4 回アライアンス研究会)  
"Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms" (TMS 第 5 回アライアンス研究会)  
"TMS-EPIQS 2nd Alliance Workshop" (TMS 第 6 回アライアンス研究会)
- 87 TMS セミナー報告
- 88 コラム  
タイリングとトポロジー / 桂 法称 (東京大学)  
学生のあなたへ / 浅野 泰寛 (北海道大学)
- 92 今年度以降の会議、論文等での謝辞について、編集後記

## 中間評価を終えて

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 教授 (研究代表者)



2017年9月に中間評価のヒアリングも無事に終わり、領域メンバーは後半に向けて新たな気持ちで研究を進められております。領域メンバーの方々には、研究面のみならず運営面でも多くのご協力を頂き、この場をお借りして感謝いたします。

### ●前期の研究成果●

これまで前期の研究で、トポロジカル物質の開拓や新奇現象の解明に関して多くの成果が得られました。特に、発足当初は思いもかけなかったような展開もあり、順調に研究が進んでいます。その典型例が、A01, B01, D02の協力により  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_2$  のトポロジカル超伝導に対して信頼できる実験的証拠が得られたことです。これらの成果には研究項目を超えた連携が大きな役割を果たしており、まさに新学術領域ならではの協力研究の賜物です。この点は中間評価でも高く評価して頂いたと感じています。

一方で、当初予定していたマヨラナ準粒子の探索などにはさらに努力が必要というコメントを頂きました。これに関して、中間評価には間に合いませんでしたが、キタエフスピン系の物質開発、さらにはマヨラナ準粒子の観測にも確固とした実験結果が出つつあり、本領域独自の面白い成果が最終報告に記載できるものと期待しています。

### ●「トポロジカル」を分かり易く●

新学術領域研究の重要な役割の一つに、国民との対話があります。これに関して、これまで市民講座、出前授業など多くの活動を行ってきたので、このことを中間評価でアピールすることができました。私自身も2017年12月に、西宮湯川記念セミナーで「トポロジカル物質って何？」というタイトルで2時間(質問込み)の講演を行いました。このセミナーは近年かなり人気を博しているようで、収容定員は300人程度とのことですが、応募者はこれを150人ほど上回ったようです。一般の方々の科学への興味が非常に高まっていることを実感しました。

トポロジカル物質は、一般の方にとってなじみが

ないものと思いますが、ノーベル物理学賞効果もあり、多くの方に熱心に聞いて頂きました。

市民講座の準備をする際に再認識したのは、トポロジカル物質を説明することの難しさです。最終的には「運動量空間での波のひねり」を理解しなければ満足感は得られないものと思います。物理を専攻していない方のほとんどすべて？は、運動量空間のイメージがそもそもありません。今回は2時間の長丁場でしたので、この本質を迂回して話すことはできませんでした。高校生の知識でも何とか理解できるようにチャレンジしましたが、やはり難しいとの反応が返ってきました。本領域が終わるまでには、「運動量空間で波のひねり」に対する分かり易い説明を見つけたいと思います。

### ●さらなる発展にむけて●

トポロジカル物質の特徴は「トポロジに保護された表面状態」にあります。物質内部の美しいトポロジが表面を守るといって、まるで「守護神」のような性質は、トポロジカル物質の起源をよく理解できない一般の方にも強いインパクトを与えているようです。

一方で、研究でも普段の生活でもそうですが、何か新たなことを始める際には、守護神なるものは存在せず、試行錯誤の末、多くの「縮退した」可能性から指針を導き出しているように思います。逆に、この保護されない多くの可能性が研究の醍醐味そのものであるとも感じます。外界から多くの刺激を受け、思わぬ方向に答えが出たり、新たな発見につながったりします。

残り2年間、当初予定になかったような研究の芽を育み、新たな研究を展開できるよう、領域一丸となって努力していきたいと思います。このためには研究者間の連携や協力をより活発にする必要があります。本領域が提供している若手励起プログラム、REP・JREPといった国際プログラムをぜひ活用して、互いに刺激を与え合って頂きたいと思います。

## 領域研究への期待

川村 光 / 大阪大学 大学院理学研究科 教授 (領域アドバイザー)



2015年度よりスタートを切られた「トポ物質」新学術領域も、中間点を過ぎました。発足以来、川上領域代表を中心に、大変活発な活動を展開されてこられまして、小生も、その一部ではありますが、国際会議やシンポジウムに参加させて頂きました。メンバーの皆様の熱気を感じるとともに、学生さんなど多数の若い方々の参加もあって、大変充実した研究会であった印象を受けました。

「トポロジー」というのは、もちろん本来は数学の概念・用語ですが、物性物理を対象としてもなお「古くて新しい」概念です。1970～80年代にかけて、低次元磁性体や超流動ヘリウム3等を対象に、実空間の構造体（主にボルテックス等のトポロジカルな“励起”）を対象としてのトポロジ的な物性研究が活発に展開されました。その代表的なものがコスタレッツ-サウレス理論で、小生も当時、フラストレーションで生じる“曲がった”（ノンコリニアな）スピン構造を舞台としたトポロジカル励起の理論研究を行ったりした経験があります。この種の問題は、本質的に多体問題になるかと思えます。他方、整数量子ホール効果の研究を端緒として、波数空間でのトポロジー物性が、一体問題のレベルですら極めて興味深い物理を有することが明らかになり、特に2005年の

トポロジカル絶縁体の提唱以降、研究の主たる対象は、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に移りました。小生が改めて述べるまでもなく、本新学術領域も含めた近年の世界レベルでの爆発的な研究の進展により、現在では、この方向の研究も一区切りの段階に達しつつある印象を受けます。

さて、今後、トポロジーの物性科学は、どのような方向に向かうのでしょうか？先ほど述べた2つの時代にそれぞれ展開された、やや異なる研究の流れの統合 — 実空間と波数空間、多体問題と一体問題 — でしょうか（そもそも統合するようなタチのものかよ、という声も聞こえそうですが）？応用への展開でしょうか？それとも、、、？

実はこれらは、本新学術が掲げられた方向性に、既に含まれていると思います。未来は常に不確定で霧の中にあります。だからこそ、面白い訳ですが。トポロジー概念は極めて強力な概念であり、「トポロジーの女神」（本当にいるのかどうか知りませんが）は、まだまだ美味な果実を、その衣の下に用意しているような気がします。。（何だかエッセーのような巻頭言になってしまい、申し訳ありません。）

## 強相関物質のトポロジカル相

前野 悦輝 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

計画研究 A01「強相関物質のトポロジカル相」の目的は、電子間の相互作用が強い物質（強相関物質）での、トポロジカルに非自明な量子凝縮状態や量子相転移の研究を格段に深化・発展させることです。

本研究では、遷移金属酸化物や重い電子系化合物を主な舞台として、人工超格子や微細加工・接合系も含めて、特にトポロジカル相の出現や物性制御における、電子相関の有効性を明らかにしていきます。

研究テーマは、対象物質の性質によって、主にトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属、トポロジカル磁性体（絶縁体）の3つに分類できます（図1）。以下では、今年度の主な成果をテーマごとに紹介します。なお、文末の引用文献リストで、[a]はH28(2016)年度2月以降、[1]-[34]はH29(2017)年度の研究項目A01の発表論文を発表順に並べたものです。

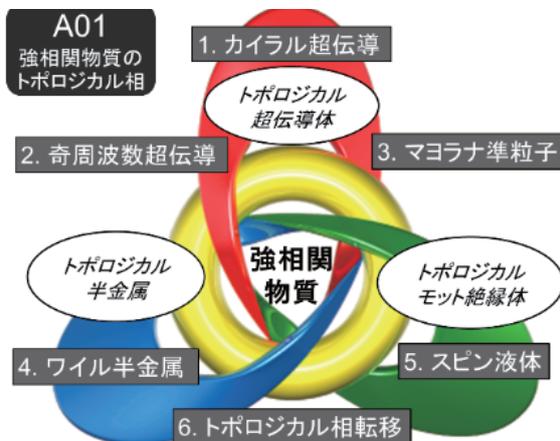


図1: 計画研究 A01 で扱う主な物質と物性。

### 【1. トポロジカル超伝導体】

トポロジカル超伝導の研究が世界的に展開される中で、本新学術領域の特徴として、ルテニウム酸化物・重い電子系化合物を含むバルク系での研究成果があげられます。また、薄膜、微細構造、人工超格子系でも独自性の高い成果が挙がってきました。

#### (1-1) ルテニウム酸化物のスピントリク超伝導

トポロジカルな超伝導である時間反転対称性を破る

スピントリク超伝導体として有力な  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  についての研究をさらに進めました。非弾性中性子回折から、反強磁性的揺らぎによる超伝導に特徴的な共鳴現象が生じていないことが明らかになり、スピントリク超伝導を支持する結果となりました [1]。

Anwar(A01 元 PD)・米澤 (A01)・前野 (A01) らは、共晶析出した Ru 金属片に近接効果で誘起した s 波超伝導と  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導との競合を調べ、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  固有の 1.5-K 超伝導相では顕著に雑音の大きな接合特性が観測され、多成分秩序変数が示唆される一方で、1.5 K 以上のいわゆる 3-K 超伝導相は s 波超伝導との競合効果を示さないことを明らかにしました [5]。この結果は、一軸圧力効果で  $T_c$  の上昇した超伝導相に対する昨年度の成果と符合するものです。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導に対するこれら最近の情報をレビューする論文も発表しました [8]。

#### (1-2) 接合系でのスピントリク超伝導現象

浅野 (A01) は田仲 (B01)・柏谷 (B01) らと、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と s 波超伝導体とのジョセフソン接合を用いて、時間反転対称性の破れの有無を正確に判定する方法を提案しました [3]。

高嶋・横山 (D02 公募)・藤本 (A01) は、図2のようなスピントリク超伝導体-磁性体接合系において、スピントリク超伝導体特有の新しいスピントリクの存在を理論的に解明しました [14]。正常電流と異なり、スピントリク超伝導電流によるスピントリクでは、駆動に必要な閾値電流が 0 で、かつ、振動的挙動が抑制されるため、従来のメカニズムより効率的に磁壁を駆動できることを示しました。

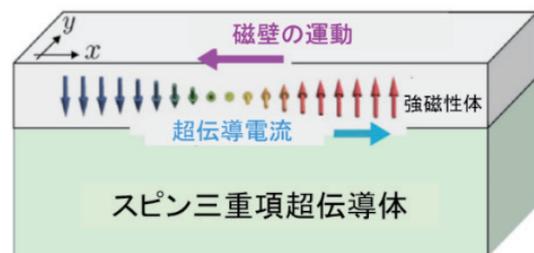


図2: 強磁性体へのスピントリク超伝導近接効果を利用した磁壁駆動の概念図。

### (1-3) 微細構造や薄膜でのトポロジカル超伝導

安井・Anwar・寺嶋 (A01)・米澤・前野らは、ライデン大学との共同研究で、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のマイクロリングの磁気抵抗の量子振動から、単結晶では初めて Little-Parks 振動を観測しました (図 3)[23]。さらに、リング面に平行な磁場の追加で、半整数フラクソイド状態を示唆する量子振動モードの分裂も観測しました [23]。

前野・柏谷 (B01) らの共同研究では、析出した Ru 金属片 1 個を取り巻く  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  微小結晶で、Ru 金属の超伝導転移 (0.5 K) 温度以下での、超伝導競合効果を明らかにしました [16]。この他、打田 (A01 公募) らは、MBE 法  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  薄膜で超伝導を実現しました [17]。

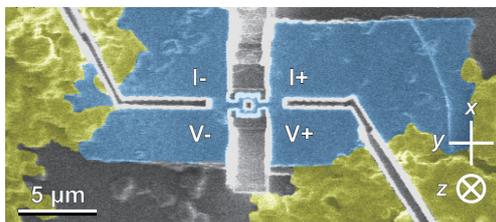


図 3:  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のマイクロリング。リトル・パークス振動に加え、半整数フラクソイド状態を示唆する量子振動分裂も観測されました [23]。

浅野らは時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導状態のエッジモードに伴うカイラル電流に対する、マイスナー遮蔽効果と表面ラフネスの効果を理論的に調べました。その結果、カイラル p 波超伝導のエッジ電流は、表面ラフネスにあまり影響されず、それが作る磁化も十分観測可能な大きな振幅を持つことを明らかにしました [10]。浅野らはまた、量子異常ホール絶縁体を利用したジョセフソン接合で、接合位相差を制御する方法を理論的に提案しました [28]。

### (1-4) ラインノードをもつトポロジカル超伝導

銅酸化物高温超伝導体などこれまでよく知られた準 2 次元ラインノード超伝導体に対しては、1 次元巻付き数が定義でき、広い意味でトポロジカル超伝導体としての分類が可能です [\*]。特定方向の接合でみられるゼロバイアスコンダクタンスピークは、トポロジカルエッジ状態によるものです。浅野らはラインノード超伝導エッジ状態が表面散乱のもとでも維持されることを理論的に示しました [4]。また、このクラスの超伝導に関連して、笠原 (A01)・松田 (A01) らは、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  の常伝導相の擬ギャップ状態において電子ネマティック状態への相転移が起きていることを明らかにしました [9]。最初に発見された重い電子系超伝導体である  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  に関して、笠原・松田らは、比熱とイオン照射効果から、こ

れまでの定説と異なり、格子欠陥に強いフルギャップの超伝導が生じていることを明らかにしました [7, 11]。

### (1-5) アンチペロブスカイト酸化物の超伝導

アンチペロブスカイト酸化物は、3 次元ディラック電子を持つトポロジカル結晶絶縁体の候補です。昨年度、オーダ・池田・前野・米澤・佐藤昌 (D01) らはキャリアドープした  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$  でアンチペロブスカイト酸化物では初めての超伝導を発見し、トポロジカル超伝導の出現可能性を指摘しました。今年度は、試料合成法の改良により超伝導転移温度と Sr 欠損量との関係を明らかにしました (論文投稿中)。また、Sr 欠損の秩序化による長周期構造とドーピングによる電子状態の変化を調べるためのバンド計算を行いました。実際の試料による高分解能 X 線回折では、長周期構造は観測できませんでした [24]。

### (1-6) ネマティック状態と超伝導

松田・笠原らは、鉄セレン超伝導体の硫黄置換効果を調べ、常伝導相から出現する電子ネマティック状態が硫黄置換と共に消失するネマティック量子臨界点近傍で超伝導ギャップ構造が大きく変化することを明らかにしました [18, 19, 33]。

### (1-7) その他のトポロジカル超伝導

寺嶋・松田・笠原らは、世界に類を見ない薄膜作製技術で重い電子系の人工超格子によるトポロジカル量子相の研究を展開しています。空間反転対称性の破れた 2 次元超伝導体では様々なトポロジカル超伝導状態が期待されています。そこで、グローバルな空間反転対称性の破れた “ABCABC...” のトリコロール積層での超伝導状態を調べたところ、上部臨界磁場が低温で上昇する特異な振舞を観測しました (図 4)。これから、理論的にも予言されていた新奇高磁場超伝導相の可能性が示唆されます [22]。

トポロジカル物質の母体から生じる超伝導がトポロジカル超伝導性を持つことは、保証されているわけではありません。俣野 (A01)・鄭 (A01)・安藤 (B01) らは、トポロジカル結晶絶縁体  $\text{SnTe}$  に In でキャリアドープした超伝導体の核磁気共鳴 (NMR) から、その超伝導はスピナー重項で、またギャップにノードがないことも明らかにしました [13]。

藤本らは、ワイル超伝導における格子歪み由来の擬似的磁場によるワイル準粒子のランダウ量子化とそれ

## TOPICS

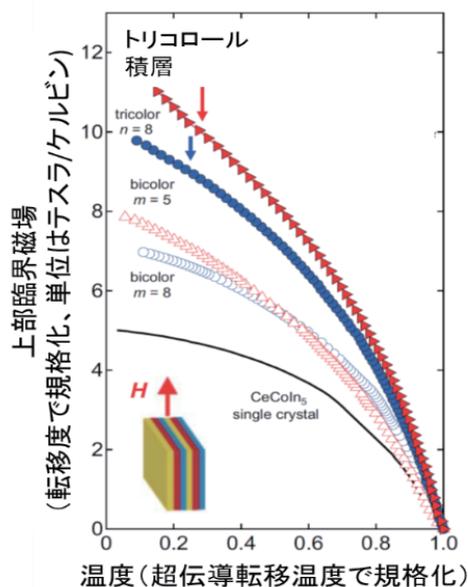


図4: 重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  を2種類の類縁常伝導体で挟んだトリコロール積層薄膜での上部臨界磁場 [22]。矢印は異常を示す。

による熱伝導率の量子振動を議論しました [29]。従来、超伝導体では反磁性電流がランダウ準位を壊します。これに対して格子歪みによる擬似的な磁場はマイスナー効果を誘起しないため、ランダウ量子化が起こり得ます。これをモデル計算で実証しました。なお、本研究は M. Franz 氏 (UBC) の学生である Tianyu Liu 氏が Topo-Q の JREP プログラムにて、阪大基礎工に滞在中に開始した共同研究の成果です。

### [2. トポロジカル半金属等]

#### (2-1) ディラック半金属

強相関電子系を制御して新たなトポロジカル状態を創り出す一般的な方法を開発できれば、トポロジカル物質科学にとって強力なアプローチとなります。Sow(A01-PD)・米澤・前野らは、エネルギーギャップの小さなモット絶縁体に定常電流を強制的に流すと、導電性が増して半金属状態になり、常伝導体では最大の巨大反磁性を示すことを発見しました [20]。これは非平衡定常状態 (Non-Equilibrium Steady State: NESS) での強相関電子系に特有の現象と考えられます。理論的には二つの軌道に基づく上部ハバードバンドと下部ハバードバンドがそれぞれホール・電子ポケットとなる「モット半金属」のモデルで説明できます。軌道反磁性をにやうのは、ディラック電子に類似の有効質量の軽い準粒子です。この方法は、今後のトポロジカル物質開発の新指針になると期待できます。

打田・永長 (B01) らは、ディラック半金属  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  の高品質の薄膜化に成功し、量子ホール効果を観測しました [26]。

#### (2-2) ワイル半金属

スピンの方向が一定ではないノンコリニアな反強磁性体である  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  は、スピнкаイラリティによって、室温でも巨大な異常ホール効果を示します。近藤 (A01 公募) らはこの物質に対し、磁気ワイル半金属の特徴で仮想磁場の源と見なせるワイル点を角度分解光電子分光 (ARPES) 等で明らかにし、また、カイラル異常に伴う負の磁気抵抗も観測しました [15]。

### [3. トポロジカル磁性体]

#### (3-1) パイロクロア格子酸化物等

打田・塚崎 (B01) らは、パイロクロア酸化物  $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  の薄膜で磁気ドメイン構造を可視化し [27]、磁気ワイル半金属の性質をもつとされるドメイン壁の外部磁場制御機構を明らかにしました [32]。また、宇田川 (A01) らはカゴメ格子上  $J_1J_2J_3$  模型の解析を通じて、トポロジカル磁性体特有の分数励起の間に働く相互作用の効果を考察し、新しい古典スピン液体状態の形成を見出すと共に、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  などのスピネル化合物で観測されるクラスター型磁気励起の起源を議論しました [12]。

#### (3-2) キタエフ・ハニカム格子でのスピン液体

マヨラナ・フェルミオンが実現しうる系として、キタエフ量子スピン液体の実現に向けた研究が盛んになっています。強いスピン軌道相互作用に起因する有効磁気モーメント  $J_{\text{eff}}=1/2$  のイオンが、ハニカム (ハチの巣) 格子上にある場合、キタエフ・ハイゼンベルグ模型に必要な異方的相互作用 (キタエフ型相互作用) が主要になると考えられています。理論の美しさと、現実物質で実現できる可能性のため、非常に魅力的なテーマです。  $(\text{Li,Na})_2\text{IrO}_3$  や  $\alpha\text{-RuCl}_3$  などが有力な候補物質ですが、いずれも低温で磁気秩序化してしまいます。

北川・高木 (A01) らは、イリジウム酸化物で低温まで磁気転移しない物質  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  を開発して、スピン液体性の研究を進展させています。また、笠原・松田らは、 $\alpha\text{-RuCl}_3$  の単結晶を用いて、磁場中での熱ホール効果の研究からの実証を進めています [34]。次号では、これらの研究成果を詳しくお伝えできる予定です。ご期待ください。

以上述べたように、本計画研究 A01 は、《研究項目 A: トポロジーと強相関》の柱として、トポロジカル超流動など相補的テーマを含む公募研究 A01 (4 件)・D02 (4 件) との連携、他の研究項目との間での共同研究も本格的に軌道に乗せて進めています。さらに、国際共同研究の展開も含め、強相関系でのトポロジカル物質科学の分野で世界を先導する研究成果の発信を目指しています。

- [\*] "Topology of Andreev bound states with flat dispersion",  
M. Sato, Y. Takana, K. Yada, T. Yokoyama,  
Physical Review B **83**, 224511 (Jun. 2011).
- H28(2016) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文
- [a] "Zero-gap semiconductor to excitonic insulator transition in  $Ta_2NiSe_5$ ",  
Y.F. Lu, H. Kono, T.I. Larkin, A.W. Rost, T. Takayama, A.V. Boris, B. Keimer, H. Takagi,  
Nature Communications **8**, 14408-1-7 (Feb. 2017).
- H29(2017) 年度の計画研究 A01 発表論文 (発表順)
- [1] "Absence of a Large Superconductivity-Induced Gap in Magnetic Fluctuations of  $Sr_2RuO_4$ ", S. Kunkemöller,  
Y. Maeno, M. Braden *et al.*,  
Physical Review Letters **118**, 147002-1-5 (Apr. 2017).
- [2] "Quasiparticle interference and strong electron-mode coupling in the quasi-one-dimensional bands of  $Sr_2RuO_4$ ",  
Z. Wang, Y. Maeno, V. Madhavan *et al.*,  
Nature Physics **13**, 799–805 (May 2017).
- [3] "Josephson effect in a multiorbital model for  $Sr_2RuO_4$ "  
K. Kawai, K.Yada, Y. Tanaka, Y. Asano, A.A. Golubov, S. Kashiwaya *et al.*,  
Physical Review B **95**, 174518-1-11 (May 2017); with publisher's note: Phys. Rev. B **95**, 219902(E) (Jun. 2017).
- [4] "Stability of flat zero-energy states at the dirty surface of a nodal superconductor",  
S. Ikegaya, Y. Asano,  
Physical Review B **95**, 214503-1-11 (Jun. 2017).
- [5] "Multicomponent order parameter superconductivity of  $Sr_2RuO_4$  revealed by topological junctions",  
M.S. Anwar, R. Ishiguro, S. Yonezawa, Y. Maeno *et al.*,  
Physical Review B **95**, 224509-1-9 (Jun. 2017).
- [6] "Flat bands and Dirac cones in breathing lattices"  
K. Essafi, L.D.C. Jaubert, M. Udagawa,  
J. Phys: Condens. Mat. **29**, 315802-1-8 (Jun. 2017).
- [7] "Fully gapped superconductivity with no sign change in the prototypical heavy-fermion  $CeCu_2Si_2$ ",  
T. Yamashita, Y. Kasahara, S. Kittaka, T. Sakakibara, C. Geibel, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda *et al.*,  
Science Advances **3**, e1601667-1-8 (Jun. 2017).
- [8] "Even odder after twenty-three years: the superconducting order parameter puzzle of  $Sr_2RuO_4$ ",  
A.P. Mackenzie, T. Scaffidi, C.W. Hicks, Y. Maeno,  
npj Quantum Materials **2**, 40-1-9 (Jul. 2017).
- [9] "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of the pseudogap in  $YBa_2Cu_3O_y$ "  
Y. Sato, S. Kasahara, Y. Kasahara, B. Keimer, T. Shibauchi, Y. Matsuda *et al.*,  
Nature Physics **13**, 1074–1078 (Jul. 2017).
- [10] "Weakening of the diamagnetic shielding in  $FeSe_{1-x}S_x$  at high pressures",  
K.Y. Yip, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, S. K. Goh *et al.*,  
Physical Review B **96**, 020502(R)-1-5 (Jul. 2017).
- [11] "Full-Gap Superconductivity Robust against Disorder in Heavy-Fermion  $CeCu_2Si_2$ ",  
T. Takenaka, Y. Mizukami, C. Geibel, Y. Kasahara, C. Putzke, Y. Matsuda, A. Carrington, T. Shibauchi *et al.*,  
Physical Review Letters **119**, 077001-1-5 (Aug. 2017).
- [12] "Clustering of Topological Charges in a Kagome Classical Spin Liquid",  
T. Mizoguchi, L.D.C. Jaubert, M. Udagawa,  
Physical Review Letters **119**, 077207-1-6 (Aug. 2017).
- [13] "Spin-singlet superconductivity in the doped topological crystalline insulator  $Sn_{0.96}In_{0.04}Te$ ",  
S. Maeda, K. Matano, Y. Ando, G-Q. Zheng *et al.*,  
Physical Review B **96**, 104502-1-5 (Sep. 2017).
- [14] "Adiabatic and nonadiabatic spin torques induced by a spin-triplet supercurrent",  
R. Takashima, S. Fujimoto, T. Yokoyama,  
Physical Review B **96**, 121203(R)-1-5 (Sep. 2017).
- [15] "Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal",  
K. Kuroda, S. Shin, T. Kondo, S. Nakatsuji *et al.*,  
Nature Materials **16**, 1090–1095 (Sep. 2017).
- [16] "Investigation of the Vortex States of  $Sr_2RuO_4$ -Ru Eutectic Microplates Using DC-SQUIDS",  
D. Sakuma, Y. Nago, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, H. Takayanagi,  
J. Phys. Soc. Japan **86**, 114708-1-6 (Oct. 2017).

## TOPICS

- [17] "Molecular beam epitaxy growth of superconducting  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  films",  
M. Uchida, Y. Tokura, M. Kawasaki *et al.*,  
APL Materials **5**, 106108-1-6 (Oct. 2017).
- [18] "Abrupt change of the superconducting gap structure at the nematic critical point in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ "  
Y. Sato, S. Kasahara, Y. Kasahara, H. Kontani, T. Shibauchi, Y. Matsuda *et al.*,  
Proc. Nat. Acad. Sci.(USA) **2018**, 1717331115-1-5 (Oct. 2017).
- [19] "Maximizing  $T_c$  by tuning nematicity and magnetism in  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  superconductors"  
K. Matsuura, Z. Hiroi, S. Kasahara, S. K. Goh, Y. Matsuda, Y. Uwatoko, T. Shibauchi *et al.*,  
Nature Communications **8**, 1143-1-6 (Oct. 2017).
- [20] "Current-induced strong diamagnetism in the Mott insulator  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ ",  
C. Sow, S. Yonezawa, S. Kitamura, T. Oka, K. Kuroki, F. Nakamura, Y. Maeno,  
Science **358**, 1084-1087 (Nov. 2017).
- [21] "Anisotropy and multiband superconductivity in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  determined by small-angle neutron scattering studies of the vortex lattice",  
S.J. Kuhn, Y. Maeno, M. R. Eskildsen *et al.*,  
Physical Review B **96**, 174507-1-13 (Nov. 2017).
- [22] "Emergent exotic superconductivity in artificially engineered tricolor Kondo superlattices"  
M. Naritsuka, M. Shimozawa, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Kasahara *et al.*,  
Physical Review B **96**, 174512-1-10 (Nov. 2017).
- [23] "Little-Parks oscillations with half-quantum fluxoid features in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  microrings",  
Y. Yasui, K. Lahabi, M.S. Anwar, S. Yonezawa, T. Terashima, J. Aarts, Y. Maeno *et al.*,  
Physical Review B **96**, 180507(R)-1-6 (Nov. 2017),
- [24] "Theoretical band structure of the superconducting antiperovskite oxide  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ ",  
A. Ikeda, T. Fukumoto, M. Oudah, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, S. Kobayashi, M. Sato, H. Takatsu, H. Kageyama, Y. Maeno *et al.*,  
Physica B: Condensed Matter **XX**, 1-5 (Nov. 2017).
- [25] "Observation of Bogoliubov Band Hybridization in the Optimally Doped Trilayer  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ",  
S. Kunisada, T. Sasagawa, S. Shin, T. Kondo *et al.*,  
Physical Review Letters **119**, 217001-1-5 (Nov. 2017).
- [26] "Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ ",  
M. Uchida, Y. Taguchi, N. Nagaosa, Y. Tokura, M. Kawasaki *et al.*,  
Nature Communications **8**, 2274-1-7 (Dec. 2017).
- [27] "Visualizing ferroic domains in an all-in-all-out antiferromagnet thin film",  
Y. Kozuka, M. Uchida, T. Nojima, A. Tsukazaki, J. Matsuno, T. Arima, M. Kawasaki *et al.*,  
Physical Review B **96**, 224417-1-5 (Dec. 2017).
- [28] "Tunable- $\phi$  Josephson junction with a quantum anomalous Hall insulator",  
K. Sakurai, S. Ikegaya, Y. Asano,  
Physical Review B **96**, 224514-1-9 (Dec. 2017).
- [29] "Quantum oscillations and Dirac-Landau levels in Weyl superconductors"  
T. Liu, M. Franz, S. Fujimoto,  
Physical Review B **96**, 224518-1-14 (Dec. 2017).
- [30] "Visualizing the evolution of surface localization in the topological state of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  by circular dichroism in laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy"  
T. Kondo, Y. Taguchi, Y. Tokura, S. Shin *et al.*,  
Physical Review B **96**, 241413(R)-1-5 (Dec. 2017).
- [31] "Crossover from impurity-controlled to granular superconductivity in  $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ ",  
S. Yonezawa, K. Bechgaard, D. Jérôme *et al.*,  
Physical Review B **97**, 014521-1-12 (Jan. 2018).
- [32] "All-in-all-out magnetic domain inversion in  $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  with molecular fields antiparallel to external fields"  
T.C. Fujita, M. Uchida, A. Tsukazaki, M. Kawasaki *et al.*,  
Physical Rev. Materials **2**, 011402(R)-1-5 (Jan. 2018).
- [33] "Superconducting gap anisotropy sensitive to nematic domains in  $\text{FeSe}$ "  
T. Hashimoto, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, S. Shin *et al.*,  
Nature Communications **9**, 282-1-7 (Jan. 2018).
- [34] "Unusual thermal Hall effect in a Kitaev spin liquid candidate  $\alpha\text{-RuCl}_3$ ",  
Y. Kasahara, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Matsuda *et al.*,  
arXiv:1709.10286 (Sep. 2017).

## 対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求

佐藤 宇史 / 東北大学大学院理学研究科 教授

計画研究 B01「対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求」では、対称性とスピン軌道相互作用を起源とする新しい種類のトポロジカル物質を探索するとともに、トポロジカル物質が発現する新奇量子現象やエキゾチック準粒子の性質を解明することを目的としています。なかでも、ディラック電子・ワイル電子などのエキゾチック準粒子がもたらす新奇物性に重点を置いた研究を推進しています。今年度は、本研究の核となる、複数の新しいトポロジカル半金属物質の発見、トポロジカル絶縁体の表面・界面ディラック電子制御、トポロジカル超伝導の実験・理論において進展がありました。これらの成果は、試料合成、先端分光、第一原理計算などの緊密なネットワークを生かした B01 ならではの連携研究に基づくものです。以下では、今年度の主な成果を紹介いたします。

### 1. 新奇トポロジカル物質

ディラック半金属とワイル半金属に続いて、新しい種類のトポロジカル半金属として最近注目されているのが線ノード半金属です [1]。ディラック半金属およびワイル半金属では伝導帯と価電子帯が「点」で縮退するのに対して、線ノード半金属では「線」上に縮退が起こります。このような物質の候補物質が理論的に幾つか提案されていますが、実験で実証された例はわずかです。最近、名大の山影らによって、鏡映対称性を有する CaAgX (X=P, As) が線ノード半金属あるいはトポロジカル絶縁体になることが理論的に予測されました。この予測を受けて、佐藤 (B01 代表者)、相馬 (B01 連携研究者) らは、CaAgAs においてバルク敏感な軟 X 線を用いた角度分解光電子分光 (ARPES) を行った結果、この物質がフェルミ準位 ( $E_F$ ) 近傍においてディラックコーンのバルクバンド分散を示す「線ノード型ディラック電子」(図 1) で特徴付けられる、狭ギャッ

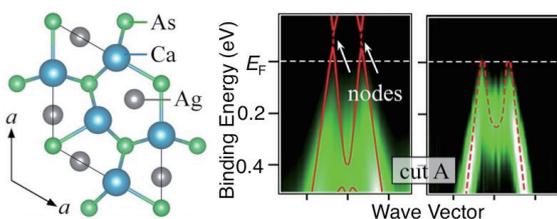


図 1: CaAgAs の結晶構造とディラック型バンド [18]

プのトポロジカル絶縁体であることを見出しました [18]。さらに、線ノードに関連したトーラス型のフェルミ面の観測にも成功し、鏡映対称性と線ノードが密接に関連していることを明らかにしました。今後はトポロジカル表面状態の探索を行う予定です。

新しいトポロジカル物質を探索する手がかりとして、グライド鏡映対称性やらせん対称性などの非共形 (Nonsymmorphic) 対称性が注目されています。トポロジカルには普通の半導体である三方晶テルル (Te) は、結晶に右巻きあるいは左巻きのらせん鎖を有し (図 2)、圧力印加によってトポロジカル絶縁体やワイル半金属に転移することが予測されています。佐藤、相馬、および山内 (D03 公募研究者) らは、Te 単結晶の ARPES 実験 [2] を行った結果、ブリルアーンゾーンの H 点周辺において、らせん対称性によって保護されたワイルノードを観測しました (図 2)。さらに、らせん構造に起因した空間反転対称性の破れによって、バンドが最大で 0.25 eV のスピン分裂をしていることも明らかになりました [2]。これらの結果は、非共形対称性が、新しいトポロジカル物質の探索や特異物性発現に向けて有用な指針となることを示しています。

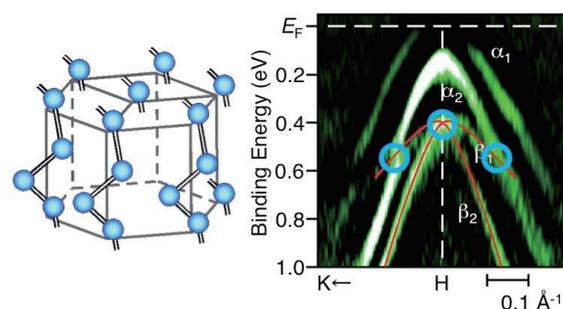


図 2: 三方晶 Te の結晶構造と H 点近傍のバンド分散。らせん対称性によるワイルノードが観測されます [2]。

### 2. “トポロジカルバルク物質”の電子構造

Pb-Bi-Se 三元系は、Bi と Te などを含む他の三元系とは異なり、通常の絶縁体 PbSe とトポロジカル絶縁体である  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  がその構造と類似の構造を保ったまま積層する構造を持ちます。実際に、トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体で構成される超格子と考えると矛盾し

## TOPICS

ないトポロジカル界面状態の二次元的バンド構造がARPESで観測されており、この物質はトポロジカルな界面状態がバルク物性として観測できる“トポロジカルバルク物質”であることが期待されています。瀬川 (B01 分担者)、安藤 (B01 連携研究者) らは  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の単位構造である Quintuple Layer が2つ重なった物質である  $(\text{PbSe})_5(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_6$  について、第一原理計算によってトポロジカルな起源をもつ界面状態が現れることを初めて確かめました [19] (図3)。また、実験で知られていた Pb-Bi 相互置換が計算でも確かめられ、その効果を入れて初めて表面状態を再現しました。

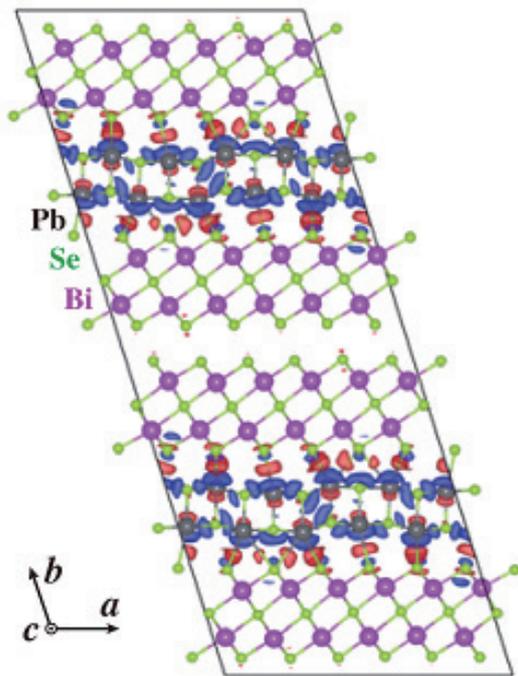


図3:  $(\text{PbSe})_5(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_6$  の単位胞の結晶構造と、計算された電子分布 [19]。青い部分では電子密度が減少し、赤い部分では増加している。

### 3. トポロジカル超伝導接合

柏谷 (B01 分担)、野村 (B01 公募研究者)、および前野 (A01 代表者) らは、トポロジカル超伝導体の最有力候補である  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の、Ru インクルージョンを含む 3K 相に関して、微小結晶を DC-SQUID に組み込むデバイスの作製に成功し、s 波超伝導である Ru 金属が超伝導転移することによる自発磁化を検出するための測定を行い、自発磁化や、Kaneyasu-Sigrist モデルによるチューブ状のボルテックスは観測されないという結果を得ました (図4)。これは時間反転対称性を破るカイラル p 波から期待される結果とはコンシステントではないため、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  が時間反転対称性を破らない状態である可能性も示唆されます [14]。

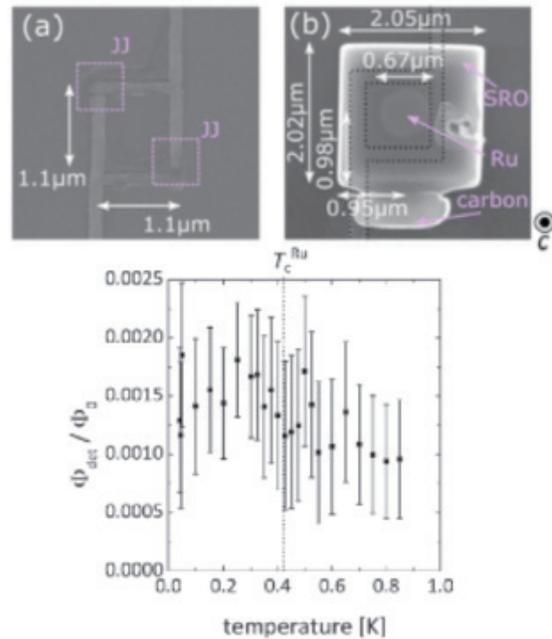


図4: (上図)SRO/Ru 界面における自発磁化を観測するためのデバイスの走査顕微鏡像 [14]。(下図)界面での位相フラストレーションが無いことが示唆されます。

### 4. トポロジカル絶縁体薄膜素子

塚崎 (B01 分担者) と佐藤らは、分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて、 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Se}_3$  混晶を形成し、組成による  $E_F$  制御を実現しました [20]。その薄膜をチャネルに用いた電界効果型トランジスタを作製することで、より精密に  $E_F$  の位置を外部電場で制御できるようになります。この基盤技術は、表面状態の伝導を観測するために不可欠です。今回、断面構造の素子 (図5左) を作製したところ、明瞭な ambipolar 動作を観測しました (図5右)。縦抵抗がピークを持ち、その時のゲート電圧においてホール抵抗はほぼゼロとなっています。磁場を印加することでホール抵抗は、負のゲート電圧下で正に増大し、正の電圧下で負に増大しました。このことは、表面状態の電荷中性点をゲート電圧で制御できたことを意味しています。これ

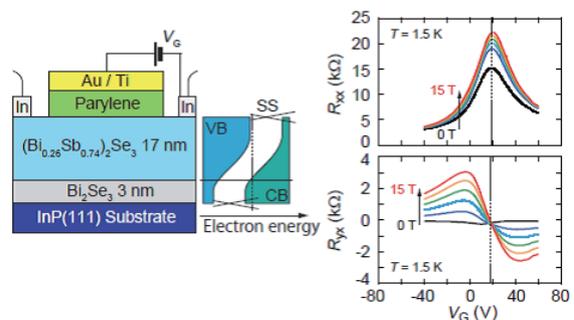


図5:  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Se}_3$  をチャネルとする電界効果トランジスタの断面構造図 (左) と縦抵抗 (右上) とホール抵抗 (右下) のゲート電圧依存性 [20]。

までの  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ベースの薄膜研究では、バルク中の欠陥に由来する電子伝導が支配的でしたが、チャンネルを  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Se}_3$  混晶にすることで初めて、外部電界による表面状態の  $E_F$  制御が可能になりました [20]。

塚崎らは、磁性不純物添加について、鉄をドーパントに選択して研究を行ってきました。図 6(a) に示すように、磁気抵抗の形状は Sb 組成（すなわち  $E_F$  の位置）に依存します。特に、 $E_F$  がバルクギャップ内と予想される試料 ( $x = 0.70$ ) では、負の大きな磁気抵抗が観測され、現在その起源について検討しています。一方、(b) に示すホール抵抗では、異常ホール効果が観測されず、磁化測定においても強磁性の発現を示唆する結果は得られませんでした。先行研究では、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  への Fe 添加による表面状態のギャップ観測の報告がなされていますが、少なくとも今回の電気伝導評価において磁気的性質の関わる特性は得られていません。今後、 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$  系での量子異常ホール効果研究に多く用いられる Cr など他の磁性不純物添加について検討します。

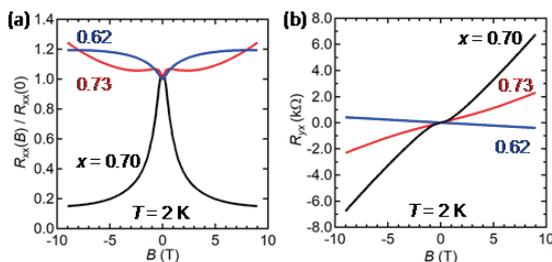


図 6: (a),(b)  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Se}_3$  に Fe を 2% 添加した薄膜から得られる磁気抵抗比とホール抵抗 ( $T = 2\text{ K}$ )。

これまでの基盤技術開発では、(1)  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Se}_3$  混晶化による  $E_F$  制御、(2) 電界効果による  $E_F$  制御、(3) In 添加によるトポロジカル相転移を観測してきました。今後、磁性の付加を実現することで、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ベース薄膜を用いた量子異常ホール効果とトポロジカル相転移の研究を行います。

## 5. スピン 3 重項超伝導の理論

### 5-1. $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のジョセフソン効果の理論

田仲 (B01 分担者)、柏谷、および浅野 (A01 分担者) らは、スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のジョセフソン効果の計算を行いました [4]。  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  は 3 軌道モデルで表して、スピン軌道相互作用をバルクおよび界面に仮定し、ジョセフソン電流の計算は Recursive Green 関数を用いて行いました。超伝導体の対称性としては、時間反転対称性を破

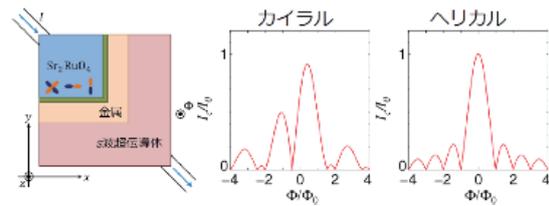


図 7:  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と  $s$  波超伝導体を含むコーナー接合 [4]。

るカイラル  $p$  波とヘリカル  $p$  波 (4 種類の既約表現) を選びました。カイラル  $p$  波超伝導では電流・位相差依存性に  $\cos(\Phi)$  依存性が現れます。図 7 に示すようなコーナー接合を作るとカイラル  $p$  波では外部磁束  $\Phi$  の関数として最大ジョセフソン電流は正と負で非対称な値をとります [6]。これに対して、ヘリカル  $p$  波のペアでは既約表現によって零磁場で極小 (極大) になる場合がありますが、基本的に  $\Phi$  の関数として正と負で対称になります [4]。同様の計算をコーナー SQUID に対して行った場合も、コーナー接合同様に、カイラル  $p$  波の場合は磁場に対する依存性は非対称になるのに対して、ヘリカル  $p$  波では対称になります。この計算結果は、スピン三重項超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の  $d$  ベクトルの方向性を含む対称性を決定するうえで重要です。

### 5-2. 超伝導体接合における電流揺らぎの理論

田村 (B01 PD) と田仲らは、異方的超伝導体に弱い不純物散乱がある場合に、常伝導金属と接合した際のコンダクタンス、過剰電流、電流揺らぎ (ショットノイズ) の計算を 2 次元異方的超伝導体に対して準古典 Green 関数により系統的に行いました [6]。過剰電流とは、十分電圧が大きい時の超伝導状態と常伝導状態の電流の差のことです。表面アンドレーエフ束縛状態が現れる  $d_{xy}$  波や  $p_x$  波の接合では、過剰電流が現れ、かつ零電圧でのノイズ / 電流の比は零になることが知られていました。また零エネルギー表面アンドレーエフ束縛状態が存在する時には必ず奇周波数ペアの存在を伴うことは広く知られています。スピン三重項  $p$  波の場合は  $s$  波の奇周波数ペアが並進対称性の破れで生じますが、スピン一重項  $d$  波の場合は  $p$  波の奇周波数ペアが生じることになり、不純物散乱に対する影響が異なることが期待されます (Y. Tanaka et al., JPSJ **81** (2012) 011013)。実際に計算結果によれば、 $p_x$  波の場合は零電圧ノイズ / 電流の比は全く影響を受けないのに対して、 $d_{xy}$  波の場合は、零からずれて有限の値になります。また過剰電流も  $p_x$  波の場合は全く不純物散乱の影響を受けないことが示されました。

## TOPICS

- [1] "トポロジカル絶縁体・半金属の創成", 佐藤宇史, パリティ「物理科学この一年」2018年1月号.
- [2] "Band splitting and Weyl nodes in trigonal tellurium studied by angle-resolved photoemission spectroscopy and density functional theory" K. Nakayama, M. Kuno, K. Yamauchi, S. Souma, K. Sugawara, T. Oguchi, T. Sato, T. Takahashi, Physical Review B **95**, 125204-1-5 (Mar. 2017).
- [3] "Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors", R. Wakatsuki, Y. Saito, S. Hoshino, Y. M. Itahashi, T. Ideue, M. Ezawa, Y. Iwasa, N. Nagaosa, Science Advances **3**, e1602390-1-9 (Apr. 2017).
- [4] "Josephson effect in a multiorbital model for  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ " K. Kawai, K. Yada, Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov, S. Kashiwaya, Physical Review B **95**, 174518-1-11 (May. 2017).
- [5] "Topological superconductors: a review", M. Sato, Y. Ando, Reports on Progress in Physics **80**, 076501-1-43 (May. 2017).
- [6] "Current fluctuations in unconventional superconductor junctions with impurity scattering" P. Burset, B. Lu, S. Tamura, Y. Tanaka, Physical Review B **95**, 224502-1-9 (Jun. 2017).
- [7] "Crossing-line-node semimetals: General theory and application to rare-earth trihydrides" S. Kobayashi, Y. Yamakawa, A. Yamakage, T. Inohara, Y. Okamoto, Y. Tanaka, Physical Review B **95**, 245208-1-15 (Jun. 2017).
- [8] "Magnetic thermal conductivity far above the Néel temperature in the Kitaev-magnet candidate  $\alpha - \text{RuCl}_3$ " D. Hirobe, M. Sato, Y. Shiomi, H. Tanaka, E. Saitoh, Physical Review B **95**, 241112(R)-1-6 (Jun. 2017).
- [9] "Three-dimensional band structure of LaSb and CeSb: Absence of band inversion" H. Oinuma, S. Souma, D. Takane, T. Nakamura, K. Nakayama, T. Mitsuhashi, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Yoshida, A. Ochiai, T. Takahashi, T. Sato, Physical Review B **96**, 041120-1-5 (Jul. 2017).
- [10] "Oscillatory Nernst effect in Pt[ferrite]cuprate-superconductor trilayer films" Y. Shiomi, J. Lustikova, E. Saitoh, Scientific Reports **7**, 5358 -1-8 (Jul. 2017).
- [11] "Current-Nonlinear Hall Effect and Spin-Orbit Torque Magnetization Switching in a Magnetic Topological Insulator" K. Yasuda, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, K. Kondou, K. S. Takahashi, Y. Otani, M. Kawasaki, Y. Tokura, Physical Review Letters **119**, 137204-1-5 (Sep. 2017).
- [12] "Tailoring tricolor structure of magnetic topological insulator for robust axion insulator" M. Mogi, M. Kawamura, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura, Science Advances **3**, eaao1669-1-6 (Oct. 2017).
- [13] "Experimental evidence consistent with a magnon Nernst effect in the antiferromagnetic insulator  $\text{MnPS}_3$ " Y. Shiomi, R. Takashima, E. Saitoh, Physical Review B **96**, 134425-1-9 (Oct. 2017).
- [14] "Investigation of the Vortex States of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru Eutectic Microplates Using DC-SQUIDS" D. Sakuma, Y. Nago, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, H. Takayanagi, Journal of the Physical Society of Japan **86**, 114708-1-6 (Oct. 2017).
- [15] "Spin Seebeck effect in the polar antiferromagnet  $\alpha - \text{Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ " Y. Shiomi, R. Takashima, D. Okuyama, G. Gitgeatpong, P. Piyawongwatthana, K. Matan, T. J. Sato, E. Saitoh, Physical Review B **96**, 180414(R)-1-5 (Nov. 2017).
- [16] "Two-dimensional Dirac semimetal phase in undoped one-monolayer FeSe film" S. Kanayama, K. Nakayama, G. N. Phan, M. Kuno, K. Sugawara, T. Takahashi, T. Sato, Physical Review B **96**, 220509(R)-1-5 (Dec. 2017).
- [17] "Quantized chiral edge conduction on domain walls of a magnetic topological insulator" K. Yasuda, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, F. Kagawa, Y. Tokura, Science **358**, 1311-1-5 (Dec. 2017).
- [18] "Observation of Dirac-like energy band and ring-torus Fermi surface associated with the nodal line in topological insulator  $\text{CaAgAs}$ " D. Takane, K. Nakayama, S. Souma, T. Wada, Y. Okamoto, K. Takenaka, Y. Yamakawa, A. Yamakage, T. Mitsuhashi, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, T. Sato, npj Quantum Materials **3**, 1-1-6 (Jan. 2018).
- [19] "Topological interface states in the natural heterostructure  $(\text{PbSe})_5(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_6$  with  $\text{Bi}_{\text{pb}}$  defects", H. Momida, G. Bihlmayer, S. Blügel, K. Segawa, Y. Ando, and T. Oguchi, Phys. Rev. B **97**, 035113 (Jan. 2018).
- [20] "Fermi-level tuning of the Dirac surface state in  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Se}_3$  thin films" Y. Satake, J. Shiogai, D. Takane, K. Yamada, K. Fujiwara, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, A. Tsukazaki, Journal of Physics: Condensed Matter **30**, 085501-1-6 (Feb. 2018).
- [21] "Selective fabrication of free-standing ABA and ABC trilayer graphene with/without Dirac-cone energy band" K. Sugawara, N. Yamamura, K. Matsuda, W. Norimatsu, M. Kusunoki, T. Sato, and T. Takahashi NPG Asia Materials **10**, e466 (Feb. 2018).

## トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

藤澤利正 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

本計画研究では、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」の輸送現象に注目しています。個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにすることや、準粒子を用いた新しいトポロジカル物質ナノ構造デバイスの基礎原理を提案し原理実証を行うことを目的としています。下記で、最近のトピックスを紹介します。

### 1. 朝永ラッティンジャー流体のスピンの電荷分離

橋坂 (CO1 連携研究者)、秋保 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者)、藤澤 (CO1 代表者) らは、GaAs 系量子ホール系において、並走するエッジチャンネルでのカイラル朝永ラッティンジャー流体のスピンの波束と電荷波束が独立に伝搬するスピン電荷分離現象の時間分解波形測定に成功しました [1]。整数量子ホール効果では、平衡状態に近い領域では一電子描像 (1 本あたりの伝導度が  $e^2/h$  の独立した伝導チャンネル) による説明が用いられますが、低エネルギーの非平衡状態は朝永ラッティンジャー流体としてよく理解できます。図 1 のように、ランダウ占有率 2 における並走するエッジチャンネルに、電荷モードの波束 (i) を生成し、局所的なランダウ占有率 1 の領域をスピンフィル

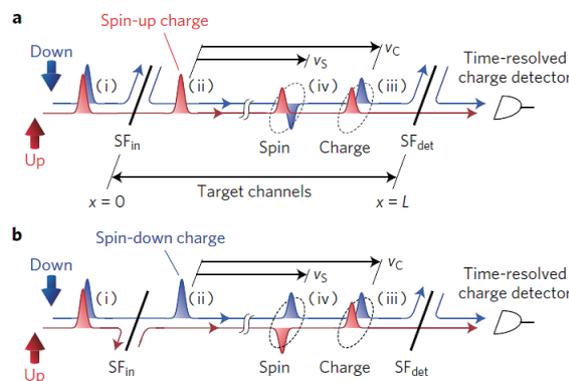


図 1. 並走する量子ホールエッジチャンネルにおいて、朝永ラッティンジャー流体のスピン電荷分離を時間分解電荷計によって観測した [1]。図 a は上向きスピンの、図 b は下向きスピンの電荷波束を入射した実験の模式図を示す。

ターとして用いることにより、特定のスピンの電荷波束 (ii) を準備しました。十分に長い対象エッジチャンネルにおいては、速度の遅いスピンモード波束と速い電荷モード波束に分離する様子を、スピンフィルターと時間分解電荷計によって観測しました。特徴的な朝永ラッティンジャー流体のダイナミクスを捉えた実験として注目されています。

### 2. InAs/(In,Ga)Sb 歪み量子井戸による 2 次元トポロジカル絶縁体バンド構造の電氣的制御

入江 (CO1 連携研究者)、秋保 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、2 次元トポロジカル絶縁体である InAs/(In,Ga)Sb 系 type-II 量子井戸において、格子定数の差を利用した面内の圧縮歪みによりバルクのエネルギーギャップを最大 35meV まで増大させることに成功しました。さらに前面・背面ゲートを用いて面直方向に電場を加えることで、バンド反転量を変化させ、エネルギーギャップを広範囲で制御できることを実証しました。さらに InAs 層厚がバンド反転・非反転の境界に近い試料においては、電場によってトポロジカル絶縁体が通常絶縁体へと変化するトポロジカル相転移の観測にも成功しました (図 2)。またバンド反転領域では、電子のバンドと正孔のバンドの混成を表す擬スピンの運動量空間で示すトポロジカルな構造を反映し、磁気抵抗振動に特徴的なベリー位相の変化が観測されています。

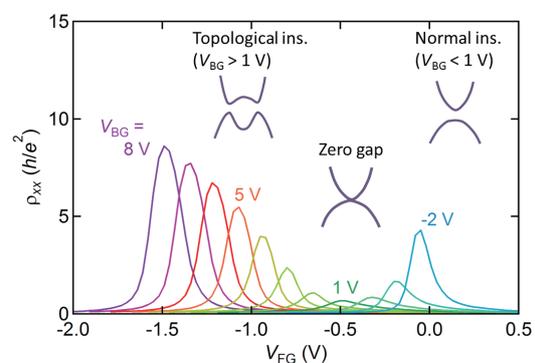


図 2. InAs/InGaSb 量子井戸において、面直電場の強さを変えることで、トポロジカル絶縁体から通常絶縁体への相転移を起こすことができる。

## TOPICS

### 3. 原子層物質 GaSe におけるスピン軌道相互作用のゲート制御

好田 (C01 分担者)、新田 (C01 連携研究者) らは、原子層物質の一つである GaSe 薄膜のスピン軌道相互作用をゲート電場により電氣的制御できることを示しました [2]。遷移金属モノカルコゲナイドである GaSe は、MoS<sub>2</sub> などとは異なり、バンド端が  $\Gamma$  点に位置する直接遷移半導体です。結晶面内方向に存在する内部電場に起因して膜面直方向に有効磁場を有し、長いスピン緩和時間が期待できると共に単層にすることで強磁性やトポジカル絶縁体への相転移が理論的に予言されています。この GaSe を剥離法により 10nm 前後まで薄くし、バックゲートを有したトランジスタ構造を用いて、低温における磁気輸送測定を行いました。ゲート電圧に依存し、ゼロ磁場付近で観測される弱反局在現象が変調されていることが分かり (図 3)、ゲート電場により Rashba スピン軌道相互作用が変調出来ることを示しました。伝導度の量子補正を取り入れて

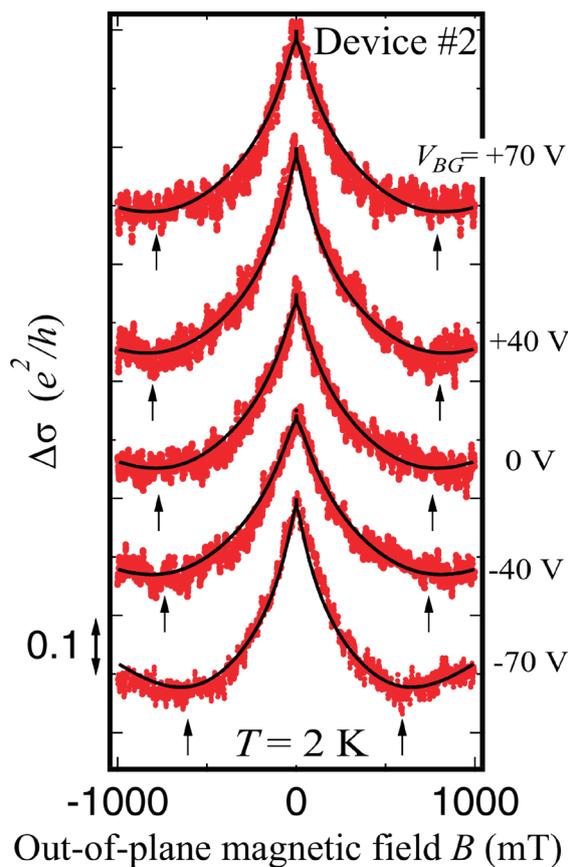


図 3. 異なるバックゲート電圧  $V_{BG}$  で測定した伝導度の面直磁場依存性。ゲート電圧に依存し伝導度の最小値 (矢印位置) が変化することから、スピン軌道相互作用のゲート制御が実現されている。

解析することによりスピン軌道相互作用の大きさを求めると、InGaAs/InAlAs 2 次元電子ガスと同程度であることが分かり、原子層物質を用いたスピントランジスタや長距離スピン輸送に向けた基盤技術を構築することが可能となります。

### 4. 反強磁性ワイル金属の軌道磁化と異常ホール効果

野村 (C01 分担者) らは、カイラル反強磁性体  $Mn_3Sn$  の電子構造を記述するタイトバインディング模型を構築し、観測されていた異常ホール効果のメカニズムを解明しました。通常、異常ホール効果は強磁性体のスピン磁化によって発生しますがカイラル反強磁性体の場合は軌道磁化が自発的に発生しており、これによって有限の異常ホール効果もたらされることを示しました。特に異常ホール伝導率が大きくなるエネルギーレベルではワイル点からの寄与が支配的であることが明らかになりました。[3]。トポジカル絶縁体/強磁性体接合界面において、磁気モーメントがスカーミオンを形成する場合の異常ホール伝導率 (トポジカルホール効果) への寄与を調べました [4]。また、磁性ワイル半金属では、磁気モーメントのテクスチャーが時間変動する際には、電荷のポンピングが実現することを明らかにした [5]。

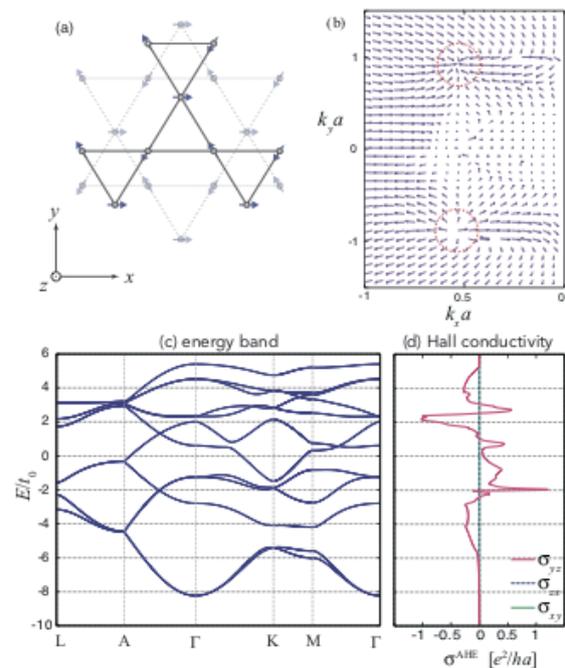


図 4. (a) カイラル反強磁性体の局在スピンの配置。(b) ワイル点近傍のベリー曲率。(c) タイトバインディング模型のエネルギーバンド。(d) 異常ホール伝導率。

### 5. ライン・ノード半金属の物理

江澤 (C01 分担者) は、先ず、線状のフェルミ面を持つライン・ノード半金属について研究を行いました。特に、ホップ・リンク、ソロモン・ノットや三葉結び目の様なホップ指数で特徴づけられるフェルミ面を持つトポロジカル・ホップ半金属 (図 5) を一般的に構成しました [6]。また、交差する線状フェルミ面を持つクロッシング・ライン・ノード半金属に光照射をすると 1 以上のモノポール電荷を持つ多重ワイル半金属が生成されることを示しました [7]。更に、分散が二乗や三乗の二重ディラック半金属や三重ディラックに磁場をかけることで、モノポールの合成を実現できることを示しました [8]。

次に、二量体化するキタエフ・トポロジカル超伝導体に近接相互作用が入った強相関系の厳密解をジョルダン・ウィグナー変換を用いて得て、トポロジカル相関図を決定しました [9]。この他、フラストレート磁性体中でスカーミオンと反スカーミオンが安定化することを示し、電流でヘリシティを制御できることを示し、二値メモリーとして使えることを示しました [10]。

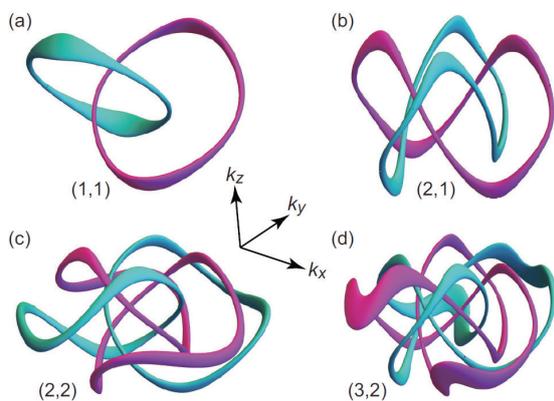


図 5. トポロジカル・ホップ半金属のフェルミ面。

### 6. 近藤効果の内部構造と量子ゆらぎの解明

小林 (C01 連携研究者) らは、カーボンナノチューブを用いて作製された人工原子において、スピンと軌道の両方の自由度を利用して、対称性の異なる 2 種類の近藤状態を作り分けることに成功しました。さらに、電流雑音測定によって、近藤状態の種類に応じて量子ゆらぎの大きさが異なることを実証しました [11]。

### 7. トポロジカル絶縁体 / 通常絶縁体超格子系

富永 (C01 連携研究者) らは、 $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  および  $\text{GeTe}$

薄膜からなる超格子薄膜をクロスポイントの W 電極に挟み込み、 $200^\circ\text{C}$  の高温状態で磁場と電場を面直に印加しながら室温まで冷却することで、室温でのスピン蓄積とそれに伴う大きな磁気抵抗効果を発生させることに成功しました。

この他、トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象に関する実験・理論研究を進めました [12-23]。

- [1] "Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga-Luttinger liquid", M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, T. Fujisawa, *Nature Physics* **13**, 4062-1-5 (Mar. 2017).
- [2] "Weak antilocalization induced by Rashba spinorbit interaction in layered III-VI compound semiconductor GaSe thin films", S. Takasuna, J. Shiogai, S. Matsuzaka, M. Kohda, Y. Oyama and J. Nitta, *Phys. Rev. B* **96**, 161303(R) (2017).
- [3] "Anomalous Hall Effect and Spontaneous Orbital Magnetization in Antiferromagnetic Weyl Metal", N. Ito and K. Nomura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 063703 (2017).
- [4] "Skyrmion-induced anomalous Hall conductivity on topological insulator surfaces", Y. Araki and K. Nomura, *Phys. Rev. B* **96**, 165303 (2017).
- [5] "Charge pumping induced by magnetic texture dynamics in Weyl semimetals", Y. Araki and K. Nomura, arXiv:1711.03135 (2017).
- [6] "Topological semimetals carrying arbitrary Hopf numbers: Fermi surface topologies of a Hopf link, Solomon's knot, trefoil knot, and other linked nodal variety", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **96**, 041202(R) (2017).
- [7] "Photoinduced topological phase transition from a crossing-line nodal semimetal to a multiple-Weyl semimetal", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **96**, 041205(R) (2017).
- [8] "Merging of momentum-space monopoles by controlling Zeeman field: From cubic-Dirac to triple-Weyl fermion systems", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **96**, 161202(R) (2017).
- [9] "Exact solutions and topological phase diagram

- in interacting dimerized Kitaev topological superconductors", M. Ezawa, Phys. Rev. B **96**, 121105(R) (2017).
- [10] "Skyrmion dynamics in a frustrated ferromagnetic film and current-induced helicity locking-unlocking transition", X. Zhang, J. Xia, Y. Zhou, X. Liu, H. Zhang, M. Ezawa, Nat. Com. **8**, 1717-1-10 (Nov. 2017).
- [11] "Quantum Fluctuations along Symmetry Crossover in a Kondo-Correlated Quantum Dot", M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrangé, R. Deblock, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri and K. Kobayashi, Phys. Rev. Lett. **118**, 196803 (2017).
- [12] "Different spin relaxation mechanisms between epitaxial and polycrystalline Ta thin films", Hiromu Gamou, Jeongchun Ryu, Makoto Kohda, Junsaku Nitta, Applied Physics Express **10**, 023003-1-5 (Jan. 2017).
- [13] "Bulk rectification effect in a polar semiconductor", T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa, Y. Iwasa, Nature Physics **13**, 578-583 (Mar. 2017).
- [14] "Microscopic derivation of magnon spin current in a topological insulator/ferromagnet heterostructure", Nobuyuki Okuma, Kentaro Nomura, Physical Review B **95**, 115403-1-8 (Mar. 2017).
- [15] "Anisotropic magnetotransport in Dirac-Weyl magnetic junctions", Yuya Ominato, Koji Kobayashi, Kentaro Nomura, Physical Review B **95**, 085308-1-6 (Feb. 2017).
- [16] "Charge fractionalization in artificial Tomonaga-Luttinger liquids with controlled interaction strength", Paul Bresseur, Ngoc Han Tu, Yoshiaki Sekine, Koji Muraki, Masayuki Hashisaka, Toshimasa Fujisawa, Norio Kumada, Physical Review B **96**, 081101-1-4 (Aug. 2017).
- [17] "Berry phase shift from  $2\pi$  to  $\pi$  in bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption", Ryota Akiyama, Yuma Takano, Yukihiro Endo, Satoru Ichinokura, Ryosuke Nakanishi, Kentaro Nomura, Shuji Hasegawa, Applied Physics Letters **110**, 233106-1-5 (Jun. 2017).
- [18] "Triplet fermions and Dirac fermions in borophene", Motohiko Ezawa, Physical Review B **96**, 035425-1-8 (Jul. 2017).
- [19] "Physics and application of persistent spin helix state in semiconductor heterostructures", Makoto Kohda, Gian Salis, Semiconductor Science and Technology **32**, 073002-1-25 (Jun. 2017).
- [20] "Nonlinear spin current generation in noncentrosymmetric spin-orbit coupled systems", Keita Hamamoto, Motohiko Ezawa, Kun Woo Kim, Takahiro Morimoto, Naoto Nagaosa, Physical Review B **95**, 224430-1-9 (Jun. 2017).
- [21] "Chiral anomaly enhancement and photoirradiation effects in multiband touching fermion systems", Motohiko Ezawa, Physical Review B **95**, 205201-1-9 (May. 2017).
- [22] "Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors", R. Wakatsuki, Y. Saito, S. Hoshino, Y. M. Itahashi, T. Ideue, M. Ezawa, Y. Iwasa, N. Nagaosa, Science Advances **3**, e1602390-1-9 (Apr. 2017).
- [23] "Negative and positive cross-correlations of current noises in quantum Hall edge channels at bulk filling factor  $\nu = 1$ ", T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki, T. Fujisawa, Journal of Physics: Condensed Matter **29**, 225302-1-9 (Apr. 2017).

## トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

佐藤 昌利 / 京都大学 基礎物理学研究所 教授

計画研究 D01「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」は、トポロジカル量子相とそこに発現するエキゾチック準粒子の基本的性質を理論的に解明し、さらに個々の物質の詳細によらない普遍的な物理現象と法則を探究することを目的としています。特に、既存の枠組みを超えた発想と分野を越えた概念の融合により、より広い観点から基礎学理の構築を目指しています。以下に本年度得られた成果をまとめます。

### 【強相関電子系・非平衡系におけるトポロジカル相転移】(川上)

川上らは、強相関電子系におけるトポロジカル相転移の理論研究を行いました。特に、重い電子系超格子  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  のトポロジカル超伝導とそれに付随するマヨラナ準粒子の性質を調べました [1]。その結果、 $\text{YbCoIn}_5$  の枚数を増やしていくと 4 枚目でトポロジカル相から自明相に相転移が生じ得ることを示しました。(D02 の柳瀬および本領域ポスドクの吉田らとの共同研究)。また、銅酸化物高温超伝導体の薄膜に円偏光レーザーを照射することでトポロジカル超伝導が誘起されること (D02 柳瀬氏らとの共同研究) [2]、さらに近藤絶縁体  $\text{SmB}_6$  にレーザーを照射することで種々のワイル半金属が誘起されることを示しました [3]。また、D04 の小布施らと協力することで、PT 対称性をもつ開放系の量子ウォークでトポロジカル相が実現することを理論的に提案し、実験的に検証しました [4]。

### 【冷却原子気体理論】(上田)

パリティ-時間 (PT) 対称な相互作用の強い冷却原子系において、PT 対称性の破れと量子臨界現象が競合する結果発現する新奇物理現象の探索を行いました。その結果、PT 対称性が破れた 2 次元量子臨界相において超流動相関が増強されることを見出しました。これは、Berezinskii-Kosterlitz-Thouless の臨界現象と著しい対照をなしています [5]。また、PT 対称な非エルミートな系においては、環境に散逸した情報を完全に取り戻すことができ一方で、PT 対称性

が破れた相においてはいかなる情報の回復もできないことを示しました。このことは、PT 対称の臨界点が、系と環境との情報の流れの可逆-不可逆性の分かれ目となることを示しています [6]。

### 【トポロジカル結晶物質の定式化】(佐藤昌)

現実の物質のトポロジカルな性質を明らかにするために、時間反転対称性や超伝導体をもつ対称性である電子・正孔対称性の他に、個々の物質がもつ結晶対称性を考慮にいれ、トポロジカル結晶物質の理論を数学の理論である K 理論を使い定式化しました。これは、あらゆる空間群および磁性空間群を考慮に入れることができ、非従来型超伝導体も系統的に取り扱い可能となっています [7]。これは数学者 (五味氏) らとの共同研究による成果です。

### 【トポロジカル超伝導体のレビュー】(佐藤昌)

トポロジカル超伝導体の理論および実験の現状を、B01 の連携研究者であったケルン大学の安藤氏とともに入門的内容からはじめてまとめました [8]。

### 【ヘリカルマヨラナフェルミオンの異方的磁気応答】(佐藤昌)

時間反転対称なトポロジカル超伝導体の表面に現れるヘリカルマヨラナフェルミオンは、ゼーマン磁場により時間反転対称性を破ることで、磁場の方向に依存して、ギャップが生じるような応答をします。本研究では、B01 の田仲氏と協力することで、結晶対称性に依存して、どのような異方的磁気応答が生じるかを明らかにしました [9]。

### 【中性子星内部 ${}^3\text{P}_2$ 超流動および $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$ のトポロジジー】(水島、新田)

水島と新田は、中性子星内部の  ${}^3\text{P}_2$  超流動状態がトポロジカル超流動体であることを明らかにしました [10]。  $10^{15}\text{G}$  にも及ぶ磁場を伴う中性子星内部では、1 軸性ネマティック状態から 2 軸性ネマティック状態へ相転移することを示しました。さらに、2 軸性ネマ

ティック状態も2つの相に細分化され、温度の低下とともに  $D_4$  対称な状態から  $D_2$  状態への相転移が起ることを見出しました。これらすべてのネマティック状態は DIII クラスに分類され、マヨラナ準粒子が存在します。さらに、水島と新田は、 $U_{1-x}Th_xBe_1_3$  について研究を行いました [11]。この物質では、ドーピングに応じて、異なる3つの超伝導相が存在します。3つの相が  $^3P_2$  超流動相の秩序状態と同じであることを指摘し、そのトポロジーや表面状態を議論しました。特に、サイクリック相とよばれる非ユニタリ状態に注目し、チャーン数やカイラル対称性によって守られた巻きつき数を導入することで、その複雑な表面アーク構造を明らかにしました。本研究は D01 研究項目内連携による成果です。

#### 【超流動 $^3He-B$ におけるボース・フェルミ励起】(水島)

$^3He-B$  は典型的な DIII トポロジカル超流動体であり、低エネルギー準粒子はマヨラナ粒子として振舞います。一方で、Nambu-Goldstone ボソンや Higgs ボソンなど様々なボース型励起が存在します。水島はこれらボソン励起とフェルミ励起の質量ギャップの間には南部総和則が成り立つことを示しました [12]。さらに、表面に束縛された massive Higgs ボソンが存在すること、それらのボソン励起とマヨラナ粒子間の結合に関する選択則が存在すること等を明らかにしました [13]。これらは、Topo-Q による REP プログラムの支援による成果です。

#### 【マヨナラ・フェルミオンと超対称性】(新田)

トポロジカル超伝導ワイヤーの端にはゼロエネルギーのマヨラナ・フェルミオンが局在しますが、十分離れていない場合は相互作用によりエネルギーを持ちます。ジョセフソン結合で相互作用している複数のマヨラナ・フェルミオンがリング状になっている場合、たった一つの相互作用を操作することで、全体に非局所的なゼロ・エネルギーのマヨナラ・フェルミオンが現れることを見出し、超対称性が現れることを示しました。またマヨラナ・フェルミオンの検出に応用できることを示しました [14]。

#### 【冷却原子気体における共形対称性と有質量南部ゴールドストーンモード】(新田)

$2+1$  次元の非線形シュレディンガー方程式に非相対論的共形対称性 (シュレディンガー対称性) がある

ことは知られていますが、冷却原子のようなトラッピング・ポテンシャルがある場合、通常はその対称性が陽に破られると思われがちであるが、実は修正した対称性があります。我々は、最も一般的な修正したシュレディンガー対称性を構成し、さらにそれが基底状態で自発的に破れていること、それに伴う南部ゴールドストーンモードが有限質量であることを示しました [15]。さらに、空間3次元で、トラッピング・ポテンシャルが3方向に伸びている場合に適用することで、3方向に伝播する有質量南部ゴールドストーンモードを調べました [16]。

#### 【相互作用するフェルミオンのカシミール力】(新田)

有限区間において、線形近似したボゴリューボフ・ドジャン方程式の自己無頓着な厳密解析解を構成しました。さらに、カシミール力の計算し、結合定数の変化に対して、カシミール力の符号が変わりうることを発見しました [17]。

#### 【 $^3P_2$ 超流動の渦のソリトン励起】(新田)

中性子がペアを組んで超流動状態になることは、中性子星の内部で実現されており、特に密度が高い場合は、 $^3P_2$  ペアリングが実現されていると思われています。 $^3P_2$  超流動の渦糸解を構成し、低エネルギー励起を調べることで、ダブル・サインゴルドン模型が現れることを発見し、キック解を構成しました [18]。

#### 【カラー超伝導の非アーベリアン渦の有効理論】(新田)

物質が非常に高密度になると、クォークがペア組むをカラー超伝導状態になります。この状態には、非アーベリアン渦が実現しています。渦の低エネルギーの有効理論は CP(2) 模型になることが知られていますが、これまでは特異ゲージによる計算しかありませんでした。今回は、これをレギュラーゲージで計算を実行することで有効理論を構成しました [19]。

#### 【ジョセフソン接合の場の理論による定式化】(新田)

ジョセフソン接合を、場の理論におけるドメイン壁で構成することで、ジョセフソン接合系を場の理論で扱う方法を提唱しました。磁場をかけた場合、ジョセフソン渦が絶縁体に入り込みますが、ジョセフソン渦のダイナミクスを解析的に扱うことが出来るようになりました。特に、3つの超伝導体がフラストレーション

ンのある場合に分数ジョセフソン渦が現れることがわかりました [20]。

【反平行磁場中における 2 次元フェルミ気体】 (西田)

反平行磁場中における 2 次元フェルミ気体の相構造について研究を行いました [21]。その結果、超流動相と量子スピホール絶縁体相が現れること、それらは 2 次相転移で接していること、その普遍クラスは希薄ボース気体あるいは XY 模型のものになること、などを見出しました。また、反平行磁場の存在によって超流動ギャップが著しく大きくなることも示し、冷却原子を用いた実現可能性について議論しました。

- [1] "Fate of Majorana Modes in CeCoIn<sub>5</sub>/YbCoIn<sub>5</sub> Superlattices: A Test Bed for the Reduction of Topological Classification"  
T. Yoshida, A. Daido, Y. Yanase and N. Kawakami,  
Phys. Rev. Lett. **118**, 147001 (2017).
- [2] "Laser-induced topological superconductivity in cuprate thin films"  
K. Takasan, A. Daido, N. Kawakami, and Y. Yanase,  
Phys. Rev. B **95**, 134508 (2017).
- [3] "Laser-irradiated Kondo insulators: Controlling the Kondo effect and topological phases"  
K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami,  
Phys. Rev. B **96**, 115120 (2017).
- [4] "Observation of topological edge states in parity-time-symmetric quantum walks"  
L. Xiao et al., Nat. Phys. **13**, 4204 (2017).
- [5] "Parity-time-symmetric quantum critical phenomena"  
Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda,  
Nat. Commun. **8**, 15791 (2017).
- [6] "Information Retrieval and Criticality in Parity-Time-Symmetric Systems"  
K. Kawabata, Y. Ashida, and M. Ueda,  
Phys. Rev. Lett. **119**, 190401 (2017).
- [7] "Topological crystalline materials: General formulation, module structure, and wallpaper groups"  
K. Shiozaki, M. Sato, K. Gomi,  
Phys. Rev. B **95**, 235425 (2017).
- [8] "Majorana Fermions and Topology in Superconductors"  
M. Sato, Y. Ando,  
Rev. Mod. Phys. **80**, 076501 (2017).
- [9] "Anisotropic Magnetic Responses of Topological Crystalline Superconductors"  
Y. Xiong, A. Yamakage, S. Kobayashi, M. Sato, Y. Tanaka, Crystal, **7**, 00058 (2017).
- [10] "<sup>3</sup>P<sub>2</sub> superfluids are topological"  
T. Mizushima, K. Masuda, and M. Nitta,  
Phys. Rev. B **95**, 140503(R) (2017).
- [11] "Topology and symmetry of surface Majorana arcs in cyclic superconductors"  
T. Mizushima and M. Nitta,  
Phys. Rev. B **97**, 024506 (2018).
- [12] "On the Nambu fermion-boson relations for superfluid <sup>3</sup>He"  
J. A. Sauls and T. Mizushima,  
Phys. Rev. B **95**, 094515 (2017).
- [13] "Bosonic Surface States and Acoustic Spectroscopy of Confined Superfluid <sup>3</sup>He-B"  
T. Mizushima and J. A. Sauls,  
arXiv:1801.02277.
- [14] "Supersymmetry in closed chains of coupled Majorana modes"  
Z. Huang, S. Shimasaki, and M. Nitta,  
Phys. Rev. B **96**, 220504 (2017).
- [15] "Conformal symmetry of trapped Bose-Einstein condensates and massive Nambu-Goldstone modes"  
K. Ohashi, T. Fujimori, and M. Nitta,  
Phys. Rev. A **96**, 051601 (2017).
- [16] "Two-dimensional Schrödinger symmetry and three-dimensional breathers and Kelvin-ripple complexes as quasi-massive-Nambu-Goldstone modes"  
D. A. Takahashi, K. Ohashi, T. Fujimori, and M. Nitta,  
Phys. Rev. A **96**, 023626 (2017).
- [17] "Sign Flip in the Casimir Force for Interacting Fermion Systems"  
A. Flachi, M. Nitta, S. Takada, and R. Yoshii,  
Phys. Rev. Lett. **119**, 031601 (2017).
- [18] "Collective excitations of a quantized vortex in <sup>3</sup>P<sub>2</sub> superfluids in neutron stars"  
C. Chatterjee, M. Haberichter, and M. Nitta,  
Phys. Rev. C **96**, 055807 (2017).
- [19] "Low-energy effective worldsheet theory of a non-Abelian vortex in high-density QCD revisited: A regular gauge construction"  
C. Chatterjee, and M. Nitta,  
Phys. Rev. D **95**, 085013 (2017).
- [20] "Field theoretical model of multilayered Josephson junction and dynamics of Josephson vortices"  
T. Fujimori, H. Iida, and M. Nitta,  
Phys. Rev. B **94**, 104504 (2016).
- [21] "Two-dimensional Fermi gas in antiparallel magnetic fields"  
T. Anzai and Y. Nishida,  
Phys. Rev. A **95**, 051603 (2017).

## 第21回久保亮五記念賞

### ●受賞理由

### 内部自由度を持った冷却原子気体の理論研究

川口 由紀 / 名古屋大学 大学院工学研究科 准教授 (公募研究 D04)

このたび、内部自由度を持った冷却原子気体の理論研究で、第21回久保亮五記念賞を受賞しました。久保亮五記念賞は、故久保亮五博士の物理学における業績を記念し、日本の統計物理学・物性科学における波及効果の大きい基礎的研究で優れた業績をあげた45才未満の若手研究者を対象に、1997年度から毎年1件授賞するものとして設けられたものです。授賞式は2017年10月7日に学士会館にて行われ、記念講演として2018年10月の久保記念シンポジウムで講演を行う予定となっています。

受賞対象となった研究は、冷却原子気体に関するものです。冷却原子気体は光や磁場を用いて真空中に捕獲された原子集団を希薄なまま極低温まで冷却した系で、人工的に作られた新しい量子多体系として注目を集めています。私はこのような冷却原子がスピン自由度を持つ場合のボース・アインシュタイン凝縮体（スピノル BEC）に着目し、原子のスピン自由度に起因する新奇物性を探究する研究を行ってきました。主要業績の第一は、原子スピン間の双極子-双極子相互作用を伴う BEC に関するもので、微弱で観測にかかりにくいと思われていた双極子-双極子相互作用の効果を、スピン角運動量から軌道角運動量への転化現象であるアインシュタイン・ド・ハース効果 [1] やらせん状のスピン配置構造形成 [2] を通して観測可能であることを示しました。予言したらせん状構造は後に実験でも観測されています [3]。これは、観測困難と考えられていた双極子-双極子相互作用に関する常識を打ち破ったもので、スピノル・ダイポール BEC という新分野の先駆的研究となっています。第二の業績は、トポロジカル励起に関するものです。渦やモノポールに代表されるトポロジカル励起は、自発的に対称性の破れた系で普遍的に存在し、宇宙・高エネルギー物理から、超伝導・超流動、ソフトマターに至る広範な研究領域で関心がもたれています。特に文献 [4] で、特異点を伴わない3次元線状励起であるノットがスピノル BEC で存在可能なことを指摘し、実験的にノット

トを生成・観測する方法を提案したところ、そのアイデアに基づいた実験が2016年に行われノットが観測されました [5]。ノットは超流動3ヘリウムや量子色力学でその存在が予言されていましたが、実際に観測されたのはこれが初めてとなります。受賞理由では、これらの研究に対し、「数学的色彩の濃いものであるが、常に幅広い視点で考察し、得られた結果を具体的に実験で確認する方法まで明確に示して、理論家のみならず、実験家からも大きな注目を集めている」として評価していただきました。

これらの研究は、上田正仁先生をはじめとする論文共著者・共同研究者のお力添えなしでは達成できなかった研究です。この場をお借りして、感謝いたします。

- [1] YK, H. Saito, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **96**, 080405 (2006).
- [2] YK, H. Saito, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **98**, 110406 (2007).
- [3] Y. Eto, et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 185301 (2014); G. E. Marti, et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 155302 (2014).
- [4] YK, M. Nitta, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **100**, 180403 (2008).
- [5] D. S. Hall, et al., Nat. Phys. **12**, 478 (2016).



授賞式の様子



## 2017年科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞

### ●受賞理由 異種量子接合の研究

横山 毅人 / 東京工業大学 理工学研究科 助教 (公募研究 D04)

物性物理学の分野では物の示す性質に興味があります。物質単体でも様々な興味深い物理がありますが、2つの異なる物質を接合することでそれぞれの物質自体が示さないような新奇な物理現象が現れることがあります。以下では受賞対象となった、1. 強磁性体 / 超伝導体接合と 2. トポロジカル絶縁体接合の2つの研究について説明します。

1. 近年強磁性体 / 超伝導体接合において、超伝導体がシングレット超伝導体であるにもかかわらず、強磁性体中に奇周波数（周波数について奇関数の）トリプレット超伝導が誘起されることが知られており、近年注目を集めています。しかし、「奇周波数性」自体に起因する物性は何なのかということとは不明でした。私はこの奇周波数トリプレット超伝導の示す奇周波数性に起因した特異な物性を明らかにしました。この奇周波数トリプレット超伝導が支配的である時、強磁性体中の状態密度にゼロエネルギーピークが現れることを明らかにしました。これは通常の超伝導が状態密度にギャップ構造を示すのとは対照的であり、奇周波数超伝導の特長です。また、誘起された奇周波数超伝導の示すマイスナー効果を調べ、軌道帯磁率が系の温度などのパラメータに対して符号を変えながら発散的かつ振動するような振る舞いを示すことを明らかにしました。これは“負のマイスナー効果”とも言え、従来の超伝導では見られない現象です。これ

らの状態密度とマイスナー効果における特徴は最近実験的にも確認され、私の理論的予言と整合する結果が得られています。

2. トポロジカル絶縁体の表面に形成される電子は質量のない Dirac 方程式に従うためそのスピンと運動量が強く結合しており、スピントロニクスへの応用が期待されています。

私は3次元トポロジカル絶縁体の表面に強磁性体を接合した系における新奇なスピン物性を予言しました。例えば、トポロジカル絶縁体の表面電子が強磁性体と結合した場合、その交換場は Dirac 電子に働くゲージ場や質量項とみなすことができ、交換場による特異な効果が期待できます。私はこの点に着目し、トポロジカル絶縁体の表面に強磁性体を載せた系において、コンダクタンスの磁化の面内方向に対する依存性が非常に強いことや、2つの磁化が平行な時にコンダクタンスが最小になるなど、従来の系では見られなかった異常な磁気抵抗効果が現れることを発見しました。これは強磁性体の交換場が Dirac 電子の運動量をシフトさせることに起因した新しい機構による磁気抵抗効果であり、トポロジカル絶縁体特有の物性です。

受賞にあたり、指導教員や共同研究者の方々に感謝申し上げます。

## NEWS

# 第12回(2018年) 日本物理学会若手奨励賞(領域4)

### ●受賞理由

## 熱測定によるネマティック超伝導相の発見

米澤 進吾 / 京都大学 理学研究科 助教 (計画研究 A01 連携研究者)



### よねざわ しんご

1980年、東京都生まれ。群馬県や千葉県で育ち、京都大学入学以降は京都在住。2008年より現職。プライベートでは4歳と1歳の2児の父。昨年よりマラソンに挑戦し、京都マラソン2017をネットタイム4時間20分強で完走しました。今年も走ります。

このたび、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の比熱測定研究に対して、第12回日本物理学会若手奨励賞(領域4)を頂くことが決まりました。物理学会の若手賞は、「日本物理学会は将来の物理学を担う優秀な若手研究者の研究を奨励し学会をより活性化するための賞」で、領域によって少しずつルールが違いますが、領域4の場合は37歳以下の研究者に与えられます。私の場合は年限ギリギリで受賞することができました。

研究対象となった研究は、スピン三重項のトポロジカル超伝導物質の有力候補である  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の比熱の磁場方向依存性が180度周期の振舞いをするを示したものの [1] です。この物質の結晶構造は三方晶なので、120度周期が60度周期の振舞いが期待されますが、それより対称性の低い振舞いが観測されたのは非常に驚きです。この結果は、超伝導ギャップ振幅が結晶の持つ回転対称性を自発的に破る「ネマティック超伝導」が実現していることを示す初めての熱力学的な証拠として、多くの注目を頂いています。また、研究対象論文としては同じ測定装置を用いた  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  についての論文 [2] もリストされており、これまでの磁場方向制御下での熱測定の積み重ねも含めて評価していただいたと思っています。

この研究は本TMS領域の前身である「トポロジカル量子現象(TQP)」新学術領域研究の後半にスタートしました。領域メンバーであった岡山大学の鄭先生のグループのスピン三重項超伝導性を示す核磁気共鳴実験結果を受け、同じく領域メンバーで大阪大学(当時;現ケルン大学)の安藤先生のグループから試料を提供して頂いて比熱測定を始めました。当時4回生として研究室に加わったばかりの田尻君と共に実験を開始し、これまでに経験のなかった air sensitive な試料の取り扱いに苦労しながらも何とか比熱を測定できるようになりました。実験開始後1ヶ月くらいで180度周期の振舞いを観測できたのですが、それが本質的なものかを確認するのに何倍もの時間がかかりました。さらに複数の試料で180度周期

性を確かめるなどしたため、論文投稿までに一年半くらいを要しました。粘り強く実験をしてくれた田尻君には特に感謝したいと思います。また、前野先生・安藤先生をはじめとする共同研究者の方々や、共同研究のきっかけや様々なサポートを頂いたTMS・TQP両領域にも感謝します。

若手賞の締切りは7月下旬、今年プラハで開かれていた強相関電子系国際会議の終わった直後でした。チェコビールを飲みに行くのをぐっと我慢してホテルで申請書を書きましたが、その甲斐がありました(書類のメドがついた後にビールはしっかり飲んだのですが)。

- [1] S. Yonezawa et al., Nature Phys. **13**, 123 (2017).
- [2] S. Yonezawa et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013); J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083706 (2014).

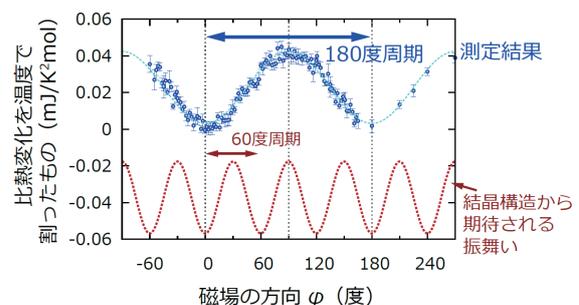


図1.  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  で観測された比熱の磁場方向依存性と、結晶構造から期待される60度周期性との比較。

## 第12回（2018年） 日本物理学会若手奨励賞（領域7）

### ●受賞理由

### フラレン化合物および層状窒化物における超伝導-絶縁体転移近傍の超伝導状態の研究



笠原 裕一 / 京都大学 理学研究科 准教授（計画研究 A01）

このたび、フラレン化合物および層状窒化物における超伝導-絶縁体転移近傍の超伝導状態の研究で、第12回（2018年）日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。本賞は、将来の物理学をにやう優秀な若手研究者の研究を奨励し、学会をより活性化するために設けられたものです。授賞式は2018年3月23日に千葉県野田市の東京理科大学で行われ、そこで受賞講演を行いました。

以下に受賞対象となった研究について簡単にご紹介させていただきます。キャリアドーピングや圧力による絶縁体の金属化は、バンド絶縁体、モット絶縁体関わらず、新奇超伝導体探索をする上での指導原理となっています。そして超伝導-絶縁体転移近傍においてその超伝導状態の性質を明らかにすることは、超伝導体研究の主目的のひとつです。なぜなら、超伝導-絶縁体転移近傍ではしばしば非従来型の超伝導状態が現れ、その性質は超伝導発現機構と密接に関係しているからです。私はアルカリドーピングしたフラレン化合物や層状窒化物を対象とした研究を進めました。前者は1991年に米国ベル研究所で、後者は1996年に広島大学の山中先生により超伝導が発見されました。どちらも超伝導-絶縁体転移近傍で比較的高い超伝導転移温度をもつ超伝導体として注目されています。私は物質組成によりパラメータ（格子体積またはキャリア濃度）を精密制御した試料について、比熱や磁化率といった基本的物理量を測定し、系統的な変化を追うという、この分野ではスタンダードな実験的研究を地道に行ってきました。しかしながら、上記の超伝導体で強い嫌気性から系統的な研究が困難であったという事情がありました。私は「嫌気性物質用比熱セル」の開発などを通じ、これまでに行われてこなかった基礎物理量の系統的研究をはじめて展開しました。

フラレン超伝導体では、超伝導-モット絶縁体転移近傍における異常な強結合状態、上部臨界磁場の増大などを明らかにしました。これによって、典型的BCS超伝導が強相関効果によって増強されることを明らかにしました [1]。母物質となる反強磁性モット絶縁体  $\text{Cs}_3\text{C}_{60}$  では、分子の配向無秩序性を原因として、磁気秩序温度が強く抑制されることを明らかにしました [2]。どちらも無機物質系にはない特徴的なものであり、特有の分子自由度の重要性を指摘しています。電子ドーピング層状窒化物超伝導体 ( $\text{Li}_x\text{ZrNCl}$ ,  $\text{Li}_x\text{HfNCl}$ ) では、Li組成  $x$  を広い範囲で変化させた試料を多数合成し、それらの比熱、磁化率を測定し、系統的な変化を明らかにしました。これにより、状態密度やペアリング相互作用がLi組成によってどのように変化するかを明らかにしました [3]。その後、 $\mu\text{SR}$  や  $\text{NMR}$  の共同研究も進め、上記の主張を支持する結果が得られています。また、この研究を契機に、スピン揺らぎやバレー分極が超伝導に関与するとする非従来型の超伝導発現機構が理論的に提案されるなど、新たな展開を見せています。

以上の研究は東京大学工学系研究科の岩佐先生を始めとするさまざまな研究者の方々との共同研究を元に行っています。この場を借りて皆様に感謝申し上げます。

[1] Y. Kasahara et al., Nat. Commun. **8**, 14467 (2017).

[2] Y. Kasahara et al., Phys. Rev. B **90**, 014413 (2014).

[3] Y. Kasahara et al. Phys. Rev. Lett. **103**, 077004 (2009).

## Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> におけるスピン回転対称性の破れとトポロジカル超伝導

鄭 国慶 / 岡山大学 大学院自然科学研究科 教授 (研究分担 A01)

### 1. はじめに：トポロジカル超伝導とマヨナラ励起

トポロジカル絶縁体と類似で、超伝導状態を記述する波動関数がトポロジカルに非自明な超伝導体はトポロジカル超伝導体と分類されます。その候補となるバルクの物質群は、(1) 空間反転対称性が破れた超伝導体<sup>1)</sup>、(2) 時間反転対称性が破れた超伝導体、(3) 奇パリティを有する超伝導体、などです。トポロジカル超伝導体の渦糸中心やエッジ (端) に現れるマヨナラ励起 (ゼロエネルギーモード) はトポロジカル量子計算への応用が期待され、近年特に注目を集めています。

(1) に属する物質として Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B などがあり、(2) に属する物質として Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> が有名です。また、*s* 波超伝導体とトポロジカル絶縁体や強磁性体との接合で誘起される超伝導がトポロジカル性を有するという理論提案があり、実験もいくつか報告されています。本稿では、私たちがスピン回転対称性の破れを発見したことによって、Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> が (3) に属する超伝導体であると証明したことについて述べます。なお、スピン回転対称性の破れを実験的に観測したのはすべての超伝導体を通じて初めてのことです<sup>2)</sup>。

### 2. トポロジカル絶縁体へのキャリアドーピング：Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の超伝導

図 1 に Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の結晶構造を示します。赤の枠で囲った五層 (quintuple layer, QL) が基本ユニットで、六方対称性を有します。絶縁体 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> ではスピン軌道相互作用が強くバンドの反転が起ったために、価電子バンドのパリティが負となり、そのトポロジカル不変数がゼロではありません<sup>3)</sup>。実際、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> ではトポロジカル絶縁体として期待されるエッジ状態が観測されています<sup>4)</sup>。Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の QL の間に Cu をインターカレート (挿入) すると超伝導が発現し、その転移温度 *T<sub>c</sub>* は最高で 3.8K に達します<sup>5)</sup>。

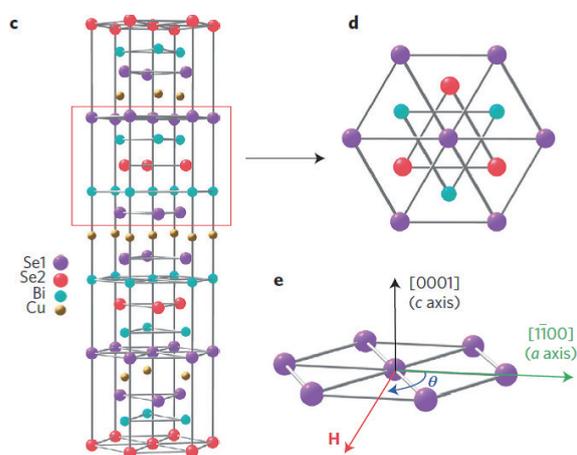


図 1 : Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の結晶構造図。H は印加磁場。

Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の超伝導が報告されるやいなや、Fu と Berg がこの超伝導が非従来型でトポロジカルである可能性が高いとする理論を提案しました<sup>6)</sup>。一方、トポロジカル絶縁体同様、バルク・エッジ対応を利用して、エッジ状態をとらえようとする実験もいくつか報告されました<sup>7,8,9)</sup>。点接触トンネル分光の実験では Sasaki らがトンネルスペクトルにおいてゼロバイスピークを観測したのに対して<sup>7)</sup>、Peng らは観測しませんでした<sup>8)</sup>。また、走査型トンネル分光の測定は BCS 的な超伝導ギャップを報告しています<sup>9)</sup>。このように、表面に敏感な実験手段からは相矛盾した結果が得られ、エッジ状態の有無からバルクのギャップを推測するのは困難でした。

そこで、私たちはバルクの性質を測定できる <sup>77</sup>Se の核磁気共鳴 (NMR) の実験を始めました。上部臨界磁場が低いために、測定は低磁場 (面に平行の場合は約 0.7T、面に垂直の場合は約 0.3T) で行うことを余儀なくされましたが、表面から 0.5mm 以上の深さまで核スピンを見ることができ、バルクの性質をとらえることに成功しました。図 1 が示すように、Se には結晶学的に異なるサイトが二つあります。以下に示すデータはすべて QL の再外側にある Se1 サイトに関するものです<sup>2)</sup>。

### 3. $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるスピン回転反対称の破れとスピン三重項超伝導

図2に $^{77}\text{Se}$ -NMRによるナイトシフトの角度及び温度依存性を示します。左パネルは磁場を面に平行(c軸に垂直)に印加した場合、右パネルは磁場を面に垂直(c軸に平行)に印加した場合の結果です。 $\theta$ は面内で磁場Hとラウエで決めた結晶軸との角度です。ナイトシフトはスピンの磁化率に比例する部分 $K_s$ と電子の軌道磁化率による部分 $K_o$ との和からなります。図には絶縁体 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のNMRスペクトルから決めた各方向の $K_o$ の位置を矢印で示しました<sup>2)</sup>。

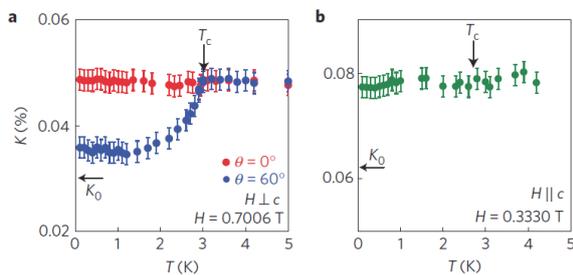


図2：各方向における $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のナイトシフトの温度依存性。 $K_o$ は軌道磁化率による寄与。

特筆すべきは、ナイトシフトの温度変化が強い方向依存性を示していることです。特に、面内の異方性は驚きでした。あらかじめ決めたあるa軸に平行に磁場をかける(H//a)と、H//c軸と同様にナイトシフトが減少しませんが、そこから磁場を60度回転させると、 $T_c$ 以下でナイトシフトが急激に減少します。

図3に1.4Kにおけるナイトシフト減少の詳しい角度依存性を示します。面内で磁場を一周(360度)回転させると、180度隔てた二つのdip(谷)が現れます。すなわち、3回対称性をもつ結晶構造に対して、2回対称性が創発したのです。前述したように、ナイトシフトはスピン磁化率に比例する量なので、これはスピン回転反対称性が $T_c$ 以下で自発的に破れたことを意味します。これらの結果から、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ はスピン三重項超伝導体であることが結論されます。また、スピン三重項超伝導を記述するdベクトルという物理量は3つある等価なa軸のうちの一つの方向にピン止めされていることがわかります。なお、良く知られているように、スピン一重項超伝導の場合は、すべての方向においてナイトシフト(スピン磁化率)が $T_c$ 以下で減少します。

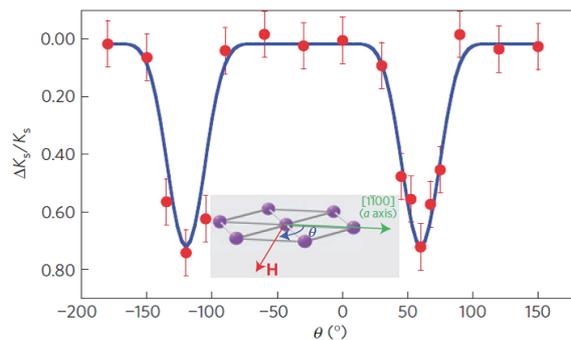


図3：1.4Kにおけるナイトシフト減少の角度依存性。

### 4. $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるネマティック秩序とトポロジカル超伝導

以上の結果は紆余屈折を経て論文として出版されたのは2016年のことですが、データの主要部分は2014年の時点ですでに国内の研究会や学会で公表していました。2014年初夏に名古屋大学での研究会で筆者が話した内容は、すぐにL.Fu氏にも伝わりました。彼は早速論文を書き私たちが観測したナイトシフトの異方性をunpublished dataとして紹介し、「ネマティック秩序」(nematic order)という言葉で実験結果を説明しました。また、FuとBerg論文<sup>6)</sup>で行った当初の提案を修正しました<sup>10)</sup>。それがきっかけで、最近では「ネマティック超伝導」という言葉も多用されるようになりました<sup>11,12)</sup>。

因みに、FuとBergの論文では4つの超伝導状態が提案されており、そのうちの $\Delta_2$ が最も実現しやすいと結論されていました<sup>6)</sup>。しかし、実際はむしろ $\Delta_4$ という状態から期待されるスピン磁化率<sup>13)</sup>が上で述べたナイトシフトの結果と最も合致することがわかりました。

さて、空間反転対称性がある超伝導体がトポロジカルになるためには以下の条件(クライテリア)を満たさなければなりません。(a) 超伝導波動関数のパリティが奇であること、(b) フェルミ面が内含する時間反転対称な点が奇数個あること。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ に空間反転対称性が保たれているので、スピン三重項から超伝導波動関数が奇パリティであることがわかります。また、フェルミ面が内含する時間反転対称な点は1個(ガンマ点)のみです。したがって、上の二つの条件が満たされており、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ はトポロジカル超伝導体であると結論されます。

## TOPICS

### 5. まとめと展望

本稿では、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の超伝導状態において初めてスピン回転対称性の破れを発見したことを紹介し、この系が時間反転対称性を有するトポロジカル超伝導体であることを示しましたが、まだいくつもの課題が残されています。

最近、 $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  や  $\text{Nb}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  でも 3 K 付近で超伝導を示すことが発見されたので<sup>14,15)</sup>、ドーパントとして特に Cu を必要とするわけではないと言えるかもしれません。しかし、結晶構造における Cu(Sr,Nb) の正確な位置を今後明らかにしなければなりません。また、ギャップ構造や  $d$  ベクトルをピン止めする機構の解明、エッジ状態の観測など、多くの課題が残っています。

謝辞：本稿は俣野和明、前田賢輝（以上岡山大学）、安藤陽一（現ケルン大学）、瀬川耕司（現京都産業大学）、M. Kriener（現理研）諸氏との共同研究の成果に基づいています。また、佐藤昌利、田仲由喜夫、山影相、三宅和正、前野悦輝、L. Fu, J. A. Sauls、米澤進吾諸氏より多くの議論をいただきました。ここに深く感謝します。

- [1] 鄭 国慶：新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」Newsletter **5**, 20 (2015).
- [2] K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, and G. -q. Zheng, Nat. Phys. **12**, 852 (2016).
- [3] H.J. Zhang et al, Nat. Phys. **5**, 438 (2009).
- [4] Y. Xia, et al. Nature Phys. **5**, 398\_402 (2009).
- [5] Y.S. Hor et al, Phys. Rev. Lett. **104**, 057001 (2010).
- [6] L. Fu, and E. Berg, Phys. Rev. Lett. **105**, 097001 (2010).
- [7] S. Sasaki et al, Phys. Rev. Lett. **107**, 217001 (2011).
- [8] H.B. Peng et al, Phys. Rev. B **88**, 024515 (2013).
- [9] N.Levy, et al. Phys. Rev. Lett. **110**, 117001 (2013).
- [10] L. Fu, Phys. Rev. B **90**, 100509(R) (2014).
- [11] S. Yonezawa et al, Nat. Phys. **13**, 123 (2017).
- [12] J. Shen et al, npj Quantum Materials **2**, 59 (2017).
- [13] T. Hashimoto et al. J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 044704 (2013).
- [14] Z. Liu et al, J. Am. Chem. Soc. **137**, 10512 (2015).
- [15] T. Asaba et al, Phys Rev. X **7**, 011009 (2017).

### 講者紹介



ていこくけい  
ZHENG Guo-qing  
ツエン グォーチン

1990年3月大阪大学博士課程修了。大阪大学助手、助教授を経て、2004年4月より現職。専門は核磁気共鳴法を用いた超伝導や強い電子相関に起因する物理現象の研究。

## キタエフ模型が生み出す量子スピ液体研究の新たな潮流

那須 譲治 / 東京工業大学 理学院 助教 (公募研究 D02)

### 1. はじめに

電子が強いクーロン斥力によって結晶格子点に局在したモット絶縁体においては、電子の電荷の自由度は凍結し、スピンの自由度が磁氣的性質を支配するいわゆる局在スピン系が実現していると考えられています。電子が局在しているために、バンド描像に基づいた理論体系は適用できず、トポロジカルな性質とは全く無縁なようにも見えます。しかしながら、ある種の量子スピン状態では、その素励起をフェルミ粒子として記述することが可能であり、自由電子系と同様の枠組みでトポロジカル特性を議論できることわかっています。ここでは、局在スピン系の模型のひとつであるキタエフ模型に着目し、その基底状態、熱力学的性質および磁気ダイナミクスを私たちの研究結果を交えながら紹介していきたいと思えます。

### 2. キタエフ模型と量子スピ液体

キタエフ模型 (図1参照) は、2006年の Alexei Kitaev によって提案されました [1]。物性物理学の分野では、この模型は量子スピ液体を実現する模型のひとつと考えられています。量子スピ液体は強い量子ゆらぎによって、極低温まで磁気秩序が現れない特異な量子状態です。その可能性は Philip Anderson によって 1973年に提案されたという長い歴史を持っており [2]、近年、無機化合物、有機物質の両方でその

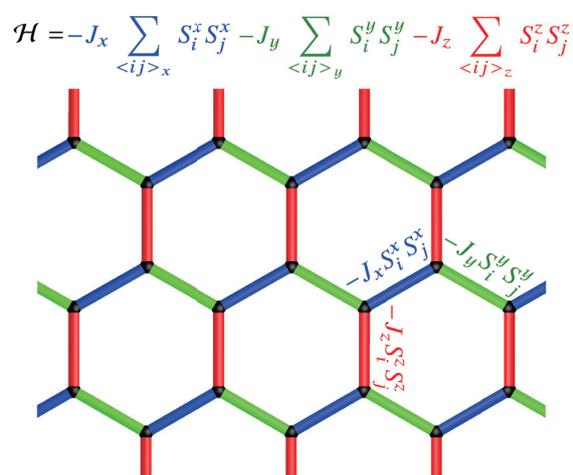


図1: キタエフ模型の相互作用。ここでは、 $J_x=J_y=J_z=J$  とする。

候補物質が発見され続けています。これまで量子スピ液体の理論研究は、幾何学的フラストレーションを有する格子上でのハバード模型やハイゼンベルク模型を中心に行われてきました。これらは量子多体問題に真正面から挑む問題であることから、基底状態の性質すら明らかにすることが困難な場合も多く、現在もお積極的に研究されています。特に、多体効果と量子ゆらぎの共存は、特異な素励起状態を生み出すことが期待され、さらに、内在する強い量子ゆらぎが量子計算へ応用できるのではと量子スピ液体研究の広がりが論じられています。

一方で、キタエフ模型の研究は、それとは全く逆のプロセスで議論されてきました。もともと、Alexei Kitaev は量子情報の分野の研究者であり、トポロジカル量子計算を実現する舞台として、可解な2次元局在スピン系であるキタエフ模型を提案し、その素励起は  $Z_2$  ゲージ場と結合したマヨラナ粒子で記述できることを示しました [1]。その後、Baskaran-Mandal-Shankar らによって長距離スピン相関がないことが示され [3]、続いて、固体中でキタエフ模型が実現する可能性を Jackeli-Khaliullin が提案し [4]、一気に物性物理学で注目が集まったという背景を持ちます。そのため、本当に固体中の磁気状態が純粋なキタエフ模型で記述可能であるかどうかは問題ではありますが、キタエフ模型自体は、量子スピ液体を厳密に基底状態にもつ模型というだけでなく、特殊な素励起の存在や量子計算への応用まで示されたとても魅力的な系です。

### 3. キタエフ模型と自由マヨラナ粒子系との対応

キタエフ模型は多くの興味深い性質を持ち合わせていますが、基底状態と励起構造の大部分は Alexei Kitaev の原論文 [1] に記述されています。そのため、私たちは物性研究で重要な熱揺らぎの効果を明らかにすることを目的に研究を進めています。特に、キタエフ模型の可解性を利用した数値計算を行うことで、有限温度の解析を行ってきました [5-9]。ここではその計算方法の概略を説明します。

# TOPICS

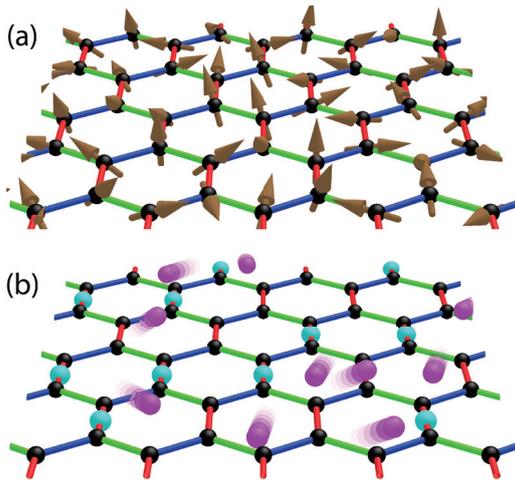


図2：(a) 量子スピン模型としてのキタエフ模型と (b) マヨラナ系へのマッピング。ピンクが遍歴的なマヨラナ粒子、水色が局所的なマヨラナ粒子を表す。

図1に示すように、キタエフ模型は  $S=1/2$  の量子スピンの蜂の巣格子に定義された局在スピン模型であり、蜂の巣格子の3つの非等価なボンドで、異なる成分のイジング型の相互作用を持っています。マヨラナフェルミオンは自由度が  $S=1/2$  スピンの半分であることから、スピンを2種類のマヨラナフェルミオンで常に書き換えることが可能ですが、キタエフ模型は、この書き換えにより、ボンドに局在するマヨラナ粒子と遍歴する自由マヨラナ粒子からなる系へと変換することができます(図2)。局在するマヨラナ粒子が局所保存量となることから、キタエフ模型は可解となります。この模型は実は、強相関電子系で広く研究されてきた Falicov-Kimball 模型や二重交換模型と類

似しており、多大な蓄積のあるこれら伝導電子系の模型に対する研究手法を量子スピン系であるキタエフ模型に適用するというアプローチを私たちは採用しました。これにより、近似なしに大きなクラスターサイズの系での数値シミュレーションが可能となりました。

## 4. スピンの分数化の顕在化

私たちはこの数値計算手法を用いて、様々な物理量の温度変化を調べていきました。ここでは特にすべての交換相互作用の強さが等しい場合を考えます。比熱の温度変化には相互作用定数に対応する温度において単一のピークが存在することが期待されますが、キタエフ模型では図3に示すように比熱は2つのピークを示します。これは、 $S=1/2$  量子スピンの相関効果によって2つのマヨラナ粒子に分数化したことを直接示す重要な結果です。

加えて、有限温度における磁気ダイナミクスも計算しました。ここで問題となるのが、量子スピンは2種類のマヨラナ粒子の複合体と見なされるため、動的スピン相関の計算は、局在したマヨラナ粒子の時間発展を追う必要があり多体問題になってしまうことです[3]。私たちは、動的スピン相関が局所的(短距離)であり、この問題が不純物アンダーソン模型と類似していることに着目しました。これを利用し、不純物アンダーソン模型の解析で良く用いられる連続時間量子モンテカルロ法をキタエフ模型の動的相関に応用することで、動的スピン構造因子の温度変化を計算しました

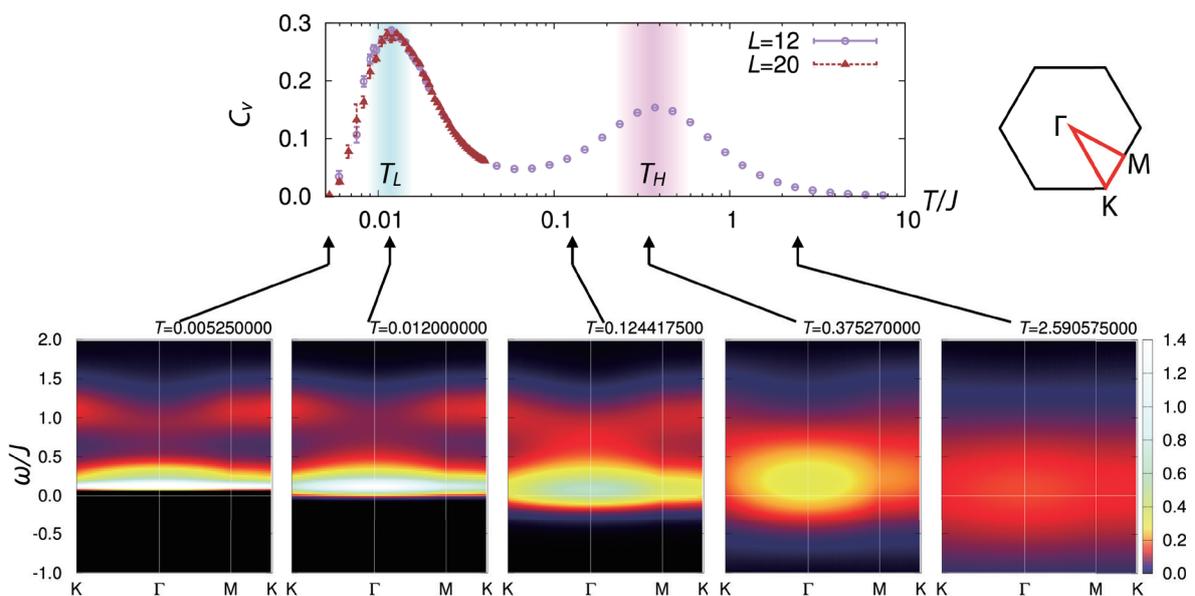


図3：上図：キタエフ模型の比熱の温度変化 [5,6]。下図：各温度での動的スピン構造因子 [7]。

[7]。その結果、極低温で見られる低エネルギーのコヒーレントなピークと高エネルギーにある連続的な構造が別々の温度で消失することを見いだしました (図3)。

上記の動的スピン相関においては、スピンの2種類のマヨラナ粒子の複合体として記述される以上、これらのマヨラナ粒子のダイナミクスを別個に取り出して議論することは難しいです。分数化を議論するには、2種類のマヨラナ粒子の片方のみを反映する物理量で議論する必要があります。ラマン散乱スペクトルは遍歴的なマヨラナ粒子を主に捉えることができるため、私たちはこの温度変化を計算しました。その結果、マヨラナ粒子のフェルミオンとしての性質が、ラマン散乱強度の温度変化に表れることを見いだしました [8]。

#### 5. トポロジカルな性質を反映した熱輸送特性

しかし、ここまでの範囲では、Kitaevモデルの素励起がフェルミ粒子である可能性を、観測量として指摘することはできませんが、それがマヨラナ粒子であることを示すためには不十分です。そのため、遍歴マヨラナ粒子の示すトポロジカルな性質に注目しました。トポロジカルに非自明なマヨラナ粒子系が持つカイラルエッジモードは、それが持つ自由度を反映して通常のフェルミオンの半分の量子化値を与えることが知られています。マヨラナ粒子は電的に中性であることから、物理量として熱ホール係数にマヨラナ性が現れることが期待されます [10,11]。私たちは、磁場下での熱ホール係数の温度変化を計算し、温度低下に伴って非単調な温度変化の後、絶対零度に向かってフェルミ粒子系の半分の量子化値に漸近することを示しました [9]。

#### 6. おわりに

ここまで、私たちが行ったKitaevモデルに関する計算結果の概略を述べてきました。近年、イリジウム酸化物やルテニウム化合物がKitaevモデルの実現舞台と見なされるようになり、実験理論共に多くの研究がなされています。これら現実の系で観測されている物理量は、純粋なKitaevモデルでも説明できるとされていますが [8,12,13]、Kitaev相互作用以外の磁気相互作用も存在し、磁気秩序など様々な影響を与えることが多くの研究からわかっています。また、磁場といった外場による影響の解明も大きな問題であり、ごく最

近、続々と研究成果が報告されています。Kitaev以外の相互作用や外場効果によるトポロジカルな性質の安定性や現実物質との対応など、まだまだ解決すべき問題が山積みですが、Kitaevモデルのもつ可解性を起点とした量子スピン液体研究は、国内外で非常に活発に研究が行われている分野であり、今後の発展が期待されます。

本研究は、求幸年氏 (東大工)、宇田川将文氏 (学習院大理)、吉竹純基氏 (東大工)、Johannes Knolle氏 (Imperial College London)、Dmitry Kovrizhin氏 (Oxford University)、Roderich Moessner氏 (MPI Dresden) との共同研究によって得られたものです。

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. (N. Y). **321**, 2 (2006).
- [2] P. Anderson, Mater. Res. Bull. **8**, 153 (1973).
- [3] G. Baskaran, S. Mandal, and R. Shankar, Phys. Rev. Lett. **98**, 247201 (2007).
- [4] G. Jackeli and G. Khaliullin, Phys. Rev. Lett. **102**, 17205 (2009).
- [5] J. Nasu et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 197205 (2014).
- [6] J. Nasu et al., Phys. Rev. B **92**, 115122 (2015).
- [7] J. Yoshitake et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 157203 (2016).
- [8] J. Nasu et al., Nat. Phys. **12**, 912 (2016).
- [9] J. Nasu et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 127204 (2017).
- [10] K. Nomura et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 026802 (2012).
- [11] H. Sumiyoshi and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 023602 (2013).
- [12] S.-H. Do, et al., Nat. Phys. **13** 1079 (2017).
- [13] Y. Kasahara et al., arXiv:1709.10286.

#### 著者紹介



#### なす じょうじ

1983年生まれ。山形県出身。2006年東北大学理学部卒業。2011年東北大学博士(理学)取得。その後、東北大学大学院理学研究科助教、日本学術振興会特別研究員を経て、2014年より現職。

# HOT TOPICS COOL NEWS

領域ウェブサイトトピックス欄から

この1年の領域の活動をピックアップしてご紹介します

2017

2017/Mar/25

橋坂 (C01)、秋保 (C01)、村木 (C01)、藤澤 (C01) らによるカイラル朝永ラッティンジャー流体の電荷・スピン波束の波形測定の実現が、Nature Physics 紙に掲載されました。この成果は、東工大 HP や、日刊工業新聞 (2017年3月14日朝刊 27面)、科学新聞 (2017年3月24日4面) で紹介されました。

2017/Apr/14

横山 (公募 D04) が平成 29 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞者に選ばれました。

2017/Jun/19

高三 (京大・博士2年)、大同 (京大・博士1年)、川上 (D01)、柳瀬 (公募 D02) の光誘起トポロジカル超伝導に関する論文が Phys. Rev. B 誌に掲載され、Nature Photonics の Research Highlights で紹介されました。本研究内容は、領域研究会 (H28年12月、仙台) で高三氏が発表し、ポスター賞・プレビュー賞に輝いたものです。

2017/Jun/22

トポロジカル結晶物質に関する佐藤昌 (D01) らの論文が Phys. Rev. B 誌の Editor's Suggestion に選ばれました。

2017/Jul/24

浅野 (A01) と川口 (公募 D04) が Europhysics Letters 誌の 2016 年レフリー賞に選ばれました。

2017/Aug/01

トポロジカル現象の冷却原子を用いた研究に関連する高橋 (公募 C01) らの論文が Phys. Rev. A 誌の Editor's Suggestion に選ばれました。

2017/Sep/11

川上 (D01)、小布施 (公募 D04) らによる開放量

子系における PT 対称性とトポロジカル相に関する論文が、Nature Physics 誌に掲載されました。また、この成果については、京都大学 HP や北海道大学 HP で紹介されました。

2017/Sep/12

川口 (公募 D04) が第 21 回久保亮五記念賞に選ばれました。

2017/Oct/27

米澤 (A01)、笠原 (A01) が第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞に選ばれました。

2017/Nov/20

松田 (A01)、永長 (B01) が、クラリベイト・アナリティクス (旧トムソン・ロイター) の選出する Highly cited researchers 2017 に選ばれました。物理学分野では 194 名のうち日本から 11 名が選出されています。

2017/Nov/28

モット絶縁体  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  に DC 電流で誘起されるディラック電子状の振舞と巨大反磁性の発見を報告する論文がサイエンス誌に発表されました。著者は前野 (A01)、米澤 (A01)、Sow (元 A01-PD, 元 Topo-Q-PD) からです。また、この成果については、京都大学 HP や日刊工業新聞で紹介されました。

2017/Dec/22

ディラック半金属  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  薄膜における量子ホール効果の発見を報告する打田 (公募 A01)・永長 (B01) らの論文が、Nature Communications に掲載されました。

2017/Dec/29

原子層鉄系超伝導体におけるディラック半金属相の発見についての佐藤 (B01) らの論文が、Phys. Rev. B 誌の Editor's Suggestion に選ばれました。

## 角度分解光電子分光を用いた ワイル磁性体の研究

近藤 猛 / 東京大学 物性研究所 准教授



こんどう・たけし

トポロジーをキーワードに、新奇量子相の開拓や、機能性材料の発掘が世界中で競って行われています。2017年に我々は、 $Mn_3Sn$  がワイル粒子を有する世界初の「ワイル磁性体」であることを発見しました [1]。空間反転対称性の破れに起因するワイル粒子は、2015年に非磁性物質のTaAsで最初に報告されていました [2]。一方、時間反転対称性の破れに起因するワイル粒子は、その探索が競って行われていたものの、実証できた例はありませんでした。その中、2015年に東大物性研の中辻グループより、 $Mn_3Sn$  が反強磁性体で初めて異常ホール効果を示すことが報告され [3]、この物質がワイル磁性体である可能性が理論的に示されました [4]。その理論的予想を受けて、角度分解光電子分光実験 (図1参照) と電子輸送実験の協力体制のもと、 $Mn_3Sn$  がワイル磁性体である証拠を掴み、世界に先駆けて報告するに至りました。

$Mn_3Sn$  は室温でも巨大な異常ホール効果を示すこと、また、10mTの微弱な外部磁場でワイル粒子に伴う10~1000テスラもの巨大な固体内仮想磁場を制御できることから、次世代の磁気メモリ材料として大きく期待できます。容易に制御可能なワイル粒子は、空間反転対称性の破れに起因するワイル物質では実現し得ません。 $Mn_3Sn$  が持つ特異的性質が見つかったことで、トポジカル物性を活かした機能性材料の実現可能性が飛躍的に高まり、この分野の基礎研究の意義がより明確となったと言えます。

「強相関」と「磁性」は表裏一体であり、ワイル粒子が容易に制御できる機能性は、強相関物質ならではの特性だと言えます。直接バンド観察を可能とする光電子分光を用いて、強相関トポジカル物理の更なる発展を目指します。

- [1] K. Kuroda et al., Nature Materials **16**, 1090 (2017).
- [2] Su-Yang Xu et al., Science **349**, 613 (2015).
- [3] S. Nakatsuji et al., Nature **527**, 212 (2015).
- [4] H. Yang et al., New J. Phys. **19**, 015008 (2017).

1978年福井県生まれ。2001年名古屋大学工学部卒業、2003年名古屋大学大学院博士前期課程修了、2005年名古屋大学大学院博士後期課程修了。2005年マサチューセッツ工科大学物理学科 日本学術振興会 特別研究員。2006年よりアイオワ州立大学エイムズ研究所 博士研究員。2011年より東京大学物性研究所 特任研究員。2014年より現職。

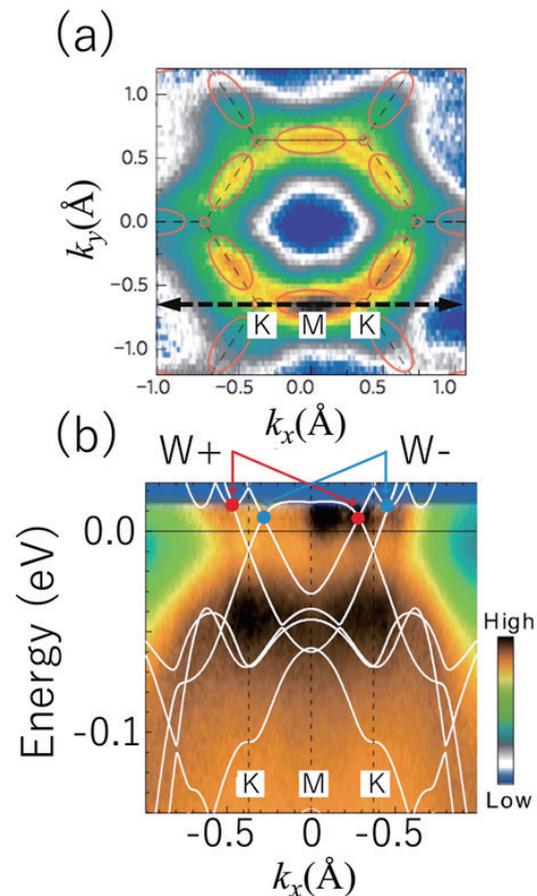


図1:  $Mn_3Sn$  の ARPES 結果 [1]。(a) フェルミ面。(b)(a) 中の矢印方向で観測したバンド分散。

### ルテニウム酸化物薄膜を用いたトポロジカル超伝導状態の解明

打田 正輝 / 東京大学 工学系研究科 助教

ルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  は代表的なスピン三重項超伝導体であり、中でもカイラル  $p$  波の超伝導対称性をもつと考えられることから精力的な研究が進められています。私は、本公募研究において、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導薄膜・接合の作製とそれを用いた超伝導状態の解明に取り組んでいます。最近、分子線エピタキシー法による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導薄膜の安定作製をもとに、その構造・欠陥・輸送特性について詳細な報告 [1] を行いましたので、簡単に内容を紹介したいと思います。

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導薄膜の作製は極めて難しいものであり、むしろ、現状の酸化物薄膜成長特有の課題を全てクリアすることで初めて可能になるといえると思います。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導は、不純物はもちろんのこと、組成にも非常に敏感であることがよく知られています。これは特に、各元素のフラックスを独立に制御する分子線エピタキシー法において大きな課題となります。本研究では、電子ビーム加熱により供給される Ru フラックスを正確に制御することにより、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導薄膜の安定作製に初めて成功し、Ru/Sr フラックス比をはじめとする作製条件の最適化を行いました。従来よりも精密なフラックス比の制御が可能になったことで、薄膜中のわずかな Ru 欠損を抑えることが超伝導発現に重要であることが明らかになりました。過去にパルスレーザー堆積法により作製された  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導薄膜 [2] と比較して、より転移温度が高く ( $T_c \sim 1.1\text{K}$ ) 格子欠陥もほぼ全くない薄膜が得られるようになりました。

本公募研究の成果である分子線エピタキシー法による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導薄膜の実現は、メゾスコピック系・ジョセフソン接合における位相敏感測定等をはじめとして、ルテニウム酸化物超伝導研究における新たな道を拓くと期待されます。

[1] M. Uchida et al., APL Materials **5**, 106108 (2017).

[2] Y. Krockenberger et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 082502 (2010).



うちだ・まさき

1985 年生まれ、愛知県出身。2007 年京都大学工学部卒業。2012 年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻にて博士(工学)取得。その後、コーネル大学海外特別研究員を経て、2013 年 9 月より現職。

## 強磁場および粒子相関の制御による 超流動ヘリウム3のトポロジカル量子臨界現象の探求

野村 竜司 / 東京工業大学 理学院 助教

超低温における液体状態の $^3\text{He}$ には、当然ながら格子欠陥は存在せず、また不純物は全て壁に吸着され影響しません。非常にクリーンな系であり、精密な実験と詳細な理論との整合性から、超流動 $^3\text{He}$ はスピン3重項p波状態にあることが確立しています。良く分かったバルク状態を基礎にして、トポロジカル表面状態の物理を調べることができることは、他の物質群と一線を画す利点です。

トポロジカル物質の典型として新たな注目を集めている超流動 $^3\text{He}$ ですが、我々はこのような指摘がされる前から、横波音響抵抗測定により表面束縛状態を観測していました [1]。この表面状態は、トポロジカル物質が示すバルク・エッジ対応により生じた、トポロジカル表面状態であることとなりました [2]。

通常の表面状態は乱れを強くすると、ゼロエネルギーで状態密度にギャップが生じるのが一般的です。一方で、トポロジカル表面状態は、対称性の破れが伴わない擾乱に対して頑強で、乱れを強くしてもギャップが開かないとされています。我々が音響抵抗測定で明らかにした、乱れが大きいときのゼロエネルギーの状態密度の増大は、このトポロジカルな頑強性を支持するものでした [3, 4]。また粒子と反粒子が等価であるというマヨラナ性の反映として、乱れによる散乱過程が特異なものになり、マヨラナ状態間の遷移が禁止されます。この特異な散乱過程のために、表面状態とバルク状態の間で強いレベル反発が生じ、表面状態密度が高エネルギー側でシャープにゼロに落ちるとされています [5]。この振る舞いも、我々の観測と良く合います [1]。超流動 $^3\text{He}$ のB相においては単に表面状態が観測されたというレベルを超えて、そのトポロジカルな性質やマヨラナ性の顕在化までもが観測されていると考えます。この表面マヨラナ状態に対する磁気効果や強相関効果を調べるのが、これからの課題です [6]。

[1] Y. Aoki et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 075301 (2005).

[2] Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys.: Cond. Matt. **24**, 343201 (2012).



のむら・りゅうじ

1968年、大阪府生まれ。1991年京都大学理学部卒業、1998年京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻博士課程単位取得退学。Northwestern大学研究員、2000年京都大学博士(理学)、東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻助手、2007年同助教、2016年東京工業大学理学院物理コース助教、現在に至る。

- [3] S. Murakawa et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 155301 (2009).  
 [4] S. Murakawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 013602 (2011).  
 [5] Y. Nagato, S. Higashitani, and K. Nagai, J. Low Temp. Phys. in press.  
 [6] K. Akiyama et al., J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 065001 (2015).

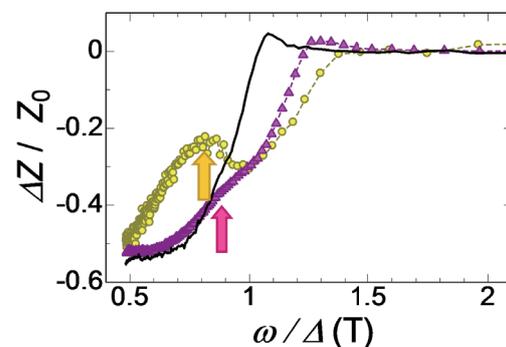


図1：横波音響抵抗のエネルギー依存性。表面の乱れが小さくなるに従い、マヨラナコーンが明確になることを反映して、矢印のように低エネルギーのピークが成長する。

## 超流動ヘリウム3のトポロジカル物性探索

白濱 圭也 / 慶應義塾大学 理工学部 教授

超流動ヘリウム3は、トポロジカル超流動体としてマヨラナ粒子やカイラルエッジ流の実験的検証が期待されています。私たちのグループでは、ヘリウム3のトポロジカル物性を探求するために、マイクロスケールのヘリウム容器や界面用プローブを微細加工により作成し、従来できなかった新しいタイプの実験を進めつつあります。本公募研究では、円盤状擬2次元ヘリウム3のカイラルエッジ流の検出を目指しています。

ヘリウム3-A相は時間反転対称性の破れたカイラル超流動体であり、カイラリティが巨視的スケールで一方方向を向く擬2次元系では、試料端を質量永久流が自発的に流れる「カイラルエッジ流」の存在が期待されます。連携研究者の提らは、質量流による角運動量が全クーパー対による $\hbar N/2$  ( $N$ は $^3\text{He}$ 全粒子数)に等しいことを理論的に示しており [1]、このオーダー $\hbar N/2$ の角運動量を円盤容器を張ったねじれ振動子のトルク測定から直接検証することを試みます。超流動コヒーレンス長の約20倍である幅 $1\ \mu\text{m}$ 、直径10ミリの円盤状空間を、無酸素銅を特殊な超精密旋盤加工で作成するのが本研究の最大の特徴です。この装置の製作は困難を極めました。全体のアSEMBルを終えてヘリウム4での動作テスト直前の段階にあり、18年前半中に慶応大学に準備中の核断熱消磁装置に搭載して実験を始める予定です。

また本公募研究とは別に、厚さ $50\ \mu\text{m}$ のシリコンウェハに幅 $1\text{-}2\ \mu\text{m}$ のマイクロスリットを貫通させて擬2次元ヘリウム3容器を作ることも東大ナノプラットの協力を得て進めており、その一例を写真で示します。スリット中に満たしたヘリウム3は両端がバルクとつながった擬2次元系であり、スリット方向への超音波実験から水島とSaulsが提案している新しいヒッグスモード [2] やトポロジカル性由来の物性探索を計画しています。また、コヒーレンス長と同程度の太さを持つ振動ワイヤーの開発も進めており、将来はこれを用いてB相自由表面のマヨラナ粒子に関する知見を得たいと考えています。



しらはま・けいや

1963年 小樽市生まれ。1985年 北海道大学理学部卒業、1990年 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。学振PD、パイロイト大学研究員、東京大学物性研究所助手を経て、1999年より慶應義塾大学理工学部助教授、2009年より教授。2018年3月まで学振学術システム研究センター数物系科学専門研究員を務めており、改革をお手伝いした新しい科研費制度がスタートしたことに安堵しています。

[1] Y. Tsutsumi and K. Machida, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2018) 074607.

[2] T. Mizushima and J. A. Sauls, arXiv:1801.02277



(左) 円盤容器の片側。1 $\ \mu\text{m}$ の段差がかすかに視認できる。  
(中) 1K回転冷凍機に装着した角運動量検出装置。  
(右) Siウェハに作成した2 $\ \mu\text{m}$ ×100 $\ \mu\text{m}$ 、深さ50 $\ \mu\text{m}$ のマイクロスリットアレイ。

## トポロジカル超伝導体へのスピン流注入と逆スピンホール効果

塩見 雄毅 / 東京大学 工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師

2017年の11月に特任講師として、学生時代を過ごした東京大学工学系研究科に戻ることとなりました。任期がついているので油断はできませんが、PIですし栄転となります。まったくもって本新学術領域のおかげです。6年近く前に東京大学で博士の学位をとり東北大学に異動してから、本新学術領域にこれまで育てて頂きました。多くの先生方に背中を押して頂きました。私のこれまでの研究人生がトポロジ科学に依存していることは疑う余地がありませんが、今後はトポロジ科学が私に依存することを目指して、頑張っ

て参りたいと思います。

本研究テーマでは、超伝導体におけるトポロジカルスピン流輸送の開拓を目指して研究を行っています。公募研究を開始した頃からスピントロニクス分野および超伝導研究分野の両方において、超伝導スピントロニクスに関して日に日に世の中の関心が高まっているように感じます。似たような研究を目指す研究者が増加していかなかで、どのように自分が存在感を発揮していくかが研究者として問われます。私はこれまで所属していた東北大学齊藤研究室の学生さんと共に公募研究期間が始まる前から超伝導スピントロニクスの研究を始めましたが、狙っていなかった方向性でも幾つか楽しい成果が出てきました。まだ内緒にしている成果も多くあるので、今後は溜まっている成果を思う存分世の中に発信していきたいと思っています。

研究開始当初は、実験技術の面で低温技術とスピン流計測技術の融合に不安を感じている部分がありましたが、一緒に研究してくれた学生さんの頑張りにより今はほぼ解消されました。色々な超伝導体に触れるなかで、超伝導の奥深さを日々感じています。物性物理学の世界で、超伝導に魅せられ超伝導の研究を継続して続けられる研究者が多いことも今なら自然に感じられます。もう少しで公募研究期間が終了しますが、超伝導そしてトポロジが私の研究人生のなかで今後も重要であり続けることは想像に難くありません。



しおみ・ゆうき

1985年三重県生まれ。2012年3月に東京大学工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。東北大学助教を経て、2017年11月より東京大学工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター特任講師。東北大学時代に仙台で寒さ耐性を身に着けたつもりでしたが、東京でも寒く感じるので気のせいだったようです。

## トポロジカル物質の局所磁場マッピング

野村 晋太郎 / 筑波大学 数理物質科学研究科 准教授

局所磁場マッピングはトポロジカル候補物質、超伝導体等の評価に広く適用可能な手法です。局所磁場マッピングから、二次元面内の電流密度の分布、磁性体の磁化の分布、超伝導体まわりの磁束の分布などを知ることができます。これは、電子の固有状態の運動量とスピンの向きとの関係が固定されるスピン-運動量ロッキング、トポロジカル端状態などトポロジカル物質に固有な現象を調べるための有力な手法のひとつです。

局所磁場マッピングにはさまざまな手法があり、それぞれ磁場感度、空間分解能、適用条件等に特色を持っています。この公募研究では、まず、Nb 弱結合走査型ナノ SQUID 顕微鏡を用いた研究 [1, 2] を進め、平行してダイヤモンド窒素不純物-欠陥 (NV) センター局所磁場測定システムを用いた研究 [3] を進めています。

走査型 SQUID 顕微鏡は磁束の変化を直接測定する最も高感度の測定方法として知られています。私たちは局所磁場マッピングのために、SQUID のループサイズ  $1 \mu\text{m}$  の弱結合接合をもつナノ SQUID プロブを開発し、電流分布、超伝導体周りの磁束の分布を調べました [1, 2]。集束イオンビームでナノサイズの構造を作製可能な超伝導体として注目を集めているタングステンカーバイド膜を対象に、磁束の空間分布から超伝導特性の評価を行いました。走査型 SQUID 顕微鏡は高感度である一方、空間分解能は SQUID ループサイズで制限され、適用温度も SQUID の超伝導が保たれる低温に限られます。そこで、広い実験条件下でトポロジカル候補物質を評価するためにダイヤモンド NV センターを用いた局所磁場測定システムを構築しました。これは、ダイヤモンド NV センターからの発光の電子スピン共鳴から磁場を検出するものです。常温から極低温の広い温度範囲で動作可能であること、数 nm の空間分解能が見込まれること等の大きな特色があります。私たちは冷却高速 sCMOS カメラの電子シャッターによる高速ゲーティングを活用して顕微鏡の広い視野範囲の磁場イメージングを一度に得るシステムの開発を進めています (図 1)。ヘリウムクライオスタット中のトポロジカル候補物質のもつ磁化をこのシステムを用



のむら・しんたろう

東京都生まれ。1989 年東京大学理学部物理学科卒、1994 年東京大学理学系研究科物理学専攻 博士 (理学)、1994 年理化学研究所フロンティア研究員、1996 年同半導体工学研究室研究員、1999 年筑波大学物理学系助教授を経て、現在に至る。

いて広い温度範囲での測定を現在進めています。新学術領域の広いネットワークを活用させていただいて、このような研究を行えることに感謝しています。

- [1] Y. Shibata et al., *Sci. Rep.* **5**, 15097 (2015).
- [2] Y. Shibata et al., *Supercond. Sci. Technol.* **29**, 104004 (2016).
- [3] Y. Miura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 04CK03 (2017).

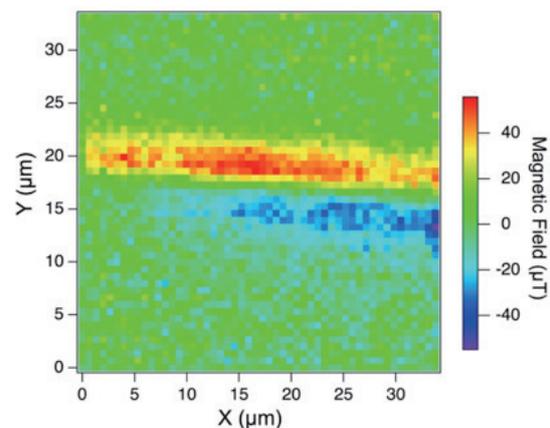


図 1: ダイヤモンド NV センター局所磁場測定システムを用いて得た細線を流れる電流の作る磁場分布のマッピング。

## 強相関ディラック・ワイル電子系におけるトポロジカル電子相と異常磁気伝導の開拓

藤岡 淳 / 東京大学 大学院工学系研究科 講師

強相関ワイル・ディラック電子の新しい量子物性を探索することをテーマとして研究を行っております。パイロクロア型やペロブスカイト型構造のイリジウム酸化物を対象として、超高圧合成法やフラックス法を用いた物質開発、磁気伝導測定、赤外-紫外精密分光などを主な手法として研究を進めています。

トポロジカル半金属の研究は  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  や  $\text{TaAs}$  などの化合物半導体や金属を中心にこの数年で急速に研究が進んでおり、超高移動度電子、巨大磁気抵抗効果、カイラル異常など相対論的電子の特徴がよく表れている現象が数多く報告されています。多くの研究は独立粒子近似がよく成り立つ物質を対象としていますが、電子間相互作用の効果が顕著になった強相関効果にも関心が集まってきています。私自身は遷移金属酸化物の磁気・軌道秩序やモット転移を専門にしてきた経緯があり、ディラック電子やワイル電子のモット物理や磁性との関連に興味を持って研究を行っています。

パイロクロア型イリジウム酸化物はモット転移を示す物質として10年以上前から知られていますが、最近、強相関ワイル電子のモット転移という視点から興味を持たれている物質です [1]。私たちのグループで超高圧合成によって組成を制御した試料を合成して輸送特性や電荷ダイナミクスを調べたところ、モット転移近傍でワイル半金属に特徴的なゼロギャップ状態が生じる事や反強磁性磁壁に金属的なエッジ状態が現れる事が明らかになりました。最近では単結晶を用いた磁場中での電子相探索やモット臨界性について研究を進めています。磁気抵抗やホール効果などから構築した温度、圧力、磁場相図に基づくと、磁場中では磁気対称性に応じて異なる複数のワイル半金属相が生じており、モット転移近傍で相競合が生じているらしいことが分かってきました [2]。特に、ワイル半金属相は磁場中では相としてある程度の領域に広がっているものの、モット絶縁体相や常磁性金属相と比べると相図中のごく狭い領域に限定されている傾向にあるようです。このようなモット臨界性の特徴は強相関ワイル電子の一側面をあらわしたものだと考えていますが、超高移動度やカイラル異常などの相対論的電子の特徴がどのような形で強相関ワイル半金属で見られるかが今後の課題だと考えています。

[1] X. Wan et al., Phys. Rev. B. **83**, 205101 (2011).

[2] K. Ueda, J. Fujioka, et al., Nature Commun. **8**, 15515(2017).



ふじおか・じゅん

1982年 大阪府生まれ。2004年 東京大学工学部物理工学科卒業。2008年(9月) 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了(工学)取得。その後、日本学術振興会特別研究員、科学技術振興機構 ERATO マルチフェロイクスプロジェクト研究員、2011年 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻助教を経て、2013年より現職。科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 さきがけ領域研究員(2015年12月より)兼務。

## Twisted ファンデルワールス接合における量子輸送現象

増淵 寛 / 東京大学 生産技術研究所 特任講師

二次元結晶を機械的に剥離し、結晶方位をずらして重ねた Twisted ファンデルワールス接合構造の作製と量子輸送現象の解明を進めています。ファンデルワールス接合は、界面における原子拡散がなく、格子整合という制約から解放されるため、既存の結晶成長法では考えられなかった結晶方位角のズレ $\theta$ という自由度が導入でき、かつ、絶縁体・ディラック電子・トポロジカル絶縁体・超伝導・ワイル半金属といった多様な機能性材料の組み合わせが実現可能である点が魅力です。

最近では、高移動度 3 層グラフェン素子において、面内磁場により 2 層 (1 層) グラフェン様バンド間の混成が生じることを、ランダウ準位反交差を通して示すことができました [1]。Twisted 角を導入した 2 層 / 1 層グラフェンにおいて、モアレ超格子の生成によるサブバンド形成・および Hofstadter's Butterfly を観測しました。Cambridge 大学に試料提供を行い、グラフェン/hBN Moiré 超格子における端電流の可視化を行いました [2]。本領域への参画をきっかけに、B01 班柏谷先生との共同研究として WTe<sub>2</sub> 素子の作製を行いました [3]。

一方、機械的剥離法によるファンデルワールス接合の作製工程は、2005 年のグラフェン単離以来、単調な光学顕微鏡観察と、職人芸的な転写作業に依存する状況が続いていましたが、最近になり、一連の工程をロボットにより自動化することに成功しました [4]。本装置により、窒素雰囲気中で、任意の二次元結晶を、Twist 角を導入しつつ、8 時間で最大 29 回積層することが可能になりました。従来の手作業に比べると 2 桁程度、作業効率が向上し、海外他研究機関に先駆けて新規構造を試作する準備が整いました。今後は、ファンデルワールス接合構造の提供も行っていきたいと考えています。

[1] Y. Asakawa, S. Masubuchi, et al., PRL **119**, 186802 (2017).

[2] Z. Dou, S. Masubuchi, et al., arXiv:1711.08005.

[3] K. Tsumura, et al., (in press).

[4] S. Masubuchi et al., (under review).



ますぶち・さとる

1982 年、神奈川県生まれ。2005 年京都大学工学部卒業、2010 年東京大学工学系研究科物理工学専攻博士後期課程修了、2010 年東京大学生産技術研究所特任助教、2016 年より東京大学生産技術研究所特任講師。

機械学習・深層学習の勉強を始めました。昨年生まれた息子も、転んで床に頭をぶつけたりしながら、強化学習に励んでいます。

## トポロジカル結晶絶縁体の表面状態観測とスピン注入

秋山了太 / 東京大学 理学系研究科 助教

本領域の公募班に参加させて頂き早いもので2年が経とうとしています。本領域では非常に活発に共同研究が推進されており、私も様々な方々からありがたくも機会を頂きコラボさせて頂いております。

そのうちの一つを今回で紹介します。これは筑波大・東大との共同研究で、MBEにより作製したFe/SnTe(001)/基板の構造を持つ試料(図1(a),(b))にマイクロ波を照射し、Fe層の磁化の歳差運動によって生み出されたスピン流がSnTeに注入されたというものです。結果は図1(c),(d)に示す通りで、スピン流は逆スピンホール効果の形で観測され、 $H_{r,H}$ におけるピークがスピン注入を示しています。起電力がFeの磁気異方性を反映していることや温度・磁場角度依存性などから、確かにスピン流由来の信号だと明らかになりました。スピンホール角は0.013程度と見積られ、この値はSiやGaAsよりも非常に大きく、 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ と同程度だと分かりました。トポロジカル結晶絶縁体へのスピン注入としては初めての実証であり、今後試料の改善によってさらなる高効率化を目指します。

[1] Shinobu Ohya, Akiyori Yamamoto, Tomonari Yamaguchi, Ryo Ishikawa, Ryota Akiyama et al., Phys.Rev. B **96**, 094424 (2017).



あきやま・りょうた

1982年、東京都生まれ。日本学術振興会特別研究員DC2を経て2012年東京大学工学系研究科博士課程修了、博士(工学)。同年筑波大学数理物質系助教、2014年12月より現職。トポロジカル絶縁体や関連する原子層物質を中心に電気伝導測定や光電子分光をメインに研究しています。趣味はカメラ、ピアノなどです。ベートーヴェン・ワーグナーが大好きです。

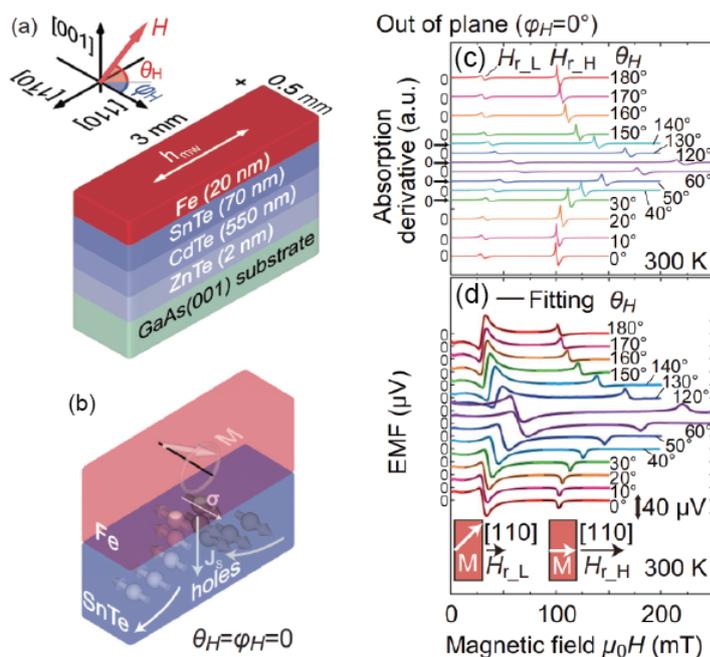


図1. (a),(b) 試料と測定概要図 (c) マイクロ波吸収微分ピーク (d) 測定起電力 [1]

## 超伝導体 / 並列二重ナノ細線接合でのクーパー対分離観測とマヨラナ粒子の探索

松尾 貞茂 / 東京大学 工学系研究科 助教

マヨラナ粒子とは自身とその反粒子とが等しくなる性質をもつ粒子のことで、非可換統計に従うと予想されています。最近このマヨラナ粒子が固体デバイスでも実現できると理論的に提案されました。このため基礎物理としてはもちろん、トポロジカル量子コンピューティングへの応用としても重要性が認識され、研究が活発に行われています。マヨラナ粒子実現の一つの手法として単一ナノ細線と超伝導体との接合が提案され、マヨラナ粒子の兆候が報告されています [1]。しかしこの手法では細線に垂直な磁場が必要であり、磁場によって超伝導ギャップが小さくなるためマヨラナ粒子の重要な物性が失われる可能性があるとして指摘されてきました。

この磁場を用いたマヨラナ粒子実現手法の不利な点を解消するため、私は最近提案された超伝導体と並列二重ナノ細線の接合において無磁場で実現されるマヨラナ粒子に注目しています。この提案 [2] では超伝導体から二つのナノ細線へとクーパー対が分離する現象（クーパー対分離現象）が、それぞれの細線への局所的なクーパー対の染み出しよりも大きくなる必要があります。そのためまずはクーパー対分離を超伝導体二重細線接合デバイスで実証すること、また分離効率を大きくすることが必要になります。これまでに私たちは超伝導体であるアルミニウムと並列二重 InAs ナノ細線との接合デバイスの微細加工技術を確立し、それぞれの細線にできた量子ドットを介してのクーパー対分離の観測に成功しました。最近では、図に示す二重ナノ細線を介したジョセフソン接合型デバイスの作製と、それぞれのナノ細線の独立なゲート制御にも成功しています。さらに、その電子輸送特性から超伝導体電極間を電子が弾道的に輸送されていることがわかりました。今後はこれまでに報告例のない、弾道的な電子輸送領域にある超伝導接合でのクーパー対分離現象の観測を目指してこのデバイスの測定を継続し、将来的にはこの超伝導体と並列二重ナノ細線の接合を用いてマヨラナ粒子の実現を目指していきたいと思っています。



まつお・さだしげ

1987 年生まれ 大阪府出身。  
2009 年 京都大学 卒業。  
2014 年 京都大学 博士 (理学) 取得。  
その後、大阪大学理学部特任  
研究員を経て、2014 年より現  
在に至る。趣味は読書と長女を  
抱っこすること。

- [1] R.M.Lutchyn et al., arXiv:1707.04899 (2017)  
[2] J.Klinovaja and D. Loss, Phys. Rev. B **90**.045118 (2014)

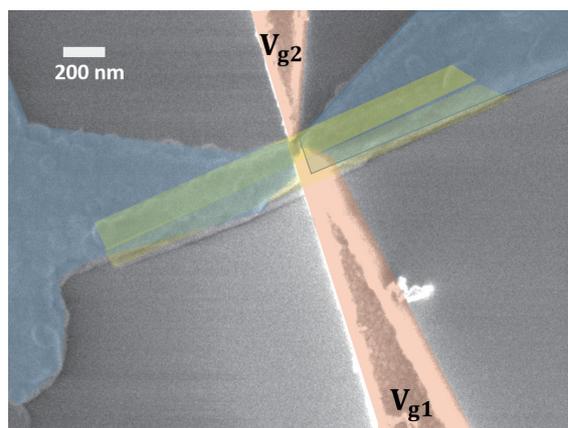


図. 並列二重 InAs ナノ細線 (黄色) と超伝導体アルミニウム (青色) のジョセフソン接合の SEM 写真。ナノ細線制御のためのゲート電極が隣接されている。

## トポロジカルポンピング現象の冷却原子を用いた新展開

高橋 義朗 / 京都大学 理学研究科 教授

私の研究室では、レーザー冷却された中性原子を用いた研究を行っています。これまでは、主に、強相関量子多体系の量子シミュレーションを行ってきましたが、最近、トポロジカル量子物理、特に、トポロジカルチャージポンピングの研究を行っています。このトポロジカルチャージポンピングという現象は、1983年に、サウレスが一次元格子上の電子気体系においてポテンシャルを周期的に断熱変化させたとき、一周後の電荷の移動量が量子化され、それがトポロジカル不変量であることを最初に見出したものです。これまでいかなる物理系においても実現されてこなかったのですが、我々は二つの波長を重ね合わせた光超格子系の制御性の高さを最大限に駆使して、そのパラメーターを断熱的に変化させることで、超低温のフェルミ原子系を用いて世界で初めてサウレスの提唱したトポロジカルチャージポンピングを実現することに成功しました ([1], 図1)。

本新学術領域には、公募研究グループとして参画させて頂いております。極めて制御性の高い光格子中の冷却原子系を対象とすることにより、他の系では実現困難な物質のトポロジカル状態や現象を実現でき、新たな可能性を創造できると期待しています。これまで領域内の方たちからいろいろな有益なアドバイスを頂き研究を進めることができました。特に、トポロジカルポンピング現象における、乱れポテンシャルの影響、および粒子間の相互作用の効果、さらにその協働効果についてこれまで研究を進めることができました。今後実験をさらに進めることで、新しい知見を得られることを期待しています。

[1] S. Nakajima, et al, Nature Physics, **12**, 296(2016)



たかはし・よしろう

1963年群馬県生まれ。1986年 京都大学理学部卒業、1988年 京都大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了、1990年 京都大学大学院理学研究科物理学専攻博士後期課程退学。1992年 博士号取得（京都大学博士（理学））。1990年より 京都大学大学院理学部助教、1994年より 京都大学大学院理学部講師、2000年 京都大学大学院理学研究科助教授を経て、2007年より現職。趣味は音楽鑑賞。

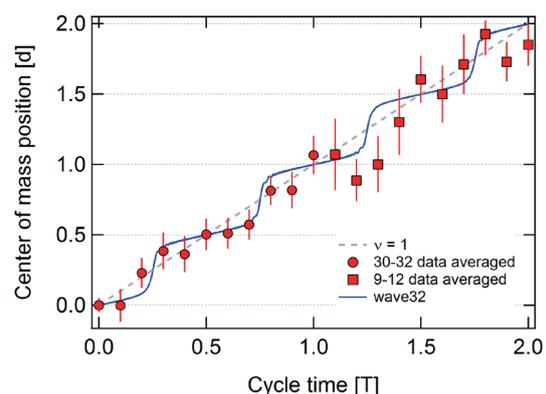


図1. サウレスポンプの実験。1周期T後に1格子定数dだけ原子集団の重心位置が移動していることがわかる。この傾きからチャーン数を決定することができる。

## 乱れや相互作用のある系のトポロジカル不変量

桂 法称 / 東京大学 理学系研究科 准教授

トポロジカル絶縁体に代表されるトポロジカル物質は、エネルギーギャップが閉じない限り不変なトポロジカル数によって特徴づけられます。このトポロジカル数は、系に並進対称性がある場合には、例えば Chern 数のように、Bloch 関数により定義される曲率の波数空間における積分として表現されます。一方で、系に乱れや相互作用がある場合には、どのようにトポロジカル数を定義するかは自明ではありません。

しかし、我々は、乱れのあるトポロジカル絶縁体・超伝導体に対しても有効なトポロジカル不変量の表式を導入することに成功しました [1, 2]。乱れがある場合は、波数が良い量子数ではなくなるため、波数空間における曲率などを導入することができませんが、代わりに実空間における演算子の交換関係などを導入して、トポロジカル不変量を定義します。このやり方は、非可換幾何という数学の分野での手法を用いたものであるため、一見小難しいと思われるかもしれませんが、実際には、ある演算子（2つの射影演算子の差により定義される）の固有値の縮退度を調べることに帰着するため、数値計算で具体的に計算できる、「実用性」のあるものです（例えば図1）。トポロジカル不変量の表式は、トポロジカルな「周期表」のエントリーのそれぞれに対して得られていますが、特に2次元・3次元のクラス AII に属するモデルに適用し、乱れのある場合にもこの手法によりトポロジカル絶縁体相を、Z2 不変量により特徴づけられることを確認しました [3]。

相互作用のある系のトポロジカル不変量による特徴づけにも、興味をもって研究を行っています。論文 [4] では、1次元のトポロジカル超伝導体 (Kitaev 鎖) において、境界条件を周期的から反周期的に変えた場合に起こる準位交差の回数の偶奇により、トポロジカル相と自明な相を区別できることを明らかにしました。この特徴付けは、乱れや相互作用の有無にかかわらず有効で、物理的にはゼロモードの存在と関係します。



かつら・ほうしょう

2004年東京大学理学部物理学  
科卒業、2008年同大学院工学  
系研究科物理工学専攻 博士課程  
修了、博士(工学)取得。その後、  
理化学研究所、カリフォルニア  
大学サンタバーバラ校にて研究  
員、学習院大学講師・准教授を  
経て、2014年より現在に至る。  
趣味・特技はカラオケ。

- [1] H. Katsura and T. Koma, J. Math. Phys. **57**, 021903 (2016).
- [2] H. Katsura and T. Koma, arXiv:1611.01928, Preprint (2016).
- [3] Y. Akagi, H. Katsura, and T. Koma, JPSJ **86**, 123710 (2017).
- [4] K. Kawabata, R. Kobayashi, N. Wu, and H. Katsura, Phys. Rev. B **95**, 195140 (2017).

$$\nu = \dim \ker(A - 1) \pmod{2}$$

$$A = P_F - D_a P_F D_a$$

図1. 3次元クラス AII に対する Z2 トポロジカル不変量。  
 $P_F$  は、Fermi エネルギー以下の準位への射影演算子、  
 $D_a$  は実空間で定義される Dirac 演算子。

## スピン軌道相互作用による異方的トポロジカル超伝導

柳瀬陽一 / 京都大学 理学研究科 准教授

—はじめに—

そもそもなぜ自然界にトポロジカル超伝導は希少な  
のか、ということをあらためて考えてみましょう。その  
理由は単純で、特殊なバンドトポロジジーを持たない  
S波超伝導体はトポロジカルに自明だからです。現在  
知られている超伝導体の大半がそれに該当することは  
言うまでもありません。一方、強相関電子系にはしば  
しば異方的（=非S波）超伝導が発現しますが、それ  
もまた多くの場合トポロジカル超伝導になりません。  
ほとんどの異方的超伝導体はギャップレスだからで  
す。

—ギャップレス超伝導をトポロジカルにする—

一方、ギャップレスの超伝導体がトポロジカルに全  
く自明なわけではなく、例えば2次元d波超伝導体で  
はノード構造が非自明なトポロジジーで特徴づけられま  
す [1]。その低エネルギー励起は線形分散を持つので、  
ボゴリウボフ準粒子のディラック系とみなせます。そ  
もそも、ディラック電子系にスピン軌道相互作用で  
ギャップを開ければトポロジカル絶縁体になる、とい  
うのが Haldane や Kane-Mele のアイデアでした。と  
いうことは、ギャップレス超伝導体にギャップを開け  
ればトポロジカルになるかもしれません。しかし、ディ  
ラック電子系と違い、ディラック超伝導体にギャップ  
を開けることは難しいのです。

大同氏は、空間反転対称性が欠如した系ではスピン  
軌道相互作用とスピン分極によりギャップが開くとい  
う一般的な性質を発見し、そのトポロジカル数を計算  
する一般公式を得ました [2,3]。その結果から、ギャッ  
プレスのスピナー重項超伝導体は一般にトポロジカル  
になることが分かりました (図1)。これまではスピ  
ン三重項超伝導がバルクトポロジカル超伝導の主要な  
候補であったことを考えると、世の中に数多くあるス  
ピナー重項超伝導が候補になることは良いニュースで  
す。また、高三氏はフロケ理論に基づいて、レーザー  
照射化の非平衡超伝導が同様のメカニズムでトポロジ  
カル超伝導になることを発見しました [4]。

2次元人工超伝導体の開発は近年著しく、強相関電子  
系でもその成功例が報告されるようになりました。大



やなせ・よういち

1973年福岡県生まれ。  
2000年京都大学理学研究科物  
理学・宇宙物理学専攻博士課程  
中退。2001年論文博士(理学)。  
2000年より東京大学理学系研  
究科助手、2007年より同助教、  
2009年新潟大学理学部准教授  
を経て、2015年より現職。か  
つての趣味は、オリエンテーリ  
ング、自転車、トレイルランニ  
ングなど。現在は子育てと奮闘  
する日々。

同氏・高三氏の理論研究はトポロジカル超伝導の新しい  
プラットフォームの登場を示唆するものです。

- [1] M. Sato et. al., Phys. Rev. B **83**, 224511 (2011).  
[2] A. Daido and Y. Yanase, Phys. Rev. B **94**, 054519  
(2016).  
[3] A. Daido and Y. Yanase, Phys. Rev. B **95**, 134507  
(2017).  
[4] K. Takasan, A. Daido, N. Kawakami, and Y. Yanase,  
Phys. Rev. B **95**, 134508 (2017).

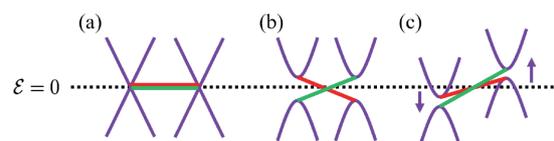


図1. バルク状態(紫)とエッジ状態(赤と緑)の概念図 [3]。(a)  
ギャップレスの異方的超伝導相。(b) ギャップが開いたト  
ポロジカル超伝導相。(c) 傾斜磁場下のギャップレスト  
ポロジカル相。

### バルクで観測できる量を探して ～新型トポロジカル物質の性質の解明～

永井 佑紀 / 日本原子力研究開発機構 研究員

私は「第一原理強束縛模型によるトポロジカル物質のバルク観測量提案」というテーマで公募研究の代表として本新学術領域に参加させていただいております。公募研究の開始の年度である2016年度においては、三次元トポロジカル超伝導体候補物質である $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の物性を理論的に調べてきました。この物質の有効ハミルトニアンは質量のあるディラック粒子が超伝導化したハミルトニアンとしてみなすことができ、その結果、比熱や核磁気緩和率にディラック系由来の新奇な物性が現れます [1-2]。フェルミエネルギーの大きさによって相対論的か非相対論的かが移り変わる為、Cuのドーピング依存性等で物性が変化することになります。

また、2016年11月から1年間、マサチューセッツ工科大学のLiang Fu教授のグループに客員研究員として参加してきました。Fu教授は才気溢れる若手リーダーという雰囲気を持ち、彼が毎回閃いてくる発想にはいつも驚かされてばかりでした。Fu教授との共同研究の一つとして、2017年度は「非エルミートトポロジカル理論」について研究を行いました。非エルミートと言えば開放系等を思い浮かべる方が多いと思います。彼の提案はそれとは異なり、ハミルトニアンと自己エネルギーを足したものを新しいハミルトニアンとみなすことで、準粒子寿命を理論に取り込み、有限温度や相互作用のある系でのトポロジーの理論を建設するという試みです。非エルミートハミルトニアンの場合、エルミートハミルトニアンには現れない「例外点(行列が対角化できない点)」が運動量空間に存在しうることになります。特に、ディラック点を持つ2バンドハミルトニアンにバンドごとに異なる準粒子寿命を導入すると、ディラック点が二つの例外点に分裂し、バルクにフェルミアークが現れます [3]。彼との共同研究として、私は、d波混成を持つ周期的アンダーソン模型において、相互作用によってバルクフェルミアークが現れることを、動的平均場理論によって明らかにすることができました(図1)[4]。自己エネルギーを含めた非エルミートハミルトニアンという概念により、重い電子系やd波超伝導体などの様々な強相関系物質をトポロジカル物質と見なせるようになり、それ



ながい・ゆうき

らの性質はバルクで観測可能であると言えることになります。この概念は非常に面白いため、引き続き色々調べたいと思います。

1982年北海道生まれ。2005年北海道大学工学部卒業、2007年東京大学理学系研究科修士課程修了、2010年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。2007年理化学研究所ジュニアリサーチアソシエイト、2008年日本学術振興会特別研究員(DC2)を経て、2010年より現職。2016年11月-2017年10月までMIT客員研究員。MITでの一年はとても刺激的でした。

ら

- [1] S. Yonezawa, et al, Nat. Phys. **13**, 123–126 (2017)
- [2] YN, Y. Ota, Phys. Rev. B **94** 134516 (2016)
- [3] V. Kozii and L. Fu, arXiv:1708.05841
- [4] YN, Y. Qi, and L. Fu in preparation

WEB 非公開

図1 (ネット公開不可). d波混成を持つ周期的アンダーソン模型でのバルクフェルミアーク [4]

## 第一原理計算を用いた新奇トポロジカル物質の探索

山内 邦彦 / 大阪大学 産業科学研究所 助教

第一原理電子状態計算（いわゆる“バンド計算”）を専門にしています。これまで遷移金属酸化物の磁性・強誘電性についての研究を主なテーマとし、様々な物性について理論研究を行ってきました。本新学術領域では、B01 佐藤宇史実験班との共同研究を密に行っており、ワイル半金属・ディラック半金属・人口多層膜など新しいタイプのトポロジカル物質における電子状態の理論研究を進めています。角度分解光電子分光測定で得られた電子構造とバンド計算結果を比較すると、フェルミ準位近傍の電子構造がどのような原子軌道成分をもつか明らかになり、トポロジカル物性の微視的起源について議論することができます。最近では、カイラル結晶構造をもつワイル半金属 Te の電子構造を計算し、図に示すように、実験結果と非常に良い一致を得ました [1]。トポロジカル物性を明らかにするためには結晶と表面の両方の電子状態を調べる必要がありますが、第一原理計算では、ワニエ関数などを用いてバルク結晶でのトポロジカル不変量を計算することができます。また、スラブ構造モデルを用いることで、トポロジカル物質に特有の表面状態も計算することができます。これらを実験結果と照らし合わせると、複雑な電子構造のなかで何が重要であるかが見えてきます。

また、実験に先駆けて、計算機シミュレーションで新しいトポロジカル物質を探索しています。私が興味をもっている遷移金属酸化物の様々な結晶歪みを利用したトポロジカル物質設計を試みて、強誘電歪みでトポロジカル転移を生じる酸化物ヘテロ構造の組み合わせを発見しました [2]。現在は、ディラック・コーン制御を目的として、トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  を基にした人口多層膜を設計しています。これらのシミュレーション結果が実験班にフィードバックされて新物質探索に貢献できるように、日々研究を進めています。

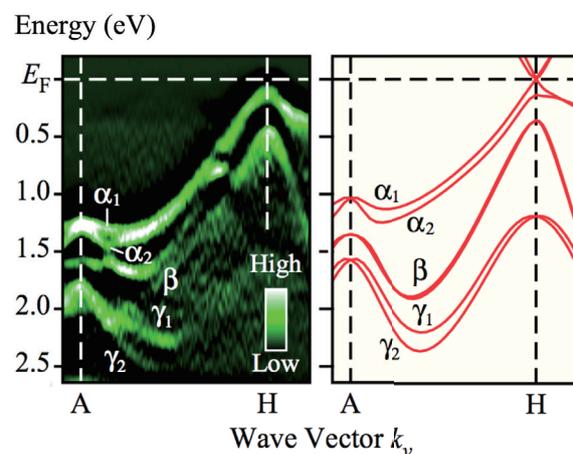
[1] “Band splitting and Weyl nodes in trigonal tellurium studied by angle-resolved photoemission spectroscopy and density functional theory”, K. Nakayama, et al., Phys. Rev. B **95**, 125204 (2017).



やまうち・くにひこ

1977年、奈良県生まれ。大阪大学理学研究科博士後期課程修了：現在、大阪大学産業科学研究所小口多美夫研究室助教。2006年から4年間ポスドクとしてイタリアに研究滞在した。現地での研究生活が気に入っており、今年2回程度イタリアを訪れている。

[2] “Topological phase transition coupled with spin-valley physics in ferroelectric oxide heterostructures”, K. Yamauchi, P. Barone, and S. Picozzi, Phys. Rev. B **95**, 035146 (2017).



図：Teの電子構造についての角度分解光電子分光実験の結果（左）とバンド計算結果（右）の比較。

## パリティ - 時間反転対称な開放量子光学系における トポロジカル相と振幅制御

小布施 秀明 / 北海道大学 工学研究院 助教

光学系の実験において、光の実験系からの意図せぬ流出は、悩ましい問題であり、通常高精度な実験結果を得るためには、光の流出を極力抑える必要があります。しかし、光の流出は光学系において厄介者以外の何者でもないのでしょうか？ 答えはノー。実は、光の流出を（可能であれば流入も）巧みに制御すると、「開放系におけるパリティ - 時間反転対称性 (PT 対称性)」に由来する奇妙な性質が発現し、光をより効果的に利用することが可能になります。我々は「開放系における PT 対称性」と「トポロジカル相」を「量子ウォーク」と呼ばれる量子系に対して調べることにより、光の振幅を制御できることを理論的に示し、さらに実験により実証しました。

この理論・実験研究で鍵となったのは、量子ウォークです。量子ウォークは、量子情報・量子計算の研究分野で発達し、量子アルゴリズムを実装するための量子状態の（通常はユニタリーな）変換を規定します。現在では、光学系・冷却原子・トラップイオンなど様々な系で実験が行われていますが、これらはいわゆる人工量子系であるため、系の詳細なパラメーター制御が可能です。そのため、量子ウォークは量子シミュレーターとして用いることもでき、トポロジカル相に起因するエッジ状態の実空間観測が行われてきました。今回の研究では、量子状態の非ユニタリーな変換を考えることにより、系と環境との間で粒子の流入がある PT 対称な量子ウォークを構築し [1,2]、さらにこの開放系におけるトポロジカル相を理論的に調べました。その結果、エッジ状態のみに PT 対称性の破れが生じ、対応する局在モードの確率振幅が時間とともに増幅することが分かりました。これにより、特定の位置の光の振幅を制御することができます。この理論結果をふまえ、エンタングルしたフォトン対を用いた量子ウォークにおいて、フォトンの環境への流出を制御した実験系を実際に構築することにより、我々の理論予測が正しいことを実験により実証しました [4]。この研究を基に、開放系におけるトポロジカル相や PT 対称な量子系に関する研究を発展させていきたいと思えます。



おぶせ・ひであき

1977 年生まれ。長野県生まれ。2005 年北海道大学大学院 工学研究科 量子物理工学専攻 博士後期課程修了。理化学研究所 古崎物性理論研究室（基礎科学特別研究員）、京都大学大学院 理学研究科 凝縮系理論グループ（学振特別研究員）、ドイツ・カールスルーエ工科大学ナノテクノロジー研究所（学振海外特別研究員）にて、トポロジカル絶縁体、アンダーソン転移、量子ウォークなどの理論研究に従事。2012 年 11 月より現職。

- [1] K. Mochizuki, D. Kim, and H. Obuse, Phys. Rev. A **93**, 062116 (2016).
- [2] K. Mochizuki and H. Obuse, Interdisciplinary Information Sciences **23**, **95** (2017).
- [3] D. Kim, K. Mochizuki, K. Kawakami, and H. Obuse, arXiv1609.09650.
- [4] L. Xiao, X. Zhan, Z.H. Bian, K.K. Wang, X.Zhang, X.P.Wang, J.Li, K. Mochizuki, D. Kim, N. Kawakami, W. Yi, H. Obuse, B.C. Sanders, and P. Xue, Nature Physic, **13**, 1117 (2017).
- [5] T. Endo, N. Konno, H. Obuse, and E. Segawa, J. Phys. A **50**, 455302 (2017).

## ワイル超伝導相の探索とデバイス提案

横山 毅人 / 東京工業大学 理工学研究科 助教

学生の頃は主に超伝導、特にメソスコピック超伝導の研究をしていました。例えば、強磁性体 / 超伝導体接合ではスピン空間の対称性の破れによって超伝導体がスピンシングレットであっても、強磁性体中に奇周波数（時間について奇関数の）トリプレットのクーパー対が現れるのですが、このクーパー対の性質を調べるのが力を入っていたテーマの一つです。また、超伝導体の渦糸状態は並進対称性が破れた系とも言えますが、この対称性の破れによって新たに誘起された超伝導相関を明らかにし、渦糸系での電子状態との関係性を明らかにしました。東京大学にポスドクとして移ってからは、トポロジカル絶縁体の研究に注力し始めました。特に、トポロジカル絶縁体に強磁性体を接合した系におけるスピントロニクス効果や、超伝導体と接合した時に現れるマヨラナフェルミオンの性質を調べてきました。東京工業大学に助教として移ってからは以上のテーマを発展させつつ、新しい分野にも挑戦しようと日々考えています。

ワイル超伝導相とは超伝導ギャップがある運動量においてゼロになりかつバンドが縮退していない相のことであり、その運動量の近傍で準粒子はワイル方程式に従います。本研究ではワイル超伝導相がトポロジカル相転移に付随してどのように現れるかを明らかにし、相図を作成します。またワイル超伝導体のワイル準粒子に起因した物性を明らかにし、特にワイル半金属との違いを明らかにします。さらに得られた結果をもとにデバイス提案を行います。

最近、3次元の鏡映対称性のある時間反転対称性を破る超伝導体においてパラメータの変化に伴いトポロジカル相転移が起こる時、一般的にワイル超伝導相が（2つの超伝導相の間に）現れることを明らかにしました [1]。この結果は物質の詳細によらないもので、今後ワイル超伝導の探索に役立つものと思います。

[1] R. Okugawa and T. Yokoyama, arXiv:1709.01101



よこやま・たけひと

2008年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了、2008年日本学術振興会特別研究員PD(名古屋大学)、2009年日本学術振興会特別研究員PD(東京大学)、2010年より東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻助教。

### トポロジカルバンドの自発形成と相転移ダイナミクス

川口 由紀 / 名古屋大学 工学研究科 准教授

この公募研究では、冷却原子気体、特にボース粒子系に関する理論研究を行っています。近年、光格子ポテンシャル中の冷却原子気体を用いて、バンド構造のトポロジーが実験的に観測されるようになってきました [1]。ただし、これらの研究では周期ポテンシャル中の1粒子ハミルトニアンバンド構造のトポロジーを検出しており、ボソン/フェルミオンの統計性による違いは見られません。一方、ボース粒子がボース・アインシュタイン凝縮を起こすとフェルミ粒子系の超伝導状態とは異なった性質が見出されます。凝縮状態からの励起スペクトルは、超伝導と同様に Bogoliubov 理論により解析でき、粒子正孔対称性を持った1粒子ハミルトニアンを対角化することでバンド構造とそれに対するトポロジカル数が定義できます [2]。ただし、統計性の違いを反映して、ボース粒子系では Bogoliubov 変換がパラユニタリー変換となり、固有値方程式は非エルミートとなるという特徴があります。このため、励起スペクトルに複素数が出現するという特異な状態が起こり得ます。複素固有値のモードが存在すると系は動的不安定となり、エネルギーを保存したまま励起が指数関数的に増大することが知られています。今回の研究では、ボース粒子系の Bogoliubov ハミルトニアンからトポロジカル不変量を一般的に定義し、動的不安定モードが存在するときにも適用可能な理論を構築しました [3]。また、この結果を、スピン軌道相互作用する1次元系に適用することで、バルクエッジ対応が存在することが数値的に確認できました。

上記の研究に加え、実空間におけるトポロジカル構造についての研究にも取り組んでおり、磁気スルミオン間に働く相互作用ポテンシャルの解明や、2成分原子気体の相分離現象における磁壁のダイナミクスの研究も行っています。

- [1] M. Aidelsburger, et al., Nat. Phys. 11, 162 (2015); L. Duca, et al., Science **347**, 288 (2015).
- [2] G. Engelhardt and T. Brandes, Phys. Rev. A **91**, 053621 (2015); S. Furukawa and M. Ueda, New J. Phys. **17**, 115014 (2015).
- [3] T. Ohashi, S. Kobayashi, and YK, in preparation.



かわぐち・ゆき

1977年大阪府生まれ。2005年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。学振PD、東京工業大学助教、東京大学助教等を経て、2015年より現職。趣味(?)は子育て。

## 太田 智明

東京工業大学 大学院理工学研究科 博士課程 2年

指導教員：東京工業大学 理学院物理学系 藤澤 利正 教授 (C01)

受入研究者：京都産業大学 理学部物理科学科 瀬川 耕司 教授 (B01)

滞在期間：2017年1月16日(月)～20日(金)

**私**は現在までに、高周波電気測定技術を用いて、2次元トポロジカル絶縁体的一种である量子ホール系の非平衡ダイナミクスを研究してきた。現在、この高周波測定技術を3次元トポロジカル絶縁体に適用する事を計画している。高周波測定により、3次元トポロジカル絶縁体における伝搬モードの速度や分散関係といった基礎的な物性が評価できると期待される。また、本測定技術の確立は、将来のトポロジカル絶縁体による高周波デバイスの実現に繋がるものであると考えている。

本研究には  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  に代表されるバルク絶縁性の高い3次元トポロジカル絶縁体が必要となる。そこで、3次元トポロジカル絶縁体の試料作製、低温での電気伝導測定による特性評価の経験を有する京都産業大学瀬川研究室に滞在し、試料作製を行った。

一週間の滞在期間を通して、3次元トポロジカル絶縁体の単結晶作製、低温での電気伝導特性評価とX線解析を行った。単結晶は、比較的短時間で作成可能な  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  を作製した他、滞在前に瀬川先生が作製しておいて下さった  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  も使わせて頂いた。今後は今回の滞在で得た試料を用いて高周波測定を行っていく計画である。

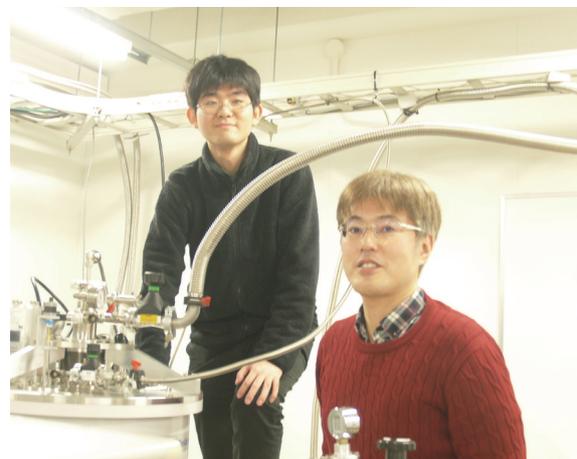
筆者は現在まで測定メインの研究を行ってきた為、今回の結晶成長に関する作業はほぼ全てが未経験であり、非常に新鮮な体験をする事ができた。グローブボックスやガラス管加工に用いる酸水素バーナーなど、初めての実験器具に触れられた事は貴重な体験であった。しかしそれ以上に、層状結晶試料が結晶面で綺麗に劈開する様、スコッチテープなどで剥離できる様などを実際に見られたことは、知っているだけであった

本プログラムは、本領域に属する研究室の大学院生や若手研究者が、領域に属する他機関の研究室に2週間程度滞在し、その分野の研究の日常を体験することで、自身の視野を広げると同時に、受入研究室の同世代の研究者に刺激を与えることを目的とする制度です。若手研究者間の直接的な交流によって、異分野の研究融合を触発し、領域に属する研究室の中に、トポロジカル物質科学の追求という学際的視野を醸成する効果が期待されています。

物性の知識（ここでは結晶の層構造）をより深く認識できる非常に有意義な体験であった。

また、京都産業大学理学部物理科学科主催でセミナーをする機会を頂き、物理科学科の多くの先生方、学生さんに筆者の現在の研究を聴いて頂く事ができた。異なる分野の先生方からのご指摘、ご質問には考えさせられる点も多く、これも非常に貴重な経験となった。

滞在中、不慣れな筆者の実験を瀬川先生はほぼ付きっきりで指導して下さいました。その丁寧な指導のおかげで何とか一通りの作業を終える事ができ、物質合成研究の一端を知る事ができた。この場をお借りして深く感謝を申し上げます。最後に、この様な有意義な経験の機会を与えてくださった本プログラムに感謝したい。



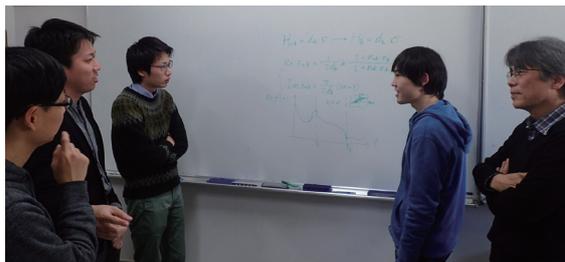
瀬川教授（右）と筆者（左）。左下は無冷媒 1.5 K 冷凍機。

# DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

## 若手励起プログラム報告

### ゴン・ゾンピン

東京大学大学院 理学系研究科 修士課程 2年



中川さん、高三さん、足立さん（左三人）、川上先生（右）との議論風景。

指導教員：東京大学 大学院 理学系研究科 上田 正仁 教授 (D01)

受入研究者：京都大学 大学院 理学研究科 川上 則雄 教授 (D01)

受入期間：2017年2月13日(月)～2017年2月24日(金)

近年原子・分子・光 (AMO) 物理の実験技術の発展によって、量子多体系の非平衡ダイナミクスは注目を集めてきました。熱平衡化、多体局在化、時間結晶など固体系で考えられない物理現象は冷却原子やイオントラップなどの人工量子多体系で実現されました。特に、熱相転移の虚数温度 (実時間) アナロジー「動的相転移」(dynamical phase transition) が四年前に理論的に提案され [1]、去年実験的に観測されました [2]。動的相転移と熱相転移は一般的に関係していませんが、トポロジを変え非自明なクエンチに対して動的相転移が必ずおこるのが最近示されました [3]。

私はもともと微小系の非平衡熱力学を研究していたが、去年から非平衡量子多体系を研究し始めました。実際、「動的自由エネルギー」と呼ばれる動的相転移を特徴付ける物理量は量子系の仕事分布と非常に密接な関係を持っています。それゆえ、昔の研究と接点のある動的相転移を研究テーマにしました。非平衡量子多体系、特にそのトポロジカルな側面の知見を学ぶため、川上研究室に滞在させて頂きました。

滞在の前半は北京・京都大学共同ワークショップに参加し、幅広いトポロジカル物性のトピックを聞きました。ノンシンモルフィック格子構造を持つトポロジカル超電導体の分類、Lieb-Schultz-Mattis 定理の拡張、マグノンの熱量子ホール効果などいろいろ興味深い話が印象に残りました。非平衡に関する講演はほとんどなかったが、研究会のポスターセッションを通して、川上研究室の高三さん (D1) や助教の手塚さんの最新研究成果を伺いました。高三さんはフロケ理論を使い、高周波数の円偏光レーザーを用いてトポロジカル超電導体をフロケ初期熱化状態として実現する方法を提案しました。手塚さんは Sachdev-Ye-Kitaev モデルの相関関数のダイナミクスを数値的に調べ、その結果をランダム行列理論で解釈しました。私も「ゼノホール効果」という前の研究に関するポスター発表をしました。

滞在の後半は動的相転移の勉強や研究に専念し、今までの結果をまとめて最後の日にセミナーで発表しました。その間、自発的に対称性を破る系における動的相転移、及び対応するイオントラップ系で最近できた実験を学びました。セミナー中とその後の自由ディス

カッションで有益なコメントを多く頂きました。特に、動的相転移を起こすため巨視的な (グローバル) クエンチの必要性について理解を深めました。不純物 (ローカル) クエンチの場合、orthogonality catastrophe のため波動関数のオーバーラップが長時間後べき的に減衰するけど動的自由エネルギーの特異性が現れないことが分かりました。なお、動的自由エネルギー以外の特徴付けやトポロジカルな動的相転移がおこる十分条件の弱化など重要な問題がはっきりしてきて、今後真剣に考えたいと思います。

セミナーでポスター発表の内容も紹介しました。ゼノホール効果は散逸に由来するホール効果であり、量子開放系における特有な現象だと言えます。量子多体開放系について、セミナー後中川さん (D3) や高三さんと議論しました。中川さんの話によると、混合状態のトポロジカルオーダーは量子情報分野でよく調べられたが、対称性によって保護されたトポロジカル (略称 SPT) 相はほとんど研究されていないので、開放系における SPT 相はこれから輝く研究分野になるかもしれません。

また、基礎物理研究所の段下さんと散逸のある冷却原子系について議論しました。段下さんは京大高橋研究室で行われている実験に合わせて、不安定な二原子分子準位と共鳴する光により制御可能な二体ロスのある Bose Hubbard 系のオーダーパラメーターダイナミクスを解析しています。段下さんにいろいろ冷却原子の専門知識を教えて頂き、大変勉強になりました。

最後になりましたが、滞在中は川上先生を始め京大凝縮系理論グループの方々にとってもお世話になりました。毎日グループの方々と一緒に食事したり、雑談したり、楽しい時間を過ごしました。この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。

[1] M. Heyl, A. Polkovnikov, and S. Kehrein, Phys. Rev. Lett. **110**, 135704 (2013).

[2] P. Jurcevic et al., arXiv: 1612.06902; N. Fläschner et al., arXiv: 1608.05616.

[3] Z. Huang and A. V. Balatsky, Phys. Rev. Lett. **117**, 086802 (2016)

## 若手励起プログラム報告

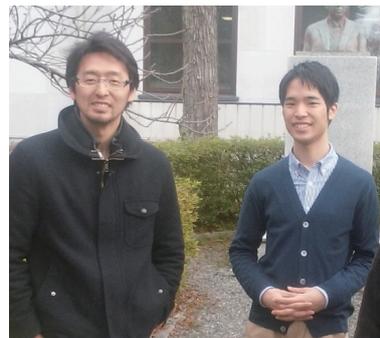
## 東川 翔

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 博士課程 1年

指導教員：東京大学 大学院 理学系研究科 上田 正仁 教授 (D01)

受入研究者：京都大学 基礎物理学研究所 佐藤 昌利 教授 (D01)

受入期間：2017年2月18日(土)～3月3日(金)



基礎物理学研究所湯川記念館前にて。  
基礎凝縮系理論研究室メンバーの段下さん(左)と私。

トポロジカルな物理現象の面白さの一つは、異なる物理系の現象がトポロジーという大きな観点からは同じように理解できることです。トポロジカル絶縁体・超伝導体では電子の波動関数が非自明なトポロジーを形成しており、トポロジカル励起(渦やスカーミオンなど)では秩序変数が非自明なトポロジーを形成しています。波数空間と実空間という大きな違いはありますが、トポロジーという大枠からは同じ現象が現れることが期待されます。私はこれまで、後者、特にトポロジカル励起が複数共存している系を研究してきました。この系の興味深い点は、トポロジカル励起のトポロジカルチャージが必ずしも保存しないことです。例えば、スカーミオンが半整数(量子)渦と共存する場合、スカーミオンの巻き付き数は保存せず、偶数個のスカーミオンを連続的に生成・消滅させることができます。近年、このトポロジカルチャージの非保存に対応した現象が、トポロジカル絶縁体・超伝導体でも起こることが指摘されました[1,2]。この発見を知って、自分の研究の視野をトポロジカル励起からトポロジカル絶縁体・超伝導体へと広げようと思い、今回佐藤先生の下に2週間滞在することに決めました。また、滞在前1週間には新学術領域が共催しているスクールと研究会に参加し、トポロジカル絶縁体・超伝導体について理解を深めました。

滞在中はHopf絶縁体の研究を行いました。Hopf絶縁体とは2バンドで3次元のトポロジカル絶縁体であり、バルクのトポロジカルナンバが絡み目数(Hopf数)で与えられるというユニークな性質を持ちます[3]。Hopf絶縁体は上述のトポロジカルナンバの非保存が起こる例の一つであり、ブリルアンゾーンの2次元断面内のチャーン数が1の場合、絡み目数2の絶縁体を絡み目数が0の絶縁体に連続的に変えることができます。この他にも、(100)面や(010)面で切る場合は表面にディラックコーンが現れるのに対して、(001)面で切るとリング状のゼロエネルギー点が現れるという興味深い性質もあります。しかしながら、表面状態のトポロジカルナンバは何か、現れる表面状態がなぜ面に依存するのかという基本的な問題さえも未解明であり、上述の絡み目数を2から0に変える連続変形において、表面状態にどのようにギャップが形成されるのかことも理解されていませんでした。

今回の滞在中では表面状態のスペクトルの数値計算や反古典近似による解析計算に取り組みました。研究テーマ自体はトポロジカル絶縁体の研究では初等的なものだとは思いますが、トポロジカル絶縁体の研究は初めてだった私にとっては知らないことが多く苦労の連続でした。しかし、佐藤先生の丁寧なご指導のおかげで、表面状態のスピントクスチャが非自明な巻き付き数を持つこと、表面のディラックコーンは反転対称性に守られたものであり、反転対称性が破れるとリング状のゼロモードになるということを明らかにすることができました。また、表面状態にギャップができる機構については、スピントクスチャの巻き付き数が2の場合は表面ブリルアンゾーンの周期性を利用することで巻き付き数を0にできるのではないかという仮説が得られました。滞在中はここまでしかわかりませんが、上の仮説の数値的な検証やHopf絶縁体のバルクエッジ対応の反古典近似による証明など、多くの問題が残されています。この滞在中をきっかけに共同研究を進めていきたいと考えています。

滞在中には佐藤先生のご厚意でトポロジカル励起に関する自分の研究についてセミナーをする機会をいただき、私の研究のトポロジカル絶縁体・超伝導体への応用について数多くのコメントをいただきました。中には、私が考えもしなかった方向性の応用もあり、分野を超えて交流することの重要性を改めて感じました。

最後になりましたが、分野違いにもかかわらず滞在を快く受け入れてくださった上に、懇切丁寧に指導してくださった佐藤先生に感謝いたします。滞在中は、昼食は基礎物理学研究所の、夕食は5号館の凝縮系理論のメンバーの皆様に誘っていただき、楽しい時間を過ごすことができました。この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。また、このような機会を与えてくださった若手励起プログラムにも感謝申し上げます。

[1] R. Kennedy and C. Guggenheim, Phys. Rev. B **91**, 245148 (2015).

[2] R. Kennedy, Phys. Rev. B **94**, 035137 (2016).

[3] J. Moore, Y. Rang, and X. G. Wen, Phys. Rev. Lett., **101**, 186805 (2008).

## 若手励起プログラム報告

### 井辺 洋平

京都大学 大学院理学研究科 修士課程 2年

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 川上 則雄 教授 (D01)

受入研究者：京都産業大学 理学部物理科学科 瀬川 耕司 教授 (B01)

受入期間：2017年2月28日(火)～3月15日(水)のうち8日間

ワイル半金属は、バルクにギャップレスの円錐型分散をもつ物質であり、場の量子論の「カイラル量子異常」に起因する特異な輸送現象が期待され、注目を集めている。私はこのワイル半金属の示す輸送現象のうち「カイラル磁気効果」という、外部磁場と平行に電流が流れる現象に関して理論研究を行ってきた。このワイル半金属に関して、実験家の方との議論を通して新たな研究の方向性を探るべく、本プログラムに応募した。また、今後研究を行っていく上で実験研究も体験し、視野を広げておきたいという思いが強くあったため、トポロジカル物質の単結晶作製や輸送測定を行っている京都産業大学の瀬川先生のもとに滞在させて頂いた。

期間中は瀬川先生の直接のご指導のもと、ワイル半金属 NbP, NbAs, またそれらの固溶系の単結晶合成を目標として実験を行った。手順としては、まず原料の元素単体を配合し熱することで各化合物の多結晶を合成し、その後ヨウ素を用いた chemical vapor transport 法を用いて単結晶の作製を試みた。

私は理論系の院生であり、ほぼ全ての実験が未経験であったため、失敗することも多々ありご迷惑をお掛けした。例えば、石英管を酸水素バーナーで熱して成形する際思うようにいかずふいにしまったり、グローブボックス中で原料を秤量中こぼしてしまいやり直しになったりなどである。

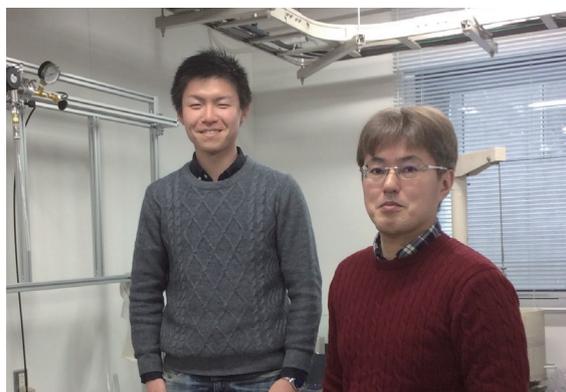
しかしながら、瀬川先生に辛抱強くご指導頂いたおかげで、実習が進むに従いそういった技術が少しずつ上達していくのを肌で感じる事ができた。また、より大きな単結晶ができるためには温度や原料の量といった条件をどうすればよいか考え調整し、得られた

フィードバックをもとに改良していくプロセスは、数式をいじる理論とは異なる楽しさがあり、やりがいを感じた。

上述のように失敗も多かったが、結果的に NbP, NbAs 単結晶を得ることができた。固溶系 Nb-(P, As) 単結晶の合成は期待通りにはいかなかったものの、多結晶ができていることを粉末 X 線回折で確認することができた。

今後はこのようなワイル半金属の混晶系に対し、表面状態や輸送に関してどのような提案ができるか、さらにどのような物質ができれば興味深いかを理論面から検討していきたいと考えている。

末筆になりますが、急なお話にもかかわらず受け入れてくださった瀬川先生、また、理論の学生である私にこのような貴重な機会を下された本プログラム関係者各位に改めて感謝申し上げます。



瀬川先生(右)と筆者。

## 若手励起プログラム報告

### 嶋村 奈津美

東北大学 大学院理学研究科 修士課程 2 年

指導教員：東北大学 大学院理学研究科 佐藤 宇史 教授 (B01)

受入研究者：理化学研究所 創発物性科学研究センター 花栗哲郎 チームリーダー

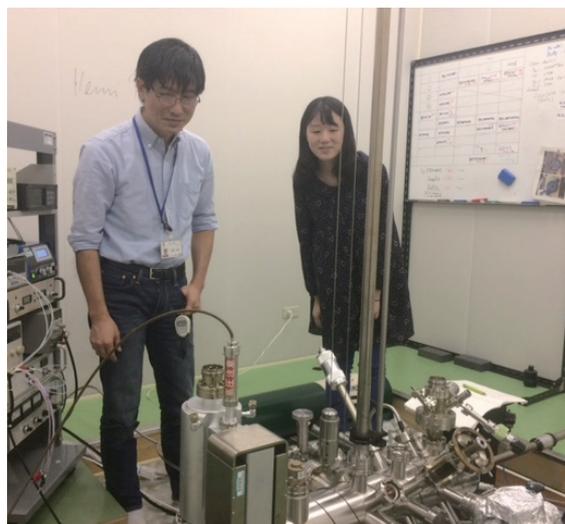
滞在期間：2017 年 10 月 23 日 (月)～11 月 2 日 (木)

近年、超伝導体とトポロジカル絶縁体の接合系においてマヨラナ粒子が出現する可能性が理論的に指摘され、大きな注目を集めています。私は、銅酸化物高温超伝導体上にスピン軌道相互作用の大きいラッシュバ金属薄膜を作製し、この接合系における新奇物性を観測することを目的として角度分解光電子分光 (ARPES) を用いた研究を行ってきました。受入先の花栗研究室は STM を用いた先駆的な研究を行っており、マヨラナ粒子探索のプラットフォームとなりうるこの系における STM 実験によってエッジ状態を観測できると期待されます。

そこで、今回本プログラムを通してラッシュバ金属 / 高温超伝導体接合試料の STM 測定を行いました。具体的には、まずより品質の高い試料を測定するために花栗研究室の STM 装置に自作の蒸着源を設置し、その後 in-situ での STM 測定を行いました。その結果、STM 測定により膜厚の変化に伴うラッシュバ金属薄膜の結晶構造の相転移や成長様式などを明らかにすることができました。私はこれまで ARPES を用いて逆空間での電子状態観測を行ってきましたが、今回実空間における電子状態を明らかにすることで、ARPES からは得られない新しい重要な情報をたくさん得ることができました。今後は、ラッシュバ金属薄膜における超伝導近接効果とエッジ状態の解明を続けていきたいと考えています。

今回の滞在では、STM 測定において重要となる針の作製や調整の仕方、測定プロセスなど多くのことを学ぶことができました。新たな実験手法を学ぶことは、私にとってとても新鮮で関心興味を広げることができました。

最後に、毎日一緒に実験や議論を行っていただいた花栗先生、岩谷先生をはじめとする花栗研究室の皆様には、大変感謝しております。また、このような機会を与えてくださった若手励起プログラムの関係者各位にもお礼を申し上げます。

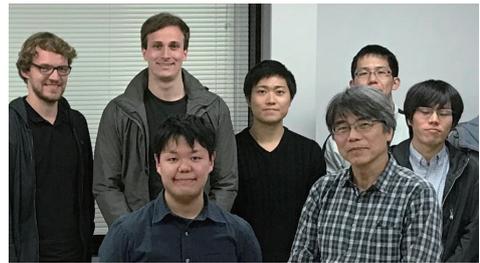


受け入れてくださった花栗先生 (左) と私 (右) と実際に使用した STM 装置 (下)。

## 若手励起プログラム報告

### 吉岡 信行

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 博士課程 1年



指導教員：東京大学 理学系研究科 桂 法称 准教授 (D02)

受入研究者：京都大学 大学院理学研究科 川上 則雄 教授 (D01)

受入期間：2017年10月23日(月)～11月10日(金)

セミナー終了後、凝縮系理論グループメンバーの皆さんと。  
手前左に筆者、手前右に受け入れ教員の川上則雄先生。

系の波動関数に内在するトポロジカルな性質が、不変量として相を特徴づける。そんな奇想天外な現象が、多くの物性物理の研究者の好奇心を駆り立てています。かく言う私もそのうちの一人で、特に乱れの存在下でのトポロジカル絶縁相・超伝導相の安定性や、量子相図に興味を持っています。たとえば、Bloch 関数で定義した Berry 曲率の積分である、第一 Chern 数を始めとして、並進対称性（もしくはさらに空間反転対称性）が存在する系では、トポロジカル不変量の計算手法は良く知られ、また比較的容易に計算できます。幾何学的な量を求める学問である、トポロジーから概念を援用したことを考えれば、不純物などの乱れに対し、頑強な性質を持つのだろう、と期待するのが自然でしょう。一方で、トポロジカル不変量の定義をどのように拡張し、相を特徴付けるのか、また数値的・系統的に調べられるのか、といった課題が多く伴います。このような問題意識のもとで、私はこれまで、機械学習により相を分類する試みを行ってきました [1]。乱れない極限での教師あり学習により、乱れの存在下での分類を行うことが目的となります。準粒子の空間分布を入力として、適当な特徴を抽出し、相分類を行う機械を構築します。乱れにより並進対称性が破れていても、準粒子分布の統計平均を取ることで、系の並進対称性の「統計的な回復」を使うことで、乱れのある系の量子相が精度よく分類できることを示しました。

現実的には、乱れの効果だけでなく、多体効果による影響も存在します。場合によっては、エッジ状態のギャップが開き、トポロジカルに自明な相となることが知られており、これはトポロジカル不変量による分類の reduction と呼ばれます [2]。もちろん、究極的には、乱れ・多体効果を包括的に扱う枠組みが必要となりますが、まず第一ステップとして、多体効果に限った場合に関し、深い知見を得ることを目的に、京都大学の川上則雄先生の元へ滞在することを決めました。

滞在中は、近年新たにトポロジカル絶縁体の拡張として提案された、高次トポロジカル絶縁体/超伝導体における多体相関について、PDの吉田恒也さんに議論して頂きました。従来のトポロジカル絶縁体/超伝

導体では、異なるトポロジカル不変量を持つバルクの境界にゼロエネルギー状態が現れますが、 $n$  次のトポロジカル絶縁体/超伝導体では、 $n$  個の境界の交差領域にゼロエネルギー状態が現れます。例えば、バルクエッジ対応により端状態の現れる、従来のトポロジカル絶縁体/超伝導体は1次に相当します [3, 4]。一方、2次の場合に対応するゼロエネルギー状態は、二次元系では角に、三次元系では辺上に発現することになります [5]。このような特異な系において、reduction が起こるのか、そしてそれはどのような機構なのか、まだ殆ど理解されていません。滞在中に、角状態を発現させるモデルの構築を行いました。相互作用の影響の詳細な解析については、今後の課題となっています。

また、川上先生のご厚意により、凝縮系理論グループにて、機械学習と物性物理の橋渡しに関し、自身の研究紹介も兼ねたチュートリアルセミナーを行う機会を頂きました。多くの方々に興味を持って頂いたのみならず、物理的発想に基づいた深い質問も受け、さらなる融合と発展の可能性を感じました。同時期に基礎物理学研究所で開催された研究会での口頭発表の経験と合わせて、非常に身の引き締まる日々を過ごしたことが鮮明に思い出されます。

最後に、刺激と楽しみに満ちた空間に身を置く素晴らしい機会を与えてくださった、若手励起プログラムに感謝申し上げます。また、通常より長い期間にも関わらず滞在を快く受け入れてくださった川上先生、時間を厭うことなく議論頂いた吉田さん、そして暖かく接して頂いた凝縮系理論グループのみなさんに、この場を借りて深く感謝致します。どうもありがとうございました。

[1] N. Yoshioka, Y. Akagi, and H. Katsura, arXiv:1709.05790 (2017).

[2] L. Fidkowski and A. Kitaev, Phys. Rev. B **83**, 075103 (2011).

[3] A. P. Schnyder, S. Ryu, A. Furusaki, and A. W. W. Ludwig, Phys. Rev. B **78**, 195125 (2008).

[4] Y. Hatsugai, Phys. Rev. Lett. **71**, 3697 (1993).

[5] J. Langbein et al., arXiv:1708.03640 (2017).

## 若手励起プログラム報告

### トラン・シュアン・チ

東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 博士課程 2 年

指導教員：東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 佐藤 宇史 教授 (B01)

受入研究者：京都産業大学 理学部物理科学科 瀬川 耕司 教授 (B01)

滞在期間：2017 年 12 月 4 日 (月)～15 日 (金)

Three-dimensional topological insulators (3D TIs) represent a new state of quantum matter with an insulating bulk band and a conducting surface state. The discovery of TIs stimulated the search for a more exotic state of matter, the topological superconductors (TSCs). My current research topic in our lab is a realization of topological superconductor (TSC) through the fabrication of a junction between superconducting ultrathin film and topological insulators (TIs) and an evaluation of electronics states by ARPES. To obtain a good junction, it is essential to fabricate high-quality TI single crystals. Since Prof. Segawa at Kyoto Sangyo University is an expert of single crystal synthesis, it was a great pleasure to visit Segawa lab. and fabricate TI single crystal samples which will be used for my ARPES measurements.

During my stay at Segawa lab., under Prof. Segawa's careful instruction, I studied how to fabricate big single crystals of 3D TI  $\text{TlBiSe}_2$  and  $\text{TlBiS}_2$  by Bridgman method, e.g. weighing raw materials (shown in Fig 1(a)) in a glove box, sealing the glass tube for preventing degradation of raw materials in the air, and optimizing growth condition. After obtaining big single-crystal materials as shown in Fig. 1 (b), I characterized it by transport and X-ray powder diffraction (XRD) measurements to confirm the high quality (The preparation for the transport measurement is shown in Fig. 1(c)). At the end of my exchange program, I received totally two big single crystals

of  $\text{TlBiS}_2$  and one of  $\text{TlBiSe}_2$  which will be very useful for my ARPES experiments. Furthermore, I also had a fruitful discussion about our recent study of new bulk-insulating TI  $\text{TI}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)\text{Te}_2$  [1] with Segawa's lab. members and Faculty of Physics' members.

My visit to Segawa's lab. provided me opportunities to visit the available facilities, practice synthesizing single crystals of TIs, carry out transport and XRD measurements, and possess valuable discussions. It's very important for my current research.

Finally, I would like to thank TMS project for giving such opportunities and Prof. Segawa for kindly and patiently teaching during my stay.

[1] C. X. Trang et al., Phys. Rev. B **93** 165123 (2016).

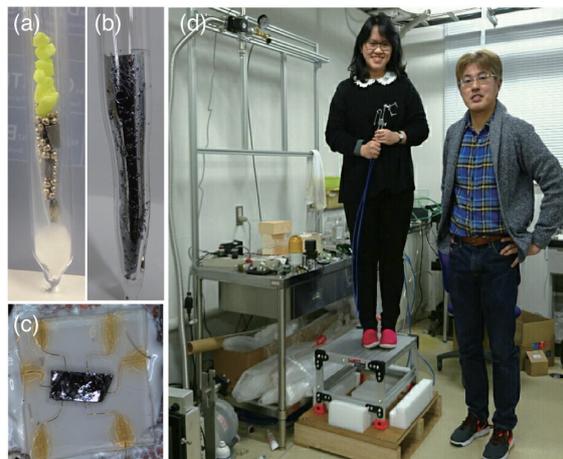


Figure 1: (a) Raw materials. (b) A big single crystal. (c) A sample with six welded contacts, preparing for transport measurements. (d) Prof. Segawa (right) and me at actual experimental area.

## 若手励起プログラム報告

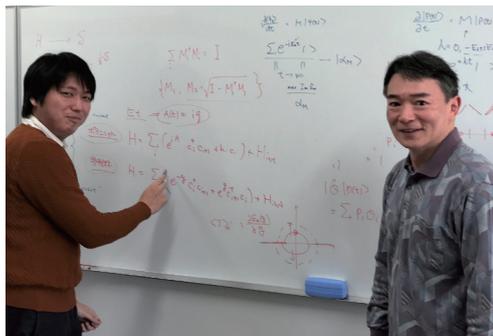
### 高三 和晃

京都大学 大学院理学研究科 博士課程 2年

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 川上 則雄 教授 (D01)

受入研究者：東京大学 大学院 理学系研究科 上田 正仁 教授 (D01)

受入期間：2017年12月11日(月)～12月22日(金)



上田先生(右)と議論。

私は、レーザー照射などにより非平衡状態に駆動された強相関電子系に興味を持って研究しています。こうした系は、平衡状態では現れない多彩な現象、トポロジカル相を含む多様な物質相の現れる舞台として、理論・実験の発展にともない、近年注目を集めています。

強相関電子系における非平衡現象の典型として、Mott 絶縁破壊(電場誘起 Mott 転移)が知られています。Mott 絶縁体に強い電場を印加すると、ある閾値を境に金属化する現象です。実は、これを理解するために、右に飛ぶホッピングと左に飛ぶホッピングの大きさの異なる「非対称ホッピング模型」(に Hubbard 相互作用を加えた模型)が有用であることが知られています [1,2]。左右のホッピングの大きさの比を大きくしていくと、ある閾値で Mott ギャップ(の実部)がゼロになり、これが Mott 絶縁破壊に対応すると考えられています。

非対称ホッピング模型のハミルトニアンは、ホッピングの大きさが非対称であるため、非エルミートです。この模型で記述される系として他に、傾斜磁場下の超伝導体の渦糸系などが知られていますが [3]、これも現象論的な対応であり、非対称ホッピング模型が微視的に実現されている系は知られていません。この背景には、非エルミート量子多体系を実現する舞台が、これまで非常に限られていたことが挙げられます。

一方で近年になって、冷却原子系に粒子の散逸を導入することで、非エルミート量子多体系を実現することが可能になりつつあり、理論・実験の両面から精力的に研究されています [4]。私は、自身の研究に現れる非対称ホッピング模型が、冷却原子系の文脈においても興味深い研究対象になり得るのではないかと思います。ぜひ冷却原子系の研究者と議論したいと考えました。それには、冷却原子系における非エルミート量子多

系について、世界をリードする研究が行われている上田研究室が最適であると考え、今回の滞在に至りました。

滞在中は、①非対称ホッピング模型の冷却原子系における実現方法を見つける、②非対称ホッピング模型と非平衡現象の関係を探る、③自身のこれまでの研究に関する議論を深める、という3つの方向性のもと、上田先生や研究室メンバーとの議論を多数させていただきました。①に関しては、Gong 君 (D1) との議論を通して、現実的な実現方法を見出すことが出来ました。これをきっかけに Gong 君が主著として執筆中の論文の著者に私も加わり、上記の内容を論文に盛り込むことになりました。②に関しては、交通流などの非平衡流を記述する古典模型として知られる ASEP(Asymmetric Simple Exclusion Process) との関係性について、濱崎君 (D1)・藤本さん (PD) を含めて議論させていただき、今後の共同研究の方向性をいくつか見出すことが出来ました。③に関しては、非エルミート・ハミルトニアンを用いた1次元系の絶縁破壊に関連する自身の研究について、蘆田くん (D2)・古川さん (助教) から有用なコメントをいただきました。上記以外にも多くの方と議論させていただき、大変有意義な滞在となりました。

最後になりましたが、このような貴重な機会を与えていただいた本プログラムに感謝いたします。そして、受け入れていただいた上田先生、研究室メンバーの皆さんに感謝いたします。ありがとうございました。

[1] T. Fukui and N. Kawakami, Phys. Rev. B, **58**, 16051 (1998).

[2] T. Oka and H. Aoki, Phys. Rev. B, **81**, 033103 (2010).

[3] N. Hatano and D. R. Nelson, Phys. Rev. Lett., **77**, 570 (1996).

[4] A. J. Daley, Adv. Phys. **63**, 77 (2014).

## Yakov Fominov 准教授

ロシア科学アカデミー

報告者：北海道大学 工学研究院 浅野 泰寛 (A01)

期間：2017年1月2日(月)～1月18日(水)

ルテニウム酸化物超伝導体の表面にはトポロジカルに守られたエッジ状態が存在し、それに伴われて奇周波数クーパー対が存在する。奇周波数クーパー対は常磁性を示すため、超伝導体の表面インピーダンスに異常が出るはずであり、これを実験および理論の両面から実証するのが共同研究の内容である。実験的にはロシアのチェルノゴロフカの物性研究所において、シェフチュン博士が表面インピーダンスの測定を行ない、従来型の超伝導体とは異質な温度依存性を示す事が分かってきた。試料は前野、柏谷が用意している。理論的にはモスクワ大学のバクルスキ、クプリヤノフ、トゥエンテ大学のゴルーポフ、田仲らが、ルテニウム表面がラフであることを考慮したうえで超伝導体を記述する準古典グリーン関数を求めている。表面インピーダンスを計算するためには、電磁場に対する線形応答係数を求めれば良く、浅野とフォミノフが過去に求めた表式に得られたグリーン関数を代入すれば良いはずであった。ところが、線形応答係数の表式がグリーン関数の様々な定義やゲージの選び方に依存しており、バクルスキが計算したグリーン関数をどのよう

に変更すれば良いのかが不明確であった。

滞在中に、フォミノフと浅野は、ゴルコフ・グリーン関数の定義、準古典アイレンベルグ方程式の定義、南部空間を $2 \times 2$ に制限する方法などを全てに渡ってグリーン関数の表式を見直した。その結果、バクルスキが得たグリーン関数を用いた線形応答係数の正確な表式を得ることが出来た。これによって、実験結果を解釈するための理論ツールが整備できたことになり、現在解析が進められている。

さらに、アイレンベルグ方程式に従うグリーン関数を用いた線形応答係数の一般的な表式の導出を試みている。この課題に関しては先行研究があるものの、グリーン関数の外場に対する一次の変化を数値的に求めなければならない、それが結果の物理的な解釈を困難にしている。フォミノフと浅野は、線形応答係数が平衡系のグリーン関数だけで記述できるはずだという一般論の立場から、簡便な公式を導くべく研究を行っている。



浅野 (A01) の自宅にて。

# RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

## REP 招聘報告

### Lee Sungbin 助教授

韓国科学技術研究所

報告者：学習院大学 理学部物理学科 宇田川 将文 (A01)

期間：2017年1月22日(日)～1月27日(金)、

2017年2月4日(日)～2月17日(金)

KAISTのLeeSungbin助教授は2017年1月22日から27日、および同年2月4日から17日まで、学習院大学に滞在した。学習院大学においては、宇田川(A班分担者)らと研究交流・共同研究の相談を行なった。また、滞在期間中に京都大学および名古屋大学を訪問し、2回のTMSセミナーを実施した。セミナーを行なうとともに、京都大学においては川上(領域代表者・D班代表者)、松田(A班分担者)、手塚(D班連携研究者)らと研究上の議論を行なった。また、名古屋大学では田仲(B班分担者)・川口(D班公募代表者)のグループと密接な研究交流を行なった。



My 1<sup>st</sup> visit of topological material program started on 22<sup>nd</sup> of January meeting with Prof. M. Udagawa who is a professor in Gakushuin University. He introduced this nice program couple of months ago and invited me to his institute for discussion and seminar. With condensed matter theory group members of Gakushuin University including Prof. H Tasaki, we have discussed recent hot topics on nonsymmorphic crystals and topological phases of matters. Symmorphic or nonsymmorphic crystals are classified depending on whether their lattice symmetries can be represented by a direct product of point groups and translations or not. In details, nonsymmorphic crystals which their symmetries cannot be represented by a direct product of point groups and translations, contain either glide reflections or screw rotations including fractional translations followed by mirror reflection or rotational symmetries. Among 230 space groups, 157 of them are nonsymmorphic where Shastry-Sutherland lattice in 2D and diamond/ pyrochlore lattices in 3D are well known examples. Motivated by many recent works on pyrochlore iridates, Prof. M. Udagawa and I were discussing general arguments related on semimetals protected by nonsymmorphic symmetries and their magnetic field dependence. In addition, we also discussed similar argument on the two dimensional Shastry-Sutherland lattice and tried to find material realization to observe interesting phenomena based on our theoretical insights. It was also very nice to meet with Prof. H. Tasaki. His bright insight on the extension of the Lieb-Schultz-Mattis theorem was



discussed during the coffee break in Gakushuin University. After one week of my visit, I had to go back to Korea for attending 5<sup>th</sup> workshop of Max-Planck Postech center for complex phase materials.

During my second visit for TMS, I have visited many other institutes including Institute of Solid State Physics center, Kyoto University, Nagoya University and Gakushuin University. For couple of days in between February 4<sup>th</sup> and 17<sup>th</sup>, I attended the workshop organized by ISSP, Theory of Correlated Topological Materials. In addition to present my recent work, I have met many friends who were attending the same workshop and had useful discussions on our research as well. During January 8-9 2017, I visited Prof. N. Kawakami's group in Kyoto University and gave a seminar on symmetry enforced semimetals and symmetry enriched topologically ordered state in nonsymmorphic crystals. I have also visited Nagoya University hosted by Prof. Y. Kawaguchi and gave a seminar on topological phases of matters, same topic that I have discussed in Kyoto University. After the seminar, I had private discussion with some of the group members including students and postdocs on their recent work. During the two weeks of my second visit, it was really great to meet and discuss with professors, postdocs and students. I was also able to advertise the 1<sup>st</sup> Asia pacific workshop on Quantum Magnetism organized by myself and other friends in other countries funded by Asian Pacific Center for Theoretical Physics.

Finally, I really appreciate Prof. M. Udagawa who invited me this nice visiting program and have made lot of efforts for scheduling and kind hospitality. In addition, I would like to thank Prof. N. Kawakami for kind invitation to Kyoto University and financial support of my visit. In addition to many stimulating scientific discussions, it was great to come back to Japan for such a long term that ended up being three weeks since I left 2006 after the completion of my BS degree in Tokyo Institute of Technology. It is always exciting experience to visit Japan and strongly motivates me to organize this kind of visiting program in our home country as well.

# RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

## REP 招聘報告

### Ilya A. Gruzberg 教授

アメリカ・オハイオ州立大学

報告者：北海道大学 大学院工学研究院 小布施 秀明 (D04)

期間：2017年3月21日(月)～4月4日(水)

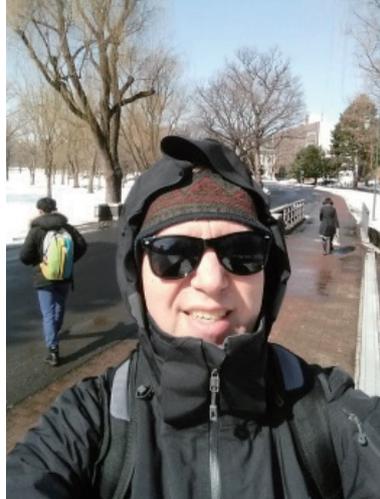
オハイオ州立大学の I. A. Gruzberg 教授を、本新学術領域の REP プログラムで、お招き致しました。来日中は、北海道大学だけではなく、東京にも1週間滞在し、桂法称准教授(東京大学)や古崎昭 主任研究員(理化学研究所)を訪問し、2週間の滞在中に計3回のTMSセミナーを行っていただきました。滞在中は、進行中の共同研究について議論を行っただけでなく、国内の多くの研究者・学生とも活発な議論を交わし、お互いに有意義な時間を過ごせました。滞在中の詳細につきまして、本人から詳細な感想をいただきましたのでご報告いたします。



I enjoyed my visit to Japan very much, and I am happy to share the impressions from my visit. First of all, the visit was very productive from the scientific point of view. I have had many discussions with Obuse-san about our joint research project, and we have made a very good progress on it. Discussion about network models for quantum Hall transitions, multifractal spectra and universality will very likely result in several publications in the near future.

Secondly, I have benefitted from discussions with other Japanese physicists, especially with Aano-san at Hokkaido University, with Katsura-san at the University of Tokyo, and with Furusaki-san at RIKEN and their group members. I was also glad for the opportunity to present results of my own work at several seminars.

Third, it was interesting to learn about the organization of scientific research in Japanese universities and research institutes. It reminded me of the German system where a senior Professor has a group of several Assistants under his supervision. This is different from the system at American institutions where Assistant Professors are really autonomous and free to pursue their own research agendas, and their supervision is much less structured and is



concerned mostly with helping them to write grant proposals and polish their papers and presentations. Both systems have their own pluses and minuses. The American system is a bit riskier, and requires a very careful selection of candidates for junior faculty positions to ensure their future success. The Japanese system is safer, since the Assistant professors are closely supervised and guided by more experienced Professors. I still think that the American system is superior, since the true potential for novel and original research is only realized when young people are given total freedom to pursue their goals.

Fourth, I am really fascinated with Japanese culture. Having heard many exciting things from colleagues who visited Japan, I was finally able to experience Japanese culture and nature by myself. And my impressions are absolutely incredible. The variety of aspects of Japanese culture and nature is fascinating: from small sea food markets on Hokkaido to neon lights of Shinjuku and Shibuya, to incredible sushi in Tsukiji market, to tranquil calm of Hamarikyū gardens, to unearthly sights of Jigokudani in Hokkaido. I have also realized that the Japanese food can only be truly enjoyed in Japan, where it is super fresh, prepared right in front of you, and is supremely delicious.

I am very grateful to my host, Obuse-san, for his guidance and advice on many places to visit and things to see, and for his commitment to make my visit enjoyable. He certainly succeeded in this fully.



I. A. Gruzberg 教授は、今回初来日でしたが、日本の研究者との議論を満喫しただけではなく、日本文化にも大いに感銘を受け、数年後のサバティカル休暇では、日本に滞在することも考えてるとのことでした。

## REP 招聘報告

### Alexander Golubov 准教授

トゥウェンテ大学（モスクワ理工工学校）

報告者：北海道大学 大学院工学研究院 浅野 泰寛 (A01)

期間：2017年3月20日(月)～3月31日(金)

2017年3月20日から31日までの12日間、Twente大学（モスクワ理工工学校）Alexander Golubov 准教授（教授）が本新学術領域のREPプログラムで、北海道大学、名古屋大学（京都大学）に滞在され、奇周波数クーパー対、スピン3重項超伝導接合に関して浅野（A班分担）、田中（B班分担）、前野（A班代表）と有意義な議論が行われました。

ルテニウム酸化物はカイラルp波スピン三重項超伝導体の有力な候補物質であり、その表面にはトポロジカルに守られたマヨラナ状態と奇周波数クーパー対が存在し、超伝導体の電磁気学的な応答に異常をもたらす事を、我々は理論的に明らかにしていました。ロシアのチェルノゴロフカにある物性研において、ルテニウム銅酸化物の微小単結晶を用いて表面インピーダンスの測定を行っています。これまでに、通常の超伝導体とは質的に異なる実験データが得られはじめています。この実験結果を解釈するためにはどのような理論計算を行い、何に焦点を当てて議論すればよいか、を話し合いました。

またルテニウム酸化物と金属超伝導体のジョセフソン接合やルテニウム酸化物を用いたSQUID（超伝導量子干渉素子）の研究が産総研で行われています。この実験を解釈するため、物質の多バンド性やスピン起動相互作用の効果を取り入れた場合のジョセフソン電流の振る舞いに関して理論の論文を投稿中です。Golubov氏と議論することで論文改訂の方針を決めました。数値計算結果をうまく再現するようなモデルと現象理解のための簡潔な物理描像の構築に関して議論を行いました。

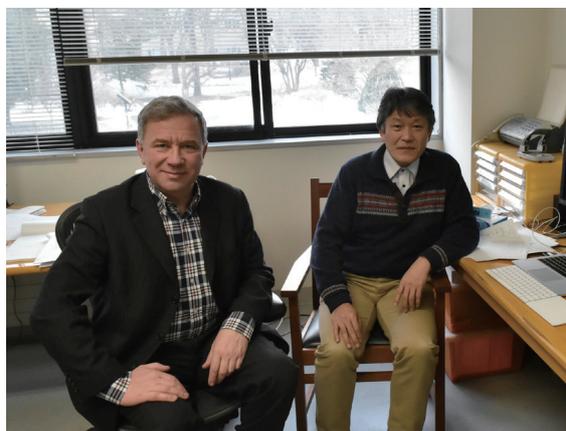


The visit of Dr. A.A. Golubov  
University of Twente, Netherlands, and Moscow  
Institute of Physics and Technology  
March 21-31, 2017

During the visit I had many fruitful discussions with Prof. Tanaka and at Nagoya University, with Prof. Asano from Hokkaido University, with Prof. Maeno from Kyoto University and Prof. Sato from Yukawa Institute and with the members of their groups.

The scientific program started from the visit to Hokkaido University and discussions with Prof. Asano and the members of his group on various problems including odd-frequency pairing in superconducting structures, surface impedance of unconventional superconductors and Josephson effect in multiorbital model of SrRuO<sub>4</sub>. Two manuscripts on these problems are currently in preparation.

On March 22 I gave a seminar at Hokkaido University on "Proximity induced topological superconductivity: Andreev bound states and odd-frequency pairing".



## RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM



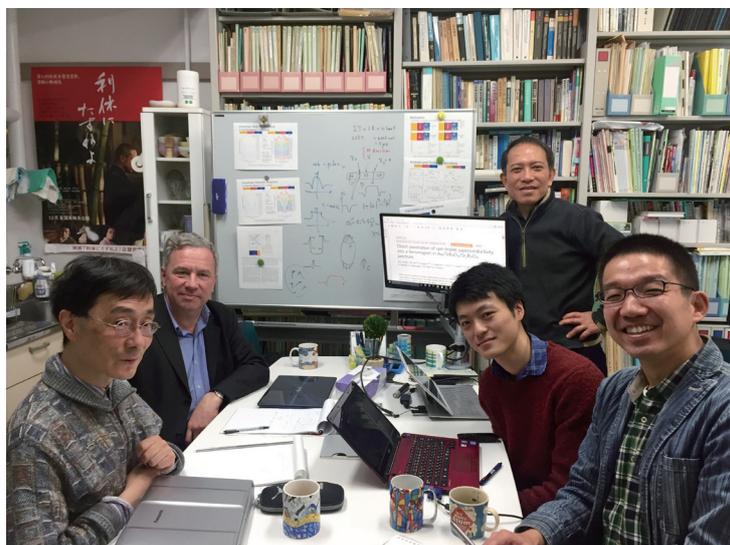
I gave an overview of hybrid Proximity induced topological superconductivity: Andreev bound states and odd-frequency pairing in structures involving superconducting junctions on surfaces of topological insulators and to the results of recent experimental and theoretical studies. I have presented the results of recent theoretical and experimental studies of proximity effect in a topological insulator (TI)  $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$  in direct contact with an s-wave superconducting Nb electrode, performed in Twente University and in Moscow Institute of Physics and Technology.

During the week March 27 - 31 I visited the group of Prof. Tanaka at Nagoya University. During this time I had many discussions with him, with Dr. Yada and with PhD student Hashimoto on problems related to extension of the circuit theory in unconventional superconducting junctions, interplay of Rashba spin-

orbit interaction and Zeeman effect in SNS structures and on Josephson effect in multi-orbital model of  $\text{SrRuO}_4$ . The manuscript is currently in preparation.

During my stay in Nagoya I visited Kyoto University on March 29. Within the first half of the day I had discussions with Prof. Maeno and several members of his group about their recent experimental results on detection of spin-triplet superconductivity in mesoscopic structures Au/ferromagnetic  $\text{SrRuO}_3$ /superconducting  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . We have discussed possible theoretical interpretations of these data and relevant models which may help to identify spin-triplet proximity effect in these junctions.

Then at 14:00-15:00 I gave a talk at the TMS seminar at Yukawa Institute on the topic "Physics of Andreev bound states and odd-frequency pairing". I have presented overview of the physics of Andreev bound states in superconducting junctions with various types of symmetry of superconducting order parameter with special attention to the relation between Andreev bound states and the odd-frequency pairing. I summarized the theory of the odd-frequency pairing and discussed its implications in experiments. After the seminar I had further discussions with Prof. Sato from Yukawa Institute and with Prof. Tanaka.



# RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

## REP 招聘報告

### Ying Liu 教授

上海交通大学 (SJTU) / ペンシルバニア州立大学 (PSU)

報告者：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 (A01)

期間：2017年12月16日(土)～1月5日(金)、2018年1月10日(水)～12日(金)

REP (Researcher Exchange Program) にて、上海交通大学 (SJTU) とペンシルバニア州立大学 (PSU) 兼担の Ying Liu (劉) 教授に12月16日から1月5日までと1月10日から12日まで京都大学に滞在いただきました。TMSのアライアンス・パートナーの一つであるSJTUのShanghai Center for Complex Physics (SCCP)の副センター長として、センター長のTony Leggett教授を支える運営の中心人物です。ホストの前野とは約20年前から共同研究をはじめ、最近では $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導に関して独立に研究を行う良きライバルでもあります。今回の滞在では、前野のグループと互いの研究の最新情報を基にじっくり議論するとともに、そのほか京都大学の関連各グループも訪問いただきました。また、川上教授とはアライアンス活動の意見交換を行い、TMS-EPIQSアライアンス・ワークショップでも講演いただきました。



I arrived at Kyoto on December 16, 2017 and began a visit which I had been very much looked forward to. My long collaboration with Prof. Yoshi Maeno started with work on  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , now a distinct direction of unconventional superconductivity research, particularly in its aspect of topological superconductivity. In recent years Prof. Maeno's group explored other novel material systems as well, especially topological materials.

I started a series of discussion with members of Prof. Maeno's research group on December 18 (Prof. Maeno was at a workshop of the TMS project in Tokyo December 18 and 19). On Monday morning, Dr. Chanchal Sow and I discussed the recent work on  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  carried out in Prof. Maeno's group. This is an interesting material not only because it is

closely related to  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  but it's also an interesting material of its own as a band-dependent Mott insulator. In particular, there is a report on the discovery of superconductivity under a very high pressure in this material several years ago, not reproduced by other groups yet. If confirmed, this would be the second superconducting Ru oxide. Even though metallic Ru oxides are abundant,  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  has remained so far to be the only Ru oxide that becomes superconducting under ambient pressure. The occurrence of superconductivity in this material was actually a subject of an extended discussion with Prof. Maeno after he returned from his trip to Tokyo. As Prof. Maeno is a co-author of this paper on possible superconductivity in  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  under pressure, he was able to provide information on the difficulty of the experiment. We discussed potential follow-up measurements that are needed to confirm the original observation. The main focus of my discussion with Dr. Sow, however, was the intriguing discovery of strong diamagnetism in  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  when the sample is subjected to a large applied current, which was reported in a paper published recently in Science with Dr. Sow being the first author. Prior to the discussion, I was unsure about the role of this unconventional experimental condition as the applied current was parametrized often by an electric field as in the case of parametrizing a semiconductor electric-field transistor. Because  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  is sufficiently conducting at all temperatures of the measurements, the electric field will be prevented from penetrating the bulk of the material. Therefore it is very important to allow the current to flow through the material in order to obtain an electric field within the bulk, which however places the material in a non-equilibrium



Visiting Prof. Yukawa's memorial office after discussion with Prof. Masatoshi Sato at the Yukawa Institute.

state. I suspect that this work may mark a beginning of serious exploration of Mott insulators in a non-equilibrium state, for which very little is known.

This discussion with Dr. Sow was followed up by a discussion with Prof. Maeno that included discussion of unpublished work on  $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ , the bilayer member of the Roddenden-Popper series of Ca ruthenates. Both of my groups at Pennsylvania State University (PSU) and Shanghai Jiao Tong University (SJTU) have done work on pure  $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ , including ionic liquid gating of thin crystals of  $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  using electric field effect devices prepared by photolithography (PSU work) and magneto thermoelectric measurements on untwinned bulk single crystals of  $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  with the crystal cut along a specific crystallographic direction. We were able to compare notes on some experimental details. While my work is focused on undoped material, Prof. Maeno's group worked on doped  $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  that yielded very interesting findings, suggesting that interesting non-equilibrium physics also exists in bilayer Ca ruthenate. I came away from these discussion sessions realizing the need for follow-up work on these two materials and opportunities for new discoveries.

I also had discussion sessions with Prof. Maeno's group members, including Mr. Mohamed Oudah, a senior graduate student in the group, and Prof. Shingo Yonezawa on the discovery of superconductivity in anti-perovskite material and work on nematic superconductivity in Cu doped  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . The work on anti-perovskite is particularly

interesting to me because of my long interest in materials possessing a perovskite structure. Venturing out into more familiar oxides I did some earlier work on non-oxide antiperovskite superconductor  $\text{MgCNi}_3$  in collaboration with Prof. Bob Cava of Princeton University, which taught me the depth of the structure-property relationship in this context. Prof. Maeno's anti-perovskite material had a different twist. Instead of going beyond oxides, the position of the oxygen is interchanged with a transition metal within the perovskite crystalline structure, leading to distinct modification of electronic structure. My expectation is that novel properties in addition to superconductivity will also be found in this class of materials.

My most intensive discussion with Prof. Maeno and his team is on  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . Since the discovery of superconductivity in this unique material by Prof. Maeno and his collaborators over two decades ago, a body of experimental evidence having been accumulated has shown that  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  features a spin-triplet,  $p$ -wave pairing state, an electronic analog of superfluid  $^3\text{He}$ , as predicted theoretically. Especially relevant to the pairing symmetry issue were NMR Knight shift measurements on the spin susceptibility and Josephson effect based phase-sensitive determination of the orientation dependence of the order parameter in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . While the NMR measurements carried out by Prof. Kenji Ishida and his collaborators was focused on the spin part of the Cooper pair wave function (the order parameter) the Josephson junction based experiments carried out in my PSU group in collaboration with Prof. Maeno dealt with the orbital part. Both classes of measurements demonstrated clearly that the order parameter  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  has an odd-parity, with its d-vector pointing along the  $c$  axis even though questions on the precise form of the superconducting order parameter have never gone away regardless of the compelling totality of work over the years. In particular, whether the precise pairing state is that of the so-called  $\Gamma_5$  state featuring a chiral  $p$ -wave pairing or one of the  $\Gamma_{1-4}$  non-chiral states featuring an in-plane oriented d-vector, a subject of current debate is yet to be

resolved. In this regard, I had discussion with Prof. Ishida on the most recent understanding on the NMR Knight shift data.

I also had discussion with Prof. Yutaka Sasaki on his observation of the A-phase of superfluid  $^3\text{He}$ , which is known without any doubt to feature chiral  $p$ -wave pairing state. Prof. Sasaki kindly showed me his lab that includes an impressive rotating dilution refrigerator. His work on superfluid  $^3\text{He}$  is particularly relevant to the issue of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  being a chiral or non-chiral  $p$ -wave superconductor. His work on NMR imaging with the application of a precisely controlled inhomogeneous magnetic field revealed direct images of the presence of domains, which could suggest that whether  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  is chiral or not may have ultimately be pinned down through an imaging experiment. It is unfortunate that the apparent failure in resolving this crucial issue now has led to doubt on whether  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  is even an odd-parity, spin-triplet superconductor to begin with.

My discussion with Prof. Maeno and his group members started with their current work on bilayer structures of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ /  $\text{SrRuO}$  done by Prof. Maeno's group as well as the pairing state in a Ru island embedded in bulk  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  done by my SJTU group. The main issue in both experiments is the proximity effect of a  $p$ -wave superconductivity, in a structure involves either a ferromagnet or an  $s$ -wave

superconductor. We also discussed with two other experiments, the magnetoresistance oscillations detection on half-flux-quantum states in mesoscopic rings of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ , which was participated by Mr. Yuuki Yasui, a senior graduate student in the group, and the detection of chiral edge currents in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  using Josephson junction tunneling measurements. The edge current measurements was also the subject of my talk in the TMS-EPIQS workshop held in Kyoto during my stay.

I'm very happy with the visit. I feel that the in-depth discussion facilitated by such an extended visit help deepen our understanding of work of one another carried out in our separate labs. I would like to suggest that the discussion be followed up by graduate students so as to help resolve issues identified in the discussion, and/or explore possible follow-up experiments. I would also like to take this opportunity to thank Prof. Maeno for arranging this productive visit, Prof. Shingo Yonezawa and several group members for hosting me, and Ms. Keiko Takamiya for the administrative assistance, all of which made the visit a productive one.



Discussion in Prof. Maeno's office. From left: Ying Liu, Yuuki Yasui, Yoshiteru Maeno, and Shingo Yonezawa.



## CIFAR Quantum Materials Summer School 2017 and the Main Meeting

2017年4月24日-29日 (Vancouver, Canada)

深谷、今村、Oudahは、4月24日-29日にかけてバンクーバーにて開催されたCIFAR Quantum Materialsのサマールクール(24日-26日)と国際会議(27日-29日)に参加しました。本稿では、会議の様子について参加した各学生の視点からご報告します。



深谷 優梨

名古屋大学 田仲研究室  
博士課程1年

発表内容：  
ドーブしたKane-Mele 模型における異方的超伝導発現機構の理論



今村 征央

京都大学 基礎物理学研究所  
物性基礎論 凝縮系理論  
博士課程2年

発表内容：  
Coupled-wire construction  
におけるゲージ場の創発

私は海外での国際会議で経験を積んでみたいと思い、今回CIFAR Summer School, Main Meetingへの参加を決意しました。私は英会話が苦手であるため、実際CIFARではポスター発表をする以上に日常会話をするのが大変でした。

ポスター発表では、実験を行っている研究者が多い中で私の理論研究のポスターに来てくれる人がいるのかと不安になりました。しかし、実際に私のポスターに来てくれたCIFARの先生方や学生さんが私の研究に関する話を聞いてくれただけでなく私の研究に興味を示してくれたのは、私にとって大きな自信となりました。特に、UBC大学のAnffany Chenさんが私のポスターに来てくれたことが非常に印象的でした。彼女とは私の研究を含めて様々なことを話し、その中で彼女が行っている研究が私の所属する田仲研と深く関係があることを知りました。CIFARで彼女と出会うことができたことが、私にとって非常に大きな成果だと感じています。ポスター発表全体を通して、私は今回以上に英語をより話せるようになりたいと強く思いました。

CIFARの講義は主に実験に関するものが多かったのですが、どの講義も基礎的なことから紹介してくれたため、初めて聞く研究分野でもその内容に興味を示すことができました。講義では、ディラック・ワイル半金属の基本的な話(Marcel Franz先生)や量子振動の話(James Analytis先生)、ワイル半金属TaAsに関する話(Brad Ramshaw先生)とトポロジカル半金属に関する内容があり、この分野に関する研究が盛んに行われていることを実感しました。また、普段私が聞くことのない半導体に関する研究や近藤絶縁体であるSeB<sub>3</sub>に関する話を聞くことができたのは、とても有意義に感じました。

最後に、様々なことで支援・補助をしてくださったCIFAR、新学術領域だけでなく、CIFARと一緒に参加しました今村征央さん、Mohamed Oudahさんには心より感謝を申し上げます。

今回のサマースクールと研究会に参加することを決めた理由は2つあります。1つ目は、私は数理物理や物性基礎論を専門としていて実験家の方々と接する機会が少ないので、実験についての講義やポスター発表から情報を収集し勉強するためです。2つ目は、北米圏の大学院生と交流し文化に親しむことでした。一方でこれらの目的は不安要素にもなります。講義の内容が理解できるか、自分の発表に興味を示してくれる人はいるのか、現地の流暢な英語の会話についていけるのか、などの不安があったのは事実です。

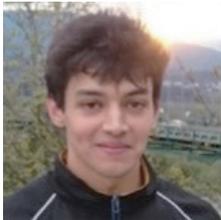
しかしこれらの不安は杞憂に終わりました。講義はどれも入門的なところから説明が始まり、学生の質問にも丁寧に答えていただく形だったので、私のような実験の知識がない人にも伝わるように工夫されていました。特にKate Ross氏の量子スピン液体の実験的観測に関する講義は興味深く聞くことができました。理論的にも難しい量子スピン液体の基礎を疎かにせず、実験でいかに観測するかに繋げる論理展開と誠実さには大変感銘を受けました。

またコーヒープレイクの時間が長く取られていたのは有難く、そこで知り合った学生がポスター発表に来てくれるという形で交流を深められたのは良かったと思います。理論系の数少ない参加者とも密に議論を交わすことができました。英語に関しては最初は速い会話に苦労しましたが、同行したMohamed Oudahさんの助けもあり徐々に慣れていきました。

滞在先であるホテルはウォーターフロントからほど近く、まだ頂上には雪が残る山々とバンクーバー港の景色は大変美しいものでした。このような美しい街で物理学に浸ることのできた1週間は貴重なもので、バンクーバーを発つ日には再びこの街に戻ってきたいという気持ちで胸がいっぱいになっていました。このような機会を与えて下さった新学術領域とCIFARの関係者の方々には心から感謝を申し上げます。



ホテル近くの公園から見たバンクーバー港



## モハメッド・オーダ

京都大学 固体量子物性研究室  
博士課程 3年

発表内容：  
Sr Deficiency Effect on  
Superconductivity in the  
Antiperovskite Oxide  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$

CIFAR Quantum Material Summer School and Program Meeting 2017 were held in Vancouver, Canada from in the period of April 24-29, 2017, and I had the pleasure of taking part in both events. The Summer School included detailed lectures that were directed towards students, where a variety of topics related to “Quantum Materials” were introduced by experts in the field. The Program Meeting included talks where professors presented their most recent research results, which can help someone new in the field get up to date on various topics. The conference typically ran from 8:30 am to about 5:00 pm with a lunch break and many coffee breaks, where I had the chance to meet professors and students from many Canadian and foreign universities. I presented a summary of my research during the poster session, and had the chance to take a look at the research of other students and postdocs and engaged in some intense discussions. Other students from Japan also participated in this conference, namely Yukihsa Imamura (Kyoto University) and Yuri Fukaya (Nagoya University), and we enjoyed the beautiful nature around Vancouver alongside other students.

Vancouver has many great sightseeing spots and my personal favourites in this trip were Stanley Park, where I went running in the morning, and Vanier Park, where we went as a group that included students from Cambridge University, UBC, Stanford University, Université Paris-Sud, Université de Sherbrooke, Nagoya University, and Kyoto University. I would like to emphasize that the CIFAR Quantum Materials conference had a great relaxing atmosphere combined with a great set of presentations, which makes it a great international conference for Japanese students to attend.

ポスタープレビュー（左上が深谷・今村、左下が Oudah）、  
エクスカージョン



ポスターセッションでの議論



今回、サマースクールと国際会議に出席し、海外の学生や研究者の方々と議論し、交友を深めたことは、とても良い経験となりました。この経験を今後の研究に生かしていきたいと思います。今回の参加にあたり、新学術領域および CIFAR の方々には大変お世話になりました。ありがとうございました。



## JREP 報告

### 安井 勇氣

京都大学 大学院理学研究科 博士課程 2 年

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)

受入教員：ライデン大学 Jan Aarts 教授

受入期間：2017 年 5 月 7 日 (日)～18 日 (木)

2017 年 5 月 7 日 - 5 月 18 日に共同研究を行っているライデン大学の Jan Aarts 教授のもとに滞在をしました。本滞在では、これまでに行ってきた研究の共著論文を執筆することを目的とします。

我々は、半整数量子フラクソイドと呼ばれる、フラクソイドの量子化が通常の半分の単位で生じる現象の観測を目指して、ルテニウム酸化物超伝導体の微小リングを用いた研究を行っています。当研究においておよそ 1 マイクロメートルの微小リングを作製するのに集束イオンビーム装置を使用しています。そのため、この装置に長けている大学院生の Kaveh Lahabi 氏と 3 年に渡る共同研究を行ってきました。

Jan Aarts 教授、Kaveh Lahabi 氏は当研究について国際的な学会での講演も行っており、多くの研究者との議論をしてきています。

そのため、これらの意見を論文に取り入れることが必要でした。メールやスカイプなどのコミュニケーション手段では議論が不十分になることも多いため、直接会って議論できたことは非常に有意義であったと考えます。

滞在先のライデンは日本との関係も深い町であり、市内にある民族学博物館では「Cool Japan」と題した展示も行われていました。滞在の時期も運がよく、一面に咲くチューリップ畑も見ることができました。

帰国後には、滞在時の議論の成果をもとに論文投稿にむけた最終調整を行っています。



Heike Kamerlingh Onnes 肖像画前での写真。  
左が Jan Aarts 教授、右が Kaveh Lahabi 氏、中央が筆者。

# JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

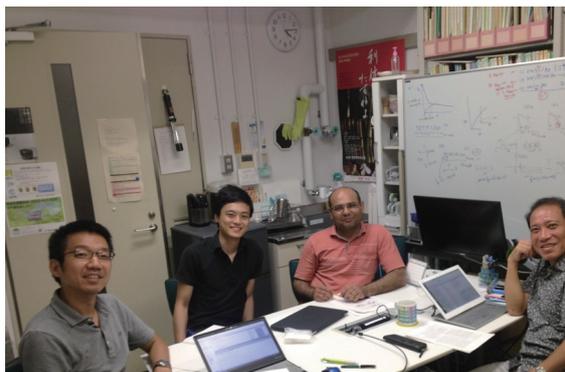
## JREP 報告

### ムハマド・シャーバズ・アンワー

ロンドン大学 助教

受入教員：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)

期間：2016年10月20日(木)～12月4日(日)



From Left to right: Dr. Shingo Yonezawa, Mr. Masanao Kunieda, Dr. Muhammad Shahbaz Anwar and Prof. Yoshiteru Maeno

“Spin-triplet proximity effect in Au/SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> superconducting junctions”

I visited Quantum Materials Lab., Kyoto University from 18<sup>th</sup> to 29<sup>th</sup> of August 2017. During my stay in Prof. Yoshiteru Maeno Lab., we prepared a draft of our recent paper, planned our future experiments and discussed recently obtained results by Mr. Masanao Kunieda (Master student).

During my JSPS postdoc at same laboratory, we made a SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> heterostructure with atomically smooth and electronically good interface in collaboration with Prof. Tae-Won Noh's group at Seoul National Univ. Furthermore, we successfully observed a direct induction of spin-triplet superconductivity in a 15-nm thick SrRuO<sub>3</sub> ferromagnetic layer with the coherence length of 9 nm. It suggests that induced superconductivity exhibits even-frequency p-wave spin-triplet nature. Our findings are published as Nature Communications 7, 13220 (2016). Recently, Mr. Kunieda obtained more data of differential conductance from newly fabricated Au/SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> junctions. In those results, we found that induced spin-triplet correlation responds anisotropically under externally applied magnetic field along the in-plane and out-of-plane directions. This JREP visit provides us opportunities to prepare a manuscript on these newly obtained results.

To understand the nature of induced correlation, we measured the differential conductance that corresponds to the density-of-states of induced correlation in SrRuO<sub>3</sub> layer by depositing SrTiO<sub>3</sub> insulating layer between SrRuO<sub>3</sub> and Au. In these new junctions, we observed superconducting-gap features with a zero bias conductance peak (ZBCP). I analysed and discussed the results with my colleagues at Kyoto University. From these results, we learnt that superconducting-gap features and ZBCP are likely coming from induced spin-triplet even-frequency p-wave and odd-frequency s-wave superconducting correlations, respectively. We are also preparing another manuscript to present our results of these tunnel junctions. A photo given at the end of this report is taken during one of our meetings.

As a next phase of our collaborating work, we want to measure superconducting critical current in junctions based on SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> hybrids. For this purpose, we designed Nb/SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> new devices and planned the experiments with Dr. Ryosuke Ishiguro from Japan Women's University and Dr. Shingo Yonezawa from Kyoto University.

I am grateful to JREP project to provide a chance to make a fruitful visit to Kyoto University. I enjoyed my work and stay at Kyoto.

## JREP 報告

### ティエンユー・リウ

ブリティッシュコロンビア大学 Ph.D. student

指導教員：ブリティッシュコロンビア大学 Marcel Franz 教授

受入教員：大阪大学 大学院基礎工学研究科 藤本 聡 教授 (A01)

受入期間：2017年1月16日(月)～4月7日(金)



I, Tianyu Liu, a Ph.D. student of The University of British Columbia in the subject of theoretical condensed matter physics, hereby submit this document to summarize my trip to Osaka University, which is supported by JREP program under TMS project.

I first learnt this program from Dr. Yoshiteru Maeno at CIFAR Quantum Materials Main Meeting, held in Toronto, 2016. Later the year, I published a paper with Dr. Dmitry I Pikulin and Dr. Marcel Franz in the field of distorted Weyl semimetals. In the publication procedure, we noticed a relevant paper by Dr. Hiroaki Sumiyoshi and Dr. Satoshi Fujimoto, which exhibits similar philosophy with our paper. This motivated me to seek some interaction with Dr. Fujimoto's group. And I immediately recalled the Topo-Q network I heard from Dr. Maeno. I then contacted Dr. Fujimoto and discussed the possibility of my visit to Osaka University. Shortly, I was admitted to the group by using the funds provided by JREP program under TMS project.

During my visit, I collaborated with Dr. Fujimoto in Osaka University and Dr. Franz back in UBC on the subject of Weyl superconductors. This is an interesting type of phase surviving in the transition between trivial superconductors and topological superconductors, an analog to Weyl semimetals. We are mostly interested in understanding such materials from different views. We built a toy model of such superconductors to study electronic structure, phase transition, and mixed state. The Weyl superconductors indeed exhibit many unusual properties distinguishing themselves from the known topological superconductors, indicating this is a new phase. This project is now being finalized and should be submitted shortly.

I think this project is a double win. For me, I was able to collaborate with other outstanding scientists and expand my academic circle. And I believe our results should interest many Japanese experimental groups. As far as I learnt, Dirac/Weyl superconductors are being widely investigated in Japan. However, there are only about 20 kinds of materials verified to be nodal. And only a small part of them are point-node superconductors. But our model is based on the proximity effect rather than a specific material and thus should be made relatively easily. The results being reported in our paper will give some in-depth knowledge of this new type of superconductors.

I feel lucky to hear this JREP program from Dr. Maeno and feel happy to be able to use it with Dr. Fujimoto. I learnt various new things and on-going projects in Fujimoto group, Masatoshi Sato group, and Norio Kawakami group. And I also visited ISSP in Tokyo for 10 days. The research style in Japan, in my style, is very rigorous. Researchers are so professional that they keep even tiny things go properly at all costs. That is the reason why Japan's science & technology is one of the best in the world. In the meanwhile, I can still feel the free academic atmosphere where I felt in Canada, which is very impressive to me.

My visit in Osaka lasts 83 days. However, I do hope I could have more time because accomplishing a project usually takes longer. After I went back to Vancouver, I need to contact Dr. Fujimoto by emails and discussions are never easy to arrange due to time difference. Overall, I think JREP is a good program. It definitely promotes the interaction between Japanese researchers and researchers all over the world, both of whom will be benefited.

# JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

## JREP 報告

### 池田 敦俊

京都大学 理学研究科 博士課程 1 年

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 前野悦輝 教授 (A01)

受入教員：スタンフォード大学 フィッシャー 教授

受入期間：2017 年 10 月 28 日 (土)～11 月 12 日 (日)

スタンフォード大学の Ian Randal Fisher 先生のもと、2017 年 10 月 28 日から 11 月 12 日の約 2 週間、「ディラック電子系アンチペロブスカイト酸化物の単結晶育成」というテーマで共同研究を行いました。私は単結晶育成についての知識があまりなかったので、まず初めに Fisher 先生が執筆された単結晶育成についてのレビュー論文をいただき、相図とは何か、どのように利用し、何をすれば単結晶が得られるかの基礎理論を勉強しました。実験面ではアーク炉を用いたタンタルのつぼの作り方から教えていただきました。アーク炉での作業は単純ですが筋力が必要で、力が足りずに苦労していると「帰るころには今より鍛えられているだろうね」と笑われました。

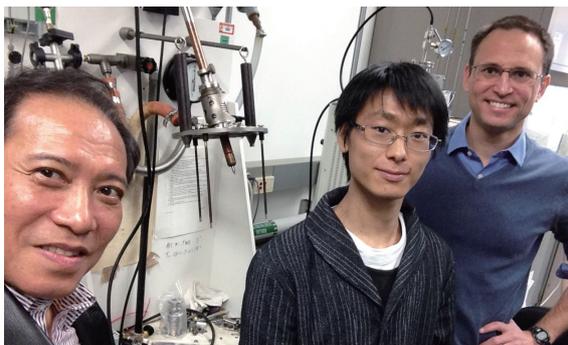
Fisher 先生にこの滞在を許可いただいた当初の計画では、炉を用いた原料の加熱は 1, 2 回しか行わない予定でした。ところが Fisher 先生のご厚意で、私が原料を仕込むたびに何度も炉を使わせていただきました。原料の組成や加熱温度を変えながら何度も試行した結果、最終的に小さいながら目的の物質の単結晶を得ることができました。さらに大きな結晶

を得られるように、今回の経験をもとに京都で研究を続けます。

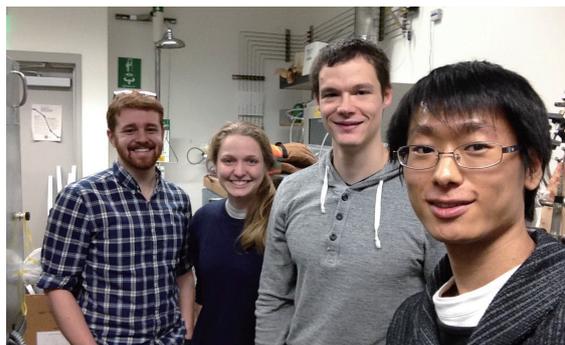
また、この滞在の背景である私の研究テーマについて研究室の皆さまに発表する機会もいただきました。30 分ほどで終わるつもりだったのですが、Fisher 先生はもちろん、学生の皆さまからも多くの(厳しい)質問をいただき、1 時間以上かかってしまいました。発表する側の私にとってとても勉強になりました。なかには私の発表内容を先取りするような質問もいくつかあり、自分の話を理解してもらえていることが嬉しい反面、「その話はあとでするつもりだからもう少し待ってくれ」と心の中で思っていました。

最後に、大変お忙しい中で私を歓迎してくださった Fisher 先生をはじめとする研究室の皆さまにお礼申し上げます。特に Rosenberg さん、Straquadine さん、Palmstrom さんには実験を手取り足取り教えていただきました。ありがとうございました。そして、この経験の機会を与えてくださった若手研究者派遣・招聘プログラムに感謝いたします。

左から、偶然居合わせた指導教員の前野教授、私 (池田)、受け入れてくださった Fisher 先生。



左から、実験を手伝ってくださった Straquadine さん、Palmstrom さん、Rosenberg さん、私 (池田)。



## JREP 報告

### 土師 将裕

京都大学 理学研究科 特定研究員 (Topo-Q PD)

受入研究者：京都大学 大学院理学研究科 松田祐司 教授 (A01)

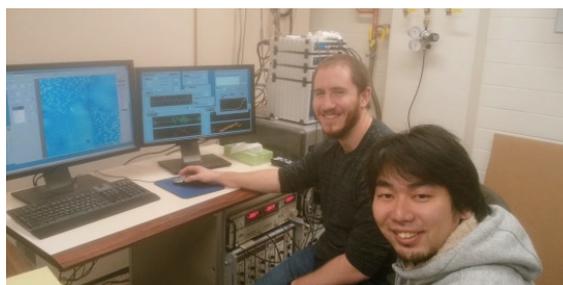
受入教員：イリノイ大学アーバナシャンペーン校 Vidya Madhavan 教授

受入期間：2017年11月27日(土)～12月20日(日)

イリノイ大学アーバナシャンペーン校の Vidya Madhavan 先生のもと、平成 29 年 11 月 27 日から 12 月 20 日までの約 3 週間、「STM によるトポロジカル物質のナノスケール観察」というテーマで共同研究を行いました。具体的には、鉄系超伝導体である FeSe の双晶境界上において発現が期待されているトポロジカル超伝導状態の STM 観察を試みました。

普段、分子線エピタキシー法で STM 測定用試料の作製を行っている私にとって、真空内劈開による試料準備に関する経験が少なかったため、大学院生の Thomas Neulinger 氏から、基礎的なことから培ったノウハウまで教えてもらいながら、実験を進めました。STM 測定に関しては、日本における経験を活かしつつ、Madhavan 先生を交えて常に議論を行いながら進めました。FeSe は比較的容易に劈開可能ではあるものの、百発百中とまではいかず、苦労することもありましたが、空間上の超伝導状態のマッピングに成功しました。その結果、FeSe の双晶境界のエッジにおいて、超伝導状態が変調している可能性を見出しました。再現性やデータのクオリティなど、結論を出すには少し追試が必要であり、本研究成果をもとに、これからも共同研究を進めたいと思っています。

また、Madhavan 先生の STM 装置やソフトウェアには、様々なノウハウやアイデアが詰まっており、我々の装置でも応用できそうな点がいくつか見つけることができました。今回の経験は、物理的な成果のみならず、今後の実験にも生かすことのできる重要な情報を得られた点でも非常にいい経験となりました。



実験を手伝ってくださった Thomas Neulinger 氏 (左) と私 (右)。

最後に、大変お忙しい中で私を歓迎してくださった Vidya Madhavan 先生をはじめとする研究室の皆さまにお礼申し上げます。特に Thomas Neulinger 氏には実験を手取り足取り教えていただきました。ありがとうございました。そして、この経験の機会を与えてくださった若手研究者派遣・招聘プログラムに感謝いたします。



ホストの Vidya Madhavan 先生 (左) と私 (右)。

Identifying Weyl superconductivity in UCoGe via the Chiral-magnetothermal effect.

## A01 ジェームズ・ドゥ・ライユル (James de Lisle)

大阪大学 大学院基礎工学研究科

受入研究者：A01 藤本 聡

We are interested in identifying a candidate for a Weyl superconductor (WSC). A WSC is characterised by Weyl nodes, however the nodes are contained in the superconducting gap function. The standard surface measurements such as ARPES are no longer useful as the relevant systems are at very low temperatures and therefore lie outside the sensitivity range. We show that one can identify WSC in UCoGe [1, 2] due to a new phenomenon we call the chiral-magnetothermal effect (CMTE). CMTE is analogous to the chiral anomaly in other condensed matter systems. In the CMTE the electric and magnetic field of the standard chiral magnetic effect are replaced by a temperature gradient and an effective momentum dependent magnetic field that arises from a torsional field (such as that from the vortex texture of the superconducting order parameter). The effect gives rise to spin polarisation, an effect which cannot be attributed to Zeeman splitting due to the absence of a magnetic field in the bulk. Using non-equilibrium quantum field theory in the quasiclassical limit, we show that the spin polarisation that occurs due to this effect appears under the first order quantum correction to the quasiclassical propagator. Such an effect should be observable using standard Knight shift measurements.

### References

[1] Mineev V P Phys. Rev. B **66** 134504 (2002)

[2] Hattori T et al. Phys. Rev. Lett. **108** 066403 (2012)



### 受入研究者からひとこと：

実は James さんとはもともと面識がなかったので、少々、不安もあったのですが、(生まれて初めてアジアで暮らすことになる彼の方がもっと不安だったでしょうが)、量子計算の研究で著名な Pachos 氏との共同研究の実績と、Leeds 大の佐々木聡さんの推薦もあり、彼を特任研究員として迎えることにしました。実は英国にいたときから囲碁が趣味で、腕前は相当なレベルのようです。阪大の囲碁部にも顔を出しているとか。日本と英国との高等教育のしくみの違いのせいか、スタンダードな物性物理より圏論などの抽象数学に強いところがあって、研究室内の学生にとっても、彼の存在はよい刺激になっています。



ジェームズ・ドゥ・ライユル

I completed my Bachelors in Mathematics and Physics at the University of Bristol, UK. I then completed a Masters and PhD in the theoretical physics department at the University of Leeds, UK. During this time my colleagues and I investigated a number of areas of topological quantum systems, notably identifying a means of measuring the Chern number in 2+1D multicomponent systems and identifying a number of 3+1D topological superconducting models that support a wide variety of topological phases with short range couplings. I have been enjoying my time so far in Japan. I enjoy exploring Osaka city, and hiking in the surrounding mountains.



# PD INTRODUCTION

## PD 紹介

### トポロジカル半金属における輸送現象

## CO1 大湊 友也

東北大学 金属材料研究所

受入研究者：CO1 野村 健太郎

トポロジカル半金属は波数空間におけるエネルギーバンドのトポロジーによって特徴付けられ、その非自明なバンド構造に起因する数多くの新奇な物理現象を示します。トポロジカル半金属になる様々な物質が発見されており、実験理論両方の側面から精力的に研究が進められています。

大学院博士課程ではグラフェンナノ構造体における磁気応答、ワイル半金属における電子輸送現象について理論的に調べました。その結果、通常の金属、半導体とは大きく異なるディラック電子系、ワイル電子系に特有な性質を見つけることができました。

現在は、トポロジカル半金属における磁気応答や輸送現象について研究しています。特に、局在磁化と伝導電子の間に強い交換相互作用がある場合に生じる現象に興味を持っています。トポロジカル半金属はスピン軌道相互作用がとて強い系で、通常の金属、半導体とは大きく異なる磁気特性、輸送特性を示します。最近の研究成果として、磁性ワイル半金属において従来の強磁性金属よりはるかに大きな異方的磁気抵抗効果が生じることを示しました。

トポロジーが関係した物理現象の研究は様々な領域に広がっています。その中で自分が携わる研究領域の発展に貢献できるように尽力していきたいと思えます。



#### 受入研究者からひとこと：

大湊さんのことは彼が大学院生の頃からよく知っていて、本研究領域の発展に貢献してくれる人材であると期待してポスドクになっていただきました。積極的に研究を進め、面白い物理をたくさん発見してくれたら嬉しいと思っています。



おおみなと・ゆうや

2011年東北大学理学部物理学科卒業、2013年東北大学大学院理学研究科物理学専攻前期博士課程修了、2016年同大学院後期博士課程修了 博士（理学）。2016年4月より東北大学（金属材料研究所）ポスドク研究員。週末は愛車でドライブに出かける。





## 2017 年度開催▽研究会報告

● 領域研究会 ● 集中連携研究会 ● アライアンス WS

### ● 第3回 TMS 領域研究会 (国際会議)

International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017)

2017 年 5 月 9 日ー 13 日 (東京工業大学 大岡山キャンパス 蔵前会館)

**新**緑の色増す季節に、東京工業大学大岡山キャンパスの蔵前会館にて、本新学術領域の第3回領域研究会を国際会議:International Conference on Topological Materials Science 2017 (略称:TopoMat2017)として開催しました。参加者は199名(国内174名。国外25名)に達し、132件の発表(プレナリー8件、招待講演13件、口頭発表15件、ポスター発表96件)がなされ、領域内・外から多くの参加者・発表者があったことから、本領域への関心の高さを表していると感じました。

9日夕刻のレセプションでは、遠路からのプレナリー・招待講演者を含めて、和やかな雰囲気の中で近況や最近の進展について語り合い、貴重な情報交換の場になるとともに本会議開催の下準備が整われました。10日からの本会議では、冒頭に、川上領域代表から本新学術領域の趣旨と活動内容について説明があり、トポロジカル物質科学に関する国際連携を支援するTopoQの活動についても説明がなされました。

10日から13日までに行われた学術講演では、トポロジカル物質科学に関する最新の研究成果が報告されました。S.-C. Zhang氏(Stanford大)によるマヨラナ準粒子の理論研究、L. Molenkamp氏(Wuerzburg大)によるHgTe系での2次元・3次元トポロジカル絶縁体に関する最新の実験結果をはじめ、様々なトポロジカル物質における物理やデバイスに関する講演がなされました。A. Leggett氏(Illinois大)によるトポロジカル超伝導に関する講演や、米澤氏(京都大)による

ネマチック超伝導を示す比熱の異方性に関する講演など、トポロジカル超伝導に関連した成果が報告されました。さらに、Q.-K. Xue氏(北京大)、十倉氏(理研・東大)の講演などでは、トポロジカル磁性体の実験研究が報告され、活発なディスカッションが行われました。スピン液体については、H.-Y. Kee氏(Toronto大)や高木氏(Max Planck)の講演などで、最新の研究成果が紹介されました。さらに、Morgenstern氏(Aachen大)の講演では、走査トンネル分光(STS)の測定によるトポロジカルエッジ状態の観測が報告され、永長氏(理研・東大)やJ. Orenstein氏(California大)の招待講演では、トポロジカル物質の興味深い非線形効果について議論されました。このように、トポロジカル物質科学の研究分野は大きく広がっている様子が感じられます。

ポスターセッションを10日と11日に行いました。1時間に濃縮されたポスタープレビューでは研究者の熱意が伝わる講演がなされ、引き続き行われた90分間のポスターセッションでは活発に議論を続ける研究者が印象的でした。恒例となっている、ポスタープレビュー賞(最優秀賞1名、優秀賞7名)、ポスター賞(金賞1名、銀賞2名、銅賞3名)は、12日の情報交換会で表彰されました。

最後に、会議の運営を円滑に行っていただいた東京工業大学の先生、学生、秘書の方々に深く感謝の意を表します。

(文責:藤澤利正)



# TopoMat2017 Program

## May 10th (Wed)

- 09:40 ~ 10:10 **Opening**  
09:40 Opening address **T. Fujisawa**  
09:50 [10AM-0] Introducing "Topological Materials Science"  
**N. Kawakami** (20)
- 10:10 ~ 10:50 **Majorana Fermion** [Y. Ando]  
10:10 [10AM-1] Discovery of the chiral Majorana fermion  
**S.-C. Zhang** (40)
- 11:20 ~ 12:50 **Topological Quantum Devices** [S.-C. Zhang]  
11:20 [10AM-2] Topological Physics in HgTe-based Quantum Devices  
**L. Molenkamp** (40)  
12:00 [10AM-3] Majorana bound states in superconductor-semiconductor hybrid nanowire system  
**M.-T. Deng** (30)  
12:30 [10AM-4] Observation of a  $4\pi$ -periodic Supercurrent in  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  Dirac Semimetal Based Josephson Junctions  
**J. de Boer** (20)
- 14:20 ~ 16:30 **Topology and Quantum Computing** [S. Fujimoto]  
14:20 [10PM-1] Topological superconductivity: Is the mean-field approach adequate?  
**A. Leggett** (40)  
15:00 [10PM-2] Quantum Supremacy: checking a quantum computer with a classical supercomputer  
**J. Martinis** (40)  
15:40 [10PM-3] Experimental study on correlated Andreev pairs under magnetic field in graphene  
**G.-H. Lee** (30)  
16:10 [10PM-4] Generalized parafermions in multi-layered fractional quantum Hall systems  
**Y. Tanaka** (20)
- 17:00 ~ 18:00 **Poster Preview A** (60) [T. Sato]  
18:00 ~ 19:30 **Poster Session A** (90)

## May 11th (Thu)

- 09:30 ~ 11:10 **Nonlinear effects, nonequilibrium states, dynamics** [K. Nomura]  
09:30 [11AM-1] Nonlinear and nonreciprocal responses of topological matters  
**N. Nagaosa** (30)  
10:00 [11AM-2] Giant anisotropic nonlinear optical response in transition metal monophosphide Weyl semimetals  
**J. Orenstein** (30)  
10:30 [11AM-3] Observation of edge states of Floquet topological phases in PT symmetric quantum walks  
**H. Obuse** (20)  
10:50 [11AM-4] Fractional-Charge Excitation in a Breakdown Region of an Integer Quantum Hall System  
**M. Hashisaka** (20)
- 11:40 ~ 12:50 **Magnetoelectric and Chiral Magnetic Effects** [M. Sato]  
11:40 [11AM-5] Electrodynamics of skyrmion-string, emergent monopole and axion in topological magnets  
**Y. Tokura** (40)  
12:20 [11AM-6] Chiral Magnetic Effect  
**K. Fukushima** (30)
- 14:30 ~ 16:10 **Topological Semimetal** [Y. Tokura]  
14:30 [11PM-1] Strategies for discovering new topological semimetals  
**L. Schoop** (30)  
15:00 [11PM-2] Fermiology of Weyl and Dirac materials  
**J. Analytis** (30)  
15:30 [11PM-3] Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal  $\text{Cd}_3\text{As}_2$   
**M. Uchida** (20)  
15:50 [11PM-4] Charge Fractionalization in Quantum Hall Line Junctions for Varying Interaction Strength  
**N. Kumada** (20)
- 16:40 ~ 17:40 **Poster Preview B** (60) [T. Mizushima]  
17:40 ~ 19:10 **Poster Session B** (90)



## May 12th (Fri)

- 09:30 ~ 10:50 **Magnetic Topological Insulator** [L. Molenkamp]  
09:30 [12AM-1] Searching for high temperature quantum anomalous Hall materials  
**Q.-K. Xue** (40)  
10:10 [12AM-2] Observation and control of the quantized conduction on the domain wall of a magnetic topological insulator  
**K. Yasuda** (20)  
10:30 [12AM-3] A large-gap magnetic topological heterostructure formed by self-organized incorporation of a ferromagnetic layer  
**T. Hirahara** (20)
- 11:20 ~ 12:40 **Topological Magnets** [S. Nakatsuji]  
11:20 [12AM-4] Topological edge states in honeycomb materials  
**H.-Y. Kee** (30)  
11:50 [12AM-5] Quantum Liquid state of  $J_{\text{eff}}=1/2$  isospins in complex Ir oxides  
**H. Takagi** (30)  
12:20 [12AM-6] Magnetic fluctuations of Kitaev's spin liquid  
**M. Udagawa** (20)
- 14:40 ~ 15:50 **Spin Order and Electron Correlation** [Y. Matsuda]  
14:40 [12PM-1] Anomalous Transport Phenomena in Non-Collinear Antiferromagnets  
**S. Nakatsuji** (30)  
15:10 [12PM-2] Extraordinary spin correlations and incipient excitonic instability of 2D Weyl fermions  
**M. Hirata** (20)  
15:30 [12PM-3] Correlation effects on Majorana modes in  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  superlattice systems - a test bed of reduction of the topological classification -  
**T. Yoshida** (20)

- 16:20 ~ 17:30 **Topological Superconductivity** [Q.-K. Xue]  
16:20 [12PM-4] Nematic superconducting gap of  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  revealed by field-angle resolved calorimetry  
**S. Yonezawa** (30)  
16:50 [12PM-5] Quasi-localized bound state and spin-triplet superconductivity in doped topological insulators  
**G.-q. Zheng** (20)  
17:10 [12PM-6] Topological nonsymmorphic superconductivity in  $\text{UPT}_3$   
**Y. Yanase** (20)

18:00 ~ 20:00 **Information Exchange Meeting with Dinner**

## May 13th (Sat)

- 09:30 ~ 11:00 **Topology and Symmetry** [M. Ueda]  
09:30 [13AM-1] Topological Crystalline Materials  
**M. Sato** (40)  
10:10 [13AM-2] Odd-frequency superconducting states with different types of Meissner response: problem of coexistence  
**Y. Fominov** (30)  
10:40 [13AM-3] Topological quantum criticality in confined superfluid  $^3\text{He-B}$   
**T. Mizushima** (20)
- 11:30 ~ 13:00 **Topological Insulators and Superconductors** [Y. Maeno]  
11:30 [13AM-4] Sub-nm probing of Topological insulators and Rashba systems  
**M. Morgenstern** (30)  
12:00 [13AM-5] Unconventional topological phase transition in two-dimensional noncentrosymmetric systems  
**B.-J. Yang** (20)  
12:20 [13AM-6] Exotic Phenomena in Topological Insulators and Superconductors  
**Y. Ando** (40)
- 13:00 ~ 13:10 **Closing**



## Poster presentations PA (May 10th)

- PA-1 Visualization of nonmagnetic impurity in heavy-fermion superconductor studied by STM **HAZE Masahiro**
- PA-2 Emergent exotic superconductivity and magnetism in Kondo superlattices **KASAHARA Yuichi**
- PA-3 Second order phase transition due to a disappearance of atotopological protection in d-wave superconducting nanoisland **Nagai Yuki**
- PA-4 Nematic to Chiral Transition in Superconducting Topological Insulator  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  **UEMATSU Hiroki**
- PA-5 Model building of spin-triplet superconductors with extrinsic defects **de Lisle James**
- PA-6 Effect of Sr Deficiency on Superconductivity in  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$  **Oudah Mohamed**
- PA-7 Interfacial Potential Barrier Dependence of Spin-Triplet Proximity Effect in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{SrRuO}_3$  Junctions **KUNIEDA Masanao**
- PA-8 Transport experiments of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  micro rings for a detection of half-quantum fluxoid **YASUI Yuuki**
- PA-9 Fermiology of possible topological superconductor derived from hole-doped topological insulator **Trang Chi**
- PA-10 Measurements of unconventional Superconductivity in One-Atom-Layer  $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Ti, Pb) **NAKAMURA Tomonori**
- PA-11 Noncommutative  $Z_2$  index of 3D topological insulators with disorder **Akagi Yutaka**
- PA-12 Planar Hall Effect on the Surface of Topological Insulator **Taskin Alexey**
- PA-13 Thin Film Growth of Ternary-Chalcogenide Topological Insulators **SEGAWA Kouji**
- PA-14 Fermi-level Tuning of the Dirac Surface State in Sb-doped  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  Thin Films **SATAKE Yosuke**
- PA-15 MBE growth of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Te thin films and observation of the surface state **KURODA Shinji**
- PA-16 2D transport properties of topological crystalline insulator SnTe film on  $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi **Nakanishi Ryosuke**
- PA-17 Magnetic field imaging for topological materials **NOMURA Shintaro**
- PA-18 Transport Properties of magnetic element doped-TI and Superconductor Junctions **YANO RIKIZO**
- PA-19 Josephson effects as a probe of unconventional superconductivity **KASHIWAYA Satoshi**
- PA-20 Electric and magnetic tunability of Andreev reflection and supercurrent via spin-orbit coupling in Zeeman-split superconductor **Hashimoto Tatsuki**
- PA-21 Theory of surface Andreev bound states and tunneling spectroscopy in three-dimensional chiral superconductors **TAMURA Shun**
- PA-22 Cooper-pair splitter realized in superconductor-InAs double nanowire junctions **Sato Yosuke**
- PA-23 Single-wall carbon nanotube as topological insulator: Phase transition and bulk-edge correspondence **OKUYAMA Rin**
- PA-24 Quantization of conductance minimum and index theorem **IKEGAYA Satoshi**
- PA-25 Transport properties of the ribbon consisting of Haldane model **TATSUMI Tomoko**

- PA-26 Impact of Ferroelectric Distortion upon Spin-Valley Coupling and Topological Phase in Transition-Metal Oxides **YAMAUCHI Kunihiko**
- PA-27 Possibility of topological quantum field effect transistor of silicene, germanene and stanene nanoribbons **HATTORI Ayami**
- PA-28 Engineering a Large-Gap 2D Topological Insulator in  $\text{InAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$  Strained Quantum Wells **AKIHO Takafumi**
- PA-29 Exploring edge transport in short-channel  $\text{InAs}/(\text{In,Ga})\text{Sb}$  quantum spin Hall insulators **IRIE Hiroshi**
- PA-30 A gate-defined anti-Hall bar for inner quantum Hall edge channels in an  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  heterostructure **Eguchi Ryota**
- PA-31 Deformed chiral conformal field theory and the quantum Hall effect **Hutasoit Jimmy**
- PA-32 Quantum Hall phase diagram of two-component Bose gases, **Furukawa Shunsuke**
- PA-33 Duality derivation of 2D quantum spin systems from the view point of coupled-wire construction **Imamura Yukihisa**
- PA-34 Interaction-Induced Crossover of Fermionic Symmetry-Protected Topological Phases in One Dimension **NAKAGAWA Masaya**
- PA-35 Majorana zero modes without edges **KAWABATA Kohei**
- PA-36 Braiding Dynamics and Non-Abelian Statistics of Majorana Fermions **MIYAZAKI Shunsuke**
- PA-37 Coarsening dynamics of spin domains in a one-dimensional spin-1 spinor Bose gas **Fujimoto Kazuya**
- PA-38 Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates **Yoshino Takumi**
- PA-39 Coarsening Dynamics of a Binary Bose-Einstein Condensate, **KAWAGUCHI Yuki**
- PA-40 Two-dimensional Fermi gas in spin-dependent magnetic fields **ANZAI Takaaki**
- PA-42 "Supersolidity" Assisted Crystallization of  $^4\text{He}$  in Aerogels **NOMURA Ryuji**
- PA-43 Effects of Perpendicular Magnetic Field on Topological Surface States in Superfluid  $^3\text{He-B}$  **AKIYAMA Koki**
- PA-44 Low-energy effective field theory of superfluid  $^3\text{He-B}$  **FUJII Keisuke**
- PA-45 Chiral Anomaly in Superfluid  $^3\text{He-A}$  with Skyrmion Texture **ISHIHARA Yusuke**
- PA-46 Casimir force for fermionic condensates: Attractive-Repulsive **YOSHII Ryosuke**
- PA-47 Topological catalysis: continuous production of topological solitons assisted by topological defects **Higashikawa Sho**
- PA-48 Supersymmetry in Quantum Rings of Interacting Majorana Modes **HUANG Zhao**
- PA-49 SUSY breaking and NG fermions in  $Z_2$  Nicolai model **SANNOMIYA Noriaki**

## Poster presentations PB (May 11th)

- PB-1 Possible band and crystal structures of the superconducting antiperovskite oxide  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$  **IKEDA Atsutoshi**
- PB-2 DC current controlled diamagnetism in the  $\text{Ca}_2(\text{Ru}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_7$  system **SOW Chanchal**
- PB-3 Mott semimetal state with strong diamagnetism in  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  induced by DC current **MAENO Yoshiteru**
- PB-4 Sextuple-Q states in a Kondo lattice model with Rashba and Dresselhaus spin-orbit couplings **OKADA Ken**

- PB-5 Laser-irradiated Kondo insulators: Controlling Kondo effect and topological properties **Takasan Kazuaki**
- PB-6 Photo induced Floquet Weyl semimetal phases **ZHANG Xiao-Xiao**
- PB-7 Local Excitation of Photocurrent in Non-centrosymmetric Systems **Ishizuka Hiro**
- PB-8 Photovoltaic Anomalous Hall effect in Line-node Semimetals **TAGUCHI Katsuhisa**
- PB-9 Zeno Hall Effect **Gong Zongping**
- PB-10  $Z_N$  Berry Phase and Symmetry Protected Topological Phase in Spin Chain **KARIYADO Toshikazu**
- PB-11 Quantum oscillations of conductivities induced by magnetic skyrmions on topological insulators **ARAKI Yasufumi**
- PB-12 Nonlinear spin current generation in noncentrosymmetric spin-orbit coupled systems **HAMAMOTO Keita**
- PB-13 Magnon Spin-Momentum Locking: Possible Realization in kagome lattice antiferromagnet **Okuma Nobuyuki**
- PB-14 Magneto-optical Kerr effects and real-time imaging of magnetic domains in the non-collinear antiferromagnetic metal  $Mn_3Sn$  **Higo Tomoya**
- PB-15 Deviation from semiclassical spin dynamics in frustrated quantum magnets with magnetic order **Kamiya Yoshi**
- PB-16 Anomalous Thermal Hall Effect in Nodal Chiral Superconductors **YOSHIOKA Nobuyuki**
- PB-17 Heat Transport as a Signature of Weyl Superconductor **KOBAYASHI Takuro**
- PB-18 Unidirectional Majorana edge states in noncentrosymmetric nodal superconductors **Daido Akito**
- PB-19 Current- and Voltage-induced Spin Torques in Weyl semimetal **KUREBAYASHI Daichi**
- PB-20 Spin magnetic susceptibility of Dirac semimetals **OMINATO Yuya**
- PB-21 Topological phases in multilayers of a normal insulator and a Weyl semimetal **YOKOMIZO Kazuki**
- PB-22 Quantized Polarization and Surface Charge originating from the Topological Nodal Line **HIRAYAMA Motoaki**
- PB-23 Symmetry enforced non-symmorphic nodal-line in spinless systems **Takahashi Ryo**
- PB-24 General phase transition between spinless nodal-line semimetals and Weyl semimetals **OKUGAWA Ryo**
- PB-25 Line-Node Dirac Semimetal  $CaAgX$  ( $X = P, As$ ) **YAMAKAGE Ai**
- PB-26 Crossing-line-node semimetals: general theory and application to rare-earth trihydrides **Kobayashi Shingo**
- PB-27 Electronic states of topological line-node semimetal  $HfSiS$  studied by high-resolution ARPES **TAKANE Daichi**
- PB-28 Topological semimetal realized in a specific honeycomb lattice **Nie Simin**
- PB-29 Multi-band touching fermions beyond Weyl semimetals **Ezawa Motohiko**
- PB-30 Topological Magnetism from Multiple Dirac Cones in Monolayer Transition Metal Trichalcogenides **SUGITA Yusuke**
- PB-31 High-resolution ARPES study of trigonal tellurium **NAKAYAMA Kosuke**
- PB-32 Electronic structure of Bi ultrathin film on  $1T-TaS_2$  studied by high-resolution ARPES **Souma Seigo**
- PB-33 Bi ultrathin films on high- $T_c$  superconductor studied by ARPES **SHIMAMURA Natsumi**
- PB-34 Electronic structure of monolayer  $1T-NbSe_2$  studied by ARPES **NAKATA Yuki**
- PB-35 Weak localization in strongly spin-orbit coupled systems **HAYASAKA Hiroshi**
- PB-36 Theoretical study of magnetoresistance in Dirac electron systems **Owada Mitsuki**
- PB-37 Extremely large magnetoresistance in  $WTe_2$  grown by flux method **TSUMURA Kohei**
- PB-38 Inter-subband Landau level couplings induced by in-plane magnetic fields in trilayer graphene **Masubuchi Satoru**
- PB-39 Terahertz study in  $Sb_2Te_3$  and multi-layered phase change memory materials **Makino Kotaro**
- PB-40 Generation and detection of edge magneto plasmons in a quantum Hall system using a photoconductive switch **Lin Chaoping**
- PB-41 Spatial evolution of a non-equilibrium energy distribution function in a quantum Hall edge channel **ITO Kosuke**
- PB-42 Thermal transport in the Kitaev model **NASU Joji**
- PB-43 Effect of interaction between fractional charges on classical spin liquid on kagome lattice **MIZOGUCHI Tomonari**
- PB-44 Ground-state phase diagram in the Kugel-Khomskii model with finite spin-orbit interactions **Koga Akihisa**
- PB-45 Kitaev-Heisenberg Hamiltonian for a Spin-orbit Mott Insulator with High-spin  $d^7$  Configuration **SANO Ryoya**
- PB-46 Dual gauge field theory of quantum liquid crystals **Beekman Aron**
- PB-47 Robustness of topological pumping in one-dimensional interacting fermions **TEZUKA Masaki**
- PB-48 Edge state induced by two dimensional quantum walks **SEGAWA Etsuo**
- PB-49 Quantum critical phenomena in parity-time symmetric systems **Ashida Yuto**
- PB-50 A proposal for creating and probing quantum black holes with ultracold gases in optical lattices **DANSHITA Ippei**

## Poster Award winners

### Gold Prize

[PA-34] **Masaya Nakagawa** / RIKEN

### Silver Prize

[PB-27] **Daichi Takane** / Tohoku Univ.

[PB-14] **Tomoya Higo** / ISSP, Univ. of Tokyo

### Bronze Prize

[PB-49] **Yuto Ashida** / Univ. of Tokyo

[PA-09] **Chi Trang** / Tohoku Univ.

[PA-35] **Kohei Kawabata** / Univ. of Tokyo

## Best Preview Award winner

[PB-13] **Nobuyuki Okuma** / Univ. of Tokyo

## Preview Award winners

[PB-27] **Daichi Takane** / Tohoku Univ.

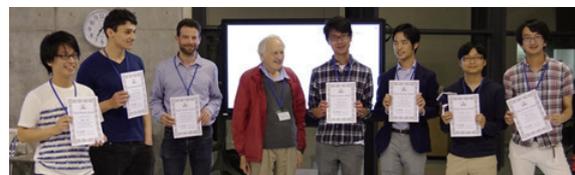
[PA-47] **Sho Higashikawa** / Univ. of Tokyo

[PB-46] **Beekman Aron** / Keio Univ.

[PA-37] **Kazuya Fujimoto** / Univ. of Tokyo

[PB-12] **Keita Hamamoto** / Univ. of Tokyo

[PA-34] **Masaya Nakagawa** / RIKEN





## ●第11回物性科学領域横断研究会

2017年11月17日ー11月18日（東京大学 物性研究所）

**毎**年恒例となった物性科学に関する領域横断研究会（凝縮系科学の最前線）が2017年11月17日（金）～18日（土）の日程で、東京大学 物性研究所で開催されました。今回で既に11回目となります。研究会運営は、ナノスピ変換領域代表の大谷義近氏（物性研）が中心となって行われました。

参加者は160名程度で昨年の東大での170名より若干少ないものの、多くの若手の出席が目立ち研究会は活気に満ちていました。昨年から2日間の開催となり、1領域あたりの講演時間は1時間で、その内容は各領域に任せられました。新たに「次世代物質探索のための離散幾何学」（小谷元子代表、東北大学）が今年から加わり全部で9領域の参加となりました（上に示したのは、領域横断ホームページに掲載された9領域のロゴ）。他領域からのゲスト講演は今年はいませんでした。

講演の内容は多岐にわたり、数理物質科学に近いものから、応用物性までカバーされました。トポ物質科学から以下の3人が口頭発表を行いました：

- 川上則雄（京大：領域代表）「トポ物質科学」の紹介 10分
- 鄭国慶（岡山大：A01計画）「トポロジカル超伝導体の探索」 25分
- 新田宗土（慶應大：D01計画）「トポロジカルな中性子」 25分

初日に凝縮系科学賞の授賞式が行われ、渡辺悠樹氏（東大工）が「空間群を用いたバンド構造のトポロジーの研究」、須田理行氏（分子研）が「分子の光異性化反応を用いたモット絶縁体 - 超伝導体の相制御」に関する受賞講演を行いました。

ポスター発表も非常に活気がありました。100件超の発表は昨年の85件を上回りました。一昨年に設けたポスター賞は、今年は6名が受賞しました。この賞は若手（特に大学院生）にとってたいへん励みになっているようなので、是非続けることができればと思います。

領域研究会の運営面での役割分担として「トポ物質科学」は本年度も広報を担当し、物理学会誌、Web、メーリングリストに研究会の情報を流しました。

来年度の領域横断研究会は大門寛氏（3D活性サイト科学、奈良先端大）が担当で、奈良先端科学技術大学院大学で行われる予定です（2018年11月30日、12月1日）。

（文責：川上 則雄）



## ● 第9回トポロジー連携研究会

「ナノ構造・エッジ伝導・マヨラナモード」

2017年12月18日-19日(京都大学東京オフィス)

年の瀬も迫った12月の18日、19日の2日間、京都大学東京オフィスにて第9回トポロジー連携研究会を開催した。領域代表、各班の研究代表、研究分担者・連携研究者、および領域外の招待講演者を含む参加者数は25名であった。冒頭で主催者(村木)から研究会の趣旨と、テーマであるナノ構造・エッジ伝導・マヨラナモードの間の関連について説明があり、その後、各研究者から最新の研究報告やレビュー講演があった。初日は主にナノ構造、ヘリカルエッジ、2日目はマヨラナモード、スピン液体、パラフェルミオン、カイラルエッジ等のテーマについて班や領域の垣根を超えた横断的な議論が集中的に行われた。

中でも Kitaev スピン液体理論(藤本)と超伝導接合におけるパラフェルミオン(田仲)に関するチュートリアルの講演など、他の研究会では聞けないような貴重な内容や、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>における Kitaev スピン液体状態の熱ホール効果(笠原)などホットな話題についても聞くことができ、非常に内容の濃いものとなった。また、ロボットを使った van der Waals ヘテロ接合の自

動化に関する印象的な講演(増淵)などもあり、小規模研究会ならではの、普段は聞けないような基本的な質問や、忌憚ない意見が多く出て、議論・理解を深めることができた。コーヒープレークの間も活発な質疑、意見交換、連携に向けた議論が行われた。最後に領域代表の川上が全体を通じた議論をまとめ、今後の方向性を確認して終了した。

ちなみに今回の連携研究会が開かれたのは、東京駅を真下に見下ろす新丸ビル10階にある京都大学東京「オフィス」の中の会議室であり、大学キャンパスで行われていたこれまでの研究会とはかなり違う雰囲気の中での2日間となった。交通の便に配慮してのことであったが、参加者数を見るかぎり、学生さんに気軽に足を運んでもらうにはちょっと敷居が高かったのかもしれない。ただ、参加者からは「少人数なので質問しやすくて良かった」との声もあり、全体的に非常に密で有意義な研究会となった。

(文責：村木 康二)





## ●第3回アライアンス研究会 “YITP-PKU-TMS International School and Workshop” 報告

2017年2月13日ー18日（京都大学 基礎物理学研究所）

2018年2月13日から2月18日までの6日間、京都大学基礎物理学研究所にて、第3回TMSアライアンス研究会が開催されました。これは、京都大学基礎物理学研究所および北京大学との共催となるもので、若手の育成・国際交流を目指したインターナショナルスクールを行うとともに、北京大学と本領域のネットワーク形成と交流を促進する目的で開催されたものです。

6日間に渡って開催された本国際スクール・研究会は、凝縮系分野の大学院生のみならず、同分野の第一線の研究者が多数参加し、スクールとしての基礎知識の共有を重点に置きつつも、大学院生と第一線の研究者との交流・議論を可能にするため、以下のようなスケジュールで開催されました。

- 13日 : スクール(レクチャー3コマ)
- 14-15日: スクール ワークショップ(1セッション、レクチャー3コマ)
- 16-17日: ワークショップ(4セッション、1ポスターセッション)
- 18日 : ワークショップ(1セッション)

またテーマとしては以下のものが取り上げられました。

- ◇トポロジカル絶縁体、量子スピンホール効果
- ◇トポロジカル超伝導およびマヨラナ型励起
- ◇スピン・軌道相互作用の生み出す物理
- ◇超伝導と異常量子状態
- ◇量子フラストレート系のスピン液体、新奇スピン秩序、トポロジカル秩序

全体で112名（うち国内61、海外51）の参加者があり、6日間に渡って活発な研究交流、議論・討論、講義、研究発表が行われました。

スクールの講義では、まず、戸塚圭介氏（基研）により、相互作用がある場合のトポロジカル相の理論である対称性によって守られたトポロジカル相 (Symmetry

protected topological phase (SPT)) に関する講義が行われました。ちょうどスクール開催直前の2016年末にSPTの典型例であるHaldane模型の研究などでHaldane氏がノーベル賞を受賞したこともあり、Haldane模型の丁寧な解説からはじまる教育的な講義が行われました。また、渡邊悠樹氏（東大）により、トポロジカル相と電子の占有率の間に成り立つ定理について、空間群が絡む場合の最新の話題も含めた講義が行われました。さらに進藤龍一氏（北京大学）により、ボソン系であるマグノン特有のトポロジカル相についての丁寧な講義がなされ、Xiong-Jun Liu氏（北京大学）は、冷却原子におけるスピン軌道相互作用および関連するトポロジカル相について詳細な講演を行いました。

ワークショップでは、34件の口頭発表と41件のポスター発表が行われ、上述のトポロジーが関連する幅広い研究テーマについての最新の研究結果が報告され、現時点での到達点が確認されました。

また、ワークショップについて特に付記すべき事項としては、セッションの座長をスクールに参加した学生が務めたことと、発表者のほとんどが学生であったポスターセッションが活況を呈していたことが挙げられます。単に、学生が基礎知識を獲得するだけでなく、学生も研究者として活発に活動を行った大変有意義な国際スクールとなりました。また、会期中に今後も北京大学と本領域の間で交流を行うことが確認されました。

最後に、スクールの運営でお世話になった京都大学、本領域関係者および北京大学の方、特に北京大学との連絡先となりスクール開催にご尽力いただいた北京大学の進藤龍一氏に感謝したいと思います。

(文責：佐藤 昌利)



# ●第4回アライアンス研究会 “Spin and Topological phenomena in nanostructures -Towards topological materials science-” 報告

2017年4月25日ー28日（ドイツ）



TMSとTop-Spin(Spin and Topological phenomena in Nanostructures)による合同ワークショップが4月25日から28日までドレスデンのライプニッツ固体・加工材料研究所(IFW: Leibniz Institut fuer Festkoerper und Werkstofforschung (IFW) Dresden)にて開催されました。ライプニッツ研究所1992年に設立された比較的新しい研究所で、190名の物理、化学そして材料科学者が所属しています。場所はドレスデンの中心地から路面電車にて緩やかな坂道を登ったところにあり、ドレスデン工科大学の敷地に隣接する閑静な場所にたずむ研究所です。

今回のワークショップのテーマは、スピン及びトポロジーに関わる分野で、その中でもNanostructure, Spintronics, Superconductivity, Semimetals and Insulators,そしてCorrelated systemsに焦点を当てた会議となります。日本側からはTMSメンバー9名の招待講演者を含む総勢50名を超える参加者(写真右下)により、充実した議論を行った4日間でした。主な組織委員はIFW DresdenのCarmine Ortix博士、サレルノ大学(イタリア)のPaola Gentile博士とMario Cuoco博士、前野悦輝先生、川上則雄先生と筆者となり、写真右上はTMSメンバーと今後の研究協力に関して議論している様子です(TMSメンバーの佐藤宇史先生も議論に加わりました)。スピンとトポロジーがキーワードと言っても分野は多岐に渡り、すべてを網羅することはできませんが、ここでは興味深い内容について筆者の独断と偏見(?)で、いくつかご紹介したいと思います。

マックスプランク研究所のMackenzie氏は固体中における電子の粘性に関する研究について講演しました。通常固体中で電子を流すためには、不純物を加えてキャリアを誘起する必要があります。しかしながら不純物がある場合、空洞のパイプに水を流すようには電子が流れないため、ほとんどの材料系では電子の粘性(Viscosity)を調べるには不適切な材料系となってしまいます。彼らは、Pdが2次元的な伝導を担うデラフォサイト型PdCoO<sub>2</sub>に着目し、低温での伝導測定から室温の水と同程度の粘性を電子が持っていることを示しました。

マンチェスター大学のFalko氏は、グラフェンと層状カルコゲナイド物質などが積層された構造において、MoS<sub>2</sub>など遷移金属カルコゲナイド上のグラフェンは10meVの非常に大きなスピン軌道相互作用を示す起源やスピン緩和メカニズムについて説明をした面白い講演でした。通常グラフェン単体では弱いスピン軌道相互作用を示すことから、このような2次元物質にお

ける新たなスピン軌道相互作用の変調手法は、今後デバイス応用にも利用できそうな印象を受けました。

またフローニンゲン大学のDejene氏はNiFe/Al/YIG基板ノンローカルスピン注入構造において、NiFeからAlに注入されたスピン流が磁性絶縁体であるYIGにさらに吸収されることで、Nonlocal信号がYIGの磁化で変調される実験を見事に示しました。

前野氏はAu/SrRuO<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>接合を用いたアンドレーフ反射に関して講演しました。Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>の超伝導状態がAu界面まで広がっていることを明瞭に示し、長距離まで広がるのはp-wave even-frequency pair amplitudeに起因するなど興味深い内容の講演でした。

他にも、フロッケ状態に関する理論(MPI岡氏)、反強磁性体におけるエデルシュタイン効果(京大柳瀬先生)、SrTiO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>界面へのスピンポンピング(京大大島氏)など様々な物質系におけるスピン及びトポロジーに関わる最新の話題について議論されました。会議においてはScientificな議論が容易にできるように、会議場のすぐ脇にディスカッションスペースが設けられており、休憩時間も十分あるため、講演後には数人で円卓を囲んで議論する姿も多数見かけ、充実した会議となりました。

またドレスデンの地元のお店をホテルのバーテンダーの方に教えてもらい、有名なソーセージとビールのお店(Watzkes-Wurstkueche)にも立ち寄りました。メニューを見てもどのようなソーセージなのかよく分からないので、何種類か注文してみんなでシェアすることに。カレー風味のソーセージや粗びきソーセージなどを味わいながら地ビールを堪能し、会議の内容を振り返ったりその時間けなかった話をさらに詳しく聞いたりなど充実した4日間を過ごすことが出来ました。このような機会を与えてくださりました、関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

(文責：好田 誠)



# ●第5回アライアンス研究会 “Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms” 報告

2017年10月2日ー3日（東京大学）

**東**京と北京を含む日中の冷却原子系研究者の交流を目的として、本合同研究会が2017年10月2、3日の二日間に渡り東京大学において開催された。本研究会が始まったきっかけは、冷却原子関連の研究者が日中（特に中国）で急激に増えており、欧米にまで出かけなくても最先端の研究内容について十分な意見交換ができるのではないかという議論を、Hui Zhai氏と私が行ったことによる。今回の参加者は、日本側32名、中国側13名の参加を得て、成功裏に終了した。

一日目は、非時間順序相関、Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型、散逸制御、トポロジカル系のクエンチ・ダイナミクス、機械学習について講演が行われた。SYK 模型はマヨラナ・フェルミオンがランダムに相互作用する可解模型であり、そのダイナミクスのブラックホールとの類似性に注目が集まっている。手塚真樹氏 (D01 連携) からはその実現法の提案があった一方、Yiming Chen 氏 (清華大) からは SYK 模型の拡張による非フェルミ液体の構成について報告があった。驚くべきことに Chen 氏は学部生である。さらに、研究会を通して5名の大学院生による講演があり、日中の若手の著しい活躍が見られた。

二日目は、離散時間結晶、トポロジカル・ポンプ、Higgs モード、Efimov 状態、トラップ気体の共形不変性、エキゾチック相互作用についての講演が行われた。離散スケール不変性を持った少数多体状態である Efimov 状態は、量子異常の帰結と考えられており、トポロジカル現象との関連が興味深い。今回は、Efimov 状態について三つの講演が行われ、日中の関心の共通

性が伺えた。座長を務めた P. Naidon 氏 (理研) からは、Efimov の正しい発音 (イエフィーモフに近い) の紹介があった。Lih-King Lim 氏 (清華大) からは、ポンプ電荷を 1,2,4 とコントロールできるトポロジカル・ポンプの理論提案があった。これは、京大高橋研 (C01 公募) の最近の実験に刺激を受けて行われた研究である。冷却原子系の操作性を活かして、このような時間軸を交えたトポロジカル現象の研究が今後も切り開かれていくと期待される。

各セッションでは議論の時間を十分とり、活発な質疑応答が行われた。本合同研究会は、前年の清華大での開催に続く第2回である。日中の参加者の関心には共通点が多く、今後も交流を続けていくことの重要性が確認された。

本研究会はもともと東大と清華大学との間で始まったために、Tokyo-Beijing という名前がついているが、今回の参加者リストからわかるようにすでに、冷却原子に関するオール Japan-China の研究交流のフォーラムの場となっていると考えられる。その意味で、次回は中国での開催となるが、開催場所は北京にこだわらなくてもよいのではないかという議論になっている。その次は日本であるが、日本でも別な場所が候補に挙がっている。いずれにせよ、当該研究分野におけるアジアのプレゼンスは急速に高まっており、将来的には日中を超えた全アジアをカバーするものに成長することが期待される。

(文責：上田 正仁)



## ●第6回アライアンス研究会 “TMS-EPIQS 2nd Alliance Workshop: Topological magnets and topological superconductors” 報告 2018年1月11日ー14日（京都大学）

TMS と EPIQS (Emergent Phenomena in Quantum Systems, Moore Foundation) による合同ワークショップが2018年1月10日から14日の5日間に渡って、京都大学益川ホールにて開催されました。EPIQSは、インテル社の創立者 Moore 氏夫妻寄贈の財団による基礎研究プログラムです。EPIQS との合同ワークショップは今回で2回目であり、日本を除く6か国から18名(内、米国から13名)、国内から47名、計65名が参加する国際会議となりました。この会議はトポロジーに関連する様々な物理を世界の第一線で活躍している研究者の方に講演していただくことが目的ですが、「京都らしさ」を参加者にアピールできたこともまた、一つの大きな成果だったと思います。

初日は、京都ロイヤルホテル&スパのバー「ヘイヴン」の一部を貸し切り、Welcome Reception を行いました。長旅や時差による疲れもものともせず、実に28人も参加者に恵まれた Reception では、セッション前にもかかわらず、既に多くの議論が行われていた様子で、翌日からの会議が非常に楽しみに感じる幕開けとなりました。



Welcome Reception で熱く交わされた議論

さて、今回の研究会は、「Topological Magnets」と「Topological Superconductors」をキーワードとして、口頭講演が計29件、ポスター講演が計23件行われました。なお、ポスター講演にはポスターアワードが設けられており、Chi Xuan Trang 氏（東北大）、松下太樹氏（阪大）、土師将裕（京大、Topo-Q PD）が受賞いた

しました。なお、ポスターアワード受賞者には京都らしい記念品である、真田紐で作られたストラップが贈られました。

Topological Magnets に関して、注目を集めていたのは、キタエフ模型物質における量子スピン液体でした。大きさ  $1/2$  を持つスピンのハニカム格子上に並ぶというシンプルな模型が織りなす物理は、非常に美しい結果を産みだしているように感じました。また、キタエフ模型物質において予測されている Majorana 粒子の発現に関する研究は、ここ数年で大きく進んできたという印象を受けました。理論の側面から、キタエフ模型において Majorana 粒子が発現することが明らかにされていましたが、実際、近年、キタエフ模型の候補物質である  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  において Majorana 粒子が発現しているという実験報告がなされています。その他にも、ディラック電子系やワイル粒子に関する話題も大きな注目を集めており、Topological Magnets における話題はまだまだ尽きないことを実感いたしました。

Topological Superconductors に関する講演においても非常に白熱した議論が行われていました。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  においてカイラル p 波超伝導が実現しているのかどうかは未だに議論の最中であり、今後、より多くの実験及び理論の側面からの研究が必要であるように感じました。その他にも、回転対称性の破れが示唆されている  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  や重い電子系超伝導体  $\text{UPt}_3$  など、今後も目の離せない話題であるように感じました。

講演中の様子





金閣寺にてエクスカージョン

また、界面の話題に興味をも覚えました。界面の効果による skyrmion の発生や、skyrmion と超伝導の界面の制御など、人工的に制御された系における研究も今後発展していくのではないかと感じました。

上記のような講演に加えて Breakout Discussion が 2 回行われました。議論があまりにも盛り上がりすぎたため、1 度目の Topological Magnets に関する Breakout Discussion では、用意されていた 3 つ議題のうち 2 つしか消化できず、残念ながら Topological Superconductors の議題に使える時間が少なくなりましたが、これも時間いっぱいまで活発な議論が行われたことによる嬉しいハプニングであるように感じました。

三日目には、エクスカージョンとて、京都のお寺と神社（平等院、金閣寺、北野天満宮）を訪れました。平日ということもありそれほど混雑しておらず、また天候にも恵まれ、研究者間の交流を深める上で非常に有意義なエクスカージョンとなりました。世界遺産でもある平等院では、皆さん 10 円玉と照らし合わせて見学されていました。エクスカージョン後には情報交換夕食会を町屋を改造したレストランにて行い、夕食を取りながら、参加者はセッション中に負けないぐらいの迫力で議論を行っていました。今回は、京都府、京都市及び、公益財団法人京都文化交流コンベンションビューロー（以下、京都 MICE）からの補助も受けることができ、その制度で京都らしいゲストとして 3 名の舞妓さんにも来てもらいました。舞妓さんには京舞の披露の後、高宮さんによる名通訳の助けを借りて、舞妓さんご自身に関する質問交換会を行っていただきま



舞妓さんらによる京舞

した。そこで印象に残った話の一つとして、舞妓さんは、約 5 年間舞妓としての修業後に「お母さん」と呼ばれる置屋の女将さんに認められれば、晴れて芸妓さんになれるそうです。これは、舞妓さんを大学院生、お母さんを指導教員、芸妓さんを Ph.D と置き換えれば大学院の修士・博士課程のシステムそのものです(!)。実際、海外からの参加者の方々も、このアナロジーを通じて、舞妓さんの世界の仕組みが腑に落ちたようでした。

最後に、本研究会を開催するにあたって、企画発注・会計・ホームページの作成をはじめ、数か月の間ここには書ききれないほど多くの事務仕事を請け負ってくださった、秋野様、高宮様、児玉様に深く感謝申し上げます。また、当日の運営を手伝ってくださった学生の方々にも深くお礼申し上げます。研究会当日のスムーズな進行や、満足度の高いイベント等、本研究会の成功は皆様のご協力無しには、成し得なかったことと思います。さらに、本研究会開催費用において、多大な支援を受けた京都 MICE に深く感謝申し上げます。京都 MICE の補助により、本研究会の Welcome Reception に参加者を招待することができました。また、エクスカージョンにおける費用も補助していただき、京都ガイドの方を呼ぶことができました。さらに、情報交換ディナーにおいて、舞妓さんに来てもらったり、京都清水焼のマグカップをプレゼントすることができ、京都らしい文化を国内外からの参加者に伝えることもできました。参加者には、京都の良さがぎゅっと詰まった時間の中で、研究交流成果を十分に挙げていただけたのではないかと思います。

(文責：土師 将裕、宇田川 将文)



## トポロジカル物質科学セミナー (Topological Materials Science Seminar) 活動紹介

2017/Feb/16(THU)

Topological Materials Science (32)  
**Sungbin Lee**, Nagoya Univ.

2017/Feb/23(THU)

Topological Materials Science (33)  
**K. Hamamoto**, Kyoto Univ.

2017/Feb/24(FRI)

Topological Materials Science (34)  
**Zongping Gong**, Kyoto Univ.

2017/Feb/27(MON)

Topological Materials Science (35)  
**Sho Higashikawa**, Kyoto Univ.

2017/Mar/22(WED)

Topological Materials Science (36)  
**A.A. Golubov**, Hokkaido Univ.

2017/Mar/23(THU)

Topological Materials Science (37)  
**Ilya A. Gruzberg**, RIKEN.

2017/Mar/27(MON)

Topological Materials Science (38)  
**Ilya A. Gruzberg**, Univ. of Tokyo.

2017/Mar/29(WED)

Topological Materials Science (39)  
**A.A. Golubov**, Kyoto Univ.

2017/Mar/30(THU)

Topological Materials Science (40)  
**Ilya A. Gruzberg**, Hokkaido Univ.

2017/Apr/17(MON)

Topological Materials Science (41)  
**Ken. Shiozaki**, Tokyo Tech.

2017/May/22(MON)

Topological Materials Science (42)  
**Shunsuke Furukawa**, Nagoya Univ.

2017/Jun/12(MON)

Topological Materials Science (43)  
**Silas Hoffman**, Tokyo Tech.

2017/Jun/13(TUE)

Topological Materials Science (44)  
**Yukio Tanaka**, AIST.

2017/Jun/14(WED)

Topological Materials Science (45)  
**Yukio Tanaka**, AIST.

2017/Jun/26(MON)

Topological Materials Science (46)  
**Keita Hamamoto**, Tokyo Tech.

2017/Jun/18(TUE)

Topological Materials Science (47)  
**Yong P. Chen**, Tohoku Univ.

2017/Aug/08(TUE)

Topological Materials Science (48)  
**Ryosuke Akashi**, Kyoto Univ.

2017/Aug/24(THU)

Topological Materials Science (49)  
**Flore K. Kunst**, Univ. of Tokyo.

2017/Aug/24(THU)

Topological Materials Science (50)  
**Emil J. Bergholtz**, Univ. of Tokyo.

2017/Aug/29(TUE)

Topological Materials Science (51)  
**P. S. Anil Kumar**, Kyoto Univ.

2017/Sep/14(THU)

Topological Materials Science (52)  
[1]**Mark Fischer** [2]**Aline Ramires**, Kyoto Univ.

2017/Oct/30(MON)

Topological Materials Science (53)  
**Bertrand Dupe**, Tokyo Tech.

2017/Nov/24(FRI)

Topological Materials Science (54)  
**Igor Marković**, Kyoto Univ.

2017/Dec/11(MON)

Topological Materials Science (55)  
**Hongming Weng**, Kyoto Univ.

2018/Jan/15(MON)

Topological Materials Science (56)  
**Giniyat Khaliullin**, Kyoto Univ.

2018/Feb/27(TUE)

Topological Materials Science (57)  
**Jose Lado**, Kyoto Univ.

2018/Mar/27(TUE)

Topological Materials Science (58)  
**Joel Bertinshaw**, Kyoto Univ.

## タイリングとトポロジー

桂 法称 / 東京大学 大学院理学系研究科 准教授



「コーヒーカップとドーナツを同一視する」という定番の説明からも分かるように、トポロジーは対象のざっくりとした、大域的な構造を議論する学問です。一方で私自身は、昔から細かいことが気になってしまう性格で、どちらかという代数や組合せ論のように、場合によっては計算機で確認しながら議論できる数学の分野の方が、安心して勉強を進められると感じていました [1]。本ニュースレターでも、トポロジカル不変量を、ある種の固有値問題の形で定式化する、最近の研究を紹介させて頂きました [2]。また、組合せ論の応用については、高校のときに有機化合物の異性体の数え上げに興味をもって以来のライフワークで、最近も可解模型と組合せ論に関する研究を行っています [3]。

このコラムでは、タイリングという組合せ論の問題とトポロジーや物理の関係について触れてみたいと思います。最初に、ドミノタイリングというものを導入しましょう [4]。これは、図1のような  $1 \times 2$  のドミノで平面を隙間なく敷き詰めることを指し、日本間の畳の敷き方、とみなすこともできます。たとえば、図1の最初の3つのタイリングのように、 $2 \times n$  の領域にドミノを敷き詰める場合の数は、Fibonacci 数  $F_{(n+1)}$  で与えられます。一般に、 $m \times n$  の領域を敷き詰める場合の数は、1960年代に統計力学の文脈で、Kasteleyn や Temperley, Fisher といった人々により調べられました。その結果、この場合の数は、パフィアンにより表され、あらわに計算できることが分かっています。また、Lieb はこの問題の背後にある自由フェルミオンの構造に気づきました [5]。

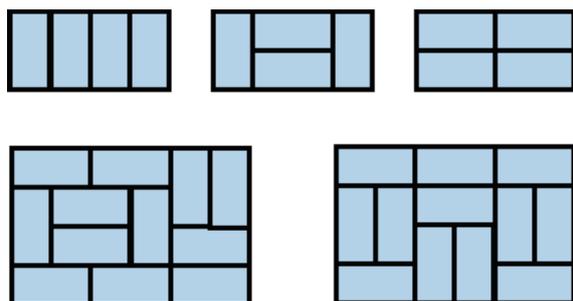


図1：ドミノタイリングの例。

ドミノタイリングは、Rokhsar と Kivelson により提案された量子ダイマー模型 [6] により、物性物理の文脈でも注目されるようになりました。この模型では、個々のドミノタイリングを直交した状態と考えます。また、図2のようなダイマー対をフリップする量子力学的な「共鳴」の過程があり、この過程によりフリップできる対の数に応じたポテンシャル・エネルギーの項も存在します。Rokhsar-Kivelson 点と呼ばれる特殊な場合には、この模型の基底状態は、すべてのドミノタイリングの重ね合わせ状態になっており、これはまさに Anderson が提唱した、RVB (resonating valence bond) 状態を体現するものになっています。

また、Rokhsar-Kivelson の論文には、「トポロジカル・セクター」という言葉も登場します。この意味を考えるためにトーラス表面、つまり「周期境界条件を課した日本間」を考えましょう。このとき、共鳴の過程で図2の点線を横切るドミノの総数は必ず2変化します。しかし、その偶奇は変わらないので、横方向・縦方向の偶奇として4つのパターン、(偶, 偶), (偶, 奇), (奇, 偶), (奇, 奇) があることが分かります。それぞれのドミノタイリングは、これらのいずれかに属しており、異なるパターンの間は共鳴過程で行き来することができません。このことを、状態空間がトポロジカル・セクターに分かれる、と呼んでいます。このようなトポロジカル・セクターは、「開放境界条件を課した（つまり普通の）日本間」の場合には存在しません。

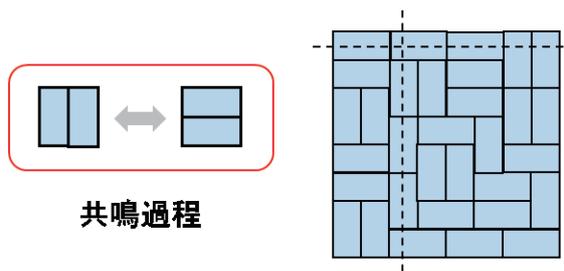


図2：共鳴過程とトポロジカル・セクター。

このように組合せ論に端を発した離散的な系でも、ある種の「巻き付き数」を適切に導入できるのは面白いところです。その後、量子ダイマー模型は、トポロジカル秩序の文脈で盛んに議論されるようになりました。トポロジカル秩序をどう定義するかは難しい問題ですが、ここでは、(i) エネルギーギャップの存在, (ii) 系のトポロジーに依存する基底状態の縮退度, (iii) 縮退した基底状態は局所的には区別できない、の3つをその特徴付けと考えることにしましょう。残念ながら、元々の量子ダイマー模型は、(i) を満たしませんが、三角格子上に拡張した模型における RVB 相では (i)-(iii) を満たすことが知られています [7]。

次に別の、トポロジーと結びつくタイリングの問題を紹介しましょう。ドミノの拡張として、複数の正方形を辺共有でつなげた多角形を並べる、ポリオミノというパズルがあります [8]。たとえば、3つの正方形の場合には、図3のように6種類の形があります。これらはトリオミノと呼ばれます。実はひょんなことから、このトリオミノのタイリングに研究で遭遇しました。それは一昨年、韓国・成均館大学の Jung Hoon Han 教授を訪れたことがきっかけでした。彼らは、量子ダイマー模型の拡張として、量子トライマー模型というものを導入し、その性質を調べようとしていました。この模型では、個々のトリオミノタイリングを直交した状態とみなし、それらの間の共鳴過程を考えます。

私が最初に興味をもったのは、このようなタイリングの数え上げです。まずは、Liebの論文のやり方 [5] (今風に言えば、テンソル・ネットワーク) を真似て転送行列を定義し、計算機でその場合の数を数えることには成功しました。ただ、このやり方では扱える系のサイズは限られており、何とか解析的な結果が得られないかと試行錯誤しましたが、ドミノの場合とは違い、どうも自由フェルミオンのような構造はなさそうだ、という結論に至りました。

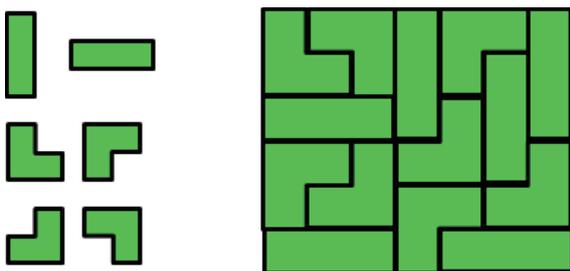


図3. 6種類のトリオミノとタイリングの例。

このことは残念でしたが、その後も共同研究者らと量子トライマー模型の性質を調べ、その結果この模型では、正方格子上でも先述の (i)-(iii) のトポロジカル秩序の特徴を持っている相があることを明らかにしました [9]。特に面白い点は、トリオミノの場合には、トラス上では9つのトポロジカル・セクターに分かれる点です。これは、我々が  $Z_3$  フラックスと呼んでいるものが異なるタイリングの間は行き来できないため、詳細は原論文 [9] に委ねますが、このフラックスに着目することで、Rokhsar-Kivelson 点では、非自明な励起状態を構成することができます。

こういったトポロジカル・セクターの概念は一般のポリオミノにも拡張することができます。トリオミノについては、今年の京都大学での研究会で、"Quantum Hangul" というタイトルで講演しました。その際、[7]の著者の Moessner 氏から、「テトロミノだとうか？」という指摘を受けました。今のところ成果は得られていませんが、近いうちに "Quantum Tetris" という講演ができればと思っています。

- [1] この辺りについての、もっと過激なコメントは、数学者の Doron Zeilberger 氏のページにあります。  
<http://sites.math.rutgers.edu/~zeilberg/OPINIONS.html>
- [2] 本誌 42 ページ.
- [3] O. Salberger et al, J. Stat. Mech., 063103 (2017); T. Udagawa and H. Katsura, J. Phys. A: Math. Theor. **50**, 405002 (2017).
- [4] 高崎金久, 『線形代数と数え上げ』 (日本評論社).
- [5] E. H. Lieb, J. Math. Phys. **8**, 2339 (1967).
- [6] D. S. Rokhsar and S. Kivelson, Phys. Rev. Lett. **61**, 2376 (1988).
- [7] R. Moessner and S.L. Sondhi, Phys. Rev. Lett. **86**, 1881 (2001).
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyomino>
- [9] H-Y. Lee, Y-T. Oh, J. H. Han, H. Katsura, Phys. Rev. B, **95**, 060413(R) (2017).

## 学生へあなたへ

浅野 泰寛 / 北海道大学 大学院工学研究院 准教授



この新学術領域が発足して三年が過ぎようとしています。事業に参画する先生がたのご指導の下、領域活動の主要な部分を関連する博士研究員や大学院生の皆さんが担っておられます。事業終了後には、「たくさん業績があがり順調に研究が進展しました」、という報告が出来るだろうと思います。元々そういう政策の一環としての事業ですし、その成功は良い話です。こんなとき、皆さんの真摯な努力に水を差すような事を申し上げるのは恐縮ですが、私は問うてみたい「学生のあなたは、それでいいですか?」、と。

何年か前に学部一年生のクラス担任なるものを仰せつかって、三十名あまりの学生に対して個人面談をしたことがありました。総合系クラスに属する彼らは、二年進級時に、薬学、理学、工学、農学などの専門分野へ配属希望を出すことになっていて、配属先決定の相談にのる、というのが主な目的でした。「将来なにをしたらいいの、さっぱりわからん!」という猛者はとても少数で、多くの学生が割と純粋な動機でそれぞれの志望を決めていて、私は安心もしたのです。しかし、些細なことかも知れませんが、ある言葉が気になりました。「役に立ちたい」。幼少の頃からネット社会に生きている彼らは、もっと個人主義的かと思っていましたので、面談をはじめた頃は立派な志だと感心しました。もちろん「役に立っている自分が好き」というナルシズムや、「役に立つことで賞賛されたい」という功名心も垣間見えました。でも、たびたび耳にすると、「役に立たない=人間失格」

という恐怖感が、彼らにそう言わしめていないか?と感じたのです。何かを憚って、自分で自分を準備的に規格化してしまっていないか?と。経済格差、高齢社会、ポピュリズム、ツイッターの炎上、空気を読む、などの言葉で語られる、社会の閉塞感や非寛容さがそうさせているのならば、ずいぶんと気の毒な事です。「役に立ちたい」というのは、わかり易い免罪符で、そう語る学生は真っ当です。しかし、規格化された意志、皆が妙にまともな社会って、これ全体主義?とったりもしました。

論文を出版することは、わかりやすい業績です。領域の先生がたにとって論文出版は義務なので、彼らの表情が陰しくなるのは仕方ないかも知れません。さて、学生のあなたは如何でしょう?無責任に研究を楽しんでいますか?もちろん研究という行為は苦しい時期があります、むしろほとんど苦しい。それを差し引いてもなお、研究をやっていて良かったと思えますか?「論文が書けない=失格」だと勝手に、自分を苛んでいませんか?この新学術領域は、緩いとはいえ課題には制約があります。学生のみなさんが、領域の主旨に沿った業績をあげてくれることは、私たちにとって大変ありがたい。でも、領域研究会に欠かさず足を運んでくれる学生のあなたが、科学的興味や自然観、研究の美学を無意識のうちに規格化してしまうことを私は恐れます。領域活動に参加する事が、逆にあなたの新鮮な心と柔軟な発想を阻害することを恐れます。物理はとても幅の広い学問ですし、何を研究しても良いはずで

私が大学院生の頃、あなたとよく似た立場でした。ある科研費プロジェクトに入れて頂き、その方向の研究課題も頂きました。研究する動機はとも大事なのですが、人によって様々です。私の動機は、恥ずかしながら、はなはだ低次元です。何かわかる（わかったつもりになる）たびに、「生きているぞ」という肉食動物的恍惚を覚える刹那がたまりません。当時を振り返ると、ずいぶんとつまらないことにも鼻息を荒くできました。なので、先生が「こっちだ」とせっかく導いて下さった方向には研究が進まず、「あっち」に脱線することしばしば。私は、自分で研究課題を見つける力もないのに、反抗だけはするどうしようもない学生で、ほとんどプロジェクトの役には立ちませんでした。でも指導して下さいた先生は寛容で、お荷物の私でも学位が取れるよう算段をつけて下さいました。如何せん動機が低俗なので、何を研究して忘我に至るか？が問題です。「簡潔な式で、量子現象を記述すること」と、舞い上がる瞬間、離陸の有り様は決まりました。でも、どうやって？それは内緒です。

この新学術領域研究が吹かせている「こっち」の風は、順風としてそれに乗れば快適かも知れません。でも風は、いつか凧ぐのです。ぼんやりと、で良いのです、学生のうちに自分の目指したい「あっち」を見つけて欲しい。そのとき、どうして自分は研究（仕事）をするのか、どうなら自分は満たされるのか、その動機を見つめて欲しい。こう申し上げるのは、動機と努力の方向が合っ

ていないと、苦しい時を乗り越えられない、つまり、うまくいくまで頑張れないと思うからです。たとえ地球を救えなくても、ノーベル賞を獲れなくても、〇〇大学の先生になれなくても、…、恍惚に至れなくても、研究するという行為が、あなたの人生を豊かにするものであって欲しいと希います。

あなたの指導教員は、たしかA先生でしたね。「あっち」を探すあなたに、A先生はきっと寛容なはずです。ここだけの話ですが、今でこそ肩で風切るA先生も、学生の頃はかなり「やらかし」ています。今日は「規格外のあっち」かも知れませんが、先生の御引退から久しくなる頃に、「こっち」になっているかもしれません。たとえそうでなくても、きっとA先生は祝福してくれますよ、確信を持って「あっち」に歩むあなたを。

後記：Newsletter編集長の柏谷さんから、何か若者へのメッセージをお願いします、と難しいご依頼がありました。これまで重ねた不義理の数知れず、日頃ぼんやりと感じていたことを、貧しい文章として綴ることになりました。飼いやられたい、これは自分への戒めでもあるのです。



今年度以降の会議

年度	領域研究会 / 国際会議	トポロジー連携研究会	国際アライアンス ワークショップ
H27 年度 (2015-16)	2015/12/11-13 第 1 回 京都大学【終了】	2015/08/18 第 1 回【終了】 2015/08/20 第 2 回【終了】 2015/08/27 第 3 回【終了】 2015/09/05 第 4 回【終了】 2015/11/06-07 第 5 回【終了】 2016/02/09-11 第 6 回【終了】	
H28 年度 (2016-17)	2016/12/16-18 第 2 回 東北大学【終了】	2016/11/17-18 第 7 回【終了】 2016/01/06-07 第 8 回【終了】	2016/09/19-21 第 1 回 "TOPO MAT Meeting" MPI, Stuttgart, Germany【終了】  2016/12/03-08 第 2 回 "EPiQS-TMS Trans-Pacific Conference on Topological Quantum Materials" Gump Station (UC Berkeley), Moorea【終了】  2017/2/13-18 第 3 回 "YITP-PKU-TMS International School and Workshop" (with ICQM- 北京大学) 京都大学【終了】
H29 年度 (2017-18)	2017/05/09-13 第 3 回 東京工業大学 * 国際会議 TopoMat2017 【終了】	2017/12/18-19 第 9 回【終了】	2017/04/25-28 第 4 回 "TOP-SPIN and TMS International Workshop" (with TOP-SPIN-Italy) IFW Dresden, Germany 【終了】  2017/10/02-03 第 5 回 "Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms" 東京大学【終了】  2018/01/11-14 第 6 回 "TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop" 京都大学【終了】
H30 年度 (2018-19)	2019/01 第 4 回 名古屋大学	研究項目内研究会 (各班) 研究項目間研究会 (テーマ： トポロジカル量子相転移)	2018/07/21-27 第 7 回 "Erice Workshop 2018" (with SPIN-Italy) Ettore Majorana Centre, Erice, Italy  2018/09/24-28 第 8 回 "ICQM-TMS 2nd Alliance Workshop" (with ICQM-PKU) Peking Univ., Beijing, China
H31 年度 (2019-20)	京都大学 * 国際会議 TopoMat2019		

本領域の研究費によって得られた成果を出版される際には、以下の例文にありますような謝辞をお願いいたします。

計画研究 A01: JP15H05852, B01: JP15H05853, C01: JP15H05854, D01: JP15H05855。

公募研究: JP16H009\*\*(\*\* は <http://topo-mat-sci.jp/contact/> で確認ください)。

また 総括班 X00: JP15H05851,

国際活動支援班 (Topo-Q): JP15K21717,

国際共同研究者による共著論文: JP15K21717。

※ 8 ケタの課題番号の前に【JP】を追加してください。

(1) This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas “Topological Materials Science” (KAKENHI Grant No. JP 課題番号) from JSPS of Japan.

(2) This work was supported by the “Topological Materials Science” (No. JP 課題番号) KAKENHI on Innovative Areas from JSPS of Japan.

(3) This work was supported by the JSPS KAKENHI (No. JP 課題番号).

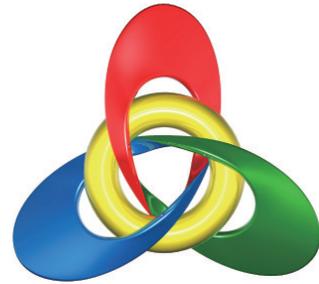
編 集  
後 記

本号も無事出版できるにあたり、ニュースレターの執筆、編集にかかわっていただいた多くの方々に厚く御礼申し上げます。個別の記事を執筆していただいた著者の皆様に加え、特にレイアウト、編集全般を引き受けていただいている領域事務局の皆様、校正を引き受けていただいた皆様（特に PD の方々）に感謝申し上げます。

アカデミックに格調高い話は本ニュースレターの本文を見ていただくとして、以下は全くの与太話です。私が学部の際に学んだ印象深い話のひとつに、生物の種の進化がある時期には進化しない状態を、そしてある時期には急激に進化し、いわゆる断続平衡というプロセスをたどる（調べてみると 1972 年のナイルズ・エルドリッジとスティーヴン・ジェイ・グールドによるもの）という説がありました。今にして思うと、これは多くのことに共通にあてはまります。技術の進化も全く同様であり、産業革命のような時期と、静かな進歩が続く時期の繰り返しになっており、現在は IoT 社会の急進展により、技術一般の急激な活性化の時期にちょうど入ったと多くの人を感じていると思います。AI やフィンテックは今後数年で世界を一変させそうです。一方、トポロジカル物質に関する研究のトレンドは、量子ホール効果からの源流が、多くのトポ関連物質の発見で活性化し数年経過した状況です。今後このトレンドがピークアウトして平衡期に落ち着いてしまうのではなく、より高いピークに向かうためには、社会に役立つ技術がトポ研究領域から発信されること、および、次世代を担う若手が力をつけていくことが必要と思っています。本領域研究では、研究を精力的に遂行するのみならず、PD 雇用、若手励起プログラム、JREP といった制度により若手育成に全力で取り組んでおり、本ニュースレターでも若手研究者の執筆による記事を多数掲載しております。ぜひ、そのあたりを注目しながら本号をご覧くださいと思っています。

(文責：柏谷聡)

# NEWSLETTER No.3



## 2 巻頭言

中間評価を終えて / 川上 則雄 (京都大学)  
領域研究への期待 / 川村 光 (大阪大学)

## 4 今年度の計画研究トピックス

計画研究 A01、B01、C01、D01

## 20 受賞ニュース

第 21 回久保亮五記念賞 / 川口 由紀 (名古屋大学)  
2017 年科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞 / 横山 毅人 (東京工業大学)  
第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 4) / 米澤 進吾 (京都大学)  
第 12 回 (2018 年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域 7) / 笠原 裕一 (京都大学)

## 24 トピックス

$Cu_xBi_2Se_3$  におけるスピン回転対称性の破れとトポロジカル超伝導 / 鄭 国慶 (岡山大学)  
キタエフ模型が生み出す量子スピン液体研究の新たな潮流 / 那須 讓治 (東京工業大学)

## 30 HOT TOPICS COOL NEWS 2017

## 31 公募研究紹介

## 49 若手励起プログラム

太田 智明 (東京工業大学)、ゴン・ゾンピン (東京大学)、東川 翔 (東京大学)、井辺 洋平 (京都大学)、  
嶋村 奈津美 (東北大学)、吉岡 信行 (東京大学)、トラン・シュアン・チ (東北大学)、高三 和晃 (京都大学)

## 57 REP 招聘報告

Yakov Fominov (ロシア科学アカデミー)、Lee Sungbin (韓国科学技術研究所)、  
Ilya A. Gruzberg (アメリカ・オハイオ州立大学)、Alexander Golubov (トゥウエンテ大学)、  
Ying Liu (上海交通大学 / ペンシルバニア州立大学)

## 65 JREP プログラム 報告

深谷 優梨 (名古屋大学)、今村 征央 (京都大学)、モハメッド・オーダ (京都大学)、  
安井 勇気 (京都大学)、ムハマド・シャーバズ・アンワー (ロンドン大学)、  
ティエンユウ・リウ (プリティッシュコロンビア大学)、池田 敦俊 (京都大学)、土師 将裕 (京都大学)

## 72 新 PD 紹介

ジェームズ・ドゥ・ライユル (大阪大学)、田村 駿 (名古屋大学)、大湊 友也 (東北大学)、吉田 恒也 (京都大学)

## 76 2017 年度研究会報告

第 3 回 TMS 領域研究会 (TopoMat2017)、第 11 回物性科学領域横断研究会、第 9 回トポロジー連携研究会、  
"YITP-PKU-TMS International School and Workshop" (TMS 第 3 回アライアンス研究会)  
"TOP-SPIN and TMS International Workshop" (TMS 第 4 回アライアンス研究会)  
"Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms" (TMS 第 5 回アライアンス研究会)  
"TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop" (TMS 第 6 回アライアンス研究会)

## 87 TMS セミナー報告

## 88 コラム

タイリングとトポロジー / 桂 法称 (東京大学)  
学生のあなたへ / 浅野 泰寛 (北海道大学)

## 92 今年度以降の会議、論文等での謝辞について、編集後記

新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」ニュースレター第 3 号

発行日：2018 年 2 月 28 日

発行：「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」総括班

編集：柏谷 聡 (編集アシスト：手塚 真樹、レイアウト：児玉 知子)

領域事務局：〒 606-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学 大学院理学研究科 物理学第一教室 凝縮系理論グループ内

TEL: 075-753-3768 / FAX: 075-753-3819

Email: tms-office@scphys.kyoto-u.ac.jp

領域ウェブサイト <http://topo-mat-sci.jp/>