

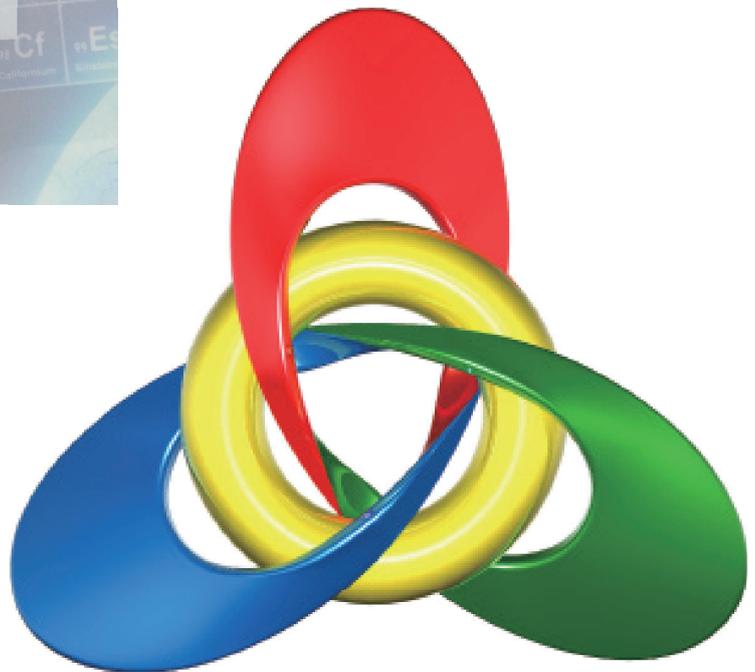
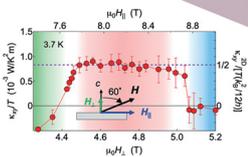
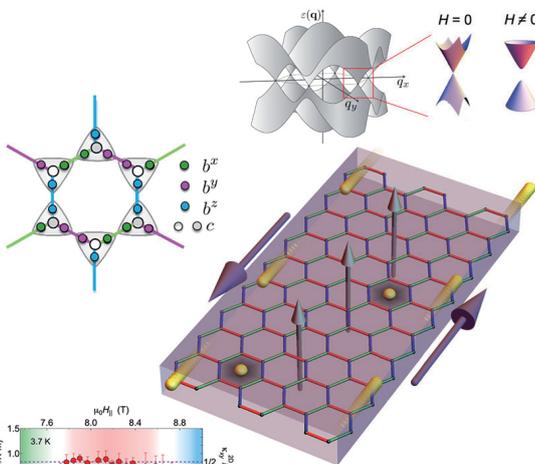
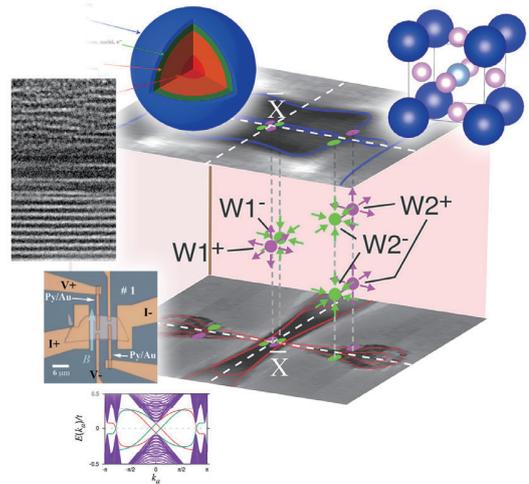
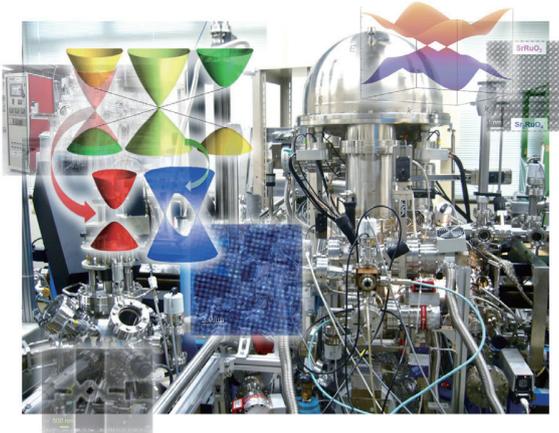
文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 H27(2015)-H31(2019) 年度

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. 5



February 2020

CONTENTS

- 2 巻頭言
「トポ物質科学」を終えるにあたって / 川上 則雄 (京都大学)
新学術領域研究プロ・コン / 十倉 好紀 (理化学研究所)
- 4 今年度の計画研究トピックス
計画研究 A01、B01、C01、D01
- 21 受賞ニュース
矢崎学術賞功績賞 / 小林 研介 (大阪大学)
- 22 トピックス
マジックアングルグラフェンにおける量子異常ホール状態 / 安田 憲司 (マサチューセッツ工科大学)
Weyl 超伝導：量子異常と固有角運動量パラドックス / 水島 健 (大阪大学)
- 28 HOT TOPICS COOL NEWS 2019
- 29 公募研究紹介
- 47 若手励起プログラム
望月 健 (北海道大学)、松下 太樹 (大阪大学)、吉野 匠 (東京大学)、山本 和樹 (京都大学)
- 51 REP 招聘報告
Ludovic Jaubert (ボルドー大学)、Yayu Wang (清華大学)、Mario Cuoco (サレルノ大学)、
Manuel Houzet (グルノーブル原子力研究センター)、前野 悦輝 (京都大学)
- 59 JREP プログラム 報告
高木 大治郎 (名古屋大学)、高根 大地 (東北大学)、山田 林介 (東京大学)、山本 和樹 (京都大学)、
Gwansuk Oh (浦項工科大学校)、川上 拓人 (京都大学)、
Thibaut Jonckere (フランス国立科学研究センター)、橋本 樹 (京都大学)、
池谷 聡 (マックスプランク固体物性研究所)、Paola Gentile (サレルノ大学)、
高三 和晃 (カリフォルニア大学バークレー校)
- 74 2019 年度研究会報告
TopoMat2019(第5回 TMS 領域研究会)、第11回トポロジー連携研究会、
第12回トポロジー連携研究会、第13回物性科学領域横断研究会、
MPI-Peking-TMS Alliance Workshop(TMS 第9回アライアンス研究会)、
The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases(TMS 第10回アライアンス研究会)、
3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (TPQM2019)
(TMS 第11回アライアンス研究会)
- 87 TMS セミナー報告
- 88 コラム
研究所訪問「アメリカ滞在記」 / 古澤 拓也 (東京工業大学)
研究所訪問「モスクワ滞在記」 / 矢野 力三 (名古屋大学)
メンデレーエフから 150 年 / 前野 悦輝 (京都大学)
論文等での Acknowledgments について、編集後記

「トポ物質科学」を終えるにあたって

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 教授 (研究代表者)



本新学術領域研究も最終年度となり、このニュースレターが発行されるころには、その役割を終えることとなります。

本領域が発足した2015年7月当時は、トポロジカル絶縁体の研究に一区切りが付き、トポロジカル半金属などに研究が展開されていました。このような研究のさらなる発展として、本領域の研究計画で特に前面に打ち出したものに、強相関トポロジカル相への展開とマヨラナ準粒子の実証があります。特に、後者の(超伝導を中心とした)マヨラナ準粒子探索に関しては世界的な競争も激しく、このハードルは高いものでした。幸運なことに、A01の松田祐司グループを中心とした「キタエフスピン系におけるマヨラナ準粒子の実測」が、これを切り開くトリガーを与えました。さらに、これは当初打ち出した「強相関トポロジカル相」の研究にも新機軸を与えるものであり、世界の研究の流れと一線を画した、ジャパンオリジナルな強相関トポロジカル相の研究となりました。本領域では5年の間に、新奇トポロジカル半金属の発見、ネマチック超伝導の発見、量子ホール系エッジ状態の非平衡ダイナミクスの解明、スピン液体物質の発見、トポロジカル物質の新分類理論の構築など、多くの成果が得られましたが、これを締めくくるのにふさわしい成果と感じていません。

この5年を振り返ってみると、半導体、超伝導、磁性などの分野が依然として「分離した感」のあった当初に比べ、今ではトポロジカル物質科学の下にこれらが自然に融合したとの印象を持っています。これには、スピン系を中心とした強相関トポロジカル物質の研究が果たした役割も大きいと思います。実際、2019年12月に開催した領域国際会議TopoMat2019のプログラム編成の際に、このような融合がこの数年で加速したことを実感しました。トポロジカル物質科学は、現在もより広範な領域へと展開し続けています。TopoMat2019の重要テーマの一つとして取り上げた「非平衡系

への研究展開」は、今後の目玉の一つになるのではないのでしょうか。

本領域の重要な目的の一つに、研究者交流のプラットフォームの構築があります。これに関しては、かなり充実した環境を提供できたものと思っています。中でも、若手励起プログラムを使って共同研究が開始され、それが面白い研究成果につながった例がいくつもあります。また、JREPによって若手の国際感覚を育むこともできました。「物質のトポロジー」という広いテーマの下に、バックグラウンドを異にする研究者が個々にあるいは一堂に集い、自由に意見交換し、他流試合を行い、高いレベルの研究にもついでいく。これこそが、この新学術領域を開始する際に、私たちが最も期待していたことです。この5年で培ってきたこのプラットフォームが、今後とも研究の活性化に生かされることを願っています。

この新学術を開始したころ、私自身それ程「トポロジカルな人間」ではなかったので、領域代表になることにはかなりためらいがありました。しかしながら、若い頃、当時の研究の主流には位置していなかった私を応援して頂いた諸先生方のことを思い出し、これも若手研究者の育成につながるのであればと奮起し代表をつとめることにしました。領域運営に関する日々の仕事はやはり楽なものではありませんでしたが、研究交流のプラットフォームを提供することができたことをたいへんうれしく思っています。

研究代表者・分担者・連携研究者の方々には、この5年間たいへんお世話になりました。また、本領域のお世話をして頂いた秘書の皆様、ありがとうございました。この領域に関わってこられた研究者・学生の方々は、この5年間を楽しまれたでしょうか。多くの方々にそのように感じて頂けたとすれば、安心してこの領域を終えることができます。

新学術領域研究プロ・コン

十倉 好紀 / 理化学研究所
創発物性科学研究センター・センター長



私にこの巻頭言を述べる資格がないことは自覚しているが、仕事を離れた大晦日に抱く雑感を申し述べて、責を塞ぎたい。本領域が主催する12月の国際会議TopoMatに出席させていただき、そこで「トポ物質」新学術研究がこの3月で、一区切りになると気付いた。発足したのはついこの間のことと思っていたが、国際会議TopoMat以外の領域の研究会に参加する機会を持たなかった。私は浦島状態にあった。竜宮城の居住者、また高温超伝導戦国時代を知る熟年研究者の愚痴の常として、「日本の物性物理の若い研究者は国際的にビジブルな活躍ができていないのか。」という感想をある会合で述べたとき、ある方から「川上新学術の研究会に来てごらんない、綺羅星のような若手が集結していますよ。」と聞いて、なるほどと思った。本領域のように、テーマ(切り口)の大きさ・魅力が重要なのはもちろんのこと、仄聞した刺激的な領域運営が奏功しているのは明らかで、リーダーの川上先生はじめ領域運営の方々のご努力と見識を思った。

なぜ、日本の科学の発信力が凋落傾向にあるのか、最近はその論議が喧しい。私自身も、酷いデータを前になぜかと考えるが、TVでの識者の討論会を聞いても納得がいかない。曰く、法人化で研究者の雑用が増えて研究時間が確保できない、短期のイノベ創出を謳う競争的資金に喰われて、交付金などの経常的な予算が著しく減り、地道で継続的な基礎研究を抑圧している、若者が職業としての学問に魅力を感じなくなり、博士修了者が減少し続けている、等々。これらの問題を解決するのは、研究に投資するすべての資金を増やすこと(URA雇用財源、基礎研究にも潤沢な研究費・交

付金、研究者の待遇の大幅な改善)が一番だが、この難問解決に必要な理論武装の社会的、文化的、政策的側面をここで論じるつもりはない。しかし、特に物性科学研究について言えば、一つ明らかな改善をもたらす他の方策がある。共同研究(collaboration)の機会を、国内・国際を問わず、大幅に増やすことである。物性科学研究の世界的潮流は、あらゆる研究手法、理論・実験を問わず、を動員する「総力戦」、mega-competitionの時代にとっくに入っている。安易に時流に乗らず、独創・独善を追求することは、あるいは蛸壺研究でさえ、将来の重要な発展の起点となりうることは認めたくえで、我々はあまりに「内向き」であり、「喧噪と恥さらし」を嫌い、「徒党を組んで出入り」することを怖れていないか、という想いが私にはある。

Collaborationを政策的・経営的に刺激促進する方法は、リーダーの努力と覚悟は必要だが、実は色々ある。トポ物質領域での若い綺羅星の話聞いて得心したのは、このcollaborationがトポロジーのような新しい重要なコンセプトのもとで前進できる可能性がよく理解できたからである。ワイル電子のどこが新しい、などという無慈悲な批判はどうでもいい、無邪気な無知と熱狂から始めたcollaborationが真に新しい科学の流れを作った例はいくつもあるからである。

これからも、このトポ物質領域で発展した研究のネットワークが、仲良し同窓会の域を超えた切磋琢磨のcollaborationの場として、発展し続けることを願っています。

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きました。

研究テーマとして、主にトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属・金属、トポロジカルモット絶縁体・磁性体の3つの軸に沿って進めています(図1)。トポロジカル磁性体に関して、昨年度にキタエフ量子スピン液体での半整数熱量子ホール効果という世界的に注目される顕著な成果を挙げました。以下ではまず、このテーマを先頭に、今年度の主な成果をテーマごとにご紹介します。

なお、文末の引用文献リストで、[a-f]はH30(2018)年度2月以降、[1-25]はH31-R1(2019)年度の研究項目A01(計画研究と公募研究)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. トポロジカルモット絶縁体・磁性体】

(1-1) 量子スピン液体

マヨラナ・フェルミオンが実現しうる系である、キタエフ量子スピン液体に関する研究は、本領域

の松田、高木を中心とする実験グループ、また藤本、宇田川、那須(公募研究D02)をはじめとする理論メンバーが世界をリードする成果を挙げてきました。

高木らは、このキタエフ量子スピン液体の物理概念と候補物質についての包括的なレビューを発表しました[f]。元々純粋に理論として提案されたハニカム(ハチの巣)格子上のキタエフ模型は、二種類のマヨラナ準粒子で記述し直すことにより解かれ、二次元以上の厳密解量子スピン液体として特別な意味を持ちます。このレビューでは、このキタエフ量子スピン液体の物質相での実現に向けた理論予想と実際の候補物質でのキタエフ系量子相とマヨラナ励起について近年の研究をまとめています。

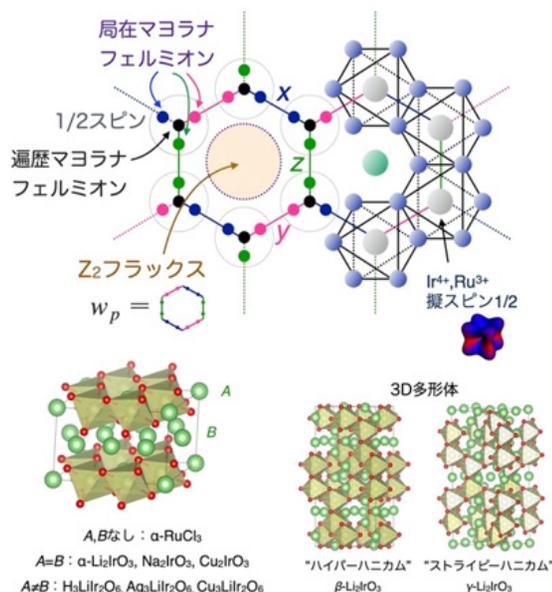


図2: キタエフハニカム模型量子液体の模式図とキタエフ系候補物質。

キタエフ量子スピン液体の実現には、磁性元素間にキタエフ型相互作用と呼ばれる特殊な異方的相互作用が必要とされてきました。強いスピン軌道相互作用をもつRu、Ir化合物群ではそれらの有効磁気モーメント $J_{\text{eff}} = 1/2$ 間にキタエフ型相互作用が実現しうるということが予想され、(Li, Na)₂IrO₃ や α -RuCl₃ などが有力な候補物質として着目され

ました。その後、3次元ハニカム様化合物群や一価イオンによる元素置換戦略により精力的に $J_{\text{eff}} = 1/2$ 磁性が調べられました。ただし、殆どの場合低温で磁気秩序化してスピン液体性を生じません。しかし、次項に紹介します通り、 $\alpha\text{-RuCl}_3$ では、高エネルギー側のマヨラナ準粒子の特徴が様々な実験で理論計算との対応が発見され、良いモデルケースとなっています。一方で、水素による元素置換体 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ では実際にスピン液体性が極低温まで成立することが本計画研究で発見されました。これらのKitaエフ系研究は大きな前進でしたが、別の形の相互作用を伴う実際のスピン系では純粋なKitaエフ液体の理論とは齟齬が大きいため、より現実物質に近い場合の理論の必要性とより広い化合物群でのKitaエフ系の探索が今後の研究の方向性として提案されてレビューは締めくくられています。

(1-2) $\alpha\text{-RuCl}_3$ でのマヨラナ・フェルミオン現象

笠原・松田・那須らが昨年度に発表した $\alpha\text{-RuCl}_3$ での「半整数熱量子ホール効果」の発見は、マヨラナ・フェルミオンおよび非可換エニオンの直接的な証拠を与えるものです。これは我が国が発信した重要成果で、トポロジカル現象の研究分野で世界中で大きな反響を得ています。前号でも解説記事とともに詳しくお伝えしました。今年度は、熱ホール効果が半整数量子化する磁場方向がKitaエフ模型で予想される振舞と一致すること、特に面内磁場においても半整数熱量子ホールが現れることを明らかにしました [24]。

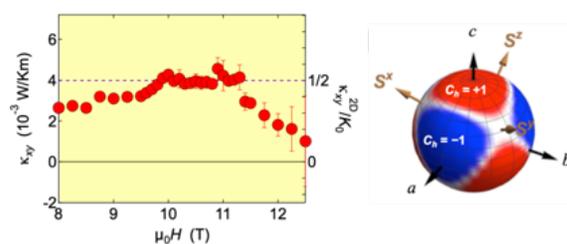


図3: (左) 面内磁場中において観測された熱ホール効果の半整数量子化。(右) Kitaエフ模型におけるトポロジカル不変量(チャーン数)の磁場方向依存性。

現実の物質ではKitaエフ型相互作用以外の磁気相互作用も存在するので、それらの影響を知ることが重要です。藤本らは、異なる方向を向く隣接スピン間の交換相互作用の影響を理論的に吟味しました [3]。その結果、そのような相互作用によってマヨラナ・フェルミオンの状態はむしろ安定化することがわかりました。

(1-3) パイロクロア酸化物の量子スピナイス

宇田川らは、パイロクロア構造の酸化物磁性体に現れる量子スピナイスの素励起、磁気モノポールの運動特性を明らかにしました。Kitaエフ模型のマヨラナ・フェルミオンと同様、磁気モノポールはスピンの分裂して生じる、半整数の磁気量子数を備えた素励起であり、そのダイナミクスには基本的な興味があります。3次元空間を遍歴する磁気モノポールの低エネルギー状態密度には、1次元のvan-Hove特異点に対応する強い特異性が生じ、熱力学や輸送特性に大きな影響を与えることを明らかにしました [e]。

【2. 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を挙げています。

(2-1) ルテニウム酸化物の超伝導状態

時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導体の有力候補である Sr_2RuO_4 の理解は、超伝導分野での重要課題として現在、世界的に注目されています [*]。最近、これまでの核磁気共鳴 (NMR) の実験に技術的問題があったことがわかり [**]、石田・前野らは NMR パルスによって数ミリ秒の間、試料温度が超伝導転移温度 T_c 以上になっていたことを確認しました [21]。これを受けて、偏極中性子散乱でのスピン磁化率の再実験も行われました [25]。これらからクーパ対としてスピン三重項が有力となり、スピン三重項の場合も現時点では否定されていませんが、秩序変数 d ベクトルが RuO_2 面に平行、すなわちクーパ対のスピンが RuO_2 面内で少なくとも部分的に消えている状態が必要となります。

時間反転対称性の有無をめぐっては、柏谷 (B01)、佐藤 (D01)、田仲 (B01)、前野らは、トンネル効果で従来着目されていなかった解析手法によって、臨界電流が電流・磁場の同時反転に対して不変であることから、時間反転対称性を破らないことを導き、 d ベクトルが RuO_2 面内にあるヘリカル状態を提唱しました (計画研究 B01 の記事に図を掲載) [10]。これはトポロジカル結晶超伝導状態です。ところが、ミュオンスピン緩和からは、

TOPICS

一軸性圧力に伴い T_c が倍以上に上昇するのに対して、時間反転対称性の破れを意味する内部磁場の発生温度 T_{TRSB} はやや下降することがわかりました [25]。この振舞は時間反転対称を破る超伝導状態で予想されていたものです。さらに Sr_2RuO_4 のマイクロリングでは自発的に DC-SQUID の振舞が現れることから、カイラルドメインなど二つの超伝導状態の縮退が強く示唆されています。

この他、前野・米澤らは、強磁性体との接合素子で、トンネルスペクトル [5] や近接効果の磁場方向依存性 [15] から、強磁性体ヘクーパー対が深く浸入する特異性を明らかにしました。

浅野、羽部 (A01-PD) らは、強磁性半導体と超伝導体の接合での近接効果を分析しました [11]。また、浅野らは時間反転対称性を破るカイラル超伝導体のエッジ状態にあるマヨラナ粒子を観測する方法を理論的に提案しました [14]。さらに、浅野、田仲らは常伝導金属線の側面に取り付けた s 波、または p 波超伝導体の近接効果を理論的に調べ、 p 波では位相干渉長が接合抵抗に敏感に依存することを明らかにしました (計画研究 B01 の記事に図を掲載) [4]。

Sr_2RuO_4 の超伝状態の解明は解決に向かって激動の様相で、スピン重項のシナリオでも主な実験事実を矛盾なく説明出来るモデルがありません。現時点での実験事実をよくまとめて、一つの提案を示す論文も出されています [***]。

(2-2) ネマチック超伝導

超伝導秩序変数が結晶の回転対称性を自発的に破る「ネマチック超伝導」状態について、水島 (D01)・藤本らは、その励起状態であるカイラル・ヒッグスモードの解析を行いました (計画研究 D01 の記事に図を掲載) [18]。

また、米澤・前野らは、トポロジカル絶縁体に Sr をインターカレートして出現するトポロジカル超伝導について、そのネマチック超伝導のドメイン構造が一軸圧力の印加によって制御できることを明らかにしました [22]。

(2-4) 鉄系超伝導体の量子臨界点

トポロジカル超伝導性によって超伝導量子渦の芯にマヨラナ粒子の存在が示唆されている $\text{FeS}_{1-x}\text{S}_x$ について、松田らは、 $x=0.15$ での反強磁性相・超伝導相の量子臨界点付近での磁気抵抗が、2成分からなることを明らかにしました [12]。これらは

軌道効果と量子臨界効果が共存することを意味します。

【3. トポロジカル半金属等】

(3-1) ディラック半金属

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もち、トポロジカル結晶絶縁体の候補物質です。米澤・前野らは、本プロジェクトによってアンチペロブスカイト酸化物で初の超伝導を発見した $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ 及び母物質 Sr_3SnO のメスバウアー分光から Sn のマイナス 4 価電子状態を明らかにしました [16]。また、羽部は、計画研究 B01 の記事で詳しく取り上げた、3 重以上に縮退したディラック電子を持つ CoSi の光学伝導度の計算から、通常のディラック半金属と異なるカイラルフェルミオン特有の周波数依存性を導きました [17]。

(3-2) 非エルミート・ハミルトニアンによるポロジカル半金属の解析

藤本、永井 (公募研究 D03) らは、非エルミート・ハミルトニアンを用いて、ワイルおよびディラック半金属の不純物効果を解析し、リングやフラットバンドの電子状態が出現することを導きました。これらの状態は光電子分光やトンネル効果による準粒子スペクトルから観測できることを提案しました [19]。

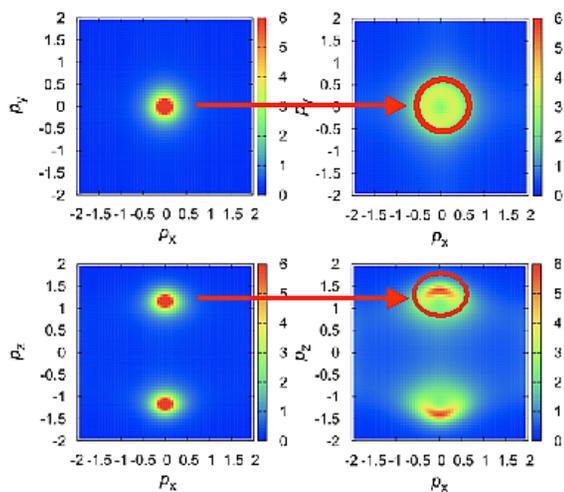


図 4: ディラック半金属・ワイル半金属では、不純物が生み出す非エルミート性によってリング状や平板状の電子バンドが出現

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、公募研究 A01 (4 件)・D02 (4 件) との連携や他の研究項目との間での共同研究で様々な成果を挙げま

した。さらに、国際共同研究の展開も含め、強相関係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を発信しています。本計画研究で取り組んできた超伝導・半金属(金属)・絶縁体(磁性体)のそれぞれのテーマで、この5年間で深化・発展を遂げ、トポロジカル物質科学の新学術領域の構築に貢献しました。

[*] "Superconductivity mystery turns 25", N. P. Armitage, *Nature* **576**, 386 (Dec. 2019).

[**] "Constraints on the superconducting order parameter in Sr_2RuO_4 from oxygen-17 nuclear magnetic resonance", A. Pustogow, Y. Luo, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer, and S. E. Brown, *Nature* **574**, 72 (2019).

[***] "A proposal for reconciling diverse experiments on the superconducting state in Sr_2RuO_4 ", S. A. Kivelson, A. C. Yuan, B. J. Ramshaw, R. Thomale, arXiv: 2002.00016 (Feb. 2020).

● H29(2017) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文
[a] "Low-energy electron-mode couplings in the surface bands of Sr_2RuO_4 revealed by laser-based angle-resolved photoemission spectroscopy", S. Akebi, T. Kondo, M. Nakayama, K. Kuroda, S. Kunisada, H. Taniguchi, Y. Maeno, S. Shin, *Phys. Rev. B* **99**, 081108(R)-1-6 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.081108

[b] "Nano-Resolved Current-Induced Insulator-Metal Transition in the Mott Insulator Ca_2RuO_4 ", J. Zhang, A. S. McLeod, Q. Han, X. Chen, H. A. Bechtel, Z. Yao, S.N. G. Corder, T. Ciavatti, T. H. Tao, M. Aronson, G.L. Carr, M. C. Martin, C. Sow, S. Yonezawa, F. Nakamura, I. Terasaki, D.N. Basov, A. J. Millis, Y. Maeno, M. Liu, *Physical Review X* **9**, 011032-1-8 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevX.9.011032

[c] "Quantum Vortex Core and Missing Pseudogap in the Multiband BCS-BEC Crossover Superconductor FeSe ", T. Hanaguri, S. Kasahara, J. Böker, I. Eremin, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Physical Review Letters* **122**, 077001-1-5 (Feb. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.077001

[d] "Electrical resistivity across a nematic quantum critical point", S. Licciardello, J. Buhot, J. Lu, J. Ayres, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, N. E. Hussey, *Nature* **567**, 213–217 (Feb. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0923-y>

[e] "Spectrum of Itinerant Fractional Excitations in

Quantum Spin Ice", M. Udagawa, R. Moessner, *Physical Review Letters* **122**, 117201-1-6 (Mar. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.117201

[f] "Concept and realization of Kitaev quantum spin liquids", H. Takagi, T. Takayama, G. Jackeli, G. Khaliullin, S. E. Nagler, *Nature Rev. Phys.* **1**, 264-280 (Mar. 2019).

● H30(2018) 年度の研究項目 A01 発表論文(発表順)

[1] "Ultrafast nematic-orbital excitation in FeSe ", T. Shimojima, Y. Suzuki, A. Nakamura, N. Mitsuishi, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Ishida, S. Shin, K. Ishizaka, *Nature Communications* **10**, 1946-1-6 (Apr. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09869-5>

[2] "Impact of off-diagonal exchange interactions on the Kitaev spin-liquid state of $\alpha\text{-RuCl}_3$ ", D. Takikawa, S. Fujimoto, *Physical Review B* **99**, 224409-1-8 (Jun. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.224409

[3] "Effects of phase coherence on local density of states in superconducting proximity structures", S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, Y. Asano, Y. Tanaka, *Physical Review B* **100**, 024511-1-11 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.024511

[4] "Tuning the Distance to a Possible Ferromagnetic Quantum Critical Point in $\text{A}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ ", J. Luo, J. Yang, R. Zhou, Q.G. Mu, T. Liu, Zhi-an Ren, C.J. Yi, Y.G. Shi, G.-q. Zheng, *Physical Review Letters* **123**, 047001-1-9 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.047001

[5] "Observation of superconducting gap spectra of long-range proximity effect in $\text{Au/SrTiO}_3/\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ tunnel junctions", M. S. Anwar, M. Kunieda, R. Ishiguro, S. R. Lee, L. A. B. Olde Olthof, J. W. A. Robinson, S. Yonezawa, T. W. Noh, Y. Maeno, *Physical Review B* **100**, 024516-1-6 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.024516

[6] "Ordering of hidden multipoles in spin-orbit entangled $5d^1$ Ta chlorides", H. Ishikawa, T. Takayama, R. K. Kremer, J. Nuss, R. Dinnebier, K. Kitagawa, K. Ishii, and H. Takagi, *Phys. Rev. B* **100**, 045142 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.045142

[7] "Coupling between heavy fermion superconductor CeCoIn_5 and antiferromagnetic metal CeIn_3 through the atomic interface", M. Naritsuka, S. Nakamura, Y. Kasahara, T. Terashima, R. Peters, Y. Matsuda, *Physical Review B* **100**, 024507-1-9 (Jul. 2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.100.024507

[8] "Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator", Y. Sato,

- Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Taniguchi, **S. Kasahara**, L. Chen, T. Asaba, C. Tinsman, H. Murayama, O. Tanaka, Y. Mizukami, T. Shibauchi, F. Iga, J. Singleton, Lu Li, **Y. Matsuda**, *Nature Physics* **15**, 954-959 (Jul. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0552-2>
- [9] "Diagonal nematicity in the pseudogap phase of $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ ", H. Murayama, Y. Sato, R. Kurihara, S. Kasahara, Y. Mizukami, **Y. Kasahara**, H. Uchiyama, A. Yamamoto, E.-G. Moon, J. Cai, J. Freyermuth, M. Greven, T. Shibauchi, **Y. Matsuda**, *Nature Communications* **10**, 3282-1-7 (Jul. 2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1>
- [10] "Time-reversal invariant superconductivity of Sr_2RuO_4 revealed by Josephson effects", **S. Kashiwaya**, K. Saitoh, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, **M. Sato**, K. Yada, **Y. Tanaka**, **Y. Maeno**, *Physical Review B* **100**, 094530-1-9 (Sep. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.094530](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.094530)
- [11] "Proximity effect in a ferromagnetic semiconductor with spin-orbit interactions", T. Yamashita, J. Lee, **T. Habe**, **Y. Asano**, *Physical Review B* **100**, 094501-1-11 (Sep. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.094501](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.094501)
- [12] "Coexistence of orbital and quantum critical magnetoresistance in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ", S. Licciardello, N. Maksimovic, J. Ayres, J. Buhot, M. Ćulo, B. Bryant, S. Kasahara, **Y. Matsuda**, T. Shibauchi, V. Nagarajan, J. G. Analytis, N. E. Hussey, *Physical Review Research* **1**, 023011-1-10 (Sep. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevResearch.1.023011](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.023011)
- [13] "Pseudospin triplet superconductivity in 2H-type transition-metal dichalcogenide monolayers", **T. Habe**, *Physical Review B* **100**, 165431-1-9 (Oct. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.165431](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.165431)
- [14] "Anomalous Nonlocal Conductance as a Fingerprint of Chiral Majorana Edge States", S. Ikegaya, **Y. Asano**, D. Manske, *Physical Review Letters* **123**, 207002-1-6 (Nov. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevLett.123.207002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.207002)
- [15] "Anomalous anisotropic behaviour of spin-triplet proximity effect in $\text{Au}/\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ junctions", **M. S. Anwar**, M. Kunieda, R. Ishiguro, S. R. Lee, C. Sow, J. W. A. Robinson, **S. Yonezawa**, T. W. Noh, **Y. Maeno**, *Scientific Reports* **9**, 15827-1-8 (Nov. 2019). DOI: [10.1038/s41598-019-52003-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-52003-0)
- [16] "Negative ionic states of tin in the oxide superconductor $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ revealed by Mössbauer spectroscopy", A. Ikeda, S. Koibuchi, S. Kitao, M. Oudah, **S. Yonezawa**, M. Seto, **Y. Maeno**, *Physical Review B* **100**, 245145-1-9 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.245145](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245145)
- [17] "Dynamical conductivity in the multiply degenerate point-nodal semimetal CoSi ", **T. Habe**, *Physical Review B* **100**, 245131 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.245131](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245131)
- [18] "Chiral Higgs Mode in Nematic Superconductors", H. Uematsu, **T. Mizushima**, A. Tsuruta, **S. Fujimoto**, J. A. Sauls, *Physical Review Letters* **123**, 237001 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevLett.123.237001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.237001)
- [19] "Disorder-induced exceptional and hybrid point rings in Weyl/Dirac semimetals", T. Matsushita, **Y. Nagai**, **S. Fujimoto**, *Physical Review B* **100**, 245205-1-9 (Dec. 2019). DOI: [10.1103/PhysRevB.100.245205](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245205)
- [20] "Measuring Magnetic Field Texture in Correlated Electron Systems under Extreme Conditions", Y. Yip, K. O. Ho, K. Y. Yu, Y. Chen, W. Zhang, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, **Y. Matsuda**, S. K. Goh, S. Yang, *Science* **366**, 1355-1359 (Dec. 2019). DOI: [10.1126/science.aaw4278](https://doi.org/10.1126/science.aaw4278)
- [21] "Reduction of the ^{17}O Knight shift in the Superconducting State and the Heat-up Effect by NMR Pulses on Sr_2RuO_4 ", K. Ishida, M. Manago, K. Kinjo, and **Y. Maeno**. arXiv: 1907.12236 (July, 2019), to be published in *J. Phys. Soc. Jpn.* (2020).
- [22] "Uniaxial-strain Control of Nematic Superconductivity in $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", I. Kostylev, **S. Yonezawa**, Z. Wang, Y. Ando, **Y. Maeno**, arXiv: 1910.03252 (Oct. 2019).
- [23] "Split superconducting and time-reversal symmetry-breaking transitions, and magnetic order in Sr_2RuO_4 under uniaxial stress", V. Grinenko, S. Ghosh, R. Sarkar, J.-C. Orain, A. Nikitin, M. Elender, D. Das, Z. Guguchia, F. Brückner, M. E. Barber, J. Park, N. Kikugawa, D. A. Sokolov, J. S. Bobowski, T. Miyoshi, **Y. Maeno**, A. P. Mackenzie, H. Luetkens, C. W. Hicks, H. Klauss, arXiv:2001.08152 (Jan. 2020).
- [24] "Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material $\alpha\text{-RuCl}_3$ ", T. Yokoi, S. Ma, Y. Kasahara, **S. Kasahara**, T. Shibauchi, N. Kurita, H. Tanaka, **J. Nasu**, Y. Motome, C. Hickey, S. Trebst, **Y. Matsuda**, arXiv:2001.01899 (Jan. 2020).
- [25] "Reduction of the spin susceptibility in the superconducting state of Sr_2RuO_4 observed by polarized neutron scattering", A.N. Petsch, M. Zhu, M. Enderle, Z. Q. Mao, **Y. Maeno**, and S.M. Hayden, arXiv:2002.02856 (Feb. 2020).

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説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、トポロジカル半金属における新型準粒子観測や薄膜素子開発、トポロジカル超伝導体の探索、奇周波数クーパ対の理論において進展がありました。これらの成果は、薄膜作製や先端分光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します。

1. トポロジカル半金属

1-1. 新型ノーダル準粒子

トポロジカル半金属中に現れることが知られているディラックおよびワイル粒子は、真空状態において存在する素粒子として提案されたものです。一方で固体は多様な対称性をもち、なかでも空間反転対称性を破るカイラルな結晶構造を持つ物質において、ディラックやワイル粒子とも違う準粒子が存在することが理論的に予言されました。そのような粒子として、粒子の内部自由度がディラック粒子とワイル粒子の中間にある「スピン1粒子」や、2つのワイル粒子が複合した「2重ワイル粒子」など、高次の自由度をもつ新型の

粒子があります。これらの新型粒子にはディラック・ワイル粒子にはない物性が予想されており、トポロジカル物質の探索に大きな広がりを与えるものとして期待されています。佐藤 (B01 代表者)、相馬 (B01 研究協力者)、安藤 (B01 研究協力者) らは、カイラルな結晶構造を持ち古くから研究がされている CoSi (図 1a) に着目し、その角度分解光電子分光 (ARPES) を行って「スピン1粒子」の特徴である平らなバンドと山型のバンドが一点で交差するバンド分散と、「2重ワイル粒子」の特徴である入れ子になったX字型バンド分散を、それぞれ明確に分離して観測しました (図 1b)。さらに表面電子状態についても調べ、これらの粒子のバンドの縮退点をつなぐ表面フェルミアーク電子状態の観測にも成功しました。この結果は、これらの準粒子がそれぞれ異なるカイラリティを持つことを示しており、トポロジカルに頑強な性質の有力な証拠となります [25]。これらの結果より、CoSi が「スピン1粒子」と「2重ワイル粒子」を内包する新しいタイプのトポロジカル半金属であることが実験的に確立しました。今後、このようなカイラル構造を持つ物質における準粒子に起因した特異物性の発現が期待されます。

1-2. ワイル半金属薄膜素子

塚崎 (B01 分担者) は、バルク単結晶を用いた研究でワイル半金属の可能性が指摘された Fe_3Sn_2 の薄膜化研究を行いました。薄膜化技術を適用することで、組成や構造について系統的な研究を行うことができ、さらには異常ホール効果を活用する素子利用の可能性を探索できます。本研究では、結晶相ではない Fe-Sn 混晶相の特性を利用した室温でのホール素子活用に向けた研究を行いました。 Fe_3Sn_2 のバルク単結晶を用いた研究では、線形バンドにギャップ構造が観測され、ワイル半金属である可能性が示唆されました。塚崎らはスパッタリング法を用いて Fe と Sn の組成調整を行う際に、非結晶相の物性測定から開始したところ、組成を Fe:Sn=3:2 とした非結晶相においても単結晶同等の大きな異常ホール効果を示すこと (図 2)

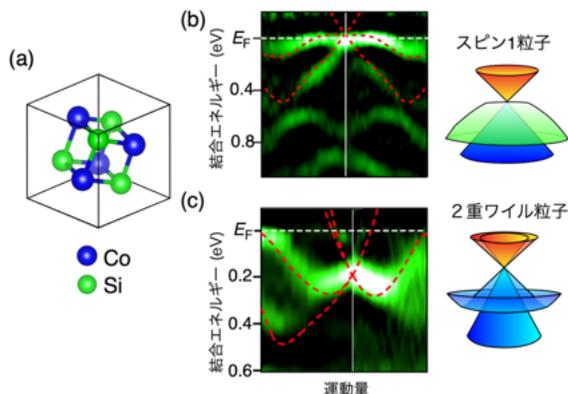


図 1: (a) CoSi の結晶構造. ARPES により観測した (b) スピン1粒子と、(c) 2重ワイル粒子のバンド分散. 赤点線はバンド計算結果 [25].

TOPICS

を見出しました [23]。磁場印加で生じるホール抵抗の大きさは、通常利用される Si 系の半導体ホール素子の性能と同等であることがわかりました。また、Fe-Sn のホール抵抗の温度変化は非常に小さく、強磁性転移温度以下であれば、安定して利用できることがわかりました。さらに、磁場検出素子として重要なノイズ特性についても評価したところ、1kHz 以下の低周波数まで利用できることを確認しました [4]。これらの特性は、室温以上の強磁性転移温度を持つ磁性ワイル半金属物質群が、バンドトポロジーに由来する異常ホール効果などの際立った物性を示し、室温での素子利用に有望であることを示唆しています。ワイル半金属候補物質としてホイスラー合金なども理論的な検討がなされているため、バルク物質や薄膜を用いた物性研究の今後のさらなる展開が期待されます。

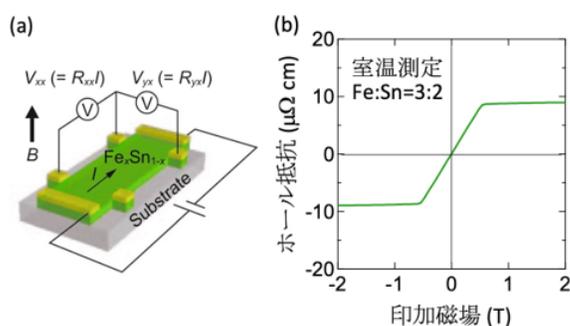


図 2: Fe-Sn ホール素子の模式図 (a) と室温で測定したホール抵抗の磁場依存性 (b) [23].

2. トポロジカル超伝導

2-1. トポロジカル超伝導体実現の新しい方法

マヨラナ粒子を内包するトポロジカル超伝導体の実現方法としてこれまで一般的に用いられているのが、超伝導近接効果を用いる方法です。この方法では、例えば、トポロジカル絶縁体と超伝導体を接合した場合、超伝導体側からトポロジカル絶縁体側にクーパー対が侵入することで、二つの物質のあいだの界面付近に存在するディラック電子が超伝導化されます。この超伝導化されたディラック電子が、マヨラナ粒子検出の鍵となります。しかしながらこの方法では、マヨラナ粒子が物質内部の界面付近に埋もれてしまうため、STM などを用いた場合でも、その検出が難しいという大きな課題がありました。佐藤、相馬、瀬川 (B01 分担者)、山内 (D01 公募)、安藤らは、トポロジカル絶縁体 TlBiSe₂ の上に、分子線エピタキシー法

を用いて Pb 超伝導薄膜を成長させることに成功し、ARPES を用いて Pb 表面のバンド分散を調べた結果、Pb 薄膜とトポロジカル絶縁体の界面に埋もれて全く見えないはずのディラックコンバンドが、Pb 表面において明確に観測されることを明らかにしました [1] (図 3)。このことは、もともとトポロジカル絶縁体の表面に局在していたディラック電子が、Pb との接合によって Pb 側に移動することを示しています。さらに、Pb 薄膜の超伝導転移温度 (~6 K) 以下で超高分解能測定を行ったところ、ディラックコンにおいて超伝導ギャップが明確に観測されました。これらの結果は、これまで不可欠と考えられてきた超伝導近接効果を用いずとも、トポロジカル超伝導が実現できることを強く示唆しています。さらにこの結果は、普通の超伝導体としてよく知られる Pb の薄膜にトポロジカル絶縁体を接合しただけで、Pb がトポロジカル超伝導体に変換できることを示唆しています。今回の結果は、「超伝導近接効果を用いる」というこれまでの常識とは異なり、接合した超伝導体そのものをトポロジカル超伝導体に変えるという新しい方向性を示すものです。このアイデアは汎用性が高く、他のさまざまな超伝導体とトポロジカル絶縁体の組み合わせにも適用できると考えられます。

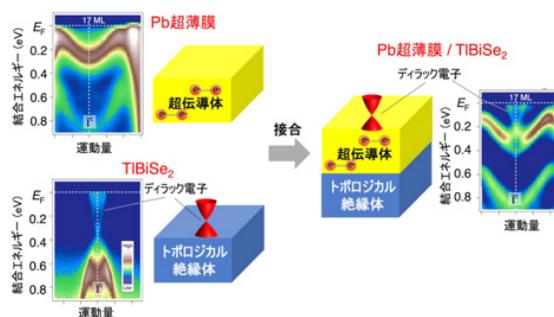


図 3: Pb/TlBiSe₂ の ARPES 結果 [1]. Pb 超伝導薄膜 (左上) と TlBiSe₂ (左下) の接合により、もともと TlBiSe₂ 表面にあったディラック電子状態が、Pb 超薄膜側に移動する (右).

2-2. ジョセフソン効果によるトポロジカル結晶超伝導の検出

カイラル *p* 波超伝導体と長らく信じられてきた Sr₂RuO₄ の時間反転対称性の破れに関しては、μSR などの実験が時間反転破れを主張しているのに対して、走査 SQUID などでは時間反転破れが検出されないという不一致が存在しました。柏谷 (B01 分担者)、田仲 (B01 分担者)、佐藤 (D01 分

担者)、前野(A01 代表者)らは、ジョセフソン効果により時間反転対称性を精密に計測する手法を提案し、それを適用することにより Sr_2RuO_4 が時間反転対称性を破らない超伝導であることを明らかにしました。まず非従来型超伝導と s 波超伝導体のジョセフソン関係においては、非従来型超伝導体が時間反転対称性を破る場合のみ \cos 項が有限になりますが、この項が臨界電流 (I_c) の外部磁場 (H) 依存性においてどのような影響を与えるのかを理論的に解析しました。その結果、平面型の接合、およびコーナー接合において、 I_c - H パターンの電流磁場反転 (CFI) 対称性と非従来型超伝導体の時間反転対称性が対応することを明らかにしました。一方実験においては $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Nb}$ 接合を作製し、サイズ依存性からドメイン運動に影響を受けない素子サイズと磁場範囲を明らかにしました。そのうえでドメイン運動の影響を排除した I_c - H 特性を精密に測定し、結果として I_c - H 特性の CFI 反転対称性が厳密に保たれている実験結果を得ることができ (図 4)、 Sr_2RuO_4 の時間反転対称性が破れていないことを証明しました。このことは、 Sr_2RuO_4 がドメイン構造を有するヘリカル対称性の可能性が高く、結晶の鏡映対称性も併せて考慮した場合、エッジに結晶対称性により保護された 2 つのマヨラナゼロモードを有するトポロジカル結晶超伝導体と考えられることを示しています [8]。他に、磁性をドーブしたトポロジカル絶縁体上のジョセフソン効果によるマヨラナ準粒子形成の実験的検出 [2] や、エッジ電流検出のためのダイヤモンドセンシング技術の開発を進めました [24]。

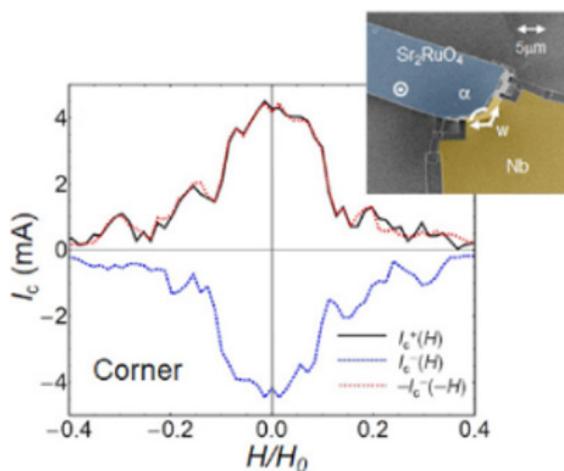


図 4: $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Nb}$ コーナージョセフソン接合における I_c - H 特性 [8]. 負側の $I_c(-H)$ (青線) に対して電流および磁場反転した $-I_c(-H)$ (赤線) が正側の $I_c(H)$ (黒線) と一致することより時間反転対称性が破れていないことが示されている. 挿入図は接合の走査イオン顕微鏡像.

2-3. 磁気ドーブしたトポロジカル絶縁体上の超伝導接合の理論

田仲らは、Bo・田仲らが 2018 年に開発したグリーン関数の方法を用いることで、磁気ドーブしたトポロジカル絶縁体上の超伝導体接合におけるジョセフソン効果の計算を行いました。化学ポテンシャルと磁化の大きさを制御しながら、(I) 常伝導状態が絶縁体的で超伝導状態がトポロジカルに自明な場合、(II) 常伝導状態が絶縁体的で超伝導状態がトポロジカルな場合、(III) 常伝導状態が金属的で超伝導状態がトポロジカルな場合の 3 つの場合について、ジョセフソン電流の温度依存性を計算しました。その結果、トポロジカル超伝導の領域では、カイラルマヨラナフェルミオンの存在により低温でジョセフソン電流が大きく増加し、この振る舞いが化学ポテンシャルに対して鋭敏な状況が (II) の場合であることが明らかになりました [7]。

3. 奇周波数クーパー対の理論

3-1. バルクエッジ対応とスペクトラル分解

超伝導体表面に形成される表面アンドレーエフ束縛状態とバルクのトポロジカル不変量の間には 1 対 1 の関係があります。特に d 波超伝導体のようなノードを持つ超伝導体においてゼロエネルギー状態とバルクのトポロジカル不変量が指数定理で結びつくことが示されています (2011 年佐藤・田仲ら)。また、ゼロエネルギー状態が存在するときに奇周波数クーパー対が存在することも示されています (2007 年田仲ら)。しかし、奇周波数ペアに関する明確なバルクエッジ対応は確立していませんでした。

田村 (B01 PD)、田仲らは、カイラル対称性が存在する場合にエッジ状態として誘起される奇周波数クーパー対とバルクのグリーン関数の間に、スペクトラル・バルクエッジ対応と呼ばれる関係式が成り立つことを予言して、Kitaev 鎖やスピン軌道相互作用のあるナノワイヤ超伝導近接効果系などの代表的なモデルに対して数値的に (ある場合は解析的に) 成り立つことを示しました [20]。その結果、低周波数極限では奇周波数クーパー対のペア振幅は $F(z) = W/z + \chi z + O(z^3)$ (z は複素周波数) と表せることがわかりました。第一項の発散的な振る舞い ($\sim 1/z$) をする係数 W は巻き付き数であり、トポロジカル相においてのみゼロでな

TOPICS

い整数になります。一方、特異性を持たない第2項($\sim z$)の係数 χ は常に存在するもので、この係数はトポロジカル量子転移点に向かって発散してトポロジカル相転移への不安定性を示すことを明らかにしました [20]。この理論により奇周波数クーパー対の総和がバルクの系で定義される c 数で議論できるようになり、奇周波数クーパー対のスペクトラル解析が飛躍的に進展しました。

3-2. Kitaev 鎖超伝導と奇周波数ペアの理論

高木、田村、田仲は、1次元 p 波超伝導モデルである Kitaev 鎖における奇周波数クーパー対を数値的に調べました [3]。その結果、奇周波数ペアはマヨラナフェルミオンと1対1の対応関係を持つことが示され、またトポロジカル量子臨界点においては、奇周波数ペアが半無限 Kitaev 鎖のバルク領域へと広がることを明らかにしました。トポロジカル量子転移点ではギャップレス超伝導状態になり、本来スピン3重項 p 波超伝導しかないバルク領域においても奇周波数ペアが存在するという新奇な効果を示しました。この性質は、スピン軌道相互作用のあるナノワイヤなどの様々なトポロジカル超伝導に普遍的に表れると期待されま
す [3]。

3-3. 異常近接効果

異常近接効果とは、拡散伝導領域の金属 (DN) とスピン3重項超伝導体の接合において、近接効果により DN 領域で準粒子状態密度が零エネルギーでピークを持つ現象です (2014年田仲・柏谷)。さらにこの起源は、奇周波数はスピン3重項 s 波によることが明らかにされました (2017年田仲)。そこで、2つの超伝導電極が接合した場合において拡散伝導領域 (DN) における状態密度の計算を行った (図5) 結果、従来型 s 波超伝導の場合は近接効果の担い手はスピン1重項 s 波となり、位相差が0の時に近接効果が強められゼロエネルギーの状態密度はギャップ構造を示す一方で、位相差が π の場合は近接効果は弱められてゼロエネルギーの状態密度は常伝導状態の値へと戻ることがわかりました。 p 波超伝導の場合は近接効果の担い手はスピン3重項 s 波となり、準粒子状態密度はゼロエネルギーでピーク構造を持ちます。このとき、位相差が0の場合はゼロエネルギー状態が接合系に一様に広がるのに対して、 π の場合は DN の中心で干涉効果により状態密度は常伝導

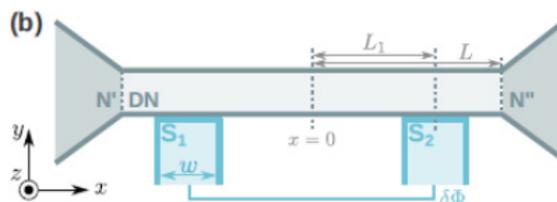


図5: 2つの超伝導電極が接合した超伝導接合の模式図 [14]。バリア障壁は S/DN 界面にのみ存在し、超伝導体は $x = \pm L_1$ において DN に接合されており、位相差 $\delta\Phi$ を持つ。

状態の値となることを見出しました。ゼロエネルギー状態の位相干渉を特徴づける位相干渉長は、従来型の近接効果では非弾性散乱の強度で決まりますが、 p 波超伝導体の場合は非弾性散乱の強度に加えて共鳴の強さ (バリアーの高さ) も強く影響することがわかりました (田仲、浅野 (A01 分担者) [14])。

バルクのスピン3重項超伝導体は希少ですが、スピン軌道相互作用を有効に用いれば銅酸化物超伝導体のようなスピン1重項 d 波超伝導体接合においてもゼロエネルギー状態からスピン3重項クーパー対を作り出すことが可能となり、異常近接効果は存在することが示されました [19]。

- [1] "Conversion of a conventional superconductor into a topological superconductor by topological proximity effect" C. X. Trang, N. Shimamura, K. Nakayama, S. Souma, K. Sugawara, I. Watanabe, K. Yamauchi, T. Oguchi, K. Segawa, T. Takahashi, Y. Ando, T. Sato, Nature Communications, **11**, 159 (Jan. 2020).
- [2] "Unusual superconducting proximity effect in magnetically doped topological Josephson junctions" R. Yano, M. Koyanagi, H. Kashiwaya, K. Tsumura, H. T. Hirose, T. Sasagawa, Y. Asano, S. Kashiwaya, Journal of the Physical Society of Japan **89**, 034702 (Feb. 2020).
- [3] "Odd-frequency pairing and proximity effect in Kitaev chain systems including topological critical point" D. Takagi, S. Tamura, Y. Tanaka, Physical Review B **101**, 024509-1-15 (Jan. 2020).
- [4] "Low-frequency noise measurements on Fe-Sn Hall sensors" J. Shiogai, Z. Jin, Y. Satake, F. Fujiwara, A. Tsukazaki, Applied Physics Express **12**, 123001-1-5 (Nov. 2019).
- [5] "Unusual change in the Dirac-cone energy band upon a two-step magnetic transition in CeBi" H. Oinuma, S. Souma, K. Nakayama, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Yoshida, A. Ochiai, T. Takahashi, T. Sato, Physical Review B **100**, 125122-1-7 (Sep. 2019).
- [6] "Theory of the Josephson current on a magnetically doped topological insulator" T. Toki, S. Nakosai, Y. Tanaka, Y. Kawaguchi,

- Physical Review B **100**, 104518-1-11 (Sep. 2019).
- [7] "Spin-orbital hallmarks of unconventional superconductors without inversion symmetry" Y. Fukaya, [S. Tamura](#), K. Yada, [Y. Tanaka](#), P. Gentile, M. Cuoco, Physical Review B **100**, 104524-1-15 (Sep. 2019).
- [8] "Time-reversal invariant superconductivity of Sr_2RuO_4 revealed by Josephson effects" [S. Kashiwaya](#), K. Saitoh, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, [M. Sato](#), K. Yada, [Y. Tanaka](#), [Y. Maeno](#), Physical Review B **100**, 094530-1-9 (Sep. 2019).
- [9] "Quantum anomalous Hall effect driven by magnetic proximity coupling in all-telluride based heterostructure" R. Watanabe, [R. Yoshimi](#), M. Kawamura, M. Mogi, [A. Tsukazaki](#), X. Z. Yu, K. Nakajima, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura, Applied Physics Letters **115**, 102403-1-5 (Sep. 2019).
- [10] "Electronic structure of a $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeTe}$ heterostructure: implications for unconventional superconductivity" K. Owada, K. Nakayama, R. Tsubono, K. Shigekawa, K. Sugawara, T. Takahashi, [T. Sato](#), Physical Review B **100**, 064518-1-5 (Aug. 2019).
- [11] "Majorana multipole response of topological superconductors" S. Kobayashi, [A. Yamakage](#), [Y. Tanaka](#), [M. Sato](#), Physical Review Letters **123**, 097002-1-6 (Aug. 2019).
- [12] "Dimensionality reduction and band quantization induced by potassium intercalation in 17-HfTe_2 " Y. Nakata, K. Sugawara, A. Chainani, [K. Yamauchi](#), K. Nakayama, [S. Souma](#), P.-Y. Chuang, C.-M. Cheng, T. Oguchi, K. Ueno, T. Takahashi, [T. Sato](#), Physical Review Materials **3**, 071001(R)-1-6 (Jul. 2019).
- [13] "Dichotomy of superconductivity between monolayer FeS and FeSe" K. Shigekawa, K. Nakayama, M. Kuno, G. N. Phan, K. Owada, K. Sugawara, T. Takahashi, [T. Sato](#), Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **116**, 24470-24474 (Jul. 2019).
- [14] "Effects of phase coherence on local density of states in superconducting proximity structures" S. Suzuki, A. A. Golubov, [Y. Asano](#), [Y. Tanaka](#), Physical Review B **100**, 024511-1-11 (Jul. 2019).
- [15] "Large anomalous Hall effect in topological insulators with proximitized ferromagnetic insulators" M. Mogi, T. Nakajima, V. Ukleev, [A. Tsukazaki](#), [R. Yoshimi](#), M. Kawamura, K. S. Takahashi, T. Hanashima, K. Kakurai, T. Arima, M. Kawasaki, Y. Tokura, Physical Review Letters **123**, 016804-1-6 (Jul. 2019).
- [16] "Monolayer VTe_2 : incommensurate Fermi surface nesting and suppression of charge density waves" K. Sugawara, Y. Nakata, K. Fujii, K. Nakayama, [S. Souma](#), T. Takahashi, [T. Sato](#), Physical Review B **99**, 241404(R)-1-6 (Jun. 2019).
- [17] "Evidence for bulk nodal loops and universality of Dirac-node arc surface states in ZrGeX_c ($X_c=\text{S, Se, Te}$)" T. Nakamura, [S. Souma](#), Z. Wang, [K. Yamauchi](#), D. Takane, H. Oinuma, K. Nakayama, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Oguchi, T. Takahashi, [Y. Ando](#), [T. Sato](#), Physical Review B **99**, 245105-1-11 (Jun. 2019).
- [18] "Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface" K. Yasuda, H. Yasuda, T. Liang, [R. Yoshimi](#), [A. Tsukazaki](#), K. S. Takahashi, [N. Nagaosa](#), M. Kawasaki, Y. Tokura, Nature Communications **10**, 2734-1-6 (Jun. 2019).
- [19] "Theory of the proximity effect in two-dimensional unconventional superconductors with Rashba spin-orbit interaction" [S. Tamura](#), [Y. Tanaka](#), Physical Review B **99**, 184501-1-21 (May 2019).
- [20] "Odd-frequency pairs in chiral symmetric systems: Spectral bulk-boundary correspondence and topological criticality" [S. Tamura](#), S. Hoshino, [Y. Tanaka](#), Physical Review B **99**, 184512-1-17 (May 2019).
- [21] "Nanomosaic of topological Dirac states on the surface of $\text{Pb}_3\text{Bi}_{24}\text{Se}_{41}$ observed by nano-ARPES" K. Nakayama, [S. Souma](#), C. X. Trang, D. Takane, C. Chen, J. Avila, T. Takahashi, S. Sasaki, [K. Segawa](#), M. C. Asensio, [Y. Ando](#), [T. Sato](#), Nano Letters **19**, 3737-3742 (Apr. 2019).
- [22] "Ferromagnetic $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ thin films fabricated by co-sputtering" K. Fujiwara, J. Ikeda, J. Shiogai, T. Seki, K. Takanashi, [A. Tsukazaki](#), Japanese Journal of Applied Physics **58**, 050912-1-4 (Apr. 2019).
- [23] "Fe-Sn nanocrystalline films for flexible magnetic sensors with high thermal stability" Y. Satake, F. Fujiwara, J. Shiogai, T. Seki, [A. Tsukazaki](#), Scientific Reports **9**, 3282-1-7 (Mar. 2019).
- [24] "Finite-pulse-width effect on quantum sensing for an asynchronous alternating-current magnetic field to dynamical decoupling sequences" T. Ishikawa, A. Yoshizawa, Y. Mawatari, [S. Kashiwaya](#), H. Watanabe, J. Appl. Phys. **126**, 064504-1-5 (Mar. 2019).
- [25] "Observation of chiral fermions with a large topological charge and associated Fermi-arc surface states in CoSi " D. Takane, Z. Wang, [S. Souma](#), K. Nakayama, T. Nakamura, H. Oinuma, Y. Nakata, H. Iwasawa, C. Cacho, T. Kim, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, [Y. Ando](#), [T. Sato](#), Physical Review Letters **122**, 076402-1-6 (Feb. 2019).
- [26] "Magnetic topological insulators" Y. Tokura, K. Yasuda, [A. Tsukazaki](#), Nature Reviews Physics **1**, 126-143 (Jan. 2019).

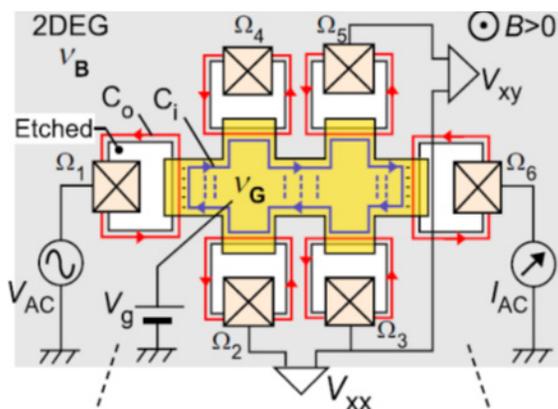
トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

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. 整数量子ホールエッジと分数量子ホールエッジ間の電荷緩和現象

CJ.Lin (C01 PD)、藤澤 (C01 代表)、橋坂 (C01 連携研究者)、秋保 (C01 連携研究者)、村木 (C01 分担者) らは、[図 1](#) のように、整数量子ホール系の中に分数量子ホール系が埋め込まれた複合量子ホール素子を用いて、整数エッジと分数エッジ間の電荷緩和現象を明らかにしました [1]。特に、占有率 $\nu_G = 2/3$ の分数ホール状態のエッジは、対向する整数エッジと分数エッジから形成されると考えられているものの、強い電荷緩和現象により、独立の輸送特性を観測することは困難が伴います。本研究では、分数ホール状態の散乱を観測し



[図 1](#). 整数量子ホール系 (灰色, 占有率 ν_B) の中に形成された分数量子ホール系 (黄色, 占有率 ν_G)。例えば、 $\nu_B=1, \nu_G=2/3$ において、整数エッジ C_0 と分数エッジ C_1 間の電荷平衡化現象を調べることができる。文献 [1] より。

つつ、エッジ間の電荷緩和を評価する手法を開拓し、その有効性を示しました。本手法により、正孔分数ホール状態のエッジ状態の理解を深めることができると期待します。

2. 量子ホールエッジチャンネルの長距離弾道輸送

藤澤 (C01 代表)、橋坂 (C01 連携研究者)、村木 (C01 分担者) らは、量子ホール系のエッジチャンネルを輸送するホットエレクトロンを、エネルギー分光測定により解析し、電子電子散乱や電子フォノン散乱の抑制によって長距離の弾道の輸送が可能になることを明らかにしました [2]。低エネルギー領域 (< 30 meV) で支配的な電子電子散乱は、高いエネルギー領域で著しく抑制されます。高エネルギーで重要になる光学フォノン散乱はエッジ電場を弱めることで顕著に抑制されます。二重ゲート構造を用いて、エッジ電場を抑制することで、光学フォノン散乱をさらに抑制できることを示しました [3]。これらの結果は、カイラルエッジ状態における単一電子輸送回路やコヒーレント輸送の可能性を拓くものです。

3. InAs 量子ホールエッジチャンネルにおける逆方向電流の観測とその緩和長測定

秋保 (C01 連携研究者)、入江 (C01 連携研究者)、村木 (C01 分担者) らは、狭ギャップ半導体である InAs の量子ホール系において、磁場の向きで決まる通常のカイラルエッジチャンネルとは逆方向に流れるエッジ電流が存在することを実験的に示しました [4]。GaAs と異なり InAs では試料端でフェルミ準位が伝導帯内に固定されるため、試料内部よりも電子密度が高い領域が試料端近傍に形成します。そのため、バルクの占有率に対応した通常のエッジチャンネルに加え、順方向と逆方向のカイラリティをもったエッジチャンネルが存在する可能性があります [[図 2\(a\)](#)]。本研究では、3 端子測定配置 [[図 2\(b\)](#)] を用いることで、逆方向電流の存在を示すことに成功しました [[図 2\(c\)](#)]。さらに長さの異なるエッジを用いることで、逆方向電流の緩和長を測定し、そのバルク占有率・ゲート

電圧・磁場に対する依存性を明らかにしました [図 2(d)]。これらの実験から、量子ホール効果が観測されるマクロな試料においても、条件によって、ミクロにはバルク - エッジ対応から予想されるよりも複雑なエッジチャネルの構造や緩和過程が存在することが明らかになりました。

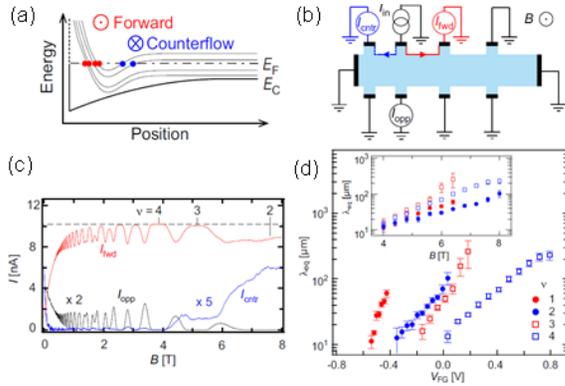


図 2.(a)InAs 試料端におけるランダウ準位の振る舞い。(b)3 端子測定配置。(c) 順方向電流 I_{fwd} と逆方向電流 I_{ctr} の磁場依存性。(d) バルク占有率 1-4 における I_{ctr} の緩和長のゲート電圧依存性。

4. スピン軌道相互作用下における電子スピンのドリフト拡散輸送ダイナミクス

好田 (C01 分担者) らは、GaAs/AlGaAs 量子井戸構造において、ドリフト・拡散運動に伴うスピンドイナミクスについて時間空間分解カー回転法を用いて明らかにし、スピン軌道相互作用の強さを定量評価できることを示しました [5,6]。電子スピンのドリフト拡散輸送下でスピン軌道相互作用に起因する有効磁場が存在する場合、電子スピンは有効磁場の周りを歳差運動しながら伝搬します。電子スピンドリフトと拡散双方の影響を同時に受けるときに、この2つの影響を分離評価する手法を確立しました。図 3(a) に示すように円偏光ポンプ光で励起した電子スピンをプローブ光で空間スキャンすることで電子スピンの時間・空間ダイナミクスを調べることが可能です。図 3(b),(c) に異なる結晶方向にドリフト輸送させた電子スピンの時間・空間発展の様子を示します。時間と共に $+x(+y)$ 方向に電子スピンは移動しながら歳差運動し、外部磁場と結晶方位に依存する有効磁場の向きにより歳差運動周波数が図 3(b) と (c) で異なることが分かります。同時に、スピン拡散により歳差運動周波数が空間的にも変調を受けていることを明らかにしました。モンテカルロシミュレーションを用いてスピンの時空間発展を良く再

現でき、ラシュバおよびドレッセルハウススピン軌道相互作用係数を定量評価できることを明らかにしました。それ以外にも、単層 MoS₂ のバレー偏極・コヒーレンスの光学的制御や CoFeB/ エピタキシャル Ta 系におけるスピン軌道トルクに関する研究を進めました [7,8]。

5. 磁性ワイル半金属の有効 2 軌道模型の導出と解析

野村 (C01 分担者) らは、最近発見された磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂ の電子状態を記述する有効ハミルトニアンを導出しました [9]。Co₃Sn₂S₂ は Co の作るカゴメ格子と Sn および S のつくる三角格子の積層です。我々はフェルミ準位近傍の Co の d 軌道と Sn の p 軌道からなる有効模型によってワイル点近傍の電子状態を記述することに成功しました。さらにカゴメ格子模型を用いて電場印加による磁壁の駆動を理論的に検証しました [10]。その結果フェルミ準位近傍の状態密度が小さくジュール熱の発生は金属にくらべ質的に少ないにもかかわらず磁壁の速度は強磁性金属中のそれと同程度か大きいことを明らかにしました。さらにスピントルクは内在的ピンニングを引き起こさないタイプの非断熱的トルクであることがわかりました [10,11]。これによってバンドトポロジーに由来する低損失磁化制御が可能であることを示唆しました。

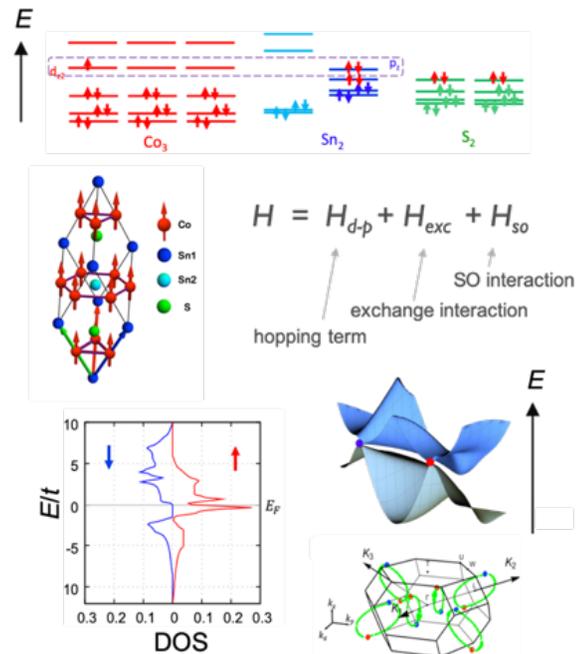


図 4. 磁性ワイル半金属 Co₃Sn₂S₂ の電子状態。

TOPICS

6. 電気回路を用いたマヨラナの物理

江澤 (C01 分担者) は、高次トポロジカル超伝導体の研究を行いました。高次トポロジカル超伝導体はトポロジカル超伝導体の拡張であり、面やエッジではなく、それらの境界であるヒンジやコーナーにマヨラナ状態が現れることが特徴です。特に、電気回路でキタエフの p 波トポロジカル超伝導体模型をシミュレートする事により、マヨラナ・コーナー状態が実現している事を予言しました [12]。この系では、コンデンサーが電子バンドを、コイルがホールバンドを、オペレーショナル・アンプリファイアーが超伝導カップリングをシミュレートしています。マヨラナ・コーナー状態はインピーダンス共鳴で観測する事が可能です。また、マヨラナ・コーナー状態のブレイディングを計算する事により、この状態がイジング・エニオンである事を示しました (図 5)。これは将来的には電気回路を用いてトポロジカル量子計算が実現可能である事を示す成果です [13]。

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 [14-31]。

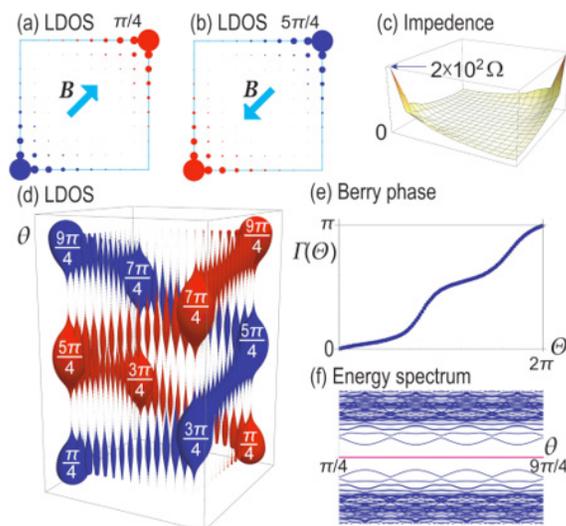


図 5. 電気回路を用いたマヨラナ・コーナー状態の生成とブレイディング。ブレイディングにより、2つのコーナー状態を2度交換すると、位相 (π) を獲得することを示している。

[1] "Charge equilibration in integer and fractional quantum Hall edge channels in a generalized Hall-bar device", Chaojing Lin, Ryota Eguchi, Masayuki Hashisaka, Takafumi Akiho, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Phys. Rev. B **99**, 195304-1-9 (2019).

[2] "Spectroscopic study on hole-electron transport in a quantum Hall edge channel", Tomoaki Ota, Shunya Akiyama, Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Phys. Rev. B **99**, 085310-1-8 (2019).

[3] "Ballistic hot-electron transport in a quantum Hall edge channel defined by a double gate", Shunya Akiyama, Taichi Hirasawa, Yuya Sato, Takafumi Akiho, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Appl. Phys. Lett. **115**, 243106 (2019).

[4] "Counterflowing edge current and its equilibration in quantum Hall devices with sharp edge potential: Roles of incompressible strips and contact configuration", T. Akiho, H. Irie, K. Onomitsu, and K. Muraki, Phys. Rev. B **99**, 121303(R) (2019).

[5] "Simultaneous evaluation of drift- and diffusion-induced spin orbit fields in a (001) GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas", Takahito Saito, Asuka Aoki, Junsaku Nitta, and Makoto Kohda, Appl. Phys. Lett. **115**, 052402 (2019).

[6] "Transient diffusive spin dynamics in intrinsic In-GaAs/InAlAs quantum wells", Kohei Kawaguchi, Toshiki Fukasawa, Ichirota Takazawa, Hiroki Shida, Yasuhito Saito, Daisuke Iizasa, Takahito Saito, Takahiro Kitada, Yoshihiro Ishitani, Makoto Kohda and Ken Morita, Appl. Phys. Lett. **115**, 172406 (2019).

[7] "Detection of both optical polarization and coherence transfers to excitonic valley states in CVD-grown monolayer MoS₂", E. Asakura, M. Suzuki, S. Karube, J. Nitta, K. Nagashio and M. Kohda, Appl. Phys. Exp. **12**, 063005 (2019).

[8] "Enhancement of spin current generation in epitaxial a-Ta/CoFeB bilayer", H. Gamou, Y. Du, M. Kohda, and J. Nitta, Phys. Rev. B **99**, 184408 (2019).

[9] "Two-orbital effective model for magnetic Weyl semimetal in Kagome-lattice shandite", A. Ozawa, K. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123703 (2019).

[10] "Electrically-driven domain wall motion in a ferromagnetic Kagome lattice", S. Kim, D. Kurebayashi, K. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 083704 (2019).

- [11] "Theory of spin torque in Weyl semimetals with magnetic texture", D. Kurebayashi and K. Nomura, *Sci. Rep.* **9**, 5365 (2019).
- [12] "Braiding of Majorana-like corner states in electric circuits and its non-Hermitian generalization", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 045407 (2019)
- [13] 「電気回路によるトポロジカル量子計算方法」江澤 雅彦、特願 2019-209011.
- [14] "Quantum anti-dot formed with an airbridge gate in the quantum Hall regime", Ryota Eguchi, Eiki Kamata, Chaojing Lin, Hiromitsu Aramaki and Toshimasa Fujisawa, *Appl. Phys. Express* **12**, 065002-1-4 (2019).
- [15] "Determination of g-factor in InAs two-dimensional electron system by capacitance spectroscopy", H. Irie, T. Akiho, and K. Muraki, *Appl. Phys. Exp.* **12**, 063004 (2019).
- [16] "Phase diagram of a magnetic topological nodal semi-metal: Stable nodal line in an easy-plane ferromagnet", Y. Ominato, A. Yamakage, K. Nomura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 114701 (2019).
- [17] "Real-time evolution and quantized charge pumping in magnetic Weyl semimetals", T. Misawa, R. Nakai, K. Nomura, *Phys. Rev. B* **100**, 155123 (2019).
- [18] "Robust magnetotransport in disordered ferromagnetic kagome layers with quantum anomalous Hall effect", K. Kobayashi, M. T., K. Nomura, *Phys. Rev. B* **100**, 161301 (2019).
- [19] "Semi-Quantized Spin Pumping and Spin-Orbit Torques in Topological Dirac Semimetals", T. Misawa, K. Nomura, *Sci. Rep.* **9**, 19659 (2019).
- [20] "Magnetolectric Response of Antiferromagnetic Van der Waals Bilayers", C. Lei, B. L. Chittari, K. Nomura, N. Banerjee, J. Jung, A. H. MacDonald, Preprint, arXiv:1902.06418.
- [21] "Weyl superconductor phases in a Weyl-semimetal/superconductor multilayer", R. Nakai, K. Nomura, Preprint, arXiv:1911.12523.
- [22] "Simple model for second-order topological insulators and loop-nodal semimetals in Transition Metal Dichalcogenides XTe_2 ($X=Mo,W$)", M. Ezawa, *Scientific Reports* **9**, 5286 (2019).
- [23] "Non-Hermitian higher-order topological states in non-reciprocal and reciprocal systems with their electric-circuit realization", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **99**, 201411(R) (2019).
- [24] "Non-Hermitian boundary and interface states in non-reciprocal higher-order topological metals and electrical circuits", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **99**, 121411(R) (2019).
- [25] "Electric circuits for non-Hermitian Chern insulators", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 081401(R) (2019).
- [26] "Electric circuit simulations of nth-Chern insulators in 2n-dimensional space and their non-Hermitian generalizations for arbitrary n", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 075423 (2019).
- [27] "Electric-circuit simulation of the Schrodinger equation and non-Hermitian quantum walks", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **100**, 165419 (2019).
- [28] "Manipulation of magnetic skyrmions in a locally modified synthetic antiferromagnetic racetrack", Renan P. Loreto, Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, Xiaoxi Liu, Clodoaldo I. L. de Araujo, *J. Magn. Magn. Mater.* **482**, 155 (2019).
- [29] "Spin torque nano-oscillators based on antiferromagnetic skyrmions", Laichuan Shen, Jing Xia, Guoping Zhao, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Oleg A. Tretiakov, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 042402 (2019).
- [30] "Current-driven dynamics of frustrated skyrmions in a synthetic antiferromagnetic bilayer", Jing Xia, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Zhipeng Hou, Wenhong Wang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, *Phys. Rev. Applied* **11**, 044046 (2019).
- [31] "Current-Induced Helicity Reversal of a Single Skyrmionic Bubble Chain in a Nanostructured Frustrated Magnet" Zhipeng Hou, Qiang Zhang, Xichao Zhang, Guizhou Xu, Jing Xia, Bei Ding, Hang Li, Senfu Zhang, Nitin M. Batra, Pedro M. F. J. Costa, Enke Liu, Guangheng Wu, Motohiko Ezawa, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Xixiang Zhang, Wenhong Wang, *Advanced Materials* 1904815, 1-8 (2019).

トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 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、さらにそれらの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。

【強相関系における非エルミート量子現象】

川上らは、強相関電子系における非エルミートトポロジカル現象の理論研究を行いました。まず、2バンドの重い電子系において、温度上昇により一粒子スペクトルに非エルミート系特有の例外点とそれに付随したフェルミアークが現れることを示しました [1]。その結果を、カイラル対称性をもつ強相関系（パイロクロア格子）に拡張し、カイラル対称性に守られた例外トラスが出現することを示しました [2]。また、上田らと協力して、散逸効果を複素引力相互作用として取り込んだ非

エルミート超伝導の平均場理論を構築し、散逸の増加にともなう、例外線で特徴づけられるリエントラント超伝導転移が出現することを示しました [3]。

【非エルミート系およびフローケ系のトポロジカル相と多体局在】

上田らは、非エルミート系のトポロジカル相の研究とその多体効果の研究を行いました (図 1)。具体的には、2次元の非エルミート系で高次トポロジカル絶縁体のコーナー状態が4つのコーナーのうちの1か所でゼロエネルギーの局在モードを持つことを示しました [4]。非エルミート系では一般にエネルギー固有値は複素数になりますが、時間反転対称な系では多体局在が起るとエネルギー固有値が実数へと転移することを見出しました [5]。Nielsen-Ninomiya の定理によると格子系ではワイルフェルミオンは単独では存在できません。しかし、周期的に駆動された3次元格子系ではワイルフェルミオンを単独で創り出すことができ、カイラル磁気効果を生じることを示しました [6]。

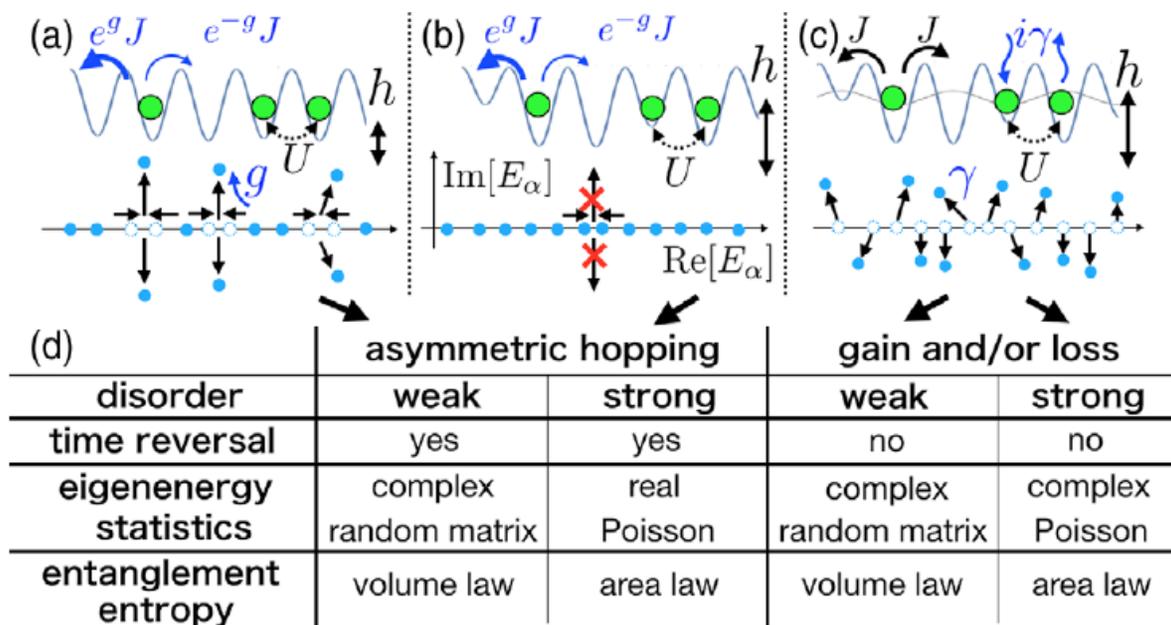


図 1 : (a) 非対称ホッピングモデルでは 2 個の実固有値が摂動の影響で複素共役対になる。(b) しかし、乱れが強くなり多体局在を起こすと固有値は実数にとどまる。(c) 系が外界とエネルギーのやり取りをすると、エネルギーは個別に複素数となりうる。(d) 対応する準位統計とエンタングルメントエントロピー。

佐藤らは、非エルミートトポロジカル相の分類理論を提出しました。まず、上田らとの共同研究において、非エルミート系特有の対称性およびギャップ構造を特定し、それに基づき非エルミートトポロジカル相の分類を行いました[7]。さらに、非エルミート系特有のギャップレス構造である例外点のトポロジカルな分類を与え、その応用として、トポロジカルダンベル(図2)という「端に例

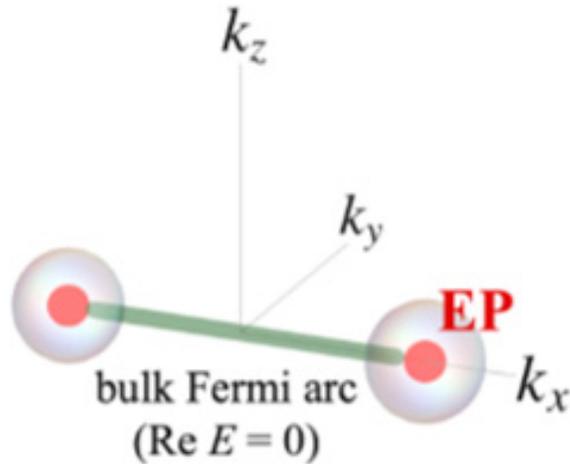


図2：トポロジカルダンベル

外点をもつライン上のギャップレス構造」が可能であることを初めて見出しました[8]。また、非エルミート型のスピン軌道相互作用をもつ超伝導

ナノワイヤを調べ、無限小の摂動によりトポロジカル相転移が生じるという興味深い現象を報告しました[9]。

【マヨナラフェルミオンの磁気応答理論】

佐藤らは、B01 班の田仲との共同研究において、マヨナラ励起の磁気応答理論を構築し、高次スピン超伝導体において磁気八重極の応答が可能となることを見出しました[10]。

【ネマティック超伝導】

水島らは、 $M_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($M=\text{Cu, Sr, Nb}$) に代表されるネマティック超伝導における Higgs ボソンや電磁応答についての理論研究を行いました (A01 藤本らとの共同研究、図3)。特に、フェルミ面の形状変化によってネマティック・カイラル相転移が引き起こされること、Chiral Higgs モードというボソン励起がソフト化することなどを示しました[11]。ボソン励起のソフト化は電磁波吸収スペクトルにて観測可能であることを指摘しました。さらに、新田らとの共同研究により中性子星内部において D_2 対称な2軸性ネマティック超流動から D_4 対称な状態への相転移が存在することを示し、量子渦に束縛された準粒子構造[12] や異常なユニバーサルリティクラスを明らかにしました[13]。

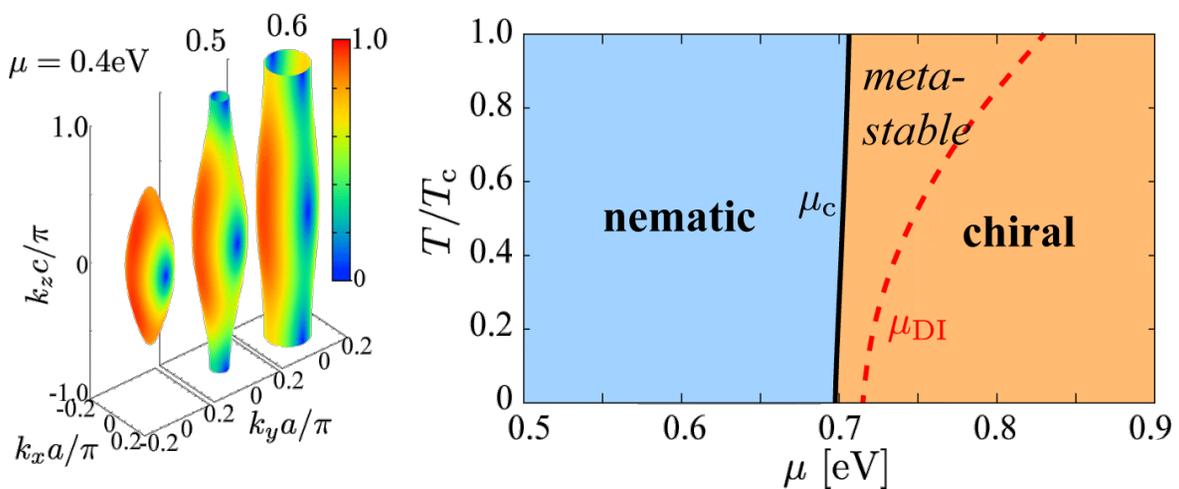


図3：フェルミ面形状変化(左)とネマティック・カイラル相転移(右)

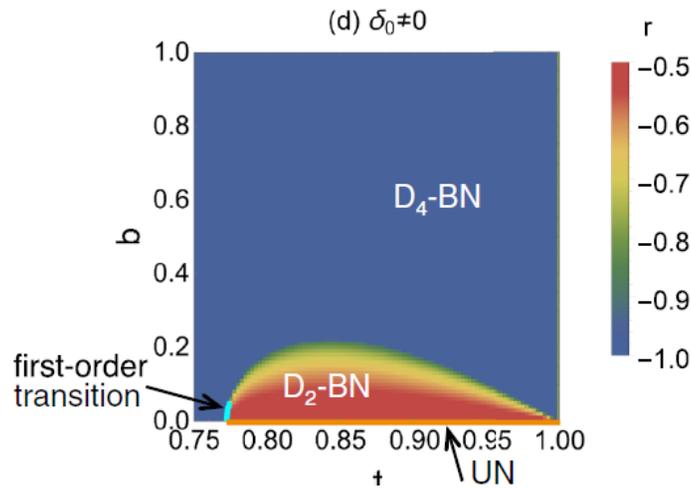


図4：中性子内部の磁場温度相図

【中性子星におけるスピン3重項P波中性子超流動】

新田らは、中性子星内部で実現されていると期待されている、スピン3重項P波 (3P_2) の中性子超流動の Ginzburg-Landau 理論の高磁場の補正を計算しました [14]。これにより、マグネターなどの磁場の強い中性子星内部が扱えるようになりました。また、オーダーパラメーターの8次までの展開を求め、安定で唯一な基底状態を求めることに成功し磁場温度相図を決定しました (図4) [15]。

【反平行磁場中の2次元フェルミ気体の理論研究】

西田らは、反平行磁場中のフェルミ気体の理論研究を行いました [16]。特に、スピン間に粒子数のインバランスがある場合を考え、Larkin-Ovchinnikov 状態よりも Fulde-Ferrell 状態がエネルギー的に安定になることを弱結合領域で示し、その基底状態の相図を平均場近似を用いて明らかにしました。また、2次元と3次元のフェルミ気体において、体積粘性とずれ粘性のスペクトル関数を久保公式と量子ビリアル展開を用いて計算しました [17]。その結果、ずれ粘性はボルツマン方程式を用いた計算結果と一致するものの、体積粘性は一致しないこと、ユニタリー領域で非解析的な振る舞いを示すこと、などを示しました。

- [1] T. Yoshida, R. Peters, N. Kawakami, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B **99**, 121101(R) (2019).
- [2] K. Kimura, T. Yoshida, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **100**, 115124-1-10 (2019).
- [3] K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasan, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **123**, 123601 (2019).
- [4] T. Liu, Y-R. Zhang, Q. Ai, Z. Gong, K. Kawabata, M. Ueda, and F. Nori, Phys. Rev. Lett. **122**, 076801 (2019).
- [5] R. Hamazaki, K. Kawabata, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 090603 (2019).
- [6] S. Higashikawa, M. Nakagawa, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 066403 (2019).
- [7] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, M. Sato, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).
- [8] K. Kawabata, T. Bessho, M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 066405 (2019).
- [9] N. Okuma, M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 097701 (2019).
- [10] S. Kobayashi, A. Yamakage, Y. Tanaka, M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 097002 (2019).
- [11] H. Uematsu, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, and J. A. Sauls, Phys. Rev. Lett. **123**, 237001 (2019).
- [12] Y. Masaki, T. Mizushima, and M. Nitta, arXiv:1908.06215.
- [13] T. Mizushima, S. Yasui, and M. Nitta, arXiv:1908.07944.
- [14] S. Yasui, C. Chatterjee, M. Nitta, Phys. Rev. C **99**, 035213 (2019).
- [15] S. Yasui, C. Chatterjee, M. Kobayashi, M. Nitta, Phys. Rev. C **100**, 025204 (2019).
- [16] T. Anzai and Y. Nishida, Phys. Rev. A **100**, 043615 (2019).
- [17] Y. Nishida, Annals of Physics **410**, 167949 (2019).

2018年度 矢崎学術賞 功績賞

●受賞理由

高精度ゆらぎ測定を用いた非平衡スピン依存伝導の研究

小林 研介 / 大阪大学 大学院理学研究科 (計画研究 C01)



このたび、高精度ゆらぎ測定を用いた非平衡スピン依存伝導の研究で、2018年度の矢崎学術賞功績賞を受賞いたしました。矢崎学術賞は、過去に公益財団法人 矢崎科学技術振興記念財団から研究助成を受けた研究者の中から、優れた業績をあげた研究者に贈られるものです。私は、2013年度一般研究助成で助成をいただき、助成期間中およびその後の研究成果をご評価いただいた結果、幸いにも功績賞を頂くことができました。2019年3月7日、東京都港区で贈呈式が開催されました。

受賞対象となった研究について簡単にご紹介します。私たちは、微細加工技術を用いて作製した微小な固体素子（メソスコピック系）を用いて、多彩な非平衡スピン依存伝導を解明することを目的として研究を行ってきました。研究の特色は、素子を通過する電流ゆらぎに注目することにあります。私たちが開発してきた世界有数の高精度の電流ゆらぎ測定系を用いて、人工原子をはじめとする様々な素子におけるスピン依存伝導を詳細に調査することによって、これまで困難であった非平衡伝導の微視的な素過程の電気的検出を目指しました。代表的な成果を3件、以下に記載します。

(a) 非平衡近藤状態の解明 [1]

カーボンナノチューブ人工原子において、理想的な近藤効果の実現に成功しました。電流ゆらぎ測定を行い、理論と定量的に比較することによって、強相関極限の量子液体が実現されていることを実証しました。本成果は、非平衡量子多体系において行われたこれまでで最も精密な実験であると考えています。

(b) スピンショット雑音の実証 [2]

電流がポテンシャル障壁を通過する際にショット雑音を生じることはよく知られています。それでは、スピンの流れ（スピン流）に特有なショット雑音は存在するのでしょうか？スピンバルブ素子において電流ゆらぎ測定を行い、このアイデアを実証しました。これは、スピンショット雑音とい

う概念を世界に先駆けて確立したものと言えます。

(c) 端状態の非平衡ダイナミクス [3]

私たちは、量子ホール状態にあるグラフェン素子中のpn接合界面において、キラリティの異なる端状態を生成し、端状態の非平衡性に基づく特異な電流ゆらぎの検出に成功しました。これは、理論 [Abanin & Levitov, *Science* **317**, 641 (2007)] で予言された端状態混合を証明した初の実験です。

以上のような様々な成果は、いずれも、固体素子中を電荷やスピンのように伝導するのか、という長年の問題を微視的な視点から明らかにしたものと言えます。非平衡物理学やスピントロニクスの更なる発展に資するものとして、本研究を高くご評価いただき、賞を頂けたことは、誠にありがとうございます。光栄なことです。

ここで述べた研究は、大阪大学・京都大学をはじめとする多くの共同研究者の皆様の多大なご協力によって初めて実現したものです。この場をお借りして共同研究者の皆様に深く御礼を申し上げます。

[1] M. Ferrier et al., *Nature Phys.* **12**, 230 (2016); *Phys. Rev. Lett.* **118**, 196801 (2017).

[2] T. Arakawa et al., *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016601 (2015).

[3] S. Matsuo et al., *Nature Comm.* **6**, 8066 (2015).



マジックアングルグラフェンにおける量子異常ホール状態

安田 憲司 / マサチューセッツ工科大学 PD

1. はじめに

2018年、2層のグラフェンを魔法角と呼ばれる、約1.1度という特定の角度だけずらして重ねたマジックアングルグラフェン (Magic angle twisted bilayer graphene, MATBG) において、電子相関に由来した絶縁体状態とその近傍の超伝導状態が報告された [1,2]。これは元々1枚のグラフェンを切断し、それらのグラフェンに角度をつけた上でファンデルワールス力によって接合することで実現できる。このとき、図1(a)に示すように、元々の結晶格子間隔に比べて長周期の構造が実現し、例えば1.1度の角度では約13 nm程度のモアレ超格子が生じる。TBGのバンド構造は、2枚のグラフェンのディラックバンド分散をずらして重ねたものとして理解できる。図1(b)に示すように、2枚のグラフェンの逆格子ベクトル K_1 , K_2 の差から、長周期のモアレ超格子のミニブリルアンゾーンが生成される。この超格子ブリルアンゾーンに着目すると、 K_1 , K_2 に生じるディラックコーンが、層間のホッピングによってその交点付近にエネルギーギャップを生じる結果、層間角度

に依存してディラック点のフェルミ速度が劇的に変化する (図1(c,d)) [1,3]。(ここでは、 K 点付近の構造に着目したが、同様な構造は K' 点付近にも生じるため、バレーの自由度が存在する。)特に魔法角1.1度においては、フェルミ速度が0に近づき、ディラック点の上下にバンド幅 W が10 meV以下の極めて平坦な2枚のバンドが生じる (図1(d))。このとき電子相関 U が W に対して支配的となり、1電子近似からは物性を予測できない強相関系が実現する。MATBGはグラフェン特有の移動度の高さに加えて、ゲート電圧によるバンド全体に渡るフェルミ準位の制御が可能なることから、強相関系を調べる上での最適なモデル物質になると期待でき、初期の報告の後、理論・実験の両面から盛んに研究が進められてきた。例えば、層間角度・キャリア密度の面内一様性の改善、圧力効果、STMや走査SQUID等の局所プローブ測定を通して、キャリア密度に依存した電子状態の鋭敏な変化が観測されてきた。それと同時に、相関角度や歪等の試料の詳細に対してバンド構造が極めて敏感であることに由来して、その相図が試料ごとに顕著に異なることも明らかになっている。さらに近年になって、積層の自由度を利用することにより、当初の予想を超えた発見もされており、スタンフォードのグループによって六方晶窒化ホウ素 (hBN) をグラフェンの方位に対して揃えた MATBG において、特定の占有率でのみヒステリシスを伴う強磁性が現れることが報告された [4]。その後、サンタバーバラのグループによって類似の試料において、ホール抵抗がゼロ磁場で量子化する量子異常ホール効果が観測された [5]。このことは、特定のキャリア密度において、電子相関がチャーン絶縁体を誘起することを意味しており、他に類似のない非常に興味深い系になっている。筆者は直接本研究には携わっていないが、本稿では関連する分野の観点から [5] の論文を中心として紹介する。

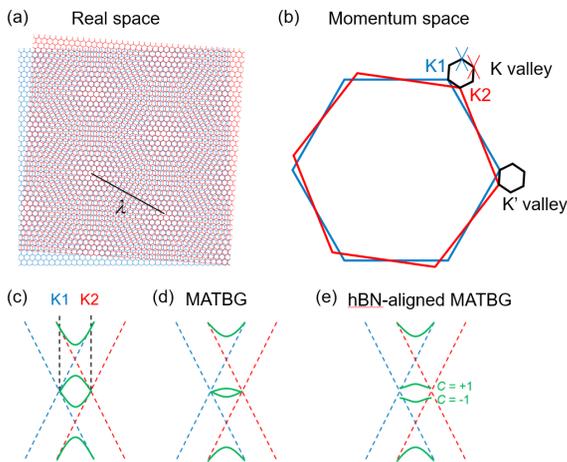


図1: (a) マジックアングルグラフェンの模式図。(b) グラフェンのブリルアンゾーン (赤、青の六角形) と、モアレ超格子の逆格子から生成されるミニブリルアンゾーン (小さい黒の六角形) が生じる。(c,d) K valley 付近のミニブリルアンゾーンにおけるバンド構造の角度依存性。層間のホッピングの効果によって、1層目 (青点線) と2層目 (赤点線) のディラックコーンが混成する結果、緑色の線で示したようにディラック点のフェルミ速度が変化する。特に、魔法角において平坦バンドが実現する (d)。(e) hBNと方位の揃った MATBG のバンド構造。電荷中性点におけるギャップが開くことにより、上側、下側の平坦バンドがそれぞれ $C=+1$, $C=-1$ のチャーン数を生じる。

2. 強磁性と量子異常ホール状態の観測

高品質なグラフェンのデバイスを作製する場合、界面の不純物を取り除き、かつゲート絶縁層として利用する目的から hBN で挟んだ積層構造を用いるのが一般的である。このとき、グラフェン同士の角度に加えて、hBN とグラフェンの相対的な角度の自由度が存在する。ファンデル

TOPICS

ワールスヘテロ構造を作製する場合、一般には hBN とグラフェンの方位はランダムな角度となるが、結晶軸方向に薄片のエッジが現れやすいことを利用することで、これらの方位を意図的に揃えることができる。図 2(a) に hBN の方位を揃えた MATBG の輸送特性のゲート電圧依存性を示す [5]。まず、 $\nu = 4, -4$ の占有状態において抵抗の大きい絶縁体状態が現れる。 ν はモアレ単位胞あたりの電子数に相当し、K 点、K' 点のバレーとスピンの自由度のため、 $\nu = 4$ (-4) の時 2 枚の平坦バンドが完全占有（非占有）となる。この時フェルミエネルギーがバンドギャップ内に相当するバンド絶縁体を実現する。この自明な絶縁体状態に加え、 $\nu = 2, 3$ において特徴的な抵抗の変化がみられる。特に興味深いのが、 $\nu = 3$ での振る舞いであり、ホール抵抗が h/e^2 の量子化値をとるとともに、縦抵抗が顕著に減少している。磁場依存性を調べると、図 2(b) のように、零磁場においても量子化抵抗が保たれるとともに、0.1 T 以下の低磁場で面直異方性のヒステリシスを伴ってホール抵抗が h/e^2 から $-h/e^2$ へと変化する。これらの振る舞いは、 $\nu = 3$ において系が強磁性となり、それによって有限のチャーン数 $C = 1$ を有する量子異常ホール状態が実現していることを意味している。特に、このようなヒステリシスと異常ホール抵抗が、1 電子近似からは金属的な振る舞いが予期される $\nu = 3$ 近傍においてのみ生じることから、電子相関によって時間反転対称性が破れていることがわかる。異常ホール効果を伴う強磁性は転移温度 $T_c \approx 9$ K 程度まで生じ、3 K 程度まで量子化抵抗が保たれる（図 2(c)）。低温でのアレニウスプロットから得られる活性化エネルギーは 30 K 程度と転移温度に比べて高く、このことは量子化温度が強磁性転移温度自体によって支配されていることを意味している [5]。

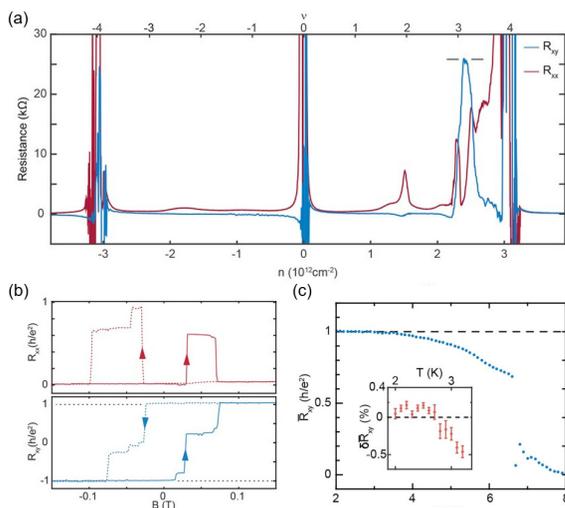


図 2: (a) 縦抵抗 R_{xx} (赤)、ホール抵抗 R_{xy} (青) の電子密度 n 依存性。(b) $\nu = 3$ における抵抗の磁場依存性。(c) $\nu = 3$ におけるホール抵抗の温度依存性。[5] より引用。
【Science 誌から許可を得て掲載】

3. 理論的理解

hBN の方位がランダムな MATBG においては、 $\nu = 3$ において絶縁体状態が観測されている試料であっても、強磁性や異常ホール効果が現れていない。このことから、hBN と MATBG の方位が揃うことが、強磁性の発現に重要な役割を果たしていると考えられる。この機構は未だ完全には解明されていないが、現時点でのもっともらしい理解を紹介する。まず、単層グラフェンの方位が hBN と揃っている場合のバンド構造を議論する。グラフェンの低エネルギー有効ハミルトニアンは質量のないディラックバンド分散で書き表される。グラフェンのディラック点は AB 副格子の対称性に守られているが、hBN との方位と揃えた場合、基板のホウ素と窒素の非等価性に由来して A 副格子と B 副格子に異なるポテンシャルが誘起される。その結果、ディラックバンド分散に 20 meV 程度のギャップが開き、K 点 (K' 点) 近傍において有限のベリー曲率が生じるとともに、価電子帯のバンドが $+1/2$ ($-1/2$) のチャーン数を持つ [6]。hBN と MATBG の方位が揃う時、同様な機構によって、K 点 (K' 点) におけるミニブリルアンゾーンの平坦バンドの電荷中性点にギャップが開き、上側の平坦バンドが $C = +1$ ($C = -1$)、下側の平坦バンドが $C = -1$ ($C = +1$) のチャーン数を有することになる（図 1(e)） [7]。以上のバンド構造と、 $\nu = 3$ において量子異常ホール効果が観測されていることを考え合わせると、図 3(b) に示すように、 $\nu = 3$ においてバレー並びにスピンの偏極した状態が実現していると考えられるのもっともらしい。つまり、交換相互作用によって、特定のバレー並びにスピン偏極した平坦バンドのみが占有され、自発的に時間反転対称性を破っているというわけである。これは、量子ホール状態においてランダウレベルが形成したとき、特定の占有率でスピンの揃った量子ホール強磁性並びに特定のバレーのみが占有されたバレー偏極状態が実現することと類似している。ここでグラフェンのスピン軌道相互作用は無視できるほど小さいため、磁性がスピンに由来しているとする磁気異方性は生じないはずである。従って、実験的に面直の磁気異方性が観測されていることは、イジング的なバレー自由度の偏極、つまり軌道角運動量の秩序が強磁性の起源となっていることを意味している [5]。ここで、電子スピンの偏極は $\nu = 3$ においてギャップを開く上で重要な役割を果たすが、異方性はなく、異常ホール効果にも寄与していないことに注意していただきたい。

量子異常ホール効果は、磁性元素 Cr あるいは V を添加したトポロジカル絶縁体 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜において精力的に調べられてきた（近年では MnBi_2Te_4 薄片においても量子異常ホール効果が観測されている） [7]。これらの系では、トポロ

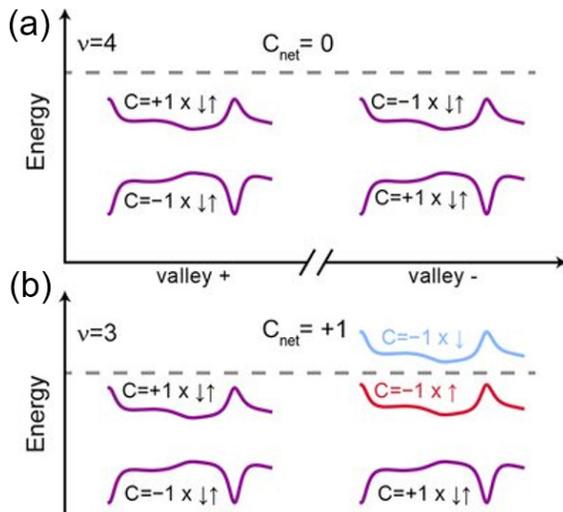


図3: $\nu = 4$ (a)と $\nu = 3$ (b)におけるバンド構造の模式図。 $\nu = 3$ の時チャーン絶縁体を実現する。[5]より引用。
【Science誌から許可を得て掲載】

ジカル絶縁体表面のスピンの偏極したギャップレスなディラックバンド分散が、局在磁化との相互作用によってギャップを開くことでベリー曲率を生じ、チャーン絶縁体となる。つまり、スピン強磁性とスピン軌道相互作用が合わさることで量子化したホール効果として電子の運動に影響を与える。一方、本系においては、電子の軌道自体が強的に秩序することで、スピン軌道相互作用を介さずに量子化が起こるという点で、磁性トポロジカル絶縁体と明確に区別される。

4. まとめと今後の展望

本稿では、hBNと方位を揃えたMATBGの $\nu = 3$ の占有率において、強磁性チャーン絶縁体を実現することを紹介した。その起源は、有限なチャーン数を持つ平坦バンドを舞台として、電子相関によってバレー並びにスピンの対称性の破れが誘起されることとして大まかに理解できるが、未だ不明な点も多くさらなる研究が求められる。例えば、単純な考察からは同様の機構で $\nu = 1, -1, -3$ の占有についても、チャーン絶縁体が生じてよいように思えるが、これらの占有率でも量子異常ホール効果が生じるのか否かという疑問が考えられる。さらに興味深いことに、本系では 10^3 A cm^{-2} という低電流密度において磁化とホール抵抗が反転することが報告されている。これは、典型的な強磁性金属/重金属接合の接合において必要な $10^{7-8} \text{ A cm}^{-2}$ に比べて極めて小さく、またこれらの場合と異なりスピン軌道相互作用に依らない電流誘起磁化反転が起こっていると考えられることから、その起源の解明が課題である[4,5]。低電流で磁化並びにカイラルエッジ電流の方向を制御できることから、これを用いたデバイスへの展開も考えられる。

類似の系の探索も進められており、hBNの方位が揃っていないと考えられるMATBGにおいても、4 T程度の磁場下ではあるものの、 $\nu = -1$ の占有率で異常ホール効果のヒステリシスを伴う磁気転移が観測されている[9]。加えて、hBNと方位を揃えたABC三層グラフェンにおいても（この系では、hBNとグラフェンの格子不整合によってモアレ超格子が形成される）、 $\nu = -1$ の占有率で $C = 2$ の量子異常ホール効果が観測されている。さらに興味深いことに、本系では面直方向に印加する電場の方向に依存して、 $C = 0$ の自明な絶縁体から $C = 2$ のチャーン絶縁体へのトポロジカル相転移が誘起される[10]。本稿で紹介したように、ファンデルワールスヘテロ接合においては、積層の設計自由度を利用することでミクロなハミルトニアンが制御でき、その結果、強相関電子系の基底状態が劇的に変化することが明らかになってきた。今後MATBGを舞台として、強相関電子系の理解がさらに深まることが期待できる。

原稿執筆の機会を下さった上田正仁先生、柏谷聡先生、PDメンターのPablo Jarillo-Herrero教授にこの場を借りて感謝いたします。

- [1] Y. Cao et al., Nature **556**, 80–84 (2018).
- [2] Y. Cao et al., Nature **556**, 43–50 (2018).
- [3] R. Bistritzer, and A. H. MacDonald, Proc. Natl. Acad. Sci. **108**, 12233–12237 (2011).
- [4] A. L. Sharpe et al., Science **365**, 605–608 (2019).
- [5] M. Serlin et al., Science eaay5533 (2019).
- [6] B. Hunt et al, Science **340**, 1427–1430 (2013).
- [7] N. Bultinck, S. Chatterjee, and M. P. Zaletel, arxiv:1901.08110.
- [8] Y. Tokura, K. Yasuda, and A. Tsukazaki, Nat. Rev. Phys. **1**, 126–143 (2019).
- [9] X. Lu et al., Nature **574**, 653–657 (2019).
- [10] G. Chen et al., arXiv:1905.06535.

著者紹介



やすだ けんじ 安田 憲司

1991年東京都生まれ。2018年9月東京大学大学院博士課程修了。2018年10月より現職。

Weyl 超伝導：量子異常と固有角運動量パラドックス

水島 健 / 大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授 (研究分担 D01)

1. はじめに

トポロジカル物質群の一つとして Weyl 半金属が理論的に提案され、その新奇物性の探索が行われている [1]。Weyl 半金属は価電バンドと伝導バンドが一点で交わる Weyl 点を内包し、表面 Fermi arc、異常 Hall 効果、カイラル磁気効果、負の磁気抵抗効果など質的に新しい物性をもたらす。この新しい概念は超伝導・超流動にも展開され [2]、現在では超流動 ^3He の A 相やウラン系超伝導物質 (URu_2Si_2 , UPt_3 , UCoGe , $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$) などが Weyl 超伝導の候補として認知されている [3,4]。これらの物質は時間反転対称性を破った超伝導ギャップの点状ノードを Weyl 点として内包する。しかしながら、Weyl 超伝導の素励起である Bogoliubov-Weyl 準粒子は電荷を持たないため、Weyl 半金属で提唱された物性は期待できない。Weyl 超伝導固有の物性は何か？この問いに対する答えは自明でない。

超流動 ^3He の A 相の低エネルギー準粒子励起が Weyl 粒子として振る舞うことは 1980 年中頃から議論されてきた。この背景には、超流動 ^3He を中心に議論されてきた「固有角運動量のパラドックス」が深く関わっている。特に、文献 [5-7] では Bogoliubov-Weyl 準粒子がもたらすカイラル異常を通して固有角運動量のパラドックスを理解する試みがなされた。これらは物性においてカイラル異常が現れた(筆者が知る限り)初めての例である。

このように、Weyl 準粒子は新しいエキゾチック準粒子であるだけでなく、異方的超伝導の未解決問題の重要な鍵となっている。ここでは、最近の筆者らの研究 [8,9] を紹介しながら、Weyl 超伝導固有の物性や固有角運動量のパラドックスとの関わりについて触れる。

2. Weyl 超伝導と量子異常

超伝導体において Weyl 点が存在し得るためには時間反転対称性が破れていることが必要条件となる。この条件を満たす最もシンプルなモデルは軌道角運動量 $L_z=1$ を持つクーパー対からなる Anderson-Brinkman-Morel (ABM) 状態であるが、これは超流動 ^3He の A 相に他ならない。図 1 に示すように、この秩序変数は 3 つの直交する単位ベクトル $(\hat{m}, \hat{n}, \hat{l})$ で表され、 (\hat{m}, \hat{n}) はクーパー対の

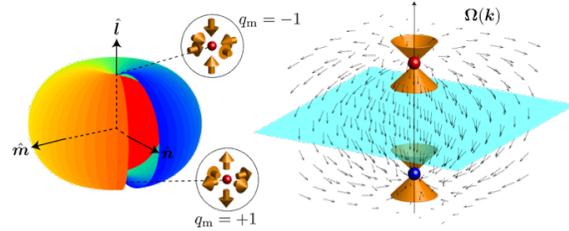


図 1: ABM 状態のギャップ関数と Weyl 点 (左)、及び Berry 曲率 (右)。

軌道面を表し、 \hat{l} が軌道角運動量の向きに対応する。超伝導ギャップ関数は $p=+p_f \hat{l}$ と $p=-p_f \hat{l}$ に点状ノードを持ち各々はモノポール数 $q_m=-1$ と $q_m=+1$ で特徴付けられる Weyl 点であり、この付近の素励起が Bogoliubov-Weyl 準粒子である。ABM 状態の持つ軌道角運動量のためにギャップ関数は非自明な位相構造を持っており、これが運動量空間における非自明な Berry 曲率を生み出す。Weyl 点は Berry 曲率のソース・ドレインとなる。Weyl 点方向に垂直な面内に温度勾配を作ることによって、異常熱 Hall 効果が起こる [4]。

Weyl 粒子のもたらす際立った特徴は量子異常とそれに起因した特異な輸送現象である。Weyl 半金属で提唱されているカイラル磁気効果や負の磁気抵抗効果といった輸送現象はその典型例であろう。しかしながら、Weyl 超伝導の素励起である Bogoliubov-Weyl 準粒子は電子と正孔の重ね合わせ状態であるため電荷とスピンを持たない。この点で Weyl 半金属の素励起と質的に異なる。また、超伝導状態ではミスナー効果により磁場は遮蔽されるため、磁場によって Weyl 粒子の Landau 準位を実現することはできない。このため、磁場・電場と Weyl 粒子との結合によって生み出されるカイラル磁気効果や負の磁気抵抗効果などは Weyl 超伝導では期待できない。

鍵となるのは、秩序変数の非自明なトポロジカル励起 (テクスチャ構造) である。 ^3He は等方的な Fermi 液体であるが、軌道強磁性状態である超流動 A 相ではクーパー対の軌道角運動量の向きを表す \hat{l} が特定の方向を選び、軌道空間での回転対称性が自発的に破られる。加えて、ABM 状態では秩序変数の $U(1)$ 位相回転と \hat{l} 周りにおける (\hat{m}, \hat{n}) の回転とが等価である (ゲージ・軌道対称性の破れ) ため、位相特異点を伴わない量子渦が triad のテク

スチャとして生み出される。図2に示す skyrmion 渦とよばれるテクスチャ構造は方位角方向に超流動流を伴い、回転下の超流動 ^3He の基底状態として自然に現れる [10]。 \hat{l} の方向が局所的な Weyl 点の方向を指し示していることを思い出せば、このようなテクスチャ構造は空間的に捻られた Weyl 点とみなすことができる。実際に、テクスチャ構造の低エネルギー励起は捻られた時空中における Bogoliubov-Weyl 準粒子として表される。この時空の捻れは Bogoliubov-Weyl 準粒子に直接作用する捻れ場 T^μ あるいは擬似的な磁場 $B^{\text{em}}=T^\mu p_\mu$ を創発する。

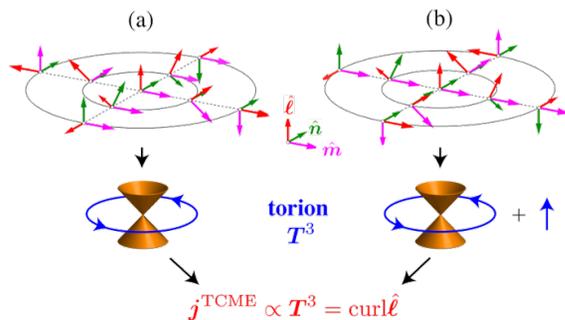


図2：Neel型 (a)、Bloch型 (b) Skyrmion 渦テクスチャとその捻れ場によるカイラル磁気効果の概念図。

この捻れ場は Weyl 準粒子に、(i) B^{em} に沿った方向に異常速度、及び (ii) B^{em} の大きさに比例した力といった2つの影響を与える。(i)の結果として、平衡状態において Weyl 準粒子の質量流が B^{em} に沿った方向に生み出される。実際に Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値計算すると、創発磁場によって Bogoliubov-Weyl 準粒子のスペクトルが Landau 準位に離散化し、非対称な分散を持つカイラルブランチが現れる [9]。捻れ場によって散逸の無い Weyl 準粒子流が誘起されるこの現象は「捻れ場由来のカイラル磁気効果 (TCME)」とよばれ、Weyl 半金属でも提唱されている [11]。Weyl 半金属の場合は格子の歪みによって創発磁場が生み出されるのに対して、超流動 $^3\text{He-A}$ では基底状態に自然に現れる秩序変数のテクスチャ構造に由来する。

捻れ場がもたらすもう一つの重要な物理的帰結について見ていこう。超伝導物質では結晶場の効果などによりクーパー対の軌道自由度は制限されるため、Skyrmion 渦のようなテクスチャ構造は期待できない。実際にウラン系化合物などの Weyl 超伝導物質群で現れる磁束量子渦は図3で示されるような位相特異点を持つ量子渦である。図3に示すように、このような位相構造は渦糸に沿った方向に創発磁場を伴うが、これは異常速度に寄与せず、カイラル磁気効果を起こさない。しかしながら、創発磁場が Weyl 準粒子に「力」を作用す

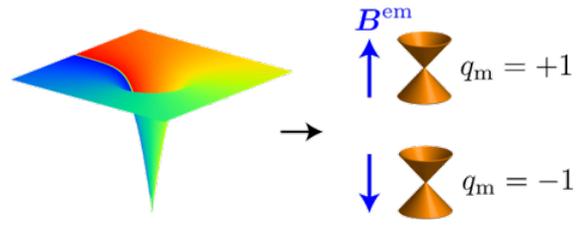


図3：位相特異点を持つ磁束量子渦の位相構造と創発磁場 B^{em} 。

ることによって、特異な熱輸送が生じる。具体的に \hat{l} が一様に z 軸方向に向いた ABM 状態を考えよう。 \hat{l} に沿った方向に実磁場を印加し磁束渦を超伝導体内に生成しておく。磁束渦に沿って温度勾配を作ったとき、その縦熱伝導度が $(B^{\text{em}})^2/T$ のように創発磁場に比例して増大する「負の熱磁気抵抗効果」が生じる [8]。なお、磁束渦の代わりに格子歪みを用いても同様の負の熱磁気抵抗効果が実現される [8]。

3. 固有角運動量パラドックスと量子異常

ABM 状態のような異方的超流体ではクーパー対が軌道角運動量 m を持つ。それでは、超流体全体の持つ軌道角運動量はいくらになるのか？ N 個の粒子が全て等しくクーパー対を形成したとすると全角運動量は $L=mN$ となるであろう。一方で、フェルミ面近くのエネルギー固有状態のみがクーパー対形成すると考えれば、軌道角運動量は $(\Delta/\epsilon_F)^2 \sim 10^{-6}$ 程度小さくなる。これは「固有角運動量パラドックス」として知られ、40年以上にわたる未解決問題である [12]。この問題は2つの異なる状況に分けられる。図4に示すように、クーパー対の軌道角運動量の向きが一様に揃った場合と、テクスチャ構造を持つ場合である。前者は試

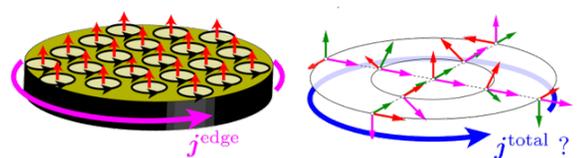


図4：(左) \hat{l} が一様に揃った Weyl 超伝導と (右) テクスチャ構造を持つ Weyl 超伝導の質量流の概念図。

料表面に現れるギャップレスな準粒子状態が運ぶエッジ流に起因しており、 L/N の大きさはこのエッジ流によって決定される [13]。近年、Tadaらによって、 $m=1$ の場合は $L=N$ に厳密に等しくなるが (後述の McClure-Takagi の定理)、一般には試料表面や形状に敏感に依存しており、 L/N はユニバーサルな値となり得ないことが示された [14]。

TOPICS

それでは、超流動³He-Aのようにテクスチャを持つ場合はどうであろうか？超流動³Heでは容器表面での対破壊効果を避けるように \hat{l} が配向するため、エッジ状態は現れず、エッジ流も存在しない。テクスチャが角運動量を生み出すのである。McClure-Takagiによって、軸対称な \hat{l} のテクスチャ構造の場合、系の全角運動量は厳密に $L=N\hbar/2$ となることが示された(McClure-Takagiの定理)[15]。Ishikawa-Miyake-Usuiは、粒子数保存する基底状態の変分関数から出発して質量流と \hat{l} の関係式 $j^{\text{IMU}} = \rho v_s + C \text{curl } \rho \hat{l}$ を微視的に導出し、これによって得られる角運動量がMcClure-Takagiの定理を満たしていることを示した(ρ は³Heの密度)[16]。右辺第1項は超流動速度場 v_s の寄与であり、第2項はクーパ対の軌道角運動量 $\hat{l}\hbar$ の空間変化に起因する。一方で、Mermin-Muzikarは同様の変分関数を用いて異なる表式 $j^{\text{MM}} = j^{\text{IMU}} + C_0 \hat{l}(\hat{l} \cdot \text{curl } \hat{l})$ を導いた[17]。最後の項の寄与は異常項とよばれ、この寄与のために j^{MM} を用いて計算される全角運動量は $L=N\hbar/2$ からずれる。この質量流に関する矛盾した結果は、McClure-Takagiのパラドックスとも呼ばれている[17]。

Balatsky-Volovik-Konysev[5]やCombescot-Dombre[7]らは、異常項の物理的起源はテクスチャ構造が創発する擬似磁場 $B^{\text{em}} = \rho_f \text{curl } \hat{l}$ によるカイラル異常であると提唱した。この創発磁場により準粒子の運動量保存則が破れ、Weyl準粒子流が生み出される。一方で、我々が文献[9]において明らかにした結果は、捻れ場由来のカイラル磁気効果による無散逸Weyl準粒子流 $j^{\text{TME}} \propto \text{curl } \hat{l}$ の存在を示す。異常項の寄与はNeel型Skyrmion渦では恒等的に0となるのに対して、 j^{TME} はテクスチャの構造によらず常に存在する。

4. おわりに

Weyl超伝導固有の現象として、捻れ場由来のカイラル磁気効果と負の熱磁気抵抗効果を紹介した。Weyl半金属と異なり、Weyl超伝導ではcurrent jetting効果は存在しないため、負の熱磁気抵抗効果はカイラル異常の直接的証拠となり得るであろう。

さらに、捻れ場由来のカイラル磁気効果によって、秩序変数の非自明なテクスチャ構造がWeyl準粒子の無散逸な流れを生み出す。量子異常や捻れ場といった概念は固有角運動量のパラドックスと深く関わっており、Mermin-Muzikarによる質量流の表式、すなわち全角運動量はMcClure-Takagiの定理を破る結果を支持するように思われる。一方で、Kitaは固有角運動量の問題を再考し、異常

項を伴わない j^{IMU} を支持する結果を得ており[12]、未だ明確な答えは得られていない。Weyl超伝導・超流動を舞台に量子異常などについての知見を深めることは、McClure-Takagiパラドックスのような未解決問題への重要な鍵となるかもしれない。

本稿は藤本聡氏(研究分担A01)との共同研究に基づく。

- [1] B. Yan and C. Felser, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **8**, 1 (2017).
- [2] T. Meng and L. Balents, *Phys. Rev. B* **86**, 054504 (2012).
- [3] T. Mizushima et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 022001 (2016).
- [4] M. Sato and S. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 072001 (2016).
- [5] A. V. Balatsky, G. E. Volovik, and V. A. Konysev, *Sov. Phys. JETP* **63**, 1194 (1986).
- [6] G. E. Volovik, *JETP Lett.* **43**, 551 (1986).
- [7] R. Combescot and T. Dombre, *Phys. Rev. B* **33**, 79 (1986).
- [8] T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima, A. Tsuruta, and S. Fujimoto, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 207002 (2018).
- [9] Y. Ishihara, T. Mizushima, A. Tsuruta, and S. Fujimoto, *Phys. Rev. B* **99**, 024513 (2019).
- [10] O. V. Lounasmaa and E. Thuneberg, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **96**, 7760 (1999).
- [11] H. Sumiyoshi and S. Fujimoto, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 166601 (2016).
- [12] 例えば、T. Kita, *J. Phys. Soc. Jpn.* **65**, 664 (1996)や文献[3]にその歴史や問題点が詳しく書かれている。
- [13] T. Mizushima and K. Machida, *Phys. Rev. A* **81**, 053605 (2010).
- [14] Y. Tada, W. Nie, and M. Oshikawa, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 195301 (2015).
- [15] M. G. McClure and S. Takagi, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 596 (1979).
- [16] M. Ishikawa, K. Miyake, and T. Usui, *Prog. Theor. Phys.* **63**, 1083 (1980).
- [17] N. D. Mermin and P. Muzikar, *Phys. Rev. B* **21**, 980 (1980).

著者紹介



みずしま たけし 水島 健

1977年生まれ。岡山県出身。2005年岡山大学大学院自然科学研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員(DC1)、岡山大学助手、同助教を経て、2014年より現職。趣味は山登りやサイクリング、食べ(飲み)歩きだったが、現在は専ら育児に奮闘中。

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

2019

2018/Nov/29

好田 (C01) が、「平成 30 年度 (第 8 回) RIEC Award 東北大学研究者賞」を受賞しました。

2019/Feb/26

トポロジカル物質中の新型粒子「スピン 1 粒子」および「2 重ワイル粒子」発見についての佐藤 (B01)、相馬 (B01)、安藤 (B01) らの論文が、Phys. Rev. Lett. 誌の Editors' suggestion に選ばれ、APS Physics の Synopsis でも紹介されました。またこの成果については、日経産業新聞、科学新聞で紹介されました。

2019/Mar/12

吉見 (B01) が、「Poster Award in FY2018 RIKEN SPDR & FPR Presentation of Research Results」を受賞しました。

2019/Mar/13

小林 (C01) が、「平成 30 年度矢崎学術賞功績賞」を受賞しました。

2019/Mar/16

山影 (D03)、田仲 (B01)、柳瀬 (D02) が、「第 24 回 (2019 年) 論文賞 授賞論文 The 24th Outstanding Paper Award of the Physical Society of Japan」を受賞しました。

2019/Mar/18

量子スピン液体の分数励起についての宇田川 (A01) らの論文 "Spectrum of itinerant fractional excitations in quantum spin ice" が Phys. Rev. Lett. 誌の Editors' Suggestion に選ばれました。

2019/Apr/08

田仲 (B01)、山影 (D03)、柳瀬 (D02) が、「第 24 回 (2019 年) 論文賞 (日本物理学会)」を受賞しました。

2019/Sep/07-08

「国際周期表年 2019 特別展 (京都) / IYPT2019 Special Event in Kyoto」を、京都大学 百周年時計台記念館 で開催しました。12 月 3 日 -7 日「第 5 回 TMS 領域研究会 (国際会議)(TopoMat2019)」でも、「巡回展：国際周期表年 2019 特別展」を開催しました。

2019/Oct/23

藤岡 (B01)、塩見 (B01)、井手上 (C01)、打田 (H28-H29 年度 A01) が、「第 14 回 (2020 年) 日本物理学会若手奨励賞」を受賞しました。

2020/Feb/17

川口 (H28-H29 年度 D04) が、「第 1 回 (2020 年) 米沢富美子記念賞」を受賞しました。

鉄カルコゲナイド超伝導体と その関連物質におけるトポロジカル相の探索

鍋島 冬樹 / 東京大学 大学院総合文化研究科 助教

鉄カルコゲナイド超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ とその関連物質のトポロジカルな性質に着目して研究を行っております。この物質はフェルミエネルギー、超伝導ギャップ及びスピン軌道相互作用の、3つのエネルギースケールが同程度であるという稀有な性質を持っており、これまでにない全く新しい超伝導状態が実現している可能性があります。実際 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ では、角度分解光電子分光の実験から、トポロジカルに非自明な超伝導（トポロジカル超伝導）が実現している可能性が指摘されています [1]。トポロジカル超伝導体ではマヨラナ粒子と呼ばれる特殊な粒子の出現が予言されており、量子コンピュータへの応用が期待されています。

トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子の検出に関しては、走査型トンネル分光によるゼロ・バイアス・ピークの観測によるものが多い（実際、鉄カルコゲナイドにおいても複数の報告がある）のですが、それ以外のマヨラナ粒子特有の現象を観測できないかと考えています。最近、私が注目しているのはインターカレーションした FeSe です。FeSe は層間にいろいろなイオンや分子を挿入（インターカレーション）することができ、それにより電子ドーピングすることで超伝導転移温度が 9 K から 40 K 近くまで大きく上昇します。この大きな転移温度の上昇自体、非常に興味深い現象なのですが、このインターカレーションされた FeSe においても、渦糸コア中にマヨラナ粒子の存在を



なべしま・ふゆき

1987 年高知県生まれ。2015 年 東京大学大学院博士課程修了。日本学術振興会 特別研究員（東京大学）を経て、2016 年より現職。上京以来、駒場キャンパスに通い続けています。

示唆するゼロ・バイアス・ピークが観測されています [2]。私の所属する前田研究室では、高品質な鉄カルコゲナイド薄膜が得られる [3] ので、その利点を活かし、ジョセフソン接合を作製して、マヨラナ粒子由来のジョセフソン効果の異常（ 4π 周期ジョセフソン効果）が検出できないかと目論んでいます。

[1] P. Zhang et al., Science **360**, 182 (2018).

[2] Q. Liu et al., Phys. Rev. X **8**, 041056 (2018)

[3] Y. Imai et al., PNAS **112**, 1937 (2015).

非磁性キラル物質の非線形ホール効果

下澤 雅明 / 大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授

通常のホール効果は、磁場が存在する下で電流を印加した時に、電場・磁場の双方に垂直な方向に電位差が生じる有名な現象です [1]。一方で異常ホール効果は、外部磁場が存在しなくても、内部磁化を持つ磁性体において起こりうることで知られています [2]。このように、いずれの電気ホール効果も線形応答理論の枠組みでは時間反転対称性が破れた状態でなければ生じないと考えられてきました。

そのような状況の中で近年、非磁性物質において外部磁場を印加しない状態でも電気ホール効果が現れる可能性が提案されました [3]。この理論の最も重要な点は、非線形応答領域まで拡張してホール効果（非線形ホール効果）を考慮していることです。この非線形ホール効果の研究は、空間反転対称性が破れた非磁性物質におけるベリー曲率を検出できる可能性があり、ベリー曲率に起因する輸送特性に関する新たな知見を得ることが期待できます。しかしながら現在までのところ、非線形ホール効果の研究は、 WTe_2 薄膜試料を用いた低温測定に限られており [4]、応用を見据えるとバルク試料を用いて室温付近まで非線形ホール効果が現れる物質探索が必要不可欠です。

そこで私たちは、バルク試料で非線形ホール効果が理論的に計算されている物質として、らせん構造を有する非磁性半導体テルル [5] に注目し、非線形ホール効果測定を行いました。テルルの非線形ホール効果は、室温を含む幅広い温度領域で観測されました。4.2 K から 140 K の温度範囲では、温度上昇につれて非線形応答の値は減少し、さら



しもざわ・まさあき

1985年長野県生まれ。2014年に京都大学大学院博士後期課程修了。2014年東京大学物性研究所助教を経て、2019年より現職。

に温度を上昇させていくと、200 K 付近より高温で符号が反転することが分かりました。また、4.2 K での非線形ホール効果の符号はキラリティー（らせんの巻き方）を変えると反転することが分かりました。以上の実験結果は、第一原理計算によって予想された振る舞いと合致しており、非磁性キラル物質のテルルにおいてもベリー曲率双極子が伝導特性に影響を与えていることを示しています。バルク試料でベリー曲率双極子由来の非線形ホール効果が観測された例は、本研究が初めてです。

- [1] E. H. Hall, Am. J. Math. **2**, 287 (1879).
- [2] G. Bergmann, Physics Today **32**, 25–30 (1979).
- [3] I. Sodemann and L. Fu, Phys. Rev. Lett. **115**, 216806 (2015).
- [4] Q. Ma et al., Nature **565**, 337–342 (2019).
- [5] S. S. Tsirkin et al., Phys. Rev. B **97**, 035158 (2018).

イリジウム酸化物における ワイル電子による異常電磁気応答の開拓

藤岡 淳 / 筑波大学 数理物質系 准教授



ふじおか・じゅん

強相関トポロジカル半金属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。モット転移が生じるような強い電子相関領域にあるイリジウム酸化物を主な研究対象として物質開発、磁気輸送計測、赤外分光による低エネルギー電荷ダイナミクスの計測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ではワイル電子(ディラック電子も含む)の特徴がバルクの様々な量子物性に現れる点で、既にカイラル異常による磁気抵抗効果やベリー位相による巨大異常ホール効果等の物性が数多く報告されています。これまで知られているこうした物性の多くは一電子近似の物理で理解できる現象ですが、更に新しい物性を開拓していく上で電子相関効果は重要な視点の一つです。電子相関に起源を持つ現象はモット転移、近藤効果、非従来超伝導等の様々な現象がありますが、私自身はモット転移について物質開発の立場から研究を行っています。トポロジカル半金属のモット転移を実験的に研究する上での大きな課題はワイル電子の量子輸送と電子相関効果が同時に実現できる適切な物質を見出す事です。イリジウム酸化物はその候補物質の一つですが、私は純良単結晶の開発と物性測定に取り組んできました。最近のトピックとしては、ディラック半金属のペロブスカイト型 CaIrO_3 でディラック線ノードがモット転移近傍の強相関領域でもロバストに残り、そのエネルギーがモット臨界性によってフェルミエネルギーに接近することで電子移動度が極めて高いディラック半金属を作りだしている事が分かってきました [1]。また、静水圧や薄膜試料でのエピタキシャル歪みによって格子歪みを変化させ、一電

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、2013年 同講師を経て、2018年4月より現職。科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 さきがけ研究者兼務(2015年12月～2018年3月)。

子バンド幅を僅かに変える事でディラックバンドのフェルミ速度や線ノードのエネルギーを大幅に制御できることも分かってきました [2,3]。

モット転移系の一般的な特徴の一つは電荷やスピン等の自由度による電子秩序相やダイナミクスが見られる点なので、今後はワイル電子ならではの新しい秩序相やダイナミクスを見出すのを目標にしています。

- [1] J. Fujioka, et al., Nature Commun. **10**, 362 (2019).
- [2] M. Masuko, et al., APL Mater. **7**, 081115 (2019).
- [3] R. Yamada, et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 216601 (2019).

RESEARCH BO1

空間反転対称性の破れた超伝導体におけるエデルシュタイン効果の観測

塩見 雄毅 / 東京大学 大学院総合文化研究科 准教授

東京大学総合文化研究科に准教授として異動して、はや1年が過ぎました。これまでトポロジーとスピン流をキーワードに様々な研究を行ってきましたが、これまでに身に着けた知識・技術を活かしながらオリジナリティのある研究を行うべく、試行錯誤しています。例えば、[図1](#)に示すように、最近トポロジカル物質のナノワイヤ試料も作ったりしています。物質試料も手を広げて、また測定手法も手を広げて、今までの私とは違った成果を出して皆さんを驚かせられるように頑張りたいです。

さて、超伝導体におけるトポロジカルスピン流現象の観測を目指す本公募研究は、研究途中で遭遇した超伝導ボルテックスの興味深い輸送現象に魅せられて、少し方向転換しました（注：超伝導ボルテックスもトポロジカルです）。磁性絶縁体と超伝導体の接合試料では、磁性体の影響を受けて超伝導ボルテックスが“変わった”輸送特性を示します。超伝導研究の長い歴史の中で磁性体・超伝導体接合試料の超伝導ボルテックスについて既に多くの論文がありますが、最近進展したスピントロニクス^[1]の知見を活かして新しい現象を見出すことを目指しています。

公募研究期間内のハイライトとしては、超伝導ボルテックスの非相反現象を利用した環境発電効果の観測があります [\[1\]](#)。これは、界面で空間反転対称性が破れた超伝導体・磁性体接合試料において、超伝導マグネットの微弱な電磁ノイズにより超伝導ボルテックスが非相対的に運動することで連続的に発電が起きることを示した成果です。最初はどのようにボルテックスが運動しているかわからず、ついに永久機関を作ったと思って、ほくそ笑んで家に帰ったのが懐かしい思い出です。



しおみ・ゆうき

1985年三重県生まれ。2012年3月東京大学大学院博士課程修了。2012年4月より東北大学助教、2017年11月より東京大学工学部特任講師を経て、2018年10月より現職。

また、最近、同様の超伝導体・磁性体接合試料において、超伝導ボルテックスのピン止めの強さが磁性体のストライプ磁区構造の方向によって変化することを利用して、磁性体の磁気ストライプ情報を電氣的に検出できる手法を開発しました [\[2\]](#)。原理的には、磁気ストライプの方向を変えることでアナログメモリになり得ます。

[\[1\]](#) J. Lustikova et al., Nat. Commun. **9**, 4922 (2018).

[\[2\]](#) Y. Chen et al. Sci. Rep. **9**, 19052 (2019).



[図1](#): トポロジカル物質である Cd_3As_2 のナノワイヤ試料。塊状の生成物に加えて、ナノワイヤ試料も観測されている。直径は100nm程度で長さは数10 μm 。

空間反転対称性の破れたバルク結晶における ワイル・ディラック物性の研究

村川 寛 / 大阪大学 理学研究科物理学専攻 助教

私はワイル半金属などの空間反転対称性が破れた物質の単結晶を合成し、低温強磁場下での電気伝導特性について研究しています。研究対象である TaAs と NbAs では三日月型の異方的なフェルミ面がワイル点を囲んでおり、磁場方位を変化させるとサイクロトロン極値軌道面がワイル点から離れていくため、量子振動の位相を調べることで、ワイル型分散関係から連続的にギャップが開き変化する過程での「ワイル的粒子」のランダウ量子化について研究をすることができます。NbAs ではフェルミ面内にワイル点ペアが存在するのに対して、TaAs では 1 つだけ存在するので、トポロジーの異なる状態間での比較も可能となります。豊中キャンパス内にある阪大先端強磁場科学研究施設では 55 テスラまでのパルス磁場を用いた物性測定が可能であり、NbAs と TaAs について様々な磁場方位下で量子振動の測定を行いました。その結果、ワイル点ペアを囲む NbAs では、極値軌道面内でバンド反転が起こらない状態で量子振動の位相が π となることを発見しました [1]。一方で TaAs では、極値軌道面がワイル点から離れると量子振動が 2 つに分裂することを観測しました。これは、カイラリティの異なるワイル点まわりのスピンベリ位相の差を検出したものと考えています。これらは花咲研博士後期課程 3 年の駒田盛是氏と進めた成果です。



むらかわ・ひろし

山口県出身。京都大学大学院博士後期課程修了後、科学技術振興機構 ERATO 十倉マルチフェロイクスプロジェクト研究員、理化学研究所基幹研究所研究員を経て 2012 年 10 月より現職。自宅に面した森に集まる野鳥を観察することが最近の趣味。

この他にも、空間反転対称性の破れた PbTaSe_2 の超伝導状態について NQR 測定によりギャップ構造を決定しました [2]。さらに、希土類元素を含んだ第二種ワイル半金属単結晶を合成し、空間反転対称性のみならず時間反転対称性も破れた系における、電場磁場応答現象の研究を進めています。最近では 4f 電子をベースとした重いワイル物質の合成と物性開拓にも取り組んでいます。

[1] M. Komada, H. Murakawa et al., to be published in Phys. Rev. B

[2] K. Yokoi, M. Yashima, H. Murakawa, H. Mukuda et al., under review in Phys. Rev. B

トポロジカル絶縁体と強磁性絶縁体の 近接効果による量子異常ホール効果

吉見 龍太郎 / 理化学研究所 創発物性科学研究センター 特別研究員

トポロジカル絶縁体における新奇量子現象の開拓を目標に研究を行っています。近年は積層化という薄膜試料の優位性を活かし、近接相互作用由来の量子現象を電気輸送測定で捉えることをテーマにしています。特に注目しているのは量子異常ホール効果 [1] です。トポロジカル絶縁体では、磁気秩序によって自発的に時間反転対称性が破れることで表面ディラック状態に磁化ギャップが開き、量子異常ホール効果が発現します。

時間反転対称性を破る手法としてこれまで主流だったのはトポロジカル絶縁体に磁性元素をドーピングして強磁性化する方法です。この手法は物質探索が容易であるという点が長所ですが、磁性不純物が結晶内で散乱因子となるという短所もあります。そこで近年では強磁性絶縁体をトポロジカル絶縁体と貼り合わせ、磁気近接効果によってギャップを開く手法が模索されています。我々は半導体 ZnTe に磁性元素 Cr をドーピングした (Zn,Cr)Te に着目し、トポロジカル絶縁体 (Bi,Sb)₂Te₃ との積層構造を作りました [2]。(Zn,Cr)Te を選んだ理由は、トポロジカル絶縁体 (Bi,Sb)₂Te₃ と同様にテルル化合物であり、また、磁性不純物 Cr が (Bi,Sb)₂Te₃ の表面準位と大きな相互作用を持つことがドーピング系における実験結果から推測されるためです。その結果、両者の積層構造では、先行研究で知られていた酸化物強磁性との磁気近接効果と比較して4桁以上大きな異常ホール抵抗を観測し、低温で磁気近接効果によって初めて量子異常ホール効果を観測しました。



よしみ・りゅうたろう

1988年東京都生まれ。2016年東京大学大学院博士後期課程修了。2016年より理化学研究所創発物性科学研究センター 基礎科学特別研究員を経て現職。

トポロジカル絶縁体における研究は理論的な取り組みが先行しており、量子異常ホール効果も当初の提案では近接効果を用いたものでした。今回の結果は理論的な提案を実証する物質選択の指針を与えたという点で意義深いと考えています。今後、磁気相互作用のメカニズムを明らかにしていくだけでなく、超伝導など他の相互作用に対象を広げ、新奇量子現象の開拓を目指していくつもりです。

[1] C. Z. Chang, et al., Science **340**, 167 (2013).

[2] R. Watanabe et al., Appl. Phys. Lett. **115**,

周期的アーチ構造をもつ 金属メタ表面における光起電力効果

石原 照也 / 東北大学 大学院理学研究科 教授



いしはら・てるや

1957 年埼玉県生まれ。1984 年 東京大学大学院博士後期課程中 退。1984-93 年 東北大学理学 部物理学科助手（この間 1990- 92 米国ブラウン大学客員研究 員）、1993-1999 年 広島大学工 学部電気系助教授、1999-2007 年理化学研究所フロンティア 研究システムチームリーダー、2003 年より現職。

電子系における非自明なトポロジーのバンド構造の実現にスピン軌道相互作用が重要な役割を果たしている。この場合スピン軌道相互作用はバンドを構成する原子によって決まっており、その制御は容易でない。一方サブ波長人工構造体メタマテリアルにおいては注目する電磁波の波長よりも小さな構造をデザインすることにより、光のスピンと並進運動量の結合を自由に制御することができる。今回人工構造による幾何学的位相を利用することにより、光のスピンに依存した応答を実現することができたので報告する [1-3]。

図 1 はアーチ型の穴を周期的に金薄膜に配列した試料の SEM 像である。微細加工は収束イオンビーム (FIB) で行った。横方向の周期は 800nm、縦方向の周期は 200nm である。図 2 は電磁場シミュレーションで計算した右回り円偏光に対する角度分解透過スペクトルである。透過の大きいモードが右肩上がり存在し、垂直入射であっても正の方向に伝搬することが示唆されている。実際このモードの電磁場分布をシミュレートしてみると、金属薄膜に局在したモードが右回り円偏光では正の方向に（左回り円偏光では負の方向に）伝搬していることが確認できる。光起電力は右回り円偏光励起で負であり、このことは伝搬するモードによって電子が力を受け、起電力を発生していることを意味している。

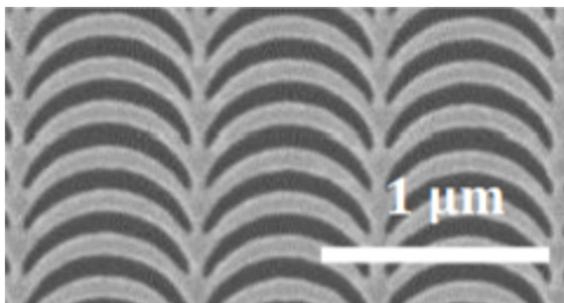


図 1: 試料の SEM 写真

- [1] T. Ishihara, "Second order optical nonlinearity in metasurfaces," International Symposium on Plasmonics and Nanophotonics, Nov.13, 2018, Kobe, Japan.
- [2] T. Ishihara, "Topological Nature of Photovoltaic Effect in Metallic Metasurfaces with Periodic Arch Structure," International Conference on Topological Materials Science 2019, Dec.5, 2019, Kyoto, Japan.
- [3] Y. Masunaka and T. Ishihara, "Circular photovoltaic Effect in Metallic Metasurfaces with Periodic Arch Structure" in preparation.

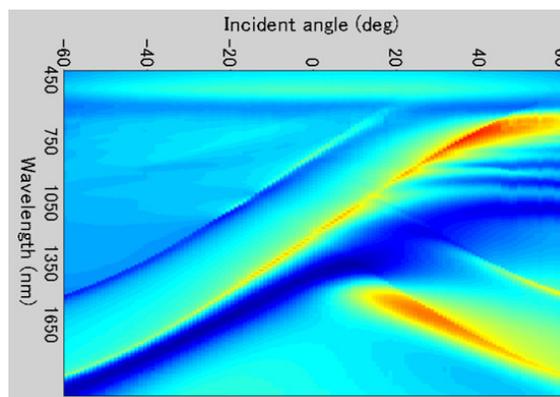


図 2: 右回り円偏光に対する角度分解透過スペクトル

トポロジカルファンデルワールス結晶ナノ試料における量子輸送現象開拓

井手上 敏也 / 東京大学 大学院工学系研究科 助教

二次元原子層がファンデルワールス結合によって積層した層状物質である、ファンデルワールス結晶を対象として、量子輸送現象の研究を行っています。ファンデルワールス結晶は、劈開・剥離することによって微小な試料を得ることができ、特に空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ物質の単一ドメイン試料を得たり、デバイス構造を作製することによりドメインや量子相制御が可能になったりします。また、最近ではファンデルワールス結晶のトポロジカルな電子状態にも着目が集まっており、二次元量子スピンホール絶縁体やワイル半金属といった様々なトポロジカル量子相がファンデルワールス結晶においても発見されています。

本研究では、低温で極性結晶構造を有するファンデルワールス結晶である、タイプII型ワイル半金属 MoTe_2 [1,2] において、空間反転対称性の破れに起因した整流特性である非相反電荷輸送の研究に取り組みました。単一ドメインが実現できると期待される劈開試料のデバイスを作製し、非線形伝導を測定した結果、低温の極性相のみで非相反電荷輸送が生じること、磁場と電流が垂直な配置では非相反縦伝導が生じ、磁場と電流が平行な配置では非線形ホール効果が生じることを発見しました。さらに、この磁場下非線形ホール効果の大きさは非相反縦伝導よりも数倍大きいことを明らかにしました。



いでうえ・としや

1986年香川県生まれ。2015年3月 東京大学大学院博士課程修了。2015年4月より現職。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(2019年10月より)兼務。

極性構造に起因した非相反電荷輸送は、これまで、磁場を印加した際に生じる、スピン分裂バンドの特徴的歪みの効果が主な起源として知られていましたが[3]、本研究で観測された巨大な磁場下非線形ホール効果は、ワイル半金属に特有のベリー曲率に起因する新しい機構の非相反電荷輸送[4]である可能性があります。今後、より詳細な起源の解明や他物質系での類似の現象の観測を通して、トポロジカル電子状態と非線形伝導現象の包括的理解を目指すと同時に、新現象の開拓にも取り組んでいきたいと考えています。

- [1] L. Huang et al., Nat. Mater. **15**, 1155 (2016).
- [2] J. Jiang et al., Nat. Commun. **8**, 13973 (2017).
- [3] T. Ideue et al., Nat. Phys. **13**, 578 (2017).
- [4] T. Morimoto and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **117**, 146603 (2016).

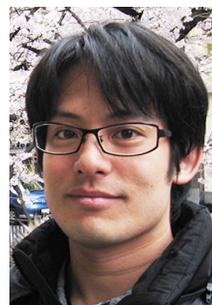
超伝導体と接合した半導体二次元電子系における非平衡スピン輸送と超伝導近接効果

中村 壮智 / 東京大学 物性研究所 助教

半導体ヘテロ構造に生じる二次元電子系に超伝導体を接合して、その内部で起きる超伝導現象の研究を行っています。ヘテロ構造中の二次元電子は半導体のバンドと構造に起因する強いスピン軌道相互作用があるため、近接効果超伝導は非自明なトポロジを持つことが期待できます [1]。一方で、二次元電子中を流れる電流はスピンホール効果 [2] によってスピン流を引き起こすことが知られていますが、近接効果超伝導がこのような非平衡スピン流によってどのように影響されるのかは自明ではなくとも興味深い問題です。

本研究では InAs の量子井戸と Nb などの従来型超伝導体の接合においてスピン流と超伝導の関係を調べて研究を行っています。これまで、超伝導電流と電流、スピン流を独立に制御し伝導特性を調べることで、極めて小さなスピン流で超伝導電流が制御できることが分かりました (図)。これはスピン軌道相互作用によって電子が Zitterbewegung と呼ばれるジグザグ運動をし [3]、二次元電子系のスピン密度に漣のような斑が生じることで超伝導破壊効果が生まれるためだと考えられます。このことは半導体二次元電子系で観測されているスピンホール角が理論的に考えられるよりも小さいこととも整合しており、二次元電子系のスピンホール効果を考える際に Zitterbewegung が無視できない要素であることを示唆しています。

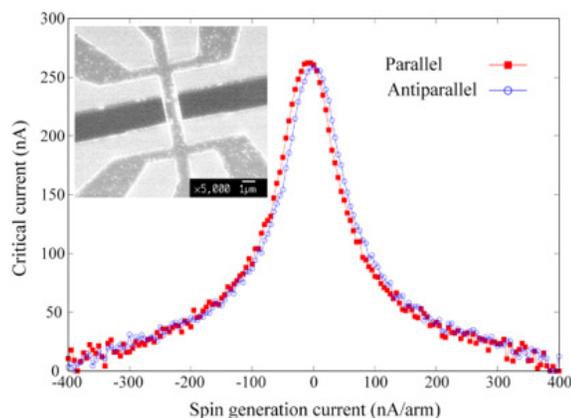
また本公募研究とは別に、半導体ヘテロ構造の二次元電子系だけでなく、磁性半導体 [4] や原子層トポロジカル絶縁体 [5] を用いて超伝導接合を作成し、トポロジカル超伝導を生み出す研究も進めています。今後、様々な物質を舞台にトポロジカルな非平衡伝導現象について新しい知見を得たいと考えています。



なかむら・たけとも

1983 年生まれ。大阪府出身。2012 年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。2010 年日本学術振興会特別研究員。2012 年より現職。超伝導現象やスピン輸送現象に興味を持って研究を行っています。

- [1] S. R. Elliott et al., Rev. Mod. Phys. **87**, 137 (2015).
- [2] J. Sinova et al., Rev. Mod. Phys. **87**, 1213 (2015).
- [3] Y. Iwasaki, TN, et al., Sci. Rep. **7**, 7909 (2017).
- [4] T. Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 107001 (2019).
- [5] H. Mine, TN, et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 146803 (2019).



図：ジョセフソン電流のスピン生成電流依存性。内挿図は試料の電子顕微鏡写真。



マグノン系トポロジカル相とその不変量

赤城 裕 / 東京大学 理学研究科 助教

あかぎ・ゆたか

大きな成功を収めたフェルミオン自由度に起因したトポロジカル物性の研究はボゾン系にも波及しています。中でも興味深いのが、磁性体における基礎的な準粒子であるマグノンです。電荷をもたないマグノンのトポロジカル熱ホール効果が理論的に提案され [1]、すぐに $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ で観測されたことで注目を集めました [2]。一方、昨今のトポロジカル物性に関する研究の爆発的広がり、クラス All のフェルミオン系トポロジカル絶縁体の提案が発端でしたが、ここで本質的な役割を果たす時間反転対称性に由来する Kramers の定理は、直接ボゾン系には適用できないことから、ボゾン系トポロジカル相の研究のほとんどは時間反転対称性を持たない系での議論に留まっていました。

そこで私達は、Kramers 対の存在を保証する有効的な時間反転演算子を導入し、フェルミオン系におけるクラス All に対応する 2, 3 次元 Z2 トポロジカルマグノン系の具体的模型 (スピン Sz 非保存) とそれらを特徴付ける Z2 トポロジカル不変量を提案しました [3,4]。さらに、これらの系におけるトポロジカル不変量の値とエッジ状態の有無の整合性 (bulk-edge 対応) も確認しました。ボゾン系には特有の数学的性質 (非エルミート性) があるため、これらの不変量はフェルミオン系とは異なった表式のベリー接続 / 曲率を用いて表現されるという特徴があります。

また、トポロジカル相は乱れに強いとされていますが、系に乱れがあると波数が定義できないため、相を特徴付けるトポロジカル不変量を定めることは自明ではありません。そこで私は、非可換幾何の手法 [5-7] を用いて、乱れのあるマグノン系トポロジカル相の不変量を定義しました。ここでは、ボゾン系における“フェルミ”射影演算子を

2014 年東京大学工学系研究科物理学専攻博士課程修了 (求研究室)。沖縄科学技術大学院大学 Postdoctoral Scholar (Shannon 研究室) を経て 2015 年より現職。趣味は美術鑑賞、動物観察、筋トレなど。つい最近、子育てが新たな趣味に追加されました。

導入することで上記の手法を拡張しました。そして、数値的な検証も行なうことで、乱れのあるマグノン系トポロジカル相を特徴付けることに成功しました [8]。他にも、私達は機械学習を用いた乱れのあるトポロジカル相の同定法も開発しております [9]。これは、乱れない極限のみのデータで学習したニューラルネットワークを用いる手法であり、bulk-edge 対応のあるフェルミオン系 / ボゾン系 (対称性、次元に依らず) で適用可能な汎用的手法です。

- [1] H. Katsura, N. Nagaosa, and P. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **104**, 066403 (2010).
- [2] Y. Onose et al., Science. **329**, 297 (2010).
- [3] H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **99**, 041110(R) (2019).
- [4] H. Kondo, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **100**, 144401 (2019). [Editors' Suggestion]
- [5] J. E. Avron, R. Seiler, and B. Simon, J. Func. Anal. **120**, 220 (1994).
- [6] Y. Akagi, H. Katsura, and T. Koma, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123710 (2017).
- [7] H. Katsura and T. Koma, J. Math. Phys. **59**, 031903 (2018).
- [8] Y. Akagi, in preparation.
- [9] N. Yoshioka, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **97**, 205110 (2018).

量子スピン液体で発現する創発準粒子のトポロジカル特性の安定性とその制御

那須 讓治 / 横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授

極低温まで磁気秩序を示さない量子スピン液体においては、その強い量子多体効果によって特殊な統計性を有する創発準粒子が生じることが示唆されています。特に、量子スピン液体を基底状態に持つKitaef模型では、スピンの分数化により現れる準粒子励起として、マヨラナ粒子と創発 Z_2 渦がその低エネルギー励起を担います。磁場を印可すると、マヨラナバンドがトポロジカルに非自明な構造をとります。この状態においては、 Z_2 渦励起にマヨラナゼロモードが束縛され、それが非可換エニオンとして振る舞うことで、量子計算への繋がりも見いだされています。この理論予想の中で、近年、Kitaef候補物質 α - RuCl_3 で観測された熱ホール係数の半量子化は、非可換エニオンの存在を強く示唆するものとして注目を集めています [1]。

本研究では、Kitaef量子スピン液体がもつ創発準粒子のトポロジカル特性を調べるため、特に磁場効果に焦点を絞り研究を行ってきました。磁気相互作用が強磁性的なKitaef模型に磁場を印可すると、低磁場では量子スピン液体状態が保持されますが、高磁場領域ではそれが破壊され、強制強磁性状態となります。一方で反強磁性Kitaef模型においては、それらの間に中間相が存在することが分かりました [2]。低磁場量子スピン液体相と中間相の間は、マヨラナバンドのトポロジカルな性質が変化する相転移であることを見いだしました。

さらに、その研究の延長として、磁場が時間変動する非平衡ダイナミクスの研究も進めています。その中でもKitaef量子スピン液体に対して印可した磁場を急にゼロにする磁場クエンチによる磁化ダイナミクスを調べました [3]。磁化の実時間ダ



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、東京工業大学理学院助教を経て、2018年12月より現職。

イナミクスをエネルギー分解すると、初期時刻では、高エネルギーの重みが大きいが、それは急速に減衰し、その代わりに時間経過とともに低エネルギーの重みが増大していくことが分かりました。解析の結果、高エネルギーのものはマヨラナ準粒子に対応し、低エネルギーのものは Z_2 渦励起に対応するものです。この結果は、スピンの分数化して生じた2種類の準粒子励起を時間ドメインで分解して観測できることを示唆しています。

これに加えて、最近では量子スピン液体におけるスピン輸送の研究も始めました [4]。磁気モーメントの出現なしにマヨラナ準粒子がスピン励起を輸送できることが分かってきましたので、これが実験的に観測できることを期待しています。

[1] Y. Kasahara et al., Nature **559**, 227 (2018).

[2] J. Nasu et al., Phys. Rev. B **98**, 060416(R) (2018).

[3] J. Nasu, and Y. Motome, Phys. Rev. Research **1**, 033007 (2019).

[4] T. Minakawa et al., arXiv:1912.10599.



異方的超伝導体の対称性とトポロジー

柳瀬陽一 / 京都大学 理学研究科 教授

やなせ・よういち

超伝導の研究においては、一粒子励起ギャップの波数依存性、すなわち超伝導ギャップ構造の理解が重要です。ギャップ構造は超伝導の対称性や発現機構と密接に関連しています。また、様々な測定手法によりギャップ構造を観測することができます。そのため超伝導分野の実験研究では、ギャップ構造を同定し、そこから秩序変数の対称性と超伝導発現機構を明らかにする戦略が長く採用されてきました。理論と実験が相乗的に進歩するうえで、超伝導体のギャップ構造を正確に知ることができる理論の構築は極めて重要です。

従来の理論として、Sigrist-Ueda らによって完成された群論的分類学 [1] が良く知られています。これは、超伝導秩序変数を結晶点群によって分類し、そこから超伝導ギャップ構造を推定するものです。しかし、「推定する」と書いたように、これは厳密な結果ではありません。実際、その例が幾つか知られています。そこで私達は、対称性とトポロジーに基づいて超伝導ギャップ構造の厳密な分類を行いました。

[A] ブリルアンゾーンの対称面上での超伝導ギャップの分類 [2,4]

対称性に保護されたラインノードを網羅的に分類しました。常磁性体・強磁性体・反強磁性体の全てについて、ラインノードが現れる空間群対称性と超伝導対称性の組み合わせを示しました [2]。Sigrist-Ueda 理論では示せない非共型空間群に守られたラインノード [3] もこの分類に含まれています。トポロジカルな保護と表面状態についても明らかにしました [4]。対称性に守られたラインノードの分類は完成したと考えられます。

[B] ブリルアンゾーンの対称線上での超伝導ギャップの分類 [2,5]

従来、超伝導ギャップ構造を決定する要因として、秩序変数の対称性とフェルミ面のトポロジー

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年より新潟大学理学部准教授、2015年より京都大学理学研究科准教授を経て2020年同教授。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、沢登りなど。現在は子育てを趣味とする日々。

が考えられてきました。私達はこれらに加えて電子波動関数の角運動量 J_z が決定的な役割をする例があることを示し、量子数 J_z を含む分類表を作成しました。さらに、分類表に現れる全てのノードがトポロジカルに保護されていることを示しました。分類結果に基づいて UPt_3 の超伝導ギャップ構造を議論し、 J_z によってワイル点の構造が異なることも示しました。他に、 UBe_{13} , $SrPtAs$, MoS_2 , $PrOs_4Sb_{12}$ などのギャップ構造についても考察を行っています。

本研究は主に角田峻太郎氏（京都大学 D3）が行ったものです。また、塩崎謙、野本拓也、小林伸吾、佐藤昌利の各氏との共同研究の成果です。

[1] M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. **63**, 239 (1991).

[2] Shuntaro Sumita and Youichi Yanase, Phys. Rev. B **97**, 134512 (2018).

[3] M. R. Norman, Phys. Rev. B **52**, 15093 (1995).

[4] Shingo Kobayashi, Shuntaro Sumita, Youichi Yanase, Masatoshi Sato, Phys. Rev. B **97**, 180504(R) (2018).

[5] Shuntaro Sumita, Takuya Nomoto, Ken Shiozaki, Youichi Yanase, Phys. Rev. B **99**, 134513 (2019).

トポロジカルフェルミアーキ： 有限温度での特異な準粒子励起の研究

永井 佑紀 / 日本原子力研究開発機構 研究員



ながい・ゆうき

ここ 1,2 年、ハミルトニアンが非エルミートの場合の研究が盛んに行われています。私は、強相関電子系などの準粒子に寿命が存在する場合における有効ハミルトニアンが非エルミートになることに着目し、研究を行ってきました。この有効ハミルトニアンは、一粒子ハミルトニアンに自己エネルギーを足したものを新しく“ハミルトニアン”と定義して得られるものです。一粒子グリーン関数の極はこの有効ハミルトニアンの固有値と対応しますので、有効ハミルトニアンの非エルミート性に起因するトポロジカルな性質について議論しています。特に、私は開放系よりもバルクの固体の系の方が好きなので、バルクで起こる現象について調べています。バルクにおいても、不純物散乱や電子相関などで準粒子に寿命が生じると有効ハミルトニアンが非エルミートになり、ディラック点が分裂するなど様々な面白い効果が現れます [1,2]。

本年度は、計画班 A01 の藤本研究室との共同研究として、三次元ディラック・ワイル半金属を調べました。非常に単純な不純物効果を考慮するだけで有効ハミルトニアンが非エルミートになり、例外点構造が現れることがわかりました [3]。この例外点構造は広い範囲のディラック・ワイル半金属の系で実現されると考えられ、角度分解光電子分光等においてフラットバンドとして観測が可能であると期待されます。

本年度はそのほかに、自己エネルギーのエネルギー依存性と一粒子グリーン関数の極の構造を考慮し、非エルミートハミルトニアンを超えた有効ハミルトニアンについて研究を行いました。実は、上記で述べた有効ハミルトニアンは、自己エネルギーのエネルギー依存性が 0 次あるいは 1 次であるときに導出されるものでした。自己エネルギー

1982 年北海道生まれ。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 年より原子力機構研究員を経て、2019 年 7 月より現職。また、2016 年 11 月より 1 年間マサチューセッツ工科大学客員研究員。2018 年 8 月より理化学研究所革新知能統合研究センター客員研究員を兼務。最近ジムで筋トレをしている。

がエネルギーの 2 次以上で展開される場合には、一般にグリーン関数の極が増えるため、これまでの有効ハミルトニアンでは記述できません。このとき、グリーン関数の極を決めるためにはグリーン関数の分母に関する行列式を解く必要があります。この問題をなんとか固有値問題に落とせないか試行錯誤している際、たまたま 1971 年の古い文献 [4] を見つけました。その文献の方法を用いると、極を決める方程式は行列次元を拡大した一般化固有値問題へと帰着されることがわかります。このような一般化固有値問題の“トポロジー”とは何かが気になるところですが、今の所手探りの状況です。

- [1] V. Kozii and L. Fu, arXiv:1708.05841.
- [2] YN, Y. Qi, H. Isobe, V. Kozii, and L. Fu, submitted.
- [3] T. Matsushita, YN, S. Fujimoto, PRB **100**, 245205 (2019).
- [4] J. E. Dennis Jr. et al., Tech. Rep. CMU-CS-71-110, Computer Science Department, Carnegie Mellon University, (1971).

ラインノード半金属および その超伝導物質の理論的探索

山影 相 / 名古屋大学 大学院理学研究科 助教

この数年でトポロジカル物質の概念は拡張され非常に豊かなものになっています。例えば、運動量空間のある点においてギャップが消失しているバンド構造をもつトポロジカル半金属については、 Mn_3Sn や $Co_3Sn_2S_2$ などのワイル磁性体が発見され、ますます研究が活発になっています。さらに、スピン1フェルミ粒子などといった、物質の中で初めて実現する新しいタイプのフェルミ粒子も興味を集めています。

我々が研究しているラインノード半金属も新しいタイプのフェルミ粒子の一例です。これは運動量空間の線上においてギャップが零になっているバンド構造をもっているトポロジカル半金属です。我々はその理想的な候補物質として $CaAgX$ ($X=P, As$) を予言し [1]、また、実際の物質においてもラインノードが存在していることを強く示唆する結果が得られています [2]。

ラインノード半金属の候補物質は精力的に探索されるようになりました。次に重要な問題はラインノードに起因するトポロジカル量子現象の解明です。我々はラインノードをもつ強磁性体薄膜において、外部電場によって巨大な電気分極が誘起されることを見出しました [3]。また興味深いことに、この磁性体におけるラインノードは磁化の ab 面内の回転に対して安定であることが分かりました [4]。ラインノードは鏡映や映進、あるいは PT といった対称性によって保護されているとこれまでは理解されていましたが、磁化の向きが任意の方向の場合にはこれらの対称性は一切存在しません。我々はこのラインノードの安定化に磁気鏡



やまかげ・あい

1983年福島県生まれ。2011年 東北大学大学院博士課程後期修了。2011年名古屋大学大学院工学研究科研究員。2014年より名古屋大学大学院工学研究科特任助教・名古屋大学高等研究院特任助教。2017年より現職。

映対称性が主要な寄与を担っていることを初めて指摘しました。今後もラインノードが産み出す特異な量子現象を明らかにすべく研究を進めていきます。

- [1] A. Yamakage, Y. Yamakawa, Y. Tanaka, and Y. Okamoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 013708 (2016).
- [2] Y. Okamoto et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 123701 (2016); D. Takane et al., *npj Quantum Materials* **3**, 1 (2018); E. Emmanouilidou et al., *Phys. Rev. B* **95**, 245113 (2017); X.-B. Wang et al., *Phys. Rev. B* **96**, 161112(R) (2017); J. Nayak et al., *J. Phys.: Cond. Mat.* (2018); N. Xu et al., *Phys. Rev. B* **97**, 161111(R) (2018).
- [3] Y. Ominato, A. Yamakage, and K. Nomura, *Condens. Matter* **3**, 43 (2018).
- [4] Y. Ominato, A. Yamakage, and K. Nomura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 114701 (2019).

RESEARCH DO3

第一原理計算を用いたトポロジカル物性の機構解明と新物質設計

山内 邦彦 / 大阪大学 産業科学研究所 助教



やまうち・くにひこ

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。本新学術領域では、B01 佐藤宇史 角度分解光電子分光 (ARPES) 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バンド計算を進めました。ARPES 測定で得られた電子構造とバンド計算結果を比較することにより、フェルミ準位近傍の電子構造のもつ原子軌道成分が明らかになり、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、 HfTe_2 の電子構造の膜厚依存性 [1] や、ディラック半金属 ZrGeSe のノーダルライン [2] などについて共同研究を行い、種々のトポロジカル物質についての知見を深めました。

一方で、実験に先駆けた理論先行の新物質設計も進めました。イタリアのグループとの共同研究で、強誘電性を示すスピネル化合物 GaMo_4S_8 において新しいスキルミオン相を予測しました [3]。博士学生 Vu 氏および D01 班の鈴木通人氏(東北大)との共同研究で、ノンコリニア反強磁性を示すアンチペロブスカイト化合物 Mn_3PtN において巨大な異常ホール効果を予測しました [4]。さらに、マルチフェロイック(反強磁性および焦電性を同時に示す)物質 BiCoO_3 におけるラシュバ効果を予測しました(図) [5]。反強磁性体におけるラシュバ効果はほとんど前例がなく、今後この分野の研究が活発になると期待しています。また、修士学生高坂氏との共同研究で、 Bi_2Se_3 や Bi_2Te_3 などの典型的なトポロジカル絶縁体を組み合わせた人工多層膜を設計し、積層構造を調整することによってトポロジカル絶縁体の表面状態を制御しました [6]。将来、この理論予測が実験グループによって実証されることを目指しています。

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、現在は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り、今年2回程度イタリアを訪れている。

4年間にわたり、研究へのご支援をありがとうございました。当初は門外漢だった私は学ぶことが多く、共同研究や議論などで様々な研究者と親交を深めたことは素晴らしい経験となりました。この経験を今後の研究活動に活かしたいと思いません。

- [1] Y. Nakata et al., Phys. Rev. Materials **3**, 071001(R) (2019).
- [2] T. Nakamura et al., Phys. Rev. B **99**, 245105 (2019).
- [3] H.-M. Zhang et al., Phys. Rev. B **99**, 214427 (2019).
- [4] V. T. N. Huyen et al., Phys. Rev. B **100**, 094426 (2019).
- [5] K. Yamauchi et al., Phys. Rev. B **100**, 245115 (2019).
- [6] T. Kosaka, K. Yamauchi*, T. Oguchi, arXiv:1912.13239 (2019).

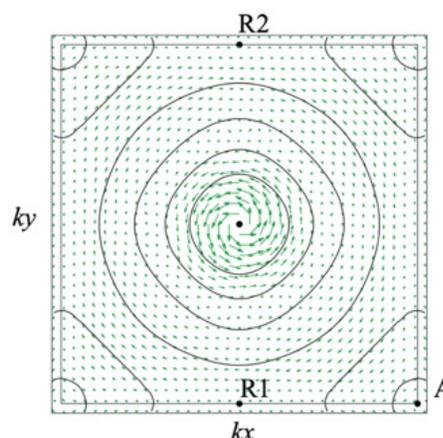
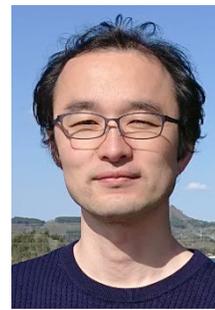


図: BiCoO_3 の正方晶ブリルアンゾーンにおけるZ点周りのスピントキスチャ。伝導帯の底がBi-p軌道の成分をもち、強いスピン軌道相互作用でスピン分裂が生じる [5]。

RESEARCH DO3

第一原理計算による反強磁性体の電子構造トポロジーとマクロ物性の研究

鈴木 通人 / 東北大学 金属材料研究所 准教授



すずき・みちと

異常ホール効果は強磁性秩序に伴う非対角応答現象と考えられてきましたが、近年私達は、強磁性と同様の対称性の破れを引き起こすことで異常ホール効果を発現させる反強磁性秩序の存在を示しています [1]。このような反強磁性秩序は高次の磁気多極子モーメントによって特徴付けることができ、 Mn_3Sn や Mn_3Ge の非線形磁気構造のもとで実験的に観測された巨大異常ホール効果 [2] は、磁気双極子と同じ既約表現に属する磁気八極子の秩序によって、強磁性磁化のもとで生じる異常ホール効果と同じように、対称性の破れの観点から説明できます [1]。

私達はこの磁気構造の多極子理論を拡張し、任意の結晶構造において、結晶点群の既約表現と多極子によって分類される、互いに直交する磁気構造をシステマティックに生成する方法を提案しています [3]。この理論手法の構築によって、与えられた結晶構造のもとで異常ホール効果のような特定の物性を引き起こす具体的な磁気構造が容易に同定できるようになり、磁気構造と物性現象の関係を系統的に研究するための指針が得られました。最近の研究で私達は、この磁気構造の多極子展開手法と第一原理計算手法を組み合わせ、アンチペロブスカイトマンガン窒化物の安定磁気構造の評価を行い、これらの物質で異常ホール効果を引き起こす反強磁性構造が安定・準安定な状態として存在することを示した上で、反強磁性秩序による異常ホール効果の系統的な解析を実施しています [4]。異常ホール伝導度はベリー曲率の占有バンドの和と波数空間の積分によって得られるため、この研究では、異常ホール効果を起こす反強磁性秩序状態に対して波数空間のベリー曲率を解析しています。この解析をもとに、これらの磁気秩序相で異常ホール伝導度の大小を決定づけているのが、ワイル点近傍の発散的に大きなベリー曲率ではなく、フェルミ準位近傍に広がった比較的小さなベリー曲率の分布 (図1) であることなど、磁性金属における異常ホール伝導度の増強要因について多くの知見を得ています [4]。現在も強磁

1979年埼玉県生まれ。2007年神戸大学大学院博士後期課程修了。2007年神戸大学博士研究員。同年ウプサラ大学(スウェーデン)博士研究員。2010年より日本原子力研究開発機構 研究員。2014年より理化学研究所 研究員。2017年より科学技術振興機構さきがけ研究員(兼任)。2018年より現職。

性体を含む様々な磁性体を対象に、磁気秩序のもとで発現する巨大物性の発現機構を電子状態レベルで理解する研究に取り組んでいます。

本研究成果は Vu Thi Ngoc Huyen、野本拓也、柳有起、速水賢、有田亮太郎、楠瀬博明、山内邦彦、小口多美夫各氏との共同研究によるものです。

- [1] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, R. Arita, Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017).
- [2] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015).
- [3] M.-T. Suzuki, T. Nomoto, R. Arita, Y. Yanagi, S. Hayami, and H. Kusunose, Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019).
- [4] V. T. N. Huyen, M.-T. Suzuki, K. Yamauchi, T. Oguchi, Phys. Rev. B **100**, 094426 (2019).

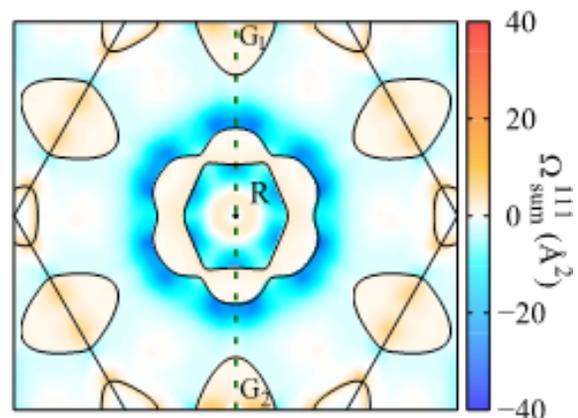
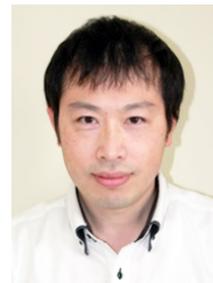


図1 Mn_3PtN のブリルアンゾーン [111] 断面におけるフェルミ面 (実線) と異常ホール伝導度に寄与するベリー曲率の分布。

トポロジカル相を活用した 光の時空間ダイナミクスの制御手法の開拓

小布施 秀明 / 北海道大学 工学研究院 助教



おぶせ・ひであき

1977年長野県生まれ。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。2005年 理化学研究所 古崎物性理論研究室（基礎科学特別研究員）。2008年 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）。2011年 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。

光学系に備わるトポロジカル相を活用することにより、古典光及び光子のダイナミクスを時空間で制御するための手法の開拓を目指した研究を行っています。この目的のために、系のパラメータを詳細に調整可能な、量子ウォークと呼ばれる人工量子系に注目しています。

光学系における光子の流出効果に着目した「開放系におけるトポロジカル相」に関する研究では、本新学術領域研究の前年度までの公募研究で、PT対称性を有する非エルミートな量子ウォークに関する理論研究 [1] やその実証実験 [2,3] を行いました。本年度は、この一連の研究をまとめた解説記事 [4] や関連する内容を含む著書 [5] が出版されました。また、この前年度からの発展研究として、高次のトポロジカル数を有する系への拡張 [6] や、非エルミート性とも関係する非線形量子ウォークにおけるエッジ状態の安定性 [7] に関する研究も行いました。

また、エッジ状態の応用として重要なマヨラナ粒子の編込操作ではエッジ状態の動的制御が必要であり、そのためにはトポロジカル数を時間とともに変化させる必要があります。この観点から、トポロジカル数が変わる境界が時間とともに移動する量子ウォークを考え、その場合におけるエッジ状態の輸送ダイナミクスの制御手法について研究を行いました。その結果、量子ウォークに対し連続極限を考えると、量子ウォークは相対論的なディラック方程式に従うことを反映し、境界が一定速度で移動する場合、エッジ状態がローレンツ収縮を起こすことが分かりました。さらに、ローレンツ収縮を考慮したエッジ状態の輸送手法を提案し、本手法は断熱近似が成立しないような、(有効的な) 亜光速領域においても、非常に精度のよい制御手法であることが分かりました。この結果をまとめた論文 [8] を現在準備中です。

- [1] K. Mochizuki, D. Kim, and H. Obuse, Phys. Rev. A **93**, 062116 (2016).
- [2] 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).
- [3] L.Xiao, X. Qiu, K.K. Wang, Z. Bian, X. Zhan, H. Obuse, B.C. Sanders, W. Yi, and P. Xue, Phys. Rev. A **98**, 063847 (2018).
- [4] 小布施秀明, 望月健, 金多景, 川上則雄「量子ウォークのトポロジカル相と光の振幅制御への応用」日本物理学会誌 **74**, 780 (2019).
- [5] 「量子ウォークの新展開」共編著：今野紀雄, 井出勇介, 「15章：トポロジカル絶縁体と量子ウォーク」小布施秀明 (培風館, 2019).
- [6] M. Kawasaki, K. Mochizuki, N. Kawakami, and H. Obuse, arXiv:1905.11098.
- [7] K. Mochizuki, N. Kawakami, and H. Obuse, J. Phys. A, accepted.
- [8] Y. Fujisawa, K. Yakubo, N. Kawakami, and H. Obuse, in preparation.

カイラル磁性体における熱揺らぎ由来の量子輸送現象

石塚 大晃 / 東京大学 工学系研究科 助教

磁性体における量子輸送現象は、磁気構造による電子のバンド構造の変化や磁気ドメインの外場による制御など、磁性体特有の制御性やそれを用いた機能性を示します。特に近年では、トポロジカルな磁気構造に由来したスピン・ベリー位相の効果が注目を集めてきました [1]。スキルミオンなどの非鏡面的な磁気構造があると、スピンのベリー位相を起源として電子のホッピングに有効的なパイエルス位相が生じます。このパイエルス位相による有効磁場は最大で 1000 T にも達します。このように、量子位相効果に由来する磁気輸送現象では従来の磁気輸送現象と異なる物理がみられます。

この分野の研究はこれまで、基底状態や長距離の磁気相関がある場合を中心に研究されてきました [1]。この状況下では、スピン・ベリー位相由来の内因的ホール効果が支配的になると予想されます。一方で、温度が磁性体の交換相互作用と同程度にまで上昇した場合には、非鏡面的な磁気相関と磁気揺らぎに由来する外因的ホール効果が生じる可能性があります [2]。実際に、実験的にはホール伝導度の温度依存性に非単調な振る舞いがみられる物質も知られています [3, 4]。以上の様に、この外因的機構は大きなホール効果の実現や熱揺らぎを用いた機能性につながる可能性があります。

この2年間の研究では、カイラル磁性体を念頭に、磁気散乱を起源とした位相干渉に由来する外因的ホール効果に関する研究を進めてきました。この2年間の主な成果としまして、磁気揺らぎによるホール効果が、基底状態におけるホール効果よりも（最大で1000倍近く）大きくなる場合があること [5] や、近藤結合が強い場合には、10度に及ぶホール角およびスピン・ホール角を示す



いしづか・ひろあき

1986年静岡県生まれ。2013年東京大学大学院博士後期課程修了。2013年 日本学術振興会 特別研究員（カリフォルニア大学サンタバーバラ校 所属）。2015年より現職。

こと [6] を見出しました。この現象は、カイラル磁性体 [4] だけでなく、デラフォサイト [3] や界面2次元電子系 [7] などの様々な系で実現し得ます。さらに、類似の外因的機構が整流効果を示すことも見出しました [8]。

- [1] N. Nagaosa & Y. Tokura, Nat. Nanotech. **8**, 899 (2013).
- [2] HI & N. Nagaosa, Sci. Adv. **4**, eaap9962 (2018).
- [3] H. Takatsu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 137201 (2010).
- [4] N. Kanazawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 156603 (2011).
- [5] Y. Kato & HI, Phys. Rev. Appl. **12**, 021001 (2019).
- [6] HI & N. Nagaosa, arXiv:1906.06501 (2019).
- [7] D. Maryenko *et al.*, Nat. Commun. **8**, 14777 (2017).
- [8] HI & N. Nagaosa, arXiv:1908.04557 (2019).

望月 健

北海道大学 大学院工学院 博士課程2年

指導教員：北海道大学 工学研究院 小布施 秀明 助教 (D04)

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：2019年2月15日(金)～28日(木)

非エルミート系のトポロジカル相は、受入研究者である佐藤昌利先生らにより、38個の対称性クラスに分類されています [1]。ハミルトニアンがエルミートであるという制約を外した場合、考えるべき対称性の数が増えるため、非エルミート系の対称性クラスの数エルミート系の場合より多くなります。滞在期間中は、上述の分類表を基に異なる対称性クラスに属する非ユニタリー量子ウォークのモデルをいくつか提案し、現れるエッジ状態について議論しました。その結果、提案したモデルにおいて現れるエッジ状態は、非エルミート系特有の状態ではなく、エルミート系にも対応する状態が存在する事がわかりました。さらに、これまで研究してきた系が、PT対称性に加えてカイラル対称性を有する事も明らかになりました。

また、量子ウォークのトポロジカル相に関する自分の研究について、セミナーをする機会を頂きました。セミナー後の佐藤先生との議論から、PT対称な非ユニタリー量子ウォークに現れる例外点の構造がカイラル対称性に起因し、巻き付き数の差により特徴づけられる事が明らかになりました。例外点とは、非エルミートなハミルトニアンが対角化不可能になる点の事です。非エルミート系では、例外点が存在する事に起因する現象が数多く知られています [2]。上述の系では、例外点が波数とパラメータを軸とした二次元空間で円状の軌道を描き、例外線を形成しています。例外点の構造に対するトポロジカル数および対称性による特徴づけは、これまで私にはなかった観点であり、新しい発見となりました。例外点直上における量子ウォークのダイナミクスについても、佐藤先生と議論しました。

量子ウォークは、光子の流出効果の導入により非エルミート系としての性質を持つだけでなく、時間周期駆動系(フロッケ系)としての性質も持つ

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。



セミナーの風景。

ています。しかし、これまで量子ウォークで観測されたエッジ状態は、有効ハミルトニアンを基に理解可能な、時間周期駆動系特有ではない状態でした。そこで、滞在期間中は、基礎物理学研究所の別所さん(M2)と議論し、時間周期駆動系特有の対称性を持つモデルをいくつか提案しました。それらのモデルについて、今後詳細に調べる予定です。

今回の滞在では、上述のように、様々な事が明らかになりました。幾つか未解決の問題はありますが、今後それらの問題に取り組み、共同研究を進めていきたいと考えています。また、本筋からは逸れますが、基礎物理学研究所では、素粒子や原子核、物性など、異分野の研究者同士の距離が非常に近いと感じました。同部屋の方々は、超新星爆発のシミュレーションなどについて議論されていて、普段そのような話題を耳にする事がない私にとっては、非常に新鮮でした。基礎物理学研究所は、学際的な研究が生まれやすい、素晴らしい研究所であると感じました。

最後になりますが、滞在期間中は、佐藤先生をはじめ、京都大学基礎物理学研究所凝縮系理論グループの方々には大変お世話になりました。グループの方々と食事をしたり雑談をしたり山登りをしたり、楽しい時間を過ごす事ができました。このような機会を与えて下さった若手励起プログラムに、感謝申し上げます。

[1] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).

[2] W. D. Heiss, J. Phys. A **45**, 444016 (2012).

DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

若手励起プログラム報告

松下 太樹

大阪大学 基礎工学研究科 博士前期課程2年

指導教員：大阪大学 基礎工学研究科 藤本 聡 教授 (A01)

受入研究者：東北大学 金属材料研究所 野村 健太郎 准教授 (C01)

受入期間：2019年2月25日(月)～3月8日(金)

私は博士前期過程において、Weyl 超伝導における幾何学変形及び温度勾配により生じる輸送の研究を行ってきました。Weyl 物質は実空間のテクスチャにより生じる創発電磁場によりカイラル量子異常を生じます。実空間のテクスチャ構造に由来した輸送や応答は非常に興味深い研究題材です。修士課程での研究は超伝導を対象としたものでした。今後は超伝導での研究で得た知見を活かし、Weyl 磁性体の磁気ドメインにより引き起こされる量子異常由来の現象の開拓にも取り組んでいく予定です。Co₃Sn₂S₂ という強磁性と Weyl 性の両方の性質を併せ持つ物質の発見により、磁気ドメインに由来した量子異常由来の輸送の実験的観測も期待されます。実験によるアクセスを後押しする研究や新しい創発電磁応答の理論提案は非常に興味深い研究テーマです。

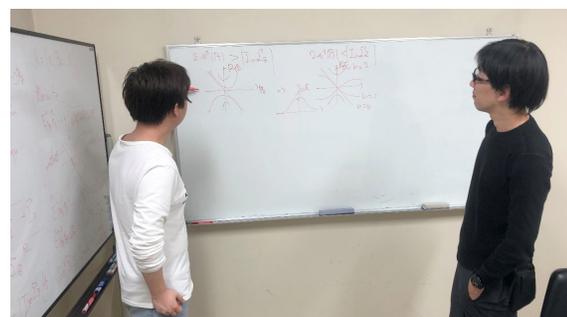
Co₃Sn₂S₂ という強磁性と Weyl 性の両方の性質を併せ持つ物質の発見により、Weyl 性と磁性の協奏により生じる新奇現象が一層注目を集まっています。Weyl 性を持つ物質の何より重要な性質はカイラル量子異常の発現です。量子異常に由来した輸送は、その新奇な性質ゆえ、多くの研究者の魅了して止みません。そして、私も Weyl 性の魅力に取り憑かれた者の一人です。

私の研究は超伝導を対象としたものでしたが、野村先生も我々もカイラル量子異常由来の現象を狙うという点で共通しています。一方で、磁性体と超伝導という異なる舞台で研究を進めてきたという経緯があります。滞在先として野村健太郎先生の研究室を選んだ理由は、この点でシンパシーを感じたことと、Weyl 磁性体 Co₃Sn₂S₂ の有効模型の研究で素晴らしい成果が上がっていることにあります。

滞在初日、野村先生と大湊氏と筆者の三人で、互いの研究成果や Weyl 系の研究に関する今後の展開について議論しました。そこでは、新しい知識を得たのみではなく、私の行ってきた研究に関する有益なコメントを頂くことができました。Co₃Sn₂S₂ の有効模型についてもお教え頂き、自分が今行っている研究の Co₃Sn₂S₂ での実現性についても確信を持つ事が出来ました。

後日、Weyl 超流動 He-A 相で議論されている Mermin-Ho の渦の対応物を Weyl 磁性体で実現する方法について議論を行いました。また、その結果発現するカイラル量子異常由来の物理や輸送についても議論進め、共同研究に発展しています。それに加え滞在中を通して、小林氏からは Weyl 系における不純物効果や相転移について多くを教わりました。

滞在中、野村先生には多くをご教授いただきました。今後ともよろしく願いいたします。また、議論の細やかさや、理論提案する際にどの物質でどうすれば見えるかまでを常に考えている点が印象的でした。大湊氏や小林氏、小澤君からも多くを学ばせていただきました。皆様にこの場を借り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深く感謝申し上げます。



筆者(左)と、野村准教授(右)。

DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

若手励起プログラム報告

吉野 匠

東京大学 大学院理学系研究科 博士課程2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：名古屋大学 大学院工学研究科 川口 由紀 准教授 (H28-H29 年度 D04)

受入期間：2019年7月29日(月)～8月10日(土)

近年、人工ゲージ場の実現に注目が集まっています。二成分ボース気体に人工磁場を発生させると、二つの磁場が考えられます。一つが平行磁場で、これは二成分ボース気体の量子ホール効果と関係し、系を回転することで実験的に実現され渦格子が観測されました。二つ目は反平行磁場で、この系には時間反転対称性があり、トポロジカル絶縁体のアナロジーとなっています。実験ではレーザーを使った方法によって実現されます。そして、この二つの系は平均場の範囲では等価であることが示されています。平均場理論から二成分系における渦格子は、異種成分間相互作用と同種成分間相互作用の比によって、5つの相を持つことが知られ、平行磁場と反平行磁場の等価性から両方同じ相図をもちます。私は、最低ランダウ準位近似のもと、平行磁場と反平行磁場のそれぞれにおける励起スペクトラムをボゴリウボフ理論と有効理論から調べ、低エネルギー領域ではすべての相で一次分散と二次分散の二つを持つことを明らかにしました。一方、高エネルギー領域では、ブルリアンゾーンの高対称点で縮退が現れることがわかりました。そのうちの一部は半並進操作と成分の入れ替え、または時間反転を組み合わせた対称操作に対するハミルトニアンの不変性によることを明らかにしました。一方で、平行磁場と反平行磁場における基底状態での相図は量子ゆらぎにより、四つの相境界が平均場におけるものから変化することがわかりました。そして異種成分間相互作用が引力(斥力)の時に平行磁場(反平行磁場)で成分間のエンタングルメント・エントロピーは小さいことを明らかにし、この振る舞いは磁場がより強い量子ホール領域とも一致します。さらに基底状態のエンタングルメント・スペクトラムについても調べ、特徴的な1/2乗の分散関係が現れることを数値的に確かめました。

私は今までトポロジカル秩序を持つボゾン系における量子ホール効果と関連した研究をしてきました。そして私は、ボゾン系でのトポロジーと関連した研究を進展させたいと考え、川口先生の元へ滞在させていただきました。滞在中は、川口先

生と助教の藤本さんと議論していただきました。まず初めに今までの研究について議論をしていただき、私がセミナーでは話すことができなかった内容を説明し、時には鋭い指摘をいただきこちらが答えに詰まることもありました。そして、二つの励起スペクトルが縮退するブルリアンゾーンの高対称点におけるトポロジカルな性質に対する手がかりを得るため、波数空間全体におけるスピ期待値を求め、高対称点の周りをスピがどのように巻きついているか調べました。その結果、縮退のある点のいくつかではスピンの向きが、その点の周りで一回転することを数値的に明らかにしました。しかしすべての縮退点で巻き付いているわけではありません。一方で縮退線がブルリアンゾーンの端にある場合は、その線を境にスピンの向きが不連続に変化することが数値的にわかりました。このような現象が系のトポロジカルな性質とどのように関係しているのかについては今後の課題です。また、トポロジカルな不変量などを考えられるのかといった点も今後考えていきたいです。

滞在中には、今までの研究についてセミナーをする機会をいただきました。それ以外でも個別に田仲研の方々と議論していただきました。今まで触れたことの無かった分野に触れ、自分の視野の狭さを感じました。

最後になりましたが、滞在を受け入れてくださった川口先生、田仲先生、矢田さんに感謝いたします。そして期間中に何度も議論していただいた川口先生と藤本さんに感謝いたします。田仲研の方々にも大変お世話になりました。食事に誘っていただいたり、雑談したり、楽しい時間を過ごすことができました。またこのような機会を与えていただきました若手励起プログラムに御礼申し上げます。



田仲研のセミナー室にて。左から藤本さん、大橋さん、川口先生、池谷さん、筆者、田仲先生。

DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

若手励起プログラム報告

山本 和樹

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: 東京大学大学院工学研究科 森本高裕 准教授

受入期間 : 2019年12月10日~23日

これまで自分は量子開放系において散逸の影響を取り扱うことに非常に興味があり、その中でも冷却原子フェルミ超流動に強い関心を持って研究を行ってきました。一つ目の研究としては開放系の有効的な記述の一つである非エルミートハミルトニアンを用いて冷却原子フェルミ超流動 [1] を取り扱い、現在は散逸下での冷却原子超流動の実時間ダイナミクスの研究を行っています [2]。フロケ系は例えば周期駆動した外場を系に加えたりすることで実現されるのですが、冷却原子系では lattice を周期的に揺らすことなどで実現されることが知られています。二年間冷却原子系の研究を行ってきた中で、フロケ系、及びフロケトポロジカル相に対する関心が日に日に高まり研究の幅を広げる可能性の一つとして意識するようになりました。

その理由として、これまで自分が考えてきたのは非弾性散乱などで記述される散逸のみが冷却原子超流動に存在する状況だったので、例えば超流動 order parameter のダイナミクスを計算することはできても基本的には系は heat up してしまったということが挙げられます。そのため、系が定常状態に達することは基本的にありません。もちろんダイナミクスを計算することで得られるものもたくさんあるのですが、定常状態を記述できればさらに面白い物理量を計算することができます。一方、フロケ系は系を drive する手法なので、うまく熱化を避けるような熱散逸を導入してやれば系を定常状態に持って行くことができます。このとき、例えば定常状態における current やトポロジカル相 [3] など様々な物理量を計算、もしくは新たな概念を導入することができ、線形応答理論など様々な手法を用いて解析を行うことができます。また、定常状態の記述が可能となれば、実験的な relevance も格段に広がり、フロケ系との関連が指摘されている高次高調波などの実験に対するインパクトも期待されます。

私はその中でフロケトポロジカル相についての知識を深めたいと考え、自身の見聞を広める上でもその専門家と議論を行うことは重要であると考えました。東京大学森本研究室はフロケトポロジ

カル相の最先端の研究室であるため、議論するには最適な環境であると考え今回の滞在に至りました。

滞在中はまず森本先生、助教の北村先生とフロケトポロジカル超流動についての議論を行いました [4]。森本先生と北村先生にはフロケトポロジカル相の基本的な性質から、定常状態におけるフロケ系の取り扱い、current や応答関数の計算などに至るまで幅広く教えていただき、今後の研究に大幅な進展をもたらすこととなりました。また、自分でもいくつかフロケトポロジカル相の取り扱いについて考えていたことがあったので、森本先生との議論を参考にいくつか計算を行ってみました。今回の滞在は二週間という比較的ゆとりのある滞在のように考えていたのですが、蓋を開けてみればほぼ毎日のように議論に付き合っていたでき、非常に密度の濃い滞在となりました。

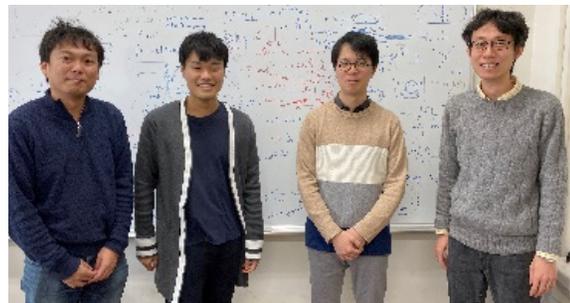
最後になりますがこのような機会を与えていただいた本プログラム実行委員の方々、及び受け入れていただいた森本先生、助教の北村先生に感謝いたします。ありがとうございました。

[1] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Kyosuke Adachi, Kazuaki Takasan, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, Phys. Rev. Lett. **123**, 123601 (2019).

[2] Kazuki Yamamoto et al. in preparation.

[3] Takahiro Morimoto, Hoi Chun Po, and Ashvin Vishwanath, Phys. Rev. B **95**, 195155 (2017).

[4] Sota Kitamura and Hideo Aoki, Phys. Rev. B **94**, 174503 (2016).



左から 北村先生、自分、渡辺研助教の藤先生、森本先生。

Ludovic Jaubert 准教授

ポルドー大学

報告者：学習院大学 理学部物理学科 宇田川 将文 (A01)

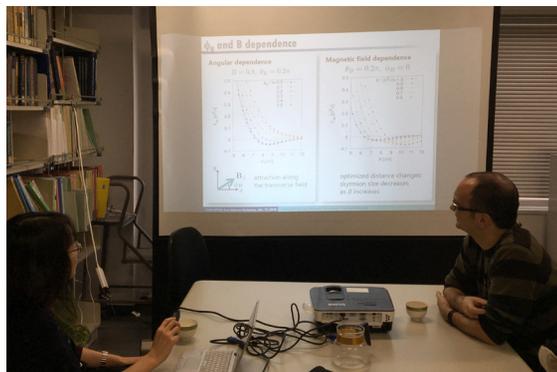
期間：2018年12月17日(月)～2019年1月28日(月)

REPプログラムを利用して、2018年12月17日から2019年1月28日まで、Ludovic D. C. Jaubert 准教授に学習院大学を中心に滞在させていただきました。Jaubert氏とは2011年にDresdenのMax Planck研究所(MPI PKS)に一年間滞在してからの縁です。以来、Jaubert氏が2014年から2018年まで沖縄科学技術大学院大学でグループリーダーを勤めたことをきっかけに、多くの共同研究を進めて参りました。今回、進行中の共同研究を進めると共に、共同で編集を手がけている書籍“Spin Ice”の仕上げの作業、また、新しい共同研究を立ち上げる良い機会と思い、滞在させていただくことになりました。本人より感想を含む詳細な報告をいただきました。



My visit of the Topological Material Science (TMS) Program started on December 17th, 2018 by meeting Prof. Masafumi Udagawa at Gakushuin University who was my main host. The purpose of this visit was (i) to collaborate with Prof. Udagawa on the complex ordering mechanisms of the kagome lattice, (ii) to work together on the edition of the book on “Spin Ice” for Springer, (iii) to discuss together future directions of work with Prof. Udagawa, and (iv) to have the opportunity to give seminars and discuss with condensed-matter experts in different institutions in Japan. Please find below a summary of my academic activities during my visit of the TMS program.

Prof. Udagawa and I have published a paper on the band structure of the breathing kagome lattice (Essafi, Jaubert & Udagawa, JPCM **29**, 315802, 2017). In this paper, we pointed out the ground state of this model when both antiferromagnetic and ferromagnetic interactions of classical Heisenberg spins co-exist. We decided to push forward this analysis by studying the finite-temperature properties of this model via Monte Carlo simulations. During my visit, we regularly discussed the numerical results, and in particular



Discussion with Prof. Kawaguchi at Nagoya University

the finite size effects of the simulations. Simulations suggest a phase transition at finite temperature, but such a critical phenomena is a priori forbidden by the Mermin-Wagner theorem. This puzzling observation forced us to explore bigger system sizes, and to consider if the peculiar Dirac cones of the band structure of this specific model might justify a topological phase transition.

We also discussed another project on the reentrant phenomena at the boundary between an Ising ferromagnet and a classical spin liquid on the kagome lattice with anisotropic interactions. We had already shown that the reentrant phenomena is accompanied by scalar chirality over a finite region in temperature and parameter space. Prof. Udagawa had computed the anomalous Hall effect (AHE) arising from this scalar chirality. During my visit, we discussed how to check if skyrmions could be observed in this model with broken time-reversal symmetry (ferromagnetism) and Dzyaloshinskii–Moriya interactions. Such observation would make this simple and realistic model exceptionally rich in unconventional physics (reentrance, chirality, AHE, possibly skyrmions ...). Both projects are currently in progress, and should give rise to papers in 2019. During this visit, I also met Dr. Rico Pohle (Tokyo University) regularly in order to write a paper on the crossover between different Curie laws in a variety of frustrated systems.

Prof. Udagawa and I have worked together on the exotic properties of frustrated magnets for a few years now, and we were both particularly motivated to bring our experience developed in this field in a different direction. But changing topic of research should not be taken lightly, which is why we took the opportunity of this visit to discuss frequently about possible future projects. Our interests then converged on the very active research on Out-of-

Time Order Correlators (OTOC). Originally, OTOC is an approach to measure the propagation of information in a quantum many-body system. Over the past few years it has evolved into a field of research by itself, connected to quantum chaos, information scrambling and even black holes. OTOC offers a quantitative way to explore the evolution from quantum to semi-classical dynamics, and vice-versa. We are very excited by the possibility to apply OTOC to the dynamics of spin liquids. Is it possible to see quantum chaos in the dynamics of spin liquids, a disordered phase inherently described by long-range entanglement? Are all spin liquids similar, or shall we expect the nature (or absence) of fractionalised excitations to play an important role? More generally, we hope that the very diverse choice of exotic phases discovered by a few decades of intensive research on frustrated magnetism will offer a new and original framework for OTOC physics!

Prof. Udagawa and I have been co-editing the first book on "Spin Ice" for Springer, supervising the writing process of approximately 20 co-authors. This book is nearly finished and this visit at Gakushuin University was extremely useful to discuss the final details of the editing process. A substantial step towards completion has been achieved during this visit and we plan to send the final book to Springer in 2019.

This visit has also been the opportunity to have many fantastic discussions with condensed-matter experts across Japan. I gave seminars:

1) in the group of Prof. Tanaka at Nagoya University (2018/12/19), where I discussed in particular with Prof. Kawaguchi on her recent work on unconventional effective interactions between skyrmions.

2) in the group of Prof. Totsuka in the Yukawa Institute at Kyoto University (2018/12/20-21), where Prof. Totsuka kindly explained me how ultracold alkali atoms can be used to realise topological phases protected by $SU(N)$ symmetry. Prof. Matsuda also presented his recent work on the thermal Hall effect in Kitaev materials and the thermal conductivity of magnetic monopoles in pyrochlore materials.

3) in the group of Prof. Furusaki at RIKEN (2019/01/16), where I could discuss with the different members of the group; in particular with Dr. Momoi on the transition between magnetisation plateaux on the triangular lattice, with Dr. Benton on the stability of quantum spin liquids in Pr-based pyrochlore materials with impurities, and with Dr. Onoda on the stability of unconventional phases in the generic nearest-neighbour model on pyrochlore.

In addition, it was a pleasure to meet and discuss with Prof. Hanasaki from Osaka University during his visit at Gakushuin University, about his work on structural fluctuations in spinels, and their influence on electronic properties.



Jaubert 氏とは、カゴメ格子上の古典スピン液体の性質に関する共同研究について多くの議論を重ねました。スピン液体のトポロジカルな特徴付けや素励起の振る舞いは本新学術領域の主たる研究対象の一つですが、フラストレート磁性体はスピン液体研究の源流の一つであり、その性質を調べることはスピン液体の包括的な理解に向けた王道的な取り組みと位置づけられます。また、Jaubert 氏とはスピン液体の素励起の性質を調べる新しい物理量の可能性として、out-of-time-ordered correlation (OTOC) についての議論を行ないました。OTOC については本新学術領域のメンバーである上田氏、手塚氏などにより精力的に研究がなされていますが、トポロジカル秩序系への応用という新しい観点を付け加えることができないか、と考えております。

学習院において充実した議論を重ねた他、Jaubert 氏は名古屋大学の田仲研究室 (D01 分担) においてセミナーを行い、同研究室の川口氏との議論を始め、有意義な交流を行ないました。また、京都大学や理研においてもセミナーを行ない、京都大学では松田氏 (A01 分担) と熱ホール効果についての議論を行ないました。今回、年を越しての滞在となり、科学的な活動の他に、年末年始の日本の独特の雰囲気を楽しんでいたようです。Jaubert 氏は沖縄科学技術大学院大学の在籍を通して、4年間、日本で研究活動を行った経験がありますが、今回、東京での長期の滞在を通じ、また別の角度から、日本の文化への親しみを深めたようです。

Jaubert 氏とは引き続き共同研究を精力的に進める予定です。これまでもお互いの拠点を行き来しつつ、共同研究を進めて参りましたが、今度、6月には同氏の在籍する Bordeaux 大学を私が訪問し、新しく立ち上げた共同研究を押し進めていく考えです。

RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

REP 招聘報告

Yayu Wang 教授

清華大学

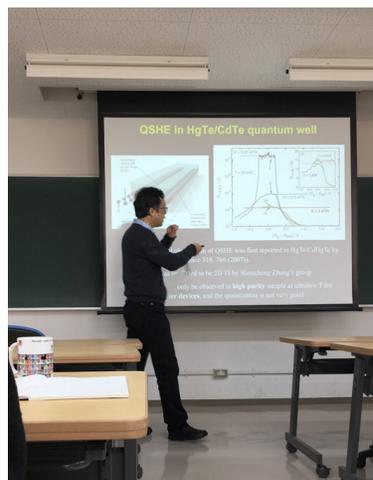
報告者：京都大学 大学院理学研究科 松田 祐司 (A01)

期間：2019年2月9日(土)～23日(土)

2019年2月9日から23日までの2週間、中国清華大学 Yayu Wang (王亚愚) 教授が本新学術領域の REP プログラムで、京都大学物理学教室に滞在され、量子異常ホール効果、銅酸化物高温超伝導体の低濃度領域における電子状態と電荷秩序状態、鉄系超伝導体の電子・磁気秩序状態等に関して松田・笠原 (A 班分担)、前野 (A 班代表)、川上 (代表) らと有意義な議論を行ないました。Yayu Wang 教授は、トポロジカル物質の輸送現象とトンネル顕微鏡を用いた強相関物質の電子状態の研究を中心に活躍されております。

滞在中、異常量子ホール効果のセミナーを行っていただきました。セミナーでは、強磁性体で試料の交換磁場が外部磁場の役割を果たしゼロ磁場においてもホール伝導度の量子化が起こる量子異常ホール効果が、清華大学においてどのように発見されたかも含めて興味ある話を聞くことができました。セミナーを聞いて、トポロジーがらみの研究において、物性測定をする人、結晶成長をする人、デバイスを作製する人、そして理論家との相互連携がいかに大事であるかをあらためて実感しました。

滞在中、京大物理教室で、様々な人と活発な議論が行われました。松田グループとは、大学院生も含めて長時間の議論が行われ、特に量子スピン液体における熱量子ホール効果、銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ、そして鉄系高温超伝導体の超伝導状態について話し合いました。そして、熱量子ホール効果を示す物質を原子層の厚みにしてトンネル顕微鏡で、スピン状態を観測する共同研究を行うことを決めました。



また、川上・柳瀬グループとは、大学院生も含めて非従来型超伝導、トポロジカル超伝導、FFLO状態、超伝導対密度波、非自明な磁気状態、非エルミート系などの最近の結果に関する議論を行いました。さらに、前野・米澤グループとは、大学院生も交えて、Ru 酸化物のモット絶縁体状態に関する研究、特に電流誘起の巨大反磁性状態に関する議論を行い、そして石田グループとは、ウラン化合物超伝導体に関する核磁気共鳴の研究についての議論を行いました。

帰国前に、Yayu Wang 教授の言ったことで印象に残ったのは、議論した京都大学の大学院生のコミュニケーション能力が清華大学の大学院生に比べてかなり高いということでした。隣の芝生は青く見えるということもありますが、本プログラム等を利用して、できるだけ普段から海外の研究者と議論することの重要性を改めて考えました。



From Feb. 9 to 23, 2019, I visited the physics department of Kyoto University. During the visit, I gave a seminar in the department, meet many faculties and graduate students, and discussed about possible future collaborations. The visit was highly fruitful, and I benefited very much from the interactions with the research groups in Kyoto.

On Feb. 13, I gave a seminar entitled "Quantum anomalous Hall effect in magnetic topological

insulators". In this talk I first gave an introduction about various quantum Hall effects in low dimensional electron systems, and the basic idea of topological insulators. Then I present how the research team at Tsinghua University had succeeded in fine tuning the electronic and magnetic properties in Cr doped $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ magnetic topological insulator thin films, which eventually led to the observation of the quantum anomalous Hall effect, i.e., quantum Hall effect in zero magnetic field. I also present more recent progresses regarding the topological quantum phase transition and topological Hall effect in magnetic topological insulators. Below is a photo taken during the seminar.

In the following few days I met intensively with the research groups in the condensed matter program of Kyoto University, and visited several laboratories. Below is a brief summary of the activities.

On Feb. 11, 12, and 21, I met with Prof. Yuji Matsuda's group three times, with 2-3 hours each time. We had in depth discussions on a variety of research fields of common interests. Prof. Matsuda and his colleagues (Shigeru Kasahara and Yuichi Kasahara) kindly told me their recent progresses in the quantized thermal Hall effect in RuCl_3 , the nematicity in iron and copper based superconductors, and BCS-BEC crossover in FeSe , and the detection of Majorana fermions in vortex cores of $\text{Fe}(\text{Se,Te})$ compound. I gave them another short talk on the STM studies of the electronic structure and charge order in cuprate high temperature superconductors. I visited their lab on ultralow temperature thermal transport measurements, torque magnetometer setup, and the STM equipment. We also discussed about possible exchange of personnel in the future.

On the morning of Feb. 18, I met Prof. Yanase and his group members. They explain to me the

basic idea of topological superconductivity, FFLO state in superconductors, and antiferromagnetic spintronics. I am very impressed by their general group theory approach in predicting the superconducting ground state in materials with non-trivial magnetic structures. I briefly introduced my recent work on the pair density wave state in the cuprates, which is closely related to one of their theories.

On the afternoon of Feb. 18, I met Prof. Kawakami. He first gave me a detailed introduction about the topological quantum materials project led by him, which covers a broad range of research topics. Then he told me his recent theoretical work on non-Hermitian systems, which I found very interesting.

On the morning of Feb. 20, I met Prof. Ishida. Because he missed my seminar on Feb. 13, I briefly went through the talk for him. Then he told me about this recent work on the NMR studies on the pairing symmetry of various unconventional superconductors, especially the U-based heavy fermion compounds. We also discussed about this year's SCES meeting in Okayama because he is an organizer and invited me to give a talk there. Later that day I visited his NMR lab.

On the afternoon of Feb. 20, I met Prof. Maeno and his group including Prof. Yonezawa and a couple of graduate students. Prof. Maeno spent a couple of hours with me and kindly reviewed several of his recent research achievements. I was particularly interested the work of current-induced diamagnetic response in the Mott insulator phase of ruthenate compounds. I told them about our recent STM studies on the atomic scale electronic structure of the Mott insulator phase in cuprates, and propose that we can actually collaborate to understand the change of electronic structure induced by a transport current in the Mott insulator phase.

RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

REP 招聘報告

Mario Cuoco 教授

サレルノ大学

報告者：名古屋大学 大学院工学研究科 田仲 由喜夫 (B01)

期間：2019年2月9日(土)～16日(土)

Mario Cuoco 先生は2月9日から16日までの7日間、名古屋大学に滞在されました。この期間中空間反転対称性の破れた多軌道トポロジカル超伝導におけるスピントクスチャーに関する論文作成(矢田、深谷、田村(新学術PD)らとの共著)の議論を田仲研究室メンバーと行いました。

この論文は昨年度発表した“Interorbital topological superconductivity in spin-orbit coupled superconductors with inversion symmetry breaking” *Physical Review B* **97**, 174522-1-17 (May, 2018). を発展させたもので多軌道トポロジカル超伝導における新しい視点を与えるものです。議論の結果は近く投稿されることになりました。また田村氏らが最近明らかにした奇周波数クーパー対とトポロジカル臨界性に関する議論も行いました。

また14日はTMSセミナーで“Antiferromagnetic semimetals and topological phases combining superconductivity and magnetism” と題する発表を行いその後何人かの研究者と活発な議論を行いました。Cuoco先生の滞在は極めて有意義でした。

The scientific program started on February 11, 2019 at Nagoya University by discussing with Prof. Tanaka and the members of his group on the problem of spin-orbital polarization

in superconducting systems with inversion symmetry breaking that involves atomic spin-orbit coupling and orbital dependent asymmetric potential. In particular, the discussion has been carried out with the aim to finalize the preparation of the draft with Dr. Y. Fukaya and Dr. K. Yada. We considered the connection between the emergence of spin-winding within the spin-texture of the excited states of topological superconductors. The discussion has been performed in order to compare single- and multiple-orbital electronic models for the occurrence of anomalous spin-textures and by focusing on the relation between the asymmetric spin-momentum potential and the orientation of the d-vector spin-triplet order parameter. Hence, the paper has been structured by defining the outlook of the figures and the conceptual flow for the presentation of the results. This activity has been carried out in all the days of the visit.

On February 14 (morning), I gave a seminar on antiferromagnetic semimetals (AF-SM) and topological phases combining superconductivity



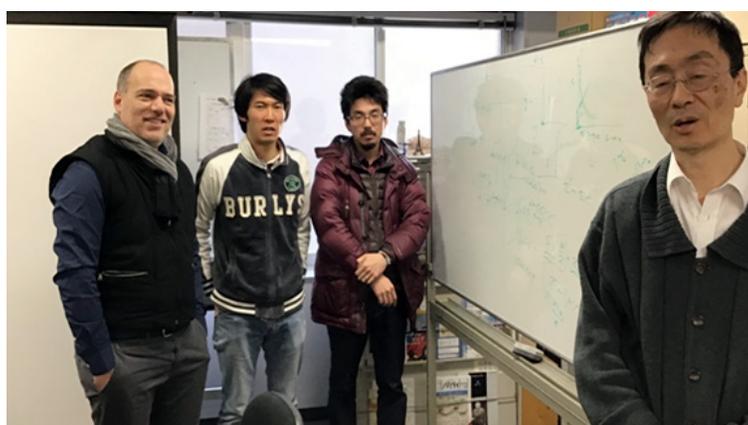
Cuoco at TMS seminar

and magnetism. In particular, I presented specific materials, i.e. transition metal oxide systems, that can exhibit AF-SM phases due to emergent orbitally directional double-exchange effects. The competition between antiferromagnetic (AF) and ferromagnetic (FM) correlations uniquely makes antiferromagnetically coupled FM zigzag stripes. Such zigzag AF states are representative of a class of non-symmorphic antiferromagnets with glide reflection symmetry. Apart from the large variety of fundamental aspects related to Dirac systems, the combination with other type of conventional orders (e.g. magnetism or superconductivity) represents an ideal testbed for achieving new phases of matter and single out materials platforms for future quantum technologies. In the talk, I discussed mechanisms and potential materials for achieving antiferromagnetic semimetals. Then, I considered the impact of s-wave spin-singlet pairing on AFM-SMs with Dirac points or nodal loops at the Fermi level. The electron pairing is generally shown to convert the semimetal into a tuneable nodal superconductor with non-standard nodal features and electronic topological transitions.

On February 14 (afternoon), I have also discussed with Prof. Tanaka and Dr. Tamura their recent findings on the critical behavior of the odd-frequency pair correlations in proximity of a topological transition. The discussion has been focused on the analogies between the conventional critical phenomena for continuous order-disorder transition and the effects observed close to a topological transition for superconductors exhibiting a topological invariant.

On February 15 (morning), I had a discussion with Dr. Kobayashi about topological three-junctions with multiple Majorana modes.

Finally, on February 15 (afternoon), I also had a discussion with Dr. R. Tazai about multipole ordering in heavy-fermions such as CeB_6 . Moreover, I have been exchanging with Prof. Katayama about the dimerization and metal-insulator transitions in $LiVS_2$ and $LiVO_2$ materials considering the possibility of broken symmetry states with zig-zag charge ordering before the insulating phase sets in.



From left: Cuoco, Tamura, Yada, and Tanaka

RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

REP 招聘報告

Manuel Houzet 教授

グルノーブル原子力研究センター

報告者：名古屋大学 大学院工学研究科 田仲 由喜夫 (B01)

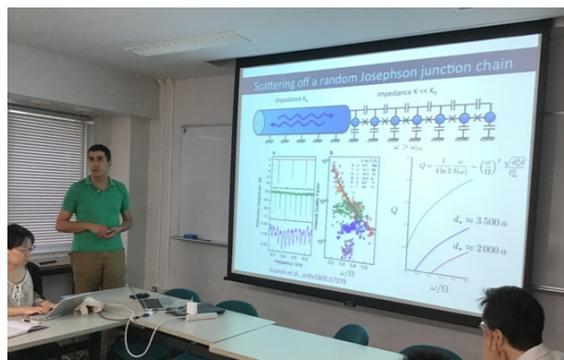
期間：2019年7月5日(金)～8月30日(金)

Manuel Houzet 氏は2019年7月5日-8月30日の間に国内の各地の拠点に滞在し、TMSのメンバーとトポロジカルに非自明な物質が示す多様な物理現象について議論および情報交換を行った。

2019年7月5日-15日は、東工大の藤澤教授の元に滞在し、7月8日に「Andreev and Majorana Weyl crossings in multi-terminal Josephson junctions」と題した講演を行った。また、藤澤教授とは、量子ホールエッジ状態における電荷ダイナミクスや長寿命非平衡状態、ホットエレクトロンの弾道的輸送などについて討論した。

7月16-19日は、名大の田仲教授のもとに滞在し、「Coulomb blockade of a nearly-open Majorana island」と題した講演を行った。田仲はアンドレーエフ束縛状態の物理と奇周波数電子対に関する議論を行った。1995年に柏谷氏と導出した異方的超伝導体接合の微分コンダクタンス公式は共鳴状態を介するトンネル効果の本質を普遍的にとらえて、マヨラナフェルミオンを介するトンネル効果の物理を表していること、97年に導出したd波接合のアンドレーエフ束縛状態の関係式にすでに 4π の周期性が予言されていたこと、など異方的超伝導体の物理における歴史的経緯を説明した。田仲は奇周波数クーパ対による異常近接効果の重要性を、PDの田村氏は奇周波数電子対によるスペクトラルバルクエッジ対応の深淵な意味を説明した。

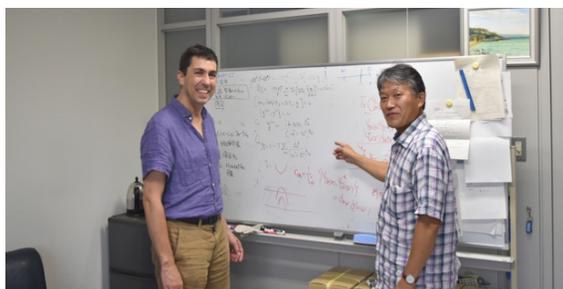
7月22日-8月2日は、北大の浅野准教授のもとに滞在し、「Enhancement of the upper critical field in disordered transition metal dichalcogenide monolayers」と題した講演を行っ



セミナーの風景 (名古屋大学田仲研究室)

た。浅野とは異常近接効果の代表的な現象である微分コンダクタンスの量子化値が数学における不変量で記述できること、トポロジカル超伝導の舞台である2軌道/2バンド系の超伝導を論じる際の問題点、多端子マヨラナ細線接合のアンドレーエフ束縛準位が示す奇妙な性質、トランスモンと呼ばれる微小な超伝導接合の回路の振る舞いについて議論を行った。PDの羽部はNbSe₂単層膜に対する第一原理計算の結果を直接用いて、その上で実現出来るNS接合のコンダクタンスの特徴的な性質を説明した。互いの興味が重なる分野が多く、実りある議論になった。遷移金属カルコゲナイド単層膜における超伝導に関する共同研究の計画を策定した。

8月5日-30日松田教授(京大)のもとに滞在し、「Andreev and Majorana Weyl crossings in multi-terminal Josephson junctions」と題した講演を行った。松田氏の研究室では、人工超格子におけるd波超伝導とスピン密度波の界面を通じた相互作用、鉄系超伝導体におけるFFLO状態、キタエフスピン系のマヨラナ粒子、量子スピン液体を通じた近接効果などに関して議論を行った。また、Houzet氏は京都大学のメンバーである、川上、佐藤、前野各氏の研究室を訪ね、現在研究中の課題について議論を行った。



議論の一コマ (北海道大学浅野グループ)

RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

REP 報告

前野 悦輝

京都大学 理学研究科 教授 (AO1 代表者)

受入研究者：カリフォルニア大学アーバイン校 Jing Xia 教授

期間：2019年10月25日(金)～11月2日(土)、
2019年12月8日(日)～16日(火)

REP プログラムを利用して、2回にわたって UCI の Xia 教授の研究室に共同研究のための滞在をさせていただきました。Xia 教授とは、2006年に私が Stanford 大学の Moler 教授の研究室に3か月間滞在したときから交流があります。彼は当時、同大学の Kapitulnik 教授の研究室の大学院生で、自ら開発した新型の Sagnac 干渉計を使った Kerr 効果の測定により、 Sr_2RuO_4 の超伝導相が時間反転対称性を破ることを明らかにしました [1]。

2019年3月になって UCLA の Brown 教授らが過去の NMR 測定の問題点を明らかにし、 Sr_2RuO_4 の超伝導相ではスピン磁化率がかなり顕著に減少することを示しました。これまでの NMR 実験では、高周波パルスにより試料温度が数ミリ秒間程度、超伝導転移温度 T_c より高くなっていたのです。これを受けて、 Sr_2RuO_4 の超伝導相についての再実験や新たな実験の成果がたくさん始まっています。特に、最近開発されたピエゾ素子を用いた一軸圧印加装置で加圧していくと、フェルミ面が Van Hove 特異点を越える Lifshitz 転移が起こり、その後で T_c が 1.5 K から 3.5 K まで上昇して更に減少に転じることがわかりました [2]。これに伴う超伝導性の変化の有無を調べることで、 Sr_2RuO_4 のトポロジカル超伝導性を念頭に置いた超伝導対称性やメカニズムの解明につながる期待が持てます。

本共同研究では、一軸圧力下で Kerr 効果測定のできる Xia 教授のグループの装置の測定可能温度域を Sr_2RuO_4 の T_c より十分下まで拡張し、京都大学で育成した単結晶試料での測定から時間反転対称性の破れた超伝導相の全容を明らかにしようとするものです。

第1回目の訪問は、カリフォルニア大学サンタ・バーバラ校 (UCSB) キャンパスにある Kavli 理論物理学研究所での第3回 TMS-EPIQS アライアンス研究会の直後に行いました。このテーマに取り組



図2: カリフォルニア大学サンタ・バーバラ校での TMS-EPIQS アライアンス研究会にて Greg Stewart さんと筆者。

TMS NEWSLETTER No. 5 (2020.2)



図1: Jing Xia 教授の研究室の希釈冷凍機の前で、筆者、Camron Farhang, 矢田歌葉絵 (京都大学)、Jingyuan Wang。

んでいる京都大学の学部生である矢田さんと合流し、Xia さんのグループの2名の大学院生の全面的な協力を得て実験をスタートさせました。Irvine は Los Angeles の南東にあり、ディズニーランドや大谷翔平選手の所属する大リーグの Angeles のスタジアムのある Anaheim 市の南に隣接しています。

この訪問では筆者が大学院生として 1981-1984 年に過ごした Los Alamos 国立研究所でお世話になった方2名にも会うことができました。Greg Stewart さん (図2) は TMS-EPIQS アライアンス研究会にも一般参加されセッションで質問もしてくださいました。UCI では Fisk さんに会うことができました。彼らは 1983 年の UPT_3 の超伝導発見の論文 [2] (出版は 1984 年) の第1、第2著者でもあります。Xia さんは Fisk 教授の実験室を受け継いでおり、試料調整関係の設備を今回の実験用に使わせてもらいました。また、“Paradigm shift toward the clarification of the superconductivity in Sr_2RuO_4 ” と “150 years since Mendeleev” の2回のセミナー・コロキウムを行いました。

第2回目の訪問は前野単独で行い、本格的に試料の基本特性の測定と新しい装置の準備を始めました。正味1週間の間、朝から夜までずっと実験室にいて、結晶の研磨や低温測定、装置の設計などを行うことができ、日本ではとてもありえないくらいな時間を過ごすことができました。米澤准教授の訪問も含めて、TMS プロジェクトの期間中にはこの共同研究を軌道に乗せたいと計画しています。

[1] Jing Xia, Yoshiteru Maeno, Peter T. Beyersdorf, M. M. Fejer, and Aharon Kapitulnik, Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006).

[2] G. R. Stewart, Z. Fisk, J. O. Willis, and J. L. Smith, Phys. Rev. Lett. **52**, 679 (1984).



図3: カリフォルニア大学アーバイン校にて、筆者、Jing Xia さん、Zackery Fisk さん。

CIFAR Quantum Materials Summer School 2019

2019年4月8日-13日 (Vancouver, Canada)

高木、高根、山田、山本は、バンクーバーにて開催された CIFAR Quantum Materials のサマースクール (4月8日-10日) と本会議 (4月11日-13日) に参加しました。本報告書では、参加者の視点から会議の様子についてご報告いたします。



高木 大治郎

名古屋大学 田中研究室
博士後期課程 1年

発表内容：
Kitaev 鎖における準古典近似を越えた奇周波数クーパー対の理論

CIFAR Quantum Material Summer School と Program Meeting では、2次元物質についての講演を聴き、自らの研究に関するポスター発表を行いました。自らの発表では、Kitaev 鎖の接合系における奇周波数クーパー対の近接効果の様子について説明を行いました。発表を通して、実験との関連性についての質問をいただき、実際の実験に即した系での計算への発展が必要であると感じました。他者の講演では実験系のもが多く、理解するのが難しいものもありました。しかし、磁場に対して特異な応答を見せる MoS_2 に関する講演 [岩佐義宏教授 (東京大学)]、今もクーパー対の対称性が議論されている Sr_2RuO_4 に関する講演 [Catherine Kallin さん (McMaster University)] を聴き、実際の物質に即した系での近接効果や奇周波数クーパー対に関する研究を行っていく必要性をますます感じました。ポスター発表では、Hao Zhang さん (Toronto University) の YBCO の接合系における近接効果の発表が印象に残っています。PBCO/YBCO/PBCO 接合系とは異なり、LCMO/YBCO/LCMO 接合系や LNO/YBCO/LNO 接合系では YBCO の層の厚さが T_c に大きく影響することがわかり、物質構造を意識した理論計算を行ったらどうなるのか調べてみたくなりました。

Vancouver の街並みを一言で表すと、"自然豊かな名古屋の栄" で、とても親近感を感じました。ご飯も美味しく、景色も美しく、とても過ごしやすい街でした。今回は私にとって初めての海外滞

在となりましたが、日本で留学生と英語で話すのとは異なり、海外で英語を話す難しさを感じ、自分の英語力を磨いていこうと思うきっかけになりました。

今回このような素晴らしいプログラムへの参加の機会を与えていただき感謝いたします。今回の TMS からの CIFAR 派遣に際しまして特にお世話になりました、京都大学の前野教授、秋野さん、岡崎さん、CIFAR の Grace Wong さんには心より感謝申し上げます。また、日本から行動を共にした高根さん (東北大学)、山田さん (東京大学)、山本さん (京都大学) に感謝いたします。この経験を活かし、国際的に活躍できる研究者を目指して、今後も精進していきたいと思えます。最後に、カナダから帰国したら何故か 1000m のベストタイムが 10 秒速くなっていました。

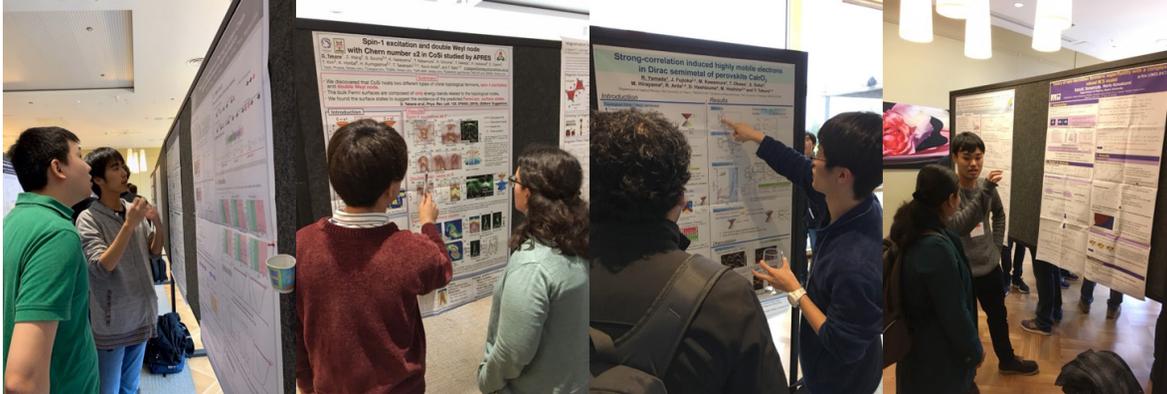


高根 大地

東北大学大学院 光電子固体物性研究室博士課程後期 2年

発表内容：
ARPES によるチャーン数 2 を持つ CoSi 中のスピン -1 励起と二重ワイル点の観測

今回私は、TMS とカナダ学術団体 CIFAR の支援を受け、カナダバンクーバーで開催された CIFAR QM Summer School & Program Meeting に参加し、自身の最近の研究結果をポスターで発表するとともに、二次元ファンデルワールス物質を中心とした最先端の研究内容についての講演を聴講しました。前半の Summer School では、二次元物質研究分野でトップレベルの講師 6 人の方が、それぞれ 2 時間という長い持ち時間のなかで、ご自身の研究のバックグラウンドから最新の結果



ポスター発表の様子

まで講義されました。どの講師の方も講演の前半1時間ほどを非常に丁寧な実験原理の説明や研究のモチベーションの説明に割いてくださり、私のような専門外の学生にも現在の二次元物質の研究トピックが理解できるように工夫されていました。特にP. J. Herrero先生(マサチューセッツ工科大学)のMagic Angle Grapheneの強相関絶縁体相及び超伝導相や、単層1T'-WTe₂の量子スピンホール効果についての実験結果、さらに、E. Rotenberg先生(Advanced Light Source)のNano-ARPESで観測したトライオン励起に関係すると思われるWTe₂でのバンド変調の実験結果を非常に興味深く拝聴しました。後半のProgram Meetingは最先端の研究結果を各研究者の方が発表され、発表中でも非常に活発に質問・議論が飛び交い、殆ど講演者が時間を超過し、しかも議論が終わるまで誰も止めようとしなないという、日本ではあまり見ない光景を目にし、国・団体による違いを肌で感じました。

今回のSummer SchoolとMeetingでは全ての参加者が同じホテルに泊まり、同じ会場で朝食から夕食までともにするため、他の研究集会に比べ非常に密な交流をすることができました。ポスターセッションも合計5時間以上用意されており、特にケルン大学の学生とは、物理についてはもちろんドイツでの学生生活や博士課程卒業後の進路を含め非常に深い話をすることができ、今後の進路や共同研究にもつながる関係を作ることができ



Summer Schoolでの講義

した。他にも、Summer Schoolの講師で空間分解ARPESの専門家E. Rotenberg先生をはじめとして、新しいワイル半金属の単結晶合成を行っている学生や現地UBCのARPES研究室(A. Damascelli研究室)の学生と自身の研究について議論でき、今後の研究のヒントや世界のARPES実験装置の現状についての情報を得ることができました。

最後に、滞在の補助をいただいたTMS及びCIFARの皆様、また日本から一緒に参加した高木さん、山本さん、山田さんにこの場を借りてお礼を申し上げます。



山田 林介

東京大学大学院 十倉研究室
修士課程2年

発表内容：
強相関ディラック半金属CaIrO₃における高移動度電子と巨大磁気抵抗

カナダのバンクーバーにて開催されたCIFAR QUANTUM MATERIALのサマースクールと本会議に参加し、第一線の研究者による講演の聴講と自身のポスター発表を行ってきました。本スクールでは、二次元ファンデルワールズ材料を中心に講義が行われました。一日当たり、分野を代表する教授による2時間の講義と学生による30分の発表が二つずつ行われました。それぞれの発表の間には30分以上のCoffee breakが入っており、全体的にゆとりを持った時間配分になっていました。そのおかげで、講義は分野の背景や基礎知識の説明が丁寧であったり、数多くの質問が出たり、詳細な議論が活発に行われていたりしました。特に、長いCoffee breakの間には様々な分野の方々と交流を深めることができました。講義の中で強

い関心を持ったのは、Pablo Jarillo-Herrero 教授 (Massachusetts 工科大学) による Magic Angle Graphene に関する講義でした。超伝導相の磁場依存性や圧力下での超伝導相の発現など、様々な実験結果を踏まえて明快に説明がなされていました。研究内容はもちろんですが、私たち学生を含めて分野の専門家以外にも研究の重要性や面白さが伝えられるプレゼン力にも驚きました。

ポスター発表では多くの参加者と議論を行いました。特に、自身の研究を始めるきっかけとなった理論の提案者である Toronto 大学の Yong Baek Kim 教授と Hae-Young Kee 教授に研究内容を紹介することができました。強い関心を持って頂き、更なる実験の提案をして頂くなど有意義な発表となりました。

最後に、諸費用を負担していただいた新学術領域と CIFAR の皆様に、感謝申し上げます。また、日本から一緒に参加した高根さん、高木さん、山本さんにお礼申し上げます。この経験を生かして、今後も研究に励んで参ります。



山本 和樹

京都大学大学院 川上研究室
修士課程 2年

発表内容：
非エルミート BCS モデルに基
づいたフェルミ超流動の理論

今回私はサマースクールとそれに続く本会議に参加しました。どれも非常に興味深い講演でしたが、サマースクールで最も興味深いと思ったのは、Oskar Vafek 先生 (National High Magnetic Field Laboratory) の講義です。最近非常に話題となっている twisted bilayer graphene の

理論についての解説がとても詳細で分かりやすいものでした。また本会議においては、Ian Affleck 教授 (UBC) のマヨラナハバードモデルについての講演がとても興味深く楽しいものでした。マヨラナ粒子の統計性についての基本的な性質から、トポロジ、場の理論と繰り込み群によるアプローチ、渦格子といったことまで渡る幅広い内容でした。

今回の CIFAR のプログラムに参加して最も有益だったのはポスター発表でした。サマースクールでの発表では主に学生の間で議論を交わすことができました。幅広い分野の人が研究会に参加していたため、普段自分のいる研究室ではあまり馴染みがないような視点からの意見を聞くことができました。そして、本会議ではさらに実りある議論を交わすことができました。特に超伝導の理論の専門家である André-Marie Tremblay 教授 (シャールブルック大学)、Hae-Young Kee 教授 (トロント大学) とは、お二方ともおよそ 40 分にもわたって議論をさせて頂き、とても貴重な時間を過ごさせていただきました。僕の研究を理解した上でクリティカルな質問を多数して頂き、それに答えている内に関連分野、果ては今後の研究についてまで議論が広がっていくというもので、非常に楽しいあつという間の時間でした。

今回の滞在ではルームメイトが外国人であったため英語も非常に上達したように感じます。サマースクールで友達になった UBC の学生とは連絡先も交換して、京都を案内することになり、国際的な交友の輪もとても広がりました。

最後に、滞在の補助をしていただいた TMS 及び CIFAR の皆様、また日本から一緒に参加した高根さん、高木さん、山田さんにこの場を借りてお礼を申し上げます。



情報交換会での様子



集合写真

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

Gwansuk Oh

浦項工科大学校 大学院生

受入研究者：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)

受入期間：2019年1月15日(火)～4月12日(金)

Near the end of the second semester in my master-doctor unified course, I was kindly introduced to the Junior Researcher Exchange Program (JREP) of the Topological Materials Science (TMS) project by professor Yoshiteru Maeno. The opportunity came invaluable to me not only as I was aware of professor Maeno's renown in the field, but also because I have been developing a lot of interest in the crystal growth techniques which professor Maeno's group specializes. Being a member of a rather newly established group at my university, I have not had many seniors to be learned about crystal growth techniques and all the know-hows in experiments, but my three-months visit to Kyoto University has taught me a lot about both the experimental techniques and the generals about the field.

My visit to Kyoto University had two main objectives: (1) to learn the floating-zone growth technique of single crystalline metal oxides and (2) to search for a new platform to study magnetic frustrations. Being encountered to an issue related to the quality of samples in my first year's study, the floating-zone technique was an enthralling method to me as it was capable of producing pristine single crystalline samples with centimeters of sizes. The reason behind the high efficacy of the technique was because it completely abolished the use of crucibles which often contaminated the molten liquid of starting materials in melt-based growths. Instead, the technique utilized a sintered rod suspended in the midair and melted only a small portion of the rod which then traversed from the one end to the other to produce a single-crystal. Such small region of molten "zone" was in fact the key to the success of the method as the sharp temperature gradient lying at the interface

between the liquid and solid phase prevented the constitutional supercooling which could hinder the growth of single crystals [1].

Despite the simplicity of the concept, the actual implementation of the technique involved careful act and considerations for each step to avoid possible impurities in the resulting crystals. For this reason, the Ruddlesden-Popper phases of strontium ruthenates were the good platforms for the training as each members of the series possessed characteristic magnetic properties that could easily be detected in either the Physical Property Measurement System (PPMS) or the Magnetic Property Measurement System (MPMS). Especially, the first member of the series: Sr_2RuO_4 with superconducting ground state was my first goal since the critical temperature was highly correlated to the presence of ruthenium defects or deficiencies [2]. Fig.1 summarizes the results of my training of Sr_2RuO_4 growths. The AC susceptibility measurement using the techniques developed in professor Maeno's lab [3] recorded the critical temperature of 1.48 K at best of my results while the suggested optimal was 1.51 K [4]. Accompanying some minor variations to the conventional procedures that I developed along the way of the training, I was able to consistently produce the high quality samples after a month and a half.

Having become comfortable with the technique, I also had a privilege to make several trials to grow some other phases of strontium ruthenates including Sr_3RuO_7 and a hypothetical structure which was suggested in the community long before. Although the results were not as satisfactory as those of Sr_2RuO_4 , they have given me some motivations to explore the still remaining possibilities in strontium

ruthenates and other variants by the use of the floating zone technique.

Fortunately, after accomplishing the first half of my goal, I was also able to afford some time for the second half which was to develop a new system with magnetic frustration. Despite the rather vague research objective, professor Maeno generously provided me some good references to look into and offered me a candidate material to work on. Although I had to confront some issues in the synthesis and the handling of the material, I was able to succeed in confirming the existence of the phase and finding the right synthesis procedures. However, some issues could not be solved within the confines of time, and whether the material will retain the expected physics is questionable, hence I found an urge to continue the investigation in the future.

Finally, I would like to leave short words of gratitude to professor Maeno and all the members of Quantum Materials Laboratory for hosting and supporting my

stay at Kyoto University. Having spent only a year in a graduate school, and even, having the most of that time spent on course-works due to my school's curriculum, my visit to Quantum Materials Laboratory was in fact the beginning of my research and I am very thankful for all the supports that I was offered. I learned more than I bargained for because of all the kind advices and helps from the students and professors of Quantum Materials Laboratory and gained strong motivations to my future work. It was a great privilege for me to meet bright students of Kyoto University and to start out my degree knowing that there are a lot of motivated people around the world. I sincerely thank everyone.

- [1] Dhanaraj. G., *Springer handbook of crystal growth*. Heidelberg: Springer (2010)
- [2] A. P. Mackenzie *et al.*, *NPJ Quantum Mater.* **2**, 40 (2017).
- [3] S. Yonezawa *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 093903 (2015).
- [4] Z. Q. Mao *et al.*, *Mater. Res. Bull.* **35**, 1813 (2000).

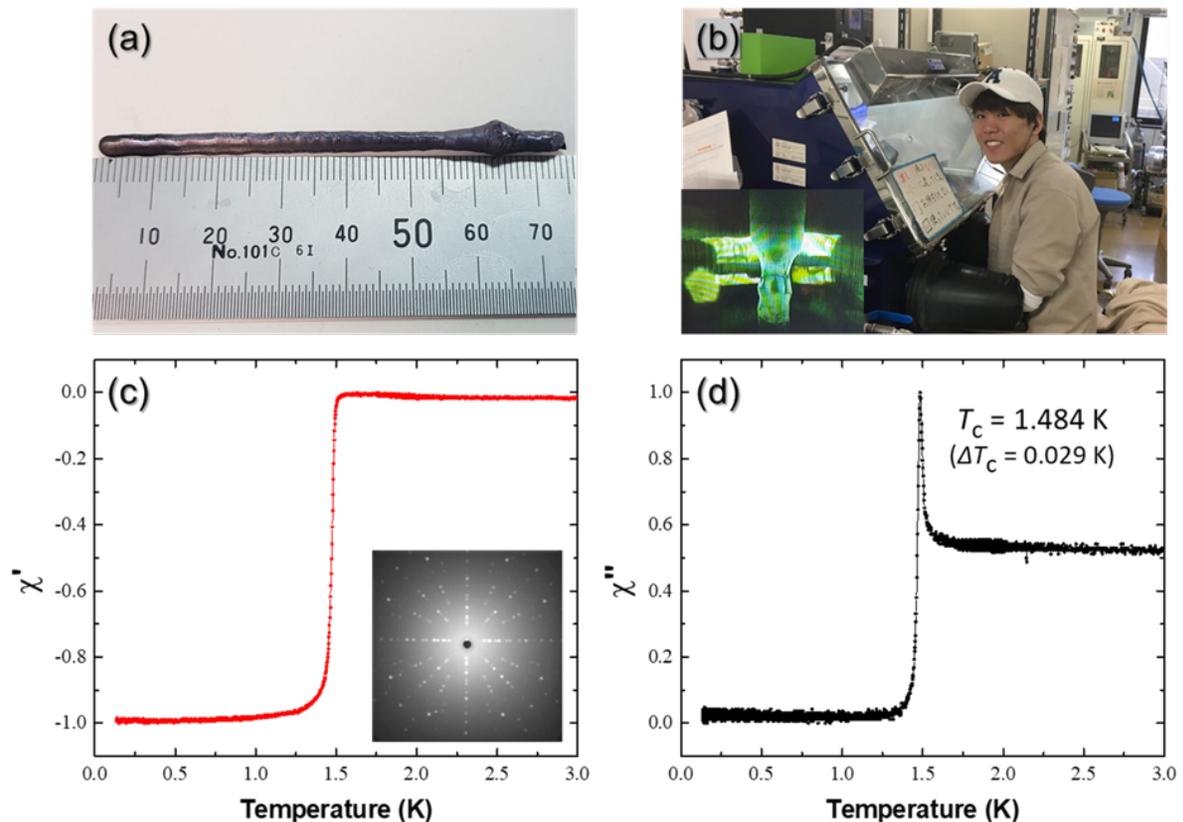


Fig 1. Growth and synthesis of crystals. (a) Sr_2RuO_4 sample grown using the floating-zone technique, (b) Preparation using the glove box and the floating-zone growth process (inset), (c) the real and (d) the imaginary parts of the AC susceptibility of Sr_2RuO_4 measured. The inset in (c) shows the typical Laue image of the crystals.

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

川上 拓人

京都大学 基礎物理学研究所 日本学術振興会特別研究員 (PD)

指導教員：京都大学 基礎物理学研究所 佐藤 昌利 教授 (D01)

受入研究者：マックスプランク固体物性研究所 (シュツットガルト) Andreas Schnyder グループリーダー

期間：2019年1月28日 (月) ~ 2月17日 (日)

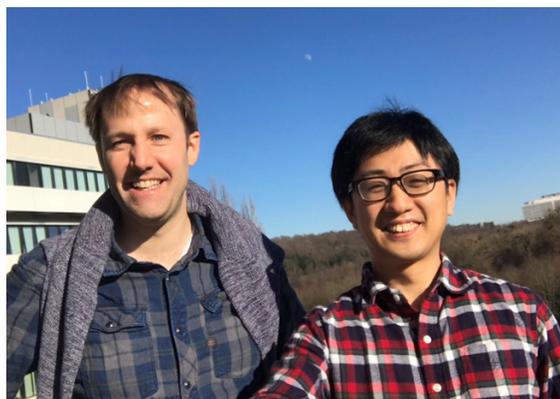
シュツットガルトのマックスプランク固体物性研究所 (MPI-Stuttgart) の Andreas Schnyder 博士のもとに、2019年1月28日から2月17日までの約3週間滞在しました。期間中、スピン3/2トポロジカル超伝導に関する研究と議論を行いました。

これまで私は、逆ペロブスカイト酸化物で実現する、通常よりも大きなスピン3/2を持つ電子系の超伝導と、そのトポロジカル特性について理論研究を行ってきました。今回は、この研究をさらに発展させる目的で、トポロジカル物性及び非従来型超伝導理論の優れた専門家である、Schnyder 博士のもとに滞在させていただきました。滞在中は、Schnyder 博士のすぐ隣の居室を使うことができ、オープンな環境で頻りに議論させていただきました。特にスピン3/2電子系を実現するもう一つの典型例であるハーフホイスラー物質群について検討し、その有効模型と常伝導相での表面状態、及び期待される超伝導状態について解析のアドバイスをいただきました。本滞在中の議論と予備計算により、新たに取り組みそうな課題を持ち帰ることができましたので、今後さらに解析を進め、詳細に議論を詰めていく予定です。

滞在中盤には、私のこれまでの研究についてセミナーで紹介する場を設けていただき、それに基づいて様々な方と議論することができました。滞在先の MPI-Stuttgart には TMS A01 班、高木英典先生のグループもあり、研究交流の大変良い機会が得られました。特に、逆ペロブスカイト Sr_3SnO

の実験を実施されている中村浩之博士には、今後の展望等について議論していただきました。また、Schnyder 博士のグループ学生、Hirschmann 氏には同氏が現在進めているスピン3/2電子系に関する理論研究プロジェクトについて、貴重な情報を提供いただきました。さらに滞在期間が偶然重なった中国科学院 KITP の Ching-Kai Chiu 博士とも、トポロジカル超伝導量子渦におけるマヨラナ束縛状態に関する議論を行うことができました。これらのインフォーマルな議論を通して多くの関連トピックの情報収集ができたという点でも、非常に有意義な滞在期間でした。

最後に、このような貴重な機会を与えていただいた若手研究者派遣・招聘プログラムにお礼申し上げます。また、お忙しい中私の滞在を快く受け入れてくださり、議論に多くのお時間を割いていただきました Andreas Schnyder 博士に心より感謝いたします。



ホストの Andreas Schnyder 博士 (左) と私 (右)

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

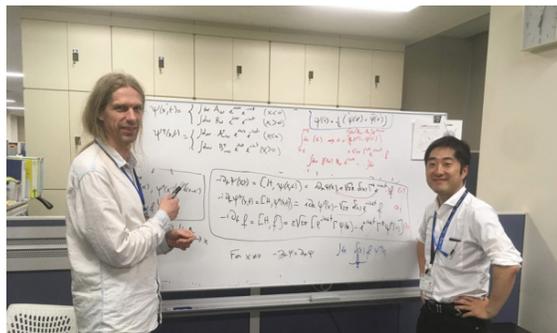
Thibaut Jonckere 博士

フランス国立科学研究センター

受入研究者：村木 康二 グループリーダー

NTT 物性科学基礎研究所 (C01)

受入期間：2019年5月21日(火)～6月13日(木)



Discussion with Dr. Hashisaka at NTT

JREP プログラムを利用し、2019年5月21日から約4週間、Jonckere 博士に NTT 物性科学基礎研究所を中心に滞在していただきました。Jonckere 氏は量子輸送現象の若手理論研究者であり、我々のグループの実験に深い興味を持ってくださっています。今後の共同研究のための第一ステップとして、実験と理論の密な情報交換を行う目的で、NTT に滞在していただきました。



I stayed at NTT Research Laboratories in Atsugi from May 21 2019 to June 13 2019, to work with Dr. Hashisaka Masayuki, in the Quantum Solid State Physics group of Dr. Muraki Koji. I am a theoretician, with experience in the transport of correlated uni-dimensional electronic systems, like the edge states of the (fractional) quantum Hall effect. So the goal was to exchange expertise with Dr. Hashisaka, Dr. Muraki and collaborators, who are performing transport experiments in fractional quantum Hall systems. I also had the opportunity to visit different research groups at Tohoku University in Sendai, Tokyo University (Kashiwa campus) and Kyoto University.

One of the research topic studied by Dr. Hashisaka in Dr. Muraki's group is an experiment which study electronic transport in a semiconductors structure placed in the fractional quantum Hall effect. In this fascinating state of matter, transport occurs at the edge of the sample only, and the elementary excitations in this system have a

fractional charge, for example $e/3$ in the simplest case. In their latest experiment, they study the transport at the interface between the integral quantum Hall effect (with excitations of charge e) and the fractional quantum Hall effect (with excitations of charge $e/3$). This opens interesting perspectives to know more about the non-trivial excitations in this system, and potentially to observe new behavior specific to this type of interface.

I had the opportunity to discuss in details the different aspects of the experiment, in order to understand the role of the different parameters present in the system, and also the experimental constraints. I also had the opportunity to present in details the theoretical approaches to this problem, explaining tools like bosonization, fermionization, Keldysh Green functions techniques, etc. The discussions have thus been a fruitful exchange between the experimental and the theoretical expertise. The goal is eventually to be able to describe quantitatively the experimental results using the theoretical models and techniques mentioned above, and the basis of the description have been well established during these discussions.

During my stay, I also add the opportunity to visit several other groups in Japan. On May 27 I was in Sendai, where I visited the group of Prof. Shibata Naokazu from Tohoku University, who performs DMRG calculations relevant for the fractional

quantum Hall effect. These numerical calculations offer very useful results which are relevant for the experiment. I then visited the group of Prof. Nomura Kentaro, where I gave a seminar titled "*Revealing Majorana bound states properties with transport in three terminal setups*".

On June 3 and 4, I was at the Kashiwa campus of Tokyo University, visiting the Institute for Solid State Physics. On June 3, I visited the group of Prof. Katsumoto Shingo, where I also presented my seminar "*Revealing Majorana bound states properties with transport in three terminal setups*". This group performs several experiments on quantum solid state physics, involving for example superconductors and spin effects, quantum Hall states, etc. I had the opportunity to discuss about these experiments with Prof. Katsumoto and with Dr. Nakamura Takemoto. On June 4, I visited the group of Prof. Kato Takeo, who is a theoretician specialized in theoretical electronic transport, with whom I had the opportunity to collaborate in the previous years. Finally, on June 7, I visited the group of Prof. Matsuda at the University of Kyoto. This experimental group is specialized on strongly correlated electron systems, and also topological phenomena in superconductors and quantum spin systems. These topics are closely related to my interest, in particular with topological superconductivity. I also had the opportunity to present my seminar there, "*Revealing Majorana bound states properties with transport in three terminal setups*".

To conclude, this stay was in my opinion very useful, productive and enjoyable. On the one hand, I had enough time to discuss with Dr. Hashisaka and Dr. Muraki about many important aspects of their experiment, and we can reasonably hope to combine our experimental and theoretical expertise to obtain a good description of the experiment. On the other hand

I had the opportunity to meet several different groups at different important universities, and to know more about the interesting physics which is made in these groups.



滞在期間中、Jonckere 氏には主に① NTT 研究者（村木、橋坂）との研究ディスカッション、② NTT 研究者（橋坂）に対する量子ホール系における量子輸送現象理論のレクチャー、③東北大学、東京大学、京都大学における TMS セミナーを行っていただきました。①の研究ディスカッションでは、NTT における実験結果に対して理論的な解釈を試みていただき、非常に有意義な議論を行うことができました。これを足掛かりとして、今後は密接な共同研究を展開していきたいと考えています。②のレクチャーでは、量子輸送現象の理論計算手法について詳しい説明をしていただき、橋坂の今後の研究の進展にとって重要な機会となりました。③のセミナーでは、マヨラナゼロモードを観測する新手法について紹介していただき、TMS メンバーにとって大変興味深いご発表でした。

Jonckere 氏は日本の文化について高い関心を持っておられ、滞在中は日本の生活を大いに満喫されたようです。これからも頻りに日本を訪れるとのことで、今回の滞在は今後の密接な研究交流のスタートとなる、非常によい機会でした。



Giving a seminar in Prof. Matsuda group at Kyoto University

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

高根 大地

東北大学 大学院 理学研究科 博士課程後期 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)

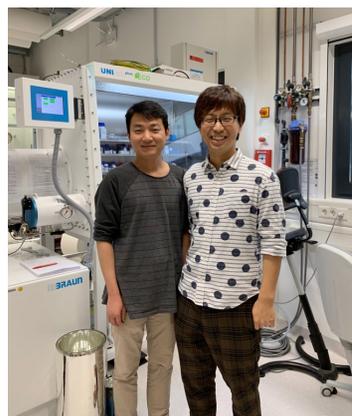
受入研究者：ケルン大学 Institute of Physics II 安藤陽一 教授 (B01)

受入期間：2019年7月18日(金)～10月18日(金)

ケルン大学 Institute of Physics II の安藤陽一先生のもと、2019年7月18日から10月18日までの約3ヶ月間、「新奇トポロジカル半金属物質の単結晶育成と物性解明」というテーマで共同研究を行いました。具体的には、反強磁性秩序を持つトポロジカル半金属候補物質 CuMnAs 等の単結晶育成、単結晶品質評価や磁場下伝導特性の測定を行いました。

今回の滞在では新たなトポロジカル半金属候補物質の単結晶育成に取り組み、その結晶性評価や磁場中伝導実験を行いました。普段はすでに合成された単結晶物質に対して角度分解光電子分光を用いてその電子状態の観測等を行っている私にとって、単結晶の育成、伝導特性の評価は全く新しい体験で、ポスドク研究員の Yongjian Wang 博士に初歩から単結晶育成のいろはを教わりながら実験を進めました。実際の単結晶育成ではなかなか目的相の単結晶が得られず、焦った時期もありましたが、1ヶ月をすぎる頃にはいくつかの物質について単結晶を得ることが出来ました。その後、EDX、XRD を用いた単結晶評価、PPMS による磁場下での伝導測定などを行い、CuMnAs 単結晶において高移動度電子の存在を示唆する実験結果を得ることができました。この実験結果についてはこれまで報告されている結果とは異なる部分あり、CuMnAs 本来の性質ではない可能性もあるため、再現性やその起源について慎重に議論していこうと考えております。また、今回得られた単結晶の一部は、東北大学に持ち帰って角度分解光電子分光を用いた研究も行いたいと考えております。

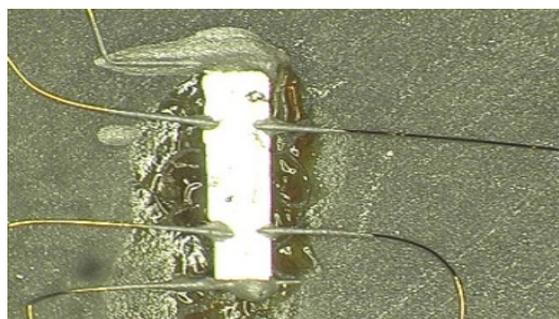
安藤研究室は10人のポスドク研究員が在籍しており、それぞれ6グループ程度のサブグループに分かれて様々な研究を展開しているため、2週間に1回行われる進捗報告会では様々な視点からの報告・議論が飛び交い、非常に刺激的な環境であ



実験の指導をしてくださった、Yongjian Wang 博士(左)と私(右)。ほとんどの時間を過ごしたグローブボックスの前で。

ると感じました。このような環境の中で物性物理学実験の根幹部分である物質合成方法を学ぶことは、自身の研究室で研究を行っているだけでは得られなかった貴重な経験になったと感じています。また、偶然にも滞在中に在ドイツ物理学者が集まる在ドイツ物理学・応用物理学セミナーがケルン大学で行われていたため聴衆として参加させていただきました。素粒子物理学や、天文物理学、原子核物理学など様々な分野の日本人物理学者がどのようにドイツで研究を行っているのか直接お話を聞く貴重な機会となりました。

最後に、非常にお忙しい中私を歓迎してくださいました安藤陽一先生をはじめとしたケルン大学安藤研究室の皆様にご礼申し上げます。特に Yongjian Wang 博士には多大な時間を割いて単結晶育成や伝導実験に関してははずぶの素人である私を指導していただきました。どうもありがとうございました。そして、3ヶ月という長期間に渡る滞在費の支援と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(JREP)に感謝いたします。



合成した CuMnAs 単結晶を使つての伝導測定試料の様子。

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

橋本 樹

京都大学 基礎物理学研究所 博士研究員 (TOPO-Q PD)

指導教員 : 京都大学 大学院理学研究科 佐藤昌利 教授 (D01)

受入研究者 : University of Twente Alexander Golubov 教授

受入期間 : 2019年9月30日(月) ~ 10月20日(日)

和元年9月30日から10月20日の約3週間にわたって、オランダのTwente大学に滞在し、Alexander Golubov教授とトポロジカル物質表面状態における超伝導について議論を行いました。一般的な超伝導の近接効果についてご教授いただくと同時に、ワーピング効果が強い場合のトポロジカル絶縁体表面における非従来型超伝導の性質について議論を行いました。

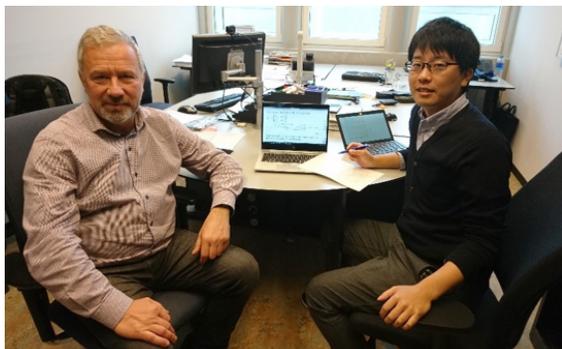
ディラック電子系における超伝導では、磁束中や端にマヨラナ準粒子が現れます。また、ディラック電子系と超伝導体の接合系では鏡面アンドレーエフ反射やクライントンネリングなど、従来の接合では起こらない特異な現象が起こります。Alexander Golubov教授とは、これらディラック電子系特異な現象が、ワーピング効果の強いトポロジカル絶縁体の超伝導においてどのようなようになるか共同研究を行いました。具体的には、今回の滞在中に、トポロジカル絶縁体上の超伝導と常伝導接合におけるコンダクタンスを数値的に計算することができました。

滞在先の Interface and correlated electrons system グループ (ICE グループ) は実験を主としているグループであり、これまでトポロジカル絶縁体 Bi_2Te_3 、 BSTS 、トポロジカル半金属 Cd_3As_2 、 PdTe_2 などにおける超伝導の観測や、これらの物質と超伝導体の接合系におけるジョセフソン電流の測定などを行っています。ワーピング効果はケミカル

ポテンシャルに丸め込むことができ、ゲート電圧等でワーピング効果の強さを変えることができます。このためワーピング効果を制御して新しいエレクトロニクスを実現できるのではないかと考えている。このようなことが実際のセットアップで実現できるか実験家の立場から多くの意見をいただくことができました。

他にも、 LAO/STO 界面における超伝導状態について、ポスドクの J. C. de Boer 氏、修士学生の G. Huitenga 氏らとも議論を行うことができました。ICE グループでは、 LAO/STO の界面超伝導についても最先端の実験をしており、トポロジカル超伝導の可能性について理論的立場から様々な提案ができました。

滞在中セミナーを行う機会をいただき、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態におけるスピン帯磁率について発表を行いました。 Sr_2RuO_4 の超伝導については最近の NMR のナイトシフトの測定で、これまで考えられていたカイラル p 波と矛盾する結果が報告されています。我々の行ったスピン帯磁率の計算結果と実験結果を比較することで、 Sr_2RuO_4 で実現している超伝導の新しいシナリオについて活発な議論ができました。同じく短期滞在中であった名古屋大学の鈴木修氏も同セミナーでトンネル伝導度の新しい計算結果を報告し、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態について議論を深めることができました。



Alexander Golubov 教授 (左) との議論風景。



滞在先でのセミナーの様子。

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

池谷 聡

マックスプランク固体物性研究所

受入研究者：名古屋大学 大学院工学研究科 柏谷 聡 教授 (D01)

受入期間：2019年10月1日（火）～10月9日（水）

2019年10月1日から10月9日の日程で、「スピン3重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の磁場下トンネル効果の研究」を研究テーマに掲げ、名古屋大学の柏谷聡教授の研究室に滞在させて頂きました。この研究は、いまからおおよそ2年前にロシアで行われた国際会議の会場で柏谷先生とさせて頂いた議論がきっかけで始まっています。2年間も熟成させた研究をいよいよまとめ上げるときが来たとき、意気込んで臨んだ名古屋大学の滞在でした。

本研究を始めた当初、私の頭の中にあったシナリオは「ヘリカル p 波超伝導体は面内方向に磁場を印加することでノードル p 波超伝導体に転移する。そしてこのヘリカル-ノードル転移が柏谷先生の行った Sr_2RuO_4 におけるトンネルスペクトルの実験を首尾よく説明する。」というものでした。ヘリカル状態が磁場によってノードル状態に転移し得るという報告は既にいくつか存在していたため、僕もこの点を全く疑っていませんでした。しかしながら、柏谷先生との議論の中で、これまで用いてきた理論模型が、 Sr_2RuO_4 という現実の物質を記述するにはあまりにも理想的あるいは恣意的なものになってしまっていることが分かりました。そこで、滞在中に、 Sr_2RuO_4 薄膜の面内磁場下での相図を徹底的に計算し直しました。その結果、残念ながら、ノードル状態は準安定状態としてしか存在し得ないことが分かりました。その代

わりに、磁場の強度・方向およびラッシュバ型スピン軌道相互作用の強度に応じて、ヘリカル状態、 d ベクトルの向きが印加磁場の方向に依存するカイラル状態、あるいは Bogoliubov 準粒子のバンドが Fermi 準位にかかったギャップレス状態といった多様な超伝導状態が発現し得ることが分かりました。滞在中に得られた新たな相図は柏谷先生の実験をスムーズには説明し得ないために最初は落胆しましたが、結果は結果であり、重要な意味があるはずで。本研究で明らかになった磁場誘起のヘリカル-カイラル転移やヘリカル-ギャップレス転移はエッジ状態の性質あるいはバルクの状態密度の大きな変化を伴うために、物理量に劇的な影響を及ぼすことが予想されます。今後は、当初予定していたトンネルスペクトルの計算も含めて、どのような物理量をどのような条件下で調べれば、これらの相転移が実験的に検出・同定できるのか、柏谷先生に引き続き議論をして頂きながら見定めていきます。

大変お忙しい中で私を招聘してくださった柏谷聡先生、また理論的側面から多くのご助力を頂いた田仲由喜夫先生、矢田圭司先生をはじめとする柏谷研究室・田仲研究室の皆さまにお礼申し上げます。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。



柏谷先生（左）と私（右）の議論風景。



名古屋大学におけるセミナーの様子。

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

Paola Gentile 博士

サレルノ大学

受入研究者：名古屋大学 大学院工学研究科 田仲 由喜夫 (B01)

受入期間：2020年1月12日(日)～1月18日(土)

Gentile氏は1月12日から1月18日名古屋大学および京都大学に滞在されました。名古屋大学では多軌道トポロジカル超伝導に関する議論を行い、1月14日にTMSセミナーで発表しました。京都大学ではトポロジカル超伝導に関する議論を川上(領域代表)前野(A代表)佐藤(D計画)柳瀬(D公募)らのグループとの議論を行いました。1月15日にTMSセミナーで発表をしました。

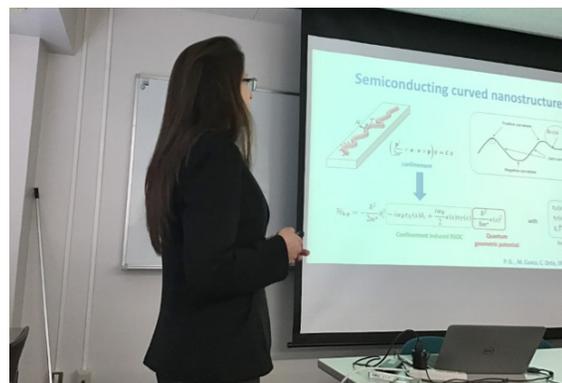


My research experience deals with the investigation of physical systems with competing orders, like in particular superconductivity and magnetism, and systems where spin-orbit coupling plays a crucial role in driving topological phases, especially in conjunction with non trivial geometric curvature. The interplay of these physical ingredients in multiorbital systems has been not deeply explored yet, especially within the context of the possible emergence of non trivial topological phases. The aim of my visit to Nagoya University was to discuss the possible perspectives about this topic, in order to open and start new directions of investigation connected with the ongoing collaboration between my group in Salerno and Prof. Tanaka's group in Nagoya.

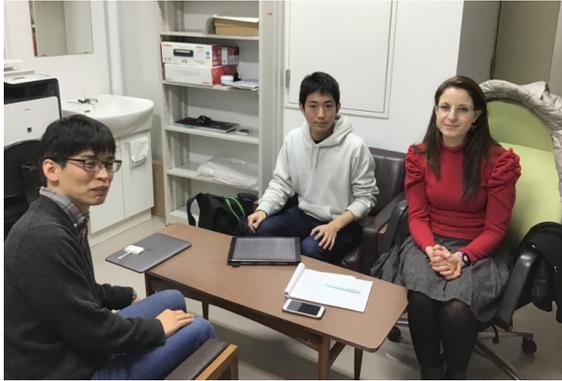
My scientific program started on January 13th, 2020 with the visit to Nagoya University and discussions with Prof. Tanaka on various problems including Josephson effect in multiorbital superconductors in the presence of inversion symmetry breaking and orbital Rashba coupling.

A manuscript on this topic, involving Prof. Tanaka's group and my group in Salerno, is currently in preparation.

On January 14th, 2020, in the morning, I discussed with Prof. Atsuo Shitade (Institute for Molecular Science of the National Institutes of Natural Sciences, Okazaki) about the Rashba spin-orbit coupling induced by geometry in curved systems without atomic spin-orbit coupling. We also discussed about the Edelstein effect in two coupled DNA chains. Then at 13:30 I gave a TMS seminar at Nagoya University about "Geometrically tunable platforms for spin-orbitronics and superconducting spintronics". In this seminar I gave an overview of the recent results I got with my group in Salerno about the impact that nanoscale geometry has on electronic, topological and superconducting properties of low-dimensional systems. I have illustrated the key achievements that ensued from combined theoretical and experimental studies which we developed in the last five years in collaboration with other three international



1. Seminar at Nagoya University on January 14th, 2020.



2. Discussion with Prof. Katsuhisa Taguchi (on the left) and Dr. Nobuyuki Okuma (in the center) at Kyoto University on January 15th. 2020.

research teams, with the financial support of an European project. The discussed results go from the experimental demonstration of the geometry-induced effects on pure spin currents in metallic channels, to the identification of a geometric control of quantum geometric phases in deformed quantum rings, and their potential deployment for the design of new spin interferometers. I also showed the possibility to exploit the interplay between geometry, Rashba spin-orbit coupling and superconductivity as a tool for the realization of novel platforms for spintronics and superconducting spintronics. After the seminar I discussed in details about the results I presented and about the used theoretical approaches with Prof. Atsuo Shitade and Dr. Sho Nakosai from Nagoya University

On January 15th and 16th, 2020 I visited Kyoto University, where I had very stimulating interactions with the research groups led by Prof. Yanase, Prof. Kawakami, Prof. Sato and Prof. Maeno.

The visit started on January 15th. Soon after my arrival, at 13:00 I gave the seminar on “Geometrically tunable platforms for spin-orbitronics and superconducting spintronics” at Department of Physics of Kyoto University. The topics I addressed in this seminar were the same discussed during my seminar in Nagoya.

After the seminar I had a meeting with Prof. Katsuhisa Taguchi and Dr. Nobuyuki Okuma from Kyoto University. Prof. Katsuhisa Taguchi illustrated me some very interesting results about the photovoltaic anomalous Hall effect in line-node semimetals and about the photovoltaic chiral magnetic effect in Weyl semimetals. Dr. Nobuyuki Okuma presented me the case of a superconducting nanowire with spin-dependent non-Hermitian hopping, showing me how a topological quantum phase transition can be driven by infinitesimal cascade instability. We discussed together the possible experimental realization of the proposed system. Then I met Prof. Yoshi Maeno and I discussed with him the recent experimental and theoretical developments about the identification of the superconducting order parameter of Sr_2RuO_4 .

On January 16th, I continued my visit to Kyoto University and I discussed with Prof. Masaki Tezuka about a topic connected the results I presented in my seminar about periodic nanowires with Rashba spin-orbit coupling. Prof. Masaki Tezuka illustrated me the possibility to drive the emergence of topological superconducting phases hosting Majorana end modes by applying a quasiperiodic lattice modulation to a one-dimensional quantum wire with strong spin-orbit interaction, in the presence of a magnetic field and in proximity to a superconductor. We thus discussed the possible extensions of the model



3. Discussion with Prof. Masaki Tezuka (on the right) at Kyoto University on January 16th. 2020.



4. Discussion with Shota Kanasugi (on the left) at Kyoto University on January 16th, 2020.

I have analyzed to the case of incommensurate lattice modulations. We also discussed the effects of different types of spatial modulations on the realization of topological phases in this system. Finally we discussed about the existence of a new universality in classical chaotic systems when the number of degrees of freedom is large, based on numerical evidence for the matrix models and random matrix products.

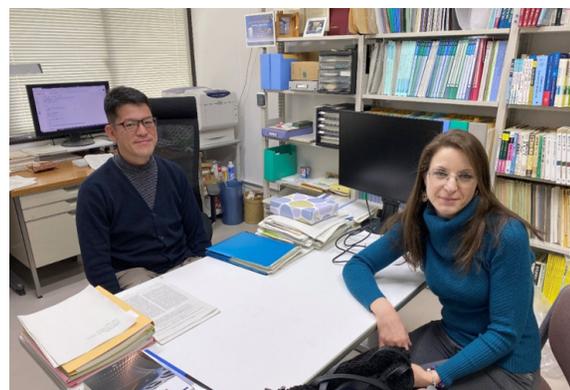
Then I met Shota Kanasugi (student of Prof. Yanase), who illustrated me his studies on SrTiO_3 , showing that this material can host ferroelectric superconductivity, which is characterized by a ferroelectric transition in the superconducting state, due to its multi-orbital nature and due to the presence of the spin-orbit coupling. We discussed other possible scenarios for the superconducting order parameter of SrTiO_3 , considering in particular the case of odd-frequency superconductivity.

Before leaving Kyoto I also had an interesting discussion with Prof. Yanase about the effects of curvature on superconductivity and on the Josephson effect between topological superconductors.

Back to Nagoya, on January 16th evening, I had a Skype meeting with Prof. Tanaka, Yuri Fukaya and Dr. Mario Cuoco, in Salerno, about the last theoretical advances on the Josephson effect in multi-orbital superconductors obtained by Y. Fukaya, in the framework of our collaboration.

On January 17th, I had a meeting with Prof. Tanaka, where we discussed many aspects of the role of curvature on superconductivity, especially on the Josephson effect between time reversal invariant and time reversal non-invariant topological superconductors.

In the afternoon I attended a meeting with Prof. Tanaka, Prof. Keiji Yada, Dr. Tamura Shun, Prof. Masaki Uchida and Prof. Satoshi Kashiwaya about tunneling effect and Josephson effect in Sr_2RuO_4 planar junctions grown from epitaxial films. We have discussed possible theoretical interpretations of these data and relevant models, including multi-orbital effects and spin-orbit coupling, which may help to identify time-reversal symmetry breaking and the specific orbital symmetry of the superconducting order parameter of Sr_2RuO_4 .



4. Discussion with Shota Kanasugi (on the left) at Kyoto University on January 16th, 2020.

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

高三 和晃

カリフォルニア大学バークレー校 ポスドク研究員

指導教員：カリフォルニア大学バークレー校 Joel Moore 教授

受入研究者：東京大学 大学院理学研究科 上田 正仁 教授 (D01)

受入期間：2019年12月27日(金)～2020年1月17日(金)

2019年12月27日から2020年1月17日にかけて、前半は京都大学の凝縮系理論グループ、後半は東京大学の上田研究室に滞在し、多くの議論をさせていただきました。これについてご報告いたします。

私は、昨年3月に京都大学で学位を取得し、5月よりカリフォルニア大学バークレー校にポスドク研究員として所属しています。現在は、「トポロジカル絶縁体」という名前を付けた論文として有名な Moore-Balents [1] の著者でもあり、トポロジカル物質科学に多大な貢献をされてきた Joel Moore 教授のもとで研究しております。学生時代を通じて、光や電場で駆動された非平衡状態 (Floquet 状態など) にある凝縮系が示す物理を調べてきましたが、最近はそのに関連して非平衡量子開放系、特にその簡便なアプローチとしての非エルミート量子系にも興味を持って研究しております。この度は、Floquet 系や非エルミート量子系に関して先駆的な研究を行っている京大の川上グループや東大の上田研究室のメンバーと議論することで、最新の成果に関する情報を吸収し、それをさらなる発展につなげたいと思い、滞在に臨みました。

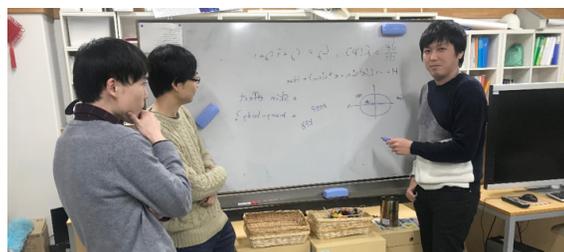
京都大学では、到着した27日から多数の議論を行い、多くの知見を得ることができました。議論に付き合っていたいただいた川上教授、田中(耕一郎)教授、佐々教授、柳瀬教授、凝縮系理論グループ学生の蝶野君、水田君、道下君、兔子尾君に感謝したいと思います。特に、共同研究者でもある水田君には、Floquet 系のダイナミクスに関する新しい研究のアイデアを詳しく説明してもらい、数時間に渡って議論することで理解を深めることが出来ました。この結果に関しては、論文にまとめることを目指して現在も議論を続けているところです。このように時間をかけて議論をして研究を前進させるには、やはり直接会って議論するのが1番だと改めて実感しました。

東京大学でも、沢山の方と議論することが出来ました。滞在先の上田教授との議論では、私が最

近取り組んでいる強電場下の強相関電子系が示すスピンダイナミクスに関する研究 [2] について議論させていただき有益なコメントをいただいた他、物質中の非平衡現象の物理として今後どういう方面を探索していくべきか示唆的なご意見をいただき勉強になりました。また、上田研究室の助教の中川さんや研究員の芳賀さんとは、自身が以前より興味を持っている「非対称なホッピングを持つ非エルミート量子系(ポイントギャップの意味で、トポロジカル相転移を示す簡単なモデルとして知られている [3])」や、それに関連する量子開放系について議論させていただき、今後の研究の指針を立てることが出来ました。上田研究室以外の方とも多く議論させていただき、大変勉強になりました。特に、物理工学科の森本准教授とは、トポロジカル物質における非線形光学応答に関する私のアイデアについてご意見をいただき、実際にどのような計算をすれば良いか目処が立ちました。

私が普段いるカリフォルニア大学バークレー校と日本では、研究の方向性が若干異なる面があり、普段聞けない意見を多数聞くことができました。ここで得られた知見を最大限研究に生かせるよう頑張りたいと思います。最後に、お世話になりました滞在先の川上教授、上田教授、各研究室秘書の岡崎さん、竹内さんにお礼申し上げます。また、ご支援いただいた若手研究者派遣・招聘プログラムに感謝いたします。

- [1] J. E. Moore and L. Balents, Phys. Rev. B **75**, 121306(R) (2007).
- [2] K. Takasan and M. Tezuka, in preparation.
- [3] Z. Gong, Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).



東大上田研究室での議論の様子。左から学生のGongくん、助教の中川さん、筆者。

2019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5回 TMS 領域研究会（国際会議） International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019)

2019年12月3日 - 7日(京都大学 百周年時計台記念館 国際交流ホール)



紅葉の映える初冬の5日間、京都大学吉田キャンパスの時計台記念館にて、本新学術領域の集大成となる第5回領域研究会を国際会議「International Conference on Topological Materials Science 2019」(略称: TopoMat2019)として開催しました。参加者は179名(国内159名、国外20名)と前回2017年5月の国際会議よりはやや少なかったものの、プレナリー6件、招待講演12件、口頭発表14件、ポスター発表116件(前回は96件)と、多くの発表が行われました。特にポスターは領域外からも含めて多くの申し込みがあって講演数が大幅に増加し、この分野の現在進行形の発展を感じさせました。

3日夕方のウェルカムレセプションは招待講演者の宿泊したホテルに併設のレストランにて行いました。多くの若手も含め69人が参加し、京野菜を使ったイタリアンに舌鼓を打ちながら、会議に先立って議論や交流を深めました。なお、このレセプションで食中毒の疑いが浮上しました。発症された5名をはじめ、多くの方にご心配・ご迷惑をおかけし申し訳ありませんでした。



4日より学術講演が始まり、領域内外の研究者による最新の成果が発表されました。会議のプログラムは敢えて分野融合的に組まれていたと思いますが、以下ではある程度分野に分けて講演・議論の内容を簡単に紹介していきます。

まず、トポロジカル絶縁体および量子ホール効果の物理については、プレナリー講演で Ke He 氏が磁気トポロジカル絶縁体の異常量子ホール効果の高温での実現を目指し様々な物質科学の手法を駆使した取り組みを紹介しました。一方、藤澤利正氏(C01)は量子ホール状態のエッジに生じる1次元伝導状態が朝永-Luttinger液体としての性質を持つことを、様々な半導体制御の方法を駆使してスピンと電荷の分離から決定づける実験を紹介しました。村木康二氏(C01)はInAs/GaSbにおける2次元トポロジカル絶縁相や、それと通常相の境目に出現するワイル半金属相に関する実験を紹介しました。Frédéric Pierre氏は異なる量子ホール状態間の電子輸送における新現象を紹介しました。

トポロジカル半金属については、佐藤宇史氏(B01)はプレナリー講演で角度分解光電子分光(ARPES)による様々なトポロジカル半金属の研究をレビューしました。Double Weyl Fermionなどといった、新たな電子状態の存在も示され、トポロジカル半金属の奥深さを感じさせる講演でした。Xi Dai氏の講演では電子のg因子の固体中での評価と、そのトポロジカル現象における効果が議論されました。山影相氏(D03)はディラックやワイル半金属を超えた新しいトポロジカル半金属で



ある Nodal-line 半金属を紹介しました。鈴木 通人氏 (D03) は反強磁性ワイル半金属における異常量子ホール効果について、その磁気八極子としての解釈や、新しい物質の提案を行いました。

また、これらのトポロジカル物質に関して、Maia G. Vergniory 氏の講演では 2 万以上の物質について電子状態計算に基づきトポロジカル絶縁体・半金属の可能性の有無を示した Topological Materials Database というオンラインデータベースが紹介されました。マテリアルインフォーマティクスがトポロジカル物質科学にも不可欠となりつつあることが感じられました。

トポロジカル超伝導・超流動およびマヨラナフェルミオンについては、会議の冒頭の Amir Yacoby 氏によるプレナリー講演で、磁場やラッシュバ相互作用を巧みに利用した phase-controlled トポロジカル超伝導の概念を紹介し、実際にトポロジカル性を外部パラメーターで On/Off できることが示されました。マヨラナフェルミオンの制御に向けた新たな技術として注目に値します。同じくプレナリー講演を行った Roland Wiesendanger 氏 (上写真) は、超伝導体と磁性体のナノ構造を組み合わせたマヨラナフェルミオン探索の現状を紹介しました。花栗 哲郎氏は超高分解能 STM を使った、Fe(Te,Se) の渦芯におけるマヨラナゼロエネルギー状態の検出を紹介しました。Yuval Oreg 氏は、マヨラナフェルミオンをもつトポロジカル超伝導体の島の列を制御して、超対称場の理論で記述されるような新たな状態を創出する理論研究を紹介しました。田村 駿氏 (B01 PD) はマヨラナ準粒子と奇周波数超伝導ペアについて、両者をつなぐ「Spectral bulk-boundary correspondence」という関係性を提案しました。Eun-Ah Kim 氏はトポロジカル超伝導体の物質設計方法について、スピン

揺らぎの強い系を含むヘテロ構造などの提案を含む講演を行いました。水島 健氏 (D01) はトポロジカル超流動体 ^3He における空間変調を伴う新しい状態について紹介しました。 ^3He に関連しては、佐々木 豊氏が MRI を用いて ^3He -A 相でのカイラルドメインの実空間観測に初めて成功した成果も紹介しました。米澤 (A01 連携) はネマティック超伝導体を一軸圧力で制御する最近の成果について紹介しました。

また、トポロジカル超伝導と関連し、最近超伝導の対称性に改めて注目が集まっている Sr_2RuO_4 に関していくつかの講演がありました。Vadim Grinenko 氏は、ミューオンを用いて時間反転対称性破れが一軸圧下でどう変化するかを調べた最新の成果の講演をし、続いて柏谷 聡氏 (A01) はジョセフソン効果、石田 憲二氏は NMR の最新の結果について講演しました。実験の進歩により従来の「カイラル p 波」シナリオを大きく見直す必要が出てきていることを明らかにした一連の講演でした。さらに、ちょうど一年前に発見された超伝導体 UTe_2 について、柳瀬 陽一氏 (D02) がトポロジカルスピン三重項超伝導の可能性を指摘しました。

マヨラナ粒子実現の舞台のもう一つの候補であるトポロジカルスピン液体については、近年注目されているキタエフ量子スピン液体に関する講演がありました。プレナリー講演者の松田 祐司氏 (A01) は、キタエフ量子スピン液体候補物質においてマヨラナフェルミオンおよび非可換エニオンの存在を実証する半整数熱量子ホール効果の観測を紹介しました。続いて北川 健太郎氏 (A01 連携) により候補物質における NMR 測定と圧力効果、そして物質開発の現状が、宇田川 将文氏 (A01) によりキタエフ量子スピン液体の理論とマヨラナフェルミオンの新しい検出手法などが紹介されました。



トポロジカル物質の光応答について、十倉 好紀氏のプレナリー講演の中で、反転対称性のない結晶系において生じる非相反応答効果のレビューが行われました。特に Shift current や非相反非線形光学効果などを紹介されましたが、これらの効果も Berry 接続などと強く関係しており、トポロジカル現象の更なる広がりを実感しました。また、石原 照也氏 (C01) はメタマテリアルの示すトポロジカルな光応答の最新研究を紹介しました。

さらに、近年発展の著しい非平衡現象に関して、佐藤 昌利氏 (D01) により非エルミート系のトポロジカル相の理論、中川 大也氏によりフロケギャップレストポロジカル相の理論、小布施 秀明氏 (D04) により量子ウォークの理論などが紹介されました。また、実験の面では、James McIver 氏がグラフェンでの光誘起異常ホール効果の実験結果を紹介しました。

ポスターセッションは4日と5日の昼食直後に行いました。恒例のポスタープレビューでは、ポスター数の増加のためにわずか45秒間でのプレビューでしたが、短い時間で印象に残るような多くの工夫が見られました。ポスターセッションでも、どのポスターも非常に盛況で、時間外でもディスカッションをする姿が多く見られました。

6日の夕刻には時計台国際交流ホールで情報交換会を行いました。香港科学技術大学の Xi Dai 氏によるスピーチと、国内アドバイザーの川村 光氏による乾杯の音頭で幕を開けました。京大生協に

よる料理でしたが、かなり料理の質の評価は高かったように思います。時間中にはポスタープレビュー賞・ポスター賞受賞のセレモニーも行いました。受賞者は後に示しますが、多くの学生・若手が成果を上げて素晴らしい発表をしており、今後の分野の発展に大きな期待が持てました。情報交換会と会議の会場が一緒だったので、準備と片付けが少し大変で、さらに参加者の方にも小一時間待つていただくことになりました。もしかしたら別会場にしておいた方がよかったかもしれません。

また、会場横の休憩室では、「国際周期表年」の展示を行いました。ディスカッションスペースも兼ねており、多くの参加者が議論や休憩の傍ら、周期表の発展の歴史などの展示に見入っていました。

思い返すと、2015年に本領域が始まったときは、トポロジは一部の特別な物質のもつ性質であるというイメージがありましたが、この5年間で非常に幅広い物質・現象にトポロジの概念が有用であることが明らかになり、それは今もさらに広まりつつあります。そのことを強く感じた国際会議となりました。

最後になりますが、会議の準備・運営を通じ、領域秘書の岡崎さん、高宮さん、児玉さんにはたいへんお世話になりました。また、会議期間中はアルバイトの学生さんにもたいへんお世話になりました。また、新学術領域研究「トポ物質科学」を通しての、日本学術振興会からの5年間のサポートに感謝いたします。

(文責：笠原 裕一, 米澤 進吾, 手塚 真樹)



TopoMat2019 Program

December 4th (Wed)

- 09:30 ~ 09:40 **Opening**
- 09:40 ~ 10:50 **Majorana I** [M.Sato]
09:40 [4AM-1] Topological Superconductivity in a Phase-Controlled Josephson Junction
A. Yacoby (40)
- 10:20 [4AM-2] Zero-energy bound states in the vortex core and at excess irons in Fe(Se,Te) **T. Hanaguri** (30)
- 11:20 ~ 12:30 **Sr₂RuO₄** [G.-q. Zheng]
11:20 [4AM-3] muSR studies on superconductors that break time-reversal symmetry: Sr₂RuO₄ and Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ **V. Grinenko** (30)
- 11:50 [4AM-4] Josephson effect and time-reversal symmetry of Sr₂RuO₄ **S. Kashiwaya**(20)
- 11:50 [4AM-5] Re-measurement of Knight shift on Superconducting Sr₂RuO₄ **K. Ishida**(20)
- 14:00 ~ 14:45 **Poster Preview A** (45) [M. Kohda]
14:45 ~ 16:15 **Poster Session A with Coffee** (90)
- 16:15 ~ 17:25 **Majorana II** [Y. Tanaka]
16:15 [4PM-1] Topological Superconductivity and Majorana States in 1D and 2D Model Systems
R. Weisendanger(40)
- 16:55 [4PM-2] Super-symmetric Insulating phases of topological-superconductors **Y. Oreg** (30)

December 5th (Thu)

- 09:30 ~ 10:50 **Topological Quantum Phenomena I** [T. Sato]
09:30 [5AM-1] Topological photocurrent - phenomena and materials - **Y. Tokura** (40)
- 10:10 [5AM-2] Effects of Symmetry on the Nature of Topological Phase Transition in a Two-Dimensional System
K. Muraki (20)
- 10:30 [5AM-3] Topological Nature of Photovoltaic Effect in Metallic Metasurfaces with Periodic Arch Structure
T. Ishihara(20)
- 11:20 ~ 12:30 [Y. Nishida]
11:20 [5AM-4] Pseudospin-1/2 Magnetism and Phase Diagram in quest for Kitaev Spin Liquid **K. Kitagawa**(30)
- 11:50 [5AM-5] Observation of a Magneto-piezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal EuMnBi₂
Y. Shiomi(20)
- 12:10 [5AM-6] Insulator-metal transition and topological superconductivity in UTe₂ **Y. Yanase**(20)
- 14:00 ~ 14:45 **Poster Preview B** (45) [T. Mizushima]
14:45 ~ 16:15 **Poster Session B with Coffee** (90)
- 16:15 ~ 17:25 **Topological superconductors** [K. Nomura]
16:15 [5PM-1] Let there be topological Superconductors
E.A. Kim(30)
- 16:45 [5PM-2] Stripe instabilities in confined superfluid ³He: Roles of Majorana fermions and Higgs bosons
T. Mizushima(20)
- 17:05 [5PM-3] Control of nematic superconductivity in Sr_xBi₂Se₃ by uniaxial strain **S. Yonezawa**(20)

December 6th (Fri)

- 09:30 ~ 10:30 **Topological Materials** [Y. Matsuda]
09:30 [6AM-1] Electronic states of exotic topological semimetals studied by ARPES **T. Sato**(40)
- 10:10 [6AM-2] Line-Node Semimetal Materials
A. Yamakage(20)
- 11:00 ~ 12:20 [M. Udagawa]
11:00 [6AM-3] Topological metals induced by Zeeman effect
X. Dai(30)
- 11:30 [6AM-4] Introducing Topological Quantum Chemistry and Topological Materials Data Base
M. G. Vergniory(30)
- 12:00 [6AM-5] Order parameter and Topological features for Large Anomalous Hall Effect **M. Suzuki** (20)
- 14:00 ~ 15:10 **Non-Hermitian/Non-Equilibrium** [M. Nitta]
14:00 [6PM-1] Non-Hermitian Topological Phases
M. Sato(30)
- 14:30 [6PM-2] Floquet Gapless Topological Phases: Classification and Characterization
M. Nakagawa(20)
- 14:50 [6PM-3] Symmetry and Topological Phases in Dynamical Systems: Quantum Walk Approach
H. Obuse(20)
- 15:40 ~ 17:10 **Topological Quantum Phenomena II** [K. Muraki]
15:40 [6PM-4] Transmitting the quantum state of electrons across a metallic island with Coulomb interaction
F. Pierre(30)
- 16:10 [6PM-5] Light-induced anomalous Hall effect in graphene
J. McIver(30)
- 16:40 [6PM-6] Non-equilibrium dynamics of quantum Hall Tomonaga-Luttinger liquids
T. Fujisawa(30)

December 7th (Sat)

- 09:30 ~ 10:50 **Topological Quantum Phenomena III** [Y. Maeno]
09:30 [7AM-1] The road to high temperature quantum anomalous Hall effect in magnetic topological insulators
K. He(40)
- 10:10 [7AM-2] Odd in Frequency Cooper Pairs in Chiral Symmetric Systems
S. Tamura(20)
- 10:30 [7AM-3] Stability of Chiral Domain Structure in Superfluid ³He-A
Y. Sasaki(20)
- 11:20 ~ 12:30 **Majorana II** [S. Fujimoto]
11:20 [7AM-4] Exploration of Majorana in Kitaev dynamics
M. Udagawa(30)
- 11:50 [7AM-5] Half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev quantum spin liquid
Y. Matsuda(40)
- 12:30 ~ 12:40 **Closing**



Poster Preview / Session A (Dec. 04)

- PA-1 Identifying the Quality Indicator for Fractional Quantum Hall Effects by In-situ Control of Disorder **AKIHO, Takafumi**
- PA-2 Spin current as a probe of KT-type topological transitions in magnets **AOYAMA, Kazushi**
- PA-3 Lattice structure and Dirac electrons of group-V elemental solids **ASAKA, Yuya**
- PA-4 The critical point of quantum topological melting **BEEKMAN, Aron**
- PA-5 Superconductivity in $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ thin films grown by molecular beam epitaxy **BLIESENER, Andrea**
- PA-6 Signature of quantum anomalous Hall effect driven by proximity coupling in a van der Waals heterostructure **FUJIMURA, Reika**
- PA-7 Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet **FUJISHIRO, Yukako**
- PA-8 't Hooft anomaly in CP^{N-1} model without flavor symmetry **FURUSAWA, Takuya**
- PA-9 Current noise generation at a $\nu = 1/3$ and $\nu = 1$ quantum Hall junction **HASHISAKA, Masayuki**
- PA-10 Higher-Order Topological Crystalline Insulating Phase in Topological Electride Apatite **HIRAYAMA, Motoaki**
- PA-11 Nontrivial Berry phases arising from real and pseudo spins in nodal line semimetal CaAgAs **HIROSE, Hishiro**
- PA-12 Gate-Induced Superconductivity in a $3R\text{-MoS}_2$ Bulk Single Crystal **HORI, Ryota**
- PA-13 Anomalous photovoltaic effect in van der Waals nanomaterials **IDEUE, Toshiya**
- PA-14 μSR experiments on the antiperovskite oxide superconductor $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ **IKEDA, Atsutoshi**
- PA-15 Anomalous Nonlocal Conductance as a Fingerprint of Chiral Majorana Edge States **IKEGAYA, Satoshi**
- PA-16 Gate-defined topological domain boundary in $\text{InAs}/(\text{In,Ga})\text{Sb}$ composite quantum wells **IRIE, Hiroshi**
- PA-17 Berry phase in the composite Fermi-liquid **JI, Guangyue**
- PA-18 Synthesis and physical properties of layered antiperovskite oxides **KAWAGUCHI, Mayo**
- PA-19 Topological stability of polka-dot phase in superfluid ^3He between parallel plates **KAWAKAMI, Takuto**
- PA-20 Theoretical study of spin torque and domain wall motion on ferromagnetic Kagome lattice **KIM, Sehoon**
- PA-21 Transformation of hedgehog-lattice and nonreciprocal conductance in chiral magnet MnGe **TKITAORI, Aki**
- PA-22 Robust magnetoresistance in disordered quantum anomalous Hall Kagome layers **KOBAYASHI, Koji**
- PA-23 SMoSSbauer spectra of the antiperovskite oxide superconductor $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ **KOIBUCHI, Shun**
- PA-24 Nodal line semimetals in magnetic field **KONYE, Viktor**
- PA-25 Higher-order bulk-boundary correspondence of a topological Mott insulator **KUDO, Koji**
- PA-26 Anomalous & topological Hall effect in magnetically doped topological insulator thin films **LIPPERTZ, Gertjan**
- PA-27 Diamagnetic Currents in Weyl Systems **MAEBASHI, Hideaki**
- PA-28 Topologically nontrivial Andreev bound states **MARRA, Pasquale**
- PA-29 Non-Hermitian physics in disordered Weyl semimetals **MATSUSHITA, Taiki**
- PA-30 Relationship between the non-hermitian property and the Kondo effect in f -electron materials **MICHISHITA, Yoshihiro**
- PA-31 Unusual in-plane anisotropy of the upper critical field of Sr_2RuO_4 under electronic current **MIYOSHI, Takuto**
- PA-32 Floquet engineering of topological phases protected by emergent symmetries **MIZUTA, Kaoru**
- PA-33 Half-integer quantization of Hall conductance in semi-magnetic topological insulator **IMOJI, Masataka**

- PA-34 Non-Hermitian effective Hamiltonian for low-energy quasiparticles **NAGAI, Yuki**
- PA-35 Anomalous reduction of the supercurrent due to the electric field gradient **NAKAMURA, Taketomo**
- PA-36 Nonequilibrium dynamics of Kitaev spin liquids with fractional Majorana excitations **NASU, Joji**
- PA-37 Giant magneto-optical responses in magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ **OKAMURA, Yoshihiro**
- PA-38 Topological Origin of Non-Hermitian Skin Effects **OKUMA, Nobuyuki**
- PA-39 Refined symmetry indicators for topological superconductors in all space groups **ONO, Seishiro**
- PA-40 Magnetic transport properties of ferromagnetic Weyl semimetal in Kagome-lattice shandite **OZAWA, Akihiro**
- PA-41 Top-down fabrication of gate-tuneable bulk-insulating TI nanowires and their quantum transport **ROESSLER, Matthias**
- PA-42 Symmetry Protected Topological Phase of $S=2$ Quantum Spin Chain in Magnetic Field **SAKAI, Toru**
- PA-43 Thin-Film Growth of Thallium-based Ternary Topological Insulators by co-sputtering method **SEGAWA, Kouji**
- PA-44 A non-linear Hall effect in a chiral nonmagnetic compound at zero field **SHIMOZAWA, Masaaki**
- PA-45 Spin Hall Effect in Topological Dirac Semimetals **ITAGUCHI, Katsuhisa**
- PA-46 Bulk-edge and bulk-hinge correspondence in inversion-symmetric insulators **TAKAHASHI, Ryo**
- PA-47 Impact of Non-Kitaev interactions on Kitaev spin liquid state **TAKIKAWA, Daichi**
- PA-48 Thermoelectric current from coexistence of even and odd frequency Cooper pairs at the quantum spin Hall edge **TANAKA, Yukio**
- PA-49 Topological Properties of the Electrides: Ca_2As Family **SANNOMIYA Noriaki**
- PA-50 Anomalous Nonlocal and Nonlinear Transport in Interacting Noncentrosymmetric Metals **TOSHIO, Riki**
- PA-51 Low-noise current measurement on a quantum antidot in a Corbino disk **UCHINO, Tomoki**
- PA-52 Tunneling conductance of Sr_2RuO_4 in a state of spin-singlet and triplet mixture **YADA, Keiji**
- PA-53 Theory of non-Hermitian fermionic superfluidity with dissipation **YAMAMOTO, Kazuki**

Poster Preview / Session B (Dec. 05)

- PB-1 A quantum-dot heat engine acting on quantum-Hall edge channels **AKIYAMA, Shunya**
- PB-2 Spin-to-charge conversion on the edge of quantum spin Hall insulator **ARAKI, Yasufumi**
- PB-3 Probing the robustness of Weyl semimetals Fermi-arcs to surface perturbations **AVRAHAM, Nurit**
- PB-4 Topological duality in Floquet and non-Hermitian systems: two dimensional Floquet Dirac fermion **BESSHO, Takumi**
- PB-5 Vortex Patterns of Atomic Bose-Einstein condensates in a density-dependent gauge potential **EDMONDS, Matthew**
- PB-6 Unconventional magnetoresistance of correlated Dirac semimetallic perovskite CaRuO_3 **FUJIOKA, Jun**
- PB-7 Quantum fluctuations of vortex lattices in binary Bose-Einstein condensates: Phase diagrams and intercomponent entanglement **FURUKAWA, Shunsuke**
- PB-8 Superconductivity on a topological insulator with strong warping effect **FURUKAWA, Shunsuke**
- PB-9 Spin-charge separation of high-frequency current noise generated from a quantum point contact in the quantum Hall regime **HATA, Tokuro**
- PB-10 Nuclear spin relaxation rate near the disorder-driven quantum critical point in Weyl fermion systems **HIROSAWA, Tomoki**

- PB-11 Densely packed spin textures in real space and their interplay with non-trivial electron bands **HIRSCHBERGER, Max**
- PB-12 Anomaly matching and symmetry-protected in-gap states in 1d quantum many-body systems **HSIEH, Chang-Tse**
- PB-13 Spin-wave spectrum of a skyrmion-string structure in a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate **IIDA, Yuya**
- PB-14 Enhancement of the Edelstein effect in edge states of 2D non-centrosymmetric d-wave superconductors **IKEDA, Yuhei**
- PB-15 Development of thin film magnetic topological materials by molecular beam epitaxy **INOUE, Hisashi**
- PB-16 Large anomalous/spin Hall effect and nonreciprocal electric transport in chiral magnets **ISHIZUKA, Hiroaki**
- PB-17 Numerical Study of Magnetic Excitations in Amorphous Ferromagnets **KAMEDA, Mai**
- PB-18 Vortex nucleation dynamics in a spin orbital angular momentum coupled BEC **KAWAGUCHI, Yuki**
- PB-19 Bulk-edge correspondence of a non-unitary three-step quantum walk with PT symmetry **KAWASAKI, Makio**
- PB-20 Chiral-symmetry protected Exceptional-Torus in correlated nodal-line semimetals **KIMURA, Kazuhiro**
- PB-21 Theoretical study of photo-induced phase transition in α -(BEDT-TTF)₃ using Floquet theory **KITAYAMA, Keisuke**
- PB-22 Majorana Multipole Response of Topological Superconductors **KOBAYASHI, Shingo**
- PB-23 Three-dimensional topological magnon systems **KONDO, Hiroki**
- PB-24 Uniaxial-strain Control of Nematic Superconductivity in Sr₂Bi₂Se₃ **KOSTYLEV, Ivan**
- PB-25 Plasmon modes along the interface of integer and fractional quantum Hall regions **LIN, Chaoping**
- PB-26 Magnon Quantum Anomalies in Weyl Ferromagnets **LIU, Tianyu**
- PB-27 Anisotropic spin relaxation rate of three-dimensional chiral superconductors **MAENO, Koki**
- PB-28 Molecular Beam Epitaxy Growth of Superconducting Sn_{1-x}In_xTe (0 ≤ x ≤ 0.67) Thin Films **MASUKO, Makoto**
- PB-29 Imaging the current driven metal insulator transition in Ca₂RuO₄ **MASUKO, Makoto**
- PB-30 Quantized Spin Pumping and Spin-Orbit Torques in Topological Dirac Semimetals **MISAWA, Takahiro**
- PB-31 Z₆ Berry phase in an anti-Kekulé honeycomb model **MIZOGUCHI, Tomonari**
- PB-32 Time-glide symmetric topological quantum walk **MOCHIZUKI, Ken**
- PB-33 Angular dependent nontrivial phase in the Weyl semimetal NbAs **MURAKAWA, Hiroshi**
- PB-34 Weyl-superconductor phases in the multilayer model of Weyl semimetals and superconductors **MURAKAWA, Hiroshi**
- PB-35 Transport properties of the device made of Ca₂RuO₄ under DC current **NARITA, Hideki**
- PB-36 Topological phases of electromagnetic waves in superlattices of negative- and positive- epsilon materials **NARITA, Hideki**
- PB-37 Topological corner and hinge modes in second order topological phases protected by chiral symmetry **OKUGAWA, Ryo**
- PB-38 Phase diagram of a magnetic topological nodal semimetal: Stable nodal line in an easy-plane ferromagnet **OMINATO, Yuya**
- PB-39 Magnetic Susceptibility Quantization of Orbital-Zeeman Cross Term in 2D Insulators **OZAKI, Soshun**
- PB-40 3-dimensional Semimetal under High Magnetic Field **PAN, Zhiming**
- PB-41 An exactly solvable model of magnetic Skyrmions **ROSS, Calum**
- PB-42 Majorana braiding dynamics and non-Abelian statistics in class D topological superconductor **ROSS, Calum**
- PB-43 Tunable Dirac fermions in Bi₂Te₃/Bi₂Se₃ topological insulator heterostructure studied by ARPES **SATO, Takumi**
- PB-44 Identifying possible pairing states of Sr₂RuO₄ by tunneling spectroscopy **SATO, Takumi**
- PB-45 0 - π Transition and Symmetries of Cooper Pairs in Rashba Superconducting Nanowire Junction **TAKAGI, Daijiro**
- PB-46 Persistent current due to a screw dislocation in Weyl semimetals **TAKANE, Yositate**
- PB-47 Revisiting (again) the sigma model approach to quantum spin systems-topological terms and LSM **TANAKA, Akihiro**
- PB-48 Simultaneous biaxial strain measurement using fiber Bragg grating optical sensors for detecting topological nematic superconductivity in Sr₂Bi₂Se₃ **TANIGUCHI, Ryo**
- PB-49 Effect of interaction on the persistent current on two-leg ladder under synthetic gauge field **TEZUKA, Masaki**
- PB-50 Magnetic field dependence of supercurrent in MoS₂/superconductor junctions with corner geometry **TSUMURA, Kohei**
- PB-51 Electric charging of magnetic textures in topological Dirac semimetal **WATANABE, Jin**
- PB-52 Anomalous Magnetotransport under High Magnetic Field in Correlated Dirac Semimetal of Perovskite CaRuO₃ **YAMADA, Rinsuke**
- PB-53 Magnetic Field Response of Josephson Junction on Magnetically-Doped Topological Insulator **YAMAMOTO, Masahiro**
- PB-54 Theory of Electromagnetic Response for Majorana Kramers Pairs in Topological Crystalline Superconductor **YAMAZAKI, Yuki**
- PB-55 Determining topological Chern number in Kitaev material α -RuCl₃ **YAMAZAKI, Yuki**
- PB-56 Transport properties of MBE-grown topological crystalline insulator thin films **YOSHIMI, Ryutaro**
- PB-57 Laser-induced band inversion in a Floquet topological insulator **ZHANG, Boyuan**
- PB-58 Transition of the gap symmetry in topological superconductors Cu_xBi₂Se₃ **MATANO, Kazuaki**

Poster Award winners

Gold Prize

- [PA-33] **Masataka Mogi** / Univ. of Tokyo
 [PB-55] **Taichi Yokoi** / Kyoto Univ.

Silver Prize

- [PA-20] **Sehoon Kim** / Tohoku Univ.
 [PA-21] **Aki Kitaori** / Univ. of Tokyo
 [PA-53] **Kazuki Yamamoto** / Kyoto Univ.
 [PB-04] **Takumi Bessho** / YITP

Bronze Prize

- [PA-10] **Motoaki Hirayama** / RIKEN CEMS
 [PA-50] **Riki Toshio** / Kyoto Univ.
 [PB-24] **Ivan Kostylev** / Kyoto Univ.
 [PB-51] **Jin Watanabe** / Tohoku Univ.
 [PB-53] **Masahiro Yamamoto** / Nagoya Univ.
 [PB-54] **Yuki Yamazaki** / Nagoya Univ.

Best Preview Award winner

- [PA-06] **Reika Fujimura** / Univ. of Tokyo
 [PB-29] **Giordano Mattoni** / Kyoto Univ.

Preview Award winners

- [PA-07] **Yukako Fujishiro** / Univ. of Tokyo
 [PA-08] **Takuya Furusawa** / TITech / RIKEN
 [PA-38] **Nobuyuki Okuma** / Kyoto Univ.
 [PA-41] **Matthias Roessler** / PH2 - Univ. of Cologne - Ando group
 [PB-17] **Mai Kameda** / IMR, Tohoku Univ.
 [PB-44] **Shu Suzuki** / Nagoya Univ.



●第11回トポロジ－連携研究会 「トポロジカル半金属」

2019年8月2日-3日
(名古屋大学ベンチャー・ビジネス・
ラボラトリー)

第11回トポロジ－連携研究会が8月2日-3日の2日間、名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーにおいて行われた。テーマはトポロジカル半金属である。質疑応答や休憩時間を長めにとり、自由に議論できる環境を用意した。

研究会は野村健太郎氏(東北大金研)のレビューを兼ねた講演で始まった。トポロジカル半金属の基本的な性質について非常に丁寧にレビューして頂いた。また、ワイル磁性体物質やそのスピントロニクス現象についての最近の結果を紹介された。その後2日間にかけて14名の発表があった。そのうち5名は領域外の方である。今回の研究会のトピックは主に3つに分けられる。1つ目はディラック・ワイル半金属における輸送現象である。

量子振動や非線形応答などの詳細な研究が成されつつあり、今後の進展を期待させるものであった。2つ目はワイル磁性体や線ノード、多重フェルミオンなどの新しいタイプのトポロジカル半金属物質についてである。最後はトポロジカル半金属における(トポロジカル)超伝導状態についての研究であった。議論も活発に成され、今後の新しい研究のきっかけとなる連携研究会となった。

(文責：山影 相)



第11回トポロジ－連携研究会

●第12回トポロジ－連携研究会 「マヨラナ励起の実証に向けて」

2019年11月14日-15日
(東京工業大学)

11月14、15日の2日間、東京工業大学百年記念館3階フェライト記念会議室において、第12回トポロジ－連携研究会「マヨラナ励起の実証に向けて」を開催した。研究会は領域内外の研究者による16件の招待講演から構成され、両日も50名を優に越える多くの参加者のもと、活発な議論が交わされた。冒頭で主催者から研究会の趣旨についての説明があり、その後、各研究者から最新の研究報告やレビュー講演が行われた。講演のテーマは研究会のタイトルに掲げるマヨラナ粒子に関係するものに限られるが、対象とする系はKitaev スピン液体に加え、He 超流動の表面状態、非平衡開放系、量子細線など多岐にわたる。

初日はまず、松田氏(京大)による、キタエフ・スピン液体における半整数熱量子ホール効果についての講演で幕を開けた。この現象を見出した松田氏自身の講演で、最新の成果である量子化の磁場方向依存性、プラトー磁場領域のサンプル依存性などについての議論などが提示された。松田氏の講演に引き続き、理論面からの相補的なレビュー講演が、野村氏(東北大・金研)により行なわれ、

熱ホール効果の基礎的な定式化から、非可換分数量子ホール状態の熱ホール応答など、最近の実験的知見を含む包括的な解説が行なわれた。

引き続き Kitaev スピン液体のセッションでは、清水氏(名大)による、 α - RuCl_3 の分数化励起の NMR を用いた観測、芝内氏(東大)による、 α - RuCl_3 における磁場中比熱、特にマヨラナギャップの角度依存性についての報告がされた。後半は求氏(東大)により、Zeeman 項と結合した Kitaev 模型の数値計算結果についての総合的な報告が行われ、また、北川氏(東大)により、 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ を初めとする、擬スピン 1/2 ハニカム化合物の実験の現況について、講演が行われた。

二日目朝の ^3He のセッションの主題は B 相表面状態に現れるゼロエネルギーマヨラナ励起である。野村氏(東工大)による音響インピーダンス測定、池上氏(理研)による、表面近傍の荷電不純物のモビリティを通じたマヨラナ状態の観測についての講演の後、堤氏(理研)が池上氏の実験に対応する理論解析の結果を提示した。午前のセッション最後の講演では桂氏(東大)により、散逸を含む非平衡状態の模型について、マヨラナ表示を用いて緩和スペクトルを求める最新の研究成果が紹介された。

二日目の午後は再び Kitaev スピン液体に話題が戻る。藤本氏(阪大)により Kitaev 模型の電

荷応答及び Γ' 型相互作用の役割について、また Fibonacci anyon を素励起として実現する非平衡開放模型についての講演が行われた。溝口氏(筑波大)は Kitaev 模型の端状態の解析解と磁化応答について、山地氏(東大)は可解極限を離れた Kitaev 候補物質の有限温度ダイナミクスの解析結果を紹介した。

最後のセッションでは田仲氏(名大)によるパラフェルミオンについての講演、松尾氏(理研)による半導体二重細線を舞台としたクーパー対分離現象などについての実験の紹介がなされ、最後の佐藤氏(京大)の講演ではマヨラナ表面状態の多極子応答についての講演が行われた。

研究会全体として非常に活発な質疑応答が行なわれたことが印象的であった。ほとんど全ての講演で、質疑の時間が切れるまで質問が続き、この分野に対する関心の深さが伺われた。また研究会の参加者も領域内外を問わず、多方面の分野の研究者を迎えることができた。特に、量子計算への応用を見据えてのことだろうか、一般企業を所属とする研究者の参加が見られたことには驚かされた。マヨラナ粒子の研究は今後も幅広い分野の研究者を巻き込んで発展を続ける、そのような強い確信を抱かせてくれた研究会であった。

(文責: 宇田川 将文)



第 12 回トポロジー連携研究会



●第13回物性科学領域横断研究会

2019年11月27日ー28日（東京大学本郷キャンパス小柴ホール）

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2019年11月27日（水）～28日（木）の日程で、東京大学小柴ホールで開催されました。今回で13回目となります。今回は、「トポ物質科学」が運営を担当し、東大ローカル委員会は上田正仁氏が中心となりました。

参加者は139名で昨年の133名（奈良先端大）より少し増えました。活発な議論が行われ研究会は成功裏に終了しました。1領域あたりの講演時間は1時間でした。新たに「量子液晶の物性科学」（芝内孝禎代表）、「機能コアの材料科学」（松永克志代表）、「ハイパーマテリアル」（田村隆治代表）が加わり全部で8領域の参加となりました。この他に「蓄電固体界面科学」（入山恭寿代表）がゲスト講演を行いました。

講演の内容は多岐にわたり、数理物質科学から、化学、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
- 笠原 裕一（京大：A01）「量子スピン液体における量子ホール効果現象 ～マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオン～」25分
- 藤岡 淳（筑波大：B01）「強相関トポロジカル半金属におけるモット臨界性と量子輸送」25分

初日に凝縮系科学賞の授賞式が行われ、橘高 俊一郎氏「極低温精密比熱測定による超伝導ギャップ構造の決定」、水野 英如氏「ガラスの力学特性における階層構造の理論的解明」に関する受賞講演を行いました。

ポスター申し込み数（68件）は例年よりやや少ないようです。6名がポスター賞を受賞し、1名が最優秀ポスター賞を受賞しました。

今年度で、本領域「トポ物質科学」と「J-Physics」が領域横断研究会を卒業し、残りの6領域と来年度新たに加わる領域で運営を行っていきます。来年度の領域横断研究会は「複合アニオン」（代表：陰山洋氏）が担当で、場所・日程は今後、決める予定です。

上田先生をはじめとする東大トポ物質科学関係者の方々、秘書の竹内さま、東大の学生の方々には、運営面でたいへんお世話になりました。この場を借りて、御礼申し上げます。

（文責：川上 則雄）



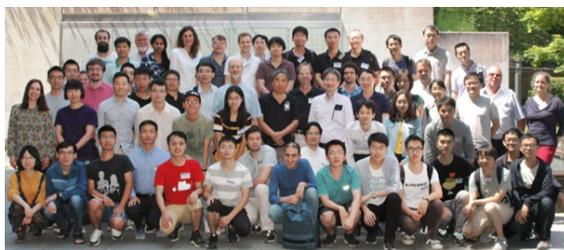
●第9回アライアンス研究会 “MPI-Peking-TMS Alliance Workshop: Workshop on Frontiers of Quantum Materials” 報告

2019年7月1日ー3日(ドイツ マックスプランク研究所)

2019年7月1日から3日の3日間、ドイツ シュツットガルトのマックスプランク固体科学研究所(MPI)にあるコスター講堂にて、第9回TMSアライアンス研究会が開催されました。これまで、MPIとTMS、北京大学とTMSの間のアライアンス研究会が開催されてきましたが、これらの研究会と北京大学とMPIの研究会を合同で開催する形になったものです。高木(TMS A01 分担, MPI), Bernhard Keimer (MPI), Yuan Li (北京大), Eva Benckiser (MPI) によって組織され、参加者は約120名、39件の招待講演と39件のポスター発表からなる極めてレベルの高い研究内容の会議となりました。

研究会の内容は、量子ホール効果、トポロジカル絶縁体、ワイル半金属、トポロジカル超伝導、量子スピン液体まで幅広い話題が取り上げられ、材料、量子輸送現象、非平衡現象などについて活発な議論がなされました。午前中と午後前半にはシニア研究者によるセッションが生まれ、各30分の講演を聞くことができました。午後後半には学生による口頭発表(各20分)、夕刻にはポスターセッション(約2時間)があり、最新の成果が報告されました。空き時間には、MPIの最先端実験装置(低温STM実験室、MBE実験室など)の見学があり、学生などから熱い質問が寄せられていました。

TMS側からは、高木(A01 分担)がハニカム量子スピン液体の同位体効果、藤岡(B01 公募)が強相関ディラック半金属、藤澤(C01 代表)が量子ホール系での電荷スピン分離について講演を行いました。北京大学からはトポロジカル半金属に関する話題、MPIからは強相関超伝導に絡んだ話題が多く、それぞれの機関の特徴が良く出ているように感じられました。



J. W. McIver (MPI-Hamburg) は、グラフェンにおける光誘起異常ホール効果について講演し、量子化値に近い異常ホール伝導度($\sim 1.8e^2/h$)の観測を報告しました。強いレーザー照射によって形成されるフロケットポロジカル相を実験的に観測した点で注目され、パルス状のレーザー照射によって短い時間でのみ出現する異常ホール効果を、光伝導スイッチによる時間分解測定で検出する新しい実験手法を用いた点でも興味深い内容でした。

J. H. Smet (MPI-Stuttgart) は、高品位グラフェンによる分数量子ホール効果について、高ランダウレベルにおける偶数分母分数量子ホール状態の観測を報告しました。偶数分母状態は、マヨラナ粒子を示す可能性があることから、GaAs、ZnOによる二次元電子系で研究されています。グラフェン中で、 $n=2$ のランダウ準位で観測された偶数分母状態は、非可換エニオンの一種である parton 状態である可能性を指摘した点で大変興味深い内容でした。

この他、高精度STM測定による超伝導状態の観測[C. Ast (MPI-Stuttgart)]、トポロジカル絶縁体の磁性ヘテロ構造における異常量子ホール効果の磁気特性[QingLin He (北京大)]など、興味深い内容が盛りだくさんでした。また、北京大学から、多くの若手研究者や大学院学生が参加し、活発に議論に加わっている様子が印象的でした。会議運営にご尽力頂きましたMPIの方々には感謝致します。

(文責：藤澤 利正)



●第10回アライアンス研究会 “The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases” 報告

2019年9月30日 – 10月3日 (京都大学)

冷却気体に関する日中二国間研究会が2019年9月30日から10月3日の4日間に亘って、TMSと基礎物理学研究所の共催で京都大学益川ホールにおいて開催されました。この研究会は2016年に中国北京市清華大学にて開催された「Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases」から続くもので、今回で第4回目となります。第2回目もTMSとの共催で開催されました(開催場所は東京大学)。初回は名前の通り、東京と北京の研究者に限定された小規模でクローズドな研究会でしたが、第2回以降は他地域の研究者も講演者を含め、コミュニティに研究会情報を周知することでその規模を拡張してきました。第4回目となる本研究会では、若手層の参加をさらに増やし、これまでの2倍の規模(参加者80人程度)の研究会として開催しました。

2000年代までの冷却気体系の物性研究の重要な発展は、北アメリカ、西ヨーロッパ、日本、オーストラリアの研究グループによってなされてきましたが、2010年代に入ってから中国の研究グループが急速にそのプレゼンスを高めてきています。例えば、清華大学、中国科学技術大学、山西大学、香港科技大学、華東師範大学の実験グループが目覚ましい研究成果をあげています。現在立ち上げ段階にある研究室の数を考慮すると、まもなく質量ともに世界的なプレゼンスを持つ規模に発展することが見込まれます。このような中国での冷却気体研究のコミュニティと密接に協力していくことで、日中両国の当該分野の発展を促進し、将来的にはアジアにおける研究連携のコミュニティを形成することがこの研究会を始めた動機の一つでした。

具体的な内容としては、初日に光格子中の冷却気体の量子シミュレーションおよび量子非平衡ダイナミクスに関する講演がありました。特に、Yb原子などの二電子原子の系で、近藤効果の量子シミュレーションを実現することが喫緊の課題であるという認識を共有することができました。2日目は非エルミート・ハミルトニアン系の講演が集中的に配置されました。特に、首都師範大学のYu Chen氏による、当該系に対する線形応答理論の検証を京都大

学の実験グループで実施できる可能性があり、講演後に彼らの間で詳細な情報交換が行われました。そのような検証実験は、本研究会の重要な成果につながると期待されます。3日目は午前SU(N)対称性を持つフェルミ気体についての講演が4件あり、当該トピックの注目の高さが伺えました。また、この日の午後には、量子多体系実験に対する機械学習の応用の講演がありました。そのうちの一つである原子気体の蒸発冷却への応用は、理研の福原グループでも実施されているものであり、日中の2グループ間で活発な議論がなされました。最終日は、冷却気体で実現が期待されるp波のクーパー対を持つ超流動の実現に向けた、p波のFeshbach共鳴に関する実験・理論についての講演がありました。この状態を実現するために必要な3体粒子損失の抑制について議論が交わされた。最後のセッションでボース気体の新奇超流動性についての講演があった後、組織委員の一人である清華大学のHui Zhai氏が研究会を総括しました。

2日目、3日目のポスターセッションでは合わせて38件のポスター発表が行われました。その大部分は学生もしくはポスドクによるものであり、日中両国の若手研究者たちが積極的に交流していました。2日目晩の情報交換会で、日本側と中国側の組織委員が次回(2020年)の開催場所とlocal organizerについて議論し、深圳の南方科技大学Zhigang Wu氏が主催することが決まりました。

最後に、研究会の運営でお世話になった本領域関係者および京都大学基礎物理学研究所の共同利用関係者の皆様、さらに中国側のorganizationを担当された清華大学高等研究院のHui Zhai氏に感謝いたします。

(文責：段下一平、佐藤昌利、上田正仁)



●第3回 EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (TPQM2019) 会議報告

2019年10月21-25日 (KITP (UC Santa Barbara), USA)

本会議は、3回目のEPIQS-TMSアライアンス研究会として、カリフォルニア大学サンタバーバラ校が擁するカブリ理論物理学研究所 (KITP) で開催されました。日本では、台風19号の大雨による災害の余波が残り、季節的に肌寒く感じるようになってきた頃の会議でした。東京を発ってサンタバーバラ空港に降り立ち、まず感じられたのは雲一つない晴天で、とても暑いこと。幸いこの好天は一週間あった会議の終日まで続き、気候的に大変過ぎやすい会議となりました。

私(塩見)はTMS側のオーガナイザーの一人として本会議に参加しました。その意味では、会議が始まる前から私の仕事は始まっていたわけで、講演者の選定からプログラムの段取りなど色々とEPIQS側のオーガナイザーともメールでやり取りし、これまでの会議とは違った形での会議参加となりました。会議のオーガナイザーは初めての経験で、決して楽しいものではありませんでしたが、会議を主催する側にならないと見えない景色もあることがわかり、大変よい勉強となりました。会議が始まれば後はEPIQS側のオーガナイザーが慣れた手つきで色々やってくれ、今回は私は発表もなかったことから、現地では気楽に講演を聞くことができました。

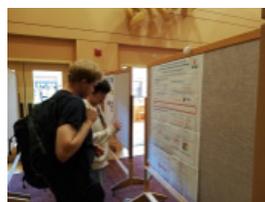
今回の会議を私なりに総括すると、のどかな場所で刺激的な議論ができた、ということになるでしょう。会議場所のカリフォルニア大学サンタバーバラ

校はビーチ沿いにあり、滞在したホテルもさながらリゾートホテルで、終始穏やかな田舎の雰囲気が漂う場所でした。一方で、ワークショップには第一線の研究者が集い、講演中にも質問が飛び交うなど熱い議論が交わされます。日本側で約30名、EPIQS側も約20名の参加者がおり、加えてKITPの研究者なども聞きに来ていたため、会場に用意された椅子は連日ほぼ満席。日本人の中には時差ボケで時折眠りに落ちた方もおられたようですが、どの講演に対しても多くの質問が出て私も座長の一人として時間通りに会議を進めるのに苦労しました。

講演は一人40分の持ち時間で30分講演+10分質問と比較的長めの時間が割り当てられ、講演の間のコーヒブレイクやランチタイムも長く設定されており、一つ一つのトピックに対して十分な議論ができるように設計されました。初日の最初の講演はMoore氏のトポロジカル半金属の光学応答の話で始まり、野村氏の同系でのスピントロニクス応答の理論研究が続きました。永井氏や川上代表は非エルミートの話がされました。非エルミートの話は学生講演を含めて多くの発表が日本側からありましたが、一方でアメリカ側からはほとんど無かったように記憶しています。代わりに、アメリカではツイスト二層グラフェンの話が盛り上がっているようで、初日は若手のLee氏が理論的な話をされていました。



(左) 滞在したホテル (右) 会場となったカブリ理論物理学研究所



(左) ポスターセッションの様子 (右) コーヒー休憩中の研究議論の様子

2日目は、田仲氏のトポロジカル超伝導、佐藤氏の ARPES の話から会議が始まり、Ross 氏のスカーミオン物質の話や Mandrus 氏のキタエフ物質の話など、比較的、物質よりの話が多かったような気がします。午後は Moore 氏の代わりに私が座長に入りましたが、Mandrus 氏、Sachdev 氏、Yacoby 氏と大御所が名を連ねてすごい成果を立て続けに発表され、大変質問も盛況で、私は手を挙げている人に質問を回しているだけで無事に座長を終えることができました。

3日目は、上田氏の非エルミートの話や、Gedik 氏の CDW 系の光誘起相転移の話などがあり、午後は Sinova 氏や塚崎氏、吉見氏、好田氏からトポロジカル・スピントロニクスの話が続きました。前日に座長を終えて安堵していた私は、午前中は Gedik 氏の頭のキレに圧倒され、午後一番に Sinova 氏の迫力あるプレゼンにまた圧倒され、海外の一流研究者の力をまざまざと見せつけられました。

4日目は水島氏、Fu 氏、柳瀬氏と超伝導関連の話が続きました。Fu 氏は前日まで姿を見せなかったため、果たして来るのだろうかと思心配していたようですが、朝早めの発表に無事に現れ、鉄系超伝導体のトポロジ物性について発表されました。午後には、Murnane 氏から CDW 系の高速光応答の話があり、前日の Gedik 氏の話とも関連する話題でした。正直、CDW は古くさい話だと思っていたのですが、最近また興味を持たれていることを知ることができたのは収穫でした。

最終日も、面白い話が続きました。Paglione 氏や Madhavan 氏の UTe_2 の三重項超伝導とそのエッジモードの観察に関する話に始まり、今をときめくグラフェンの話につながりました。地元カリフォル

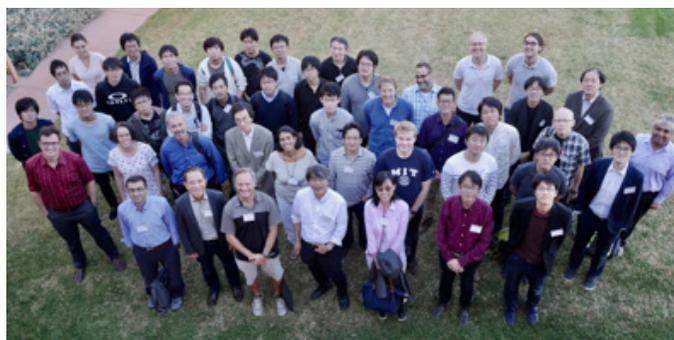


(左) Moore 財団のロゴ入りのリュックのプレゼント (右) ホテルでの卓球

ニア大学サンタバーバラ校の Young 氏は、ツイスト二層グラフェンについて若さ溢れるイケイケの発表を行い、私も同世代の研究者として大変刺激を受けました。続く Kim 氏は一転して落ち着いた雰囲気ながら圧倒的な余裕とオーラを醸し出し、さながらハーバード大の授業を受けているようでした(受けたことないけど)。最後は TMS 側の佐藤氏の非エルミートの話で会議は締めくくられました。

全体を振り返り、日本の会議と異なり羽振りがよく、改めておもてなしが素晴らしかったと感じました。毎日 KITP で昼食が出て、火曜日と木曜日の夜には夕食とお酒もできました。食事はサラダも多く健康的で、健康志向の私としては大変満足でした。コーヒブレイクではフルーツやお菓子もありました。ランチタイムも含めて講演の間の休みが長く、少々間延びするプログラムだと会議中は感じていましたが、今思えばメリハリがついていた気がします。休むところは休んで、また講演を集中して聞いて議論する。このようなサイクルの中で、休みに時間とお金(食事)をかけるところは、アメリカならではかもしれません。私は余り休まずに働くタイプの人間ですが、働き方改革のお手本を体験できた会議でした。

(文責：塩見 雄毅)



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

2019/Mar/20(WED)

Topological Materials Science Seminar (92)
Toshihiro Sato, Kyoto Univ.

2019/Apr/26(FRI)

Topological Materials Science Seminar (93)
Yigal Meir, Kyoto Univ.

2019/May/08(WED)

Topological Materials Science Seminar (94)
Masaya Nakagawa, Kyoto Univ.

2019/May/16(THU)

Topological Materials Science Seminar (95)
Luka Trifunovic, Kyoto Univ.

2019/May/27(MON)

Topological Materials Science Seminar (96)
Thibaut Jonckere, Tohoku Univ.

2019/Jun/03(MON)

Topological Materials Science Seminar (97)
Thibaut Jonckere, The Univ. of Tokyo.

2019/Jun/07(FRI)

Topological Materials Science Seminar (98)
Thibaut Jonckere, Kyoto Univ.

2019/Jul/03(WED)

Topological Materials Science Seminar (99)
Jyong-Hao Chen, Kyoto Univ.

2019/Jul/08(MON)

Topological Materials Science Seminar (100)
Manuel Houzet, Tokyo Tech.

2019/Jul/16(TUE)

Topological Materials Science Seminar (101)
Manuel Houzet, Nagoya Univ.

2019/Jul/19(FRI)

Topological Materials Science Seminar (102)
Ryohei Kobayashi, Kyoto Univ.

2019/Jul/25(THU)

Topological Materials Science Seminar (103)
Manuel Houzet, Hokkaido Univ.

2019/Aug/21(WED)

Topological Materials Science Seminar (104)
Motoaki Hirayama, Kyoto Univ.

2019/Aug/25(THU)

Topological Materials Science Seminar (105)
Manuel Houzet, Kyoto Univ.

2019/Oct/07(MON)

Topological Materials Science Seminar (106)
Satoshi Ikegaya, Nagoya Univ.

2019/Nov/05(TUE)

Topological Materials Science Seminar (107)
Seishiro Ono, Kyoto Univ.

2019/Nov/19(TUE)

Topological Materials Science Seminar (108)
Takumi Bessho, Kyoto Univ.

2019/Nov/28(THU)

Topological Materials Science Seminar (109)
Antti Niemi, Kyoto Univ.

2019/Dec/09(MON)

Topological Materials Science Seminar (110)
Satoshi Ikegaya, Osaka Univ.

2020/Jan/14(TUE)

Topological Materials Science Seminar (111)
Paola Gentile, Nagoya Univ.

2020/Jan/15(WED)

Topological Materials Science Seminar (112)
Paola Gentile, Kyoto Univ.

2020/Feb/14(FRI)

Topological Materials Science Seminar (113)
Yoshihiro Michishita, Kyoto Univ.

研究所訪問「アメリカ滞在記」

古澤 拓也 / 東京工業大学 理学院 西田研究室 博士課程 1年



トポロジカル物質科学のJREPという派遣プログラムを用いて、2019年10月から11月にかけて、マサチューセッツ工科大学、スタンフォード大学、シカゴ大学にそれぞれ10日ほど滞在をしました。本コラムでは、今回のアメリカ滞在についてお話ししたいと思います。

私はこれまで、量子多体系の非摂動的な解析手法である双対性に注目し研究を行ってきました。双対性というのは、2つの一見異なる理論の間の等価性でのことで、1つの物理現象に複数の理解を与えます。双対性を用いて問題にあった見方から解析を行うことで、一般に難しいとされる強相関量子多体系を理解することができます。

近年、2次元における双対性が新たに発見され、素粒子、物性の両面から盛んに研究が行われています。この進展の発端となったのは、実は最も有名なトポロジカル相の一つである分数量子ホール系です。特に、占有率が1/2の分数量子ホール系では、長年にわたる「粒子・正孔対称性」の問題が知られており、その解決策として複合ディラック準粒子という描像が提案されました [1]。そして、この描像と元の電子系の関係はディラックフェルミオンの双対性として解釈することができます。この提案を皮切りに、2次元において、他にも多くの双対性が発見され、それをもとにスピン液体や非閉じ込め相転移などの新奇な相や相転移について、非自明な予言がなされています [2]。

このような双対性に基づく研究は、日本ではあまり盛んに行われていないため、実際に双対性の研究を行っている研究者たちと議論や共同研究をしてみたいと思っていました。私の指導教員である西田さんの勧めで、JREPという制度に応募したところ、幸運にも採用していただくことができました。滞在先としては、私が双対性に関する論文 [3] を出した際に、メールをしていただいたマサチューセッツ工科大学のSenthilさんとスタンフォード

大のChenさん、及び、夏に東工大で集中講義をしていただいたシカゴ大の笠さんに受け入れていただきました。

初めの滞在では、マサチューセッツ工科大学に訪問しました。出発日である10月12日に台風19号が直撃し飛行機がキャンセルとなってしまいました。某アメリカ旅行会社を通じて飛行機を予約していたのですが、日本語のカスタマーサポートへは深夜の3時になっても一向につながらず、最終的にアメリカのカスタマーサポートへ電話をし、予約の変更をしてもらうことになりました。拙い英語ながらもなんとか変更してもらうことができましたが、結果として、出発が4日ほど遅れ16日の出発となってしまいました。幸先の悪いスタートでしたが、到着後には無事、受け入れ先のSenthilさんやMetlitskiさんとも議論することができました。特にスピン液体への応用などのアドバイスをいただくなど、今後の研究を進める上で大変有意義でした。また、22日には、ハーバード大においてセミナー発表を行い、Vishwanathさんと偶然ハーバード大にきていたWangさんを変えて議論を行いました。毎日のように面白そうなセミナーが行われており、刺激的な日々を過ごすことができました。

休日には、ボストンの街並みを見物しつつ、ボストン美術館やハーバード大の美術館を回りました。日本では見る機会のないモネやゴッホの著名な絵の原本を見ることができ、感動を覚えました。



(左) 最終日には、ボストン名物のシーフードを食べに行きました。(右) シリコンバレーで食べたマイクロソフト巻き。マイクロソフト感はあまり感じられませんでした。ちなみにマイクロソフト社はシアトルのほうにあるそうです。

ボストンを出発した後は、スタンフォード大学のChenさんを訪問しました。サンフランシスコはボストンよりもかなり暖かく、日中はシャツ1枚で過ごせるほどでした。到着した日に、Chenさんに徐々に日本食が食べたいと伝えると、大学近くにうまい店があると言って、車でやよい軒に連れて行ってもらいました。アメリカにやよい軒があるというのは驚きでしたが、普通の定食が20ドルもするなど、その値段の高さにさらに驚きました。しかし、アメリカの食事に飽きてきていた私にとっては、普段日本で食べていたご飯がこの上なく美味しく感じました。やよい軒の食事でも元気をもらいつつ、翌日には自身の研究内容についてセミナーを行い、その非可換ゲージ群への拡張について議論を行いました。昼食の際には、物性理論グループのメンバーと様々な話をしました。特に印象的であったのは、スタンフォード大の研究の特徴は、美しく、シンプルで、それを真っ先にやることだという言葉です。私もそのような素晴らしい研究をしたいものだと思います。休日には、Campus Bike Shopで自転車を借り、GoogleやApple本社のあるシリコンバレーの方までサイクリングをしました。

次の滞在先であるシカゴはサンフランシスコとは打って変わって非常に寒く、ダウンジャケットが必須でした。シカゴ大学の笠さんとは、集中講義をして頂いた際の縁もあり、親しく交流させていただき、非常に楽しく過ごすことができました。笠さんとは、自身の研究成果についての議論に加え、非閉じ込め相転移におけるアノマリーと共存相についても議論を行いました。分数量子ホール系の考察から、新しい双対性を見つけ、近年の進展を生み出したSonさんなど、双対性に関わる研究を行っている方々と議論でき、貴重な経験でした。事前に、シカゴは治安がよくないという情報



シカゴの夜景



最後にアメリカらしいものをということで、肉を御馳走していただきました。

を得ていたこともあり、少し警戒していましたが、特に事件に巻き込まれることもなく、無事に日本へ帰ることができました。最終日には、共同研究者であるイリノイ大シカゴ校の本郷さんとフィールド自然史博物館へ行き、Sueと呼ばれる世界最大のティラノサウルスの化石に圧倒された後、夕方のシカゴを散策しました。

今回の滞在中の議論を通じて、大変有意義な多くのアドバイスや情報を得ることができました。今後は、今回得られた知見を生かし、共同研究などにつなげたいと考えています。最後に、大変お忙しい中、私を歓迎してくださったSenthilさん、Chenさん、笠さんをはじめとする研究室の方々、議論をしてくださった方々に、深くお礼を申し上げます。また、このような長期で海外に滞在するのは初めての経験であり、研究に限らず、英会話など様々な面で成長することができました。このような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。

- [1] D. T. Son, Phys. Rev. X **5**, 031027 (2015).
- [2] T. Senthil, D. T. Son, C. Wang, C. Xu, Phys. Rep. **827**, 20 (2019).
- [3] T. Furusawa, Y. Nishida, Phys. Rev. D **99**, 101701 (2019).

研究所訪問 「モスクワ滞在記」

名古屋大学 大学院工学研究科 柏谷聡研究室 研究員 矢野 力三



2019年10月に約3週間、モスクワ郊外にあるモスクワ物理工科大学 (Moscow Institute of Physics and Technology: MIPT) の Vasily Stolyarov 氏の研究室に滞在し様々な実験をする機会を得ました。あまり知られることのないロシア事情の共有と、これからビザが必要な国への海外滞在を予定している人へのなにか参考になれば幸いです。ガイドブックを読んでもわからないリアルな声をお届けしたいと思います。

ロシアへの渡航準備と注意

距離は近いのにあまり情報が入ってこない国ロシア。これらは平和条約がまだ結ばれていないという点にすべての発端があります。そのためロシアでは自由旅行が基本的にはできず、行ける場所も時間も限られることが多いのです。

まず、ビザの取得が第一の関門になります。観光ビザの取得の際にも旅程や招待状などが必要です。取得には招待状に記載の情報を基に手続きをしますが、この招待状は当然ロシア語です。大使館以外でビザ取得する際は注意してください。実は「ロシア ビザセンター」で検索すると上位に出てくるのは大使館公認のサイトと名前が酷似した代行サイトで、公認価格の3倍以上どころか取得もできないトラブルもあるようです。このような代行サイトはロシア以外にも多岐にあり、例えばアメリカ入国に必要な ESTA 取得時にも度々問題になることがあるようなので、皆様も注意してください。

ロシアへ渡航した後も注意が必要です。現地人以外の人は常に「パスポート」と入国時に渡される「入出国カード」、そして滞在先から発行される「滞在登録」の3点を常に携帯していなければなり



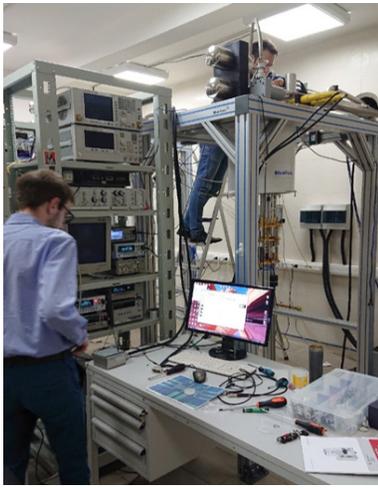
(左) 着陸直前の飛行機から見たモスクワ、(右) 滞在中の MIPT の建物

ません。これはスパイ対策のための古い規則なのですが、不携帯での罰金などがあるようです。最後の滞在登録は通常は宿側が手続きをしてカードが手渡されます。ですが、自分が到着したときは手続きが完了されておらず、その間に見事にパトロール中の警官に声かけられてしまいました。ロシアの警官は通常複数人で行動しており、屈強な体つきの警官に囲まれると恐怖しかありません。ロシアは街中ではほとんど英語が通じませんが、身振り手振りや Google 翻訳の大活躍で登録中の旨が伝わりなんとか事なきを得ました。この翻訳アプリはカメラ入力や会話モードがオフラインでも使えるので非英語圏に行かれる方にお勧めです。

MIPT 到着と研究開始

今回訪問した MIPT はモスクワ中心から北西に約 25km の場所にあります。飛行機からロシアを見た風景では集落と集落の間はほぼ森林や草原でしたが、MIPT はその境目とも言える場所にありました。気候は年間を通じて札幌と同じです。MIPT はランダウやギンツブルグなどにゆかりのある学校であり、グラフェンでノーベル賞を受賞したアンドレ・ガイムとコンスタンチン・ノボセロフ両氏の出身校の名門です。まさにヘキ開性のある低次元物質で超伝導近接効果を研究している自分にとって深い縁を感じ、感慨深いものがありました。

私はこれまで磁性ドーピングをしたトポロジカル絶縁体に注目して、その超伝導近接効果を調べてきました。今回の訪問の目的は走査型トンネル顕微鏡 (STM) を使った結晶の電子状態観察と希釈冷凍機を使った数十 mK 下での超伝導接合の測定です。これにより元のバルク結晶の電子状態解明と極低温での近接効果の両方を調べるといったものでした。STM はこれまで学会等で話は聞いたことはあったものの、経験したことなく、in situ でのヘキ開も初めてですすべての作業が新鮮でした。自分の単結晶の原子レベル像が確認できた時はすごく感動しました。そして電子状態も理想的な状態に近いことが確認できとても有意義な測定が続きました。



希釈冷凍機を整備する学生と研究員。時刻は夜 23 時過ぎている。

今回のロシア訪問では、ロシアの研究のスピード感と学生の積極性の 2 点で特に驚くことになりました。STM での結果を議論中、ぼそっと光学的測定もできたらいいのと言った時のこと、「よし、すぐにやろう！」と言って近くのテラヘルツ研究グループのところへ足を運び、1 時間後には測定が始まりました。さらに超伝導接合の実験も、STM の結果を踏まえてサンプルホルダーの加工作業から取り組み、すぐに今回の実験セットアップの改良も翌日にはできました。このスピード感はこれまで私が経験したことのないもので、とても感動しました。このスピード感を支える一つの要因は学生の勤勉さと積極性にあります。驚いたことに学生はみな夜 12 時を過ぎても実験に集中していたり、実験家でありながら自主的にセミナーを開き、理論の論文までも書いたりしているとのことでした。研究室での発表においても、質問をまずするのは先生ではなく学生で、学生同士がお互いに意見をぶつけ合い、それをみんなで考えながら進めていくスタイルのようです。各々がしっかりと考えながら全員参加型での発表なのでみんな楽しそうに議論をしているのでうらやましく感じました。このようなスピード感と学生参加型の積極性はぜひこれから自分の研究室にも取り入れ、良い所を吸収していきたいと思えたことが今回の一番の収穫だったのかもしれない。

日常生活と観光

ロシアはガイドブックによると世界有数の物価の高い国だそうです。ところが実際に過ごしてみると、社会主義的なごりなのか、生活必需品に関してはほとんど日本より安いという印象でした。特に地下鉄の運賃（距離に関係なく約 70 円）や通信費（一月容量無制限で 500 円）は非常に安く驚きました（空港の SIM は高く、偽物も多いので注意）。今回滞在したのは学生寮だったため食事は自炊でした。意外にも 24 時間開いているスーパー

があったため、そこで毎日簡単に調理できるものを買っていました。実験以外の時間では学生と話す時間も多く、日本のことについてよく多く聞かれましたが、特に印象に残ったのはアカデミックの就活事情について何人にも聞かれたことでした。話には聞いていましたが、まじまじと質問されて世界的にポストク問題は話題なのだと思えました。

休日は二日間だけ観光に割くことができました。ロシアの観光の定番と言えば赤の広場やクレムリンですが、そちらは他のガイドブックに譲ります。今回紹介したいのはヴェーデーエヌハー（ВДНХ：和名は全ロシア博覧センター）です。ここは日本の上野のような場所で、様々な博物館やロシアの歴史的建造物の集まる場所です。冒頭で紹介したように、通常ロシアは自由旅行ができないので、ツアー観光もないここは貴重な体験になりました。見学した先は、旧ソ連の宇宙開発博物館です。さすがアメリカと宇宙開発をくりひろげたロシアだけあり、一般人からの宇宙開発の人气が垣間見え、長い行列ができていました。人類で初めて宇宙空間に到達した際の宇宙服から最新の探査機まで多くの展示がありました。日本との違いで印象的だったのは、体験型の展示が多く、真空体験や宇宙グローブを装着できる展示、さらには宇宙環境の過酷さを伝えるゲーム機などがあり、見るだけでなく、自分で感じ、考えさせるというロシア教育の一端を垣間見た気がしました。

これまで見てきたように、本来の目的である研究だけでなく、今回のロシア滞在で普通の観光では決して味わうことのできない多くの貴重な体験をすることができました。滞在期間中は Vasily さんに生活環境の整備から実験のほぼすべてにおいてお世話になりました。実験を手伝っていただき、多くの刺激を与えてくれた研究室の学生たちにも感謝しています。そしてこのような貴重な体験を実現させていただいた本研究領域に末筆ながら深く御礼申し上げます。



（左）ヴェーデーエヌハーの入り口の門（右）旧ソ連の宇宙開発博物館内部。奥に見える宇宙船には搭乗可能。右下に写っているのは一緒に行った学生。

メンデレーエフから 150 年

前野 悦輝 / 京都大学 大学院理学研究科 教授 (計画研究 A01 代表者)



1. 国際周期表年がやってきた

2019 年はメンデレーエフ (Dmitri Mendeleev) による元素周期律発見に基づく周期表発表 [1] から 150 周年にあたり、ユネスコ国際周期表年 (IYPT2019) としての活動が世界中で展開されました。私に関わった狭い視点からにはなりますが、是非ご紹介させていただきたくコラムのスペースをいただきました。

宇宙を構成する元素を一枚の表にまとめた周期表は、人類が成し遂げた科学上の発見の最重要な成果の一つといえ、トポロジカル物質を開発する上でも基本となります。日本では 2019「年度末」までを区切りとして、全国巡回の「国際周期表年 2019 特別展」をはじめとするイベントが各地で行われています [2]。巡回展の中には SCES2019(岡山)、TopoMat2019(京都)、J-Physics(神戸)など、新学術領域研究が支援しているものもいくつかあります。

実は、私は周期表を趣味の一つとしています。私が 20 年ほど前に考案した立体周期表「エレメンタタッチ」 [3] のペン立て、マグ、Tシャツ、タオルは、京都大学グッズになっており、本領域の年次研究会や国際会議でのポスター賞の賞品にも使っていました。今年は、物理学・宇宙物理学専攻の 3 教室の全体主任の役回りでかなり多忙なのですが、おそらく 50 年に 1 回しかめぐってこない国際周期表年とあらば運命 (次回の参加はおそらく無理)。ということで、当新学術領域研究のアウトリーチ活動の一環として、私もこの世界行事にできる限り参加することにしました。

まず、2019 年 2 月に日本学術会議 (東京乃木坂) で開催の日本での IYPT オープニングイベントの講演者にいただき、エレメンタタッチのポスター展示もしました。この講演会は新元素ニホニウム

の発見に関わった方々、元素を活用した最先端研究・技術の専門家に加えて、元素あるいは周期表マニアのような方々で構成されていました。私は周期表の歴史とエレメンタタッチについて話しました。意外なことに、現在使われている長周期表の考案者については、世界をリードする日本の化学専門家の間でもあまり知られていないことがわかりました。後にいくつかの国際イベントでお会いした海外化学会の重鎮の皆さんも同様でした。これについては下でも触れます。ともかく、このイベントでは全国を代表する周期表マニアの皆さんと知り合いになりました。

2019 年 3 月の日本物理学会 (九州大) では、日本化学会との 2 元中継で特別シンポジウムがありました。その後、巡回展等での展示や工作教室開催で、いくつかの科学館を回りました。3 月には愛媛県の総合科学博物館、11 月には佐賀県の武雄温泉の近くにある宇宙科学館、そして 2020 年 2 月下旬には大分県の関崎海星館で工作教室を開きます。

10 月に本新学術領域研究の交流プログラム REP でカリフォルニア大学アーバイン校に滞在したときは、本業のセミナーに加えて、「150 years since Mendeleev」と題する物理学コロキウムを行い、大学院生から名誉教授の皆さんにまで、立体周期表を作っていただきました (図 1)。



図 1: REP で訪問中のカリフォルニア大学アーバイン校でのコロキウム



図2：巡回展のパネル展示

12月には日本での活動の集大成として、世界のIYPTのクロージングイベントが東京で行われ、ここでもエレメンタッチの展示をしました[2]。この間、東京大学の理学図書館でも、エレメンタッチの展示をしていただきました。

2. 巡回展が始まるまで

ユネスコが2019年を国際周期表年と定めたのは2017年の12月です。私に何ができるかと思案していたところ、2018年の10月に愛媛県総合科学博物館の久松洋二さんから連絡がありました。京大にお越しになった際、展示の相談よりも周期表談義に熱中して意気投合し、その後の活動の同士として付き合いが始まりました。2019年の3月には愛媛で1日3回、エレメンタッチ工作教室を開催しました。愛媛県総合科学博物館の元素展は素晴らしく、周期表の歴史展示、元素が発見された鉱物見本の展示など、他では見たことのないレベルで感動的でした。名誉館長の有馬朗人さんも来られ、またちょうどこの時、日本のIYPT2019活動のリーダーである玉尾皓平さん（豊田理化学研究所所長、国際周期表年実行委員会委員長）が、久松さんと全国巡回展の打ち合わせに来られ、私も同席させていただきました。

全国巡回展は、愛媛での展示物もベースに、玉尾さんの熱意と数々のアイデアを盛り込んだ拡張版といえ、8月からスタートして全国24か所をめぐっています(図2)[2]。大規模・長期のイベントからパネルだけの展示まで様々ですが、この中にはもちろん、2019年12月3～7日「TopoMat2019国際会議」（京都大学百周年時計台記念館）も含まれます。私もTMS事務局の高宮桂子さんとともに100点以上ある展示物の説明文の英語訳作成のお手伝いをしました。

3. ロシアに行きました

7月にはメンデレーエフゆかりのサンクトペテルブルグ(St. Petersburg)で、周期表国際会議Md150があり、日本からは理研・仁科加速器センター長の延與秀人さんと私が参加しました[4]。オープニングセッションでは延與さんによるニホニウム発見についての講演があり、私はその座長を務めました。小川博士による幻のニッポニウム Np “発見”、仁科博士らが93番目元素を合成していたのだが確認実験までは至らなかったこと、その元素が後にネプチニウムとして発見され、元素記号 Np が使われてしまったこと、など113番目元素発見とニホニウム Nh 命名までの執念の歴史が良くわかりました。

2日間にわたる会議で、30件の講演と多数のポスター発表がありました。特別広いポスター展示スペースをいただき、エレメンタッチを国際的に知ってもらう良い機会になりました(図3)。日本の周期表マニアの皆さんから預かった周期表扇子や「からくるりん」、そして東京で開催のIYPT閉会イベントの広告も一緒に展示しました。「からくるりん」は野老(ところ)実験クラブの佐藤康子さんの発明品で、昔懐かしいからくり紙細工が周期表になったものです。



図3：ロシアでの周期表国際会議でポスター展示。

「アトキンス物理化学」などの教科書で日本でも良く知られる Peter Atkins さん (Univ. of Oxford) の講演は、実に示唆に富んだものでした。2s 電子と 2p 電子のエネルギー縮退の理由を 3 次元から 2 次元に投影する図でイメージ化したり、別の世界の電子系の周期表の考察などがありました。2 次元クーロンポテンシャル、1 次元三角井戸、2 次元や 3 次元の井戸型閉じ込めポテンシャル。これらの世界のさまざまな周期表が紹介されました。この講演に触発されて即日 4 次元系の周期表や、原子核の周期表も作ってみました。原子核の方は忘年会で話が盛り上がり、京都大学に最近着任された原子核理論家の萩野浩一さんとのコラボで、論文投稿したところです。そのうち京大グッズに・・・

この他、周期表に関して多くの本を書かれておられる UCLA の Eric Scerri さん、QED 効果を含めて Z = 172 までの周期表を作られた Pekka Pyykkö さん (Univ. of Helsinki) にも会えました。Pyykkö さんの周期表では 5g 元素 (121-138) の次に 7d 元素 (156-164) があり、そのあとの 139 からの 8p 元素の途中に 141 からの 6f 元素が割り込みます [5]。



図 4：京都での周期表特別展ポスター

4. 京都に周期表マニアが集結

私にとって IYPT のメインイベントは、本新学術プロジェクトにも特別協賛いただいた京大での特別展でした。京都大学は「一家に 1 枚周期表」(玉尾、寺嶋孝仁 (A01 研究協力者) ら)、「エレメンタッチ周期表」(前野) の発祥地です。また、京都は「えれめんトランプ」のような知的啓発グッズも生み、「元素検定」(桜井弘、梶井文子ら) などの活動も発信してきました。

これらの背景を踏まえ、一般市民向けイベント「元素周期表 de ワクワク♪」と題した「国際周期表年 2019 特別展(京都)」を 2019 年 9 月 7 日(土)・8 日(日)の 2 日間、TopoMat2019 と同じ京都大学 百周年時計台記念館 国際交流ホールで開催しました(図 4)[2]。以下のように、① 周期表全国巡回展、② 講演会、③ 元素検定、④ 元素で遊ぼう、の構成で行い、約 350 名の来訪者を集めました。

① 周期表全国巡回展：メンデレーエフの時代から現在までの様々な周期表、元素が発見されたさまざまな鉱物、元素にまつわる最先端の科学技術について展示し、実験コーナー、高純度科学研究所のご協力による実物周期表の展示も設けました。さらに、周期表関連図書の展示と読書コーナー、京都大学元素同好会によるパネル展示も。それぞれの元素が発見時代ごとに色づけされた周期表が完成するという、シヤチハタさんの技術の粋を集めた? スタンプラリーも大好評でした。

② 講演会：周期表マニアの講師が集まり、それぞれの思いを込めた講演で会場を熱気に包みました。聴衆は元素・周期表マニアの小学生から大学関係者まで、約 100 席用意した会場の後方にもイス席をいっぱいまで並べました。「一家に 1 枚周期表」に込めた思い(玉尾皓平)、明治の化学者小川正孝とアジア初の新元素発見(久松洋二)、趣味で始める「元素学」# とは(谷口亜紳/元素学たん)など多彩な講師が揃いました。前野の講演では、メンデレーエフの短周期表から現代の周期表への転換に決定的な役割を果たしたヴェルナーの長周期表についても強調しました [6]。カメルン・オネスの物理学賞と同年の 1913 年にノーベル化学賞を受賞したヴェルナーは、錯体化学で現代でも著名なのに、長周期表の考案者としてはなぜか化学者

の間でさえあまり知られていません。高校の教科書には是非、メンデレーエフとともにその名を記してほしいものです [7, 8]。

③ 元素検定 (元素周期表同好会) : 定員 70 名で、当日に検定証発行まで行いました。これまで約 30 人という検定 1 級合格者も何人かスタッフとして来てくれました。

④ 「元素で遊ぼう」: 「周期表工作教室 (エレメンタタッチ)」 (前野) は 4 回開催しました。野老実験クラブは「からくるりん」 (佐藤康子) と元素記号の「元素ネイル」 (中村恵子) 施術コーナーを設けました。私も「O-Mo-Te-Na-Si」のネイルを左手の指 5 本に付けてもらって一日過ごしました。コンビニに買い物に行ったときは、レジで若干恥ずかしい思いをしました。さらに「えれめんトランプで遊ぼう」のコーナーでは、熱中して長時間過ごす子供たちもいました。これらの様子は、KBS 京都イブニングニュース (TV) および読売新聞にて報道していただきました。スナップ写真とアンケート結果については「国際周期表年 (IYPT) 実行委員会」の HP にも掲載されています (図 5) [2]。

このイベントの後、当研究室の先代教授である石黒武彦さんが立体周期表をいくつかの陶芸作品にされ、YouTube に動画を掲載されています [9]。石黒さんとのやり取りのおかげで、エレメンタタッチと過去の類似立体周期表の違いが鮮明になり、メンデレーエフの周期「律」を表現するには、エ

レメンタタッチのように s と p の電子系をまとめて一周期にすることが重要である理由を再認識できました [8]。

IYPT の一年間の活動で知り合った周期表マニアの同士の皆さんに感謝します。また、一連のアウトリーチ活動と一緒に取り組んでくれた TMS 事務局の高宮桂子さん・児玉知子さん、イベント開催にご協力いただいた常見俊直さん (京大理・社会連携) およびアルバイト学生の皆さんに感謝します。アウトリーチ活動の実施にあたり、新学術領域研究「トポロジカル物質科学」、その他の日本学術振興会プロジェクト、京都大学教育研究財団の補助を受けました。

- [1] D. Mendeleev, Zeitschrift für Chemie **1869**, 405-406.
- [2] <https://iypt.jp/news/index.html>
- [3] 前野悦輝, 日本物理学会誌 **57**, 681-683 (2002) および同号表紙.
- [4] <https://mendeleev150.ifmo.ru/>
- [5] Pekka Pyykkö, Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, 161-168 (2011).
- [6] A. Werner, Berichte **38**, 914-921 (1905).
- [7] 前野悦輝, 化学と工業 **72-11**, 951 (2019).
- [8] 前野悦輝, 化学 **74(12)**, 44-46 (2019).
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=l2l658s0LBU>



図 5 : 京都での周期表特別展の運営メンバー

これまでの会議活動

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	2015/08/18 第 1 回 2015/08/20 第 2 回 2015/08/27 第 3 回 2015/09/05 第 4 回 2015/11/06-07 第 5 回 2016/02/09-11 第 6 回	
H28 年度 (2016-17)	2016/12/16-18 第 2 回 東北大学	2016/11/17-18 第 7 回 2016/01/06-07 第 8 回	2016/09/19-21 第 1 回 "TOPO MAT Meeting" MPI, Stuttgart, Germany 2016/12/03-08 第 2 回 "EPiQS-TMS Trans-Pacific Conference on Topological Quantum Materials" Gump Station (UC Berkeley), Moorea 2017/2/13-18 第 3 回 "YITP-PKU-TMS International School and Workshop" (with ICQM- 北京大学) 京都大学
H29 年度 (2017-18)	2017/05/09-13 第 3 回 東京工業大学 * 国際会議 TopoMat2017	2017/12/18-19 第 9 回	2017/04/25-28 第 4 回 "TOP-SPIN and TMS International Workshop" (with TOP-SPIN-Italy) IFW Dresden, Germany 2017/10/02-03 第 5 回 "Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms" 東京大学 2018/01/11-14 第 6 回 "TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop" 京都大学
H30 年度 (2018-19)	2019/01/22-24 第 4 回 名古屋大学	2018/11/30-12/01 第 10 回	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)	2019/12/04-07 第 5 回 京都大学 * 国際会議 TopoMat2019	2019/08/02-03 第 11 回 2019/11/14-15 第 12 回	2019/10 第 9 回 "TMS-EPiQS3rd Alliance Workshop" Santa Barbara, USA 2019/09/30-10/03 第 10 回 "The Fourth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases" 京都大学 2019/10/21-25 第 11 回 "3rd EPiQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (TPQM2019)" KITP (UC Santa Barbara), USA

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**, JP18H042**(** は <http://topo-mat-sci.jp/contact/> で確認ください)。

また 総括班 X00: JP15H05851,

国際共著論文は全て : JP15K21717,

国際活動支援班 (Topo-Q) の支援 (REP, JREP, Topo-Q PD, etc.) を受けた成果 : 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に御礼申し上げます。記事を執筆していただいた著者の皆様、特に、十倉先生、安田様におかれましては、突然のお願いにもかかわらず執筆を御快諾いただき、誠にありがとうございました。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、児玉様、校正を引き受けていただいた山影様、田村様、矢野様、手塚先生に感謝申し上げます。長い時間を編集に割いていただいた前野先生、川上先生にもお礼申し上げます。

本新学術領域研究は前身の「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」から数えるなら、足掛け 10 年の長い期間にわたって行われ、併せて 10 号のニュースレターが発行されました。10 年前の新学術領域研究の開始時のシーンを思い返すなら、トポロジカル物理がこのような革新的な展開を成し遂げることを思い描くのは極めて難しく、何も分かっていなかった私は物性研 (当時) の佐藤 (昌) 先生を訪ねて、物理のバックグラウンドや展望を教えていただいたことを鮮明に覚えています。また白浜の研究会で前野先生、上田先生、安藤先生、宇田川先生らが今後の展望を語ったこと、前野先生、石川先生、田仲先生と先斗町で食事をしながら戦略を練ったこと、大地震の際に、ほぼ完全に破壊つくされた装置類の前で途方に暮れていたことも懐かしく思い出します。

トポロジカル研究はこれからもっと広範なフィールドに展開していくものと期待できます。たとえば素粒子や高エネルギー分野との共創により、さらに新しいフィールドを築いていくことが期待できます。トポロジカル材料は直接社会の役に立つ機能性素材として社会の中に入っていくことが期待できます。マヨラナコンピュータも数十年後にはすべての人が使うことのできる社会基盤になっているでしょう。そのような発展のために我々はさらに努力を続けていく必要があります、その発展を担っていく可能性のある若手が本学術領域から多く輩出できていることは大きな誇りです。本ニュースレターを執筆していただいている若手研究者はやがて日本の物性研究を担う研究者になるでしょう。その際に本ニュースレターを読み返してもらえれば、編集者担当者としては無上の喜びです。

(文責、柏谷 聡)