

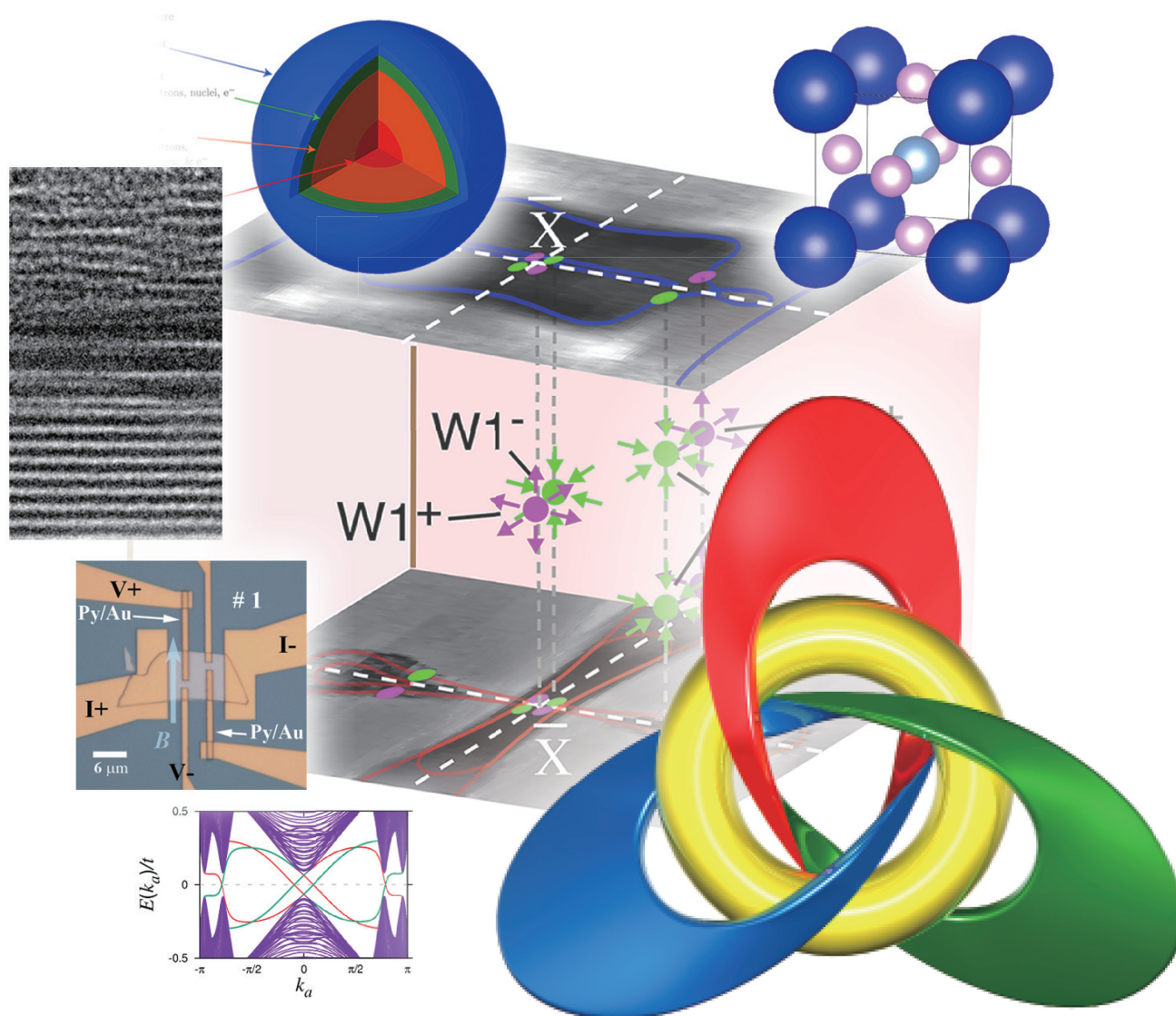
文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 H27(2015)-H31(2019) 年度

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. 2



February 2017

NEWSLETTER No.2

CONTENTS

- 2 巻頭言
 - さらなる飛躍を目指して / 川上 則雄 (京都大学)
 - 領域研究への期待 / 樽茶 清悟 (東京大学)
- 4 今年度の計画研究トピックス
 - 計画研究 A01、B01、C01、D01
- 16 受賞ニュース
 - 2016 年 Nevill F. Mott 賞 / 桂 法称 (東京大学)
- 17 トピックス
 - ヘリウム再凝縮装置・無冷媒マグネットの立ち上げ・運用を経験して / 瀬川 耕司 (京都産業大学)
 - 中性子星はトポロジカル超流体か? / 水島 健 (大阪大学)
- 22 2016 ピックアップトピックス
- 23 公募研究紹介
- 42 若手励起プログラム
 - 藤井 啓資 (東京工業大学)、高根 大地 (東北大学)、田村 駿 (名古屋大学)
 - 池田 敦俊 (京都大学)、ムハマド・シャーバズ・アンワー (京都大学)
- 47 REP 招聘報告
 - Mario Cuoco 博士 (サレルノ大学)、James Sauls 教授 (ノースウェスタン大学)
- 51 JREP プログラム 報告
 - 高三 和晃 (京都大学)、服部 綾実 (名古屋大学)、吉田 周平 (東京大学)、Ivan Kostylev (京都大学)、
 - ヤン・ニクラス・ハウスマン (ベルリン・フンボルト自由大学)、鈴木 修 (北海道大学)、
 - 吉田 恒也 (京都大学)、安井 勇気 (京都大学)
- 58 新 PD 紹介
 - 土師 将裕 (京都大学)、矢野 力三 (産業技術総合研究所)、林 朝鏡 (東京工業大学)
- 61 2016 年度研究会報告
 - 第 2 回領域研究会 / 第 10 回物性科学領域横断研究会 / 第 6 ~ 8 回トポロジー連携研究会 /
 - 第 1 回アライアンス研究会 / 第 2 回アライアンス研究会 / 市民講演会 / TOP-SPIN2 /
 - UFOX / QMS / APS March Meeting
- 76 TMS セミナー報告
- 77 コラム
 - ホール粘性をめぐるあれこれ / 西田祐介 (東京工業大学)
- 79 今年度以降の会議、論文等での謝辞について、編集後記

さらなる飛躍を目指して

川上 則雄 / 京都大学大学院理学研究科 教授 (研究代表者)



本新学術領域が発足し、ほぼ1年半が過ぎました。領域メンバーの方々の研究も軌道に乗ってきたことと思います。今年度から公募研究に19名の方々が参加されました。ヘリウム超流動や冷却原子系の実験など、計画研究に欠けていた研究も補強され、さらに充実した体制になりました。本領域の中間評価がもうすぐありますが、あせらず着実に研究を進めていきたいと思っています。

●ノーベル物理学賞●

2016年10月4日にうれしいニュースが飛び込んできました。2016年のノーベル物理学賞に、トポロジカル現象・相転移に関する先駆的な理論研究を行い、この分野を切り開いたKosterlitz, Thouless, Haldaneの3氏が輝きました。対象となった業績は「トポロジカル相転移とトポロジカル物質相の理論的発見」というものです。特に、受賞理由の中に"Strange phenomena in matter's flatlands", とか "The secrets of exotic matter" という表現が使われています。これは、KT転移やHaldaneスピン鎖の予言などが、基本原理のみからは容易に想像できない「創発現象」の典型例になっていることを表していると思います。

●「トポロジカル」って何?●

10月4日の夜には、新聞社から関係者に多くの問い合わせがあったものと思います。私自身も2時間近く、根気よく新聞社に説明を試みました。KT転移とは何か、Haldaneの研究した量子スピン系とはどのようなものか。しかし、次の日の多くの新聞記事を見てあっと驚きました:「数学のトポロジーを用いて超伝導を理論的に解明」。大手新聞社も含め、この業績を理解し読者に伝えることはたいへん難しかったようです。「トポロジカル物質」なるものを広く専門外の人に説明することが、いかに難しいかを象徴した出来事でもあったように思います。「連続変形するマグカップ」とトポロジカル物質の間にたいへん大きな壁があ

るように感じました。専門外の人から見たときトポロジカル物質とはいったい何なのか、私たちも今一度原点に返って考える必要があるようです。今後、アウトリーチで平易な解説を行うことが必須であることを痛感しました。

●対称性に守られたトポロジカル相●

今回の受賞対象になった研究は、KT転移、Haldane予想、量子ホール効果、チャーン絶縁体など、いくつかのトポロジカル物質・現象に関する研究からなっていますが、本新学術領域の「トポロジカル物質科学」と密接につながり、その土台となっています。中でも、Thoulessらにより進められた量子ホール系の理論とHaldaneによる拡張(チャーン絶縁体)は、その後、Kane-Meleにより発展させられ、トポロジカル絶縁体・超伝導体の爆発的な研究につながっていることは周知のことだと思います。さらに印象深いことは、Haldane量子スピン系とトポロジカル絶縁体・超伝導の密接なつながりです。最近の研究により、Haldane量子スピン系が「対称性に守られたトポロジカル相」の典型例であり、トポロジカル絶縁体・超伝導と同じ概念の中に納まることが分かっています。私自身も1990年代に1次元量子系の研究を行っていましたが、弱相関と強相関の量子現象を代表するこれらの概念が融合するとは思っていませんでした。本領域では、弱相関と強相関系を結ぶ研究をさらに深化させたいと考えています。

●さらなる飛躍を●

トポロジカル物質・現象という言葉が広く知られるようになったことは、私たち研究者に大きな刺激を与え、またこの分野の研究を目指す若手にとっても大きな励みになるものと期待しています。今後とも領域内外からの多くの協力のもと実り多い成果をあげ、専門外の方々にも「トポロジカル物質科学」とは何かを正しく理解して頂けるように精進したいと思います。

領域研究への期待

樽茶 清悟 / 東京大学 大学院工学系研究科 教授 (領域アドバイザー)



本学術領域研究の主題となっている「トポロジの物質科学」は、ここ数年益々ホットな話題になっていて、外国では欧米はもとより、とくに中国において帰国した人たちを中心に研究が急速に進んでいます。今年度のノーベル物理学賞はトポロジー理論に対する功績「theoretical discoveries of topological phase transition and topological phases of matter」に対して Thouless、Haldane、Kosterlitz の三氏に授与されましたが、これは世界の研究情勢を反映しているように思います。その中で本領域研究では、前身の新学術領域研究「トポロジカル量子現象」による先駆的な数多くの成果を発展させて、強相関、対称性、ナノサイエンスという、より焦点を絞った概念を研究対象としています。ナノサイエンスは新たな項目ですが、ナノ構造による人工トポロジカル相の創出は興味深いテーマと思います。本領域研究は、発足してまだ2年足らずですが、いずれの研究項目においても、すでに注目すべき成果が得られており、アドバイザーの一人として大変頼もしく感じています。

私自身は、最近、マヨラナフェルミオン、パラフェルミオン、アンドレーフ束縛状態、トポロジカル量子計算などに関心を持っています。従って、関連の会議にも時折参加していますが、どの会議でも若い人達による活発な研究報告が目につきます。本領域研究の会議でも、上記の話題には個人的な関心がありますが、強相関トポロジカル相、トポロジカル相転移などの新しい話にも刺激を受けています。とくにポスターによる若手の発表には活気があって頼もしい限りです。

現在の状況が続く限り、本領域研究の業績に関して、アドバイザーとして何の心配もしていません。また、総括班の企画する種々の全体プログラムに関しても、先の領域研究からのノウハウをもとに充実したものにしていると思います。中でも、国外研究機関とのアライアンスワークショップや国際スクールなどを通して国際ネットワークの構築、若手研究者が他研究室に武者修行的に参加する若手励起プログラムは、本領域研究の特徴といえるでしょう。このほか、アウトリーチ活動も充実していますが、蛇足の注文としては、トポロジーは一般には理解しにくい概念なので、ホームページや講演会などを通して、なるべく平易に解説する工夫をお願いしたいと思います。

余談ながら、マイクロソフトの Station Q と呼ばれるプロジェクトの一つとして、デルフト大、コペンハーゲン大、UCSB などの欧米の大学を中心にトポロジカル量子現象、トポロジカル量子計算の集中プロジェクトが数年前にスタートし、今や佳境に入っています。これに対抗する必要はないと思いますが、私は、本領域研究は、我が国における当該分野の研究を世界に伍して牽引する役割を担っていると考えています。競争的資金のプロジェクトでは、よく「何の役に立つか」といった問い掛けがなされますが、トポロジーは物質科学、物理現象を再構成する新しい自由度であり、本領域研究には、引き続きサイエンスとしての面白さ、より普遍的な物質・物理の研究が展開されることを期待しています。

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いきます。その際の指針の一つとなるのが、図1に示す相図[*]で、スピン軌道相互作用に伴うバンド反転等で生じるトポロジカル相が、電子相関の効果でさらに豊かなトポロジカル状態を生み出す様子を示しています。

研究テーマは、対象物質の性質によって、主にトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属、トポロジカル

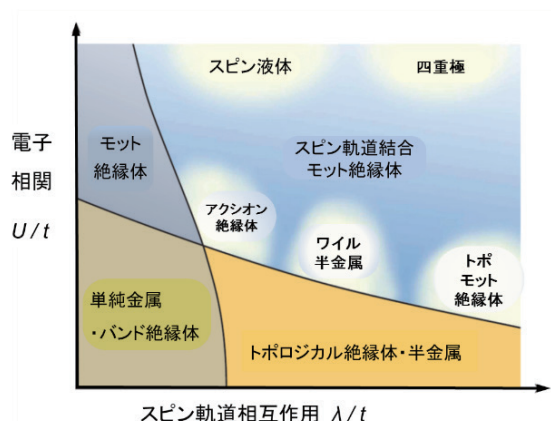


図1: 電子相関の強いトポロジカル相の相図[*]。
 U : 電子間斥力、 λ : スピン軌道相互作用、 t : トランスファー積分。



図2: 計画研究 A01 で扱う主な物質と物性。

磁性体（絶縁体）の3つに分類できます（図2）。以下では、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]-[d]はH27(2015)年度2月以降の計画研究A01の発表論文、[11]-[20]はH28(2016)年度の発表論文を発表順に並べたものです。

【1. トポロジカル超伝導体】

(1-1) ネマティック超伝導の発見

米澤・前野・俣野・鄭・瀬川・安藤(B01)、永井(D02)

計画研究A01とB01、さらに公募研究D02を含む共同研究により、超伝導波動関数の振幅が結晶の回転対称性を自発的に破る新奇な「ネマティック超伝導」をはじめて実証しました。これはまた、理論で提案されているトポロジカル超伝導の実現をも強く示唆する成果です。

トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 に銅をインターカレートした $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ は、トポロジカル超伝導の有力候補として注目されてきました。鄭・俣野らは、瀬川・安藤(B01)らが育成した単結晶試料について核磁気共鳴(NMR)実験を行い、超伝導状態のスピン磁化率の異方向性が、結晶の対称性から期待される3重回転対称性を破る2回対称性を示すことを発見しました[2]。この結果は、超伝導状態においてスピン回転対称性が破れたスピン三重項超伝導が実現していることを示しています。さらに米澤・前野らは、この物質の比熱の磁場方向依存性が、180度周期の振動を示すことを明らかにしました[13]。永井(D02)による理論解析を含めて、このことは、超伝導波動関数の振幅が結晶（および常伝導電子状態）の回転対称性を自発的に破る、新奇な「ネマティック超伝導」が実現していることを示したものです。

これらの成果は、これまでに知られていない種類の対称性破れを伴う新奇超伝導が $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で実現していることを初めて示しただけでなく、この物質がスピン三重項のトポロジカル超伝導体であることをバルク測定から実証したという重要な意義も持ちます。

(1-2) 強磁性金属へのスピン三重項超伝導近接効果の実証・奇周波超伝導との関連

Anwar・前野・米澤・寺嶋・浅野

トポロジカルな超伝導である、時間反転体対称性を破るスピン三重項超伝導体として有力な Sr_2RuO_4 についての研究も着々と進めました。Anwar(PD)らは、スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 (T)の単結晶を基板として、

その劈開面に強磁性金属 SrRuO_3 (F) の単結晶薄膜を成長させた2層系を素子化し、金を蒸着したT/F/N接合素子での超伝導近接効果を研究しました [16]。そして、アンドレーエフ反射の特徴から、スピン三重項のクーパー対が強磁性体中をF/N界面まで侵入しており、いわゆる「長距離近接効果」が実現していることを明らかにしました。従来のs波超伝導体を用いた場合、強磁性体金属中へのスピン三重項近接効果の実現には、不均質な磁性層の挿入を必要としていました。本研究での「直接的」長距離近接効果の実現は、 Sr_2RuO_4 の超伝導のスピン三重項性の新たな検証にもなります。

また、**柏谷 (B01)** らとの共同研究で、単結晶 Sr_2RuO_4 の中に析出したRu金属を弱結合としてNbのループを蒸着したSQUIDの作製にも成功し、Ru金属の超伝導転移(0.5 K)温度以下での、超伝導競合効果を明らかにしました [7]。その他、NMRによるスピン・スピン緩和時間 T_2 [15] や一軸方向の歪印加による“3-K”超伝導相の誘起 [19] など、特異な超伝導性を明らかにしました。関連テーマとして、**宇田川**は準2次元カイラル超伝導体の渦糸状態に伴うワイル相を研究しました [9]。また、**米澤**は準1次元有機超伝導体の超伝導状態に関するレビュー論文を発表しました [d]。さらに**浅野**は、**田仲 (B01)** らとの共同研究で、異方性超伝導体の接合における不純物散乱 [6] や、奇周波s波超伝導の生成と制御を量子ドット上で行う理論提案もしました [4]。

関連のテーマとして、超伝導接合におけるトポロジカル超伝導に関して、**浅野**らは、マヨラナ・フラットバンドを介した完全伝導の量子化を理論的に明らかにしました。ギャップがノードを持つ多くの超伝導体はその表面に高い縮退度のゼロエネルギー状態を持ちます。汚れた金属と接合した場合、この縮退は解けますが、奇パリティ超伝導体表面のマヨラナ・フラットバンドは縮退が解け残り、それが金属に侵入して完全伝導を起こします。**浅野**らは、解け残る縮退数がアッティヤ・シンガーの指数で与えられ、**図3**に示すように、接合のコンダクタンスがこの指数に対応する整数値に量子化されることを示しました [5, 8]。これは金属中に染み出した奇周波数クーパー対の異常近接効果と深く関係した現象です。

(1-3) 微小なカイラル超伝導体のカイラルエッジ電流

浅野

浅野らは時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導状態のエッジモードに伴うカイラル電流に対する、マイスナー遮蔽効果と表面ラフネスの効果を理論的に調べました。その結果、カイラルp波超伝導のエッジ電流は、表面ラフネスにあまり影響されず、それが作る磁化も十分観測可能な大きな振幅を持つことを明らかにしました [14]。

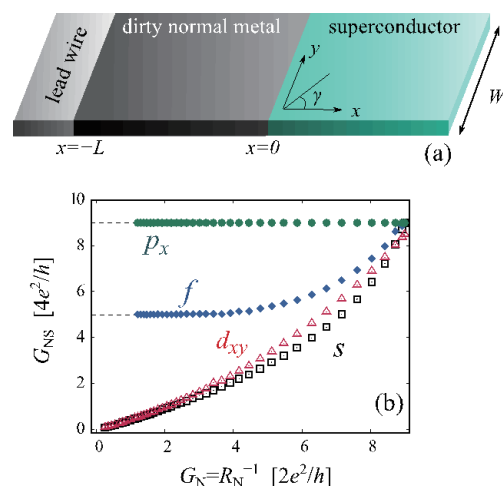


図3: (a) NS接合の概念図。(b) NS接合のゼロバイアスコンダクタンスの金属部コンダクタンス依存性。 p 波の指数は9、 f 波の指数は5、 s 波と d 波の場合指数は0。

(1-4) アンチペロブスカイト酸化物で初めての超伝導の

発見 **米澤・前野・佐藤昌 (D01)**

通常のペロブスカイト酸化物に比べて、対応するイオン価数の符号が逆転した「アンチペロブスカイト酸化物」は、3次元ディラック電子を持つトポロジカル結晶絶縁体の候補物質系で、次節の「トポロジカル半金属」として重要な研究対象です。**前野・米澤**らはキャリアドーピングにより、アンチペロブスカイト酸化物では初めての超伝導を発見しました。さらに、計画研究 **D01** との共同研究により、トポロジカル超伝導が起っている可能性を指摘しました [18]。

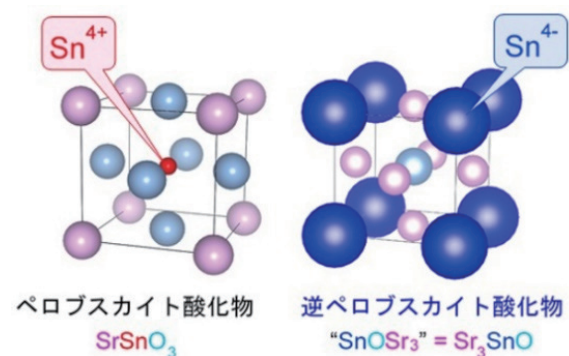


図4: 左は通常のペロブスカイト酸化物 SrSnO_3 。右はマイナスイオン金属イオン Sn^{4+} を含む逆ペロブスカイト酸化物 SnOSr_3 (Sr_3SnO とも書ける)； SnOSr_{3-x} の超伝導を発見。

[2. トポロジカル半金属等]

(2-1) ワイル半金属におけるカイラル磁気効果の予言

藤本

ワイル半金属の重要な特徴であるカイラル異常は異常ホール効果、カイラル磁気効果、負の磁気抵抗等の特異な輸送現象として発現します。しかし、これまで多くの観測事例がある電流と平行な磁場のもとでの負の磁気抵抗は、電流分布の不均質性に因る場合も考えられ、ワイル半金属の決定的証拠とならないことが最近の研究で分かってきました。これに対して**藤本**らは

TOPICS

通常の電磁応答でなく転位等の格子欠陥が生ずる擬似的磁場によるカイラル磁気効果を理論的に提案し(図5)、現実のワイル半金属物質において観測可能なカイラル異常の直接的証拠となることを明らかにしました[1]。

なお、前野・米澤らは、ワイル半金属で期待されていたのと同様の式で表される負の磁気抵抗効果が、実は準2次元金属PdCoO₂の面間方向の磁場中での面間導電性にも現れること、そしてこれは面間方向に僅かな分散を持つ系でのランダウ量子化で説明出来ることを明らかにしました[c]。

関連テーマとして宇田川は、タイプIIワイル物質での磁気異常とカイラルモード反転について理論的に考察しました[10]。

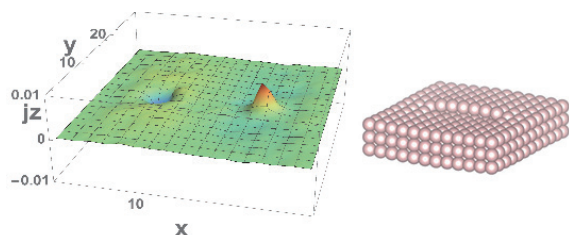


図5. カイラル磁気効果の例。左は右図のワイル半金属のらせん転位にともなう電流分布。

(2-2) ゼロギャップ半導体 高木

ゼロギャップ半導体Ta₂NiSe₅において、 $T_c = 328$ K以下でTa 5d電子とNi 3d正孔対(励起子)が自発生成し、超格子形成を必要としない $q = 0$ 励起子絶縁体に転移することを実験的に示しました[20]。d電子特有の重い質量に加えて、電子鎖と正孔鎖の空間分離により励起子束縛エネルギーが0.2 eVと極めて大きいことが、その起源であることも明らかにしました。一電子バンドギャップをパラメータとして、ゼロギャップ付近で T_c がピークを示すドーム状の電子相図を提示しました。これは励起子絶縁体に期待される振る舞いと一致するものです。この成果は、今後のトポロジカル相の創成・制御に重要なヒントを与えるものです。

[3. トポロジカル磁性体]

(3-1) パイロクロア格子酸化物におけるエキゾチック準

粒子 松田・宇田川・寺嶋

スピンの量子ゆらぎの効果により秩序化しない量子スピン液体では、トポロジカルな基底状態や特異な素励起(準粒子)の出現が予言されています。松田・宇田川・寺嶋らは強い幾何学的フラストレーションの効果によりスピン液体状態に非常に近接するパイロクロア酸化物Yb₂Ti₂O₇において、遍歴的な低エネルギー励起に敏感な手法である熱伝導率測定を行い、極低温で特異な振る舞いを観測しました[b]。その結果Yb₂Ti₂O₇では、古典的には拡散的に振る舞う磁気モノポールとよばれる素励起が、量子ゆらぎによりコヒーレントなバリステック伝導を示すことを明らかにしました。

また、宇田川はスピンアイス系における非平衡状態

でのダイナミクスを考察しました[11]。

(3-2) ハニカム格子ルテニウム酸化物における新奇ダイマー状態 前野・米澤

トポロジカルな性質を持つキタエフ・スピン液体の実証を目指し、ハニカム格子の遷移金属酸化物、特にイリジウム酸化物の研究が活発に行われています。前野・米澤らは、関連のハニカム格子系のルテニウム酸化物Li₂RuO₃のRu-Ruダイマー転移に対する乱れの効果[a]、およびLi欠損系での特異なダイマー転移を明らかにしました[12]。

(3-3) イリジウム層状酸化物 高木

Sr₂IrO₄は電子相関とスピン軌道相互作用の協奏により生じた $J_{\text{eff}}=1/2$ のモーメントを有するスピン軌道モット絶縁体です(図1も参照)。通常スピン軌道相互作用の強い系では磁気異方性が顕著となりますが、Sr₂IrO₄ではスピン軌道相互作用に誘起される等方性(ハイゼンベルグ性)が出現するとされています。帯磁率の解析から、磁気相関が二次元 $S = 1/2$ ハイゼンベルグスピンとして振る舞い、高温超伝導銅酸化物との等価性を示しました[17]。低温で現れる三次元磁気秩序構造に面間の磁気結合のフラストレーションが重要な役割を果たしていることも明らかにしました。

(3-4) 重い電子系人工超格子における磁気量子相転移の制御 松田・寺嶋・笠原

世界に類を見ない薄膜作製技術を用いて重い電子系の超格子を作製することで、人工的な量子相転移制御やトポロジカル量子相の実現が期待されます。松田・寺嶋・笠原らは、スピン密度波(SDW)を示す磁性金属CeRhIn₅と非磁性金属YbRhIn₅の超格子(図6)を作製することで、SDWの低次元化による量子相転移の実現に成功しました[3]。さらに、観測された量子臨界点の異方的な磁場応答について、界面における局所的な空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用に伴うラッシュバ分裂が重要な役割を果たしていることを明らかにしました。

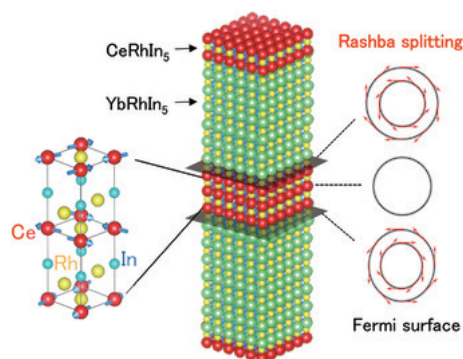


図6: CeRhIn₅/YbRhIn₅人工超格子の模式図と界面におけるラッシュバ分裂の概念図。

本計画研究 A01 は、《研究項目 A: トポロジと強相関》の柱として、トポロジカル超流動など相補的テーマを含む公募研究 A01 (4 件)・D02 (4 件) との連携も進めています。また、研究項目間の連携では、マヨラナ準粒子の検証等で D01・C01 と、奇周波数超伝導等で B01 と、超伝導素子開発等で C01 と、それぞれ情報・アイデア・ノウハウの交換やアナロジー追及も含めて連携して相乗的な研究展開を図っています。さらに、国際共同研究の展開も含め、世界を先導する研究成果の発信を目指します。これらの研究を活発な連携を生かして進めることで、新学術領域「トポロジが紡ぐ物質科学のフロンティア」の開拓と基礎学理の構築・学問体系の樹立を目指す本領域全体の目的遂行に貢献します。

[*] "Correlated Quantum Phenomena in the Strong Spin-Orbit Regime", W. Witczak-Krempa, G. Chen, Y. B. Kim, L. Balents, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **5**, 57–82 (2014).

● H27(2015) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文

[a] "Effect of disorder on the dimer transition of the honeycomb-lattice compound Li_2RuO_3 ", M. P. Jimenez-Segura, A. Ikeda, S. Yonezawa, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **93**, 075133 (Feb. 2016).

[b] "Possible observation of highly itinerant quantum magnetic monopoles in the frustrated pyrochlore $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ", Y. Tokiwa, T. Yamashita, M. Udagawa, S. Kittaka, T. Sakakibara, D. Terazawa, Y. Shimoyama, T. Terashima, Y. Yasui, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Nature Commun.* **7**, 10807 (Feb. 2016).

[c] "Interplanar coupling-dependent magnetoresistivity in high-purity layered metals", N. Kikugawa, P. Goswami, A. Kiswandhi, E. S. Choi, D. Graf, R. E. Baumbach, J. S. Brooks, K. Sugii, Y. Iida, M. Nishio, S. Uji, T. Terashima, P. M. C. Rourke, N. E. Hussey, H. Takatsu, S. Yonezawa, Y. Maeno, L. Balicas, *Nature Commun.* **7**, 10903 (Mar. 2016).

[d] "Novel superconducting phenomena in quasi-one-dimensional Bechgaard salts", D. Jerome, S. Yonezawa, *Comptes Rendus Physique* **17**, 357 (Mar. 2016).

● H28(2016) 年度の計画研究 A01 発表論文 (発表順)

[1] "Torsional Chiral Magnetic Effect in a Weyl Semimetal with a Topological Defect", H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 166601 (Apr. 2016).

[2] "Spin-rotation symmetry breaking in the superconducting state of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, G.-q. Zheng, *Nature Phys.* **12**, 42520 (May. 2016).

[3] "Tuning the Magnetic Quantum Criticality of Artificial Kondo Superlattices $\text{CeRhIn}_5/\text{YbRhIn}_5$ ", T. Ishii, R. Toda, Y. Hanaoka, Y. Tokiwa, M. Shimozaawa, Y. Kasahara, R. Endo, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 206401 (May. 2016).

[4] "All-electrical generation and control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots", P. Burset, B. Lu, H. Ebisu, Y. Asano, Y. Tanaka, *Phys. Rev. B* **93**, 201402(R) (May. 2016).

[5] "Degeneracy of Majorana bound states and fractional Josephson effect in a dirty SNS junction" S. Ikegaya, Y. Asano, *J. Phys. Cond. Matter.* **28**, 375702 (Jul. 2016).

[6] "Influence of the impurity scattering on charge transport in unconventional superconductor junctions", B. Lu, P. Burset, Y. Tanuma, A.A. Golubov, Y. Asano, Y. Tanaka, *Phys. Rev. B* **94**, 014504 (Jul. 2016).

[7] "Evolution of supercurrent path in Nb/Ru/ Sr_2RuO_4 dc-SQUIDs", Y. Nago, R. Ishiguro, T. Sakurai, M. Yakabe, T. Nakamura, S. Yonezawa, S. Kashiwaya, H. Takayanagi, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **94**, 054501 (Aug. 2016).

[8] "Quantization of conductance minimum and index theorem", S. Ikegaya, S. Suzuki, Y. Tanaka, Y. Asano, *Phys. Rev. B* **94**, 054512 (Aug. 2016).

[9] "Generic Weyl phase in the vortex state of quasi-two-dimensional chiral superconductors", Tomohiro Yoshida, M. Udagawa, *Phys. Rev. B* **94**, 060507R-1-4 (Aug. 2016).

[10] "Field-Selective Anomaly and Chiral Mode Reversal in Type-II Weyl Materials", M. Udagawa, E.J. Bergholtz, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 086401-1-5 (Aug. 2016).

[11] "Out-of-equilibrium dynamics and extended textures of topological defects in spin ice", M. Udagawa, L. D. C. Jaubert, C. Castelnovo, R. Moessner, *Phys. Rev. B* **94**, 104416-1-24 (Sep. 2016).

[12] "Effect of delithiation on the dimer transition of the honeycomb-lattice ruthenate $\text{Li}_{2-x}\text{RuO}_3$ ", M. Jimenez-Segura, A. Ikeda, S. A. J. Kimber, C. Giacobbe, S. Yonezawa, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **94**, 115163 (Sep. 2016).

[13] "Thermodynamic evidence for nematic superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno, *Nature Phys.* **13**, 123-126 (Feb. 2017, Online: Oct. 2016).

[14] "Spontaneous edge current in a small chiral superconductor with a rough surface" Shu-Ichiro Suzuki, Yasuhiro Asano, *Phys. Rev. B* **94**, 155302 (Oct. 2016).

[15] "Anomalous magnetic fluctuations in superconducting Sr_2RuO_4 revealed by ^{101}Ru nuclear spin-spin relaxation", M. Manago, T. Yamanaka, K. Ishida, Z.Q. Mao, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **94**, 144511 (Oct. 2016).

[16] "Direct penetration of spin-triplet superconductivity into a ferromagnet in $\text{Au}/\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ junctions", M. S. Anwar, S. R. Lee, R. Ishiguro, Y. Sugimoto, Y. Tano, S. J. Kang, Y. J. Shin, S. Yonezawa, D. Manske, H. Takayanagi, T. W. Noh, Y. Maeno, *Nature Commun.* **7**, 13220 (Oct. 2016).

[17] "Model analysis of magnetic susceptibility of Sr_2IrO_4 : A two-dimensional $J_{\text{eff}} = 1/2$ Heisenberg system with competing interlayer couplings", T. Takayama, A. Matsumoto, G. Jackeli, H. Takagi, *Phys. Rev. B* **94**, 224420 (Dec. 2016).

[18] "Superconductivity in the antiperovskite Dirac-metal oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ ", M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, Y. Maeno, *Nature Commun.* **7**, 13617 (Dec. 2016).

[19] "Strong peak in T_c of Sr_2RuO_4 under uniaxial pressure", A. Steppke, L. Zhao, M. E. Barber, T. Scaffidi, F. Jerzembeck, H. Rosner, A. S. Gibbs, Y. Maeno, S. H. Simon, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, *Science* **355**, eaaf9398-1-5 (Jan. 2017).

[20] "Zero-gap Semiconductor to Excitonic Insulator Transition in Ta_2NiSe_5 ", Y. F. Lu, H. Kono, T. I. Larkin, A. W. Rost, T. Takayama, A. V. Boris, B. Keimer, and H. Takagi, *Nature Commun.* Accepted.

対称性に基づいた新奇的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 准教授

計画研究 B01「対称性に基づいた新奇的なトポロジカル相の探求」の目的は、対称性とスピン軌道相互作用を起源とする新しい種類のトポロジカル物質を探索するとともに、トポロジカル物質が発現する新奇量子現象やエキゾチック準粒子の性質を解明することである。以下では、今年度の主な成果からいくつかのトピックを選んで紹介する。

1. 新奇トポロジカル半金属

ワイル半金属は、時間あるいは空間反転対称性を破り、バンドのスピン縮退を解くことで得られる新たなトポロジカル半金属相である [1]。最近、空間反転対称性を持たない TaAs 系物質がワイル半金属であると理論予測がなされ、精力的に研究が行われている。これらの物質群の中で最もスピン軌道相互作用の小さい NbP 単結晶の ARPES 実験を行い、表面バンド構造を決定した [2]。図 1 に示すように、NbP の表面電子構造は、終端面の種類により劇的に変化することが明らかになった。P 終端面においては、X 点まわりの tadpole 型のフェルミ面が観測されるのに対し、Nb 終端面では X 点を取り囲む全く別のフェルミ面が観測された。バルクワイルノードの射影点は表面状態の詳細にかかわらず同一であることから、Nb/P 終端面におけるフェルミ面の交点位置からワイルノードの位置とフェルミアークを見出した。これらの結果は、NbP が空間反転対称性を破る新型のワイル半金属であることを示している。

新しい種類のトポロジカル半金属として最近注目されているのが線ノード半金属である。ワイル半金属では伝導帯と価電子帯が「点」で縮退するのに対して、線ノード半金属では「線」上に縮退が起こる。線ノード

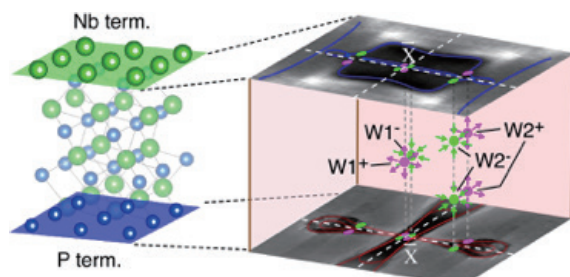


図 1: NbP の Nb 終端面 (上) と P 終端面 (下) の表面フェルミ面とバルクワイルノード (W1, W2)。

ド半金属相が実現する具体的な物質が幾つか理論的に提案されているが、それらを実験的に同定した例は殆ど無い。Si の正方格子を有する層状物質 HfSiS の電子構造を ARPES で決定し、この物質がグライド対称性によって保護された線ノードを有するトポロジカル半金属であることを明らかにした。さらに線ノード近傍で、一次元的に縮退線が伸びる X 字型の表面状態「ディラックノードアーク」(図 2) を観測した [3]。

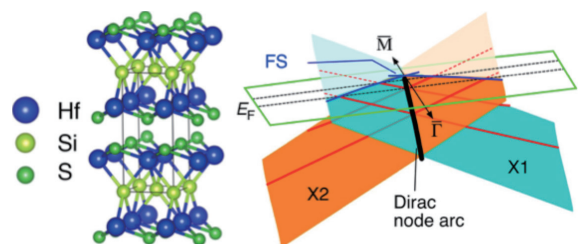


図 2: HfSiS (左) とディラックノードアーク (右)。

2. トポロジカル絶縁体スピンデバイス

トポロジカル絶縁体の表面状態の特徴の一つに、運動量とスピンの向きが 1 対 1 に対応するスピン - 運動量ロッキングというものがある。このスピン偏極を観測するために、強磁性電極による輸送特性の測定が試みられてきたが、スピン - 運動量ロッキングによりスピン緩和長が平均自由行程と等しくなってしまうために微細加工が必要であるという事情もあり、初めての観測の報告は 2013 年とかなり遅い時期になってからであった。具体的には、試料表面で電流をある方向に流した場合、強磁性電極の磁化の向きに応じた信号が輸送特性に観測される結果がこれまでに複数報告されている。

トポロジカル絶縁体の表面状態のキャリアは、化学ポテンシャルの位置によって n 型と p 型のどちらの符号も取りうる。キャリア符号の反転とともにスピンの向きも反転するが、電流に対する応答では同じ電流に対して粒子の流れが n 型と p 型で逆方向になるため、キャリアの符号を反転させても観測される信号は反転せず、スピントランジスタにつながるような応答は期待できない。しかし実験では、その信号の向きに正と負の 2 通りの観測の報告がこれまでにあり、今回の実験では、どのような状況で信号の向きが変わるかを明らかにした (図 3)[4]。

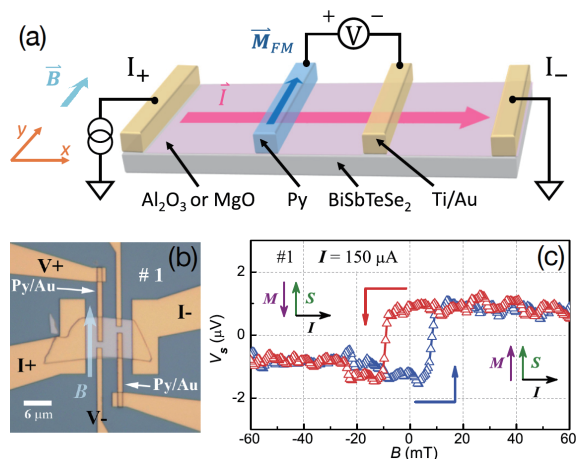


図3: (a) 測定概念図。(b) BiSbTeSe₂ 試料上に作製したデバイスの例。(c) 観測された輸送特性。この試料はバルク伝導性があり、信号が逆に出ている。

バルク絶縁性に乏しい試料では表面における強いバンドベンディングによってバルクバンドのラッシュバ分裂が起き、そのバンドにおけるスピンの向きがトポロジカルな表面状態の逆になることから観測される信号が逆向きになることが起こりうる。この知見は今後のスピントランジスタ実現に役立つことが期待される。

3. トポロジカル超伝導接合

トポロジカル超伝導の最有力候補である Sr₂RuO₄ と Nb のハイブリッド構造による超伝導ループとジョセフソン接合を作製し (図4)、dc-SQUID の干渉パターンから超伝導状態に関する情報の抽出を行った [5]。3 K 相、Sr₂RuO₄、Ru 金属相が異なる温度で超伝導転移を起こすため多彩な干渉パターンが観察されたが、電流パスの変化、および臨界電流のメカニズムに関して、適切なモデルを構築することにより、干渉パターンの全温度領域の特性を説明できた。一方 Sr₂RuO₄ がトポロジカル超伝導であることの積極的な証拠を検出するには至っていない。

また、トポロジカル超伝導性の決定的な証拠となるエッジ電流を検出するための scanning SQUID を構築し、デバイス内の電流分布のマッピングが可能なることを、磁束量子のピンニング力の極めて弱いタングステンカーバイド膜を用いて検証した [6]。この技術を進

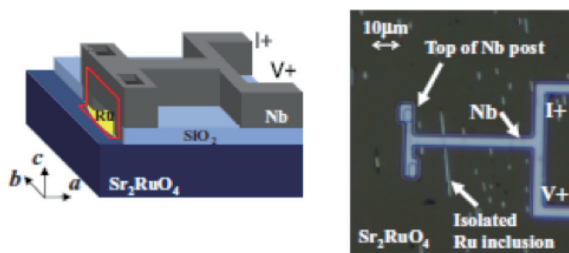


図4: Sr₂RuO₄ と Nb のハイブリッド構造による超伝導ループとジョセフソン接合。

めることによりトポロジカルエッジ電流の検出が可能になると期待される。Scanning SQUID は場所分解能を有する電流分布測定が可能である一方で、試料と SQUID 間距離をサブミクロンまで短くすることは極めて困難であるため、場所と磁場分解能に制限が生じる。これを克服するために、SQUID アレーを構成し、その上に直接ミクロン程度のサイズの Sr₂RuO₄ 試料を直接設置することにより高分解能の実現を目指している。今回は、マイクロアレーを実際に作製して特性の評価を行い、試料中の磁場分布の測定が十分可能であることを示した [7]。

4. トポロジカル絶縁体薄膜の作製と電子状態評価

薄膜の組成を分子線エピタキシー法 (MBE) で精密に制御することで、トポロジカル相転移やワイル半金属の制御手法確立を目的とした研究を行っている。特に、電子構造の変化を ARPES で確認しながら、電気伝導特性を合わせて議論することで、将来的な物質設計に発展させることは有用な技術になるものと期待できる。現在までに、真空一貫搬送による MBE による薄膜合成 (塚崎) と ARPES による電子状態評価 (佐藤宇) のフィードバックシステムの構築が順調に進み、図5に示す (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ の薄膜合成と ARPES 評価を実施した。その結果、Sb 組成の増加に伴い、フェル

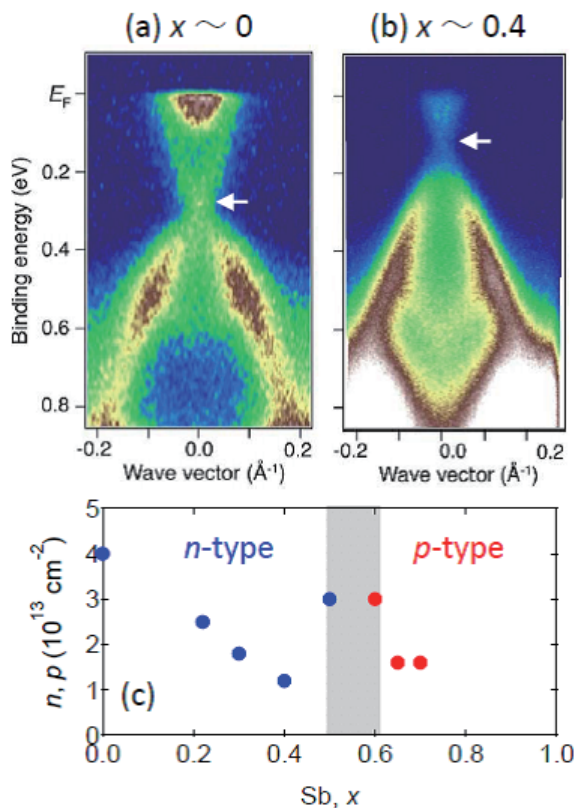


図5: (a),(b) (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ の ARPES データ [(a)x~0.2, (b)x~0.4]。(c) Hall 効果測定で求めた電子濃度と正孔濃度の Sb 濃度依存性。

TOPICS

ミ準位が価電子帯にシフトする様子を観測した [図 5(a),(b)]。また、Hall 効果測定の結果においても p 型伝導性を確認しており [図 5(c)]、 Bi_2Se_3 ベースの混晶薄膜においても、組成の調整でディラック点近傍にフェルミ準位を制御できる可能性を示した。なお、これらの結果は、さらなる Sb 組成の増加を実現することで、トポロジカル相転移の可能性を検証する土台が整ったことを意味しており、今後の精密組成制御と物性理解によって、トポロジカル相転移の制御手法への指針となることが期待される。

5. 奇周波数クーパー対の理論

5-1. 2 重量子ドット・超伝導クーパー対接合

2 重量子ドット・超伝導接合系は、クーパー対スプリッターとして関心が集まっている系である。この系でドットのエネルギー準位、ドットと電極、ドットと超伝導体の結合の大きさを制御することによって、誘起される奇周波数クーパー対を制御できることを明らかにした [8]。特に、2 つの量子ドットのレベルがフェルミ準位に位置する共鳴条件を満たす際には、非局所アンドレーエフ過程が奇周波数検出に有効であることが分かった。図 6 のような接合で、左から右の電極に流れる電流には、非局所アンドレーエフ反射 (crossed Andreev reflection) と電子のトンネル過程 (co-tunneling) の両者が寄与するが、共鳴条件を満たす際に零電圧で非局所アンドレーエフ反射による正のコンダクタンスを示すことが、ドットの自由度に関して符号変化する奇周波数クーパー対が存在することに対応することを明らかにした [8]。

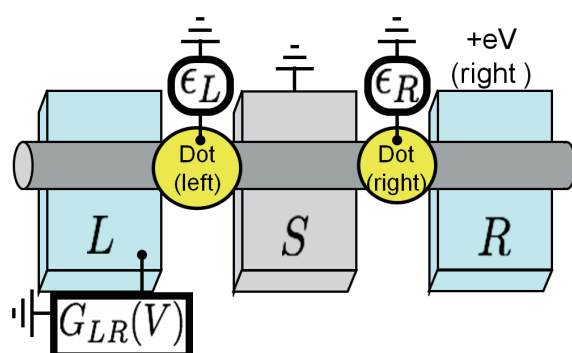


図 6: 非局所コンダクタンスの測定の概念図。

5-2. 2 チャンネル近藤格子における奇周波数クーパー対接合の理論

2 チャンネル近藤格子においては奇周波数ギャップ関数が得られることが星野らにより得られていたが、この系と通常の超伝導体あるいは奇周波数 s 波クーパー対をエッジ状態として持つ p 波超伝導体との接

合系のジョセフソン効果の計算が行われた。得られた結果には虚数を含むような項は現れず物理的なものであった [9]。バルクで奇周波数ギャップ関数が存在する際には、非一様な系であることが必要であることが確認された。

- [1] “物質のなかのワイル粒子”, 相馬清吾, パリティ「物理科学この一年」2017 年 1 月号.
- [2] “Direct observation of non-equivalent Fermi-arc states of opposite surfaces in noncentrosymmetric Weyl semimetal NbP”, S. Souma et al., Phys. Rev. B **93** (2016) 161112R (Editors' suggestion).
- [3] “Dirac-node arc in the topological line-node semimetal HfSiS”, D. Takane et al., Phys. Rev. B **94** (2016) 121108R.
- [4] “Switching of charge-current-induced spin polarization in the topological insulator BiSbTeSe₂”, F. Yang et al., Phys. Rev. B **94** (2016) 075304.
- [5] “Evolution of supercurrent path in Nb/Ru/Sr₂RuO₄ dc-SQUIDS”, Y. Nago et al., Phys. Rev. B **94** (2016) 054501.
- [6] “Development of Magnetization Measurement Devices Using Micro-dc-SQUIDS and a SrRuO Microplate”, Y. Nagao et al., J. Low Temp. Phys. **183** (2016) 292.
- [7] “Development of a Two-Dimensional Micro-SQUID Array for Investigation of Magnetization Spatial Distribution”, D. Sakuma et al., J. Low Temp. Phys. **183** (2016) 300.
- [8] “All-electrical generation and control of odd-frequency s -wave Cooper pairs in double quantum dots”, P. Burset et al., Phys. Rev. B **93** (2016) 201402.
- [9] “Tunneling and Josephson effects in odd-frequency superconductor junctions: A study on multichannel Kondo chain”, S. Hoshino, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **93** (2016) 224511.

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。最近のトピックスを紹介します。

1. 一次元電子系の長寿命非平衡状態

藤澤 (C01 代表者)、橋坂 (C01 連携研究者)、村木 (C01 分担者) らは、GaAs 系量子ホール効果におけるエッジチャンネルを結合した人工的な朝永ラッティンジャー流体において、非平衡状態が電子緩和よりも長い緩和長を有することを見出しました [1]。実験は、図 1 のようにエッジチャンネルを結合することにより、スピニフルで双方向の朝永ラッティンジャー流体を形成して行いました。量子ポイント接合 (PC) を用いて 1 つのエッジチャンネルに局所的な非平衡状態を形成させると、相互作用によって 4 つのエッジチャンネルに電子成功励起が発生します。この非平衡励起状態のエネルギー分光を行なうと、低温の電子と高温の電子が共存しているように観測されます。通常の液体であれば中間温度の熱平衡状態に移行すると考えられますが、朝永ラッティンジャー流体の場合には非平衡な励起状態に長く留まると考えられており、一次元系の特異な長寿命状態の観測に成功したものです。

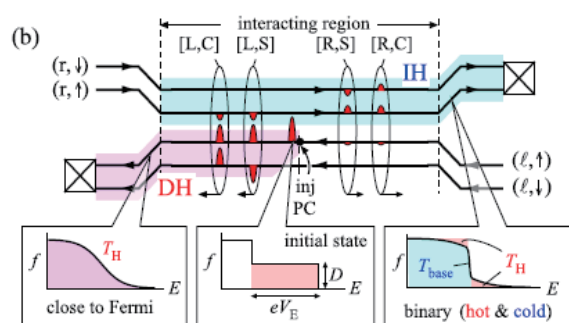


図 1. カイラル一次元チャンネル (矢印付き実線) を結合することにより朝永ラッティンジャー流体 (interacting region) を形成した。初期状態 (中央下挿入図) から、二成分温度をもつ非平衡状態 (右下挿入図) が形成される。

2. InAs/(In,Ga)Sb 歪み量子井戸による 2 次元トポロジカル絶縁体のバンドエンジニアリング

秋保 (C01 連携研究者)、入江 (C01 連携研究者)、村木 (C01 分担者) らは、InAs/GaSb 系 type-II 量子井戸において、GaSb よりも格子定数の大きい In_{0.25}Ga_{0.75}Sb を用いることで、面内の圧縮歪によってバンド反転したトポロジカル相において従来よりも大きなバンドギャップが得られ、それによってバルクの抵抗率が従来の InAs/GaSb 系よりも 2 桁向上することを示しました (図 2) [2]。また、従来の InAs/GaSb 系においても、試料構造を工夫し、ゲート電界によってバルク伝導を抑制することで、単一エッジチャンネルのほぼ量子化した伝導を観測しました [3]。

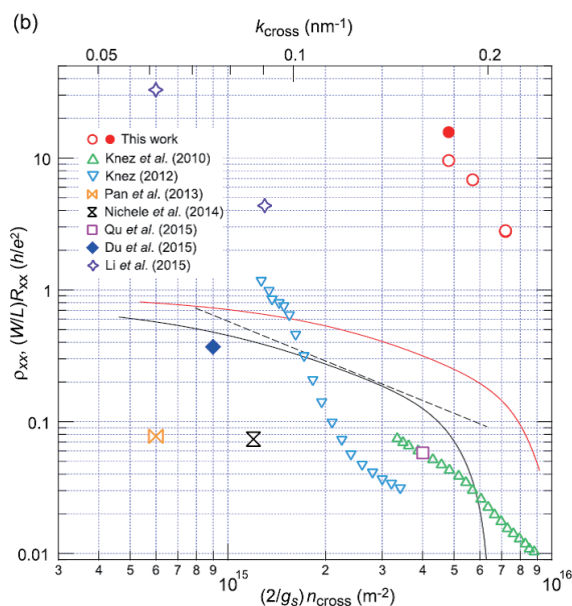


図 2. InAs/InGaSb 系 (赤丸) と従来の InAs/GaSb 系の電荷中性点における抵抗率の比較。横軸はバンド反転の大きさを示す。実線と破線は理論曲線。

3. バリスティック 2 次元電子系におけるアンドレーエフ反射とアンドレーエフ束縛状態

入江宏 (C01 連携研究者) と村木 (C01 分担者) らは、量子ポイント接合を単一モードの透過率可変なプローブとして、Nb を近接させた In_{0.75}Ga_{0.25}As 2 次元電子系においてバリスティック領域におけるアンドレーエフ反射とアンドレーエフ束縛状態を観測しました [4]。

TOPICS

4. 半導体中の永久スピン旋回状態のゲート制御

好田 (C01 分担者) らは、半導体において長距離スピン輸送が可能となる永久スピン旋回状態とその逆状態のゲート制御に成功しました [5]。(001) 量子井戸において、ラシュバおよびドレSSLハウススピン軌道相互作用が等しい場合、有効磁場が SU(2) 対称性を有するためスピン軌道相互作用の存在下であってもスピン緩和の抑制が可能となります。これは永久スピン旋回状態 (Persistent spin helix state; PSH) と呼ばれ、長距離スピン輸送とスピン制御を同時に兼ね備える魅力的な状態です。さらに、ラシュバスピン軌道相互作用の符号を正から負へと変えることでその逆状態 (i-PSH) も可能となり、PSH と i-PSH 状態を用いるとスピンを用いた相補型トランジスタの実現が可能となります。表面ゲート付き InGaAs/InAlAs 量子井戸構造を用いて、磁気輸送特性に表れる弱反局在解析からスピン緩和長のゲート (キャリア濃度) 依存性を求めました (図 3)。その結果、異なる 2 か所のキャリア濃度 ($1.2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$, $1.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$) においてスピン緩和長が急激に増大することが分かり、PSH と i-PSH 状態をゲート電圧により切り替えることに成功しました。

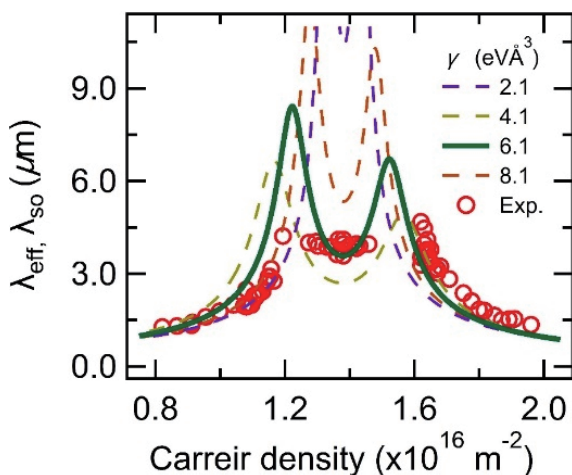


図 3. 弱反局在から求めたスピン緩和長のキャリア濃度依存性とバルクドレSSLスピン軌道相互作用係数 γ を変えたフィッティング結果。

5. ワイル半金属のスピン電磁応答

野村 (C01 分担者)、大湊 (C01 博士研究員) らは、強磁性秩序を有するワイル半金属の磁気輸送現象の研究に取り組み、磁性ワイル半金属を含む接合系では、スピン - 運動量ロッキングにより 100% の異方的磁気抵抗が可能であることを明らかにしました (図 4 参照) [6]。

このほか、磁性ワイル半金属を含むデバイスでは、バイアス電圧による磁化の反転や振動電圧によるスピ

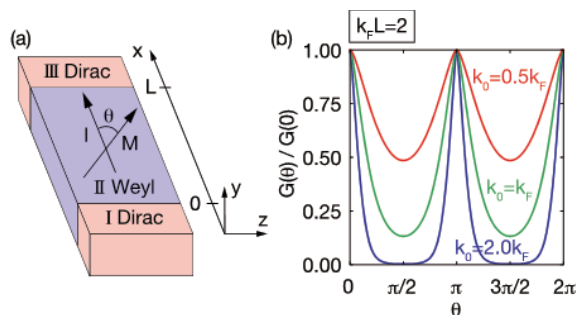


図 4 (a) 磁性ワイル半金属接合系。(b) 伝導度は電流と磁気モーメントのなす角に強く依存する。

ンの生成が可能であることを提案し [7]、磁性ワイル半金属のスピン波や磁壁などのテクスチャー励起を記述する有効理論を導出しました [8,9]。

さらに、スピン軌道相互作用の強い反強磁性体有するトポロジカル有効作用を導出し、ネールベクトルの空間変化による局所異常ホール電流や、時間変化によるカイラル磁気効果の存在を明らかにしました [10]。スピン軌道相互作用に起因するトポロジカル絶縁体の磁化率を求め [11]、熱量子ホール効果の微視的を構築しました [12]。

6. 三次元ハニカム格子の物理

江澤 (C01 分担者) は、ハイパーハニカム格子を含む三次元ハニカム格子を一般的に定義し、その性質を調べました [13]。グラフェンなどに代表されるハニカム格子は、低エネルギー現象がディラック方程式で記述されるなど、種々の美しい物理の発現の根源です。近年、ハニカム格子の三次元版であるハイパーハニカム格子が提案され、 $\beta\text{-Li}_2\text{IrO}_3$ で実験的に実現していることが高木 (A01 分担者) らによって報告されています。本研究 [13] では、ハイパーハニカム格子を含む三次元ハニカム格子を一般的に定義し、その性質を調べました。図 5 に示す単位胞のすべてに対し、フェルミ面が一次元のリング状であるループ・ノード半金属であることを解析的に示しました。これはディラック半金属やワイル半金属がポイント・ノードであることと対照的です。表面状態はループ・ノードを境界とするような部分平坦バンドを持ち、ドラム・ヘッド状態と名付けられています。エッジ状態は、両端がジグザグの場合にはループの外側に平坦バンドが生じますが、両端がベアードの場合にはループの内側に平坦バンドが生じます。一方、ジグザグとベアードで終端した場合には完全平坦バンドの表面状態になります。以上の様に、ハニカム格子の物理が自然に三次元に拡張できることが分かりました。

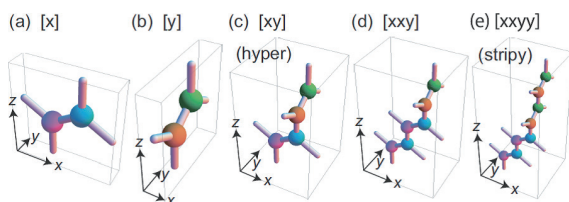


図 5. 三次元ハニカム格子の単位胞。

7. トポロジカル物質の理論

江澤 (C01 分担者) は、様々なトポロジカル物質の理論を構築しました。二層スキルミオンでスキルミオン・ホール効果が消失し直進する事や [14]、トポロジカル絶縁体と磁性トポロジカル絶縁体との界面でスキルミオンが安定化する事 [15] を示し、電氣的にスキルミオンを検出する方法を提案しました [16]。

また、パッカード構造の新しいエッジ状態の提案 [17]、高いトポロジカル数を持つスキルミオンが安定化する機構の提案 [18] を行い、4 – 6 族の単原子層半導体が直接バンドギャップを持つこと [19]、多層系でスキルミオンが安定化すること [20] を示しました。さらに、反強磁性体中で実現するスキルミオンを提案し [21]、砂時計フェルミオンと呼ばれる新奇な状態をノンシンモルフィック対称性に基づき解析的に導出しました。[22]。スキルミオニウムと呼ばれるスキルミオン複合構造の制御法を提案し [23]、擬スピン 3/2 のフェルミオンが三色立方格子で実現する事を示しました。[24]。ゲルマネンでのディラック分散の兆候を STM で観測しました [25]。

- [1] "Long-lived binary tunneling spectrum in the quantum Hall Tomonaga-Luttinger liquid", K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, Y. Tokura, and T. Fujisawa, Phys. Rev. B **93**, 075304-1-11 (2016).
- [2] "Engineering quantum spin Hall insulators by strained-layer heterostructures", T. Akiho, F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Appl. Phys. Lett. **109**, 192105-1-5 (2016).
- [3] "Single-edge transport in an InAs/GaSb quantum spin Hall insulator", F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Phys. Rev. B **94**, 035301-1-5 (2016).
- [4] "Andreev reflection and bound state formation in a ballistic two-dimensional electron gas probed by a quantum point contact", H. Irie, C. Todt, N. Kumada, Y. Harada, H. Sugiyama, T. Akazaki, K. Muraki, Phys. Rev. B **94**, 155305-1-6 (2016).
- [5] "Gate-controlled Switching between persistent and inverse persistent spin helix states", K. Yoshizumi, A. Sasaki, M. Kohda, and J. Nitta, Appl. Phys. Lett. **108**, 132402 (2016).
- [6] "Anisotropic magnetotransport in Dirac-Weyl magnetic junctions", Y. Ominato and K. Nomura, arXiv:1611.05236.
- [7] "Voltage-driven magnetization switching and spin pumping in Weyl semimetals", D. Kurebayashi and K.

- Nomura, Phys. Rev. Applied **6**, 044013 – 1-6 (2016).
- [8] "Spin textures and spin-wave excitations in doped Dirac-Weyl semimetals", Y. Araki and K. Nomura, Phys. Rev. B **93**, 094438 – 1-12 (2016).
- [9] "Universal charge and current on magnetic domain walls in Weyl semimetals", Y. Araki, A. Yoshida, and K. Nomura, Phys. Rev. B **94**, 115312 – 1-7 (2016).
- [10] "Chiral Magnetic Effect and Anomalous Hall Effect in Antiferromagnetic Insulators with Spin-Orbit Coupling", A. Sekine and K. Nomura, Phys. Rev. Lett. **116**, 096401 – 1-5 (2016).
- [11] R. Nakai and K. Nomura, "Crossed responses of spin and orbital magnetism in topological insulators", Phys. Rev. B **93**, 214434 – 1-8 (2016).
- [12] "Finite-temperature effective boundary theory of the quantized thermal Hall effect", R. Nakai, S. Ryu, and K. Nomura, New J. Phys. **18**, 023038 – 1-12 (2016).
- [13] "Loop-nodal and Point-nodal Semimetals in Three-dimensional Honeycomb Lattices" M. Ezawa, Phys. Rev. Lett. **116**, 127202 (2016).
- [14] "Magnetic bilayer-skyrmions without skyrmion Hall effect" Xichao Zhang, Yan Zhou and Motohiko Ezawa, Nature Communications **7**, 10293 (2016).
- [15] "Geometric Hall effects in topological insulator hetero-structures" K. Yasuda, R. Wakatsuki, T. Morimoto, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Ezawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa and Y. Tokura, Nature Physics **12**, 555 (2016).
- [16] "Purely electrical detection of a skyrmion in constricted geometry" Keita Hamamoto, Motohiko Ezawa, Naoto Nagaosa, Appl. Phys. Lett. **108**, 112401 (2016).
- [17] "Tunable skewed edges in puckered structures" Marko M. Grujic, Motohiko Ezawa, Milan Z. Tadic, Francios M. Peeters, Phys. Rev. B **93**, 245413 (2016).
- [18] "High-Topological-Number Skyrmion and Topologically Protected Dissipative Structure" Xichao Zhang, Yan Zhou and Motohiko Ezawa, Phys. Rev. B **93**, 024415 (2016).
- [19] "Direct Band Gaps in Group IV-VI Monolayer Materials: Binary Counterparts of Phosphorene" C. Kamal, Aparna Chakrabarti and Motohiko Ezawa, Phys. Rev. B **93**, 125428 (2016).
- [20] "Thermally stable magnetic skyrmions in multilayer synthetic antiferromagnetic racetracks" Xichao Zhang, Motohiko Ezawa and Yan Zhou, Phys. Rev. B **94**, 064406 (2016).
- [21] "Antiferromagnetic Skyrmion: Stability, Creation and Manipulation" Xichao Zhang, Yan Zhou and Motohiko Ezawa, Scientific Reports **6**, 24795 (2016).
- [22] "Hourglass Fermion Surface States in Stacked Topological Insulators with Nonsymmorphic Symmetry" M. Ezawa, Phys. Rev. B **94**, 155148 (2016).
- [23] "Control and manipulation of a magnetic skyrmionium in nanostructures" Xichao Zhang, Jing Xia, Yan Zhou, Daowei Wang, Xiaoxi Liu, Weisheng Zhao, Motohiko Ezawa, Phys. Rev. B **94**, 094420 (2016).
- [24] "Pseudospin 3/2 Fermions, Type-II Weyl Semimetals and Critical Weyl Semimetals in Tricolor Cubic Lattice", M. Ezawa, Phys. Rev. B **94**, 195205 (2016).
- [25] "Scanning tunneling spectroscopy study of the Dirac spectrum of germanene" C.J. Walhout, A. Acun, L. Zhang, M. Ezawa and H.J.W. Zandvliet, Journal of Physics: Condensed Matter **28**, 284006 (2016).

トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

佐藤 昌利 / 京都大学 基礎物理学研究所 教授

【強相関トポロジカル絶縁体の理論】(川上)

川上らは、トポロジカル絶縁体への相関効果を系統的に調べた。特に、トポロジカルモット絶縁体と呼ばれる、相関効果により実現される絶縁相に注目した [1]。この相では、バルクは通常のトポロジカル絶縁体と同じであるが、エッジ状態のみがモット絶縁体となる。特に2次元の場合を系統的に調べ、温度がある程度高い場合エッジ状態は電子的でありフェルミ統計に従うが、温度が低下するとエッジ状態はスピン集団励起に移行しボーズ統計に従う。このように温度変化により、エッジ状態の統計性にクロスオーバーがみられる。これはトポロジと相関効果により初めて現れる現象である。この研究を2次元の「弱いトポロジカル絶縁体」にも応用し、相互作用によるトポロジカル分類の reduction $Z \rightarrow Z_4$ の例を示した [2]。また、トポロジカル近藤絶縁体 SmB_6 で観測されたスペクトルの奇妙な温度依存性は、強相関とトポロジのからみあいにより説明できることを明らかにした [3]。

【p-波コンタクトテンソルの提案】(上田)

フェッシュバハ共鳴によりs波散乱長が発散するユニタリ極限近傍においてはTanの関係式と呼ばれる普遍的な関係式が短距離の相関を特徴づけること知られているが、上田らはトポロジカル超流動が期待されるp波の場合に同様な関係式が成立するかどうかを調べた。その結果、軸対称性が自発的あるいは外部ポテンシャルなどにより破れているp波フェルミ気体においては、フェッシュバハ共鳴近傍において9成分からなるp波コンタクトテンソルによって短距離相関が完全に特徴づけられることを見出した。また、それを実験的に観測する方法の提案を行った [4]。

【エフィモフ物理における少数多体物理の汎関数繰り込み群における研究】(上田)

共鳴的相互作用をする原子気体においては、2体の束縛状態が存在しない領域で3体の束縛状態が存在しうることがエフィモフによって指摘されている。エフィモフ物理は繰り込み群的な観点からは、固定点ではなくリミットサイクルで特徴づけられるという著しい特徴を持つ。更に、各エフィモフ状態に対して1対の4量体が付随するという興味深い現象が数値的に知

られていた。上田らはこの現象を汎関数繰り込み群を用いて、エフィモフ状態の半分の周期を持つリミットサイクルとして理解できることを初めて示し、また、それが理論スペースにおける巻き数というトポロジカルな性質から理解できる可能性を指摘した [5]。

【光誘起のカイラル磁気効果】(佐藤昌・田仲(B01))

ワイル半金属において、円偏光によって生じる新しい種類のカイラル磁気効果が存在することを指摘した。円偏光レーザーを照射するだけで、ワイルフェルミオンのカイラリティによって、レーザーの照射方向と平行あるいは反平行な方向に電気が流れることを明らかにした [6]。

【蜂の巣格子単層物質のエッジ状態の研究】(佐藤昌・田仲(B01))

シリセン、ゲルマネン、スタネンは、グラフェンと類似の蜂の巣格子単層物質であるが、その構成原子の大きさゆえに、グラフェンと異なり完全な平坦ではなく、上下方向にわずかに座屈した構造をとる。本研究では、この座屈構造による軌道混合がこれらの物質のトポロジカル表面状態に大きな影響を与えることを指摘した [7]。

【ディラック金属におけるトポロジカル超伝導性】(佐藤昌、前野(A01)、田仲(B01))

ディラック金属では、スピン軌道相互作用により異なる角運動量をもつ軌道混成がディラック点近傍で生じる。佐藤昌は、田仲(B班)とともにこの特異な構造によって、トポロジカル超伝導性が発現しうることが明らかにした [8]。また、前野(A01)らが発見したディラック半金属由来の超伝導体 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ にこの理論を適用し、トポロジカル超伝導体である可能性を示唆した [9]。

【非共形空間群によって守られたトポロジカル超伝導ノードの研究】(佐藤昌、柳瀬(D02 公募))

従来から、スピン軌道相互作用の強い重い電子系ではスピン三重項超伝導体が安定なラインノードを持っていないという定理(いわゆるブランドの定理)が知られている一方、実験では UPt_3 がラインノードをもつス

ピン三重項超伝導体として振舞っていることが問題となっていた。本研究では、K理論を用いて、非共形空間群を考えるとスピン三重項超伝導であってもラインノードが安定に存在することを示し、実際に $U\text{Pt}_3$ においてスピン三重項かつラインノードが安定に存在するモデルを与えた [10]。

【中性子星における $^3\text{P}_2$ 超流動 状態のトポロジー】(水島・新田)

水島・新田らは中性子星内部で実現されているとされる $^3\text{P}_2$ 超流動 状態のトポロジーについて議論した [11]。中性子星内部は高密度の中性子で構成されており、クーパー対の全角運動量が $J=2$ であるスピン 3 重項 p 波超流動状態の存在が示唆されている。弱結合極限のゼロ磁場下では $^3\text{He-B}$ と類似したトポロジカル構造を持つ 1 軸性ネマティック相が安定化するが、磁場下では D_2 対称な 2 軸性ネマティック相と D_4 対称な 2 軸性ネマティック相が安定化する可能性があることがわかった。さらに、強結合効果を取り込むことで非ユニタリ状態であるサイクリック相が安定化する。ネマティック相では 2 次元マヨラナ粒子が表面などに局在するが、サイクリック相では 3 次元マヨラナ粒子が現れることが明らかとなった。

【 $^3\text{P}_2$ 超流動における渦】(新田)

中性子星内部では中性子が超流動状態になっているが、特に内部の高密度領域では $^3\text{P}_2$ ペアリングと呼ばれる、スピントリプレット、軌道角運動量が 2 で全角運動量が 2 という状態になっている。この領域において Ginzburg-Landau 理論の範囲において、任意の大きさの外部磁場下での基底状態を決定し、整数渦の構造を詳しく調べた [12]。また、マグネターと呼ばれる非常に強い磁場をもった中性子星では、 D_4 二軸性ネマティック相が基底状態となり、半整数非アーベリアン渦が現れることを指摘し、半整数渦の構造を詳しく調べた [13]。さらに、整数渦の低エネルギー有効理論がダブル・サイン・ゴルドン模型になること示し、その上のキンクの上で自発磁化が反転することを見出した [14]。

【カラー超伝導における渦】(新田)

物質が非常に高密度になるとクォークがペアを組んでカラー超伝導状態になる。そこでは、金属超伝導の類似として、Meissner 効果によって非アーベリアン渦と呼ばれるカラー磁束が存在する。そこで、非アーベリアン渦の周りには Aharonov-Bohm 効果があ

ることを発見した [15]。また、非アーベリアン渦には、マヨラナフェルミオンが局在するが、同時に南部 Goldstone モードも局在する。これらの相互作用を決定した [16]。さらに、渦に局在する南部 Goldstone モードの低エネルギー有効理論はこれまで特異ゲージで構成されていたが、特異ゲージを取らずに構成した [17]。

【超流動ヘリウム 3-B 相におけるホール応答】(西田)

超流動ヘリウム 3-B 相の低エネルギーの有効場の理論を構築することで、系に外部磁場を印加した際にホール粘性が現れることを示した。特に、ホール粘性は系に誘起される軌道角運動量密度により決まること、その軌道角運動量密度の大きさは外部磁場と帯磁率により決まることを示した。また、系にホール粘性が生じたことの物理的帰結として音波に横波成分が混ざること示し、その大きさを定量的に見積もった [18]。

川上は野村健太郎 (B01) 著「トポロジカル絶縁体・超伝導体」(丸善, 2016) の編集を行った。また、佐藤昌は藤本 (A01)[19] および安藤 (B01 連携)[20] それぞれとトポロジカル超伝導体に関するレビュー論文を執筆した。

- [1] T. Yoshida and N. Kawakami, Phys. Rev. B **94**, 085149 (2016); H.-Q. Wu et al., Phys. Rev. B **94**, 165121 (2016).
- [2] T. Yoshida and N. Kawakami, arXiv:1610.04650.
- [3] R. Peters et al., Phys. Rev. B **93**, 235159 (2016).
- [4] S. M. Yoshida and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 033611 (2016).
- [5] Y. Horinouchi and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 050702(R) (2016).
- [6] K. Taguchi, T. Imaeda, M. Sato, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **93**, 201202(R) (2016).
- [7] A. Hattori, S. Tanaya, K. Yada, M. Araidani, M. Sato, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, and Y. Tanaka, arXiv:1604.04717.
- [8] T. Hashimoto, S. Kobayashi, Y. Tanaka, and M. Sato, Phys. Rev. B **94**, 014510 (2016).
- [9] M. Oudah et al, Nat. Commu. **7**, 13617 (2016).
- [10] S. Kobayashi, Y. Yanase, and M. Sato, Phys. Rev. B **94**, 134512 (2016).
- [11] T. Mizushima, K. Masuda, and M. Nitta, arXiv:1607.07266.
- [12] K. Masuda, and M. Nitta, Phys. Rev. C **93**, 035804 (2016).
- [13] K. Masuda, and M. Nitta, arXiv:1602.07050.
- [14] C. Chatterjee, M. Habererichter, and M. Nitta, arXiv:1612.05588.
- [15] C. Chatterjee, and M. Nitta, Phys. Rev. D **93**, 065050 (2016).
- [16] C. Chatterjee, N. Cipriani, and M. Nitta, Phys. Rev. D **93**, 065046 (2016).
- [17] C. Chatterjee, and M. Nitta, arXiv:1612.09419.
- [18] K. Fujii and Y. Nishida, arXiv:1610.06330.
- [19] M. Sato and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 072001

2016 年 Nevill F. Mott 賞

●受賞理由

磁性由来の強誘電性および量子磁性体における
熱ホール効果の機構の理論的研究

桂 法称 / 東京大学 理学系研究科 准教授 (公募研究 D02)

このたび、磁性由来の強誘電性および量子磁性体における熱ホール効果の機構に関する理論的研究で、2016 年 Nevill F. Mott 賞を受賞しました。Nevill F. Mott 賞は、毎年開催されている強相関電子系の国際会議 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES) で表彰される Early career prizes のひとつで、2013 年から始まったものです。特に、学位を取得後 8 年以内の若手研究者で、強相関電子系の理論で優れた研究を行ったものに与えられます。受賞式は 2016 年 5 月 11 日に、中国浙江省杭州市の浙江大学で行われ、そこで受賞講演を行いました。

受賞対象となった研究についても簡単にご紹介させていただきます。まず、(i) 磁性由来の強誘電性の微視的機構は、私が大学院時代に取り組んだテーマです。固体中で磁性と強誘電性が結合する可能性は、古くは P. Curie が指摘していましたが、実際には両者が共存する系は稀で、またそれらの間の応答（電気磁気効果）も非常に弱いものと思われていました。しかし、2003 年頃から TbMnO₃ をはじめとする物質群で、磁性と強誘電性の間に巨大な結合が存在することが木村剛氏らにより発見され、注目を集めていました。そこで、磁性に由来する強誘電性の新しい機構はないだろうか？という観点から、指導教官の永長先生と Balatsky 氏と研究を進め、らせん磁性など磁気秩序が反転対称性を破る場合には、格子が反転対称であっても、スピン軌道相互作用を介して有限の電気分極が現れることを、微視的なモデルを用いて示しました [1]。当初は、「スピン軌道相互作用のような弱い効果が、現実に出すことはあるのだろうか？」と不安に思いましたが、その後いろいろなマルチフェロイクスで磁気構造が調べられ、らせん磁気構造と強誘電性の関係が確立されていきました。(ii) 量子磁性体における熱ホール効果、は学位取得後の PD 時代に行った研究です。絶縁磁性体は、電荷をもったキャリアが存在しないためホール効果を起こすことはないと考えら

れます。したがって、熱流の場合である熱ホール効果も起きないだろう、と安易には考えられます。しかし、磁場とスカラーカイラリティとの結合や DM 相互作用といった非自明な相互作用が存在する場合には、マグノンなどの電荷をもたない素励起が、ベリー曲率を通じて熱ホール効果を起こすことを理論的に示しました [2]。こちら、当初は toy model で可能性を示唆したに過ぎない、と自分でも思っていたのですが、1 年以内に十倉先生のグループが Lu₂V₂O₇ での観測に成功するという幸運に恵まれました [3]。

(i), (ii) とともに、永長先生をはじめとする論文共著者・共同研究者のお力添えなしでは到底達成できなかった研究であったと改めて思います。この場をお借りして、感謝いたします。

(文責：桂 法称)

[1] H. Katsura, N. Nagaosa, and A. V. Balatsky, Phys. Rev. Lett. **95**, 057205 (2005).

[2] H. Katsura, N. Nagaosa, and P. A. Lee, Phys. Rev. Lett. **104**, 066403 (2010).

[3] "Observation of the magnon Hall effect", Y. Onose et al., Science **329**, 297 (2010).

ヘリウム再凝縮装置・無冷媒マグネットの 立ち上げ・運用を経験して

瀬川 耕司 / 京都産業大学 理学部物理科学科 教授 (研究分担 B01)

この記事は、気軽に読めるものということで依頼をいただいたが、トポロジに関係する気のきいた記事など私に書けるわけもないので、2010年から2015年までのだいたい5年間で全6台のヘリウム再凝縮装置・無冷媒マグネットシステムの立ち上げ・運転をした貴重な経験をまとめ、ここで共有してみようかと思う。

そもそも低温が物性実験にとって非常に重要であることは言うまでもない。温度による擾乱によって室温では見えない現象が低温では現れ、物理の本質がよりよく見えるようになるからである。その低温を実現するにはヘリウムが不可欠であり、従来の低温実験系（クライオスタット）では外部から液体ヘリウムを定期的に供給し、そこをベースとしてより低温を実現していて、これは現在でも広く使われている。

物性実験に使われるこの方式のクライオスタットでは、1) 多くは2-5日に一度ヘリウムの継ぎ足しが必要、2) 同じ敷地内にヘリウムの再凝縮のできる施設があり、そこにつながるヘリウム回収ラインがあること、が現実的には必須となる。そこで次世代のクライオスタットとして、a) 蒸発するヘリウムを実験装置内で再凝縮して利用する再凝縮装置付きシステム、b) そもそも液体ヘリウム槽を持たず、冷凍機直結で冷却を行う無冷媒システム、の2種類が作製され、研究者・学生の負担を減らすことができるようになっていく。

私の所属していた大阪大学産業科学研究所にあった安藤陽一先生の研究室では、2010年2月ごろから上記a)の再凝縮装置を次々に導入し、当初約60 m²の実験室で最大4台のシステムが同時に稼働するようになった。内訳は、1) Oxford社製14 Tマグネットのデュワーを再凝縮装置が組み込まれたものに換装したIntegraACというシステム、2) Quantum Design社の再凝縮装置付きPPMSシステム、3) 同じくQuantum Design社製だが既存の磁化測定システムMPMSに再凝縮装置を後から取り付けたもの、4) Cryomagnetics社製の14 Tマグネットシステムに後から同様に再凝縮装置を取り付けたもの、である。4台の再凝縮装置はいずれもパルス・チューブ式で1)のみ住友重機械製、残り3台はCryomech社製である。後者については装置から伸びるチューブをクライオスタットのトランスファーポートに挿したままで運用する(写真1)。パルス・チューブ式の冷凍機は



写真1: Cryomech社製再凝縮装置の外観。右下に見えているチューブをクライオスタットに挿して運用する。

ほとんどメンテナンスせずに運転し続けることができる利点がある（コンプレッサー等には必要）。実際に5年間運転して全く問題は生じなかった。

再凝縮装置を使い始めてまず印象に残ったのは、冷凍機が常に全力を出しているわけではない、ということである。再凝縮がうまく機能した場合は蒸発するヘリウムをすべて再液化できているということなので、ヘリウム槽内の圧力は下がる。これが大気圧より低くなると空気を吸い込んで危険を生じるため、圧力を維持するためにヒーターで冷凍機が働かないようにする仕掛けが必要なのである（ちなみにCryomech社の純正システムでは温度計をモニターするようになっていたが、これはあまり効率が良くないので圧力計による方式にすぐに改造した）。そして測定のために励磁などをすると大抵の場合ヘリウムの蒸発は再凝縮の能力を超え、液体ヘリウムが減少してしまうことが避けられない。PPMSに付属するシステムでは非測定時にヘリウムガスをボンベから供給することで補充する方式をとっていたが、蒸発量の大きい14 Tマグネットでは補充のためのヘリウムトランスファーは再凝縮装置のない場合よりは回数がずっと少なくなるが、依然として必要であった。

再凝縮できなかったヘリウムガスは逃さずに回収するのは当然なのだが、なるべく実験室にとどめておくに越したことはない。そこで試行錯誤した結果、4台のクライオスタットのヘリウム槽を何らかの形でつなげておくという運用に落ち着いた。低温センターから液体ヘリウムを持ってくるためのヘリウム容器からも1日に2リッター程度の液体ヘリウムが蒸発するが、それもヘリウム槽とつなげて利用することにした。その結果としてマグネットの運転がしばらく休止する時には液体ヘリウムを溜め込む、といった運用をすることができた。さかんに実験が行われていて他の装置からヘリウムの蒸発がある場合には2-3日ほど待てば液体ヘリウムレベルが十分に回復する、という具合である。結論としては、再凝縮装置は数が増えれば増えただけ効率良く運用することができる、ということになる。

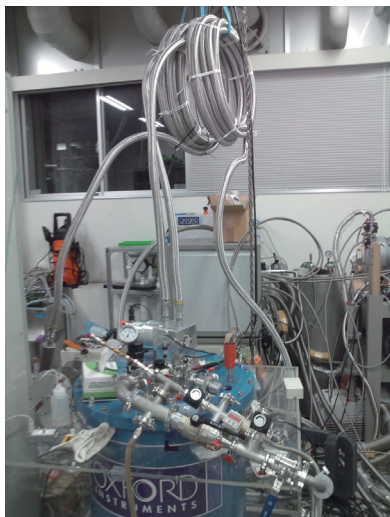


写真2: Oxford社のIntegraACの外観。再凝縮装置は内蔵されている。文中では触れていないがベランダに高圧ヘリウムチューブを出していたらやはりリークしたため、交換したチューブは室内に吊して運用することにした。

これらの装置には、パルス・チューブ式の冷凍機の駆動のためにガスに圧力差をつけるコンプレッサーが欠かせない。このコンプレッサーから約20気圧の高圧ヘリウムガスを満たした12-20mの長さの金属チューブが2本、クライオスタットに向かってのびることになる。コンプレッサーについては最初の3年間ほどはトラブルに多く見舞われた。まずは冷却水からのスケールである。2010年ごろはちょうど近くの建屋で耐震改修工事が行われていた関係で、冷却塔から冷却水に炭酸カルシウムなどのスケールと呼ばれる成分が混入してしまったり、それがCryomech製のコンプレッサーCP2800の冷却水配管内に析出して冷却が行われなくなってしまった。これを酸性の洗浄剤で洗い流したところ、なんとか熱交換は復活したのだが、取りきれなかった洗浄剤の蒸気が換気口から室内に侵入してヘリウムガスチューブに穴を開けてしまった（チューブまるごと交換）。それだけではなく、わずかに残った洗浄剤のせいで特に悪くなかった住友重機械製のコンプレッサーF-70の熱交換器にリークが生じてしまい、こちらは送り返して修理になってしまった。

実験室内のパルス・チューブ型冷凍機については事実上選択肢がCryomech社と住友重機械工業、の2社の製品になる。この2社のコンプレッサーに対する基本的な方針は大きく異なっている。住友重機械についてはコンプレッサーの完成度が高く、めったなことではトラブルを起こさないというのが私の印象である。対してCryomech社の方は、かなりトラブルが起きやすいのだがサポートが迅速で電子メールを本社に送るとすぐに対応してもらえる。とにかく自力でなんとかしたい場合に実験装置をほとんど止めずに修理できることが多い。

こうして再凝縮装置の運転を安定的に行えるようになったが、2013年度から研究室に順次導入された無冷媒システムは冷凍機ヘッドやコンプレッサーは再凝縮装置と同様であるものの、クライオスタットの構造が

全く異なっていた。導入されたのは2台で、Oxford社の無冷媒希釈冷凍機システムTritonと、1.4 Kまでの測定が可能な8 TマグネットシステムTeslatron-PTである。

まずなかなか慣れなかったのは、無冷媒システムには真空槽が一つしかないことである。液体ヘリウムを使うクライオスタットでは、真空槽は外側と内側の二つがあるのが普通である。それが一つしかないということは、システム全体の冷却を熱交換ガスに任せて後で真空引き、という手順が通じないということであるため、無冷媒システムでは常にヘリウムガスを循環することになる。このように、クライオスタットを無冷媒化するというのは根本的に構造を変えることになり、簡単な改造では太刀打ちできない。逆に言えば既存のシステムをほぼそのまま活用できるという点では再凝縮装置の方に圧倒的な利がある。

しかし、試料の冷却に若干時間がかかるなどの欠点を考えに入れても、液化ガスがあらわに存在しないという無冷媒システムの利点は非常に大きいと感じた。私自身はマグネットクエンチを3度ほど経験したのだが、近くにいってもクエンチ自体に気づくことがないのには驚いた。今後時間はかかるかもしれないが実験用クライオスタットは無冷媒システムに置き換わっていくことと思う。

最後に、再凝縮装置・無冷媒クライオスタットの運用にあたっては、1) 冷却水の質は重要、2) 熱交換器の洗浄には酸性の薬剤を極力避ける、3) 高圧ヘリウムガスチューブを腐食させない、という点を注意しておきたい。私個人の印象ではやはり将来の主役は無冷媒マグネットであり、再凝縮装置は過渡期の技術のように感じる。このような時期にこの手で立ち上げと運用に携われたのは幸運であつたし、苦労も多かったが幸せな時間であつた。安藤陽一先生をはじめ関係する方々に深く感謝したい。

著者紹介



せがわ こうじ

1971年東京都生まれ。94年京都大学理学部卒業、96年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。05年博士（理学）。(財)電力中央研究所主任研究員、大阪大学産業科学研究所助教・准教授を経て2015年から現職。

中性子星はトポロジカル超流体か？

水島 健 / 大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授 (計画研究 D01)

1. はじめに

中性子星は、超新星爆発によってできる天体の最終形態のひとつで、 10^{57} 個程度の核子で構成される、いわば宇宙空間に浮かぶ巨大な原子核である。その半径は 10km 程度であり、例えるなら太陽と同程度の質量を持つ天体が大阪市に収まっていることになる。高密度のためフェルミ温度は 10^{12} K 程度と高温であり、核子系はフェルミ縮退している。さらに、角運動量保存則のため中性子星は元の恒星よりも高速に自転しており、速いものでは 0.01sec の回転周期を持つ。近年では 10^{15} G にも及ぶ強大な磁場をともなう中性子星（マグネター）も発見されており、最も高密度な天体である中性子星内部では極限環境下での量子縮退系が実現されている。

中性子星内部の核子系が超流動を示すことは、1967 年にパルサーとしてその存在が確認される以前から理論的に予言されていた。これは全角運動量が $J=2$ であるスピン 3 重項 p 波 (3P_2) 超流動であると期待され、 ^3He との関連性が指摘されてきた [1,2]。一方で、近年では 3P_2 超流動の秩序変数空間がスピン 2 のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) のそれと等価であることがわかり、冷却原子系で蓄積されたトポロジカル励起などの知見が中性子星へとフィードバックされつつある [3]。ここでは、中性子星の内部構造と超流動の存在の必然性を議論しながら、そのトポロジカルな側面についての最近の研究成果 [4] を紹介する。

2. 中性子星の内部構造と超流動性

中性子星は図 1 に示すような層状構造をもつ。数 m の大気層の下に電子とイオンから成る「外殻 (outer

crust)」があり、電子・中性子・中性子過剰核からなる「内殻 (inner crust)」がそれにつづく。「外核 (outer core)」は 10^{14}g/cm^3 程度の密度の中性子を中心に構成され、電気的中性条件とベータ平衡条件のために若干の電子と陽子を含む。さらに、大質量の中性子星には「内核 (inner core)」が存在し、パイオン凝縮やクォーク物質等の様々な仮説が提唱されている。

中性子星における超流動研究の歴史は古く、1957 年の BCS 理論の提唱直後まで遡る。1959 年に Migdal は BCS 理論を核子系へと応用した [5]。その論文の中で、中性子星内部において $\Delta = 1\text{MeV}$ ($T_c = 10^{10}\text{K}$) 程度の転移温度をもつ超流動状態が存在することを予言した。

中性子星内部に超流動状態が存在することの観測的根拠には以下の 2 つがある：(1) Vela パルサーにおけるグリッチ現象後の角速度の緩やかな回復 [6]、(2) Cassiopeia-A の中性子星における急速な温度低下 [7]。パルサーとは強い磁場を持ち回転している中性子星であり、定常的に電磁波を放出しながら角運動量が減衰していく。しかしながら、1969 年に Vela パルサーにおいて突然角速度が増加する「グリッチ現象」が観測された。グリッチ後に 1 カ月ほどの時間スケールで角速度が定常的な減衰曲線へと回復する。核子系が常流動状態であれば核子の平均衝突時間である 10^{-11}sec 程度で定常状態へ減衰すると考えられるが、観測された時間スケールはこれに比べて桁違いに長い。もし核子系が超流動であればエネルギーギャップのために核子間の衝突時間が指数関数的に長くなるので、グリッチ現象からの緩和時間が桁違いに長いという観測事実と合致する。

もう一つの根拠は超流動転移に伴う冷却過程の劇的な変化である。中性子星が形成される初期段階ではその温度は 10^{11}K 程度であるが、その後、修正 Urca 過程（例えば $n + n \rightarrow n + p + e + \bar{\nu}_e$ ）などを介して電子（反）ニュートリノを放出することで、表面温度と内部温度がそれぞれ 10^6K 、 10^8K 程度まで冷却される。このような冷却過程を詳細に解析していくと、天体の内部構造が浮かび上がってくる [8]。2010 年に X 線天文衛星「Chandra」の観測により Cassiopeia-A の中性子星の表面温度が 9 年間で 4% も急速に下がっていることがわかった。この急冷は通常の Urca 過程などでは

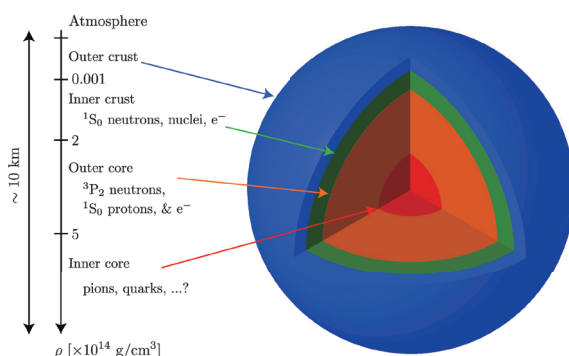


図 1：典型的な中性子星の内部構造の概略図

TOPICS

説明できず、新たな冷却機構を必要とする。Page らは、クーパ対形成にともなうニュートリノ対放出という新しい冷却機構を提案し、観測結果を矛盾なく説明することに成功した [7]。超流動転移近傍では中性子や陽子はクーパ対を形成する。その際にニュートリノ対を放出することで余分なエネルギーを天体の外へと運び出す。この冷却過程は Urca 過程よりも高効率である。

3. $^3\text{P}_2$ 超流動相とトポロジー

さて、中性子星内部はどのような超流動状態であろうか？ Migdal ら初期の研究ではスピン 1 重項 s 波 ($^1\text{S}_0$) 超流動状態が考えられていた。しかしながら、1966 年に Wolf は中性子の密度が $2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ 以上の高密度となる外核領域では $^1\text{S}_0$ 状態は存在し得ないことを指摘した [9]。中性子間の相互作用ポテンシャルは、0.5fm 以上の長距離では π 中間子交換による引力である一方で、ベクター中間子交換に起因する斥力芯が短距離で存在する。高密度領域である外核では斥力芯のために $^1\text{S}_0$ 転移温度が消失する。Page らは上述の Cassiopeia-A の急冷現象を説明するために外核の中性子が $^3\text{P}_2$ 超流動状態であることを指摘し、その転移温度が 10⁹K 程度であると評価した [7]。この $^3\text{P}_2$ が存在するのであれば冷却は今後数十年間続くと予想されている。継続的な観測により将来 $^3\text{P}_2$ 超流動の存在が実証されるかもしれない。なお、陽子は比較的密度が小さいために外核において $^1\text{S}_0$ 超伝導状態である。

さらに、ベクター中間子交換過程は短距離で強い LS 力を誘起する。中性子間の LS 力が無視できる場合は ^3P の全ての相互作用チャンネル ($^3\text{P}_0$, $^3\text{P}_1$, $^3\text{P}_2$) は縮退する。このような状況は超流動 ^3He で実現されており、B 相である Balian-Werthamer 状態の特別な状況は $^3\text{P}_0$ 状態とみなすことができる。LS 力は $^3\text{P}_0$, $^3\text{P}_1$ に対しては斥力として働く一方で、 $^3\text{P}_2$ 状態に対してのみ引力となり得る。このため外核では、 $^3\text{P}_2$ 超流動状態が実現していると期待される [1,2]。

$^3\text{P}_2$ 超流動の基底状態は Ginzburg-Landau (GL) 自由エネルギー $F = \alpha \text{tr}[dd^*] + \beta_1 |\text{tr} d^2|^2 + \beta_2 [\text{tr}(dd^*)]^2 + \beta_3 \text{tr}(d^2 d^{*2})$ より決定される。ここで、一般にスピン 3 重項 p 波秩序変数は 2 階テンソル $d_{\mu i}$ によって表されるが、 $J=2$ の制約によりトレースレス対称テンソルとなる。その結果として、現れる超流動相も ^3He のそれと比べて大きく異なる。Sauls-Serene [10] は $^3\text{P}_2$ 超流動の GL 自由エネルギーと秩序変数が d 波超流動のそれ [11] と等価であることを見出し、その超流動相図を明らかにした (図 2(a))。相図は Nematic 相、Cyclic 相および Ferromagnetic 相の 3 相からなるが、弱結合極限で

は Nematic 相が安定である。興味深いことに、spin-2 BEC においても同様の相図 [12] が得られ、各状態の秩序変数空間も $^3\text{P}_2$ 超流動のものと同値である。そのため各相について spin-2 BEC で用いられている名称を用いた。

Nematic 相は時間反転対称性を保った状態である。ただし、GL の 4 次項の範囲では D_∞ 対称性を持つ 1 軸性 Nematic (UN) 相から D_{2v} , D_4 対称性を持つ 2 軸性 Nematic (BN) 相まで無限に偶然縮退している。この縮退は 6 次以上の GL 項や外場によって解くことができる。実際に超流動フェルミ液体理論に基づいて計算された磁場中での $^3\text{P}_2$ 超流動相図を図 2(b) に示す。零磁場では最も対称性の高い UN 相が安定化するが、磁場を印加することによって D_2 -BN、 D_4 -BN 相へと逐次相転移する [4]。高温側では 2 次相転移であるが、低温では 1 次相転移となり 3 重臨界点が存在する。10¹⁵G 程度の磁場を有するマグネターの内部では 3 重臨界点に近い状況が実現していると期待される。3 重臨界点近傍では比熱が増大するため、マグネターの冷却機構にも大きな影響を与えられと考える。

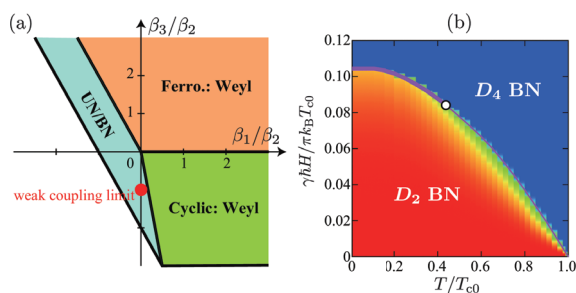


図 2: (a) GL 理論による $^3\text{P}_2$ 超流動相図。(b) 準古典理論による温度—磁場相図。細線と太線はそれぞれ 2 次・1 次相転移線を表し、白丸は 3 重臨界点を示す。

縮退した Nematic 相は全て DIII クラスのトポロジカル超流動である。UN 相はフルギャップであり、特徴的な d ベクトル構造を示す (図 3(a))。 ^3He の BW 状態に類似した構造であり、そのトポロジカル構造は非自明な 3 次元巻きつき数で表される。一方の D_4 -BN 相はフェルミ面の北極と南極に点ノードを持つギャップレス相であり、 Z_2 数で特徴付けられる [13]。いずれも表面にイジングスピンを持つマヨラナ粒子をとめない、異常な磁気応答を示す。

Ferromagnetic 相は超流動 ^3He の A1 相と等価であり、完全スピン偏極したクーパ対 ($S_z=+1$) が軌道角運動量 $L_z=+1$ に凝縮した状態である。つまり、時間反転対称性を自発的に破った Weyl 型超流動状態である。

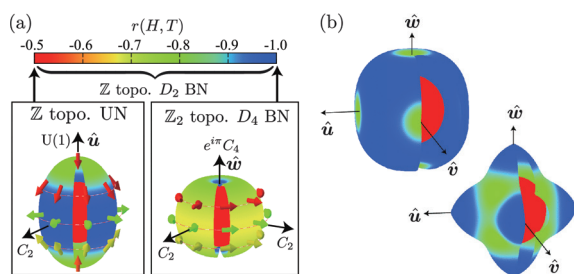


図3: (a) Nematic相のギャップ構造とトポロジカル不変量。(b) 非ユニタリ Cyclic 相のギャップ構造。

最も興味深く、超流動 ^3He に対応する状態が無いのは Cyclic 相である。正四面体対称性を持つこの相は時間反転対称性を自発的に破った非ユニタリ状態であり、フルギャップと点ノードという2つの異なるギャップ構造を持つ Weyl 超流動体である (図 3(b))。8つの点ノードは4組のモノポール・反モノポール対とみなすことができ、非自明な Berry 曲率の源となっている。それを反映して、Cyclic 相の表面では複雑なフェルミアー構造が現れる。一方で、各モノポール・反モノポール対近傍の準粒子は粒子・正孔対称な Weyl 粒子対として振舞う。そのため Cyclic 相の低エネルギー有効ハミルトニアンは質量の無い3次元マヨラナ粒子のハミルトニアンに帰着される。

4. おわりに

ここでは、中性子星の研究の歴史を概観しながら、その内部における $^3\text{P}_2$ 超流動の存在の必然性と、各相のトポロジカル構造について簡単に紹介した。表題への現時点での答えは、「中性子星内部には $^3\text{P}_2$ 超流動が存在し得て、それは非自明なトポロジーを持つ」といえる。弱結合極限では最も対称性の高い UN 相が安定である。ただし図 2(a) でみられるように、弱結合極限は Nematic と Cyclic 相の相境界近傍にあるため、実際の基底状態は強結合効果に敏感であり、現実的な高密度核物質でどのような相が安定になるかは自明ではない。

また、ここでは詳しく触れなかったが、中性子星は高速に回転する超流動体であり、量子渦というトポロジカル欠陥を必然的にともなう。渦のサイズは 10-100 fm 程度であるのに対して平均渦間隔は 1-10 μm と非常に疎に分布している。しかしながらグリッチの起源などを議論する際に渦は本質的な役割を演じる。さらに、spin-2 BEC の知見から、BN 相や Cyclic 相などには非可換統計に従う分数量子渦の存在が議論されている [3,12]。この非可換統計性は秩序変数空間に起因したものであり、いわゆるマヨラナ粒子に起因するものとは質が異なる [12]。非可換分数渦にマヨラナ粒子が

存在するのか、そしてグリッチなどの動的現象への影響はどうなるのか、などといった問題が今後の課題であろう。また、外核の陽子も $^1\text{S}_0$ 超伝導であるが、それが第I種なのか第II種超伝導体なのかは未だ議論的である [14]。陽子の超伝導特性によって外核の磁場分布も変更され得るので、重要な未解決問題である。

最後になったが、 $^3\text{P}_2$ 超流動に現れる UN/BN 相や Cyclic 相は立方晶系の奇パリティ超伝導体において実現され得ることに触れておきたい [4]。UBe₁₃ などのような立方晶系の非従来型超伝導体を $^3\text{P}_2$ の観点から見直すことも面白いかもしれない。

本稿は新田宗土氏 (慶應義塾大学・研究分担 D01) 及び益田晃太氏 (東京大学) との共同研究に基づく。

- [1] R. Tamakagaki, Prog. Theor. Phys. **44**, 905 (1970).
- [2] M. Hoffberg et al., Phys. Rev. Lett. **24**, 775 (1970).
- [3] K. Masuda and M. Nitta, Phys. Rev. C **93**, 035804 (2016); arXiv:1602.07050.
- [4] T. Mizushima, K. Masuda, and M. Nitta, arXiv:1607.07266.
- [5] A. B. Migdal, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **37**, 249 (1959) [Sov. Phys. JETP **37**, 176 (1960)].
- [6] G. Baym et al., Nature **224**, 879 (1969).
- [7] D. Page et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 081101 (2011).
- [8] D. G. Yakovlev et al., Phys. Usp. **42**, 737 (1999).
- [9] R. A. Wolf, Astrophys. J. **145**, 834 (1966).
- [10] J. A. Sauls and J. W. Serene, Phys. Rev. D **17**, 1524 (1978).
- [11] N. D. Mermin, Phys. Rev. A **9**, 868 (1974).
- [12] Y. Kawaguchi and M. Ueda, Phys. Rep. **520**, 253 (2012).
- [13] M. Sato, Phys. Rev. B **81**, 220504 (2010).
- [14] B. Link, Phys. Rev. Lett. **91**, 101101 (2003).

著者紹介



みずしま たけし

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

2016

2016/May/17

田仲 (B01)・佐藤 (D01)・永長 (B01) によるトポロジカル超伝導・奇周波数ペアの総説記事が、1946年以降に JPSJ に出版された論文の中で、2015年の引用数が最も多いトップ10にランクされました。

A review paper by Y. Tanaka (B01), M. Sato (D01) and N. Nagaosa (B01) has been selected as one of the top 10 most-cited articles in 2015 from all publications in J. Phys. Soc. Japan since Vol.1 (1946).

2016/Oct/14

米澤 (A01)、永井 (公募 D02)、瀬川 (B01)、安藤 (B01)、前野 (A01) らによるネマティック超伝導の発見の論文が Nature Physics 誌に掲載されました。また、同誌の注目論文を紹介する News and Views に解説記事が掲載されました。この成果については、京都大学 HP や京都新聞、日刊工業新聞などで紹介されました。

A paper on the discovery of nematic superconductivity by Yonezawa (A01), Nagai (D02), Segawa (B01), Ando (B01), Maeno (A01) et al. has been published in Nature Physics, accompanied by a commentary article in News and Views. This work has been reported on Kyoto University homepage as well as the Kyoto Shimbun newspaper, the Nikkan Kogyo Shimbun newspaper, etc.

2016/Oct/28

米澤 (A01)、前野 (A01) らによる強磁性体へのスピン三重項超伝導近接効果の論文が Nature Communications 誌に掲載されました。また、この成果については、京都大学 HP や日刊工業新聞で紹介されました。

A paper on the spin-triplet superconductivity proximity effect by Yonezawa (A01), Maeno (A01) et al. has been published in Nature Communications. This work has been reported on Kyoto University homepage as well as the Nikkan Kogyo Shimbun newspaper.

2016/Nov/09

秋保 (C01)、入江 (C01)、村木 (C01) らによる歪みヘテロ構造を用いた量子スピンホール絶縁体のバンドエンジニアリングに関する論文が Applied Physics Letters 誌に掲載されました。

A paper on the band engineering of quantum spin Hall insulators using strained-layer heterostructures by Akiho (C01), Irie (C01), Muraki (C01) et al. has been published in Applied Physics Letters.

2016/Dec/12

米澤 (A01)、前野 (A01)、佐藤昌 (D01)、Hausmann (JREP 招聘、A01) らによるアンチペロブスカイト酸化物初の超伝導の発見の論文が Nature Communications 誌に掲載されました。また、この成果については、京都大学 HP や京都新聞で紹介されました。

A paper reporting the discovery of the first superconductor among antiperovskite oxides by Yonezawa (A01), Maeno (A01), M. Sato (D01), Hausmann (JREP invitee, A01) et al. has been published in Nature Communications. This work has been reported on Kyoto University homepage and Yukawa Institute homepage, as well as in the Kyoto Shimbun newspaper.

直接バンド観察で開拓する 新奇強相関トポロジカル量子相

近藤 猛 / 東京大学 物性研究所 准教授

これまでの物性研究の主な舞台は、電子相関とスピン軌道相互作用のどちらか一方を有する物質にありました。強い電子相関と強いスピン軌道相互作用の両者を兼ね備えた電子系は未開拓であり、新奇なトポロジカル量子相が理論予想されることから、次なるフロンティアとして注目されています。昨今次々と報告される弱相関なトポロジカル量子相に関する実験結果は、理論予想を忠実に再現する例が多く、理論先攻型の研究テーマと言えます。対称的に、強相関を舞台とするトポロジカル状態は、第一原理計算でも再現しきれない新奇量子相が発現する可能性を秘めています。本研究では、極限光電子分光（極限レーザーを用いた高分解能な角度・スピン・時間分解光電子分光）を駆使する直接バンド観察を通じて、理論研究を駆り立てる実験先攻型の研究を目指すことで「トポロジーが紡く物質科学」に貢献する計画です。

トポロジカル物質の特徴として、固体表面やエッジにスピン偏極する金属状態が発現します。表面に敏感な角度分解光電子分光 (ARPES) は、弱相関トポロジカル物質の研究で威力を発揮した実験ツールです。特に、スピン分解 ARPES は、理論予想されていたトポロジカル表面金属のスピン偏極状態を直接観察から実証することで、その有用性を確立するに至っています。フェルミ準位近傍のより精密な電子構造を評価する要請を受けて、スピン分解 ARPES 技術は今も急速に発展し続けています。強相関トポロジカル物質を対象とする本研究計画においても、(スピン分解)ARPES が強力な実験ツールとして活かされるものと考えています。

今取り組んでいる物質の一つにパイロクロア型イリジウム酸化物($\text{Ln}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$; Ln=ランタノイド)があります。5d 電子がフェルミオロジーを担うことで、スピン軌道相互作用、運動エネルギー、及びクーロン相互作用が同程度のエネルギースケールを持って競合し、金属と絶縁体の狭間に位置する電子状態に起因して、新奇トポロジカル量子相が発現が期待されています。「強相



こんどう・たけし

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

関トポロジカル絶縁体」や「ワイル半金属」の母体電子構造となるフェルミノード状態（放物形状の伝導帯と価電子帯がフェルミ準位一点で接する）を我々は実証しており、今後さらなる進展研究を展開していきたいと考えています。

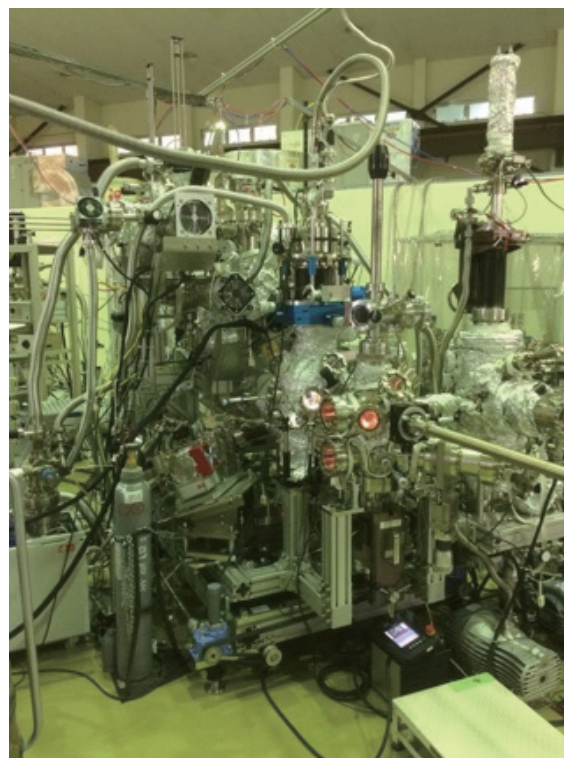


図 1: レーザー光源で超高エネルギー分解能を実現した VLEED 検出器搭載型スピン分解光電子分光装置 [1] (東大物性研)

[1] K. Yaji et al., Rev. Sci. Instrum. **87**, 053111 (2016).

ルテニウム酸化物薄膜を用いたトポロジカル超伝導状態の解明

打田 正輝 / 東京大学 工学系研究科 助教

ルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 は、スピン三重項、中でもカイラル p 波 ($p_x \pm ip_y$) の超伝導対称性をもつと考えられ、その対称性の決定やトポロジカルな性質の観測に向けて精力的な研究が行われています。一方、 Sr_2RuO_4 は、転移温度が低く不純物にも敏感なため超伝導を示す薄膜の作製が極めて難しいという問題があり [1]、例えば、銅酸化物をはじめとする異方的超伝導体の対称性決定で重要な役割を果たしてきた粒界ジョセフソン接合等のテクニックは、これまでのルテニウム酸化物超伝導の研究において用いられてきませんでした。

私は、学位取得後、コーネル大学の Kyle Shen 研究室・Darrell Schlom 研究室において、酸化物分子線エピタキシー法による薄膜の作製とその角度分解光電子分光測定を行ってきました。酸化物の輸送特性についても、分子線エピタキシー法により作製した高品質薄膜では、従来のパルスレーザー堆積法では実現困難な量子輸送現象が現れ得ます。酸化物の分子線エピタキシー成長には技術的な課題もいくつかありますが、私は特に電子ビーム加熱による高融点材料の酸化物薄膜作製について、装置の立ち上げと成膜技術の蓄積を進めてきました [2,3]。これは特に、イリジウムやルテニウム等を含む酸化物のスーパークリーン物質における量子現象の研究に本質的に重要であると考えられます。

本公募研究では、分子線エピタキシー法によるルテニウム酸化物超伝導薄膜・接合の作製によって、 Sr_2RuO_4 の超伝導対称性やトポロジカルな性質の解明に迫りたいと考えています。薄膜の強みを生かした研究により、本新学術領域の進展に貢献できるよう頑張ります。

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

[2] M. Uchida et al., Phys. Rev. B **90**, 075142 (2014).

[3] M. Uchida et al., Phys. Rev. B **91**, 241119(R) (2015).



うちだ・まさき

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

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

野村 竜司 / 東京工業大学理学院 助教



のむら・りゅうじ

He の量子凝縮相が示す多彩で驚きに満ちた現象に惹かれて、boson 系と fermion 系を問わず研究してきました。 ^4He では主に超流動液体からの結晶化過程を可視化することにより調べてきました。音響放射圧による結晶化 [1] や無重力下の結晶形 [2] など、古典結晶では有り得ない新現象を見ることが出来ました。

超流動 ^3He では、表面状態に興味を持ち調べてきました。超流動 ^3He はスピン 3 重項 p 波凝縮状態にあることが確立しています。超流動 ^3He の B 相は、3 次元の時間反転対称トポロジカル超流体であり、その表面状態が粒子と反粒子が等価なマヨラナ粒子であるとの理論的指摘が出て以来、新たな注目を集めています [3]。私はこのような指摘がされる前から、横波音響抵抗測定により表面アンドレーエフ束縛状態の観測をしていました [4]。この表面状態がトポロジカル物質に特有のバルク - エッジ対応によって生じたギャップレス表面状態であるとの解釈が可能となりました。壁の乱れを系統的に変化させ、乱れが小さいときには表面状態が線形分散関係（マヨラナコーン）を持つことを横波音響抵抗測定から示すことができました。また乱れが大きいつきに、マヨラナ粒子に特有の奇妙な散乱過程に起因する表面状態密度の振る舞いを明らかにしました [5, 6]。

ゼロ磁場・無相関の言わば無摂動状態のマヨラナ表面状態の物理は、我々のこれまでの研究によって、乱れの影響まで含めて有る程度は明らかにされていると言えると思います。本研究の目的は、この無摂動状態に微小な擾乱が加わったときの超流動 ^3He のトポロジカルな安定性を解明することです [7]。磁場の印加や圧力掃引による粒子相関の制御により、マヨラナ粒子が質量を獲得する振る舞いを探究したいと思います。

- [1] Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 111009 (2008).
- [2] T. Takahashi, H. Ohuchi, R. Nomura, and Y. Okuda, Science Advances **1**, e1500825 (2015).
- [3] Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys.: Cond. Matt. **24**, 343201 (2012).
- [4] Y. Aoki, Y. Wada, M. Saitoh, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, Phys. Rev. Lett. **95**, 075301 (2005).
- [5] S. Murakawa, Y. Tamura, Y. Wada, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, Phys. Rev. Lett. **103**, 155301 (2009).

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

- [6] S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 013602 (2011).
- [7] K. Akiyama, M. Wasai, M. Mashino, T. Nakao, S. Murakawa, R. Nomura, and Y. Okuda, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 065001 (2015).



図 1：超流動液体中を落下する ^4He 結晶。トポロジーとの関連は無い。量子乱流を巻き起こして落下している可能性はあるかも。

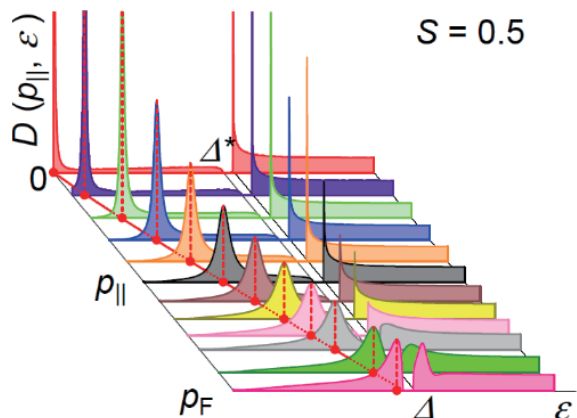


図 2：超流動 ^3He -B 相の表面マヨラナ状態の分散関係の理論 [6]。S = 0.5 は壁の鏡面度を表す。ある程度の乱れが有っても、マヨラナ状態の線形分散関係は生き残る。

トポロジカル超流動体の微小角運動量検出

白濱 圭也 / 慶應義塾大学 理工学部 教授

超流動ヘリウム3は、「実在する最も古いトポロジカル超流動体」である。Intrinsicなトポロジカル超流動体であるB相だけでなく、最近ではA相をワイル超流動体とみなした議論も活発になされている。ヘリウム3とトポロジーの深い関連性は、30年以上前からVolovikや中原らにより論じられていたが、これを積極的に明示する実験は殆ど存在しなかった。40年以上の研究で既に深い理解に到達したと思われていたヘリウム3の物理は、2005年に始まったトポロジカル物質研究の大潮流の中で、新しい方向性を得た。特に近年の日本の研究者の貢献は目覚ましく、水島や堤ら若い理論家の提案や、池上、村川、野村、佐々木らの実験が新局面を拓いてきた。我々もトポロジカル超流体としてのヘリウム3物理の発展に、実験面から貢献したいと考えている。

超流動ヘリウム3はゲージだけでなく軌道・スピン・時間反転等の対称性も破れるため、その物性は容器の形状と壁の影響を強く受ける。我々の研究戦略は、コヒーレンス長からその10倍程度までのオーダーの様々な微細空間構造をナノ・マイクロ加工技術で作成して、ヘリウム3をそこに閉じこめることで、トポロジーが良く制御された制限空間中での実験を行うというものである。ヘリウム3は超流動ヘリウム4と異なり、コヒーレンス長が50nm程度と長いため、微細構造容器を現状の加工技術で作成可能である。また、長くNMRが中心だったヘリウム3の研究に、回転冷凍機やダイヤモンド電極による流れの実験を取り入れることも特徴の一つで、電気的に中性な超流動体であるヘリウム3に、電子輸送現象の研究の視点を導入することも目指している。

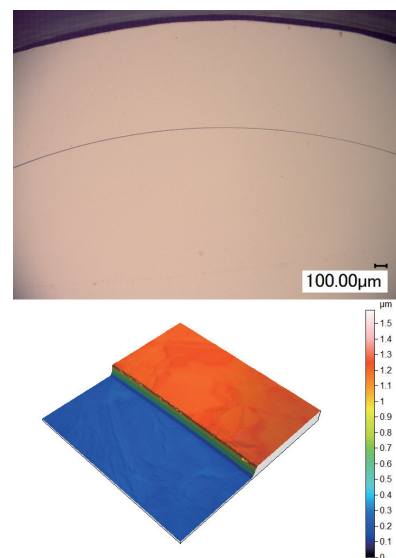
本公募研究では、特にA相の擬2次元薄膜で期待されるカイラルエッジ質量流や巨視的角運動量に焦点を当て、その直接的検出を目指す。A相はクーパー対の軌道角運動量の向きである l ベクトルが容器壁の法線方向を向くため、平行平板状の容器中では l の向き即ちカイラリティが巨視的スケールで揃った状態になると期待される。カイラリティの揃った擬2次元A相では、試料端を質量永久流が自発的に流れる「カイラルエッジ流」の存在が期待され、連携研究者の堤らは質量流による角運動量が全クーパー対による $\hbar N/2$ (N は ^3He 全粒子数)に等しいことを理論的に示した。このオーダー $\hbar N/2$ の角運動量生成を直接検証することを試みる。我々の実験の特徴は、擬2次元薄膜を実現するための銅製円盤状容器を、微細機械加工の第一人者である慶應大理工の間(ヤン)教授の協力を得て超精密旋盤で加工することと、角運動量が自発生成で発生するトルクをねじれ振動子の振動変位として検出することにある。

カイラルエッジ流の存在はヘリウム3のトポロジカル性の重要な帰結であり、その観測の意義は大きい。予想される角運動量の大きさが非常に小さいため実験は難しいが、2016年11・12月のTMS研究会では意外にも(?)多くの方がカイラルエッジ流の観測に関心を持っていると感じた。我々のグループはシリコンウェハー上でのマイクロスリット構造やヘリウム3準粒子検出用超伝導ナノワイヤーの開発にも取り組んでおり、ヘリウム3の新しい実験を通してトポロジー物質科学の発展に少しでも貢献していきたいと考えている。



しらはま・けいや

1963年 小樽市生まれ。1985年 北海道大学理学部卒業、1990年 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。学振PD、バイロイト大学研究員、東京大学物性研究所助手を経て、1999年より慶應義塾大学理工学部助教授、2009年より教授。2015年より学振学術システム研究センター数物系科学専門研究員を務めており、科研費制度についても日々勉強しています。



図：(上)超精密旋盤で加工された無酸素銅表面(中央の曲線が $1\mu\text{m}$ の段差)
(下)干渉計による表面測定結果(表面粗さは約5nm)(慶應大 間紀旺教授提供)

トポロジカル超伝導体へのスピン流注入と逆スピンホール効果

塩見 雄毅 / 東北大学 金属材料研究所 助教

時が経つのは早いもので、東北大学に助教として着任してもうすぐ5年になります。トポロジカル絶縁体におけるスピントロニクスの研究は、私が東北大学に着任して直ぐの頃に安藤陽一先生から私のボスの齊藤先生に共同研究の打診があったことから始まりました。その当時はスピントロニクス分野に移りたてで右も左も分からない頃で、藁にもすがる思いで「是非やらせてください」と齊藤先生に言ったのを懐かしく思い出します。何だかんだあって無事に成果も出て、前身の前野新学術の公募研究に採択される幸運もあり、こうしてこの分野に生き残ることが出来ている喜びと安堵を2016年の年の瀬にしみじみと感じています。トポロジカル物質の背後にある壮大な世界に皆さんと同様興味を感じながら、トポロジカル物質の実用化こそが真の社会還元であるという強い思いを忘れずにこれからも頑張っていきたいと思っています。

本課題のテーマは、トポロジカル超伝導体へのスピン流注入と逆スピンホール効果ということで、前回の前野新学術の時の課題名と敢えて似た題名としました（通りやすいかなと思って）。トポロジカル超伝導体はクーパー対がスピン自由度をもつのでスピン流と成り得るのでその実験的実証を目指したいと考えています。実を言うと、私の中ではトポロジカルな「超伝導体へのスピン流注入」現象と読み替えて、とりあえずs波だろうがd波だろうがお構いなしに超伝導体における新しいトポロジカル・スピン流現象を片っ端から開拓してやろうという目論見がこの課題名には隠れています。どこまで2年間でできるかわかりませんが、幾つか成果らしきものも出てきています。今後も学生さんと力を合わせて超伝導スピン流現象の開拓に挑戦していく所存です。

トポロジカル物質は新しい分野ですが、超伝導は歴史が長く論文数も圧倒的で、調べれば調べるほど何か出てきて新参者にはハードルが高いとも感じます。また、学会に行くと超伝導分野は怖い偉い先生が多数いらっしゃると思っています（失礼）。それだけ超伝導というのは世代を超えて魅力的な研究対象なのだと思います。最近超伝導に密に触れて、その奥深さが何となく感じられるようになってきた気がします。まだ若いトポロジカル物質の研究と成熟した超伝導の研究をスピントロニクスを軸として自分の力で融合させることができれば、一物理研究者としてそんなに幸せなことはないだろうと思っています。



しおみ・ゆうき

1985年三重県生まれ。2012年3月 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。2012年4月より東北大学齊藤研究室助教。2014年12月より、ERATO スピン量子整流プロジェクト 研究総括補佐および先端スピン流科学グループグループリーダー 兼任。

先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカル物質の解明

野村 晋太郎 / 筑波大学 数理物質科学研究科 准教授

光を使った量子ホール状態の観測に興味を持ち今まで研究を進めてきました。光を使う分光測定法では物質系の基底状態だけではなく励起状態の関わる現象を捉えることができるという特徴があります。また、光のスピンは光学素子により正確に制御可能であるという特徴があります。光のスピンの物質系のスピンのやりとりにより、光を使った物質系のスピン制御とスピン検出が可能です。前回の新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」には後半から参加させていただき、円偏光近接場走査型光学顕微鏡を用いた量子ホールカイラル端状態の研究を進めさせていただきました。そこでは光を使ってナノメートルスケールの領域へスピン偏極した電子を注入することに成功し、スピン分裂した量子ホールカイラル端状態の空間マッピングに初めて成功しました [1]。また SQUID を用いた Sr_2RuO_4 中の量子渦状態の研究にも関わらせていただき、トポロジカル超伝導体の面白さにも触れる機会をいただきました。

本新学術領域研究では先端ナノプローブ分光測定法を用いて、トポロジカル物質中の電流密度、磁場分布の空間マッピングを通じてトポロジカル物質のミクロスコピックな性質を評価することを目的としています。たいへん活発な新学術領域研究の中での共同研究により、トポロジカル物質の理解と新規物性の探求を貢献できればと考えています。

[1] S. Mamouda et al., Nano Lett. **15**, 2417 (2015).



のむら・しんたろう

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

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

藤岡 淳 / 東京大学 大学院工学系研究科 講師

強相関電子系におけるトポロジカル半金属の研究を行っております。主にイリジウム酸化物を研究対象とし超高压合成法やフラックス法を用いたバルクの物質開発、基礎物性測定、テラヘルツ・赤外分光による電子状態プローブを組み合わせる新しい電子相と電荷輸送現象の開拓を目指しております。学生時代から強相関電子系の軌道自由度を使った電子状態制御やダイナミクスについての研究に関わってきましたが、東京大学の助教(十倉研究室)に着任した頃から強相関トポロジカル半金属に関する研究を始めました。

ちょうどパイロクロア型アイリジウム酸化物の研究を始めた頃に、モット転移の近くでワイル半金属が生じるという論文 [1] に接しました。「ワイル半金属」の意味もよく分からないまま、とにかくモット転移近傍の物質を色々作ってみようという感じで研究を進めたところ、光学伝導度の測定によってモット転移近傍でワイル半金属に特徴的なゼロギャップ状態が生じる事を見出しました。その後、ギャップが開いたモット絶縁体状態でも反強磁性磁壁に金属的な状態が現れる事や磁場誘起モット転移が生じるなど研究開始当初には予想できなかった現象が見出されました。磁壁の金属的状态についてはワイル半金属のエッジ状態との関連性、磁場誘起モット転移についてはワイル半金属が磁場下で生じている可能性など、まだよく分からない点が多く残されておりますが、今後、本領域での共同研究などを通して取り組んでいきたいと思っております。個人的には強相関系は理論的な取り扱いが難しいぶん予想外の現象が数多く潜んでいて感じておりまして、それを探索するために物質開発に比較的重心を置いて研究を進めています。現在はパイロクロア系以外の物質の探索も行っており、強相関ディラック・ワイル電子による予想外の現象を見つけたいと考えております。

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



ふじおか・じゅん

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

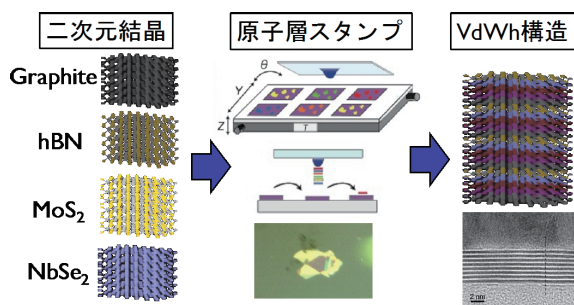
Twisted 二層グラフェンにおける量子輸送現象

増淵 寛 / 東京大学生産技術研究所 特任講師

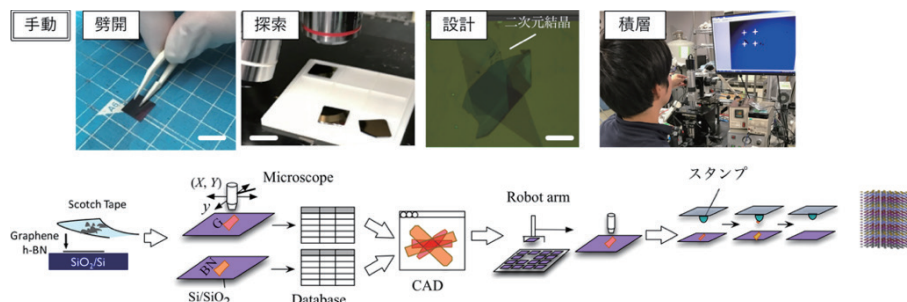
グラフェンに代表される二次元層状化合物を単原子層まで薄層化し、それらを接合させた“ファンデルワールスヘテロ接合構造”の作製と量子輸送現象の解明に取り組んできました。ファンデルワールスヘテロ接合構造では、(i) 界面における原子拡散が無く、(ii) 格子整合条件の制約を受けないため、既存の結晶成長法では考えられなかった結晶方位角のズレ θ という新たな自由度を導入した量子構造が実現可能です。二枚のグラフェンを、 θ を導入し重ね Twisted 二層グラフェンを作製すると、線形なエネルギー分散関係が運動量空間においてずれて重なった特異なバンド構造が形成されます。スタンプを押すようにアクリル樹脂上に二次元結晶を積層する技術を利用することで、電子移動度 $\mu = 30,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を示す試料が実現します。このような試料では、伝導電子のバリスティック伝導、電子波干渉、整数・分数量子ホール効果といった多様な量子輸送現象が発現します。これらの現象を通して、Twisted 二層グラフェンのバンド構造を理解したいと考えています。

本研究で利用する試料作製法は、グラフェン以外の多様な電子物性を有する二次元結晶群（トポロジカル絶縁体： Bi_2Se_3 ・超伝導体： NbSe_2 ・強磁性体： FeTaS_2 ）にも適用可能です。最も基本的な Twisted 二層グラフェンの電子物性を深く理解することで、これらの材料を、“一原子層ごとに”、“任意の組み合わせ”で、“ θ を導入しつつ”重ね合わせた新規物質の設計・創出に繋がりたいと考えています。諸先輩方のご指導を頂きつつ、様々なファンデルワールスヘテロ構造の作製・提供を通じた共同研究も積極的に推進していきたいと思っています。何卒よろしくお願い申し上げます。

- [1] S. Masubuchi et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 036601 (2012).
- [2] S. Masubuchi et al., Phys. Rev. B **88**, 121402(R) (2013).
- [3] 増淵寛、町田友樹、名称：ファンデルワールスヘテロ構造の作製方法、特願 2014-118916.



原子層スタンプの概要。



ますぶち・さとる

1982年神奈川県生まれ。2005年京都大学工学部卒業、2010年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士後期課程修了。2010年より東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構特任助教、2015年より東京大学生産技術研究所特任助教、2016年より東京大学生産技術研究所特任講師。趣味は電子工作・プログラミング・音楽鑑賞。

2007年より、グラフェンの研究を行っています。スコッチテープを用いた劈開法を用いて試料作製プロセスを立ち上げ、慌ただしい日々を送る中、あっという間に10年が経過してしまいました。研究を始めた当初は、これほど長くこの分野に関わる事ができるとは思いませんでした。これも、大学院生・共同研究者を始めとする多くの方々に支えていただいたためです。

単層 2 次元トポロジカル結晶絶縁体の開発と、超伝導体との接合による協奏現象の探求

秋山 了太 / 東京大学 理学系研究科 助教

ご存知のように、通常のトポロジカル絶縁体 (TI) が時間反転対称性によって表面状態が保護されているのに対して、結晶の鏡映対称性によって表面状態が担保されている系がトポロジカル結晶絶縁体 (TCI) です [1]。我々はこの系の典型物質である SnTe および $\text{Pn}_x\text{Sb}_{1-x}\text{Te}$ を中心物質として研究しています [2]。SnTe 系の薄膜は大きく分けて 1. 濡れ性が悪く島状・迷路状になりやすい、2. Sn 欠損によってヘビーな p 型になりやすい、の 2 つの面から良質な膜作製が難しいと言われています。我々は TCI と超伝導との接合や TCI 単原子層膜成長によって現れるマヨラナ状態や 2 次元トポロジカル状態など新奇な物理現象の観測を目標としていますが、当然ながらその前にこれらの問題解決が重要となってきます。膜の凹凸改善としては作製した GaAs/CdTe 基板を使用したり [3]、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 構造の上に成長することで大幅に表面粗さを改善し (RMS $\sim 0.5\text{nm}$)、さらに弱反局在効果によって 2 次元表面状態の確認を行いました。また、最近では Li を同時ドーピングすることで半導体的な温度依存性を示す SnTe が作製でき、シュブニコフドハース振動の観測も行いました。そして、 $\text{Pn}_x\text{Sb}_{1-x}\text{Te}(111)$ においては TI における $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ のように [4]、Sb ドーピングによってフェルミ準位をギャップ中に移動することで、ARPES 測定で表面状態の観測にも成功しました (図 1)。これらの基礎技術を用いて、今後磁性元素のドーピングによるワイル半金属化など、研究を更に進展させていく予定です。

また近年、ラッシュバ系などスピントクスチャを持つ超薄膜金属における超伝導が 1 重項 + 3 重項の超伝導候補物質として注目を集めています [5]。これらと TCI とのヘテロ接合はとても興味深い系だと考えています。また、Au や Pb などを用いて作られる表面超構造は理論的にトポロジカル超伝導体となることが予想されています [6]。こういった表面・界面が重要な系におけるトポロジカル + 超伝導の織りなす性質を、超高真空 in situ 電気伝導測定などを駆使して、さらに理論家の方々ともコラボレーションして明らかにできればと考えています。



あきやま・りょうた

1982 年生まれ 東京都出身。2012 年東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻博士 (工学) 取得。同年筑波大学数理物質系助教着任。2014 年 12 月より現在に至る。トポロジカル (結晶) 絶縁体の表面超構造・薄膜作製、電気伝導や ARPES を中心に研究に取り組む。趣味は海釣り、ピアノ・作曲、アマチュア無線、山歩きなど。

- [1] Y. Tanaka et al., Nat. Phys **8**, 800 (2012).
- [2] R. Akiyama et al., Nano Research **9**, 490 (2016).
- [3] R. Ishikawa et al., J. of Crys. Growth **453**, 124 (2016).
- [4] R. Akiyama et al., arXiv **1701.00137** (2017).
- [5] A. V. Matetskiy et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 147003 (2015).
- [6] B. Huang et al., Phys. Rev. B **93**, 115117 (2016).

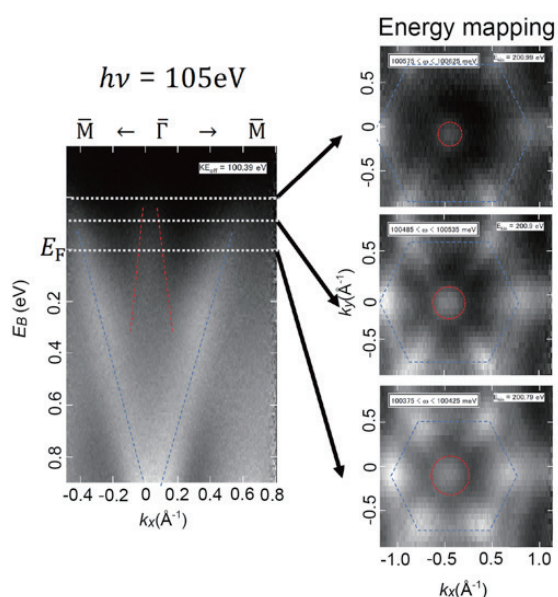


図 1. $\text{Pn}_x\text{Sb}_{1-x}\text{Te}(111)$ における ARPES 像 (HiSOR BL-7 において測定)。

量子ホール状態と超伝導体の接合における 新奇超伝導現象の実験研究

松尾 貞茂 / 東京大学 工学系研究科 助教

2次元トポロジカル絶縁体、特に量子ホール状態と超伝導体の接合に興味を持って研究を行っています。量子ホール状態と超伝導体の接合に関する研究は、半導体と超伝導体の接合の研究が行われだした1990年代から興味を持たれているトピックです。最近のグラフェンと超伝導体との接合作製技術の進展に伴って、再び注目されています。このグラフェンを用いた研究では、最近量子ホール端状態を流れる超伝導電流などが報告されています [1]。また、トポロジカルな観点からは、超伝導と量子ホール状態との接合系でエキゾチック粒子（マヨラナ、パラフェルミオン）の出現が理論的に提案されています [2,3]。

現在、実験では超伝導体として臨界磁場の大きなニオブチタンを用い、量子ホール状態としてはInAsの量子井戸に実現された2次元電子系を用いています。これらの電子線リソグラフィーやエッチング技術を組み合わせてうまく接合を作製することで、強磁場（4 T）でスピン分離した量子ホールバルク状態（スピン分離したランダウ準位）と超伝導体との接合でのアンドレーエフ反射の観測に成功しました。常伝導部分が完全にスピン偏極していることから、観測されたアンドレーエフ反射は接合界面でのスピンフリップ過程を経ています。このようなスピンフリップ過程を経たアンドレーエフ反射は、超伝導体と強磁性体との接合系で議論されているスピン三重項超伝導近接効果と同様な現象であり、半導体と超伝導体との接合では初めてスピン三重項超伝導近接効果を観測した結果であると考えています [4]。現在は上記の接合作製手法をさらに改善し、端状態と超伝導体とのアンドレーエフ反射や超伝導電流の観測を目指した実験を進めています。

また、並列になった二本の自己形成InAsナノ細線と超伝導体の接合に関しても研究を行っています。上記の系同様にマヨラナ、パラフェルミオンの実現が期待されている系であり、その実現に必要なクーパー対分離現象の観測を行っています。現在クーパー対分離現象が観測されており、将来的なエキゾチック粒子実現の第一段階は達成されたと考えています。

このようなメゾスコピックな超伝導接合系での新奇超伝導現象について、本新学術領域を通して貢献していければと考えています。

[1] F. Amet, et al., Science **352**, 966 (2016).

[2] Roger S. K. Mong, et al., Phys. Rev. X **4**, 011036 (2014).

[3] X.-L. Qi, et al., Phys. Rev. B **82**, 184516 (2010).

[4] S. Matsuo, et al., 投稿中



まつお・さだしげ

1987年生まれ 大阪府出身。
2009年京都大学卒業。2014年 京都大学 博士（理学）取得。
その後、大阪大学理学部特任研究員を経て、2014年より現在に至る。メゾスコピック系のデバイスで起こるトポロジカル現象や超伝導現象に興味をもち研究を進めています。

トポロジカルポンピング現象の冷却原子を用いた新展開

高橋 義朗 / 京都大学 理学研究科 教授

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

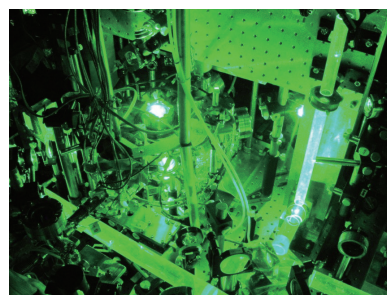
本新学術領域には、公募研究グループとして参画させて頂くことになり、大変有り難く感じております。本領域での研究では、これまでの研究をさらに発展させ、トポロジカル量子物質の物理に新たな展開をもたらすことを研究の目的としています。極めて制御性の高い光格子中の冷却原子系を対象とすることにより、他の系では実現困難な物質のトポロジカル状態や現象を実現でき、新たな可能性を創造できると期待しています。具体的には、冷却イッテルビウム (Yb) 原子を対象として、その豊富な内部自由度を駆使して、基底状態と準安定状態という有効的なスピン自由度を導入し、トポロジカルスピンポンピングを実現することや、また、トポロジカルポンピング現象における、乱れポテンシャルや不純物の影響、および粒子間の相互作用の効果、を詳しく調べる予定にしています。

今のところ研究室は、スタッフ3名と特定教員3名、博士研究員2名、博士後期課程学生3名、修士課程学生8名という構成です。本領域に関係されている多くの理論の先生方からいろいろなアドバイスを頂き、幅広く共同研究をやらせていただこうと思っています。どうぞよろしくお願い致します。



たかはし・よしろう

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



こんな装置で実験をしています。

強相関トポロジカル相のエッジ状態・低エネルギー励起

桂 法称 / 東京大学 理学系研究科 准教授

これまで強相関系やトポロジカル系を中心に理論的研究を行ってきました。特に、マルチフェロイクスにおける強誘電性の微視的起源の解明、絶縁磁性体におけるマグノンなどの準粒子による熱ホール効果の機構の提案、トポロジカルに非自明な平坦バンド系の提案、量子エンタングルメントによる強相関系・トポロジカル相の特徴づけ、などに関する研究を行ってきました。また、ハバード模型や量子スピン鎖などの強相関系のモデルの数理的側面に関する研究も行ってきました。

本新学術領域では、強相関かつトポロジカルな系のエッジ(端)状態や低エネルギー励起について理論的に調べます。相互作用のないトポロジカル相のひとつの特徴づけは、系の境界に現れるエッジ状態の存在です。これは、バルクの非自明なトポロジカル不変量の存在と密接に関係するため、バルク・エッジ対応と呼ばれています。一方で、強相関系では、バルクのトポロジカル不変量を定義することも計算することも、容易ではありません。そこで、強相関トポロジカル相のひとつの特徴づけとして、「エッジ演算子」と呼ばれるものの有無を提案したいと考えています。このエッジ演算子は、系のハミルトニアンと交換する演算子で、かつ系の境界に局在したものです。このようなエッジ演算子の存在を、強相関マヨラナ粒子系などにおいて具体的に調べることを目指します。このような概念は、多体の局在現象などとも密接に関係するものであり、乱れと相互作用の双方によりトポロジカル相を保護し、その領域を拡げる、という可能性も模索します。

また、相互作用のないトポロジカル相においても、乱れがあり系に並進対称性がない場合には、バルクのトポロジカル不変量やエッジ状態の特徴づけなどについて、未解明な部分が多くあります。それらについても、非可換幾何などの数学的手法や、カーネル多項式法などの数値計算手法を用いてアプローチしていくことを目指します。その他には、素粒子物理との学際的な話題として、格子フェルミオン系における超対称性の破れと、それに伴って現れる、特異な分散関係を持つエキゾチックな準粒子についての研究も行っていきます。また、これらの系は、2次元・3次元のKitaev模型のある種の拡張と実は密接に関係しますが、そのような観点から第2のKitaev模型と呼べるような、強相関トポロジカル相の雛形を作ることを目指します。



かつら・ほうしょう

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

量子スピン系に内在するマヨラナダイナミクスとそのトポロジ

那須 譲治 / 東京工業大学 理学院 助教

1973年にAndersonによって提案された量子スピン液体は、それからおよそ半世紀が経過するにもかかわらず、現在もお強相関電子系及び磁性分野での最前線の研究課題として、多くの研究者の興味を惹きつけています。量子スピン液体とは、磁性絶縁体において、格子点に局在する電子のスピン自由度が量子効果により極低温まで秩序化を示さない特異な磁気状態です。近年、有機化合物・遷移金属化合物において続々と候補物質が発見され続けています。その一方で、この状態を実現させるためには、強い量子揺らぎと磁気相互作用のフラストレーションが重要と考えられており、理論的にそれらを同時に取り扱うことは非常に困難であることから、量子スピン液体は強相関電子系の理論研究の難題のひとつとして位置付けられてきました。

2006年にKitaevによって提案された量子スピン模型と、その模型がスピン軌道相互作用の強い強相関電子系で実現されるという2009年のJackeli-Khalilullinの研究は、量子スピン液体の研究の潮流を大きく変えつつあります。Kitaev模型と呼ばれるこの模型は、2次元以上においても量子スピン液体が基底状態であることを厳密に示すことができる稀有な模型であり、その舞台としてイリジウム酸化物やルテニウム化合物などが精力的に研究されています。理論的には、この局在スピン模型は、局在スピンの自由度が分数化して生じた Z_2 ゲージ場と結合する創発的な遍歴マヨラナ粒子系とみなすことができます。このことは、遍歴フェルミ粒子系の概念を量子スピン系であるKitaev模型に適用できることを意味します。我々はこれを利用し、電子系で用いられてきた計算方法を流用することで、この有限温度の性質やそのダイナミクスを近似なしに計算することに成功しました[1-5]。また、この模型に磁場を印加すると、内在する創発マヨラナ粒子系のトポロジが変化することが知られており、最近では、それがどのように熱輸送特性に影響を与えるかに興味を持って研究をしています。



なす・じょうじ

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

- [1] J. Nasu et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 197205 (2014).
- [2] J. Nasu and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **115**, 087203 (2015).
- [3] J. Nasu et al., Phys. Rev. B **92**, 115122 (2015).
- [4] J. Nasu et al., Nat. Phys. **12**, 912 (2016).
- [5] J. Yoshitake et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 157203 (2016).

強相関電子系における 非従来型トポロジカル超伝導理論

柳瀬陽一 / 京都大学理学研究科 准教授



やなせ・よういち

1973 年 福岡県生まれ。1996 年 京都大学理学部卒業、1998 年 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修士課程修了、2000 年 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士課程中退。2001 年 論文博士（理学）。2000 年より東京大学理学系研究科助手、2007 年より同助教、2009 年新潟大学理学部准教授を経て、2015 年より現職。

トポロジカル絶縁体の発見によるブレイクスルーは、すぐさまトポロジカル超伝導の研究に波及し、この 10 年間に多くの研究が行われました。その意味で、トポロジカル超伝導の研究は黎明期を終えたと言えるかもしれません。しかし、「これはトポロジカル超伝導体です。」とはっきり言えるものは未だ少ないように思います。（「トポロジカル超伝導相」と「トポロジカル超伝導体」はやや違うと考えています。）これは、私のような根っからの物質科学屋にとっては看過できない問題です。トポロジカル超伝導体の実現と検証は容易でないことですが、それを理論と実験の協力により多方面から検討し全体像を描いていくのが物性物理学の王道だと考えます。その意味で「Topological Materials Science」と銘打たれた本新学術領域に参画する機会をいただいたことは幸甚の至りです。

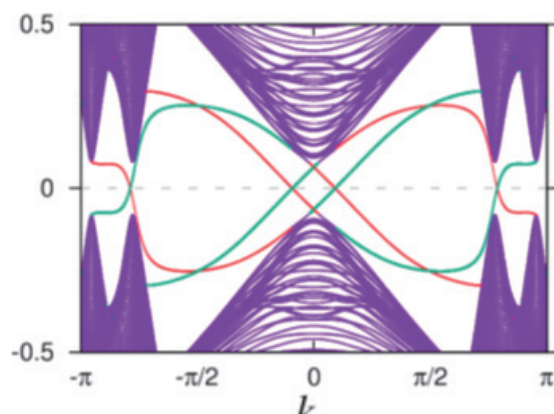
幸いにして、当グループ修士課程 2 年の大同暁人君が中心となって行った研究により、幅広い物質群において実現される「人工的」ですが「内因的な」トポロジカル超伝導体のデザインをすることができました [1]。このような方向性の研究を進め、理論・実験の多面的な研究に発展させることが新学術領域における目標の一つになります。

もう一つの目標は、トポロジカル相の理論を積極的に用いて、強相関電子系に発現する非従来型超伝導体のキャラクリゼーションを行うことです。物質科学の理論家とトポロジカル相の理論家の間には未だに見えない壁があるように感じます。トポロジカル相に関する理論の有用性を目に見える形にすることでその真価を示し、両者の融合を進めたいと思います。この方向で現在行っているのが、重い電子系超伝導体 UPt_3 の研究です [2,3]。これまでに行った研究により、この物質が非共型結晶対称性に由来するエキゾチックな超伝導物性の宝箱のようなものに思えてきました。この研究は小林伸吾氏、佐藤昌利氏、塩崎謙氏とも協力して行っています。

ここまで、研究紹介というよりは居酒屋での勝手語りのようになってしまいましたが、本当は一番に言い

たいことは以下のことです。物性科学の枠をも超えた幅広い研究者が集うこの新学術領域に大きな魅力を感じています。これまでも、異分野の方との出会いが思いもしなかった研究の進展につながった経験を幾度もしました。この領域の皆様とぜひ深い交流をさせていただければ、と願っております。どうぞよろしくお願いいたします。

- [1] Akito Daido and Youichi Yanase, Phys. Rev. B **94**, 054519 (2016).
- [2] Youichi Yanase, Phys. Rev. B **94**, 174502 (2016).
- [3] S. Kobayashi, Y. Yanase, and M. Sato, Phys. Rev. B **94**, 134512 (2016).



高温超伝導体積層構造を用いてデザインしたトポロジカル超伝導状態におけるマヨラナ準粒子のスペクトル [1]

第一原理強束縛模型による トポロジカル物質のバルク観測量提案

永井 佑紀 / 日本原子力研究開発機構 研究員

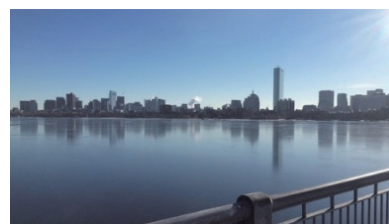
私は、主に超伝導の現象論を用いて研究を行ってきました。超伝導現象論とは、超伝導発現機構を微視的に直接的に研究するアプローチではなく、超伝導状態になった系で生じる様々な現象に着目して実験との比較を通じて物性を理解するアプローチです。これまで、STM やポイントコンタクトスペクトロスコピーで観測される界面や超伝導磁束で生じる準粒子束縛状態や、比熱、熱伝導率、中性子散乱実験で得られる動的帯磁率、核磁気共鳴実験で得られる核磁気緩和率等、を対象にして、第一原理計算から得られる有効模型を用いて実験結果の説明や新しい現象の予言を行ってきました。また、トポロジカル超伝導体と非従来型超伝導体に違いがあるのか、という観点から、トポロジカル超伝導体における軌道角運動量や不純物効果等の特異な振る舞いについても調べてきました。本新学術領域では、計画研究 A01 の前野グループや鄭グループと共同して、三次元トポロジカル超伝導体候補物質である $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ や $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ の物性の解明とそのトポロジカル性の検出を行いたいと考えています。その際、物質の特徴を反映させた模型（主として第一原理計算によって得られた模型：第一原理強束縛模型）を用いて、表面敏感ではない測定手法の提案によって、本新学術領域に寄与したいと考えています。また、原子力機構の持つスーパーコンピュータ ICE X（約 2.4 ペタフロップス、総計 60,240CPU コア）を活用することで、動的平均場理論等の超伝導現象論以外のアプローチを用いた $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の物性（特に、電子密度の大きさと比較して高い転移温度の起源）の解明も行えたらと考えています。

現在、原子力機構内の海外留学制度である「原子力留学」制度を用いて、2016 年 11 月から 2017 年 10 月までの予定で、米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) 物理学科の Liang Fu グループに Visiting scholar として研究滞在中です。Fu 博士はトポロジカル絶縁体・超伝導体研究における第一人者であり、その研究姿勢にも学ぶところが多いです。また、MIT 物性理論グループでは毎週のように外部の研究者を呼んでセミナーを開催しており、トポロジカル物質に関するセミナーも非常に多く、最新の研究の知見を得ることができます。この機会を利用して、本新学術領域に独自の寄与ができればと考えています。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。



ながい・ゆうき

1982 年北海道生まれ。2005 年 北海道大学工学部卒業、2007 年東京大学理学系研究科修士課程修了、2010 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。2007 年理化学研究所ジュニアリサーチアソシエイト、2008 年日本学術振興会特別研究員 (DC2) を経て、2010 年より現職。2016 年 11 月から 1 年間米国マサチューセッツ工科大学物理学科 Liang Fu グループのもとで研究滞在中。Boston は札幌と気候が似ていて過ごしやすく気に入っている。



MIT 側からの Charles 川の眺め。冬が始まり、表面は固体、バルクは液体となった。

第一原理計算を用いた新奇トポロジカル物質の探索

山内 邦彦 / 大阪大学 産業科学研究所 助教

第一原理電子状態計算（いわゆる“バンド計算”）を専門にしています。これまで遷移金属酸化物の磁性・強誘電性についての研究を主なテーマとしつつ、物質のスピン転移・ラシュバ効果・熱電効果・分子結晶の構造安定性など様々な物性について理論研究を行ってきました。本新学術領域では、計画研究 B01 の佐藤グループと共同でワイル半金属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研究を行っています。光電子分光測定で得られた電子構造と計算結果を比較することによって、フェルミ準位近傍の電子構造がどの原子軌道に起因するかをつきとめ、トポロジカル物性がどのようなカラクリで発現するのかを明らかにします。トポロジカル物質は「バルク・エッジ対応」によって特徴的な表面状態を示すため、トポロジカル物性を明らかにするためには結晶と表面の両方の電子状態を調べる必要があります。第一原理計算では、ワニエ関数などを用いてバルク結晶でのトポロジカル不変量を計算することができます。また、スラブ構造模型を用いることで、トポロジカル物質に特有の表面状態も計算することができます。これらを実験結果と照らし合わせると、複雑な電子構造のなかで何が重要であるかが見えてきます。

実験に先駆けて、理論計算で新しいトポロジカル物質を探索することも研究目標として掲げています。計算機上では、圧力効果や原子置換効果によってトポロジカル物性がどのように影響を受けるかを簡単に調べることができ、実験グループの負担を減らすことができます。また、私が興味をもっている遷移金属酸化物の様々な結晶歪みを利用したトポロジカル物質設計も行っており、これまでに、強誘電歪みでトポロジカル転移を生じる酸化物ヘテロ構造の組み合わせを発見しました [1]。さらに、インフォマティクス手法である「進化的アルゴリズム」を用いた高効率な理論先行型のトポロジカル新物質探索を行うことを予定しています。これは、元素の組み合わせを入力パラメーターとして、安定な組成と結晶構造を求める強力な手法です。これらの計算手法を駆使して、トポロジカル物性を示す新たな候補物質を計算機上で設計し、実験グループに提案することを目指します。

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



やまうち・くにひこ

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



並列計算に用いる計算機クラスター

トポロジカル相を活用した光ダイナミクスの時空間制御

小布施 秀明 / 北海道大学 工学研究院 助教

トポロジカル絶縁体では、電子の波動関数が持つトポロジカルな性質により、対称性を守る不純物に対して安定な表面状態が現れます。この特異な性質は電子系に限らず、フォトンや、さらに近軸近似を行った Maxwell 方程式によって記述される古典的なレーザー光を用いた系にも備わっています。このことから光学系におけるトポロジカル相の研究も現在盛んに行われており、表面状態の直接観測がいくつかの実験系で可能となっています。その一例にビームスプリッター列による量子ウォーク実験 [Kitagawa et al., Nat. Commun. (2012)] があります。この実験ではトポロジカル相を誘起するパラメーターを空間的に変化させていますが、さらにパラメーターを時間的に変化させることも可能です。このような系では、動的制御が可能なトポロジカル相を積極的に活用することにより、光学系における光ダイナミクスを制御することが期待できます。この観点から理論研究を行い、実験提案を行うことを公募研究の大きな目的として、本新学術領域研究に参加させていただくことになりました。本新学術領域研究で行われている研究テーマの中では異色であると思いますが、どうぞよろしくお願いいたします。

去年は、まずは静的なトポロジカル相を用いることにより、光学系で問題となるフォトンやレーザー光の損失を抑制することを目的とした研究を主に行いました。損失があるような開放量子系を現象論的に扱うと、複素数の固有エネルギーを持つ非エルミート系となるため、一般にその系のダイナミクスは複雑なものになります。しかし、非エルミートな系であっても、空間反転と時間反転操作を組み合わせた PT 対称性という特殊な対称性がある場合、トポロジカル相に由来する表面状態以外の固有エネルギーは実数となる系の存在が知られています。我々は、この性質を基に、フォトンの確率振幅に対するゲインと損失の効果を取り入れた量子ウォークにおいて PT 対称性が保たれる条件を明らかにし [1]、さらにこの系のダイナミクスを調べた結果、トポロジカル相に起因する表面状態の存在確率を指数関数的に増幅できることを示しました [2]。さらに、この結果を損失の効果しかない量子ウォークに拡張した場合、表面状態のみ減衰の効果が極めて小さくなることが分かりました。この理論結果に基づき、ビームスプリッター列による量子ウォークの実験を行ったところ、実験結果と理論予測が良く一致することが確かめられました。今後は、トポロジカル相が動的に変化した場合の表面状態の安定性について本格的に研究を行います。

[1] K. Mochizuki, D. Kim, and H. Obuse, Phys. Rev. A **93**, 062116 (2016).

[2] D. Kim, K. Mochizuki, N. Kawakami, and H. Obuse, arXiv:1609.09650.



おぶせ・ひであき

1977 年生まれ。長野県出身。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。その後、理化学研究所 古崎物性理論研究室 (基礎科学特別研究員)、京都大学大学院 理学研究科 凝縮系理論グループ (学振特別研究員)、ドイツの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。

量子ウォークの研究を開始したのは、京都大学でポスドクとして川上先生のお世話になっていた頃です。量子ウォークが、アンダーソン転移の理論研究で重要なネットワーク・モデルと数理論構造がよく似ていることから興味を抱き、さらに実験も可能ということに衝撃を受け、川上先生のご助言を頂きながら、地道に取り組んでいました。最近では、量子ウォークに軸足が移っている感もありますが、個人的にはアンダーソン転移の派生研究という位置づけで楽しんでいます。

ワイル超伝導相の探索とデバイス提案

横山 毅人 / 東京工業大学 理工学研究科 助教

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

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



よこやま・たけひと

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

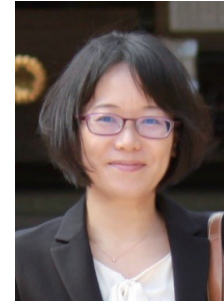
トポロジカルバンドの自発形成と相転移ダイナミクス

川口 由紀 / 名古屋大学 工学研究科 准教授

冷却原子気体、特にボース粒子系に関する理論研究を行っています。原子気体では内部自由度の局所的な制御や観測が実験的に可能であることから、これまでは主に、渦やモノポールといった実空間におけるトポロジカル構造のダイナミクスを研究してきました。現在進めている研究の一つに、このようなトポロジカル励起の運動によるドメイン成長のダイナミクスがあります。一般に相転移後などの秩序形成ダイナミクスにおいて、長時間ダイナミクスは微視的な詳細によらずユニバーサルな振る舞いを示し、系がトポロジカル欠陥を有しうる場合には、その対生成・対消滅を繰り返すことにより、長距離秩序へと発達していきます。本研究では、原子気体が磁化やエネルギーを保存する孤立系であることに着目して、保存則や超流動性とドメイン成長則の関係解明に取り組んでいます。

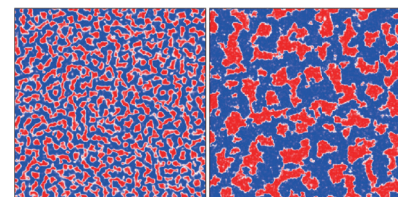
一方、運動量空間におけるトポロジカル構造に着目すると、ボース粒子系においても凝縮体からの励起スペクトルとして、トポロジカルに非自明なバンド構造が出現することがあります。この場合、系に境界を作ると、トポロジカル絶縁体の場合と同様に系の端や表面に局在した励起状態が出現します。一方で、ボース粒子系の特徴として、Bogoliubov 方程式は非エルミートという性質があり、励起スペクトルに複素固有値が出現するという特異な状況が起こり得ます。複素固有値が出現する場合には、対応するモードは不安定となり時間とともに指数関数的に増大します。本研究では、端状態が複素固有値モードとなるような状況を探索し、端状態を動的に検出する可能性を調べています。

現在は、学生 2 名とともに上記の研究に取り組んでいます。どうぞよろしくお願い致します。



かわぐち・ゆき

1977 年大阪府生まれ。2005 年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士後期課程修了。2005 年より東京工業大学大学院理工学研究科博士研究員、助教、2008 年より東京大学大学院理学系研究科助教、2012 年より東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター特任准教授、2014 年より東京大学大学院工学系研究科 講師を経て、2015 年より現職。



ドメイン成長の時間発展。(左)ドメイン形成直後、(右)長時間発展後。エネルギーを保存したままでもドメイン壁の運動により秩序が発達する。

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。

藤井 啓資

東京工業大学 理学院物理学系 修士課程 1 年

指導教員：東京工業大学 理学院物理学系 西田 祐介 准教授 (D01)

受入教員：京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 川上 則雄 教授 (D01)

滞在期間：2016 年 12 月 5 日 (月)～12 月 16 日 (金)

私は現在、超流動体等のガリレイ対称性を有する系の低エネルギー有効理論を研究しています。ガリレイ対称性を持つ系は、隠れた対称性として局所的なガリレイ対称性を持ちうることが明らかにされています [1]。私は、超流動 ^3He がこの局所的なガリレイ対称性を持つことを明らかにし、超流動 ^3He の B 相において対称性と一貫した低エネルギー有効理論を構築し解析しました。対称性に基づいて有効理論を構築する手法は、相互作用の強さに依らず用いることができるため、強相関系において強力な手法となっています。今回の滞在開始時点では、この超流動 ^3He -B に関する結果は論文にまとめたものの、次の研究テーマは未確定の段階でした。そのため、研究結果について議論していただくことに加え、川上研究室の有する強相関系の知見を学び、今後の研究に役立てることを滞りでの目標としていました。

滞り初日には、インフォーマルセミナーとして、上記の研究結果に関して1時間ほどの発表を行いました。発表後には、普段の私の研究室で受ける質問とは違った切り口からの質問およびコメントを多く頂きました。拙い返答となってしまった部分もあったかと思いますが、川上研究室の方々は積極的に議論してくださり、良い経験になりました。

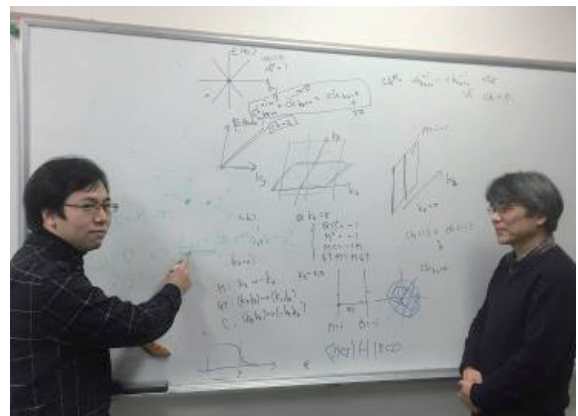
滞り2日目以降は、助教の手塚さんをはじめとして、川上研究室の方一人ひとりと議論する時間をとり、それぞれの研究内容を一から丁寧に教えていただきました。一対一で議論しながら学べる貴重な機会でした。特に、博士課程3年の住吉さんには、微分幾何学の手法で如何にして熱応答や転位等の欠陥を扱うかを教えていただきました。微分幾何学の手法は、局所的なガリレイ対称性を利用する自身の研究にも関連する話で

あり、熱応答等への応用は私自身の今後の研究を考える上でとても参考になりました。博士論文の提出等で忙しい中で時間を割いていただいたことに感謝いたします。

さらに、最後の3日間は、慶應義塾大学の山本直希さんによる集中講義「素粒子物性論」が京都大学で行われていたため、これに参加しました。集中講義では、トポロジカル絶縁体やワイル半金属を具体例として、対称性とトポロジに基づく低エネルギー有効理論が扱われました。これらの内容は、私自身の研究と密接に関わる内容であったため、大変有意義でした。

最後になりましたが、突然の滞りにも関わらず受け入れていただいた上、発表及び議論の時間を取っていただいた川上教授並びに研究室の皆様感謝いたします。とても充実した2週間で、当初の目標通り今後の研究を考える上でとても有益な滞りでした。

[1] D. T. Son and M. Wingate, Ann. Phys. **321**, 197 (2006).



(左)筆者。川上教授(右)との議論風景。自身の研究室での議論とは異なる観点からの御指摘を数多く頂き、非常に有意義な議論でした。

若手励起プログラム報告

高根 大地

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 博士前期課程 1 年

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

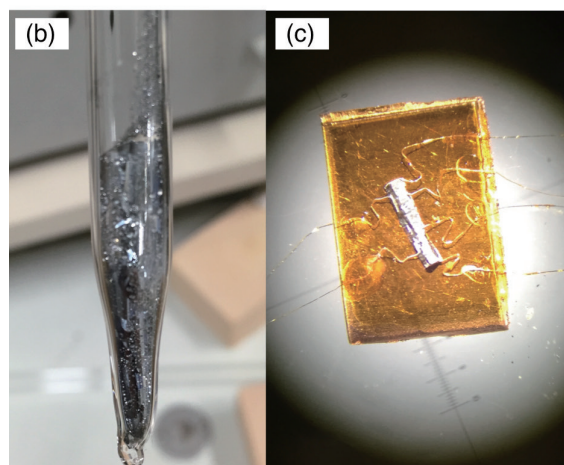
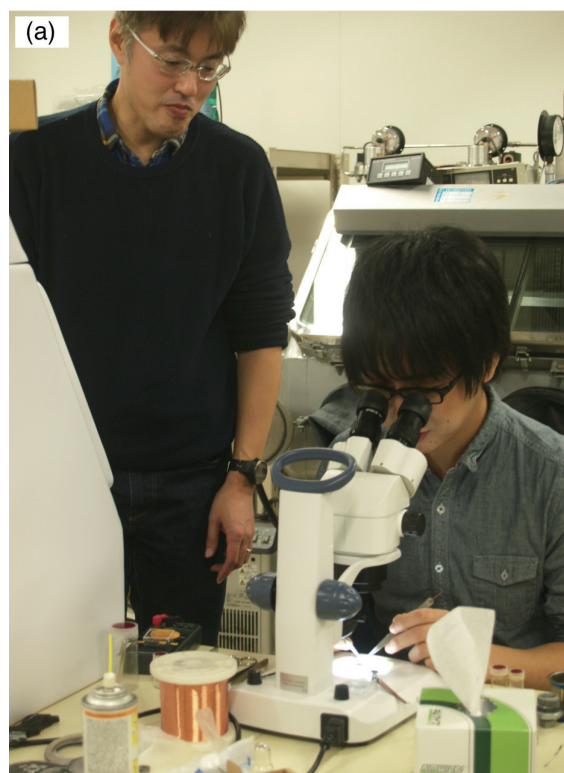
受入教員：京都産業大学 理学部物理科学科 瀬川 耕司 教授 (B01)

受入期間：2016 年 12 月 5 日 (月)～12 月 9 日 (金)

トポロジカル絶縁体をはじめとしたトポロジカル物質はその特異な電子状態の観点から様々な新規量子現象が提案され近年盛んに研究活動が行われている。私はこれまでトポロジカル絶縁体やトポロジカル半金属の特異な電子構造の直接観測を目的として角度分解光電子分光による研究を行ってきた。最近、私の所属する研究室において微小スポット低エネルギー連続発振光源を用いた ARPES 装置を開発し、従来よりもドメイン選択的かつ高運動量分解能な ARPES 測定を行う事が可能となった。そこで実空間分解能の高い ARPES 実験をトポロジカル絶縁体に対して行う事によってトポロジカル絶縁体の電子状態に新たな知見を与えられるのではないかと考え、本プログラムを通じて高品質トポロジカル絶縁体単結晶の合成が可能な京都産業大学瀬川研究室にて試料合成を行った。

今回の滞在においては瀬川先生からの直接のご指導のもと、トポロジカル絶縁体の単結晶合成、試料整形を行い、ARPES 実験にむけて多く (50 以上) の単結晶試料を得る事が出来た。また X 線回折やホール抵抗測定なども行い、得られた結晶が十分に高品質である事も確認した。現在は所属研究室にて ARPES 実験に向け準備中である。

試料合成以外にも単結晶試料の品質評価、整形を含む一貫したプロセスに関わったことや、瀬川先生の試料合成に関する講義を京都産業大学の生徒とともに拝聴したことで試料合成にかかわる知見が大きく深まった。末筆ではあるが、このような機会を与えてくださった本プログラム関係者各位、ご指導くださった瀬川先生および瀬川研の皆様に感謝をのべたい。



(a) 瀬川先生 (左) と私、(b) 単結晶成長直後の Bi_2Se_3 、
(c) ホール抵抗測定用の端子を付けた Bi_2Te_3

DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

若手励起プログラム報告

田村 駿

名古屋大学 工学研究科 PD

指導教員：名古屋大学 工学研究科 田中 由喜夫 教授 (B01)

受入教員：京都大学 基礎物理学研究所 佐藤 昌利 教授 (D01)

受入期間：2016 年 12 月 20 日 (火)～12 月 26 日 (月)

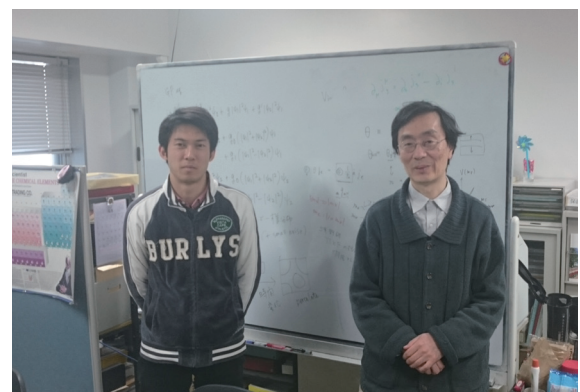
絶縁体を挟んだ超伝導体と金属の接合の界面にはミッドギャップ状態である表面アンドレーエフ束縛状態 (SABS) ができる。2 次元の d 波超伝導体である銅酸化物高温超伝導体ではフラットな SABS が形成され、伝導度におけるゼロバイアスピークとして観測されている。SABS を理解するための最も簡単化された枠組みとして Blonder-Tinkham-Klapwijk (BTK) 理論があり、d 波の超伝導ギャップを仮定した場合の計算結果は実験結果を定性的に再現している。我々は、より複雑な超伝導ギャップを仮定した場合の SABS の研究の過程において、BTK 理論の範囲内で SABS のエネルギー分散を解析的に得ることに成功した。そして、3 次元のカイラル超伝導体では複雑なエネルギー分散の SABS が実現することを明らかにした。また、非ユニタリーやスピン重項と三重項が混成したような、一般的な超伝導ペア関数に拡張した場合の伝導度の公式を得ることに成功した。そして、これらの結果を元に磁場下の伝導度による $U\text{Pt}_3$ の超伝導の対称性の特定方法の提案を行った。この研究で得られた結果のより深い理解を得るために、超伝導体のハミルトニアン の対称性による表面状態の分類を学ぶために基礎物理学研究所の佐藤先生の元に滞在した。

滞在中は分類方法を学ぶと共に、接合界面におけるスピン軌道相互作用や凹凸の影響、更に磁場が超伝導ギャップのノードに与える影響などについて議論して頂いた。これらの効果は接合界面では摂動的に取り扱えないものであるため、今後、伝導度を与える影響を一つずつ検証していきたい。滞在中、基礎物理学研究所でのセミナー発表の場を設けて頂き、現在の研究



に関する助言を頂いた。また、理学研究科の前野先生 (A01) には Anwar さんの行った Sr_2RuO_4 の接合に関する実験について説明して頂く場を設けて頂いた。彼の得た実験結果を説明できるような理論計算が出来れば幸いである。更に、理学研究科の柳瀬先生とも議論の場を設けて頂き、 $U\text{Pt}_3$ に関する知見を得ることが出来た。

このような貴重な機会を与えてくださった新学術領域の若手励起プログラムに感謝致します。受け入れてくださった佐藤先生、昼食に誘って頂いた、戸塚先生、段下先生、國見さん、忘年会を企画してくださった学生の方々、そして、休日に食事に誘って頂いた素粒子理論の方々に感謝申し上げます。



田中先生 (右) と私

若手励起プログラム報告

池田 敦俊

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 理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)

受入教員：名古屋大学 工学研究科 田仲 由喜夫 教授 (B01)

受入期間：2016 年 12 月 12 日 (月)～12 月 14 日 (水)、2016 年 12 月 19 日 (月)～12 月 22 日 (木)

物質のトポロジーの研究は理論先行であり、トポロジカル物質と実験的に確認された例は多くありません。私は新たなトポロジカル超伝導体の発見を目指して物質合成を行っているのですが、やみくもに新物質を合成するのは効率的ではありません。そこで以前より共同研究の関係にあった名古屋大学の田仲研究室に滞在し、第一原理バンド計算を教えていただきました。これにより、そもそも超伝導になる可能性があるか、また非自明なトポロジーに不可欠であるバンド反転があるかが合成前に予想でき、実験効率やモチベーションの面で大きな効果があります。

私はバンド計算の全くの初心者だったので、最初はすでに結果が報告されている Ca_3PbO のバンド構造を再現することから始めました。しかしバンド計算の大前提となる、京都の研究室内のサーバーを名古屋から作動させるということが最初の関門でした。京都にいる同期や先輩に電話をかけ、何とか環境を整えてもらいました。環境さえ整えば、 Ca_3PbO の再現はほとんど問題なくできました。バンド計算の理論が全く分かっていない人間にも使えるよう、ソフトウェアが非常に親切に設計されていることに驚きました。

次に、これから合成に取り組む予定の新物質について計算しました。この物質は合成の報告すらないので、バンド計算の前に格子定数を最適化する必要があります。その最適化も同じソフトウェアを使ってできるので、「コンピュータの中ではこんなに早く新物質ができるのか」と感動する裏で、「実験ではこんなに簡単にはいかないだろうな」と気分が重くなりました。

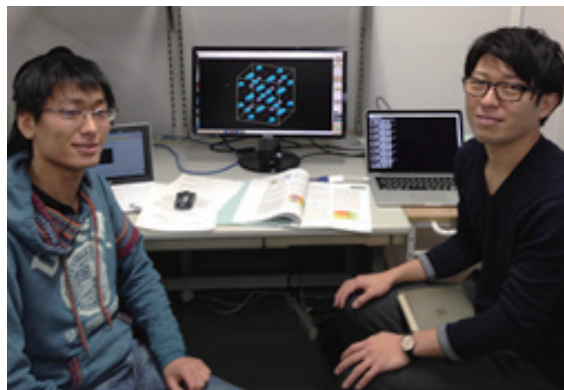
最後に、私たちが最近発見した超伝導体の $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ [1] における Sr 欠損を取り入れるため、単位胞を拡大

した計算を行いました。この計算では度重なるエラーに見舞われましたが、指導していただいた博士課程の福元敏之さんのおかげで何とかエラーを克服できました。

今回の滞在で、新物質探索の強力な指針を手に入れました。この技術を活かして、効率的な物質開発を行いたいと思います。

田仲由喜夫先生をはじめ、私を暖かく迎えてくださった研究室の皆さまに感謝いたします。特に福元さんには、毎晩遅くまでほとんどつきっきりでバンド計算を教えていただきました。ありがとうございました。この機会を与えてくださった若手励起プログラムにもお礼申し上げます。

[1] M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, and Y. Maeno, Nat. Commun. **7**, 13617 (2016).



バンド計算を教えてくださった名大田仲研 D1 の福元さん (右) と私。 Sr_3SnO の単位胞を 8 個並べ、Sr 欠損を含む超格子のバンド計算をしている様子。

DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

若手励起プログラム報告

ムハマド・シャーバズ・アンワー

京都大学 大学院理学研究科 PD

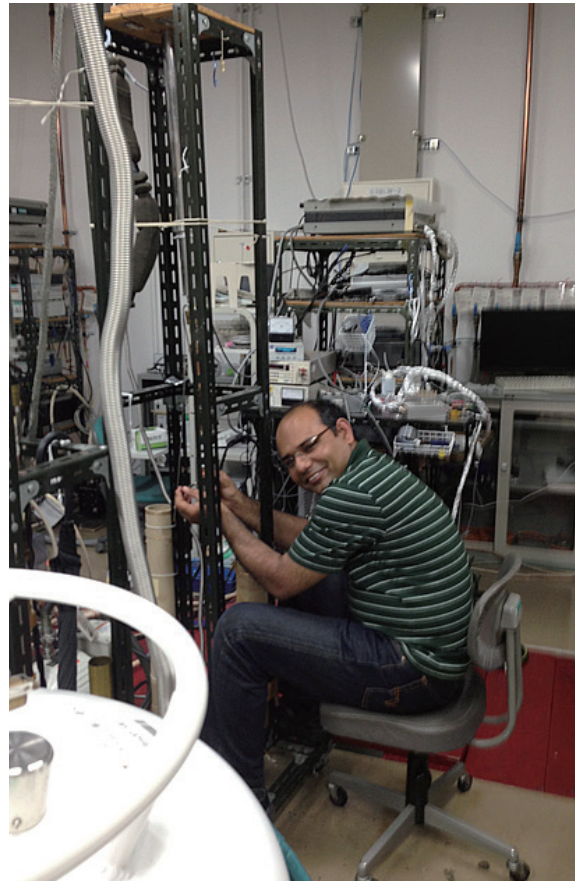
指導教員：京都大学 理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)

受入教員：産業技術総合研究所 柏谷 聡 首席研究員 (B01)

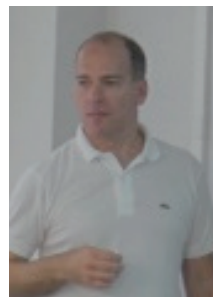
受入期間：2016 年 12 月 12 日 (月)～12 月 16 日 (金)

Self Introduction: After my PhD at Leiden University, I moved to Kyoto University. Here, I have been working at with Prof. Yoshiteru Maeno since 2012. During my stay at Kyoto, I worked on Topological superconducting junctions and spin-triplet superconductor based proximity hybrid systems. Very recently, I successfully completed my JSPS fellowship and started my research work as a TMS researcher in December. Thanks to TMS project, I got a chance to visit Prof. Satoshi Kashiwaya at AIST.

Visit to AIST: Since the discovery of unconventional superconductivity in Sr_2RuO_4 , various experiments demonstrate that the orderparameter of Sr_2RuO_4 exhibits the chiral p-wave spin-triplet nature with time reversal symmetry breaking. Such superconductors can form domains with degenerate chirality of their superconducting order parameter. A chiral-domain wall separates two domains with opposite chirality. Chiral-domain walls must exhibit dynamic behavior just like ferromagnetic domain walls [M. S. Anwar *et al.*, Sci. Rep. (2013)]. Recently, we systematically observed telegraphic-like noise in Nb/Ru/ Sr_2RuO_4 topological superconducting junctions, with which the phase winding of order parameter can be effectively probed by making use of real-space topology. The observed anomalous telegraphic-like noise is well explained by chiral-domain-wall motion. It is a natural question, whether we can control the motion of chiral-domain walls? To answer this question, we studied topological junctions in various configurations and collected interesting data. Prof. S. Kashiwaya is one of the experts of superconducting



junctions based on unconventional superconductors. During my stay at AIST, we discussed and studied our data in detail to establish a strong conclusion. Furthermore, we also discussed our very recent observation of direct induction of spin-polarized supercurrents into a ferromagnetic SrRuO_3 out of Sr_2RuO_4 [M. S. Anwar *et al.*, Nat. Commun. (2016)]. My visit to AIST also provided me opportunities to discuss our data of $\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ junctions. I also visited the facilities available to fabricate complicated novel Josephson junction based on spin-triplet superconductors. We planned our future experiments and collaborations to extend on exotic proximity effects. We believe that our work has important implications in the field of Superspintronics. I am thankful to TMS project for giving me a chance to visit AIST-Tsukuba.



Mario Cuoco 博士

イタリア・サレルノ大学

報告者：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 (A01)

期間：2016年7月21日(木)～8月15日(月)

イタリア・サレルノ大学の Mario Cuoco 博士は、2016年7月21日から8月15日の間、京都大学と名古屋大学に滞在した。京都大学では TMS セミナーを3回実施し、前野 (A01 代表者)、松田 (A01 分担者)、川上 (領域代表者・D01 代表者)・柳瀬 (D02 公募代表者)、佐藤昌利 (D01 分担者) らの各グループとの研究交流・共同研究の相談を行った。川上・前野とは、来年度の SPIN 研究機構と TMS とのアライアンス研究会開催に向けた相談も進めた。また名古屋大学でも2回の TMS セミナーを実施して、田仲 (B01 分担者)・川口 (D04 公募代表者) のグループと研究上の議論を行った。



My TMS visit started on 22nd July with a meeting with Prof. Y. Maeno who nicely described the scientific agenda for my stay in Kyoto and shortly introduced his research group structure and related activities. In this occasion we soon entered into the physical issues related to the recent experimental achievements of the Maeno's group on the proximity effect in the $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-SrRuO}_3$ system, which is the first successful realization of a superconductor-magnet heterostructure with spin-triplet pairing and itinerant ferromagnetism. Such system is particularly relevant for its potential of being a prototype for a superconducting spintronic device where the Cooper pairs can be employed for storing or transferring information by exploiting their spin angular momentum rather than the charge degree of freedom. The discussion mainly focused on the transport properties of the $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-SrRuO}_3$, the nature of the proximity effect, the range of pairs leaking in the ferromagnet, the possibility of an interface reconstruction of the d-vector and of the magnetization. Such aspects have been further considered in the first seminar I delivered on "Spin triplet superconductors: interface to ferromagnets

and magnetic edge states". Many of the results obtained in this framework has been inspired by the discovery of spin-triplet superconductivity in Sr_2RuO_4 by Prof. Maeno, and further boosted by his success to design controlled interfaces between spin-triplet superconductor and ferromagnet.

Then, I have benefited of many stimulating discussions with Prof. M. Sato about quantum topological systems at large. In particular, Prof. Sato thoroughly presented his last achievements in getting a novel classification of topological states of matter protected by non-trivial spatial groups (e.g. non-symmorphic) as well as about the mechanisms for getting unconventional superconducting states in Dirac semimetal due to special orbital texture around the Dirac points. I also had the privilege to discuss with Prof. Sato about my recent findings on curved nanostructure with Rashba spin-orbit coupling as related to the content to a second seminar I gave on "Designing topological states, spin textures and spin interferometers by shape deformation".

With Prof. Yanase I had the opportunity to discuss about the possibility of having novel chiral topological phases at the interface between nodal superconductors and ferromagnet, or in nodal superconductors in the presence of an applied magnetic field. Such meetings have stimulated possible directions of investigation especially in connection to experimentally feasible heterostructures and superlattices.

The meeting with Prof. N. Kawakami brought me into the complex world of topological states of matter in the presence of strong electron correlations. I benefited of many fruitful discussions with Prof. Kawakami and Prof. Peters concerning the role of Coulomb interaction in setting topological phases, the methodologies to find a topological phase, the general expectations of achieving a topological non-trivial state in Mott-like systems. Arguments of



discussion with Prof. Kawakami were also related to the results I presented concerning my research activities on correlated electron systems, especially for transition metal oxides (seminar on “Orbital doping in hybrid transition metal oxides”).

I also had the privilege to meet all the members of Prof. Maeno’s group, discussing about their current research activities on unconventional superconductivity, instabilities of Mott phases, correlated multi-orbitals materials, etc. Moreover, I benefited of fruitful discussions with Prof. K. Ishida about ferromagnetic superconductors and the mechanisms for having spin-triplet pairing.

The visit in Kyoto has been also a great occasion to further discuss with Prof. Kawakami and Prof. Maeno about the organization of the alliance Workshop between the TMS members and the European Consortium of the CNTQC project.

Apart from the excellent and extremely stimulating scientific atmosphere in Kyoto, I had the opportunity to get into the Japanese traditions by assisting at some of the parades that take place during the festival of the Gion Matsuri. It has been a precious and incredible experience of life and customs.

The second part of my TMS visit has been in Nagoya and started on 6th August. I met Prof. Y. Tanaka at the University of Nagoya who quickly showed to me the scientific agenda and engaged me into many fruitful and extremely stimulating scientific meetings. I had the great privilege to discuss with Prof. Tanaka about his many achievements in the context of unconventional superconductors, anomalous Andreev bound states and in particular of the emergent role and the ubiquity of odd-in-time pairing (both as superconducting order parameter and induced pair correlations). I had many stimulating discussions on the most relevant experimental setup to probe odd-frequency pairing and on the subtle

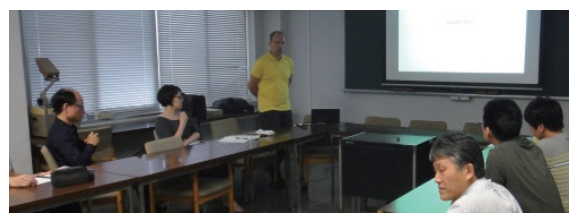
relation with the edge states occurring in topological non trivial superconductors.

I benefited a lot from the many discussions with Prof. Yada on unconventional superconductors with flat surface bands and the relevant predictions in the context of tunnelling spectroscopy for multi-orbitals superconductors in general and in particular about the experimental observations in Sr_2RuO_4 .

The meeting with Prof. Kawaguchi has been also extremely enlightening especially concerning the emergence of novel skyrmions in magnetic heterostructures made of helical and ferromagnetic interfaced systems as well as the spatial profile of domain walls between skyrmions.

The scientific atmosphere has been extremely alive and stimulating. I had many exchanges with all the members of Prof. Tanaka’s group. Such meetings allowed me to get access to the various research directions that are carried out in the Prof. Tanaka’s group concerning the topological superconductors (especially Cu doped BiSe), the transport properties of superconducting/normal or magnet heterostructures, the nature of the edge states and the way to detect them, the braiding of Majorana states, the design of fractional Majoranas, etc. I find also much stimulating the discussion on devices based on axial currents.

Starting from the seminar I gave on spin-triplet superconductors interfaced to ferromagnets, I had the privilege to discuss with Prof. Tanaka about new directions to explore concerning the re-organization of the d-vector on the surface or at the edge of topologically non-trivial spin-triplet superconductors.



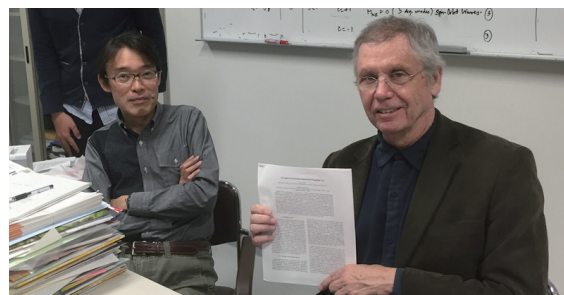
REP 招聘報告

James Sauls 教授

ノースウェスタン大学

報告者：大阪大学 大学院基礎工学研究科 水島 健 (D01)

期間：2016 年 11 月 1 日 (火)～11 月 22 日 (火)



大阪大学にて藤本教授 (A01) と植松氏と議論

REP プログラムを利用して、2016 年 11 月 1 日から 3 週間 Sauls 教授に大阪大学を中心に滞在していただきました。Sauls さんとは 2012 年に Northwestern 大学へ半年間滞在してからの縁で、それから毎年研究室に短期滞在し、共同研究をすすめてきました。2016 年の秋セメスターでは授業がないということでしたので、良い機会と思い、滞在し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。

I arrived in Osaka on the 1st of November and spent the first week at Osaka University discussing a collaboration on the Bosonic mode spectrum of the topological B-phase of superfluid ^3He with Professor Mizushima. I also had the opportunity to discuss several topics with Professors Fujimoto and Mizushima related to the topological properties of chiral superconductors. Of particular interest to me was learning about the connection between torsion and chiral anomalies from Professor Fujimoto. This led me to realize that recent work by my graduate student, Josh Wiman, predicting the existence of a new topological spiral ordered phase of ^3He in 100 nm pores with spontaneous current flow on the boundaries is likely a realization of a torsion induced chiral anomaly. I am pursuing this as a result of these discussions. Professor Mizushima also arranged discussions with Dr. Kazushi Aoyama at Osaka University on the properties on superfluid ^3He in confined geometries, as well as the Bosonic spectrum of multi-component superconductors which are being pursued by Professor Mizushima and Professor Fujimoto as well as my group at Northwestern. Out of these discussions developed a plan to pursue research into the Bosonic spectrum in non-centrosymmetric superconductors with Professors Aoyama and Mizushima.

Early in my visit I had the opportunity to visit Kyoto University to give the TMS Seminar on “Anomalous Hall Effects in Chiral Superfluids” and to learn about recent work in Professor Maeno’s laboratory as well as Professors Ishida and Matsuda. Several students asked me questions during the discussion period. During the visit I learned quite a lot about experiments and the interpretation of the newly discovered nematic superconducting phase of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$. I had two detailed conversations with Professor Maeno on heat transport in Sr_2RuO_4 and its possible implications for the paring symmetry in this unconventional superconductor. The Kyoto visit also allowed me the opportunity to meet and talk with Professor Kawakami heading the TMS project. Professors Kawakami and Maeno treated me to exceptional hospitality, Japanese cuisine and culture!

In the second week of my visit I had the opportunity to give a pedagogical seminar titled “*From Spontaneous Symmetry Breaking to Topological Order*” at Osaka University, Department of Materials Engineering Science. This was followed by a unique opportunity to appreciate the specialties of Osaka, to discuss the passion we all have for the sport of baseball as well as physics! During this second week I worked on a manuscript with Professor Mizushima on the masses of the Bosonic modes of the B-phase, more specifically on the mass shifts due to vacuum polarization effects. The parent vacuum is Fermionic, and thus particle-hole and particle-particle interactions lead to polarization induced mass shifts for Bosonic modes with different symmetry than that of the vacuum. These mass shifts lead to violations of Nambu’s conjectured sum rule for the class of Nambu-Jona-Lasino theories for Bosonic and Fermionic mass generation by spontaneous symmetry

breaking. In this paper we also develop a Lagrangian field theory for the Bosonic spectrum. While this formulation is formulated by integrating out the Fermionic degrees of freedom, and thus cannot include vacuum polarization corrections, it has the advantage of allowing including leading order strong coupling effects and allows us to extend the theory of the Bosonic spectrum to confined topological $^3\text{He-B}$. This is a basis for our continuing collaboration to investigate the signatures of the surface Majorana spectrum in the reflection and absorption spectrum of spin $J=2$ Higgs modes in $^3\text{He-B}$. This work is accepted for publication in Physical Review B pending minor revisions.

In the third part of my visit I had the opportunity to visit Professor Tanka and his group at Nagoya University. I had the opportunity to a research seminar on "*Anomalous Hall Effects in Chiral Superfluids*" and to hear about the broad range of research going on in Professor Tanaka's group, including discussions on the concept of "*odd-frequency superconductivity*", a major theme of Tanaka-san's research. I had the opportunity to learn of the work by Professor Kawaguchi on novel ground states of dipolar BECs and cold atoms, as well Professor Kontani's research on the theory of strong correlations in Fe-based superconductors. From Nagoya I moved to Keio University to participate in a joint workshop of the TMS project and the Topological Science Project hosted by Professor Nitta of Keio University termed the *TMS Intensive-Interactive workshop*. Indeed it was both intensive and interactive, and an excellent workshop with a broad range of theoretical ideas and results presented in topological materials to the role of topology and spontaneous symmetry breaking in quantum field theory. This was one of the best cross-disciplinary workshops I have participated in. I learned a lot, particularly about theoretical directions of colleagues in Japan – from topological insulators to neutrinos. I also came away with a deeper sense of the focus and interactions within the physics community in Japan. It was a great opportunity for me, and as a result I expect there will be continuing research collaborations with colleagues in Japan for which I am eager to contribute.



Sauls さんには大阪・京都・名古屋と3度もTMSセミナーを行っていただき、さらに集中連携研究会（慶應）でも講演をしていただきました。タイトなスケジュールにもかかわらず、教育的なイントロを含む質の高い講演をしていただき、感謝に堪えません。TMSセミナーでは、前野新学術領域の大きな成果の一つである「超流動 $^3\text{He-A}$ におけるカイラリティの直接観測」に関する理論が主なトピックでした。カイラリティの直接観測という美しい実験結果と、それに定量的に合致した美しい理論を軸にしながら、 UPT_3 など関連した超伝導物質に対する新たな知見も含んだ講演は圧巻でした。Sauls さんはもともと中性子星に関するテーマでPh.D.を取得され、その後、超流動 ^3He から超伝導物質へと様々な研究分野を渡り歩かれています。その経歴もあってか、素粒子や宇宙など異分野の方々が集まった慶應での研究会も満喫され、異分野・異文化交流を楽しまれたようです。

日本に到着された数日後にワールドシリーズの最終戦をともに観戦し、その結果にカブスの熱狂的ファンであるSauls さんは歓喜していました。ただ、その次の週の大統領選挙の結果に打ちひしがれ、まさに天国と地獄を味わったようです。民主党はブルーカラー有権者に支持のあるサンダース氏を候補にしなかったのが敗因だと分析しながら、立ち直れないほどに項垂れている姿が印象に残っています。また本人が「自分の人生の9割は物理で、残りは自転車だ」というほどのサイクリストで、滞在中は愛用のロードバイクをアメリカより持参されていました。セミプロというほどのレベルなので、とても一緒にはついていけませんでした。秋の深まる箕面や



CIFAR Quantum Materials Summer School 2016 and the Main Meeting

2016 年 4 月 25 日 -30 日 (Toronto, Canada)

高三、服部、吉田、Ivan は 4 月 25 日 -30 日にかけてトロントにて開催された CIFAR Quantum Materials のサマースクール (25 日 -27 日) と国際会議 (28 日 -30 日) に参加した。本稿では、会議の様子について、参加した各学生の視点からご報告する。

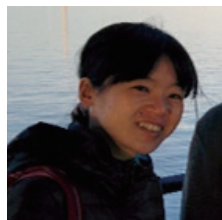


高三 和晃

京都大学 凝縮系理論研究室
博士課程 1 年

発表内容：

トポロジカル近藤絶縁体における
レーザー誘起 Weyl 半金属



服部 綾実

名古屋大学 田仲研究室
博士課程 1 年

発表内容：

水素終端シリセン、ゲルマネン、
スタネンリボンにおけるエッジ状態

国際会議を通して情報収集したい、さらにサマースクールでの密な交流を通して海外の研究者と積極的に議論できるようになりたいという想いで、本プログラムへの参加を決めました。本サマースクール・国際会議では、講演間のコーヒープレークが長く取られています。そのため、参加者同士で話す時間が自然と長くなります。2 回目の海外出張であったので、まだ英語でのディスカッションには苦手意識があり、1 日目や 2 日目は、人の話を受動的に聞いてばかりで、夜にはヘトヘトという状況が続いて大変でした。しかし、相手の研究内容に興味を持って話しかけ続けていると、最終日近くにはある程度は自然体で質問や議論ができるようになった感覚がありました。お陰で最終的には、色々な大学の学生や先生と交流できました。交流の中で特に嬉しかったのは、「ポスターセッションの時間内に聞けなかったから、個人的に話を教えて欲しい」と



トロント市街の夜景



吉田 周平

東京大学 上田研究室
博士課程 2 年

発表内容：
p 波相互作用するユニタリー
フェルミ気体の理論



Ivan Kostylev

京都大学 固体量子物性研究室
博士課程 2 年

発表内容：
Study of uniaxially strained
crystals

CIFAR Quantum Materials のサマースクールと本会議では、トポロジカル物質や強相関の入門から最新の話まで多様な講義、講演を聞くことができた。やや異色に感じられたのは、Andy Mackenzie 先生 (Dresden) による固体電子の流体力学的な振る舞いに関する講演である。冷却原子気体や液体ヘリウム等の量子流体にも通じる話で大変興味深く感じた。全体的に銅酸化物高温超伝導、特に擬ギャップ相の起源や擬ギャップ「臨界点」に関する講演が多く感じられたのはお国柄だろうか。多くの講演では丁寧な導入が付けられており、これらの分野を概観するのに役立った。

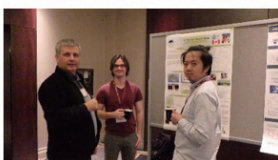
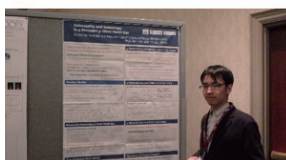
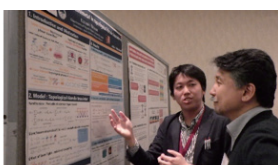
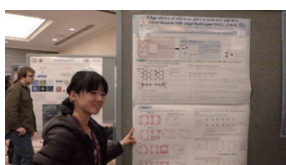
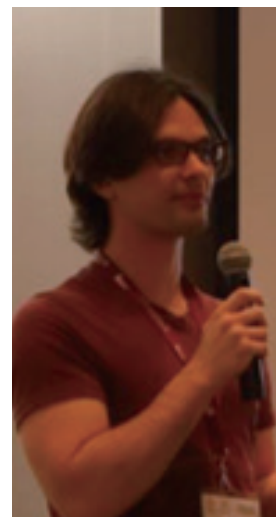
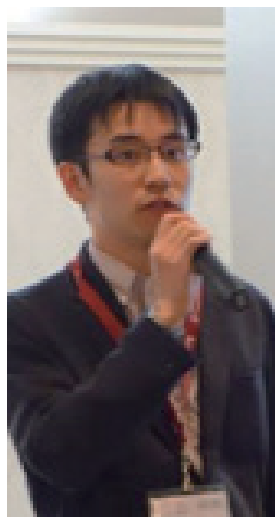
CIFAR Quantum Materials には冷却原子気体の研究者も参加されている。特に、メンバーの一人である Joseph H. Thywissen 教授 (Toronto 大学) は、私が研究している p 波フェルミ気体の実験を行っている。そのため、参加に先立って Thywissen 教授とコンタクトを取り、本会議の期間中に議論する時間を持つことができた。Thywissen グループからは他にも、光格子顕微鏡を用いたフェルミ・ハバード模型の量子シミュレーションに取り組んでいる学生が参加しており、彼らと議論できたのは大変貴重な機会であった。

滞在先であり全てのプログラムの会場でもホテルは、Bloor-Yorkville の華やかなショッピング街にある。そんな街も、少し歩くと歴史を感じさせる Toronto 大学のキャンパスや、それぞれに独特の雰囲気を持つ様々なエスニック・タウンに行き着く。一日の講演の後にこの街を歩くのは、とても楽しい時間であった。

この度サマースクールと本会議に参加し、海外の研究者との議論、交流からカナダでの生活に至るまで、全てとても良い経験になりました。新学術領域および CIFAR の皆様には、このような貴重な機会を下さったこと、この場を借りてお礼申し上げます。



ポスタープレビュー（左から、服部・高三・吉田・Ivan）



ポスター発表



前野先生・McMaster大学の学生・MITの学生と一緒にディナーに行きました

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



JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

ヤン・ニクラス・ハウスマン

ベルリン・フンボルト自由大学 修士課程 2 年

指導教員：Nicola Pinna 教授

受入教員：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 (A01)

期間：2016 年 10 月 20 日 (木)～12 月 4 日 (日)

"Synthesis of the superconducting Dirac-metal antiperovskite oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ "

I stayed at the Quantum Materials laboratory of Prof. Yoshiteru Maeno in Kyoto University for 46 days from 20 October to 4 December, 2016. My major is chemistry and I participated in the synthesis of the recently in this group discovered antiperovskite oxide superconductor $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$. $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ is the first superconductor among antiperovskite oxides and it contains slightly gapped three-dimensional Dirac cones at its Fermi level, owing to an energy level inversion of the Sn-5p and Sr-4d. It is predicted to be a candidate for a topological crystalline insulator, protected by mirror symmetry.

It was a very fascinating experience for me to work in a solid state physics laboratory and I enjoyed to work on the synthesis of a material with such a big potential. I experienced differences in the approach of chemists and physicists. As a chemist I was always focused completely on the purity and crystallinity of a material. These parameters are doubtlessly important for physicist, too. However, for physicist in the centre of investigation are different properties like in this case superconductivity and it was interesting to experience the significant effect of comparably small changes in synthesis parameters on the superconducting properties. Therefore, to perform research on such a material, I, as the synthesising chemist, had to work very close together with the investigating physicist, mainly Mohamed Oudah,

of the group. I believe this worked well across the cultural barriers during my stay in the Quantum Materials laboratory. At least I learned a lot from my Japanese and international physicist colleagues and I believe the materials I produced will be useful for them, too.

The supervision of Prof. Yoshiteru Maeno and Prof. Shingo Yonezawa was excellent and very intensive with one meeting on this research subject a week and an additional weekly seminar on solid state physics. My knowledge of superconductivity and solid state physics in general evolved substantially during my stay. In conclusion, I really enjoyed my stay in the Quantum Materials laboratory and believe it was a fruitful exchange for both sides.

(A note from the host researcher: The work Niklas made the substantial contribution to was published as Nature Commun. **7**, 13617 (12 December, 2016).)



From left: Atsutoshi Ikeda, Mohamed Oudah, and Jan Niklas Hausmann, in front of the glove box used in this work.

JREP 報告

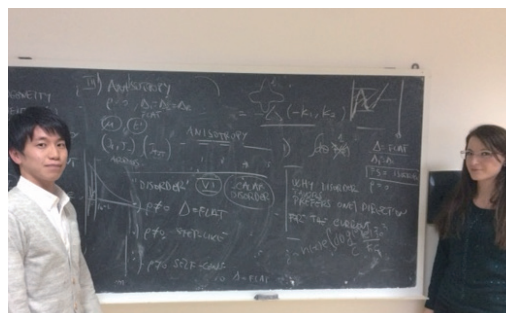
鈴木 修

北海道大学 工学院応用物理学専攻 博士課程 3 年

指導教員：北海道大学 大学院工学研究院 浅野 泰寛 准教授 (A01)

受入教員：サレルノ大学 物理学専攻 Mario Cuoco 教授

受入期間：2016 年 10 月 5 日 (水)～11 月 3 日 (木)



図：議論の様子。P. Gentile 氏 (右) と (左) 私。

ティレニア海に面する港町サレルノは、陽気なイタリア人で溢れる活気ある街である。その郊外にキャンパスを構えるサレルノ大学では、学生も教員も当然陽気であり、皆が精力的に研究に取り組んでいる。またサレルノ大学は、現存する大学のうち二番目に古い大学であり、偉大な歴史をもつという一面もある。今回、鈴木修は、若手研究者交換プログラムを通して、サレルノ大学に約 1 ヶ月滞在し、Mario Cuoco 氏、Paola Gentile 氏と共に、カイラル d 波超伝導体の自発エッジ電流に関する研究を行った。

Cuoco 氏と Paola 氏は共に超伝導接合系物理の発展に貢献してきた権威であり、特にスピン三重項超伝導体を用いた接合系に精通している。更に近年ではトポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体に関しても精力的に研究している。今回の滞在で着目した物質はカイラル d 波超伝導体である。カイラル d 波超伝導とは、角運動量を有するクーパ対によって引き起こされる超伝導であり、SrPrAs などの物質で実現が期待されている。一方で、カイラル d 波超伝導体はトポロジカルに非自明な超伝導体であり、その端には 2 つのカイラルエッジ状態が現れる。それらエッジ状態に起因して、カイラル超伝導体の試料端には自発的にエッジ電流（カイラルエッジ電流）が誘起される事が知られている。自発エッジ電流の観測は、カイラル d 波超伝導の実験的検証に於いて、避けては通れぬ道である。その為には、カイラルエッジ電流に関する理解を深める必要がある。

我々のグループではこれまでに、カイラル d 波超伝導の自発エッジ電流は表面乱れに対して強い事、その一方で、表面が鏡面的な場合と乱れている場合では、自発エッジ電流は逆方向へ流れる事を明らかにしている。トポロジカル超伝導の観点からは、表面ラフネスによるポテンシャルの乱れでは、カイラル d 波超伝導の対称性クラスは変化しない事が知られており、これ

までカイラル電流が表面の乱れによって反転する理由は十分に説明出来ていなかった。

そこで今回、指導教員である浅野泰寛先生を通して、トポロジカル超伝導の専門家である Cuoco 氏らの下での長期滞在を希望した。Cuoco 氏らとの度重なる議論を踏まえて、我々は、表面状態のエネルギースペクトルが表面の乱れに対してどのように振る舞うのかに着目した。我々は、カイラル d 波超伝導体表面近傍の角度分解状態密度を解析し、試料表面の乱れが表面状態の分散関係に与える影響について調べた。その結果、表面の乱れの効果は「不純物自己エネルギー」と「ペアポテンシャルの抑制」として反映される事、特にペアポテンシャルの空間変化は、カイラル超伝導体の分散関係を大きく変えてしまう事を明らかにした。加えて、我々はフェルミ面の異方性の効果についても調べ、カイラル電流の積分量が化学ポテンシャルによって変化する事を明らかにした。Cuoco 氏と Gentile 氏、そして我々の知見を総合する事で、カイラル d 波超伝導体のエッジ電流は、試料表面の乱れやフェルミ面の形状に依存して、電流の向きや量が変化する事を明らかにした。得られた成果は論文にまとめ、発表する予定である。

最後に、このような機会を与えて下さった新学術領域若手研究者交換プロジェクトの皆様に感謝致します。本プログラムを通して、若手研究者として、更には人間としても大きく成長できたと考えています。また滞在中、Mario Cuoco 氏や Paola Gentile 氏、博士研究員 Zujian Ying 氏と Andrea Di Ciolo 氏には様々な面でお世話になりました。特に Cuoco 氏には、研究の進め方から、イタリアの文化・歴史、お気に入りのピッツェリアまで多くの事を教えて頂きました。心から感謝致します。また領域事務局の石川様には、若手研究者交換プログラムに関する事務手続きを取り持つて頂き深く感謝致します。

JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

JREP 報告

吉田 恒也

京都大学大学院 理学研究科 特定研究員

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 川上則雄 教授 (D01)

受入教員：カリフォルニア大学 カブリ理論物理学研究所 Leon Balents 教授

受入期間：2016 年 10 月 10 日 (月)～11 月 11 日 (金)

私はこれまでトポロジカル絶縁体における強相関効果が誘起する異常な物性について研究を行ってきた。トポロジカル絶縁体は自由電子系でその発現が報告され、試料端におけるギャップレスの電子励起の存在も観測されてきた。その一方で、ここ数年で SmB_6 等の強相関系でもトポロジカル相が発現し得る事が明らかとなり、強相関トポロジカル系では電子相関効果がトポロジカル絶縁体で見られてきた新奇な物性をさらに多様化することが期待される。その例の一つとしてトポロジカルモット絶縁体が挙げられる。ここでは、ギャップレスの表面状態は電子励起には現れず、集団励起に発現する。この新しい状態は単純な平均場法に基づき提案されたが、それを超えた枠組みでは否定されており、その発現には議論の余地があった。私はこれまでの研究で一次元・二次元系におけるトポロジカルモット絶縁体の確立を高精度な数値計算手法を用いて取り組んできた。この研究で残された課題の一つとして、三次元系での確立が挙げられる。

このテーマをさらに加速させるため、若手研究者交換プログラムを利用して 2016 年 10 月 10 日から 11 月 11 日まで Leon Balents 教授の研究室に滞在し、研究・議論を行った。Balents 教授はトポロジカルモット絶縁体を提案した人物の一人である。滞在中には私が現在、試みている計算について議論をし、また強相関トポロジカル系における有限温度領域で予想される事についてアドバイスを頂いた。さらに Balents グループでの研究の発展として、近藤格子系で発現するトポロジカル秩序相の研究について情報収集ができ、滞在中有意義な時間を過ごせた。また、滞在期間中にはワークショップも開催されており、ワークショップの参加者とも議論ができ、相互作用のあるフェルミ粒子系でのみ存在するトポロジカル相が存在する事、三次元系における新しいトポロジカル秩序相の発現に関しても情報収集できた。

今後は上述の情報やアイデアを研究に生かし Balents 教授やグループのメンバーの方々との共同研究に発展させたいと考えている。

滞在先の Kavli Institute for Theoretical Physics(左) と受入研究者の Leon Balents 教授 (右)



JREP 報告

安井 勇氣

京都大学 理学研究科 博士課程 1 年

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 前野悦輝 教授 (A01)

受入教員：ケンブリッジ大学 Jason Robinson 先生

受入期間：2016 年 10 月 15 日 (土) ~ 2017 年 1 月 10 日 (火)

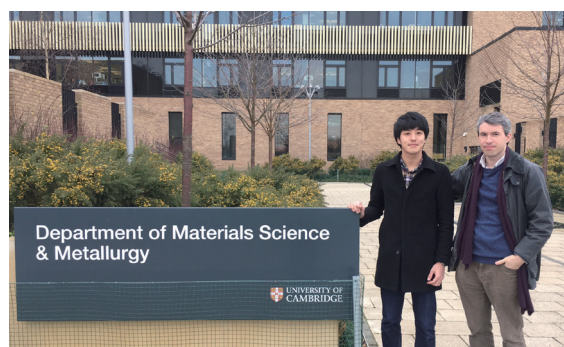
ケンブリッジ大学の Jason Robinson 先生のもとでトポロジカル超伝導体 Sr_2RuO_4 の超伝導薄膜作製を目指して 3 ヶ月間の滞在をしました。本滞在では 11 月 3 日まで京都大学学内経費で滞在し、11 月 4 日以降は JREP 制度での滞在をしました。私はこれまで Sr_2RuO_4 を用いて半整数量子フラクソイドと呼ばれる、超伝導体内での特異なフラクソイド状態について実験を行ってきました。この実験では磁束量子数本程度の小さな磁束を取り扱うため、微小な試料作製が必要です。このような微細加工には薄膜リソグラフィ法が一般に用いられていますが、 Sr_2RuO_4 では安定して超伝導薄膜を作製することができません [1]。そのため、リソグラフィ法が使えず、微細加工に用いる方法が制限されています。またほかにも多層膜を用いた近接効果の研究など、超伝導薄膜を必要とする“夢物語”は多くあります。そこで、昨年 Sr_2RuO_4 薄膜の部分的超伝導が報告された [2] ケンブリッジ大学で、このプロジェクトをさらに推し進め、超伝導薄膜を用いた様々な研究へ応用しようという目的で今回の滞在に至りました。

この滞在は私にとって何もかもが新鮮でした。私は普段バルクの超伝導体を用いた研究をしているため、薄膜育成自体が初めてであり、それ自体が新鮮でした。また、作製した試料の特性評価についても、バルク試料のものと基本原理は同じであるものの、普段使わない技術、道具、考え方を用いており、目新しくありました。電気抵抗の測り方ひとつをとっても、真上から電極を刺す!? 方法をとっており、驚きの連続です。実験以外にも、大学のカレッジで開催された formal dinner やホームパーティー、クリスマスパーティーに招待していただくなど、日本では味わうことのできない経験をさせていただきました。

最後になりますが、このような有意義な滞在の機会を与えていただいた本プログラムに感謝いたします。また、受け入れてくださった Jason W. A. Robinson 先生、実験面、生活面ともに面倒を見てくださった A. Di Benardo 氏、C. M. Palomares Garcia 氏に感謝いたします。

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

[2] J. Cao et al., Supercond. Sci. Technol. **29**, 095005 (2016).



Material Science & Metallurgy 学部前での写真。右が Jason Robinson 先生、左が筆者。



Newnham College の formal dinner での写真。

走査トンネル顕微鏡からみる重い電子系超伝導体の人工薄膜

YOO/A01 土師 将裕

京都大学 大学院理学研究科

受入研究者：A01 松田祐司

走査トンネル顕微鏡 (STM) は、表面の電子状態を原子スケールで観察できる手法であり、かつては表面分析手法の一つでしたが、近年急速な発展を遂げており、磁性体や超伝導体、トポロジカル絶縁体などへの応用も盛んに行われています。

大学院博士課程では、走査トンネル顕微鏡を用いて、磁性薄膜と基板の界面で形成されるカイラル磁性体（らせん磁気構造やスカーミオン構造）の微視的研究を行ってきました。

2016 年 10 月からは、京都大学の松田祐司教授のグループで開発している分子線エピタキシー法 (MBE) と STM を組み合わせた装置を用いて、MBE によって作られた重い電子系超伝導体である CeCoIn_5 薄膜の STM 観察に携わっております。薄膜化された重い電子系超伝導体では、低次元で実現される新しい超伝導状態が実現していることから注目を集めており、さらに、そのトポロジカルな性質から Majorana 束縛準位の形成など、様々な興味深い現象が予測されています。

MBE に関してはまだまだ学ばべき点が多いですが、大学院で培った STM の技術を生かし、研究を進めています。また、Topo-Q PD として、国際研究協力の強化に貢献したいと考えております。



受入研究者からひとこと：

物性研の長谷川研の助教の吉田さんと一緒に見学に来られたときに会い、その後ぜひ研究員で来て欲しいと、こちらからお願いしました。土師さんが来て STM の画像が格段にきれいになり、専門家の技術に驚きました。強相関電子系におけるトポロジカル励起の STM による直接観測を目標にしていますが、何でもいから面白いことを見つけてもらえたらと思っています。



はぜ・まさひろ

1988 年大阪府出身。2010 年大阪大学卒、2012 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了、2012 年大研医器株式会社入社、2016 年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了、工学博士。2016 年 10 月より京都大学理学研究科特定研究員。2017 年の目標は、昨年始めたサーフィンの上達。

PD 紹介

Study of Topological Phases in Ruthenates

B01 矢野 力三

国立研究開発法人産業技術総合研究所

受入研究者：B01 柏谷 聡

学部時代は鉄系超伝導の研究室で新しい超伝導体をみつけられず、修士ではトポロジカル物質の探索をしているまわりを横目に、比較的軽元素で興味深い物性の発現を目指して物質探索をしていました。今回、本学術領域を通じて超伝導体とトポロジカル物質の接合という、これまで関わるることのできなかった両者に携われることに喜びを感じております。

博士課程ではCrの層状ダイカルコゲナイドとその派生物質に着目し、新しい研究の舞台を与えるような多様な物性を発揮する物質系の確立を目指して単結晶育成と電氣的、磁氣的性質について物性を調べてきました。Crは価数に応じて $\text{Cr}^{3+}:3d^3$ または $\text{Cr}^{4+}:3d^2$ という電子状態が期待でき、金属から絶縁体的特性、また、3d 電子由来の強相関電子機能や磁性、スピン機能、さらには三角格子上に配置された3d 電子の軌道を利用した新しい電子機能の創出などが見込まれる興味深い物質系ですが、これまであまり注目されてきませんでした。CDWや低次元物性など数多くの興味深い話題を提供してきた層状ダイカルコゲナイドですが、じつは CrX_2 ($X=\text{S, Se, Te}$) は合成例も少なく、特に CrS_2 に至っては合成に成功した例はありませんでした。

そこで私はこれまでに ACrX_2 ($A=\text{Cu, Ag; X}=\text{S, Se}$), $\text{Ag}_x\text{Cr}_{2+y}\text{X}_4$, CrPX_4 , や CrX_2 などの単結晶育成法を確立させ、その物性を明らかにしてきました。これらの物質は超伝導こそ出なかったものの、まさにフェルミ液体的金属から強相関的絶縁体まで、マルチフェロイクスや特殊な磁性、可動イオン、電子軌道状態までもが顔を出すような実に豊かな物性を示すことがわかりました。

以上のように私はこれまで単結晶育成を自分の強みとしてきましたが、本領域ではマヨラナ粒子の検出を目指してトポロジカル物質と超伝導体との接合を調べていきます。これまでの自分の研究とは趣は変わりますが、自分の所属していた研究室で行っていた新奇超伝導体とトポロジカル物質開拓の知見を活かし、自分自身でも必要な結晶を育成して、現在所属のグループのもつ微細加工技術と測定技術を合わせることで、本学術領域に貢献できるよう努力していきたいと思います。



受入研究者からひとこと：

我々のグループにはいまだ新材料に強い方が不在で、それが研究のネックの一つになっていました。矢野さんはまさしくその弱点を補っていただける方で、一緒に研究を進めることで、これまでとは異なる新しい研究展開が可能になると期待しています。矢野さんからにじみ出る体育会系の雰囲気も新鮮で、日々楽しませていただいております。



やの・りきぞう

2011年慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科卒業、2013年東京工業大学大学院 総合理工学研究科 物質科学創造専攻 前期博士課程修了、2016年同大学院 後期博士課程修了 博士(理学)、2015年4月より日本学術振興会特別研究員(DC2)採用され、2016年9月に辞退。同年10月より現職の産業技術総合研究所 特別研究員。学部時代には体育会卓球部に所属し週6でラケットを握り、卒業後は石英管に持ち替えて結晶育成が趣味になりました。

PD INTRODUCTION

PD 紹介

Study of Neutral Modes in Fractional Quantum Hall Effect

CO1 林 朝鏡 (Chaojing Lin)

東京工業大学 理学院物理系

受入研究者：CO1 藤澤 利正

The fractional quantum hall (FQH) effect shown plateaus at fractional quantum conductivity can be realized by applying a high magnetic field to a high mobility two-dimensional electron gas in GaAs/AlGaAs heterostructures, which has been well known as a topological state induced by the strong electron-electron interactions for almost 30 years, but it still continuously contributes new concepts and phenomena to nowadays condensed matter physics since to this state the understandings are still insufficient.

A new kind of low-energy collective excitation with only carrying energy but no net charges, named as neutral mode was recently revealed in FQH edge states by shot-noise measurements [1]. As the general transport method failed in detecting this mode, little knowledge has been known to its basic properties like the dispersion relation and dynamic responses. What I will focus is to reveal these properties for neutral modes by extending the electrical pump-probe scheme, a high frequency technique which has been successfully developed in researches on integer quantum hall edge state [2] in Fujisawa Lab in Tokyo Institute of Technology, to the FQH regime, as well as in combination with some spectroscopic techniques into the experiments. Since the neutral mode is a result of edge reconstructions due to the interactions and disorders, therefore these experiments should shed a new light on understanding the FQH edge structures, furthermore the knowledge we gained, which itself would also contribute to our understandings to the FQH effect.

The research on FQH effect is an extension to my previous work on topological systems during my Ph.D studies. I am grateful to the chance provided by Prof. T. Fujisawa (Tokyo Institute of Technology) to me to participate in the Topological Material Science project, where I have already enjoyed the researches!

[1] A. Bid et al., Nature **466**, 585 (2010).

[2] H. Kamata et al., Nature Nanotech. **9**, 177 (2014).



受入研究者からひとこと：

最近、GaAs 系量子ホールの研究から、新進のトポロジカル材料の研究への移行が感じられる昨今である。しかし、新進トポロジカル材料の研究を経験した Chaojing Lin 氏によると、GaAs 系量子ホール効果の実験の美しさに大きな魅力があるという。「やはりそうか。じゃあ一緒にやろう」ということで、研究室に来てくれました。一緒に頑張りましょう。



ちゃおじーん・りん

I got my Ph.D from Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences in 2016. During my Ph.D, I have been working on transport studies of various topological states, like the topological insulators and Weyl semimetals. Currently, I am a postdoctoral researcher (TMS project) in Fujisawa Lab, Department of Physics, School of Science, Tokyo Institute of Technology, Japan. In my spare time, I very much like to play badminton.

2016 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 2 回 領域研究会

2016 年 12 月 16 日ー 18 日（東北大学 片平キャンパス さくらホール）



小雪舞う師走の候、仙台の中心部に位置する東北大学片平キャンパスにて、本新学術領域の第2回領域研究会が3日間に亘って開催された。参加者は前回を上回る175名に達し、本領域の注目度の高さが伺えた。会議は本領域アドバイザーの三宅氏による挨拶により幕が開けられ、川上領域代表による今年度の成果報告、今後の予定に関する連絡があった。今回は44件の口頭発表、68件のポスター発表が行われ、多くの成果に関して活発な議論が交わされた。

会議初日午前には安藤氏によるトポロジカル絶縁体・超伝導体の最新の実験結果、佐藤氏によるトポロジカルディラック金属で実現する新しい超伝導相に関する講演があった。午後前半のセッションではワイル半金属に関する理論および実験の発展が、後半のセッションではトポロジカル原子層に関する新しい成果が報告された。領域外部からは岩佐氏（東大）と山本氏（東大）に招待講演をしていただき、原子層物質科学とトポロジカル物質科学の融合分野に新しい視点を提供していただいた。

二日目午前にはエキゾチックトポロジカル現象として電流誘起反磁性効果やカイラル超流動体の角運動量の検出、新奇スピン液体の理論的解析、および反転対称性の破れた系におけるトポロジカル超伝導体に関する講演が行われた。午後は冷却原子系、カイラル磁性体、超流動ヘリウム3、中性子星、ワイル超伝導体におけるトポロジカル現象の新展開が議論された。招待講演の佐々木氏（京大）には磁気共鳴分光映像法を用いたヘリウム3のドメイン構造の最新結果を提供していただいた。

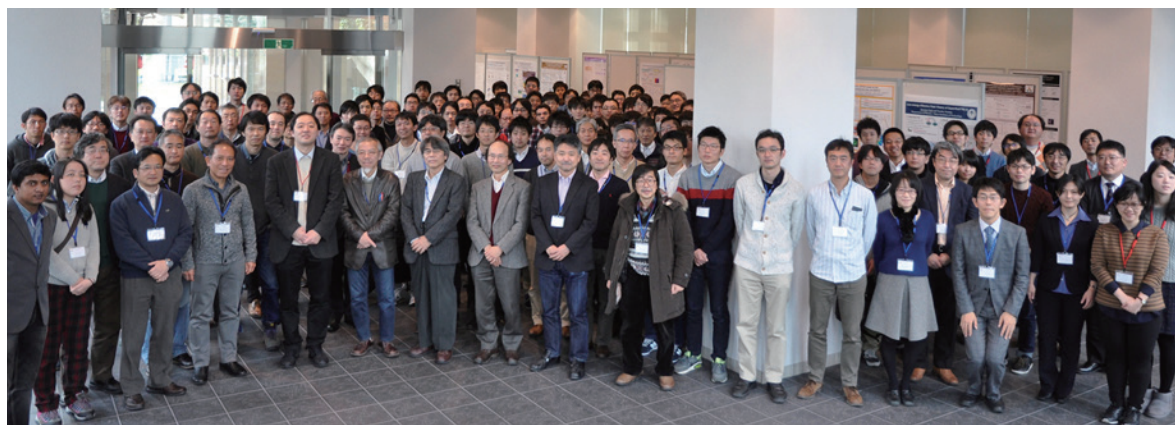
最終日午前中はトポロジカル絶縁体の実験の目覚ましい発展が紹介された。午後は本新学術領域研究の重点課題である強相関トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子、量子スピン液体における新奇励起構造、および量子熱伝導の理論が議論された。

ポスターは会議初日から最終日まで、会場ロビーに掲示されていたため、コーヒープレイクやランチプレイクなどポスターセッションの時間外にも議論が行われた。ポスターセッションに先立ち、本領域研究会ではおなじみとなったポスタープレビューが行われた。各発表者は1分間でその本質をわかりやすく伝え、その後のポスターセッションの活発な議論を盛り上げた。優れたポスターおよびポスタープレビューに対してそれぞれ賞が贈られた。ポスタープレビュー賞は東川氏（東大）、小林氏（京大）、池谷氏（北大）、安田氏（東大）、高三氏（京大）に、ポスター賞は中澤氏（東大）、高三氏（京大）、東川氏（東大）、中川氏（京大）、濱本氏（東大）、金山氏（東北大）に授与された。

口頭発表・ポスター発表を通して、学生を含む若手研究者が生き生きと議論する姿が印象的であった。これも本新学術領域の特徴であり、今後ますますの活躍を期待する。

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

（文責：野村 健太郎）



第2回 領域研究会・口頭発表プログラム



2016年12月16日(金)

10:30 ~ 12:00		座長: 上田 正仁	14:20	17PM-2	トポロジカルポンピング現象の冷却原子を用いた新展開	高橋 義朗 (15 分)
10:30		Opening	14:35	17PM-3	カイラル磁性体 / 強磁性体接合におけるスクリミオン構造	川口 由紀 (15 分)
10:40		領域成果				
11:10 ~ 12:00		トポロジカル絶縁体の新展開				
11:10	16AM-1	トポロジカル絶縁体・超伝導体における新奇現象				
		安藤 陽一 (30 分)				
11:40	16AM-2	Topological superconductivity in Dirac semimetals				
		佐藤 昌利 (20 分)				
13:20 ~ 15:00		ワイル半金属				
		座長: 塚崎 敦				
13:20	16PM-1	ワイル半金属におけるカイラル異常と磁気テクスチャの荷電効果				
		野村 健太郎 (20 分)				
13:40	16PM-2	高分解能 ARPES で見たトポロジカル半金属の電子構造				
		相馬 清吾 (20 分)				
14:00	16PM-3	Magnetic-field induced multiple topological phases in pyrochlore iridates with Mott criticality				
		藤岡 淳 (15 分)				
14:15	16PM-4	パイロクロア型イリジウム酸化物で直接観測するフェルミノード状態				
		近藤 猛 (15 分)				
14:30	16PM-5	ラインノードディラック半金属 CaAgX (X=P, As)				
		山影 相 (15 分)				
14:45	16PM-6	逆ペロブスカイト物質 Ba ₃ SnO の特異なバンド構造				
		苅宿 俊風 (15 分)				
15:25 ~ 17:10		トポロジカル原子層				
		座長: 村木 康二				
15:25	16PM-7	2次元系におけるトポロジカルおよび超伝導設計				
		青木 秀夫 (30 分)				
15:55	16PM-8	遷移金属カルコゲナイドの可能性				
		岩佐 義宏 (30 分)				
16:25	16PM-9	グラフェンにおけるトポロジカルバレー流				
		山本 倫久 (30 分)				
16:55	16PM-10	二次元カイラル磁性体におけるスクリミオンの量子状態				
		高嶋 梨菜 (15 分)				
17:10 ~ 19:00		ポスターセッション A(奇数番号)				
		座長: 瀬川 耕司・宇田川 将文				
17:10		Poster Preview A				
		(40 分)				
17:50		Poster Session A				
		(70 分)				

2016年12月17日(土)

9:00 ~ 10:05		エキゾチックトポロジカル現象				
		座長: 佐藤 昌利				
9:00	17AM-1	Strong diamagnetism under DC current in Ca ₃ RuO ₄ single crystals				
		Chanchal Sow (20 分)				
9:20	17AM-2	トポロジカル超流動体における微小角運動量の直接検証				
		白濱 圭也 (15 分)				
9:35	17AM-3	蜂の巣格子上の超対称性のあるキタエフ模型				
		桂 法称 (15 分)				
9:50	17AM-4	Sachdev-Ye-Kitaev 模型の長時間の振舞と実験的実現法の提案				
		手塚 真樹 (15 分)				
10:50 ~ 11:55		トポロジカル超伝導				
		座長: 柏谷 聡				
10:50	17AM-5	非従来型クーパー対によるトポロジカル超伝導				
		柳瀬 陽一 (20 分)				
11:10	17AM-6	バイクリスタル基板上に形成した Sr ₂ RuO ₄ 超伝導薄膜				
		打田 正輝 (15 分)				
11:25	17AM-7	近藤超格子におけるエキゾチック超伝導相				
		笠原 裕一 (15 分)				
11:40	17AM-8	人工超格子 CeCoIn ₅ /YbCoIn ₅ における Majorana フェルミオン				
		吉田 恒也 (15 分)				
14:00 ~ 14:50		冷却原子系				
		座長: 西田 祐介				
14:00	17PM-1	トポロジカルな影響と反作用				
		上田 正仁 (20 分)				
14:20	17PM-2	トポロジカルポンピング現象の冷却原子を用いた新展開				
		高橋 義朗 (15 分)				
14:35	17PM-3	カイラル磁性体 / 強磁性体接合におけるスクリミオン構造				
		川口 由紀 (15 分)				
15:10 ~ 16:20		トポロジカル物質科学の新展開				
		座長: 石川 修六				
15:10	17PM-4	超流動ヘリウム 3 のカイラルドメイン構造				
		佐々木 豊 (30 分)				
15:40	17PM-5	トポロジカルな中性子星				
		新田 宗土 (20 分)				
16:00	17PM-6	Chiral anomaly and torsional responses in Weyl metals and Weyl superconductors				
		藤本 聡 (20 分)				
16:20 ~ 18:10		ポスターセッション B(偶数番号)				
		座長: 好田 誠・新田 宗土				
16:20		Poster Preview B				
		(40 分)				
17:00		Poster Session B				
		(70 分)				
9:00 ~ 10:25		トポロジカル物質設計				
		座長: 藤澤 利正				
9:00	18AM-1	分子線エビタキシー法を用いた Bi ₂ Se ₃ 系混晶薄膜の作製と ARPES 評価				
		塚崎 敦 (20 分)				
9:20	18AM-2	高品質トポロジカル結晶絶縁体 Pb _{1-x} Sn _x Te 薄膜の作製とその評価				
		秋山 了太 (15 分)				
9:35	18AM-3	2次元トポロジカル絶縁体とスピンバレー結合				
		山内 邦彦 (15 分)				
9:50	18AM-4	トポロジカル絶縁体超格子の薄膜作製				
		瀬川 耕司 (20 分)				
10:10	18AM-5	トポロジカル絶縁体磁気超格子によるアクション絶縁体の開発				
		茂木 将孝 (15 分)				
10:50 ~ 12:10		トポロジカル絶縁体デバイス				
		座長: 野村 健太郎				
10:50	18AM-6	Engineering and transport characterization of inverted InAs/(In,Ga)Sb quantum well				
		村木 康二 (30 分)				
11:20	18AM-7	二次元トポロジカル物質におけるスピン - 電流変換				
		塩見 雄毅 (15 分)				
11:35	18AM-8	非磁性 GeTe/Sb ₂ Te ₃ カルコゲン超格子の磁気・電気現象				
		富永 淳二 (15 分)				
11:50	18AM-9	カイラル量子ホールエッジチャンネルにおけるスピン電荷分離現象				
		橋坂 昌幸 (20 分)				
13:30 ~ 14:50		エキゾチック準粒子				
		座長: 藤本 聡				
13:30	18PM-1	多層分数量子ホール系における一般化されたパラフェルミオン				
		田仲 由喜夫 (30 分)				
14:00	18PM-2	スピン分離した量子ホールバルク状態と超伝導体の接合におけるアンドレーエフ反射の観測				
		松尾 貞茂 (15 分)				
14:15	18PM-3	PT 対称な非ユニタリー時間発展におけるフロッケ・トポロジカル相				
		小布施 秀明 (15 分)				
14:30	18PM-4	分数励起の再結合による新奇トポロジカル相形成				
		宇田川 将文 (20 分)				
15:15 ~ 16:40		強相関トポロジカル系				
		座長: 前野 悦輝				
15:15	18PM-5	Jeff = 1/2 isospin の量子液体状態				
		高木 英典 (30 分)				
15:45	18PM-6	キタエフ模型における磁場下での熱ホール効果				
		那須 譲治 (15 分)				
16:00	18PM-7	量子スピン液体におけるフォトンとモノポールの検出				
		松田 祐司 (20 分)				
16:20	18PM-8	強相関トポロジカル絶縁体				
		川上 則雄 (20 分)				
16:40		Closing				
		(5 分)				



第2回 領域研究会・ポスター講演



- | | | | | | |
|-----|--|---------------|-----|--|--------|
| P1 | 非共型対称性な超伝導体におけるノードのトポロジカル安定性 | 小林 伸吾 | P34 | PT 対称な非ユニタリー量子ウォークにおけるトポロジカル相および不規則性の効果 | 望月 健 |
| P2 | Spin-triplet superconductivity induced in a ferromagnet in $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{SrRuO}_3$ -based junctions | 前野 悦輝 | P35 | Cd_3As_2 薄膜における電界効果と化学置換を用いたキャリア制御 | 西早 辰一 |
| P3 | 接触型相互作用する 1 次元ボース気体およびフェルミ気体の相関関数 | 関野 裕太 | P36 | 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体におけるドメイン成長 | 羽根田 和紀 |
| P4 | 3 次元カイラル超伝導体におけるアンドレーエフ束縛状態と磁場下伝導度 | 田村 駿 | P37 | トポロジカル線ノード半金属 HfSiS の高分解能 ARPES | 高根 大地 |
| P5 | 磁性トポロジカル絶縁体における巨大な非相反磁気抵抗 | 安田 憲司 | P38 | ワイル半金属における電圧誘起磁化ダイナミクス | 紅林 大地 |
| P6 | Electronic states of new bulk-insulating topological insulator $\text{TlBi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}_2$ | Trang Chi | P39 | スピノル Bose-Einstein 凝縮体の流体力学描像の第 2 量子化形式 | 湯川 英美 |
| P7 | トポロジカル励起の共存系におけるトポロジカルチャージの非保存 | 東川 翔 | P40 | ワイル半金属における様々な磁壁配置下での局在電荷 | 吉田 光秀 |
| P8 | 二成分ボース気体の量子ホール相図 | 古川 俊輔 | P41 | ワイル半金属における光誘起カイラル磁気効果 | 田口 勝久 |
| P9 | ドーピングした Kane-Mele 模型における異方的超伝導ペアのメカニズム | 深谷 優梨 | P42 | ディラック・ワイル磁気接合系における異方的磁気伝導 | 大湊 友也 |
| P10 | 非可換量子渦のトポロジーによって保護されたヘリシティカスケード | 小林 未知数 | P43 | スピンレスノーダルライン半金属とワイル半金属の普遍的相図 | 奥川 亮 |
| P11 | Bi 超薄膜 / 高温超伝導体 Bi_2Tl_2 ヘテロ接合の高分解能 ARPES | 嶋村 奈津美 | P44 | 遷移金属トリカルコゲナイドにおけるディラック分散と電子相関効果 | 杉田 悠介 |
| P12 | 超流動ヘリウム 3-B 相の低エネルギー有効理論 | 藤井 啓資 | P45 | 超伝導接合における異常なマイスナー効果 | 横山 毅人 |
| P13 | ダイヤモンド NV センター中スピンアンサンブルを用いた磁場分布空間マッピング | 野村 晋太郎 | P46 | トポロジカル Dirac 半金属におけるスピン軌道結合帯磁率 | 巽 洲太 |
| P14 | 原子層 FeSe 薄膜におけるディラック半金属相 | 金山 将大 | P47 | 常磁性によって誘起された異方的トポロジカル超伝導 | 大同 暁人 |
| P15 | 遷移金属ダイカルコゲナイド 1T-TaS_2 上の Bi 薄膜の電子構造 | 山田 敬子 | P48 | 銅酸化物高温超伝導体におけるトンネル効果とスピン軌道相互作用 | 田沼 慶忠 |
| P16 | NbSe_2 原子層薄膜における新奇なモット絶縁相の観測 | 中田 優樹 | P49 | Magnetic properties of $(\text{Sn},\text{Mn})\text{Te}$ thin films grown by molecular beam epitaxy | 石川 諒 |
| P17 | トポロジカル絶縁体候補物質 CaAgAs 薄膜の磁場中輸送特性 | 浦田 隆広 | P50 | トポロジカル絶縁体薄膜の磁場下における電子状態 | 野村 拓人 |
| P18 | Laughlin's magnetic-flux-threading argument for the quantized thermal Hall effect | 仲井 良太 | P51 | バンド反転した $\text{InAs}/(\text{In},\text{Ga})\text{Sb}$ 量子井戸におけるスピン軌道分離のアンドレーエフ反射分光 | 入江 宏 |
| P19 | ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子ホール効果の観測 | 中澤 佑介 | P52 | トポロジカル超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の NMR | 保野 和明 |
| P20 | スキルミオンテクスチャをもつ超流動 $^3\text{He-A}$ におけるカイラル異常 | 石原 祐亮 | P53 | 反強磁性体における異常ホール効果のクラスター多極子理論 | 鈴木 通人 |
| P21 | トポロジカル超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるネマティック・カイラル相転移 | 植松 宏紀 | P54 | マグノンスピンの運動量依存性に関する研究 | 大熊 信之 |
| P22 | サウレスポンピングを用いたワイル半金属における異常ホール効果の研究 | 三澤 貴宏 | P55 | トポロジカル絶縁体 / 強磁性体接合におけるスピンゼーベック効果の理論 | 大熊 信之 |
| P23 | $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の比熱測定によるネマティック超伝導の発見 | 米澤 進吾 | P56 | 量子ホール端状態におけるホットエレクトロンのエネルギー緩和 | 太田 智明 |
| P24 | 新超伝導体: アンチペロブスカイト酸化物 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ | 米澤 進吾 | P57 | ジョセフソン効果を用いた非従来型超伝導性の検出 | 柏谷 聡 |
| P25 | Quantization of conductance minimum and index theorem | 池谷 聡 | P58 | トポロジカル結晶絶縁体 $(\text{Pb},\text{Sn})\text{Te}$ 薄膜のキャリア密度制御および表面状態観察 | 山口 智也 |
| P26 | エッジ水素終端シリセン・ゲルマネン・スタネンナノリボンのエッジ状態と電気伝導特性 | 服部 綾実 | P59 | HoCoGa_5 型構造を持つウラン金属間化合物の伝導特性 | 芳賀 芳範 |
| P27 | Indistinguishability as non-locality constraint | Amorim Cassio | P60 | トポロジカル絶縁体・強磁性体・超伝導体接合における端状態 | 矢田 圭司 |
| P28 | 波数空間における創発電磁誘導 | 石塚 大晃 | P61 | ワイル半金属中の磁壁に局在した普遍電荷および電流 | 荒木 康史 |
| P29 | 一軸性カイラル磁性伝導体に対する数値シミュレーション | 奥村 駿 | P62 | 乱れた Weyl セミメタルにおける異方的磁気伝導の数値的研究 | 小林 浩二 |
| P30 | 超流動 ^3He におけるトポロジカル量子相転移の探索 | 野村 竜司 | P63 | ラシュバ系における非相反電気伝導現象 | 濱本 敬大 |
| P31 | 「超固体性」によるエアロジェル中での ^4He の結晶化 | 野村 竜司 | P64 | 銅酸化物薄膜におけるレーザー誘起トポロジカル超伝導 | 高三 和晃 |
| P32 | スピン依存磁場中の二次元フェルミ気体の研究 | 安斎 貴昭 | P65 | $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 上トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 薄膜への Li ドーピング効果 | 中西 亮介 |
| P33 | 強相関トポロジカルポンプの量子ホール状態による構成 | 中川 大也 | P66 | マイクロ SQUID による Sr_2RuO_4 -Ru 共晶中磁束量子渦状態の観測 | 永合 祐輔 |
| | | | P67 | マイクロ SQUID による Sr_2RuO_4 中の磁束量子渦状態の観測 | 永合 祐輔 |



●第10回物性科学領域横断研究会

2016年12月9日ー12月10日（神戸大学百年記念館）

毎年恒例となった物性科学に関する領域横断研究会（凝縮系科学の最前線）が2016年12月9日（金）～10日（土）の日程で、神戸大学 百年記念館で開催されました。今回で既に10回目となります。組織委員長は、J-Physics 領域代表の播磨尚朝氏（神戸大学）でした。

阪急六甲駅から坂道を登っていくと、神戸の街が一望できる神戸大学百年記念館にたどり着きます。参加者は160名程度で昨年の東大での170名より若干少ないものの、多くの若手の出席が目立ち研究会は活気に満ちていました。昨年度は3日間で余裕をもってプログラムが構成されていましたが、本年度から2日間になりました。このため1領域あたりの講演時間は1時間に短縮され、その内容は各領域に任されました。昨年度に加えて、新たに複合アニオン（陰山洋代表、京都大学）が加わり全部で7領域の参加となりました（上に示したのは、領域横断ホームページに掲載された7領域のロゴ）。7領域以外にもゲスト講演として5領域が参加しました。

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

- 川上則雄（京大：領域代表）「トポ物質科学」の紹介 10分
- 好田誠（東北大：C01計画）「半導体におけるスピン軌道相互作用の新展開」25分
- 野村竜司（東北大：A01公募）「トポロジカル超流動 ^3He の表面マヨラナ状態」25分

初日に凝縮系科学賞の授賞式も行われ、前田和彦氏（東工大准教授）が「新たな光触媒の開発」に関する受賞講演を行いました。

ポスター発表も非常に活気がありました。85件の発表は昨年の78件を上回りました。ポスター賞・プレビュー賞を昨年度設けましたが、今年度は時間の関係でプレビューがなくなったのでポスター賞のみとなりました。この賞は若手（特に大学院生）にとってたいへん励みになっているようなので、是非続けることができればと思います。

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

来年度の領域横断研究会は大谷義近氏（ナノスピントロニクス、物性研）が担当で、2017年11月17日～18日（仮）に柏（物性研か柏の葉キャンパス駅前）で行われる予定です。

（文責：川上 則雄）



● 第6回トポロジー連携研究会

「人工量子系におけるトポロジー」

2016年2月9日-10日(東京大学)

第6回集中連携研究会「人工量子系におけるトポロジー」が、2016年2月9、10日の二日間に渡り東京大学において行われた。領域代表、各計画研究の代表、研究分担者・連携研究者、および領域外の招待講演者数名を含む計52名の参加を得て、成功裏に終了した。

初日はワイル半金属の外場制御、中性子超伝導と冷却原子の類似性、界面での超伝導やスキルミオンの制御などについて最新の研究成果が紹介された。二日目は、トポロジカル超伝導の幾何構造制御、量子ホール素子によるフィボナッチ・エニオン生成、冷却原子系による量子ホール効果、p波相互作用・近藤効果の量子シミュレータ、スピン・アイスにおけるモノポールなどについての研究成果の紹介および今後の研究方向の提案などがなされた。異なった研究項目や領域外の講演者を交えて関連テーマごとにセッションを組むことで、問題を多角的に掘り下げることができ、研究項目や領域を超えた活発な議論が行われた。コーヒブレークや情報交換会でも、研究項目・領域を超えた交流や連携研究の提案がなされた。トポロジカル物質科学を人工的にデザインする観点から、今後の研究方向性と問題点を、分野を超えて共有することができ、有意義な研究会となった。

(文責：上田 正仁)

● 第7回トポロジー連携研究会

「物性物理と基礎物理におけるトポロジー」

2016年11月17日-18日(慶應義塾大学)

第7回トポロジー連携研究会は慶應義塾大学 日吉キャンパスにて2016年11月17日13:00から18日17:00までの2日間にわたって開催された。領域内外、また物性物理分野外からの参加者も含めた延べ100名の参加があり、成功裏に研究会を終えた。

研究会の初日にはREPにて招聘のSauls教授の講演に始まり、ヘリウムを代表とする低温物理系におけるトポロジー的考え方の重要性に関する講演が多く、理論・実験の双方からの最新の研究成果についての報告がなされた。2日目には素粒子・原子核分野からの参加者による講演を多数含み、トポロジーというキーワードを通じて物性物理という枠組みを超えた統一的な物理現象の理解への方向性が活発に議論された。研究会期間中は他分野からの参加者間の交流を促すべく休憩時間に余裕を持たせ、実際に物性実験の専門家と素粒子理論の専門家の間での議論も見受けられた。本研究会の趣旨である異分野交流の促進という観点では想定以上の成果が得られたと言える。今後の進展に向けた有意義な研究会となった。

(文責：新田 宗土)

第6回トポロジー連携研究会



WORKSHOPS AND MEETINGS



第7回トポロジー連携研究会

● 第8回トポロジー連携研究会

「奇周波数クーパー対の物理」

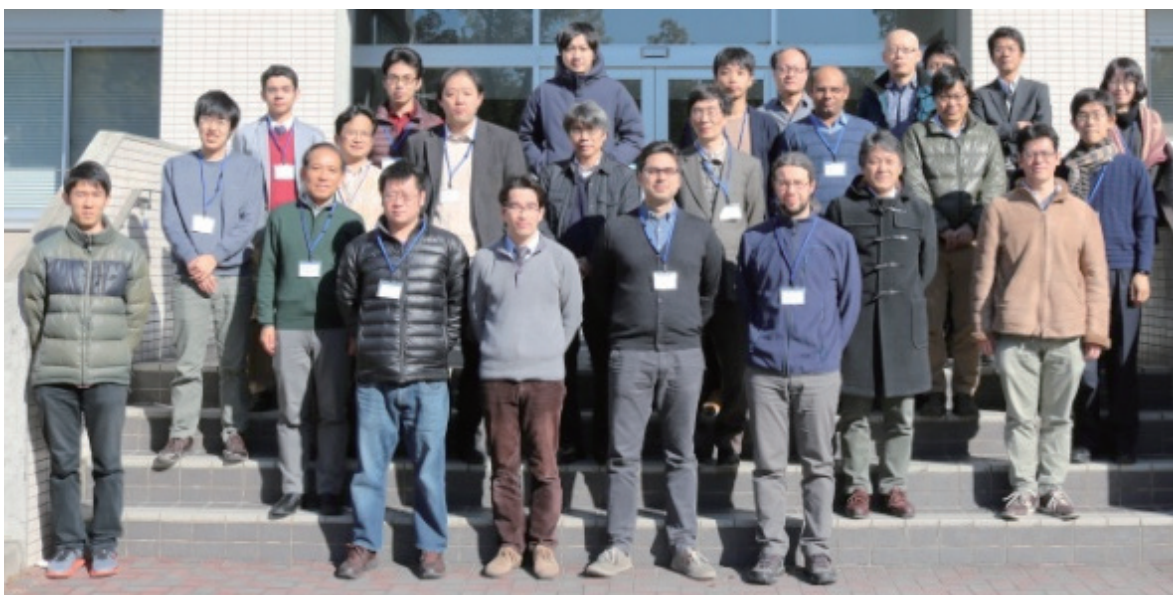
2017年1月6日 - 7日 (名古屋大学)

研究会初日では、超伝導接合において誘起される奇周波数クーパー対に関する議論が行われた。最初に田仲 (B 分担) が歴史的経緯を紹介した。水島 (D 分担) はミラー反転対称性の観点から奇周波数ペアについて整理を行った。浅野 (B 分担) 異常近接効果と指数定理の関係を明らかにした。東谷 (広島大) は、奇周波数ペアの作り出す不均一超伝導状態を発表した。横山 (D04 公募) は、常磁性マイスナー効果の理論を発表して、強磁性体接合で観測されていることを紹介した。Burset (Aalto 大) は2重量子ドットにおける奇周波数制御に関する理論提案を行った。実験の発表では、異常近接効果検出に向けた Sr_2RuO_4 接合の表面インピーダンスの測定 (柏谷 B 分担)、強磁性体・ Sr_2RuO_4 接合 (Anwar 京大 前野 (A 代表) のグループ) の発表が行われた。松尾 (C 公募) は量子ホール系と超伝導体接合におけるトンネル効果の実験結果を発表した。

2日の好田 (C 分担) の発表は、Rashba と Dresselhaus スピン軌道相互作用が共存する系のスピン物性の実験の紹介であった。柳瀬 (D02 公募) はペア密度波の理論を発表した。Fominov は Fominov (ランダウ研) バルクの奇周波数ギャップ関数の問題を指摘した。一様な系で、熱力学的に安定な奇周波数ギャップ関数を考えるとエルミート性を壊すために、ジョセフソン効果などに非物理的結果を与える。最後に星野 (理研) は、多チャンネル近藤格子における奇周波数超伝導と軌道秩序について発表した。新しい方向性の研究であり、今後の更なる発展が期待できる。2日にわたって活発な議論が行われ、今後の実験の方向性および理論研究の進むべき方向性について極めて有益な議論が行われた。不均一超伝導が新しい量子現象を生み出す無限の可能性を秘めていることを改めて感じた非常に意義のある研究会であった。

(文責：田仲 由喜夫)

第8回トポロジー連携研究会

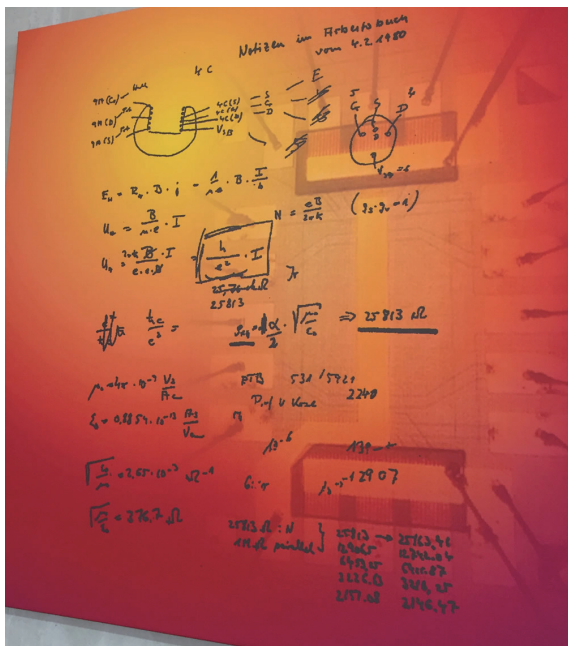


●第1回アライアンス研究会 “TOPO MAT Meeting” 参加報告

2016年9月19日ー21日（ドイツ）

ドイツに秋の訪れを知らせるオクトーバーフェスト開幕を目前とした2016年9月19日から3日間の日程で、シュツットガルト大学とそこに隣接するマックスプランク固体科学研究所（MPI）にてTOPO MAT Meetingが開催されました。今回筆者は若手セッションの世話人という立場で会議プログラム作成に参加したので、その準備や会議の雰囲気などを紹介します。

今回のワークショップ（WS）は、本新学術領域「トポロジカル物質科学」とMPIを中心とするドイツ側との間の国際研究協力のネットワーク構築とその強化を目的としています。3日間に及ぶ会議では本新学術領域とMPIのメンバーを中心とした26名の講演者に加えて、7名の若手研究者が口頭発表を行いました。本WSでは、トポロジカル絶縁体・超伝導体に関する最近の話題に加えて、Weyl/Dirac 半金属・超伝導、スピン液体やモット絶縁体など強相関系におけるトポロジカル相、さらには冷却原子気体におけるトポロジカルな話題など多岐にわたるトピックをそれぞれの分野の第一線の研究者が講演し、活発な議論が展開されました。プログラムはトポロジカル物質科学研究の最前線を概観するために十分な内容であり、議論のための時間もしっかりと設けられていました。



MPIの建物内にあるKlitzingの量子ホール効果発見時のノート



バンケットの様子

本WSの一つの特徴は、プログラムの一部を若手研究者へ発表の機会を与えるためのセッションとして設けたことです。WS主催者であるAndreas Rost氏（シュツットガルト大学・MPI）とSkypeを通して4月頃から若手企画について打ち合わせを繰り返しました。当初はWSとは独立に若手中心の企画を行う、あるいは会議のプログラムの中に若手セッションを組み込むと情報が錯綜しており、遠隔地と共催して会議計画を進めていく難しさを実感しました。打ち合わせを繰り返すうちに「プログラム内に若手参加者によるセッションをつくる」という方向性が定まり、企画を進めることになりました。最終的に7名の若手研究者に講演をお願いすることにして、多彩なトピックスを扱うセッションを構成することができました。ワイル半金属における量子輸送現象やNMRに基づくスピン液体の研究などに加えて、ランダム相互作用を持つフェルミ粒子で構成されるSachdev-Ye-Kitaev 模型や多バンド超伝導などのような他のセッションでは扱われていなかったトピックスを含むプログラムを構成しました。講演者は大学院生を含みましたが、皆さんしっかりと準備された素晴らしい講演で、セッションを通じて活発な議論が展開されました。

会議期間中はRost氏と高木英典氏やその研究室の方々によるきめ細やかな運営がなされ、何不自由のない快適な会議でした。毎夜のディナーには、所内でのBBQやローカルなレストランに連れて行っていただき、良いリフレッシュとなりました。また、会議最終日は街中にあるビール醸造所直営のレストランにてバンケットが行われ、オクトーバーフェスト直前の本場ビールとボリュームたっぷりのドイツ料理を存分に楽しみながら、研究交流を深めることができました。

（文責：水島 健）

●第2回アライアンス研究会 “EPiQS-TMS Trans-Pacific Conference on Topological Quantum Materials” 参加報告

2016年12月3日ー8日（タヒチ）

TMS と EPiQS (Emergent Phenomena in Quantum Systems, Moore Foundation) による合同ワークショップが12月3日から8日の6日間に渡って、フランス領ポリネシアのモーレア島にて開催された。モーレア島は観光地として有名なタヒチ島の西隣に位置し、美しいエメラルドグリーンの海に囲まれた熱帯性気候の島である。物理分野の研究会を開催する場所としてはなかなか連想しにくい土地であるが、折よく本島には滞在型の研究施設があるということで、今回この地でのワークショップの実現の運びとなった。我々が滞在した研究施設は Gump station と呼ばれ、カリフォルニア大学バークレー校 (UCB) が海洋生物学研究の拠点として保有している。施設は現地出身の少数のスタッフによって運営され、入れ替わり立ち替わり訪れる様々な分野の研究者達を大忙しで捌いているようである。

さて、日本とモーレア島の距離は当然ながら短くはない。成田を発った後、11時間半のフライトを経て、まずフランス領ポリネシアの中心地である、タヒチ島のパペーテに到着する。タヒチ島からモーレア島まではフェリーも出ているようだが、国内便に乗り継いで飛行機で向かうのが最も手取り早い。モーレアまでは50人乗り程度の小型機で15分。安定飛行高度まで上昇した瞬間に下降が始まる、あたかも弾道ミサイルのようなフライトが着弾する先がモーレア島のモーレア・テマエ空港である。

モーレア島は珊瑚礁の美しい海に囲まれ、豊かな動植物にあふれたのどかな島である。道路脇にはマン



海中を優雅に泳ぐサメ

ゴー、パパイヤ、ココナツ、バナナ、パンの実などの各種の果物が豊富に自生し、自然に熟れ落ちた果実が路上で甘い匂いを放っている。路傍の果物は自由に食べてよいそうで、木登りの技術さえ習得すれば、少なくともこの島で飢え死にする事はないだろう。エクスカージョンで泳ぐ事になる海中にはサメやエイが豊富に遊泳する。Organizer の J. Moore 教授によるとサメには safe shark と “mostly” (!) safe shark の2種類がいるようだが、幸いなことにサメ達は皆、我々を食物ではなく友人として認めてくれたようであった。また、島には野生なのだろうか、無数のニワトリが鋭い鳴き声をあげて闊歩し、宙に羽ばたいて (!) 飛び上がり、樹上から人間を見下ろすのである。ニワトリすら優雅に羽ばたく本島で、トポロジカル物性研究の大きな飛躍を予期したのは筆者だけではあるまい。

さて、このように熱帯の自然豊かな島で開催されたワークショップでは、量子ホール系、磁性、超伝導、接合系などの幅広いシステムを対象として、マヨラナ粒子の実現、カイラル量子異常、分数励起などを中心にトポロジカル現象に関する豊かな話題が提供された。S. C. Zhang 教授によるマヨラナ粒子に関する示唆深い講演を含む2度の breakout discussion とポスター発表を交え、日米双方から15人程度ずつが口頭発表する充実の内容である。

Moore 教授による opening talk



講演の順番は前後するが、Yazdani 氏の講演では、マヨラナ粒子の実現が議論された。従来型の超伝導体である鉛に、教科書的な強磁性体である鉄を一次元鎖を作るように蒸着させ、強磁性 + スピン軌道相互作用 + s 波超伝導の機構から p 波超伝導を誘起し、Kitaev wire model のセットアップを実現する。trivial な in-



ダイニングホールで、夕食前のひと時を議論に費やす日米のメンバー

gap 状態を注意深く取り除いた結果、見事に鎖の端に Majorana in-gap 状態が局在して見えた様子には非常に感銘を覚えた。

本会議のキーワードでもあったカイラル量子異常の観測については、様々な角度からの議論が提示された。カイラル量子異常により期待される最も顕著な現象はカイラル磁気効果である。当初の primitive な提案では、一様磁場による一様電流の誘起という驚くべき効果が予言されたわけであるが、当然ながら、平衡状態ではこのような応答は禁止される。従って、有限振動数 / 波数の応答を通じてカイラル磁気効果を引き出す事が腕の見せ所となるわけだが、Armitage 氏、Gedik 氏などによる光学応答による実験的アプローチ、特に非線形光学応答に注目する Orenstein 氏及び森本氏、非一様な実空間構造に注目する立場から藤本氏による講演が行われ、その多様な工夫はこの現象の深さと、関連する研究の活発さを伺わせるものであった。

また、トポロジカル秩序に伴う分数励起をどのように観測するか、という問題は個人的に最も興味をもっている点であるが、Balents 氏による、超選択則が果たす本質的な役割とその帰結として局所感受率が示すべき特異性の指摘には目から鱗が落ちる思いであった。磁性の局所量については最終日に Yacoby 氏による NV center を用いた magnon の局所化学ポテンシャルの観測法についての話題が提示されたが、同氏の次の目標としてはスピナイスの分数励起の観測がスコープに



入っているようであり、目が離せないことである。

このようなトポロジカル物性の中心的な話題に加えて、個人的に興味を覚えたのは、これまでトポロジとは離れた文脈で発展して来た様々な分野の現象に対するトポロジカルな再解釈がいくつか提案された事である。Checkelsky 氏の講演では CeSb という「悪魔の階段」的な多数の磁気秩序を示す系が紹介されたが、これは幾何学的フラストレーション系を研究の主戦場としている筆者には懐かしい系であった。近年、この物質の表面状態に Dirac cone が見つかり、非自明なトポロジカル相が実現している事が見出されたそうである。トポロジをキーワードとする、このような「異文化交流」が新学術領域を通じてますます促進されるとなれば、非常に楽しい事である。

さて、最後に会議でお世話になった、現地のスタッフの方々との異文化交流についても触れておこう。施設の管理は Hinano さんという名前の女性が統括している。日本でも「ひなの」さんという女性はいるし、ことによると、日本語とタヒチ語とは共通する部分もあるのかもしれない。実際、日本語の「こころ」と同じ発音をもつタヒチ語があり、スタッフの方々に、車での送迎など、面倒くさい事を頼む時でも、“from the bottom of my kokoro” と言ってお願いすると、ゲラゲラ笑いながらどんなことでも二つ返事で承諾してくれる。おそらく発音だけでなく、意味も似通った言葉なのであろうか、と思っていると、後で真の意味を知ることとなり、いささか愕然とする事になった。ともあれ、日本の心とタヒチの kokoro。意味する事は多少(?) 違えども、遠い異文化に属する者たちが、まさに「ココロ」という単語を通じて心を通わせられるというのは、何やら心温まる話である。トポロジもまた、異なる物理や価値観をつなぐ普遍的なキーワードとしてますます発展を遂げることを祈りつつ、小稿の結びとしたいと思う。

(文責：宇田川 将文)

●市民講演会：大学への物理学「トポロジーと超伝導」 ～ノーベル賞受賞者 ベドノルツ博士を迎えて～

2016年2月28日（京都大学 基礎物理学研究所・湯川記念館）

2016年2月28日（日）、本新学術領域が主催する標記の市民講演会が京都大学基礎物理学研究所・湯川記念館パナソニックホール開催されました（9:30受付～12:00）。京都大学理学研究科・基礎物理学研究所との共催です。また、京都府・京都市教育委員会と京都新聞の後援を頂きました。高校生及び同伴家族・教員を中心とし、大学生の参加も歓迎しました。WEBで事前申し込みをする方式をとり、参加者は最終的に73名で、そのうち高校生は15名、大学生が31名でした。

この講演会は、1987年ノーベル物理学賞受賞者のベドノルツ博士（スイス・IBM研究所）が来日される機会を利用して、科学の面白さを若い世代に伝えることを主目的として企画したものです。ベドノルツ博士は共同研究者のミュラー博士（スイス・IBM研究所）と共に1986年に酸化物高温超伝導を発見し、翌年にノーベル賞を受賞されました。

講演会の前半は、トポロジーと物質科学の研究、特に超伝導について演示実験を含めた解説を行いました。まず、前野悦輝教授が超伝導を含めた低温物理学の研究の歴史、超伝導の生成機構、さらにはトポロジーと超伝導の関わり合いについて紹介しました。その後、米澤進吾助教と前野研究室のPD・大学院生による超伝導のデモ実験が行われました。高校生や一般の方にとって、超伝導による磁気浮上はまるで魔法のような現象として映ったと思います。

後半は、ベドノルツ博士が高温超伝導を発見した経緯やノーベル賞受賞者としての活動などについて紹介され、高校生へメッセージを述べられました。特に、IBM研究所で超伝導の研究を始めた頃、どのような物質を選ぶべきか悩んだこと、図書館で古い文献を読みあさりそのときのひらめきがカギになったことなどを語られました。このひらめきがノーベル賞につながる「幸運」だったとのことでした。ただし、このような幸



運にめぐりあうためには、高いモチベーションを常に持つことが重要であることを強調されました。また、最初の論文を提出した直後「超伝導の専門家」から信用されなかったこと、さらにそれを克服したエピソードなどは、たいへん面白いものでした。「失敗することはよいことだ、次にそれを生かせばよい」というメッセージは、たいへん印象的でした。講演全体にベドノルツ博士の穏やかで謙虚な性格が現れ、参加者は皆リラックスして講演を楽しみました。

講演会終了後のアンケートには、超伝導という不思議な現象に感動したという内容のほかに、ノーベル賞に至るまでのベドノルツ博士の「幸運」、さらに同氏の研究に対する真摯な姿勢などがあり、多くの出席者が強い感銘を受けたように思います。

本講演会に出席した高校生の数は、ちょうど定期試験の時期と重なったため、必ずしも多くはありませんでしたが、モチベーションの高い学生ばかりでした。質問は日本語でもOKとアナウンスしましたが、質疑応答は（高校生も含め）すべて英語で行われました。また、講演会が終わっても、多くの高校生がスタッフに超伝導やトポロジーに関する質問を続け、冬にも関わらず熱気あふれる講演会となりました。ベドノルツ博士との個人的な写真撮影にも長い列ができ、同氏の謙虚で親しみやすい人柄を反映したものとなりました。

（文責：川上 則雄）



● “TOP-SPIN2 : Spin and Topological phenomena in nanostructures” 出席報告

2016 年 5 月 26 日ー 27 日 (オランダ)

私が出席したのは、2016 年 5 月 26-27 日の両日、オランダの Groningen 大学で行われたコンパクトな会議である。この会議を主催したのは、IFW Dresden, Groningen Univ. CNR-SPIN Salerno という EU 内部の連携組織で立ち上げた研究プロジェクト “Curved Nanomembranes for Topological Quantum Computation” である。この会議で始めてお会いしたプロジェクトリーダーの Ortix 氏はじめ、他のグループリーダーも 40 代、発表をするのも PD や PhD の学生が多く、全体として若くフレッシュな印象が際立つ会議であった。私は D3 の学生と共に、TMS からの派遣メンバーとして会議に一般参加した。トポロジカル絶縁体を用いたデバイスの提案、トポロジカル超伝導体の新しい候補物質やマヨラナの観測、スキルミオンを自在に運動させた実験、リンクング数で特徴づけされた磁気状態など、とてもエキサイティングな発表が続いた。必ずしも完成度が高くはないが、心から面白いと思って研究している事がとても伝わる発表が多かった。これが、若手主体の国際会議の良いところだと言えるだろう。

会議の主賓の一人が、ライデンのベネカーである彼は朝一番の講演でワイル半金属の物理を面白おかしくおさらいした後、実験の概要をまとめた。「進捗があまりに早く、毎日多数の実験論文が arXiv に出るので、目が離せない分野だ。中国から 10 人以上の連名論文が多く、名前が Wang、Zhang など、バリエーションに乏しいので、誰が何をやっているのか掴みきれないが、実験の 9 割は中国人がやっている。」と冗談めかして言いながら、チャイナパワーの凄さを認めていた。顔の見えない勢いに、戸惑いながらちょっと違和感を持って受け止めている、というのがヨーロッパの認識だろうか。確かにこの会議は、南欧の組織委員が仕切っているが、発表している学生や PD は非ヨーロッパ系の人が多く、インド、パキスタン、中国、などア

ジア系が大きな割合を占めており、ここで成功したいという意欲の高い彼らが、ヨーロッパの基礎科学を支えているのは紛れない事実である。彼らは、自分の顔(論文)を売り込もうと一所懸命で、彼らのようにアグレッシブになり切れない日本人の私を認識する羽目にもなった。

会議のあった Groningen はオランダの北部に位置する大学の街である。オランダゴシックと言うべきか、少々厳しい建物と石畳が景観を整えるチャーミングな小都市である。街の中心マルクトを囲むように、カフェやレストラン、個人商店が立ち並び、この風景はおそらく昔から変わってないし、これからも変わらないのだろう。こうした小都市が経済的にもある程度自立し、学生を取り込んだ地方文化を育み、また質素倹約を伝統とする生活の様式が相まって大学の国際的な競争力を支えている。ヨーロッパに来るとよく思う、不便で無駄の多い事が、人と人との関係性を適度に保ち、最終的には寛容な社会を形作る遠因なのだと。そして、科学は寛容な社会にしか根付かないものだと。

(文責: 浅野 泰寛)

会議で講演する筆者

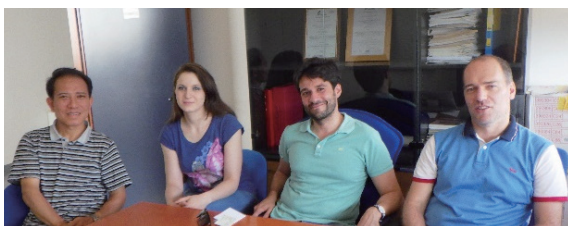


●イタリア SPIN のワークショップ “UFOX” に参加して

2016 年 7 月 7 日ー 8 日 (イタリア)

サレルノ大学 (University of Salerno) で 2016 年 7 月 7-8 日に開催された “UFOX Workshop” に参加しました。UFOX は “Unveiling complex phenomena in Functional OXides” の略で、我々 TMS と国際アライアンスを展開するイタリア国立研究カウンセル (CNR) の SPIN(SuPerconductors, oxides and other INnovative materials and devices) 研究機構主催の研究会でした [1]。サレルノ大学には SPIN 研究機構の 5 つの支所の一つがあり、REP で招聘した Mario Cuoco 博士、JREP で派遣された北海道大学の鈴木修さんのホスト (ホステス?) の Paola Gentile 博士らがおられます。サレルノ大学のキャンパスについては、この NL に掲載の鈴木さんの JREP 報告記事をご覧ください。

このワークショップに先立って、私はサレルノ大学の物理学専攻でのセミナー “Novel phenomena in the Mott insulator Ca_2RuO_4 under non-equilibrium conditions” を行い、TMS の Topo-Q プログラム (REP, JREP など) も紹介しました。また、トポロジカル現象をフィーチャーした TOP-SPIN という研究会シリーズの第 3 回目 (Dresden, 2017) の組織委員長の Carmine Ortix 博士 (IFW, Dresden) らと、その研究会を TMS との共催で行う相談もしました (写真)。TMS 側の代表委員は好田誠さん (C01, 東北大) に引き継ぎました。なお、第 2 回 TOP-SPIN 研究会 (2016) には TMS から浅野泰寛さん (A01, 北大) が派遣されています。



サレルノ大学にて、アライアンス研究会開催の相談。左から前野、Gentile 博士、Ortix 博士、Cuoco 博士。

さて、UFOX 研究会では、冒頭のサレルノ大学物理学専攻主任と CNR-SPIN 機構長からの挨拶に続いて、13 件の招待講演 (30 分間) と 20 件の一般講演 (20 分間) があり、ポスターは 5 件程度でした。参加者は約 60 名で、招待講演者は、

G. Khaliullin (Max Planck Institute, Stuttgart), “Soft-spins, excitonic magnetism, and the Higgs mode in ruthenates”,

H. Hilgenkamp (Univ. Twente), “Tunable transport in oxide thin films and heterostructures”,

F. Parmigiani (Univ. Trieste), “Non-equilibrium Mott-like electronic excitations in high-temperature cuprate superconductors”,

Y. Maeno (Kyoto Univ.), “Superconductivity in antiperovskite Dirac-metal oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ ”

の 4 名以外は、大部分がヨーロッパ各国およびイタリア国内で活躍中のイタリア人若手研究者でした。

会議は、強相関遷移金属酸化物に焦点を絞ったものでした。Giniyat Khaliullin さんは、最近重要な展開を遂げている Ir 酸化物の d^5 電子状態に対して、軌道縮退を伴う Ru 酸化物の d^4 の物理の面白さを反強磁励起状態の Higgs mode の存在などの例を挙げて紹介しました。Carla Fatuzzo さん (EPFL, Lausanne) は、共鳴非弾性 X 線散乱 (RIXS) の結果をもとに、一連のルテニウム酸化物とイリジウム酸化物における結晶場とスピン軌道相互作用の系統的变化を論じて、モット絶縁体 Ca_2RuO_4 とスピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の間に、一連のイリジウム酸化物が位置する図を示しました。

Hans Hilgenkamp さんは、 VO_2 薄膜表面に電解質で電場を印加して誘起するモット転移における金属・絶縁体領域の共存について講演しました。また、ヨーロッパで精力的に研究が進む $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面の電子状態に関する講演、Cu, Fe, Pd などの酸化物の高圧合成、薄膜育成などの講演が相当数ありました。

トポロジカル状態を前面に出した講演としては、P. Gentile さんの “Edge states and topological insulating phases generated in non-uniform Rashba spin-orbit nanostructures” など数件でしたが、今後の大いなる展開が予期できるという印象を持ちました。

[1] <http://ufox.physics.unisa.it/index.htm>

(文責: 前野 悦輝)



UFOX 参加者。昼食は会議室のすぐ横にあるこの庭で、イタリア地元料理がふるまわれた。

● Symposium on Quantum Materials Synthesis (QMS) 2016 in New York に参加して

2016 年 8 月 30 日ー 9 月 1 日 (アメリカ)

8 月 30 日から 9 月 1 日にかけて、ニューヨークの 7 ワールドトレードセンターで開かれた QMS2016 に、TMS からのサポートを受けて参加してきました。会場がワールドトレードセンターメモリアル真隣のビル 40 階にある会議室 (右写真右側のビル) でしたので、素晴らしい眺望の中、活発な議論がなされました。参加者数は 100 名程度で、アメリカの研究者が多数を占め、欧州と中国、日本から数名ずつという印象でした。今回は、アメリカの Gordon & Betty Moore 財団の EPIQS 主催で、Topo-Q international connection を強めることや共同研究の推進、さらには Grand Challenges and Opportunities という会議副題にも示されたとおり、新しい研究指針発掘を促す趣旨で会議進行がなされました。

すべて招待講演でかつ、discussion を遮らない運営であったため、議論が非常に白熱しました。かなり時間を押す運営でしたが、休憩と食事時間を削り、なんとか夜に終わるという感じで、皆 40 階に缶詰状態でした。元々、午前 8 時から夜 9 時頃までのタイトなスケジュールでしたが、それについて、Opening remark で Rutgers 大のオーガナイザー S.W. Cheong 教授は、「この会議場は安くないから、密な議論を期待する。」と冗談交じりに話し、場を和ませました。さらに、バンケット後にも Post-dinner talk という議論の場も設定されていたため、バンケットでもアルコールはなく、かなり詰まった会議でした。しかしながら、40 階からの NY の夜景は素晴らしかったです。



初日の Plenary talk では、UCSB の中村先生から GaN LED&Laser の講演がなされました。講演内容は、日本での商品化までの成功の話題とアメリカ異動後の白色照明に関する話題でした。どちらも素晴らしい成果で、今後も効率の良い窒化物系固体半導体発光素子が生み出されそうです。

各セッションは、1, Energy Materials, 2, Dissipationless conductors, 3, 2D Materials, 4, New Materials, 5, Topological Materials, 6, Probes, 7, Oxide engineering, に分けられ、物質科学に関連する合成と物性に関する構成でした。エネルギー関連では横浜桐蔭大の宮坂先生と Berkeley の Peidong Yang 先生から講演がありました。ペロブスカイト太陽電池の詳しいレビューを聞くことができました。Yang 先生はナノテク技術のアメリカ最先端にいる研究者と思いますが、水分解や人工光合成に対して、半導体ナノ構造とバクテリアを組み合わせるという奇抜な発想で、まさに game changing を感じさせるとても面白い講演でした。

他の講演を列挙しますと、超伝導分野で Bozovic 先生からの Cuprate 薄膜に関するレビューと将来展望、トポロジカル絶縁体関連で剥離法を用いたデバイスでの輸送現象やワイル半金属などの ARPES、酸化物積層構造で歪み印加による物性制御、強誘電体に生じる vortex のようなドメイン構造、固体化学で高圧合成による新物質合成の議論、などの最新の話題について議論されました。アメリカからの参加者のほとんどが



EPIQS から助成を受ける研究者であり、各分野の重要な話題をまとめて聞けた印象があります。EPIQS は若手研究者の支援も行っているため、MIT や Berkeley などの助教授がアクティブに自身の成果を発表するとともに、活発な議論を牽引している雰囲気もとても印象的でした。

Topo-Q international network の取り組みは、TMS と EPIQS や海外の研究プロジェクトとの国際ネットワークを広げる目的だと思います (上写真: 会議中の掲示にも、Building Communities, Advancing Science とありました)。今回の僕の参加は TMS からの派遣ということもあり、会議中、TMS で取り組んでいる Topo-Q network に関する Flyer を配布するとともに、Moore 財団の staff と今後の連携についても議論できましたので、少なからず貢献できたかと思います。この QMS 会議は今後も継続されることが決まり、2017

年にはドイツで開催される予定です。

個人的には、FeSe-EDLT での超伝導に関する講演を行いました。講演の冒頭では、TMS と Topo-Q network との関連について紹介し、今後とも発展的な関係で国際会議や共同研究を展開したい旨、伝えてきました。自身の講演内容では、FeSe/MgO でも FeSe/SrTiO₃ 同様の高い Tc を観測できる、という結果に強い関心を持ってもらうことができ、講演後の休憩時間やバンケットの際には、EDLT や界面超伝導、FeSe 高温超伝導化の起源などについて率直な意見交換ができました。また、Bozovic 先生とも FeSe だけでなく、界面超伝導全般についてじっくり議論でき、大変有意義な経験となりました。今回は、僕にとって久しぶりの NY で、プリンストン大に短期で実験に来た時以来 8 年ぶりでした。残念ながら上記の通り、40 階に缶詰でしたが、それでも、時差ぼけを活用して日の出の時間帯に自由の女神の見える岸まで散歩したり、親交のある研究者と情報交換したりもできました。この機会を頂き、ありがとうございました。厚く御礼申し上げます。

(EPIQS : Emergent Phenomena in Quantum Systems, Gordon & Betty Moore 財団の助成プログラム。

Website : <https://www.moore.org/initiative-strategy-detail?initiativeId=emergent-phenomena-in-quantum-systems>)

(文責: 塚崎 敦)



● “APS March Meeting” の会議報告と連携構築

2016年3月14日ー18日（アメリカ）

アメリカ物理学会 (American Physical Society) の APS March Meeting が 2016 年 3 月 14 日から 18 日まで米国ボルチモアのコンベンションセンターで開催され、新学術領域メンバーから上田 (D01 分担)、松田 (A01 分担)、水島 (D01 分担)、佐藤 (昌) (D01 分担)、藤澤 (C01 代表) が参加しました。各自の研究成果の発表、最新の研究成果の情報収集のほか、トポロジカル物質科学に関する連携を深めるための活動を行いました。

●会議概要●

APS March meeting では、50 を超える会場で 9000 件を超える発表が行われ、トポロジカル物質に関するセッション数も非常に多く、各国からの招待講演を含め、質の高い発表が多くなされていました。

松田 (A01 分担) は、重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 の超伝導揺らぎに関する発表を行い、時間反転対称性の破れたカイラル超伝導体の候補物質である URu_2Si_2 で、この系の常伝導状態において観測されたネルンスト効果が従来の超伝導揺らぎの理論よりも桁違いに大きいことを報告しました。その巨大ネルンスト効果は、最近藤本 (A01 分担) らにより提唱されたカイラル超伝導状態に関与したベリー位相の揺らぎによって定量的に説明できることを議論しました。シンポジウムでは、この系の超伝導状態では時間反転対称性が破れていることをスタンフォード大学のグループがカー効果の実験により明確に示していたことが印象的でありました。

佐藤 (昌) (D01 分担) は、Dirac semimetal の超伝導状態に関する成果を報告すると共に、glide 対称性に起因する新しい種類のトポロジカル相に関して、プリンストン大学 Bernevig さんの元学生で現在は Yale 大でポスドクをしている Alexandradinata さんと議論を行いました。また、Nordita の現所長である Hannson 氏とも、研究打ち合わせを行いました。

水島 (D01 分担) は、磁場中の超流動 $^3\text{He-B}$ において形成される様々なドメイン壁の分類についての研究成果を報告しました。超流動 $^3\text{He-B}$ の持つ非自明なトポロジカル構造を反映したドメイン壁について

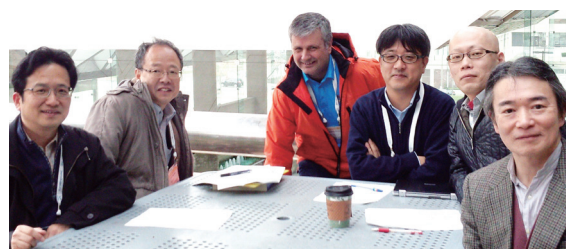
の成果を報告し、実験グループと実現可能性について議論をしました。また、Anton Vorontsov 氏ら理論家と ^3He における輸送現象の理論について情報交換を行いました。会議中には、トポロジカル超伝導候補物質 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ についての Liang Fu 氏による招待講演があり、その非従来型超伝導体としての特性や ^3He との類似性という点で強く印象に残りました。

藤澤 (C01 代表) は、量子ホールエッジチャンネルを用いた朝永ラッティンジャー流体について、長寿命の非平衡状態を生成することに成功した結果を報告しました。また、本新学術領域での活動について、Moore 財団 EPiQS のメンバーでもある Pablo Jarillo-Herrero (MIT) と打ち合わせを行いました。Jarillo-Herrero の招待講演では、角度をつけて積層した 2 層グラフェンを用いた量子スピンホール効果に関する研究成果などが印象に残りました。

●アライアンスワークショップに関する打ち合わせ●

本新学術領域とマックスプランク研究所 (MPI) とのアライアンスワークショップ (2016 年 9 月開催) に関する打ち合わせを、新学術領域メンバーと MPI ドレスデンの Andy Mackenzie 氏 (ワークショップ主催者の一人) と行いました。ワークショップで扱うべきトピックや招待講演者の提案、若手セッションの運営方法に関して意見交換を行いました。その内容は後日開催された総括班会議やワークショップ主催者 (MPI 高木 (A01 分担)) に伝えられ、ワークショップ運営に反映されました。

(文責: 藤澤 利正)



アライアンスワークショップに関する打ち合わせの様子。
左から、藤澤、松田、Mackenzie、佐藤 (昌)、水島、上田。

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

2016/Mar/24(THU)

Topological Materials Science Seminar (7)
Alexander A. Golubov, Nagoya Univ.

2016/Apr/15(FRI)

Topological Materials Science Seminar (8)
Eun-Gook Moon, Kyoto Univ.

2016/Apr/22(FRI)

Topological Materials Science Seminar (9)
Yuki Nagai, Kyoto Univ.

2016/Jul/01(FRI)

Topological Materials Science Seminar (10)
Hideaki Takayanagi, Tohoku Univ.

2016/Jul/28(THU)

Topological Materials Science Seminar (11)
Kensuke Kobayashi, Kyoto Univ.

2016/Jul/25(MON)

Topological Materials Science Seminar (12)
Mario Cuoco, Kyoto Univ.

2016/Aug/01(MON)

Topological Materials Science Seminar (13)
Mario Cuoco, Kyoto Univ.

2016/Aug/04(THU)

Topological Materials Science Seminar (14)
Mario Cuoco, Kyoto Univ.

2016/Aug/09(TUE)

Topological Materials Science Seminar (15)
Mario Cuoco, Nagoya Univ.

2016/Aug/10(WED)

Topological Materials Science Seminar (16)
Mario Cuoco, Nagoya Univ.

2016/Aug/09(TUE)

Topological Materials Science Seminar (17)
Fabien Lafont, NTT Atsugi R&D Center

2016/Oct/26(WED)

Topological Materials Science Seminar (18)
Miguel A. Cazalilla, Kyoto Univ.

2016/Oct/06(THU)

Topological Materials Science Seminar (19)
Hosho Katsura, Kyoto Univ.

2016/Oct/17(MON)

Topological Materials Science Seminar (20)
Masafumi Udagawa, Nagoya Univ.

2016/Nov/01(TUE)

Topological Materials Science Seminar (21)
Shunsuke Furukawa, Tokyo Tech.

2016/Nov/04(FRI)

Topological Materials Science Seminar (22)
James Sauls, Kyoto Univ.

2016/Nov/08(TUE)

Topological Materials Science Seminar (23)
James Sauls, Osaka Univ.

2016/Nov/16(WED)

Topological Materials Science Seminar (24)
James Sauls, Nagoya Univ.

2016/Nov/21(MON)

Topological Materials Science Seminar (25)
Masaki Tezuka, Tokyo Tech.

2016/Dec/01(THU)

Topological Materials Science Seminar (26)
Ken Shiozaki, Kyoto Univ.

2016/Dec/02(FRI)

Topological Materials Science Seminar (27)
Marcel Franz, Kyoto Univ.

2016/Dec/20(TUE) *broadcasted at Kyoto University

Topological Materials Science Seminar (28)
Yoichi Ando, Tokyo Tech.

2017/Jan/11(WED)

Topological Materials Science Seminar (29)
Yakov V. Fominov, Hokkaido Univ.

2017/Jan/30(MON)

Topological Materials Science Seminar (30)
Katsuhisa Taguchi, Tokyo Tech.

2017/Feb/08(WED)

Topological Materials Science Seminar (31)
SungBin Lee, Kyoto Univ.

ホール粘性をめぐるあれこれ

西田祐介 / 東京工業大学 理学院 物理学系 准教授



編集委員長の柏谷さんからコラムを執筆するよう依頼を受けました。何について書こうか考えた結果、最近の自分自身の研究で触れる機会のあったホール粘性について書くことにしました。その理由は、そもそもホール粘性という物理量について日本ではあまり知られていないのではないかと、という印象を本新学術領域の研究会などで多くの人々と議論する中で抱いたことにあります。実際に Google で “ホール粘性” と検索すると、2016 年 12 月末時点ではたったの 14 件（似たページは除外）しか引っかかりません（図 1）。その内訳を分析すると、

- ・ 木村太郎さん（慶應）による記事など／5 件
- ・ 大栗博司さん（Caltech）による記事など／2 件
- ・ ホール粘性とは関連のない記事など／7 件

となります。ただし、木村さん、大栗さんともにご自身の研究を紹介する中でホール粘性に言及されていますが解説されているわけではないので、もし本コラムがウェブ公開されれば、ホール粘性の日本語での解説記事としては初めてのものになるかと思います。一方、“hall viscosity” と検索すると、約 4760 件が引っかかります（図 2）。公平な比較ではないかもしれませんが、ホール粘性という物理量の日本での認知度の低さが窺えるかと思います。



図 1：“ホール粘性”の検索結果。



図 2：“hall viscosity”の検索結果。

では、ホール粘性とは一体どういった物理量なのでしょう。後述するように、ホール粘性という呼称はホール伝導率との類似性由来しますので、まずはホール伝導率について復習することにします。伝導率とは電場に対する応答としての電流を決める係数であり、 $J_i = \sigma_{ij} \cdot E_j$ によって与えられます。この伝導率テンソル σ_{ij} はその添字 i と j の入れ替えに対して対称成分と反対称成分に分解することができますが、その反対称成分をホール伝導率と呼び、電場に対して直交する横方向への電流の応答を表します（図 3）。ホール伝導率の持つ特徴的な性質として、時間反転対称性が破れている必要がある、3 次元の場合には回転対称性も破れている必要がある、散逸を伴わない、などがあります。

一方で、粘性とは歪み速度に対する応答としての応力（の粘性部分）を決める係数であり、 $T'_{ij} = -\eta_{ijkl} \cdot V_{kl}$ によって与えられます。この粘性テンソル η_{ijkl} はその添字 ij と kl の入れ替えに対して対称成分と反対称成分に分解することができますが、その反対称成分をホール粘性と呼び、歪み速度に対して直交する横方向への応力の応答を表します（図 4）。ホール粘性の持つ特徴的な性質として、時間反転対称性が破れている必要がある、3 次元の場合には回転対称性も破れている必要がある、散逸を伴わない、などがあります。つまり、ホール粘性はホール伝導率の粘性テンソルにおける対応物である、ということが出来ます。

このようなホール伝導率との類似性を前面に押し出して、ホール粘性の呼称を提唱した最初の論文は 2009 年の N.Read によるものです [1]。しかしホール粘性は、例えば外部磁場などによって時間反転対称性や回転対称性を破れば一般に生じますから、ホール粘性と現在では呼称される物理量自体は昔から知られていました。実際に Landau-Lifshitz の 10 巻では、外部磁場中の気体やプラズマにおいてホール粘性に相当するものが議論されています [2]。

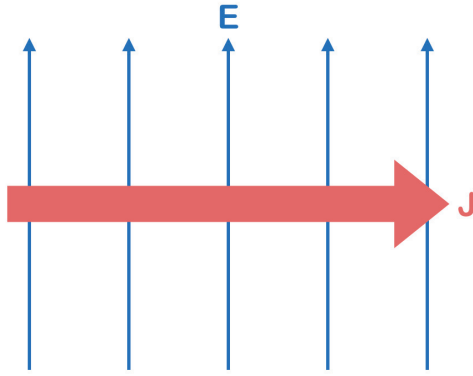


図3：伝導率におけるホール応答。電場に直交する方向に電流が流れる。

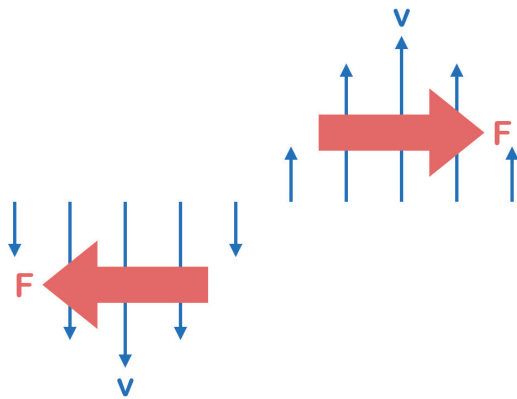


図4：粘性におけるホール応答。速度場に直交する方向に力が働く。

このように昔から知られている物理量であるホール粘性が、現代的な意味で新たに注目されるきっかけとなった論文は、1995年のJ.E.Avronらによるものです[3]。この論文では、エネルギーギャップのある系では計量を座標とするベリー曲率によってホール粘性が表されることが示され、実際に量子ホール系においてホール粘性が計算されています。その後少し時間が経ってから、2009年に該当分野の大御所であるN.ReadやF.D.M.Haldaneらによって分数量子ホール系やカイラル超流動系におけるホール粘性が議論されました[1,4,5]。こうした系においてはホール粘性がある種の量子化や普遍性を示すことなどから、トポロジカル系を特徴付ける新たな指標として注目され、ホール粘性という言い得て妙な呼称とともに興味が広がっていったようです。

以上、ホール粘性とは何か、またその歴史的な経緯などについて、不完全で偏った個人的見解を思いつくままに書いてきました。このようにホール粘性について理論的な解析は数多くある一方で、実は実験的な測定はいかなる物理系においても未だになされていません。従って、もし今後ホール粘性の実験的な測定に成功すれば、大きなインパクトを持った成果となり得るように思います。

冒頭で触れた自分自身の研究では、外部磁場中の超流動ヘリウム3-B相におけるホール粘性とその物理的帰結を議論しました[6]。超流動ヘリウム3は1972年の発見以来膨大な蓄積がありますが、その中でわずかとはいえ新たな知見を付け加えられたことは素直に嬉しく思っています。この研究を進める中で計画研究D01の水島さん(阪大)には超流動ヘリウム3の基本的な事柄を教えていただき、10月には東京工業大学で集中講義もしていただきました。また、公募研究A01の野村さん(東工大)と白濱さん(慶應)には実験・測定に関する事柄について教えていただき、11月の慶應義塾大学における連携研究会ではJ.Saulsさん(Northwestern)とも議論させていただきました。

このようにホール粘性は本新学術領域が目指す研究対象とも大いに関連があり得ます。本コラムを契機に古くて新しいホール粘性についての議論や理解が深まり、本新学術領域から新しい研究成果が生まれることを期待します。

- [1] N. Read, Phys. Rev. B **79**, 045308 (2009).
- [2] E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii, "Physical Kinetics" (Pergamon Press, Oxford, 1981).
- [3] J. E. Avron, R. Seiler, and P. G. Zograf, Phys. Rev. Lett. **75**, 697 (1995).
- [4] I. V. Tokatly and G. Vignale, J. Phys. Cond. Matt. **21**, 275603 (2009).
- [5] F. D. M. Haldane, arXiv:0906.1854.
- [6] K. Fujii and Y. Nishida, arXiv:1610.06330.

今年度以降の会議

年度	領域研究会 / 国際会議	トポロジー連携研究会	アライアンス ワークショップ
H28 年度 (2016-17)	12/16--18【終了】 東北大学	11/17-18【終了】 第 7 回 (慶応義塾大学) 「物性物理と基礎物理にお けるトポロジー」 1/6-7 第 8 回 (名古屋大学) 「奇周波クーパー対の物理」	9 月【終了】 Stuttgart (ドイツ MPI) 12 月【終了】 Moorea (米国 EPiQS) 2/13-18 YITP-PKU-TMS International School and Workshop (第 3 回アライアンス研究 会 with 北京大学) (YITP Kyoto)
H29 年度 (2017-18)	5/9-13 東京工業大学 *国際会議 TopoMat2017		4/25-28 TOP-SPIN and TMS International Workshop (第 4 回アライアンス研究 会 with TOP-SPIN-Italy) (IFW Dresden, Germany)
H30 年度 (2018-19)	名古屋大学		
H31 年度 (2019-20)	京都大学 *国際会議 TopoMat2019		

論文等での Acknowledgment について

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

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

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

また 総括班 X00: JP15H05851, 国際活動支援班 (Topo-Q): JP15K21717。

※ 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).

本号も無事出版できるにあたり、ニュースレターの執筆、編集にかかわっていただいた多くの方々に厚く御礼申し上げます。今年こそは早めに準備を進めて、余裕を持たせた編集を行おうと心に決めていましたが、やはり例年通り、追い詰められないと仕事が進まないという性格ゆえ、年末ぎりぎりですたばたしてしまうパターンを繰り返してしまいました。関係者各位には毎回道迷惑をおかけして、誠に申し訳ありません。

今年度の新学術領域研究の活動の特徴は、特に若手の研究交流に活気があり、実験家が理論系の研究室に滞在研究を行うなど交流も行われ、若手励起プログラムおよび JREP が充実したことでした。この交流はまさしく領域研究の意図するところであり、ぜひ来年以降も継続することを望んでいます。

翻って世の動静に目を転じると、AI 研究が異常に盛り上がっています。我々の世代から見ると AI ブームは 3 度目で、過去 2 回はからぶりで、いずれも大山鳴動して鼠一匹の結果だったように思います。ところが今回は、deep learning を中心とする技術革新で、AI 囲碁の活躍に加えて、言語認識、自動運転、芸術、エキスパートシステムなど、一気に IoT 革命といえるようなインダストリー 4.0 が始まりそうな雰囲気になっています。量子コンピュータ分野も進歩が著しく、量子コンピュータが研究室を出て世に出る最初の年になるのではないかという予測が 2017 年の Nature 誌に書かれています。(たった 3-4 年前には、CMOS 技術およびロジックの進歩はムーアの法則が破たんしてしまい、進歩の終末を迎えつつあるとされていた状況とは天地の差です。)

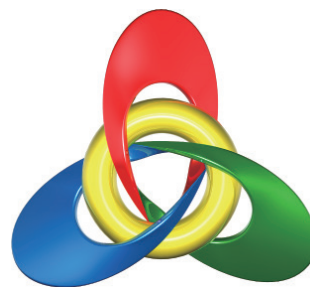
このまま IoT 革命が突き進んでいくと、おそらく 10-20 年後には知的業務や研究も、多くが AI によって担われ、通常のスキルしか有していない労働者、教育者、研究者さえも職場で生き残るのは難しいのではないかと考えられます。文学、音楽のみならず、いわゆる鋼鉄的な研究論文は AI が普通を書くようになるでしょう。AI による生産性急拡大により、労働力が過剰になってしまい、若者の職がなくなってしまうかもしれないという可能性が叫ばれるようになりました。

一見大変なことが起こりそうですが、これは逆に日本にとっては大きなチャンスです。日本では少子高齢化、および若者の人口減少が長年の懸案事項になっていますが、AI により生産活動にうまく組み入れ、労働人口の減少をうまくキャンセルすることで、世界で最も効率的な筋肉質社会を作り上げることが可能です。たった 3-4 年で日本は世界で最も先進社会を実現可能な国に急変したことになります。

その新しい社会変革にトポロジカル物質やトポロジカル量子現象がどのように関わってくるのかは我々研究者の努力次第であり、本学術領域は極めて重要な任務を担っていることになります。このような社会背景を意識して研究を進めることが肝心と考えられます。

(文責：柏谷聡)

NEWSLETTER No.2



- 2 巻頭言
さらなる飛躍を目指して / 川上 則雄 (京都大学)
領域研究への期待 / 樽茶 清悟 (東京大学)
- 4 今年度の計画研究トピックス
計画研究 A01、B01、C01、D01
- 16 受賞ニュース
2016 年 Nevill F. Mott 賞 / 桂 法称 (東京大学)
- 17 トピックス
ヘリウム再凝縮装置・無冷媒マグネットの立ち上げ・運用を経験して / 瀬川 耕司 (京都産業大学)
中性子星はトポロジカル超流体か? / 水島 健 (大阪大学)
- 22 2016 ピックアップトピックス
- 23 公募研究紹介
- 42 若手励起プログラム
藤井 啓資 (東京工業大学)、高根 大地 (東北大学)、田村 駿 (名古屋大学)
池田 敦俊 (京都大学)、ムハマド・シャーバズ・アンワー (京都大学)
- 47 REP 招聘報告
Mario Cuoco 博士 (サレルノ大学)、James Sauls 教授 (ノースウェスタン大学)
- 51 JREP プログラム 報告
高三 和晃 (京都大学)、服部 綾実 (名古屋大学)、吉田 周平 (東京大学)、Ivan Kostylev (京都大学)、
ヤン・ニクラス・ハウスマン (ベルリン・フンボルト自由大学)、鈴木 修 (北海道大学)、
吉田 恒也 (京都大学)、安井 勇気 (京都大学)
- 58 新 PD 紹介
土師 将裕 (京都大学)、矢野 力三 (産業技術総合研究所)、林 朝鏡 (東京工業大学)
- 61 2016 年度研究会報告
第 2 回領域研究会 / 第 10 回物性科学領域横断研究会 / 第 6 ~ 8 回トポロジー連携研究会 /
TMS 第 1 回アライアンス研究会 / TMS 第 2 回アライアンス研究会 / 市民講演会 / TOP-SPIN2 /
UFOX / QMS / APS March Meeting
- 76 TMS セミナー報告
- 77 コラム
ホール粘性をめぐるあれこれ / 西田祐介 (東京工業大学)
- 79 今年度以降の会議、論文等での謝辞について、編集後記

新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」
ニュースレター第 2 号

発行日: 2017 年 2 月 28 日

発行: 「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」総括班

編集: 柏谷 聡 (編集アシスト: 手塚 真樹、レイアウト: 児玉 知子)

領域事務局: 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学 大学院理学研究科 物理学第一教室 凝縮系理論グループ内

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

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

領域ウェブサイト <http://topo-mat-sci.jp/>