

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. 1



February 2016

NEWSLETTER No.1

CONTENTS

- 2 巻頭言
 - 「トポジカル物質科学」の創成に向かって / 川上 則雄（京都大学）
 - 新学術領域「トポ物質科学」第一回領域研究会に参加して / 三宅 和正（領域アドバイザー）
- 4 今年度の計画研究班トピックス
 - 計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 8 トピックス
 - 磁性ワイル半金属におけるスピンと電荷の関係 / 野村 健太郎（東北大学）
 - 2次元トポジカル絶縁体の研究 / 村木 康二（NTT 物性科学基礎研究所）
- 13 メンバー紹介
- 36 PD 紹介
 - Chanchal sow（京都大学）
- 37 2015 年ピックアップトピックス
- 38 若手励起プログラム報告
 - 関根 聡彦（東北大学金属材料研究所 日本学術振興会特別研究員 PD）
- 39 REP 招聘報告
 - K.T. Law 教授（香港科学技術大学）
 - Xi Dai 教授（Institute of Physics, Beijing, China）
- 41 2015 年度研究会報告
 - 第1回領域研究会 / 第1～5回TMS連携研究会 / CIFAR 報告 / Shanghai 報告 / EPIQS 報告
- 52 メンバー名簿

今後の会議のお知らせ、論文等での謝辞について、編集後記

「トポロジカル物質科学」の創成に向かって

川上 則雄 / 京都大学大学院理学研究科 教授



2015年7月より本新学術領域が発足し、すでに高いアクティビティで研究が展開されています。さらにトポロジー連携研究会、若手励起プログラム、国際活動支援班などの種々の領域プログラムも順調に進められています。皆様のご協力で、好発進することができたと考えております。

●トポロジカル物質科学の新たな展開●

連続変形に対する不変性を記述する「トポロジー」の重要性が物質科学において広く認識されるようになってきました。もちろん、この分野に新たなブレークスルーをもたらしたのは「トポロジカル絶縁体」と呼ばれる一連の物質群の発見であることは周知のことと思います。この驚くべき発展を遂げている分野で世界に先駆けて発足した新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」(H22-H26, 代表：前野悦輝)においては、トポロジカル絶縁体の実証や、トポロジカル量子現象の共通認識を導くに至りました。今やトポロジーの概念は、物質科学において広範な基盤を与えることが明確になっています。

このように世界的潮流になってきたトポロジカル量子現象の研究ですが、物質科学の基盤概念として真に根付くには、本質的に未開拓の部分が多く残されています。特に、現実の物質に多様性と機能性を与える「強い電子相関効果」の解明、結晶構造の「対称性」に基づくトポロジカル物質の開拓、および「ナノサイエンス」を駆使したヘテロ構造などによるトポロジカル相の人工制御が、新たな物質開発だけでなく学理構築の鍵となります。

●理念と目的●

このような学術的背景の下、本新学術領域は、物質に内在するトポロジーを基軸として、強い電子相関・結晶対称性・半導体ナノ構造に由来する新奇物性開拓を行うとともに、トポロジカル量子相特有の準粒子を探索・実証し、その背後に横たわる量子凝縮相の物理を解明することを目的としています。これにより、強相関トポロジカル系、トポロジカル絶縁体・超伝導体、

分数量子ホール系などの研究を飛躍的に発展させます。そして、これらを包括的に含む新たな分野横断型の研究領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」を開拓し、トポロジカル物質科学の基礎学理の構築と学問体系の樹立を目指します。今後、領域メンバーがこの目標に向かって一丸となって邁進したいと思います。

●国際ネットワーク構築●

以上の領域研究を推進する中で、トポロジカル物質科学に関わるプラットフォームの形成を目指します。国内での研究情報交換の場を設けるとともに、世界的規模のネットワークを構築します。このため、海外のプロジェクト・研究所との人材交流と連携研究を深めるための International Research Network on Topological Quantum Matter (略称 “Topo-Q”) の構築を目指します。Topo-Q には、カナダ高等研究機構 (CIFAR) 量子物質プロジェクト、アメリカの EPIQS プロジェクト (Moore 財団)、ドイツのマックスプランク研究所、上海交通大学複雑系物理学センターなどを含む多くのプロジェクトや研究機関が参加しています。今後、これら海外の研究者との人材交流を行い、アライアンスワークショップなどの開催を通して研究情報交換を行います。

●若手研究者の育成●

このような「トポロジー」をキーワードとした分野横断的な研究を推進しながら、次の世代を担える、柔軟な発想をもつ若手研究者の育成・発掘に努めたいと思います。若い世代から「トポロジカルは面白い」という声が聞かれるよう、魅力的な新学術領域を創成したいと思います。

本領域はまだ産声を上げたばかりですが、今後、領域内外の方々の協力を得ながら、「トポロジカル物質科学」の創成に向けてメンバーが一丸となって努力していきたいと思っています。

新学術領域 「トポ物質科学」第一回領域研究会に参加して

三宅 和正 / 豊田理化学研究所 (領域アドバイザー)



この川上新学術領域は、前野新学術領域「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」の圧倒的な成果を継承しさらなる発展をめざすもので、その終了の後、間髪を置かず採択されたことから、高く評価されたと考えられます。アドバイザーとしての寄稿を依頼されましたが、私自身はこの分野の研究の発展をやや横から眺めている状況ですので、本質的に重要な指摘ができるとは思えません。というわけで、昨年末に開催されたキックオフミーティングに参加したときの印象を述べてその責めを塞ぎたいと思います。

研究組織・体制の観点からは4つの計画研究班でそれぞれ強力なメンバーを組織していることが印象的です。そのキーワードは「強相関物質」「対称性」「ナノ構造」「エキゾチック準粒子」ですが、「ナノ構造」というキーワードが応用を視野に入れたという意味の新しい方向性を感じます。研究会は計画研究のメンバーの口頭講演とそれ以外の参加者のポスター講演から構成されていました。前者はそれぞれに講演のレベルの高さを感じましたし、後者では公募研究に応募したと思しき研究者や若手研究者の多様な研究発表を聞くことができ、個人的にはとても楽しむことができました。

私はこれまで重い電子系の分野で研究してきましたが、その観点から興味をもったことを2, 3述べたいと思います。トポロジカル絶縁体では表面の準粒子に特徴的な分散が現れるということですが、Ceをベースとする重い電子系金属では表面とバルクでは電子相関の効果が異なる（後者では4f電子のレベルが深いため電子相関がより強くなる）と考えられており[1]、表面状態の空間的構造と電子間相互作用の効果につい

てもっと知りたいと思いました。その意味でもトポロジ物質の分類学が電子間相互作用を考慮すると変わってくる可能性があるということは新鮮でした。

古くから研究されてきた近藤絶縁体 SmB_6 が実はトポロジカル絶縁体であったということが分かって注目されていますが[2-4]、同じく近藤絶縁体の典型物質 YbB_{12} もトポロジカル絶縁体であるという実験に関するポスター発表が印象的でした[5]。特に、表面の金属状態の準粒子の有効質量はとても重いことを示唆しており、新しい発展が期待されます。また、これらの近藤絶縁体の結晶構造はいずれも立方晶であり、これまで見つかったトポロジカル絶縁体がすべて菱面体晶であったことと好対照であるようです。今後物質の多様性に着目した研究の重要性を示唆しているようにも見えます。

もう一つ興味深かったのは、ドーピングしたトポロジカル絶縁体で実現する $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導状態がスピン3重項でかつ自発的回転対称性が破れているという報告でした[6,7]。これがトポロジカル絶縁体と関連しているのかどうか、今後の研究の発展が期待されます。

- [1] A. Sekiyama et al., Nature **403**, 396 (2000).
- [2] T. Takimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 123710 (2011).
- [3] S. Wolgast et al., Phys. Rev. B **88**, 180405(R) (2013).
- [4] M. Neupane et al., Nature Commun. **4**, 2991 (2013).
- [5] F. Iga, et al., P-18.
- [6] G.-q. Zheng et al., 12AM-1.
- [7] S. Yonezawa et al., 12AM-2.

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

本計画研究「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）で発現する超伝導体・モット絶縁体・半金属などの相での、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・発展させることである。

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、強相関トポロジカル現象の物理を発展させる。この研究の遂行により、対称性に基づく非従来型超伝導という分類を、トポロジカル超伝導の視点からとらえなおし、より精緻に体系化する。また、モット絶縁体や半金属も含めた新奇トポロジカル相の創成・制御を進めるとともに、電子相関の有効性を明らかにする。

具体的には以下のテーマを中心にトポロジカル相の研究を深める。

- (1) カイラル超伝導現象の実証：メンバー間で Sr_2RuO_4 や URu_2Si_2 の単結晶試料を共有し、自発磁場や熱電効果の観測によって、エッジ流やカイラル揺らぎなど新奇トポロジカル超伝導現象を実証する。
- (2) 奇周波数超伝導状態の実証：微小単結晶における常磁性マイスナー効果や、強磁性金属 / スピン三重項超伝導体接合での近接効果の研究から、トポロジカル超伝導との関係性を明らかにする。
- (3) マヨラナ準粒子の実証に向けた実験：マヨラナ準粒子の実証に向け、スピン三重項超伝導体の微小リングでの半整数量子化磁束や、重い電子系超伝導人工超格子のエッジ状態の観測を目指す。
- (4) ワイル半金属・ワイル型トポロジカル超伝導体の探索：アンチペロブスカイトやパイロクロア酸化物で3次元ディラック電子系やワイル半金属を探索する。また、ウラン系超伝導体でワイル型トポロジカル超伝導状態を実証する。

(5) モット絶縁体でのトポロジカル相の探索：人工超格子を含むハニカム格子・パイロクロア格子のイリジウム酸化物等で、量子スピン液体状態、特にトポロジカルモット絶縁相の実現を目指す。

(6) トポロジカル量子相転移の制御：非平衡状態を含めた強相関系特有の物質制御性を生かすことでトポロジカル相の生成過程を明らかにし、トポロジカル量子相転移の多様性・普遍性に関する統一的知見を得る。

本計画研究 A01 は、《研究項目 A 班：トポロジーと強相関》の柱として、トポロジカル超流動など相補的テーマを含む公募研究 A01 と連携する。また、研究項目間の連携では、マヨラナ準粒子の検証等で D 班・C 班と、奇周波数超伝導等で B 班と、超伝導素子開発等で C 班と、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る。さらに、世界的な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「トポロジー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する。



対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求

佐藤 宇史 / 東北大学大学院理学研究科 准教授

本計画研究「対称性に基づいた新奇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。

具体的には、時間・空間・結晶点群対称性などの様々な対称性やスピン軌道相互作用を積極的に活用・制御することで、トポロジカル絶縁体、ディラック半金属、ワイル半金属、トポロジカル超伝導体、トポロジカル結晶超伝導体などの新奇なトポロジカル物質を世界に先駆けて発見し、高分解能スピン分解光電子分光やトンネル分光などの先端分光技術などを駆使して、そのエッジ・表面およびバルクにおける電子構造の完全決定を目指す。また、高品質のバルク・薄膜単結晶の作製に加えて、分子線エピタキシー (MBE) 法や接合デバイス作製技術を用いてトポロジカル超伝導候補物質の各種接合を作製することによって、新奇トポロジカル量子現象の観測・解明を行う。これらの研究は、以下の5つの項目を中心に据えて行う。

(1) トポロジカル量子相転移の解明：

トポロジカル絶縁体の量子相転移近傍における電子状態の変化を明らかにする。高分解能スピン分解 ARPES 装置と薄膜試料高真空輸送システムを開発することで、ディラック電子のバンド構造とスピントクスチャを完全決定する。

(2) ディラック・ワイル半金属相の実現：

3次元ディラック半金属およびワイル半金属の候補物質のバルク・薄膜単結晶を合成し、組成・物性の制御とバンド構造の測定により、電子状態の全貌を明らかにする。

(3) 表面・界面のディラック電子制御による新奇物性発現：

トポロジカル絶縁体を含む超格子構造や強磁性トポロジカル絶縁体薄膜などにおいて表面と界面のディラック電子を制御し、その電子構造を決定する。これにより、表面・界面における空間反転対称性の破れと電子状態との関連を明らかにする。さらに、異常量子ホール効果などの新奇量子現象の実現をめざす。

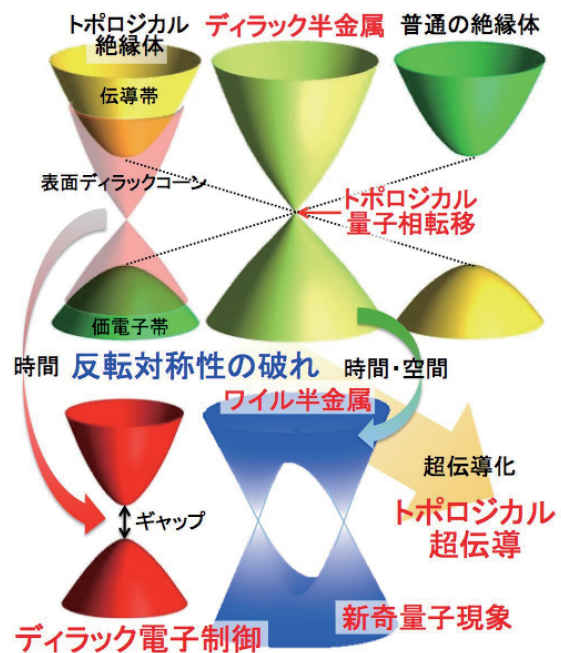
(4) トポロジカル超伝導体の開発と検証：

トポロジカル絶縁体とトポロジカル結晶絶縁体にキャリアをドーブして超伝導を実現し、そのトポロジカル超伝導性を検証する。トポロジカル超伝導体の候補物質に関して、トポロジカルな性質を決定するペアポテンシャルの位相構造を明らかにする。

(5) エッジ流・奇周波数電子対・マヨラナ準粒子の検証：

トポロジカル絶縁体・超伝導体、および強磁性体を含む高品質の接合を作製し、トポロジカル超伝導性に由来するエッジスピン流、奇周波数ペア、およびマヨラナ準粒子の存在を実験と理論の両面から多角的に検証する。

上記の研究の多くは A01, C01 および D01 班の研究テーマとも密接に関係しているため、他の計画研究との有機的な研究交流によって、概念共有を深めた研究展開も図る。さらに、トポロジカル量子現象特有の準粒子を探索・実証し、その背後に横たわる量子凝縮相の物理を解明することを目指す新学術領域全体の目的遂行にも寄与する。



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

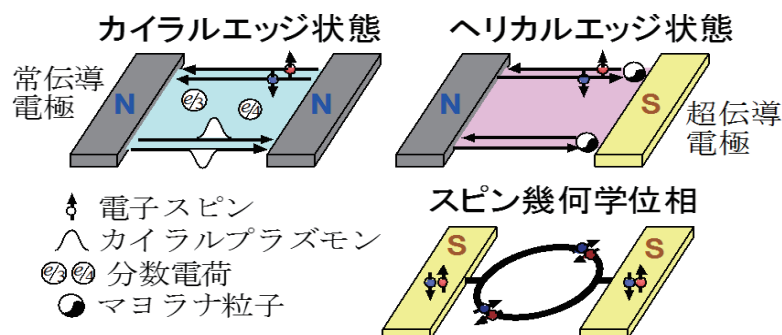
本計画研究「トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象」では、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」を用いて、個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにするとともに、準粒子を用いた新しいトポロジカル物質ナノ構造デバイスの基礎原理を提案し原理実証を行うことを目的としている。

トポロジカル物質ナノ構造では、トポロジーとナノ構造により制限された自由度の下で、対称性・相互作用・近接効果が生む相乗効果により、従来の物質にはない特異な量子現象やエキゾチックな準粒子の発現が期待できる。本計画では、半導体ナノサイエンスで培った技術、すなわち、高純度結晶成長によるヘテロ接合、ゲート電圧によるバンド構造の変調やスピン軌道相互作用の制御、ナノ加工による微細構造デバイスの集積化、超伝導体・磁性体接合（ハイブリッド化）技術、高速電界効果によるキャリアの動的制御技術、極低温低雑音測定による精密計測などの手法を最大限に活かすことにより、人為的制御による新奇なトポロジカル量子現象を引き出すことが大きな特徴である。

実験研究として中心となる材料は、高い電子移動度により明瞭な整数・分数量子ホール効果を示し電界効果によるナノ構造技術も確立している AlGaAs/GaAs

系ヘテロ構造、電界制御によりスピン軌道相互作用の変調が可能で永久スピン旋回状態を得ることができる InGaAs 系ヘテロ構造、電子と正孔の共存を制御できるとともに大きなスピン軌道相互作用によって量子スピンホール効果を得ることができる InAs/GaSb 系ヘテロ構造である。これらの系でのナノ構造やハイブリッド構造の作製により、新奇なトポロジカル量子現象を引き出すことができる。エキゾチックな準粒子（カイラルプラズモン、分数電荷、マヨラナ準粒子など）や電子スピンの幾何学的位相の振る舞いを明らかにすることで、ナノサイエンスの観点からトポロジカル系の物理を切り拓くことを目指す。人工トポロジカル相の創生・制御と、準粒子輸送現象（非平衡状態、動的挙動、量子統計、準粒子干渉、エッジ流、スピン干渉、スピン輸送）の解明を通してトポロジカル物質ナノ構造の基礎学理を確立し、準粒子を用いた新デバイスの基礎原理の構築へとつなげる。

また、理論研究により、原子層二次元系薄膜やワイル半金属などの実験技術の確立していない系でのトポロジカル量子現象や輸送現象に関する研究を進め、将来の実験研究の指針とすることができる。さらに、連携研究者や他の計画研究の研究者との協力により、トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象を探求し、トポロジカル物質を用いたデバイスの提案と実証を目指している。



トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

川上 則雄 / 京都大学大学院理学研究科 教授

本計画研究「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」の目的は、物質科学の新たな局面を切り開きつつあるトポロジカル量子相とそこに発現するエキゾチック準粒子の基本的性質を理論的に解明し、さらに個々の物質の詳細によらない普遍的な物理現象と法則を探究することである。既存の枠組みを超えた発想と分野を越えた概念の融合により、より広い観点から基礎学理の構築を目指す。特に、トポロジカル物質科学の開拓の鍵となる「強相関」、「対称性」、「ナノサイエンス」に重点を置いた理論研究を展開し、これらの実験研究を推進する A 班 - C 班と緊密に協力することで領域研究全体の連携を推進する横系の役割を担う。対象とする主な系と研究のねらいは以下のとおりである。

- ・ 強相関物質群における新奇なトポロジカル量子相の理論探索
- ・ 対称性によって守られたトポロジカル量子相の解明によるトポロジカル物質の実験研究の先導
- ・ ナノ構造におけるエキゾチック準粒子の特性の研究を通じたトポロジカル量子相の本質の解明
- ・ 素粒子物理など他分野とのアナロジーを通じたトポロジカル物質科学の新概念の構築

本計画研究メンバーは川上 (物性)、上田 (冷却原子)、佐藤昌利 (場の理論)、西田 (原子核)、新田宗土 (素粒子)、水島 (超流動)、手塚 (物性)、段下 (冷却原子) と多岐にわたるが、それぞれが独自の観点からトポロジカル量子現象の研究に携わっている。

本プロジェクトで推進する予定の具体的テーマをいくつか列挙すると

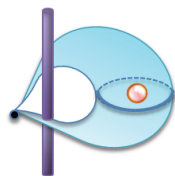
- (1) 強相関系におけるトポロジカル量子相の理論構築 (A 班と連携) : トポロジカルモット絶縁体における強相関効果を解明し、エッジモット状態などの新奇トポロジカル状態の発現機構を探究する。強相関トポロジカル量子相の理論の枠組みを確立する。
- (2) 新奇な量子系におけるトポロジカル相 (A 班、B 班と連携) : 結晶対称性によって守られたトポロジカル励起の分類を行い、新奇トポロジカル物質を提案する。ボース・アインシュタイン凝縮の励起バンドがトポロジカルに非自明な構造を持つ条件と観測方法を提案する。原子気体やフェルミ超流動の制限空間におけるトポロジカル相転移を解明する。
- (3) トポロジカル量子相でのエキゾチック準粒子の探索と検証 (A 班、B 班、C 班と連携) : トポロジカル超伝導・超流動の非平衡ダイナミクスやナノ構造における量子輸送現象の解明により、マヨラナ準粒子の検出法と制御法の提案を目指す。フェルミ超流動の表面や量子渦に局在するマヨラナ粒子やスピン流がフェルミ液体の基本特性に与える効果を解明する。フェルミ粒子系の普遍的な少数束縛状態がトポロジカル相に及ぼす効果を解明する。
- (4) 領域外への研究展開 : 人工ゲージ場と光格子の組み合わせにより、強相関トポロジカル絶縁体を中性原子で理論的にシミュレートすることで系統的に研究する。中性原子気体の超流動、中性子超流動、カラー超伝導におけるトポロジカル励起の研究を行う。

下図に、いくつかの研究テーマの例を模式的に示した。

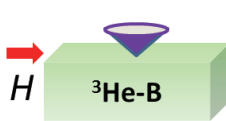
学理の構築

・エキゾチック準粒子の性質解明

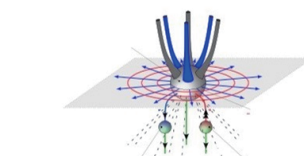
・トポロジカル不変量に基づく新物質・新現象の説明と予言、および普遍的物理現象と法則の探索



冷却原子気体中の量子渦・モノポール共存系



超流体ヘリウムのトポロジカル量子相転移



中性子星・高密度クォーク物質中のトポロジカル励起

磁性ワイル半金属におけるスピンと電荷の関係

野村 健太郎 / 東北大学金属材料研究所 准教授 / 研究分担 C01

1. ワイル半金属

近年、スピン軌道相互作用がもたらす新奇量子状態としてトポロジカル絶縁体の研究が進められてきたが [1]、これに加え最近では、ワイル半金属 [2] と呼ばれる強いスピン軌道相互作用に起因する新奇ゼロギャップ半導体が注目を集めている。この系は伝導帯と価電子帯の間に、ハミルトニアン $H = \pm v_F (p_x \sigma_x + p_y \sigma_y + p_z \sigma_z)$ によって特徴付けられる、縮退の無い線形分散をもつ。ここで v_F はフェルミ速度、 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ はパウリ行列である。バンドが交差する点 ($p=0$) はブリリュアン域に複数存在し、ワイルノードと呼ばれる。

初期の研究では空間反転対称性を破ったワイル半金属状態が理論的に提案され [3]、最近実験によって検証された [4]。一方、時間反転対称性を破るワイル半金属はイリジウム酸化物 [5]、磁気ドーピングしたトポロジカル絶縁体 [6,7] など理論的に実現が提案されている。特に時間反転対称性を破るワイル半金属は、異常ホール効果に代表される、波数空間のトポロジーに起因する現象の実現が予想され、今後の研究の発展が期待できるテーマである。本稿では最近我々のグループで明らかにしたスピン磁化と電荷自由度が非自明に絡みあう現象として電荷誘起スピントルクの理論的提案について紹介する。

磁性ワイル半金属を実現すると提案されている系で最もシンプルと言えるのは、トポロジカル絶縁体に磁性不純物をドーピングした系である。例えば Bi_2Se_3 や $\text{Bi}_2(\text{Se}_x\text{Te}_{1-x})_3$ などに Cr や Mn などの磁性元素がドーピングされると、スピン軌道相互作用が弱まりバルクギャップが消失する領域が存在する。非磁性でかつ時間反転対称性と空間反転対称性を持つ場合は、ギャップレス線形分散が二重縮退しており、ディラック半金属と呼ばれる (図 1 (a) 参照)。一方、低温で磁性不純物の局在スピンの秩序化して強磁性状態になるとバンド縮退が解け、ワイル半金属が実現する (図 1 (b) 参照)。図 2 には Bi_2Se_3 を母物質にした Mn をドーピングした場合の温度・ギャップ相図を示す [7]。実験的には Cr をドーピングした $\text{Bi}_{2-y}\text{Cr}_y(\text{Se}_x\text{Te}_{1-x})_3$ においてギャップの消失および強磁性秩序が観測されている [8]。

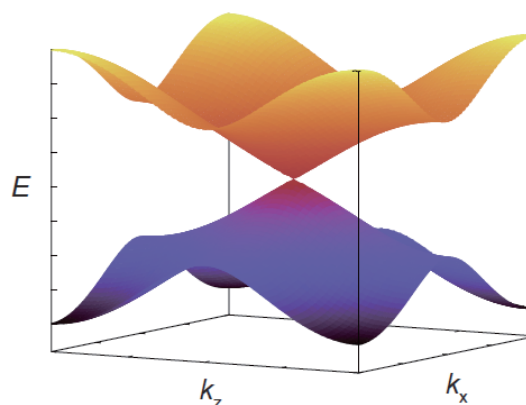


図 1 (a) : ディラック半金属の分散。

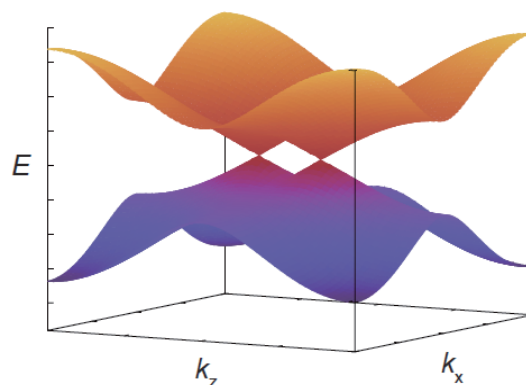


図 1 (b) : ワイル半金属の分散。

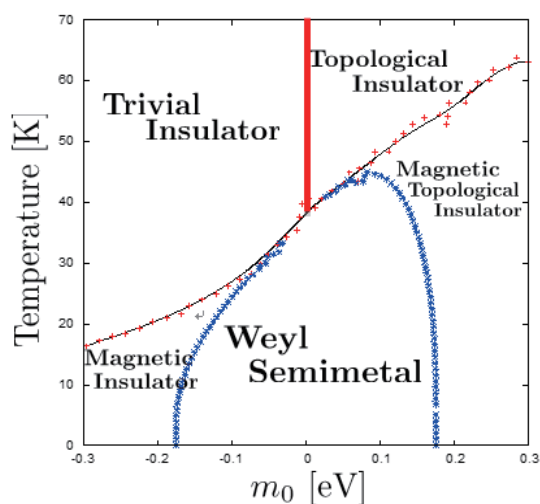


図 2 : 磁気ドーピングしたトポロジカル絶縁体の温度 - ギャップ相図。トポロジカル絶縁体と通常絶縁体とのディラック半金属状態は強磁性秩序が発生するとワイル半金属となる。

2. 異常ホール効果

スピン軌道相互作用および強磁性秩序を有する事からこの系ではゼロ磁場下におけるホール効果、すなわち異常ホール効果、が生じる事が期待される。実際、図1(b)にあるような2つのワイルノードを有する系に対し、ベリー曲率を計算すると、2つのワイルノードは、波数空間の中で、プラスおよびマイナスの「磁荷」をもった磁気モノポールの構造を有する(図3参照)。これらを波数空間で積分したものは異常ホール伝導率に対応する[1,9]。電場を印加すると、電場と磁化に垂直な電流成分が発生する。

$$\mathbf{j}_{\text{AHE}} = \sigma_{\text{AHE}} \hat{\mathbf{M}} \times \mathbf{E} \quad (1)$$

一方で、磁場を印加した場合には磁化と平行(反平行)な成分が電荷密度を生成する。

$$\rho_{\text{AHE}} = \sigma_{\text{AHE}} \hat{\mathbf{M}} \cdot \mathbf{B} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{E}$ は電場、 $\mathbf{B}$ は磁場、 $\hat{\mathbf{M}}$ はドープされた磁性不純物の磁化の方向を向く単位ベクトル、 σ_{AHE} は異常ホール伝導率の大きさである。

最近我々は異常ホール効果が生じる強磁性体の平衡状態における電磁応答を記述する熱力学ポテンシャル：

$$\Omega_{\text{CS}} = \int d^3x \sigma_{\text{AHE}} A_0 \hat{\mathbf{M}} \cdot \mathbf{B} \quad (3)$$

を提案した。ここで A_0 は静電ポテンシャルである。(3)式を $\rho_{\text{AHE}} A_0$ のように電荷密度と静電ポテンシャルの結合項と見なせば(2)が得られ、一方、 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ を(3)に代入して、部分積分によって $\mathbf{j}_{\text{AHE}} \cdot \mathbf{A}$ の形に変形すると(1)の関係式が得られる。

3. 電荷誘起スピントルク

熱力学ポテンシャル(3)は局所磁化 $\mathbf{M}$ とそれに共役な有効磁場 $\mathbf{B}_{\text{eff}}$ の結合項と見なす事もできる。このことは静電ポテンシャルの変化によって磁化の方向ベクトルの向きをスイッチすることが可能である事を示唆する。実際ゼーマン項から得られるトルクが

$\mathbf{T}_{\text{Zeeman}} = g\mu_B \mathbf{S} \times \hat{\mathbf{M}}$ と書けるように、(3)式から電荷誘起スピントルク

$$\mathbf{T}_{\text{CS}} = \frac{\sigma_{\text{AHE}}}{\rho_s} A_0 \mathbf{B} \times \hat{\mathbf{M}} \quad (4)$$

が得られる。ここで ρ_s は磁性元素の数密度である。静電ポテンシャル A_0 は例えばワイル半金属薄膜をつくってゲート電極を付ければ自由に变化させることが出来るであろう。このようにしてスピントルクの電氣的な生成が磁性ワイル半金属では理論的に予測された

[10]。実際にはゼーマン項や、電荷密度 ρ_{AHE} の発生による静電エネルギー項、磁気異方性項なども存在する。どのようにして磁化ベクトルの方向をスイッチするか、スピンプンピングによるスピン流を発生できるかなど、今後計画研究を進め明らかにしていきたい。本稿は東北大学博士課程大学院生の紅林大地氏との共同研究に基づく。

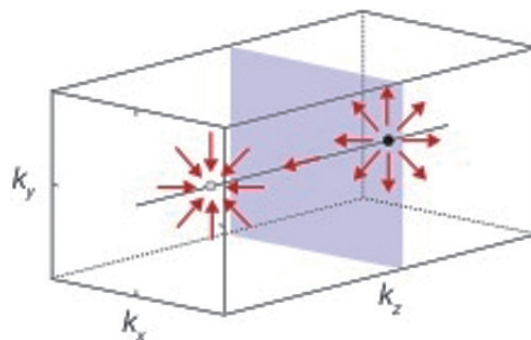
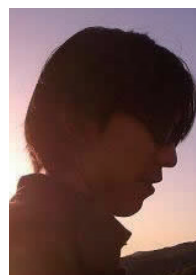


図3：ワイル半金属におけるベリー曲率の様子。

参考文献

- [1] 「トポロジカル絶縁体入門」 安藤陽一著（講談社）
- [2] ワイル半金属状態は教科書（例えば「基礎の固体物理学」 斯波弘行著）で定義されている従来の半金属とは異なった状態である。また「トポロジカル半金属」という用語については[1]を参照されたい。
- [3] S. Murakami, New J. Phys. **9**, 356 (2007).
- [4] S.-Y. Xu et al., Science **349**, 613 (2015).
- [5] X. Wan et al., Phys. Rev. B **83**, 205101, (2011).
- [6] A. A. Burkov and L. Balents, Phys. Rev. Lett. **107**, 127205 (2011).
- [7] D. Kurebayashi and K. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 063709 (2014).
- [8] J. Zhang, et al., Science **339**, 1582 (2013).
- [9] N. Nagaosa, et al., Rev. Mod. Phys. **82**, 1539 (2010).
- [10] K. Nomura and D. Kurebayashi, Phys. Rev. Lett. **115**, 127201 (2015).

著者紹介



のむら けんたろう

1974年神奈川県生まれ。2003年東京大学総合文化研究科広域科学専攻相関基礎科学系博士課程修了。テキサス大学でポスドク、東北大学助教、理化学研究所研究員を経て現職。ディラック電子の深遠な物理に魅了されて10年になります。この分野の今後益々の発展に微力ながら貢献したいと思います。

2次元トポロジカル絶縁体の研究

村木 康二 / NTT 物性科学基礎研究所 / 計画研究 C01

よく知られているようにトポロジカル絶縁体が最初に理論的に提案されたのも実験的に確認されたのも2次元系であり、それがその後3次元系に拡張されたことでトポロジカル絶縁体の研究は大きく発展して現在に至っている。3次元系では実に様々な物質がトポロジカル絶縁体であることが示されているのに対して、2次元系で実験的に確認されているのは最初に報告されたトポロジカル絶縁体であるHgTe/CdTe量子井戸[1]と、その数年後に報告されたInAs/GaSb量子井戸[2]の2つだけである。(理論的には他にもいくつか提案があり[3]、BiバイレイヤーではSTMでエッジ状態の存在を示す実験はあるが[4]、電気伝導が測定されているのは今のところ上記の2つの系だけである。)また、3次元トポロジカル絶縁体ではARPESによってディラック型のエネルギー分散やスピン-運動量ロッキングの様子が詳細に実験で調べられており、電気伝導では表面ディラック電子特有の量子ホール効果が観測されているのに比べると、2次元系の研究の進捗状況は分かりづらいかもしれない。ここでは2次元トポロジカル絶縁体(あるいは量子スピンホール系)の実験について研究の流れと現状を概説する。

HgTeとCdTeはいずれもII-VI族の半導体である。HgTeは伝導帯と価電子帯が反転したバンド構造をしているが、CdTeはバンド反転のない通常の半導体であり、HgTeをCdTeで挟むことでHgTeに量子準位が形成され2次元のサブバンドが形成される。この量子井戸の厚さがある閾値(6.3 nm)よりも厚い場合、HgTe内のs軌道が作る量子準位はp軌道の量子準位よりもエネルギー的に下になるため、バンド反転が保たれ、2次元トポロジカル絶縁体となる。一方、InAsとGaSbはIII-V族半導体であり、いずれもバンド反転のない通常のバンド構造をもつ。これらをヘテロ接合にすることでトポロジカル絶縁体となる理由は、バンドのエネルギー配置が相対的にずれており、InAsの伝導帯の底がGaSbの価電子帯の頂上よりも下にあるためである。これを両側からバンドギャップの大きいAlSbで挟むことで、s軌道とp軌道の量子準位がそれぞれInAsとGaSb中に形成される。これらがバンド反転条件を満たすためにはInAsとGaSbの厚さに条件が加わるが、GaSb中にサブバンドを形成する正孔の有効質量はかなり大きいいためその量子準位の影響は小さく、実際にはほぼInAs層の厚さによって決まる。典型的な厚さはGaSbが8-10 nm、InAsが~12 nmである。トポロジカル絶縁体となるためにはバンドギャップが

開く必要があるが、InAsとGaSbのヘテロ界面を通して波動関数がしみ出して軌道が混成することによって反交差ギャップが開く。この反交差ギャップの大きさは理論計算によると4 meV程度と小さいが、極低温であればバルクが絶縁化するには本来十分なはずの大きさである。s軌道のサブバンドとp軌道のサブバンドが空間的に離れていることは、ギャップが小さいという点ではデメリットであるが、ゲート電圧によってバンドオーバーラップを制御できるという点ではメリットとなる。

トポロジカル絶縁体では伝導帯と価電子帯を結ぶ線形分散をもった特異なバンドが試料境界に現れる。3次元トポロジカル絶縁体ではこれが2次元のディラック電子として試料表面に現れるのに対し、2次元トポロジカル絶縁体では1次元のヘリカルエッジチャネルとして試料端に現れる。これが「ヘリカル」と呼ばれる理由は、通常の1次元電子系と異なり、右向き・左向きの各運動量状態に対してそれぞれある決まったスピンの向きをもった1つの状態しか存在しないことによる。一方の試料端に注目すると、その端に存在する右向きと左向きのエッジ状態は逆向きのスピンをもったクラマース対となっており、お互いに時間反転の関係にある。ゼロ磁場で磁性不純物が存在しない場合、時間反転対称性によって(非弾性)後方散乱が抑制されるのはそのためである。また、スピンの向きによって運動方向が決まっているため、電極から電子を注入すると、あるスピンの向きの電子はその電極の右側のエッジチャネルへ、その逆向きのスピンをもつ電子は左側のエッジチャネルに注入されることになる。これはスピンホール効果の量子化版と言うことができ、2次元トポロジカル絶縁体が量子スピンホール絶縁体と呼ばれる所以である。

後方散乱がない場合、試料端のヘリカルエッジチャネルにLandauer-Büttkerの公式を適用することで試料の伝導度を予測することができる。通常の6端子ホールバー型試料の場合、4端子測定で得られる縦抵抗は $h/2e^2$ (~13 k Ω)となる。ここで分母の因子2はスピン縮退によるものではなく、ソースとドレインを結ぶエッジチャネルが試料の両端に存在することによる。HgTe/CdTe量子井戸において試料端の長さが1 μ mと短い場合、ゲート電圧を掃引すると抵抗が $h/2e^2$ に近い値でプラトーを示したことが最初のトポロジカル絶縁体の証拠とされた[5, 6]。しかし観測された抵抗の振

る舞いは量子化と呼ぶにはほど遠く、期待される量子化値からのずれが大きいだけでなく、ゲート電圧を掃引した際の抵抗の揺らぎもかなり大きい。また抵抗が量子化値に近い値をとるのは試料端が短い場合に限られており、端が長い試料では抵抗は増大する。HgTe/CdTe 系については、試料作製の難しさもあってか、その後に発表された論文においても抵抗の量子化に関してはほとんど改善が見られていない。

一方、InAs/GaSb についてはゲート電圧を掃引した場合にフェルミ準位がギャップ中であっても試料の抵抗があまり高くないことはトポロジカル絶縁体の予想以前から知られていた [7]。残留バルク伝導は 3 次元トポロジカル絶縁体においても問題となっているが、InAs/GaSb の場合も同様である。ただし InAs/GaSb の場合、残留バルク伝導の起源は明らかではない。ETH のグループは非常に高易動度の InAs/GaSb 試料の作製に成功しているが、易動度の高い試料のほうがバルクの残留伝導度は大きいという結果になっている [8]。Rice 大のグループは初期の研究において、残留バルク伝導が大きい InAs/GaSb 試料において伝導度の試料の長さに対する依存性を調べることで試料の幅に依存しない伝導度の成分を評価し、それが期待される量子化値に近いことからエッジ伝導の存在を示した [9]。3 次元トポロジカル絶縁体の場合、表面伝導の寄与を評価するために試料の厚さ依存性を調べるという手法がとられているが、それと同様の発想である。

InAs/GaSb 系ではドーピングをしなくてもキャリアが存在し、通常は n 型の伝導を示す。我々のグループではフェルミ準位をエネルギーギャップ領域に調節しやすいように $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}$ のバリア中にアクセプタである Be を変調ドーピングした試料を作製したところ、この試料において良好なバルク絶縁性が得られ、非局所伝導によってエッジ伝導が支配的であることを示すことができた [10]。さらに InAs の厚さを 10, 12, 14 nm と変えることで、通常の絶縁体からトポロジカル絶縁体、半金属（バンド反転しているが実効的にギャップがなくなっている状態）へと変化することを示した。

その後、Rice 大のグループは InAs/GaSb の界面に Si をドーピングした試料を作製し、この試料が良好なバルク絶縁性を示し、かつかなり良好な抵抗の量子化を示すことを報告している [11]。この試料においても抵抗はエッジの長さにほぼ比例して増大し、その比例係数からエッジの非弾性散乱長が $4.4\ \mu\text{m}$ と見積もられている。ヘテロ界面に Si をドーピングしたのは、disorder によってバルクの電子状態を局在させるのが目的であり、実験結果はその顕著な効果を示している。一方、量子スピンホール系において抵抗が量子化せずにゲート電圧によって揺らぐ原因として、ポテンシャ

ル揺らぎによって生じた電子・正孔の puddle を介したエッジ状態の緩和が考えられている [12]。したがって Si ドーピング試料においてバルク絶縁性だけでなく抵抗の量子化も改善していることは注目に値するが、そのメカニズムの詳細は必ずしも明らかではない。

2 次元のトポロジカル絶縁体においてフェルミレベルがギャップ中にある場合に電流が試料端を流れていることは、HgTe/CdTe、InAs/GaSb の両方の系について、非局所伝導の測定 [13,10] と scanning SQUID による電流の実空間マッピング [14,15] によって示されている。一方、エッジチャネルのスピンに関する情報については、HgTe/CdTe のバルク領域の逆スピンホール効果を用いた実験 [16] と InAs/GaSb 系における Andreev 反射の実験 [17] がある。後者では Nb 電極をつけたチャネル長 $0.5\ \mu\text{m}$ の試料を用いている。normal 反射ではスピンを反転せずに運動方向を変える必要があるが、ヘリカルエッジチャネルではそのようなモードが存在しないため 100% の確率で Andreev 反射が起きると予想される。実験では Andreev 反射による伝導度ピークの高さからこのことを示したとしている。

超伝導接合に関しては、その後、Harvard 大を中心としたチームによって Al を電極としたチャネル長 $0.8\ \mu\text{m}$ の HgTe/CdTe 試料において超伝導電流が観測されている [18]。臨界電流が示す Fraunhofer パターンのフーリエ解析から電流の空間分布を調べ、フェルミ準位がギャップ中にある場合に超伝導電流が試料端に集中していることが示されている。InAs/GaSb についても Al を電極としたチャネル長 $0.4\ \mu\text{m}$ の試料において同様の測定が Delft 大を中心としたチームによって報告されている [19]。さらに Delft 大の実験ではあるゲート電圧の範囲で Fraunhofer 振動に通常の倍の周期をもつ振動成分が観測されており、マヨラナゼロモードとの関連の可能性が議論されているが、これについては別の解釈も提案されている [20]。

また Delft 大のグループは InAs/GaSb 試料に横磁場を加えることでバンド反転 - 非反転の遷移を観測している [21]。横磁場によって InAs の電子サブバンドと GaSb の正孔サブバンドは k 空間で相対的にずれるが、非バンド反転領域ではもともとバンドのオーバーラップがないためバンドギャップは変化しないのに対し、バンド反転領域ではエネルギー的にオーバーラップしたバンドが k 空間で分離するためミニギャップが消失して半金属的になる。このように横磁場によって異なる層に属するサブバンドを k 空間でずらす手法は InAs/GaSb 系でも以前から行われていたが、フロントゲートとバックゲートを有するデュアルゲート構造を用いてバンド反転領域から非反転領域への遷移を一つの試料で見たのは初めてである。この実験で気が付く

のは、非バンド反転領域においても試料の抵抗がかなり低いことである。バンド反転領域ではギャップが小さいため、残留バルク伝導によって抵抗が低くなることはあるが、非バンド反転領域ではエネルギーギャップが大きいのでバルク伝導は抑制されるはずである。

この疑問に答えるように、最近になって Copenhagen 大を中心とした Delft 大を含む複数のグループによるチームは、InAs 層が薄くバンド反転していない InAs/GaSb 試料においても試料端に伝導チャンネルが存在し、フェルミ準位がバンドギャップ中にある場合、電流が試料端に沿って流れていることを伝導測定と scanning SQUID による電流の実空間マッピングの両面から示している [22]。伝導測定では試料の 2 端子抵抗は試料端の長さにほぼ比例し、試料端 $0.3\ \mu\text{m}$ では抵抗が $h/2e^2$ よりもずっと小さい値まで下がっており、トポロジカルなエッジ状態とは別物の trivial なエッジチャンネルが存在することを示している。

実は InAs/GaSb 系においてエッチングによって作ったメサの側面に伝導層ができる場合があることは以前から知られており、赤外検出器においては暗電流となるため、それを低減するための研究が行われている。上記の研究チームは複数の研究機関でプロセスを行い、結果が再現することを示しているが、一方、我々のグループでは非バンド反転領域では試料は良い絶縁性を示しており [10]、プロセスやウェハに対する依存性が考えられる。特に InAs/GaSb 系の場合、InAs と GaSb で化学的な性質が異なるため、ウェットエッチングの場合は選択エッチが可能である反面、別の難しさがある。(一方、ドライエッチングの場合、試料への損傷が問題となる。)

我々のグループではバンド反転領域から出発し、ゲート電圧によって残留バルク伝導を抑制することでエッジ伝導が支配的な領域に到達することができている [23]。原理的にはさらにゲート電圧を加えれば非バンド反転領域に到達するはずであるが、ゲートリークの問題があり、まだそれには至っていない。より低いゲート電圧でバンド反転領域と非反転領域を行き来できるようにウェハ構造の改良が必要である。trivial なエッジ伝導のない試料においてバンド反転領域と非反転領域を行き来することができればゲート電圧によってエッジチャンネルの存在を on/off できることになり、それを示すことは重要なステップである。

以上、2 次元トポロジカル絶縁体の実験について HgTe/CdTe と InAs/GaSb に限っておおまかに紹介した。3 次元に比べて進展が遅かった 2 次元トポロジカル絶縁体の研究であるが、ここ数年でいろいろな展開があったことが伝われば幸いであるが、実際に研究を

している者としては大変な状況になってきたというのが正直なところである。

参考文献

- [1] B. A. Bernevig, T. L. Hughes, and S.-C. Zhang, Science **314**, 1757 (2006).
- [2] C. Liu et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 236601 (2008).
- [3] I. K. Drozdov et al., Nature Physics **10**, 664 (2014).
- [4] 「トポロジカル絶縁体入門」安藤陽一
- [5] M. König, et al., Science **318**, 766 (2007).
- [6] M. König, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 031007 (2008).
- [7] L. J. Cooper et al., Phys. Rev. B **57**, 11915 (1998).
- [8] C. Charpentier et al., Appl. Phys. Lett. **103**, 112102 (2013)
- [9] I. Knez et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 136603 (2011).
- [10] K. Suzuki et al., Phys. Rev. B **87**, 235311 (2013).
- [11] L. Du et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 096802 (2015).
- [12] J. I. Värynen et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 216402 (2013); Phys. Rev. B **90**, 115309 (2014).
- [13] A. Roth et al., Science **325**, 294 (2009).
- [14] K. C. Nowack et al., Nature Materials **12**, 787 (2013).
- [15] E. M. Spanton et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 026804 (2014).
- [16] C. Brüne et al., Nature Physics **8**, 485 (2012).
- [17] I. Knez et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 186603 (2012).
- [18] S. Hart et al., Nature Physics **10**, 638 (2014).
- [19] V. S. Pribiag et al., Nature Nanotechnology **10**, 593 (2015).
- [20] B. Baxevanis, V. P. Ostroukh, and C. W. J. Beenakker, Phys. Rev. B **91**, 041409(R) (2015).
- [21] F. Qu et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 036803 (2015).
- [22] F. Nichelle et al., arXiv:1511.01728.
- [23] K. Suzuki et al. Phys. Rev. B **91**, 245309 (2015).

著者紹介



むらき こうじ

1965 年東京都出身 1994 年 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
同年 日本電信電話(株) (NTT) 基礎研究所 1999 年 NTT 物性科学基礎研究所
現在 同研究所 量子電子物性研究部 量子固体物性研究グループ グループリーダー, 上席特別研究員 (この間 2001 ~ 2002 ドイツ・マックスプランク研究所 客員研究員を併任)
分子線エピタキシーによる高易動度 2 次元電子系の成長と電気伝導測定を通して主に分数量子ホール系の研究を行ってきた。



まえの・よしてる

強相関係のトポロジカル超伝導と 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」では、電子間の相互作用が強い物質（強相関物質）で発現する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進める。世界的にトポロジカル量子現象の研究が著しい勢いで展開される中、トポロジカル超伝導、遷移金属酸化物など、我が国発のオリジナル物質や独自の強みを生かしたテーマでの研究に特に力を注いでいる。

私のグループでは A01 連携研究者の米澤進吾助教や寺嶋孝仁教授とともに、遷移金属酸化物を主な舞台として、微細加工・接合系も含め、強相関トポロジカル現象の物理を発展させる。特にトポロジカル超伝導状態に特有の新奇現象を確立したいと考えている。具体的には飛躍的展開を狙って、これまでの成果も踏まえたテーマと、新たな物質系や研究手法に基づくテーマを組み合わせ、強相関物質でのトポロジカル相の研究を進める。

- (1) 新奇カイラル超伝導現象の実証：A01 分担者の松田祐司教授らによって URu_2Si_2 で観測されたカイラル超伝導揺らぎによる巨大ネルンスト効果は、カイラル超伝導性が観測されている Sr_2RuO_4 でも存在することが期待される。A01 分担者の藤本聡教授らによる理論とも比較して、この新奇なトポロジカル超伝導効果を確立したい。
- (2) 奇周波数超伝導状態の実証： Sr_2RuO_4 単結晶基板上に強磁性金属の SrRuO_3 薄膜をエピタキシャル成長させた系で、強磁性金属 / スピン三重項超伝導体接合での近接効果を研究している。このテーマでは国内外の共同研究の展開によって、強磁性体中に誘起されたスピン三重項対振幅と奇周波数超伝導、さらにトポロジカル超伝導との関係性を明らかにする。また、 Sr_2RuO_4 の微小単結晶における常磁性マイスナー効果観測に向けた領域内共同研究も進める。
- (3) マヨラナ準粒子の実証に向けた実験：マヨラナ準粒子の実証に向け、スピン三重項超伝導体の微小リングでの半整数量子化磁束の観測を目指す。
- (4) 非平衡状態でのトポロジカル相の探索：非平衡状態を含めた強相関系特有の物質制御性を生かすことで新たなトポロジカル相やトポロジカル量子相転移の発現が期待される。我々はモット絶縁体 Ca_2RuO_4 などを対象に、国内外の共同研究者の力も借りて、電流の下でのモット絶縁相の変化を調べている。この研究は本領域 PD の Chanchal Sow 博士を中心に進めている。

1957 年京都市出身。1979 年京都大学理学部卒業、1984 年カリフォルニア大学サンディエゴ校大学院博士課程修了。広島大学理学部 助教授などを経て現職。1988 年ー1989 年には、スイス連邦 IBM チューリッヒ研究所においてノーベル受賞者ペドノルツ博士のもとで高温超伝導を研究。低温物理学を専門とし、ルテニウム酸化物における超伝導の発見とスピン三重項状態の研究など、新たな研究分野の発展に取り組む。

- (5) 超伝導化トポロジカル絶縁体でのトポロジカル超伝導相の解明：このテーマは A01 連携研究者の米澤進吾助教が中心に、B01 の瀬川耕司教授、安藤陽一教授のグループとの共同研究で、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶の方向制御磁場中の比熱から、その超伝導対称性を解明する研究を進めている。

今年度から新たな枠組みの「国際活動支援班」の予算が認められたのは本新学術領域にとってはまさに朗報である。運営面では、“Topo-Q”と名付けたトポロジカル量子物質に関する国際ネットワークの構築のために、海外パートナーとのアライアンス・ワークショップ開催の企画や人材交流プログラムの推進などで本領域の活動にお役に立てるよう努力する所存である。

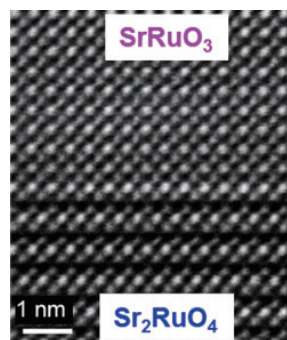


図 1： $\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 系の界面の透過顕微鏡 (TEM) 像

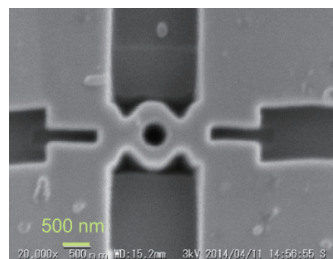


図 2： Sr_2RuO_4 単結晶を微細加工した超伝導リング

強相関系の新奇素励起の探索

松田祐司 / 京都大学 大学院理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 教授

我々のグループは、強相関電子系や量子スピン系における新奇な（できればトポロジカルな）素励起現象を探索しています。現在興味を持って研究室で取り組んでいるテーマは、強相関電子系の界面、エキゾチック超伝導状態、新奇電子状態、量子スピン系です。具体的には

- (1) 重い電子系超伝導体の人工超格子の電子状態
- (2) 重い電子系一層膜における超伝導と STM による電子状態の観測
- (3) 2次元近藤格子の近藤ホールの直接観測
- (4) 鉄系超伝導体の超伝導ギャップ構造 BCS-BEC クロスオーバー、新奇超伝導相、ディラック電子
- (5) ウラン化合物の隠れた秩序と超伝導
- (6) カイラル超伝導体の素励起、カイラルエッジ電流、熱電効果
- (7) 銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ
- (8) スピン液体の新奇素励起

等です。最近やっと走査トンネル顕微鏡が立ち上がりました。(下図)

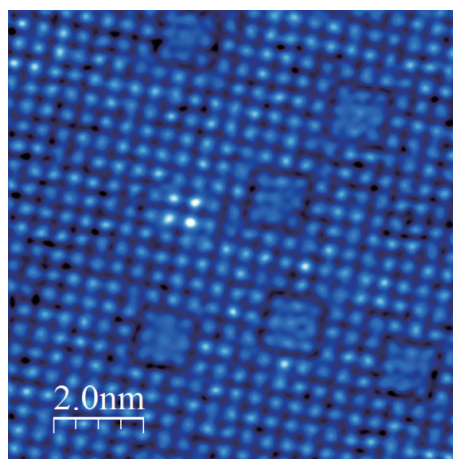


まつだ・ゆうじ

高知県出身

東京大学で学位取得後、東京大学教養学部、プリンストン大学、北海道大学理学部、東京大学物性研究所、をへて2004年より現職。

最近一番驚いたこと：エジプトでラクダに乗ったとき「お前はポーランド人か」と聞かれました。



図：分子線エピタキシー法で作成した重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ の STM トポ像。明るく光っているのは In 原子。特に強く光っている In の中心には Ce を La で置換した近藤ホールが存在。

トポロジカル相の物質開拓

高木 英典 / 東京大学 大学院理学系研究科、
マックス・プランク研究所



たかぎ・ひでのり

関連電子物理とトポロジカル物理の出会いを体現する、新しく、面白い物質を開発することを目指しています。

今から10年近く前にハイパーカゴメ構造を有する $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ において量子スピン液体挙動を見つけたことをきっかけに、物質開発の舞台としてのイリジウム酸化物を意識するようになりました。その後、層状のイリジウム酸化物 Sr_2IrO_4 でスピン軌道相互作用誘起の $J_{\text{eff}}=1/2$ モット絶縁体相の存在を、磁気×線共鳴回折を見出しました。この時点で、スピン軌道相互作用と強相関の問題を研究の切り口として意識するようになりました。ここ5、6年重い元素イリジウムを含む複合酸化物を舞台として、電子相関とスピン軌道相互作用の相関の協奏・競合に伴う物性、例えば、スピン軌道相互作用誘起の二次元ハイゼンベルグ反強磁性、キタエフ型スピン液体の開発、ディラックノード半金属-磁性絶縁体転移の開拓を手掛けてきました。(基盤研究(S))期待した物性の中に相関トポロジカル相が含まれていたことは言うまでもありません。

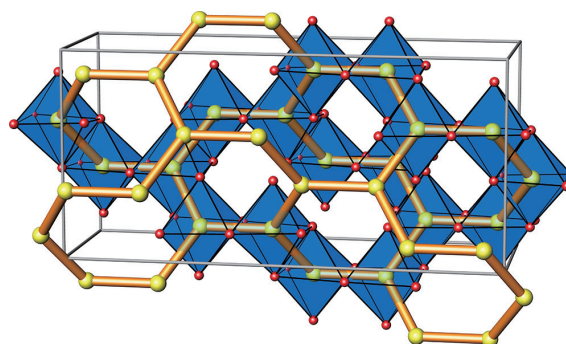
Sr_2IrO_4 を舞台とする二次元ハイゼンベルグ磁性の話は、実験的に確証を得て、最近では銅酸化物との比較の視点から、ドーピング効果に注目に集まっています。キタエフスピン液体ではそのマテリアライゼーションとして、二次元ハニカム α - Li_2IrO_3 から始めて、3次元版であるハイパーハニカム格子の物質 β - Li_2IrO_3 を見つける(研究室の助教だった高山知弘氏による)ことができました。しかしながら、おそらくはキタエフ型以外の相互作用の存在によって、現実の物質では複雑な長距離秩序が出現することがわかってきました。 SrIrO_3 を舞台とするディラックノード半金属のテーマでは、薄膜超格子を使ってノードにギャップを開けるところまで来ました。(研究員だった松野丈夫氏と平井大悟郎氏による。)トポロジカル物理の視点が重要な役割を果たす、後者の二つのテーマで、いまだにトポロジカルなところまで踏み込めていないのが悔しいところで、ここを何とかするとイリジウム酸化物を舞台とするスピン軌道相互作用と強相関の話が決定的に盛り上がると信じています。踏み込み足りない部分をこの領域に持ち込んで、真の相関トポロジカル相を発信したいと計画しています。

成算がないわけではありません。最近、ハイパーハニカム格子のイリジウム酸化物で、圧力下で磁場誘起のモーメントの消失を観測したのを皮切りに、北川健太郎氏との共同研究で、複数のハニカム関連物質で量子スピン液体挙動のような振る舞いが見えてきていま

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻教授、マックスプランク固体研究所所長(ディレクタ)、シュトットガルト大学数学物理学部 Alexander von Humboldt 教授。1961年東京生まれ。1983年東大工学部物理工学科卒、1989年工学博士。ベル研究所研究員、東大講師、助教授を経て、1999年東大教授。2013年よりドイツマックスプランク固体研究所の所長兼務、日本とドイツを往復する日々を送る。

す。まだキタエフ液体なのかどうかもわかりませんが、自分なりにとても楽しみにしているネタです。もちろん、次の面白い物質を見つけないと、この領域での発展はありませんので、だんだん重心を物質開発の方に移していくつもりです。電子相関の切り口ではありませんが。アンチペロブスカイト Sr_3PbO や関連物質のプロジェクトがすでに走っています。

最後に、マックスプランク研究所との掛け持ちで、人の二倍働かなければならないのですが、実際には二倍の時間働くことはできずにあります。すでにいろいろと迷惑おかけしてしまっております。その補てんに、領域の国際化でお役に立てればと思っています。花火を打ち上げただけで終わらないように気を付けます。若手の人が実質的な共同研究を通じて、異文化を肌で感じ、日本の強みと良さ(弱みだけでなく)を意識してもらえるような機会を、あまり背伸びしない範囲で、しかし持続的に提供したいと考えております。



ハイパーハニカム格子 β - Li_2IrO_3 の結晶構造。すべてのIrは等価で、ハニカム格子と同様3本の 120° 結合で結ばれている。酸素を通じた超交換相互作用だけ考えるとキタエフモデルの3次元版になっており、基底状態は厳密にキタエフ型スピン液体であることが証明されている。

強相関電子系における トポロジカル超伝導状態の探索

鄭 国慶 / 岡山大学 大学院自然科学研究科 教授

5年前の新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」(代表: 前野悦輝先生)に続き、本新学術領域研究プロジェクトに参加させていただき大変光栄に思います。5年間どうぞよろしくお願いいたします。今回は空間反転対称性の破れた超伝導体 [1] やドーブしたトポロジカル絶縁体におけるトポロジカル超伝導状態 [2] の探索が主なテーマでしたが、今回は電子間相互作用が働く系でのトポロジカル量子現象の研究を分担させていただく予定です。

専門は低温物性物理で、主に核磁気共鳴 (NMR) を用いた超伝導等の研究を行っています。試料の合成、透過型電子顕微鏡やX線を用いた結晶構造解析、バンド計算なども行っています。低温 (20 mK) や高圧 (4 GPa) 下での測定が常時研究室内でできるようになっており、7~8年前にパルス強磁場 (56 T) 下でのNMR測定も成功させているので、お役に立てそうな仕事があれば気軽に声をかけていただければと思います。

さて、本領域で予定している研究テーマを二つ紹介させていただきます。一つは3d元素Crをベースにした化合物におけるトポロジカル超伝導状態の探索です。遷移金属の酸化物(銅酸化物高温超伝導体や水和コバルト酸化物)や遷移金属のカルゲンナイド(鉄砒素系高温超伝導体)などが強相関物質として有名ですが、最近Crをベースにした化合物群 $A_2Cr_3As_3$ ($A=K, Rb, Cs$)で超伝導が発見され [3]、強相関電子系で新しい超伝導仲間が増えました。 $Rb_2Cr_3As_3$ ($T_c=4.8K$)では超伝導ギャップ関数に点状の節 (point nodes) が存在すること (図1)、強磁性ゆらぎが低温で発達すること (図2)などが我々の研究によって明らかになりました [4]。液体 3He の物理が固体である本物質(群)で実現する可能性が高く、今後単結晶を用いた研究進捗が楽しみ

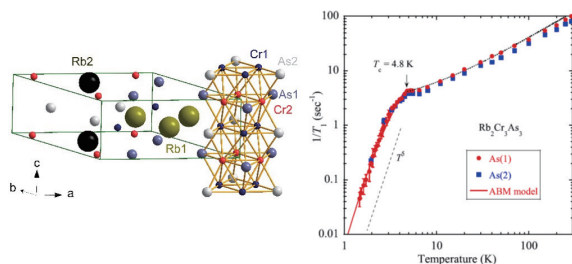
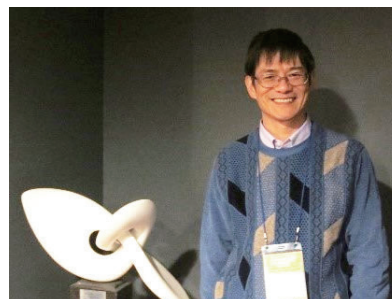


図1：左： $Rb_2Cr_3As_3$ の結晶構造。右： $Rb_2Cr_3As_3$ におけるスピン格子緩和率 $1/T_1$ の温度依存性。 T_c 以下の曲線は 3He で提案されたギャップ関数 (ABM モデル) の温度依存性。



グオチン・ゼン

1962年中国福建省生まれ。1990年3月大阪大学博士課程修了。大阪大学助手、助教授を経て、2004年4月より岡山大学教授。専門は核磁気共鳴法を用いた超伝導や電子相関の研究。

です。また、この物質は空間反転対称性が破れており、反対称スピン軌道相互作用が60meV程度に達しているので、その役割にも興味を持っています。

“岡山発”の超伝導体も強相関トポロジカル物質としての可能性を秘めています。一例として、六方晶構造を有する $SrPtAs$ では5d電子間の相互作用と5d電子に起因する強いスピン軌道相互作用が興味深い物理を織りなしています [5-6]。特に、バンド構造やハチの巢結晶構造がドーブしたグラフィンと類似性を持ち、d+id超伝導状態が実現しやすいと理論的に提案されています。このようなカイラル超伝導状態はトポロジカル非自明です。今後はバンド構造やスピン軌道相互作用の制御等を行いながら、トポロジカル量子物理現象を探索していきたいと考えています。

- [1] S. Harada, J. J. Zhou, Y. G. Yao, Y. Inada, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B **86**, 220502(R) (2012).
- [2] K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, and G.-q. Zheng, arXiv:1512.07086
- [3] J. K. Bao et al, Phys. Rev. X **5**, 011013 (2015).
- [4] J. Yang, et al, Phys. Rev. Lett. **115**, 147002 (2015).
- [5] S. Pyon, K. Kudo, and M. Nohara, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 053701 (2012).
- [6] K. Matano, K. Arima, S. Maeda, Y. Nishikubo, K. Kudo, M. Nohara, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B **89**, 140504(R) (2014).

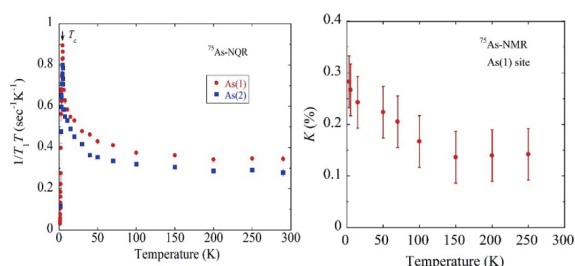


図2： $Rb_2Cr_3As_3$ における $1/T_1T$ とナイトシフト K はともに温度の降下に連れて増大し、強磁性スピンゆらぎの存在を示す。

強相関トポロジカル物質

藤本 聡 / 大阪大学 基礎工学研究科 物性物理工学領域 教授



ふじもと・さとし

大阪府出身。京都大学大学院理学研究科博士課程修了。同大助手、助教、准教授を経て2014年より現職。

本新学術領域におけるわたしの主要テーマは「強相関物質におけるトポロジカル絶縁体・超伝導体の理論」です。トポロジカル絶縁体はパリティの異なるバンド間でバンド反転が起こり、スピン軌道相互作用でエネルギーギャップが開くことによって実現しますが、昔から知られている強相関バンド絶縁体であるf電子系の近藤絶縁体では、d軌道とf軌道とのスピン軌道相互作用によるバンド反転が必然的に存在するため、トポロジカル絶縁体の実現しやすい状況になっていません。また、強い電子相関効果によるエネルギースケールの繰り込みのため、ギャップのサイズは比較的小さく、磁場、圧力等でコントロールしやすい点も重要です。時間反転対称性で守られたトポロジカル絶縁体に磁場や磁性不純物を導入するなどしてギャップを壊すとWeyl(半)金属と呼ばれるトポロジカルな金属状態が実現することが知られています。バルクギャップがmeVオーダーという小さいエネルギースケールであるトポロジカル近藤絶縁体に磁場や磁性不純物を導入してWeyl(半)金属を実現することも、将来の重要課題の一つでしょう。また、強相関電子系では、しばしばスピン三重項クーパー対やカイラル超伝導など非従来型の超伝導状態が実現しますが、これらはトポロジカル超伝導やWeyl超伝導を実現する格好の舞台となっています。また、強相関物質の典型例である量子磁性モット絶縁体においても、量子スピン液体状態としてトポロジカル相が実現する可能性があります。このように強相関電子系物質は新規なトポロジカル相を開拓する上で有望な研究対象であると言えます。

我々が最近、取り組んでいるテーマの一つに重い電子系超伝導体であり、かつWeyl超伝導の有力候補物質である URu_2Si_2 において、Weylとしての特性がどのような物理現象として現れるかという問題があります。Weyl超伝導状態では試料表面に低エネルギー準粒子状態としてMajorana Fermi arcが現れ、これが低温領域で緩和時間に依存しない無散逸な異常熱ホール効果を生み出すことが知られています。しかしながら、その大きさは非常に小さく、実験観測は、将来の重要でチャレンジングな課題です。これに対して我々は、むしろ超伝導転移温度以上の高温領域で、トポロジカルな特徴が超伝導揺らぎ現象として発現しないであろうかと考え、実際それが巨大Nernst効果として実現することを見出しました。Weyl超伝導は時間反転対称性の破れたカイラル超伝導状態として実現し、カイラル超伝導におけるポイントノード励起がWeylフェルミオンとして振舞います。我々は超伝導転移温度以上で

印加磁場によってカイラリティが分極したクーパー対の揺らぎが電子に対してskew散乱を起こし、横方向の電子の流れを生み出して巨大なNernst効果をもたらすことを理論的に予言しました。これは従来の磁場によるローレンツ力に基づく超伝導揺らぎのNernst効果とは、全く異なる新しい物理機構であり、我々はこれを「Berry位相揺らぎ機構」と名付けました。この新規な巨大Nernst効果は京都大学の松田研究室によって URu_2Si_2 において観測され、この物質がWeyl超伝導体の有力候補であることを裏付けました。

また、Weyl(半)金属・超伝導の重要な特徴としてchiral量子異常が、どのような物性現象として実現されるかという問題もあります。この問題に関連して、我々はWeyl(半)金属の結晶構造に転位などの欠陥が存在すると、それがWeyl電子に対して電磁場のような作用をし、転位線上に無散逸電流を誘起することを見出しました。これはWeyl電子が波数空間でBerry曲率を伴うことに起因しており、前述のchiral量子異常と密接に関連した物理現象です。この新規トポロジカル現象に近い将来、実験的に観測されることを期待したいです。また、chiral量子異常はWeyl超伝導でも何らかの形で発現することが予想されます。例えば、磁場下の渦糸状態で上記と同様の効果が実現しないかという問題は、Weylフェルミオンにおけるchiral vortical効果とも関連して、大変興味深いものであり、現在、精力的に取り組んでいます。

また、上記の研究課題に加えて、トポロジカル超伝導におけるMajorana粒子による非アーベル量子統計も、非常に重要なテーマです。これをいかにして実現して実験観測可能にするかは、将来的なトポロジカル量子計算への応用のみならず、基礎物理の新概念を確立する上でも極めて重要です。しかし、どのようにすれば誰もが納得出来る形で非アーベル統計を実現したと言えるのかは未だ明確な答えがありません。粒子の入れ替え操作が非可換であることが、どのようなユニークな（できればマクロな）物理現象として発現するのかを明らかにすることが理論研究者に課された課題であり、これも本新学術領域を通してやり遂げたいと考えています。

奇周波数クーパー対の物理

浅野 泰寛 / 北海道大学 大学院工学研究院応用物理学部門 准教授

奇周波数対称性を持つクーパー対が引き起こす多彩な物理現象を理論的に研究してきました。トポロジカルに非自明な超伝導体の表面にはトポロジカルに守られた束縛状態が存在しますが、これは必ず奇周波数クーパー対を伴っています。これまで分かっている奇周波数クーパー対の性質は「常磁性」であることです。様々な超伝導の教科書を紐解くと、必ずマイスナー効果の説明に行きあたるでしょう。即ち、通常のクーパー対の凝縮体は「反磁性」なのです。この「通常の」というところは、「偶周波数対称性を持つ」と置き換えられます。超伝導試料を小さくしていくと表面の部分、即ち奇周波数クーパー対がいる部分が相対的に大きくなります。その結果、微小かつトポロジカルに非自明な超伝導体は、理想的には常磁性になり得るのです [1]。「常」という漢字は「ごく普通」という響きを持ちますが、常磁性は磁場を引き込むという大変奇妙な性質のことを指します。調べて不思議だと想ったのは、そういう超伝導相も安定に存在し得ることでした。

特にルテニウム酸化物のような、スピン 3 重項奇パリティの超伝導体の表面には奇周波数クーパー対と同時にマヨラナ準粒子が束縛されています。このときに、超伝導体に金属を接合して電気伝導率を調べると、どんなに金属が汚れていてもゼロバイアスの微分コンダクタンスがある量子化値を示す事が示せます。この現象の物理的な意味を 10 年ほど考えていたのですが、やっと満足のいく説明を見出しました [2]。ある演算子が「ハミルトニアンと反可換」だという、カイラル対称性が説明の鍵でした。自分ではこうした対称性を決して思いつけなくて、本領域に先立つ前野先生の新学術領域研究で、多様な分野の方々と実りある議論ができたことが、とても助けになりました。

本新学術領域研究では、これらの研究を継続しつつ発展課題を模索するつもりです。特に奇周波数クーパー対を実験でどのように観測したらよいか、という課題に取り組むつもりです。

[1] S.-I. Suzuki and Y. Asano, Phys. Rev. B **91**, 214510 (2015).

[2] S. Ikegaya, Y. Asano and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **91**, 174511 (2015).



あさの・やすひろ

1995 年 名古屋大学工学研究科
博士後期課程修了

1995 年 北海道大学工学部助手
2008 年 北海道大学工学研究院
講師

2011 年 北海道大学工学研究院
准教授、現在に至る

磁性体の強相関トポロジカル現象

宇田川 将文 / 学習院大学 理学部物理学科 准教授

幾何学的フラストレーション系とは局所的な格子構造が自明なエネルギーの最適化を妨げるシステムを指します。フラストレーションの強い磁性体や遍歴電子系でどのような相が安定化するか解き明かすのは一般的に難しい問題ですが、しばしばトポロジカルに非自明な多体状態が形成される事が知られています。量子スピナイスに代表されるスピン液体状態や非共面的磁気秩序の安定化に伴う磁気 Chern 絶縁体はその代表的な例です。

これらのトポロジカル相の特徴はその励起構造及び動的性質に最も顕著に現れると考えています。量子スピナイスではスピン反転が分裂することによって生じる、モノポールと呼ばれる分数励起が存在します。この例を初めとして、量子スピン液体ではスピンや電荷など、系を構成する自然な自由度の量子数の変化が、より小さい基本単位に分裂して振る舞う、分数化という現象が見られます。また、磁気 Chern 絶縁体は磁気秩序によって量子化ホール伝導度が生じる、一種の整数量子 Hall 系と理解する事が出来ます。しかしながら、外部磁場によって発現する整数量子 Hall 相とは異なり、それ自体ダイナミクスをもつ磁気自由度によって誘起される相であるという点が、著しい特徴を産み出します。すなわち、平衡 Hall 電流などの「静的な」物理量は整数量子 Hall 系と類似する一方で、磁気自由度のダイナミクスやキャリアドーピングに伴う「動的な」性質は整数量子 Hall 系と著しく異なることが期待されるわけです。

これまで一体問題を中心に急速な発展を遂げて来たトポロジカル相の物理ですが、励起特性や動的性質といった多体効果の世界は、今まで理解されて来た以上の豊富な物理が潜むフロンティアだと考えます。私はフラストレート磁性体を中心に、トポロジカル相の多体効果の研究を通じて、この新学術領域に貢献して行きたいと考えています。



うだかわ・まさふみ

1979 年千葉県生まれ。2002 年東京大学理学部卒業、2006 年同大学院理学系研究科博士課程中退、同大学院工学系研究科物理工学専攻に助手として採用。2007 年東京大学大学院理学系研究科にて、理学博士(論文博士)取得。2015 年から現職。2011-12 年には、ドレスデンの Max Planck 研究所 (MPI-PKS) において、Roderich Moessner 教授のもと、スピナイスの研究に従事。スピナイスを初めとして、幾何学的フラストレーションをもつ磁性体を専門とし、特に遍歴する電子や励起に対するフラストレーションの効果に注目して研究を行って来た。

新奇トポロジカル物質のスピ分解 ARPES

佐藤宇史 / 東北大学 大学院理学研究科 准教授

トポロジカル絶縁体を中心とした新奇なトポロジカル物質の高分解能スピ分解角度分解光電子分光 (angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES) を行っています。電子は「エネルギー」「運動量」「スピン」という自由度を持っていますが、スピ分解 ARPES という手法は、この物理量のすべてを決定できる強力な実験手法です。しかしながら、これまでは効率の低さのため肝心のスピン検出が困難で、トポロジカル物質をはじめとする新機能物質の電子状態解明に向けて障害となってきました。この問題を克服するために、東北大学においてモット検出器および超低速電子線回折 (VLEED) 装置をベースとした高分解能スピ分解光電子分光装置の開発を行い、様々な改良の結果、スピ分解時において 5 meV という超高エネルギー分解能を達成しました。現在は、本装置や高輝度放射光を用いて、トポロジカル絶縁体とその関連物質の電子構造の解明を行っています。

これまでは、新学術領域「トポロジカル量子現象」で公募研究を行い、阪大産研の瀬川・安藤グループと共同で、トポロジカル絶縁体におけるディラックコーン表面状態の制御や新型トポロジカル物質の同定を中心に据えた研究をしてきました。前者については、ディラックコーンの質量・キャリア制御、界面ディラックコーンの観測、金属とトポロジカル絶縁体との接合におけるトポロジカル近接効果の観測などがその成果です。また後者については、IV-VI 族半導体 SnTe が、2 重のディラックコーンをもつ新種のトポロジカル物質「トポロジカル結晶絶縁体」であることを実験的に検証し、 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 固溶系におけるトポロジカル量子相転移に伴う電子状態の変化を明らかにしました。

現在は、トポロジカル絶縁体だけでなく、ディラック半金属やワイル半金属などの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に注力しています。バルク・薄膜の物質合成グループや理論グループとも緊密に連携することで、エキゾチックなトポロジカル量子現象に密接に関わるフェルミ準位近傍の微細電子構造を明らかにしていきたいと考えています。



さとう・たかふみ

B01 計画班 研究代表。東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了：現在、同研究科准教授。秋田県出身：大雪には慣れています。料理が趣味。調味料の微妙なブレンドが実験家の腕の見せどころ。

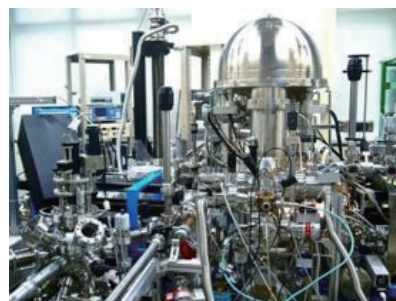


図 1：ミニモット検出器を搭載した高分解能スピ分解光電子分光装置 (東北大学)

弱相関電子系を舞台とした トポロジカル絶縁体・超伝導体の実験研究

瀬川 耕司 / 京都産業大学理学部物理科学科 教授

この数年間、トポロジカル絶縁体・超伝導体の実験研究を大阪大学産業科学研究所の安藤研究室にて行ってきました。

トポロジカル絶縁体の研究は理論での予言に始まり、それを実験が実現するというサイクルで進行する、私の知る限り物理学研究史上類を見ない理論主導で発展している分野です。それはトポロジカル結晶絶縁体の登場、ディラック半金属やワイル半金属と研究の対象が移り変わっても同様に続いている傾向です。しかし、実験によって初めてわかったこともありました。たとえば、タリウム系でのトポロジカル量子相転移は実験によって初めて明らかにされたことであると言えます [1, 2]。具体的には、 TlBiS_2 が理論予測に反してトポロジカルに自明な絶縁体であったことが実験で初めて明らかになり、その結果としてトポロジカル絶縁体である TlBiSe_2 との固溶系ではトポロジカルに非自明な相と自明な相の間で量子相転移が実現します。この発見は残念ながら実験が新しい局面を切り開いたようなものではなく、トポロジカルに非自明 / 自明の境界は結晶構造なども関わるため、その微調整は実験なくしてはできない、という程度の意味しか持ちません。とはいえ、トポロジカル量子相転移が見られる物質系は意外にも少なく、動的に制御できる外部パラメータでトポロジカルな性質をオン／オフできる物質はまだ見つかっていませんので、そのような物質系を実現したいと考えています。

また、トポロジカル超伝導の研究では、物質を超伝導にすること自体が理論的に予測できることではないため、実験の活躍する余地がまだ大きい分野です。既知のトポロジカル超伝導体候補物質の物性のさらなる探究に加え、新奇物質・物性の開拓を目指し、トポロジカル絶縁体と同様に弱相関電子を主な舞台として、実験家としてのささやかな抵抗を続けていきたいと考えています。

[1] S.-Y. Xu et al., Science **332**, 560 (2011).

[2] T. Sato, K.S. Y. Ando and T. Takahashi et al., Nat. Phys. **7**, 840 (2011).



せがわ・こうじ

1971 年東京都生まれ。1994 年京都大学理学部卒業、1996 年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了（六本木のころの物性研究所、石川研究室）。2005 年博士（理学）。（財）電力中央研究所研究員、大阪大学（産業科学研究所・安藤研究室）助教、准教授を経て 2015 年から現職。専門は単結晶作製と輸送特性の測定。その他、LabVIEW, Lua を使った測定プログラムづくり、パルスチューブ冷凍機周辺のお守りが得意。

トポロジカル超伝導、および接合系

柏谷 聡 / 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門、首席研究員

前新学術領域研究から引き続き、接合系の実験を中心としたトポロジカル超伝導、奇周波電子対等の研究に従事させていただきます。このようなあらたな分野ではトンネル効果自体が従来超伝導とは全く異なる性質を示すことが予想されるため、接合系を用いてトポロジカル超伝導にアプローチするための下地を整えながら研究を進めてきました。 Sr_2RuO_4 はトポロジカル超伝導の最有力候補と考えられてきましたので、 Sr_2RuO_4 を中心に測定を行ってきました。まずトポロジカルエッジ状態としてのアンドレーエフ束縛状態の形成に関して、ac (bc) 面に沿ったNIS型の接合作成を行い、ギャップ内に広く分布する分散関係を有するアンドレーエフ束縛状態の形成を確認しました [1]。また他の超伝導対称性を含めて、期待されるトンネルスペクトルを系統的にまとめ、NIS型接合におけるアンドレーエフ状態の概略をまとめました [2]。トンネル分光によりトポロジカルエッジ状態の検出は可能ですが、さらに詳細な位相情報、たとえばカイラル超伝導とヘリカル超伝導の区別などの判別が困難なため、ジョセフソンやSQUID等の実験に着手しました。まずSQUIDに関しては、Nb系マイクロSQUIDと Sr_2RuO_4 の集積デバイスを作成し、エッジ電流がSQUIDの測定感度内で存在しないことが明らかになりました。一方、ジョセフソン効果は、イリノイ大などの先行研究により、カイラルドメイン運動と思われる効果が存在することが知られています。我々はフラウンフォーファー干渉の対称性を議論し、同一デバイスの接合サイズを連続的に変化させた系統性を観測することにより、ドメイン運動と思われる効果は消失し、数ミクロン程度のサイズでは通常のジョセフソン効果が観測できることを明らかにしました [3]。これにより、ドメインサイズの見積もりが可能となり、またNb/ Sr_2RuO_4 のジョセフソン効果がドメインの影響を受けることなく議論できることになりました。エッジ電流が存在しないことはカイラル超伝導性とは合致しないと見えますが、いくつかの理論研究においてはそのような新しい状態の可能性も示唆されており、さらに多面的実験を行うことが必要と考えられます。本新学術領域では Sr_2RuO_4 に関しては超伝導対称性が解釈のあいまいの余地なく決定できる実験を目指します。また、他のトポロジカル超伝導候補物質にもトンネル実験を行い、トポロジカル超伝導性を確定させ、マヨラナ準粒子の検証への足がかりを確立させることを目指して実験を進める予定です。



かしわや・さとし

1962年生まれ、東京都出身。1988年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了、同年電子技術総合研究所入所。2001年より産業技術総合研究所、2013年より現職、現在に至る。最近は運動不足のため腹回りが気になり始め、職場までの道を歩くようにしている。

[1] S. Kashiwara et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 077003 (2011).

[2] S. Kashiwara et al., Physica E **55**, 25 (2014).

[3] K. Saitoh, et al., Phys. Rev.B (Rapid) **92**, 100504 (2015).

トポロジカル絶縁体超格子の物性開拓

塚崎 敦 / 東北大学金属材料研究所 教授

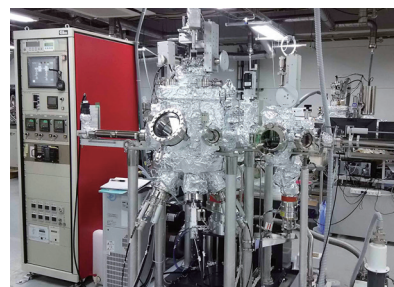
東北大学に異動してもうすぐ3年になります。トポロジカル絶縁体薄膜の研究は、FIRST プログラム「強相関量子科学：代表十倉好紀先生」の特任講師として東京大学大学院工学系研究科量子相エレクトロニクス研究センターに在籍していた時から関わらせてもらっています。現在も共同研究の形で研究グループに加わって、十倉研究室の学生と一緒に取り組んでいます。個人的に強く興味を持っているのは、異常ホール効果の量子化です。試料の磁化によってホール抵抗 (h/e^2) の量子化状態が誘起されて、ゼロ磁場で観測できることや磁化反転で制御できること、は2次元電子系における磁場誘起の量子ホール効果とは全く異なる新しい現象と思います。最近、薄膜積層構造の制御によって、例えば空間反転対称性を破るとどうなるかといった、構造と制御の点から研究を進めています。これらは、十倉先生、川崎先生、永長先生、理研研究員の方々および十倉研の学生たちと共同で進めています。

理研でのトポロジカル絶縁体研究が契機となって、新学術領域に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。本研究では、東北大金研に分子線エピタキシー (MBE) 装置を導入して新しい物質系に取り組みます。特に、これまであまり薄膜で研究されてきていない物質系を選んで、薄膜技術で何ができるか、にチャレンジしようと思っています。B 班班長の佐藤先生の研究グループと、MBE-ARPES の真空一貫搬送を行うことで、TI 薄膜試料の構造と電子構造の関連やワイル半金属に取り組みます。また、設備はないのですが、接合構造における電気伝導特性や電界効果を用いた物性制御に関する実験研究を行いたいと思っています。結果として、トポロジカル絶縁体の新しい設計指針を見出せないかと淡い期待を持っています。今のところ研究室は、スタッフと学生3-4名という構成で、競争分野に挑むには小さなグループですが、共同研究と強磁場施設などの共同利用でやっていこうと思っています。どうぞよろしくお願い致します。



つかざき・あつし

1976 年兵庫県生まれ。2000 年東京工業大学工学部卒業、2002 年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了、2005 年東北大学大学院理学研究科化学専攻博士後期課程修了。2005 年より東北大学金属材料研究所博士研究員、助教、2010 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講師、2012 年東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻准教授を経て、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 (2016 年 3 月まで)、および理化学研究所創発物性科学研究センター強相関界面研究グループ客員研究員兼務。



MBE 装置の導入が完了しました

トポロジカル超伝導の理論

田中 由喜夫 / 名古屋大学大学院工学研究科 教授



たなか・ゆきお

【1】新奇アンドレーエフ束縛状態の理論

トポロジカル超伝導体とはトポロジカルに保護されたアンドレーエフ表面束縛状態を有する超伝導体である。銅酸化物超伝導体などのいわゆる異方的超伝導体もトポロジカル超伝導体と呼ばれることが最近の研究により明らかになっている [1]。当初2次元異方的超伝導体研究が発展したが、3次元系ではよりトポロジカルに非自明な束縛状態が存在することが明らかになっている。3次元カイラル超伝導体のアンドレーエフ束縛状態のトポロジカルな構造を調べた。ここではポイントノードに由来するフェルミアーキとラインのノードに由来するフラット零エネルギー状態が共存する。前者は巻きつき数を作り出し後者はチャーン数を作り出す。超伝導体の結晶軸と表面の法線ベクトルの角度、スピン軌道相互作用による零エネルギー状態の不安定性を明らかにした。これらの成果は UPt_3 あるいは URu_2Si_2 のトンネル効果の解析の上で重要である [2]。またドーピングしたワイル半金属の超伝導に関する研究を行った。我々のグループは、時間反転対称性の破れたワイル半金属のBCS状態に十字型フラットバンドとでも言うべき特異な表面Andreev束縛の存在を初めて明らかにした。このアンドレーエフ束縛状態は、ワイル半金属が常伝導状態で有するフェルミアーキ（表面状態）がスピン偏極しているために、フェルミアーキは超伝導状態においても残り、十字型のアンドレーエフ束縛状態形成に寄与した [3]。またトポロジカル結晶絶縁体をドーピングした超伝導トポロジカル結晶絶縁体におけるアンドレーエフ束縛状態の計算も行い、超伝導トポロジカル絶縁体に見られるTwistした分散を持つ束縛状態は現れないことを明らかにした。[4]

【2】トポロジカル絶縁体上の超伝導体・強磁性体接合

トポロジカル絶縁体上の超伝導体・強磁性体接合においては、アンドレーエフ束縛状態がマヨラナ型準粒子として存在することが知られている。d波超伝導接合において特異な電流・位相差特性が現れることが明らかにした [5]。また強磁性体を用いない接合において外部磁場を加えることでマヨラナ型準粒子を制御することも明らかになった [6]。

【3】奇周波数超伝導ペアとマヨラナフェルミオンの理論

超伝導体上の磁気単原子鎖においては端にマヨラナフェルミオンができることが明らかになっている。この系の局所状態密度、ペアの対称性を詳しく解明し、

1962年生まれ。名古屋大学教授。これまで、異方的超伝導体におけるトンネル現象、新奇な超伝導対称性、超伝導発現機構、トポロジカル超伝導体・絶縁体などの理論研究を行ってきた。本領域では、奇周波数クーパー対等のこれまでの研究を発展させるだけでなく、ワイル半金属、原子層物質などの新奇トポロジカル物質、パラフェルミオン、カイラル磁気効果といった問題にも取り組みたい。

奇周波数クーパー対が遍く存在しマヨラナフェルミオンが存在する時は奇周波数クーパー対の振幅が著しく増大していることを明らかにした [7]。

これらの研究以外にも、異常Rashba金属・超伝導体接合のトンネル効果の理論 [8]、ワイル半金属における軸性流の理論 [9]、マヨラナフェルミオンのBraidingに関する数値計算 [10] などの成果があった。

[1] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011013 (2012).

[2] S. Kobayashi, Y. Tanaka, and M. Sato, Phys. Rev. B, Phys. Rev. B **92**, 214514 (2015).

[3] Bo Lu, Keiji Yada, Masatoshi Sato, and Yukio Tanaka, Phys. Rev. Lett. **114**, 096804 (2015).

[4] T. Hashimoto, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **92**, 174527 (2015).

[5] P. Burset, Bo Lu, G. Tkachov, Y. Tanaka, E. M. Hankiewicz, and B. Trauzettel, Phys. Rev. B **92**, 205424 (2015).

[6] Bo Lu, K. Yada, A. A. Golubov, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B. **92**, 100503(R) (2015).

[7] H. Ebisu, K. Yada, H. Kasai, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **91**, 054518 (2015).

[8] T. Fukumoto, K. Taguchi, S. Kobayashi, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **92**, 144514 (2015).

[9] K. Taguchi and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **91**, 054422 (2015).

[10] C. S. Amorim, K. Ebihara, A. Yamakage, Y. Tanaka, and M. Sato, Phys. Rev. B. **91**, 174305 (2015).



ふじさわ・としまさ

量子ホール効果における カイラルエッジ状態の非平衡輸送現象

藤澤 利正 / 東京工業大学大学院理工学研究科 教授

AlGaAs/GaAs など半導体ヘテロ接合の二次元電子系に強磁場を印加した際に出現する量子ホール効果は、古くから知られているトポロジカル系であり、量子化ホール抵抗など、その平衡状態に近い輸送特性や電子状態については比較的良好に理解されている。我々は、量子ホール系での非平衡状態の物性を明らかにするとともに、エッジ状態を利用した機能的なデバイスの提案を目指して研究を進めている。

整数量子ホール効果は、ランダウ占有率が整数となるときに、バルクは絶縁状態となり、試料端に形成されるカイラルなエッジ状態を介した伝導現象として理解することができる。しかし、非平衡状態となると、電子輸送による説明は破綻する。エッジ状態は、一次元電子系であるため、クーロン相互作用が非常に重要である。近年、エッジ状態の低エネルギー励起を、一次元電子系のモデルである朝永ラッティンジャー流体として理解する研究が進展している。一次元電子系の低エネルギー励起は電子の集団励起（プラズモン）であり、プラズモンのコヒーレント輸送として整理できると期待される。

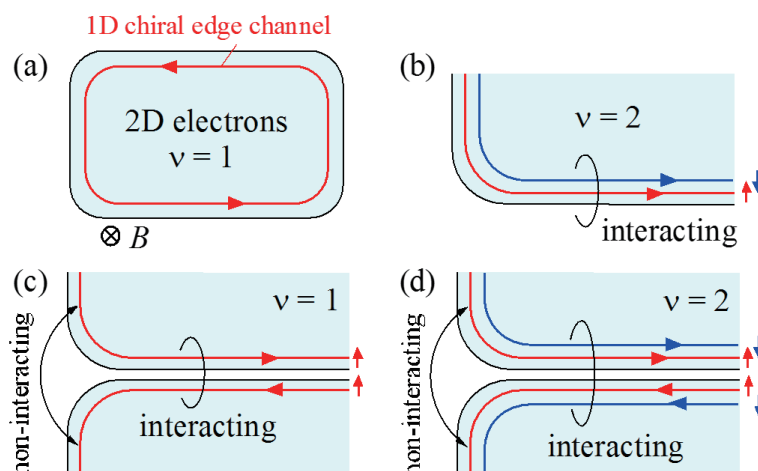
通常の（カイラルでない）双方向の（零磁場での）スピニフル量子細線と異なり、カイラルな量子ホール系では一方向伝導であり、ランダウ占有率によってスピニレス [占有率 1、図 (a)]、スピニフル [占有率 2、図 (b)] を選ぶことができる。さらに、対向するエッジチャンネルを近接させると、双方向のチャンネルを形成することもできる [図 (c,d)]。さらに、これらのチャネ

1991 年東京工業大学大学院博士課程修了。同年 NTT 基礎研究所（現在の物性科学基礎研究所）にて半導体ナノ構造、特に量子ドットでの単一電子ダイナミクスの研究に従事。2008 年東京工業大学極低温物性研究センター教授。量子ホールエッジチャンネルでの電荷ダイナミクスの研究を開始。2010 年より現職。トポロジカル（量子ホール）系でナノデバイスによる物性研究を中心に本計画研究を遂行している。

ルは、相互作用する程度に近接させることや、相互作用が無視できる程度に隔てることもできる。チャンネル間の相互作用によって、プラズモンの結合モードが形成され、朝永ラッティンジャー流体に特有のスピニ電荷分離や電荷分断化現象を詳細に測定することができる。

特に、二次元電子系を微細加工したナノ構造デバイス（量子ドット、量子ポイント接合、電子波・プラズモン干渉計）によって、様々な測定手法が開発されてきたことにより、系の非平衡状態を調べることが可能になってきた。我々も、時間分解の電荷測定、電子のエネルギー分光測定、相互相関電流雑音特性などの手法を用いて、カイラルエッジ状態の非平衡プラズモン輸送特性について研究を進めている。

このようなプラズモン輸送は、量子ホール系に限らず、種々のトポロジカル系のエッジ状態における輸送特性の理解にも貢献すると考えている。



分数量子ホール系の基底状態と準粒子

村木 康二 / NTT 物性科学基礎研究所

私が所属する NTT 物性科学基礎研究所の量子固体物性研究グループでは、半導体ヘテロ構造における 2 次元電子系や、それらをベースとした量子ドットなどのナノ構造における量子伝導の研究を行っています。この新学術領域では、私は計画研究 CO1 の研究分担者として、主に高易動度 GaAs/AlGaAs 2 次元電子系の分数量子ホール系と InAs/GaSb 量子スピンホール系を舞台とした「トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象」の研究を担当しています。ここでは分数量子ホール系の研究について簡単に紹介します。

分数量子ホール系における未解決の問題の 1 つとして占有率 $5/2$ の分数量子ホール効果があります。Moore-Read が Pfaffian 波動関数を提案し、その準粒子がもつ non-Abelian 統計を指摘したのは 1991 年ですが、 $5/2$ 状態の本質が何であるかについて未だにコンセンサスが得られたと言える状況にはなっていません。我々のグループでは 2012 年に NMR を用いて $5/2$ 状態がスピン偏極していることを示しましたが、このことは $5/2$ が Pfaffian または anti-Pfaffian 状態であるための必要条件ではありますが、十分条件ではありません。MIT-Harvard チームの準粒子トンネリングの実験は anti-Pfaffian 状態を支持していましたが、その後の準粒子トンネリングの実験では MIT や ETH のグループは (non-Abelian ではない) 331 状態のほうが実験と理論の一致が良いと主張しています。また Weizmann グループのショットノイズによる中性モードの観測は anti-Pfaffian のような hole-conjugate 状態を示唆していましたが、その後の実験では hole-conjugate 状態でなくとも中性モードが観測されると報告しています。もちろん波動関数を特定しなくても準粒子が non-Abelian であることを示せば良いのですが、分数量子ホール系においてこれまで Fabry-Perot 干渉計で観測された抵抗振動はすべて Coulomb-blockade 型のものであり、($\nu = 1/3$ も含めて) 分数量子ホール系では Aharonov-Bohm 型の振動は未だに観測されていないというのが現在の理解です。このような混沌とした状況を打破するには、 $\nu = 5/2$ に限らず基本的なことを見直すと同時に、今までにないアプローチが必要だと考えています。さらにこの新学術領域では、理論、実験両面で領域メンバーとの協力関係を活かすことで、ブレークスルーとなるような成果につなげることを目指しています。



むらき・こうじ

1965 年東京都出身 1994 年東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 博士課程修了
同年 日本電信電話(株) (NTT) 基礎研究所 1999 年 NTT 物性科学基礎研究所
現在 同研究所 量子電子物性研究部 量子固体物性研究グループ グループリーダー、上席特別研究員 (この間 2001 ~ 2002 ドイツ・マックスプランク研究所 客員研究員を併任)
分子線エビタキシーによる高易動度 2 次元電子系の成長と電気伝導測定を通して主に分数量子ホール系の研究を行ってきた。

半導体におけるスピン軌道相互作用を活用したスピン機能創出

好田 誠 / 東北大学大学院工学研究科 准教授



こうだ・まこと

私たちは、InGaAsなどの化合物半導体ヘテロ構造におけるスピン軌道相互作用の精密制御を行い、電気的なスピン生成・スピン制御そして長距離スピン輸送に関わる研究を行っています。最近ではPtやTaなどの金属薄膜におけるスピン軌道相互作用についても研究を進めているところです。研究対象としているスピン軌道相互作用は相対論的効果であり、電子スピンの対し有効磁場を与えることから、外部磁場や強磁性体を全く必要とせずスピン状態を制御することができます。真空中の電子におけるスピン軌道相互作用のハミルトニアンは、

$$H_{SOI} = -\mu_B \vec{\sigma}_s \cdot \left[\frac{\vec{p} \times \vec{E}}{2mc^2} \right] = -\mu_B \vec{\sigma}_s \cdot \vec{B}_{SOI} \quad (1)$$

で記述でき、電子の運動方向 p と内部電場 E の外積方向に有効磁場 B_{SOI} が生じます。半導体量子井戸構造を考えた場合、内部電場は量子井戸のポテンシャル勾配に対応し、外部からゲート制御できるため、デバイス構造とゲート電極を作り込むことで、様々な手法で有効磁場を制御することができます。この特徴を生かしたテーマに関し本稿で紹介します。

スピン軌道相互作用の有効磁場をゲート制御することで、電子スピンの歳差運動であるスピンの動的位相や幾何学的位相を外部から制御することが可能です[1,2]。半導体においてスピン歳差運動を精密計測するため図1(a)に示す半導体リング構造を用います。このようなリングに入射した電子波は時計回り・反時計回りに分波され再び分岐点に戻ってきます。有効磁場の向きは、式(1)より、電子の運動方向に依存するため、電子スピンは互いに逆向きに回転しながら分岐点に戻りスピン干渉を引き起こします。その結果、伝導度に変調されスピン回転角を抵抗変化として精密計測することができます。図1(b)にスピン干渉に起因する抵抗のゲート電圧依存性を示します。リング構造の表面に形成した金属ゲートに電圧を印加することで有効磁場

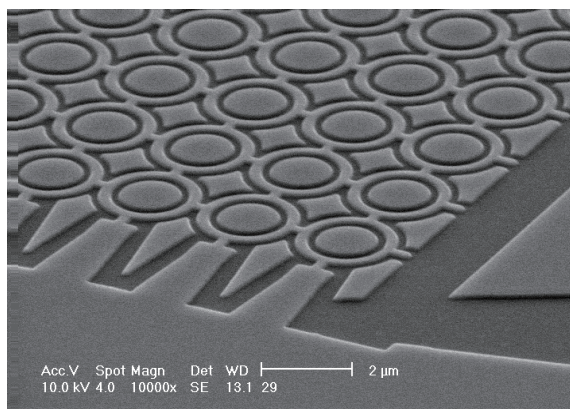


図1(a)：InGaAs 量子井戸構造を用いたスピン干渉素子

1978年東京都出身。2005年東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士後期課程修了。東北大学大学院工学研究科助手、助教を経て2010年より現職。2014年から1年間IBMチューリッヒ研究所にて時間分解カー回転測定法を学ぶ。主にスピン軌道相互作用の精密制御を駆使した電気的スピン生成・制御・検出に取り組んでいる。

を変化させると、周期的な抵抗変化が観測され、スピン歳差運動がゲート電圧により制御されていることがわかりました。このようなスピンの動的位相制御だけでなく[1]、リング構造を歳差運動する電子スピンには幾何学的な位相も有しており、リングの半径を系統的に変えることで幾何学的位相の検出も可能にしています[2]。

スピン軌道相互作用による有効磁場を精密制御することでスピン生成やスピン制御などを半導体のみで実現することができます。本領域では、これまで蓄積してきた半導体におけるスピン軌道相互作用の制御をトポロジカル絶縁体などの新物質にも応用して、新奇物理現象を探索していければと思っています。

[1] M. Kohda, T. Bergsten, and J. Nitta, "Manipulating spin orbit interaction in semiconductors" Journal of the Physics Society of Japan **77**, 031008-1-031008-9 (2008).

[2] F. Nagasawa, J. Takagi, Y. Kunihashi, M. Kohda, and J. Nitta, "Experimental Demonstration of Spin Geometric Phase: Radius Dependence of Time-Reversal Aharonov-Casher Oscillations" Physical Review Letters **108**, 086801-1-086801-4 (2012).

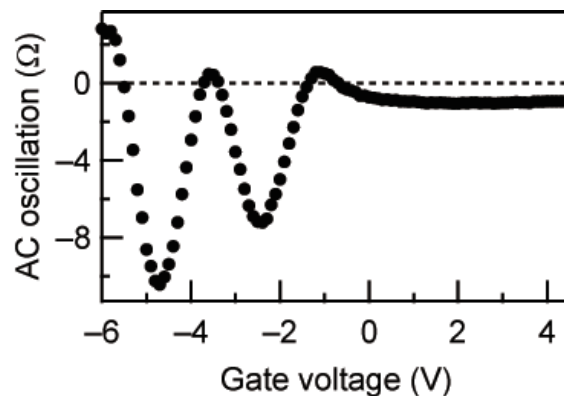


図1(b)：スピン干渉に起因した抵抗変化のゲート電圧依存性

ディラック-ワイル電子系のトポロジカル電磁現象

野村 健太郎 / 東北大学 金属材料研究所 准教授

スピン軌道相互作用に起因する非自明な量子現象がこれまで多く発見されています。近年注目を集めている時間反転不変なトポロジカル絶縁体では、スピン軌道相互作用によるバンド反転が本質的役割を担います。これまで、その表面におけるスピン-運動量ロッキングに興味を惹かれて、トポロジカルに保護された反局在効果や異常量子ホール効果、スピントロニクスへの応用などの新しい物理現象の研究に関わってきました。本プロジェクトではさらにナノ科学をキーワードに加えて研究を進めております。ナノ技術は現代文明を支える重要な要素ですが、基礎科学の視点からも、量子ホール効果の歴史は正に微細加工技術の発展と共に歩みましたし、磁性トポロジカル絶縁体表面での異常量子ホール効果も薄膜で観測されました。また近年はスピントロニクスの分野でも強磁性ナノ薄膜の研究が際立った成果をもたらしています。

最近、スピン軌道相互作用と磁性のインタープレイの問題として、磁性ワイル半金属におけるスピン相関とスピン波励起の理論的研究に着手しました。磁性半導体などでは伝導電子を媒介して局在スピン間に相互作用が生じ磁気秩序をもたらしますが、ワイル半金属ではスピン-運動量ロッキングのために局在スピン間の相互作用は通常の系とは質的に異なります。電子の運動量と局在スピンの方向に強い相関が生まれるためです。これはスピントクスチャーの構造にも影響を与えます。ワイル半金属とよく似た理論構造を有する ^3He 超流動 A 相では非従来型の渦糸やモノポールといったトポロジカルな励起構造が知られていますが、磁性ワイル半金属の薄膜やナノ構造においても興味深いテクスチャーが実現されるかどうかを検証したいと思います。またゲート電極による局在スピン磁化の制御など応用も視野に入れ研究を進めております。



のむら・けんたろう

神奈川県出身。

2003 年東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了。その後テキサス大学にてポスドク、東北大学助教、理化学研究所研究員を経て、2012 年より現職。

トポロジカル原子層物質の物理

江澤 雅彦 / 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 講師



えざわ・もとひと

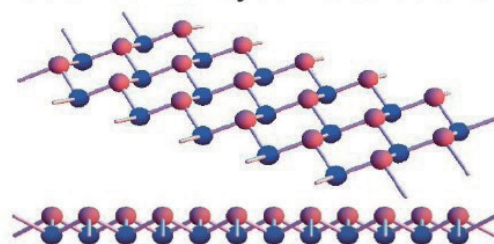
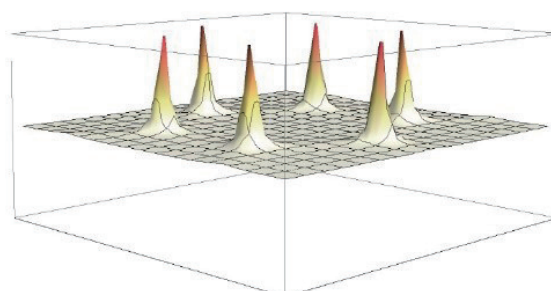
近年、トポロジカル原子層物質の物理が盛んに研究されている。トポロジカル原子層物質とはトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体などのトポロジカルな性質を示す一原子でできた膜状の物質である。安定な原子層物質はハニカム構造である場合が多い。特に、シリコン、ゲルマニウム、錫の原子層物質であるシリセン (silicene)、ゲルマネン (germanene)、スタネン (stanene) が代表格である [1,2]。これらは全てIV族の物質である。これらの物質は buckle (座屈) しているので電場でバンドギャップが制御でき、トポロジカル相転移を起こす事ができる [3]。シリセンの研究は2012年に銀基板上などで合成された実験的報告を機に爆発的に研究が進展した。また最近、銀基板上に作成したシリセンをアルミナ基板に転写し、銀をはぎ取る事により、金属である銀基板の影響を取り除く実験が行われ、室温でトランジスタとして動作する事やディラック・コーンを示す電気伝導度が観測されている [4]。ゲルマネンは2014年に金、プラチナやアルミニウム基板上に合成されている。また、昨年、スタネンがBiTe基板上に作成されて着目されている [5]。これらの物質は物性物理学の大きな潮流であるグラフェンの物理とトポロジカル物性の合流点に位置し、豊富な物理特性が明らかにされている。特にシリコンはクラーク数が二番であり、地球上に豊富に存在する。シリコン単体でトポロジカル絶縁体になる事は産業応用上も重要である。また、従来の電子工学はシリコンをベースにしているので、シリセンは将来のデバイスとしても有力である。また、ビスマスの原子層物質もトポロジカル絶縁体である。最近になり、トポロジカル・エッジの実験的報告がなされている [6]。

三次元トポロジカル絶縁体はBiTeなど数多くの物質で実験的に検証されているが、実験的に検証されている二次元トポロジカル絶縁体はHgTe/CdTe超構造やInAs/GaSb超構造などであり、まだそれほど多くはない。原子層物質の面白い点は様々な化学修飾やvan der Waals超構造といった積層が可能な点であり、今後の進展が楽しみである。詳細はレビュー論文を参照されたい [7]。

1982年生まれ。宮城県出身。2005年 東京大学理学部物理学学科卒業。2007年 東京大学理学系研究科物理学専攻修士課程修了、同博士課程進学、2007年 同博士課程中退、東京大学工学系研究科物理工学専攻助教。2010年 論文博士(理学)取得。2015年 同講師。現在に至る。

- [1] C.-C. Liu, W. Feng, and Y. Yao, Phys. Rev. Lett. **107**, 076802 (2011).
- [2] M. Ezawa, Phys. Rev. Lett. **109**, 055502 (2012).
- [3] M. Ezawa, New J. Phys. **14**, 033003 (2012).
- [4] L. Tao, Nat. Nanotech. **10**, 227 (2015).
- [5] F.-F. Zhu, et. al. Nat. Materials **14**, 1020 (2015).
- [6] I. K. Drozdov et. al., Nat. Phys. **10**, 664 (2014).
- [7] M. Ezawa, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 121003 (2015).

buckled honeycomb structure

topological insulator
(Berry curvature)

トポロジカル絶縁体の相関効果

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

これまで凝縮系物理学の中で、強相関電子系の理論を中心に研究してきた。「お気に入り」のテーマの一つに1次元量子系に現れる準粒子の研究がある。この準粒子は低次元量子ゆらぎに起因するものであり、これだけでもかなりエキゾチックである。トポロジカル物質の表面に現れるエキゾチック準粒子は、トポロジーにその性質が左右されるという、まさにドラマチックな運命の持ち主である。わくわくするような理論や実験が日々提出されており、物理屋としての探究心を煽られる。私自身は、この分野への比較的新しい参入者であるが、これまでの強相関電子系での経験を生かして、トポロジーと強相関の絡み合いによる量子現象の研究を行っている。ここ数年行ってきた / これから行いたいテーマをいくつか挙げると、

1. 強相関トポロジカル相とモット絶縁体 [1]

特にトポロジカルモット絶縁体と、その端に現れる準粒子の性質の解明。特にエキゾチックなエッジモット状態の実例の理論的な提案。

2. 非平衡強相関系のトポロジカル相転移 [2]

光誘起などによる非平衡状態でのトポロジカル相転移、例えば光誘起ワイル半金属、対称性に守られた相転移など。

3. トポロジカル近藤絶縁体 [3]

強相関トポロジカル相の典型例である、SmB₆などを筆頭候補とするトポロジカル近藤絶縁体、特に表面状態の研究。

4. 準周期系のトポロジカルな性質 [4]

準周期系のトポロジカル不変量での分類、さらにこの系に及ぼす相関効果の解明。

5. 実時間ダイナミクスにおけるトポロジカル不変量 [5]

量子系の実時間ダイナミクスに現れるトポロジカル相の研究。

[1] T. Yoshida et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 196404 (2014).

[2] M. Nakagawa and Norio Kawakami, Phys. Rev. A **89**, 013627 (2014); Phys. Rev. Lett. **115**, 165303 (2015).

[3] R. Peters et al., 投稿中

[4] F. Matsuda et al., J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083707 (2014).

[5] H. Obuse et al., Phys. Rev. B **92**, 045424 (2015).



かわかみ・のりお

1958年生まれ 岡山県出身。
1982年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。1984年大阪大学助手、1989年京都大学助教授、1995年大阪大学教授を経て、2007年より現職。主に強相関電子系の理論を中心として、低次元電子系、量子スピン系、ナノ量子系、冷却原子系などを研究対象としている。トポロジカル量子物質に関しても、強相関効果という切り口から研究を展開している。趣味は、和菓子老舗めぐり、散歩気分での週末京都観光。賀茂川をこよなく愛す。

ボソンのトポロジカル量子相

上田 正仁 / 東京大学大学院理学系研究科 教授

本研究の目的は、冷却原子の持つ高い制御性を利用して、ボソンがこの系において発現するであろう様々なトポロジカル量子相を探ることにある。トポロジカル量子相を研究する上で冷却原子がユニークな点は、原子間相互作用の対称性をあらかじめ指定してかかることが可能なことにある。これは、原子間相互作用がフェッシュバハハ効果を用いて制御されるために、与えられた原子種に対して外部磁場を与えると、どんな対称性の下で相互作用をするのかがあらかじめ理論計算によって確実に知ることができるためである。固体物性においては、超電導が発見されると最初の興味深い問いはクーパー対の対称性であるが、冷却原子気体においてはそれに対する答えが与えられているという前提で、研究テーマを設定する必要がある。

我々は、ボソンのトポロジカルバンドとボソンの量子ホール効果について研究を行っている。前者に関しては、冷却原子気体がエネルギー散逸が無視できるので、励起状態のトポロジカルバンドの性質を実験的に探究できるという点に着目して研究を行ってきた。具体的には、フェルミオンに対する Haldane 模型を相互作用するボソンへ拡張した Haldane-Bose-Hubbard 模型におけるボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 相の励起構造をボゴリウボフ理論を用いて分析した。これは、周期変動する蜂の巣光格子を用いて実験的に実現された系である。この系にフェルミオンをロードすると、トポロジカル絶縁体为实现されるが、ボソンをロードするとどんな新しい現象が発現するかが着目点であった。分析の結果、トポロジカルな性質が相互作用する BEC 相のボゴリウボフ励起バンドに引き継がれ、非自明なチャーン数を持った領域が相互作用の強さとともに増大することが明らかになった。この時、端状態をコヒーレントに励起すると、それが背後の BEC と干渉することで物質波が伝搬することが分かった。これは、端状態がカイラルエッジ状態であることを表している [1]。

ボソンの量子ホール効果については、2 層系の各層に対して同じ向きだけでなく反対向きに人工磁場を印加できるという電子系ではない特色がある。この時、系は時間反転対称性を保持しており、2 層の充填率がともに 1 の場合に整数量子ホール効果が表れるなど対称性によって保護されたトポロジカル量子現象が現れる [2]。この他にも、2 層系の分数量子ホール状態においては 2 つの層のボソンが強く相互作用している状態でも多体波動関数が 2 層の別々の状態の積で書けるなど未解明なことが多々存在する。



うえだ・まさひと

1986 年 東京大学理学部物理学科卒業。1988 年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程修了。1991 年 理学博士取得 (東京大学)。1988 年 日本電信電話株式会社基礎研究所研究員。1992 年 東京大学物性研究所嘱託研究員 (日本電信電話株式会社基礎研究所と兼務)。1994 年 広島大学工学部第二類電子物性大講座助教授。2000 年 東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻教授。2008 年より現職。

[1] S. Furukawa and M. Ueda, New J. Phys. **17**, 115014 (2015).[2] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **111**, 090401 (2013).

対称性とトポロジカル物質

佐藤 昌利 / 京都大学 基礎物理学研究所

前回の新学術領域に引き続き、今回の理論班の研究計画メンバーとして参加することになりました。よろしくお願いいたします。

現在、私は対称性がトポロジカル相に果たす役割を明らかにすることを目的に研究をおこなっています。トポロジカル相にとって、対称性は重要な役割を果たしています。よく知られているように、トポロジカル相のアイデアは、1982年の甲元さんらによる整数量子ホールをトポロジカル数の量子化で説明した論文にさかのぼることができます [Phys. Rev. Lett. **49**, 405 (1982)]。この発見は、Michel Berry による Berry 位相発見以前になされており、また、実際、Michel Berry の回想によると、数理物理学者の Barry Simon が Berry 位相の幾何学的意味を明らかにし、TKNN のアイデアとの関係を指摘した論文 [Phys. Rev. Lett. **51**, 2167 (1983)] を書いて以来、Berry の仕事が物理の世界でよく知られるようになったということです [M. V. Berry, "The Quantum Phase, Five Years After" in Geometric Phases in Physics, ed. A. Shapere, F. Wilczek (World Scientific)]。(余談ですが、Berry 位相の論文は、Thouless による断熱過程で TKNN 数を導出した Thouless pumping の論文とほぼ同時期に発表されており、また甲元さんらの仕事の前年には Nielsen-Ninomiya の no-go theorem の仕事も出ています。現在、トポロジの分野で重要となっているこれらの仕事がこの頃ほぼ同時期に現れているのが非常に興味深いです。)

Simon は 1983 年には、Avron、Seiler と共にトポロジカル相の分類を初めておこなっており [Phys. Rev. Lett. **51**, 51 (1983)]、何の対称性も仮定しない一般の場合、3 次元以下には、TKNN 数 (Chern 数) で特徴づけ



さとう・まさとし

1996 年 京都大学大学院物理学第二専攻博士後期課程修了。1996 年 湯川記念財団奨学研究員。1997 年 日本学術振興会特別研究員。1999 年 東京大学物性研究所物性理論研究部門助手。2007 年 東京大学物性研究所物性理論研究部門助教。2012 年 名古屋大学大学院工学研究科准教授。2015 年より現職。

られる整数量子ホール状態だけが可能であることを見出しています。また、時間反転対称性がある場合に分類がどうなるかもその後研究しているのですが [Phys. Rev. Lett. **61**, 1329 (1988)]、重要な見落としがあり、Kane と Mele の 2004 年の研究を経て初めて、3 次元以下で時間反転対称性によって守られたトポロジカル相が存在することが明らかになったことは皆さんもご存じの通りです。

私自身は、甲元さんたちの仕事を、超伝導体の研究に応用することで新しい方向性が開かれるのではないかと考え、2003 年頃からトポロジカル相の研究をスタートさせました。前回の新学術領域では、多くの方との議論および共同研究を通じて、トポロジカル量子現象の様々な側面を知ることができました。本新学術領域では、その主要な目的である電子相関の効果をも考慮して、更に研究を発展させていくとともに、新しいトポロジカル物質・現象の予言を行い、実験家の皆さんとも共同研究をおこないたいと考えています。

超伝導・超流動体におけるトポロジーと対称性の協奏

水島 健 / 大阪大学 基礎工学研究科 准教授

現在の研究テーマは、専ら、超伝導・超流動等のトポロジカルな側面とその背後に潜む対称性との関連について明らかにすることであり、その Hallmark としての新奇量子物性の提案をしていくことです。前野新学術領域の開始前の段階では、トポロジーと対称性の関係性は自分にとってそれほど明確なものではありませんでした。しかしながら、佐藤昌利さんとの超流動 $^3\text{He-B}$ の共同研究を通して、この系で発現するトポロジカル相転移と対称性の自発的破れが「イジング秩序」という一つの言葉で表されるということが明らかになりました。これによって、トポロジーと対称性が密接に関係していることがわかり、さらにその帰結として、対称性によって守られたマヨラナ粒子が存在することを突き止めました。また、 UPt_3 のような非従来型超伝導体におけるトポロジーと結晶対称性の直接的な関係性についても明らかにしてきました。

本新学術領域では、このような新奇トポロジカル量子相転移や量子臨界現象の解明、さらに、マヨラナ粒子やワイル粒子などの新奇準粒子の検出を目指します。特に、超流動 ^3He を中心に、トポロジカルな起源を持つ準粒子が媒介する非平衡ダイナミクスや輸送現象を調べていくつもりです。超流動 ^3He の研究は 40 年以上の歴史を持ち、バルク超流動特性については徹底的に理解されてきました。これらの知的基盤に加え、高い対称性を持ち、さらに、容器の表面鏡面性や空間次元性などを自由に制御できる超流動 ^3He はトポロジカル量子現象の宝庫であり、本研究テーマ遂行のための格好の舞台であると言えます。A 相のワイル粒子・カイラル異常や横波音響インピーダンスによる表面アンドレーエフ束縛状態の精密分光実験などといった現在のホットな話題が既に超流動 ^3He の研究の歴史の中で理論的に議論され、観測されてきました。さらに、エッジ質量流との関係性から、固有角運動量という古典的問題の学術的価値が注目されています。 ^3He をモデル物質として、そこで培われた経験や知見を超伝導物質系や冷却原子、中性子星内部の $^3\text{P}_2$ 超流動状態の問題へフィードバックさせていくことも、本新学術領域における私の研究テーマであると考えています。



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)、岡山大学大学院自然科学研究科助手、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。

これまでとこれからの研究について

西田 祐介 / 東京工業大学 理工学研究科 准教授

私はもともと原子核理論の研究室出身でありまして、大学院時代は高温・高密度におけるクォーク物質の相構造に興味を持って研究していました。しかし、冷却原子系で実現され、当時ホットトピックとなっていたBCS-BECクロスオーバーに興味を惹かれ、博士課程の2年次に渡米したのを契機に、それ以来は主に冷却原子を対象として研究を行っています。1兆度を超える温度を持つ高温・高密度におけるクォーク物質の研究と、ナノケルビンの極低温において実現される冷却原子気体の研究とは全く異なるのではないかとしばしば尋ねられるのですが、理論家にとっては Ψ で表される自由度をクォークと思うか原子と思うかの違いですので、大して変わりはないはずです。このように分野横断的な思考ができるのが自分自身の売りではないかと思っております。本新学術領域のメンバー紹介のページでは私の専門分野は「量子多体系と少数系の物理」とであると書かせて頂きました。このように専門分野に対象となる具体的な物理系の名称を書かなかったのは、分野横断的でありたいという私自身の志向の表れであります。

研究内容についてもう少し具体的に述べますと、原子核系であるか冷却原子系であるかのような系の詳細に依らずに現れる普遍的な物理現象に興味を持って研究しています。量子多体系であればBCS-BECクロスオーバーがその代表例であり、量子少数系であればエフィモフ効果がその代表例です。特に最近、量子少数系における知見を生かしたボトムアップ的な量子多体系へのアプローチを構築することを目標に研究を行っています。

これまで述べてきたように私の研究は、本新学術領域の重要キーワードである「トポロジー」とは必ずしも関係していません。本新学術領域には既に物質科学におけるトポロジーの専門家が多くいらっしゃるの、そのような専門家の皆さんの後追いの研究をすることはあまり意味のないことであると考えております。むしろトポロジーの素人である私に期待されている役割は、物質科学におけるトポロジーに関する新たな知見を、冷却原子系や原子核系などのような分野外へ波及させること、あるいは、他分野から新しい知見を輸入して本新学術領域の皆さんにお知らせすることではないかと考えております。このような貢献を本新学術領域において少しでもできるよう精進する所存です。



にしだ・ゆうすけ

1980年3月、大阪府生まれ。
2002年3月、東京大学理学部物理学科卒業。2007年3月、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。2008年8月まで、ワシントン大学原子核理論研究所研究員。2011年8月まで、マサチューセッツ工科大学パパラードフェロー。2013年2月まで、ロスアラモス国立研究所オープンハイマーフェロー。2013年3月より、東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻准教授。

中性子超流動とカラー超伝導

新田宗土 / 慶應義塾大学・日吉物理学教室



にった・むねと

科学の分野において、トポロジーがとても重要なキーワードになってきました。トポロジーとは、大きさや形にはこだわらない繋がり方のみを対象にした柔らかい幾何学です。例えば、ある駅からある駅に行く行き方は何通りあるのかというのは、行くまでの距離やかかる時間にこだわらないトポロジーの問題となります。

私は、渦の研究を行っています。渦といえば、お風呂の水を流した時に出来る渦や台風が思い浮かぶでしょう。これらも渦ですが、もう少し変わった渦に興味を持っています。ヘリウムを冷やすと液体になりますが、非常に低温にすると、超流動という状態になり、「量子化された渦」が現れます。また、金属を冷やすと超伝導という状態になり、そこでも量子渦が現れます。この渦は、トポロジーで特徴づけられる渦です。杭にロープが何回巻きつけて結ぶことを考えると、整数回しか巻き付けませんが、これをホモトピー群 π_1 と呼んでいて、その巻き付き数で特徴づけられるような渦です。超伝導体でもある特殊な超伝導体、カイラルp波超伝導体と呼ばれる超伝導体の場合は、量子渦のなかに奇妙な粒子、マヨラナ・フェルミオンが閉じ込められています。また超流動体でも、ヘリウム3という超流動体でも、同様の量子渦にマヨラナ・フェルミオンが閉じ込められています。この奇妙な粒子を複数用意して、その場所を交換するとき、その交換を時計周りにするか反時計周りにするかで結果が異なるという不思議な現象が起こります。この交換するという操作は、交換する経路によらず同じ結果を与えます。すなわち、結果がトポロジーだけで決まります。このことを利用すると、トポロジーで保護された計算、トポロジカル量子計算を行うことができると思われています。

出身：大阪府。

経歴：大阪大学大学院卒業、東京工業大学、アメリカ・パーデュー大学でポスドクを経て、現在にいたる。今年度より私立大学戦略基盤に採択され、「トポロジカル・サイエンス」というプロジェクトを立ち上げました。

さて、今度は宇宙に目を向けてみましょう。宇宙には様々な星が見えていますが、ほとんどの星は、自ら輝く星、恒星です。我々の太陽も、恒星の一つです。恒星はほとんど水素でできています。重力によって、内部が高密度になっていて核融合を起こしヘリウムを作る際に出るエネルギーで光っています。光ると同時にその圧力で重力に対抗してその形を保っています。やがて、恒星が水素を使い果たすと、より重い元素を合成します。しかし、鉄まで到達するともうそれ以上合成することが出来ません。そうすると超新星爆発という大爆発を起こします。その後残るのが、ブラックホールや中性子星です。この中性子星がまた面白い天体で、10 kmほどの小さな天体に、太陽ほどの質量がつまって非常に高密度な天体です。この天体はほとんど中性子でできています。さて、この天体の内部の方では、中性子が超流動体になっています。さらに高密度では、トリプレット超流動というものになっており、カイラルp波超伝導や、ヘリウム3超流動に似た状態になっていると思われています。現在、この超流動体の量子渦の研究を行っています。

Study of Topological Phases in Ruthenates

Chanchal Sow / 京都大学 大学院理学研究科

(受入研究者: A01 前野悦輝)

The concept of topology can be very useful in understanding many important phenomena occurring in highly correlated materials. To demonstrate this importance, we mainly focus on two ruthenium oxides (ruthenates): Sr_2RuO_4 and Ca_2RuO_4 . Sr_2RuO_4 : I am involved mainly in the crystal growth and its initial characterizations to achieve high quality Sr_2RuO_4 single crystals for the study of Novel Topological Phases such as: (i) realizing Half Quantum Vortex (HQV), (ii) fabrication of topological junctions between ferromagnet and triplet superconductor (F/T) to observe the long range proximity effect.

Ca_2RuO_4 : Ca_2RuO_4 (CRO) is a Mott insulator that becomes a good metal by suitable stimuli such as chemical substitution [1], pressure, temperature, or electric field [2]. Application of electric-field or current can induce novel electronic states in this strongly correlated material. My main focus is to demonstrate the power of non-equilibrium conditions to create new phases, including topological phases. CRO is a good candidate since its Mott gap decreases with DC current [3]. I found that the resistance is indeed reduced by more than 5 orders of magnitude in 4-5 mA current. Further, a small current (< 3 mA) is sufficient to suppress the AFM ordering. All the measurements so far are performed on high-quality CRO single crystals grown by Prof. F. Nakamura (Kurume Institute of Technology). When the mechanism of such effect is better understood, this technique may become useful in stabilizing desired topological phases in such frozen electron solids (Mott insulators).

[1] S. Nakatsuji et al., PRL **84**, 2666 (2000).

[2] F. Nakamura et al., Sci. Rep. **3**, 2536 (2013).

[3] R. Okazaki et al., JPSJ **82**, 103702 (2013).



ちゃんちゃん・そう

I have done my Ph.D from Indian Institute of Science, Bangalore, India in 2014. My thesis is on the structural, magnetic, and magneto-transport properties in oxide materials (mainly strongly-correlated electron systems) addressing the interplay between two competing order parameters. In particular, I have studied two kinds of competing interactions: (i) the FM-AFM interplay either in bulk or at the interface in thin films; (ii) the interplay between FM and superconductivity (SC) in spin-singlet superconductor (S)/ferromagnet (F) heterostructures. Basically both of these interplays lead to non-equilibrium phenomena in these oxides with various hystereses. Currently I am working as a Postdoc (TMS project) in Quantum Materials Lab, Department of Physics, Kyoto University, Japan. I enjoy every small things like making samples, investigating its properties and finally understanding the underlying physics of it. I like hiking mountains in Japan. I fear to take raw fish (Sashimi/Susi).



受入研究者からひとこと:

米国で開催のゴードン会議 (GRC) で講演した際、当時大学院生の Sow さんがいろいろ鋭い質問をしてくれたのがきっかけで、京都に来てもらうことになりました。とにかくエネルギーにあふれ、いつも楽しそうに大きな声で話しながら実験に取り組んでいるのが、研究室にとっての活力になっています。先日、京都大学主催の外国人研究者パーティーに行ったところ、そこで出会ったインドからの研究者の中では、Sow さんがおそらく一番物静かな青年と分かり、びっくり。

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

2015

2015/Ju1/1

本領域が新学術領域研究に採択されました。

"Topological Materials Science" has been accepted by MEXT.

2015/Ju1/23

「第1回トポロジカル物質科学セミナー」

京都大学 北部キャンパス

"Topological Materials Science Seminar (1)"

North Campus, Kyoto University

First order quantum evolution in disappearance of magnetic order: Mott systems, unconventional superconductors and itinerant ferromagnets

(plus)

Searching for topological vortex core in Sr_2RuO_4

Prof. Yasutomo J. Uemura

Columbia University in the City of New York

2015/Oct/15

「第2回トポロジカル物質科学セミナー」

東京工業大学 大岡山キャンパス

"Topological Materials Science Seminar (2)"

Ookayama campus, Tokyo Institute of Technology

Long-distance entanglement of spin qubits via quantum Hall edge states

Dr. Guang Yang

RIKEN Center for Emergent Matter Science, Wako, Japan

2015/Nov/20

「第3回トポロジカル物質科学セミナー」

京都大学 北部キャンパス

"Topological Materials Science Seminar (3)"

North Campus, Kyoto University

Weyl semimetals and superconductors:

Basics and Torsional chiral magnetic effect

Prof. Satoshi Fujimoto

Department of Materials Engineering Science

Osaka University

2015/Dec/21

「第4回トポロジカル物質科学セミナー」

京都大学 北部キャンパス

"Topological Materials Science Seminar (4)"

North Campus, Kyoto University

Odd frequency spin-triplet superconductivity

at magnetic / superconductor interfaces

Prof. Jason Robinson and Mr. Angelo Di Bernardo

St John's College, Cambridge UK

2016/Jan/15

「第5回トポロジカル物質科学セミナー」

京都大学 北部キャンパス

"Topological Materials Science Seminar (5)"

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

Ising Superconductivity and Majorana Fermions in Transition Metal Dichalcogenides

Prof. Kam Tuen Law

Hong Kong U. of Science and Technology

2016/Jan/28

「第6回トポロジカル物質科学セミナー」

京都大学 北部キャンパス

"Topological Materials Science Seminar (6)"

North Campus, Kyoto University

Weyl semi-metal: a new topological state

in condensed matter

Prof. Xi Dai

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

2016/Feb/28 (予定)

「ノーベル賞受賞者ベドノルツ博士を迎えて

―大学への物理学：超伝導とトポロジー―

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

"With Nobel Laureate Dr. Bednorz - Topics from University Physics: Superconductivity and Topology"

Yukawa Institute for Theoretical Physics

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。

関根 聡彦

東北大学金属材料研究所 日本学術振興会特別研究員 (PD)

指導教官：東北大学金属材料研究所 野村健太郎 准教授

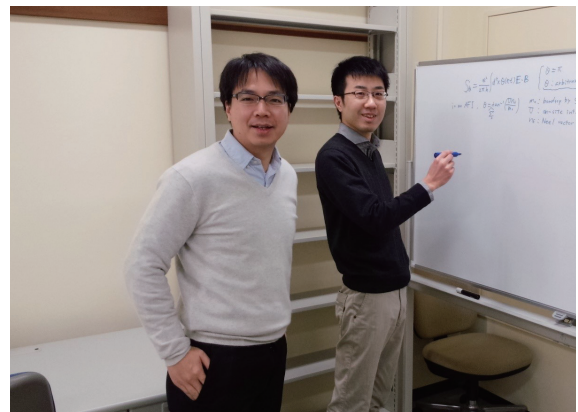
受入教官：京都大学基礎物理学研究所 佐藤昌利 教授

受入期間：平成 28 年 1 月 12 日（火）～1 月 22 日（金）

私は現在、シータ項などのトポロジカル項を有する 3 次元系の外場に対する特異な応答を調べています。シータ項に起因した特異な現象としては、Weyl 半金属におけるカイラル磁気効果（磁場による電流の生成現象）などが知られています。私はこれまでに、3 次元反強磁性絶縁体における動的なカイラル磁気効果の発現可能性を調べてきました。また、3 次元トポロジカル超伝導体においてもシータ項に似た項が存在することが指摘されていることから、カイラル磁気効果に似た交差相関応答が超伝導体においても発現するのではないかと考え、「カイラル重力磁気効果」（回転による熱流の生成現象）の発現可能性を調べてきました。

今回の滞在ではまず、佐藤先生と Weyl 超伝導体などのポイントノード超伝導体におけるカイラル重力磁気効果の発現可能性を議論しました。その結果、半金属の場合と異なり超伝導体の場合は電子正孔対称性が要求されるため、ポイントノード超伝導体では発現しないのではないかという（残念ながらネガティブな）結論が得られました。その後は、ノードのある超伝導体のトポロジカルな性質を、ノーマル状態の Fermi 面の Berry 位相を用いて特徴付けることはできないかという新たなテーマについて議論しました。このテーマについてはまだ具体的な結果は出ていませんが、どのような条件下でノードのあるトポロジカル超伝導体を実現されるのかを一般的に分類できたら面白いのではないかと考えています。

滞在期間中には基礎物理学研究所（基研）でセミナーをする機会をいただき、様々な方と有意義な議論をすることができました。また、トポロジカル超伝導体の研究で知られる香港科技大の K. T. Law 氏が同時期に基研に滞在しており、同室であったことから物理の議論はもちろんのこと様々な話題についてお話しすることができました。最後になりましたが、このような貴重な機会を与えていただいた本プログラムに感謝いたします。そして受け入れていただいた佐藤先生、基研の凝縮系理論グループの皆さんに感謝いたします。



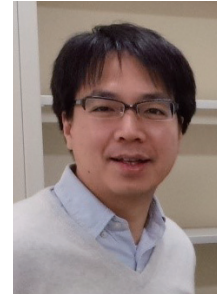
香港科技大の K. T. Law 氏（左）と議論中。

K.T. Law 教授

香港科学技術大学

報告者：京都大学基礎物理学研究所 佐藤昌利

期間：平成 28 年 1 月 14 日（木）～ 1 月 24 日（日）



2016 年 1 月 14 日から 24 日までの 10 日間、香港科学技術大学の K.T. Law 教授が本新学術領域の REP プログラムで、京都大学基礎物理学研究所に滞在され、今後の研究連携を含めて、有意義な討論が行われました。滞在中の詳細に関しましては、本人から詳細な感想をいただきました。



Our visit started with my talk at YITP, in which we discussed how a special type of spin-orbit coupling called Ising spin-orbit coupling, can result in the Ising superconducting state in transition metal dichalcogenides (TMD) materials. This new superconducting state has strongly enhanced in-plane upper critical field. We discussed how these TMD materials can be used to generate topological superconductors and nodal topological superconductors. Many of these new results are inspired by previous works of Prof. Sato. I have also benefited from the discussions with Prof. Kawakami, Prof. Maeno and Prof. Sato who attended the seminar.

Prof. Yanase at Kyoto University is also very interested in superconducting TMD materials. We had long discussions on how new topological superconducting phases can be generated in these systems, particularly in single layer and bilayer TMDs under in-plane magnetic fields.

In the meeting with Prof. Kawakami, Prof. Kawakami introduced to me some of his very interesting works about the interaction effects on the gapless modes in topological insulators. We discussed how his previous works can possibly be generalised to topological insulators with different symmetries.

The meeting with Prof. Matsuda was very fruitful. We discussed how Majorana fermions can emerge in d-wave superconductors with Rashba spin-orbit couplings. We discussed possible detection methods of Majorana fermions in these systems such as CeCoIn5. We also discussed the possible pairing phases of a uranium based superconductor and the possible realization of Weyl topological superconducting phases in this system.

During my visit, I had the privilege to have many discussions with Prof. Sato. We discussed about a project on realising topological superconductors with nodal lines. With his deep insights, Prof. Sato pointed out the essential symmetry conditions on how nodal lines can emerge even in a conventional s-wave superconductor. We will have further discussions on this subject and establish a collaboration on this subject. We also discussed how uni-directional propagating surface states can be realized in gapless topological superconductors. We will also have collaborations on this project.

After my visit to YITP, I visited Prof. Nagaosa's group at RIKEN. I had fruitful discussion with Prof. Iwasa on the detection of Ising superconductivity in TMD materials and possible collaborations will be established. During my visit at RIKEN, I also had the opportunity to discuss with Prof. Guo-Qing Zheng and Prof. Shingo Yonezawa who are members of the Topological Material Project.



Law 教授と同時期に、本新学術領域の若手励起プログラムで東北大学の関根さんも基礎物理学研究所に滞在されており、色々と刺激を受けられたようでした。

Xi Dai 教授

Institute of Physics, Beijing, China

報告者：京都大学大学院理学研究科 川上 則雄

期間：平成 28 年 1 月 27 日（水）～1 月 31 日（日）



「トポロジカル絶縁体とワイル半金属の理論的研究」を目的に、Xi Dai 教授が 2016 年 1 月 27 日から 1 月 31 日まで京都大学 凝縮系理論研究室に滞在されました。今回は短期の滞在でしたが、川上グループと活発な議論を行いました。特に、強相関のトポロジカル絶縁体の候補としての SmB_6 、 YbB_{12} に関しては、両グループが共に研究テーマとしており、詳細な議論と今後の共同研究に関する討論をおこないました。この問題に関しては川上グループの Peters 氏も研究討論に参加し、 SmB_6 に関する Peters 氏の最近の研究成果を紹介し、今後の共同研究の具体案を練りました。また、トポロジと相関効果によって出現する温度誘起トポロジカル相などについても集中的な議論を行いました。このテーマに関しては、今後、研究が大きく進展していくものと期待しています。ワイル半金属相の理論と実験に関しては、Dai 教授の属する Institute of Physics が世界最先端の研究を行っており、最近の研究結果を紹介してもらうとともに、川上グループで推進している光誘起のワイル半金属相の研究を紹介しました。ワイル半金属はトポロジカル物質の中心的課題となっているので、Dai 教授との議論は大変有意義でした。さらに、Dai 教授は A01 班の分担者である松田祐司グループとも強相関電子系に関する実り多い研究討論を行いました。

滞在中の 1 月 28 日の午後に京都大学大学院理学研究科において、ワイル半金属の関する TMS セミナー「Weyl semi-metal: a new topological state in condensed matter」を開催し、Dai 教授のグループの最近の研究成果を報告して頂きました。TMS 班のメンバーである、理論の川上グループと佐藤昌利グループ、実験の前野グループと松田グループ、さらには TMS メンバー以外のトポロジカル物質に興味のある多くの方々が参加され、活発な議論が行われました。

Dai 氏の所属する Institute of Physics は中国におけるトポロジカル物質科学の重要な研究拠点となっており、今後、国際活動支援班 Topo-Q ネットワークを用いた連携を行っていくことになりました。具体的には、REP, JREP による相互派遣を行うのみならず、ワークショップなどの共同開催も積極的に検討することになりました。

2015 年度開催▽研究会報告

● 領域研究会 ● 集中連携研究会 ● CIFAR

● 第 1 回 領域研究会

2015 年 12 月 11 日ー 13 日（京都大学芝蘭会館 稲盛ホール・山内ホール）



本格的な冬の到来を迎えた師走の候、京都大学芝蘭会館において、本新学術領域初めての領域研究会が3日間に亘って開催された。会議には計128名の研究者が参加し、多くの新しい成果が発表された。本研究会は国際会議ではなかったものの、清華大学のKe He氏を始めとして多数の海外出身の研究者が参加し、本新学術領域の国内外からの注目度の高さが伺えた。また、参加者に占める若手研究者（助教、ポスドク、学生）の割合がおおよそ半分であり、若手研究者による新しい挑戦が本領域の期間中に多く行われることを予感させられた。

会議はアドバイザーの三宅氏の挨拶で幕が開き、領域代表の川上氏の領域主旨説明、続いて各研究班の代表より本領域での研究目標が説明された。これに続き、37件の口頭発表、66件のポスター発表が行われた。口頭発表の内、Ke氏（清華大）、古田氏（東大）、古崎氏（理研）、町田氏（東大）の4件の講演には30分の時間が割り当てられ、その他20分が15件、15分が18件であった。

Ke氏は磁気ドーピングされたトポロジカル絶縁体において理論的に予言された量子異常ホール状態が、分子線エピタキシー法を用いて作成された $(\text{Bi,Sb})_2\text{Se}_3$ 薄膜において実際に実現していることを、詳細な実験データと共に紹介した。古田氏は数学者であるが、数学の立場から見たトポロジカル量子現象についてコホモロジーの概念を用いて解説を行った。古崎氏は以前から対称性に基づくトポロジカル相の分類を行っているが、その相互作用効果による影響について詳細な解説を与えた。町田氏は、スタンプ法と呼ばれるテクニックを用いてツイストさせたグラフェン二重層を作成

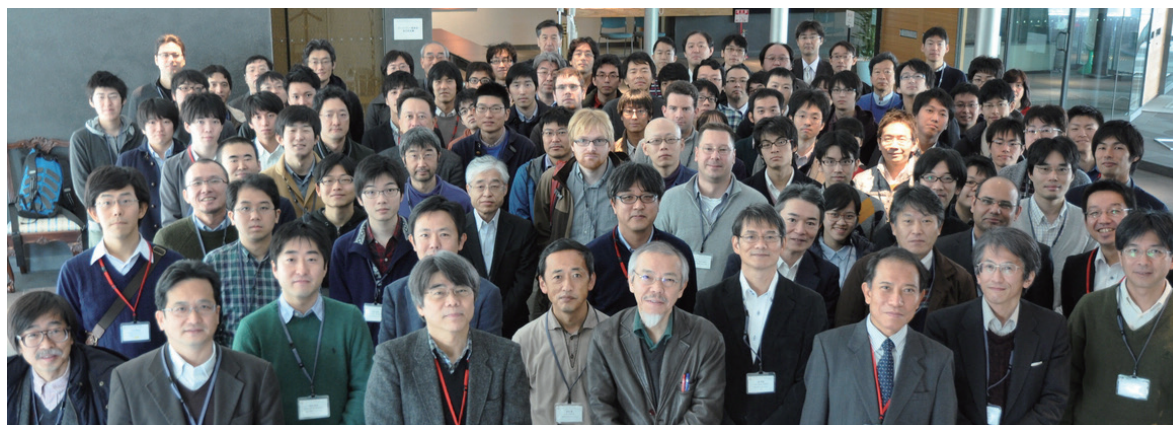
し、量子ホール効果測定を手段に、ディラックコーン結合によるリフシツ転移を報告した。

その他、20分及び15分の口頭発表においても、ワイル半金属、奇周波数超伝導、超流動 ^3He 、超伝導 $\text{Cu}_2\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、冷却原子系、中性子星におけるトリプレット超流動、トポロジカル絶縁体超格子構造物質、ループ・ノード半金属、分数量子ホール系のエッジ状態、 Sr_2RuO_4 のカイラルドメインウォール、電氣的スピン制御、量子スピン液体、その他多くの重要な研究成果が発表された。その詳細は紙面の都合上割愛するが、是非研究会のホームページからプログラムや概要集をご覧ください。

ポスターは会議初日から最終日まで、口頭発表会場に隣接するホールに掲示されていたため、コーヒープレイク等のポスターセッションの時間外にも各所で議論が行われた。また、ポスターセッションの時間前にはポスタープレビューが行われ、各発表者は1分間という短い時間の中で印象的なプレゼンテーションを行った。ポスター発表者に対しては6名のポスタープログラム委員会による選考が行われ、優れたポスター及びポスタープレビューに対しそれぞれ賞が贈られた。ポスター賞は茂木氏（東大）、荒木氏（東北大）、田尻氏（京大）、橋坂氏（東工大）、安井氏（京大）、山下氏（京大）、ポスタープレビュー賞は池谷氏（北大）、曾氏（東大）、高三氏（京大）、安井氏（京大）に授与された。

最後に、会議の運営を円滑に行って頂いた京都大学の先生、学生、秘書の方々に深く感謝の意を表します。

（文責：矢田 圭司、佐藤 昌利）



第1回 領域研究会・口頭発表プログラム



2015年12月11日(金)

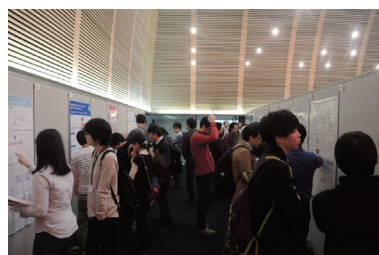
10:30 ~ 12:50		座長：上田 正仁 (10分)
10:30		Opening
10:40		アドバイザー挨拶 三宅 和正 (10分)
10:50	11AM-1	領域紹介：トポロジーが紡ぐ
		物質科学のフロンティア 川上 則雄 (20分)
11:10	11AM-2	計画研究 A01: 強相関係のトポロジカル相
		前野 悦輝 (25分)
11:35	11AM-3	計画研究 B01: 対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探究
		佐藤 宇史 (25分)
12:00	11AM-4	計画研究 C01: トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象
		藤澤 利正 (25分)
12:25	11AM-5	計画研究 D01: トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子
		川上 則雄 (25分)

14:00~15:10		ワイル半金属・超伝導体
		座長：村木 康二
14:00	11PM-1	ワイル半金属におけるスピン電荷結合
		野村 健太郎 (20分)
14:20	11PM-2	Metal-insulator transition and anomalous magnetic domain-wall conductance in pyrochlore-type iridates
		藤岡 淳 (15分)
14:35	11PM-3	ディラック電子系としての逆ペロブスカイト型酸化物 Ca_3AO (A=Pb, Sn) の物性
		岡本 佳比古 (15分)
14:50	11PM-4	ドーブしたワイル半金属超伝導の理論
		田仲 由喜夫 (20分)

15:55 ~ 16:50		奇周波数ペアリング
		座長：藤本 聡
15:55	11PM-5	奇周波数クーパーペアリング
		浅野 泰寛 (20分)
16:15	11PM-6	超流動 ^3He におけるトポロジカル量子相転移
		水島 健 (20分)
16:35	11PM-7	超流動 $^3\text{He-B}$ 相に接するエアロジェル中での奇周波数 ^3He 対の観測
		石川 修六 (15分)
16:50 ~ 19:00		ポスターセッション A (奇数番号)
		座長：好田 誠・新田 宗土
16:50		Poster Preview A (40分)
17:30		Poster Session A (90分)

2015年12月12日(土)

9:20 ~ 10:30		ヘリカル絶縁体・超伝導体
		座長：佐藤 宇史
9:20	12AM-1	ドーブしたトポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_2\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるスピン三重項超伝導
		鄭 国慶 (20分)
9:40	12AM-2	$\text{Cu}_2\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導状態において観測された自発的回転対称性の破れ
		米澤 進吾 (15分)
9:55	12AM-3	ヘリカル絶縁体・超伝導体中のエキゾチック表面状態
		佐藤 昌利 (20分)
10:15	12AM-4	3次元トポロジカル絶縁体の表面状態におけるスピン依存伝導現象
		安藤 裕一郎 (15分)
11:15 ~ 12:35		量子ホール・量子異常ホール
		座長：前野 悦輝
11:15	12AM-5	Quantum anomalous Hall effect in magnetic topological insulators
		Ke He (30分)
11:45	12AM-6	冷却原子系におけるトポロジカル量子現象
		上田 正仁 (20分)
12:05	12AM-7	実空間観察でみる分数量子ホール状態のトポロジカルな構造
		遊佐 剛 (15分)
12:20	12AM-8	Quantum and Anomalous Hall Effects in two-dimensional electron system of MgZnO/ZnO heterostructures
		Denis Maryenko (15分)



14:25 ~ 15:45		トポロジカル物質科学の展開
		座長：西田 祐介
14:25	12PM-1	トポロジカル不変量と偏微分方程式
		古田 幹雄 (30分)
14:55	12PM-2	スピノール・ダイポール BEC におけるスピンホール効果
		川口 由紀 (15分)
15:10	12PM-3	中性子トリプレット超流動における量子渦の磁場特性
		新田 宗土 (20分)
15:30	12PM-4	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)
16:20 ~ 18:30		ポスターセッション B (偶数番号)
		座長：野村 健太郎・瀬川 耕司
16:20		Poster Preview B (40分)
17:00		Poster Session B (90分)

2015年12月13日(日)

9:20 ~ 10:50		トポロジカル絶縁体・超伝導体
		座長：塚崎 敦
9:20	13AM-1	相互作用のあるトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類
		古崎 昭 (30分)
9:50	13AM-2	Gapless Andreev Bound States in HgTe topological Josephson junctions
		Russell S. Deacon (15分)
10:05	13AM-3	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 (15分)
10:20	13AM-4	トポロジカル d 波超伝導
		柳瀬 陽一 (15分)
10:35	13AM-5	相互作用するマヨラナおよびパラフェルミオン鎖の基底状態とトポロジカル秩序
		桂 法称 (15分)

11:20 ~ 12:45		2次元系量子輸送・超格子
		座長：藤澤 利正
11:20	13AM-6	トポロジカル絶縁体バルク超格子の輸送現象
		瀬川 耕司 (20分)
11:40	13AM-7	空間反転対称性の破れたトポロジカル絶縁体積層構造における幾何学的ホール効果
		安田 憲司 (15分)
11:55	13AM-8	ファンデルワールス接合における量子輸送現象
		町田 友樹 (30分)
12:25	13AM-9	三次元ハニカム格子系におけるループ・ノード半金属とポイント・ノード半金属
		江澤 雅彦 (20分)

13:55 ~ 15:20		カイラル絶縁体・超伝導体
		座長：水島 健
13:55	13PM-1	内部自由度をもつ分数量子ホール系における相転移とエッジ構造
		村木 康二 (20分)
14:15	13PM-2	カイラルエッジ状態の近接場走査型光学顕微鏡による観測
		野村 晋太郎 (15分)
14:30	13PM-3	Sr_2RuO_4 のカイラルドメインウォール
		柏谷 聡 (20分)
14:50	13PM-4	$\beta\text{-PdBi}_2$ におけるトポロジカル表面状態の超伝導状態の STM 観察
		岩谷 克也 (15分)
15:05	13PM-5	酸化物ヘテロ構造における界面誘起トポロジカルホール効果
		松野 丈夫 (15分)

15:50 ~ 17:15		スピン液体・キタエフモデル
		座長：宇田川 将文
15:50	13PM-6	半導体におけるスピン軌道相互作用を用いた電氣的スピン生成とスピン制御
		好田 誠 (20分)
16:10	13PM-7	量子スピン液体における分数量子スピン励起
		求 幸年 (15分)
16:25	13PM-8	イリジウム酸化物におけるキタエフスピン液体の実現
		北川 健太郎 (20分)
16:45	13PM-9	スピン液体の新奇素励起
		松田 祐司 (20分)
17:05		Closing (10分)

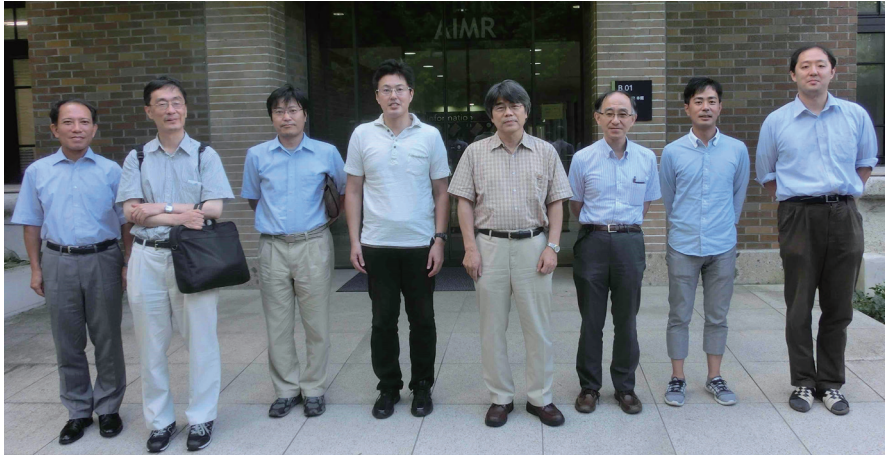
第1回 領域研究会・ポスタープレビュー講演



P1	Spin-triplet proximity effect in $\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ heterostructures	M. S. Anwar	P32	カイラルスピン液体における有限温度相転移と熱ホール効果	那須 誠治
P2	$\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の磁気的性質と電気伝導特性	杉本 雄亮	P33	Sr_2RuO_4 の量子アノマリー現象	延兼 啓純
P3	ディラック・ワイル半金属におけるスピン相関とスピン波励起	秋山 了太	P34	冷却原子を用いた相関トポロジカル相科学	西田 祐介
P4	Two-dimensional quantum transport of multivalley (111) surface state in topological crystalline insulator SnTe thin films	荒木 康史	P35	光超格子中の相関ボース原子量子ウォーク	野田 数人
P5	Dual gauge theory of quantum liquid crystals	Aron Beekman	P36	^4He Crystals Far from Equilibrium	野村 竜司
P6	Superconducting proximity effect in 3D topological insulators in the presence of a magnetic field	Pablo Burset	P37	トポロジカル絶縁体薄膜の表面状態の理論	大庭 慶之
P7	Topological d-wave Superconductivity under Tilted Magnetic Field	大同 暁人	P38	Floquet Topological Phases of Quantum Walks	小布施 秀明
P8	トポロジカル欠陥のある Weyl 半金属における Torsional カイラル磁気効果	藤本 聡	P39	トポロジカル絶縁体におけるフェルミ準位制御によるスピン偏極光電流の増大	岡田 健
P9	2次元ハニカム格子におけるスピン揺らぎ誘起超伝導	深谷 優梨	P40	多層ディラック電子系反強磁性体 EuMnBi_2 における量子化ホール抵抗の観測	酒井 英明
P10	光格子中の BEC におけるバンド・トポロジーとエッジ物質波	古川 俊輔	P41	キャリア・ドーピングしたスピンチューブのカイラリティ誘起超伝導	坂井 徹
P11	重い電子系化合物 CeCoIn_5 エピタキシャル薄膜の STM/STS 測定	花岡 洋祐	P42	弱いトポロジカル近藤絶縁体由来の Weyl 半金属	佐々木 邦信
P12	微量水素修飾グラフェンのスピン軌道相互作用と位相破壊抑制	春山 純志	P43	冷却原子系での新たなトポロジカルポンプの実現に向けて	澤田 あずさ
P13	局所分数量子ホール系における分数量子ホール子の生成実験	橋坂 昌幸	P44	光格子中の強磁性スピナーボソンの外部磁場下での相図	曾 弘博
P14	低バックル構造を持つ 2 次元物質の水素終端	服部 綾実	P45	高分解能 ARPES によるワイル半金属 NbP の表面フェルミアークの観測	相馬 清吾
P15	エッジマグネトプラズモンの Mach-Zehnder 型干渉計	檜山 直晃	P46	Controlling the Mott insulating state in Ca_2RuO_4 under non-equilibrium conditions	Chanchal Sow
P16	くりこみ群のリミットサイクルと Efimov 状態の物理	堀之内 裕理	P47	Robustness of the Spontaneous Edge Current in Chiral Superconductors	鈴木 修
P17	空間反転対称性の破れたワイル半金属におけるカイラル磁気効果	井辺 洋平	P48	蜂の巣格子キタエフ磁性体の熱励起と磁気励起	鈴木 隆史
P18	トポロジカル近藤絶縁体 YbB_{12} の表面 / バルク効果	伊賀 文俊	P49	ドーピングされたトポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_4\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導状態における比熱	田尻 兼悟
P19	リチウム欠損のあるハニカム格子系 $\text{Li}_{2-x}\text{RuO}_3$ における二量体コヒーレンス	池田 敦俊	P50	ガスソース MBE によるデルタドーピング SrTiO_3 構造の量子ホール効果の観測	高橋 圭
P20	Anomalous Proximity Effect and More Than One Majorana Fermion	池谷 聡	P51	重い電子系におけるレーザー誘起ワイル半金属	高三 和晃
P21	アクション不安定性による電気磁気効果の理論	今枝 立至	P52	Self-consistent study of Abelian and non-Abelian order in a two-dimensional topological superconductor	田中 佳織
P22	トポロジカル / チャーン絶縁体 - ディラック / ワイル電子系における創発的トポロジカル特性	井村 健一郎	P53	実効的に非整数次元の格子系とトポロジカル相	手塚 真樹
P23	バリステックな 2 次元電子ガスに誘起されたアンドレーエフ束縛状態のトンネル分光	入江 宏	P54	特異点論によるバンド間交差の分類	寺本 央
P24	重い電子系ハイブリッド超格子 $\text{CeRhIn}_5/\text{CeCoIn}_5$ における輸送測定	石井 智大	P55	High-resolution ARPES study of topological insulator $\text{TlBi}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_2$	C. Trang
P25	層状ダイカルコゲナイド WTe_2 におけるトポロジカル相転移の探索	笠原 裕一	P56	スピンアイスの分数励起	宇田川 将文
P26	トポロジカル絶縁体のヘテロ構造エンジニアリング: 高分解能 ARPES	君塚 平太	P57	多重モノポールチャージを持つワイル半金属超伝導における表面アンドレーエフ束縛状態	矢田 圭司
P27	ディラック半金属におけるトポロジカル超伝導性の理論	小林 伸吾	P58	反転中心をもたないラインノード・ディラック半金属 CaAgX ($X=\text{P,As}$)	山影 相
P28	高温量子異常ホール効果に向けたトポロジカル絶縁体薄膜への磁気変調ドーピング	茂木 将孝	P59	重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 のネルンスト効果	山下 卓也
P29	一次元近藤格子における対称性に保護されたトポロジカル相転移	中川 大也	P60	半整数量子フラクソイド検出のための Sr_2RuO_4 微小リングを用いたリトルバックス振動実験	安井 勇気
P30	光超格子中の冷却フェルミ原子を用いたトポロジカル量子ポンプ	中島 秀太	P61	カイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 での秩序変数フリップ	米澤 進吾
P31	CeCoIn_5 系トリコロール超格子によるグローバルな空間反転対称性の破れの導入	成塚 政裕	P62	共鳴 p 波相互作用するスピネス・フェルミ気体の普遍的性質	吉田 周平
			P63	Kane-Mele-Kondo 格子系における有限温度効果	吉田 恒也
			P64	極性フェリ磁性体におけるフォノンの異常熱ホール効果	吉岡 信行
			P65	時間反転対称なトポロジカル超伝導体の磁場応答	熊元 森
			P66	$\text{Fe}(\text{Se,S})$ の軌道秩序相におけるディラック電子	下山 祐介
			P67		



ポスター賞、ポスタープレビュー賞の受賞者発表



第1回トポロジー連携研究会

● 第1回トポロジー連携研究会

B01班「対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求」研究戦略

2015年8月18日(東北大学)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR)本館において、B班の連携研究会を開催した。参加者は、計画班員、領域代表、他班の研究代表者らを含む計9名であった。

最初に、川上代表から新学術領域全体の趣旨説明があり、その後B班の趣旨説明が行われた。引き続き、各担当者による研究方針の説明と最新の成果報告がなされた。研究会では、トポロジカル絶縁体を中心とした新しいトポロジカル物質、とりわけ最近大きな話題になっているディラック・ワイル半金属の示す新奇な物性と電子状態について活発に議論が交わされ、班内や班間でのいくつかの具体的な連携が提案された。研究会の後半には、メンバー間の親睦を兼ねた討議が続けられ、研究に関する情報交換が盛んに行われた。

この研究会を通じて、班員間で今後目指すべき物理や問題点を共有することができ、有意義なスタートアップの会議となった。

(文責：佐藤 宇史)

領域代表・D01班研究代表者の川上氏(京大理)、D01班の計画班メンバーである水島氏(阪大基礎工)、新田氏(慶応大)、西田氏(東工大)、佐藤昌(京大基研)、D01班連携研究者の手塚氏(京大理)、それからA01班研究代表者の前野氏(京大理)、C01班研究代表者の藤澤氏(東工大)の計8名で、濃密な議論を行いD01班の研究戦略を練った。

まず、領域発足にあたり、領域代表の川上氏から、本新学術領域全体の趣旨説明がおこなわれ、本新学術領域におけるD01班の果たすべき役割に関する共通認識の浸透が図られた。その後、D01班の計画班メンバーによる研究計画の発表および質疑応答が行われた。各メンバーの発表に関しては、強相関物質、対称性によるトポロジカル相の分類、ヘリウム3、冷却原子、中性子星など多岐にわたる内容が議論され、理論班らしさが出たものとなった。また、各メンバーが自分の持ち時間を大幅に超えて発表を行うなど熱のこもった議論が展開された。

D01班の目指すべき目標、可能な連携研究、問題点などを整理することができ、有意義な連携研究会であった。

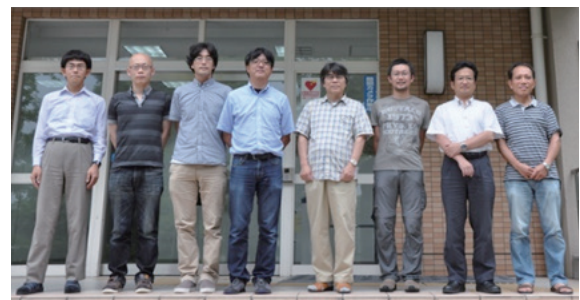
(文責：佐藤 昌利)

● 第2回トポロジー連携研究会

D01班「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」研究戦略

2015年8月20日(京都大学)

第2回トポロジー連携研究会(D01班研究戦略)が2015年8月20日(13:00-19:00)に京都大学大学院理学研究科5号館115会議室にて開催された。参加者は、



第2回トポロジー連携研究会



第3回トポロジー連携研究会

● 第3回トポロジー連携研究会

C01班「トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象」研究戦略

2015年8月28日(東京工業大学)

計画研究C01班のメンバー(共同研究者となる研究員、助教、博士課程学生を含む10名)と他班の研究代表者1名を交えてC01班の研究戦略を議論した。

まず、本新学術領域の目的を再確認し、C01班の役割(トポロジカル物質ナノ構造の輸送特性)に関する認識を高めた後、各メンバーの研究計画を発表し質疑応答を行った。主な内容は、カイラルエッジの非平衡状態(藤澤)、偶数分母占有率の分数電荷状態(村木)、ヘリカルエッジ状態の輸送特性(村木)、スピン干渉素子におけるベリー位相(好田)、永久スピン旋回状態(好田)、ワイル半金属(野村)、単原子層物質(江澤)、トポロジカル物質超格子(富永)、ショット雑音特性(小林)に関する量子輸送特性である。

トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象を探索し、トポロジカル物質を用いたデバイスの提案と実証を目指す研究計画を共有することで、問題点を整理することができ、連携研究の可能性を模索する有意義な連携研究会となった。

(文責: 佐藤 宇史)

WORKSHOPS AND MEETINGS

● 第4回トポロジー連携研究会

A01班「強相関物質のトポロジカル相」研究戦略

2015年9月6日(京都大学)

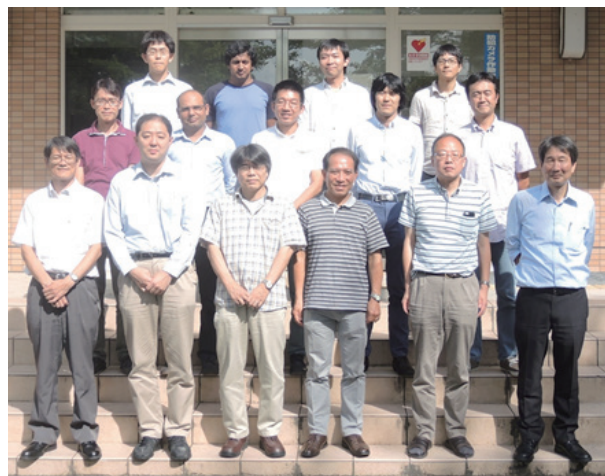
計画研究A01「強相関物質のトポロジカル相」のメンバーが集まり、領域の趣旨と計画研究の目的を共有するために、2015年9月6日(土)12:00~18:30に京都大学大学院理学研究科で開催した。

計画研究A01のメンバーに加え、領域代表者、他班の研究代表者ら合計16名で、濃密な議論を行った。まず、本領域の全体計画を再確認し、A01班の果たすべき役割に関して共通認識を高め、関連研究会の日程等を含めた情報を共有した。その後、8名のメンバーが研究計画に関する発表・質疑応答(15+15分間)を行った。

発表内容は、トポロジカル超伝導に関するものでは、半整数量子渦、強磁性体への近接効果、カイラル超伝導揺らぎによる巨大ネルンスト効果、ドーピングしたトポロジカル絶縁体などの超伝導対称性、人工超格子、ワイル超伝導、BEC型超伝導、アクチノイド化合物合成などについて議論した。さらに、強相関系の一般的性質をもとに本領域で狙うトポロジカル相の発現舞台について議論し、ハニカム格子系とKitaエフ・スピン液体、またトポロジカル半金属の研究現状についても議論した。

全体討論も通じて、A01班の目指すべき目標、班内外の連携研究、問題点などを整理・共有することができ、有意義な連携研究会となった。

(文責: 前野 悦輝)



第4回トポロジー連携研究会

● 第5回トポロジー連携研究会

「ワイル半金属・超伝導」

2015年11月6日-11月7日(東北大学)

東北大学原子分子材料科学高等研究機構(WPI-AIMR)本館において、第5回連携研究会(集中)「ワイル半金属・超伝導」を開催した。参加者は、領域代表、各班の研究代表、研究分担者・連携研究者、および領域外の招待講演者を含む計50名であった。研究会の冒頭で、主催者の佐藤から、ワイル半金属・超伝導がいま世界的に大変注目されており、本新学術領域のすべての班に共通する重要なテーマであることが説明された。その後、各研究者から最新の研究テーマについての発表があった。初日は「ワイル半金属」に、2日目は「ワイル超伝導」に主にテーマを絞り、集中的な議論が行われた。

初日の最初に、ワイル半金属のチュートリアル講演が野村によって行われ、トポロジカル絶縁体との違いなどが議論された。続いて、空間反転対称性の破れたワイル半金属のARPES(相馬)と理論(村上)についての発表があった。後半は、パイロクロアイリジウム酸化物についての実験(藤岡、Tian)とワイル半金属における電子相関効果の理論(永長)についての説明がなされた。

二日目は、最初にワイル超伝導についてのチュートリアル講演が藤本によってなされ、ワイル半金属との違いなどが議論された。また、カイラルd波超伝導体 URu_2Si_2 のネルンスト効果の実験(松田)と理論(藤本)の説明があった。ディラック半金属については、ドーブした系における超伝導の理論(佐藤(昌))、鉄系超伝導体におけるディラック電子(中山)、アンチペロブスカイトにおける輸送特性(太田)、およびディラック・ワイル半金属における磁場応答の理論(越野)の講演があり、活発な議論がなされた。さらに、スピン三重項超伝導体におけるワイル超伝導(柳瀬)と、ドーブしたワイル半金属における超伝導(田仲)についての発表があった。最後に領域代表の川上からおわりの挨拶があった。

本研究会では、講演時間(30分)に対して質疑応答の時間を長めに(15分)確保できたため、質問者が納得いくまで活発な議論が交わされた。コーヒブレークや情報交換会などの機会にも、具体的な連携・共同研究の提案がされた。この研究会を通じて、ワイル半金属・ワイル超伝導における研究の現状や今後目指すべき研究の方向性を認識することができて、有意義な集中連携研究会となった。

(文責：佐藤 宇史)



第5回トポロジー連携研究会

● CIFAR“Quantum Materials Program Meeting”の報告

2015年10月1日ー10月3日（モンリオール）

2015年10月1日～3日にモンリオールで開催されたCIFAR (Canadian Institute for Advanced Research) の "Quantum Materials Program Meeting" の会合の様子について報告します。Quantum Materials (QM) Program はカナダ及びカナダ国外の固体量子物質に関する研究者が、研究を協力して推進することを支援するCIFARのプログラムであり、Louis Taillefer 氏 (Sherbrooke 大) がその代表です。また本新学術領域 TMS の前野悦輝氏と安藤陽一氏はそのメンバーで、高木英典氏はそのアドバイザーを務めています。今回、このプログラムと日本のTMSとの交流促進のために、川上則雄氏、前野氏、藤本が参加しました。会議の参加者は大部分が北米の方々でしたが若干名ヨーロッパから来ている人もいて、下記の発表者以外に L. Balents, Y. B. Kim, X. G. Wen, S. Sachdev, G. Kotliar, A. Georges, Seamus Davis, M. Gingras, M. Franz などが参加していました。いずれも国際会議などで Plenary talk をしそうな大御所ですが、残念ながら今回は彼らの talk はなく、議論に参加するのみでした。

講演プログラムは末尾に掲載した通りです。TMSからは川上氏が本新学術領域 TMS について紹介する講演を行い、藤本が URu_2Si_2 の巨大 Nernst 効果について発表を行いました。トポロジカル関連での発表は、他に A. Vishwanath 氏が nonsymmorphic な結晶対称性を有する系におけるトポロジカル秩序に関する発表を行い、L. Fu 氏が多軌道電子系でトポロジカル超伝導が実現する微視的な機構について発表 (Geneva の M2S での講演とほぼ同じ内容でした) を行いました。また、冷却原子気体関連の発表も3件ほどあり、中でも M. Greiner 氏による多原子系における entanglement entropy の測定の話は非常にエキサイティングなものでした。全体的に銅酸化物高温超伝導に関する発表が多いプログラム構成になっており、特に電荷秩序と超伝導との共存に関する発表が5件ほどありました。いずれも電荷

秩序は超伝導発現機構に直接、関わっているのではなく、むしろ競合しているという（従来のメジャーな解釈と矛盾しない）結論のようです。また、量子スピン液体に関する実験の発表もいくつかあり、P. Mendel 氏がハイパーカゴメ Ir 酸化物について、C. Broholm 氏がパイロクロア物質 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の spin ice 状態について、今井氏 (McMaster 大) がカゴメ磁性体におけるスピンギャップの NMR 測定について講演を行いました。いずれも本新学術領域でも重要テーマとして挙げられている物質です。もちろんトポロジカルな側面についてはまだまだ実験で観測される段階ではありませんが、強相関系におけるトポロジカル相の究極的なテーマであり、今後の展開が注目されます。

最終日、Taillefer 氏が朝食時にトポロジカル関連の研究をしている人たちを集めて、議論の場を設けました。参加者は、Taillefer 氏、川上氏、前野氏、Balents 氏、Liang Fu 氏、A. Vishwanath 氏、M. Franz 氏と藤本でした。この朝食セッションで、Weyl 半金属、Weyl 超伝導・超流動に話題が及んだ際、Liang Fu 等と日本からの参加者の間に、用語の定義に微妙なズレがあることに気づきました。Liang Fu は Weyl 半金属・超伝導ではディラック点の縮退が完全に解けているべきという認識で、これは確かに本来の Weyl フェルミオンの定義通りです。これに対して、日本からの参加者（及びおそらく日本の専門家の方々の多く）は超流動ヘリウム3のA相などは、スピン自由度の自明な縮退があるもののBCSギャップのポイントノードからの1粒子励起がWeyl フェルミオンとして振る舞うWeyl 超流動であるという認識です。ヘリウム3におけるWeyl 超流動状態を (Weyl 半金属などという言葉がまだなかった時代に) 最初に考察したのは、G. Volovik だと思いますが、彼もスピン自由度による自明な縮退は考慮せずに chiral anomaly などを議論しており、日本の多くの研究者と同じ立場です。これに対して、Liang Fu は A



モントリオールの風景

相を Weyl にするためにはスピン縮退を解かないといけないと思っています。Weyl 半金属・超伝導の研究が基本概念の形成段階でまだまだ発展途上であることを物語っているようです。

全体的に、出席者の数に比べると講演数が少ない会議でしたが、その分、普段、あまりお会いできない方々とゆっくりお話しする機会が得られたのが大きな収穫であったと思います。コーヒープレイクで、X. G. Wen 氏と話をしている際、これからの理論物理学研究において一番重要な数学道具は Category theory だと彼が強調しているのが印象に残りました。また、「その点、日本には素晴らしい数学者がたくさんいて羨ましい」とも言われていました。正直、日本国内のトポロジカル絶縁体・超伝導体研究において、物理研究者と数学者との交流は、これまで活発とは言い難かったのではないかという個人的な印象があり、Wen 氏の話聞いて、反省させられる気がしました。これに関連して昨年 12 月に開催された第 1 回領域研究会において古田幹雄先生にご講演いただき、議論していただいたことは、上述の意味で重要な前進かもしれません。

3 日間の会議を通して、トポロジカル物質の研究が、世界的に最も競争の激しい重要テーマの一つであるという事実が再認識されました。近年、CIFAR を含め海外で次々とトポロジカル関連の研究プロジェクトが幾つも立ち上げられており、今後、TMS がそれらの海外プロジェクトとも交流しながら、その中で際立ったプレゼンスをいかに発揮していくかが問われてくるでしょう。

(文責：藤本 聡)

PROGRAM

OCTOBER 1

- | | |
|---------------------------------|--|
| Frédéric CHEVY (Paris) | Bose-Fermi superfluid mixtures |
| Markus GREINER (Harvard) | Measuring entanglement entropy through the interference of quantum many-body twins |
| Randy HULET (Rice) | Antiferromagnetism with ultracold atomic fermions |
| Satoshi FUJIMOTO (Osaka) | Giant Nernst effect due to chiral superconducting fluctuations |

OCTOBER 2

- | | |
|--|---|
| Norio KAWAKAMI (Kyoto) | The Topological Materials Science (TMS) program in Japan |
| Yann GALLAIS (Paris) | Nematic fluctuations and superconductivity in iron-based superconductors |
| Marc-Henri JULIEN (Grenoble) | Charge order in YBCO, with and without magnetic fields |
| Mohammad HAMIDIAN (Harvard/Cornell) | New techniques for density wave visualization in the cuprate pseudogap regime |
| Cyril PROUST (Toulouse) | High-field studies of the Fermi surface and charge order in YBCO |
| Johan CHANG (Zürich) | High-field X-ray studies of charge order in YBCO |
| Nicolas DOIRON-LEYRAUD (Sherbrooke) | Seebeck studies of charge order in YBCO |

OCTOBER 3

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Philippe MENDELS (Paris) | Spin-liquid physics: the case of the hyperkagome iridate $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ |
| Collin BROHOLM (John Hopkins) | Spin ice order in $\text{Pr}_{2-x}\text{Ir}_{2-x}\text{O}_{7-y}$ |
| Ashvin VISHWANATH (Berkeley) | Recent developments in topological semimetals |
| Liang FU (MIT) | Odd-parity superconductors: topological and Weyl |
| Takashi IMAI (McMaster) | NMR evidence for a gapped spin-liquid ground state in a kagome Heisenberg antiferromagnet |

●中国 SCCP のワークショップ “ Sr_2RuO_4 ” に参加して

2015 年 12 月 5 日—12 月 7 日（上海）

上海交通大学（Shanghai Jiao Tong University: SJTU）で 2015 年 12 月 5—7 日に開催された “The 2015 International Workshop on Sr_2RuO_4 : Unresolved Issues and Prospects” に参加しました。このワークショップは本新学術領域研究 TMS が国際連携を進めている上海交通大学の Shanghai Center for Complex Physics (SCCP) が主催するもので、このセンターの所長は TMS のアドバイザーの Anthony Leggett 教授（イリノイ大と SJTU 兼任）、副所長はペンシルバニア州立大との兼任の Ying Liu 教授です。

この研究会は Ying Liu 教授と Manfred Sigrist 教授（ETH）が組織したもので、その目的は Sr_2RuO_4 の超伝導対称性をテーマに、1994 年の超伝導発見以来の主要成果と解釈の問題点を専門家の間でじっくり話し合っており、最終決着に向けての現状認識を深めようとするものです。 Sr_2RuO_4 のトポロジカル超伝導に関しては、1999 年に早くもカイラル超伝導のエッジ状態の性質が議論されており [1]、最近盛んになったトポロジカル超伝導研究の先駆的成果がありました。結論として、現在のカイラル・スピン三重項のシナリオで説明出来ない現象もあるものの、それに代わって多くの現象を矛盾なく説明できるモデルもないという現状を確認した研究会でした。ほとんどの講演を一つの超伝導体に絞った今回の研究会は、関係者にとって非常に貴重な機会でした。

研究会は 11 名の講演者を含む約 30 名の出席者でのこじんまりしたもので、主な講演者は 45 分講演以外に個別テーマの 15 分講演も行いました。講演者以外に Li Lu 教授（The Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences (IOS, CAS)）、Fuchun Zhang 教授（浙江大学）なども参加され、活発な議論がありました。また前野は TMS の紹介、特に国際ネットワーク “Topo-Q” プログラムを紹介する講演も行いました。

初日のセッションは、会議参加者が宿泊するホテルに近い旧キャンパス（Xuhui Campus）の格式高い会議室で行われました。会議 2 日目・3 日目は、上海市中心から南方にあるメインキャンパス（Minhang Campus）に場所を移し、物理学棟 12 階の SCCP セ

ミナー室でセッションが行われました。下の写真は物理学棟から見下ろしたキャンパスの素晴らしい眺望です。3 日目は月曜日だったせいで、ホテルからキャンパスまでの会議バスが、通勤ラッシュの信じられないような重い交通渋滞に巻き込まれました。

初日には、前野は Sr_2RuO_4 の超伝導対称性をめぐる論点を話し、Sigrist 教授は超伝導対称性のまとめと、Ru 金属との界面で超伝導転移温度が倍増するいわゆる「3-K 相」の物理を議論しました。石田憲二教授（京大）は Sr_2RuO_4 の核磁気共鳴のレビュー講演で、特に最近の精密化実験で得られたスピン三重項特有のナイト・シフト増大効果を紹介しました。2 日目には Mineev 教授（CEA, Grenoble）が、 Sr_2RuO_4 の超伝導対称性について、これまでの実験・理論を網羅した非常によく練られたレビューを行いました。キーとなる実験結果を精査し、結論はスピン三重項で、軌道は二つの可能性、すなわちこれまで有力とされているカイラル超伝導か、あるいはある非カイラル状態が最有力というものでした。前者は時間反転対称性の破れたトポロジカル超伝導状態で、後者では上部臨界磁場の抑制現象を説明できる可能性があるということでした。

カイラルエッジ流については Wen Huang 氏（McMaster 大）から理論解説、また Liu 教授からその観測を目指す巧妙な実験の経過報告がありました。 Sr_2RuO_4 の薄膜の超伝導化にはこれまで多くの専門家が挑戦してきましたが、一つしか成功報告がありません [2]。Liu 教授は PLD や MBE での製膜例をもとに、超伝導化しない理由を分析しました。このほか、MPI Dresden からは Clifford Hicks 博士と Alex Steppke 博士が、伸張・圧縮両方の歪印加での Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度の変化を議論しました。

[1] M. Matsumoto and M. Sigrist, J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 994 (1999).

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

（文責：前野悦輝）



物理学棟から望んだ上海交通大学のキャンパス。（許可の上転載）

● *BIG Ideas in Quantum Materials* : EPIQS ワークショップに参加して

2015 年 12 月 14 日ー 12 月 18 日 (ラホイア)

ラホイア (La Jolla) で 2015 年 12 月 14ー18 日に開催された “BIG Ideas in Quantum Materials Workshop” に参加した。私のミッションは、この研究会で当新学術領域研究「トポロジカル物質科学 (TMS)」を紹介し、特に国際ネットワーク “Topo-Q” プログラムの詳細を紹介するとともに、米国ムーア財団の “Emergent Phenomena in Quantum Systems”(EPIQS) プログラムの関係者とアライアンスワークショップ開催についての計画を進めることにあった。また TMS-*PD* の Sow 博士が中心に進めている研究成果のポスター講演も行った。京都での領域研究会の翌日に出発し、成田ーサンディエゴの快適な直行便を利用してこの研究会に駆けつけた。開催場所はカリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) のスクリプス海洋研究所の会議施設で、会議ディナーは同研究所付属の水族館で行われた。

BIG Ideas と題したこの研究会はムーア財団や ICAM がスポンサーであるが、EPIQS プロジェクトに採択された研究者の一人、Basov さん (UCSD) から提案されたと聞いた。セッションの構成は良く工夫されていた。3 日間の会期中、毎日午前には 2 セッション、昼食に続いて午後 3 時半までは日替わりのポスターセッション、そして午後に長めの 1 セッションがあった。セッションは全てミニシンポジウムの形態で、冒頭には座長による趣旨説明 (15 分間) があり、それに続いて午前には各 3 名の講演、午後は 4 名の講演があった。各講演時間はプログラムに 20 分間と明記してあるが、そのあとに 15 分間の質疑応答時間がとってあった。概ねすべての講演者はこの 20 + 15 分間の構成をよく守っていた。初日の最後には私から TMS プロジェクトと Topo-Q プログラムの紹介をする 10 分間講演を追加してもらった。また 2 日目の会議ディナーでは、UC Berkeley (UCB) の Ramesh さんがエネルギー省の太陽光エネルギー政策の責任者を務めた経験をジョークも交えて熱く語った。

セッションのテーマとして、“Topology and New States of Matter” が 2 セッション、“Superconductivity” が 2 セッション、その他には “Two Dimensional Materials”、“Quantum Control and Information”、

“Visualization of Physical Phenomena”、“Non-equilibrium Phenomena and Measurements under Extreme Conditions”、さらに “Social Impact” もあった。この会議では各講演者は「自分の講演テーマに関して何が Big Idea なのか？」を 1 枚のスライドに明記することになっていた。以下では、トポロジカル物質に関する講演でどのような BIG Ideas (以下 *BI*) が披露されたのかを中心に、会議の雰囲気をお話したい。

トポロジカル相に関しては、最初のセッションはまず座長 Joel Moore さん (UCB) から 3 次元ディラックとワイル金属の重要性、マヨラナフェルミオン確証が “Holy Grail (聖杯)” であるなどの話があった。このセッションでは、当 TMS の国際アドバイザーでもある S.C. Zhang さん (Stanford) は、*BI* として Big Data や Machine Learning など駆使してトポロジカル量子物質を予言して応用までつなげることを挙げた。Armitage さん (Johns Hopkins) はテラヘルツ分光の講演で、*BI* として異なる断面形状の試料などでの分光によるトポロジカル相の実証を挙げた。Samath さん (Penn State) は MBE を駆使したトポロジカル絶縁体と磁性体・超伝導体との様々なハイブリッド系での Topological Spintronics 展開を *BI* に挙げた。

最終日午前のもう一つのトポロジカル相セッションでは、まず座長の Gedik さん (MIT) が光誘起のトポロジカル相創成を *BI* に挙げた。講演者の Madhavan さん (イリノイ UIUC) は試料を歪ませることで結晶対称性に由来するトポロジカル状態を制御する試みを話した。Ong さん (Princeton) の講演題目は “Chiral Anomaly in Dirac/Weyl Semimetals” で、特にカイラルアノマリーの歴史的背景から実験での検証まで、実に明快で聴衆にわかりやすい説明があった。*BI* にかえて Future Directions として挙げたテーマは、1. カイラルアノマリー、2. マヨラナフェルミオン、3. スピン液体と量子磁性体、4. 近接効果で誘起された超伝導電子対、5. 整数・分数量子ホール系の新奇なトポロジカル視点 (parafermion など) で、TMS で取り組んでいるのとはほぼ同様のテーマを含んでいる印象であった。方向性が一致していると喜んではおれず、TMS ではいかに世界的に独自性・独創性のある成果を出しているか

が問われるが、TMS メンバーの現在の活躍からは大いに期待できると思った。Vishwanath さん (UCB) は、ワイルド半金属とトポロジカル絶縁体の違いとして、表面のフェルミアーキとバルクのアイラルアノマリーの重要性を議論し、表面とバルク状態の接続性に関する同じ UCB の Analytis グループの実験結果も紹介した。「Big Ideas として Wild Ideas がある」というスライドだったので、休憩時間に私から「あれは『Weyled』 Ideas』と書いてもよかったのでは?」と聞いたところ、次回からはそのようにしよう、ということだった。このネタは私もどこかの機会に使わせてもらうことで許可を得た (本稿で早速使用)。

このほかのセッションでもトポロジカル物質に関連する講演が多かった。Yacoby さん (Harvard) は、2 次元量子スピンホール (QSH) 絶縁体のエッジ状態「可視化」の実験を紹介した。これは、超伝導リード線からの近接効果で誘起される電子対が試料端 (エッジ) にだけ出現することを、超伝導臨界電流の磁場依存性をフーリエ解析した実空間分布で示した実験 (Nature Physics **10**, 638 (2014)) である。それを発展させた成果 (Hart *et al.*, arXiv: 1509.02940) の説明もあった。

超伝導に関しては、2 日目のセッションで Schuller さん (UCSD) 座長のもと、CIFAR 量子物質プロジェクト代表者の Taillefer さん (Sherbrooke) と Davis さん (Cornell) が銅酸化物高温超伝導体の相図に関して、特に量子臨界点の起源や擬ギャップと電荷秩序の関係について最新データをもとに議論した。3 日目は Chubukov さん (Minnesota) 座長で、Maple さん (UCSD)、Keimer さん (MPI Stuttgart) らが講演した。

2 次元物質のセッションを含むいくつかのセッションで、グラフェンや MoS_2 などの講演が Phillip Kim さん (Harvard) によるものをはじめざっと数えて 8 件もあり、USA でのこの分野への関心の高さがうかがい知れた。いわゆるスタンプ法で素子作製したファンデルワールス・ヘテロ接合に関する研究は、TMS の研究会でも何度か紹介してもらっていたが、光との相互作用を扱う講演も多かった。グラフェンなどの基板に必須の物質として、谷口さん・渡邊さん (NIMS) により高圧合成された六方晶窒化ホウ素 (h-BN) の重要性が強調されていたことも印象的であった。

予想以上の参加者数があったせいか、会場の 2 階席は大学院生と PD 専用にして、1 階席は講演者とシニ



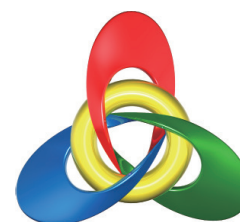
図: ムーア財団の EPIQS プログラムの運営を担う Dusan Pejakovic 博士 (左) と Ernie Glover 博士 (中)。筆者と会議ディナーにて。

ア参加者に譲ってもらえるよう Basov さんから申し訳なさそうにアナウンスがあった。その代り各セッションでは 2 階席からの質問時間に各座長から十分な配慮があった。これがアメリカスタイルかと改めて感心したのは、演台の後ろに立ったままで講演したのは私を含めて数名だけで、ほとんどの講演者はスクリーンの両端から聴衆席の通路まで縦横に動き回って熱弁をふるっていたことである。

EPIQS プログラムは、米国ムーア財団の大型予算プログラムで、電子多体系での高温超伝導、重い電子状態、新準粒子の出現などの基礎研究を対象に 2014 年 11 月頃から 5 年間の補助を行っている。実験研究者 19 名に総額約 41 億円、物質合成専門家 12 名に約 24 億円、そして理論センターとして 6 大学に総額約 10 億円の補助がある。理論センターに選ばれたのは Harvard, MIT, Stanford, UCB, UCSB, UIUC である。量子ホール系を含めたトポロジカル物質科学は主要テーマの一つであり、TMS の海外アドバイザーの S.C. Zhang さん (Stanford)、Anthony Leggett さん (UIUC) をはじめ、TMS メンバーと交流の深い研究者も多い。幸いなことに EPIQS プロジェクトと TMS プロジェクトとのパートナーシップが構築されつつある。

アライアンスワークショップの企画については、Pejakovic さんから UCB の施設を使用して TMS と EPIQS の合同開催の提案をいただいていたが、今回の会期中で直接相談して具体的な企画を進めることができた。今回の会議でも座長を務めた Moore さん (UCB) を米国側の組織委員長として 2016 年後半に開催する案が出ており、Moore さんからは会議施設の詳しい様子を聞くことができた。また Moore 財団は今後、Topo-Q のような人材交流プログラムの実施にも大変関心があるということであった。今後、両プロジェクトの交流によって相乗効果生まれることは間違いないだろう。

(文責: 前野 悦輝)



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」メンバー紹介

アドバイザー

国内	川村 光	大阪大学 大学院理学研究科
	樽茶 清悟	東京大学 大学院工学系研究科
	三宅 和正	豊田理化学研究所
海外	Anthony J. LEGGETT	The University of Illinois at Urbana-Champaign
	Shoucheng ZHANG	Stanford University

計画研究

A01：強相関物質のトポロジカル相

研究代表者	前野 悦輝	京都大学 大学院理学研究科
	研究分担者	松田 祐司
連携研究者	高木 英典	京都大学 大学院理学研究科
	鄭 国慶	東京大学 大学院理学系 / マックス・プランク研究所
	藤本 聡	岡山大学 大学院自然科学研究科
	浅野 泰寛	大阪大学 大学院基礎工学研究科
	宇田川 将文	北海道大学 大学院工学研究院
	寺嶋 孝仁	学習院大学 理学部物理学科
	芳賀 芳範	京都大学 低温物質科学研究センター
	米澤 進吾	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター
	笠原 裕一	京都大学 大学院理学研究科
	北川 健太郎	京都大学 大学院理学研究科
	俣野 和明	東京大学 大学院理学系研究科
		岡山大学 大学院自然科学研究科

B01：対称性に基づいた新規なトポロジカル相の探求

研究代表者	佐藤 宇史	東北大学 大学院理学研究科
	研究分担者	瀬川 耕司
連携研究者	柏谷 聡	京都産業大学 理学部物理科学科
	塚崎 敦	産業技術総合研究所 電子光技術研究部門
	田仲 由喜夫	東北大学 金属材料研究所
	安藤 陽一	名古屋大学 大学院工学研究科
	永長 直人	ケルン大学 / 大阪大学 産業科学研究所
		東京大学 大学院工学系研究科

C01：トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

研究代表者	藤澤 利正	東京工業大学 大学院理工学研究科
	研究分担者	村木 康二
連携研究者	好田 誠	NTT 物性科学基礎研究所
	野村 健太郎	東北大学 大学院工学研究科
	江澤 雅彦	東北大学 金属材料研究所
	新田 淳作	東京大学 大学院工学系研究科
	富永 淳二	東北大学 大学院工学研究科
	小林 研介	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門
		大阪大学 大学院理学研究科

D01：トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

研究代表者	川上 則雄	京都大学 大学院理学研究科
	研究分担者	上田 正仁
連携研究者	佐藤 昌利	東京大学 大学院理学系研究科
	水島 健	京都大学 基礎物理学研究所
	西田 祐介	大阪大学 基礎工学研究科
	新田 宗土	東京工業大学 理工学研究科
	手塚 真樹	慶應義塾大学 日吉物理学教室 自然科学研究教育センター
	段下 一平	京都大学 大学院理学研究科
		京都大学 基礎物理学研究所

今後の会議予定

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
H27 年度 (2015-16)		[第 6 回] 2/9-2/10 東京大学	
H28 年度 (2016-17)	12/16-12/18 東北大学		9 月 Stuttgart (ドイツ MPI) 12 月 Moorea (米国 EPiQS)
H29 年度 (2017-18)	5 月 東京工業大学 * 国際会議		
H30 年度 (2018-19)	名古屋大学		
H31 年度 (2019-20)	京都大学 * 国際会議		

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。
ただし以下で課題番号は、計画研究 A01: 15H05852, B01: 15H05853, C01: 15H05854, D01: 15H05855 です。

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

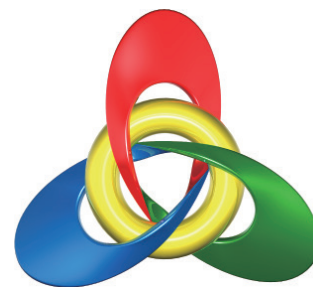
編 集

後 記

本新学術最初のニューズレタをお届けします。入稿間際、重力波の検出の発表が各種メディアで大きく扱われ、物理学・基礎科学への社会の関心と期待をあらためて感じました。研究者は常に他分野の研究者への、そして異なる専門性を持った人たちからなる社会への説明を求められます。重力波やニュートリノ振動の実証、惑星探査といったいわゆる巨大科学に比べ、トポロジカル量子現象を基軸とする物質科学の研究は、一言で何をやっているか説明することは難しいように思います。しかしこの分野にはここで繰り返すまでもなく固有の魅力があります。これを、やや長い言葉が要るとしても、発信し続けることで、前提となる量子力学の理解の浸透や、この分野でも活用される大型装置の必要性が受け入れられることにもつながるのではないのでしょうか。

D 班の連携研究者、加えて事務局の一員としても参画させていただくこととなり頑張っています。多地点通話可能なテレビ会議システムが稼働を開始し、遠隔でもお目にかかる機会があるかもしれません。どうぞよろしくお願いいたします。(文責：手塚 真樹)

NEWSLETTER No.1



- 2 巻頭言
「トポロジカル物質科学」の創成に向かって / 川上 則雄 (京都大学)
新学術領域「トポ物質科学」第一回領域研究会に参加して / 三宅 和正 (領域アドバイザー)
- 4 今年度の計画研究班トピックス
計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 8 トピックス
磁性ワイル半金属におけるスピンと電荷の関係 / 野村 健太郎 (東北大学)
2次元トポロジカル絶縁体の研究 / 村木 康二 (NTT 物性科学基礎研究所)
- 13 メンバー紹介
- 36 PD 紹介
Chanchal sow (京都大学)
- 37 2015 年ピックアップトピックス
- 38 若手励起プログラム報告
関根 聡彦 (東北大学金属材料研究所 日本学術振興会特別研究員 PD)
- 39 REP 招聘報告
K.T. Law 教授 (香港科学技術大学)
Xi Dai 教授 (Institute of Physics, Beijing, China)
- 41 2015 年度研究会報告
第 1 回領域研究会 / 第 1 ~ 5 回 TMS 連携研究会 / CIFAR 報告 / Shanghai 報告 / EPIQS 報告
- 52 メンバー名簿

今後の会議のお知らせ、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 1 号

発行日：2016 年 2 月 25 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/>