

NEWSLETTER No.5

CONTENTS

2 巻頭言

TQP の締括りへのエール / 家 泰弘 (領域アドバイザー)

対称性とトポロジカル量子現象 / 前野 悦輝 (京都大学)

4 今年度の計画研究班トピックス、5年間の成果

計画研究班 A01、B01、C01、D01

18 受賞ニュース

安藤 陽一 (大阪大学) / 井上 学術賞、大阪科学賞

水島 健 (大阪大学) / 第9回凝縮系科学賞

20 トピックス

空間反転対称性の破れた超伝導体 / 鄭 国慶 (岡山大学)

ワイル半金属超伝導体における十字型フラットバンド / 矢田 圭司、佐藤 昌利、田仲 由喜夫 (名古屋大学)

Sr_2RuO_4 の超伝導一次相転移の謎 / 米澤 進吾 (京都大学)

29 公募班課題概要 (A01~D04)

50 2014年ピックアップトピックス

51 若手相互滞在プログラム報告

塩見 雄毅 (東北大学) / ムハマド・シャーバズ・アンワー (京都大学)

鈴木 修 (北海道大学) / 前田 賢輝 (岡山大学)

55 2014年度研究会報告

CIFAR 報告 / 第16回~第17回集中連携研究会

第8回物性科学領域横断研究会 / TQP2014

65 コラム

LT27 参加報告 / 水島 健 (大阪大学)

第156回ノーベル・シンポジウム 参加報告 / 佐藤 昌利 (名古屋大学)

優秀さの3段階と独自の課題を見つける「地図メソッド」 / 上田 正仁 (東京大学)

編集後記

TQP の締括りへのエール

家 泰弘 / 東京大学 物性研究所 (領域アドバイザー)



平成 22 年度からスタートした新学術領域研究「トポロジカル量子現象」ですが、早いもので最終年度を迎えました。本領域のメンバーにとっては、濃密な研究活動による充実感と達成感を味わう一方、とても短かく感じられる 5 年間だったのではないかと思います。

本領域が発足する頃、エキゾチックな超伝導やトポロジカル絶縁体の研究が世界的に大きく進展しつつありました。それまで素粒子物理学の世界の概念であったマヨラナ粒子を凝縮系において観測する可能性や、トポロジカルに保護された状態を量子計算に用いる可能性など、エキサイティングな提案もなされ、新たな研究展開の予感がありました。そのような中で、時機を逸せず本領域が立ち上がったことは、直接の関係者のみならず、我が国の物性コミュニティにとっても、たいへん有意義なことであったと思います。それが可能となったのは、本領域に先立つ「スーパークリーン物質」の特定領域での活動というベースがあったおかげで、かなり広い分野の研究者の人脈ができていたことが大きかったように思います。

本領域の特徴の一つは、超流動ヘリウム 3 や冷却原子系のような系と固体電子系とを俯瞰して研究を進めていることにあります。これは、量子多体系が示すさまざまな秩序、対称性、そしてトポロジカルな観点からの分析を広い視野で行う上で極めて有用なアプローチであると思います。一方、液体ヘリウムや冷却原子系と固体電子系とは実験の手法やノウハウが大きく異なります。本領域ではそのような差異を認識しつつ、相互に有益な知を引き出すための努力が行われ、一定の成果を挙げたと思います。

物性実験における試料の質の重要性は改めて強調するまでもありません。トポロジカルな現象には本来ロバストなものが多いはずではありますが、固体電子系を対象とした実験で物理の本質を抉り出すためには、結晶の質とともに不純物濃度や界面の質の制御が不可欠です。そのための地道な努力が多くグループで行われ、領域内外で高品質試料が共有されたことはこの分野の発展に大きく貢献した要素であり、海外の研究者が羨望する科研費の新学術領域制度の特徴がまさに実践されたものと思います。

この 5 年間、領域代表の前野先生をはじめ、計画研究・公募研究のメンバーの渾身の努力によって、優れた研究成果の数々が本領域から国際的に発信された

ことは喜ばしい限りです。そのことは、論文リストや、領域メンバーの昇進や受賞の一覧からも読み取ることができます。昨年 12 月に開催された国際会議 TQP2014 には、海外からもアクティブな研究者が参加し活発な議論が行われ、本領域の海外での認知度が高いことが伺えました。

研究成果のみならず、本領域は領域運営に関してもお手本となるような点が多々ありました。集中連携研究会や若手の短期滞在プログラムを通じて、領域メンバーの研鑽やノウハウ交換を促進したり、CIFAR との連携をはじめ海外研究グループとの交流による、若手研究者の海外派遣や海外からの受け入れも有効に機能しているものと見受けられました。アウトリーチ活動も活発に行われているようで、その努力に敬意を表します。ちなみに私は、個人的な意見としては科研費の受給とアウトリーチ活動を関連づけるような現行規程には大いに疑問を抱いています。本領域が発足する頃に、総合科学技術会議での議論から、高額な競争的資金を受けた研究者の評価にアウトリーチ活動を実質的に義務付けるような方針^{*1}が打ち出されました。もちろんアウトリーチ活動は重要であって推進すべきなのですが、それを競争的資金の受給とリンクするのは筋違いだと考え、学術分科会でもそのように主張しましたが聞き入れられませんでした。人材育成にせよアウトリーチにせよ、きちんとした制度設計をせずに安易に科研費に関連づけるような風潮がありますが、本来研究活動に専念すべき科研費受給者に余分の duty を課するのは制度本来の趣旨を歪める動きだと危惧しています。

つつい愚痴めいたことを書いてしまいましたが、アウトリーチ活動や人材育成の実績も含めて、本領域が最終評価において高い評点を得ることを確信しています。領域の終了が近づくと、とかく次のことに意識が向かいがちですが、大型の科研費を受けて行った活動をきっちり総括することも重要です。領域代表の前野先生が最終取りまとめで苦勞されることがないように、メンバー全員のご協力をお願いすることをもって、私からの老婆心メッセージとします。

※ 1 件当たり年間 3 千万円以上の公的研究費（競争的資金またはプロジェクト研究資金の配分）を受ける研究者等に対して「国民との科学・技術対話」に積極的に取り組むよう公募要項等に記載する。

対称性とトポロジカル量子現象

前野 悦輝 / 京都大学大学院理学研究科 (領域代表・A01 班計画研究代表者)



遂に本領域も4年間半のメインの活動期間の終盤となり、ニュースレターも最終号となりました。12月には京都で領域国際会議を盛況のうちに開催することができました。最終年度に盛り上がった状態で終えることができるかどうか、このようなプロジェクトの成否の指針となると当初から考えていました。皆様のご活躍の賜物で、まさに望んでいた通りの状態で最終段階を迎えることができました。

ニュースレター最終号も盛りだくさんです。今年度は集中連携研究会として、領域活動の総括を行うための合宿も行いました。トピックス記事は、いずれも今後のさらなる研究展開を約束するような内容になりました。公募研究代表の皆さんにとっては後期2年間という短期間に関わらず、新学術領域開拓のために努力いただきありがとうございました。

若手相互滞在プログラムは、国際会議への派遣も加えて最後まで多くの若手にご利用いただきました。それぞれの報告書を読み、きっと後あとまで記憶に残る体験をしていただけたものと確信しています。TQP2014 国際会議は、名古屋でのTQP2012と同様、登録締め切り日前に前倒しで締め切らせていただくという盛況ぶりでした。私自身は「趣向」が高じてしまい、お茶席の段取り、コーヒーと菓子の調達(チョコのセレクション)、エクスカージョンのおむすびネタの決定などに、事務局や研究室のメンバーを巻き込んで迷惑をかけながら、精力を使い果たしてしまったのが反省点です。おかげで、ニュースレター原稿は私の分が最後になってしまいました。エクスカージョンで訪れた「八相の庭」は鄭さん、斎藤さんの記事でも取り上げられていますが、私も気に入って写真をパソコンの背景に使っています。

最終号はコラム記事も特に充実しています。研究能力の「上田理論」に関しては、(自分のことで申し訳ないのですが、)私も学部生時代に「第一種的能力限界」と「第二種的能力限界」という言葉を作って、自分の才能のなさや格闘していたのを思い出しました。これは上田さんの云われる最初の二つのことのようにすね。その後の自分なりの結論としては、周りにいく

らでも自分より優秀な人材がいる中で、自分ならではの得意技(研究スタイル、芸風?)を発見できたなら何とかやっていけるのでは、というものです。

本プロジェクトの名称の「対称性の破れた凝縮系における」という部分は、時間反転対称性の破れ、スピン・軌道対称性の破れ、空間反転対称性の破れ、など本領域で扱うトポロジカルな凝縮系の特徴を示しています。(鄭さんのトピックス記事でも説明があります。)一方、トポロジカル絶縁体など最近の研究を先導するトポロジカル物質の不変量は、時間反転対称性による保護に起因します。この原理から、本プロジェクトの活動中に、新たな大きな展開の潮流が生まれました。すなわち、結晶構造の鏡面対称性などの点群対称性によって保護された「トポロジカル結晶絶縁体」が生まれ、また同様の新視点で超伝導・超流動相の理解が深まりました。この点から研究の現状と今後の一面を表現すると、「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」の研究によって、「新しい対称性に保護されたトポロジカル量子現象」の糸口が加わって、今後の研究の一層の展開がなされる、といえそうです。

さて本領域のロゴは、この冊子の裏表紙にも説明がある通り、ポロメの輪を貫く3回ひねりのメビウスの帯です。数年以上前の海外出張の際の機内販売で、ポロメの輪のペンダント・プレスレット・指輪の3点セットを見つけ、安かったこともあり、「巻頭写真用」に思わず手に入れました。結局、最後まで使う機会を逸してしまいました。上の写真は、今参加している韓国 Muju(茂朱)の会議会場にあるオブジェで作者は晶由道(Jung, Hae Dok, 1969-) 作品名は「無題」です。三葉結び目(trefoil knot)と呼ばれる形ですが、それぞれの面が直交する三方向を向いているのが洒落ています。

最後になりましたが、「こだわりが強くてなおかつ優柔不断」というとても扱いにくい代表者を領域メンバーの皆さんと共に支えてくれた、事務局の伊藤さんと児玉さん(また前期の西村さんと蒲田さん)にこの場をお借りして深く感謝させていただきます。

「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」の最近のトピックス

前野 悦輝 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

A01 班では、クーパー対の軌道角運動量が整列する「カイラル超伝導体」や強磁性体を含む超伝導接合などにおける、時間反転対称性の破れた超伝導状態を中心に、トポロジカルに特徴づけられる新奇現象の研究を進めてきた。ニュースレター前号では、磁場をRuO₂面に平行に印加した場合のSr₂RuO₄の超伝導転移が一次転移になること、Sr₂RuO₄-Ru 共晶を利用した「トポロジカル超伝導接合」、Sr₂RuO₄とs波超伝導体との直接接合素子でのジョセフソン効果、強磁性体を含む超伝導接合系での奇周波数超伝導状態などの進捗を紹介した。以下では今年度発表論文の研究を中心に、その後の研究成果からいくつかを選んでご紹介する。

1. カイラル超伝導状態に伴う2成分秩序変数に対応する新現象の発見：伸張・圧縮両方の歪でSr₂RuO₄の超伝導転移温度が顕著に増大（前野(A01代表)、米澤(A01連携)）

超伝導体に一方向の圧力を掛けると、結晶の歪によって電子状態が変化し、超伝導転移温度は上昇、または下降する。我々は超伝導単結晶試料に伸張と圧縮の両方の圧力を印加できる新しいピエゾ装置を開発し、それを用いてカイラル超伝導状態の強い証拠が揃っているルテニウム酸化物 Sr₂RuO₄の性質を詳しく調べた [1]。

その結果、まず RuO₂ 面内の [100] 方向では、伸張で超伝導転移温度 T_c が上昇する一方で圧縮では下降する、通常の圧力効果を観測した。ところが面内の [110] 方向では、伸張・圧縮の両方で超伝導転移温度が顕著に上昇する特異な振舞を見出した。これは、超伝導状態が2成分からなり、伸縮・圧縮で結晶の対称性を破るといずれの場合もどちらか一方が、元より高い転移温度を持つことで説明できる。実際、バンド計算からも [110] 方向の圧力で電子状態が大きく変化することがわかった。軌道2成分の超伝導状態は、時間反転対称性を破る状態に対応し、ルテニウム酸化物の超伝導がスピン三重項で時間反転対称性を破る「カ

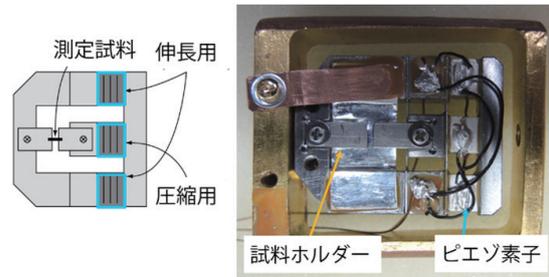


図1：ピエゾ素子を用いた試料伸縮装置。

イラル超伝導体」であるという解釈をさらに強めることになる。結果の詳細に関しては、転移温度の圧力依存性が予想された線形の「V字型」と異なって高次の依存性になるなど、未解決の問題も提起した。いずれにせよ、ピエゾ素子を用いた新開発の装置は、超伝導体の研究だけでなく、幅広い応用につながると期待できる。

2. スピン三重項超伝導状態でのスピン磁化率の増大新現象（石田(A01連携)、前野(A01代表)；三宅(B01連携)）

核磁気共鳴 (NMR) ナイトシフトやスピン偏極中性子散乱から、スピン三重項電子対形成と大きく異なり、Sr₂RuO₄の超伝導転移ではスピン磁化率が変化しないことが明らかになっている。RuO₂面に正確に平行な磁場中での超伝導スピン状態について、石田(A01連携)らがRuとSrの両方の核のNMRを巧みに併用することにより新たな精密実験を行ったところ、スピン三重項性のさらなる確証を得た [2]。この結果の解釈として三宅は、フェルミ面近傍の電子状態密度に強いエネルギー依存性がある場合、スピン三重項超伝導の形成に伴って、磁場中では電子のスピン偏極バンド間の移動が起こり、結果として常伝導相よりも大きなスピン感受率を持つようになる機構を明らかにした [3]。

3. Sr_2RuO_4 の上部臨界磁場での一次相転移に伴う磁化のとびの観測 (米澤 (A01 連携)、前野 (A01 代表); 町田 (D02 公募))

Sr_2RuO_4 の準 2 次元面に正確に平行な磁場の下では、超伝導転移が 1 次相転移になることを熱磁気効果や比熱から明らかにしてきた [4, 5]。そしてさらに物性研究所の橋高・榊原らとの共同研究で、この一次相転移に伴う磁化のとびを定量的に明らかにした [6]。得られた値は上部臨界磁場 $H_{c2}=1.5$ kO に対して磁化のとび $4\pi\delta M = 0.79 \pm 0.15$ G で、比熱のとびから算出したエントロピーのとびと熱力学的にも矛盾のない値になっている。しかしながら、この大きな磁化のとびはスピン成分のとびだけでは説明できないもので、従来の軌道対破壊以外の未知の対破壊機構の存在を示唆している。また、そもそもつぎに述べる核磁気共鳴ナイトシフトの結果は H_{c2} でのスピン成分のとびがほとんど無いことを意味する。

また磁気トルクの測定から、超伝導コヒーレンス長の異方性が 60 程度であることが導かれた。上部臨界磁場の異方性 20 より 3 倍も大きいことは従来の対破壊効果に加えて大きな対破壊機構が働いていることが明らかである。

これらの結果に矛盾のない機構を明らかにすることは、スピン三重項超伝導対称性の完全な理解にとっては避けて通れない課題として残っている。

4. 時間反転対称性を破るスピン三重項超伝導体と強磁性金属との接合系 (Anwar (A01PD)、前野 (A01 代表)、石黒 (A01 公募); 米澤 (A01 連携))

強磁性金属への超伝導ペア振幅の浸み出しは、最近約 10 年の間に次の 2 つの場合で可能であることが実証され、大いに発展したテーマである。第一のケースとして、 s 波超伝導体からスピン一重項ペアが振幅と位相の振動を伴ってごく短距離侵入する場合; 第二のケースとして、接合界面でスピン混成が起こるようにしたときに、スピン三重項 s 波の奇周波数ペアが長距離侵入する場合である。スピン三重項超伝導体を用いれば、第三の新型として直接スピン三重項奇周波数ペアが長距離侵入すると期待される。またトポロジカル超伝導近接効果に特有のエッジ・スピン流が接合面に生成される可能性がある。

このような新奇現象の研究舞台として、 Sr_2RuO_4 単結晶の劈開面に強磁性金属 SrRuO_3 薄膜をエピタキシャル成長させた系の開発に成功し、接合面での導電性が良好であることを明らかにした [7]。今後は強磁性磁化方向の外部磁場による制御等で、接合電流の変化を観測するなど、スピン三重項超伝導ならではの現象を引き出すことが期待される。

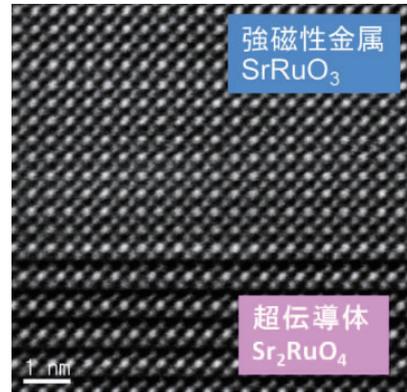
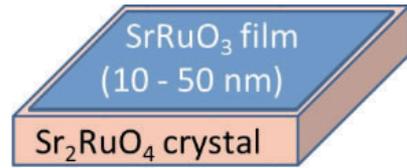


図2: Sr_2RuO_4 単結晶の上に強磁性金属 SrRuO_3 薄膜をエピタキシャル成長させた系の模式図と透過型電子顕微鏡写真 [7]。スケールバーは 1 ナノメートル。

5. トポロジカル超伝導に伴う常磁性マイスナー効果の観測方法の提案 (浅野 (A01 分担))

スピン一重項 s 波やスピン三重項 p 波などの奇周波数超伝導成分は、空間的に不均質な系では一般的に生じる。しかし、トポロジカル超伝導体のエッジ状態や接合での近接効果に伴い、奇周波数ペア振幅が支配的となりうることを理論的に明らかにした。そして、この効果が実験的に十分観測できる条件を理論的に提案した [8]。

トポロジカル超伝導に伴う奇周波数状態が負のペア振幅を持つのを反映して、磁場中では常磁性応答、すなわち正のマイスナー効果を示す。 d 波や p 波超伝導体の微小円板の磁場応答を計算し、円板の大きさが超伝導コヒーレンス長と同程度になると、低温で正味のマイスナー効果が正となること、また円板表面の乱れに依存する様子を計算した [8]。この結果は奇周波数超伝導状態の実体を明確に示す例となりうるので、 Sr_2RuO_4 をはじめとした異方的超伝導体での実証が急がれる。

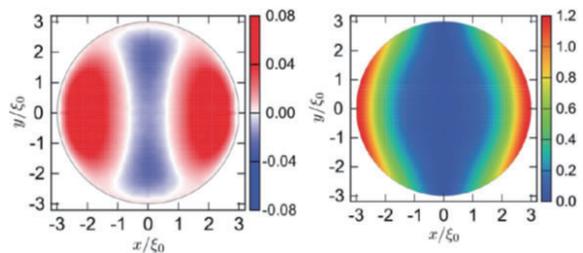


図3: スピン三重項 p 波超伝導体の微小円板に発現する奇周波数超伝導状態の計算結果 [8]。左: 局所磁化率は図で左右の端で正となる。右: 正の磁化率に対応する部分で奇周波数 s 波状態が生じている。

5年間の成果

以下の記事で、各班の5年間の成果のサマリーが紹介されているが、まずA班について紹介する前に、領域全体としての分野融合の成果をまとめておきたい。一言でいえば、当初の目論見以上に、物理概念や研究に用いる言語の共有化から、実験技術・装置をめぐっての共同研究まで、この新学術領域研究ならではの活発な分野融合研究が進んだといえる。

トポロジカル超伝導に関する、いくつかの例を挙げると、 Sr_2RuO_4 のスピンの磁化率の新機構については、B班での超流動ヘリウム理論に対する深い知見から、スピン三重項超伝導ならでの機構で説明出来ることがわかった。近接効果での奇周波数超伝導状態の誘起のアナロジーで、B班では超流動 ^3He での探求が行われた。またC班で大きな成果の挙げられている超伝導トポロジカル絶縁体の超伝導対称性をめぐっては、実験家も含め、 Sr_2RuO_4 や ^3He の超流動でいつも議論するスピン三重項秩序変数 d ベクトルを用いた詳細な議論を進めるカルチャーが浸透したといえる。A班の低温実験技術を軸に、C班のテーマである電場誘起表面超伝導や反転対称性の破れた超伝導などの共同研究で実績を挙げた。D班はこの領域で期待されたとおりの役割、すなわち各班の研究テーマに密着して、研究を大いに加速する役割を十分に果たした。またD班ではスピン三重項超流動をめぐる中性子星の磁束に関する研究など、トポロジカル量子現象の分野の大なる拡張を先導するような試みも進んでいる。

さて、次にA班の主な成果を紹介する。ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 超伝導のスピン3重項カイラル超伝導状態については、研究の現状を吟味するレビュー論文[9]を発表したが、この2年間で既に80回程度論文引用されている。またトポロジカル超伝導のトンネル分光に関するレビュー論文も発表した[10]。

1. Sr_2RuO_4 のバルク超伝導

スピン三重項超伝導体の対称性の完全な理解は、現在の物性物理学の悲願の一つともいえるのではないだろうか。本領域では Sr_2RuO_4 に加えて UPt_3 についてもスピン三重項超伝導状態の完全な理解を目指して、徹底的な研究努力を払った。トポロジカル超伝導の概念導入で、エッジ状態や奇周波数超伝導状態など、従来にはなかった新奇な概念での実証が進んだ。NMRナイトシフト[2, 3]や一軸性圧力効果[1]など、スピン三重項ペアリングとトポロジカル超伝導性を決定づける新たな成果が生まれた。その一方で、現在のシナリオでは説明できない問題点の焦点を絞り込む研究深化も遂げた。 RuO_2 面に正確に平行な磁場の下での超伝導一次相転移の確立と、それに伴うエントロピーや磁化のとのびの定量化が進んだ[4-6]。

2. Sr_2RuO_4 の微小結晶でのトポロジカル量子現象

スピン三重項カイラル p 波のクラスD 2次元トポロジカル超伝導体に分類される Sr_2RuO_4 では、クーパー対の軌道角運動量の向き揃った「カイラルドメイン」を少数化あるいは単一化することで、そのトポロジカル量子現象が増強されると考えられる。この5年間で、大型単結晶を小さく砕き、さらに微細加工を施しての実験が進んだ。

まず、 Sr_2RuO_4 単結晶とのトンネル接合作製技術を飛躍的に向上させた[11]。金との接合のトンネルスペクトルからは、導電面方向超伝導ギャップ内に広く分布するコンダクタンス・ピークの存在を確定的にした[12]。これはカイラル・エッジ状態の状態密度と解釈でき、観測されるいくつかの異なる形状のスペクトルについても、複数バンドからの寄与の割合によって説明することができた。Nbとのジョゼフソン接合素子では、臨界電流の電流・磁場方向依存性から決まる時間反転対称性の破れと、接合面積との関係を系統的に明らかにした。その結論としてカイラルドメインの存在とその大きさが数ミクロン程度であることを導いた[13]。

微小結晶リングの磁化測定からは、クーパー対がスピンの内部自由度を持つときに可能となる半整数フラクソイド(HQF)を観測した[14]。HQFにはマヨラナ準粒子が伴うと予想されているので、非可換統計性を検証するためのステップとして、HQFの生成と制御が重要になる。そこで電流・電圧特性からHQFを生成・制御するための微小結晶リング素子の開発も進め、磁気振動の量子化を観測できるようになった。

3. 共晶系を利用したトポロジカル超伝導接合

Sr_2RuO_4 結晶にRu金属を析出させた系を利用した様々な研究も行った。Ru金属を通して超伝導近接効果が得られるのを利用して、集束イオンビーム(FIB)微細加工の技術を駆使したSQUID素子での奇パリティ実証の研究を進めた。Ru金属に s 波超伝導体からの近接効果で超伝導を誘起して、それを取り囲む Sr_2RuO_4 の超伝導のトポロジカルな特性を引き出す「トポロジカル超伝導接合素子」の作製にも成功した[15]。

4. 強磁性・超伝導接合系での奇周波数ペアリングと近接効果

強磁性金属中にスピン三重項 s 波の奇周波数超伝導状態を侵入させることは、時間反転対称性の破れたトポロジカル超伝導体の近接効果を解明するために重要課題である[16]。 Sr_2RuO_4 の結晶劈開面では RuO_6 八面体の回転を伴う構造変化が起こって電子状態が変化するために超伝導はもとより、接合の良導電性が得られない問題があった。劈開面に強磁性金属(キュリー温度160 K)の SrRuO_3 をエピタキシャル成長させる

ことに成功してアンドレーエフ反射など接合特性に関するデータが出始めている [7]。

5. 奇周波数クーパー対の常磁性応答

奇周波数クーパー対はペア振幅が負になるために、その磁気応答が常磁性的になってしまうという現象論的な予想があった。微視的な理論に基づき、奇周波数クーパー対の常磁性応答を確かめ、またどのように観測されるのかの理論結果を表面インピーダンス測定 [17] や磁化測定 [8] を例に示し、実験系の提案を行った。

[1] "Strong Increase of T_c of Sr_2RuO_4 under both Tensile and Compressive Strain", C. W. Hicks, D. O. Brodsky, E. A. Yelland, A. S. Gibbs, J.A.N. Bruin, M. E. Barber, S. D. Edkins, K. Nishimura, S. Yonezawa, Y. Maeno, A.P. Mackenzie, *Science* **344**, 283-1-4 (2014).

[2] K. Ishida et al., (2014): preprint.

[3] "Theory of Pairing Assisted Spin Polarization in Spin-Triplet Equal Spin Pairing: Origin of Extra Magnetization in Sr_2RuO_4 in Superconducting State", K. Miyake, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 053701-1-4 (2014).

[4] "First-Order Superconducting Transition of Sr_2RuO_4 ", S. Yonezawa, T. Kajikawa, and Y. Maeno, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 077003 (2013).

[5] "Specific-heat evidence of the first-order superconducting transition in Sr_2RuO_4 ", S. Yonezawa, T. Kajikawa, Y. Maeno, *J. Phys. Soc. Jpn.* (2014).

[6] "Sharp magnetization jump at the first-order superconducting transition in Sr_2RuO_4 ", S. Kittaka, A. Kasahara, T. Sakakibara, D. Shibata, S. Yonezawa, Y. Maeno, K. Tenya, K. Machida, *Phys. Rev. B* **90**, 220502(R) (2014).

[7] "Ferromagnetic $SrRuO_3$ thin-film deposition on a spin-triplet superconductor Sr_2RuO_4 with a highly conducting interface", M. S. Anwar, Y. Jae Shin, S. Ran Lee, S. Jin Kang, Y. Sugimoto, S. Yonezawa, T. Won Noh, Y. Maeno, *Appl. Phys. Express* **8**, 015502-1-5 (2014).

[8] "Paramagnetic instability of small topological superconductors", S. Suzuki, Y. Asano, *Phys. Rev. B* **89**, 184508-1-7 (2014).

[9] "Evaluation of Spin-Triplet Superconductivity in Sr_2RuO_4 ", Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, K. Ishida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 011009-1-29 (2012).

[10] "Tunneling spectroscopy of topological superconductors", S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, K. Saitoh, Y. Mawatari, and Y. Tanaka, *Physica E* **55**, 25 (2014).

[11] "Edge States of Sr_2RuO_4 Detected by In-Plane Tunneling Spectroscopy", S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and Y. Maeno, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 077003 (2011).

[12] "High-Supercurrent-Density Contacts and Josephson Effect of Strontium Ruthenate", K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, Y. Mawatari, Y. Tanaka, and Y. Maeno, *Appl. Phys. Express* **5** (2012) 113101.

[13] "Inversion symmetry of Nb/ Sr_2RuO_4 Josephson junctions as test of chiral domain wall motion", K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, Y. Mawatari, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, preprint (2015).

[14] "Observation of Half-Height Magnetization Steps in Sr_2RuO_4 ", J. Jang, D.G. Ferguson, V. Vakaryuk, R. Budakian, S.B. Chung, P.M. Goldbart, Y. Maeno, *Science* **331**, 186-188 (2011).

[15] "Anomalous switching in Nb/Ru/ Sr_2RuO_4 topological junctions by chiral domain wall motion", M. S. Anwar, T. Nakamura, S. Yonezawa, M. Yakabe, R. Ishiguro, H. Takayanagi, and Y. Maeno, *Sci. Rep.* **3**, 2480-1-6 (2013).

[16] "Charge and spin supercurrents in triplet superconductor-ferromagnet-singlet superconductor Josephson junctions", P.M.R. Brydon, Wei Chen, Y. Asano, Dirk Manske, *Phys. Rev. B* **88**, 054509 (2013).

[17] "Unconventional Surface Impedance of a Normal-Metal Film Covering a Spin-Triplet Superconductor Due to Odd-Frequency Coop Pairs" Y. Asano, A. A. Golubov, Ya. V. Fominov, Y. Tanaka, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 087001 (2011)

「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の最近のトピックス

石川 修六 / 大阪市立大学 大学院 理学研究科 教授

B01 班では、スピン三重項超流動体である超流動³He を主な研究対象とし、液体界面での新奇現象や秩序変数の制御により発現する現象の探索と物理的解釈、また同じスピン三重項状態であるカイラル超伝導物質で起こる現象との類似性・普遍性の探求、さらにボース-アインシュタイン凝縮状態や冷却原子系の研究を通して、トポロジカル量子現象の研究を進めている。以下に今年度で得られたトピックスをまとめた。

1. 超流動³He -A 相での半整数量子渦探索(石川(B01 代表)、中原 (B01 分担)、高木 (B01 分担))

バルク液体中での超流動 A 相では、渦を一周するときの秩序変数の位相回転が 2π の整数倍になっており量子渦は整数で特徴付けられる。一方、同じ A 相だが薄膜状態では半整数渦と呼ばれる量子渦の存在が予想されている。軌道の自由度とスピンの自由度がそれぞれ π だけの位相回転を担うと考えられている。軌道の位相勾配が超流動速度を与えるので、 2π の 1/2 倍ということから半整数渦と呼ばれる。(同様な半整数量子状態はカイラル超伝導での半整数フラクソイドがある) 分担者である中原、高木の理論的考察・計算の結果を踏まえて、石川は平行平板に挟まれた薄膜超流動状態を物性研究所の回転冷凍機に実現し、この新奇量子渦の観測を目指して実験研究を始めた。中原は回転超流動³He -A 相薄膜における半整数渦の安定性を研究し [1]、また、回転角速度を増やしたときにできる複数の半整数渦の空間的パターンを求めた [2]。高木は中原の研究結果を受け、複数の半整数渦が格子を形成する場合の核磁気共鳴実験 (NMR) でのスピン系の応答を計算した。半整数量子渦の安定領域は高磁場、高温であり、NMR 共鳴周波数が回転角速度に大きく依存する結果が得られている。安定化条件の高磁場 (~1 T) 下で回転しながらノーマル液体から超流動状態に相転移させ量子渦を形成させた後に、磁場を小さくして NMR 測定磁場 (30 mT) 下で量子渦を観測する予定である。まだ半整数量子渦の観測には至っていないが、図 1 に回転していない状況での NMR 信号を示す。ラーマー周波数側に尾を引く信号は、非一様なテクスチャ構造を暗示する [3]。

2. 超流動³He-B 相の表面マヨラナ束縛状態に対する磁気効果(野村 (B01 分担))

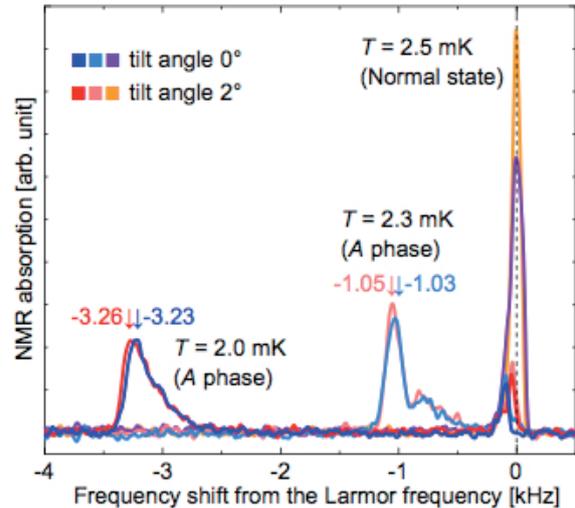


図 1 : NMR 信号。ラーマー周波数側へ尾を引く信号である。

ゼロ磁場中の超流動³He-B 相は、時間反転対称なトポロジカル超流体と理論的に分類されている。野村らの行ってきた横波音響インピーダンス測定により、壁の鏡面度が大きいときに運動量に線形な分散関係を持った表面束縛状態の存在が示され、B 相が確かに表面マヨラナコーンを持ったトポロジカル超流体であることが実験的に明らかになった。一方磁場下では時間反転対称性の破れにより、トポロジカルに保護されていた表面マヨラナゼロモードが消失し、ゼロエネルギーにギャップが生じるトポロジカル相転移を示すと予想されている。野村らは最近、壁の鏡面度が小さい拡散的散乱の極限において、磁場中での超流動³He-B 相の横波音響インピーダンス測定に成功した。ゼロ磁場での温度依存性に表れたインピーダンスの虚部のピーク構造が、0.1 T 以下の低磁場で消失することが分った。このピーク構造は、拡散的散乱極限での表面状態密度の特徴を反映した対励起に起因することが分っている。磁場中でのピークの消失は、ギャップエネルギーが磁場により歪むことにより、対励起に起因する効果がぼやけたためと考えられる。またインピーダンスの虚部が 0.13 T 以上の高磁場で、ある温度を境に低温側で急激に落ち込むことを見出した。この温度は高磁場ほど低温にシフトした。この温度でのギャップエネルギーを見積もったところ、磁場に対して線形の依存性を示したことから、磁場によるトポロジカル相転移にともなうギャップ生成を捉えた可能性がある。

3. 不均一超流動・超伝導体における奇周波数クーパー対とスピン帯磁率異常 (東谷 (B01 分担)、三宅 (B10 分担))

超流動³He-B相とエアロジェルとの界面には、 $\uparrow\downarrow$ $\downarrow\uparrow$ スピン対称性を有する奇周波数スピン三重項クーパー対が形成される [4]。このような反平行スピン対が組まると、スピン帯磁率が減少すると考えるのが自然であるが、奇周波数状態では逆に増加することを東谷らは見出した [5]。スピン三重項奇周波数クーパー対も同様に、スピン帯磁率を増加させることが示される [6]。このスピン帯磁率異常の起源は、奇周波数状態の「負の超流動密度」にある [6]。これは奇周波数超伝導状態における「負のマイスナー効果」と同じ現象と考えられる [7]。

4. 超流動³He-B相の表面奇周波数状態と自発スピン流 (東谷 (B01 分担))

超流動³He-B相の表面に形成されるアンドレーエフ束縛状態は、自発スピン流を生み出すことが知られている。東谷は、自発スピン流と奇周波数状態との関係を理論的に調べ、スピン流は偶周波数クーパー対と奇周波数クーパー対が共存する領域のみに流れることを示した [8]。超流動³He-B相の表面では実際にこのような共存状態が実現する [9]。

5. 超流動³He-A相表面におけるトポロジカル欠陥の観測 (池上 (B01 分担))

A相では軌道空間での回転対称性が破れる結果、単純なカイラルドメイン壁のみではなく point boojum や linear boojum など特異なトポロジカル欠陥も生じる。池上は、³He-Aの自由表面に形成されるドメイン壁を、表面下にトラップした電子に働く intrinsic Magnus 力の測定する事により観測した。常流動相からA相へゆっくり (温度掃引速度 50・K/h 以下) の冷却した場合、 l (軌道角運動量) が同じ向きにそろった単一カイラルドメインが観測されることが多い。しかし、いくつかのサンプルでは、複数のカイラルドメインが存在すると考えられる信号が観測された。観測された信号は、ドメイン壁の位置を適当に仮定する事により良く再現される。このとき表面に出来るドメイン壁が存在する。そのドメイン壁は、上向き l と下向き l を隔てる単純なドメイン壁である可能性の他に、linear boojum と呼ばれる特異点が表面に局在したトポロジカル欠陥である可能性があるが、ドメイン壁構造はまだ明らかになっていない。また、機械的振動による信号のジャンプが観測された。これはドメイン壁の移動を観測していることに対応しており、この測定手法を高度化する事によりドメイン壁のダイナミ

クス研究の可能性が開けると期待される。

5年間の成果

○「異方的超流動³He-A相の巨視的固有角運動量」(石川・高木)

スピン三重項 p 波凝縮状態ではクーパー対の軌道角運動量はプランク定数の単位で 1 の大きさであり、直接観測することは不可能である。しかし、全てのクーパー対が同じ軌道角運動量状態となるカイラル対称性が破れた状態を³He-A相では実現できる可能性があり、巨視的な大きさとして全クーパー対の固有角運動量を観測出来るかどうか、異方的超流動³He 発見以来の未解決問題であった。理論的な考察では、角運動量の向きを揃えることが出来ても、クーパー対の空間的な重なり起因する相殺のために観測出来ないという主張と、相殺は起こらないという主張があるが、実験的には確定していなかった。石川・高木は、世界で初めて巨視的な軌道角運動量の観測に成功した。これは凝縮系物理一般に対し非常に大きな貢献と考えられる。

○「異方的超流動³He-B相の表面マヨラナ分散」(野村・東谷)

野村・東谷は、超流動⁴He 薄膜で壁をコートし、壁の境界条件を系統的に変化させたときの超流動³He-B相の表面束縛状態の振る舞いを、横波音響インピーダンス測定により明らかにした。壁の鏡面度が大きいときには、音響インピーダンスの温度依存性にダブルピーク構造が現れた。このダブルピーク構造は表面束縛状態の線形分散 (マヨラナコーン) の存在を示すものである。鏡面度が小さいときには、ゼロエネルギーの表面状態密度の増大により、温度依存性はシングルピークとなった。一方で東谷は、ゼロエネルギー表面状態密度が奇周波数対振幅と厳密に対応することを理論的に示した。したがってシングルピークの観測により、鏡面度が小さいときに乱れに強い奇周波数スピン三重項 S 波成分が増大することが実験的に示されたことになる。また野村は、鏡面度を変えることに用いた超流動⁴He 薄膜が圧力下において強相関効果を示し、量子臨界点が存在することを見出した。

○「エアロジェル界面に接する異方的超流動³He-B相の新奇近接効果 - 奇周波数クーパー対によるスピン帯磁率の増大」(石川・東谷)

東谷は、奇周波数超流動に特徴的な物性として、パウリスピン帯磁率の増大を予想し、このスピン帯磁率異常を超流動³He-B相とエアロジェルとの界面に形成される奇周波数 s 波クーパー対の近接効果を利用して観測することを提案した。石川はこの新奇近接効果を

実証するために、通常の近接効果とアンドレーエフ束縛状態（表面束縛状態）が出現するオーダーパラメータ配位を実現し核磁気共鳴法を用い低温で磁化の増大を観測した。東谷は詳細な数値計算により、 $0.3T_c$ (T_c はバルク超流動 ^3He の転移温度) 以下の超低温で超流動 $^3\text{He-B}$ / エアロジェル界面付近のスピンド磁率が顕著に増加することを示した。この結果は、石川らの実験と定性的に一致している。

○「奇周波数超伝導と ESP 超伝導状態での自発的時間反転対称性が破れ」(三宅)

奇周波数超伝導での「負マイスナー効果の問題」をラグランジアンにもとづく経路積分の方法で解決した。反強磁性スピン波に媒介される相互作用により誘起される奇周波数超伝導の安定性について、(1) 秩序状態における強結合効果を考慮しても p 波スピン重項奇周波数超伝導状態は実現可能である、(2) 同超伝導転移温度の不純物散乱に関する効果は AG 公式による抑制効果に比べて 4 倍ほど弱い、ことを明らかにした。フェルミ準位近傍の状態密度が顕著なエネルギー依存性を持つ Sr_2RuO_4 の様な ESP 超伝導状態においてスピン起源の自発的時間反転対称性が破れることを示した。これは超流動 $^3\text{He-A}$ 相発見以来 40 年間気がつかれなかった現象である。

○「異方的超流動 $^3\text{He-A}$ での半整数量子渦の探索」(中原・高木・石川)

中原は、回転超流動 $^3\text{He-A}$ 相薄膜における半整数量子渦の安定性を研究し、それが安定に存在する温度、圧力、磁場、回転角速度の領域を明らかにした。また、回転角速度をさらに増やしたときにできる複数の半整数渦糸の空間的配置を求め、論文としてまとめた。高木は中原の報告を元に、半整数渦からのスピン波 NMR 振動数を求めた。また半整数渦は、渦対を作り安定化する可能性を示し、これらの結果を日本物理学会と領域研究会で発表し、現在論文作成中である。石川はこれらの理論考察に基づき半整数量子渦を観測するために、安定領域実現のための高磁場および薄膜超流動状態 A 相を実現し検出実験を開始したが、半整数量子渦の検出には至っていない。

○「超流動 $^3\text{He-A}$ 相におけるカイラリティの直接観測」(池上)

超流動 $^3\text{He-A}$ では、全てのクーパー対は軌道角運動量が同一方向にそろって凝縮している。時間反転対称性を破る状態であり、軌道角運動量の向き (l) で特徴付けられるカイラリティという性質を持つ。カイラリティはクーパー対の軌道運動を表す最も基本的なものであるが、その直接観測は未だなされていない。池上は、 $^3\text{He-A}$ 中を運動する電子に、intrinsic Magnus 力と呼ばれる、速度と l の両方に垂直方向に働く力を

発見し、カイラリティを初めて直接観測することに成功した [10]。

[1] "Half-Quantum Vortices in Thin Film of Superfluid ^3He ", K Kondo, T Ohmi, M Nakahara, T Kawakami, Y Tsutsumi, and K Machida, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 104603 (2012).

[2] "Multiple half-quantum vortices in rotating superfluid ^3He ", M Nakahara and T Ohmi, Phys. Rev. B **89**, 104515 (2014)

[3] "Investigation of half-quantum vortex in superfluid $^3\text{He-A}$ phase", Y Kimura, T Kunimatsu, K Obara, H Yano, T Hata, T Takagi, and O Ishikawa, Journal of Physics: Conference Series **568**, 012006 (2014).

[4] "Proximity Effect between a Dirty Fermi Liquid and Superfluid ^3He ", S. Higashitani, Y. Nagato, K. Nagai, J. Low Temp. Phys. **155**, 83 (2009).

[5] "Magnetic Response of Odd-Frequency s-Wave Cooper Pairs in a Superfluid Proximity System", S. Higashitani, H. Takeuchi, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, Phys. Rev. Lett. **110**, 175301 (2013).

[6] "Odd-frequency pairing effect on the superfluid density and the Pauli spin susceptibility in spatially nonuniform spin-singlet superconductors", S. Higashitani, Phys. Rev. B **89**, 184505 (2014).

[7] "On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity", H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake, Journal of the Physical Society of Japan **80**, 054702-1-7 (May. 2011).

[8] "Spin Current as a Manifestation of Surface Odd-Frequency Pairing in Superfluid ^3He ", S. Higashitani, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 075002 (2014).

[9] "Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid ^3He ", S. Higashitani, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, S. Murakawa, R. Nomura, Y. Okuda, Phys. Rev. B **85**, 024524 (2012).

[10] "Chiral Symmetry Breaking in Superfluid $^3\text{He-A}$ ", H. Ikegami, Y. Tsutsumi, K. Kono, Science **341**, 59-62 (2013).

空間反転対称性を破る電子流体の新奇界面現象

鄭国慶 / 岡山大学大学院 自然科学研究科 教授

1. 電場誘起表面電子系に特有な輸送特性の観測

野島と上野のグループは、SrTiO₃(100)面を用いた電気二重層トランジスタ (EDLT) における伝導キャリア面密度 n_{2D} の制御範囲を約 2 桁におよぶ $8 \times 10^{12} - 7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ まで拡張した。特に超伝導転移温度が低くなるオーバードープ (高電場) 側のキャリア密度 ($n_{2D} > 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) において、30 K 以下の低温で (i) 移動度の急激な上昇、(ii) 伝導面に平行磁場中での負の巨大磁気抵抗効果、(iii) 磁場の面内回転に対し 4 回対称性を持つ磁気抵抗、といった特異な現象が組み合わさって起こることを見出した (図 1)。これらの

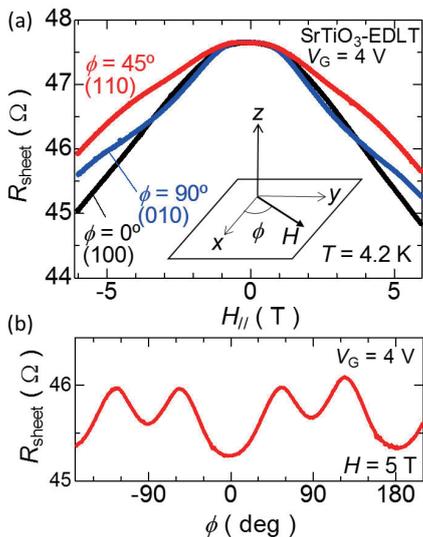


図 1: 電気二重層トランジスタにより高電子密度を誘起した SrTiO₃ 表面における電気抵抗の (a) 面内磁場依存性、(b) 面内磁場方位依存性。

結果は、伝導電子の主なスピンの低温で (100) 方向と (010) 方向を主軸を持つように整列したことを示唆しており、柳瀬グループより理論的に提案されている、Ti の t_{2g} 軌道の混成効果を考慮に入れたラシュバ型スピン軌道相互作用による特徴的なスピントクスチャ ($|k_y| > |k_x|$ の場合 (100) 方向、 $|k_y| < |k_x|$ の場合 (010) 方向を持つ) を初めて実験的に捉えたものと考えられる。SrTiO₃-EDLT において、観測された常磁性極限を大きく越える面内の上部臨界磁場もこのスピントクスチャの存在を考えれば説明可能である [1]。

一方、SrTiO₃-EDLT ($T_c \sim 0.4 \text{ K}$) と ZrNiCl-EDLT ($T_c \sim 15 \text{ K}$) における最適ドープ近傍での磁場中超伝導転

移には、磁場が伝導面に垂直な場合、両系に共通して数 10 mT という低い磁場中でも電気抵抗が 0 K に向けて完全にゼロにならない (残留抵抗のある金属的な基底状態を示す) という特徴があることが明らかになった (図 2)。この結果は、クリーンおよび弱ピンニングでかつ完全 2 次元といった条件下でのみでおこる磁束系の量子トンネルクリープ現象として説明できる (論文投稿中)。この条件は、通常の金属薄膜では到達が難しいため、今後、電場誘起超伝導体が 2 次元超伝導体を深く理解するための有効なモデル系となることも期待される。

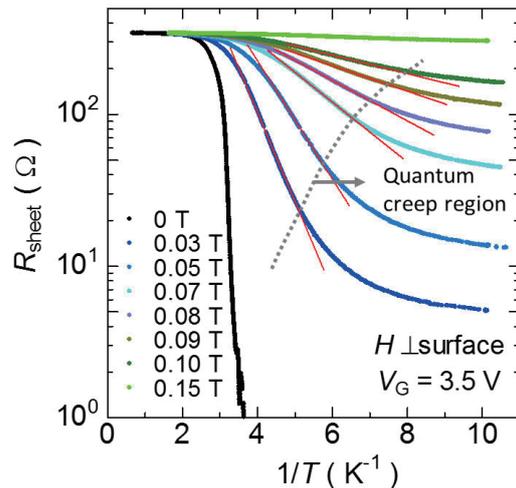


図 2: 量子磁クリープ現象を示す SrTiO₃ 電気二重層トランジスタ面垂直磁場中における面抵抗の温度依存性 (アレニウスプロット)。

2. トポロジカル絶縁体関連物質における新超伝導体の発見

瀬川らはトポロジカル絶縁体関連物質である Pb 系ホモロガス相 [(PbSe)₅(Bi₂Se₃)₆] に Cu を電気化学的にインターカレートすることにより、新しい超伝導体を見出した [Cu_x(PbSe)₅(Bi₂Se₃)₆]。この系はドープされたトポロジカル絶縁体による超伝導体 Cu_xBi₂Se₃ と組成は似ているが物性は大きく異なり、 T_c は 2.85 K と低いものの超伝導体積分率は 100% 近くに達し、より良い超伝導特性を示す [2]。この系での電子比熱の温度依存性は低温で BCS 的に振舞わず (図 3)、超伝導ギャップに線型ノードが存在することが示唆され、その超伝導は非従来型である可能性が高い。

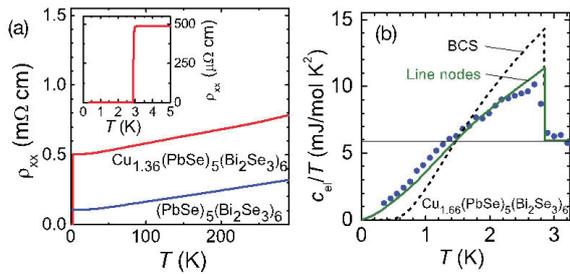


図3：新超伝導体 $\text{Cu}_x(\text{PbSe})_5(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_6$ の (a) 電気抵抗率、(b) 電子比熱の温度依存性

3. ドープしたトポロジカル絶縁体のスピン三重項超伝導状態の観測

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に Cu をドープすると超伝導が発現する。この物質の超伝導状態を巡って様々な相矛盾した結果が発表され、論争になっている。鄭らのグループは Se-NMR 測定を行い、超伝導状態でスピン回転対称性が破れたことを発見した。図4に磁場を結晶の a 軸にかけたとき（左）と a 軸から60度傾けた方向にかけた時（右）の NMR スペクトルの温度変化を示す [3]。前者では超伝導転移温度前後でスペクトルがほぼ変わらないが、後者では転移温度以下ではスペクトルが大きくずれることがわかる。これは、超伝導状態でスピン磁化率が異方性を示し、結晶の持つ6回対称性を破っていることを示すものである。また、この結果は $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ がスピン三重項・奇パリティ状態にあり、トポロジカル超伝導であることを示す確たる証拠である。



図4： $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるスピン帯磁率の面内異方性を示す NMR

4. トポロジカル近藤絶縁体 SmB_6 のバンド計算

トポロジカル近藤絶縁体として SmB_6 が再び注目を集めている。長年未解決であった電気抵抗の奇妙なふるまいが、「低温での f バンドの形成およびトポロジカル絶縁相への転移、そしてそれに起因する金属的な表面状態の出現」というシナリオで説明できる可能性が指摘されている。一方、約10年前に Ogita らによって $R\text{B}_6$ シリーズのラマン散乱が測定され (PRB 68, 224305 (2003))、 A_{1g} および E_g 振動モードは R の価数によらずにユニバーサルな格子定数依存性を示すのに対し、二価の希土類および Sm の T_{2g} モードで異常

結果

が見られると指摘された。その起源に関してこれまで明確な議論はなされていない。獅子堂らは第一原理から電子状態と格子振動を計算することでこの問題を考えた [4]。図5に SmB_6 の電子状態を示す。 Sm の f バンドが $j=5/2$ と $7/2$ に大きくスピン軌道分裂している（注：図では $j=5/2$ のみ見えている）ことと、 Sm の d_{xy} 成分をもつ非占有バンドが X 点に向かって大きく垂れてきているのが特徴的である。これらの特徴は $R\text{B}_6$ の電子状態に共通であるが、特に SmB_6 では X 点まわりで f バンドと伝導バンドの混成によるバンド反転が起こりトポロジカル絶縁体となる。伝導バンドの波動関数を解析すると、 R サイトの d 軌道のみでなく B の p_{xy} 軌道も含まれていることが分かる。すなわち伝導バンドがフェルミ面を作る際には、伝導電子は T_{2g} フォノンと強くカップルすることができ遮蔽効果によりその振動数を下げると期待される。高温（室温）では、伝導電子の数は R イオンの価数に依存し 三価 $> \text{Sm} >$ 二価であり、Ogita らの T_{2g} フォノン振動数の異常は伝導電子による遮蔽効果の強弱を反映したものと理解される。以上より、この伝導バンドはトポロジカル転移において本質的な役割を果たすとともにフォノン異常においても重要な役割を担っていることが分かった。さらには SmB_6 において T_{2g} フォノン振動数の温度変化を測定することでトポロジカル相への転移の様子を知ることができると期待される。

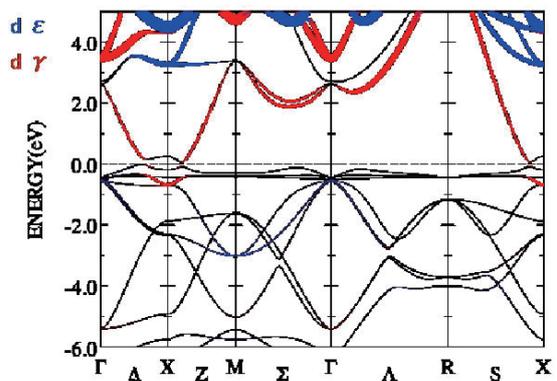


図5： SmB_6 のバンド構造

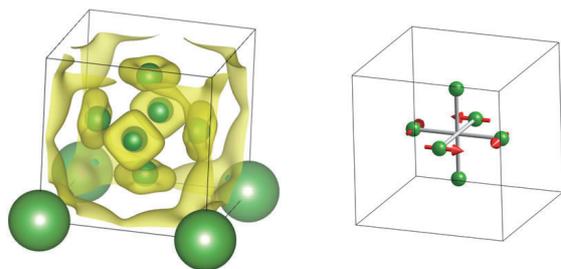


図6： SmB_6 の伝導バンドの波動関数の空間分布（左）と T_{2g} フォノンモード（右）

5 年間の成果

1. 電場誘起表面超伝導体の電子状態の解明と探索

野島と上野のグループは、電場誘起伝導表面の超伝導および常伝導の電子状態を深く理解するため、同グループで超伝導を発見した SrTiO₃ 電気二重層トランジスタを用いて、上部臨界磁場、磁場中電気抵抗転移、常伝導状態の磁気抵抗効果、面方位依存性といった様々な研究を行った。特に上部臨界磁場の実験結果は、電場誘起電子系が純粋な 2 次元超伝導であることを証明した (図 1)。さらに、上部臨界磁場の値から見積もれる超伝導層の有効厚さが、電場の大きさによらずほぼ一定値 (約 10 nm) となることを突き止めた [5]。また、得られた面平行の上部臨界磁場の低温での大きさは、常磁性リミットである 0.65 T を大きく上回り、強いスピン軌道相互作用の存在を示唆する。化学ドーピングでは超伝導が報告されていない KTaO₃ においても、電場により超伝導を誘起することに初めて成功した [1]。また、バンド絶縁体 ZrNCl における電場誘起超伝導の上部臨界磁場が、SrTiO₃ と同様に極

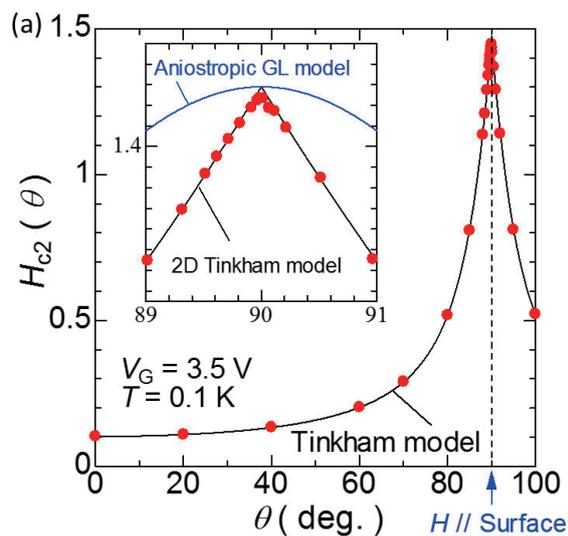


図 1 : SrTiO₃ 電気二重層トランジスタにおける電場誘起超伝導の上部臨界磁場の方位依存性

めてよい 2 次元性を示すことも観測している (論文投稿中)。さらにモット絶縁体である銅酸化物超伝導体の電場制御を試み、YBa₂Cu₃O_y 超薄膜の超伝導転移温度を可逆的に変化させることに成功し、無限層 La ドープ SrCuO₂ 超薄膜の電気抵抗を減少させるまでに至った。

2. MBE 法によるトポロジカル絶縁体高品質薄膜作製と輸送特性の解明

瀬川・安藤グループは本新学術領域によって分子線エピタキシー法による薄膜作製装置を導入し、また微細加工の経験を持つ研究員を雇用できたことにより、トポロジカル絶縁体薄膜について顕著な成果を挙げることができた。具体的には、1) Bi₂Se₃ 高品質超薄膜とその輸送特性の測定により [6]、表面状態のトポロジカル保護を明らかにした [7]。2) トポロジカル結晶絶縁体 SnTe についても薄膜作製と輸送特性測定により表面状態を観測した [8]。3) トポロジカル絶縁体 (Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ 薄膜について、表面を劣化させることなくトップゲートで広い範囲でキャリア濃度を制御することに成功した [9]。

3. ドープされたトポロジカル絶縁体における超伝導

ドーピングされたトポロジカル絶縁体 Cu_xBi₂Se₃ による超伝導は 2009 年に発見されていたが、瀬川・安藤らは Cu インターカレーションを電気化学的に行うことにより、大幅に超伝導特性を向上させた。その結果、超伝導転移に伴う比熱の異常を観測し [10]、ソフトポイントコンタクトによる微分コンダクタンスにはゼロエネルギー励起を観測した [11]。また、鄭らは Se-NMR 測定を行い、Cu_{0.3}Bi₂Se₃ の超伝導状態でスピン回転対称性が破れることをすべての超伝導体・超流体を通じて初めて発見した。これらの結果は Cu_xBi₂Se₃ がトポロジカル超伝導体であることを示す確たる証拠である。さらに、瀬川・安藤らは関連物質でより良い超伝導特性を持つ新超伝導体 Cu_x(PbSe)₅(Bi₂Se₃)₆ を発見した [2]。

4. 空間反転対称性の破れた超伝導体における構造とスピン軌道相互作用の制御

空間反転対称性の破れた (NCS) 物質でスピン三重項超伝導状態を誘起する鍵は反対称スピン軌道相互作用 (ASOC) である。これまでに、ASOC を増大させる手立てとして考えられてきたのは、重金属を含む物質を合成することである。しかし、このような指針で設計・合成された BiPd や LaBiPt などでは、ASOC の増大は確認できたものの、スピン三重項の成分を支配的に増すまでに至らなかった [3]。鄭らのグループは、結晶の対称性破れの度合いを制御し、特に重元素間の bond angle を小さくすることがスピン軌道相互作用を最も効果的に増大させられることを突き止めた [12]。また、この指針に基づき、空間反転対称性の破れが報告された $\text{LaPt}_{2-x}\text{Ge}_{2+x}$ において構造の制御を行った結果、正方晶 $\text{LaPt}_{1.8}\text{Ge}_{2.2}$ 超伝導体 ($T_c=2\text{K}$) を発見した [13]。

[1] K. Ueno, T. Nojima, S. Yonezawa, M. Kawasaki, Y. Iwasa, and Y. Maeno, Phys. Rev. B **89**, 020508(R) (2014).

[2] S. Sasaki, K. Segawa and Y. Ando, Phys. Rev. B **90**, 220504 (2014).

[3] K. Matano et al, unpublished (2014).

[4] F. Kuroda, T. Shishidou, and T. Oguchi (unpublished).

[5] K. Ueno et al, Nature Nanotech. **6**, 408 (2011).

[6] A.A. Taskin et al, Advanced Materials **24**, 5581 (2012).

[7] A.A. Taskin et al, Phys. Rev. Lett. **109**, 066803 (2012).

[8] A.A. Taskin et al, Phys. Rev. B **89**, 121302 (2014).

[9] F. Yang et al, Appl. Phys. Lett. **104**, 161614 (2014).

[10] M. Kriener et al, Phys. Rev. Lett. **106**, 127004 (2011).

[11] S. Sasaki et al, Phys. Rev. Lett. **107**, 217001 (2011).

[12] K. Matano et al, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 084711 (2013).

[13] S. Harada et al, Phys. Rev. B **86**, 220502(R) (2012).

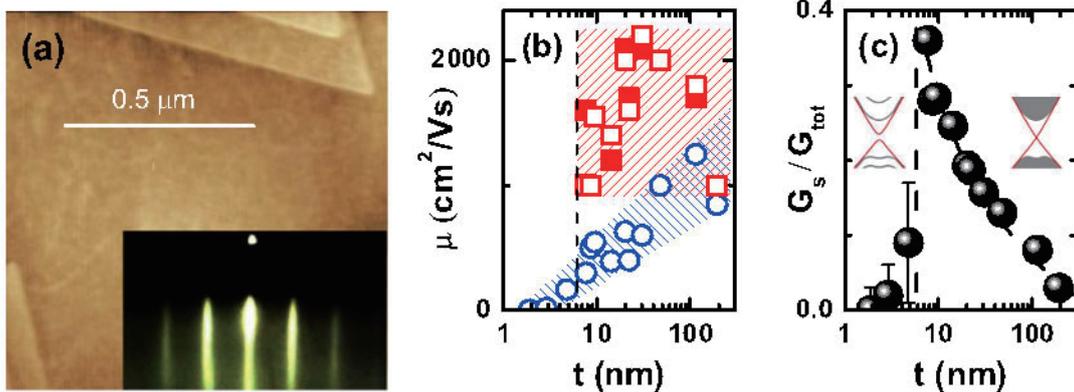


図2 : Bi₂Se₃ 薄膜の (a) AFM 像と RHEED 像、(b) 移動度と (c) 表面伝導度の膜厚依存性。

トポロジカル凝縮系の理論

田中 由喜夫 / 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

理論家で構成される D 班は、すでに A-C 班の項目で述べてきたように、各班の実験・理論グループとの共同研究を有効に推し進めて研究を行っている。また D 班独自の成果も多数あげた。

1. 超伝導トポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の理論 (水島、佐藤、田中)

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ では奇パリティのペアが実現されている可能性が指摘されている。佐藤田仲らはドーピングによりフェルミ面の形が楕円型から円柱型に変わるに際して、一度トポロジカル転移を起こして、トポロジカルに非自明な相から自明な相に移行することを示した [1]。一方、NIST (USA) で行われた STM の実験では、BCS 超伝導的なエネルギーギャップ構造が得られ、一見非トポロジカルな BCS 的 s 波を支持する結果であった。水島らはトポロジカルに自明なペアを仮定して、この超伝導体の近接効果の研究を行った。表面に存在する Dirac Cone のために、トポロジカルに自明な超伝導状態がバルクに生じた際には、コヒーレントピークが分裂することが示された。すなわち NIST の実験は単純な BCS ペアでは理解できない。一方、トポロジカルに非自明な奇パリティペアが円柱状の 2 次元のフェルミ面で実現されると、BCS 的なギャップ構造を示すことが明らかになった [1]。田仲らは微分コンダクタンスを簡便に計算する公式を構築した [2]。

2. スピン 3 重項超伝導の理論 (田中、柏谷 (A 班))

矢田、田仲は、 Sr_2RuO_4 の 3 バンドの効果、スピン軌道相互作用、現実的なギャップ関数の大きさを取り入れることができる微視的理論が構築された [3]。またカイラル p 波超伝導体では表面のラフネスによって、零エネルギー状態密度は増加し、同時に奇周波数ペア振幅も増加するということが明らかになった [4]。

3. トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類理論 (佐藤、田中)

佐藤らは、結晶対称性によって守られたトポロジカル相であるトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の研究を進め、鏡映対称性、2 回回転対称性、空間反転対称性など 2 回の操作で元に戻る位数 2 の結晶対称性によって守られたトポロジカル相の分類を完全に与えることに成功した [5]。さらに、基底状態の分類だけでなく、位相欠陥や量子渦などのトポロジカル欠陥のある場合にも分類を進め、可能なゼロモードの構造を明らかにした [5]。また、超伝導体のノード構造のトポロジカルな分類を行い、奇パリティ超伝導体一般ではラインノードがトポロジカルに不安定であり、その為表面アンドレーエフ束縛状態のフラットバンド構造が表面ラッシュバスピ軌道相互作用で壊されることを明らかにした [6]。また、グラフェンなどに現れるバルクディラックフェルミオンの安定性を対称性に守られたトポロジカル相の観点から議論した [7]。

4. マヨラナ励起のダイナミクスの研究 (佐藤、田中)

佐藤、田仲らは、ナノワイヤー上のマヨラナ励起の交換の様子を時間に依存したボゴリューボフ・ドジャン方程式を数値解析で解くことにより明らかにした。非可換統計が可能となるかの条件を具体的に求めた [8]。

5. ワイル半金属起源の超伝導相の理論 (田中、佐藤)

田中、佐藤らは、ワイル半金属にキャリアをドーブした系の超伝導相を調べた。その結果、ワイル半金属のトポロジカルな性質に起因して、並進対称性を壊さないような一様な超伝導状態では、s 波超伝導状態であっても必ずポイントノードが現れること、また、それに伴って表面に特異なアンドレーエフ状態が生じることを明らかにした。特に、多くのワイル半金属で期待される磁気鏡映対称性が系に存在する場合には、交差したフェルミアークを持つような表面アンドレーエフ束縛状態が生じることを明らかにした [9]。

6. トポロジカル結晶絶縁体の薄膜の電子状態の理論 (佐藤、田仲)

山影、佐藤、田仲は、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe の薄膜の電子状態のトポロジカルな性質を調べた。ミラー対称性によりミラーセクターに分解することで、エッジ状態のトポロジカルな性質を明らかにした [10]。

7. ディラック半金属における軸性流 (田仲)

ディラック半金属は、磁化誘起などにより時間反転対称性の破れが起こると、ワイル半金属になる。田仲らは、2つの Dirac Cone の間の流れの差による軸性流がスピンの注入により生じることを明らかにした [11]。

8. 奇周波数対とイジング磁気異方性の理論 (水島)

水島は、時間反転対称性を保ったスピン3重項トポロジカル超伝導体の表面に現れる奇周波数対とイジング磁気異方性の関係性を対称性の観点から明らかにした [12]。この系において、一般的に、スピン帯磁率は偶周波数奇パリティ対と奇周波数偶パリティ対からの寄与で構成される。奇周波数偶パリティ対は表面では常に存在しその磁気応答が常にイジング異方性を示すことを明らかにした [12]。

9. 冷却原子気体の理論 (上田)

互いに反対向きの人工ゲージ場下にある2次元2成分ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の基底状態の相図を、充填率と相互作用の結合定数の関数として求めた [13]。この系は、時間反転対称であり、スピンホール系のボソン版であるとみなすことができる。特に、成分間引力相互作用が成分内斥力相互作用と大きさが同じ場合には、2つのスピン成分がペアを組んだ多体状態を形成することを見出した。

5年間の成果

1. フラットバンドアンドレーエフ束縛状態 (佐藤、田仲)

銅酸化物超伝導体や反転対称性の破れた超伝導体で現れる零エネルギーフラットバンドアンドレーエフ束縛状態がトポロジカル不変量と結び付くエッジ状態であることを明らかにした。

2. トポロジカル結晶超伝導体 (佐藤、田仲)

エネルギーギャップ関数のミラー変換に対する変換性によって、得られるギャップレス状態がマヨラナフェルミオンになるか、ディラックフェルミオンになるかを識別し、この理論を Sr_2RuO_4 に応用して、トポロジカル量子転移を明らかにした。

3. トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類理論 (佐藤)

佐藤らは、結晶対称性によって守られたトポロジカル相であるトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の研究を進め、鏡映対称性、2回回転対称性、空間反転対称性など2回の操作で元に戻る位数2の結晶対称性によって守られたトポロジカル相の分類を完全に与えることに成功した。

4. ドープしたトポロジカル絶縁体のアンドレーエフ束縛状態 (田仲、佐藤、水島)

田仲・佐藤、水島は瀬川 (C01 班)・安藤 (C01 班連携)らの協力のもと、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ がエッジ状態をもつトポロジカル超伝導体であることを明らかにした。表面マヨラナフェルミオンのエネルギー分散関係が、トポロジカル絶縁体由来のエッジ状態、フェルミ面の形状により構造変化を起こし、トンネルコンダクタンスの STM の実験を系統的に説明することを明らかにした。

5. 超流動ヘリウム3のトポロジカル量子相転移 (水島・佐藤)

水島・佐藤は、 $^3\text{He-B}$ 相に磁場が存在するときにおいても、その方向によっては「対称性によって守られたトポロジカル相」が存在することを明らかにした。また、対称性の自発的破れとトポロジカル相転移が同時に起こる臨界磁場の存在を定量的に示した。

6. 奇周波数クーパーペアとトポロジカル超伝導 (田仲)

田仲・浅野 (A01 班) は、従来型 s 波超伝導体の上に乗せたナノワイヤーのエッジにおいて、マヨラナ型準粒子励起が存在するときには必ず奇周波数クーパー対が存在することを明らかにした。その結果、期待される異常な近接効果は、スピン 3 重項 p 波超伝導体接合で 10 年前から知られているスピン 3 重項超伝導体固有の異常近接効果に他ならないことを明確にした。

7. スピノール BEC とトポロジー (上田)

上田・川口は、BEC の基底状態、定常状態をマヨラナ表示と対称性を用いることで系統的に求めた。この方法によりスピン 3 の BEC に新量子状態が存在することが明らかになった。これらの成果は Physics Reports の総説記事にまとめられた。

5 年間の研究により、既存の異方的超伝導が、対称性によって保護されたトポロジーによって理解されることが明らかになった。またその結果、超流動 ^3He の磁場下相転移のような新奇な相転移も存在することが明らかになった。さらに $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ や InSnTe のような新物質のトポロジカル超伝導も明らかにより、トポロジー概念を用いることで超伝導・超流動を俯瞰し、新奇な系をデザインできるような段階に到達した。また奇周波数クーパー対とマヨラナ型準粒子励起との関係も明確になり、エッジ状態としての局在したクーパーペアの性質の理解が深化した。

[1] T. Mizushima, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **90**, 184516 (2014).

[2] S. Takami, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka, J. Phys. Soc. Jpn., **83**, 064705, (2014).

[3] K. Yada, Y. Tanaka, A.A. Golubov and S. Kashiwaya, J. Phys. Soc. Jpn., **83**, 074706 (2014).

[4] S. V. Bakurskiy, A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **90**, 064513, 2014.

[5] K. Shiozaki and M. Sato, Phys. Rev. B **90**, 165114 (2014)

[6] S. Kobayashi, K. Shiozaki, Y. Tanaka, M. Sato, Phys. Rev. B **90**, 024516 (2014)

[7] M. Koshino, T. Morimoto, M. Sato, Phys. Rev. B **90**, 115207 (2014) Editor's suggestion

[8] C. Amorim, K. Ebihara, A. Yamakage, Y. Tanaka, M. Sato, arXiv:1405.5153

[9] B. Lu, K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, arXiv:1406.3804

[10] H. Ozawa, A. Yamakage, M. Sato, and Y. Tanaka, Phys. Rev B **90**, 045309, 2014.

[11] K. Taguchi and Y. Tanaka, arXiv:1406.4636.

[12] T. Mizushima, Phys. Rev. B **90**, 184506 (2014).

[13] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. A vol. **90**, 033602 (2014).

本年も本新研究領域から素晴らしい業績が多く発信され、2名の受賞者を輩出しました。今後も皆様のさらなるご活躍を期待しております。

安藤 陽一 氏

第30回井上學術賞と第32回大阪科学賞を受賞！

大阪大学産業科学研究所の安藤陽一教授（総括班・C01班）が第30回井上學術賞と第32回大阪科学賞を受賞しました。いずれも基礎研究・科学技術の発展に顕著な貢献をした50歳未満の研究者に贈られる賞であり（後者は大阪周辺の研究者が対象）、受賞対象業績は双方とも「**トポロジカル絶縁体・超伝導体の先駆的研究**」です。

私の記憶では、あれは安藤陽一氏が電力中央研究所（現一般財団法人）から大阪大学に着任された直後の2007年4月5日ごろでした。1996年から部下であった私は当時まだ前職で、電話で話をした折「ところで、『トポロジカル絶縁体』っていうのがあるんだよ。」と聞いたのが、私がトポロジカル絶縁体という言葉に触れた最初でした。その約7年後にトポロジカル絶縁体に関連する研究で大きな賞を2つも受賞されるとは凡人の私は想像だにできませんでした。

理論主導で研究が進んだこの分野で実験家が果たした役割はともすると過小評価されることもあるかと思いますが、しかし、物質そのものをわれわれが手にし、トポロジカルに保護された表面状態をこの世に引き出して人類が実際に「見た」、その具体性のレベルを飛躍的に上げた意味は非常に大きいと言えます。また、比較的小規模の研究室で多くの成果が出せたのは、研究進展の初期からの安藤氏の物理に対する深い理解あってのことです。その見解は2014年に刊行された「トポロジカル絶縁体入門」（講談社）にも結実しています。

井上學術賞と大阪科学賞の両方を受賞されているのは京都大学の山中伸弥氏など錚々たる方々ばかりです。今後の安藤氏のさらなる活躍が大いに期待されます。

（文責・瀬川耕司）



第30回井上學術賞の写真。



第32回大阪科学賞の写真。

水島 健（大阪大学 大学院基礎工学研究科）

第9回凝縮系科学賞

●受賞理由

トポロジカル超流動・超伝導の理論的研究

この度、本新学術領域D班の計画班メンバーである水島健氏（大阪大学大学院基礎工学研究科）が第9回凝縮系科学賞を受賞されました。受賞理由は「トポロジカル超流動・超伝導の理論的研究」です。凝縮系科学賞は、広い意味での凝縮系科学の研究に従事する博士学位取得10年以内の若手研究者が対象の賞であり、毎年原則として実験系・理論系各1名の方が選出されます。水島氏は、岡山大学在籍時から、主に数値的手法を用いて、冷却原子のボーズ・アインシュタイン凝縮の研究や、ヘリウム3原子における超流動現象において顕著な業績をあげてられました。

受賞対象となった研究は、2編の論文[1,2]です。これらの論文で水島氏はヘリウム3原子の超流動B相のもつ新しいトポロジカルな性質を明らかにしました。超流動ヘリウム3のB相が表面にギャップレスなヘリカル・マヨラナ励起を持つトポロジカル超流動相であることは、本新学術領域B班の計画班メンバーである野村竜司氏（東京工業大学）らの実験で検証されていますが、従来この相は時間反転対称性により守られているため、磁場を印加し、時間反転対称性を破るとトポロジカル超流動性は消失すると考えられていました。水島氏は、共同研究[2]の成果として、印加磁場下においても「時間反転対称性」と「回転対称性」を組み合わせる「隠れた離散対称性」によって保護されている新奇トポロジカル相がヘリウム3に存在することを明らかにしました。また、印加磁場の増加によって「隠れた離散対称性」が自発的に破れると同時に表面マヨラナ励起にギャップが生じる「自発的対称性の破れを伴うトポロジカル量子相転移」が生じることを示しました。さらには、マヨラナ・イジング性と呼ばれるマヨラナ励起特有の磁気異方向性が「隠れた離散対称性」によって守られたトポロジカル超伝導・超流動相に起因することも指摘しました。論文[1]では、この研究をさらに進め、印加磁場に対する応答の詳細を明らかにしています。この新しいトポロジカル相、およびトポロジカル量子相転移の検証は、ヘリウム3の分野にとどまらず、トポロジカル量子現象全体としても重要な課題であり、現在、B班メンバーの野村氏らの実験が進行中です。

受賞対象の一部は、私（佐藤）および町田一成氏（岡山大学特命教授）との共著論文ですが、本新学術領域の目玉の一つである集中連携研究会をきっかけに、この共同研究は始まりました。本賞が水島氏の卓越した能力に与えられたのももちろんの事ですが、同時に班内・班間の連携を強力に推進してきた本新学術領域の成功が領域外にも広く認められたものとして、大変喜ばしいことです。水島氏の更なるご活躍を期待いたします。（文責・佐藤昌利）

[1] T. Mizushima, "Superfluid ^3He in a restricted geometry with a perpendicular magnetic field", Phys.Rev. B86 (2012) 094518 1-17.

[2] T. Mizushima, M. Sato, and K. Machida, "Symmetry Protected Topological Order and Spin Susceptibility $^3\text{He-B}$ ", Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 165301 1-5.



空間反転対称性の破れた超伝導体

鄭 国慶 / 岡山大学大学院 自然科学研究科 教授

1. 自然界と対称性

私たちの身の回りには左右対称にできているものが多い。動物の顔や雪の結晶がその代表例である。対称性は私たちの美的感覚に大きな影響を与え、それは建造物にもみることができる。紫禁城や Neuphenburg 城、京大覚寺勅使門内の庭 (図 1 a) などどれも高い対称性を有している。量子力学で習ったように、科学の世界では「対称性」という概念は自然の基本原理に密接に関連しており、物理量の保存法則の背後には必ずある種の対称性が存在する。一方、自然界には「対称性の破れ」も遍在する。例えば DNA の二重鎖は反転中心を持たない。また、私たちが TQP2014 国際会議の excursion で訪れた東福寺内の「八相の庭」は十九世までの庭園とは全く趣を異にし (図 1 b) [1]、空間反転対称性が破れている。物理学では、原子核のベータ崩壊は対称性が破れパリティが保存されないことが知られている。この現象を Co 核で発見した Wu 女史の墓園は彼女の研究者人生を視覚的かつ端的に表す佳作となっている (図 2)。また、超伝導のような二次相転移は一般に「対称性の自発的破れ」として理解されている。ここで重要なのは対称性の破れがまったく新しい物理をもたらすということであろう。



図 1 a: 大覚寺 (京都、876 年創建) 勅使門内の庭園



図 1 b: 東福寺内の「八相の庭」 (京都、1939 年造園)

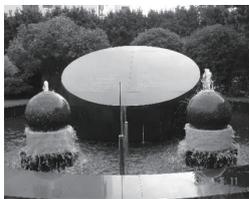


図 2: パリティ非保存を Co 核のベータ崩壊実験で発見した C.S. Wu 女史の墓園 (南京近郊、T.D. Lee 設計)

2. 空間反転対称性が破れた物質での超伝導とトポロジ

さて、空間反転対称性が破れた (non-centrosymmetric, NCS) 物質で超伝導が起こると、どのような新しい物理が期待できるだろうか? 結論を先にいうと、(1) スピン一重項状態とスピン三重項状態が混合する。(2)

超伝導を記述する波動関数がトポロジカル的非自明になり、トポロジカル絶縁体のようにエッジスピン流が期待できる、などが挙げられる。

ご承知のように、パリティが保存する系では、超伝導状態はスピン一重項・偶パリティの軌道関数 (s 波や d 波) か、スピン三重項・奇パリティの軌道関数 (p 波や f 波) のいずれかの状態をとる。しかし、空間反転対称性が破れると、パリティが非保存になるので上記の制限を受けなくなるために、スピン一重項とスピン三重項が混合する状態が可能になる。混合の度合いは、次式で書かれるような反対称スピン軌道相互作用 (asymmetric spin-orbit coupling, ASOC) の強さで決まる。

$$H_{so} = \frac{\hbar^2}{4m^2c^2} [\nabla V(r) \times \vec{k}] \vec{\sigma}$$

ここで、 $\nabla V(r)$ は電場、 \vec{k} は波数、 $\vec{\sigma}$ はパウリ行列である。また、 $\vec{g}_k \propto \nabla V(r) \times \vec{k}$ で定義する \vec{g}_k ベクトルを導入すると、誘起されるスピン三重項状態の \vec{d} ベクトルは必ず \vec{g}_k ベクトルに平行であることが証明されている [2]。なお、 \vec{d} ベクトルとはスピン三重項超伝導状態やスピン三重項超流動状態を記述する物理量で、最も簡単なユニタリー状態では、その方向はクーパー対のスピン方向に垂直で、その絶対値はエネルギーギャップに等しい。

次に、 $\vec{g} = \vec{g}_y + i\vec{g}_x$ で書かれるような場合を考える。このような形式で書かれるスピン軌道相互作用は Rashba-type ASOC と呼ばれ、半導体の分野では有名である。この関数は $(\vec{x} + i\vec{y})(k_x + ik_y) - (\vec{x} - i\vec{y})(k_x - ik_y)$ と書き直すことができる。第一項はとりもなおさず Sr_2RuO_4 で実現しているカイラル超伝導状態であり、第二項はその時間反転した相棒である。したがって、この状態はスピン方向を逆さまにし、運動方向も逆である二つのカイラル状態から合成されたものであり、エッジでは電流が流れないが、スピン流が流れるヘリカル状態が期待できる。この状況は、トポロジカル絶縁体と極めて類似している。

3. $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ における反対称スピン軌道相互作用の制御とスピン三重項超伝導

しかし、現実には大きな Rashba-type ASOC を生み出す NCS 超伝導体はほとんど存在しないと言ってよい。以下では、絶対値は極めて大きい、より複雑な形 (波数依存性) をした ASOC が存在する $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ における超伝導の研究成果について説明する。

図 3 にこの物質系の結晶構造を示す。どの方向に沿っても、空間反転中心がない。また、Pt の原子番号 Z が

大きいために、ASOC が大きい。三次元的結晶構造をしていることから、 \vec{g}_k ベクトルの波数依存性も次式で書かれるように高次の項を含む [3]。

$$\vec{g}(k) = \begin{pmatrix} k_x [1 - a(k_y^2 + k_z^2)] \\ k_y [1 - a(k_x^2 + k_z^2)] \\ k_z [1 - a(k_x^2 + k_y^2)] \end{pmatrix}$$

$\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ はギャップにノードがありスピン三重項状態が支配的 [4]、 $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$ は等方的ギャップを持ちスピン一重項状態が支配的であることがすでに分かっていた [5]。当初、両者の違いが原子番号の違いに起因すると

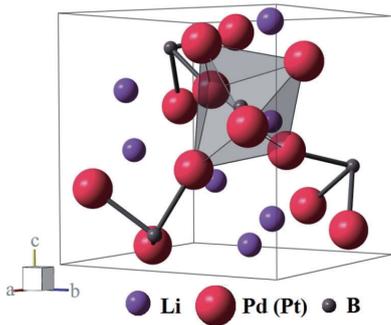


図 3 : $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ の結晶構造

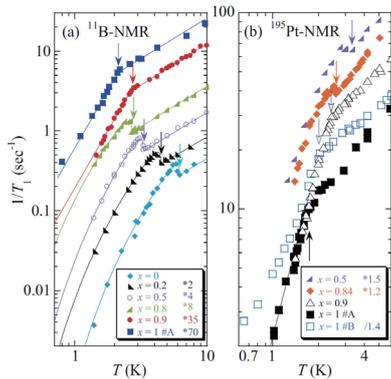


図 4 : $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ におけるスピン格子緩和率 $1/T_1$ の温度依存性。矢印は T_c を示す。

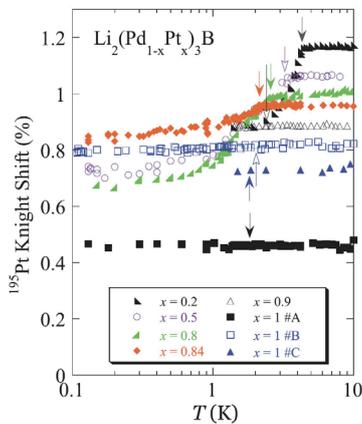


図 5 : $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ におけるナイトシフトの温度依存性。矢印は T_c を示す。

思われていた。しかし、重い元素 (Ir, Pt, Re, Bi など) を含む NCS 超伝導が数多く合成されたがスピン三重項状態が支配的なものは見つからず、スピン三重項状態を混合する要因はそう単純でないことが判明した。そこで、我々はその要因を解明するために、 $\text{Li}_2\text{M}_3\text{B}$ 系で Pt と Pd 間で合金を作り ($\text{M}=\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x$)、ASOC を系統的に制御し超伝導状態との相関を調べることにした [6]。図 4 と図 5 にそれぞれこの系のスピン格子緩和率 $1/T_1$ とナイトシフトの結果を示す。 $x < 0.8$ と $x > 0.9$ とでは、対照的な振る舞いが観測された。 $x < 0.8$ の組成では、 $1/T_1$ が T_c 直下で一旦増大をしたのちに指数関数的に減少し、ナイトシフトが T_c 以下で減少する。それに対して、 $x > 0.9$ では $1/T_1$ が T_c 直下で増大せず (コヒーレンスピークを示さず) に温度の三乗 (T^3) に従って減少し、ナイトシフトが T_c 以下で減少しない。この結果は、 $x < 0.8$ の領域では超伝導ギャップがフル (等方的) に開きスピン一重項が支配的であるのに対して、 $x > 0.9$ では超伝導ギャップに線状のノード (節) があり、スピン三重項が支配的であることを意味する (図 6 上)。

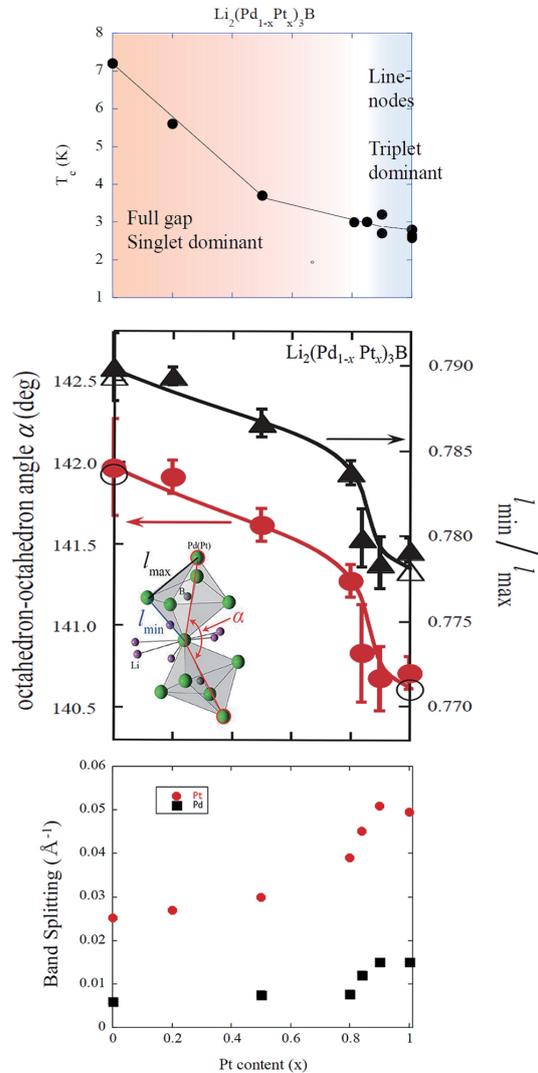


図 6 : (上) 超伝導対称性の変遷を模式的に描いた。(中) 反転対称性の破れの度合いが Pt 組成量とともに変化する様子。(下) R 点におけるバンド分裂の様子。

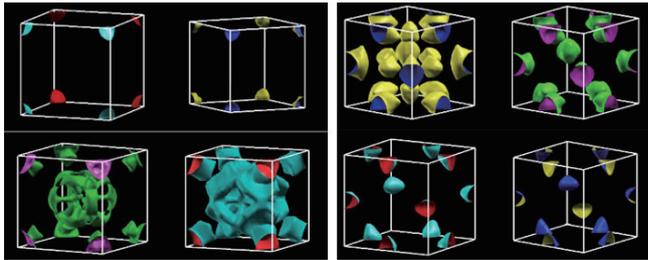


図7: $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ のフェルミ面。4部分から構成されており、それぞれが反対称軌道相互作用によって分裂している。

それでは、 $x=0.8$ を境に超伝導状態が急峻に変わるのなぜだろうか？ ASOCが原子番号 Z の二乗に比例するだけならば、それが Pt の組成に対する変化はなだらかになってもよさそうである。私たちが構造解析をした結果、 Z^2 以外の要因を突き止めた。 $x=0.8$ を境にして、Pt(Pd)-Pt(Pd) のボンド角 α が急激に減少することが判明した (図6中)。すなわち、 $x=0.8$ を超えると、反転対称性の破れの度合いが急に増したのである。それが原因で、ASOC が急激に増大したことをバンド計算で確認した。

図7に $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ のフェルミ面を示す。両パネルとも ASOC によって分裂したフェルミ面を左右に並べたものである。バンドの分裂が x とともにどのように変わるかを示す例として、R 点 (図7左パネル中、八つの角の位置) 付近のバンド分裂幅の x 依存性を図6の下パネルに示した。赤丸 (黒四角) は Pt(Pd) が全サイトを占めると仮定したときの結果である。この図からわかるように、Pt と Pd の違いはほぼ Z^2 の違いで説明できるが、 $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ で発現するスピン三重項が支配的な状態は Pt(Pd)-Pt(Pd) ボンド角の減少 (局所的なひずみ) に負うところが大きい。

この結果は $\text{Mg}_{10}\text{Ir}_{16}\text{B}_{10}$, Re_7B_3 , BiPd , LaPtBi などの NSC 超伝導体では重い元素を含んでいるにも関わらず [7-8])、スピン一重項が支配的になっていることをごく自然に説明する。これらの物質では、空間対称性の破れの度合いが $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ に比べて遥かに小さいからである。すなわち、物質開発に際して重い元素の含有のみでは不十分で、より対称性の低い構造を作りだすことが必須である。

最後に、 $x=0.84$ 付近の超伝導に触れておく。 $1/T_c$ の結果からわかるように超伝導ギャップが完全に開いている。しかし、ナイトシフトがわずかにしか減少しないことから、スピン三重項の成分が大きいことが推察できる。Sato-Fujimoto によると [9])、このような超伝導状態はトポロジカル的に非自明であり、エッジ状態が期待できる。微分コンダクタンスなどの測定により、トポロジカル超伝導の証拠を得るべく現在実験が続行中である。

4. まとめ

本稿では、空間反転対称性の破れた超伝導 $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ ($x>0.84$) が示すスピン三重項が支配的な状態、それを発現させる条件、及びトポロジカル超伝導としての可能性について解説した。この系は T_c が比較的に高いので、トポロジカル量子現象を探索する舞台に適

しているのみならず、超伝導 / 強磁性接合を作製して奇周波数超伝導を研究できるなど、多くの可能性を秘めている。そのためにも、単結晶の作製をぜひ成功させたい。

謝辞：本稿は原田翔太、稲田佳彦 (岡山大学)、J.J. Zhou, Y.G. Yao (IOP, CAS) 諸氏との共同研究の成果に基づいている。また、御領潤、宇田川将文、佐藤正利、藤本聡諸氏から多くのご教示をいただいた。ここに深く感謝する。

参考文献：

- [1] 「八相の庭」という名前は釈迦牟尼佛一生の八段階 (八相) に因んだようである。八相はそれぞれ、降兜率、托胎、出生、出家、降魔、成道、転輪、涅槃である。
- [2] P. A. Frigeri, D. F. Agterberg, A. Koga, and M. Sigrist, Phys. Rev. Lett. **92**, 097001 (2004).
- [3] H.Q.Yuan, D. F. Agterberg, N. Hayashi, P. Badica, D. Vandervelde, K. Togano, M. Sigrist, and M. B. Salamon, Phys. Rev. Lett. **97**, 017006 (2006).
- [4] M. Nishiyama, Y. Inada, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. Lett. **98**, 047002 (2007).
- [5] M. Nishiyama, Y. Inada, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B **71**, 220505(R) (2005).
- [6] S. Harada, J. J. Zhou, Y. G. Yao, Y. Inada, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B **86**, 220502(R) (2012).
- [7] K. Tahara, Z. Li, H. X. Yang, J. L. Luo, S. Kawasaki, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B **80**, 060503(R) (2009).
- [8] K. Matano, S. Maeda, H. Sawaoka, Y. Muro, T. Takabatake, B. Joshi, S. Ramakrishnan, K. Kawashima, J. Akimitsu, and G.-q. Zheng, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 084711 (2013).
- [9] M. Sato and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **79**, 094504 (2009).

著者紹介



てい こくけい
(ツエン グォーチン)

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月より現職。専門は核磁気共鳴法を用いた超伝導や磁性の研究。

ワイル半金属超伝導体における十字型フラットバンド

矢田 圭司 / 名古屋大学 大学院工学研究科 助教

佐藤 昌利 / 名古屋大学 大学院工学研究科 准教授

田仲 由喜夫 / 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

1. イントロダクション

ワイル半金属とは、その低エネルギー状態が有効的にワイル方程式で記述され、バルクバンドにギャップレスな点を持つ3次元物質である [1]。この価電子帯と伝導帯が接する点はワイル点と呼ばれ、運動量空間におけるモノポールとして見る事が出来る。それゆえ、異常ホール効果、カイラル異常 [2-3]、電気磁気効果 [4] 等、様々な特異現象の実現が期待されている。ワイル半金属の最も特筆すべき性質として、表面状態としてフェルミアークが存在する点である [5]。金属中の電子は閉じたフェルミ面を持つのに対して、ワイル半金属の表面束縛状態はフェルミエネルギーで開いたアークとなるのである。フェルミアークという言葉自体は、銅酸化物高温超伝導体において、バルクのフェルミ面のスペクトルの一部が擬ギャップ形成によって消失する現象として用いられたのが始まりである。対して、ワイル半金属のフェルミアークは真のアークであり、表面ブリルアンゾーンに射影されたワイル点で終端する。

ワイル半金属相が実現するための必要条件として、時間反転対称性または空間反転対称性の破れが指摘されている [6]。その中で、実際の候補物質として、パイロクロア構造のイリジウム酸化物 [5]、 HgCr_2Se_4 [7]、磁性不純物をドーブしたトポロジカル絶縁体 [8]、トポロジカル絶縁体 / 通常絶縁体の超格子構造物質 [6] 等が徐々に理論的に提案されている。現在、これらの物質で精力的に実験が行われており、ワイル半金属物質の確立に近づいている。更には、キャリアドーブされたワイル半金属における超伝導の理論的提案がなされるようになった。現在まで、大別して FFLO 状態及び BCS 状態の二つのペアの可能性が指摘されている。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確認したので、本記事ではその起源や性質について簡単な解説を行う。

2. モデル

本研究では空間反転対称性があり時間反転対称性の破れたワイル半金属相を考える。その最小限のモデルとして次の 2×2 のハミルトニアンを考える [9]。

$$\mathcal{H}(\mathbf{k}) = t \sin k_x \sigma_y - t \sin k_y \sigma_x + (t_z \cos k_z - M) \sigma_z + m(2 - \cos k_x - \cos k_y) \sigma_z - \mu \sigma_0$$

ここで σ_i はスピン空間のパウリ行列を表す。 t 及び t_z はそれぞれ面内・面間のホッピングを表し、 μ は化学ポテンシャルである。 m 及び M は磁化の大きさを表し、ワイル点の位置を制御するパラメータである。例えば、 $m=0$ 、 $M=t_z \cos Q$ の時、ワイル点は $(0, 0, \pm Q)$ 、 $(0, \pi, \pm Q)$ 、 $(\pi, 0, \pm Q)$ 、 $(\pi, \pi, \pm Q)$ の8点である。 m を有限にするとゾーン境界にあるワイル点の位置を変化させることができる。2つのワイル点が同じ位置に来ると対消滅させてギャップを開くことが可能である。ここでは $t=t_z$ をエネルギーの単位とし、 $m/t=0.8$ 、 $\mu/t=0.3$ 、 $Q=\pi/2$ とした。この場合、ワイル点は $(0, 0, \pm \pi/2)$ となり、最も単純なワイル半金属のモデルとなる。では、次に波数依存性がない BCS ペアポテンシャル (スピン一重項) を導入する。超伝導状態のハミルトニアンは BdG の 4×4 の形式で次の様に書かれる [10]。

$$\begin{aligned} \mathcal{H}(\mathbf{k}) = & t \sin k_x \sigma_y \tau_z - t \sin k_y \sigma_x \tau_0 + (t_z \cos k_z - M) \sigma_z \tau_z \\ & + m(2 - \cos k_x - \cos k_y) \sigma_z \tau_z - \mu \sigma_0 \tau_z - \Delta \sigma_y \tau_y \end{aligned}$$

ここで τ_i は粒子-正孔空間のパウリ行列を表す。この強束縛模型を出発点とし、その表面状態の解析を行う。考える表面は (100) 面とし、 y 及び z 方向には周期的であり、 x 方向については半無限系を考える。

3. 十字型フラットバンド

上記のモデルと条件の下で得られた(100)表面状態の結果を図1に示した。図1(a)は射影されたフェルミ面内で超伝導ギャップ内に存在する Andreev 束縛状態の分散である。図に示されたように k_y 軸方向には線形分散を持つ。これはギャップレス状態であり、途中 $k_y=0$ においてエネルギー0の点を通過する。そのため k_z 軸に沿ってゼロエネルギーのフラットな分散が現れる。一方、 k_z を変化させると k_y 軸方向の群速度が徐々に変化し、 $k_z=Q(=\pi/2)$ 付近でその符号が変化する。そのため、その符号変化をする k_z において k_y 軸と平行なフラットな分散が現れる。結果として、ゼロエネルギーのフラットな Andreev 束縛状態は十字型となって現れる。このゼロエネルギー状態を模式的に表したのが図2である。 k_z 軸方向のゼロエネルギー状態はポイントノードで終端し、 k_y 軸方向のゼロエネルギー状態はフェルミアークと繋がっている。以降で、この十字型フラットバンドの起源を議論する。

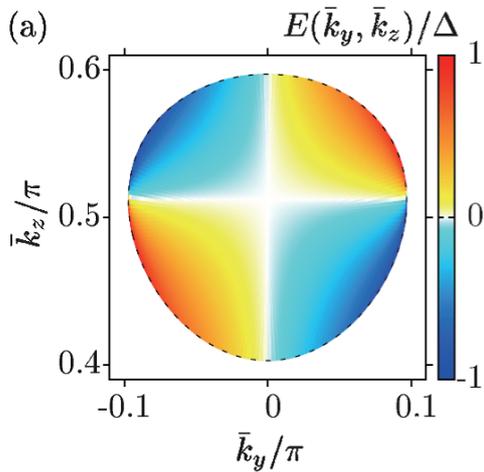


図1：ワイル半金属のBCS状態における(a) Andreev 束縛状態のエネルギー分散

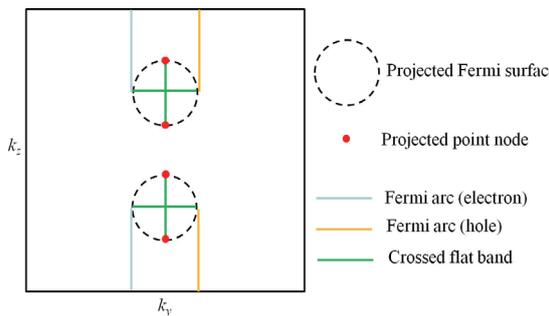


図2：ワイル半金属BCS状態に現れるゼロエネルギー状態

4. モノポールチャージとチャーン数

この系はクラスDの超伝導体であり、3次元においてはトポロジカル数が存在しない。一方、2次元においてはチャーン数を定義可能である。つまり、3次元

ブリルアンゾーン内の2次元断面を考えればその断面においてチャーン数が定義される。ここでは k_z が一定の断面を考え、各断面においてチャーン数がどのようになるか考察する。まず、常伝導状態、つまりドープしたワイル半金属におけるチャーン数から考える。ワイル半金属においては常伝導状態においてもフェルミアークが存在する。 $\mu=0$ の場合、フェルミアークはワイル点を結ぶように現れるが、有限の μ の場合においては図3の左図のように二つのフェルミ面を繋ぐようにフェルミアークが存在する。ここで各 k_z においてチャーン数を計算してみよう。まず、フェルミ面が存在する領域では金属状態のためチャーン数が定義出来ない。その他の領域では、フェルミアークの存在がチャーン数の有無に対応している。使用したモデルパラメータでは図に示した通り $C=0$ or -1 となっている。これを BdG 形式に拡張した場合 ($\Delta=0$)、チャーン数がホール寄を含めて2倍となる。実際、ホール部分から新しいフェルミアークが現れる。ではこの次にペアポテンシャルを導入する。ペアポテンシャルを導入することによってギャップが開くので、先ほどチャーン数が定義不可能だったフェルミ面の存在する金属領域でもチャーン数の定義が可能となる。この時、実際のチャーン数はペアの対称性に依存するが、BCSペアの場合チャーン数が -1 となる。フェルミ面の外側の部分は、常伝導状態でもギャップが開いているが、そのギャップはペアポテンシャルを導入してもほとんど変化せず、チャーン数は常伝導状態と同じである。つまり、 k_z を0から変化させるとチャーン数が $0, -1, -2$ と変化する。これはブリルアンゾーン内でトポロジカル相転移が起きていることを意味する。ギャップを閉じることなくトポロジカル相転移は起きないため、転移が起こる k_z においてはギャップが閉じている。つまり、それぞれのフェルミ面の北極と南極においてはポイントノードが現れる。 k_z を一定にした面がポイントノードを横切る度にチャーン数が変化するため、このポイントノードはワイル点と同様にチャーン数の差分だけモノポールチャージを持つことを意味する(図4参照)。ゼロエネルギー状態は正のチャージを持つモノポールから負のチャージを持つモノポールに向かって現れるため、図4の様に、異なるフェルミ面のゼロエネルギーの Andreev 束縛状態がフェルミアークを通じて繋がる。

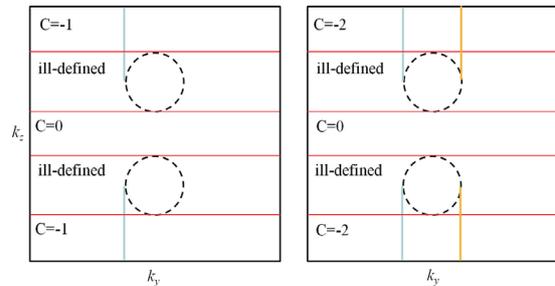


図3：ワイル半金属相におけるチャーン数(左)及びBdG形式におけるチャーン数(右)

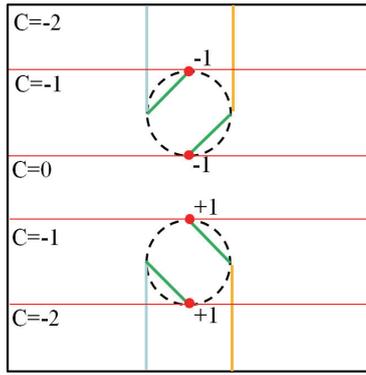


図4：チャーン数から期待されるゼロエネルギー Andreev 束縛状態

5. 磁気鏡映対称性

チャーン数の議論だけではゼロエネルギー状態が交差する必然性はない。しかし、正と負のモノポール間を結ぶゼロエネルギー状態が通る経路は結晶の対称性等から限定される。この系においては時間反転対称性が破れているが、時間反転対称性と鏡映対称性(xz面)の直積である磁気鏡映対称性が存在している。この磁気鏡映対称性の下ではゼロエネルギー状態の通る経路は k_y に関して対象でなければいけない。つまり、 $k_y=0$ のポイントノードから出発したゼロエネルギー状態は図4のような経路を取ることは出来ず、実際には図2の様な経路を取り十字型となる。

6. 検出方法

十字型フラットバンドの検出方法としてトンネルコンダクタンスがあげられる。図1より、ゼロエネルギー状態の交差点は van Hove 特異点になっていることが分かり、ゼロエネルギーの状態密度が発散する。そのため、低透過率における規格化されたコンダクタンスが図5に示したようにゼロバイアスで鋭いピークを示すことが分かる。

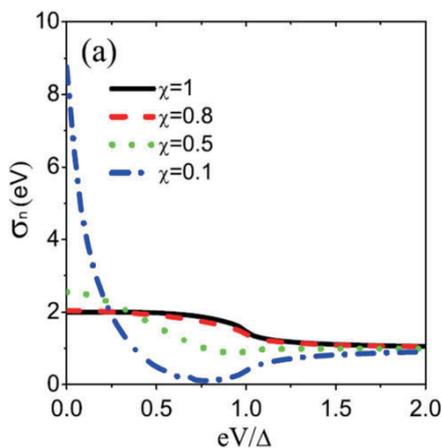


図5：様々な透過率 χ におけるコンダクタンス

7. 結論

我々はワイル半金属にドーブした超伝導においては十字型フラットバンドが現れる可能性があることを見出した[11]。このような Andreev 束縛状態が既存の超伝導体に見られた例はなく、本研究で初めて明らかになった。十字型フラットバンドが現れる必要条件是、1. 空間的に一様なペア(非 FFLO 的)、2. 時間反転対称性の破れたワイル半金属、3. 磁気鏡映対称性の3つである。イントロダクションで例にあげたワイル半金属の候補物質は全て2及び3の条件は満たしているため、これらの物質で超伝導体が見つかった場合、十字型フラットバンドが現れる可能性が期待される。

この研究は Bo Lu 博士(名大 PD)との共同研究によるものである。

参考文献

- [1] S. Murakami, New J. Phys. **9**, 356 (2007).
- [2] V. Aji, Phys. Rev. B, **85**, 241101 (2012)
- [3] A. A. Zyuzin and A. A. Burkov, Phys. Rev. B **86**, 115133 (2012).
- [4] H. Ooguri and M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **108**, 161803 (2012).
- [5] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath, and S. Y. Savrasov, Phys. Rev. B **83**, 205101 (2011).
- [6] A. A. Burkov and L. Balents, Phys. Rev. Lett. **107**, 127205 (2011).
- [7] G. Xu, H. Weng, Z. Wang, X. Dai, and Z. Fang, Phys. Rev. Lett. **107**, 186806 (2011).
- [8] D. Kurebayashi and K. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 063709 (2014).
- [9] K.-Y. Yang, Y.-M. Lu, and Y. Ran, Phys. Rev. B **84**, 075129 (2011).
- [10] G. Y. Cho, J. H. Bardarson, Y.-M. Lu, and J. E. Moore, Phys. Rev. B **86**, 214514 (2012).
- [11] B. Lu, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka, arXiv:1406.3804

著者紹介



やだ けいじ

1980年ニュージャージー州(アメリカ)生まれ、育ちは東京と三重。2002年名古屋大学理学部物理学科卒業、2007年同大学院理学研究科博士課程修了(博士(理学))。その後、同大学工学研究科田仲研(旧井上研)及びTwente大学(オランダ)の研究員を経て、2014年7月より現職(助教)。オランダ滞在中に減量に成功し、今でも体重をキープしています。

Sr₂RuO₄ の超伝導一次相転移の謎

米澤進吾 / 京都大学理学研究科 (A01 班連携研究者)

1. はじめに

相転移現象はほとんどが一次相転移と二次相転移に大別できることを学んだのは大学2年生のころだったのであろうか。世の中にあまたの相転移がこのように分類できてしまうことに大きな驚きを感じた。そこから10年以上たって、超伝導における相転移の回数に関するナゾに取り組むことになっているのには何かのめぐり合わせを感じてしまう。本稿では、Sr₂RuO₄ の超伝導相転移が、高磁場中で一次相転移になっていることを明らかにした我々の研究 [1,2] を、研究の裏話なども含めて紹介したい。

2. Sr₂RuO₄ の超伝導の未解決問題

Sr₂RuO₄ の超伝導の発見 [3] から今年で21年となるが、これほど長く研究されている一番の理由はこの物質がスピン三重項超伝導体の最有力候補であるからであろう [4]。スピン三重項性は核磁気共鳴 (NMR) 実験によるスピン磁化率測定から明らかにされた [5]。特に、Sr₂RuO₄ では超伝導状態においても実験感度の範囲内ではスピン磁化率が変化しない*¹ ことが明らかになっており、クーパ対のスピンが磁場方向に自由に偏極できるスピン三重項状態が実現していることが示された。同様の結果は偏極中性子散乱実験によっても得られている [6]。また、他にも、スピン三重項性を支持する実験結果は数多く報告されている [7]。近年では、トポロジカルに非自明な波動関数を持つ (擬) 二次元カイラル *p* 波超伝導という観点からも盛んに研究され、本新学術領域研究の主要な研究テーマにもなっている。

しかし、スピン三重項超伝導のシナリオ内で理解できていない謎も幾つか知られている。そのうち最も重要なもののひとつは、上部臨界磁場 H_{c2} の異常な温度依存性である。磁場を伝導面 (結晶の *ab* 面) に平行にかけた場合、 H_{c2} の温度依存性が通常の第II種超伝導体の H_{c2} の温度依存性とは大きく異なっていることは2000年前後から知られていた [8]。特に低温では、単純な予測に比べて1/2から1/3倍程度にまで抑制される。また、同じ条件下では、 H_{c2} 近辺で比熱・磁化・熱伝導率などの物理量が急激な変化をすることも知られていた [9]。これらの現象の起源は15年近くの間、基本的な未解決問題となっている。

3. 磁気熱量効果 (MCE) の測定実験

Sr₂RuO₄ の H_{c2} の異常な振舞いの起源を探るために、2011年に我々は磁気熱量効果 (Magnetocaloric effect, MCE) の実験を始めた。MCEとは、外部磁場 H の変化に伴って試料の温度が変化する効果のことで、断熱消磁冷却法に適用されていることでなじみの方も多いと思う。散逸を無視すれば、MCEに伴う試料温度 T の変化は以下のような式で表せる。

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_T = -\frac{C}{T}\left(\frac{dT}{dH}\right) - \frac{k(T - T_{\text{bath}})}{T\dot{H}}$$

(k は試料と熱浴の間の熱伝導、 C は試料の比熱、 T_{bath} は熱浴の温度) この式から、MCEがエントロピー S の磁場微分と関係していることが分かる。特に、もし上式の第二項が大きいとき、即ち熱伝導 k が大きい場合、 $\Delta t = (T - T_{\text{bath}}) / T$ はほぼ $\partial S / \partial H$ に比例することになる。本実験で用いた装置 (図1) は、まさにこの極限 (Strong-coupling limit) [10] で動作していることが予備実験から分かった。この場合、エントロピーが不連続になる一次相転移点では、 $\partial S / \partial H$ は発散するため、 Δt も発散的なピークを示すことが期待される。一方、二次相転移では $\partial S / \partial H$ は階段関数的な異常を持つので、 Δt もそのような異常を示すと期待できる。

MCE測定実験は、当時4回生で研究室に配属された梶川知宏氏の卒業研究プロジェクトとしてほぼゼロから立ち上げた。いくつかの試行錯誤があったが、特に印象に残っているのは導線の問題である。初めは温度計とヒーターを吊るすための導線に熱伝導度の低いNb-Ti超伝導線を用いていたが、磁場をスイープすると大きな発熱を生じることが分かった。はじめは誘導電流による発熱かと思っていたが、なぜか発熱が磁場の履歴に依存していた。そこから、超伝導線内にトラップされた磁束が動くときの発熱だと推測した。実際、この問題は導線を常伝導のPt-W合金に変えることで解決できた。

また、ここで、普段紹介する機会のない測定ソフトウェア技術についても少しだけ触れたい。私は、機器と通信しつつ、独自文法のシーケンスで逐次制御を行うことも可能な測定用LabVIEWソフトウェアを開発している。このシーケンス制御機能は、複雑な実験のセミオートでの実行を可能とし、本研究の成功の陰の立役者であった。このソフトウェアは我々のグループの他の研究にも活躍している。

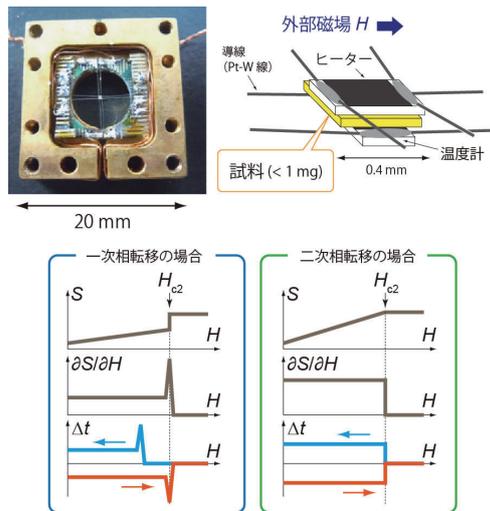


図1：磁気熱量効果測定に実際に用いた熱量計。下段は一次相転移と二次相転移の場合の温度応答の比較。

4. 一次相転移の発見

Sr_2RuO_4 についての測定 (Sample #1, 0.684 mg) を開始し、図2(a)のように、 H_{c2} 付近で Δt がピーク的な異常を持つことはすぐに認識できた。また、磁場を上げていったときと下げていった時の H_{c2} に 0.02 T 程度の明確な差があることを確認した。これらは、相転移においてエントロピーに不連続があり、かつ転移がヒステリシスを伴っていることを意味しており、 Sr_2RuO_4 の超伝導転移が一次相転移であることを直接的に示している。後述するように、第II種超伝導体でこのような一次相転移が起こるのは極めて異常である。また、この一次相転移は、磁場を ab 面からわずかに2度傾けたり、温度を 0.8 K 以上にしたりすると通常の二次相転移に戻ってしまうこともわかった (図2および3)。

さて、論文 [1] を準備し、別のサンプルで再現を取れたら投稿しようということになり、再現を取るための別のサンプルを探すことになった。そこで、梶川氏が 20 個超のサンプルの T_c をひたすら計測し、 $T_c = 1.5 \text{ K}$ と質の極めて良い、通称「神サンプル」を見つけ出してくれた。この試料 (Sample #2, 0.184 mg) で測定をすると、図2(b)のように、 H_{c2} での Δt ピークがケタ違いにシャープになった。あまりにデータがきれいすぎたため、このサンプルのデータが揃うまで論文投稿を延ばすことになった。うれしい悲鳴であった。

本研究の後、比熱 [2] や磁化 [11] でも一次相転移が確認され、この物質の超伝導相転移が低温高磁場で一次相転移になっていることは確定したと言えるだろう。

一次相転移になっているという劇的な性質が、20 年近くもの間、明らかになっていなかったのはなぜなのだろうか？ その答えは一次相転移性の試料依存性に隠されている。先に述べたように、この一次相転移の幅は試料の質に非常に敏感であり、ほんのわずかな試料の不均一性によっても転移幅が広がってしまうし、ヒステリシスも見えづらくなってしまふ。このように転移の様子が不均一性に非常に敏感なのは、多くの他の一次相転移と共通している。例えば、水の過冷却現象の

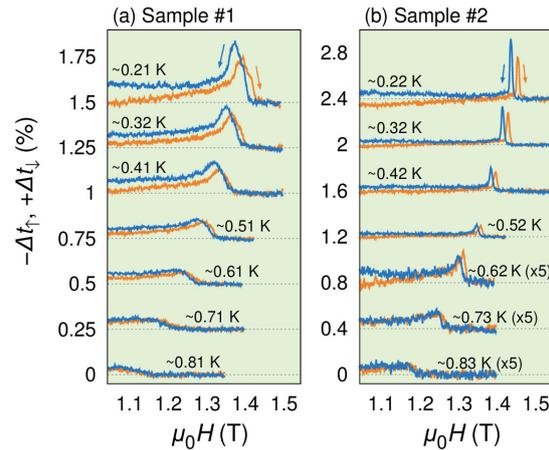


図2：磁気熱量効果測定実験 [1] で得られた試料の相対温度 Δt 。見やすいように、データを縦にずらしている。また、上げスweepのデータに関しては Δt に -1 をかけて符号を正にしている。(b) の Sample #2 が本文中で言うところの「神サンプル」である。

起こりやすさが水の純度や容器のきれいさに依存するのは良く知られている話である。これまで使われていた Sr_2RuO_4 単結晶試料では、たとえ $T_c = 1.5 \text{ K}$ のものであっても、その内部にあるわずかな不均一性によって一次相転移がなまってしまうため、通常の測定では観測が難しかったのであろう。一方、本実験では一次相転移を観測しやすい磁気熱量効果という手法を使ったことに加え、1 mg 以下の非常に小さいサンプルを測定できるような高感度の装置を作り上げ試料均一度の非常に高い部分を選択的に取り出して実験できたことが功を奏した。

5. 一次相転移は特殊なのか

最後に、この一次相転移が意味するところについて考えてみたい。通常の第II種超伝導体の場合、相転移は二次相転移になる。これは、超伝導体に侵入する量子化磁束によって反磁性磁化が減って行き、 H_{c2} で連続的にゼロになるためである。従って、観測された一次相転移は明らかに通常の軌道効果では説明できない。これまでに第II種超伝導で一次相転移が実現する例は、電子のゼーマン効果と超伝導の競合する、いわゆる Pauli 効果 [12] 以外には知られていない。しかし、一方で、Pauli 効果の起源は超伝導と常伝導のスピン磁化率の差であるから、 Sr_2RuO_4 のように両相でのスピン磁化率が等しい場合には効かないはずである。従って、これまでに知られていない、未知の超伝導の破壊機構が背後に潜んでいる可能性がある。なお、磁場を傾けたり温度を上げたりすることによって二次相転移が復活するのは、通常の軌道効果の寄与が支配的になるためだと推測できる。

一次相転移の論文 [1] が出版されてから 2 年近く経つが、この現象とスピン磁化率の実験とを consistent に説明する理論は私の知る限りまだ発表されていない。理論家の方々の話を聞くと一次相転移を再現するのが非常に難しいのだそうである。

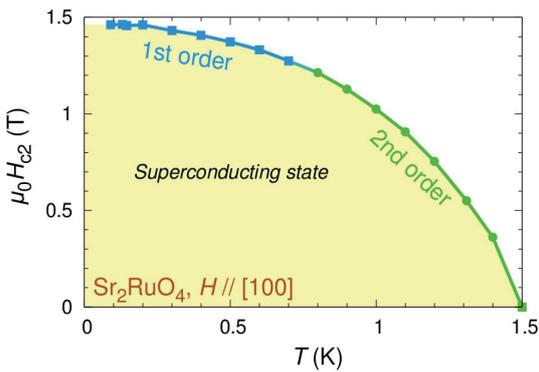


図3：比熱測定 [2] から得られた Sr_2RuO_4 の $H // [100]$ での超伝導相図。水色の四角は H_{c2} での転移が一次相転移になっていることを示す。

一方、私は、第I種超伝導体の研究 [13] からこの世界に入ったということもあり、一次相転移に対して別の見方も持っている。マイスナー効果が超伝導の本質であるとすると、磁場中での超伝導 - 常伝導転移は本質的には一次相転移と親和性が高いのである。それは、マイスナー効果によって生じた有限の反磁性磁化を何らかのメカニズムでゼロにしなければ二次相転移にはならないからである。実際、第I種超伝導体の超伝導 - 常伝導転移は、磁場中では一次相転移である。つまり、第II種超伝導体の方が、渦糸の侵入という「特殊」なメカニズムによって二次相転移を可能にしているとも言える。逆に言うと、いかなるメカニズムにせよ、通常の軌道効果以外のメカニズムで超伝導が壊れているならば、隠されていた一次相転移が再び顔を出すのは必然なのではないだろうか。Pauli 効果はその一例であるが、 Sr_2RuO_4 における未知の対破壊効果とその第二の例なのかもしれない。

6. おわりに

Sr_2RuO_4 は、常伝導状態が Fermi 液体として記述でき、バンド構造も単純で、磁気秩序や量子臨界などの複雑性も有しないために、知られている非従来型超伝導体の中でも最も理解しやすい物質であるはずである。にもかかわらず、超伝導相転移の次数という最も基本的な部分が未解決なのは興味深く、超伝導について我々が知らないことはまだまだたくさんあることを示唆している。超伝導研究の根本問題であるという意識を持って、この謎の解明にさらに取り組みたい。

謝辞

本研究は京大理学研究科の梶川知宏氏、前野悦輝教授との共同研究である。本研究で用いた単結晶試料は本研究室において Z. Q. Mao 氏と F. Hübler 氏によって育成されたものである。新学術領域研究を通じて、研究にかかる費用のサポートを頂けただけでなく、多くの発表・議論の機会も得られたことを、この場を借りて御礼申し上げます。

脚注

*1 Ru サイトの NMR で磁化率をみると、磁化率がわずかに増える傾向にあることが最近報告されており、スピン三重項対特有の効果として解釈されている [14]。

参考文献

- [1] S. Yonezawa et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).
- [2] S. Yonezawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083706 (2014).
- [3] Y. Maeno et al., Nature **372**, 532 (1994).
- [4] A. P. Mackenzie and Y. Maeno, Rev. Mod. Phys. **75**, 657 (2003); Y. Maeno et al., J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011009 (2012).
- [5] K. Ishida et al., Nature **396**, 658 (1998); K. Ishida et al., Phys. Rev. B **63**, 060507(R) (2001); H. Murakawa et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 167004 (2004).
- [6] J. A. Duffy et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 5412 (2000).
- [7] 例えば、K. D. Nelson et al., Science **306**, 1151 (2004); J. Xia et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006); J. Jang et al., Science **331**, 186 (2011); S. Kashiwaya, et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 077003 (2011).
- [8] Z. Q. Mao et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 991 (2000).
- [9] K. Deguchi et al., J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 2839 (2002); K. Tenya, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 023702 (2006).
- [10] A. W. Rost et al., Science **325**, 1360 (2009).
- [11] S. Kittaka et al., J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 013704 (2014).
- [12] A. M. Clogston, Phys. Rev. Lett. **9**, 266 (1962); Y. Matsuda and H. Shimahara, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 051005 (2007).
- [13] S. Yonezawa and Y. Maeno, Phys. Rev. B **72**, 180504(R) (2005).
- [14] K. Ishida et al., presented at SCES2014 and TQP2014; K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 053701 (2014).

著者紹介



よねざわ・しんじ

1980年東京生まれ、群馬県と千葉県で育ち、1999年京都大学入学。2003年京都大学理学部卒業。2005年京都大学理学研究科修士課程修了。2009年京都大学理学博士。2009年より現職。 Sr_2RuO_4 を始めとする非従来型超伝導の性質に興味を持って日々実験しています。新学術領域では事務局のメンバーとしても参加させていただき、大変でしたが貴重な経験をさせていただきました。ジョギングや社交ダンスを少しかじっていましたが、息子が生まれたので最近では休業中です。

スピン分裂した量子ホール系カイラルエッジ状態の 近接場走査型光学顕微鏡を用いたマッピング

野村 晋太郎 / 筑波大学 数理物質系 物理学域 准教授

右回り、左回り円偏光は進行方向に対して +1、-1 の定まった角運動量を持ち、これを試料に入射すると光の角運動量が選択則に従って電子系のスピン角運動量へと転写される。従来、通常の伝搬光に対してこの手法が広く使われてきたが、最近研究の進展の著しいナノ構造物質の物性の解明には空間分解能が十分ではなかった。空間分解能の向上には光の波長よりも小さな穴や球のまわりに局所的に発生する「近接場光」を用いて光の回折限界以下のものを観察する近接場光学顕微鏡 (NSOM) が有力な手法である [1]。私達は、従来難しいとされていた近接場プローブから円偏光を出射する方法を今回新たに開発することに成功した。この円偏光近接場光学顕微鏡を希釈冷凍機温度強磁場中に設置し、スピン分裂量子ホール系カイラルエッジ状態の研究を進めた (図 1)。

この円偏光近接場光学顕微鏡を用いて私達はスピン分裂した量子ホール系カイラルエッジ状態の空間マップ図を得ることに成功した [2]。カイラルエッジ状態にはスピン偏極した非圧縮性液体の帯とスピン非偏極の非圧縮性液体の帯とが交互に縞状に存在し、その内のスピン偏極した非圧縮性液体の帯の付近で光起電圧の大きな円偏光度が観測された。この結果は局所スピン密度汎関数法に基づく計算結果で説明され、量子ホール系カイラルエッジ状態にスピン偏極した電子が注入されていることが示された。この研究成果は、例えば量子スピンホール素子等のトポロジカル絶縁体・超伝導体の評価に生かされると期待される。

[1] H. Ito et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 256803 (2011).

[2] S. Mamyouda et al., (unpublished).



のむら・しんたろう

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

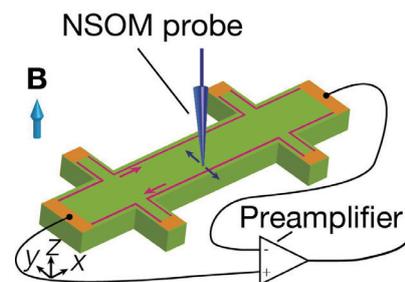


図 1 : 円偏光近接場走査型光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール系カイラルエッジ状態の空間マッピング測定方法の概略図。

スピン三重項超伝導体 UPt_3 における熱ホール効果

井澤 公一 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授

従来の BCS 理論で説明困難な超伝導（非従来型超伝導）のメカニズムの解明にはクーパー対の“形”（対称性）の情報が必要不可欠です。これまで我々は UPt_3 の熱伝導率の磁場方向依存性に基づき、 UPt_3 における超伝導がこれまで長らく信じられていた E_{2u} 表現ではなく、 E_{1u} 表現に属する f 波であること、そしてその対称性により UPt_3 で四半世紀以上謎であったいくつかの問題を自然に説明できることを明らかにしました [1]。この E_{1u} 表現に属する超伝導状態は、低温低磁場の B 相で両極 ($k_x=k_y=0$) にポイントノード、回帰線上に水平ラインノードをもちます。このノード構造の情報が超伝導発現機構解明に重要な役割を果たすことが期待されます。しかし、フェルミ面が球形や円筒形のような単純な場合は別として、実際のフェルミ面は複雑であるため、上述の情報だけでは現実のフェルミ面上のノード位置までは知ることは困難です。最近の第一原理バンド計算に基づいた解析の進展により、現実的なバンド構造を元にした議論が可能となっており [2]、実際のフェルミ面に照らし合わせたノード構造などの実験的解明が強く望まれます。そこで我々は、この点も視野に入れ、新たな視点から準粒子励起を調べるため、熱ホール抵抗 W_{xy} の実験に取り組みました。

図 1 に示したのは熱ホール抵抗の磁場依存性です。超伝導転移温度付近では、熱ホール抵抗の零磁場での傾き、すなわち（熱）ホール係数は極めて小さいことがわかります。これは UPt_3 が電子と正孔の数が等しい補償金属であることと整合します。しかし、温度低下とともに約 150 mK 付近からホール係数が増加します。超伝導状態ではノード付近の準粒子が熱輸送に寄与することを考えると、この結果は準粒子が多く励起するラインノードが主にホール面に走っていることを示唆しています。 UPt_3 では、ブリルアンゾーン内の Γ 点周りに 3 枚の電子面、A 点周りに 2 枚のホール面が存在することを考えると、この結果は E_{1u} 表現で期待される回帰線上の水平ラインノード構造と整合します。一方、赤道上、つまり電子面に水平ラインノードをもつ E_{2u} 表現とは整合しません。そして磁場を増加させ BC 転移点を越えると、熱ホール抵抗は符号変化し、準粒子は電子的な性格に変化します。これは、C 相において電子面も含めたすべてのフェルミ面に新たに垂直ラインノードができることを考えると自然に理解することができます。このように熱ホール係数の振る舞いから現実のフェルミ面上のノード位置が議論できることがわかりました。今後、第一原理バンド計算がなされることにより、超伝導発現機構に関する理解が深まることが期待されます。

[1] Y. Machida et al., Phys. Rev. Lett. **108**,157002(2012).

[2] H. Ikeda et al., Nature Physics **8**, 528 (2012).



いざわ・こういち

兵庫県出身。1998年広島大学で学位取得後、東京大学物性研究所助手。2005年フランス原子力庁 Marie-Curie フェロー研究員を経て、2007年東京工業大学准教授、現在に至る。新しい物好き。マニアックな実験が大好きで、簡単には真似の出来ないような実験をすることをモットーに研究しています。趣味はクラシック音楽。ラップ吹き。

WEB 非公開

図 1 : UPt_3 における熱ホール抵抗 W_{xy} の磁場依存性。

ルテニウム酸化物超伝導体のバルク・表面における電子・スピン状態の解明

岩澤 英明 / 広島大学 放射光科学研究センター 助教

本研究課題では、高分解能スピン分解 ARPES (角度分解光電子分光) により、ルテニウム酸化物超伝導体 (Sr_2RuO_4) の電子・スピン状態を明らかにし、スピン三重項超伝導の表面・界面で起こりうる新奇量子現象を理解するための基盤を形成することを目的としました。

近年、 Sr_2RuO_4 のスピン ARPES により面外方向のスピン偏極が観測され、その起源はスピン・軌道相互作用に由来すること、また、スピン・軌道相互作用により生じた軌道混成のために「クーパー対の波導関数のスピン成分 (一重項・三重項) の混成」が引き起こされることが示唆されています (Veenstra et al., Phys. Rev. Letts. **112**, 127002 (2014))。

しかし、スピン偏極はバンドの底において観測されており、フェルミ準位近傍のスピン状態を検証する必要があります。本研究では、広島大学放射光科学研究センターのアンジュレータービームライン (BL-9B) に設置されたスピン分解 ARPES 装置 (図 1) を用いて、 Sr_2RuO_4 のバルクのスピン状態の解明に取り組みました。

図 2 (a) は、本装置を用いて測定した Sr_2RuO_4 のフェルミ面です (X 点中心の α 面、 Γ 点中心の β 面・ γ 面の計 3 枚)。図 2 (b) の上下のパネルは、 Γ X 方向・ α 面において測定した、スピン分解エネルギー分布曲線 (EDC) と、それらから導出したスピン偏極率です。一見して、有意なスピン偏極 (面内方向) がフェルミ準位近傍に存在することがわかります。観測された面内方向のスピンは、スピン・軌道相互作用により説明が出来ないことから、異なる機構により、スピン偏極が生じている可能性が示唆されます (Iwasawa et al., in preparation)。



いさわ・ひであき

1980 年生まれ、千葉出身。2008 年東京理科大学理学研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、広島大学放射光科学研究センター研究員、同特任助教を経て、同助教。サッカー・ランニングなど体を動かすことが趣味です。

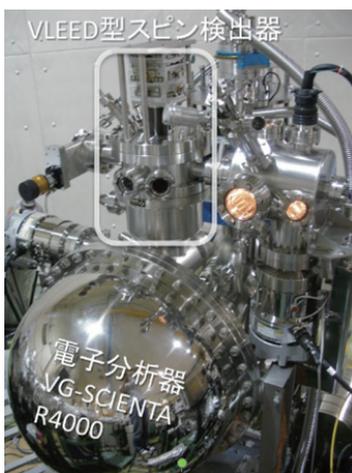


図 1 : VLEED 型スピン分解 ARPES 装置

従来型の本モット検出器と比較して、100 倍ほどスピン検出効率の高い超低速電子線回折 (Very Low Energy Electron Diffraction: VLEED) 型のスピン検出器を 2 つ備え、世界最高のエネルギー・波数分解能で、3次元スピン成分を測定できます。

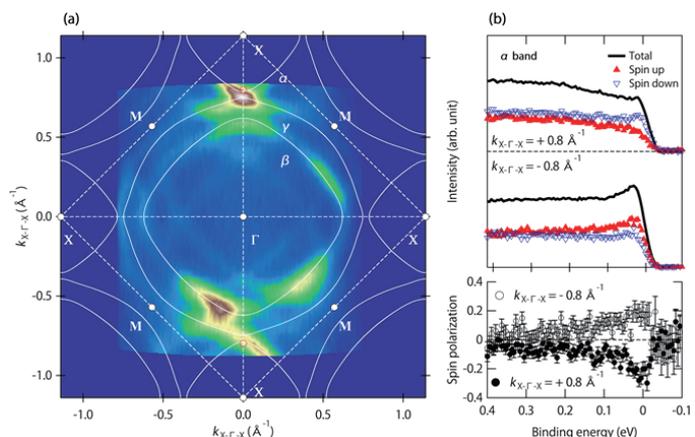


図 2 : Sr_2RuO_4 におけるスピン分解 ARPES データ

- (a) 通常の ARPES により測定したフェルミ面
 (b) α フェルミ面における (測定波数: 図 2 (a) 中の赤丸)、スピン分解 EDC (上) とスピン偏極率 (下)。

トンネル現象を用いた重い電子系の多重超伝導相の研究

住山 昭彦 / 兵庫県立大学 大学院物質理学研究科 教授

重い電子系超伝導体の中には、本研究で扱う UPt_3 や UBe_{13} のようにスピン 3 重項状態である可能性が高く、かつ複数の超伝導相を示す物質があります。私は、ジョセフソン効果と点接合分光という 2 つのトンネル現象を利用して、この多重超伝導相の解明を目指しています。前者のジョセフソン効果は、調べたい超伝導体と従来型の超伝導体との間に流れる超伝導電流 (ジョセフソン電流) を測定するもので、秩序変数の位相やスピン 3 重項電子対のスピンへの向きの情報が得られます。また、後者の点接合分光は、試料に常伝導金属の針を接触させ、接触部分の微分抵抗のバイアス電圧依存性を測定するもので、エネルギー・ギャップの情報が得られます。

UPt_3 については、温度と磁場に依存して A (高温低磁場) 相、B (低温低磁場) 相、C (低温高磁場) 相の 3 つの相に分かれ、秩序変数として、 E_{1u} と E_{2u} 対称性を持つ候補が提案されています。本研究では、特に C 相の研究をするため、高圧を印加することにより低磁場で C 相を出現させていますが [1]、ジョセフソン接合の質を反映する臨界電流の磁場依存性は 0.81 GPa まで悪化せず、フラウンホーファー回折図形の特徴が得られています (図 1 (a))。

一方、 UBe_{13} については、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ が x のある範囲で 2 つの超伝導相を示すことが報告されていましたが、比熱の測定では UBe_{13} でも 2 つの相転移の可能性が示唆されており [2]、本研究ではその検証を目指しています。図 1 (b) は UBe_{13} と BCS 超伝導体の Nb, Al の間に流れるジョセフソン臨界電流を示したもので、 UBe_{13} の転移温度 $T_c \sim 0.9$ K よりさらに低温側の相転移温度 0.7 K 以下でジョセフソン効果が発現する、或いは急激に増大を始めることが見て取れ、第 2 の超伝導転移が検出できたのではないかと考えております。

[1] J. Gouchi et al.: JPS Conf. Proc. **3** (2014) 011067.

[2] F. Kromer et al.: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 4476.



すみやま・あきひこ

大阪府出身、1986 年東京大学大学院 理学系研究科 博士課程修了。三菱化成工業 (株) 総合研究所所員、姫路工業大学理学部 講師を経て、2008 年より現職の兵庫県立大学大学院 物質理学研究科 教授。

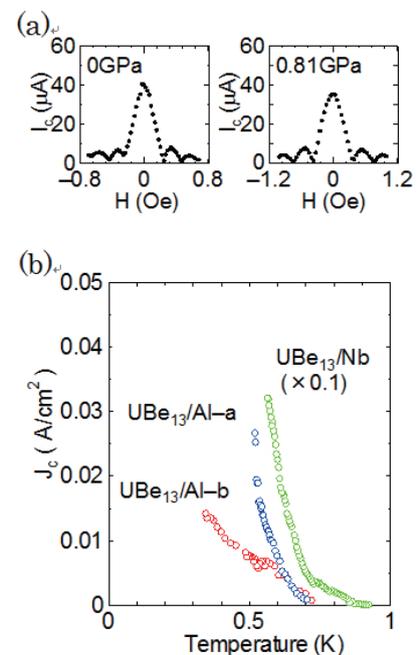


図 1 (a) UPt_3 と Al の間のジョセフソン臨界電流の磁場依存性と (b) UBe_{13} のジョセフソン臨界電流の温度依存性。

カイラル*p*波*s*波超伝導ハイブリッドSQUIDによる カイラル超伝導位相状態の研究

石黒 亮輔 / 理化学研究所 創発物性科学研究センター 協力研究員

一つの超伝導ループにクーパー対の対称性の異なった複数の超伝導体が含まれる超伝導ループ（このループにはもちろん対称性の異なった超伝導間の超伝導接合が必ず含まれます）の研究を行っています。従来型の超伝導体は*s*波スピン三重項のクーパー対によって実現している一方でカイラル超伝導体として知られるSr₂RuO₄は*p*波スピン三重項のクーパー対を形成しており、これらは対称性が異なっています。クーパー対の対称性が異なっている超伝導間では軌道状態やスピン状態が異なるため、これらの超伝導間の超伝導電流は自明なものではない考えられます。私は微細加工を用いてカイラル*p*波超伝導体Sr₂RuO₄と*s*波超伝導体でマイクロメーターサイズのハイブリッドSQUIDを作製し研究を行っています。

*s*波超伝導体としてニオブを用いSr₂RuO₄部を集束イオンビーム加工（FIB）によって細く加工し作製したSQUIDでは、その磁場干渉の周期性が通常の磁束量子（ $h/2e$ ）を単位としたものだけでなく、半分の磁束量子（ $h/4e$ ）に対応するものも現れることを臨界電流の磁場干渉パターン（図1）とマイクロ波照射下のシャピロステップから見出しました。さらにこのSQUIDの磁場干渉パターンは時間反転対称性を破っていることを示しました[1,2,3]。現在、これらの結果はSr₂RuO₄が内にカイラルドメインが形成され、カイラルドメイン間（クーパー対の軌道角運動量が異なる）を流れる超伝導電流に起源があるものと考えています。また、SQUIDの構造をよりシンプルにするために、FIBによって～10 μm程度のサイズのSr₂RuO₄をバルクから削り出し他者と、FIBによるイオンビームアシスト蒸着によるタンガステン超伝導薄膜（*s*波、 $T_c \sim 5\text{K}$ ）を用いた新しいハイブリッドSQUIDを作製しました。これらについてはTQP2014で発表を行いました。また通常のSQUIDに～10 μm程度のサイズのSr₂RuO₄を直接載せ半整数量子渦、Sr₂RuO₄-Ru共晶における自発渦、カイラルエッジ電流の観測などにも取り組んでいます[4,5]。

- [1] R. Ishiguro et al., J. Phys. Conf. Ser. **568**, 022020 (2014).
- [2] R. Ishiguro et al., 投稿中
- [3] Y. Nago et al., J. Phys. Conf. Ser. **568**, 022031 (2014).
- [4] S. Tsuchiya et al., J Phys Soc Jpn **83**, 094715 (2014).
- [5] R. Ishiguro et al., J. Phys. Conf. Ser. **568**, 022019 (2014).



いしごろ・りょうすけ

1973年生まれ 神奈川県出身。
1997年京都大学卒業。2003年 京都大学 博士（理学）取得。その後、パリ高等師範学校、大阪市立大学、東京理科大学助教を経て、2013年より現在に至る。本研究に並行してダイエットに取り組みました。

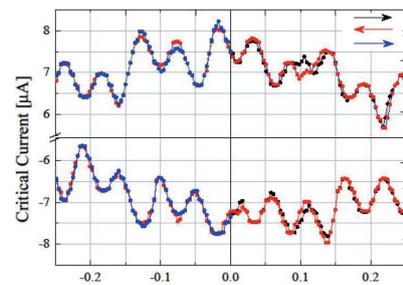


図1：ハイブリッドSQUIDの超伝導臨界電流の磁場干渉パターン。半分の量子磁束に対応する周期も観測。

超流動ヘリウム3中のトポロジカルオブジェクトの制御と創出

佐々木 豊 / 京都大学 低温物質科学研究センター 教授

核整列固体ヘリウム3や常流動・超流動ヘリウム3を対象に核磁気共鳴(NMR)、超音波吸収、高精度圧力測定、機械振動子測定などの手段により、最もシンプルな構成要素からなる強相関物質の、複雑でかつ魅力的な多体現象の研究を行って来ました。近年は空間不均質な秩序構造を探索するためにNMRの発展系としての磁場勾配下NMRや磁気共鳴映像法(MRI)の開発に力を入れ、世界初の超低温MRI撮影装置(ULTMRI)の開発に成功しました。

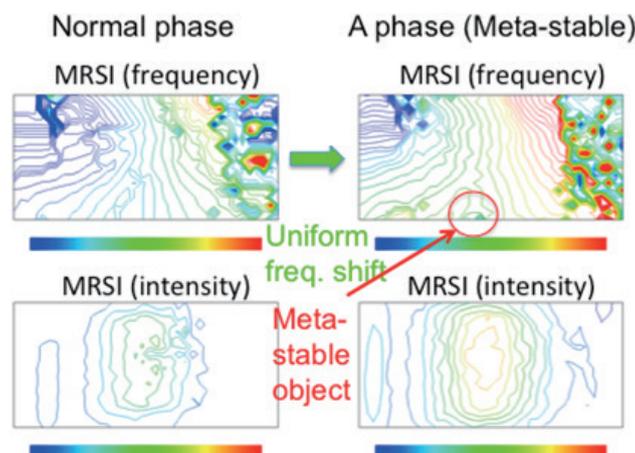
本領域では、ULTMRIを発展させて超流動ヘリウム3のテクスチャーなど空間不均質な秩序構造の直接測定手段となりうるURTMRSIを開発することにより、テクスチャー中に生成する欠陥や量子渦などのトポロジカルオブジェクトの構造や生成消滅機構、テクスチャー制御の可能性などを探索しています。ULTMRSIでは核スピン密度の空間分布のみを測定する通常のMRIに加えて、共鳴周波数の空間分布も同時に取得することができ、その情報から空間不均質な秩序状態の空間変化を直接知ることができます。この方法により、超流動ヘリウム中に現れるトポロジカルオブジェクトを実空間で可視化することが可能になります。

下図(TQP2014-PA6より抜粋)に示したのは厚さ100 μm の平行平板セルに閉じ込められた常流動ヘリウム3のNMR共鳴周波数の空間分布(磁場分布に対応)(左上図)と、超流動A相での共鳴周波数分布(右上図)です。超流動A相ではほぼ全域で一様な周波数シフトをしていることと共に、一部に準安定な特異点的構造が発生し、その部分の共鳴周波数が周辺とは異なっていることが見て取れます。この部分の局所的なスペクトルを抽出して見ると、周辺部分と同じ周波数のピークの他に少しずれた周波数のピークが混在していることがわかります。このずれた共鳴周波数に対応するオブジェクトは空間のメッシュサイズ(170 μm 角)より小さなもので、どのような構造であるのかについてテクスチャーの数値シミュレーションの助けを借りて検討を進めているところです。



ささき・ゆたか

1961年大阪府出身
1983年京都大学理学部卒業、
1988年同大学院理学研究科博士
後期課程研究指導認定退学、
同大学文部技官、1990年米国
カリフォルニア大バークレー校
博士研究員、1993年京都大学
理学部助手、2002年京都大学
低温物質科学研究センター助教
授、准教授を経て2012年より
教授。趣味はものづくり全般と
飲み食いでしょうか。今冬は自
家菜園の大根の出来が素晴らしいです。



トポロジカル絶縁体および関連物質のスピ分解 ARPES

佐藤 宇史 / 東北大学 大学院理学研究科 准教授

本研究では、トポロジカル絶縁体とその関連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) 実験を行いました。電子は、「エネルギー」「運動量」「スピン」という自由度をもっていますが、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非常に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分解検出が大変難しく、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大きな障害となってきました。この問題を克服するため、東北大学において、ミニモット検出器あるいは低速電子線回折装置を基軸とした超高分解能スピ分解 ARPES 装置の開発を行っています。本装置と高輝度放射光を併用することで、トポロジカル絶縁体関連物質においていくつかの興味深い成果 [1-4] が得られています。

我々のグループでは、C01 班の大阪大学の瀬川・安藤グループと共同で、IV-VI 族半導体 SnTe が、(001) 面において 2 重のディラックコーンを有する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 2012 年に同定しました [5]。その後、SnTe とその関連物質の研究をさらに発展させています。とりわけ、 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ におけるトポロジカル量子相転移近傍の電子状態を明らかにした結果、トポロジカル相においてディラックコーンの位置がブリルアンゾーンの鏡映面上を移動するという、普通のトポロジカル絶縁体には見られない現象を明らかにしました [2]。また SnTe では、(001) 面に加えて新たに (111) 面の測定を行い [3]、(001) 面のような 2 重ディラックコーンでは無く、ブリルアンゾーンの Γ 点と M 点中心にそれぞれ単独のディラックコーンが存在する事を明らかにしました (図 1)。このことは、観測された表面状態が確かに鏡映対称性によって保護されていることを強くサポートするものです。これまで同一物質で異なる表面方位のディラック電子構造を同定された例は無く、この実験結果は、バルクのトポロジーと表面状態の幾何学的関連性を初めて明らかにするものです。また、トポロジカル超伝導の可能性が指摘されている $Sn_{1-x}In_xTe$ における ARPES 測定もを行い、超伝導の母体となる 3 次元的なバルクのフェルミ面形状を明らかにしました。さらにこの物質では、SnTe と同様に 2 重のディラックコーンが残っていることを見出しました。このことは、In-SnTe がバンド反転と鏡映対称性によって特徴付けられるドーブされたトポロジカル結晶絶縁体であることを示しています。これらの成果は、TQP2014 国際会議や領域内研究会 (阪大、下呂温泉) などにおいても発表しました。

今後は、更なる高効率・高分解能を目指したスピ分解 ARPES 装置の開発を行い、物質合成グループと強固にコラボレーションすることで、ワイル半金属などの新奇なトポロジカル物質の探索も行っていく予定です。



さとう・たかふみ

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。

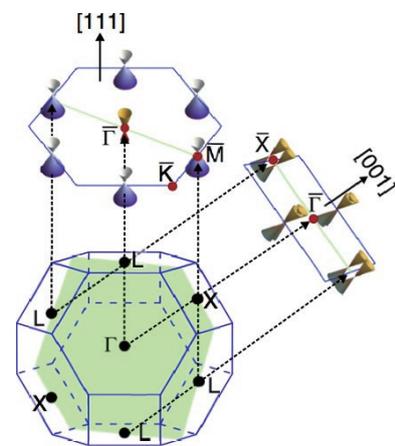


図 1: ARPES で決定した、(111) および (001) 表面におけるディラックコーン表面状態 [3]

- [1] M. Nomura et al., Phys. Rev. B **89** (2014) 045134.
- [2] Y. Tanaka et al., Phys. Rev. B **87** (2013) 155105.
- [3] Y. Tanaka et al., Phys. Rev. B **88** (2013) 235126.
- [4] T. Sato et al., Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 206804.
- [5] Y. Tanaka et al., Nature Phys. **8** (2012) 800.

スピンプンプによるトポロジカル絶縁体への スピン流注入と逆スピンホール効果

塩見 雄毅 / 東北大学 金属材料研究所 助教

近年高い注目を集めているトポロジカル絶縁体は、バルクはバンドギャップをもつ絶縁体である一方、表面にギャップレスの金属状態が生じているような特殊な物質です。表面状態で伝導を担う電子も通常の金属とは異なり、ヘリカルなスピン偏極をもったディラック電子と呼ばれるもので、平衡状態で無散逸なスピン流が表面状態を流れていることから、そのスピントロニクス応用が強く期待されていました。

本研究では、強磁性体を接合したトポロジカル絶縁体において、スピントロニクスの観点からトポロジカル絶縁体表面状態のスピン流物理の研究を行っています。スピンプンピングと呼ばれる強磁性共鳴を利用した手法を用いると、強磁性体から表面状態にスピンを注入することができます。表面状態では平衡状態で逆向きスピンが互いに反対方向に流れているため電流は生じませんが、スピンを外から注入しそのバランスを崩してやると、図1に示すように電流が生じます。このとき電流は注入したスピンの向きと注入方向の両方に垂直な方向（ホール方向）に生じます。

本研究では、バルクキャリアを補償したトポロジカル絶縁体 $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$ | Ni-Fe 合金接合系を用いて、スピン注入実験を行いました。上記で説明した通り、スピン注入誘起電圧信号は、注入するスピンの向きに依存するため、磁場に対して奇の対称性をもつことが期待されます。我々は、バルクキャリアを補償したトポロジカル絶縁体試料において、表面状態の輸送現象が主要となる低温で磁場に対して奇の信号が見られることを示しました。幾つかの対照実験により、この信号がトポロジカル絶縁体表面状態におけるスピン注入誘起電圧信号であることを実証しました [1]。現在は、この結果を更に発展させるべく、フェリ磁性絶縁体 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ を用いたトポロジカル絶縁体へのスピン注入実験を本新学術領域の若手相互滞在プログラムを利用して進めています。

最近では、新奇トポロジカル物質として注目を集めているスカーミオン結晶におけるスピン流物理も研究しています。磁気共鳴によるスカーミオン結晶の反時計回り運動を利用し、スカーミオン結晶相からのスピンプンピングによるスピン流生成を達成しました [2] (図2)。今後も非自明なトポロジ的性質がより顕著に現れるような新奇現象の開拓、またそのスピントロニクス・デバイス応用を目指し、研究を進めていくつもりです。

[1] Y. Shiomi, K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, Kouji Segawa, Yoichi Ando, and E. Saitoh, Phys. Rev. Lett. **113**, 196601 (2014).

[2] D. Hirobe, Y. Shiomi, Y. Shimada, J. Ohe, and E. Saitoh, submitted (2014).



しおみ・ゆうき

三重県出身。2012年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。その後、東北大学原子分子材料科学高等研究機構助教を経て、現職。2014年12月からERATO スピン量子整流プロジェクト研究総括補佐兼任。仙台に慣れてきて、段々飽きてきました。

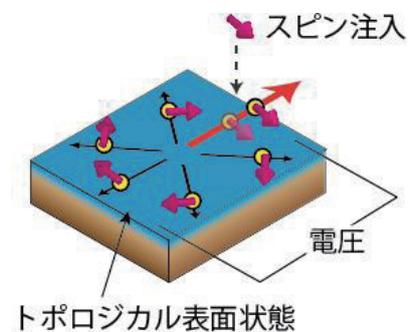


図1：トポロジカル絶縁体へのスピン注入と誘起される電圧信号 [1]

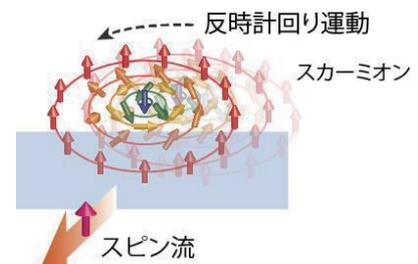


図2：スカーミオン結晶からのスピン流生成 [2]

空間反転対称性の破れを人工的に制御した 重い電子系超伝導体の物性研究

芝内 孝禎 / 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授

我々が世界ではじめて成功した Ce を含む重い電子系エピタキシャル薄膜成長の技術を用いて、人工的に空間反転対称性の破れを制御した超格子構造を作製し、その物性測定から空間反転対称性の破れの効果を明らかにすることを目的とした研究を行っています。現在までに、重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 と、同じ結晶構造を持つ通常金属 YbCoIn_5 の超格子の作製に成功しており、重い電子状態を担う Ce 層の層数を固定し、図 1 のように Yb 層の層数に変調をかけることにより、Ce 層から見た反転対称性の破れを制御することが可能となりました。このような系の超伝導特性を調べたところ、上部臨界磁場の温度依存性や角度依存性が変調度合いに対して系統的な変化を示し、空間反転対称性の破れに伴うフェルミ面のラッシュバ分裂によるパウリ効果の抑制が観測されました [1]。この結果は反転対称性の破れによる電子状態の変化が超伝導状態に強く影響を与えることを直接示したものであり、今後、このような特殊な電子構造に伴う新奇な状態の実現へと期待がふくらみます。

また、これとは全く異なる系ですが、重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 で議論されている時間反転対称性を破るカイラル d 波超伝導についても興味を持って研究を行っています。最近得られた純良単結晶試料について、熱電効果の一種であるネルンスト効果を測定したところ、超伝導転移温度以上でその値が通常の超伝導揺らぎの理論で期待される値の百万倍にもなる巨大なネルンスト信号を観測しました [2]。D04 班の藤本氏らとの共同研究により、この巨大なネルンスト効果はこの物質の時間反転対称性を破る超伝導に伴う特殊な超伝導揺らぎにより説明可能であることが示されました。このことはカイラル超伝導体の研究において、転移温度以上における超伝導揺らぎの測定の重要性を初めて示したものであり、本研究領域で取り扱われている他のカイラル超伝導の候補物質での研究への展開が期待されます。

[1] M. Shimozawa et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 156404 (2014).

[2] T. Yamashita et al., Nature Phys. **11**, 17-20 (2015).



しばうち・たかさだ

1967 年生まれ。兵庫県出身。
1990 年東京大学工学部卒業、
1993 年同工学系研究科博士課程中退後、東京大学工学部物理工学科助手、ロスアラモス国立研究所研究員、2001 年京都大学工学研究科助教授、2005 年京都大学理学研究科助教授、同准教授を経て 2014 年より現職。

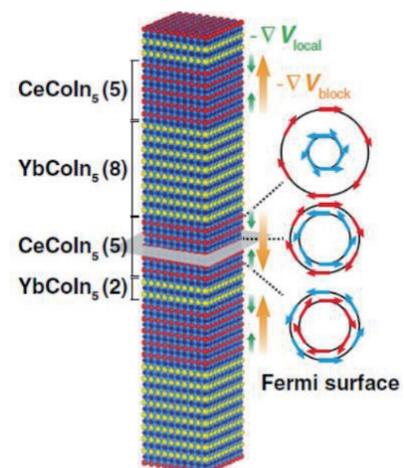


図 1: 重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 と、同じ結晶構造を持つ通常金属 YbCoIn_5 の超格子構造。YbCoIn₅ の厚みに変調をかけることで空間反転対称性の破れの度合いを制御できる。

原子層制御技術による3次元トポロジカル絶縁体の スピン機能創出

安藤 裕一郎 / 京都大学大学院 工学研究科 助教

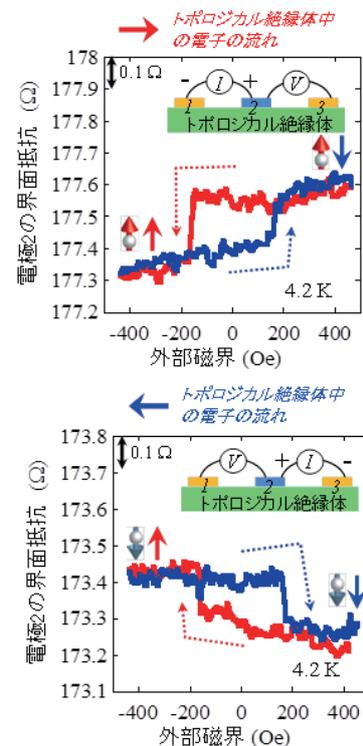


あんどう・ゆういちろう

3次元トポロジカル絶縁体の表面状態では、電子の運動量とスピン角運動量に相関があり（スピン-運動量ロッキング）、電流を印加するだけで電流方向に依存したスピン流を生成できると期待されています。この特性はスピントロニクス分野において魅力的であり、3次元トポロジカル絶縁体を用いた新奇スピンデバイスの実現が望まれています。私は当該デバイスの実現を目指し、表面状態に起因するスピン流の電気的検出を試みています。

実験にはCO1班の大阪大学・安藤・瀬川グループにご提供いただいたバルク単結晶3次元トポロジカル絶縁体（ $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ 等）を用いています。スコッチテープ法により数10nmに薄片化した試料に、微細加工プロセスにより数100nmスケールの強磁性体・非磁性体電極を配置しデバイスを作成します（図の挿入図参照。電極2に強磁性体であるパーマロイ（ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ）を使用）。強磁性体/3次元トポロジカル絶縁体接合に電流を印加した場合を考えます。トポロジカル絶縁体から強磁性体へ流入する電流がスピン偏極している場合、強磁性体の磁化の向きとスピンの量子化軸の相対角度により、強磁性体の抵抗が変化します。（磁気抵抗効果）本研究ではこの磁気抵抗効果を用いて、電気的に検出しました。その結果、図に示すようにスピン流が強磁性体中に注入されたことに起因する磁気抵抗効果を検出することに成功しました。また、電流の向きを変転すると信号の極性が反転していることが判ります。これは電子の運動方向の反転に伴うスピン量子化軸の反転に起因していると考えられます。また、バルクが金属的であるトポロジカル絶縁体（ Bi_2Se_3 ）を用いて同様の測定を行ったところ、このような矩形の信号は得られませんでした。この結果は、今回得られた信号がトポロジカル絶縁体の表面状態に起因していることを強く示唆しています。本結果はNano Letters, **14**, 6226-6230 (2014)で報告しました。スピン機能の電気的検出には成功しましたが、課題は山積しています。例えば、スピン注入効率を計算すると1%にも満たしておらず、理論的予想よりも1桁から2桁小さいことが判明しました。また信号の検出は150K以下に留まっています。今後は高効率かつ室温におけるスピン注入の実現を目指すほか、スピン機能のゲート変調などにも挑戦していきたいと考えています。

東京都出身。2005年京都大学工学部卒業。2007年京都大学大学院エネルギー科学研究科修了。2010年九州大学大学院システム情報科学府修了、博士（工学）取得。2010年4月から日本学術振興会特別研究員（PD）、2012年2月から大阪大学大学院基礎工学研究科・助教、2014年4月より現職。



図：(上) $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ を用いたスピンデバイスにおける磁気抵抗効果の測定結果および(下) 電流の向きを反転した場合の測定結果、矩形信号がトポロジカル絶縁体のスピン流に起因。

量子ホール系におけるエッジ状態とトポロジカル励起の研究

福田 昭 / 兵庫医科大学 医学部物理学教室 准教授

半導体接合界面における2次元電子系が、強磁場・超低温で起こす特異な量子現象である、「量子ホール効果」に興味を持ち、特に2次元電子系を2枚近接配置した2層系量子ホール効果における量子現象を中心に実験を行っています。最近では、高移動度 GaAs 中の2次元電子系における分数量子ホール効果における動的核スピン偏極 (DNP) の研究や、2次元電子系の対象をグラフェンにまで広げて、量子輸送現象の研究を中心に進めています。

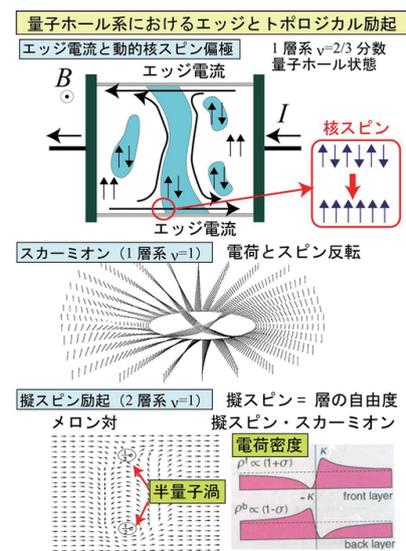
具体的には、量子ホール状態、特に2層系量子ホール効果を中心に、ソリトン格子相 [1]、傾角反強磁性相 [2] や SU(4) スカームイオン [3] の発見、半量子渦対の乖離としてのコストリッツ-サウレス転移の観測 [4]、層間核スピン拡散の測定 [5] などを行ってきました。最近では、 $\nu = 2/3$ 量子ホール状態においてスピン転移点付近でエッジ状態の大電流による DNP を行い、DNP 後の状態が非量子ホールの温度依存性を示す新奇な量子状態でありことが分かってきました。また、DNP 電流の周波数を変化させることにより、ドメイン構造の動的ダイナミクスが解明されつつあります (共に論文執筆中)。また、グラフェンでは、弱局在効果と普遍的伝導度揺らぎの関係が明らかになってきました (論文執筆中)。また、不活性ガスであるヘリウムをグラフェンに吸着するだけでも伝導度の変化が生じ、高感度な圧力センサーとなり得る可能性があることが期待されています [6]。これらの研究成果が、他の物質のトポロジカル量子物性の解明に、相補的に役立つことを望んでいます。

- [1] A. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 016801 (2008).
- [2] A. Fukuda et al., Phys. Rev. B **73**, 165304 (2006).
- [3] S. Tsuda et al., Phys. Rev. B **88**, 205103 (2013).
- [4] D. Terasawa et al., Phys. Rev. B **86**, 165320 (2012).
- [5] N. Minh-Hai et al., Phys. Rev. B **89**, 041403(R) (2014).
- [6] A. Fukuda et al., J. Phys.: Conf. Ser. **568**, 052009 (2014).



ふくだ・あきら

奈良県出身。2002年京都大学・大学院理学研究科博士課程修了、2002年理化学研究所基礎科学特別研究員、2004年京都大学・低温物質科学研究センター 講師 (研究機関研究員) を経て、2008年兵庫医科大学・医学部・物理学教室准教授、現在に至る。



超格子バンドエンジニアリングを用いた トポロジカル絶縁体の実現

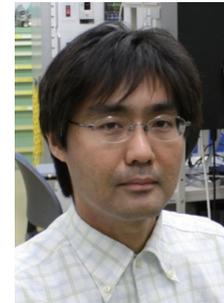
松野 丈夫 / 理化学研究所 基幹研究所 専任研究員

5d 電子系であるイリジウム酸化物は、スピン - 軌道相互作用が約 0.5 eV と大きく、かつ電子相関とも競合するという特徴を持ちます。この競合は、従来歴史的であると信じられてきたイリジウム酸化物に予想外の基底状態を実現させることが近年明らかになってきました。一例として、二次元的構造をとる Sr_2IrO_4 はモット絶縁体、その三次元版であるペロブスカイト型 SrIrO_3 は半金属となります。さらに、これらの物質を制御することにより、「電子相関の効いたトポロジカル絶縁体」という物質の新たな状態が生まれる可能性が理論的に指摘されています。

本研究では薄膜合成法を用い、(111) 方向に積み重なった $[(\text{SrIrO}_3)_m, (\text{SrTiO}_3)_2]$ 超格子を作製しました。この構造では Ir 原子の配列がハニカム格子と等価になり (図 1)、その特殊性からトポロジカルな性質を持つことが予測されています (m はハニカムの層数に対応します)。このような Ir と Ti の原子配列は熱力学的に不安定ですので、一層ずつ積層を制御できる薄膜合成法によってのみ実現可能な、究極の超格子バンドエンジニアリングと言えます。 SrIrO_3 が常圧ではペロブスカイト構造ではなく六方晶をとるため (111) 面上の超格子作製は困難を極めました。A サイトのイオン半径を変化させることで六方晶の出現を抑え、理論で予言された構造の作製に成功しました (図 2)。その結果、 $m = 3$ が磁性絶縁体となる一方で、より次元性の低い $m = 1, 2$ では明瞭な磁性が観測されませんでした。このことは、低次元性が磁性を安定化させる (001) 面上の超格子 [1] とは大きく異なる点であり、 $m = 1, 2$ がトポロジカル絶縁体と関連している可能性があります [2]。今後は分光学的手法を用いてさらなる解明を進めていく予定です。

[1] J. Matsuno et al., arXiv:1401.1066.

[2] D. Hirai, J. Matsuno, and H. Takagi, submitted to APL Materials.



まつの・じょうぶ

2001 年 東京大学大学院理学系研究科修了、産業技術総合研究所 博士研究員等を経て、2005 年理化学研究所研究員、2008 年より同専任研究員。学生時代に茶道をかじっていましたが、TQP2014 では思いがけず十年ぶりかのお茶席を楽しむことができました。

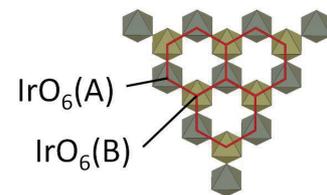


図 1 : (111) 方向に積層した人工超格子 $[(\text{SrIrO}_3)_2, (\text{SrTiO}_3)_2]$ の模式図。

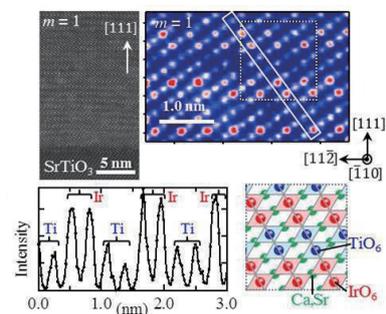


図 2 : 人工超格子 $[(\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{IrO}_3)_2, (\text{SrTiO}_3)_2]$ の断面透過電子顕微鏡 (高角散乱環状暗視野モード)。

多重極限下の電子・熱物性測定と結晶構造解析 による圧力誘起トポロジカル超伝導の研究

大村 彩子 / 新潟大学 研究推進機構 超域学術院

ビスマス (Bi) は数万気圧で超伝導を発現します。その転移温度 (T_c) は 7 - 8 K で単体としては比較的高く、さらに高压側では圧力に伴い T_c が上昇することが知られています。数万気圧 (1 万気圧 ~ 1 GPa) という圧力は高圧力科学分野では比較的容易に到達できる圧力領域であり、我々のグループでは Bi を主な構成元素とする半導体や半金属に対して高压下での電気抵抗測定や放射光 X 線回折、ラマン分光法により Bi_2Te_3 や Bi-Sb 全率固溶体での圧力誘起超伝導を探索してきました。最近、Bi 系合金が 3 次元トポロジカル絶縁体として注目されるようになり、現在では圧力誘起トポロジカル相転移など圧力もまた重要なパラメータとして認識されています。

本研究ではトポロジカル絶縁体における圧力誘起超伝導の探索と転移機構の解明、及び圧力誘起トポロジカル相転移の観測を研究課題としています。そのひとつとして、 $\text{Cu}_y\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の Se サイトを Te 置換した $\text{Cu}_{0.25}\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ ($x = 0, 0.01, 0.1, 0.66$) (図 1) について圧力を用いた超伝導研究を行っています。 $\text{Cu}_y\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の母体である Bi_2Se_3 では 12 万気圧以上で圧力誘起超伝導が発現します (Kong et al., JPCM **25** (2013) 362204; $T_c = 4.4$ K at $P = 12$ GPa)。我々は、 $\text{Cu}_{0.25}\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ を調べることによって、本物質における Te 置換の効果に加えて、母物質に対する Cu-doping 効果を探れると考えています。

$\text{Cu}_{0.25}\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ では、本研究で扱う組成のうち Te 組成 $x \leq 0.01$ が常圧で超伝導 ($T_c = 3.2$ K) を示します。 $x = 0.01$ で観測した電気抵抗率の温度依存性では、圧力に対して著しい変化を示します。加圧すると 5 万気圧付近まで半導体的な振る舞いを示した後、高压側では再び金属的となります。さらに、圧力 10 万気圧を超えると、5.4 K 付近から抵抗率の急落がわずかに観られ、これは磁場で抑制されることから超伝導であると推測されます。高压力下での抵抗率の急落は $\text{Cu}_{0.25}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 及び $x = 0.1$ でも観測されますが、いずれもその程度は僅かです。一方、 $x \leq 0.1$ の組成では圧力誘起構造相転移が 10 万気圧付近から始まります。そのため、圧力誘起超伝導は高压相に由来するとも考えられますが、加圧に伴う超伝導分率の変化が殆どみられないため、各組成の結果と併せて複数の可能性について議論しているところです。



おおむら・あやこ

千葉県船橋市出身。お茶の水女子大学で学位取得後、日本原子力研究開発機構 (関西光科学研究所)、東北大学 (大学院工学研究科) を経て、2008 年より現職。趣味は時々のピアノや石鹸作り、信濃川土手散歩など。

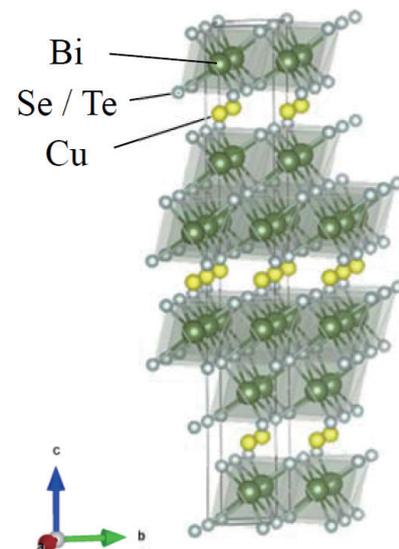


図 1 : $\text{Cu}_{0.25}\text{Bi}_2(\text{Te}_x\text{Se}_{1-x})_3$ の結晶構造

強磁性体／超伝導体接合におけるスピントロニクス

横山 毅人 / 東京工業大学 大学院理工学研究科

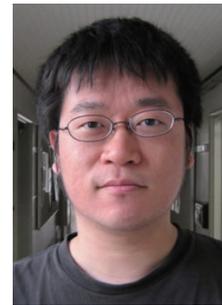
一般に異なる秩序を持つ系の接合において、それらの秩序が単に競合するだけとは限りません。時にそれらの協奏により興味深い物性が現れます。本研究は、強磁性体／超伝導体接合におけるスピントロニクス、つまり、電荷、スピン、位相の自由度の結合による新奇な現象を調べることを目的としました。具体的には、超伝導体と接合した磁性体に位相の勾配を与えた場合に非一様な磁性によって誘起される横成分の超伝導電流の存在を明らかにしました。従来のスピントロニクスでは超伝導の自由度はあまり着目されてなかったのですが、本研究によって超伝導スピントロニクスという分野を発展させていきたいと思っています。現在、連携研究者の村上修一教授とこの内容の論文を執筆しています。

また、強磁性体とトポロジカル絶縁体の接合に関する研究も行いました。第17回集中連携研究会においては、トポロジカル絶縁体を用いたスピントロニクスについて研究発表を行いました。特にトポロジカル絶縁体に磁性絶縁体や磁性金属を接合した系における様々なスピン物性についてお話ししました。[1] 強磁性体と接合することでトポロジカル絶縁体表面に現れるディラック電子に“ゲージ場”や“質量項”を与えられることがこの系の大事なところでした。

TQP2014 ではトポロジカル結晶絶縁体の輸送現象について発表を行いました。トポロジカル結晶絶縁体は結晶の対称性によって守られた表面状態を持ちます。トポロジカル結晶絶縁体 SnTe は4つのディラックコーンを持ち、この4つの自由度をバレー自由度と呼びます。ディラック電子はスピンと運動量が結合しているため、例えば磁化によって容易に電流が制御できます。ここではトポロジカル結晶絶縁体表面に磁化と歪みを誘起した系におけるバレーとスピン自由度が結合した輸送現象を明らかにしました。[2]

[1] T. Yokoyama and Y. Tserkovnyak, Phys. Rev. B **89**, 035408 (2014).

[2] T. Yokoyama, New J. Phys. **16**, 085005 (2014).



よこやま・たけひと

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

トポロジカル超伝導マヨラナ準粒子励起の操作と新奇機能の理論探索

胡 暁 / 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 主任研究者

量子計算は量子波動関数の重ね合わせを利用して大量の情報を並列に処理する斬新な計算方法である。最先端の暗号技術、新規物理現象の解明や新規物質の開発のための量子シミュレーションなど、多くの重要な応用が期待されている。しかし、量子状態が壊れやすいため、大規模な量子計算は実現できていない。最近、マヨラナ準粒子の満たす非アーベル統計を利用した、デコヒーレンスのないトポロジカル量子計算の可能性が盛んに調べられている。

我々は今までに量子渦を持つトポロジカル超伝導サンプルの縁に現れるマヨラナ準粒子に着目し、その操作方法を考案した。本年度これを発展させ、マヨラナ量子ビットの NOT ゲートを考案した。図 1 に示されているように、それぞれ真ん中に量子渦をもつ四つのトポロジカル超伝導サンプルを接合で繋ぎ、これらによって囲まれた超伝導基盤の真ん中に、量子渦を導入する。マヨラナ量子ビット（図左側）の縁マヨラナ準粒子が接合部分でのゲート電圧のオン・オフによって、真ん中の量子渦を一周すれば、その波動関数の符号が変わり、それに伴って量子ビットが元の状態の NOT 状態になる [1]。さらにこの特性を利用して、マヨラナ準粒子の操作によるトポロジカル単電子ポンピングも提案した。また、量子渦に局在する芯マヨラナ準粒子を、量子渦を動かさずに移動・位置交換できる方法を提案した [2]。

一方、トポロジカル超伝導とマヨラナ準粒子状態を実現するために、シリコン表面に蒸着した In 原子の 1 原子層にみられる超伝導の研究を行った。特に STM/STS によるゼロバイアス電気伝導の実験測定結果と、ボゴリューボフ・ドジャンヌ方程式による理論解析結果を比較することによって、原子テラスの間にある原子ステップがジョセフソン接合として振る舞うことを明らかにした [3]。表面超伝導研究の大きな一歩とアメリカ物理学会のニュース欄にて紹介され、日刊工業新聞にも報道された。

同時進行で、反強磁性トポロジカル絶縁体の物質設計を進めている。スピン偏極を持ったゼロ抵抗電流によって特徴づけられる新しい量子異常ホール効果について、パリティの特集号「物理科学、この 1 年」にて解説した [4]。また、国際レビュー誌に論文も寄稿しており、本新学術領域研究プロジェクトが終了する前に掲載されることを願っている今頃である。

[1] Q. F. Liang, Z. Wang and X. Hu, Phys. Rev. B **89**, 224514 (2014).

[2] L.-H. Wu, Q.-F. Liang and X. Hu, Sci. Technol. Adv. Mater. **15**, 064402 (2014).

[3] S. Yoshizawa, H. Kim, T. Kawakami, Y. Nagai, T. Nakayama, X. Hu, Y. Hasegawa, and T. Uchihashi, Phys. Rev. Lett. **113**, 247007 (2014) [Editors' Suggestion].

[4] 胡暁, “磁性トポロジカル絶縁体”, パリティ **29** 巻 1 号, 3-3 ページ (2014).



ふ・しおー

1990 年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。東北大学金属材料研究所助手・助教授、旧科学技術庁金属材料技術研究所主任研究員を経て、2007 年から現職。筑波大学連携大学院教授も兼務。

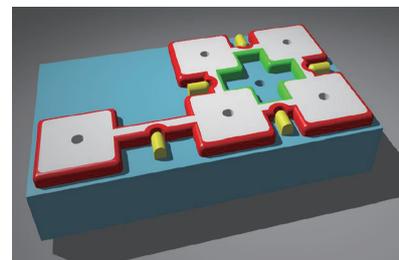


図 1 : マヨラナ量子ビットの NOT ゲートの模式図

カイラル p 波超流動体の固有角運動量とエッジ流の解明

押川 正毅 / 東京大学物性研究所 教授



おしかわ・まさき

1994年 東京大学大学院理学系研究科博士課程中退、1995年博士(理学)

1994年から東京大学工学部物理工学科助手、Killam Post-Doctoral Fellow, University of British Columbia、東京工業大学物性物理学専攻助教授を経て2006年より現職。

ニュースレター前号で紹介した [1] ように、カイラル p 波超流動体の全軌道角運動量については長年の間論争があり、「固有角運動量のパラドックス」として知られていた。問題を復習すると、カイラル p 波超流動体では、2つのフェルミ粒子が相対角運動量 1 のクーパー対を作る。従って、フェルミ粒子の個数を N とすれば、クーパー対の数は $N/2$ であり、全軌道角運動量も $N/2$ になりそうである。一方、対形成によるギャップの大きさ Δ は、通常はフェルミエネルギー E_F に比べて非常に小さい。従って、フェルミ面から離れた(エネルギーが対形成ギャップよりも高い)フェルミ粒子は対形成に参加せず、クーパー対形成はフェルミ面の近くでのみ起きるとも考えられる。すると、超流動体の全軌道角運動量は $N/2$ に比べて強く (Δ/E_F のベキで) 抑制されると考えられる。これらの間の矛盾を解明し、全軌道角運動量の値を正しく求めることが理論的な課題であった [2]。

本公募研究では、この問題をこれまでほとんど議論されて来なかったカイラル d 波、 f 波…超流動体も含めて一般化して考察した。すなわち、クーパー対の相対角運動量として一般の自然数 ν を考えた。($\nu=1$: p 波、 $\nu=2$: d 波、 $\nu=3$: f 波等)。全てのフェルミ粒子がクーパー対形成を通じて軌道角運動量に寄与すれば、全軌道角運動量は $\nu N/2$ となるはずであるが、実際の値はどうであるかが問題となる。これまでの議論の混乱は正当性の不明な近似や仮定に由来する部分も大きかったため、我々は円盤に閉じ込められた 2 次元カイラル超流動体について、標準的なボゴリユエボフ・ドジャン方程式を保存量に注目して正確に解くことで問題の解明を試みた。紙面も限られているので、導出は省略し我々の得た結果を述べたい。まず、カイラル p 波の場合、ギャップ Δ がどんなに小さくてもゼロでなければ、大きな系の極限では全軌道角運動量が厳密に $N/2$ となることを示した。

一方、高次 ($\nu \geq 1$: d 波、 f 波…) のカイラル超流動体の場合、クーパー対ごとの角運動量が p 波の場合より大きいにも関わらず、全軌道角運動量は意外なことに強く抑制される(高次 Δ/E_F のオーダーとなる)。これらの結果は、境界を持つ系に必然的に生じるエッジ状態の構造と密接に関連しており、物理的には高次のカイラル超流動体では境界付近でクーパー対が破壊される効果によると解釈できる。

このように、本研究ではこれまで全く予想されていなかった意外な結果を得たが、この結果をプレプリント・アーカイブに投稿して発表 [3] すると、すぐに 2 つのグループによって我々の結果を支持するプレプリントが投稿された [4,5]。本研究の動機のひとつは、カイラル p 波超伝導体であると考えられている Sr_2RuO_4 において、カイラル p 波超伝導体に期待されるエッジ電流が実験的に観測されていないという謎であった。これまでの我々の研究では、円盤に閉じ込められた理想的なカイラル超流動体を対象にしており、結晶格子の存在などは考慮していないため、 Sr_2RuO_4 におけるエッジ電流不観測の問題を直接解決するものではない。しかし、エッジ電流の問題も、我々の研究と深く関係していることは確かである。実際、 Sr_2RuO_4 ではむしろ高次のカイラル超伝導に相当するものが実現しており、我々の結果がエッジ電流不観測という実験結果を理解する基礎になるという提案 [6] も最近なされている。このように、本公募研究では、当初の計画で予定していたカイラル p 波超流動体の全軌道角運動量の問題に一定の解決を与えただけでなく、高次のカイラル超流動体について予想外の興味深い結果を得た。これらの成果は、共同研究者の多田靖啓(東大物性研)、Wenxing Nie(清華大学高等研究院) 両氏の貢献なしには得られなかった。また、最初に全軌道角運動量の問題を紹介して頂いた前野領域代表をはじめ、有益な議論をして頂いた本領域の多くのメンバーに深く感謝する。

[1] 押川正毅「カイラル p 波超流動体の固有角運動量とエッジ流の解明(公募班研究紹介 D03)」対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象 ニュースレター No. 4 (2014年2月) p. 39

[2] A. J. Leggett, Quantum Liquids: Bose Condensation And Cooper Pairing in Condensed-matter Systems (Oxford Graduate Texts), Oxford University Press (2006).

[3] Y. Tada, W. Nie, and M. Oshikawa, Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two Dimensional Chiral Superfluids, arXiv:1409.7459, accepted for publication in Phys. Rev. Lett.

[4] G. E. Volovik, Orbital momentum of chiral superfluids and spectral asymmetry of edge states, arXiv:1409.8638

[5] W. Huang, E. Taylor, and C. Kallin, Vanishing edge currents in non-p-wave topological chiral superconductors, arXiv:1410.0377

[6] T. Scaffidi and S. H. Simon, Large Chern Number and Edge Currents in Sr_2RuO_4 , arXiv:1410.6073

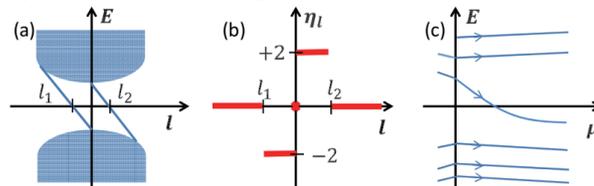


図 1: カイラル d 波超流動体の全軌道角運動量とスペクトラルフロー。

(a) 角運動量 l の関数として表示した、BCS 相におけるエネルギースペクトル。対形成によるギャップの中に 2 つのギャップレスなエッジモードが存在する。

(b) BCS 相において各角運動量 l のセクターが持つ量子数 η_l 。 η_l がゼロでない場合、系の軌道角運動量に「理想的な値」 $\nu N/2$ からのずれが生じる。 d 波超流動体の 2 つのエッジモードで挟まれた領域で η_l がゼロでなくなり、理想的な値からのずれに寄与することがわかる。

(c) η_l がゼロでない領域の角運動量 l についての、化学ポテンシャル μ の関数としてのエネルギー固有値の変化。

$\mu = -\infty$ では系は BEC 相にあり、量子数 η_l はゼロである。 μ を増加させて系が BCS 相に移行する際にエネルギー固有値が符号を変えると、そのつど量子数 η_l が変化する。

スピン三重項超流動体 ^3He 並びに UPt_3 の トポロジカル励起の理論研究

町田 一成 / 岡山大学 大学院自然科学研究科特命 教授 (研究)

Sr_2RuO_4 の対関数の対称性の研究を主として遂行した。今回は低温磁化測定を実験グループとの共同研究を通して実行した。当該研究領域内の実験グループ (前野、米澤) から提供された純良試料を用いて、物性研グループ (榊原、橘高) が磁化測定を行い、理論的な解釈に寄与した [1]。この実験において、磁場方向を精密に制御することが決定的である。これはこの物質の一軸性異方性が極めて大きいことに依る。物性研グループは方位を 1 度以内に制御することに成功し、低温での磁化曲線を測定した。その結果、 H_2 において鋭く、しかも大きな磁化ジャンプを観測し、これが一次転移であることを明らかにした。これは以前の磁気熱量効果実験、比熱実験で観測された一次相転移現象に呼応するものである。この現象を準古典近似に基づく微視的 Eilenberger 方程式を解く事で、理論的に解析した。

超流動体 ^3He については、B 相のトポロジカルな性質についての総説を当該領域に属する方々と共同で執筆した [2]。

UPt_3 についての考察も進めた。特に H/c のときに H_2 や磁化等に現れるパウリ常磁性効果について、筆者の従来からの考え [3] を修正して d ベクトルの回転はスピン軌道相互作用によって阻止されると考えた方が、良いかもしれないという方向で理論を再構成することを計画している。

[1] S. Kittaka, A. Kasahara, T. Sakakibara, D. Shibata, S. Yonezawa, Y. Maeno, K. Tenya, and K. Machida, Phys. Rev. B **89**, 220402 (R) (2014).

[2] T. Mizushima, Y. Tsutsumi, M. Sato, and K. Machida, arXiv:1409.6094.

[3] Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida, J. Phys. Soc. Jpn., **82**, 113707 (2013).



まちだ・かずしげ

京都大学助手、岡山大学助教授、教授を経て、2011年4月より岡山大学大学院自然科学研究科特命教授(研究)として研究に専念している。

トポロジカル励起とトポロジカル量子計算

新田 宗土 / 慶應義塾大学 日吉物理学教室 准教授

物理学や科学の分野において、トポロジーと対称性は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。対称性とはある状態を別の状態に移しても変わらない性質があることをいいます。

私は、渦や位相欠陥の研究を行っています。渦はお風呂の水を流した時に出来る渦とは、少しだけ違っています。ヘリウムなどを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。あるいは金属を冷やすと超伝導という状態になり、そこでも現れます。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。このような渦があると何がありがたいかという、例えば本領域の主テーマであるカイラル p 波超伝導体と呼ばれる超伝導体の渦には、マヨラナ・フェルミオンという特殊で奇妙な粒子が閉じ込められます。この奇妙な粒子を用いると、トポロジーで保護された量子計算を行うことができると思われています。

系が対称性を持っているにも関わらず、基底状態がそれを保っていない場合に、対称性が自発的に破れたといいます。対称性の破れには、南部ゴールドストーン励起という、小さく振動をするのにはエネルギーのほとんどかからない励起（ギャップのない励起）が現れます。磁性体のドメイン壁のようなトポロジカル欠陥があると、空間の並進対称性が破れるため、南部ゴールドストーン励起が現れます。これは渦や壁を伝わる壁の振動そのものです。ところが、面白いことに、壁の振動と同時に位相の振動も同時に励起されなければいけないことがわかりました (図 1)。この現象の背後には、空間の並進対称性と位相回転の対称性の操作が交換しないということが隠れていて、その非可換性がトポロジーで決まっていることもわかりました [1]。磁性体におけるスカーミオンという渦に似たもの振動にも、同じ性質があることがわかりました [2]。

[1] M.Kobayashi and M.Nitta, Phys. Rev. Lett. **113**, 120403 (2014)

[2] M.Kobayashi and M.Nitta, Phys. Rev. D **90**, 025010 (2014)



につた・むねと

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トドクを経て、現在にいたる。趣味はデジカメなど。今年度は2年ぶりに授業に復帰し、忙しく過ごしています。

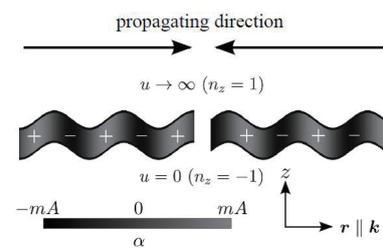


図 1 : ドメイン壁を伝わる南部ゴールドストーン励起。壁の振動と共に、位相の振動も励起される。

トポロジカル凝縮相における量子交差相関現象

野村 健太郎 / 東北大学 金属材料研究所 准教授

トポロジカルに非自明な状態はトポロジカル不変量によって特徴付けられる事は周知の通りですが、トポロジカル不変量は多くの場合、交差相関応答の係数として物理現象に現れます。トポロジカル不変量は続変形の下で不変であるため、トポロジカル相における交差相関応答はランダムネスなどの摂動に対し強いという性質を持ちます。3次元トポロジカル絶縁体の興味深い現象としてトポロジカル電気磁気効果 [1] と呼ばれるものがあります。この現象は、電場をかけると表面量子ホール電流が試料の周りを循環し、内部に磁場あるいは磁気モーメントを作ります。同様に磁場をかけると内部に電気分極が発生する事が示せます。電場(磁場)で磁化(電気分極)を誘起するというように、電気的自由度と磁気的自由度が交差した形で応答するのが特徴です。この電気磁気効果はマルチフェロイクスの分野で古くから研究が進められておりますが、多くの場合その応答係数は小さく、より大きい応答係数を導くことが長年の課題です。トポロジカル絶縁体に対しても、(表面の量子ホール状態を破壊しない程度の)大きな電場に対してマイクロテスラ程度の磁化しか発生できません。

我々はトポロジカル絶縁体の表面における交差相関を考えて参りました [2]。トポロジカル表面に強磁性体を近接させると表面ディラック電子特有の磁気的相互作用が導入されます。この系は交換相互作用という比較的大きいエネルギースケールを持ちますので、観測可能な現象が期待できます。最近、強磁性体の微視的自由度に着目し、表面ディラック電子とマグノンの相互作用を記述する有効理論の構築に成功しました [3]。これによると磁場と磁化の間のゼーマン相互作用と類似の結合項が電場と磁化の間に現れます。すなわち電場と磁場の双方に対し同様の応答をもたらす事からこの有効理論には電磁双対性があるということが明らかになりました。これによって電場を印可する事で強磁性体薄膜の磁気モーメントの向きを自由に制御することが可能となります。

[1] X.-L. Qi, T. L. Hughes, and S.-C. Zhang, Phys. Rev. B **78**, 195242 (2008).

[2] K. Nomura and N. Nagaosa, Phys. Rev. B 161401 (2010).

[3] D. Kurebayashi and K. Nomura, in preparation.



のむら・けんたろう

2003年東京大学大学院総合文化研究科博士課程終了。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。

多自由度電子系においてスピン軌道相互作用が誘起するエキゾチック量子相

柳瀬 陽一 / 新潟大学理学部物理学科 准教授

私達のグループでは、スピン自由度に加えて軌道自由度や副格子自由度を持つ多自由度電子系に着目し、スピン軌道相互作用によって発現するエキゾチックな磁性・多極子・超伝導相の理論研究を行っています。本新学術領域の公募班に採択されたこの2年間に以下の研究成果を得ました。

(1) SrTiO₃ ヘテロ構造における多軌道型 FFLO 超伝導 [1,2]

本新学術領域メンバーの上野氏と野島氏らにより実現された SrTiO₃ ヘテロ構造の高密度 2 次元電子系を記述する多軌道モデルを構成しました。その磁場中超伝導状態が新しいタイプの FFLO 超伝導であることを示し「軌道依存型複素ストライプ相」と名付けました。

(2) 多層系超伝導体におけるトポロジカル結晶超伝導 [3-8]

本新学術領域メンバーの芝内氏らにより作成された人工超格子を念頭に、多層系超伝導体においてスピン軌道相互作用がエキゾチックな超伝導状態を誘起することを示しました。そして、それが鏡映対称性によって守られたトポロジカル結晶超伝導であることを示しました。

(3) Sr₂RuO₄ におけるスピン三重項超伝導とトポロジカル欠陥 [9,10]

本新学術領域における主要なテーマの一つであるスピン三重項超伝導体 Sr₂RuO₄ の磁場中超伝導状態を調べました。C 軸磁場中においてゼロ磁場とは異なるカイラル超伝導状態が安定になり、分数量子渦が現れることを示しました。この量子渦をトポロジカルに分類するとスカーミオンになります。即ち、我々は Sr₂RuO₄ において超伝導スカーミオン格子が実現される可能性を提案しました。

(4) 奇パリティ多極子と磁気電気効果 [11,12]

局所的な空間反転対称性が欠如した系の副格子自由度に由来するエキゾチックな磁気・多極子相を調べ、スピン軌道相互作用により様々なネマティック秩序が誘起されることを見いだしました。重い電子系の分野で偶パリティ多極子秩序が盛んに研究されてきましたが、本研究はそれを奇パリティ秩序に拡張したことになります。

この他に (5) ネマティック秩序と共存するカイラル超伝導 [13] (6) 空間反転対称性が欠如した系における電子相関効果 [14] の研究を行いました。国際会議 TQP2014 では柳瀬の他に吉田智大 (P D)、高松周平 (D 2)、人見尚典 (M 2) が発表しました。

[1] Y. Nakamura and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 083705 (2013).

[2] Y. Nakamura and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 024714 (2015).

[3] T. Yoshida, M. Sigrist, and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 074714 (2013).

[4] T. Yoshida, M. Sigrist, and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 013703 (2014).

[5] M. Sigrist, D.F. Agterberg, M.H. Fischer, J. Goryo, F. Loder, S.H. Rhim, D. Maruyama, Y. Yanase, T. Yoshida and S.J. Youn, J. Phys. Soc. Jpn. Special topics: "Advances in Physics of Strongly Correlated Systems" **83**, 061014 (2014).

[6] 吉田智大, 丸山大輔, 柳瀬陽一, 固体物理 (2014) Vol. **49**, No.3, 9-24.

[7] Y. Higashi, Y. Nagai, T. Yoshida and Y. Yanase, J. Phys.: Conf. Ser. **568**, 022018 (2014).

[8] T. Yoshida, M. Sigrist, and Y. Yanase, 投稿中。

[9] S. Takamatsu and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 063706 (2013).

[10] Y. Yanase, S. Takamatsu, and M. Udagawa, J. Phys. Soc. Jpn. Special topics: "Advances in Physics of Strongly Correlated Systems" **83**, 061019 (2014).

[11] Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 014703 (2014).

[12] T. Hitomi and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 114704 (2014).

[13] S. Takamatsu and Y. Yanase, To appear in Phys. Rev. B.

[14] D. Maruyama and Y. Yanase, 投稿中。



やなせ・よういち

福岡県北九州市出身。2000年 京都大学理学研究科博士課程中退。東京大学理学系研究科に勤めたのち、現在は新潟大学理学部准教授。学生時代から最近までオリエンテーリングという競技をしていました。他にトレイルランニング、自転車、沢登りなどを趣味としていますが、最近は子育てに没頭する日々です。

空間反転対称性の破れた電子系のトポロジカル相とマヨラナ・フェルミオン

藤本 聡 / 大阪大学 基礎工学研究科 物性物理工学領域 教授

電子波動関数のベリー曲率が創発的な“磁場”を生み出し、異常ホール効果やトポロジカル・ホール効果等の輸送現象を起こすことは、この新学術の方々はよくご存知だと思います。我々が最近、取り組んでいるテーマの一つに、このベリー曲率あるいはベリー位相が動的に揺らぐと何か新しい現象が起こらないか、というのがあります。もちろん、ベリー位相の時間変化が創発的な“電場”や電流を生み出すことはよく知られています。ここで考えたいのは、それとは異なり、むしろ元々、ベリー位相が存在しない系で、非自明な構造を形成しようとする何らかの揺らぎが発達してきたとき、何か新奇な物理現象が生じないかという問題意識です。

実は、この問題意識は京大・松田研で行われた重い電子系超伝導体 URu_2Si_2 の Nernst 効果の実験に触発されたものです。その実験によると、超伝導転移温度 T_c 近傍の正常金属相で巨大な Nernst 信号が観測されました。その大きさは従来知られている他のあらゆる超伝導体よりも桁違いに大きく、さらに驚くべきことに、RRR 値の大きいクリーンな試料ほど Nernst 信号は大きくなります。 T_c 近傍で急激に増大していることから超伝導ゆらぎに起因することが期待されますが、前述の2つ目の特徴は、従来の超伝導揺らぎの理論では説明できません。他方、 URu_2Si_2 はこれまでの超伝導ギャップ構造の研究から時間反転対称性を破ったカイラル $d_{zx}+id_{zy}$ 波対の実現が示唆されています。これは Weyl 超伝導であることを意味し、波数 k_z を固定すると、ベリー曲率が存在します。我々は、前述の Nernst 効果はカイラル超伝導揺らぎに伴うベリー位相揺らぎが引き起こす新奇現象ではないかと考え、京大博士後期課程在学の住吉浩明さんを中心に研究を進めました。

その結果、カイラル・クーパー対ゆらぎが準粒子に対して skew 散乱を起こし、これが準粒子の横方向の輸送現象を生み出すというシナリオに到達しました。このシナリオによると、時間反転対称性が自発的に破れていない転移温度以上でも、印加磁場が超伝導揺らぎのカイラリティの分極を誘起し、カイラル分極した超伝導ゆらぎが電子の skew 散乱を引き起こします。これは、スピン軌道結合のある不純物による skew 散乱由来の異常ホール効果と類似しています。重要な違いは、今の場合、skew 散乱を引き起こすのが、動的な超伝導ゆらぎであるという点であり、dynamical Andreev skew 散乱と呼ぶべきものです。この機構による Nernst 係数の理論式は、前述の実験結果を定量的によく説明します。(図) これは、 URu_2Si_2 でベリー位相揺らぎによる新しい機構の Nernst 効果が起こることを示しており、さらにカイラル超伝導実現を強く支持する大変、興味深い結果であると思います。

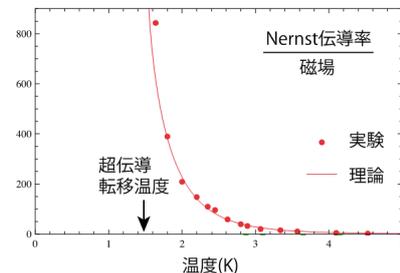
[1] T. Yamashita et al., Nature Physics **11**, 17 (2015).

[2] H. Sumiyoshi and S. Fujimoto, Physical Review B **90**, 184518 (2014).



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。



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

2014

Nov. 2014

水島健 (D01) が凝縮系科学賞を受賞しました。
K. Mizushima (D01) received the 9th Condensed-Matter Science Prize.

Oct. 2014

安藤陽一 (C01) が第32回大阪科学賞を受賞しました。
Yoichi Ando (C01) received the 32nd Osaka Science Prize.

May. 2014

佐藤 (D01) の「マヨラナ・フェルミオン」に関する解説記事が日本物理学会誌に掲載されました。
A review article on 'Majorana fermion' by Sato (D01) has been published from BUTURI (monthly membership journal of the physical society of Japan).

May. 2014

上野 (C01) が平成26年度科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞者に選ばれました。
Ueno (C01) was awarded a prize of The Ministry of Education, Culture, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan in 2014.

Apr. 2014

日本物理学会において、藤本 (D04) がマヨラナ粒子に関する、また野村 (D04) がワイル半金属に関するチュートリアル講演を行いました。
Fujimoto (D04) and Nomura (D04) gave tutorial lectures on Majorana fermions and Weyl semimetals, respectively, at the fall meeting of the Physical Society of Japan.

Apr. 2014

Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度が伸縮両方で顕著に上昇することを明らかにした、米澤 (A01)・前野 (A01) らの論文がサイエンス誌に掲載されました。
A paper reporting "Strong increase of T_c of Sr_2RuO_4 under both tensile and compressive strain" by Hicks, Yonezawa (A01), Maeno (A01), Mackenzie et al., has been published in Science.

Apr. 2014

安藤陽一 (C01) が第30回の井上學術賞「トポロジカル絶縁体・超伝導体の先駆的研究」を受賞しました。
Yoichi Ando (C01) received the 30th Inoue Prize for Science for "Pioneering Research of Topological Insulators and Superconductors".

Apr. 2014

領域メンバーによる J. Phys. Soc. Japan の2編の解説論文 (田仲、佐藤、永長 (全員 D01) 及び前野、石田、米澤 (全員 A01) ら) が共に2012年の最も引用された論文トップ10になりました。
Review papers by Y. Tanaka (D01), M. Sato (D01) and N. Nagaosa (D01), and by Y. Maeno (A01), K. Ishida (A01), S. Yonezawa (A01) et al. have been selected among the top 10 most-cited papers of published in 2012. J. Phys. Soc. Japan.

塩見 雄毅

東北大学 金属材料研究所 助教

滞在先：京都大学大学院 工学系研究科

(派遣元研究者：本人、受入研究者：安藤 裕一郎)

CO1 → CO1

本滞在では、フェリ磁性絶縁体 $Y_3Fe_5O_{12}$ からバルクキャリアが補償されたトポロジカル絶縁体試料へのスピン注入の達成に向け、受け入れ先の安藤裕一郎博士の研究室（京都大学）でナノデバイスの作製を行いました。

私はこれまで、強磁性金属パーマロイとトポロジカル絶縁体の接合系でスピン注入実験を行ってきました。マイクロ波を用いたスピンポンピングと呼ばれるスピン注入法によって、トポロジカル絶縁体表面状態へ非平衡スピンを注入し、表面状態のスピン-軌道ロッキングによるスピン-電荷変換現象を世界で初めて観測しています (Y. Shiomi, et al. Phys. Rev. Lett. **113**, 196601 (2014))。本滞在では、この成果をフェリ磁性「絶縁体」 $Y_3Fe_5O_{12}$ に拡張することで、強磁性金属の輸送現象による汚染の心配の無い、純粋なトポロジカル表面状態のスピン輸送現象を観測することを目指しました。この研究の達成により、既に報告したパーマロイ|トポロジカル絶縁体接合系での成果を強くサポートすることができます。

滞在の中では、本研究の達成に必要なナノデバイスを設計し作製しました。液相エピタキシャル法により作製した $Y_3Fe_5O_{12}$ 単結晶薄膜の表面を研磨した後、電子ビームリソグラフィー法及び電子ビーム蒸着法を用い、電極の重ね描画の際に必要な十字マーカーをまず作製しました。その後、スコッチテープ法により $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ 薄膜を剥離し、マーカーをつけた $Y_3Fe_5O_{12}$ 上に接合しました。レーザー顕微鏡を用いて、スピン注入による起電力測定に使用する $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ 単結晶薄膜試料を 10 個ほど選び出しました。あらかじめ描いておいたマーカーの位置を参照

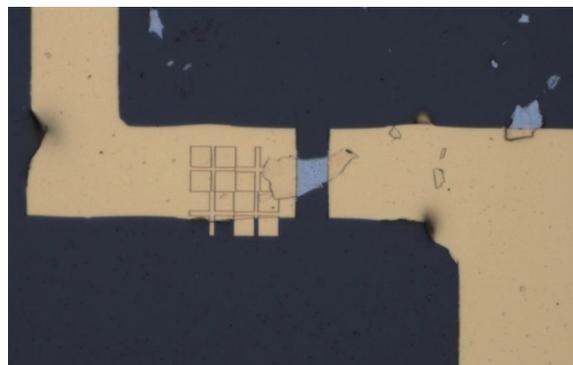


図1：試作したデバイスの写真（トポロジカル絶縁体の剥離薄膜試料の両端に Au 電極をつけた。試料サイズは数ミクロン程度。）

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 週間程度滞在中、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、トポロジカル量子現象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。

し、選び出した $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ 試料に再び電子ビームリソグラフィー法を用いて Au による電極づけを行いました (図 1)。

これまで安藤裕一郎博士の研究室では、熱酸化 Si 基板上に同様の技術で $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ を用いたデバイス作製を行ってきています。今回の滞在では、熱酸化 Si 基板と $Y_3Fe_5O_{12}$ 基板との違いが問題となり研究の進行が遅れました。私が用意した $Y_3Fe_5O_{12}$ 基板は熱酸化 Si 基板ほど均一ではなく、表面のラフネスも大きかったです。これらはレジスト塗布や $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ 薄膜の転写の際に障害となりました。また、電子ビームリソグラフィーの際には $Y_3Fe_5O_{12}$ 基板上でのチャージアップも問題となりました。

一週間という短い滞在期間の中で、安藤裕一郎博士及び研究室の皆様には実験装置を融通して頂き、非常に充実した時間を過ごすことができました。研究を少し進めるたびに障害に何度もぶつかる中、皆様が真剣に問題解決に取り組んでくださったことは大変幸せに感じました。また、研究室の白石誠司教授には歓迎会を開いてくださり、とても楽しくそして貴重な時間を過ごすことができました (図 2)。この滞在で始めた共同研究をきっかけに、今後も情報・技術交換により高いレベルの研究が遂行できたらと思います。

今回の滞在プログラムでは、普段なかなか体験できない他研究室の雰囲気や真似すべき良い研究習慣も学ぶことができました。このように個人的な研究スキルの向上だけでなく、駆け出しの大学教員として新しい知識・経験を得ることができ、大変勉強になりました。領域の先生方及び事務局の方にも本滞在に関し大変お世話になりました。本滞在に関係された全ての方に厚く感謝申し上げます。



図2：歓迎会での写真
(左端：安藤裕一郎博士。右端：塩見雄毅（筆者）)

ムハマド・シャーバズ・アンワー

京都大学 大学院理学研究科 特定研究員

滞在先：理化学研究所

(派遣元研究者：前野 悦輝、受入研究者：石黒 亮輔)

A01 → A01

I am working as PD Researcher on Topological Quantum Phenomenon project A01. I visited Dr. Ryosuke Ishiguro, who is a solicitation project member of A01 working at RIKEN, on 14th of May to fabricate our new superconducting devices based on a spin-triplet superconductor Sr_2RuO_4 .

Superconducting junctions based on conventional superconductors (S) and ferromagnets (F) are being studied: firstly, to investigate the spatial oscillations of order parameter of S in the F-layer because of exchange field; and secondly, to understand the long-range proximity effect via the s-wave, spin-triplet Cooper-pair (odd-frequency-pair) generation because of magnetic inhomogeneity present at the S/F interface. In contrast, it has been theoretically predicted that at the interface between a ferromagnet and a spin-triplet superconductor (T), not only the charge supercurrents but also spin supercurrents emerge. Thus, the F/T junctions, with both controllable charge and spin supercurrents would initiate a new research field that can be called as Superspintronics.

The availability of spin-triplet superconducting thin films is one of the main challenges to realize the F/T junctions. To overcome this problem, we utilized the reverse technique; we deposited an epitaxial ferromagnetic SrRuO_3 thin film on the ab-surface of a single crystal of Sr_2RuO_4 spin-triplet superconductor (grown at Kyoto) with collaboration of Prof. Tae-Won Noh at Seoul National University, Korea. The transport properties of such a hybrid structure show that the interface between SrRuO_3 and Sr_2RuO_4 is highly conducting, which is generally not the case for the interface between a normal metal and the ab-surface of Sr_2RuO_4 .



(Left) At RIKEN clean room with Dr. Ishiguro. (Right) At Tokyo University of Science with sputtering system.

Our findings stimulated us to investigate the spin-triplet proximity effect between SrRuO_3 and Sr_2RuO_4 to realize another way of generating odd-frequency spin-triplet pairing. For this purpose, we decided to fabricate our new superconducting devices with our on-going collaborations with Dr. Ryosuke Ishiguro, one of the solicitation members of A01 working at RIKEN.

All optical lithography (maskless; UV) steps, etching of SrRuO_3 , and deposition of SiO_2 layer was done at RIKEN. Au and Nb layers were deposited at Tokyo University of Science to prepare the top electrodes made of Au and Nb. During my stay at RIKEN, I fabricated the devices well before the estimated time, thanks to well-planned work, and help from Dr. Ishiguro and one of his master students Mr. Yusuke Tano. It was our first attempt to fabricate such devices, so we also learnt many things about how to improve the quality of our devices. Our devices would lead us to explore the rich and interesting topological quantum physics of spin-triplet proximity effects.

I am thankful to TQP project for providing me a chance to work at RIKEN.

鈴木 修

北海道大学 大学院工学院 博士課程 1年

滞在先：広島大学 大学院総合科学研究科

(派遣元研究者：浅野 泰寛、受入研究者：東谷 誠二)

AO1 → CO1

私は、現在「微小な異方的超伝導体の異常な常磁性応答」について理論的に研究している。通常、超伝導体は Meissner 効果のため反磁性応答を示す。これは、超伝導体の表面で Cooper ペアが反磁性的な超伝導電流を運び、外部磁場を遮蔽した結果である。一方、異方的超伝導体の表面には奇周波数 Cooper ペアと呼ばれる特殊な Cooper ペアが現れる場合がある。この奇周波数 Cooper ペアは見かけ上「負のペア密度」を持つ事が理論的に予言されており [1]、この事は、奇周波数ペアが異常な常磁性電流を運ぶ事を暗示している。超伝導微粒子や超伝導細線といった微小な異方的な超伝導体では、表面とみなせる領域がバルク領域に比べて大きいので、奇周波数 Cooper ペアの存在が無視できない。つまり、微小な異方的超伝導体は異常な常磁性応答を示す [2]。

奇周波数 Cooper ペアが現れるのは、異方的超伝導体のみではない。超流動 ^3He に於いてもその存在が議論されている。滞在先の東谷先生は、超流動 ^3He の B 相の一部にエアロジェルという物質を組み込んだ系での奇周波数 Cooper ペアの振る舞いを調べた [3]。この系は超伝導系での汚れた常伝導 $/p$ 波超伝導接合に対応しており、エアロジェル中に奇周波数 Cooper ペアが染み出す事が知られている。 ^3He は電荷中性であるため、先に述べたような異常な常磁性電流が流れる事はないが、エアロジェル中に現れた奇周波数 Cooper ペアの「負のペア密度」に起因してスピン帯磁率の異常な増大が理論的に予言されている。

東谷先生も私も奇周波数 Cooper ペアの磁気応答について計算している、また個人的に超流動 ^3He に興味があり勉強したい気持ちがあったので、東谷先生の下での滞在を希望した。加えて、東谷先生は現在、微小な異方的超伝導の基底状態に興味がある。微小な超伝導体は、大きな超伝導体とは質的に異なる振る舞いを示す事があり、非常に興味深い系である。私の研究も有限系での異方的超伝導であるため、準古典理論を有限系に適用する際のテクニックなども学べたら良いと考えた。

滞在中は頻りにセミナーが開催された。東谷先生と PD の宮脇さんには「異方的超伝導薄膜の新奇基底状態」について紹介して頂いた。この話は、異方的超伝導体表面に現れる奇周波数 Cooper ペアの不安定性と深く関係している。東谷先生は、私の知らない奇周波数 Cooper ペアの性質についても教えて下さったので、非常に有意義な議論だった。東谷先生たちが行っている薄膜での計算を、私の得意な円盤型超伝導で行ったらどのような結果が得られるのかを考えると、高揚感

があり非常に楽しかった。広島大学の長登康先生には、「超流動 ^3He での表面 Andreev 束縛状態」についてお話しして頂いた。異方的超伝導と異方的超流動 ^3He の違いもよく理解できていなかった私には、まさに目から鱗が落ちるような話だった。特に ^3He の相ごとに異なる秩序変数は私にはとても難しく、超流動相の名前と各秩序変数の波数依存性が合致するまでかなりの時間を要した。その他にも、超流動 ^3He は超伝導と違い電荷中性であるため古くから表面状態の検出が困難だった事、近年では音響インピーダンスという量で表面状態の情報が拾える事、超流動は非常に綺麗な系であるためその実験結果は理論とよく合う事など、短い時間ながら多くの事を学べた。

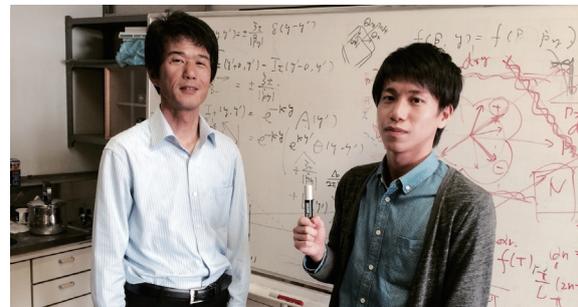
今回、初めて他大学に滞するという経験をさせて頂いた。指導教官以外の専門家と自分の研究について深く議論できる機会は、私には今までほとんど無かったが、今回の滞在中、奇周波数 Cooper ペアに詳しい東谷先生と議論した事で、自分の研究の理解がさらに深まった。先生たちの物事の考え方、物理の捉え方、研究者としてのスタイルを知れた事は、今後の人生に於いて非常に価値ある財産になると確信している。

滞在先の東谷誠二先生、PD の宮脇信実さん、広島大学の長登康先生、滞在中を私に紹介して下さい下さった指導教官の浅野泰寛先生には心から感謝致します。

[1] Y. Asano et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 087001 (2012).

[2] S.-I. Suzuki and Y. Asano, Phys. Rev. B **89**, 184508 (2014).

[3] S. Higashitani et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 175301 (2013).



東谷誠二先生 (左) と私 (右)。広島大学の研究室にて。

前田 賢輝

岡山大学 大学院自然科学研究科 博士課程 1 年

滞在先：大阪大学 産業科学研究科

(派遣元研究者：鄭 国慶、受入研究者：小口 多美夫)

CO1 → DO1

空間反転対称性の破れた超伝導体では、パリティ混成した超伝導が可能になることと、反対称スピン軌道相互作用 (ASOC) が働く、という2つの理由から、非従来型超伝導が期待されています。実際に $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ という物質では、スピントリプレット成分がドミナントなパリティ混成した超伝導が実現していると考えられています。しかし、このような物質は非常にまれで、新たなパリティ混成した超伝導体の発見が望まれています。そこで、私は LaPt_2Ge_2 という物質に注目し、核磁気共鳴 (NMR) 法等を用いた研究を行ってきました。

LaPt_2Ge_2 は超伝導転移温度 $T_c=0.55\text{K}$ を持つ超伝導体で、 $T_s=394\text{K}$ で構造相転移を示します。低温相の結晶構造に対しては空間反転対称性の破れた結晶構造 (空間群: $P2_1$) と空間反転対称性を持った結晶構造 ($P2_1/c$) の2つの候補が報告されており、空間反転対称性の破れた超伝導体である可能性があります。また、重い元素 Pt を含んでいることから、強いスピン軌道相互作用が期待できます。私達はこれまでに、Pt:Ge の組成比をずらした $\text{LaPt}_{1.8}\text{Ge}_{2.2}$ で T_c が3倍以上 (1.95K) まで上昇することなどを発見し、報告しました [1]。

構造相転移に注目してみると、 LaPt_2Ge_2 と同じ結晶構造を持ち、構造相転移を示すものに、 SrPt_2As_2 と LaPt_2Si_2 があります。これらの物質では、構造相転移は Charge Density Wave (CDW) によるものとされていることから、筆者は LaPt_2Ge_2 における構造相転移も CDW によるものなのではないかと考えました。ま

た、仮に CDW があるとすれば $P2_1$ の結晶構造は CDW では説明できないため、候補から除外することができます。そこで、CDW の起源となるフェルミ面のネスティングが存在するかどうかをバンド計算から明らかにしたいと考えました。

今回の滞在では、阪大産研の小口研究室で1週間、第一原理バンド計算プログラム「HiLAPW」を用いたバンド計算を学ばせていただきました。その結果、関連物質の LaPt_2Si_2 によく似たフェルミ面が得られました (図 1)。M 点付近を見てみると、筒状の2次元的なフェルミ面があり、部分的なネスティングが確認できます (図 1 中の矢印)。また、低温相と高温相の状態密度を比較したところ、低温相でフェルミ準位の状態密度に減少がみられました。これらの結果から、 LaPt_2Ge_2 における構造相転移が CDW によるものであることが示されました。残念ながら反転対称性の破れた超伝導体ではない可能性が高まりましたが、構造相転移の起源を明らかにすることができました。

最後に、このような機会を与えて下さった新学術領域の若手滞在プログラム、受け入れ先となって下さった小口研究室のみなさまに感謝致します。新年早々の滞在にもかかわらず、私のために時間を割いて指導をしていただき、実り多い1週間を過ごすことができました。

[1] S. Maeda et al., JPSJ **82**, 065002 (2013).

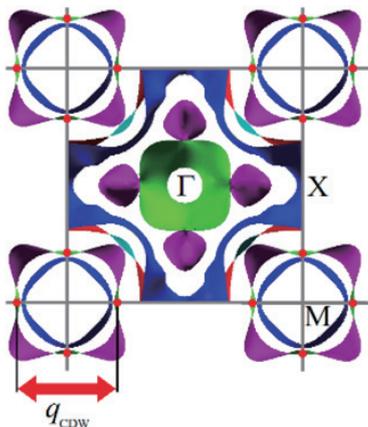
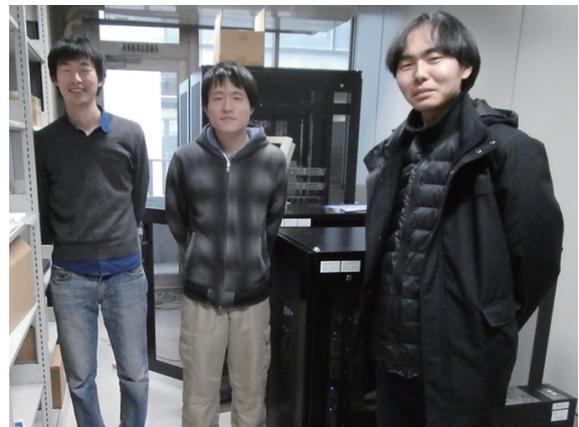


図 1: LaPt_2Ge_2 のフェルミ面



計算機の前での1枚。
左から西條さん、筆者、藤村さん。

2014 年度開催▽研究会報告

● CIFAR ● 集中連携研究会 ● 領域研究会・国際会議

● CIFAR Quantum Materials Summer School 2014 and the Main Meeting

2014年5月5日ー5月10日（モントリオール）

1. はじめに

鈴木、Amorim、高嶋、柴田、安井は5月5日-10日にかけてモントリオールにて開催されたCIFAR Quantum Materialsのサマースクール（5日-7日）と国際会議（8日-10日）に参加した。本稿では、会議の様子などについて報告する。

2. サマースクールと会議の全体の様子

サマースクールには、主にカナダやアメリカの大学院生、ポスドクが参加しており、国際会議ではサマースクールの参加者とCIFARのプログラムメンバーなどの研究者が集まっていた。

サマースクールのプログラムは学生のスタッフによって組まれており、国際会議で話される内容を理解する手助けになるように構成するなど、色々と工夫がされていた。例えば、Joseph H. Thywissenさんは、国際会議でユニタリーフェルミ気体のスピン拡散についての最近の研究結果について講演されていたが、サマースクールでは、その準備として、冷却原子でのユニタリーフェルミ気体について丁寧に導入されていた。また、他にもスピン液体や高温超伝導体、トポロジカル絶縁体などのトピックについてもその分野をサマースクールで概観して未解決点などを説明してもらえたので、国際会議での発表を理解する助けになった。

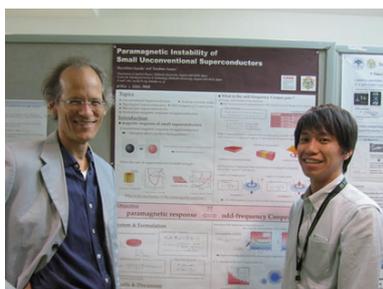
また、サマースクールと国際会議のどちらも、様々な分野の人が集っているため、多くの素朴で本質的な質問が出され、活発に議論が行われていた。そして、コーヒーブレイクの時間が長めにとられていたため、

学生と先生が近い距離感で交流や議論を行うことができた。研究テーマを模索している学生にとって、色々な人にアイデアを聞いてもらえたり、助言をもらえたことは大変勉強になった。（高嶋）

3. サマースクールの特色

サマースクールでは物理の専門分野に関するトピックだけではなく、物理の世界に生きる人間としての問題も取り上げられていた。例えば、Gender gap in Physicsという講演があり、そこでは物理学科に進学する女性の数が少ない理由、その解決策等が話された。これは全世界の取り組むべき問題であり、物理学の紹介の仕方やそのテーマの議論を高校レベルで行うと状況の改善につながると説明された。もう一つの理由は、一般的に男性には自信家が多いが、女性には少なく、さらに、その自信が物理学に不可欠であるということである。そのため、女性が自信を持てるような環境作りが必要であると説明された。大学レベルでは女性の数が少ないため、女性が集まれる場を提供し、女性にとってより過ごしやすい環境を作ることが問題解決の手助けになると話された。

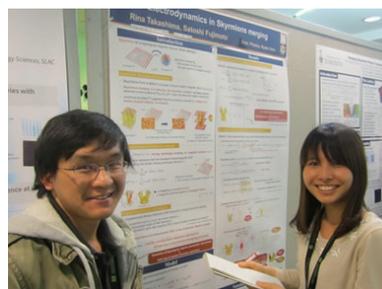
また他には、キャリアパスについてのパネルディスカッションもあり、そこでは二人の大学教員と科学記者とベンチャー企業の方々が講演された。学生からの質問を受け付け、人生の経験者の立場からこれらの悩み、不安に回答された。講演者は彼ら自身の経験をもとにして話しており、普段聞くことのできない生の声を聞くことができた。（Amorim）



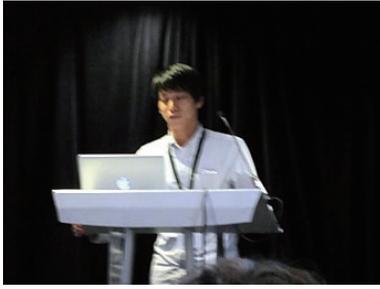
CIFARの量子物質プログラム代表の Louis Taillefer 教授と鈴木



Toronto大学のJohn Wei教授と柴田



McMaster大学の大学院生と高嶋



鈴木 修
「Paramagnetic Instability of Small Unconventional Superconductor」



Cassio Sozinho Amorim
「Numerical braiding of Majorana Fermions on finite size nanowires」



高嶋 梨菜
「Electrodynamics in Skyrmions Merging」



柴田 大輔
「AC susceptibility of Sr_2RuO_4 under various field-thermal treatments」



安井 勇気
「Search for Half-Quantum Fluxoid States in a Micro Ring of Sr_2RuO_4 」

4. ポスターセッションの様子

サマースクールと国際会議では、口頭発表だけでなく、ポスター発表も行なわれる。日本から派遣された学生はこれらのポスター発表に参加した。ポスター発表は、口頭発表と違い質疑応答の時間が十分にあるので、踏み込んだ質問や密度の濃い議論が出来る。

鈴木は普段、異方的超伝導の理論的研究を行っているため、超伝導の対称性に興味がある。ポスター発表の参加者には、準粒子干渉効果を用いて鉄系超伝導体の対称性を調べる実験を行っている学生がいたので、実験原理や方法、結果などについて多くのことを学ぶことが出来た。Amorim はマヨラナ粒子のブレイディングについて発表した。ブレイディング過程の説明のために、ポスターに手で回せる模型をつけたのだが、聴衆者の半数以上は模型を回すまでその存在に気付かなかった。高嶋は、動的変化によるトポロジカル現象について発表した。時間変化や環境の存在下でのトポロジカル現象について研究をされている方と議論でき、これからの研究の参考になった。柴田と安井は、ルテニウム酸化物超伝導体の実験を行なっている。数多くあるポスターの中で、ルテニウム酸化物超伝導体の実験について発表したのは彼らだけだったこともあり、彼らのポスターは非常に多くの注目を集めていた。特に、同じくルテニウム酸化物を理論的に研究している学生から、柴田・安井は質問攻めにされた。

日本からの参加者には英語に不安を抱く者もいたが、熱意を持って接すれば、ぐちゃぐちゃな英語でもなんとか意味を伝えられることがわかった。ポスター発表を通して、英語の必要性・重要性を再認識したの

はもちろんだが、「物理の面白さ」は世界共通だと肌で感じられたことは大きな財産になるだろう。(鈴木ほか)

5. 現地での生活—食事編

現地での食事は基本的に朝食昼食はCIFARが用意するビュッフェ形式、夕食は自前で調達する形であった。ヨーロッパ文化圏らしくチーズが常備され、パンが美味しい。特に日本で出てくるような柔らかな食パンではなく、固めのパンを使ったサンドイッチは絶品であった。ただ、サラダについてくるオリーブや漬物は日本人の舌には合わない刺激物で、好奇心から一度口にしてみたものの、二度と手を出さないという悲劇が繰り返された。また、デザートがとにかく甘い。チョコ系のデザートであれば、まだ甘さ控えめだがそれ以外は暴力的に甘い。水がないと喉に押し込めない程である。日本人との味覚的な違いを痛感した瞬間である。

他にも日本との違いとして飲み物があげられる。出てくる飲み物の多くが炭酸系飲料なのだ。コーラ、スプライト、ペプシ等、水かと思ったらスパークリングウォーターだったという、一体何がここまで彼らを炭酸に駆り立てるのかと甚だ疑問である。ただ、このようにちよくちよく舌に合わないものが出てくるものの、出てくる料理は基本的に美味しい。コース料理のようなきちんとした食事になると味付けもボリュームもケチの付けようもない。この美味しい料理を同じ席についた人と物理を着にしながら食べるというのはいろいろな意味で良い経験であった。(柴田)



安モントリオールの名前の由来ともなった
モン・ロワイヤル（王の山）からの市街地眺め。

6. 現地での生活—モントリオールの街編

このプログラムが開催されたモントリオールは北米の大都会ながら、ヨーロッパの雰囲気も混ざり、二面性を感じる場所であった。数百年前に建てられた家が集まる旧市街の広場では、アーティストが人々に囲まれてパフォーマンスをし、川沿いでは家族やカップルが遊んでいた。カナダではアイスホッケーが人気であり、その中でも屈指の強豪チームを持つモントリオールでは、いたるところで関連グッズが販売され、アイスホッケーの話題がされていた。芸術作品もとても多くあり、経済、スポーツ、文化、教育と研究の多くの側面が共存した素晴らしい街であった。

この街では当然、ほとんどのものが日本とは違う。その違いが我々に様々なトラブルをもたらした。カナダへの移動日、長い移動時間でヘトヘトになりながら、鈴木はやっとの思いでホテルに着いた。とりあえず歯を磨いて、シャワーを浴びて、今日は早く寝ようと考え、洗面台へ向かった。ところが、いくら蛇口をひねれども全く水が出てこない。残念ながら、洗面台だけではなくシャワーもこのタイプの蛇口だ。壊れているのか？元栓が開いてないとか？押し込んでみる？など様々な操作を試すものの、いっこうに水は出てこない。最後に、押しダメなら引いてやれ！と思い切って蛇口を引っばると、シャワーから水が出た！「やった！」

と思ったのも束の間、鈴木は頭からどっぷり水浸しになった。初日から海外と日本の違いを目の当たりにした鈴木は、遠く離れた日本の蛇口を思い浮かべながら、床に就いた。

Amorim は久々にフランス語を話すことができ、高揚した。モントリオールの店に入ると、一人の店員さんが英語で話しかけ、もう一人がフランス語で答える。皆が好きな言語を使う。これこそがバイリンガル国であると感じた。だれもが2ヶ国語を理解し、好きな方の言語を使い、自由にコミュニケーションをとっていた。また、留学生として、多くの国の留学生に会い、全世界のモビリティをより強く感じた。多くの人々がさまざまな国から集まり、留学の経験が重要だと改めて感じた。高嶋は、サマースクールで知り合った学生達とアイスホッケーバーに行きホッケーの試合を観戦した。やはりカナダで一番人気のスポーツなだけあって、その日は多くのバーが、テレビでホッケーの試合を放送しており、平日の夜6時だったが、どのバーも熱気に包まれており、非常に盛り上がっていた。柴田はカナダへの入国審査の際、「目的は？」「サマースクールに参加しに来ました」と答えたら「夏？春だろ」と審査官に白い目で見られた。ごもつともである。安井はバスに苦戦を強いられた。ホテルへ帰ろうとバス停で待っていたら、一つめのバスは何事もなかったかのように通り過ぎていった。二つめのバスに乗る事には成功した。しかし、気がつくとバスはホテルの前を通り過ぎていた。ここで車内アナウンスが無い事に気付く。すぐに次のバス停で降りて逆向きのバスに乗り、すぐさまボタンを押した。これでホテルに着くと、一安心だ。しかし、バスはまたしてもホテルの前を通り過ぎて行った。(安井ほか)

7. おわりに

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



最終日の会食の様子。
左から2番目は
東京大学の和達准教授

● 第 16 回集中連携研究会

「トポロジカル超伝導」

2014年6月14日-16日（下呂温泉木曾屋）

プロジェクトの最終年度を迎えるにあたり、活動の総括と最終年度の実効的研究計画について認識を共有することを目的に、2014年6月14日午後から16日夕方まで、岐阜県下呂温泉木曾屋にて合宿形式での集中討論を行った。研究会は計画班代表による総括講演から始め、キーとなる成果の講演に加えて、二つの自由討論セッションを設けて、これまでの研究成果や今後の見通しを吟味した。参加者は総括班メンバーを含む本プロジェクトの計画班・公募班から26名を選んだ。研究会の2日目には、領域国際会議 TQP2014(2014年12月)のプログラム委員会も行った。

本研究会は合宿形式で、質問時間を十分にとり、研究成果の吟味と今後の方向性を明確にしたことはもちろん、領域としての成果発信の観点も含めて掘り下げた議論を行うことができた。短期間であったが、参加者全員が寝食を共にして議論・相談を深める密度の濃さで、また経費の面でもコストパフォーマンスの良い、極めて有意義な研究会であったといえる。

6月14日の午後のセッションでは、各計画班の代表者（A：前野、B：石川、C：鄭、D：田仲）から各班の当初計画とその後の進捗状況・成果の報告があった。

A班（時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象）は、1. Sr_2RuO_4 のバルク超伝導の未解決問題をまとめ、スピン三重項カイラル超伝導性を支持するナイトシフトや一軸性圧力効果の最新成果を報告し、2. Sr_2RuO_4 の微小結晶を用いたトポロジカル量子現象について、エッジ状態密度とエッジ電流、半整数フラクソイド、常磁性マイスナー効果の研究現状を紹介した。また、3. 共晶系を利用したトポロジカル超伝導接合、4. 強磁性・超伝導接合系での奇周波数ペアリングと近接効果、5. マヨラナ準粒子と奇周波数ペアリングの理論の概要も紹介した。

B班は、時間反転対称性を破るトポロジカル超流動体である ^3HeA 相について、1. 固有軌道角運動量の確定、2. エッジ質量流の観測、3. 半整数量子渦の観測、また、スピンと軌道の対称性を破るトポロジカル超流動体 ^3HeA 相について、4. 表面マヨラナ準粒子状態の観測、5. 乱れた常流動相との奇周波数超流動という、いずれも未解決の重要な問題の解決を目的に挙げて研究開始した。固有軌道角運動量の確定については、渦のテクスチャーの同定とそれに即した理論と実験との比較を通じて、詳細なレベルで結論が得られている。 ^3HeA 相のカイラルドメインの観測についても池上らの研究から大きな成果が得られた。そのほかのテーマについてもその進展状況の説明があった。

C班はトポロジカル絶縁体や超伝導体におけるスピン起動相互作用の役割を明らかにすることを目的に、1. 反転対称性の破れた超伝導体の超伝導対称性、結晶育成、詳しいバンド計算、2. トポロジカル絶縁体の実証や、トポロジカル絶縁体と強磁性体・電界効果を組み合わせたデバイス基礎動作、3. トポロジカル絶縁体に基づく超伝導体の物性解明、4. 電気二重層

トランジスターの手法での新奇超伝導体、などのテーマに取り組んできた。鄭はこれらの中から、反転対称性のない結晶構造の超伝導体 $\text{Li}_2(\text{Pd,Pt})_3\text{B}$ と、トポロジカル絶縁体にドーピングして発現する $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ と $(\text{Sn,In})\text{Te}$ の超伝導について詳しく解説した。前者では元素置換による結晶構造の変化がスピン軌道相互作用の効果に大きな影響を与えて超伝導対称性を変化させ、具体的にはスピン三重項成分を増強させる。後者については、決定的ともいえる核磁気共鳴ナイトシフトの詳細な結果が披露された。

D班は、1. Sr_2RuO_4 を想定しての、時間反転対称性の破れたトポロジカル超伝導体のエッジ状態密度について多バンド効果を取り入れた理論、2. s波超伝導体とトポロジカル絶縁体との接合系などによるトポロジカル超伝導の実現とマヨラナ粒子の出現の理論、3. 奇周波数超伝導状態に伴う現象について、4. トポロジカル物質の周期表の拡張など、冷却原子系の実験結果以外の研究成果の解説を行った、いずれの班も計画通りの成果や予想外の研究展開による成果に加えて、当初計画の成果が得られていない場合についても、これまでの努力の内容や困難点などについて披露された。

14日の夕食後のセッションでは、上田司会による「この新学術で約束したこと、実際にできたこと」についての自由討論を行った。その中では固有軌道角運動量確定の成果の取り扱い、奇周波数ペアリングの概念の位置づけと実際の現象の認識、電場誘起超伝導体内部での電場勾配の問題、などについて掘り下げた討論を行った。

2日目の15日には安藤陽一と佐藤宇史が、本領域の主要な成果を担ってきたトポロジカル絶縁体の物質開発と実証に関する研究成果を総括する講演を行った。次に井澤と米澤がスピン三重項超伝導体 UPt_3 と Sr_2RuO_4 について、超伝導対称性を確定する上で解決が必要な点を鮮明にする講演を行った。特に井澤は、従来の議論の中心であった軌道対称性だけでなくスピン成分も含めて包括的に解明すべきという立場で、現在相反する解釈についての争点を明確にまとめた解説を行った。米澤は、磁場中相図の理解、特に上部臨界磁場での1次相転移現象について、異方性を含めた詳しい実験事実を説明した。その中で、1次相転移での磁化のとびはスピン成分主体では説明できないことも示した。

これに引き続き新田と藤本はそれぞれ、マヨラナ粒子の非可換統計性と、マヨラナ粒子観測の方法についての理論的提案を解説した。新田は、マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子計算、ポーズアインシュタイン凝縮体中のトポロジカル励起、時間に依存する基底状態をもつという「Time Crystal」の存在の有無についての最近の理論展開について解説し、さらに中性子星におけるトポロジカル超流動の概念導入で未解明の超強磁束を説明する試みなども披露された。藤本は、スカーミオンの作るダイオン状態、カイラル超伝導の揺らぎを反映する磁場中のネルンスト効果とワイル半金属、また電子相関の強い1次元系でのトポロジカル・モット転移と電荷・スピン励起についての研究成果を解説した。電子相関の強い系でのトポロジカル状態の

実現は今後の重要課題と期待されている。川上はその例とされるトポロジカル近藤絶縁体について、 SmB_6 がそれにあたるのかどうか、最近数多く発表されている論文成果をレビューした。

柳瀬は、局所反転対称性の破れとトポロジカル超伝導状態について、重い電子系人工超格子や電場誘起表面超伝導の実験を意識しての講演を行った。続いて野島は、 SrTiO_3 の電場誘起超伝導での超伝導層の厚みを決定する要因についての議論や、表面ラッシュバ効果の増強を狙った重い元素を用いた電場誘起超伝導研究のこれまでの経過と現状を述べた。

この後、安藤陽一司会による自由討論「トポロジカル量子現象の Holy Grail は？それに如何に迫るか？」を行った。そのセッションで、押川は Entanglement エントロピーとトポロジカル状態の関係、入江は s 波超伝導体と強磁性のハイブリッド系での三重項超伝導誘起の研究について、胡はマヨラナフェルミオンの検出方法、田仲はワイル半金属についてコメントした。2 日目の夕食後は、12 月に京都で開催する領域国際会議 TQP2014 のプログラム委員会を開き、招待講演者やセッションの組み立てなどの相談を行った。

3 日目の 16 日には引き続き、領域の主な研究成果についての解説と討論を行った。上田は冷却原子系のトポロジカル励起について、相互作用の極めて高い制御性と可視化技術を活用することでトポロジカル絶縁相、ディラックモノポールをはじめとする多様な状態の実現に成功していることを解説し、半整数量子渦とスカーミオンの複合系でのトポロジカル数の保存についてのパラドクスとその解についても説明した。水島はトポロジカル量子相転移の例として、超流動ヘリウムで期待される、バルクギャップを開いたままでトポロジカル状態が消失する現象について検出方法も含めた理論提案をまとめた。山影は超伝導化したトポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導ギャップとエッジ状態について、バルク超伝導に起因するものとトポロジカル表面状態の超伝導化に起因するものとの寄与を両方考慮して導いたトンネルスペクトルを詳しく解説し、NMR ナイトシフトの理論結果も報告した。

野村是水島の理論に対応するトポロジカル量子相

転移の発見に向けての実験の現状を報告した。池上は超流動 ^3HeA 相でカイラルドメインのダイナミクスの観測に初めて成功した成果を解説し、詳しいダイナミクスについても報告した。その技術を生かしてエッジ質量流の観測に結び付けられないものか、活発な議論があった。

瀬川は、トポロジカル絶縁体にキャリアドープして誘起した新超伝導体の発見について報告した。松野は電子相関が強い系におけるトポロジカル相の実現をめぐるイリジウム酸化物やチタン酸化物との人工超格子系での研究の現状を述べた。胡はマヨラナフェルミオンを交換して非可換統計性を実証するデバイスの構想について解説した。

最後のセッションでは、柏谷が、 Sr_2RuO_4 のトポロジカル超伝導性検証のための、超伝導接合系でのこれまでの様々な研究を総括した。浅野は、奇周波数超伝導ペアリングの実証に関して、特に d 波超伝導体の微小試料で現れる奇周波数状態について述べた。東谷は、マヨラナフェルミオンと奇周波数ペアリングとの密接な関係について解説し、特にエアロジェルを用いたヘリウム 3 の超流動 / 常流動接合系で期待されるトポロジカル現象について述べた。

参加者は旅館の 5 階のフロアをほぼ独占しての宿泊となった。露天風呂付きの温泉はすぐ上の 6 階にあり、多くの参加者が朝夕の温泉を満喫した。夕食では地酒「天領」とその濁り酒、飛騨牛、昼には名物の朴葉（ほうば）焼やトマトたっぷりの豚どんぶりなどが楽しめ、研究会の議論も自然と活発化して大いに盛り上がった。おりしも 15 日はワールドカップ・サッカーの日本チーム初戦であったため、セッションの開始を早朝にずらして、昼食休憩時間は 2 時間にするなどプログラムに配慮した。研究会の遂行に関するたくさんのリクエストを気持ちよく受け入れて、成功に導いてくださった女将さんはじめ木曾屋の皆さんの心のこもったもてなしに感謝したい。下呂温泉は 9 月に噴火した御嶽山から 30 キロほどの距離にあり、幸い直接の被害はなかったものの様々など苦労もされているのではないだろうか。機会を作ってまたぜひ訪れてみたい。

(文：前野 悦輝)

第 16 回集中連携研究会



● 第17回集中連携研究会

「トポロジカル絶縁体」

2014年7月22・23日(大阪大学産業科学研究所講義室)

当新学術領域の第17回集中連携研究会は「トポロジカル絶縁体」をテーマとして2014年7月22日(火)、23日(水)の2日間にわたって、大阪大学産業科学研究所講義室で開かれた。

本新学術領域が発足して4年が経過したタイミングであったが、トポロジカル絶縁体をテーマとした集中連携研究会は意外にも今回が初めてであった(「トポロジカル超伝導・超流動」は第10回で開かれている)。本研究会では、最近顕著な成果を挙げている研究者の講演によって日本におけるトポロジカル絶縁体研究の最前線を概観するとともに、最先端の成果に関する議論を通じて、トポロジカル絶縁体研究が今後目指すべき方向性について参加者の間で共通認識を形成することを目指した。

この分野の研究は理論主導で進んできたため、研究会は理論の講演中心で構成されることが多いが、本研究会では日本においても実験研究がさかんに行われるようになったことを反映して実験系の講演が14件中11件と多数を占めた。内容も、顕著な成果はもちろんのこと最新の未発表の結果もふんだんに取り入れられた講演ばかりであり、スピン注入、光電子分光、STM/STS、量子Hall効果、テラヘルツ分光、と様々な実験手

セッションの様子



法、また試料もバルク単結晶から薄膜まで多岐に渡り、日本におけるトポロジカル絶縁体研究の最前線を概観するために十分な内容であった。また、トポロジカル絶縁体から派生したトピックともとらえられるワイル半金属、ディラック半金属についても理論家を交えて活発に議論が行われた。全体を通して、領域内でトポロジカル絶縁体に関する最新の知見を共有し、今後の研究の方向性を明確にできたと考えられる。

(文責、瀬川 耕司 / 安藤 陽一)

第17回集中連携研究会





●第8回 物性科学領域横断研究会

2014年11月21日ー11月22日

(大阪大学基礎工学部国際棟シグマホール)

大阪大学豊中キャンパスにおいて、物性科学に関する6つの新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」、「コンピュータによる物質デザイン」、「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」、「ゆらぎと構造の協奏」、「ナノスピン変換科学」、「分子アーキテクト」共催による分野横断研究会が行われた。領域毎に領域代表が領域研究の概要を説明した後、領域メンバーによる2件の講演を行うという形式で研究会が構成されていた。今回は参加の無かった「原子層科学」、「 π 造形科学」、「高次複合光応答分子システムの開拓と学理の構築」からもゲスト講演が行われた。本来科学的な側面の報告をすべきである事は承知しているが、それは各領域のホームページに委ねることとして、本講では本領域からの寄与がどうであったかを伝えられればよいと思う。

本領域の発表は初日の最初に行われた。前野領域代表の講演の中で、「トポロジカル量子現象」という造語が完全に定着するほど関連する研究分野が隆興していること、当初の予測を大幅に上回る勢いで研究の進捗が見られたこと、また他分野からの参入によって新しい切り口をもつ研究分野が生まれつつあることが報告された。領域立ち上げの時には想像もできなかった展開になっているのは確かで、この5年で私自身の物質観も大きく変容したと思う。ただ目の前の課題に必死に取り組むことを繰り返して、あっという間に最終年度を迎えた感があり、世の移ろいの早さと比べて一体自分はどれ程進歩したのかと思うとはなはだ心許ない限りである。本領域のテーマと関連する国際的なグループ研究が続々と後発し、我々は既に追われる立場である。それを自負として、世界に物申す研究をせねばならないと、小さく自分に誓った次第である。

B班の石川氏はヘリウム3-A相における固有角運動量研究の経緯を述べた後、実験結果と多くの理論を比較し、実験的に固有角運動量を確かに捉えた事を報告した。実験が困難であるために、ヘリウム3の物理学の進展は電子系に比べて遅い。しかしひとたび一歩進めば、その一歩の軌音には確かな響きがあるのもヘリウムの物理である。固有角運動量の問題は、ご年配の研究者にとって憶えのある課題らしく、超流動ヘリウム研究の中の大きな成果だと賞賛の声が揚がったこと

をお伝えする。次いで私は奇周波数クーパー対の異常な磁気的性質について講演した。超伝導でありながら常磁性になることが私自身は面白いと思っていたが、一般向けの序論が十分でなく「問題の在処」を明確にできなかったせいか聴衆の反応は今ひとつであった。いつも自分の学生に注意していることが出来ていなくて、全く反省しきりである。

本領域として誇れる事実を二つお伝えする。まず、本領域D班の水島氏がトポロジカル超流体の理論的研究で第9回凝縮系科学賞を受賞し、堂々たる受賞記念講演を行った。本領域において、水島氏が科学として重要な貢献をされたに留まらず、若手国際会議の主要メンバーとして、またTQPのポスターセッションのまとめ役として、常により若い研究者の範となる活躍をされた事に異議を挟む人は少なからう。受賞講演は、私にとっても「よかった」と思える時間だった。大阪へのご栄転ともあわせて、ここに心よりお祝いを申し上げる。初日の懇親会の後、石川氏とともに「ささやかな祝宴」を設けたことはご報告に及ぶまでもないだろう。

次に、発足当初から前野代表があらゆる機会を捉えておっしゃったことの一つに「素人質問を恐れない」がある。今回の領域横断研究会では、本領域に参画する研究者から多くの質問が寄せられたことは紛れもない事実で、討論の活性化に寄与すること他の領域を圧倒していた。こうした姿勢は本領域が育んだ文化といえよう。特に若い関係者が挙手し発言する事が、私にはとてもうれしく感じられた。集中連携研究会、年次報告会、国際会議の場で前野領域代表が率先して示された姿勢が、確かに浸透している事を感じた領域横断研究会であった。

本領域の最終年度も残すところわずかである。5年とは何かをなすには短い時間である。メンバーがそれぞれに進歩して少しずつ向き合い、やっとチームらしくなってきたときに、活動を終えねばならないのは時限付きプロジェクトの宿命である。それは分かっているが、もう少しこのメンバーで続けたいという気持ちになった。

(文責、浅野 泰寛)

●トポロジカル量子現象国際会議 TQP2014

2014年12月16日ー12月20日

(京都大学 百周年時計台記念館)

底 冷えの寒さを感じる師走の京都を舞台に、本新学術領域の最終会議であるトポロジカル量子現象国際会議 TQP2014 が、4 日間に亘って開催された。参加者は国内外併せて 184 名に達し、一昨年度の国際会議 TQP2012 に引き続き、本領域の注目度の高さが伺えた。会議は、領域代表および本会議の座長である前野氏の講演により幕を開け、会議進行上の諸説明に続き、各研究班の注目すべき成果の概説が行われた。これらに続き、6 件の基調講演、27 件の口頭発表、104 件のポスター発表が行われた。

基調講演には 1 件あたり 40 分の時間が割り当てられ、活発な議論が交わされた。Volovik 氏は実空間、運動量空間、位相空間それぞれのトポロジーと物理現象の関係性について、Sauls 氏は超流動 ^3He を制限空間に閉じ込めた場合のエッジカレントや角運動量、また Zhang 氏はグラフェンにおける Valley ホール効果について解説した。さらに Xue 氏は磁性物質をドーブしたトポロジカル絶縁体における異常量子ホール効果、高橋氏は冷却原子ガスのトポロジカルなチャージポンピング、十倉氏はトポロジカル絶縁体における量子ホール効果および異常量子ホール効果について、各々先駆的な研究内容を紹介した。

その他の口頭発表においても、重要な話題が議論された。詳細は添付のプログラムを参考にさせていただきたいが、超伝導に関しては Sr_2RuO_4 , UPt_3 および中心対称性の破れた超伝導体における最新の成果、超流動については ^3He のカイラルドメイン、固有軌道角運動量、表面束縛状態、等が報告された。トポロジカル絶縁体についてはドーブによる超伝導性の発現、トポロジカル結晶絶縁体の発見といった先駆的な物質開発・制御、また上記の諸物質や現象に対する理論的な研究や奇周波数クーパー対に関する報告も行われた。さらに超伝

導体/強磁性体接合の作製や半整数磁束量子の検証といった最先端の話題も議論された。

ポスターは会議初日から最終日まで掲示されていたため、プログラム上の発表時間に留まらず、連日コーヒーブレイク時などに各所で議論が交わされていた。ポスター発表者に対しては、参加者による投票およびポスタープログラム委員会による選考が行われ、優れたポスターおよび 1 分間のプレビューを行った発表者に賞が贈られた。ポスター賞は杉本氏 (京大)、吉見氏 (東大)、安藤氏 (京大)、鈴木氏 (北大)、堤氏 (理研)、矢田氏 (名大)、紅林氏 (東北大) に贈られ、ポスタープレビュー賞は江口氏 (京大)、Lee 氏 (広大)、鈴木氏 (北大)、紅林氏 (東北大)、高嶋氏 (京大) に贈られた。またポスター会場には「茶室」が設けられ、伝統的な作法に則って抹茶と和菓子が振舞われた。海外からの参加者だけでなく、国内の参加者にとっても「Japanese Tea Ceremony」は珍しい体験になったのではないだろうか。これだけでなく懇親会のメニューや、コーヒーブレイクのコーヒー・お菓子に至るまで「京都」や「和」を意識した品々が用意されており、日本文化を垣間見る機会にもなったと思われる。

会議冒頭で、前野氏から本領域は中間評価において A+ という非常に高い評価を獲得した旨が報告されたが、世界に先駆けたトポロジカル関連プロジェクトの最終年度に相応しい高水準の国際会議となった。

最後になりましたが、会議の運営・サポートを円滑に行っていただいた京大：固体量子物性研究室の皆様へ深く感謝いたします。

(文責：柏谷 聡, 齋藤 広大)



INTERNATIONAL CONFERENCE ON
TOPOLOGICAL QUANTUM PHENOMENA TQP2014

PROGRAM

DECEMBER 17, 2014 (WEDNESDAY)

09:30~10:00	Opening	
09:30	Welcome	Y. Maeno (10min)
09:40	Achievements of the TQP project	Y. Maeno (20min)
10:00~10:40	Topology in Physics	Chair: J. Berlinsky
10:00	Topology in Physics	G. Volovik (40min)
11:10~12:30	Chiral Superconductors and Superfluids	Chair: S. Higashitani
11:10	Evidence for Time Reversal Symmetry Breaking Superconductivity in $U\text{Pt}_3$	E. Schemm (30min)
11:40	Direct Detection of Chirality in Superfluid $^3\text{He-A}$	H. Ikegami (20min)
12:00	Topological superfluid ^3He under engineered nanoscale confinement: new phases and the search for Majoranas	J. Saunders (30min)
13:40~16:00	Poster Session A	Chair: T. Nojima
13:40~14:30	Poster Preview A	(1min for each poster, 50min)
14:30~16:00	Poster Session A	(90min)
16:00~17:10	Topological Edge State	Chair: H. Fukuyama
16:00	Edge States, Edge Currents in Chiral Superfluids with Strong Anisotropy and Confinement	J. Sauls (40min)
16:40	Spin-triplet superconductors: interface to ferromagnets and magnetic edge states	M. Cuoco (30min)
17:40~18:50	Odd Frequency Pairing	Chair: Y. Tanaka
17:40	In search of odd-frequency spin-triplet proximity effect in $\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ hybrids	M. S. Anwar (20min)
18:00	Magnetic property of odd-frequency Cooper pairs	Y. Asano (20min)
18:20	Odd frequency condensates in correlated fermion and boson systems	A. V. Balatsky (30min)

DECEMBER 18, 2014 (THURSDAY)

09:20~10:40	Triplet Superconductivity I	Chair: K. Miyake
09:20	Topological superconductivity based on topological insulators	Y. Ando (30min)
09:50	NMR study of topological superconductors	G. Zheng (30min)
10:20	Extra Magnetization in the Superconducting State of Sr_2RuO_4 Probed with ^{87}Sr and ^{99}Ru -NMR Measurements	K. Ishida (20min)
11:10~12:20	Triplet Superconductivity II	Chair: Y. Yanase
11:10	Order parameter nodal structure and symmetry in $U\text{Pt}_3$	B. Halperin (30min)
11:40	Nodal structure and pairing symmetry of $U\text{Pt}_3$	K. Izawa (20min)
12:00	Anomalous superconducting phase diagram of the chiral-p-wave superconductor Sr_2RuO_4	S. Yonezawa (20min)

13:40~16:00
13:40~14:30

14:30~16:00

16:00~17:10

16:00 18PM-1

16:40 18PM-2

17:10~17:50

17:10 18PM-3

17:30 18PM-4

Poster Session B

Poster Preview B

(1min for each poster, 50min)

Poster Session B (90min)

Dirac and Majorana Fermions

Chair: T. Ando

Topological Transport in Graphene

Y. Zhang (40min)

The wires' approach to topological insulators

Y. Oreg (30min)

Topological Phase Transition

Chair: A. Yamakage

Topological phase transitions in superfluids and superconductors

T. Mizushima (20min)

Magnetic Field Effects on the Surface Majorana Bound States of Superfluid ^3He B-phase

R. Nomura (20min)

DECEMBER 19, 2014 (FRIDAY)

09:20~10:30

09:20 19AM-1

10:00 19AM-2

11:00~12:00

11:00 19AM-3

11:30 19AM-4

Topological Devices

Chair: Y. Asano

Quantized anomalous Hall effect in Cr-doped $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ topological insulator

Q. Xue (40min)

Magneto-optical Kerr rotation from $\text{GeTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ topological superlattice

J. Tominaga (30min)

New Development in Sr_2RuO_4

Chair: J. Aarts

Search for half-flux-quantum Little-Parks oscillations in Sr_2RuO_4

Y. Liu (30min)

A novel method for using strain to tune correlated electron materials

C. Hicks (30min)

DECEMBER 20, 2014 (SATURDAY)

09:20~10:30

09:20 20AM-1

10:00 20AM-2

11:00~11:50

11:00 20AM-3

11:30 20AM-4

13:40~15:10

13:40 20PM-1

14:20 20PM-2

14:50 20PM-3

15:40~17:10

15:40 20PM-4

16:10 20PM-5

16:40 20PM-6

17:10~17:20

Novel Quantum Matter

Chair: N. Kawakami

Controlled topological quantum physics using ultracold atoms

Y. Takahashi (40min)

Anomalous surface states in p-wave superconductors

A. Golubov (30min)

Chiral Superfluids

Chair: M. Cuoco

Edge currents in Sr_2RuO_4

C. Kallin (30min)

Intrinsic Angular Momentum of Topological Superfluid $^3\text{He-A}$

O. Ishikawa (20min)

Topological Insulators

Chair: Y. Maeno

Quantum Hall effects and more in topological insulators

Y. Tokura (40min)

New Physics in Topological Crystalline Insulator

L. Fu (30min)

Experimental Research on Topological Insulators

K. Segawa (20min)

Majorana Fermions

Chair: M. Ueda

Symmetry in Topological Insulators and Superconductors

M. Sato (30min)

Topological phases with parity symmetry and orientifolds

S. Ryu (30min)

Weyl and Dirac fermions in solids

N. Nagaosa (30min)

Closing



POSTER PRESENTATION



- PA-1 Electrical injection and extraction of spin polarized current through a ferromagnetic metal / topological insulator interface **Y. Ando** (Kyoto Univ.)
- PA-2 Low Frequency Dynamics of the Chiral Edge Domains in the Fractional Quantum Hall State **A. Fukuda**
- PA-3 High-resolution spin-resolved ARPES study on Sr_2RuO_4 **H. Iwasawa**
- PA-4 Effects of Magnetic Field and Rotation on 3P_2 Neutron Superfluids **M. Nitta**
- PA-5 Investigation of pressure-induced superconductivity in $Cu_{0.25}Bi_2(TeSe_{1-x})_3$ **A. Ohmura**
- PA-6 Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging as a New Tool to Study Topological Superfluid 3He **Y. Sasaki**
- PA-7 Chiral superconductivity in URu_2Si_2 **T. Shibauchi**
- PA-8 Spontaneous parity violation and magneto-electric effect in locally non-centrosymmetric system **Y. Yanase**
- PA-9 Spin and valley transports in topological crystalline insulators **T. Yokoyama**
- PA-10 Electrical transport in topological crystalline insulator $SnTe$ thin films **R. Akiyama**
- PA-11 Reversible electron-hole conduction and surface Shubnikov-de Haas oscillations in the bulk insulator $Tl_{1-x}Bi_{1+x}Se_2$ **G. Eguchi**
- PA-12 Search for the Second Phase Transition of Heavy-Fermion Superconductor UBe_{13} **J. Gouchi**
- PA-13 Surface States of Superconducting Topological Crystalline Insulator **T. Hashimoto**
- PA-14 Electric Octupole Order in Locally Non-centrosymmetric System **T. Hitomi**
- PA-15 Transport properties in superconducting nanowires with Dresselhaus spin-orbit coupling **S. Ikegaya**
- PA-16 Lack of spontaneous magnetic field in Sr_2RuO_4 microcrystals detected by SQUID **S. Kashiwaya**
- PA-17 Possible realization of interacting symmetry-protected topological phases in topological crystalline insulators **H. Isobe**
- PA-18 Thermal Conductivity Measurement of Liquid 3He Confined in Aerogel **J. Kasai**
- PA-19 Goldstone-mode instability in a Spinor Bose-Einstein condensate **Y. Kawaguchi**
- PA-20 Investigation of Half-Quantum Vortex between Parallel Plates in Superfluid 3He -A Phase **Y. Kimura**
- PA-21 Topologically stable gapless phases in nonsymmorphic superconductors **S. Kobayashi**
- PA-22 Ferroelectricity in Atomically Thin MoS_2 Studied From First Principles **J. Lee**
- PA-23 Stable solitons in a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate **B. Li**
- PA-24 Superconductivity and structural phase transition in $LaPt_{2-x}Ge_{2+x}$ **S. Maeda**
- PA-25 Fractionally quantized charge pumping in a one-dimensional superlattice **P. Marra**
- PA-26 Superconductivity in locally-nocentrosymmetric $SrPtAs$ **K. Matano**
- PA-27 Disorder effects of magneto-transport on the surface of a topological insulator **I. Matsuzaki**
- PA-28 Phase ordering percolation in Segregating Bose-Einstein Condensates **Y. Mizuno**
- PA-29 Classification of topological crystalline insulators and superconductors **T. Morimoto**
- PA-30 Weyl semimetals in inversion-asymmetric systems **S. Murakami**
- PA-31 Upper critical field and vortex lattice in multi-band superconductors with strong Pauli-paramagnetic effect **N. Nakai**
- PA-32 Phase Difference in Superconducting Order Parameters in Two-channel Kitaev Chain **S. Nakosai**
- PA-33 Development of Low Temperature Amplifier **K. Obara**
- PA-34 Off-diagonal current-current correlation in a spinor dipolar Bose-Einstein Condensate **T. Oshima**
- PA-35 Two-dimensional Dirac fermions on a Bi square net in nonmagnetic layered pnictides $AZnBi$ ($A=Sr, Ba$) **H. Sakai**
- PA-36 Vortex phase diagram of the topological superconductor Sr_2RuO_4 probed by ac susceptibility **D. Shibata**
- PA-37 Photoinduced Spin Density on the Surface of Topological Insulators **K. Shintani**
- PA-38 Electronic structure and phonon modes of $SrMn_5$ **T. Shishidou**
- PA-39 Fabrication and magnetic properties of $SrRuO_2/Sr_2RuO_4$ hybrids **Y. Sugimoto**
- PA-40 Effect of surface roughness on paramagnetic response of small topological superconductors **S. Suzuki**
- PA-41 Interface gapless states of topological insulators from interfacial symmetries **R. Takahashi**
- PA-42 Delocalization of surface Dirac electrons in disordered weak topological insulators **Y. Takane**
- PA-43 Eilenberger theory for site-selective NMR in superconducting vortex states **K. Tanaka**
- PA-44 Cooperon condensation and unconventional superconducting states in topological insulators **S. Tsuchiya**
- PA-45 Topological Vortex Bound State in Superfluid 3He B-phase **Y. Tsumumi**
- PA-46 Electric field-effect on n-type cuprate superconductor **K. Ueno**
- PA-47 Antiferromagnetic Topological Insulator for Spintronics **L. Wu**
- PA-48 Andreev bound states in superconducting Weyl semimetal **K. Yada**
- PA-49 Topological phase transition in thin-film topological crystalline insulators **A. Yamakage**
- PA-50 Magnetoresistance of Sr_2RuO_4 micro-rings for half-quantum-fluxoid observation **Y. Yasui**
- PA-51 Phase competition between a topological insulator and a nontrivial spin liquid in one dimension **T. Yoshida** (RIKEN)
- PA-52 Quantum Hall Effect on Surface States of Topological Insulator Field-Effect Devices **R. Yoshimi**
- PB-1 Giant Anomalous Nernst Effects due to Chiral Superconducting Fluctuation in Chiral Superconductors **S. Fujimoto**
- PB-2 Chirality-induced half-flux periodicity in superconducting quantum interference in Sr_2RuO_4 **R. Ishiguro**
- PB-3 Search for a new topological insulator: superlattice-based honeycomb Ir oxides **J. Matsuno**
- PB-4 Imaging of spin-split incompressible strips in the quantum Hall chiral edge state **S. Nomura**
- PB-5 Orbital Angular Momentum in Two-Dimensional Chiral Superfluids **M. Oshikawa**
- PB-6 Manipulation of topological states in a topological-insulator heterostructure **T. Sato**
- PB-7 Spin pumping effects in topological materials **Y. Shiomi**
- PB-8 Search for Spontaneous Magnetization of Non-centrosymmetric Superconductors **A. Sumiyama**
- PB-9 Non-Abelian Dynamics in 1D Systems **C. Amorim**
- PB-10 Superconductivity and Josephson effect in ultrathin crystals of Sr_2RuO_4 prepared by mechanical exfoliation **X. Cai**
- PB-11 Degenerate Bose Einstein condensation **T. P. Choy**
- PB-12 Non-equilibrium binary spectrum in coupled quantum Hall edge channels **T. Fujisawa**
- PB-13 Imaging the two-component wavefunction in the topological surface state of Bi_2Se_3 **T. Hanaguri**
- PB-15 Onset of the Limit Cycle and the Universal Three-Body Parameter in Efimov Physics **Y. Horinouchi**
- PB-16 Study of magnetoelectric effect near Dirac semimetal phase **T. Maeda**
- PB-17 Dimensional crossover of transport characteristics in topological insulator nanofilms **K. Imura**
- PB-18 Fermi Level Tuning of Topological Insulator Bi_2Te_3 by Electrochemical Cu-Intercalation **S. Ishiwata**
- PB-19 Dimer ordering in a honeycomb-lattice ruthenate: crystal growth and magnetic properties **Marco P. Jimenez S.**
- PB-20 Topological Characterization of the Plateau Phase in the Dimerized Heisenberg Ladder **T. Kariyado**
- PB-21 Crystal Growing and Unusual Disorder Effect of Parity Mixing Superconductor Li_2T_3B (T:Pt,Pd) **Y. Inada**
- PB-22 A density functional design of an interaction-driven Chern insulator for an optical lattice system **S. Kitamura**
- PB-23 Magnon dynamics and cross-correlated response on the surface of topological insulators **D. Kurebayashi**
- PB-24 Crossed surface flat bands of Weyl semimetal superconductors **B. Lu**
- PB-25 Ru Nuclear Spin-Spin Relaxation Rate Measurement on Superconducting Sr_2RuO_4 **M. Manago**
- PB-26 Topological aspects of 2D lattice model with obliquely introduced linear-shaped potential **F. Matsuda**
- PB-27 Intrinsic Angular Momentum and Magnetic Moment in Chiral Superconductor on 2D Lattice **K. Miyake**
- PB-28 Topological odd parity superconductivity of Cu-doped Bi_2Se_3 **T. Mizushima**
- PB-29 Novel Susceptibility Induced by Impurity with Boundary in Liquid 3He **Y. Morioka**
- PB-30 Search for Half-quantum Vortex in Sr_2RuO_4 Using Micro-SQUIDs **Y. Nago**
- PB-31 Microscopic theory of quantized thermal Hall effect at finite temperature **R. Nakai**
- PB-32 Anomalous Magnetoresistance and Superconductivity in Electric Field Induced Conducting Surface of $SrTiO_3$ **T. Nojima**
- PB-33 Helical Edge Transport in Quantum Hall Ferromagnetic State in Organic Dirac Fermion System **T. Osada**
- PB-34 Vortex Structure in Superfluid 3He -B **H. Ozawa**
- PB-35 Chiral domain wall motion probed by inversion symmetry of Nb/Sr_2RuO_4 Josephson junctions **K. Saitoh**
- PB-36 Superconducting $Sn_{1-x}In_xTe$ nanoplates **S. Sasaki**
- PB-37 Controllable Rashba splitting in heavy-fermion superconductor $CeCoIn_5$ **M. Shimozawa**
- PB-38 On the topological classification of inversion symmetric Fermi points **K. Shiozaki**
- PB-39 Bulk Angular Momentum and Hall Viscosity in Chiral Superconductors **A. Shitade**
- PB-40 Electric-Field-Induced Semimetal-Topological Insulator Transition in the $InAs/GaSb$ System **K. Suzuki**
- PB-41 Axial Current due to Magnetization Dynamics in Weyl Semimetals **K. Taguchi**
- PB-42 Chiral superconductivity in nematic states **S. Takamatsu**
- PB-43 Geometrical Aspects of Dynamical Response **R. Takashima**
- PB-44 Symmetry protected topological order in magnetization plateaux **S. Takayoshi**
- PB-45 Projected Symmetry Breaking in Superfluid 3He -B **H. Takeuchi**
- PB-46 Dirac-cone surface states of topological crystalline insulator $SnTe$ studied by ARPES **Y. Tanaka** (Tohoku Univ.)
- PB-47 Possible Sextet Condensation in ^{173}Yb Gas: Ginzburg-Landau Approach **A. Tsuruta**
- PB-48 Topological defects and composite excitations in pyrochlore conductors **M. Udagawa**
- PB-49 Stability of Rabi-coupled Countersuperflow of Two-component Bose-Einstein Condensates in Quasi-one-dimension **A. Usui**
- PB-50 Anisotropic Uniaxial Pressure Effects in Sr_2RuO_4 Studied by AC Magnetic Susceptibility **H. Yaguchi**
- PB-51 Highly gate-tunable topological-insulator devices **F. Yang**
- PB-52 Topological Superconductivity in Artificially Grown Superlattice $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ **T. Yoshida** (Niigata Univ.)

LT27 参加報告

水島 健 / 大阪大学 大学院基礎工学研究科・物質創成専攻 准教授

Int'l Conference on Low Temperature Physics (LT) が 2014 年 8 月 6-13 日の日程でアルゼンチンの首都ブエノスアイレスにて開催された。今回筆者は LT とそのサテライトである ULT2014 に参加したので、そのときの会議の様子やアルゼンチンの街などを紹介したい。LT は 3 年に一度開催される低温物理学に関する国際会議であり、冷却原子、量子流体・超流動、超伝導、磁性、低温技術等の広範囲に及ぶ領域をカバーする。27 回目となる今回は、初めて南半球及び南米にて開催された。また、組織委員長が女性という点でも初めてである。参加者は 32 の国々から 600 名程度と、これまでの LT の参加人数の約半分程度であったが、14 の基調講演を含む 150 以上の口頭発表からなるプログラムは非常に充実したものであった。芝内氏による基調講演など、領域関係者の講演も多く行われた。

LT27 のプログラムは、まず組織委員長である Hernandez 氏の挨拶に始まり、Simon 賞と London 賞授賞式及び受賞者による基調講演が行われた。London 賞は、超伝導量子ビット等を用いた量子状態の制御に対する先駆的な実験に対して Michel Devoret, John Martinis, Robert J. Schoelkopf の 3 氏に与えられた。Simon 賞は、超流動 ^3He 、重い電子系超伝導及び乱れた金属における量子輸送理論への基礎的貢献に対して Peter Wolfle 氏に与えられた。Wolfle 氏は超流動 ^3He に関する膨大な情報を含む教科書 *Superfluid Phases of Helium 3* の筆者 (Dieter Vollhardt 氏との共著) としても有名で、私自身も研究上のバイブルとして大変お世話になっているが、講演を拜聴するのは今回が初めてであった。近年は強相関物質系の理論に研究舞台を移されているが、受賞講演を通して Wolfle 氏の現在の研究の興味や業績等を知ることができ、非常に貴重な経験となった。

LT は物性物理全体に渡る広大な研究テーマを扱う。本領域の研究課題であるトポロジカル量子現象も LT の中心的テーマであり、会議期間中を通して、冷却原子、超流動 ^3He 、超伝導、絶縁体等、様々なパラレルセッション

で活発な議論がなされていた。連日ポスター講演も行われており、その総数は 600 以上にのぼる。そのため逐一報告することはできないが、私が主に参加した超流動 ^3He のセッションを中心に少しでも触れておきたいと思う。超流動 ^3He の B 相は数少ない確立したトポロジカル超流動体の一つであり、この系はトポロジカル超伝導研究の理想的な舞台を提供すると期待される。これまでも、本領域の野村竜司氏 (B 班) のグループによって、横波音響インピーダンスを通して表面束縛状態のスペクトロスコピーが行われてきた。これにより、超流動 ^3He の B 相表面にギャップレス状態が存在することが実験的に検証された。一方で、喫緊の課題は、表面束縛状態のマヨラナ性に直接起因した物理現象をどのように検出するかということであろう。実際に、LT での超流動ヘリウムのセッションでの講演でも、表面束縛状態やマヨラナ粒子の検出へ向けた実験手法の開発に関する講演が多く見受けられた。例えば、MEMS を超流動 ^3He 中に浸すことでメカニカル共振器が実現されている。この特徴は、共振器の隙間に数ミクロンの超流動 ^3He 薄膜が自然とできることと、振動数が kHz オーダーとなることである。前者はもちろんトポロジカルに守られた表面状態の検出のために不可欠である。また、超流動 ^3He -B のバルクのエネルギーギャップが数十 MHz のオーダーであるので、この共振器は非常に小さなエネルギースケールのプローブに最適かもしれない。その他にも、様々な実験手法の開発に関する報告がなされ、この分野の世界的な動向をうかがうことができた。

充実したプログラムや講演内容とは対照的に、会議の運営に関してはやや不満が残る。LT はブエノスアイレス中心部から地下鉄に乗って 30 分程度の郊外の会議場で開催された。会場は 3 階建てで、1 階と 3 階にセッション用のホールがある。2 階がコーヒーブレイクやランチ、ポスターセッション等が行われるホールがある。参加人数に比べて会場が狭く、特に休憩時間になると身動きが取れなくなる程であった。議論用のスペースもほとんどなく、運営の粗さが目立ったと思う。

さて、wikipediaによると、今回のLTが開催されたブエノスアイレスは「南米のパリの名前で親しまれ」とある。街の中心部にはオベリスクが聳え、そこを中心に7月9日通りと呼ばれる大通り沿いには近代的な高層建築が並んでいる。一方で、7月9日通りから海岸側へ行く途中には一時代前のヨーロッパ的な建築物が多く見受けられ、路上で紳士淑女のカップルがタンゴを踊っている。(見た目は)非常に美しい町という印象であり、南米のパリと呼ばれるのも納得である。しかしながら、今回の参加者の話を聞くと、街中でケチャップ強盗(鞆等にケチャップをかけて気を逸らした際に財布等を盗む)の被害にあったという参加者が何人かいたそうである。また、中心部のメインストリートの一つであるフロリダ通りを歩くと、数メートル毎に、低い独特の声で「カンピオ、カンピオ(両替の意味)」と聞こえてくる。アルゼンチンの経済は未だにインフレ状態であり、為替レートも安定しておらず、外貨獲得のために街中での(おそらく違法な)両替が横行している。しかも銀行のレートよりも一般に高レートのようなのである(もちろん偽札の可能性もある)。

ブエノスアイレスのLTが閉会した後、はサテライトワークショップのULT2014に参加した。ULTは約1ケルビン以下の超低温における新しい物理現象や低温技術等について討論することを目的としている。

回のULTはパタゴニアの玄関口であるSan Carlos de Barilocheという小さな町のホテルで開催された。San Carlos de Barilocheは森と湖に囲まれた静かな町で、「南米のスイス」と呼ばれているらしい。参加者の多くは超流動ヘリウム3の研究であり、終日ホテルに缶詰でLTよりもより深い議論が行われた。私自身も、制限空間中の超流動 $^3\text{He-B}$ のHiggsモードについて講演を行った。雑踏のブエノスアイレスを離れ、アンデス山脈を望む湖畔のホテルに終日缶詰で、Saunders氏やHalperin氏といった超流動 ^3He の集団励起と音波のエキスパートと有益な議論をすることができたのは、非常に良い経験となった。会議中には、Barilocheに縁のある故John Wheatley氏の業績と足跡をたどるメモリアル講演も行われた。

今回の2週間に及ぶアルゼンチン滞在は、日頃の雑務をしばし忘れ、物理に没頭できる貴重な機会であった。今回のLTについてはいろいろと不満も書いたが、多くの人と議論することができ、また今後の共同研究の種も蒔くことができ、個人的には収穫の多い会議であった。次回のLT28は2017年にスウェーデンのヨーテボリ(Gothenburg)にて開催される。

(文責、水島 健)

ULT2015 参加者 (San Carlos de Bariloche)



第 156 回 ノーベル・シンポジウム 参加報告

佐藤 昌利 / 名古屋大学 大学院工学研究科 准教授



2014年6月13日(金)から15日(日)にかけて、第156回ノーベル・シンポジウム「New forms of matter: topological insulators and superconductors」が開催された。出席者は招待者のみという閉じた会議であったが、幸い参加することができたので、その様子をここで報告したいと思う。

シンポジウムは、スウェーデンのストックホルム東部のリーディング島で開催された。リーディング島は、ストックホルム中心地から少し離れた高級住宅地で、会場となった Hogberga Gard は古いレンガ造りが印象的な、こじんまりしたホテルである。ホテルの庭は海に面しており、食事の際には、ストックホルムの島々を一望に見渡しながら会話を楽しむことができるという、雰囲気の良い場所である。ホテルの周辺には、日用品を売る店はもちろんのこと、土産品を売る観光店も一切なく、代わりに個人所有のヨットや高級車が置かれた家が並んでおり、日常生活を感じることはない。宿泊客は、(おそらく)シンポジウム参加とその家族だけであり、孤立した環境で日常を忘れ、シンポジウムだけに集中した日々であった。

スウェーデンには、フランクフルト経由で前日の6月12日に到着した。同じくノーベル・シンポジウムに参加した旧知の Schnyder 氏(マックスプランク研究所・ドイツ)と空港で一緒になったため、同じタクシーでホテルまで移動したが、ホテル到着が深夜遅かったためか、ホテルの玄関は既に施錠されており、門灯もついていない状態であった。インターフォンを押しても返事がなく、どうなるかと思ったが、真っ暗の中、予め印刷していた主催者からの案内メールからホテルの電話番号を見つけだし、Schnyder 氏のスマートフォンで何とかホテルと連絡を取ることができた。ホテルの人の話では、深夜にはインターフォンはつながらず、電話で連絡して正解だったということだったので、はじめから深夜のチェックインは想定していないようであった。ビジネス用のホテルとは違い、のんびりとした運営がなされているようであった。

翌13日朝、ノーベル財団による挨拶からシンポジウムは始まった。ノーベル・シンポジウムは今回で156回目であるが、すべての分野を合わせた合計数であり、各分野で数えるとあまり開催されていないとい

うことであった。シンポジウムでは、トポロジカル量子現象に関する様々な話題が報告された。個々の話題に関しては、シンポジウムのプログラムを添付するのでそちらを参考にしてもらおうことにして、ここでは、特に印象に残った話題について報告したいと思う。

まず、実験の面では、Hasan 氏(プリンストン大学・アメリカ)と Molenkamp 氏(ヴュルツブルク大学・ドイツ)によるトポロジカル絶縁体の実験に関する総合報告があった。領域関係者の仕事としては、大阪大学の安藤グループの結果が取り上げられ、特に絶縁性のよいトポロジカル絶縁体の作成、東北大学との共同研究によるトポロジカル結晶絶縁体の検証、名古屋大学との共同研究による $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の仕事などが紹介された。Hasan 氏が ARPES の優位性を訴え、特にスピン分解 ARPES による表面ディラック励起実証のプライオリティを全面に押し出したプレゼンテーションをしたのに対し、Molenkamp 氏の方は、輸送現象の観点からもっと物理の内容に即したプレゼンテーションをしたのが対照的であった。Hasan 氏が HgTe の最初の実験ではスピンに関する輸送現象が観測されておらずトポロジカル絶縁体の検証になっていないという趣旨の講演をした時、目の前にいた Molenkamp 氏がうーんという感じで頭を掻いたのが印象的であった。

トポロジカル絶縁体の理論の方では、Mele 氏(ペンシルバニア大学・アメリカ)の発表が Kane-Mele によるトポロジカル絶縁体発見の経緯を伝えるもので興味深いものであった。Mele 氏の話によると、当時グラフェンのバルクに現れるディラック励起を研究しており、グラフェンの対称性を破らずにディラック励起にギャップを与える項の存在を見出したことが共同研究の始まりということであった。その項はスピン軌道相互作用に対応し、グラフェンの場合には非常に小さいため、最初は更に研究することに意味があるか疑問に感じたらしいが、同僚の Kane 氏(ペンシルバニア大学・アメリカ)から対称性を保ったままギャップを開ける項はそれ自体理論的に価値のある項であるから、研究を進めるべきだといわれ、最終的に量子スピンホール状態の発見につながったという話であった。Mele 氏は、Geim らによるグラフェン実現以前に、グラフェンにディラック励起が現れることを理論的に見出したこともあるということだが、この時も周りの反応は、ディ



会場となった Hogberga Gard

ラック励起が現れるのは面白いが実験で実現できないのでは仕方がないという感じであったらしい。理論として本当に面白い事であれば、実証については過度に気にせず、追及することが大切ということが、彼の話の教訓であった。

マヨラナフェルミオンの理論に関しては、特に新しい進展は報告されなかったが、Alicea 氏 (カルフォルニア工科大学・アメリカ) が、領域関係者の仕事のうち、佐藤・藤本や田仲・永長の仕事を紹介した。実験の方では、Yazdani 氏 (プリンストン大学・アメリカ) のグループの実験が報告された。超伝導体の上に鉄原子を並べることでトポロジカル超伝導体ができるという報告で、系の端に局在したゼロエネルギー状態の存在が STM ではっきりと観測されており、マヨラナ端状態の存在を確信させるものであった。また、Marcus 氏 (コペンハーゲン大学・デンマーク) のグループによるトポロジカル超伝導ナノワイヤの作成の進展も報告され、今後この方面でも実験が進んでいくことへの期待が高まった。最後の講演は Volovik 氏によるもので、柏谷・田仲の仕事が紹介された。

シンポジウムの最後には、パネルディスカッションが行われた。領域に関係した話題としては、岡山大学の鄭グループによる $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の NMR の実験を Fu 氏が取り上げた。関連して、私自身も NIST による $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 表面の STM の実験に関係した水島・山影・佐藤・田仲の最近の仕事 (Mizushima et al, Phys. Rev. B90, 184516 (2014)) に関して発言を行い、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のトポロジカル超伝導性については決着がついてない旨が強調された。また、Kapitulnik 氏 (スタンフォード大学・アメリカ) が UPt_3 のトポロジカル超伝導性に関する我々の仕事 (Tsutsumi et al. JPSJ 82, 113707 (2014)) を取り上

げ、今回のシンポジウムでは話題として取りあげられなかった旧来の異方的超伝導体もトポロジカル超伝導体としての理解が進みつつあることが報告された。また、パネルディスカッションを取りまとめた Moore 氏 (カルフォルニア大学・アメリカ) が、最後の締めくくりで私が 2003 年に行ったアクション・ストリングの非可換統計の仕事 (Sato, Phys. Lett. B575, 126 (2003)) の先駆性について改めて言及してくれたことが個人的にはうれしいことであった。

食事の際、Volovik 氏 (アルト大学・フィンランド) に指摘され、はじめて気がついたのだが、シンポジウム参加者はほとんどがアメリカ・ヨーロッパで活躍している研究者で、アジア地区の大学・研究所から招待されているのは、Xue 氏 (清華大学・中国) と私だけであった。シンポジウム講演で個々の仕事が紹介されたとはいえ、発足以来、世界に先駆けてトポロジカル量子現象の研究を強力に推進してきた本新学術領域としては、少し偏りがあったのでは、というのが正直な感想である。そういう意味でトポロジカル量子現象研究の実験・理論双方における世界的な盛り上がりを感じると同時に、今後、もっと多くの人々に本領域で得た成果、特に、 $^3\text{He-B}$ 相や Sr_2RuO_4 を中心とする日本独自の成果を認知してもらうために、周辺研究領域を更に巻き込み、海外の研究者との交流・研究成果発信に益々努めていく必要があるということを感じたシンポジウムであった。

(文責、佐藤 昌利)

シンポジウムの後、立ち寄ったストックホルム宮殿で Fu 氏との記念撮影



NEW FORMS OF MATTER: TOPOLOGICAL INSULATORS AND SUPERCONDUCTORS

PROGRAM

FRIDAY MORNING, JUNE 13 —

TOPOLOGICAL INSULATORS I

09:00 - 09:15	Opening address	15:45 - 16:15	T.L. Hughes (University of Illinois, Urbana-Champaign, USA), Interplay between Symmetry and Geometry in Topological Phases
09:15 - 10:00	M.Z. Hasan (Princeton University, USA), Topological Insulators: A New Form of Quantum Matter	16:15 - 16:45	S. Ryu (University of Illinois, Urbana-Champaign, USA), Generalized Laughlin's argument for symmetry protected topological phases
10:00 - 10:30	L. Molenkarnp (Würzburg University, Germany), HgTe? a Topological Insulator in 2 and 3 Dimensions	16:45 - 17:00	Short break
10:30 - 11:00	Coffee break	17:00 - 17:30	M. R. Zirnbauer (University of Cologne 7 Germany), Bott periodicity for Z2 symmetric ground states of gapped free-fermion systems with disorder
11:00 - 11:30	Q.-K* Xue (Tsinghua University, China), Experimental realization of quantum anomalous Hall effect	17:30 - 18:00	X.-L. Qi (Stanford University, USA), Layer construction of three-dimensional topological states a
11:30- 12:00	B.A. Bernevig (Princeton University, USA), Topological Insulators Without Spin-Orbit Coupling		
12:00-12:30	L. Fu (Massachusetts Institute of Technology, USA), Topological crystalline insulators		

FRIDAY AFTERNOON, JUNE 13 —

TOPOLOGICAL INSULATORS II

14:00 -14:45	EJ. Mele (University of Pennsylvania, Philadelphia, USA), The winding road to topological insulators	09:00 - 09:45	C. M. Marcus (University of Copenhagen, Denmark), Hard-gap superconductor-semiconductor devices and topological superconductivity
14:45 -15:15	T. Neupert (Princeton University, USA), Fractional Chern Insulators	09:45 - 10:15	M. Heiblum (Weizmann Institute of Science, Israel), Proliferation of neutral modes in fractional quantum Hall states
15:15 -15:45	Coffee break	10:15 -10:45	Coffee break
15:45 -16:15	C. Chamon (Boston University, USA), Fractional Topological Insulators	10:45 -11:15	A. Yazdani (Princeton University, USA), Visualizing Topological Quantum States: From Dirac edge states to Majorana zero modes
16:15 -16:45	A. Altland (University of Cologne, Germany), Quantum criticality of the one dimensional topological Anderson insulator	11:15 -11:45	A. Vishwanath (University of California, Berkeley, USA), TBA.
16:45 -17:00	Short break	11:45- 12:15	S. Das Sarma (University of Maryland? USA) Has (the) Majorana really returned?
17:00 -17:30	A. Stern (Weizmann Institute of Science, Israel) Non-abelian physics between one and two dimensions		

SATURDAY MORNING, JUNE 14 —

ONE-DIMENSIONAL SYSTEMS AND MAJORANA FERMIONS I

09:00 - 09:45	J. Alicea (California Institute of Technology, USA), Majorana Materializes	14:00 -14:30	S.C. Zhang (Stanford University, USA), Topological insulators and topological superconductors
09:45 -10:15	C.W.J. Beenakker (Leiden University, The Netherlands), Super-Ohmic conduction of edge modes in topological insulator's and superconductors	14:30 -15:00	N. Read (Yale University, USA), Chiral topological phases and entanglement
10:15 -10:45	Coffee break	15:00 -15:15	Short break
10:45 -11:15	F. von Oppen (Free University Berlin, Germany), Topological superconducting phase in helical Shiba chains	15:15 -15:45	F. Wilczek (Massachusetts Institute of Technology, USA), Entangled Histories
11:15- 11:45	C.L. Kane (University of Pennsylvania? Philadelphia, USA), Topological Superconductivity and, the Fractional Josephson Effect	15:45 -16:15	G. E. Volovik (Aalto University Finland), From Standard Model of particle physics to room-temperature superconductivity
11:45 -12:15	H.Q. Xu (Lund University, Sweden), Majorana fermions in topological superconductor nanowires	16:15 -16:45	Coffee break
14:00 - 14:45	A.W.W. Ludwig (University of California, Santa Barbara, USA), TBA.	16:45 -17:45	Panel discussion
14:45 -15:15	F.D. M. Haldane (Princeton University, USA), "Quantum Geometry" and Topological Insulators	17:45 -18:00	Closing remarks
15:15 -15:45	Coffee break		

SUNDAY MORNING, JUNE 15 —

ONE-DIMENSIONAL SYSTEMS AND MAJORANA FERMIONS XI

09:00 - 09:45	C. M. Marcus (University of Copenhagen, Denmark), Hard-gap superconductor-semiconductor devices and topological superconductivity
09:45 - 10:15	M. Heiblum (Weizmann Institute of Science, Israel), Proliferation of neutral modes in fractional quantum Hall states
10:15 -10:45	Coffee break
10:45 -11:15	A. Yazdani (Princeton University, USA), Visualizing Topological Quantum States: From Dirac edge states to Majorana zero modes
11:15 -11:45	A. Vishwanath (University of California, Berkeley, USA), TBA.
11:45- 12:15	S. Das Sarma (University of Maryland? USA) Has (the) Majorana really returned?

SUNDAY AFTERNOON, JUNE 15 —

PANEL SESSION

14:00 -14:30	S.C. Zhang (Stanford University, USA), Topological insulators and topological superconductors
14:30 -15:00	N. Read (Yale University, USA), Chiral topological phases and entanglement
15:00 -15:15	Short break
15:15 -15:45	F. Wilczek (Massachusetts Institute of Technology, USA), Entangled Histories
15:45 -16:15	G. E. Volovik (Aalto University Finland), From Standard Model of particle physics to room-temperature superconductivity
16:15 -16:45	Coffee break
16:45 -17:45	Panel discussion
17:45 -18:00	Closing remarks

優秀さの3段階と独自の課題を見つける「地図メソッド」

上田 正仁 / 東京大学 大学院理学系研究科 教授

柏谷編集委員長から「若手への勉強法の伝授」について書くように仰せつかりました。これは、おそらく拙著「東大物理学者が教える「考える力」の鍛え方」（ブックマン社）の関連での依頼であると思います。この本は、駒場キャンパスで「物理の基礎方程式」に関する授業をした際に、新入生にはその前に学ぶことがあると考えて「(アカデミックな) 人生の基礎方程式」と銘打った授業を行ったところ、受講者が5倍以上に膨れ上がり1限であるにもかかわらず立ち見の学生が続出しました。そこでわかったことは、優秀な学生に共通した悩みがあるということです。自分に才能はあるのか。周りの学生が偉く見える、自分はその中でついていけないのか、研究者としてあるいは社会に出てやっていけないのかなど真剣な悩みを多くの皆さんが持っていました。そういうことについて対話をしようではないかというのがこの授業の目的です。その中から私自身が学ばせていただいたことが、この本を書く直接の動機となりました（授業では「物理の基礎方程式」の話しもちろんちゃんと行いました）。本の内容は、「優秀さの3段階」という話から初めて、考える力を鍛え、自ら課題を見つけ、独創的な仕事をするためにはどうすればよいかという「アカデミックスキル」的なことを段階を追って説明したものです。そこには、わたくしの大学院生に対する指導経験も反映されています。この意味で、本書の内容をかいつまんでお伝えすることは確かに「若手への勉強法」の参考になるかもしれません。

講義で「対話」したことは、大学で伸びる人と、社会あるいは大学院で伸びる人は一体どんなタイプかです。

まず、いわゆる優秀層は、高校まで、大学（学部）まで、そして大学院（社会）でガラッと変わります。それはなぜか？よく言われるのは、モチベーションが持続し

ないということです。しかし、これが当てはまるのはモチベーションを持たないで大学に入学した少数派だと思います。本当の答えは、評価基準が突然変化することだと思います。優秀さの評価基準が人生の各段階で突然変化するのは、これが「優秀さの3段階」です。

まず大学入試までは、マニュアル通りに正確に解く力である「マニュアル力」で優秀さが評価されます。ところが大学に入ったとたん、考える力が要求されるようになります。一つの問題について深く考えることが要求されるようになるのです。この評価基準は、突然、前触れもなく変わります。では大学院、あるいは社会に出たらどうなるかという、今度は課題を自分で見つけなさいと言われます。つまり、創造力が要求されるようになるのです。

「マニュアル力」とはなにか？それは、一通りに答えが決まった問題を、与えられた時間の中にできるだけ早く正確に解く能力です。類型化された問題を正しい手順に従って解くスキルと言うこともできます。これは、試験あるいは偏差値で測ることのできる力です。テレビのクイズで、あの人は頭が良いというときに測られる力もマニュアル力です。マニュアル力の高い人は、一般に高学歴、あるいは頭が良いと言われます。

ところが、大学では数週間から数か月間も一つの問題に取り組んでそれを解決できる人が高く評価されます。このように評価基準が突然変化するために、マニュアル的な問題を解くことがあまり得意でないような、一見鈍感そうに見える学生が、大学に入って力を発揮することがよくあります。彼らは高校までは、比較的鈍感だと言われていました。短い時間でパッと答えが出ないからです。ところが、そういう人の中で、じっと考えることが得意な人がいます。そういう人が大学に入ってから高く評価されるのです。

大学院に入って研究を始めてから評価されるのは、もちろん創造力です。創造力とは自ら課題を見つけて、それに対して独自の解決法を編み出す力を言います。実社会では上に述べた3つの力の総合力が評価されますが、学問の世界では創造力が特に高く評価されるといふ点が際立って異なっています。

マニュアル力、考える力、創造力はお互い相反するものかという点、そうではなく、これら三つの力は互いに密接に関連しているということが重要なポイントです。マニュアル力があって初めて考える力ができます。考える力は、創造力を発揮するためにぜひとも必要です。「学びて思わざれば則ち罔し（くらし）、思ひて学ばざれば則ち殆し（あやうし）」。学ぶだけで考えることができなければ、思考がどうしても暗くなってしまいます。既に分かっていることを学ばなければ、考えが非常に危うい方向に行きます。これは孔子の時代からよく知られている教訓です。

ですから、受験勉強が役に立たないというのは完全な誤りです。教育評論家の間ですら、受験勉強は役に立たないということがしばしば言われますが、それはうそです。受験勉強で学ぶ「マニュアル力」は、その時期に身に付けなければいけない、非常に重要なスキルなのです。ただし、それが全てだと思つと、大学に入ったとき、社会に出たときに挫折する原因になります。

最後に、自ら課題を見つけるヒントについて述べたいと思います。私の研究室の学生さんには、よく地図メソッドが役に立つと話しています。これは独創の種を見つける方法で、問題意識を明確にして、問題の核

心を浮かび上がらせる方法です。まず、関心のあるテーマに関して、それに関連しそうなテーマの資料を徹底的に集めます。今ではインターネットや文献検索が簡単に使えます。まずこの時点で、徹底的に資料を集めることが重要です。普通は資料を集めておしまいというのがほとんどですが、それでは駄目です。資料を丹念に読み込んでいって、既に分かっていることを整理します。そして、分かっていることの間にはどのような関係があるかを整理するのです。それを丹念にやっていると、分かっていることが何か分かってきます。

研究をするときに学生さんがよく陥るわながあります。論文などは大変熱心に読みますが、そのときにネタを探そうとして読むと駄目なのです。それは、既にある論文のネタの延長線上に意識が集中するからです。そうではなくて、自分の中に問題意識があって、そこで何が分かっているかを見極めるために関連文献を読むのです。分かっていることが何かと同時に、何が分かっているのかということ意識しながら、既存の文献を読み込んでいくのです。そうすると頭の中で分かっていることと、分かっていることが整理されてきます。また、分かっていることの相互の関連も分かってきます。これが地図です。同時に、何が分かっているのか、分かっていることの中で何が本質的な理解につながっているのかが洞察できるようになるのです。これは、大変努力の要る地味なことなのですが、非常に有効な方法です。そして、その努力をすることであなた独自の課題が必ず見つかります。

(文責、上田 正仁)



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。スペースが許す限り、なるべく（１）でお願いします。ただし以下で課題番号は、A01: 22103002, B01: 22103003, C01: 22103004, D01: 22103005, 公募研究: 25103701 - 25103724 です。

(1) This work was supported by the "Topological Quantum Phenomena" (No. 22103002) Grant-in Aid for Scientific Research on Innovative Areas from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan.

(2) This work was supported by the "Topological Quantum Phenomena" (No. 22103002) KAKENHI on Innovative Areas from MEXT of Japan.

(3) This work was supported by the MEXT KAKENHI (No. 22103002).

編 集

後 記

今年もあわただしくお正月が終わってしまい、ニュースレターの記事を編集せねばならない季節がやってきました。5年にわたって毎年出版ができているのは、ひとえに研究者皆様の業績の蓄積と、編集をサポートしていただいている前野研究室の事務局の方々のおかげであり、まことに感謝の念に堪えません。また編集のサポートをしていただきました齋藤、山影両氏にも深く御礼申し上げます。ニュースレターは毎号大変な労力をかけて出しているわけですが、講演で聞いただけでは理解できていなかった事が、ニュースレターの記事を通してはっと気づくことが多々あり、情報誌としての役割を確かに果たせていると感じています。強く印象に残っている記事は2号の浅野さんのトピックと本号の上田さんのエッセイで、ともに内容の濃さのみでなく日本語の能力の高さを感じる素晴らしいものでした。また水島さんには2号連続して旅行記の執筆をお願いしたにもかかわらず、快く引き受けていただいたことを感謝しております。ニュースレターの過去号は以下のリンクからダウンロード可能です。記録のためにリンクを記しておきます。

http://www.topological-qp.jp/achievements/pdf/tqp_newsletter_no1.pdf

http://www.topological-qp.jp/achievements/pdf/tqp_newsletter_no2.pdf

http://www.topological-qp.jp/achievements/pdf/tqp_newsletter_no3.pdf

http://www.topological-qp.jp/achievements/pdf/tqp_newsletter_no4.pdf

http://www.topological-qp.jp/achievements/pdf/tqp_newsletter_no5.pdf (予定)

(文責、柏谷 聡)