

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

光学顕微鏡の空間分解能は通常波長程度に制限される。この限界を越えるのが近接場走査型光学顕微鏡である。これ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光を用いて、光の回折限界以下のものを観察する走査プローブ顕微鏡の一種である。我々は、希釈冷凍機温度強磁場中で動作する近接場走査型光学顕微鏡を新たに開発し、量子ホール系カイラルエッジ状態の研究を進めている [1]。

本測定方法の概略図を図 1 に示す。近接場プローブを試料表面上走査して約 100 nm の分解能で局所光照射し、強磁場中で電極 1-2 間に生じる光起電圧をマッピングした。その結果、磁場の増大に伴い試料端から内側へシフトするカイラルエッジ状態に起因するマップ図を得、スピン分裂した量子ホールカイラルエッジ状態の可視化に初めて成功した。このようにプローブに光を用いる利点は、波長選択により特定の量子状態を励起可能なこと、表面から離れた内側の状態を調べることが可能なこと、さらに円偏光照射によりスピン注入が可能なことにある [2]。従来、近接場光プローブでは円偏光照射が難しいとされていたが、最近、外部偏向補償と軸対称な近接場プローブの開発により円偏光度 95% 以上が実現された。この研究成果は、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. Nomura et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 096803 (2004).



のむら・しんたろう

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

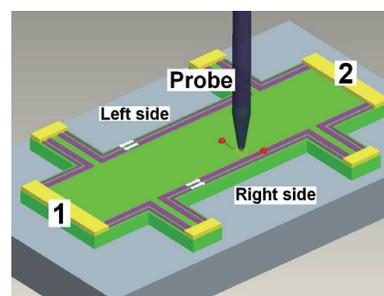


図 1 : 近接場走査型光学顕微鏡を用いたカイラルエッジ状態のマッピングの測定方法の概略図。

スピン三重項超伝導体 UPt_3 の準粒子低エネルギー励起構造の解明

井澤 公一 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授

これまで強相関電子系でみられる異常な金属状態や超伝導状態などの特異な量子現象に興味をもち研究してきました。特に超伝導では、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を目指し、熱輸送係数や比熱の磁場方向依存性の精密測定からクーパー対の“形”（対称性）を調べてきました。

近年、 UGe_2 、 $URhGe$ 、 $UCoGe$ にみられる強磁性超伝導や $CePt_3Si$ 、 $CeRhSi_3$ 、 $CeIrSi_3$ でみられる空間反転対称性の破れた超伝導など、興味深い非従来型超伝導体が数多く発見され、その多彩でエキゾチックな超伝導状態に多くの注目が集まっています。それに対して UPt_3 は発見から30年近い長い歴史をもつ超伝導体ですが、A相、B相、C相の少なくとも3つの明確な多重超伝導相をもつ奇パリティ超伝導体として他とは一線を画する存在で、超伝導研究において最も重要な物質の一つです。これまでの数多い研究の結果、 UPt_3 では既約表現 E_{2u} に属する超伝導対称性が実現していると長らく信じられてきました。しかしその一方で、この E_{2u} 対称性で期待されるギャップ構造は実験で直接的には確かめられてはいないことや、いくつかの UPt_3 に特徴的な実験事実を単純には説明することが出来ないといった問題点があり、実際には理解されているという状況ではありませんでした。そこで我々は UPt_3 の準粒子低エネルギー励起構造を調べ、C相で自発的に回転対称性を破った超伝導状態が実現していることを見出しました（図1）。そして UPt_3 における超伝導対称性が、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 波超伝導であること、さらにその対称性により UPt_3 で四半世紀以上謎であったいくつかの問題が自然に説明できることを明らかにしました [1]。

今後、従来の研究手法にとらわれず、新しい手法・概念を積極的に導入し、 UPt_3 で実現している3つの超伝導状態の詳細をさらに調べることで、スピン三重項超伝導や多重超伝導の一般的理解を深めたいと考えています。特に、 UPt_3 はトポロジカル超伝導体である可能性が理論的に指摘されていることから、上で述べた取り組みに加え、トポロジカルな性質がもたらす新奇現象を探索し、トポロジカルな特異性がどのように物性に具現化されるかを明らかにすることも目指したいと考えています。そして、これまで理解されなかった現象の理解だけでなく、新しい現象・概念を創出するような研究を展開してゆきたいと思っています。

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

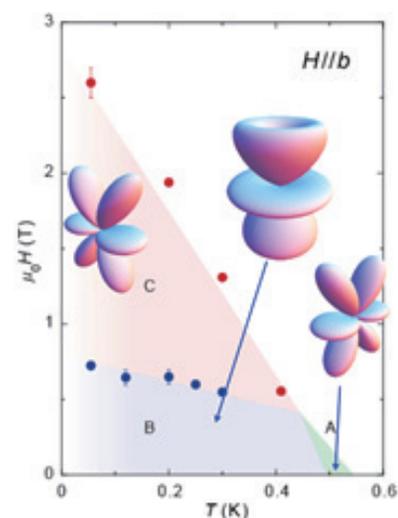


図1： UPt_3 の相図と角度分解熱伝導率測定により決定した各相での超伝導対関数。

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

固体が示す超伝導をはじめとした様々な興味深い現象は、固体中で電子がどのように運動しているのか、という事と密接に関わっています。この固体中の電子の振る舞い（エネルギー・運動量）を調べる最も直接的な実験手法が、角度分解光電子分光（ARPES）です。これまでの研究では、銅酸化物高温超伝導体やルテニウム酸化物超伝導体（ Sr_2RuO_4 ）中で、どのように電子が運動しているのかを、ARPESにより精密に調べてきました。近年では、電子の運動を数 meV の精度で精密に調べることが可能となったことで、固体中の電子が、どのように相互作用（＝電子と他の電子の間の相互作用や電子と格子振動の間の相互作用など）を受けているのか、また、そのような相互作用が超伝導を担うクーパ対の形成にどう関与しているのか、という問題に興味をもって研究を進めています。

本公募研究課題では、ルテニウム酸化物超伝導体（ Sr_2RuO_4 ）の電子状態および電子の持つスピンの状態を明らかにすることを目的とします。 Sr_2RuO_4 は時間反転対称性の破れたカイラル p 波のスピン三重項超伝導状態をとることが有力視されています。従って、 Sr_2RuO_4 のバルク・表面における電子・スピン状態を理解することが、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の形成に繋がるのではないかと期待しています。

本公募研究課題では、広島大学放射光科学研究センターが有する世界最高水準の高分解能 ARPES 装置ならびに超低速電子線回折（Very Low Energy Electron Diffraction: VLEED）型スピン分解 ARPES 装置（[図 1](#)）を駆使して、 Sr_2RuO_4 のバルク・表面の電子・スピン状態の解明に取り組みます。



いわさわ・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、現職。小さい頃から大学まで部活で続けていたサッカーが今でも趣味です。



図 1：世界最高効率の VLEED 型スピン分解光電子分光装置

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

私がこれまで研究してきた、重い電子系超伝導体と呼ばれる Ce 化合物や U 化合物では、超伝導電子対が従来型のスピン 1 重項 s 波とは異なる状態にあると考えられており、そ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薄い常伝導金属を挟んだジョセフソン接合を流れる超伝導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の方きの情報が得られます (図 1 (a))。また、後者の点接合分光は、ピエゾ素子を用いて試料に常伝導金属の針を接触させ、その微分抵抗を測定するもので、エネルギーギャップの情報が得られます (図 1 (b))。

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。我々の B 相におけるジョセフソン効果の結果は E_{1u} を支持していますが [1]、本研究では他の相、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、磁場に弱いジョセフソン効果の研究を実現させます。

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。最近の研究で、点接合の微分抵抗は、 UBe_{13} の転移温度 $T_c \sim 0.9$ K 以下と 0.6 K 以下で減少する 2 段階の転移を示しており、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.: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 113701.

[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。

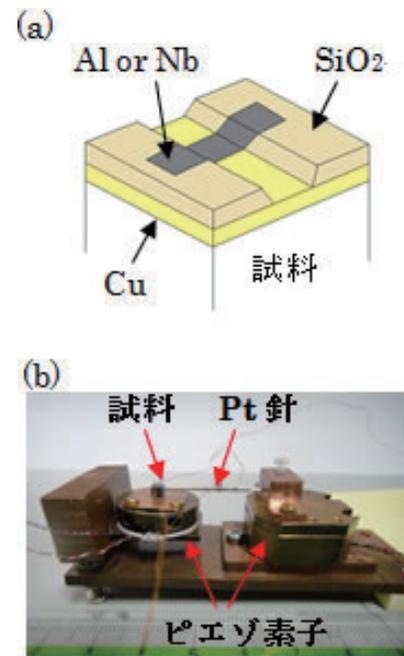


図 1 (a) ジョセフソン素子の概略図と (b) ピエゾ素子を用いた点接合形成器具。

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

A01 班の公募研究に参加させていただいています。私が本公募研究で行っているのは通常の s 波超伝導体のニオブとカイラル p 波超伝導体の Sr_2RuO_4 を用いたマイクロメートルサイズの単一超伝導ループによるハイブリッド超伝導位相干渉計 (SQUID) の研究です。私はこのハイブリッド SQUID によってカイラル p 波超伝導体の超伝導位相を検出し、 Sr_2RuO_4 超伝導対称性の検証、 Sr_2RuO_4 と Ru の共晶に出現する 3K 相の超伝導対称性についての検証を行います。また、このハイブリッド SQUID には磁束量子が半分大ききで現れる半整数量子渦の実現も期待されています。半整数量子渦はマヨラナフェルミオンとの関連しており、このハイブリッド SQUID の研究をトポロジカル量子計算につなげることができればと考えています。

これまでの研究で、このハイブリッド SQUID の臨界電流の磁場依存性から高次のジョセフソン電流の存在や、一部の温度領域において SQUID の位相が 180 度シフトした π SQUID 状態の観測など、カイラル超伝導体の超伝導対称性を反映した現象が観測されています。またこの小さな SQUID の Sr_2RuO_4 部においてもカイラルドメインが複数存在していることも明らかになったため、さらにサイズを小さくすることで単一のカイラルドメインの Sr_2RuO_4 を実現し、分かりやすくかつ制御性に優れた素子を開発し、研究を進めていきたいと思います。



いしぐる・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。京都大学大学院理学研究科博士課程修了 2003 年パリ高等師範学校 博士研究員、海外特別研究員。2006 年大阪市立大学 博士研究員。2008 年東京理科大学理学部応用物理学科 嘱託助教。2013 年 現職。低温物理学の分野で研究を行っています。

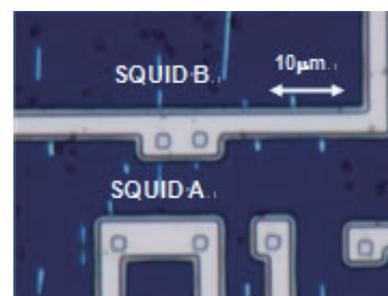


図 1：フォトリソグラフィーによるハイブリッド SQUID。
 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶と Nb 配線によって立体的な超伝導ループを構成。

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求するためにNMRの発展型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、超低温MRI撮影装置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などについて研究しています。また外場による変形のダイナミクスなどを調べることでテクスチャー制御の可能性を追求したいと思っています。

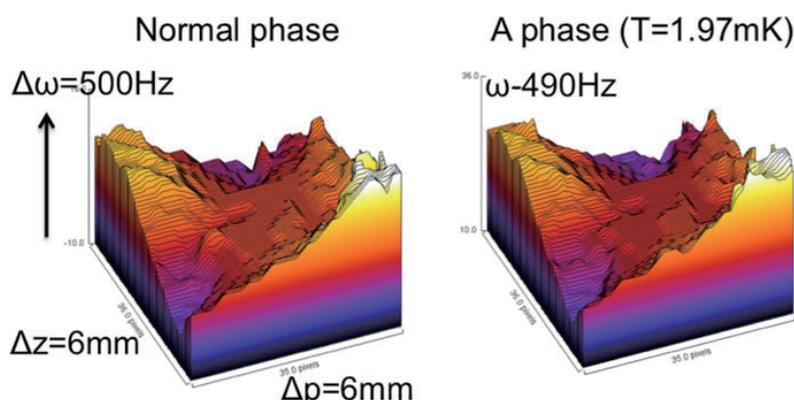
通常のMRI撮影では信号源となる核スピンの密度の空間分布のみを取得するのですが、現在開発中の新手法ULTMRSIでは共鳴周波数の空間分布も同時に取得することができ、その情報から空間不均質な秩序状態の空間変化を直接知ることができます。この世界初の測定法を利用して、超流動ヘリウム中に現れるトポロジカルオブジェクトを実空間で可視化する計画を進めています。

図に示したのは厚さ100 μm の平行平板セルに閉じ込められた液体ヘリウム3から取得したセル内の磁場分布(p_z 面内の共鳴周波数 $\omega \sim 5$ MHzの分布を鳥瞰図で表示)と、同じ分布を超流動A相の状態取得したものです。非線形なNMR応答をすることで知られている超流動相でもULTMRSI法により一様に周波数シフトをしている様が測定出来たことが確認できます。



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。写真の背景はアイラ島のBowmore蒸留所の蔵。



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

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) 実験を行っています。電子は「エネルギー」「運動量」「スピン」という自由度を持っていますが、スピ分解 ARPES という手法は、この物理量のすべてを決定できる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「スピ分解高分解能光電子分光装置」(図1)の開発を行い、様々な改良の結果、スピ分解時において 8 meV という世界最高のエネルギー分解能を達成しました。現在は、本装置や高輝度放射光を用いて、トポロジカル絶縁体とその関連物質の電子構造の解明を行っています。

C01 班の大阪大学の瀬川・安藤グループと共同で、幾つかの新種のトポロジカル絶縁体の同定や、トポロジカル転移に伴う電子状態の変化を捉えることに成功しています。最近、IV-VI 族半導体 SnTe が、2重のディラックコーン(図2)を持つ新種のトポロジカル物質「トポロジカルクリスタル絶縁体」であることを同定し、一方で、姉妹物質の PbTe は普通の絶縁体であることを明らかにしました。この実験を拡張して $Pb_{1-x}Sn_xTe$ 固溶系の ARPES 測定を行い、トポロジカル相においてディラックコーンが波数空間を移動するという不思議な現象を明らかにしました。また、トポロジカル超伝導候補物質である In を部分置換した SnTe の電子構造を決定し、超伝導組成においても 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。

今後は、さらなる高分解能を目指した新型スピ分解光電子分光装置の開発を行い、種々のトポロジカル物質のスピに依存した電子構造を高精度で決定して、トポロジカル新奇物性発現に関するフェルミ準位近傍の微細電子構造を明らかにしていきたいと考えています。



さとう・たかふみ

秋田県出身: 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。

料理が趣味。調味料の微妙なブレンドが実験家の腕の見せ所。

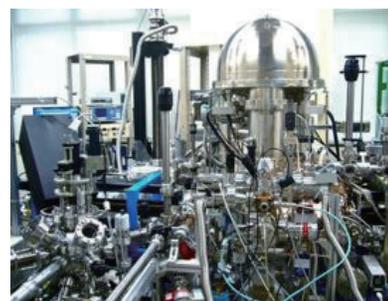


図1: 超高分解能スピ分解光電子分光装置

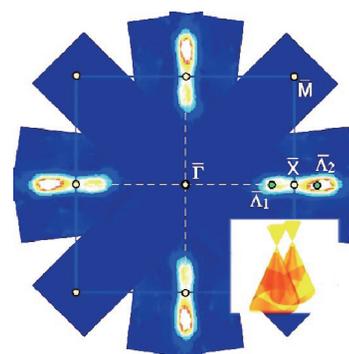


図2: SnTe のフェルミ面と二重ディラックコーン

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、バルクはエネルギー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。スピンプンプと呼ばれるマイクロ波を用いた手法を用いると、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の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。

今年度は、まずバルク結晶のトポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ | 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、 $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ 試料において、磁場に対して偶のゼーベック信号に加え、磁場に対して奇の信号が低温で見られることを確認しました。 Bi_2Se_3 などにおける対照実験の結果との比較により、この信号が、世界で初めてとなる、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]。これまでのスピントロニクスの研究は、スピン流が非保存量であるため、ナノメートルスケールの薄膜構造を用いて行われてきましたが、トポロジカル絶縁体は天然の疑似薄膜構造をもつため、バルク結晶でもスピントロニクス実験が可能であることがわかりました。

今後は、今回の研究結果を発展させ、表面状態の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, "Bulk topological insulators as inborn spintronics detectors", arXiv:1312.7091 (2013).



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。仙台は寒いと感じる今日この頃です。

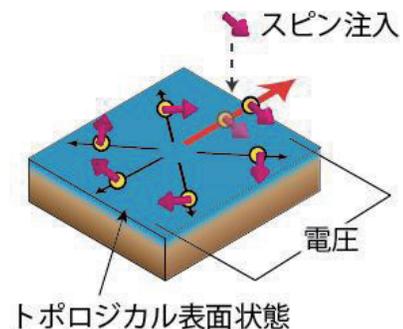


図1：トポロジカル絶縁体へのスピン注入と誘起される電圧信号

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 / 京都大学大学院理学研究科 准教授

強相関電子系において現れる様々な量子現象に興味を持って、低温の物性実験研究を推進しています。特に、高温超伝導体、鉄系超伝導体、重い電子系超伝導体などの非従来型超伝導における超伝導対称性や電子相図の解明を、低エネルギー準粒子励起に敏感な物理量である磁場侵入長や熱伝導率の精密測定により行ってきました。また、量子相転移現象にも着目し、化学組成や磁場、さらに次元性などの温度以外の外部パラメータを制御することにより量子臨界点の物理を研究しています。

新学術領域では、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 [1,2] 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指します。図1は重い電子系超伝導体CeCoIn₅と、同じ結晶構造を持つ通常金属YbCoIn₅の超格子の一例です [2]。このような超格子において、特に、f電子と伝導電子の混成による重い電子状態が実現するCe原子を含む層の層数を固定し、通常の金属状態であるYb層の層数に変調をかけることにより、反転対称性の破れを制御することが可能となります。

このような自然界には存在しない系での超伝導特性に着目して研究を行っていきます。

[1] H. Shishido et al., Science **327**, 980-983 (2010).

[2] Y. Mizukami et al., Nature Phys. **7**, 849-853 (2011).

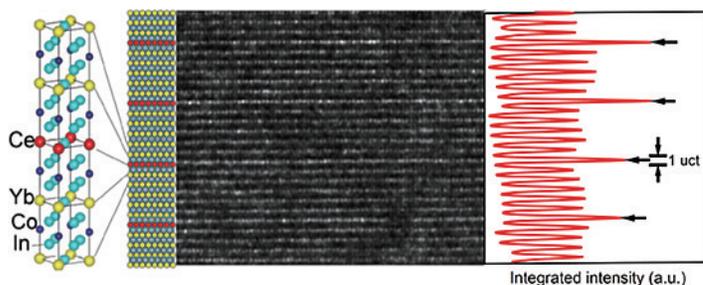


図1：重い電子系超伝導体CeCoIn₅と、同じ結晶構造を持つ通常金属YbCoIn₅の超格子の透過型電子顕微鏡像とその強度を横方向に積分したもの(右)。



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教、ロスアラモス米国立研究所研究員、2001年京都大学工学研究科助教授を経て、2005年より京都大学理学研究科助教授(現准教授)。

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 / 大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教

3次元トポロジカル絶縁体の表面状態には熱平衡状態でも純スピンの流が存在すると言われています。また、電子の運動量とスピン角運動量に強い相関があり、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。これら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nde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。スピン特性は強磁性体/3次元トポロジカル絶縁体ヘテロ界面を形成することにより、電気的に検出することができます。しかし、検出に用いる強磁性体のスピン特性はヘテロ界面状態の劣化により著しく低下します。従って、3次元トポロジカル絶縁体のスピン機能発現にはヘテロ界面の精密制御が鍵となります。本研究ではこれまでのスピントロニクス研究で培った界面制御技術を駆使し、3次元トポロジカル絶縁体におけるスピン機能の発現に適したヘテロ界面の実現を目指します。

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10 nmに薄片化した試料に、微細加工プロセスにより数100 nmスケール強磁性体・非磁性体電極を配置しデバイスを形成します。これまでは強磁性体電極にパーマロイ ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) を用いた素子を用いて、界面抵抗の磁化方向依存性 (磁気抵抗効果) を評価してきました。その結果、表面伝導が支配的な低温 (~ 30 K) において、強磁性体の磁化の向き・印加電流の極性に依存して界面抵抗が変化することが判明しました。この挙動はバルク伝導が顕在化する室温では消失します。これらの結果から、トポロジカル絶縁体中に印加された電流により生成されたスピン流が、ヘテロ界面においてスピン依存伝導を示すことにより磁気抵抗効果が観測されたと考えられます。この磁気抵抗効果を定量的に評価することにより、3次元トポロジカル絶縁体のスピン特性を解明できると期待されます。今後はより精密なスピン特性の評価を行う他、液体窒素温度での強磁性体形成や、界面トンネル絶縁膜を挿入したデバイスを作製し、スピン特性の高効率検出に適したヘテロ界面の実現を目指します。



あんどう・ゆういちろう

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月より現職。

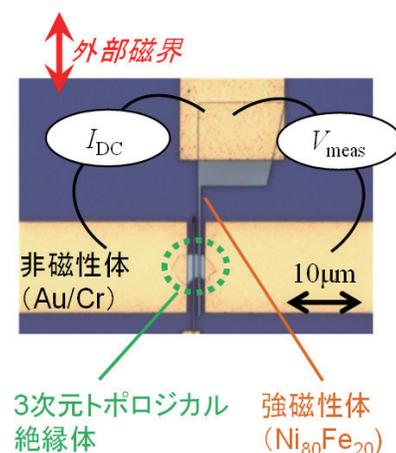


図1: 3次元トポロジカル絶縁体を用いたスピndeバイスの光学顕微鏡像。

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

超低温における低次元量子凝縮系の物性に興味を持ち、研究を続けて来ました。京都大学における大学院時代には、絶対零度まで永久気体として存在する偏極原子状水素の2次元超流動の探索を行いました。理化学研究所では、液体ヘリウム上に浮かんだ2次元電子の研究を行いました。近年は、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、分数量子ホール効果における動的核スピン偏極の研究や、2次元電子系の対象をグラフェンにまで広げて、研究を進めています。

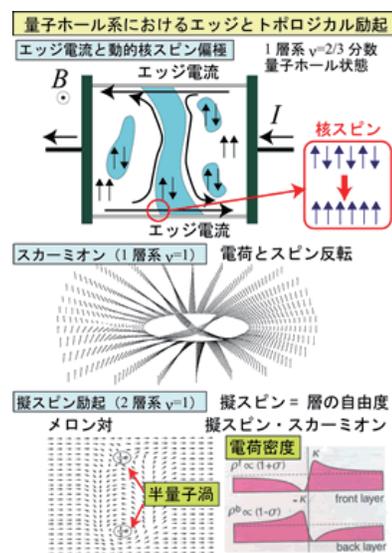
量子ホール状態、特に2層系量子ホール効果を中心に、ソリトン格子相 [1]、傾角反強磁性相 [2] や SU(4) スカームイオン [3] の発見、半量子渦対の乖離としての Kosterlitz-Thouless 転移の観測 [4]、層間核スピン拡散の測定 [5] などを行いました。今後は、電気伝導測定のみならず、動的核スピン偏極現象や磁気抵抗検出型 NMR などを用いて、エッジ状態での電子の散乱機構とエッジの動的変化過程、および半量子渦対や磁気ロトン、スカームイオンなどの量子ホール系特有のトポロジカルな励起状態の特定とその生成・消滅機構を解明します。トポロジカル絶縁体の研究グループとは、類似点及び相違点双方に着目して、互いに相補的にさまざまな物理現象を解明できる可能性を楽しみにしています。

- [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).



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。



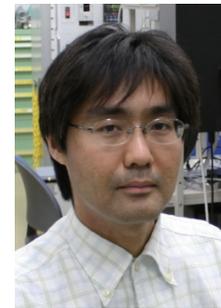
超格子バンドエンジニアリングを用いた トポロジカル絶縁体の実現

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。このことから、「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。本研究では原子層レベルで制御可能な薄膜合成技術を駆使して、イリジウム酸化物においてトポロジカル絶縁体を実現することを目的としています。

スピン - 軌道相互作用と電子相関との競合は、従来遍歴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 がモット絶縁体となることが示され、注目を集めています。一方、その三次元版である SrIrO_3 は格子歪みとスピン - 軌道相互作用の結合により半金属となります。前期では、 SrIrO_3 と SrTiO_3 からなる人工超格子薄膜 $[(\text{SrIrO}_3)_m, \text{SrTiO}_3]$ を $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上に作製し、 m を変化させることで次元性制御によるモット絶縁体 - 半金属転移を実現しました。これは人工超格子によるバンド構造制御、すなわち超格子バンドエンジニアリングの好例です。

前期の成果を活かして現在取り組んでいるのは、右に示すような (111) 方向に積み重なった $[(\text{SrIrO}_3)_2, (\text{SrTiO}_3)_2]$ 超格子の作製です。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、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。ところが、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、通常の合成法では実現が困難です。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。実績のある (001) 方向に比べて (111) 方向への積層は格段に難しいため苦戦はしていますが、目標に向けて一歩ずつ近づいています。



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。最近はずっかりご無沙汰ですが、学生時代に茶道をかじっておりました。

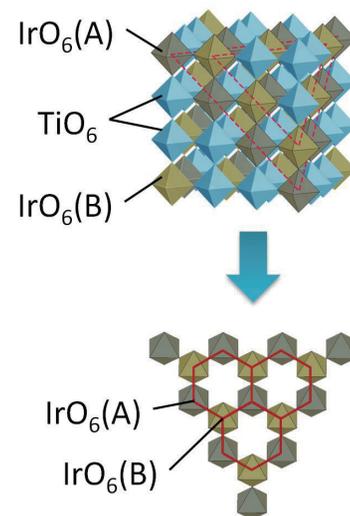


図 1 : (111) 方向に積層した人工超格子 $[(\text{SrIrO}_3)_2, (\text{SrTiO}_3)_2]$ の結晶構造。Ir 原子のみを抜き出すとハニカム格子を形成している。

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) は数万気圧という到達可能な圧力領域で超伝導を発現し、その転移温度 (T_c) は 7 - 8 K で単体としては比較的高く、さらに高圧側では圧力に伴い T_c が上昇することが知られています。この性質を受けて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着目し、高圧下での放射光 X 線回折や分光法、電気抵抗測定を実験手法として、 Bi_2Te_3 や Bi-Sb 全率固溶合金での圧力誘起超伝導を探索してきました。その後、これらの物質が 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、現在では高圧物性も広く研究されるようになってきました。

本公募研究では、トポロジカル絶縁体における圧力誘起超伝導の探索および転移機構の解明を目指しています。前述したように、 Bi_2Te_3 や Bi_2Se_3 等の A_2B_3 型トポロジカル絶縁体では既に超伝導が観測されています。我々のグループでは、図 1 に示すように Bi_2Te_3 で 6 GPa 以上 (1 GPa~1 万気圧) の圧力領域で超伝導を見出しました。また、室温での圧力誘起構造相転移との比較から、超伝導は高圧結晶相 (図中の $\text{C}2/m$ 構造) に起因すると報告してきました。しかし、他のグループからは 3 GPa 以上の圧力領域、つまりトポロジカル絶縁体相の $R-3m$ 構造から超伝導が発現するとの報告もあります。この相違はキャリア密度等の試料固体差に加えて、層状構造の圧縮に効く各測定での静水圧性の差 (圧縮環境の差) が要因のひとつとして考えられています。そのため本課題の研究期間において、低温高圧力下で複数の輸送特性が測定可能なシステムや結晶構造との同時測定法の構築も目指しています。最近では、3 次元ラッシュバ物質 BiTeX ($X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) において数万気圧での圧力誘起トポロジカル相転移 (trivial \rightarrow topological) が理論予測されており、トポロジカル量子現象の研究分野で圧力が貢献できる場が増えてきました。我々は共同研究者とともに、電気抵抗測定、結晶構造解析、バンド計算からトポロジカル相転移の探索を始めています。

高圧力を用いて、また実験および理論グループが連携して、トポロジカル絶縁体の物性を解明できることを楽しみにしております。



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信濃川土手散歩など。

Bi_2Te_3 における物性・構造の圧力変化

上段: 室温下の圧力誘起構造相転移
中段: 室温下の電気抵抗率
下段: 圧力誘起超伝導の転移温度 T_c

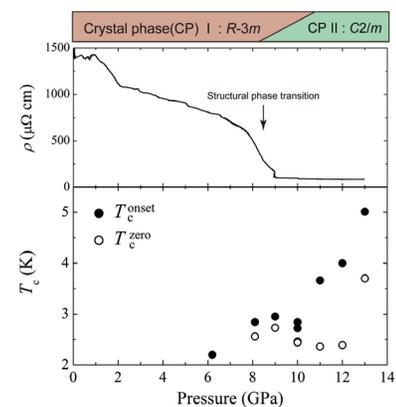


図 1 : Bi_2Te_3 の物性と結晶構造における圧力効果

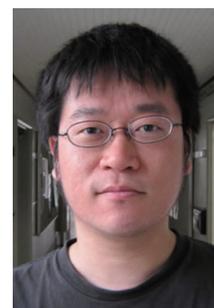
強磁性体／超伝導体接合におけるスピントロニクス

横山 毅人 / 東京工業大学 大学院理工学研究科

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

本領域では、強磁性体／超伝導体接合におけるスピントロニクス、特に強磁性により誘起された（奇周波数）トリプレット超伝導を用いた、電荷、スピン、位相の自由度の結合による新奇な現象を解明したいと思います。具体的には、トリプレットクーパー対誘起のホール流とスピン流を調べること、トリプレットクーパー対が磁化にどのようにトルクを与えるか明らかにし、磁化のダンピング及び電流誘起スピントルクを調べることを目的とします。従来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つつ、奇周波数トリプレット超伝導の示す物性を明らかにしたいと考えています。

また、強磁性体／超伝導体接合に限らず、トポロジカル絶縁体・超伝導体のテーマにも積極的に取り組み、対称性の破れた凝縮系の理解を少しでも深めることに貢献したいと思います。



よこやま・たけひと

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

トポロジカル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 ユニット長

近年トポロジカル超伝導のゼロエネルギー準粒子励起を用いたトポロジカル量子計算が注目を集めています。これらの励起は電子とホールとの1対1の重ね合わせで、粒子と反粒子が等価になるため、マヨラナ準粒子と呼ばれています。マヨラナ準粒子が非アーベル量子統計に従い、縮退した基底状態を持つので、量子ビットに利用できます。この場合、マヨラナ準粒子の位置交換は縮退部分空間内での状態のユニタリ変換に相当し、ビット演算になります。

我々は量子渦を含むトポロジカル超伝導サンプルのエッジに現れるマヨラナ準粒子に着目し、そのトポロジカル的な操作方法を考案しました。奇数個の量子渦を含むトポロジカル超伝導体では、量子渦のコアだけでなく、サンプルエッジにも必ずマヨラナ準粒子が励起されます。図1のように、超伝導サンプルを繋ぐくびれ部分にゲート電圧を印加して、サンプル間の電子ホッピングを遮断することで、サンプル間の連結及び連結されたサンプルに含まれる量子渦数の奇・偶を実効的に制御できます。我々はこの性質を利用して、エッジマヨラナ準粒子の高速な移動及び位置交換方法を見出しました [1]。これによって、非アーベル統計が実現できることも明らかになりました。

本年度の研究活動の一つとして1次元トポロジカル超伝導についても調べました。超伝導ワイヤの両端にあるマヨラナ準粒子を利用すれば、空間的に離れた二つの量子ドット間の量子絡み合い状態を生成できます。我々は二つの量子ドットがそれぞれ電子によって占められる確率と量子絡み合いの度合いを示す物理量 concurrence の間の定量的関係を明らかにしました [2]。既に確立されている実験方法を用いて量子ドットの電子占有率を測定すれば、量子ドット間の非局所的絡み合いが正確に分かります。この性質はマヨラナ準粒子存在の検証にも利用できます。

[1] Q.-F. Liang, Z. Wang, and X. Hu, Europhys. Lett. **99**, 50004 (2012) [Editors' choice].

[2] Z. Wang, X. -Y. Hu, Q. -F. Liang and X. Hu, Phys. Rev. B **87**, 214513 (2013).



ふ・しおー

1961年中国安徽省生まれ。1979年中国北京大学物理系に入学。中退して1981年に東京大学に入学、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。

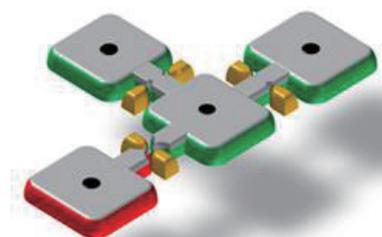


図1：マヨラナ準粒子の位置交換を行うデバイス

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

カイラル p 波超流動体あるいは超伝導体は、ヘリウム3の超流動状態を記述するものとして、また Sr_2RuO_4 の超伝導状態を記述するものとして重要な系である。また、近年はトポロジカル超流動の観点からも注目を集めている。カイラル p 波超流動体については、以前より「固有角運動量のパラドックス」が知られていた。これは、超流動体の全角運動量を問うものである。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は、通常はフェルミエネルギー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、超流動体の全角運動量は $N/2$ に比べて強く抑制されると考えられる。これら2つの直観的な描像にそれぞれ対応する具体的な計算結果も報告された。両者の間の矛盾を解明し、与えられた状況下での全角運動量の値を理論的に正しく求めることが一つの目標になる。これは物性物理学における基本問題であり、数十年にわたって研究されてきたが、解決には至っていなかった[1]。

この問題は、量子相転移とも深く結びついている。2次元のカイラル p 波超流動体は、強く対形成した相と、弱く対形成した相の2つを持つことがわかっている。対形成の強い極限では、全てのフェルミ粒子が対を作り、この対がボース粒子としてボース・アインシュタイン凝縮を起こす。この状況では、超流動体の全角運動量は $N/2$ になるはずである。しかし、主な興味の対象である、マヨラナモードを持つトポロジカル超流動相は弱く対形成した相であり、ボース・アインシュタイン凝縮の極限とは量子相転移によって隔てられている。この相での全角運動量の値は自明ではない。

無限系では角運動量をはじめとするさまざまな物理量が無限大になるので、数学的に確実な議論を行うには、まず有限系を考える必要がある。角運動量が保存されるには系が回転対称性を持つ必要がある。有限系としては回転対称なポテンシャル中の超流動体を考えることになる。このとき、トポロジカルな機構により、必然的に系の外側の境界付近にはギャップレスなエッジ状態が生じる。エッジ状態はエッジ流を担うことができ、これはまた角運動量に寄与する。このように、固有角運動量の問題は、エッジ状態とも密接に関連している。

本研究では、まず理想的な状況下で固有角運動量とエッジ流を解明するため、空間的に一様な対形成ギャップを仮定して、有限の大きさの回転対称ポテンシャル中のボゴリュエボフ・ドジャン方程式を解いて角運動量やその空間分布を求める。また、当初の研究提案は p 波に限定されていたが、さらに高次の d 波、 f 波等のカイラル超流動体も含めて統一的な理解を試みる。

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



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。

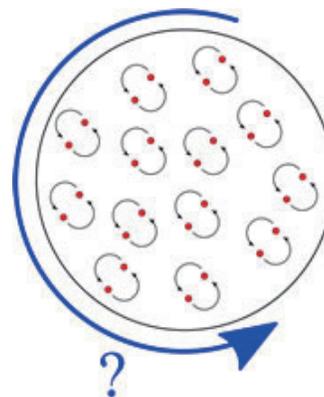


図1: カイラル超流動体の固有角運動量問題。 N 個のフェルミ粒子全てがクーパー対を形成するとすれば、系の全角運動量は $N/2$ (p 波の場合)となる。しかし、この結果がどの範囲まで成立するかは自明ではない。

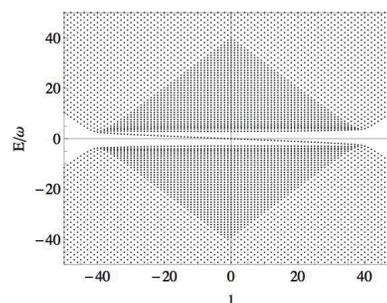


図2: 回転対称な2次元無限井戸型ポテンシャル中のカイラル p 波超流動体のエネルギースペクトル。対形成ギャップが開いているが、ギャップ中のエネルギー準位としてエッジ状態が存在している。

超流動 ^3He A 相 B 相また重い電子系超伝導体 UPt_3 を用いた トポロジカル現象の理論研究

町田 一成 / 岡山大学 大学院自然科学研究科特命 教授 (研究)

中性原子 ^3He 、 ^{87}Rb 、 ^{23}Na 等の集団が示す超流動状態や荷電粒子集団の示す超伝導状態は多体問題の典型例となっていて、その形成起源を探る研究は物性物理の根幹を成している。当該研究課題の下で、私はそうした超流動、超伝導に発現する準粒子構造の研究を行っている。長くに渡って回転系や超伝導体の磁場下で出現する渦の研究を実行してきた。秩序変数が一成分で記述されるスカラー超伝導体と並んで、多成分で記述される超流動状態の渦もその視野に入れながら、渦芯に束縛された準粒子構造を様々な理論形式を用いて研究してきた。ゼロエネルギー近傍に離散化して存在する、そうした束縛状態の直接観測は未だ誰も成功していない。当研究領域の大きな課題の一つは厳密にゼロ状態にある準粒子、即ち Majorana 粒子の探索がある。その意味ではこれは挑戦的な課題であるとも言えるし、またやりがいのある課題でもある。

私の当該領域におけるミッションの一つはこの離散化された渦芯束縛状態をいかに観測するかを理論的に解明することである。ごく最近 STM/STS 実験が Cu-doped Bi_2Se_3 に対して行われた [1,2,3]。渦近傍の局所状態密度の観測によりその特徴的な空間構造から渦芯束縛 Majorana 準粒子の可能性が指摘された。こうした実験を吟味する中で、上のミッションを達成する所存である。

[1] Jin-Peng Xu, et al, arXiv:1312.7110.

[2] Jin-Peng Xu, et al, arXiv:1312.3713.

[3] Mei-Xio Wang, et al, Science 336, 52 (2012).



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。

素粒子論的手法によるトポロジカル励起の研究

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、数学のトポロジーの重要性が増してきています。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。A駅からB駅まで行くのに、どれくらい時間がかかるかは無視して、行けるかどうかや何通りの行き方があるのかを考えるのはトポロジーの問題です。18世紀のプロイセン王国にケーニヒスベルクという都市がありました。7つの橋がかかっていたのですが、すべての橋を一回だけ渡って全部の橋を渡れるかと言う問題がありました。大数学者オイラーは、トポロジーの一分野のグラフ理論を使って、それが不可能であることを示しました。

私は、渦の研究を行っています。渦と言っても、皆さんが日常よく目にするあの渦、台風や竜巻、あるいはお風呂の水を流した時に出来る渦も流体の渦とは、少しだけ違っています。普通の水などは違い、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、粘性のないさらさらの流れが実現します。これをかき混ぜてやった場合に出来る渦は、「量子化された渦」なんです。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。1.5回だと結ぶことが出来ませんね。量子化された渦はそのようなものです。

このような渦はたくさんあると、お互いに反発しあいます。よって、超流体をぐるぐる回すと、三角形に配置されます。四角ではなく三角形なのは、それが一番ぎっしり敷き詰められるからです。超流体が2種類あるとさらに面白い構造になります。そのような場合で特に、2種類の超流体に特殊な相互作用がある場合の渦の格子を図1に表しました。さらに複数の超流体があると、さらに面白いことが出来ます。この場合は、グラフ理論で分類できます。図2には、7種類の超流体がある場合に、渦のグラフで作ったオリオン座を表しました。

現在はさらに中性子星という、とても高密度な天体に現れる渦に興味を持って研究しています。



にった・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。今年度は日々の授業から解放されて、伸び伸びと研究させていただいています。

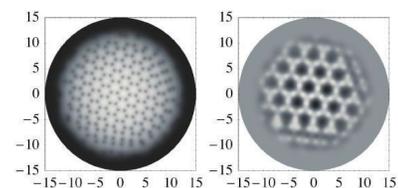


図1：渦格子

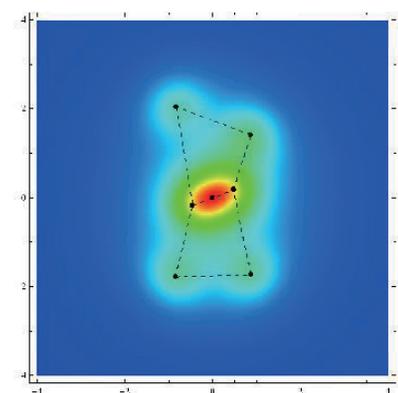


図2：渦グラフ

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



のむら・けんたろう

神奈川県出身

2003年東京大学大学院総合文化研究科博士課程終了。その後テキサス大学でポストドク、東北大学助教、理化学研究所研究員を経て、2012年より現職。

トポロジカル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よく知られていますが、トポロジカル不変量は観測可能なのだろうか？量子ホール効果ではホール伝導率の量子化値がチャーン数に一致しますが、例えば近年注目を集めている3次元のトポロジカル超伝導体・超流動体を特徴付ける巻き付き数はいかにして「測定」することができるのか？本プロジェクトでは交差相関応答に着目しこの問題を明らかにすべく研究を進めております。

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あるいは量子交差相関応答と呼ばれるものがあります。まずトポロジカル絶縁体の表面に磁性不純物をドーピングするなどして表面を量子ホール状態にします。図1にありますように、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。

これらの研究に興味を持ち我々はトポロジカル超伝導体や超流動体でも類似の現象がないかを模索しました。その結果、図2にあるように、温度勾配によって軌道角運動量が誘起される、あるいは試料の力学的回転によって熱分極が発生するといった熱と力学的回転の間の交差相関応答を発見いたしました。これらの関係式の係数、すなわち交差相関応答にトポロジカル不変量が現れます。これらの結果は現象論的な解析によって得られましたが、本プロジェクトでは微視的な立場から、具体的な模型に基づき軌道角運動量を計算しております。これは表面状態にギャップを開け熱量子ホール状態にすることが重要ですがこのときの条件によってバルクのトポロジカル不変量と交差相関係数が一致する事が確かめられました。今後はより広いクラスの交差相関応答を調べて行きたいと思っております。

[1] K. Nomura, S. Ryu, A. Furusaki, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **108**, 026802 (2012).

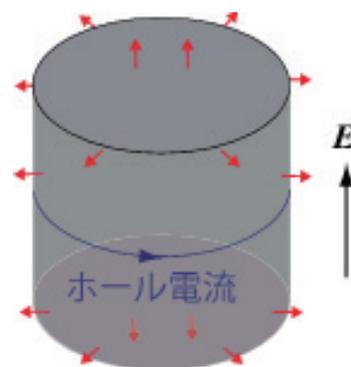


図1：トポロジカル絶縁体に電場をかけると表面に量子化ホール電流が流れる

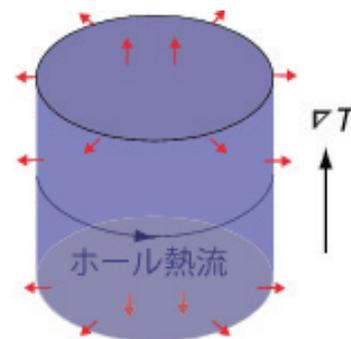


図2：トポロジカル超伝導体に温度勾配をかけると表面に量子化ホール熱流が流れる

多軌道モデルに基づくパリティがない超伝導の理論研究

柳瀬 陽一 / 新潟大学理学部物理学科 准教授



やなせ・よういち

多成分秩序変数によって記述される量子凝縮相は様々な自発的対称性の破れを伴い、ある場合にはトポロジカルに非自明な性質を示します。私はこれまでそのようなエキゾチック超伝導体や超流動体を主としてミクロ理論を用いて研究してきました。いうまでもなく、ミクロ理論は物質の個性とその普遍的な性質を結びつける懸け橋となるものです。

大学院に入学したあと最初に取り組んだテーマが、重い電子系スピン三重項超伝導体における d ベクトルの理論を作ることでした。いま思えばあまりにも無謀なテーマを前にあえなく撃沈しましたが、幸いにして銅酸化物高温超伝導体における異常金属相の研究で学位を取得することができました。その後、 Sr_2RuO_4 を研究対象として d ベクトルの計算をできたことはとても大きな喜びでした。その後、FFLO 超伝導、パリティがない超伝導、ランダム系の超伝導絶縁体転移、冷却原子気体の Angular-FFLO 超流動などの研究を、強相関効果や量子臨界性、アンダーソン局在との関連を含めて行いました。現在はスピン三重項超伝導体の分数量子渦、ネマティック秩序と共存するカイラル超伝導体の量子渦、局所的なパリティがない系のエキゾチック超伝導と磁気電気結合量子相、多軌道系のパリティがない超伝導、スピン軌道相互作用が誘起するネマティック秩序相、などの研究を進めています。現在の研究対象としている物質は、 Sr_2RuO_4 、 URu_2Si_2 、人工超格子 $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ 、 $\text{NdRu}_2\text{Al}_{10}$ 、 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 、 SrTiO_3 ヘテロ構造などですが、物質の個性とその普遍性をつなぐ学問を追求する以上、今後も対象が広がっていくのは自然なことと考えています。

最近力を入れているテーマの一つが、軌道自由度がありなおかつパリティがない超伝導の研究です。そもそも、パリティがない超伝導の源となる反対称スピン軌道相互作用は軌道自由度から生じます。しかし、軌道自由度があるモデルを用いてパリティがない超伝導を研究した例はこれまでありませんでした。昨年我々が SrTiO_3 ヘテロ構造を対象として行った研究では、軌道自由度と空間反転対称性の欠如の協奏効果に由来するエキゾチックな超伝導相が見つかりました。また、最近では多軌道系に特有のトポロジカル超伝導相もあることが分かってきました。今後は新学術領域の実験グループとも連携し、新しい超伝導相を予言・解明する理論研究に取り組みたいと思います。

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。学生時代から現在に至るまでオリエンテーリングという競技をしています。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、今年は何れもお休みです。

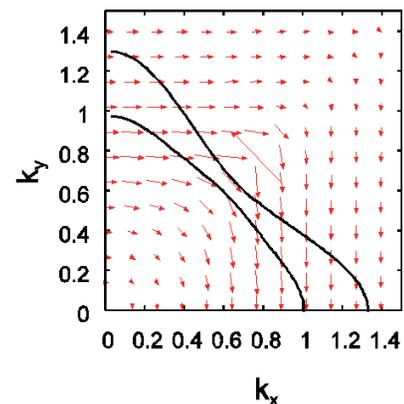


図1： SrTiO_3 ヘテロ構造におけるラッシュバ分裂したフェルミ面とそのスピン構造

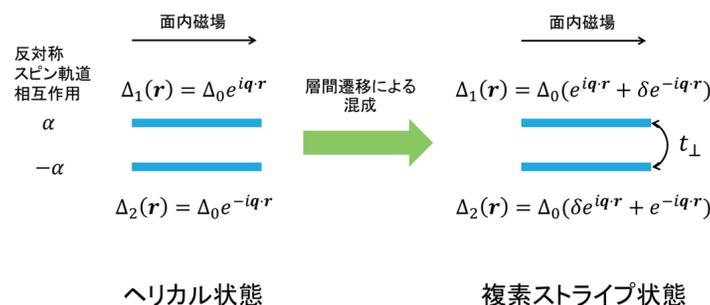


図2：人工超格子 $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ における複素ストライプ相

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 / 京都大学 大学院理学研究院物理学・宇宙物理学専攻 准教授

超伝導体で実現するトポロジカル相とマヨラナ・フェルミオンの理論研究を行っています。超伝導体におけるマヨラナ・フェルミオンは、重みの等しい電子と正孔の重ね合わせ状態であるゼロ・エネルギー・ボゴリュエボフ準粒子として実現しますが、最も際立った特徴の一つは、これが従来のフェルミオンともボソンとも異なり、非アーベル統計（非可換統計）と呼ばれる新しい量子統計に従うことです。非アーベル統計に従う粒子は、同一粒子の入れ替え操作が非可換であり、入れ替えの順番を変えると異なる量子状態が実現するという著しい性質を持ちます。この特徴を量子計算に応用することが提案されてから、その実現を目指して世界中で非常に活発な研究がなされています。

私達は数年前から、空間反転対称性のない超伝導体が、この目的を達成する上で非常に有望であることに着目し、現実の物質で、トポロジカル超伝導、マヨラナ・フェルミオンを実現するための方策、条件を探索してきました。近年、我々が提案したような反転対称性のない超伝導体におけるマヨラナ・フェルミオンの実験探索が、ナノ細線を用いて行われつつありますが、未だマヨラナ・フェルミオンの観測は確立していません。これを確立するための決定打となる実験は何なのか、理論サイドから提案していきたいと考えています。マヨラナ・フェルミオンはトポロジカル超伝導における輸送現象で主要な役割をし、非アーベル統計性も、その輸送特性に現れます。それゆえ、それが関与する特徴的な電磁気応答や熱応答を理論的に解明することは、この新奇現象を実験的に確立する上での基礎となる重要課題であり、私達はこれに精力的に取り組んでいます。

さらにまた最近、これまであまり注目されていなかった動的なゆらぎの関与するトポロジカル現象の理論探索にも取り組んでいます。例えば、カイラル超伝導体のように超伝導秩序変数によって、トポロジカルに非自明な構造が現れる系では、転移温度近傍で発達する超伝導ゆらぎがトポロジカルなゆらぎを伴い、新奇現象を生み出す可能性があります。これらのトポロジカル量子現象を、従来の固体電子系のみならず、光格子系において実現することも視野に入れて、実験グループとも協力しながら、本課題を推進していきたいと考えています。



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、助教を経て現職。主に強相関電子系の新奇な超伝導、磁性、およびトポロジカルな量子現象に興味がある。