

文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究（平成 22 年度 -26 年度）

対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象

TOPOLOGICAL QUANTUM PHENOMENA IN CONDENSED MATTER WITH BROKEN SYMMETRIES

NEWSLETTER No. 3



FEBRUARY 2013

NEWSLETTER No.3

CONTENTS

- 2 巻頭言
前野新学術領域研究によせて 福山 寛
The Great Topological Expansion 前野 悦輝
- 4 今年度の計画研究班トピックス
計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 12 受賞ニュース
吉川 豊 (京都大学)・村川 智 (慶應義塾大学) / 第6回日本物理学会若手奨励賞
水島 健 (岡山大学)・古川 俊輔 (東京大学) / 第7回日本物理学会若手奨励賞
- 15 トピックス
奇周波数バルク超伝導について (三宅 和正)
 $^3\text{He-B}$ のトポロジカル超流動相 (水島 健)
超伝導/強磁性半導体接合でのゼロバイアスコンダクタンスピークの観測 (赤崎 達志)
- 24 公募班研究紹介 (A01~D04)
- 43 2012年ピックアップトピックス
- 44 若手相互滞在プログラム報告
齋藤 広大 (産業技術総合研究所) / 橋本 樹 (名古屋大学)
小林 伸吾 (東京大学) / 金本 真知 (京都大学)
- 48 新規採用研究者の紹介
Muhammad Shahbaz ANWAR (京都大学) / YANG, Fan (大阪大学)
- 50 2012年度研究会報告
第8回~第10回集中連携研究会 / 第6回物性科学領域横断研究会 / TQP2012
- 59 お知らせ
今後の会議予定

編集後記

表紙写真: TQP2012 スナップより
左から、田仲 由喜夫 (名古屋大学), Jan Aarts (Leiden Univ.), Tony Leggett (Univ. of Illinois at Urbana-Champaign), Shoucheng Zhang (Stanford Univ.), 鄭国慶 (岡山大学)

前野新学術領域研究によせて

福山 寛／東京大学 大学院理学系研究科（領域アドバイザー）



トポロジカル量子現象新学術領域研究も折り返し点を過ぎ、この4月からは公募研究も装いを新たに、いよいよ後半戦が始まる所です。領域研究会、ホームページ、ニュースレター、総括班会議などさまざまな機会を通じて、研究が大いに進捗し領域内交流も盛んで本領域研究が非常に成功していることを、同じ物性物理学の研究者として大変嬉しく思います。これは、この種の大規模グループ研究にとって最も大切な三つの要素、領域代表者のあらゆる面における強力なリーダーシップ、明確で先進的な領域研究のコンセプト、そのコンセプトに合致する強力な領域メンバー、のいずれもが高いレベルで揃っているからです。構成員自身がこれに参加することを誇りに思い高揚感をもって推進する、この領域はまさにそうしたトップレベルの新学術領域研究だと思います。

本領域の母体ともいえる「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」（平成17～21年度、<http://www.superclean-materials.org/>）は、量子液体・固体（ヘリウム）、スピン三重項超伝導体（ルテニウム酸化物）、強相関電子系（理論）、冷却原子系、量子スピン系（理論）という途方もなく広い学問分野を横断して、何か新しい「量子多体系の物理学」を構築してゆこう、といういわば実験的な試みでした。このように広い分野の研究者を一つの領域にくくるため「スーパークリーン」という抽象的な造語をキャッチフレーズにしましたが、その意図は、ともすれば固定しがちな分野の壁を越えて、若く世界的にもトップレベルの研究者をとにかく集めて研究集団を作れば、その豊かで混沌としたスープの中から、必ず明確で新しいコンセプトの物理学

の萌芽が生まれる、という物性物理学の可能性に対する楽観的ともいえる確信でした。その最大の成果の一つに、本領域の誕生があることは言うまでもありません。

さて、「トポロジカル量子物理学の構築」という目標に向けて、後半戦も本領域が刮目すべき研究成果を生み出し続けることに、私はいささかの疑問ももちませんし微力ながら応援を惜しまないつもりですが、期待を込めた注文の一つ。それは領域研究成果そのもののアウトリーチ活動です。物理学の研究者とりわけ物性物理学の研究者は、宇宙や素粒子などの分野に比べて、これがあまり得意でない（熱心でない）ように思います。巨大科学の分野では、納税者の理解なしに巨額の研究費を使って研究することが難しくなったという切実な事情もあるでしょう。しかし、テーブルトップの研究とはいえ、トポロジカル量子相の研究も一般人にとって身近で分かり易いものとは言えませんし、研究費の総額も決して少なくはありません。私たちの学問をバトンタッチすべき次世代の若者の琴線に触れる必要もあります。前野領域代表はこの点も深く理解し孤軍奮闘（？）されていますが、あと2年間、そのエネルギーが領域全体にどのように伝搬してゆくかも楽しみにしています（スーパークリーン特定は、領域代表者の力不足でこの点は落第でした）。いままさに学問の最先端を切り開いている研究者の言葉と熱意は、パブリックの心にも必ず響くはずで。

The Great Topological Expansion

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）



トポロジカル量子現象の研究は、我々の当初の予想をはるかに超えてその対象物質がどんどん広がっています。The great topological expansion とは、結晶の鏡映対称性からでも新たにトポロジカル絶縁体として分類できるものが生まれるという論文の解説記事 News & views [1] の表題です。“It is becoming clear that topological materials with interesting properties are far more plentiful than originally thought, …” には皆さん同感ではないでしょうか。

若手の理論家を中心に次々に大胆な提案がなされ、それらをすぐに実証しようと実験家が絡む、という展開が続いています。それらと双方向に、これまで知られていた対象をトポロジカル量子現象として再定義する研究も超流動³He をはじめとして超伝導接合系などでも大いなる進捗がありました。領域国際会議のバンケットでも、超流動³He の界面にはトポロジカルなエッジ状態があるのだから、これまでのデータの解釈の大幅な見直しも必要になるのではないかと、という話で大いに盛り上がっていました。また、1960年代から研究されてきた近藤絶縁体 SmB₆ について以前から知られた低温での奇妙な残留導電性が、実はトポロジカル絶縁体の表面（エッジ）金属状態として説明することも示されました。トポロジカル近藤絶縁体の誕生です。このように、全く新しい発想でどんどんアイデアを展開できる若い頭脳と、これまでの現象に対する豊かな知識にあふれるベテラン研究者の頭脳の両方が、それぞれの役割をふんだんに発揮できる分野が生まれている実感を味わっています。

トポロジカル物質の分類表についても、現在は再構築のための新しい部品が次々と作業台に並べられている段階で、その数は今のところ無秩序に増加を続けて

いる感があります。それと同時に、最初のお祭り騒ぎの段階から、次に向けての取り組みも着々と進んでいます。本領域活動の目玉の一つである「集中連携研究会」では、皆さんの新しい成果と鋭い分析力が披露され、そしてしばしば批判的な意見も含めて存分に議論されているため、毎回とても勉強させてもらっています。

今年度は中間評価の報告書提出とそのヒアリング審査があり、また前期の公募研究の方々にとってもせわしない（慌ただしい）ことですが、成果報告が求められる時期になりました。報告書作りではメンバーからの原稿が次々に届き、多くのメンバーで協力して何度も改訂を重ね、物理の議論でも盛り上がり完成しました。おかげさまで中間評価では審査委員会から最高評点をいただくことができました。その報告書の内容の一部は本号の最初の各計画研究の成果紹介の記事に反映されていますので、是非ご覧ください。

今年は海外との協力関係を展開することにも力を注ぐ予定です。個人レベルでの国際共同研究は既に多くの方が活発に展開していますが、本領域と同様の動きが各国で出始めていますので、それらと領域レベルでの国際共同活動も進めていきたいと思っています。具体的にスタートしているのは、カナダ高等研究機構（CIFAR）の量子物質プログラムとの人材交流や互いの研究会への参加です。また中国、米国、ヨーロッパのプロジェクトとの具体的交流も進めていきますので、メンバーの皆さんのご協力、ご参加もよろしくお願いいたします。

[1] “The Great Topological Expansion”, H. Dennis Drew, Nature Phys. 8, 779-780 (Nov. 2012).

計画研究 A01

時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

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、トポジカルに特徴づけられる新奇現象の研究を進めている。ニュースレター前号ではルテニウム酸化物超伝導体の SIN 接合でのカイラルエッジ状態密度の観測、トポジカル超伝導接合素子の提案と実証、磁化による半整数フラクソイド状態の観測など、多彩なトポジカル量子現象についてご紹介した。今回はその後の研究成果を中心にご紹介する。

まず、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を吟味するレビュー論文 [1] を出版し、特に核磁気共鳴実験などによるスピン 3 重項超伝導の証拠の確実性についても吟味を深めた。微結晶を用いた Sr_2RuO_4 の研究が多角的に進行中で、トポジカル超伝導の研究が世界的に加速する中、ルテニウム酸化物への注目度は増している。また強磁性体と超伝導体の接合実験もゼロエネルギーでのコンダクタンスピークの出現を磁性半導体の接合で初めて実証できた。このように、微結晶や超伝導接合の実験技術が大いに向上したので、現在はトポジカル超伝導の起源となる超伝導内部位相を直接観察するための研究を重点的に推進している。以下に最近のトピックスをまとめた。

1. Sr_2RuO_4 の磁場中超伝導転移

米澤 (A01 連携研究者)、前野 (A0 代表者) らは、熱磁効果測定から、磁場を RuO_2 面に平行に印加した場合の超伝導転移が、通常の超伝導体と異なり一次相転移になっていることを初めて示した (図 1) [2]。この結果は Sr_2RuO_4 のスピン 3 重項超伝導がこれまでに知られていないメカニズムで磁場と相互作用していることを示唆しており、 Sr_2RuO_4 の超伝導対称性とトポジカル量子現象を理解する上で非常に重要な成果である。

2. Sr_2RuO_4 の共晶超伝導接合を用いたトポジカル超伝導状態の研究

ミクロンサイズの s 波超伝導体の周りを Sr_2RuO_4 が取り囲む構造で、超伝導位相の巻き付き数の違いによる臨界電流の変化等を検出する「トポジカル超伝導接合」を提唱した [3]。最近 Sr_2RuO_4 と Ru の共晶結晶に析出した 1 個のミクロンサイズの Ru 金属片に近接効果で s 波超伝導を導入する近接効果素子での

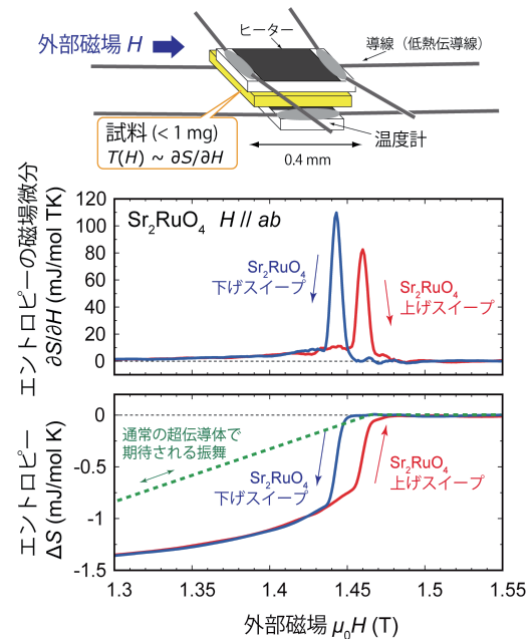


図 1 : Sr_2RuO_4 の熱磁効果測定結果。低温では上部臨界磁場近傍で超伝導 - 常伝導転移が不可逆になっていることとエントロピーが不連続変化することを明らかにした。これらは一次相転移の特徴である。

研究を進めている。共晶を利用した接合では石黒 (東京理科大) らとの共同研究で、超伝導量子干渉素子 (SQUID) も安定に製作できるようになった [4]。

3. Sr_2RuO_4 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

共晶を用いた接合ではトポジカル超伝導特有の配置も可能になる反面、界面での超伝導転移温度の増大や素子構造の複雑さが避けられない。これに対して、 Sr_2RuO_4 と s 波超伝導体との直接の接合作製は、 Sr_2RuO_4 表面の電子状態の変質のために困難な問題であり、より単純な素子構造で本質的な超伝導特性を引き出す研究を阻んできた。産総研の齋藤 (A01 博士研究員)、柏谷 (A01 分担者) らの努力で、最近遂に Sr_2RuO_4 に直接電極を取り付ける素子の接合特性が大幅に向上し、この超伝導体ならではの特異な振る舞いを再現した (図 2) [5]。

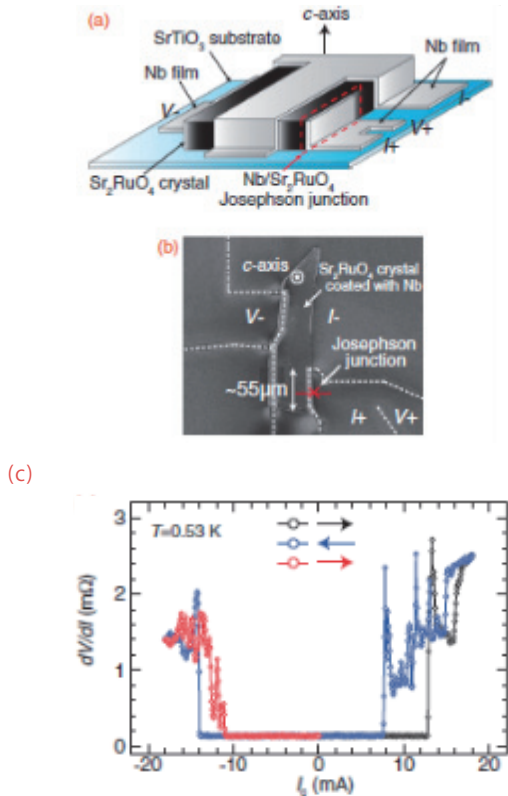


図2: Sr_2RuO_4 と Nb とのジョセフソン接合素子の模式図 (a) と実例 (b) [5]。磁場中量子干渉パターンも観測できているが、バイアス電流の増減に伴う履歴ループ (c) は通常の振る舞いを示し、また時間反転対称性を破る非対称性が現れる。

4. 強磁性体を含む超伝導接合系での奇周波数超伝導状態

赤崎 (A01 分担者) らは制御性の高い強磁性が得られる強磁性半導体 p-InMnAs と s 波超伝導体 Nb の強磁性 / 超伝導 (F/S) 接合で、強磁性体内に誘起される奇周波数スピン 3 重項状態の研究を進めた。従来のスピン 1 重項偶周波数クーパ対が近接効果により F 中に侵入した場合には、微分コンダクタンス-バイアス電圧特性には、ミニギャップ構造が現れる。ところがこの接合では逆にゼロバイアス近傍にピーク構造が現れ、その磁場依存性を含めて、スピン 3 重項 s 波の奇周波数クーパ対が F 中に侵入した場合に予想される局所状態密度のピークと定性的に一致した。詳しくは本号に赤崎氏による解説がある。

奇周波数ペアリング状態では「負のマイスナー効果」というパラドックスがあった。浅野 (A01 分担者) らは、接合系ではこの効果が、空間的に局在した奇周波数ペアによる異常な電磁応答となって現れることを理論的に示した [6]。また浅野らは C01 班にも関連するテーマとして、強磁性絶縁体とトポロジカル絶縁体との接合界面に現れる金属状態について、磁化方向に対する依存性を理論的に導いた [7]。

5. その他

トポロジカル超伝導状態の出現も期待できる空間反転対称性の破れた超伝導体は、計画研究 C01 の主要テーマの一つであるが、前野 (A01 代表者) らは鄭 (C01 代表者)、稲田 (C01 分担者) らと $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ に関する共同研究を進めている。それに加えて、 CaIrSi_3 については単結晶育成や比熱、磁化率からの相図を含めてその超伝導対称性の研究を進めた [8, 9]。また、副産物として新超伝導体発見の報告も行った [10]。

参考文献

- [1] "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).
- [2] "First Order Superconducting Transition of Sr_2RuO_4 ", S. Yonezawa, T. Kajikawa, and Y. Maeno, to appear in Phys. Rev. Lett. (2013).
- [3] "Essential Configuration of Pb/Ru/ Sr_2RuO_4 Junctions Exhibiting Anomalous Superconducting Interference", T. Nakamura, T. Sumi, S. Yonezawa, T. Terashima, M. Sigrist, H. Kaneyasu, Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 064708-1-6 (2012).
- [4] "Fabrication of SQUIDs with Nb/Ru/ Sr_2RuO_4 junctions", R. Ishiguro, M. Yakabe, T. Nakamura, E. Watanabe, D. Tsuya, H. Oosato, Y. Maeno, and H. Takayanagi, J. Phys. Conf. Ser. **400**, 022035 (2012).
- [5] "High-Supercurrent-Density Contacts and Josephson Effect of Strontium Ruthenate", K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, Y. Mawatari, Y. Tanaka, Y. Maeno, App. Phys. Express **5**, 113101-1-3 (2012).
- [6] "Anomalous surface impedance in a normal-metal/superconductor junction with a spin-active interface", Y. Asano, M. Ozaki, T. Habe, A.A. Golubov, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **86**, 024510-1-8 (2012).
- [7] "Interface metallic states between a topological insulator and a ferromagnetic insulator", T. Habe, Y. Asano, Phys. Rev. B **85**, 95325-1-8 (2012).
- [8] "Pressure Study of the Noncentrosymmetric 5d-Electron Superconductors CaM_3Si_3 ($M = \text{Ir, Pt}$)", G. Eguchi, F. Kneidinger, L. Salamakha, S. Yonezawa, Y. Maeno, E. Bauer, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 074711-1-4 (2012).
- [9] "Large spin-orbit splitting and weakly anisotropic superconductivity revealed with single-crystalline noncentrosymmetric CaIrSi_3 ", G. Eguchi, H. Wadati, T. Sugiyama, E. Ikenaga, S. Yonezawa, Y. Maeno, Phys. Rev. B **86**, 184510-1-7 (2012).
- [10] "Superconductivity in La_3Pt_4 ", Y. Kawashima, G. Eguchi, S. Yonezawa, Y. Maeno, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 125001-1-2 (2012).

計画研究 B01

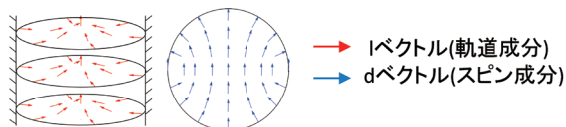
「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の最近のトピックス

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る。

1. 回転する細管容器中の超流動 ^3He -A 相における固有角運動量の検出

超流動 ^3He -A 相のクーパー対は、両極にノードを持つ軸対称なギャップ構造を有し、軸方向に大きさ \hbar の軌道角運動量（固有角運動量；IAM）を持つ。軌道角運動量の向きが揃った系はカイラル超流体となる。超流動発見以来の問題は、この場合に固有角運動量が巨視的な量として検出できるかどうかである。数多くの理論的推察がなされ、巨視的固有角運動量が存在するという結論と巨視的な量ではないという結論の両極端な状態であった。この問題に決着をつけようとする実験が、昨年より、石川、國松、久保田により東大物性研で行われてきた。直径 0.1mm の 1 本の細管容器からなる試料セルを用意し、その中に閉じ込めた超流動 ^3He -A 相の cw-NMR 実験を行ってきた。昨年度、回転下で B 相から A 相に昇温させることによって、Mermin-Ho (hyperbolic) 型の秩序変数の織目構造（テクスチャー）（図 1）が安定に形成できることを示した [1]。回転角速度 Ω において、回転系での自由エネルギー $E' = E - \Omega \cdot L$ (E : 静止下での自由エネルギー、 L : 静止下での全角運動量) を最小にするようにテクスチャーが変形し、その変形度合いは一定の角速度のときに観測されるスピン波信号の核磁気共鳴周波数に反映されると予想されてきた [2]。今年度当初から、昨年度と同様な方法で Mermin-Ho テクス



Mermin-Ho hyperbolic

図 1 : Mermin-Ho(hyperbolic) テクスチャー

チャーを得て、AB 転移温度直上の 2.03mK において、スピン波信号の共鳴周波数の回転速度変化を測定した。図 2 に示したようにスピン波の共鳴周波数の回転応答は、巨視的軌道角運動量が観測された場合の計算結果（高木【D03 班公募研究】による）と良い一致を示した。今後のデータの集積によって、積年の問題に終止符を打てる見通しが立ってきた。



図 2 : $\Omega = 5\text{rad/s}$ で作った M-H テクスチャーのサテライト共鳴周波数の回転速度変化。縦軸は規格化された周波数。赤色、青色実線はそれぞれ巨視的 IAM が存在しないとき、するときの理論計算結果。

2. エアロジェル／超流動 ^3He 界面でのスピン帯磁率異常

超流動 ^3He を満たした容器の一部にエアロジェルを導入すると、エアロジェルの不純物効果を利用して超流動を部分的に壊すことができる。その結果得られる不均一系は、不純物を含む "dirty" な常流動体 (DN) とスピン三重項超流動体 (TS) の接合系と見ることができる [3,4]。東谷と竹内は、エアロジェルと超流動 ^3He -B 相で構成される DN / TS 系のスピン帯磁率を数値計算し、近接効果によってエアロジェル中に誘起される奇周波数 s 波クーパー対に起因して、エアロジェル／超流動 ^3He 界面付近の局所スピン帯磁率にピーク構造が現れることを見いだした（図 3）。石川はエアロジェルを用いた実験を昨年度から継続して行い、磁化の温度変化を調べている。図 4 に示したのは、圧力 24bar での cw-NMR による磁化の測定結果である。非常に低温度で磁化の増加が観測されているが、表面固体 ^3He 等に因る可能性があり、東谷等が指摘する奇周波数クーパー対の出現に起因する現象かどうかを確定することは出来ていない。

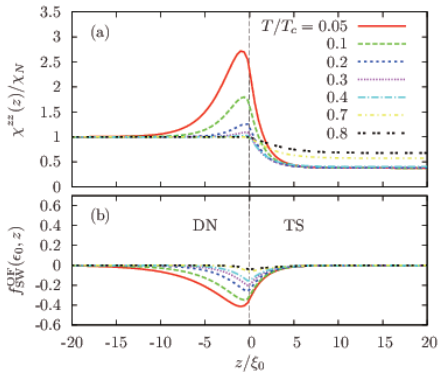


図3：エアロジェルと超流動³He-B相で構成されるDN / TS系の(a) 局所スピン帯磁率と(b) 奇周波数s波クーパ対振幅の空間依存性。エアロジェルはz < 0の領域にある。低温でエアロジェル層中に局所スピン帯磁率のピークが現れる。このピーク構造は奇周波数s波クーパ対によって生み出される。

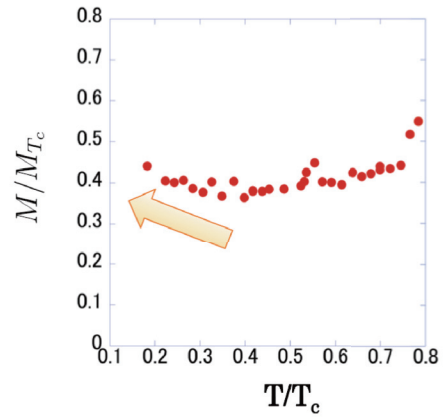


図4：エアロジェル界面近傍の磁化の温度変化

3. 超流動³Heの表面束縛状態に対する磁気効果

超流動³He-B相の表面束縛状態は、壁が十分滑らかなときに運動量に線形な分散関係(マヨラナコーン)を持つことが、横波音響インピーダンス測定により明らかになっている[5]。マヨラナコーンはB相の持つ時間反転対称性により、ゼロエネルギー状態が保護されるために生じる。一方で双極子磁場より大きな磁場をかけると、時間反転対称性が破れてマヨラナコーンにエネルギーギャップが生じるはずである。野村はこのトポジカル相転移を観測するために、磁場中の横波音響インピーダンス測定を進めるとともに、平行平板中のNMR実験の準備も進めている。マヨラナコーンのギャップ生成は、表面帯磁率の増加として観測されるはずである。両測定は、ギャップ生成をそれぞれ力学的応答、磁氣的応答として捉えるもので、相補的観測となる。

4. 超流体におけるブレーン対消滅とタキオン凝縮

2種類のボース気体からなる2成分ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)は、異成分間の斥力相互作用が強くなると2相に相分離し、2相間にドメイン壁(界面)が安定に実現する。竹内は新田【D03 班公募研究】等と共同で、超弦理論におけるブレーンの対消滅によるタキオン凝縮と類似する現象が、2成分BEC中の界面の対消滅過程において引き起こされることを理論的に見出した[6]。ブレーンに見立てた3次元空間中の界面の対消滅過程は、界面に沿った'射影'2次元空間において強磁性相転移のような自発的対称性の破れを引き起こす(図5)。一方、ランカスター大

学の超低温物理グループは、ブレーンに見立てた超流動³HeのA相とB相の界面を対消滅させた後、秩序変数の空間変調による構造物が取り残されるという興味深い実験結果を得ている[7]。この現象の理論的解明は今後の課題である。

参考文献

- [1] "Textures of Rotating Superfluid ³He -A in a Single Narrow Cylinder", T. Kunimatsu, H. Nema, R. Ishiguro, M. Kubota, T. Takagi, Y. Sasaki, and O. Ishikawa, to be published in J. Low Temp. Phys.
- [2] "Mermin-Ho Texture and Its Transverse NMR Spectrum in a Rotating Cylinder", T. Takagi, J. Phys. Soc. Jpn. 65, 1722 (1996).
- [3] "Proximity Effect between a Dirty Fermi Liquid and Superfluid ³He", S. Higashitani, Y. Nagato, and K. Nagai, J. Low Temp. Phys. 155, 83 (2009).
- [4] "Theory of the Proximity Effect in Junctions with Unconventional Superconductors", Y. Tanaka and A. A. Golubov, Phys. Rev. Lett. 98, 037003 (2007).
- [5] "Surface Andreev bound states of superfluid ³He and Majorana Fermions", Y. Okuda and R. Nomura J. Phys.: Cond. Matt. 24, 343201-1-19 (2012).
- [6] "Tachyon Condensation Due to Domain-Wall Annihilation in Bose-Einstein Condensates", H. Takeuchi, K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Nitta, Phys. Rev. Lett. 109, 245301 (2012).
- [7] "Relic topological defects from brane annihilation simulated in superfluid ³He", D. I. Bradley, S.N. Fisher, A.M. Guenault, R. P. Haley, J. Kopu, H. Martin, G. R. Pickett, J. E. Roberts, and V. Tsepelin, Nat. Phys. 4, 46 (2008).

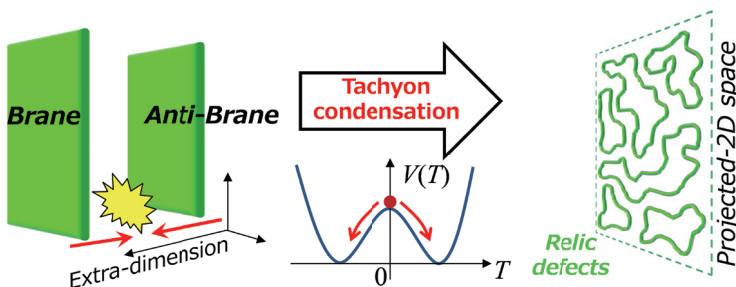


図5：二つの界面(BraneとAnti-Brane)の対消滅によるタキオン凝縮の概略図。射影2次元空間(Projected-2D space)においてタキオン場Tの成長が自発的対称性の破れを引き起こす。

計画研究 C01

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

計画班 C01 は空間反転対称性の破れた超伝導体におけるスピン軌道相互作用の制御と超伝導特性の解明、絶縁体薄膜の作製、トポロジカルクリスタル絶縁体の開発、銅酸化物絶縁体の電場によるドーピング、及び PdCrO₂ のホール効果の理論計算などに取り組んだ。ここでは、以下の4トピックスについて紹介する。

1. 空間反転対称性の破れた物質におけるスピン軌道相互作用を増大させる新戦略

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スピン軌道相互作用 (SOC) である。これまでに、SOC 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 Mg₁₀Ir₁₉B₁₆ や LaBiPt などでは、予想に反し、スピン一重項が支配的である [1,2]。最近、鄭・稲田らは、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明らかにした [3]。図 1 は Li₂(Pt_{1-x}Pd_x)₃B おけるスピン・格子緩和率 1/T₁ とナイトシフトの温度依存性である。x < 0.8 ではエネルギーギャップが等方的で、スピン一重項状態が実現

しているが、x > 0.9 ではエネルギーギャップ関数に線状の節があり、スピン三重項状態が実現していることを示している。研究グループは、このような超伝導状態の推移は x=0.8 を境に結晶構造が急変したことに起因することを明らかにした。図 2 は Pt(Pd)-Pt(Pd) bond angle の変化を示す。x > 0.8 では bond angle が急激に減少することがわかる。研究グループはさらにバンド計算により、この変化は反転対称性の破れの度合いを増しスピン軌道相互作用を増大させた結果、フェルミ面の分裂が大きくなったことを示した。

2. トポロジカル絶縁体: Bi₂Se₃ 純良薄膜の作製に成功

トポロジカル絶縁体における興味深い表面状態を非分光的手法で直接的に観測することは重要である。安藤・瀬川らは薄膜成長方法の工夫により量子振動が観測される高品質 Bi₂Se₃ 薄膜の作製に成功し、その表面状態の振舞いの詳細を観測することに成功した [4,5]。薄膜の厚さを薄くすると上面と下面との表面状態が混成してディラック錐にギャップが開き、表面状態のトポロジカルな保護が解けてトポロジカル相転移が起きる様子をこの高品質薄膜で初めて明らかにすることができた (図 3)。

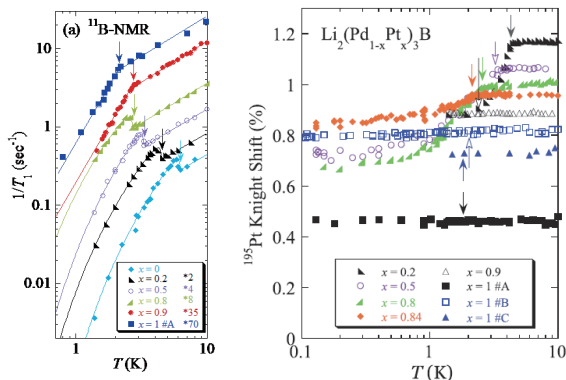


図 1 : Li₂(Pt_{1-x}Pd_x)₃B におけるスピン・格子緩和率 1/T₁ とナイトシフトの温度依存性

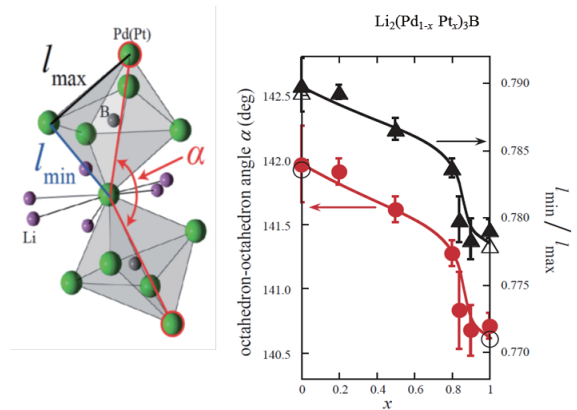


図 2 : Pt-Pt bond angle の変化

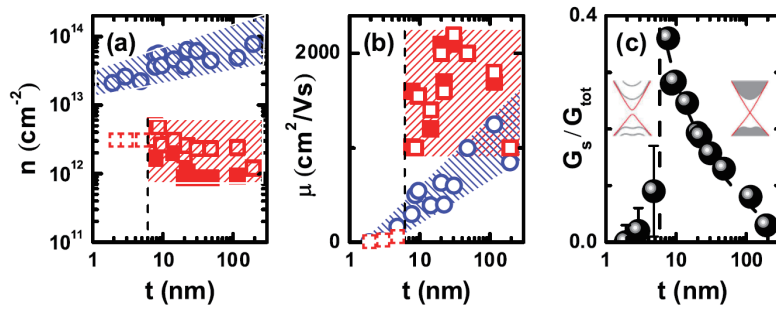


図3：Bi₂Se₃ 薄膜の輸送特性における (a) 二次元キャリア濃度, (b) 移動度, (c) 全伝導度に対する表面状態の伝導度の割合. 赤色は表面伝導, 青色はバルクの寄与を示す。

3. トポロジカル絶縁体：トポロジカルクリスタル絶縁体の発見

これまで三次元トポロジカル絶縁体と呼ばれていたものは時間反転対称性によって保護されたトポロジカル不変量によって特徴づけられていたが、結晶格子の対称性によって保護される表面状態を持つ新種のトポロジカル絶縁体の存在が L. Fu によって提唱された。安藤・瀬川と公募班の佐藤は、SnTe が実際に新種のトポロジカル絶縁体、トポロジカルクリスタル絶縁体であることを単結晶試料の角度分解光電子分光によって明らかにした [6] (図4)。このトポロジカル物質は従来のトポロジカル「周期表」の枠に入らないものであり、類縁の超伝導試料でソフトポイントコンタクト分光にゼロバイアスピークが見られるなど [7]、トポロジカル量子現象の研究に今後新たな舞台を与えることとなる可能性がある。

4. 銅酸化物超伝導体の電場制御

野島と上野らは、La をドーピングすることで絶縁体化した YBa₂Cu₃O_y の薄膜試料を用いた電気二重層トランジスタ構造において、電場により超伝導を復活させるだけでなく、可逆的に超伝導転移温度を制御すること

に成功した (図5)。さらにホール効果によるキャリア密度の詳細な測定から、電場によりキャリア変調された表面層がより深い領域の電子状態に影響を及ぼし、試料中の比較的広い範囲 (50 nm 程度) でキャリア密度が変わることも見出した。これらの結果は、本実験手法が p 型のモット絶縁体にも有効な静電的ホールドープ法として機能するだけでなく、電子相関を反映した新たな物理現象を調べるポテンシャルを有することを示している。

[1] K. Tahara, Z. Li, H. X. Yang, J. L. Luo, S. Kawasaki, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B 80, 060503(R) (2009).
 [2] K. Matano *et al*, to be published
 [3] S. Harada, J. J. Zhou, Y. G. Yao, Y. Inada, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B 86, 220502(R) (2012).
 [4] A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and Y. Ando, Phys. Rev. Lett. 109, 066803 (2012).
 [5] A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and Y. Ando, Advanced Materials 24, 5581 (2012).
 [6] Y. Tanaka, Z. Ren, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, K. Segawa and Y. Ando, Nature Phys. 8, 800 (2012).
 [7] S. Sasaki, Z. Ren, A.A. Taskin, K. Segawa, L. Fu and Y. Ando, Phys. Rev. Lett. 109, 217004 (2012).

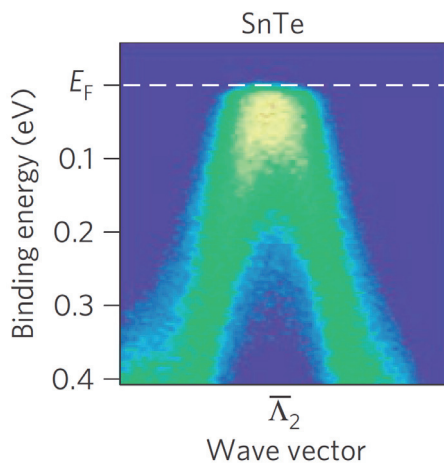


図4：SnTe 単結晶試料で観測された表面状態

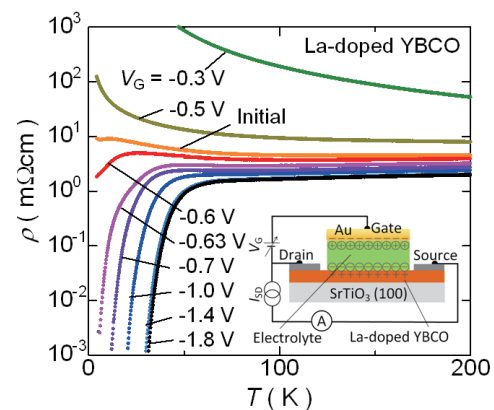


図5：La ドープ YBa₂Cu₃O_y を用いた電気二重層トランジスタ構造における超伝導制御

計画研究 D01

トポロジカル凝縮系の理論

田仲 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. ドープしたトポロジカル絶縁体のトポロジカル超伝導状態 (田仲、佐藤; C01 班と連携)

トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 に Cu を挿入すると、キャリアドープにより金属化し、低温で超伝導状態になることが最近知られるようになった。田仲・佐藤は瀬川 (C01)・安藤 (C01 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構造変化 (図 1(a)) を起こすことを示し、瀬川らが観測したトンネルコンダクタンス (図 1(b) は素子の模式図) のゼロバイアスピークを説明した [1]。またトポロジカル超伝導体のスピン帯磁率、比熱の計算を超伝導状態で行った。その結果、比熱、スピン帯磁率の測定を行うことで、超伝導の対称性を決定する事が出来ることを示した [2]。またトポロジカル超伝導体と従来型の偶パリティの超伝導体接合においては、Josephson 電流が特異な温度依存性を示すことを明らかにした。

2. スピン三重項超流動におけるトポロジカル転移 (水島、佐藤; B01 班と連携)

超流動 $^3\text{He-B}$ 相はトポロジカル超流動体であり、その表面状態にはバルクの波動関数のトポロジーによって安定性が保証されたマヨラナフェルミオンが現れる。実際、B 班野村らの音響インピーダンスの測定によってマヨラナフェルミオンと思われる励起状態が確認されている。水島・佐藤は、 $^3\text{He-B}$ 相のマヨラナフェルミオンが磁場下でどのように振る舞うかを理論的に調べた。 $^3\text{He-B}$ 相は、トポロジカル絶縁体と同様に時間反転対称性によってトポロジカルな安定性が与えられている為、磁場をかけ、時間反転対称性を破るとマヨラナフェルミオンは安定でなくなると予想される。ところが、実際には磁場を表面に垂直にかけたときのみマヨラナフェルミオンは消失して、磁場を平行にかけたときには、マヨラナフェルミオンは安定に存在し続ける。この理由は明らかでなかったが、水島・佐藤はこの背後に「対称性によって守られたトポロジカル相」の存在があることを明らかにした [3]。つまり、表面に平行に磁場をかけたときには、時間反転対称性と回転対称性を組み合わせた離散対称性が残り、それによって新たに自明でないトポロジカル数が導入され、マヨラナフェルミオンの安定性が保証されることを示した。また、横磁場下のマヨラナフェ

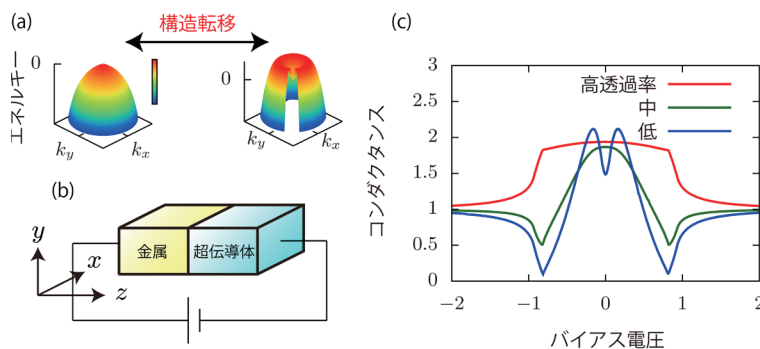


図 1 : (a) トポロジカル超伝導体のケミカルポテンシャルを変化させた際のアンドレーエフ束縛状態の分散関係の変化を示す。
(b) 接合の図。
(c) 金属・トポロジカル超伝導体接合の微分コンダクタンス。

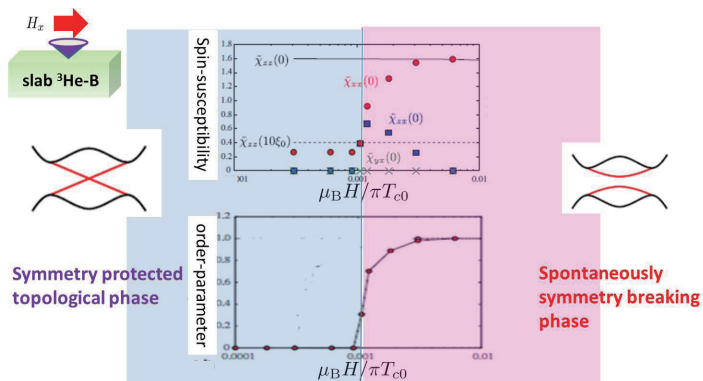


図 2: 横磁場下の $^3\text{He-B}$ 相のトポロジカル量子相転移。横磁場 H が臨界値を超えると、離散対称性のオーダーパラメータが有限の値を取る自発的対称性の破れた相に移るとともに、表面マヨラナフェルミオンが消失する。相転移近傍では、スピン帯磁率に異常が現れる。

ルミオンが、ある臨界磁場において突然消失することを発見し、これが離散対称性の自発的破れに伴うトポロジカル相転移であることを明らかにした。(図 2) この新奇な量子相転移近傍ではスピン帯磁率に異常が期待されるため、B01 班で計画されている制限空間中の超流動 $^3\text{He-B}$ の実験において観測可能である。

3. 冷却原子気体の理論 (上田、水島)

スピンという内部自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) 中に形成される量子渦はそれらが発生する量子相によって多彩な構造を示す。我々はその構造を方程式を解くことなく、ホモトピー理論の完全系列を用いて分類することに成功し、それが実際に存在することを多成分グロスピタエフスキー方程式を解くことによって明らかにした [4]。また、2 成分 BEC からなる擬スピン 1/2 系を高速回転させることによって実現される強い量子相関を有する量子渦液体状態をしらべ、ある特定の渦充填率の時に非アーベル統計に従う励起スペクトルをもつスピニングレット状態が出現することを見出した [5]。水島は、新田 (D 班公募) とともに、冷却原子気体において 3 次元スカーミオンが基底状態として安定化し得ることを見いだした [6]。

4. 奇周波数クーパー対の理論 (田仲、水島; A01 と連携)

従来型 s 波超伝導体の上に載せたナノワイヤーのエッジにおいて、スピン軌道相互作用と外部磁場によりマヨラナ型準粒子励起が創成されることが最近話題になっている。田仲、浅野 (A01) は、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 [7]。さらに、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

接合ですでに知られている奇周波数クーパー対による異常近接効果 [8] に他ならないことを明確にした。また水島、田仲は、カイラル p 波超伝導体の量子渦に局在した準粒子状態のマヨラナ性と奇周波クーパー対振幅の関係性について明らかにした [9]。

田仲、佐藤、永長 (C01 班) はトポロジカル量子現象に関する総説を執筆した [10]。

[1] A. Yamakage, K. Yada, M. Sato and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 85, 180509 (2012).
 [2] T. Hashimoto, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato, and Y. Tanaka, arXiv: 1209.0656.
 [3] T. Mizushima, M. Sato, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. 109, 165301 (2012).
 [4] S. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, Phys. Rev. A 86, 023612 (2012).
 [5] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. A 86, 031604(R) (2012).
 [6] T. Kawakami, T. Mizushima, M. Nitta, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. 109, 015301 (2012).
 [7] Y. Asano and Y. Tanaka, arXiv:1204.4226.
 [8] Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 70, 012507 (2004).
 [9] T. Daino, M. Ichioka, T. Mizushima, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 86, 064512 (2012).
 [10] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn., 81, 011013, (2012).

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、若手から4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。

吉川 豊（京都大学 大学院理学研究科）

第6回日本物理学会若手奨励賞

●受賞理由

超放射ラマン散乱を用いた物質波のコヒーレント制御



冷却原子気体における超放射ラマン散乱の実験的研究に対して、第6回日本物理学会若手奨励賞（領域1）を受賞しました。超放射ラマン散乱（Superradiant Raman scattering: 以下SRS）は、1954年にDickeによって提唱された「超放射」と呼ばれる集団的な緩和現象の一種です。SRSは、照射する励起光のパラメータを動的に変えることで系の時間発展を自由に制御できるという、Dicke超放射にはない特徴を持っています。これを最大限に利用することで、原子波の性質を高精度に調べたり、その量子状態をコヒーレントに制御したりすることが可能になります。本研究では、ボース凝縮体におけるSRSの基本的な性質の確認から始まり、非凝縮気体でのSRSの観測、superradiant pump-probe spectroscopyと呼ばれる分光法による原子波の1次相関関数の精密測定、光位相共役過程に類似した双方向性SRSによる原子コヒーレンス—光子間の高効率変換の実現、さらには異なる2つの運動量モードの原子コヒーレンスを1つのボース凝縮体中に保存して独立に制御するホログラフィック多重保存の実験的検証にも成功しました。これらの成果は、任意の光子数状態発生や量子原子波制御など、量子情報処理や原子波光学等の研究分野における新しい実験技術の礎になるものと期待されます。

●一言コメント

光の誘導放出がレーザー光を作り出すのと類似の現象が多数の原子集団の放射現象にも現れることがDickeにより指摘され、超放射と呼ばれている。光散乱の行列要素が原子数とともに増大することがその物理的起源である。共鳴光を用いた通常の超放射は、光の周波数が原子の共鳴周波数によって固定されているのに対して、吉川氏はラマン過程を用いることによって原子波の量子状態を高い精度で制御する方法を開拓しました。本領域では吉川氏は、やはり複数のレーザー光を用いて人工的なゲージ場を作り出す研究に取り組んでおられます。一層のご活躍を期待したいと思います。

（上田正仁）

村川 智（慶應義塾大学 理工学部）
第6回日本物理学会若手奨励賞

●受賞理由

超流動 ^3He の表面状態、特にマヨナラ準粒子状態の解明

村川智さんは横波音響インピーダンス測定による超流動 ^3He の表面状態研究により、第6回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。トポロジカル超流動体は、バルク状態のトポロジカルな特性が表面状態の存在を規定するバルク-エッジ対応と呼ばれる性質を持つと予測されていました。村川氏は、東京工業大学に博士研究員として在籍中に、壁を ^4He 薄膜でコートすることにより境界条件が変化することを利用して、超流動 ^3He の表面束縛状態の系統的振る舞いを調べました。この研究により、壁が滑らかな場合に超流動 ^3He の表面に線形の分散関係をもったギャップレス表面状態が存在することが明らかになり、トポロジカル超流体とその表面のマヨナラ粒子の実在が示されました。現在は慶應義塾大学で超流動 ^4He を用いたジョセフソン素子の開発を進められており、さらなるご活躍が期待されます。

（文責、野村竜司）



水島 健（岡山大学大学院 自然科学研究科）
第7回日本物理学会若手奨励賞

●受賞理由

超流動 ^3He および冷却原子気体におけるマヨラナ状態の理論的研究

超流動 ^3He と冷却原子気体系においてマヨラナ粒子の研究を展開した研究業績に対して第7回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。スピン3重項超流動体である ^3He -A相やB相、或は p 波フェッシュバツハ共鳴近傍の冷却フェルミ原子気体にはそのバルクにおいて定義される非自明なトポロジカル不変量に起因して、半整数・整数量子渦の芯や表面に零エネルギー準粒子が存在し得ます。そのミニマムなモデルとしてスピン偏極した p 波超流動体を考え、量子渦の芯や表面に現れる零エネルギー準粒子状態の性質を明らかにしました。この系においてクーパー対間の引力を極端に強めると、強結合効果に起因したトポロジカル相転移がバルクにおいて生じます。このトポロジカル相転移とマヨラナ粒子との関連性を明らかにしました。これらの知見を基盤として、最近では、スピン3重項超伝導体の量子渦に内在するマヨラナ粒子と奇周波数クーパー対相関との関係性や、磁場中の超流動 ^3He -Bにおける自発的対称性の破れを伴うトポロジカル相転移の存在といった新しいトポロジカル量子現象を抽出することに成功しています。



▲一言コメント

若手奨励賞は日本物理学会の各領域から選出されますが、受賞の対象となった水島氏の研究は低温物性から素粒子物理まで幅広い内容を包含するもので、現行の領域に収まるものではありません。水島氏の緻密な数値計算に裏付けられた複眼的な考察は、専門家のみならず非専門家にもわかりやすいと定評のある彼のプレゼンにも生きています。この受賞を機にさらに広範な活躍をされることを期待しています。

（東谷誠二）

古川 俊輔（東京大学 大学院理学系研究科）

第7回日本物理学会若手奨励賞

● 受賞理由

量子多体系におけるエンタングルメント・エントロピーの研究



このたび東京大学大学院理学系研究科助教で本領域の特任研究員であった古川俊輔氏が第7回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。授賞理由は「量子多体系におけるエンタングルメント・エントロピーの研究」です。古川氏は、トポロジカル秩序やフラストレート量子スピン系など物性理論の幅広い領域にわたって活発に研究活動されてきました。また、エンタングルメントなどの量子情報の概念を物性理論へ応用することによって顕著な業績を挙げてこられました。

受賞対象となった研究は、3編の論文 [1-3] です。古川氏はこれらの論文においてトポロジカル相から量子臨界系までまたがる広い対象において、エンタングルメント・エントロピー (EE) がいかに系の普遍的性質と結びついているかを示す重要な成果を挙げました。古川氏らは、2006年に Kitaev らが予言した、トポロジカル秩序を特徴づける普遍的エントロピーの存在を翌2007年に量子スピン液体の模型において数値的に実証しました [1]。この結果は、その後、Kitaev らの予言を量子スピン液体研究に広く応用するさきがけ的研究となりました。一次元量子臨界系では EE に共形場理論のセントラル・チャージが現れることが知られていましたが、古川氏らは二領域間の相互情報量から共形場理論のより詳しい情報を得ることができることを提案しました [2]。特に朝永・Luttinger 流体においては、相互情報量はいわゆる朝永・Luttinger 流体パラメーターのみによって普遍的に定まることを数値的・解析的に示しました。この結果はそれまで見逃されていた EE と共形場理論のより深い関係を明らかにしたものとして高く評価されています。さらに複数の朝永・Luttinger 流体が結合した系の EE を研究し [3]、高次元量子臨界系での EE の有用性を探求しました。

3編の論文 [1-3] は、古川氏の滞在した CEA Saclay (フランス)、トロント大学 (カナダ) の研究者との共同研究で、左は論文 [1] の共同研究者との写真です。

(文責、上田正仁)



写真:古川氏(左)と共同研究者のG. Misguich氏(右)。
2006年、フランス、ロワールにて。

[1] S. Furukawa and G. Misguich, Phys. Rev. B 75, 214407 (2007).

[2] S. Furukawa, V. Pasquier, and J. Shiraishi, Phys. Rev. Lett. 102, 170602 (2009).

[3] S. Furukawa and Y. B. Kim, Phys. Rev. B 83, 085112 (2011).

奇周波数バルク超伝導について

三宅 和正 / 大阪大学 基礎工学研究科 (物性物理工学領域) 教授

1) 奇周波数超伝導状態

奇周波数超伝導状態とはギャップ関数がクーパー対を構成する2電子の虚時間の交換に関して“奇”であり、松原振動数の相対値 ϵ_n の関数として“奇関数”である。即ち、 $\Delta_{\mathbf{k}}(-i\epsilon_n) = -\Delta_{\mathbf{k}}(i\epsilon_n)$ の関係が成り立つ。そのため、スピン3重項s波(TS)ペアとかスピン1重項p波(SP)ペアとかいう状態も2電子の交換に関するパウリ原理の要請を満たしている。このような超伝導状態のうちのTSペアは40年ほど前にBerezinskiiにより超流動³Heのモデルとして提案された[1]。90年代になると、理論的な興味から奇周波数超伝導状態の物理が調べられた。その後、幾何学的フラストレーションのある系[2]、反強磁性と共存する超伝導物質[3]、準1次元系[4]、ソフトフォノンと結合する電子系[5]、などでも奇周波数超伝導状態が実現する条件が研究されて現在に至っている。

2) 開壁かいびやく以来の“病理”とその克服

ところが、(バルクの)奇周波数超伝導状態には開壁かいびやく以来、通常の有効ハミルトニアンが存在する場合に成り立つグリーン関数の間の関係、たとえば

$F^+(i\epsilon_n) = F(-i\epsilon_n)^* = -F(i\epsilon_n)^*$ を用いるとマイスナーの積分核が通常とは逆符号になる、即ち、超流動電子密度が負になる、という“病理”をもっていた。これはGL的に考えると、秩序状態は転移温度の高温側に存在することを意味しており、奇周波数超伝導状態を受け入れるのに大きな障害となっていた。これを克服するために、局在スピンと電子対の結合した混合場を考えると問題は解消するというアイデアがAbrahamsらにより提唱された[6]。一方、奇周波数超伝導はペア相互作用の周波数依存性が重要、即ち遅延効果をともっており、ハミルトニアンが時間依存性をもたない普通の記述では正しくないということが分かってきた。最初にそのことを指摘したのはBelitz & Kirkpatrickであったが、場の理論のことばで書かれて

いたためよく理解されずに来たきらいがある[7]。最近になって、同様の主張が分かり易いかたちで成され[8,9]、GL理論をラグランジアンを用いて経路積分により定式化することで、負マイスナー効果、転移温度の高温側が秩序相となるという二つの困難が解決することが示された。即ち、異常グリーン関数の間の正しい関係は、 $F^+(i\epsilon_n) = F(i\epsilon_n)^*$ であることが分かった[9]。

3) リエントラントの問題

従来、奇周波数超伝導の理論といえば転移温度の議論が主であり、ペア相互作用の遅延効果がそれほど強くない場合には、温度がゼロに近づくともノーマル状態に戻る(リエントラント)振る舞いを示すのが一般的であった。どの程度遅延効果が強いとリエントラントの振る舞いがなくなるのかという大雑把な議論は文献[3]で成された。最近、量子臨界点近傍の反強磁性スピンゆらぎに媒介されるペア相互作用

$$V(\mathbf{q}, \omega_m) = \frac{g^2 N_F}{\eta + A\mathbf{q}^2 + C|\omega_m|}$$

を用いて、転移温度より低温のギャップ方程式

$$\Delta(\mathbf{k}, \epsilon_n) = -T \sum_{\mathbf{k}', \epsilon'} V(\mathbf{k} - \mathbf{k}', \epsilon_n - \epsilon') \frac{\Delta(\mathbf{k}', \epsilon')}{\epsilon_n'^2 + \xi_{\mathbf{k}'}^2 + |\Delta(\mathbf{k}', \epsilon')|^2}$$

を解いて、SP奇周波数ギャップの最小松原振動数成分 $\Delta(\pi T)$ とギャップが最大になる松原振動数でのギャップの値 $\Delta_{0, \max}(\epsilon_n)$ の温度依存性は図1のように求められた[10]。これを見ると量子臨界点に近づく($\eta \rightarrow 0$)とリエントラントの振る舞いは解消することが分かる。また、TS偶周波数ギャップ状態との相対的安定性および共存状態の可否を調べた結果が図2に示される。これを見ると、量子臨界点のごく近傍または反強磁性との共存相では、降温とともにSP奇周波数ギャップ状態に転移し、より温度が下がるとTS偶周波数ギャップ状態が現れて両者の共存相となることが予想される。

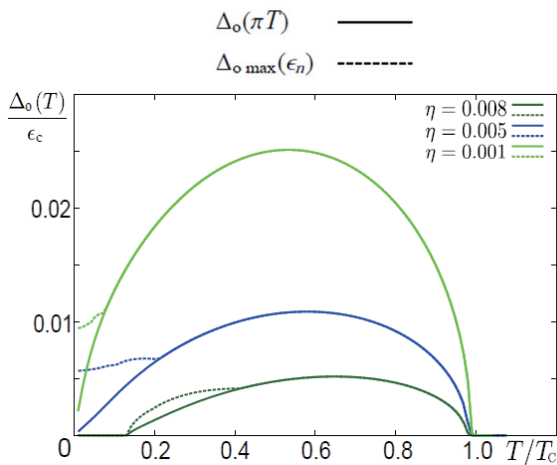


図 1: SP 奇周波数ギャップの最小松原振動数成分 $\Delta_0(\pi T)$ とギャップが最大になる松原振動数でのギャップの値 $\Delta_{0, \max}(\epsilon_n)$ の温度依存性

遅延相互作用が重要な場合には、ペア相互作用 $V(q, \omega_m)$ が準粒子の自己エネルギーに与える効果をセルフコンシステントに取り扱う「強結合理論」が必要となることが予想されるが、結果は図 1 と基本的に同じであった [11]。

4) 奇周波数超伝導転移温度に関する不純物効果

今まで奇周波数超伝導転移温度に対する非磁性不純物効果が調べられていなかったので、文献 [3] で求められた SP 奇周波数ギャップ状態の転移温度がどのように不純物濃度 n_{imp} に依存するかについて Abrikosov-Gorkov (AG) 流の取り扱いにより調べた [12]。その結果を図 3 に示す。転移温度の減少は AG の結果と比べて緩やかで、かつ転移温度がゼロとなる直前でリエントラントの振る舞いを示すのが特徴的である。

5) 奇周波数超伝導の遍在性

もう一つの発展は、奇周波数超伝導は特殊な現象ではなく、ギャップレスなスピン波（南部モード）をもつ反強磁性と共存する超伝導状態でかなり普遍的に実現していることが分かってきたことである。奇周波数超伝導状態であれば松原振動数 ϵ_n に関してギャップは奇関数であるが、 ϵ_n を実軸に解析接続した後ではギャップの虚部は $\Delta''_{\mathbf{k}}(-\epsilon) = \Delta''_{\mathbf{k}}(\epsilon)$ のように偶関数であり、一般には $\epsilon=0$ でギャップレスになる訳ではない。しかし、文献 [3] で示されたように、量子臨界点 ($\eta=0$) ではギャップの虚部が $\epsilon=0$ でゼロになるので、ギャップレス超伝導状態となる。

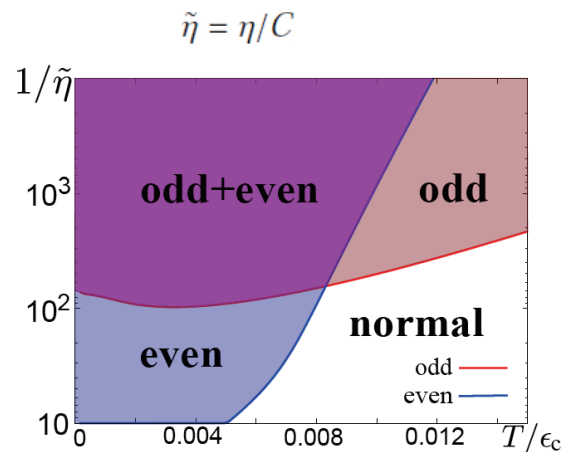


図 2: 量子臨界点からの距離 (η / C) - 温度平面での超伝導相図 (η は反強磁性逆帯磁率、 C はスピン揺らぎのエネルギースケールを表す)

現在、反強磁性との共存領域でギャップレス超伝導が実現している可能性があるのは、重い電子系物質では、 $\text{CeCu}_2(\text{Si}_{0.98}\text{Ge}_{0.02})$ [13]、 CeRhIn_5 [14]、 $\text{CeRh}_{1-x}\text{Ir}_x\text{In}_5$ [15]、 CeIrSi_3 [16]、鉄砒素系物質では、 $\text{Ba}_{0.77}\text{K}_{0.23}\text{Fe}_2\text{As}_2$ [17]、 CaFe_2As_2 [18]、銅酸化物系では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.45}$ [19]、 $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ [20]、が上げられる。もちろん、これらの系で奇周波数バルク超伝導状態が実現しているという更なる実験的証拠がどのようにしたら得られるかに関する理論的研究の進展が期待される。

この論考は楠瀬博明氏（愛媛大学理工学研究科）、伏屋雄紀氏（現、電気通信大学情報理工学研究科）、原田朋礼氏（現、マツダ自動車工業）、吉岡由宇氏（大阪大学基礎工学研究科）との共同研究にもとづいています。記して感謝します。

参考文献

- [1] V. L. Berezinskii, Sov.-Phys. JETP 20, 287, (1974).
- [2] M. Vojta and E. Dagotto, Phys. Rev. B 59, 713, (1999).
K. Yada *et al*, J. Phys. Chem. Solids 69, 3321, (2008).
- [3] Y. Fuseya, H. Kohno, and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. 72, 2914, (2003).
- [4] M. Shigeta, S. Onari, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 79, 174507, (2009).
- [5] H. Kusunose, Y. Fuseya, and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 044711, (2011).

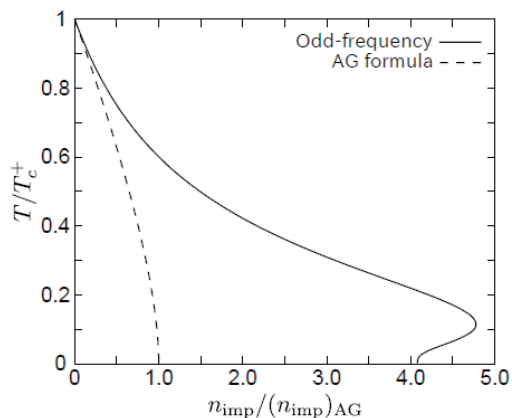


図 3 : SP 奇周波数超伝導転移温度の不純物濃度 n_{imp} に対する依存性

- [6] E. Abrahams, A. Balatsky, D. J. Scalapino, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. B 52, 1271, (1995).
- [7] D. Belitz and T. R. Kirkpatrick, Phys. Rev. B 60, 3485, (1999).
- [8] D. Solenov, I. Martin, and D. Mozyrsky, Phys. Rev. B 79, 132502, (2009).
- [9] H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 054702-1-7, (2011).
- [10] T. Harada, Y. Fuseya, and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. 81, SB015-1-4, (2012).
- [11] T. Harada, Y. Fuseya, H. Kusunose, and K. Miyake, 論文準備中。
- [12] Y. Yoshioka and K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 093702-1-4, (2012).
- [13] S. Kawasaki *et al*, Phys. Rev. B 66, 224502, (2002).
- [14] S. Kawasaki *et al*, Phys. Rev. Lett. 91, 137001, (2003).
- [15] G.-q. Zheng *et al*, Phys. Rev. B 70, 014511, (2004).
- [16] R. Settai *et al*, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 073705, (2008).
- [17] Z. Li *et al*, Phys. Rev. B 86, 180501(R), (2012)
- [18] S. Kawasaki *et al*, Supercond. S&T 23, 054004, (2010).
- [19] D. Haug *et al*, New J. Phys. 12, 105006, (2010)
- [20] S. Shimizu *et al*, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 043706, (2011).

著者紹介



みやけ・かずまさ

この30年くらい普通でない超流動・超伝導状態の可能性について理論的側面から研究してきました。今回はその中で奇周波数超伝導の話題を紹介します。

$^3\text{He-B}$ のトポロジカル超流動相

水島 健／岡山大学大学院 自然科学研究科 助教

^3He は極低温まで液体であり、かつクリーンな系であるため、自発的対称性の破れを伴う超流動相においても依然として高い対称性を保つ。本稿では超流動 ^3He に内在するトポロジーと自発的対称性の破れとが協調して引き起こす新しいトポロジカル量子現象について紹介する。

物質の量子状態を分類するための最も良く知られた理論は対称性の破れに基づくランダウ理論であろう。例えば、強磁性や超伝導等のような量子状態はスピン空間での回転対称性や $U(1)$ 位相対称性の自発的破れを伴う。各量子状態は破られた対称性に対応した秩序変数を用いて特徴づけられる。秩序変数は相転移温度以下において「連続的に」増加する。一方で、量子ホール状態のような対称性の低下を伴わない量子状態の存在も既に良く知られている。強磁場下の 2 次元電子系で実現するこの量子状態の起源は対称性の低下ではなく、(ブリルアンゾーンでの) 電子状態が含有する非自明な性質にある。この非自明な性質はバルクの電子波動関数を用いて定義されるチャーン数と呼ばれるトポロジカル不変量によって特徴づけられる [1]。秩序変数と異なり、このトポロジカル「不変量」は連続的にその値を変えることができない。この不変量を変更するためにはエネルギーギャップを一旦閉じることで電子状態を再構成する必要がある。つまり、トポロジカル不変量の異なる相境界には必ずギャップレスな電子状態が存在する (バルク・エッジ対応。図 1 も参照)。近年、このようなトポロジカル不変量という概念が絶縁体や超伝導・超流動体に幅広く展開され、物質の新たな側面が切り出されつつある [2-5]。本稿では、超流動 ^3He の持つ豊かな対称性とトポロジカル不変量の関係性を明らかにすることで、「自発的対称性の破れ」と「トポロジカル相転移」という質の異なる 2 つの物

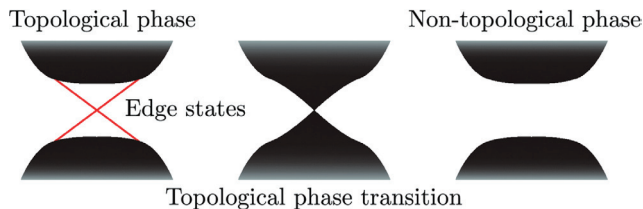


図 1. トポロジカル相 (左) と非トポロジカル相での電子状態 (右) の例。トポロジカル相転移点ではバルクギャップが閉じる。非自明なトポロジカル不変量はエッジ状態の存在を保証する。

理現象が協調して起こす新しいタイプの量子現象について紹介する。

^3He は極低温まで液体であり、かつ非常にクリーンな系であるため、高い対称性を持つ。また、原子核スピン $1/2$ を持つため、軌道空間での 3 次元回転対称性 $SO(3)_L$ に加えて、スピン空間での回転対称性 $SO(3)_S$ を持つ。さらに、 $U(1)$ 位相、時間反転対称性、粒子・ホール対称性等を保つ。バルク ^3He では 1mK 程度で超流動転移し、これらの対称性の一部が自発的に破れる。例えば、バルク超流動相図の大部分を占有する B 相では、スピンと軌道空間での相対的な回転対称性が破れる。つまり、B 相の秩序変数の軌道自由度とスピン自由度は特定の相対角度に「固定」された状態であり、その秩序変数空間は $U(1) \times SO(3)_{L,S}$ と表される (図 2(a))。一方で、スピンと軌道の同時回転操作 $SO(3)_{L+S}$ や時間反転操作に対して不変であり、対称性の破れた状態の中で最も高い対称性を維持している [6]。スピンと軌道の同時回転操作 $SO(3)_{L+S}$ の様子を図 2(b) と (c) に示した。特に、スピン空間での回転行列 $R(S)$ は秩序変数の自由度 (相対回転の軸と角度) を含んでいる。

以上の対称性を踏まえて、超流動 ^3He の B 相の準粒子状態のトポロジカルな性質をみていこう。超流動相の準粒子状態は、いわゆる Bogoliubov-de Gennes (BdG) ハミルトニアン固有状態として与えられる。バルクの B 相を考え、時間反転対称性を破るような外

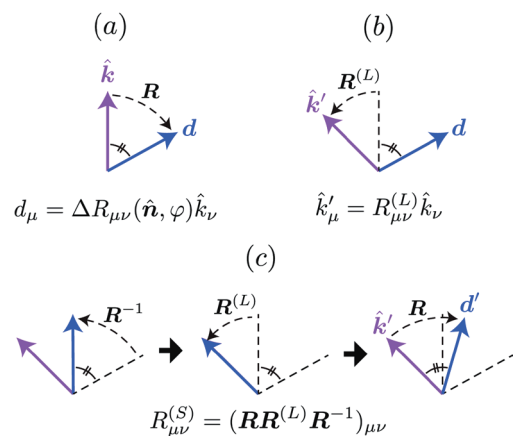


図 2. (a) B 相の秩序変数。スピン自由度を表す d ベクトルは軌道自由度 k からの相対回転 R によって特定の角度で固定される。(b) 軌道空間での回転 $R^{(L)}$ と (c) スピン空間での回転 $R^{(S)}$ の様子。軌道とスピン空間の同時回転後の状態 d' は元の状態 d と等価である (ギリシア文字の添字は x, y, z を表す)。

場は存在しないとしよう。超流動³Heのトポロジカル不変量は運動量空間とエネルギー空間における3次元巻き付き数としてVolovikにより導入された[7]。本来の動機はPlanar相とA相という同じ準粒子スペクトル(3次元フェルミ球の両極に点ノード構造)を持ち、かつ、熱力学的に等価な2つの超流動相を区別するためであったが、後にバルクB相へも適用された[8]。バルクB相の3次元巻き付き数はSchnyderら[9]によって別の視点からも導入されたが、結果として両者は等価である。詳細についてはそれぞれの文献に委ねるが、バルクB相のトポロジーにとって必要な条件は、(i)準粒子エネルギーが有限のギャップを持っていることと、(ii)BdGハミルトニアンと反可換(或は可換)な演算子 S が定義されることである(カイラル対称性)。B相におけるカイラル演算子 S は時間反転操作 T と粒子・ホール変換操作 C を組み合わせたものである($S=TC$)[8,9]。この2つの条件がそろっていれば、トポロジカル不変量としての3次元巻き付き数が定義でき、実際にB相では巻き付き数は2という非自明な値をとる。トポロジカル不変量はバルク・エッジ対応を通して、マヨラナコーンと呼ばれる表面状態およびスピンの流として顕在化する。マヨラナコーンの示す顕著な性質として、イジング的なスピン帯磁率(マヨラナイジングスピン)が挙げられる[10-15]。

以上より、B相のトポロジカル超流動性は時間反転対称性と粒子・ホール対称性によって保証されているといえる。言い換えると、時間反転対称性を破る磁場等のような外場に対してトポロジカル相は安定でないように思われる。これはNMR等のような磁場を伴う実験では致命的である。しかしながら、上述のトポロジカルな議論を整理すると、カイラル対称性に必要な条件は時間反転対称性ではなく、より一般的な離散対称性で構わないことがわかる。それでは、一様磁場中のB相で離散対称性は保たれているのだろうか？

この問いに答えるために、まず³He-B相の秩序変

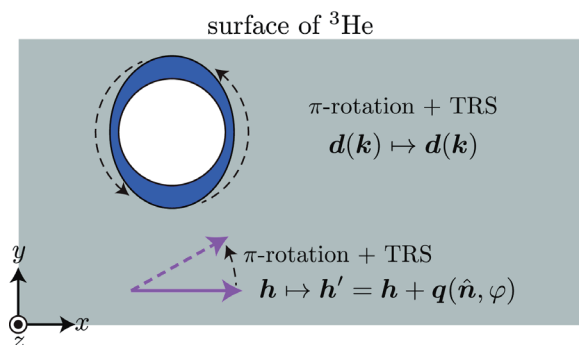


図3. 表面に対して平行に磁場を印加した場合のB相秩序変数の模式図。B相秩序変数は軌道とスピン空間の同時 π 回転操作と時間反転操作(TRS)に対して不変である。同じ操作を磁場に適用すると、秩序変数空間に依存した量 q が現れる。 $h=H/|H|$ は磁場の方向を表す。

数がスピンと軌道空間での連続的な同時回転対称性 $SO(3)_{L+S}$ を持っていることを思い出そう。具体的に、図3に示すように xy 面に壁を設置する。壁では対破壊効果が生じるため、壁に垂直な運動量を持つ秩序変数は強く抑制される。つまり、スピン・軌道空間の回転対称性が壁に垂直軸(z 軸とする)周りの $SO(2)$ に低下する。ここに、さらに x 軸方向に磁場 H を印加しよう。一様磁場は等方的な秩序変数を楕円体状に歪める。これは、B相の秩序変数のスピンと軌道自由度が結合しているためであり、磁場を印加するにつれて秩序変数の磁場に平行な成分がつぶれていく。磁場による対破壊効果の為に、 z 軸周りのスピン・軌道空間の2次元連続回転対称性 $SO(2)$ が z 軸周りの2回回転対称性に低下する。一方で、B相の秩序変数は磁場が存在したとしても時間反転操作に対して不変である。

以上は秩序変数の持つ対称性である。 z 軸周りのスピン・軌道空間の同時 π 回転操作(U とする)は磁場の向きを変える。ここで注意しておきたいのは、図2(c)でみたようにスピン空間での回転 $R^{(S)}$ は秩序変数の自由度(相対回転軸と回転角)に依存するということである。図3に記すように、 z 軸周りのスピン・軌道空間の π 回転操作に加えて時間反転操作を行った後の磁場 h' は必ずしも元の磁場の方向 h に戻らず、秩序変数空間に依存した量 q だけ変更を受ける。 q はミクロな計算に基づいて決められるべき量であるが、一般論として言えることは、「 $q=0$ である限り、磁場中のB相のハミルトニアンはスピン・軌道空間の π 回転操作 U と時間反転操作 T の同時操作 UT に対して不変」である。この離散回転操作に粒子・ホール変換 C を組み合わせることで磁場中B相のハミルトニアンと反可換なカイラル演算子 $S=UTC$ が定義できる。このように、一見すると時間反転対称性が破れた系においても、系固有の離散対称性を用いることでカイラル対称性を復活させることができ、結果としてトポロジカル不変量としての巻き付き数を定義できる。磁場中B相の巻き付き数 w は離散対称性が存在する限り、即ち、 $q=0$ である限り非自明な値($w=2$)となる(図4)。この非自明なトポロジカル不変量を持つ磁場中B相は、バルク・

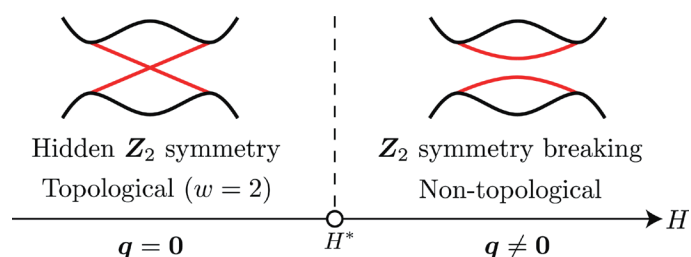


図4. 平行磁場中での超流動³He-Bの相図。

エッジ対応の結果 [14,16] として、その表面に局在したマヨラナ粒子を伴う。一方で、 q 値が有限となるとマヨラナコーンに質量ギャップが生じ、イジング異方性も消失する。

ここまではハミルトニアンに対称性に基づく定性的な議論を行ってきた。しかしながら、離散対称性を決定づける q については、具体的にミクロな計算から決定する必要がある。実際に文献 [14] において、準古典 Eilenberger 理論を用いることで q 値を磁場の関数として決定した。図 4 に示すように、 q 値がゼロから有限の値に変わる臨界磁場 H^* が存在する。この臨界磁場は核スピン起因の磁気双極子相互作用のスケールで決まっており、おおよそ数十ガウスである。 H^* 以下の低磁場領域では離散対称性が保たれており、その結果として非自明なトポロジカル不変量が存在する。この領域では極端なイジング性のために、表面に平行な磁場は表面マヨラナコーンと結合することができず、表面のスピンド磁率は抑制される。一方の高磁場側では離散対称性が破れた非トポロジカル相が実現する。この相ではイジング異方性は消失し、表面束縛状態が磁場に応答する結果として、非常に大きなスピンド磁率が生じる [11,14,15]。

以上より、磁場中 $^3\text{He-B}$ のトポロジカル相とマヨラナ粒子は離散対称性によって保護されており、「対称性によって保護されたトポロジカル相」と呼ばれる。この相は臨界磁場 H^* において、離散対称性の自発的破れとともに自明な超流動相へトポロジカル相転移する。このような自発的対称性の破れによって引き起こされるトポロジカル相転移は非常に稀な例であり、超流動 ^3He の持つ高い対称性によって実現される。さらに、この量子相転移は通常のトポロジカル相転移とは定性的に異なる。通常のトポロジカル相転移では、図 1 に示したように、相転移点において準粒子のトポロジを再構成するために一旦バルクギャップを閉じる。しかしながら、「対称性によって保護されたトポロジカル相」では対称性の自発的破れによって準粒子のトポロジを再構成することができるので、ギャップを閉じる必要が無い。相転移点ではマヨラナコーンが突然に質量ギャップを伴うのである (図 4)。このように、磁場中 B 相では、「自発的対称性の破れ」と「トポロジカル相転移」という 2 つの質の異なる物理現象が協調して引き起こす新しいタイプのトポロジカル量子現象が潜んでいる。

^3He のトポロジカル超流動性についての理解はこの 2、3 年で急速に深まったと言える。さらに、東工大の奥田グループの B 相での横波音響インピーダンスの実験 [17] により、線形分散を持つ表面状態 (マヨラナコーン) が検出された。マヨラナイジング性やスピン流といったトポロジカル不変量に直接的に起因した物理現象の検出が今後の急務の課題であろう。特に、有限磁場での量子相転移はスピンド磁率の異常な振る舞いを伴う。これは今後の NMR の実験による観測が期待される。超流動 ^3He のスピンドダイナミクスに対しては、所謂 Leggett-Takagi 理論に基づく強力な理論が存在す

る。しかしながら、マヨラナイジング性やスピン流が生じるのは表面から超流動コヒーレンス長 (数十 nm) 程度の非常に狭い領域であり、これは従来の Leggett-Takagi 理論の適用範囲外である。故に、従来の理論は「局在したマヨラナ粒子やスピン流がどのようにスピン運動に影響するか？」に対する明確な答えを与えない。今後は、Leggett-Takagi 理論を越えたミクロな視点から超流動 ^3He のスピンドダイナミクスを再考することも必要であろう。

本研究は、佐藤昌利氏 (名古屋大) と町田一成氏 (岡山大) との共同研究である。

参考文献

- [1] D.J. Thouless, et al., Phys. Rev. Lett. 49, 405 (1982).
- [2] Y. Tanaka, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011013 (2012).
- [3] X.-L. Qi and S.-C. Zhang, Rev. Mod. Phys. 83, 1057 (2011).
- [4] 佐藤昌利、物性研究 94, 311 (2010).
- [5] 水島健、物性研究 97, 149 (2011).
- [6] D. Vollhardt and P. Wolfe, The Superfluid Phases of Helium-3 (Taylor and Francis, London, 1990).
- [7] G.E. Volovik, The Universe in a Helium Droplet (Oxford University Press, Oxford, 2003).
- [8] G.E. Volovik, JETP Lett. 90, 587 (2009).
- [9] A.P. Schnyder, et al., Phys. Rev. B 78, 195125 (2008).
- [10] S.-B. Chung and S.-C. Zhang, Phys. Rev. Lett. 103, 235301 (2009).
- [11] Y. Nagato, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78, 123603 (2009).
- [12] G.E. Volovik, JETP Lett. 90, 398 (2009).
- [13] R. Shindou, et al., Phys. Rev. B 82, 180505(R) (2010).
- [14] T. Mizushima, et al., Phys. Rev. Lett. 109, 165301 (2011).
- [15] T. Mizushima, Phys. Rev. B 86, 094518 (2012).
- [16] M. Sato, et al., Phys. Rev. B 83, 224511 (2011).
- [17] Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys.: Condens. Matter 24, 343201 (2012).

著者紹介



みずしま・たけし

1977 年岡山生まれ。2000 年岡山大学理学部卒、2005 年同大学院自然科学研究科博士課程修了 (博士 (理))。2002 年学振特別研究員 (DC1)、2004 年より現職。冷却原子気体・超流動 ^3He ・超伝導物質系に広く興味を持っている。

超伝導体／強磁性半導体接合でのゼロバイアスコンダクタンスピークの観測

赤崎 達志／NTT 物性科学基礎研究所 主幹研究員

超伝導体／強磁性体 (S/F) 接合では、超伝導と強磁性の共存により様々な量子現象が出現すると期待されている。以下では、従来型の *s* 波超伝導体を用いた S/F 接合中での超伝導と強磁性の共存を考える。F 中での有限な交換エネルギー h_{ex} を考慮すると、形成されるクーパー対は、反平行スピンの電子対で有限な重心運動量を持つか、平行スピンの電子対で重心運動量を持たない場合が考えられる。前者は、よく知られた FFLO 状態であり、F 中で対関数の振幅が正負に振動しながら減衰していく。このため S/F/S 接合では、位相差がゼロの時に安定になる通常ジョセフソン接合 (0 接合) と位相差が π の時に安定になる場合 (π 接合) が出現する [1]。当初の S/F 接合に関する実験的成果は、この S/F/S 接合における 0- π 転移の観測であった。Ryazanov らは、F として小さい h_{ex} を有する CuNi を用い、F の厚さによって Josephson 電流が非単調に増減を繰り返すことから、0- π 転移していることを明らかにした [2]。同様な手法で、Kontos らも Nb/PdNi/Nb 接合で 0- π 転移を観測している [3]。しかしながら、このような現象は、F 中の対関数が h_{ex} の増大に従って指数関数的に減衰するため、弱い強磁性の場合にのみ観測可能でありせいぜい数十 nm 程度の短距離効果であった。ところが、2006 年に Keizer らにより、完全偏極しているハーフメタルの CrO_2 を F として用いた S/F/S 接合において、F の長さが 0.3 ~ 0.4

μm と十分長いにもかかわらず Josephson 電流が流れることが示された [4]。この実験結果は、FFLO 状態では説明することができず、平行スピンの重心運動量を持たないクーパー対の存在が要請される。このクーパー対の対関数は、スピン部分と軌道部分が対称であるため、2 電子の入れ替えに対して反対称であるというフェルミ統計に由来する要請を満たすためには、2 電子の時間の入れ替えによって対関数が反対称にならざるをえない。これこそ奇周波数クーパー対と呼ばれる新奇のクーパー対である。理論 [5, 6] によれば、S/F 界面近傍にバルクの F 中の磁化の向きとはノンコリニアな磁化を持つ界面層が存在し、スピン反転散乱が起きたとすると、平行スピン三重項のクーパー対が F 中に誘起されると予想されている。この平行スピン三重項のクーパー対は、交換エネルギーの影響を全く受けないため F 中奥深くまで侵入し、長距離にわたり Josephson 電流を運ぶことが可能となる。Khaire らは、F として Co を用いた S/F/S 接合に界面層として弱い強磁性体である PdNi or CuNi を導入した場合としない場合を比較し、界面層がある場合は Co 層が厚くなくても Josephson 電流が流れることを示した [7]。同様に、Robinson らは、原子層ごとに磁化が円錐の外側を沿うように回転するコニカル磁性体である Ho を界面層に用いることで、Josephson 電流の減衰が抑制されることを示している [8]。これらの実験結果は、奇周波数

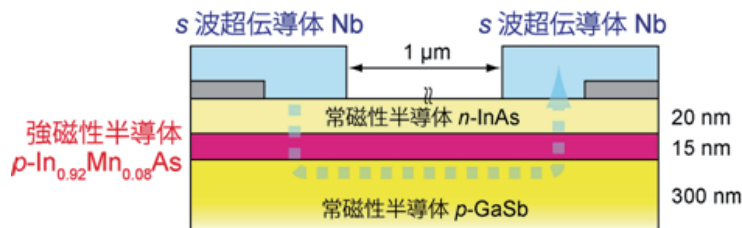


図 1: 図 1. Nb/*n*-InAs/*p*-InMnAs 接合の模式図。薄い水色の矢印は、この接合における電流の流れ方を示す。

WEB 非公開

図 2 : Nb/*n*-InAs/*p*-InMnAs 接合の微分コンダクタンス-バイアス電圧特性の温度依存性

クーパー対の存在を強く示唆するものである。

一方、我々は奇周波数クーパー対の存在を確認する別のアプローチとして、奇周波数クーパー対が存在することによる準粒子状態密度の変化に注目している。奇周波数クーパー対が存在するならば、F 中の状態密度はゼロエネルギーにピークを持ち、その幅は Thouless energy で特徴付けられることが理論的に示されている [9]。我々は、常磁性半導体である *n*-InAs と強磁性半導体である *p*-InMnAs との二層伝導チャンネルを有する超伝導接合（図 1 参照）を作製し、状態密度が反映される微分コンダクタンスの評価を開始している。この接合では、超伝導金属と容易にオーミック接触が取れる *n*-InAs 中にスピン偏極を誘起することができると考えられる。また、*p*-InMnAs は強磁性体であると同時に半導体でもあり、金属と異なり比較的容易に電界でキャリア濃度を制御することが可能である。そのため、キャリア濃度に強く依存する磁気特性も電界によって制御できることが知られている [10]。これにより、将来的には電界によって S/N 接合を S/F 接合に転移させることが可能となり、一つの素子で強磁性に転移することによって出現する効果を抽出することができるかと期待される。図 2 に、*n*-InAs/ 強磁性 *p*-In_{0.92}Mn_{0.08}As 二層チャンネル超伝導接合の dI/dV - V 特性の温度依存性を示す。この図から、0.6 K 以下でミニギャップと考えられる微分コンダクタンスの減少とゼロバイアスコンダクタンスピーク (ZBCP) が観測されることがわかる。また、この ZBCP は、図 3 に示すよ

図 3 : ゼロバイアスコンダクタンスの温度依存性

うに 0.6 K 以下で Nb のギャップ電圧以上で求めたノーマルコンダクタンスよりも大きな値になることが分かる。この結果は、この ZBCP が S/N 接合で観測される無反射トンネリングでは説明できないことを示唆している。次に、図 4(a) にこの接合の dI/dV - V 特性の磁場依存性を示す。印加磁場が増大するにつれて、ZBCP とミニギャップ構造が小さくなっていくことが分かった。この実験結果は、図 4(b) に示した平行スピン三重項奇周波数クーパー対が F 中に侵入した場合に局所状態密度にゼロエネルギーピークが出現すると予想している理論計算と定性的に一致している。これらのことから、ZBCP の起源は奇周波数超伝導状態の ZEP と関連していると考えられるが、0.1 meV 程度と考えられる ZBCP の特徴的なエネルギースケールと Thouless energy との関係、平行スピン三重項奇周波数クーパー対を誘起するために必要なノンコリニアな磁化を持つ界面層の存在等、まだ未解明な部分があり、さらなる接合構造の改善、意図的な界面磁化層の挿入等を行い、これらを明らかにしていくことが今後の課題である。

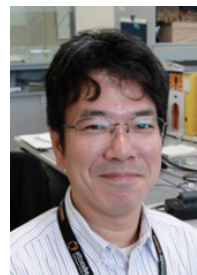
WEB 非公開

図 4: Nb/n-InAs/p-InMnAs 接合の微分コンダクタンスーバイアス電圧特性の磁場依存性 ((a) 実験、(b) 計算^[11])

参考文献

- [1] E. A. Demler *et al.*, Phys. Rev. B 55, 15174 (1997).
- [2] V. V. Ryazanov *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 2427 (2001).
- [3] T. Kontos *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 137007 (2002).
- [4] R. S. Keizer *et al.*, Nature 439, 825 (2006).
- [5] F. S. Bergeret *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 4096 (2001).
- [6] Y. Asano *et al.*, Phys. Rev. Lett. 98, 107002 (2007).
- [7] T. S. Khaire *et al.*, Phys. Rev. Lett. 104, 137002 (2010).
- [8] J. W. A. Robinson *et al.*, Science 329, 59 (2010).
- [9] T. Yokoyama *et al.*, Phys. Rev. B 75, 134510 (2007).
- [10] H. Ohno *et al.*, Nature 48, 944 (2000).
- [11] A. A. Golubov, Private communication.

著者紹介



あかざき・たつし

1962 年高知県出身、1984 年九州大学理学部物理学科卒業、1986 年九州大学大学院理学研究科修士課程修了、1986 年 NTT 基礎研究所研究員、1995 年 博士（工学）（大阪大学）、2005 年 NTT 物性科学基礎研究所スピントロニクス研究グループグループリーダー 現在に至る。

グラフェンでできた超伝導／強磁性／超伝導接合における磁性と超伝導の競合

神田 晶申 / 筑波大学 数理物質系 物理学域 准教授

炭素の2次元六方格子であるグラフェンは、フェルミ準位近傍の低エネルギーで円錐状の伝導体と価電子帯が頂点で接する線形のエネルギー分散を持つので (図1)、伝導電子 (ホール) は質量ゼロのディラック粒子として振舞います。その結果、“相対論的”とも呼べる効果が身近な固体中で起こり、固体の他の性質との相互作用を通して多くの新奇物理現象が現れることが期待されています。さらに、これをうまく使うと超高性能の電子デバイスを作ることも可能です。我々は特に、グラフェン／超伝導体、グラフェン／強磁性体接合に着目して研究をおこなっています。

グラフェン／超伝導体接合において特殊な現象を観測するためには、超伝導体との界面におけるグラフェンのキャリア密度をゼロに近づけることが肝要となります。一方で、現実のグラフェンでは、ゲート電界によってキャリア密度を変化させようとしても、電極との接合界面ではキャリア密度が固定化 (ピン止め) され、ゼロにできないことが、伝導特性の接合長依存性から明らかになりました。現在ピン止めをはずすために、接合界面に多層グラフェンを成長する技術を開発しており、良好な結果を得つつあります。

一方、グラフェン／強磁性体界面では、強磁性体からのスピン注入を起こすことで、グラフェン内にアップスピン数、ダウンスピン数の差を誘起することができます。Hanle 法という方法を使って、グラフェン中のスピン数の差の拡がり数ミクロンに達することを確認しました。

このような性質を使うと、超伝導体／グラフェン／超伝導体接合のグラフェン部分に強磁性体を接続した構造において、実効的な超伝導／強磁性／超伝導 (SFS) 接合が実現できることが期待されます。理論では、グラフェン構造を持つ SFS 接合モデルの解析が行われており、様々な興味深い現象が予言されています。本研究では、その検証を行うことが最終目標です。



かんだ・あきのぶ

京都府宇治市出身。東京大学理学部物理学科卒、同大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員、同フロンティア研究員、筑波大学物理学系助手、講師を経て現職。最近気分転換と減量を兼ねて、近所のジムに登録しました。いつまで続くことやら…。

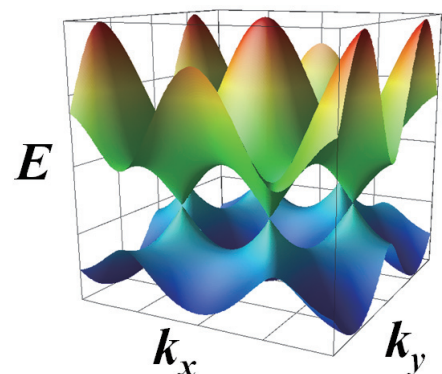


図1：グラフェンのバンド構造

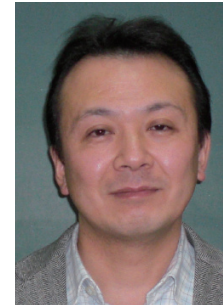
一軸応力下比熱・磁歪測定によるスピン三重項超伝導二段転移の解明

天谷 健一 / 信州大学 教育学部 教授

Sr_2RuO_4 は転移温度が 1.5 K のスピン三重項の対称性をもつ第二種超伝導体ですが、超伝導が消失する磁場（上部臨界磁場 B_{c2} ）直下でもう一段超伝導転移が生じるという、「超伝導二段転移」という特異な現象が見つかっています。この二段転移は、これまで2つの連続する2次相転移と考えられていたのですが、最新の精密測定によれば、そうではない可能性が指摘されています。また、 Sr_2RuO_4 と析出相の界面において、本来の超伝導（1.5K 相）の他に超伝導転移温度が約 3 K の超伝導（3K 相）が生じることが知られていましたが、「3 K 相」の体積分率は [001] 軸方向の一軸応力によって劇的に増大する一方、「1.5 K 相」の超伝導転移温度は、一軸応力によって減少することが明らかになってきました。磁場下での超伝導二段転移や奇妙な一軸応力依存性の起源を明らかにすることが Sr_2RuO_4 のスピン三重項超伝導の発現機構の本質的な解明につながると考えられます。

公募研究では、まず、常圧における磁化や磁気トルク測定などの熱力学的測定により、常圧における「超伝導二段転移」の次数を明らかにしたあと、一軸応力下における物性測定を行ない、この超伝導転移の一軸応力依存性と磁歪の磁場依存性を比較し、一軸応力依存性や超伝導二段転移の起源を明らかにすることを目指しています。

図1に実験結果の一例として、磁気トルクから得られた超伝導磁化の磁場に垂直な成分 M_{\perp} の磁場依存性を示します。1.1 T から 1.3 T にわたる「超伝導二段転移」が発生する磁場領域において、磁化が磁場の上げ下げによって異なる値をとる「ヒステリシス」が見られます。このことから、上部臨界磁場 B_{c2} での転移の次数ははっきりとはわかりませんが、その直下で起こる転移は1次相転移の可能性が強いことがわかりました。



てんや・けんいち

1966 年生まれ。北海道出身。1990 年慶應義塾大学工学部卒。1994 年慶應義塾大学大学院理工学研究科物理学専攻博士後期課程中退。北海道大学理学部助手、信州大学教育学部准教授を経て、現職。キャンパス分散型の「タコアシ大学」に所属しているため、長野と松本を往復しています。

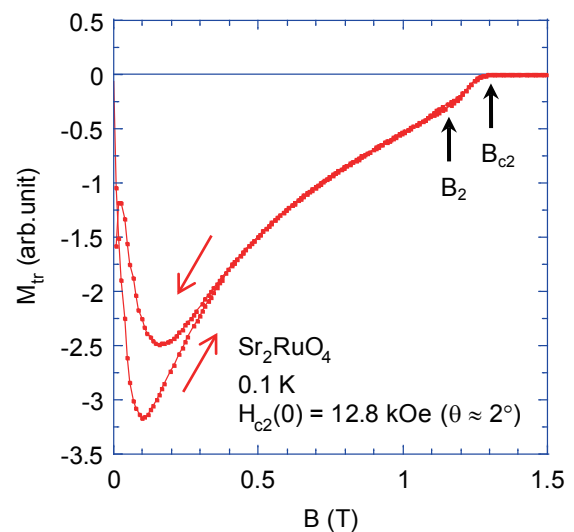


図1：超伝導磁化の磁場に垂直な成分

ジョセフソン効果による時間反転対称性の破れた超伝導状態の検証

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、超伝導電子対が時間反転対称性の破れた状態にある可能性が示唆されているものがあります。時間反転対称性の破れの検証では、 μ SR による自発磁場の検出に関するものが多いですが、私はこれらの超伝導体と従来型超伝導体間のジョセフソン効果を用いた検証を目指しています。

ジョセフソン効果は 2 つの超伝導体間の位相差を直接的に感知するため、良質の素子ではスリットによる光の回折現象と同様に、ジョセフソン臨界電流が磁場に対してフラウンホーファー回折図形を描いて増減しますが、時間反転対称性の破れがある場合は、時間反転に対応する磁場方向の反転に対し非対称で、複雑な磁場依存性を示すことが予想されます。実際の研究では、地球磁場の影響等で見かけ上の時間反転対称性の破れが見られることが多いですが (図 1 (a))、素子の構造、磁場遮蔽等の改善により、フラウンホーファー回折図形の磁場依存性が得られれば、時間反転対称性は破れていないと解釈できます (図 1 (b))。

本研究で対象としている UPt_3 , URu_2Si_2 は時間反転対称性の破れの可能性が議論されていましたが、ジョセフソン効果で見える限りは時間反転対称性の破れていない結果が得られてきています。特に UPt_3 では、3 つの直交する結晶軸方向について良質の素子が得られるようになり、最近提案された E_{1u} の対称性を持つ、時間反転対称性を破らない秩序変数で結果を説明できることが明らかになりました [2]。一方、空間反転対称性のない超伝導体の $LaPt_3Si$ で見られた、非対称な磁場依存性の原因はまだ分かっておらず、時間反転対称性の破れのような本質的な原因によるのかについては、今後の研究課題であると考えております。

[1] A. Sumiyama *et al.*: Phys. Rev. B 72 (2005) 174507.

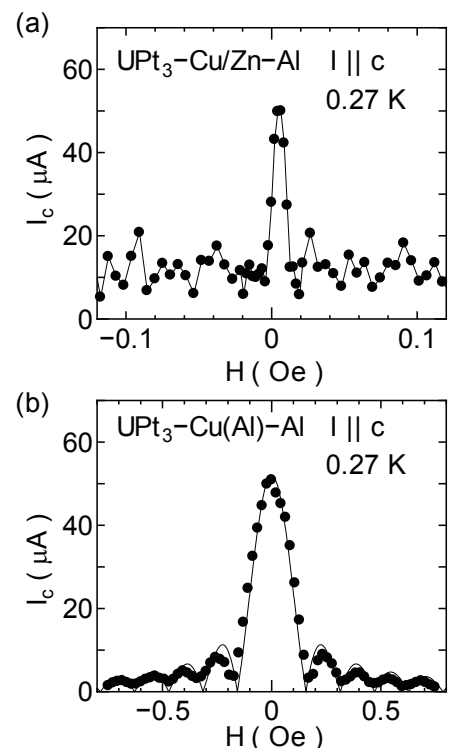
[2] J. Gouchi *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 113701.

図 1 UPt_3 のジョセフソン効果。
(a) 以前の素子 [1]、(b) 本研究で改善された素子 [2]。



すみやま・あきひろ

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。
最近、すっかり細かい作業が学生任せになってしまいました。



不均一超流動 ^3He における奇周波数状態のもたらす磁氣的性質の研究

松本 宏一 / 金沢大学 理工研究域・数物科学系 教授

エアロジェルという多孔体中に液体 ^3He を満たすと超流動性が抑制される。従って、スピン三重項・ P 波超流動状態とエアロジェルという不純物によって作られるフェルミ液体との界面を作ることができる。東谷氏(広島大)らの理論によればエアロジェルと超流動 ^3He の系では、異方的なクーパー対は不純物散乱により破壊され、表面に共存していた奇周波数と偶周波数のクーパー対の内、奇周波数 S 波クーパー対のみが存在できる。この効果により帯磁率の増加という現象が予測されている。本学術領域のメンバーである石川氏(大阪市大)らは、磁場勾配下での NMR により研究を行っているが、本研究では SQUID を用いた高感度の磁化・交流帯磁率同時測定により、帯磁率の異常を観測することを目的としている。

図 1 に示すような核断熱冷凍機を用い超流動状態まで冷却する。これまでに、試料にかかる静磁場マグネット、SQUID を用いたブリッジ回路、ピックアップコイルのテストなどを行った。試料であるエアロジェルの合成において、ガラス管内のゲルを乾燥する過程でゲルに割れや収縮が発生する問題が生じた。解決に時間を要したが、現在はゲルの実験セル内への設置方法を工夫するなどして、研究を行っている。

我々はエアロジェル中の液体 ^3He を伝播する超音波の実験も行った。常流動領域において、音速と減衰に異常なピークを観測した。本学術領域のメンバーである竹内、東谷両氏(広島大)は Kunusen 領域と流体力学的領域のクロスオーバーが音波の減衰の温度依存性に強く影響することを理論的に示した。領域研究会等で両氏と議論し、我々の観測した音波伝播の異常は、音波伝播の領域がクロスオーバーする温度域で粘性率が変化することによる透過率の変化に起因すると考え、解析を行った。その結果、クロスオーバー領域で起こる音波の異常な減衰の温度圧力依存性や減衰の大きさを説明する事ができた。



まつもと・こういち

1960年東京都出身。
83年東京工業大学理学部卒業、
88年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。89年東京工業大学助手、99年金沢大学助教授、2010年教授、現在に至る。
 ^3He , ^4He の超流動を中心とした低温物理実験のほか、低温工学の研究も行っています。



図 1 核断熱冷凍機と磁気特性測定装置

超流動 ^3He 中のトポロジカルオブジェクトの検出と制御

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 ^3He や常流動・超流動 ^3He 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、超低温 MRI 撮影装置 ULMRI を発展させて超流動 ^3He 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。

図 1 に示されているのは 1.5mK で撮影した超流動 ^3He -A 相 B 相共存状態の MRI 画像です。対称性の異なる 2 相の間には 1 次相転移が挟まれており、通常の実験条件下では過冷却状態での安定相の核生成のあとは速やかに安定相のみの単相状態になるのですが、多孔質物質エアロジェル中では有限幅の温度領域で共存状態が保たれます。その状態を温度精度 $1 \mu\text{K}$ で保つことで MRI 画像の取得に成功したものです。オレンジ色で示された円形の A 相の中に出現したくさび型の色の濃い領域が B 相の位置を表しています。

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の実体を可視化する計画を進めています。



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。

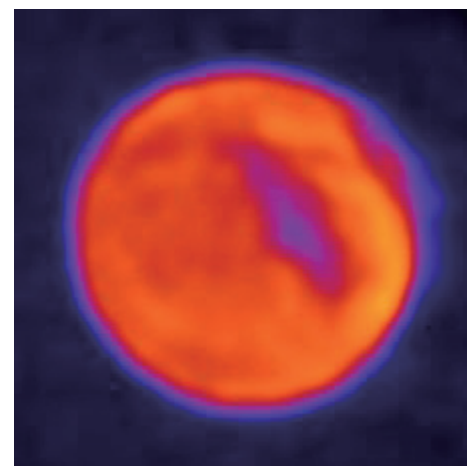


図 1 : 超流動 ^3He -A 相 B 相共存状態の MRI 画像

2次元光格子中の冷却イッテルビウム原子におけるゲージ場創生の新技術

吉川 豊 / 京都大学 大学院理学研究科 助教

2011年4月よりB01班の公募研究に参加させていただいています。私はこれまで、光を用いたボース・アインシュタイン凝縮体をはじめとする極低温気体原子の量子操作から、軌道角運動量を持った光ビーム、光ナノファイバーやフォトニック結晶共振器などのナノ量子光学デバイスの開発まで様々な研究を行ってきました。その経験を生かし、本学術領域では光格子中の冷却イッテルビウム原子に人口ゲージ場を発生させる実験的研究を行なっています。

人口ゲージ場は、非共鳴光を冷却原子系に照射することによって仮想的なゲージ場ポテンシャルを作り出し、本来電荷を持たない中性原子を磁場中の荷電粒子と同等に振る舞わせる技術です。本研究では特に、2次元光格子中の冷却イッテルビウム原子(図1)に対して、光誘起トンネリングと呼ばれる手法を用いて、非常に高強度の人口ゲージ場(1プラケット当りのパイエルス位相が π のオーダー)を発生させる実験を行なっています。この技術によって、気体原子系で量子ホール状態やスピンホール状態などのトポロジカル量子状態の実現が期待されます。また、量子縮退原子を用いることで、不純物ゼロや極低温(ナノケルビンオーダー)の実験環境が容易に作れるうえ、イッテルビウム原子はボゾンとフェルミオン両方の安定同位体が利用できます。そのため、固体電子系で発展してきた既知の現象の高精度検証にとどまらず、物性物理学の枠組みを超えた新しい物理分野を開拓できる大きな可能性を秘めています。



よしかわ・ゆたか

1976年生まれ。東京都出身。慶應義塾大学理工学研究科物修士課程修了後、東京大学大学院総合文化研究科助教を経て、現職。趣味はサイクリング、ジョギングなど。

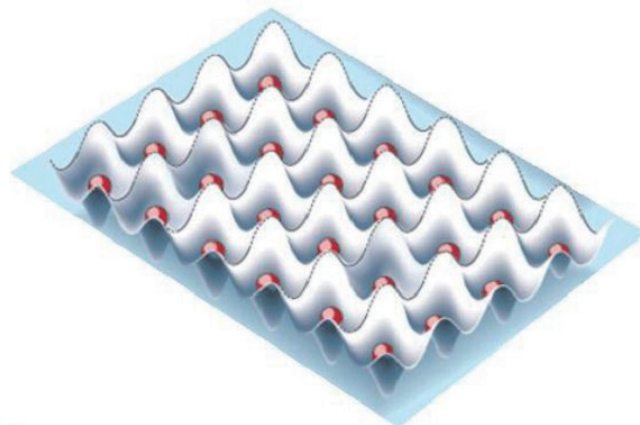


図1：2次元光格子ポテンシャル中にトラップされた冷却原子の模式図

微小磁場中スピノルボーズ凝縮体を用いた新奇量子渦の実現

東條 賢 / 中央大学 理工学部 准教授

希薄 Rb 原子気体のボーズアインシュタイン凝縮体を用いた実験的研究を行っています。原子のスピン自由度を利用したボーズ凝縮（スピノルボーズ凝縮）では、磁氣的性質を反映した様々な量子状態が存在します。特に Rb 原子のスピン 2 状態では新しい磁気相の可能性が理論的に予測されていますが、安定的なボーズ凝縮体生成と微弱な磁場環境が必要で、磁気相は未だ決定していません [1]。近年、量子渦芯と凝縮体の間には磁気相の関係があるため、磁気相を反映した量子渦芯が形成されることが示され、特にスピン 2 では凝縮体が量子渦芯のどちらかに新奇磁気相状態の Cyclic 状態が生じると予想されています [2]。本研究では 10 ミリガウス程度の微小磁場中においてスピノルボーズ凝縮体を生成し、内部に発生させた特異な量子渦の生成と観測を目指しています。

量子渦生成方法には磁場もしくは光を用いる方法があります。本研究では微小磁場中のスピノル状態を用意するため磁場は使えず、光で凝縮体をかきまぜる「光スプーン法」を用います。これまでの磁気トラップ中の光スプーン実験とは異なり [3]、まだ実現されていない光トラップ中の光スプーン法による量子渦生成を行いました。図 1 に実験結果を示します（トラップ開放後に撮影、黒い部分が凝縮体の影）。ボーズ凝縮体の中心付近に量子渦芯が確認でき、スピン操作可能な光トラップにおける量子渦生成に初めて成功しました。

2012 年 4 月からは新しい所属に移り、新規実験装置を立ち上げ中です。旧装置で困難であった空間解像度の向上と環境磁場の能動的制御を新たに導入して、微小磁場環境における量子渦ダイナミクスの観測実現を目指しています。

[1] M. Ueda, "Fundamentals and new frontiers of Bose-Einstein condensation", World Scientific, Singapore (2010),

[2] M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, arXiv:0907.3716.

[3] K. W. Madison, F. Chevy, W. Wohlleben, and J. Dalibard, Phys. Rev. Lett. 84, 806 (2000).



とうじょう・さとし

出身：大阪府

経歴：2003 年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、京都大学大学院理学研究科博士研究員、学習院大学理学部助教を経て 2012 年より中央大学理工学部准教授。

今年の 4 月から新しい所属に移り、所属学生とともに研究用のモノ作りに励んでおります。最近はメンバーの成長を目の当たりにし、刺激の多い日々を送っています。

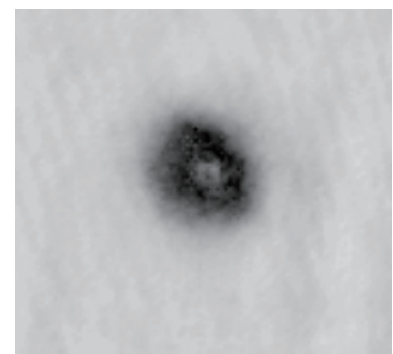


図 1：光スプーン法による量子渦生成。中空部は量子渦芯

イオンを用いた超流動 ^3He 自由表面新奇現象の研究

池上 弘樹 / 理化学研究所 基幹研究所 専任研究員

私は、超流動 ^3He 、 ^4He といった量子液体の表面上あるいは表面下に蓄えられた 2次元電荷系を舞台とした研究を行っております。この系には 3つの側面があると思います。1つは、古典 2次元電子系としての研究対象、2つ目は電子系とヘリウム表面の結合により出現するダイナミクスを研究する舞台、3つ目はヘリウム表面を研究するためのプローブです。それぞれ異なった面白さがあります。また、液体ヘリウムと 2次元電荷系は共にとてもきれいな系なので、明確な実験結果が得られるという点も魅力です。この新学術領域では、3つ目の点から研究を行っています。

この新学術領域では、特に、超流動 ^3He -B 相の自由表面下に形成される表面束縛状態の観測を目指しています。B 相の表面には、B 相のトポロジカルな性質を反映して表面束縛状態が出来ますが、この表面束縛状態は、驚くべきことに、粒子と反粒子が等価なマヨラナ粒子的な性質を示すと予想されています。また、自由表面は乱れや不純物が無い理想的な表面であるため、表面束縛状態を研究するための最高な舞台と言えます。しかし、自由表面に形成される表面束縛状態を観測するための良いプローブはありません。私は、自由表面下にトラップされたイオン（正イオン、負イオン）がそのためのプローブになり得ないかという発想から研究を開始しました。特に、イオンの輸送特性の測定を行うことにより表面束縛状態の観測を目指しています。

また、時間反転対称性を破った状態である超流動 ^3He -A 相も興味ある対象です。A 相では、そのトポロジカルな性質の表れとして、イオンがその進行方向と垂直な方向に力を受けるといふ intrinsic Magnus 力というもの理論的に予想されています。この新学術領域では intrinsic Magnus 力の観測とその性質の解明、また intrinsic Magnus 力と A 相のトポロジーの関係性を明らかにしたいと思います。



いけがみ・ひろき

1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程中途退学。2001年博士（工学）。1999年東京大学大学院総合文化研究科助手。その後、独立行政法人理化学研究所研究員を経て、現在、専任研究員。趣味はドライブ。

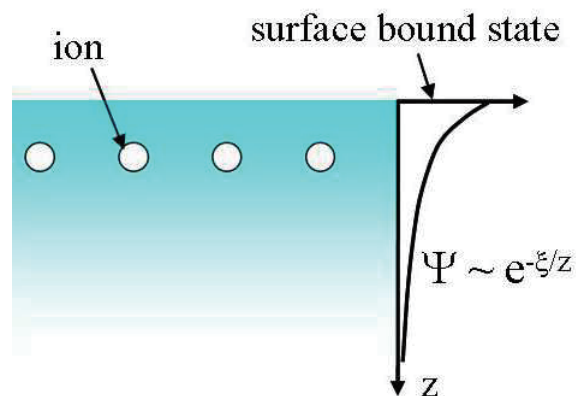


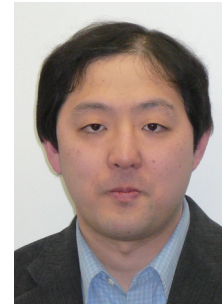
図1：超流動 ^3He の自由表面と表面下にトラップされたイオン

高分解能スピン分解 ARPES によるトポロジカル絶縁体における微細電子構造の研究

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のスピン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、スピン分解 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ン検出が大変難しく、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、数年前から東北大学において「スピン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、スピン分解時において 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、この装置を用いて様々なトポロジカル絶縁体やその候補物質の電子状態を決定するための研究を行っています。

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。例えば、トポロジカル絶縁体 TlBiSe_2 と通常の絶縁体 TlBiS_2 の固溶系である $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ では、 $x=0.5$ においてトポロジカル量子相転移が起こる事を明らかにし、さらにトポロジカル相では時間反転対称性を明示的に破らずともディラック電子が質量を獲得する事を見出しました。また、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ においては、バルクを絶縁体に保ったままでディラック電子のキャリア符号や表面バンド構造を制御できることがわかりました。より最近では、40 年以上前から研究されている SnTe という物質が、2 重のディラックコーン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ました(図2)。今後は、これらのトポロジカル物質や新型のトポロジカル絶縁体候補物質の電子構造をスピンにまで分解して精度よく決定し、物性発現機構に密接に関係する基盤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。調味料の微妙な配合が実験家の腕の見せ所。

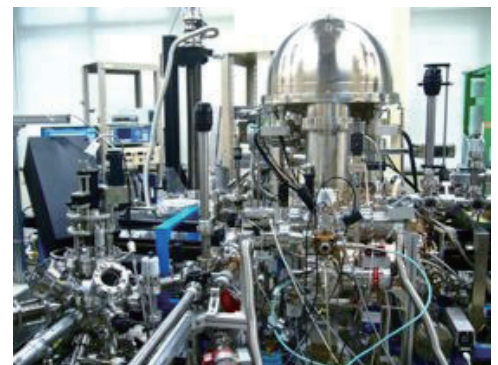


図1：超高分解能スピン分解光電子分光装置

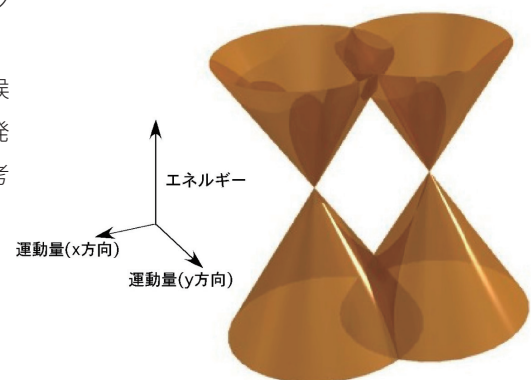


図2：SnTe の二重ディラックコーン状態

p, f 電子系トポロジカル超伝導の探索

村中 隆弘 / 電気通信大学 情報理工学研究科 先進理工学専攻 准教授



むらなか・たかひろ

本公募研究では、 p 電子或いは f 電子が主な役割を果たす系において、空間反転対称性の破れた結晶構造を有する新超伝導体の開発を目的としている。本公募研究期間中に目的とする超伝導体の発見には至らなかったが、これまでに発見した3つの系の超伝導物質について報告する。

① 擬2元系 AlB_2 型化合物

$AESi_2$ (AE: Ca, Sr, Ba) で表される物質群は、Si サイトへの遷移金属置換により AlB_2 型構造を示す。Cu 置換系 $Ba(Cu_xSi_{2-x})$ は $0.2 \leq x \leq 0.8$ において AlB_2 型構造を形成し、 $x=0.3$ において最大 $T_c=3K$ となることを発見した [1]。また、Cu 置換濃度の上昇に伴って T_c は減少する。この系は Si サイトへ Cu がランダムに置換された AlB_2 型構造であるが、ある置換濃度では SrPtAs ($T_c=2.4K$, KZnAs 型構造 SG: $P6_3/mmc$) に見られるような、Cu と Si が蜂の巣型格子を規則的に占有しローカルに空間反転対称性を破る可能性も考えられる。

② MAX 化合物

MAX 相と呼ばれる物質群は $M_{n+1}AX_n$ ($n=1\sim3$) (M: 遷移金属, A: Al, In, Sn 等, X: C, N) の組成式で表され、 $n=1$ の場合、 M_6X ブロックと A 層が積層した Cr_2AlC 型構造 (SG: $P6_3/mmc$) をとる。この系では Nb_2InC ($T_c=7.5K$) などいくつかの超伝導物質が報告されているが、M サイトへ遷移金属元素が置換された超伝導体は報告されていない。特に、M サイトへの Y や Lu 置換は理論計算から否定されていたが、我々は Lu_2SnC の合成に成功し $T_c=5.2K$ で超伝導転移を示すことを明らかにした [2]。バンド計算からは、 E_f 近傍の状態密度の関係から Lu d 電子が重要な役割を担っていると考えられる。

③ Ga クラスター化合物

空間反転対称性の破れた Co_2Ga_9 型構造 (SG: Pc) をはじめとする2元系 TM-Ga 化合物は遷移金属を内包した Ga クラスター構造を持ち、その中でも8つの Ga 元素の共有結合によって形成される anti-prism 型構造が、その構造安定性に重要な役割を担っている。この特徴を有する $PaGa_5$ 型構造 (SG: $I4/mcm$) の化合物に着目したところ、 $NiGa_5$ ($T_c=3.5K$), $PdGa_5$ ($T_c=2.3K$) を発見した。バンド計算からは、 E_f 近傍の状態密度の関係から Ga の anti-prism 型構造が重要な役割を担っており、さらに、両物質における T_c の違いは内包される遷移金属元素の状態密度の違いによって生じていると考えられる。

参考文献

- [1] K. Inoue *et al.*, Physics Procedia 27, 52-55 (2012).
[2] S. Kuchida *et al.*, proceedings in ISS2012.

富山県出身。2003年青山学院大学理工学研究科修了 博士(理学)。2003年4月から青山学院大学理工学部 PD、助手、助教を経て、2012年4月より現職。2012年4月より現職。

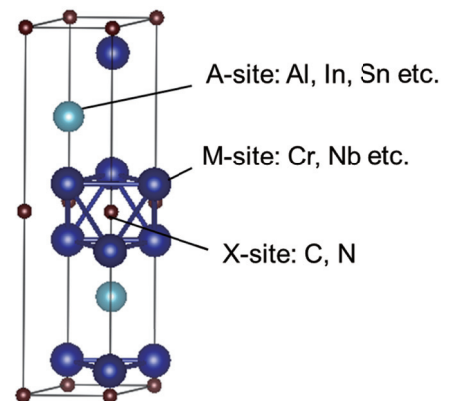


図1: Cr_2AlC 型構造

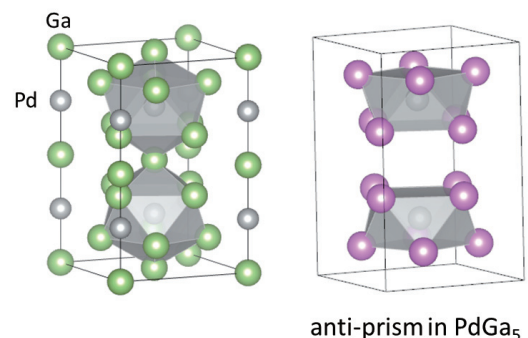


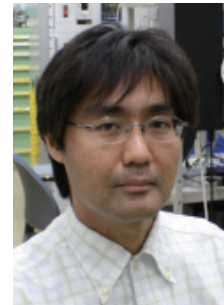
図2: $PaGa_5$ 型構造

イリジウム酸化物薄膜を舞台としたトポロジカル絶縁体の物質開発

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。本研究では既知の物質にとどまらず、人工的に構造を制御したイリジウム酸化物薄膜を基軸とした物質開発を行い、トポロジーと電子相関との協奏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。これらモット絶縁体と半金属を含む電子相関の理解は、スピン - 軌道相互作用と電子相関の関わりを明らかにする上で不可欠です。本研究では、 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を制御しました (図 1)。人工超格子ではバルク試料と異なり m を自由に制御できますので、電子相関を幅広く探索することが可能です。このような原子レベルで制御された超格子薄膜作製にはパルスレーザー堆積法を用いました (図 2)。最も二次元性の強い $m = 1$ の試料は弱強磁性を示し、 Sr_2IrO_4 と同様のモット絶縁体であることが明らかとなりました。 m の増加、すなわち次元性の増大に伴い磁気転移温度は低下し、 $m = 4$ においては磁気転移が観測されませんでした。すなわち、次元性制御によるモット絶縁体相の消失が実現しました。これは、スピン - 軌道相互作用と電子相関の双方が重要となる系の電子相の制御として初めての例であり、電子相関の効いたトポロジカル絶縁体に向けて大きな一歩となることが期待されます。



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。最近はす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。

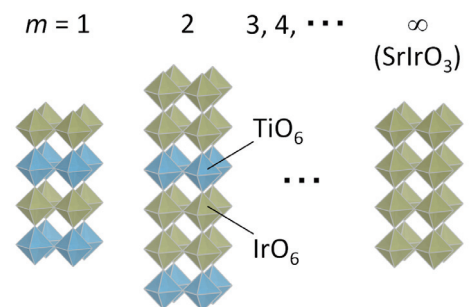


図 1 : 人工超格子 $[(\text{SrIrO}_3)_m, \text{SrTiO}_3]$ の結晶構造

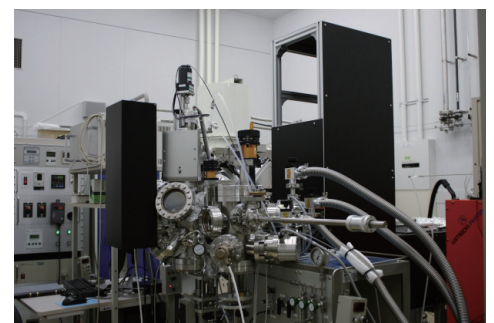
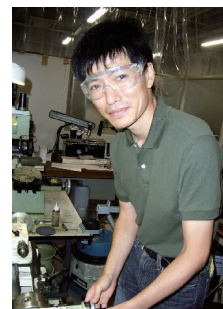


図 2 : パルスレーザー堆積法による薄膜作製装置

分光イメージング走査型トンネル顕微鏡による トポロジカル絶縁体の研究

花栗 哲郎 / 理化学研究所 高木磁性研究室 専任研究員



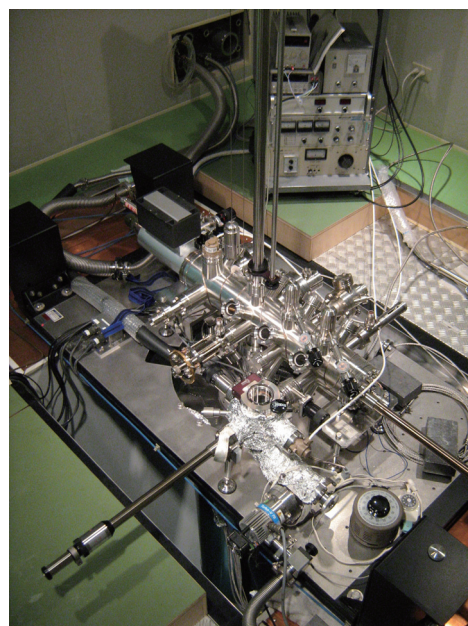
はなぐり・てつお

東京都出身。東北大学で学位取得。東京大学勤務を経て理化学研究所でSTMを使った研究に従事。近々、物性計測のプロ集団を目指す新チームを立ち上げ予定。趣味は、実験、自転車、山、居酒屋一人酒。

走査型トンネル顕微鏡 (STM) は、表面の構造を原子分解能で調べることができるだけでなく、サブ meV のエネルギー分解能で「電子状態の地図」を作成することが可能な、強力なツールです。実際の STM 実験には、様々な高度な技術が要求され、「実験おたく」を自認する私にとって大変魅力的な手法です。この 10 年ほど、超高真空極低温強磁場という多重極限環境で動作する超高安定な STM の開発と応用に従事し (図)、主に、高温超伝導体の超伝導ギャップの研究を行ってきました。本新学術領域研究では、これまで培った STM 技術を利用して、トポロジカル絶縁体表面のディラック電子の性質を調べています。

電子系に磁場を印加すると、ランダウ量子化によって、電子の取りうるエネルギーは離散化されます (ランダウ準位)。通常、ランダウ準位のエネルギーは磁場に比例しますが、ディラック電子では最低エネルギーの準位は磁場に依存せず、その他の準位は磁場の平方根に比例することが期待されます。我々は、典型的なトポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 の表面ディラック電子のランダウ量子化をトンネル分光で調べ、これらの特徴をとらえたほか、ランダウ準位の空間分布を描き出すことにも成功しました。さらに、最近、 $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ の最低ランダウ準位が、わずかに磁場依存性を持っていることを発見しました。この異常は、電子スピンと磁場の相互作用、すなわちゼーマン効果によるものです。ランダウ準位に対するゼーマン効果はグラフェンでも見つかっていますが、この場合は上向きと下向きのスピンをもつ 2 種類のディラック電子があるために、ランダウ準位は磁場で分裂します。一方、 $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ では準位の分裂は観測されず、磁場とともに準位エネルギーは単調にシフトしました。この結果は、トポロジカル絶縁体表面のディラック電子にはスピン縮退が無いことを明確に示しています。

今後、ディラック電子の磁場中での性質の研究に加え、不純物効果や、超伝導体や強磁性体との接合界面の電子状態の研究を展開していきたいと考えています。



図：開発した多重極限走査型トンネル顕微鏡

トポロジカルな欠陥に局在するマヨラナ・ゼロモードと指数定理

福井 隆弘 / 茨城大学 理学部 教授



ふくい・たかひろ

超伝導中の渦糸の近傍に現れるゼロモードの有無を指数定理という強力な数学的手法を用いて調べることが最初の目的でした。実際に研究を始めてみると、どちらかという指数定理そのものに力点を置いた研究となりました。以下、この2年弱にわたる研究の幾つかを振り返りたいと思います。

物質のトポロジカル相に関する研究の醍醐味はその普遍性にあると考えています。最初の研究は、あまり物性ではなじみがないですが、中性子星など超高密度のクォーク物質において発現していると考えられているカラー超伝導に関するテーマに取り組みました。ここで安定に実現するであろう非可換渦糸の周りのマヨラナ・ゼロモードを詳細に調べました。

渦糸を考える限りは、無限遠方で「丸い」系を考えれば良いですが、マヨラナ状態を実際に実験的に実現するためには、渦糸よりもむしろヘテロ構造に基づいた π 接合系等の方が容易であると考えられます。こういった系では秩序変数は遠方でも必ずしも丸くはありません。次の研究として、**図1**の系に対して指数定理でゼロ状態を探りました。左右の磁場をコントロールすると、 π 接合系に現れるマヨラナ・ゼロモードに加えて、一般には有限質量励起モードも系全体のゼロ・エネルギー状態となり得ることを示しました。

このような「四角い」境界条件に対しても指数定理が実用上十分に機能することが分かったので、次の課題としてバルク・エッジ対応の一般的証明を指数定理の応用として行いました。**図2**のように異なるチャーン数を持つバルク状態のある境界で滑らかにつながり合わせた場合に、境界にエッジ状態が現れますが、このエッジ状態の個数と2つのチャーン数との関係を指数定理で導きました。

最近、本科研費研究グループの一員である東北大グループを中心として、トポロジカル絶縁体と普通の絶縁体を交互に積み重ねたヘテロ構造物質の実験が行われ興味を引いています。この実験に触発され、また**図2**の拡張として**図3**の状態に興味を持つに至りました。現在では、これをモデル化しそのトポロジカルな性質を調べています。

長野県出身。1987年京大理卒、1992年京大博修了。大学院までは核理論が専門。しばらく前に研究のための体力・健康維持を目的にジョギングを始めましたが、はまってしまい、今では逆に健康を書し、研究時間を削って走っています。

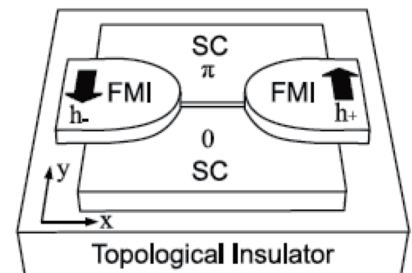


図1：ヘテロ構造 π 接合系

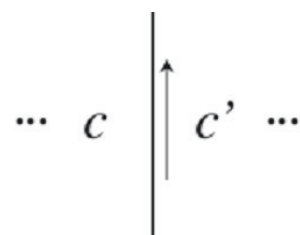


図2：バルク・エッジ対応

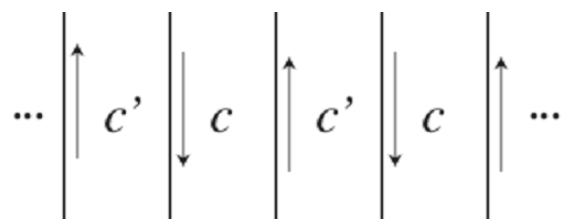


図3：2種類のトポロジカル物質の超格子系

対称性の破れた磁性体・超伝導体ナノ接合系における量子輸送理論

川畑 史郎／産業技術総合研究所 主任研究員

近年、対称性の破れた微小超伝導接合を舞台としてトポロジカルに非自明な量子状態の実現を目指した研究が盛んに行われています。本研究では、時間反転対称性の破れた磁性体／超伝導接合に現れる異常な量子輸送現象の理論構築とその応用を目指して研究を進めてきました。具体的には以下のテーマに関して研究を行いました。

[1]「超伝導体／磁性体接合における奇周波数クーパー対とその検証法の提唱」

磁化が非一様な磁性体と超伝導体を接合した系においては、磁性体中にスピントリプレット奇周波数クーパー対が誘起されることが理論的に予言されてきました。本研究では、磁性体中の準粒子状態密度に表れるゼロエネルギーピークを観測することによって、奇周波数クーパー対の存在を実験的に検出できることを示しました。

[2]「磁性半導体・超伝導接合を用いた電子冷却器」

量子デバイスや検出器を冷却する技術として金属／絶縁体／超伝導体接合 (NIS) 冷却に関する研究が注目を集めています。しかしながら超伝導金属界面におけるアンドレーフ反射のために冷却効率が期待したほど増大しないという深刻な問題がありました。そこで、絶縁体の代わりに磁性半導体スピンフィルターを用いることによって、アンドレーフ反射が抑制され、通常 of NIS 冷却器の理論限界を 5 倍程度上回る冷却性能が引き出せることを示しました。

本領域のサポートにより、国内外の多くの研究者と議論をする機会が得られたことは大きな収穫でした。今後もこれまでの研究をより一層発展させて行きたいと思っています。



かわばた・しろう

鹿児島県出身

1998 年大阪市立大学博士課程修了。

1998 年電総研研究員

2000 年産総研研究員

2005 年産総研主任研究員

現在に至る。

趣味：エスプレッソコーヒー

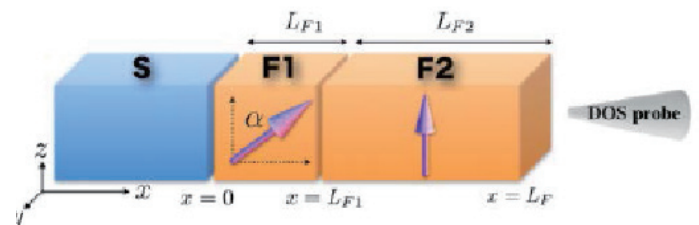


図 1：奇周波ペアを検出するための磁性体／超伝導接合

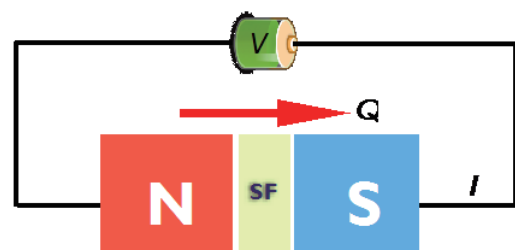


図 2：電子冷却器

超流動 ^3He の境界と渦における新奇的な状態の探索と同定

高木 丈夫 / 福井大学 大学院工学研究科 教授

アドバルーンや、風船に入っているヘリウム (He) ガスは、絶対温度 4K まで液化せずに気体のままでいます。さらに、2K より低温では、ボーズ凝縮を起こして、超流動状態となります。この性質は質量数が 4 のボーズ粒子である ^4He のものです。このほか自然界には、質量数が 3 のフェルミ粒子である ^3He があります。これは、3mK 以下の低温でクーパー対 (粒子対) をつくってボーズ凝縮を起こします。もともとがフェルミ粒子ですから、クーパー対を作ってボゾン化してボーズ凝縮をするわけです。この辺の事情はフェルミ粒子である金属中の電子がクーパー対を作って超伝導になる事情とおなじです。

さて、この ^3He のクーパー対なのですが、角運動量を持つことが確定しています。特に超流動 A 相と呼ばれる相では、その角運動量が陽に現れる状態になっています。ところが、この角運動量が「観測に掛かるかどうか」が、超流動 ^3He が発見されて以来の未解決の問題となっています。角運動量を持っているといっても、分子レベルでコマのように回転をしているならば、(図 1) 容易に観測されるはずですが、運動相関する原子の距離が 10nm から 100nm の範囲に広がっていると、クーパー対どうしの干渉効果もあり、話は簡単ではありません。また、クーパー対の生成はフェルミ面近傍での粒子相関の変調で起こるわけですが、その効果がフェルミ面内部まで及ぶかどうか、という問題も同時に抱えているわけです。

これらの問題を解決する実験方法：超流動 ^3He -A 相を回転して A 相の折り目構造を変調して NMR 振動数の回転依存性を測定する、という方法を提案しました。現在、東大物性研で実験が続けられていますが、クーパー対の全モーメントが観測される、という状況が有力なようです。 ^3He の他にも、超伝導物質でもクーパー対の角運動量が陽に出現すると思われる物質が見つかっていますので、 ^3He と併せて、研究の発展が期待されます。



たかぎ・たけお

青森県藤崎町出身。
東北大理卒、名大理院修了、
現在福井大学工学部教授。
趣味：電子回路製作、ヘタなテニス、散歩、食べ歩き
近況：北陸は冬になって、外出には不向きの天気になりました。青空と太陽が恋しいです！



図 1：クーパー対の角運動量はコマの
そのように観測可能か？

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

物理学の分野において、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。(例えば、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。)物理学とは言っても様々な分野があるのですが、私の場合は物性理論の研究と素粒子論の研究を並行して行っています。一方で得られた知識を他方に適用したり、またその逆にフィードバックすることで、分野によらない新しい理解が得られることもあります。

特にその中でも、渦などの位相励起の研究を行っています。まず、渦とは、皆さんも日常よく目にするあの渦です。台風や竜巻、あるいはお風呂の水を流した時に出来る渦です(図1)。しかし、ここで言う渦は「量子化された渦」です。どういうことかと言うと、普通の水などとは違い、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ます。その場合は、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、量子化されているのです。もう少し詳しく言うと、循環という、流れがどれだけクルクル回っているのかを表す量があります。通常の渦はこれがどのような値でもよいのですが、量子渦ではこれが決まった(とても小さな)値の整数倍しか許されません。この背後には、 π_1 という量が関係しています。杭にロープが何回巻きつけて結ぶことを考えると、整数回しかあり得ませんね。この回数を表すのが π_1 です。同じような状況が超伝導体でも実現します。通常は金属に電流を流すと、抵抗がありますが、極低温に冷やしてやると超伝導状態になり、抵抗がゼロで電流が流れるようになります。この超伝導に磁場をかけてやると、磁場が侵入するのですが、決まった値の整数倍の磁場でしか存在できません。これも実は渦です。ただし、超流動の渦とは違って、この場合は渦の中に磁場が閉じ込められていて、量子化された磁束とも呼びます(磁束量子の構造に関しては文献1の図2を参照)。このような渦や、次元を一般化し π_n で分類されるトポロジカル欠陥の研究を行っています。

[1] H. F. Hess, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 62, 214 (1989).



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。



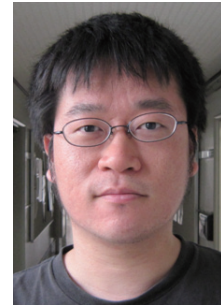
図1：台風も巨大な渦

空間反転対称性の破れた超伝導体の渦糸状態における トポロジカル量子現象

横山 毅人 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 助教

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だとしても、強磁性体中に奇周波数（時間について奇関数の）トリプレットのクーパ対が現れるのですが、このクーパ対の性質を調べる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、超伝導接合系において対称性の破れによって誘起された奇周波数超伝導の示すマイルスナー効果を調べ、軌道帯磁率が系の温度などのパラメータに対して発散的かつ振動するような依存性を示すことを明らかにしました。これは奇周波数超伝導が磁場を排除しないことに起因しており、従来の超伝導とは全く異なる性質です。一方で、トポロジカル絶縁体に強磁性体を載せた系において磁化を時間的に変動させたときに現れる整流効果や、トポロジカル絶縁体の表面を流れる電流により表面に載せた強磁性体の磁化が反転可能なことも示しました。さらに、トポロジカル絶縁体に超伝導体を載せた系におけるジョセフソン効果や、トポロジカル絶縁体の表面に円偏光を照射した場合、逆ファラデー効果によって面直な磁化が誘起されることを示しました。また、トポロジカル絶縁体の表面に強磁性体を載せた系の示すネルンスト効果と熱ホール効果の一般的な定式化を行い、ペルティエ伝導度から表面 Dirac 電子の質量やベリー位相の構造を調べる方法を提示しました。



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。
運動不足を解消すべくプールに通っています。

二重人格を持つトポロジカル絶縁体表面の電子状態

井村 健一郎 / 広島大学 先端物質科学研究科 助教

トポロジカル絶縁体はバルク（内部）は通常の絶縁体と変わらないのに、表面は金属という言わば二重人格の物質です。さらに表面の金属状態はちょっと変わり者です。試料の「かたち」にとても敏感で、例えば細長くしてワイヤー状にすると、独りでにその中をソレノイドが通っているかのような振る舞いをしてみせたり、あるいは球状（サイコロ状でもほとんど同じことですが）のナノ粒子状にしてやると今度は自然界には通常存在しないモノポール（磁気単極子）があたかもその中にあるかのような変わったスペクトルを示したりします。このように一方で、積極的・目立ちたがり屋の性質を示す反面、バルクには染み込んでいかないという「臆病な」ところもあります。私はこのようにちょっと変わり者で、母体であるトポロジカル絶縁体同様、二重人格を示す表面状態の研究をしています。

生命体や細胞と同じようにと言うと語弊があるかもしれませんが、固体中の電子にもそれぞれ「遺伝情報」のようなものがあって、それは我々が使用する有効モデルの中に「書かれて」います。トポロジカル絶縁体中の電子は、この遺伝情報がアインシュタインの相対性理論に従う電子と似ている、言わば「相対論的な遺伝子」を持つ固体電子です。遺伝情報は、試料の形状：表面の有無・位置（あるいはトポロジー）を決めて、有効モデルの従う量子力学的な方程式を解いてやることで「発現」します。こうして発現する遺伝情報の典型例が「金属的な」表面状態ですが、これを相対論の「ことば」で言うと、電子の有効質量が（例えば、光子のように）ゼロになるということになります。私はここ数年来の研究で、先程触れたトポロジカル絶縁体電子の外向的な方の性格：モノポールやソレノイドを実効的に誘起するという方の性格が、通常表面に閉じこもりがちで内向的と思われていた遺伝子から発現するという事を明らかにしました。またさらに最新の研究成果 [1] として、一見相反するとも思えるトポロジカル絶縁体電子の持つ二面性：内向的 vs. 外向的な性質が、実はむしろ表裏一体のものであることも分かってきました。

[1] K.-I. Imura, Y. Takane, arXiv:1211.2088.



いむら・けんいちろう

東京都文京区出身。1999年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。その後、ポスドク・助教として、パリ第11大学、理化学研究所、東京大学物性研究所、東北大学理学研究科等に在籍。



図：「内向的」トポロジカル絶縁体電子が外向的に転じる様（フラックスに沿ってバルクにしみ込む表面状態）。

トポロジカル場の理論による新規量子現象の探索

田中 秋広 / 物質・材料研究機構 主幹研究員

統計力学で習う分配関数 $Z = \sum_{\text{配位}} W(\text{配位}) e^{-\beta E(\text{配位})}$ は、配位の重み因子 W が通常正の実数ですが、中には複素数値となって配位同士がふるいに掛け合う（ベリー位相効果）変わった量子系があります。所謂「トポロジカル秩序」を持つ系ではこの効果は顕著で、古くは反強磁性鎖の Haldane ギャップの核心がここにあることが知られています。この量子効果の原因となる「ベリー位相項(トポロジカル項)」を含む有効理論を以下ではトポロジカル場の理論 = TQFT と呼ぶことにします。TQFT が生み出す物理から、抽象的に見えがちなトポロジカル秩序の姿をとらえるのが私のテーマです。

トポロジカル絶縁体の電磁現象には、電磁場の他にアクシオン場と呼ばれる自由度が登場し、その TQFT がマクスウェル方程式に重要な修正をもたらします。(熱伝導現象もアクシオン型 TQFT に支配されることを早くに指摘しました。) 実際、この系は多彩な表面量子効果が予言されていますが、いずれも試料表面をアクシオン場のドメイン壁と見なすことで簡単に導かれます。一方アクシオンは位相(角度)場であるため、渦糸も形成できるはずですが、渦糸はトポロジカル絶縁体と通常絶縁体の積層構造(ワイル半金属)等において実際に出現すると予想されますが、性質は殆ど調べられていません。本領域の井村氏やポスドクの菊池氏とともに調べた結果、**図1**のように、バルク - 渦糸間の電流フローが関与する一種の量子ホール効果が実現する様子が詳しく見えてきました。なお、渦糸の凝縮相もトポロジーの観点から興味深い物性を示すと予想されます。

また、本来 TQFT で記述されない「通常」の系を TQFT で表されるトポロジカル秩序のある系に「変換」させる方法も検討してきました。一例として連携研究者の井上氏と、レーザー照射下の通常絶縁体 (**図2**) が、トポロジカル絶縁体として振る舞うことを二次元系、三次元系の双方に対して確認しました。このようなトポロジカル秩序の人工創成は本領域でも研究が進行している冷却原子系の実験の進展と相まって世界的に活発化しています。



たなか・あきひろ

東京出身。1990年東大物工卒、原研特別研究生等を経て1999年博士(工学)。2000年科技厅金材技研(現物質・材料研究機構)入所。物性と異分野の交流に関心があります。

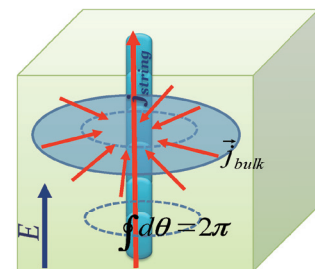
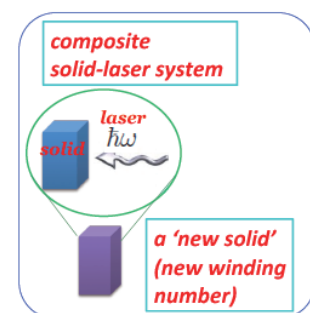


図1：アクシオン渦糸の量子ホール効果

図2：トポロジカル物質の人工創成に向けて



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

2012

Dec. 2012

古川俊輔氏 (D01・上田グループ) が、「量子多体系におけるエンタングルメント・エントロピーの研究」により第7回 (2013) 日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。

Shunsuke Furukawa of Ueda's group (D01) received the 7th Young Scientist Award of the Physical Society of Japan for his research "Topological entanglement entropy in the quantum dimer model on the triangular lattice".

Dec. 2012

D01 班水島が第7回 (2013) 日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。

Mizushima (D01) received the 7th Young Scientist Award of the Physical Society of Japan.

Nov. 2012

B01 班の野村らが見出した高圧における⁴He 薄膜の超流動転移の抑制と量子臨界性の研究が、Asia Pacific Physics Newsletter の Research Highlights で取り上げられました。

The research by Nomura (B01) and others on "Suppression of the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition and Quantum Criticality in ⁴He Films at High Pressures" was picked up by Pacific Physics Newsletter.

Jul. 2012

7名の領域メンバーが超伝導国際会議 (M2S) で招待講演を行いました。

Seven members of our project gave invited talks at M2S (Materials and Mechanism of Superconductivity) Conference.

Jul. 2012

水島 (D01)、新田 (D03) らによるスカーミオンの研究成果が Physical Review Letters 誌の表紙を飾りました。

Results on skyrmions by Mizushima (D01), Nitta (D03) et al. appeared on the cover page of Physical Review Letters.

Jun. 2012

佐々木聡氏 (C01・安藤-瀬川グループ) がゴードン会議でポスター賞を受賞しました。

Satoshi Sasaki (C01, Ando-Segawa group) received the poster award at the Gordon Research Conference on Correlated Electron Systems.

Apr. 2012

B01 班の吉川と村川が第6回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。

Yoshikawa and Murakawa in group B received Young Scientist Award of the Physical Society of Japan.

齋藤 広大

産業技術総合研究所 電子光技術研究部門

滞在先：京都大学 大学院理学研究科

(派遣元研究者：柏谷 聡、受入研究者：前野 悦輝)

A01 → A01

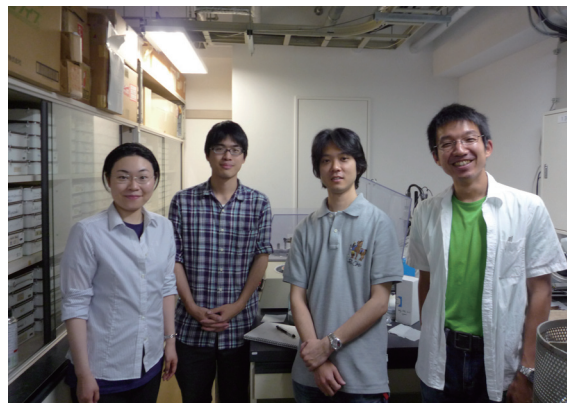
祇園祭が始まる少し前の6月中旬から下旬にかけて、京都大学固体量子物性研究室（前野研究室）に滞在させていただきました。私達のグループではルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 を用いた微小素子によるトンネル効果の研究を進めてきました。その過程で、カイラル p 波 - 対称性に特有のカイラルドメインが c 軸方向に存在する可能性が示唆されており、厚み方向に μm 単位で精密な制御を行った素子の作成が必要になってきています。一方で、 Sr_2RuO_4 は薄膜作製の成功例が極めて少なく、良質な単結晶から素子を作成することが必要不可欠です。従って、単結晶から研磨により高品質な薄片を作成するプロセスが極めて重要であり、当該技術を有する前野研究室の指導に基づき、結晶研磨プロセスの大幅な改善を目指すことにしました。また Sr_2RuO_4 のペア対称性を決定する実験のためには、比較サンプルとして他のペア対称性を有する超伝導体が必要であり、銅系や鉄系超伝導体、さらに空間反転対称性の破れた (NCS) 超伝導体に対しても同様の研磨による薄片作成を行うことにしました。

研磨プロセスは、まず単結晶 Sr_2RuO_4 の選択から始まります。私達は析出 Ru (3K 相) が少ない結晶が必要でしたので、交流磁化率の測定結果と前野先生の助言に基づき、3K 相が少ないと考えられる単結晶を選定しました。続いて単結晶ロッドを厚さ数 mm 程度の円柱状に切り出し、 ab 面に沿ってへき開します。そして、結晶を専用の治具に接着し、研磨機を用いて ab 面を研磨していきます。研磨作業は、研磨剤の粒径を段階的に小さくしながら仕上げていくのですが、非常に根気がいる作業で、面積：数 mm^2 、厚さ 10 μm 程度の薄片を作成するためには 1 日半から 2 日程度を要しました。比較実験に使用する Sr_2RuO_4 以外の結晶としては、 $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ 、 $\text{BaFe}_{1.84}\text{Co}_{0.16}\text{As}_2$ 、 $\text{Li}_2(\text{Pd}_{0.16}\text{Pt}_{0.84})_3\text{B}$ を

本プログラムは、本領域に属する研究室の大学院生や若手研究者が、領域に属する他機関の研究室に 2 週間程度滞在し、その分野の研究の日常を体験することで、自身の視野を広げると同時に、受入研究室の同世代の研究者に刺激を与えることを目的とする制度です。若手研究者間の直接的な交流によって、異分野の研究融合を触発し、領域に属する研究室の中に、トポロジカル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。

当方から持参し、同様の研磨を行いました。研磨をする結晶が多数あったため、前野研究室で所有している研磨機 2 台を両方とも優先的に使用させていただきましたが、それでも予定期間内に作業を終えることができず、滞在期間を数日延長させていただくことで、作業を完了することができました。最終的には、それぞれの結晶について薄片を数個ずつ作成することに成功しました。

滞在中、前野先生や助教の米澤さんを始め、研究室の皆様には様々な面でお世話になりました。特に博士 2 年の谷口さん、修士 2 年の山岡君には、研磨のやり方を丁寧に指導していただきました。また領域事務局の西村さんには、急な滞在期間延長にも拘らず、宿泊先等を迅速に手配していただき大変助かりました。固体量子物性研究室は学生の人数も多く、活発的に研究をされていて、活気に満ちた印象を受けました。このような環境で、充実した滞在研究をさせていただいた本プログラムに感謝致します。



滞在中、主にサポートしていただいた皆様。左から博士 2 年の谷口さん、修士 2 年の山岡君、私、助教の米澤さん。お世話になりました！

橋本 樹

名古屋大学 大学院工学研究科 修士課程 1 年

滞在先：大阪大学 産業科学研究所

(派遣元研究者：田中 由喜夫、受入研究者：瀬川 耕司)

DO1 → CO1

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ はトポロジカル絶縁体に直接ドーピングすることで得られる初めてのトポロジカル超伝導体として注目を集めている。我々はこの $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のペアポテンシャルの対称性を理解することを目的に研究を行なっている。具体的には Liang Fu らによって提案されている 4 つのペアの対称性を仮定し、状態密度、電子比熱、スピン帯磁率の数値計算を行なっている [1]。この中で電子比熱は大阪大学産業科学研究所の安藤研究室で行われた実験データを参考にさせていただき研究を進めており、このような接点もあり、安藤研究室に滞在させていただいた。滞在するにあたり、今後研究を行なっていく上で理論研究だけでなく実験研究も行なってみようという思いが強かった。

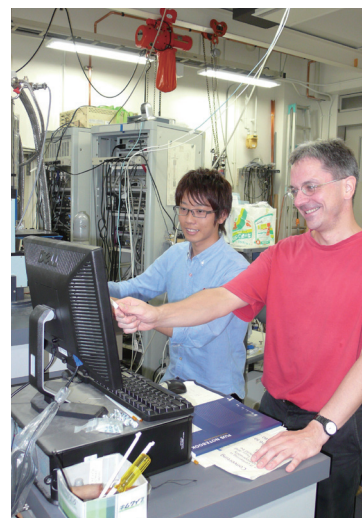
滞在期間は 2 週間で、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の高品質単結晶の作製と MPMS を用いて帯磁率の測定を行なった。具体的には Markus Kriener 博士の指導のもと Bi_2Se_3 の加工、Cu の電気化学的インターカレート、アニールなどを行なった。慣れない実験をさらに英語で行うということで最初は苦戦したが、Kriener 博士が忍耐強く付き合ってくれたこともあり、なんとか試料を作ることができた。簡単な実験器具なら自由に使いこなせるようになったのは一つの成果ではないかと思っている。まだまだ勉強中の身ではあるが、自身の研究内容をセミナーで発表する機会をいただくことができた。これから論文にする内容だったので多くの意見をいただき大変有意義なものになったと同時に、質問にうまく答えられないなど自身の勉強不足を痛感する良い機会ともなった。 Sr_2RuO_4 のペアの対称性は既に多くの議論が行われており、この Sr_2RuO_4 について理解を深めることは $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のペアの対称性を理解する助けになるといったことなど今後勉強すべきことも教えていただくことができた。

滞在中、同世代の学生の皆様には大変お世話になった。研究に関することだけでなく、進路に関してなど貴重な意見をいただいた。また、理論系の研究室での研究の様子などにも興味を持っていただき、交流を深められたのではないかと感じている。実験でわからないところをしっかりと補い合っている学生間のチームワークの良さは見習いたいと思った。

急なお話にも関わらず受け入れてくださった安藤教授、並びに研究室の皆様にはこの場をお借りして改めて深く感謝申し上げたい。今まで論文の上でのみ知っていた多くの実験を実際に見ることができた。また、それらを丁寧に説明していただき物理の理解が深まった。2 週間の滞在を通して多くの方々と交流することができ、研究に関する視野が広がったと確信している。

参考文献

[1] T. Hashimoto, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka, to be published in J.Phys. Soc. Jpn.



安藤研究室における実習風景、
右は Kriener 博士、左が筆者。

小林 伸吾

東京大学大学院 理学系研究科 博士課程 3年

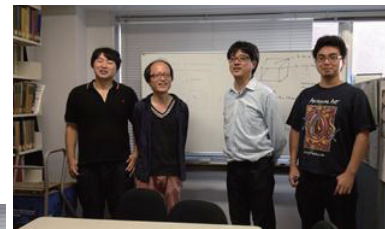
滞在先：名古屋大学 大学院工学研究科

(派遣元研究者：上田 正仁、受入研究者：佐藤 昌利)

DO1 → DO1

近年、固体物理において、エッジ状態とトポロジカル不変量が深く結びついていることが実験と理論の双方において実証されています。ここでのトポロジカル不変量は、波数空間上での電子状態の変化によって定義されます。上記の場合以外にも、トポロジカル不変量が直接関係する物理現象があります。それは、冷却原子気体や超流動ヘリウム中のトポロジカル励起（量子渦やスカーミオンなど）です。トポロジカル励起の場合、トポロジカル不変量は実空間上での秩序変数（巨視的波動関数）の変化によって定義されます。例えば、量子渦の周りでは秩序変数の位相が0から 2π の整数倍だけ変化したとき、この整数が量子渦のトポロジカル不変量を与えます。

私は上田正仁教授の下で、トポロジカル励起に存在するトポロジカル不変量の数学的基礎について研究を行ってきました。私のこれまでの研究ではトポロジカル励起にのみ焦点を当ててきましたが、上記に述べた固体中の電子と冷却原子気体（超流動ヘリウム）の秩序変数が持つトポロジカル不変量は波数空間と実空間の違いはありますが、定義する数学自体は類似しています。よって、私は研究の視野を固体中のトポロジカル現象にまで広げたいと考え、今回若手派遣プログラムに申し込みました。滞在先については、固体中のトポロジカル不変量とエッジ状態の関係性をきちんと学び、さらには最新の研究状況を把握するために名古屋大学の田仲由喜夫教授と佐藤昌利准教授の居られる研究室を選びました。滞在は2週間させていただき、滞在中は研究を行いやすいように名古屋大学構内の宿舎に泊めていただきました。日々の研究は、佐藤先生との毎日2時間の議論と私が抱いた疑問を佐藤先生やPDの山影さんに質問するという形で進行していきました。最初の1週間は、固体物理の分野に慣れるために、私は幅広く論文を読み漁り疑問に思ったことを佐藤先生や山影さんに質問しました。また、気になるトピックがあったら佐藤先生にその研究の進行状況を教えていただき、研究になるかどうか一緒に考えていき



佐藤先生との議論風景です（左）。ここから様々なアイデアが生まれました。PDの山影さんと矢田さんも含めてみんなで記念写真も撮りました（上）。

ました。この1週間の中で議論を重ねた結果、私は1つの方向性を定めることができました。それは、点群対称性 (PGS) を持ったトポロジカル超伝導体 (TSC) 中のマヨラナ粒子の判定法の確立です。従来のトポロジカル絶縁体の場合は、Altland-Zirnbauer の周期表によってマヨラナ粒子が判別されていましたが、PGSがある場合は、その周期表の枠から外れることが知られており、さらなる判定法が要求されます。私は、残りの1週間で PGS を持った TSC の研究に費やしました。私は佐藤先生と協力して、PGS とマヨラナ粒子の関係性を定量的に探るために、具体的なモデルとして Teo と Hughes が考案した4重回転対称性を持つ2次元の TSC [1] に焦点を当て、数値計算を行いました。まず、我々は数値計算により先行結果を再現することに成功しました。次に、我々はモデルに摂動を加え、点群対称性を破ったときの振る舞いを調べました。その結果、点群対称性が無いにも関わらず、存在するマヨラナ粒子を発見致しました。滞在中の研究ではここまでしか調べることができませんでしたが、今回発見したマヨラナ粒子の判別条件やモデルの3次元への拡張など課題はいくつも残されています。よって、この若手派遣プログラムをきっかけとして、今後も共同研究を続けていきたいと考えています。

最後に、この機会を与えてくれた新学術領域の若手派遣プログラムに感謝いたします。また、私を受け入れてくれた田仲先生、佐藤先生、山影さん、矢田さん、田仲研究室の学生みなさんに感謝いたします。特に研究室のみなさんには、私が滞在した時期はちょうど物理学会前で忙しいにも関わらず、毎日食事に誘っていただいたり、名古屋の名物などを紹介していただいたりして楽しい日々を過ごすさせていただきました。おかげで大変有意義な2週間を過ごすことができ心から感謝しています。

[1] J. C. Y. Teo and T. L. Hughes arXiv:1208.6303v1

金本 真知

京都大学 大学院理学研究科 博士後期課程 3年

滞在先：大阪市立大学 大学院理学研究科

(派遣元研究者：佐々木 豊、受入研究者：石川 修六)

BO1 → BO1

我々は今、超流動³He内部のテクスチャー構造についての研究を行っている。超流動³Heは内部自由度を持つ対凝縮体であり、その中にさまざまな相を持つ。例えばその相の一つであるA相では、秩序変数は2本のベクトルによって表され、その分布を液晶などの分野とのアナロジーからテクスチャーと呼ぶ。テクスチャーは容器壁の構造や外部から印加する磁場などの影響を受けて、全エネルギーが最小になるように決まる。NMRの測定を行うと、テクスチャー、すなわち局所的な秩序変数ベクトルの向きに応じて、外部磁場により与えられるラーモア周波数からのずれが観測される。通常のNMRでは信号は唯一つのコイルでまとめて検出されるために、場所の情報は失われる。つまり、テクスチャーによる秩序変数分布の容器内の積算値だけが観測可能である。そこで、外部からかける磁場に勾配を与える。すると、ヘリウムの位置の情報が、周波数の変化として検出できる。テクスチャーの情報と、位置の情報の両方が同時に周波数に乗ってしまうことになるが、磁場勾配の大きさを変化させて複数測定し、それらを上手く計算することで、場所ごとの秩序変数の情報を分離することができる。これが我々の開発している周波数分解イメージングであり、これによって静的なテクスチャーの分布のみならず、外部から変化を加えた際のテクスチャーのダイナミクスについても研究を行うことが目標となっている。

まずは周波数分解イメージングのテストとして、テクスチャーの形がよく知られている、厚みが100ミクロン程度の薄い並行平板内の超流動³Heにおいての実験を準備中である。このような幾何形状中ではドメインウォールと呼ばれるテクスチャーの乱れた部分ができることが知られている。これは秩序変数ベクトルの向きが平行でも反平行でもエネルギーは縮退しているために、場所ごとに向きの異なるドメインが成長し、それらがぶつかったところでベクトルの向きが急激に変化する領域ができるためと考えられている。このドメインウォールは過去の実験でも確認されているが、前述のように全体の中でそういう部分があるということだけであり、実際に壁のような構造が可視化されたことはない。

大阪市立大学超低温物理学研究室では同様の並行平板セル中の超流動³Heに対して、音波による実験を行っている。そこで、市大での実験から我々の実験へと何かヒントが得られると考え、11日間の滞在を行った。音波による測定についてはまったくの素人であったため、非常に基礎的なことから丁寧に教えていただいた。一般に、実験は以下のような形になる。容器内にヘリウムを閉じ込め、その両端に圧力を電位に変換することのできる圧電素子を配する。一方に交流電圧をかけ、音波を発生させ、もう一方でその音波を検出する。音波の共鳴周波数と行路長から音速を得ることができる。超流動ヘリウム中では一般的な音波である疎密波だけでなく、超流体と常流体のカウンターフローからなる波など、様々な波が発生する。それらの波の音速から、超流動³Heの状態、性質を調べることが可能である。また、共鳴周波数だけではなく、定電流駆動時の振幅あるいは共鳴スペクトルの線幅から音波にかかる減衰の大きさを知ることができ、そこから内部での散乱の大きさを知ることができる。それらの情報を元にしてテクスチャー情報を取得する可能性などについて議論した。

また、実験のイメージをつかむために室温の空气中を伝わる音波の実験を行った。音波を発振および観測するための道具として、セラミック製のピエゾ振動子を用いた。金属板の上に両面がアルミニウムで蒸着された圧電素子が貼り付けてあるもので、電圧をかけることで素子が伸縮し、金属板が振動する。実際に測定を行うと、行路長と音速から計算される共鳴周波数の他にも多くの共鳴が観測された。ピエゾ振動子のそれ自体の固有の共鳴や、容器の壁を伝わる音波の共鳴などであり、振動子と測定したい系の共鳴周波数が近い場所にあると測定に影響が出てくるので、実際の測定には注意が必要である。その他、電気回路を組む際の注意点や、市販の計測機器の機能や特徴なども学んだ。電気回路などの計測にかかわる部分ではNMRの測定にも役立つことがたくさんあり、これからの実験に大阪市大での貴重な経験を生かしたい。

Muhammad Shahbaz ANWAR

京都大学 大学院理学研究科

(受入研究者：A01 前野 悦輝)

During my PhD I investigated the generation of spin triplet superconductivity at the interface between a conventional superconductor a-MoGe and a half metallic ferromagnet CrO₂, which leads to a long-ranged proximity effect. Conventional spin-singlet Cooper pairs dephase in a ferromagnet under the effect of its exchange field over a coherence length, which cannot be more than few nm. However, such a dephasing does not occur with spin triplet Cooper pairs and leads to Cooper pairs penetration over a distance of even ~1μm. Spin mixing and spin flip scatter are the main ingredients to generate the triplet correlation that is possibly s-wave spin triplet superconductivity.

Sr₂RuO₄ is most probably a chiral p-wave spin triplet superconductor. In this topological quantum phenomena project, our main objective is to prepare conventional-superconductor/Ru/Sr₂RuO₄ topological junctions to investigate the interference between a conventional s-wave spin singlet superconductor and a chiral p-wave spin triplet superconductor. The phase sensitive measurements would manifest the chiral domain wall dynamics. The chiral p-wave superconductivity of Sr₂RuO₄ may even generate a half quantum vortex. It has been found that Sr₂RuO₄ exhibits a half fluxoid jumps from magnetic torque measurements. We will also fabricate micrometer-sized rings of Sr₂RuO₄ to confirm the half fluxoid generation using transport phenomena. I am grateful to Kyoto University for providing a chance to participate in topological quantum phenomena project.

References

- [1] Long range supercurrents in ferromagnetic CrO₂ using a multilayer contact structure, M. S. Anwar, M. Veldhorst, A. Brinkman, and J. Aarts Appl. Phys. Lett. 100, 052602 (2012).
- [2] Long range supercurrents through half-metallic ferromagnetic CrO₂, M. S. Anwar, F. Czeschka, M. Hesselberth, M. Porcu, J. Aarts, Phys. Rev. B. 82, 100501(R) (2010).



むはまど・しゃーばず・あんわー

2001-2003; I did my Master in Applied Physics from University of Engineering and Technology Lahore Pakistan. 2004-2006; I completed my M.Phil in Applied Physics from the same University. After that I moved to Leiden University Netherlands, where I did my PhD in 2010. In my free time I love to play with my son Hamza Shahbaz Anwar and like to write poetry/essay.

受入研究者
からのご挨拶

We are very happy that アンワーさん joined our project, since his PhD work on the odd-parity spin-triplet superconductivity ideally fits the purpose of the TQP project. When I first met him in a conference in Italy, I was very impressed by his invited talk, showing his keen sense of material in his fabrication of ferromagnetic oxide films for the junctions. The activity at Kyoto Univ. group has already been benefitted by his expertise in investigating unconventional superconducting junctions. I hope he fully enjoy the life in Japan with his lovely family.

楊 帆 YANG, Fan

大阪大学 産業科学研究所

(受入研究者：C01 瀬川 耕司)

I got my Ph. D. from the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2012. During my Ph.D. career, I mainly focused on nano-devices based on 3-D topological insulators (TIs) and superconductors.

According to the theory, when a 3-D TI is in contact with an *s*-wave superconductor, an unconventional superconducting phase will occur at the interface due to the proximity effect. Such new superconducting state will be like a spinless *p*-wave superconductor. In order to check this prediction experimentally, we designed several experiments. The first one is Sn-Bi₂Se₃ single junctions, on which we observed zero-bias conductance peaks at low temperatures. The second one is Josephson junctions and SQUIDs based on Bi₂Se₃ flakes and superconducting Pb electrodes. We successfully realized a Josephson junction with channel length up to 3.5 μ m. The third one is a hybrid structure with Bi₂Se₃, Pb and Pd, on which we detected an independent proximity-induced superconducting state.

I am familiar with nano-fabrication and low-temperature transport measurement. It is great for me to join this T. Q. P. project. I will continue my research on TI nano-devices here. Let us look forward to a pleasant and fruitful collaboration.



やん・ふあん

2012年中国科学院物理研究所にて博士号取得。2012年8月より現職。



受入研究者からひとこと

楊さんは、来てまだ半年経たないうちからトポロジカル絶縁体の微細加工実験で様々な困難を突破して成果を出しつつあります。人柄もすばらしく、一緒に実験していて楽しい存在です。今後に大いに期待しています。

2012 年度開催▽研究会報告

● 集中連携研究会 ● 若手国際会議 ● 領域研究会・国際会議

● 第8回集中連携研究会「冷却原子とトポロジー」

6月4日・5日（東京大学理学部）



2012年6月4日（月）と5日（火）の両日にわたり、東京大学本郷キャンパスで第8回集中連携研究会「冷却原子とトポロジー」を開催した。参加者は36名であった。内訳は総括班から4名（前野、石川、田仲、上田）、講演者16名、一般が16名であった。本領域以外の研究者の参加者もあり、また、日経サイエンスのエディターも初日に参加していただき物性研究に関するトポロジーの果たす役割への関心の高さがうかがわれた。

会議では集中連携研究会の趣旨に従って、スピーカーは冷却原子に限定せず、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導およびマヨラナフェルミオンなど、本新学術領域全般に当たるトピックスをカバーした。また、トポロジカル絶縁体や超流動ヘリウムにおける表面マヨラナコーンについては、実験家によるレビューもお願いし、一般講演では伝わりにくい実験の詳細についての活発な議論がなされた。冷却原子気体のトピックスとしては、スピノールBEC、人工ゲージ場、ボゴリウボフ理論を超えたリー・ヤン補正のスピノール理論など若手の講演者が中心となって最近のトピックスが紹介された。各講演は質問時間を十分に取ったために活発な議論が行われ、異分野の言葉を理解する助けになったのではないかと考えられる。また、領域

外のグラフェンや素粒子分野の研究者も聴衆として参加していただけたことは議論に多面性と深みを与える点で幸いであった。日経サイエンスのエディターには懇親会にも参加いただき、本領域の重要性に関する意見交換ができた。

プログラムは初日がトポロジカル絶縁体（講演者：瀬川、井村）、トポロジカル場の理論（佐

藤、田中、水島）、およびスピノール場の理論（川口、古川）、2日目がマヨラナフェルミオン（野村、福井）、トポロジカル励起（新田、小林）、人工ゲージ場（川上、Xu、吉川）、スピノールBEC（東條、Phuc）であった。同じセッションで実験家と理論家をできるだけ混ぜるようにし、また、時間の都合で講演は依頼できなかった当該分野の専門家の方に座長を依頼することで議論の活発化を図った。学生を含めた若手が多く参加し、懇談会まで含めて熱のこもった議論がなされた。

実験面では瀬川氏がタリウム系トポロジカル絶縁体の現状のレビューを行い、また、野村氏がトポロジカル超流動 $^3\text{He-B}$ 相の表面マヨラナコーンの観測に関する講演を行った。また、吉川氏が冷却原子のイッテルビウムを用いた人工ゲージ場の発生に向けた実験的試みについての現状報告を行った。中性原子気体は相互作用の符号や強さを含めたほとんどの実験パラメータを高い精度で制御できる系であるが、電荷をもたないためにゲージ場と結合できないという問題点があった。しかし、最近になってレーザー光を用いて原子準位をシュタルクシフトさせることによってゲージ場と等価な効果を発生させる実験技術がIan Spielmanによって開発された（Y.-J. Lin, *et al.*, Nature 462, 628-362

(2009))。この人工ゲージ場の技術によって中性原子に実効的な磁場をかけることができ、それによって整数および分数ホール状態や非アーベル SU(3) スピンシンプレット対のような量子状態（古川氏）やこれをスピノール系へ応用することでこれまで知られていなかった多彩な渦格子が形成されること（Xu 氏）などが議論された。

この会議に参加して改めて実感したことは、トポロジカル量子現象に関する興味深い実験研究に関しては前野氏の p 波超流動も含めて日本は世界の最先端を走っていることであり、それに刺激されて異なった分野の理論家同士の相互移動と交流が起こりつつあることである。分野間の交流と融合も盛んである。素粒子論と物性論との交流は古くからあるが、最近では、トポロジーのような数学的概念に加えて、エンタングルメントエントロピーなどのような量子情報の概念を応用した著しい成果が表れている。

このように発足3年目にして本新学術領域の構成メンバー間の分野の垣根を越えた研究交流は着実に実を結びつつあると言えよう。トポロジーという概念を専門家の間にとどめずより一般の方にどのように理解していただくことが、本分野が大きく成長していく過程でますます重要になってくるものと思われる。最後に、本研究会の成功は川口由紀さん、古川俊輔さん、大島ルミさんと研究室の学生諸君の協力の賜物であり、ここから感謝申し上げたい。

(文責、上田 正仁)

● 第9回集中連携研究会

「異方的超流体でのトポロジカル量子渦」

2012年9月1日（大阪市立大学）

「異方的超流体でのトポロジカル量子渦」という題目で、9月1日の1日だけの研究会を開催した。年当初には計画されていなかった研究会であるが、理論研究面の進展が有り、是非研究会を開き興味を持つ方々と議論できればと思い開催した。暑い中、非常に限定した内容に対する研究会であったにもかかわらず、29名の方の参加があった。各講演時間に対する質疑の時間を十分用意したこともあり、講演後の質問は活発であった。

午前中は「超流動 ^3He での半整数量子渦 (HQV)」に関する講演（2件の理論研究と1件の実験レビュー・今後の実験方針）であった。中原（近大）は、平行平板中の超流動 $^3\text{He-A}$ 相で存在が予想されている半整数量子渦の安定性を、圧力、温度、磁場と回転速度をパラメータとして議論した。川上（岡山大）はこの半整数量子渦芯界面に存在すると考えられているマヨラナ粒子に関して議論した。この半整数量子渦を観測した報告は未だにない。木村（大阪市大）は回転実験装置を使ってこれまでに行われたいくつかの実験についての簡単なレビューを行い、今後の実験計画（東大物性研究所に於ける）について議論した。後の自由討論では超流動 ^3He での半整数量子渦の観測に向けて理論・実験の両面から活発な議論がなされた。多くの理論家、実験家が一堂に会して議論できたことは有意義であった。

午後の前半のセッションでは新奇量子渦に関する講

第9回集中連携研究会



演（2件の実験研究と1件の理論研究）があった。米澤（京大）が最近観測された Sr_2RuO_4 での半整数フラクソイドに関する実験のレビューを行った。國松（大阪市大）は東大物性研で行われている円筒容器内の超流動 ^3He での Mermin-Ho 渦の実験についての現状報告を行った。竹内（広島大）は超流体におけるブレン対消滅に関する理論研究の紹介を行った。 Sr_2RuO_4 での半整数フラクソイド状態のオーダーパラメータがどうなっているのか、また午前中のセッションでの話題であった超流動 ^3He での半整数量子渦実験との関連・展開について議論があった。細い円筒容器内でのテクスチャーの同定実験結果とその中の1つである Mermin-Ho 渦を用いた実験から明らかになりつつある固有角運動量に関しては、Mermin-Ho 渦でのエッジ流の寄与について議論があった。超流動 ^3He の A-B 界面の衝突後に何か残骸が観測されていることとブレン対消滅との関連について議論があった。

後半のセッションではエッジ流・エッジ状態について講演（2件のレビュー）があった。講演後に長い討論時間を用意し、講演を基にした自由議論を行った。前野はエッジ状態に関して基本的な理解（カイラル、ヘリカルでの分類）についてまとめた。田仲（名古屋大）はエッジ状態・アンドレーエフ束縛状態・奇周波数ペアについて理論のレビューを行った。トポロジカルエッジ状態という新奇状態の共通認識があるが、そもそもの「エッジ流」が意味することについて不明確な点があり、共通理解に至ってはいないという問題意識を参加者が持ったことは有意義であった。

（文責、石川 修六）

● 第10回集中連携研究会

「トポロジカル超伝導・超流動」

2012年12月13日・14日（大阪大学産業科学研究所）

当新学術領域の第10回集中連携研究会は「トポロジカル超伝導・超流動」というテーマで開催した。今回の研究会の企画立案にあたっては、副責任者として大阪市大の石川氏に加わっていただいた他に、総括班メンバーの中の前野、鄭、田仲、佐藤の各氏からプログラム委員としてのアドバイスをいただいた。今から



3年前、この新学術領域を発足させるための申請書作成の際、現在の総括班メンバーが京都大学に合宿してブレンストーミングを行ったのだが、その中で「集中連携研究会」というネーミングを提案した張本人として、今回の研究会は「集中連携」の名に恥じないものにしよう、という意気込みを持って企画立案に臨んだ。

Salomaa と Volovik が超流動 ^3He の持つトポロジカルな性質に注目したのが1988年、Reed と Green がカイラル p 波超伝導状態のトポロジカル性を指摘したのが2000年であるから、トポロジカル超伝導・超流動の歴史はかなり古いと言える。しかしこれらのトポロジカル量子状態が本格的に注目を集めるようになったのはトポロジカル絶縁体の発見後である。特にトポロジカル超伝導・超流動状態における最も特徴的な現象であるマヨラナ粒子の出現に関して、これが現実の実験にかかる対象として注目を集め始めたのは、2008年のFu と Kane によるトポロジカル絶縁体/超伝導体接合におけるマヨラナ粒子の人工的生成法の提案がなされて以降である。

そのような歴史的背景の中で、最近1年間で実験に大きな進展があった。一つは、Fu と Kane によるトポロジカル絶縁体/超伝導体接合の提案の変形版である半導体ナノワイヤ/超伝導体接合におけるマヨラナ粒子検出の報告、もう一つは、Cu をドーピングしたトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 が時間反転対称性を保ったトポロジカル超伝導体であって表面にヘリカルマヨラナ粒子が出現していることを示唆する実験の報告である。た



実験の難しさ、それを克服するための今後の実験の方向性に関する認識を共有できた。最後の「トポロジカル超伝導・超流動研究の今後の可能性」のセッションでは、理論家の方々に刺激的な話題を提供していただき、このテーマ

だしこれらの実験はいずれもまだ確定的なものとは認められていない。一方、これらの超伝導系に先んじて超流動³He-B相におけるマヨラナ表面状態の存在が報告されており、その実験も最近着実な進展を見せている。そこで今回の集中連携研究会では、マヨラナ粒子を中心的なテーマとしつつ、トポロジカル超伝導・超流動系における特徴的な現象を総合的に俯瞰できるようなプログラムを企画し、領域内でトポロジカル超伝導・超流動に関する最新の知見を共有することを目指した。

具体的には「ヘリカル超流動・超伝導とマヨラナフェルミオン」と題した最初のセッションで、まず名大の田仲氏からトポロジカル超伝導・超流動に関する初心者向けの概説を行ってもらった後、超流動³He-B相におけるマヨラナ表面状態とCuドーピングBi₂Se₃におけるトポロジカル超伝導性に関する最新の研究成果を議論した。その次の「トポロジカル量子計算とマヨラナフェルミオン」と題したセッション—これが企画責任者としては今回の目玉セッションのつもりだった—において、マヨラナ粒子の応用の可能性や検出実験の問題点および将来展望について、非常に充実した発表と議論が行われた。このセッションを通して、マヨラナ粒子はなぜ面白いのか、またこれまでに報告されている半導体ナノワイヤの実験はどこが怪しいのか、マヨラナの尻尾をつかまえるにはどのような戦略が必要なのか、といった点に関して、参加者それぞれがこれまでより深いレベルでの理解を得られたと思う。

翌日はまず「カイラル超流動・超伝導」と題したセッションで、時間反転対称性を破ったカイラルなトポロジカル状態を実現している超流動³He-A相とSr₂RuO₄における特徴的な現象を議論し、これらの系における

マにおける将来的な実験テーマをじっくり話し合うことができた。

当新学術領域における集中連携研究会では、普通の研究会とは違って、議論に十分な時間を取ることを基本としており、発表はその議論のための話題提供、という考え方である。今回もこの哲学を実践すべく、一部のレビュー講演を除いて発表25分+議論20分という単位でセッションを企画した。さらに素人質問大歓迎のセッション進行を行ったので、普段は時間不足で（もしくは訊くのが恥ずかしくて）質問できないような事柄も納得が行くまで議論することができ、大変有意義な研究会になったと考えている。

(文責、安藤 陽一)

● 第6回物性科学領域横断研究会

2012年11月27日・28日(東京大学武田先端知ホール)

第6回物性科学横断領域研究会は、今年度は11月27日、28日に東京大学において開催された。本学術領域からは前野(領域代表、A01班代表)、鄭(C01班代表)、田仲(D01班代表)が出席した。ここでは、本新学術領域以外に、「重い電子系の形成と秩序化」、「分子自由度が拓く物質科学」、「コンピューティクスによる物質デザイン：複合相関と非平衡ダイナミクス」、「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・素粒子科学のフロンティア」が参加を行った。前野氏が領域全体の説明を行った後、田仲がトポロジカル超伝導、鄭氏が空間反転対称性の破れた系の超伝導の最近の進展に関する講演を行った。以下自身が行った発表を中心に、報告する。

トポロジカル超伝導の説明では、まず量子ホール系、トポロジカル絶縁体の簡単な説明を行った後にアンド

WORKSHOPS AND MEETINGS

レーエフ束縛状態の説明を行った。アンドレーエフ束縛状態のうち、バルク・エッジ対応をしているアンドレーエフ束縛状態を持つ超伝導体をトポロジカル超伝導体と呼ぶということを説明した。銅酸化物超伝導体もトポロジカル超伝導体と見なせることを強調した。アンドレーエフ分散関係は、フラット、カイラル、ヘリカル、コーン型に分類されることを紹介し、本領域では Sr_2RuO_4 のカイラルエッジ状態が柏谷氏、前野氏のトンネル効果の実験 (A01 班)、 ^3He のマヨラナコーンの観測が野村氏の表面インピーダンスの実験 (B01 班) で観測されたことを紹介した。さらに、Cu をドーピングしたトポロジカル絶縁体で、新種の分散関係を持つ ABS に由来する零電圧ピークを安藤氏らのグループで発見したことも強調した (C01 班)。このバルク・エッジ対応をする ABS の中で、特別なものがマヨラナフェルミオン (マヨラナ型準粒子励起) であることを次に説明した。さらに現在、スピン・軌道相互作用を用いてナノ加工した系でマヨラナフェルミオンを作り出す研究が行われていることを紹介した。スピン軌道相互作用でフェルミ面を分裂させ、さらにゼーマン効果あるいは軌道間の混成効果で、より自由度の低い電子系を作り出して、そこに近接効果で超伝導を誘起させる

とマヨラナ型準粒子励起が作られるという理論提案に基づく研究の流れである。C 班の永長氏との間で行った、酸化物界面で形成されるヘリカルマヨラナ型準粒子励起についても紹介した。発表に対していくつか質問があり大変に有意義であった。

夕方は凝縮系科学賞の授賞式があり、トポロジカル物質の周期表を提案した笠氏がこの周期表をいかに作るようになったのか経緯も含めて大変に力のこもった発表を行った。笠氏の講演で印象深かったのはトポロジカル絶縁体の説明であった。通常の絶縁体の波動関数はエンタングルメントしておらず連続変形で孤立原子の波動関数に近づけることができるのに対して、トポロジカル絶縁体はエンタングルしているために孤立原子の波動関数に変形できない。したがって、エッジで金属状態を避けられないというものであった。

ポスターの中で特に興味を持ったのは物性研の上田研の奇周波数ギャップ関数をチェッカーボード格子で予言するというもので、重い電子系の研究グループの中に奇周波数クーパ対の考え方が浸透しつつあると思ううれしく感じた。

(文責、田仲 由喜夫)



TQP2012 参加者集合写真 (名古屋大学 ES 総合館)

●トポロジカル超伝導体 TQP2012 会議録

2012年5月16日ー5月20日 (名古屋大学 ES 総合館)

暖かい穏やかな五月晴れの名古屋に、参加者 163 名、うち海外からの出席者 14 名を集め、名古屋大学 ES 総合館にて 4 日間にわたって開催された。会議は HP での申し込みの段階においてすでに大きな反響を呼んでおり、会場の収容人員を超えるおそれがあったため、本来意図していた締切日よりも早めに申し込みが打ち切られるという異例の人気であった。会議の冒頭においてチェアマンである田仲氏による講演からスタートし、主に外国からの出席者向けに日本の歴史の中における尾張、名古屋城、および現代の名古屋の発展についての紹介が行われ、続いて、同じくチェアマンである前野氏による科研費、新学術領域研究の紹介が行われた。これらに引き続いて、4 件のプレナリー発表、31 件の口頭発表、98 件のポスター発表が行われた。

プレナリーには 1 件あたり 50 分の時間が割り当てられ、すべてにおいて極めて重要で意義の深い発表が行われた。Volovik 氏は当該分野を立ち上げた先駆者であり、運動量空間におけるトポロジーの基礎から quantum vacua の universality class と現実のトポロジカル物理現象に関して、安藤氏はトポロジカル絶縁体の新しい物質開発、物性制御に関する最新の展開、Leggett 氏はヘリウムの特異な側面、マヨラナフェルミオンの性質、量子コンピュータに関する将来展望などを、また Zhang 氏は凝縮系の多くの実験結果を使いながら、トポロジカル凝縮系の理解がどのように進んできたか、についての歴史を明瞭に解説した。

そのほかの口頭発表において主にフォーカスされたのは、物性実験研究に関しては、ヘリウムや Sr_2RuO_4 などのカイラル超伝導・超流動、トポロジカル絶縁体およびそのドーピングによる超伝導体の最新の成果、 $5/2$ の分数量子ホール状態の理解、グラフェンなどのディラック電子系などの話題が取り上げられた。また、理論的側面に関しては、トポロジカル物質の分類、トポロジカル現象のデザイン、マヨラナ粒子によるブレーディング、冷却原子気体における新奇なトポロジカル構造などが議論された。また最新のホットな話題として、超伝導/強磁性接合系における奇周波数超伝

導状態や 1 次元ナノワイヤーのマヨラナ粒子の検出、半整数磁束量子の検出、中心対称性の破れた超伝導など、急激に理解が進みつつある新現象についても議論された。これらのさらなる詳細については、添付のプログラムを参照して頂きたい。

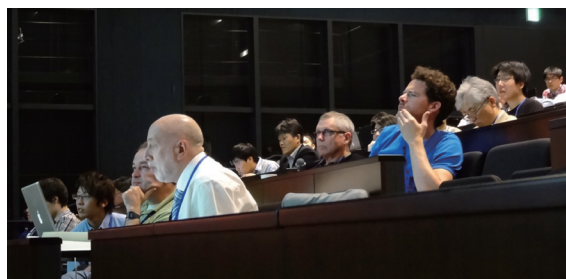
また会議中に目に付いたのは、ポスター発表の盛り上がりであった。ほぼすべてのポスターに、通路を遮るくらいの人だかりができており、会場内の移動に苦労をしたほどであった。会議の最後には、参加者の投票に基づき、ポスターおよびポスターレビューに対する表彰が行われ、中河西氏 (東大)、入江氏 (NTT)、竹内氏 (広島大学) が優れた発表として表彰された。ポスターの質の高さにみられる若い力の参入は、当該分野の大きな発展を支えるものであり、新しい視点に基づく今後の展開が大いに期待される。

会議の中途には、ES 総合館に仕事部屋を構えられているという益川氏による激励の言葉も頂き、大いに盛り上がりのある議論が進められた。4 日間のスケジュールを通して、内容は極めて濃厚で、トポロジカル量子現象の今後のさらなる大きな発展を予期させる内容であった。新学術領域研究の国際アドバイザーである Leggett 氏、Zhang 氏、Aarts 氏らから、本学術領域が世界に先駆けたトポロジカル関連プロジェクトであり、また本国際会議も世界最先端の流れを作っているとの有りがたいコメントも頂いた。2 年後に行われる TQP2014 において、さらなる発展が報告されることを願ってやまない。

最後になりましたが、本会議の開催に当たって、スムーズな運営と細やかなサポートを行っていただいた名古屋大学田仲研究室の皆様への支援に深く感謝いたします。

(文責、柏谷 聡)





PROGRAM

MAY 17, 2012 (THU)

- 9:00 **Welcome** Y. Tanaka (10min)
- 9:10 17AM-0 Introducing Topological Quantum Phenomena Project Y. Maeno (20min)
- 9:30 ~ 10:50 Topological States: Chair M. Nakahara
- 9:30 17AM-1 Topology of Quantum Vacua G. Volovik (50min)
- Recent Topics on Topological Superconductors M. Sato (30min)
- 11:20~12:30 Chiral SC: chair N. Birge
- 11:20 17AM-3 Searching for Complex Order Parameters and Majorana Fermions in Superconducting Materials and Josephson Devices D. Van Harlingen (30min)
- 11:50 17AM-4 Chiral Edge States of Sr_2RuO_4 S. Kashiwaya (20min)
- 12:10 17AM-5 Anomalous Superconducting Transition of Sr_2RuO_4 Investigated by Magnetocaloric Effect S. Yonezawa (20min)
- 13:40~15:30 Odd-parity/Odd-freq. pairs: Chair Y. Tanaka
- 13:40 17PM-1 Twofold Symmetry Breaking in the Gap Function of UPt_3 Probed by Thermal Conductivity K. Izawa (30min)
- 14:10 17PM-2 Odd-frequency Pairing in Superconducting Heterostructures A. A. Golubov (30min)
- 14:40 17PM-3 Odd-frequency Pairing in Superfluid ^3He S. Higashitani (20min)
- 15:00 17PM-4 Odd-frequency Superconductivity: Stability and Ubiquitousness K. Miyake (30min)
- 16:00~18:20 Poster Session A: Chair T. Nojima
- 16:00 ~ 16:50 Poster Preview A (50min)
- 16:50 ~ 18:20 Poster Session A (90min)

MAY 18, 2012 (FRI)

- 9:20~10:40 Topological Ins. / Topological SC: Chair N. Nagaosa
- 9:20 18AM-1 Topological Insulators and Superconductors: Materials Frontier Y. Ando (50min)
- 10:10 18AM-2 From the Topological Invariants to the Edge States of Topological Insulators V. Gurarie (30min)
- 11:10~12:20 RS invariant: chair V. Gurarie
- 11:10 18AM-3 Classification of Topological Insulators and Superconductors: Some Applications A. Furusaki (30min)
- 11:40 18AM-4 Surface Majorana Cone of the Topological Superfluid ^3He B Phase R. Nomura (20min)
- 12:00 18AM-5 Theory of Tunneling Spectroscopy in Superconducting Topological Insulators A. Yamakage (20min)

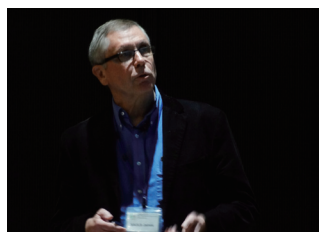
MAY 19, 2012 (SAT)

- 9:20 ~ 10:30 Majorana Fermion: Chair M. Ueda
- 9:20 19AM-1 Some Remarks about Majorana Fermions and Their Use in Topological Quantum Computing A. Leggett (50min)

- 10:10 19AM-2 Symmetry Protected Topological Phase and Spin Susceptibility in ^3He -B K. Mizushima (20min)
- 11:00~12:20 S/F junctions: chair A. A. Golubov
- 11:00 19AM-3 Micron-ranged Supercurrents Induced in the Half-metallic Ferromagnet CrO_2 J. Aarts (30min)
- 11:30 19AM-4 Spin-triplet Supercurrent in Ferromagnetic Josephson Junctions N. Birge (30min)
- 12:00 19AM-5 Odd-frequency Cooper pairs in Spin-triplet Superconducting Proximity Structures Y. Asano (20min)
- 14:30~16:20 Chiral States: chair K. Nagai
- 14:30 19PM-1 Surface States and Edge Currents of Superfluid ^3He in Confined Geometry J. Sauls (30min)
- 15:00 19PM-2 NMR Study on Mermin-Ho Texture in Rotating Superfluid ^3He -A O. Ishikawa (30min)
- 15:30 19PM-3 NMR Investigation of the $\nu = 5/2$ Fractional Quantum Hall State K. Muraki (30min)
- 16:00 19PM-4 Proposal for Transporting and Braiding Edge Majorana Fermions X. Hu (20min)
- 16:50~19:10 Poster Session B: Chair T. Shishidou
- 16:50~17:40 Poster Preview B (50, 50min)
- 17:40~19:10 Poster Session B (90min)

MAY 20, 2012 (SUN)

- 9:00 ~ 10:10 Topological Ins. Topological SC: Chair G. Zheng
- 9:00 20AM-1 Topological Insulators and Superconductors S. Zhang (50min)
- 9:50 20AM-2 STM/STS Studies of Topological Insulators under Magnetic Fields T. Hanaguri (20min)
- 10:40 ~ 12:00 Topological Excitation: chair K. Miyake
- 10:40 20AM-3 Topological Aspects in Ultracold Atomic Gases M. Ueda (30min)
- 11:10 20AM-4 Single-site Resolved Detection and Manipulation of Atoms in an Optical Lattice T. Fukuhara (20min)
- 11:40 20AM-5 Probing the Physics of the Fractional Vortex State in Mesoscopic Rings of Sr_2RuO_4 R. Budakian (30min)
- 13:20 ~ 14:50 Chiral SC/ NCS SC: chair Y. Inada
- 13:20 20PM-1 Novel States at Defects and Twin Boundaries in Non-centrosymmetric Superconductors M. Sigrist (30min)
- 13:50 20PM-2 Novel Superconducting State in Non-centrosymmetric Compounds $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3$ G. Zheng (20min)
- 14:10 20PM-3 Surface Superconductivity on SrTiO_3 : Depth and Crystal Orientation Dependence K. Ueno (20min)
- 14:30 20PM-4 Probing the Direction of the Angular Momentum of Cooper Pairs in Superfluid ^3He -A H. Ikegami (20min)
- 15:20 ~ 16:40 Topological States: Chair G. Volovik
- 15:20 20PM-5 Topological and Chiral Aspects of Graphene H. Aoki (30min)

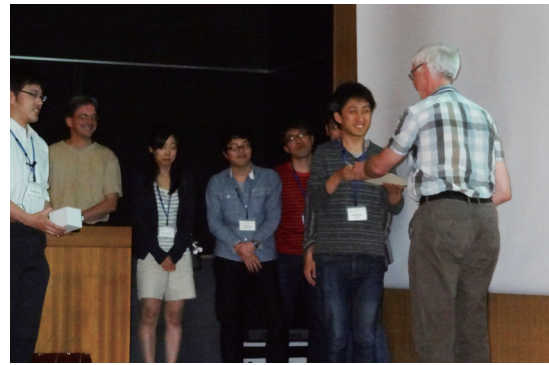


15:50 20PM-6 Topological Chiral Edge Modes in Magnonic Crystals S. Murakami (20min)
 16:10 20PM-7 Theoretical Design of Topological Materials N. Nagaosa (30min)
 16:40~17:00 Closing

POSTER PRESENTATION

- | | |
|--|---|
| <p>PA1 Superconductivity in Ga-clathrate Compounds
T. Muranaka</p> <p>PA2 Electronic Phase Diagram of Ir Oxide Superlattices with Strong Spin-orbit Interaction
J. Matsuno</p> <p>PA3 Chiral Magnetic Soliton Lattice on Chiral Helimagnet $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$
Y. Togawa</p> <p>PA4 Quantum Transport through Chiral Soliton Lattice in Chiral Helimagne
J. Kishine</p> <p>PA5 Skyrmion Quantum Number and Adiabatic Pumping in 2D Magnetic Topological Insulators
B.-J. Yang</p> <p>PA6 Beliaev theory of a ferromagnetic spinor Bose-Einstein condensate
N. T. Phuc</p> <p>PA7 Half-Quantum Vortices in Thin Film of Superfluid ^3He
M. Nakahara</p> <p>PA8 Effects of Lithium Deficiency on Superconductivity in the Noncentrosymmetric Superconductors $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$
G. Bao</p> <p>PA9 Long Ranged Proximity Effect in Thin Films of Half metallic Ferromagnet CrO_2
M. S. Anwar</p> <p>PA10 Liquefaction of ^3He in Two-dimensions
D. Sato</p> <p>PA11 Probing and Controlling Strongly Interacting Quantum Matter at the Single Atom Level
T. Fukuhara</p> <p>PA12 Controlling Injection of Charge Carriers from Contact Metals to Graphene for Realization of Relativistic Josephson Effects
A. Kanda</p> <p>PA13 Yet-To-Be-Discovered 2D Superfluid ^3He
S. Nakamura</p> <p>PA14 Remarkable Role of Interfacial Thickness on Energetics and Transport in a Perpendicular Magnetic Field: A One-electron and A One-Composite Fermion Approach
K. Mouloupoulos</p> <p>PA15 Hall Effect of Graphene and Single Dirac Fermions with Disorder
M. Noro</p> <p>PA16 Existence of Dense Superfluid ^3He-^4He Mixture in Aerogel
Y. Sasaki</p> <p>PA17 Modulation of Electron Transport by Strain-induced Pseudo-magnetic Fields in Graphene
H. Tomori</p> <p>PA18 Temperature Variation of Critical Current Modulations of dc-SQUIDs with Nb/Ru/Sr_2RuO_4 Junctions
T. Sakurai</p> <p>PA19 Pd-Pt Substitution Effect of the Noncentrosymmetric Superconductor $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$
G. Eguchi</p> <p>PA20 Reflectionless Nonlinear Spin Flows Past an Obstacle in spin-1 Polar BECs
D. Takahashi</p> <p>PA21 Strong Suppression of KT Transition and Existence of Quantum Phase Transition of ^4He Film under High Pressure ^3He
S. Murakawa</p> <p>PA22 Stable Skyrmions in SU(2) Gauged Bose-Einstein Condensates
T. Kawakami</p> | <p>PA23 Vortices in Mesoscopic Plates of a Chiral Superconductor Sr_2RuO_4
R. Ishiguro</p> <p>PA24 Gapless Interface States between Two Topological Insulators in the Fu-Kane Model
R. Takahashi</p> <p>PA25 Fabrication of One-hole Micron-size Bridges of the Spin-triplet Superconductor Sr_2RuO_4
Y. Yamaoka</p> <p>PA26 Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid ^3He-B
H. Ikegami</p> <p>PA27 Magnetocaloric Effect of a Sub-mg Sr_2RuO_4 Single Crystal
T. Kajikawa</p> <p>PA28 Calculation of Electronic State for the Topological Superconductor $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$
T. Hashimoto</p> <p>PA29 Creation of Artificial Gauge Fields in Ultracold Ytterbium Atoms
Y. Yoshikawa</p> <p>PA30 Topological Superconductivity in Bilayer Rashba System
S. Nakosai</p> <p>PA31 ^{77}Se NMR Study of Possible Topological Superconductors $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$
F. Iwase</p> <p>PA32 Texture of ^3He-A Phase in a Narrow Cylinder
T. Kunimatsu</p> <p>PA33 Enhancement of Magnetization in Liquid ^3He at Aerogel Interface
A. Fukui</p> <p>PA34 Theoretical Analysis of Thermal Hall Effect of Magnon in General Magnets
R. Matsumoto</p> <p>PA35 Magnetic Order and Superconductivity in a Superconducting Ferromagnet UCoGe
K. Deguchi</p> <p>PA36 Acoustic Properties of Normal Liquid ^3He in 97% Aerogel
O. Iwakami</p> <p>PA37 Surface Majorana Cone of the Superfluid ^3He B Phase on a Partially Specular Wall
K. Akiyama</p> <p>PA38 Charge Pumping Due to Triplet Vector Chirality in Ferromagnet/triplet Superconductor Junctions
T. Yokoyama</p> <p>PA39 NMR/NQR Studies of the Non-centrosymmetric Superconductor LaPtBi & BiPd
K. Matano</p> <p>PA40 Hydrodynamic Equations of Spin-1 Bose-Einstein Condensates
E. Yukawa</p> <p>PA41 Correlation Effects on a Topological Insulator : a Variational Monte Carlo Approach
Y. Takenaka</p> <p>PA42 Local Correlation Effect on Topological Insulators
T. Yoshida</p> <p>PA43 Multicomponent Ginzburg-Landau theory for Sr_2RuO_4
S. Takamatsu</p> <p>PA44 Spin Torques and Charge Transport on the Surface of Topological insulator
A. Sakai</p> <p>PA45 Surface States in Magnetic Topological Insulators
Y. Ueno</p> <p>PA46 Time Reversal Symmetric Kitaev Model and Topological Superconductor in Two Dimensions
R. Nakai</p> <p>PA47 Josephson Characteristics of Superconducting Quantum Point Contact
H. Irie</p> <p>PA48 Molecular Beam Epitaxial Growth of Topological Insulators on Insulating Substrates
A. Taskin</p> <p>PA49 Topological Aspects of the Quantum Spin Nanotubes
T. Ssakai</p> <p>PA50 Chiral Superconductivity in Non-centrosymmetric Systems with Zeeman Magnetic Field
K. Yada</p> |
|--|---|

- PB1 Surface Density of States in *s*-wave Rashba Superconducting Junctions Y. Tanuma
- PB2 High-Field Anomaly in the Superconducting Mixed State of Sr_2RuO_4 K. Tenya
- PB3 Quantum Vortex Generation in Spin-2 Bose-Einstein Condensate Using Optical Spoon Stirring S. Tojo
- PB4 Index Theorem for Topological Insulator and Superconductor Systems T. Fukui
- PB5 Surface State in the $n=0$ Quantum Hall State in the Organic Dirac Fermion System T. Osada
- PB6 Exotic Superconductivity in Locally Non-centrosymmetric Systems Y. Yanase
- PB7 Optimizing the $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ Solid Solutions to Approach the Intrinsic Topological Insulator Regime Z. Ren
- PB8 Theoretical Study of the Spontaneous Magnetic Moment in the Chiral Superconducting State A. Tsuruta
- PB9 Fourth Sound Resonance of Superfluid ^3He in Slab Geometry C. Kato
- PB10 Axion Strings in Topological Insulators/Quantum Spin Systems A. Tanaka
- PB11 Reentrant Topological Transitions in Quasiperiodically Modulated One-dimensional Quantum Wire Coupled to a Superconductor M. Tezuka
- PB12 Conductance Fluctuation and Weak Antilocalization in a Submicrometer-sized Wire of Epitaxial Bi_2Se_3 S. Matsuo
- PB13 Transport Properties of Topological Insulators with Cobalt Films Deposited on their Surface K. Eto
- PB14 Junction-Size Dependence of Josephson Current in $\text{Nb}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ Micro-Josephson Junctions K. Saitoh
- PB15 Topological Classification of Vortex-core Structures in Spinor BECs S. Kobayashi
- PB16 Spin-triplet Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in UCoGe T. Hattori
- PB17 Gating with Ionic Liquid on Bulk Single Crystals of a Topological Insulator K. Segawa
- PB18 Superconducting Pairing Symmetry and Spin/Charge Fluctuations in a Staggered Field K. Shigeta
- PB19 Fermi Surface and Spin Texture of the Noncentrosymmetric Superconductors $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$ and $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ T. Shishidou
- PB20 Finite Size Effects of the Surface States in a Lattice Model of Topological Insulator K. Ebihara
- PB21 NMR/NQR Studies of Non-centrosymmetric Superconductors K. Arima
- PB22 Topological Aspects and Magnetic Properties of Edge States in the Multi-band Superconductor Sr_2RuO_4 Y. Imai
- PB23 Possibility of Superconducting Proximity Effect of Equal-spin Triplet Components in $\text{NbN}/\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Al}/\text{NbN}$ Junctions K. Matsuda
- PB24 Edge State and Edge Current in Superfluid ^3He Y. Tsutsumi
- PB25 Spinless Basis for Spin-singlet FQH States T. Kimura
- PB26 Floquet Theory of Photo-induced Topological Phase Transition: Application to Grapheme T. Oka



- PB27 High Field Magnetoresistance of Topological Insulator Bi_2Se_3 T. Sasaki
- PB28 Index Theorem for Topological Insulator Heterostructure Systems K. Shiozaki
- PB29 Symmetry Breakdown of Zn-Excimer Condensates Induce by Weak Magnetic Field K. Obara
- PB30 Tachyon Condensation in Bose-Einstein Condensates H. Takeuchi
- PB31 Non-Abelian Statistics of Vortices with Multiple Majorana Fermions M. Nitta
- PB32 Transport and Superconducting Properties of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2(\text{Se}_{1-y}\text{Te}_y)_3$ K. Kadowaki
- PB33 Soft Point-contact Spectroscopy of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ S. Sasaki
- PB34 Small Superfluid Density in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ M. Kriener
- PB35 A New Long-Range-Ordered Superfluid State of ^4He Films in Three-Dimensional Topology N. Wada
- PB36 Critical Exponent of the Plateau Transition in the Integer Quantum Hall Effect K. Slevin
- PB37 Possible 1D Superfluid ^4He Realized in Nanochannels T. Matsushita
- PB38 Electric-Field Tuning of Superconductivity in Y123 High- T_c Cuprates T. Nojima
- PB39 Transport in InAs/GaSb Topological Insulating Phase K. Suzuki
- PB40 Quantum Hall States in Two-component Bose Gases under Rapid Rotation S. Furukawa
- PB41 Chiral Majorana Edge Excitations in Sr_2RuO_4 H. Nobukane
- PB42 Spin-Antisymmetric Pomeranchuk Instability in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ Nematic Phase Y. Yoshioka
- PB43 Spin-polarized Magneto-optical Current of Dirac Electrons in Bismuth Y. Fuseya
- PB44 Spin-to-surface Locking in Gapped and Gapless Topological Phases K. Imura
- PB45 Possible Unconventional Pairing States in SrPtAs J. Goryo
- PB46 Magnetic-Field Modulation of the Josephson Effect between URu_2Si_2 and Al A. Sumiyama
- PB47 Mermin-Ho Texture and Intrinsic Angular Momentum of ^3He A-phase T. Takagi
- PB48 The Appearance of Robust Odd Frequency Pairing in Superconductor/Inhomogeneous-ferromagnet Junctions S. Kawabata



今後の会議予定

●集中連携研究会

4月末から5月頃：後期公募キックオフ

(5月6日ー5月8日にはCIFARの研究会があり、数名は参加していただきたいと思います。)

前半：各班(計画+公募)の集中連携研究会

●若手国際会議

Second International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena
in Condensed Matter with Broken Symmetries

日時：2013年10月22日(火)ー10月26日(土)

会場：フェストーネ(沖縄県宜野湾市)

●第7回物性科学領域横断研究会

2013年11月に開催予定

●領域研究会

日時：2013年12月19日(木)ー12月21日(土)

会場：名古屋大学 ES 総合館 ES ホール

●今後の領域研究会の予定

詳細は決定し次第、ウェブサイト上で告知します。

H26年度：2015年3月 京都大学

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: 231035XX, etc. 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

本新学術領域も３年目が終わりにさしかかっております。ニュースレターの編集も３回目となり、作業自体には慣れつつありますが、特筆すべきことはデザインの進歩です。特に今号の表紙など、科研費ニュースレター「らしからぬ」でき上がりになったのではないのでしょうか？レベルの高い原稿を書いたいただいた筆者の方々にはもちろん、原稿の校正担当の山影さんと齋藤さん、そしてデザイン担当の西村さんに心から御礼申し上げます。

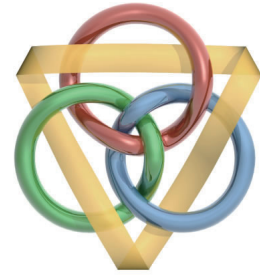
私事ですが、産総研ではいまだに地震による被害対策の工事が行われており、先月は居室、今月は実験室が封鎖となってしまいました。おまけに、ヘリウムの枯渇により、来年度のヘリウム供給の停止が宣告され、低温実験はまだまだ苦境が続きます。今年度を振り返ってみると、山中教授のiPS細胞によるノーベル賞は、なにより喜ばしい話題でした。iPS細胞は多くの医療技術に実用応用さ

れる可能性にあふれており、基礎研究の場に居合わせるものとしては大いに勇気づけられました。翻って、トポロジカル量子現象からは、人類の生活を変えてしまうような成果は出せるのでしょうか。「そもそもトポロジーって結局何ができるの？」という質問を所内でもたびたび受けませんが、相手に納得してもらえるように説明するのはなかなか骨が折れます。量子計算では「猫が計算をする」と表現されましたが、トポロジカル量子計算ならば「ドーナツも計算する」とか言えば、納得はしなくても、親しみを感じてもらえるかも、と期待しています。残りの２年間、ドーナツをいろいろねじってみます。

(文責、柏谷 聡)

NEWSLETTER No.3

領域ロゴの意味するもの



- 2 巻頭言
前野新学術領域研究によせて
The Great Topological Expansion
- 4 今年度の計画研究班トピックス
計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 12 受賞ニュース
吉川 豊・村川 智 / 第 6 回日本物理学会若手奨励賞
水島 健・古川 俊輔 / 第 7 回日本物理学会若手奨励賞
- 15 トピックス
奇周波数バルク超伝導について (三宅 和正)
 $^3\text{He-B}$ のトポロジカル超流動相 (水島 健)
超伝導 / 強磁性半導体接合でのゼロバイアスコンダクタンス
ピークの観測 (赤崎 達志)
- 24 公募研究紹介
- 43 2012 年 ピックアップトピックス
- 44 若手相互滞在プログラム報告
齋藤 広大 (産業技術総合研究所) / 橋本 樹 (名古屋大学)
小林 伸吾 (東京大学) / 金本 真知 (京都大学)
- 48 新規採用研究者の紹介
Muhammad Shahbaz ANWAR (京都大学) / YANG, Fan (大阪大学)
- 50 2012 年度研究会報告
第 8 回~第 10 回集中連携研究会、第 6 回物性科学領域横断研究会、
TQP2012
- 59 今後の会議予定 / 編集後記

三つの輪はそれぞれ計画研究 A,B,C を表し、異なる物質系での研究の連携を表現しています。このボロメの輪 (ボロメアの輪、Borromean rings) を貫く 3 回ひねりのメビウスの帯 (Möbius band) は計画研究 D を表し、個々の物質系を超えた概念の融合や普遍法則の探求を表現しています。

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」
ニュースレター第 3 号

発行日：2013 年 2 月 15 日

発行：「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」総括班

編集：柏谷 聡、田仲 由喜夫 (編集アシスト：齋藤 広大、山影 相、レイアウト：西村ゆかり)

領域事務局：〒 602-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学 大学院理学研究科 物理学第一教室 固体量子物性研究室内

TEL/FAX: 075-753-3783

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

領域ウェブサイト <http://www.topological-qp.jp/>