

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

## NEWSLETTER No. 4



FEBRUARY 2014

# NEWSLETTER No.4

## CONTENTS

### 2 巻頭言

最終年度へ向けて / 安藤 恒也 (領域アドバイザー)

時間反転と鏡面反転 / 前野 悦輝 (京都大学)

### 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

前野 悦輝 (京都大学) / 紫綬褒章

山影 相 (名古屋大学) / 第8回日本物理学会若手奨励賞

岩澤 英明 (広島大学) / 第8回日本物理学会若手奨励賞

### 15 トピックス

スピン三重項超流動体の固有軌道角運動量 / 石川 修六 (大阪市立大学)

奇周波数クーパー対の磁気応答 / 東谷 誠二 (広島大学)

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトポロジカル超伝導性とトンネル効果 / 柏谷 聡 (産業技術総合研究所)

### 24 公募班研究紹介 (A01~D04)

### 45 2013年ピックアップトピックス

### 46 若手相互滞在プログラム報告

小沢 英之 (名古屋大学) / 塩崎 謙 (京都大学)

### 48 2013年度研究会報告

第11回~第15回集中連携研究会 / 第4回領域研究会 / 若手国際会議

第7回物性科学領域横断研究会 / CIFAR 報告

### 63 お知らせ

今後の会議予定

### 64 コラム

アメリカ滞在記 / 水島 健 (岡山大学)

アンドレーエフ束縛状態を研究して / 田仲 由喜夫 (名古屋大学)

編集後記

## 最終年度へ向けて

安藤 恒也 / 東京工業大学特命教授 (領域アドバイザー)



本新学術領域は平成22年度に開始され、もうすぐ最終年度を迎えようとしています。発足時には、理論的に予言されたようにトポロジカル絶縁体に特有の表面状態が存在することが実験的に示され、その重要性が一般的に認識され、研究が盛んになりはじめていました。また、同時に、トポロジカル超伝導や超流動、またマヨラナ粒子などのエキゾチックな概念が注目を浴びようになっていました。ちょうどこのような時期にこの新学術領域を開始することができたのは、本学術領域だけではなく、我が国におけるこの分野の研究発展にとってたいへん幸運だったと思います。

私自身、何度か重点領域・特定領域・新学術領域などに参加し、また、その審査等に関わってまいりましたが、このように理想的なタイミングでプロジェクトを開始できたものはあまり記憶にありません。その原因には当然「委員会での審査」の問題もありますが、多くは「領域としてまとめる代表研究者」がなかなか決まらないことがあるように思えます。この新学術領域はその点でも全く危惧を感じることはありません。

昨年9月に行われた中間評価でも「・・・当初計画を超えた全体的に内容のある成果が得られつつあり、計画研究、公募研究ともに極めて順調に進展している。共同研究についても着実な成果が認められ、広報や若手育成にも積極的に取り組むなど、意欲的な領域運営は高く評価できる。今後、他分野との連携を進め、本研究領域の成果の波及に努めることが期待される。・・・」(総合所見の一部抜粋)のように最も高い

評価を受けました。実際、領域における非常に活発な研究活動とその成果を反映して、たくさんの研究会や国際ワークショップが開催されています。特に、2012年5月には名古屋大学で第一回の国際会議が開催され多くの参加者を集めました。本年12月には京都でその第二回が開催される予定です。さらに、この領域の多数の若手研究者が日本物理学会若手奨励賞を受賞しています。

現在、私は日本物理学会が発行する英文誌 Journal of Physical Society of Japan (JPSJ) の編集委員長を務めております。JPSJでは、代表的な研究を年に2~3件ほど選び、招待論文として取り上げています。昨年は安藤陽一氏による Topological Insulator Materials [JPSJ 82, 102001 (2013)] が出版されました。この論文は大変な労作ですし、またレビューとして時宜を得ていることもあり、すでに引用する論文が20件を超えているようです。さらに現在、この領域の方々には複数の招待論文の執筆を依頼しております。どうか今後もJPSJにご協力頂きますことをお願い申し上げます。

早いもので、この新学術領域も残り1年と3ヶ月となりました。世界的にもトポロジカル量子現象の研究はますます発展しているようです。残された研究期間にさらに新しい研究成果が生まれ、さらに次の新学術領域へと発展・展開することを願っております。

## 時間反転と鏡面反転

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)



早いもので本領域の活動もいよいよ仕上げ時期に入ります。おかげさまでトポロジカル量子現象の概念の発展深化は着実で、「トポロジカル量子」の言葉も様々なところで自然に使っていただけるようになってきたと思います。ニュースレターも第4号になりました。今年度は後期の公募研究代表者を迎え、メンバーの層が一層厚くなりました。21件の後期公募研究についてはこのニュースレターの記事を是非ご覧ください。6月には計画班ごとに集中連携研究会を開き、新メンバーも含めて本領域と各計画研究の目的やこの2年間での達成目標などを確認しました。各計画班の今年度の動きと、領域研究会や若手国際会議などについても記事を掲載しました。

物理学においては扱う系の対称性や、その解としての対称性が基本的な重要性を持ちます。トポロジカル物質の分類についても、空間反転対称性、時間反転対称性に基づくもの以外に、最近では結晶対称性、特にその鏡面対称性を使つてのトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導状態が予言され、我々の領域をはじめとしてその理論展開と実験での実証が始まっています。時間反転や鏡面反転は、トポロジカル分類に限らず日常生活との対応でも物理学者が興味を持ってきた問題です。

領域アドバイザーのレゲット教授には今年度5月に京都大学で特別講義をしていただきましたが、一般学生向けの講演の題目は「時間の矢: Why can't time run backwards」でした。多くの物理法則の時間反転対称性に関わらず、その解としての日常現象の時間の流れの方向性の原因を掘り下げて考えてみようということでした。レゲット講義で私が印象的だったのは、相対性理論や量子力学の例を挙げて、物理学の革命をもたらすには人間の日常認識を覆す発想が必須で、そのような常識の一つが時間の流れに対する因果律の認識ではないか、と思案を深めてこられた点でした。

鏡面反転の不思議については朝永振一郎や

Feynman もエッセーに記しています。「鏡に映った自分の姿を見て上下はそのままでも左右が反転しているように見えるのはなぜだろうか?」という鏡像問題です。この問いは、「鏡の中の自分を見て、左右反転していないと認識するにはどのような思考をすればよいか」という問いに置き換えることも出来るでしょう。

エッセー集「鏡の中の物理学」での朝永の結論は次の通りです。「右と左が逆になっているとか、上と下とが逆になっているとか、あるいは前と後ろとが逆になっているとか、そういう判断は、鏡のうしろに実際にまわって立った自分の姿を想定して、それとの比較の上での話であろう。そうすれば結局は、鏡の横を通つてうしろにまわった自分の方が、鏡の上を通つて向こうがわでさかだちしている自分より想定しやすいからであろうし、… (以下略) …」Feynman の結論も同様で、「われわれは自らをつぶすように変形して前後を逆にすることを想像できないので、鏡の向こうへ回つて反対に向いたかのように、左右入れ替わった自分を想像する。左右が逆になるのは、この心理的な回転による」(J. Gleick による伝記より)。(下線は前野)

面白いことにこの問題は心理学者の間でもまだ議論が続いているようで、2006年の日本認知科学会シンポジウムでも何人かの論客が自説を展開して、他説を論破しようとする催しがありました。私も先日、新入生を対象にした学内イベントで、この話題を取り上げてみました。ホームセンター店では鏡面コートしたプラスチック板が手に入るのので、それを曲げていって凹面鏡(双曲面鏡)を作ると、実際、左右反転しない自分の姿を映すこともできます。平面鏡の場合、鏡面の向こう側に回り込んだ自分を想像すると左右反転してしまいます。バックミラーに映った後方車を見ると左右反転していない姿を容易に認識できることから、自分と鏡の間にいる観察者の視点を想像して自分の鏡像を見ると違って見えるはずなのですが、いかがでしょうか?

## 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、トポロ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、磁場を RuO<sub>2</sub> 面に平行に印加した場合の Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の超伝導転移が一次転移になること、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>-Ru 共晶を利用した「トポロジカル超伝導接合」、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> と s 波超伝導体との直接接合素子でのジョゼフソン効果、強磁性体を含む超伝導接合系での奇周波数超伝導状態などの進捗を紹介した。今回はその後の研究成果を中心に紹介する。なお、ルテニウム酸化物 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のスピン三重項カイラル超伝導状態を吟味するレビュー論文 [1] はこの 2 年間で既に 50 回程度引用されている。

### 1. Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の磁場中超伝導転移

米澤 (A01 連携)、前野 (A01 代表) らは、磁場掃引に対する温度変化 (熱磁効果) から、RuO<sub>2</sub> 平面に平行な磁場の場合、低温では上部臨界磁場近傍で超伝導-常伝導転移が一次相転移になることを明らかにした [2]。さらに熱磁効果に加えて比熱測定を含めて、特に磁場の面内方位依存性についてのデータ集積を行っている。

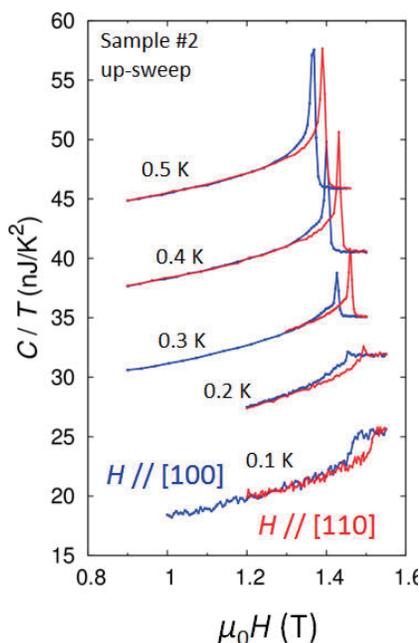


図1: Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の面平行上部臨界磁場付近の比熱の面内異方性。

このような面平行磁場中での超伝導スピン状態については、石田 (A01 連携) らが Ru と Sr の両方の核の NMR を巧みに併用することにより新たな精密実験を行ったところ、スピン三重項性のさらなる確証を得た。また前野らは国際共同研究での中性子小角散乱による磁束格子の研究から、面平行磁場でのコヒーレンス長の異方性が大きいことなどを明らかにした [3]。

### 2. Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の共晶超伝導接合を用いたトポロ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<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 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を検出・制御する「トポロジカル超伝導接合」の実証をさらに進めている。Anwar (A01 博士研究員)、米澤、石黒 (A01 公募研究)、前野らは、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> に共晶析出した 1 個のミクロンサイズの Ru 金属片に Nb からの近接効果で s 波超伝導を導入した素子で、臨界電流の特異なスイッチング現象を観測し、その振る舞いをカイラルドメインの介在とその運動により説明した [4]。石黒らは共晶を利用した Nb/Ru/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> 接合で超伝導量子干渉素子 (SQUID) を製作し、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の位相反転を裏付けるパイ接合の応答も得ている。

### 3. トポロジカル超伝導体の接合素子のエッジ状態

産総研の齋藤 (A01 博士研究員)、柏谷 (A01 分担者) らの努力で、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> と常伝導金属や s 波超伝導体との直接の接合作製技術が大幅に向上してカイラルエッジ状態に伴う状態密度が観測されるようになった。様々な観測トンネルスペクトルに対するマルチバンドの効果を取り入れた理論解析も進んだ [5]。浅野 (A01 分担者) らは、様々なトポロジカル超伝導体を含むジョゼフソン接合素子の界面でのアンドレーエフ

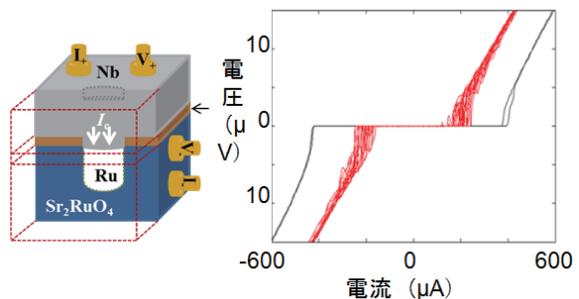


図2: 自然の共晶析出を利用した Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> と Nb の「トポロジカル超伝導接合」と臨界電流の特異なふるまい [4]。

束縛状態や臨界電流とトポロジカル普遍数との関係を系統的に理論解析した成果を発表した [6]。

#### 4. 強磁性体 - 超伝導接合系での奇周波数超伝導状態

浅野らは超伝導体と強磁性体との接合における奇周波数スピン三重項超伝導状態やスピン中などの理論的考察を進めた [7,8]。また浅野は田仲 (D01 代表者) と共同研究でトポロジカル超伝導体と金属ナノ細線の接合系で出現するマヨラナ粒子と奇周波数超伝導状態の密接な関係を導いた [9]。C01 班に関連するテーマについて、浅野はトポロジカル絶縁体の表面や接合界面でのエネルギーギャップを導いている [10,11]。

#### 5. その他

重い電子系超伝導体  $UPt_3$  は、 $Sr_2RuO_4$  と同様にスピン三重項超伝導体と考えられている。その超伝導発見は 1984 年であるが、井澤 (A01 公募研究) らの熱伝導率の実験からこれまで「定説」の超伝導対称性を見直す提案がなされた [12]。住山 (A01 公募研究) らは素子作製方法の改善により  $s$  波超伝導体と  $UPt_3$  の間のジョセフソン効果にフラウンホーファー回折パターンのある良質の接合素子を得ることに成功した [13]。新たに提案されている超伝導対称性と比較すると、 $UPt_3$  ではカイラルではない超伝導状態の実現を示唆している。

他の計画班との共同研究もますます盛んになってきた。トポロジカル超伝導状態の出現も期待できる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、前野らは鄭 (C01 代表者)、稲田 (C01 分担者) らと共同研究を進め、

$Li_2(Pd_{1-x}Pt_x)_3B$  の比熱の成果を発表した [14]。

また  $SrTiO_3$  の電場誘起表面超伝導に関して米澤、前野は、上野 (C01 分担者)、野島 (C01 分担者) らとの共同研究で、超伝導が理想的ともいえる 2 次元性を示すことと超伝導層の厚みが誘起キャリアー数に依存しない不思議なふるまいを明らかにした [15]。

#### 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, Phys. Rev. Lett. **110**, 077003 (2013).
- [3] "Anisotropy of the Superconducting State in  $Sr_2RuO_4$ ", C. Rastovski, C. D. Dewhurst, W. J. Gannon, D. C. Peets, H. Takatsu, Y. Maeno, M. Ichioka, K. Machida, M. R. Eskildsen, Phys. Rev. Lett. **111**, 087003-1-5 (2013).

- [4] "Anomalous switching in Nb/Ru/ $Sr_2RuO_4$  topological junctions by chiral domain wall motion", M. S. Anwar, T. Nakamura, S. Yonezawa, M. Yakabe, R. Ishiguro, H. Takayanagi, and Y. Maeno, Sci. Rep. **3**, 2480-1-6 (2013).
- [5] "Microscopic theory of tunneling spectroscopy in  $Sr_2RuO_4$ ", K. Yada, Y. Tanaka, A. Golubov, and S. Kahiswaya, arXiv:1311.4682 (2013).
- [6] "Bulk-boundary correspondence in Josephson junctions", J-Y. Yoo, T. Habe, Y. Asano, Physica E **55**, 48-54 (2014).
- [7] "Robustness of Spin-Triplet Pairing and Singlet-Triplet Pairing Crossover in Superconductor/Ferromagnet Hybrids", Shiro Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 124702 (2013).
- [8] "Charge and spin supercurrents in triplet superconductor-ferromagnet-singlet superconductor Josephson junctions", P. M. R. Brydon, W. Chen, Y. Asano, D. Manske, Phys. Rev. B **88**, 054509 (2013).
- [9] "Majorana fermions and odd-frequency Cooper pairs in a normal-metal nanowire proximity-coupled to a topological superconductor", Y. Asano, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **87**, 104513 (2013).
- [10] "Gapped Energy Spectra around the Dirac Node at the Surface of a Three-Dimensional Topological Insulator in the Presence of the Time-Reversal Symmetry", T. Habe, Y. Asano, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 064704 (2013).
- [11] "Robustness of gapless interface states in a junction of two topological insulators", T. Habe, Y. Asano, Phys. Rev. B **88**, 155442 (2013).
- [12] "Twofold Spontaneous Symmetry Breaking in the Heavy-Fermion Superconductor  $UPt_3$ ", Y. Machida, A. Itoh, Y. So, K. Izawa, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, and K. Machida, Phys. Rev. Lett. **108**, 157002 (2012).
- [13] "Measurement of the Josephson Effect of Heavy-Fermion Superconductor  $UPt_3$  as a Test of the Odd-Parity Order Parameter", J. Gouchi, A. Sumiyama, G. Motoyama, N. Kimura, E. Yamamoto, Y. Haga, and Y. Onuki, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 113701 (2012).
- [14] "Phonon anomaly and anisotropic superconducting gap in non-centrosymmetric  $Li_2(Pd_{1-x}Pt_x)_3B$ ", G. Eguchi, D. C. Peets, M. Kriener, S. Yonezawa, G. Bao, S. Harada, Y. Inada, G.-q. Zheng, Y. Maeno, Phys. Rev. B **87**, 161203-1-4 (2013).
- [15] "Effective thickness of two-dimensional superconductivity in a tunable triangular quantum well of  $SrTiO_3$ ", K. Ueno, T. Nojima, S. Yonezawa, M. Kawasaki, Y. Iwasa, and Y. Maeno, Phys. Rev. B **89**, 020508(R) (2014).

## 「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  $^3\text{He}$  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。以下に今年度に得られたトピックスをまとめた。

### 1. 平行平板中の超流動 $^3\text{He}$ -A 相での半整数量子渦

超流動  $^3\text{He}$ -A 相のクーパ対は軌道角運動量  $l$  の大きさであり、エネルギーギャップの異方性（両極にノードを持つ）が本質的にあるために、超流動  $^4\text{He}$  とは異なり多くの渦構造が提案されてきた。バルク液体では多くの渦構造が、核磁気共鳴法（NMR）を用いて確認されてきた。渦部分でのスピン波励起が特徴的な共鳴周波数を示すことを利用した同定である。

未だに存在が確認されていない渦の1つに“半整数量子渦”と呼ばれるものがある。半整数量子渦は、軌道空間とスピン空間の双方の空間において、渦の周りでの位相回転が  $\pi$  で、全体では足し合わされて位相回転が  $2\pi$  となっている渦のことであり、カイラル超流動状態特有の構造である。バルク液体で観測された渦では、渦の周りでの軌道部分の位相回転が  $2\pi$ （あるいは  $2\pi$  の整数倍）となる渦であることとは対照的に、 $2\pi$  の半整数倍であることから、このように呼ばれる。これは A 相を記述する理論モデルである Anderson-Brinkman-Morel (ABM) 状態では、双極子相互作用を無視すると軌道自由度とスピン自由度が独立になっているために起こりうる。

高木は、このような渦状態が実現できたとして、計算機シミュレーションにより、NMR 実験での共鳴周波数の計算を行った。双極子コヒーレンス長（10  $\mu\text{m}$ ）程度の際間を持つ平行平板間に超流動  $^3\text{He}$ -A 相を入れて、平行平板に垂直方向の磁場を掛けて双極子相互作用による配向の効果を除くことが出来るテクスチャー構造を作り、系を回転して半整数渦を設定した。この系での特徴的なスケールは、双極子相互作用が効かないために渦芯の特異領域長（GL コヒーレンス長）と渦間隔となる。この系の NMR 共鳴振動

数を考察すると、渦芯付近は  $d$ -ベクトルの特異性のために磁気共鳴的に“硬い”領域が発生する。この領域はおおよそ双極子コヒーレンス長であり、磁気共鳴には参加しない。このため、バルク full negative shift ( $R_l^2 = -1$ ) の共鳴振動数は、この領域の摂動を受け Larmor 振動数側に移動する。この効果を計算したものが図 1 であり、横軸は渦間距離を表す。ここで、pair vortex とは、半整数渦が対を作っている状態を考えたものである。

また、中原は、半整数量子渦の安定性に関する理論計算を行った。自由エネルギーの計算を磁場と圧力をパラメータにして行い、半整数渦の安定存在領域は、比較的高磁場下であるとの結論を得た。石川は、実験で半整数量子渦の検出を目指すために新たな NMR 測定法を開発した。

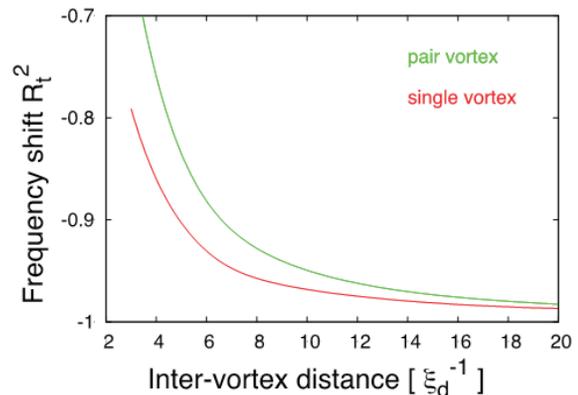


図 1：磁気共鳴周波数の半整数渦間距離依存性

## 2. $^3\text{He}$ 奇周波数クーパー対による増強パウリ常磁性

超流動 $^3\text{He}$ とエアロジェルの境界面には、スピン三重項s波の対称性をもつ奇周波数クーパー対が形成されることが予想されている。石川等はエアロジェル境界面付近のNMR測定（圧力24bar）より図2に

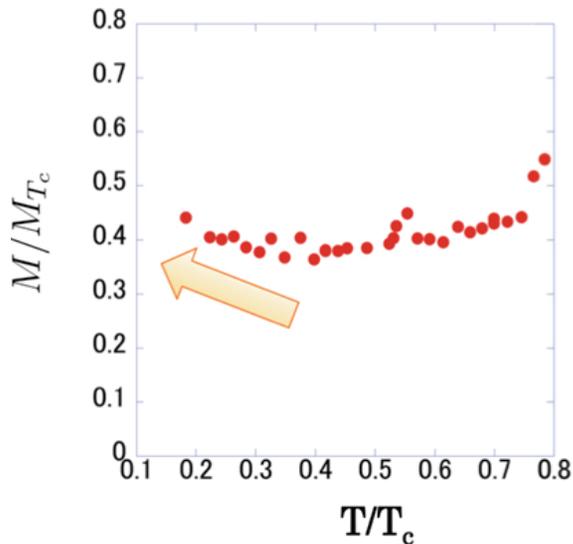


図2：エアロジェル界面近傍の磁化の温度変化

示すような非常に低温での磁化の増大を観測した。

東谷等は、この近接構造の局所スピン帯磁率が境界付近で増大することを見だし、この現象が奇周波数クーパー対の形成に由来していることを明らかにした[1]。境界面近傍の局所スピン帯磁率を積分した量（界面帯磁率）の温度変化を図3に示した。奇周波数クーパー対が低温の急激な温度変化を生み出している。図2に示した温度変化は理論計算結果と同様な振る舞いで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であることを示唆するものである。

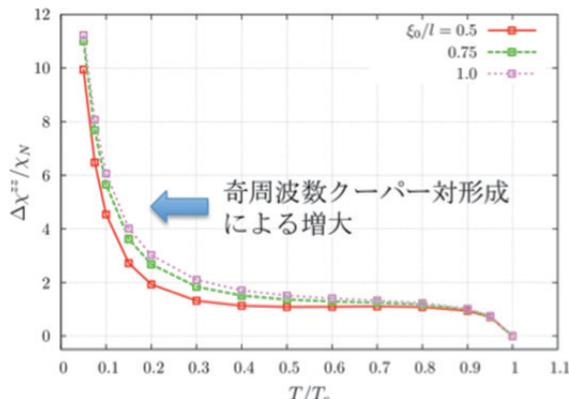


図3：界面帯磁率の温度変化

## 3. 超流動 $^3\text{He}$ -B相の表面マヨラナ状態に対する磁気効果

超流動 $^3\text{He}$ -B相は時間反転対称性を持ったトポロジカル超流体であると理論的に分類されている。野村等の行ってきたゼロ磁場下での横波音響インピーダンス測定により、壁の鏡面度が大きいときに運動量に線形な分散関係（マヨラナコーン）を持った表面束縛状態の存在が示され、B相が確かにバルク - エッジ対応を示すトポロジカル超流体であると実験的に明らかになった。磁場下でのB相では、時間反転対称性によって守られていた表面マヨラナゼロモードが、トポロジカル相転移により消失すると期待される。

野村らは最近、磁場中での超流動 $^3\text{He}$ -B相の横波音響インピーダンス測定に成功した。壁の境界条件は鏡面度が小さい拡散的散乱の極限での測定である。ゼロ磁場での温度依存性に表れたインピーダンスの虚部のピーク構造が、0.1 Tの磁場下では消失することが分った。このピーク構造は、拡散的散乱極限での表面状態密度の特徴を反映した対励起に起因することが分っている。磁場中でのピークの消失は、ギャップエネルギーが磁場により歪むことにより、対励起に起因する効果がぼやけたためと考えられる。磁場中での横波音響インピーダンスの理論的研究はまだ成されていないが、理論との比較が可能になればトポロジカル相転移の効果の有無も明らかになると期待できる。

### 参考文献

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

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

### 1. トポロジカル絶縁体 : Pb 系ホモロガス相におけるトポロジカル起源の表面状態の観測

Pb 系ホモロガス相  $(\text{PbSe})_3(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{3m}$  は通常の絶縁体 PbSe とトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  とが積層した構造を自然に持つ。安藤、瀬川らは佐藤宇史 (C01 班公募研究) らとの共同研究により、この Pb ホモロガス相でトポロジカルな起源を持つ表面状態を観測した (図 1)。結晶内に自然に形成されるヘテロ結合を利用することは、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観測する新たな手法となる可能性があり、この物質系の今後の研究が注目される。

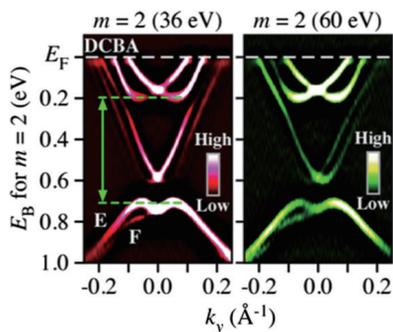


図 1 : Pb 系ホモロガス相  $m = 2$  で観測された表面状態

### 2. トポロジカル超伝導体候補物質の研究

トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の層間に Cu をインタカレートすると超伝導が発現するが、超伝導体積分率が低いためにバルクのギャップ対称性はまだ不明になっている。最近、C01 班の鄭、侯野らは同班の安藤、瀬川らが電気化学的に作成した単結晶試料 (超伝導体積分率約 40%) を用いてナイトシフト等を測定した結果、この物質は  $d$  ベクトルが  $ab$  面内に向くスピン三重項超伝導状態にあることを強く示唆した。この結果により、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  は DIII に属すトポロジカル超伝導体である可能性が高くなった。

また、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe は Sn サイトを In で置換すると超伝導体となる。安藤、瀬川らは気相成長法で得られた  $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  単結晶について、超

伝導相図を新たに見出した [1]。  $T_c$  のドーピング依存性は  $x = 0.038$  を境に変化し、特に低ドーピング側では結晶の乱れが増えるとともに  $T_c$  が上昇する異常な振舞いが見られた。一方、鄭、侯野らは、独自に作成した  $x$  の大きい試料を NMR 法で調べた結果、超伝導ギャップが  $s$  波対称性をもつことを明らかにした (図 2)。これは、 $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  系の超伝導ギャップ対称性に量子相転移の可能性を示唆している。

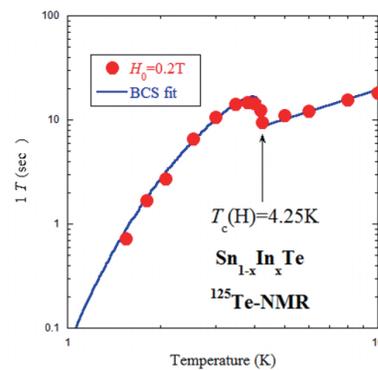


図 2 : ドーピングの大きい  $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  多結晶におけるスピン格子緩和率の温度依存性。

### 3. $\text{SrTiO}_3$ 電場誘起表面伝導の新展開

野島と上野のグループは、 $\text{SrTiO}_3(100)$  面上にイオン液体を用いた電気二重層トランジスタ構造を作製することにより、これまでの電解質を用いた場合に比べ約 7 倍の大きさの電子密度 ( $6.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) までキャリアドーピングを広げること成功し、この高電子密度の金属状態が約 30 K 以下の低温において大きな正 (垂直磁場中) と負 (平行磁場中) の磁気抵抗効果及びそれに伴う異常ホール効果を見出した。これらの結果は、静電的キャリアドーピングが超伝導に加え、磁気秩序を引き起こす可能性を示している。

もう一つの試みとして、 $\text{SrTiO}_3(100)$  表面に加え、(110), (111) 表面を用いた電気二重層トランジスタを作製した。それぞれのデバイスにおいて電場誘起超伝導の観測に成功し、さらに図 3 に示すような結晶方位によって異なる超伝導転移温度のゲート電圧依

存性を得た。表面電場により引き起こされる電子のサブバンド構造が面方位によって違うことから、超伝導転移のふるまいに変化が現れたものと考えられる。それぞれの面方位におけるスピン軌道相互作用の違いにより、強磁場下での超伝導状態も変化するものと期待される。

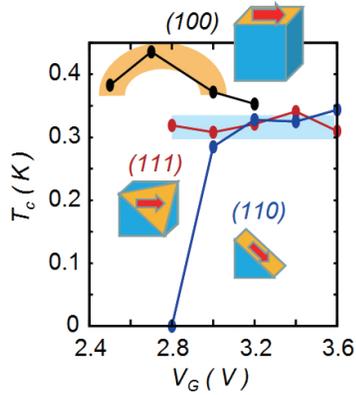


図3：様々な面方位をもつ SrTiO<sub>3</sub> 表面に作成した電気二重層トランジスタにおける電場誘起超伝導転移温度のゲート電圧依存性

#### 4. 空間反転対称性の破れた超伝導体や磁性体の研究

稲田、鄭らは空間反転対称性の破れた超伝導体 Li<sub>2</sub>Pd<sub>3</sub>B と Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B において不純物や乱れによる超伝導 H-T 相図の変化を調べ、両者で極めて対照的な結果を見出した [2]。Li<sub>2</sub>Pd<sub>3</sub>B では T<sub>c</sub> が変化せず H<sub>c2</sub> が増大するのに対し、Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B では明確な対破壊効果が観測された (図4)。Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B の超伝導ギャップにノードが存在する新たな証拠である。さらにスピン軌道相互作用の強い系では不純物や乱れの影響を弱める機構が存在する可能性を示した。

三角格子系 PdCrO<sub>2</sub> においては、Cr<sup>3+</sup> 局在スピンの 120 度構造のノンコリニア反強磁性を示し、様々な異常物性を示す。その起源として、低温で何らかの磁気秩序変調により Berry 位相が獲得されるという提案がされている。獅子堂らは第一原理計算で得られたフェルミ面に基づき、PdCrO<sub>2</sub> のホール効果の解釈

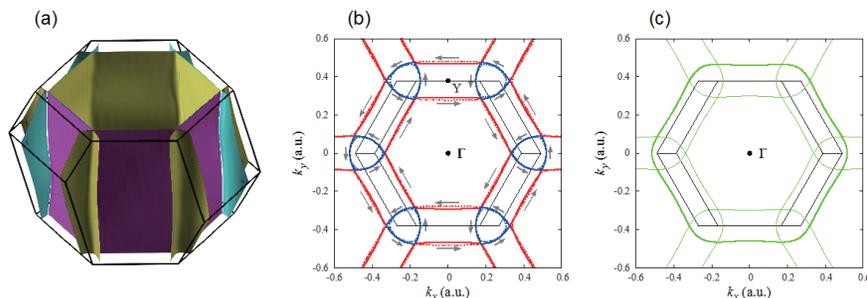


図5：(a) PdCrO<sub>2</sub> のフェルミ面。(b)  $k_z=0$  でのフェルミ面の断面。周期的ゾーン形式を採用。矢印は z 方向に磁場をかけた際のサイクロトロン運動の様子を表す。(c) 非磁性 PdCoO<sub>2</sub> のフェルミ面断面を  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  周期で折り畳んだもの。

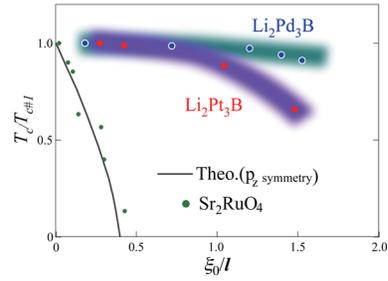


図4：Li<sub>2</sub>Pd<sub>3</sub>B と Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B の T<sub>c</sub> の  $\xi_0/l$  依存性。縦軸は T<sub>c</sub> の変化率、 $\xi_0$  はコヒーレンス長、 $l$  は平均自由行程。図中に Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> や p<sub>2</sub> 対称性のギャップ関数を仮定した計算結果を示す。

を与えた [3]。図5に示すように、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  長周期磁気秩序からくるバンドの折り畳みの結果、フェルミ面は  $\Gamma$  点まわりの大きな六角柱 (ホール面) とゾーンをまたぐ小さな三角柱 (電子面) からなる。磁気秩序による空間反転対称性の破れから伝導バンドはスピン分裂し、スピン軌道相互作用により電子面・ホール面の交点に小さなギャップが開く。その結果、低磁場では電子軌道とホール軌道のホール抵抗への寄与が競合するが、高磁場では Magnetic Breakdown による巨大軌道が出現しホール抵抗が著しく変化する。

[1] M. Novak, S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa and Y. Ando, Phys. Rev. B **88**, 140502 (2013).

[2] G. Bao, Y. Inada, G. Eguchi, Y. Maeno, M. Ichioka, and G.-q. Zheng, Physica C **494**, 95 (2013).

[3] J. M. Ok, Y. J. Jo, K. Kim, T. Shishidou, E. S. Choi, H.-J. Noh, T. Oguchi, B. I. Min, and J. S. Kim, Phys. Rev. Lett. **111**, 176405 (2013).

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. トポロジカル結晶超伝導体の理論 (佐藤、田仲、水島)

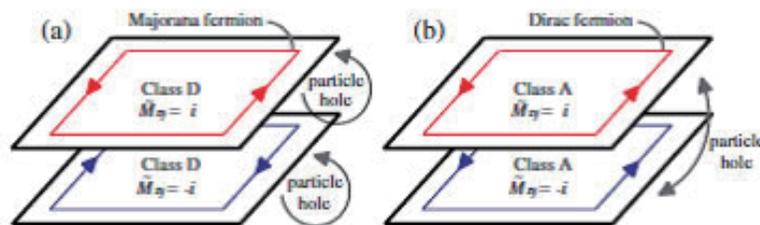
トポロジカル相探求の新しい方向として物質固有の対称性を使った相構造が注目を集めている。佐藤・田仲は物質固有の対称性として結晶対称性を考慮した時、どのような新しいトポロジカル超伝導体が可能かを探求した。特にミラー対称性を考慮した場合、ギャップ関数のミラー変換に対する変換性によって、得られるギャップレス状態がマヨラナフェルミオンになるか、ディラックフェルミオンになるか明らかにし、この理論を  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に応用して、 $d$  ベクトルの回転によって得られるディラックフェルミオンからマヨラナフェルミオンへのトポロジカル量子転移が得られることを明らかにした [1]。更に、佐藤は水島、山影と共にこの理論を  $^3\text{He-A}$  相や  $\text{UPt}_3$  へ応用し、その適用範囲が広いことを明らかにした [2,3]。

特に、 $\text{UPt}_3$  の低温低磁場で現れる B 相の超伝導状態はミラー変換と時間反転の同時操作の下で不変性を保つ状態である。B 相ではこの離散対称性に起因した

カイラル対称性が保たれており、故に、トポロジカル相であることがわかった。結果として、B 相表面では離散対称性によって守られたマヨラナ粒子を伴うが、その性質は  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $^3\text{He-A}$  のそれとは異なる。その表面マヨラナ粒子はイジング的な磁場応答を示し、特定の方向に印加された磁場によってのみ表面マヨラナ状態はギャップを開ける。マヨラナイジングスピンはトンネル効果等を用いて検出可能であることを指摘した。

### 2. カイラル $p$ 波超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のトンネル効果の理論 (田仲、柏谷 (A 班))

田仲は、矢田と  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトンネル効果の理論を研究した。矢田による今回の計算は、3 バンドの効果、スピン軌道相互作用をとりいれ、これまでの格子 Green 関数の計算では困難であった現実的な超伝導 Gap の値をいれた計算を行った点に特徴がある。 $\alpha$  バンド  $\beta$  バンドのギャップ関数が  $\gamma$  バンドよりも大きい方が柏谷氏によるトンネル効果の実験を再現しやすいことを見出した [4]。



図：ミラーセクターに対する 2 通りの電子・正孔対称性。

### 3. BDI 対称性を持つトポロジカル超伝導の理論 (田仲、佐藤) [5,6]

1次元 AIII トポロジカル絶縁体、量子異常ホール系が近接効果によって超伝導体になった場合、エッジにはマヨラナフェルミオンが2つ現れる場合がある。この場合における2つのマヨラナフェルミオン間の異常な干渉効果、固有なスピン輸送現象、非局所アンドレーエフ反射を解明した。

### 4. トポロジカル絶縁体接合の輸送現象の理論 (田仲、永長 (C 班)、横山 (A 班))

山影、田仲、永長らは、単層シリコンであるシリセンからできる pn、npn 接合の輸送現象の理論を提案した。この系は、電場をかけることでトポロジカル転移を示し、新しい機能を持つデバイスの候補として注目を集めている [7]。また田仲は田口、横山 (A 班) とトポロジカル絶縁体上の強磁性体接合における巨大磁気抵抗効果の理論研究を行った。磁気抵抗効果はトポロジカル絶縁体上のスピン流により増幅されることを解明した [8]。

### 5. 冷却原子気体の理論 (上田)

人工ゲージ場下の2成分のボース気体の多体状態を厳密対角化の手法を用いて研究した。その結果、次の2つの結果が得られた。まず、成分間相互作用の強さが成分内相互作用の強さと同程度の時に、フィリング因子が  $2/3+2/3$  の時に非アーベル的スピンスプレット状態が実現されることを見出した。この状態は励起状態が非アーベル統計に従う [9]。さらに、フィリング因子が  $1+1$  の場合は、整数量子ホール状態のボソン版ともいべき状態が存在することを見出した。この状態は、対称性によって保護されたトポロジカル相の好例だと考えられる [10]。

### 6. 超伝導トポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の近接効果の理論 (水島、佐藤、田仲)

水島らは超伝導トポロジカル絶縁体  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の近接効果の研究を行った。表面に存在する DiracCone のために、軌道分極が生じその結果として、トポロジカルに自明な超伝導状態が生じた際には、表面でペアポテンシャルが増幅されるために、コヒーレントピークが分裂することを示した。他方トポロジカルな軌道間ペアが出来る場合は、これまでの山影らの理論を再現することを確認した [11]。

田仲は Physica E 特集号 (トポロジカル量子現象) の編集を行った。

[1] Y. Ueno, A. Yamakage, Y. Tanaka and M. Sato, Phys. Rev. Lett., **111**, 087002, (2013).

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

[3] M. Sato, A. Yamakage, and T. Mizushima, Physica E **55**, 20 (2014).

[4] K. Yada, Y. Tanaka, A.A. Golubov and S. Kashiwaya, arXiv:1311.4682.

[5] J. J. He, J. Wu, T. P. Choy, X.J Liu, Y. Tanaka, K. T. Law, Nature Communications, (2014).

[6] A. Yamakage and M. Sato, Physica E **55** 13(2014).

[7] A. Yamakage, M. Ezawa, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, Phys. Rev. B, **88**, 085322 (2013).

[8] K. Taguchi, T. Yokoyama and Y. Tanaka, arXiv: 1309.4195.

[9] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. **A86**, 031604(R) (2012)

[10] S. Furukawa and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **111**, 090401 (2013)

[11] T. Mizushima, A. Yamakage, M. Sato and Y. Tanaka, arXiv: 1311.2768.

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、前野代表の紫綬褒章に加え、若手から2名の受賞者を輩出しました。今後も皆様のさらなるご活躍を期待しております。

前野 悦輝 氏  
紫綬褒章を受章！

当研究室の教授で、当新学術領域の領域代表でもある前野悦輝教授が平成25年春に紫綬褒章を受章されました。受章の対象となった功績の概要としては「低温物理学研究功績」と紹介されていますが、特に「ルテニウム酸化物の超伝導を発見し、関連物質を含むその後の国際的な研究展開の中心的研究者として、特にスピン三重項超伝導の物理を深化させ、超伝導研究における重要な潮流を生む貢献をなした。」という業績について授与されたものです。つまり、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導発見だけでなく、その後の分野の大きな広がり・発展への貢献も含めての評価であると理解されます。

紫綬褒章は日本国天皇が授与する栄典の一つで、「学術芸術上ノ発明改良創作ニ関シ事績著明ナル者ニ賜フモノトス」と政令で定められています。おもに学術・芸術・スポーツなどの分野で著しい功績があった人に送られています。前野さんと同時に、歌手の松任谷由美さんやバレエダンサーの熊川哲也さんが受章されたのも記憶に新しいところです。

紫綬褒章はやはり通常の科学賞よりも社会的影響力は格段に大きいようで、前野さんのところには京都中の政治家の方からお祝いの電報が届いたり、記念品業者からカタログが大量に届いたりしたそうです。研究室にも近隣のホテルの方が何人も来られて、「記念式典はぜひウチで」「お弟子さんが記念式典をするんでしょう？」などと営業にきました。これには「お弟子さん」(米澤)もかなりビビったのですが、前野さんは記念式典の開催は固辞されました。その代わりに、研究室内で簡単なパーティーを行い、また9月の物理学会の際に京大および広大時代の研究室のOB会も兼ねたお祝いの会を開きました。

このお祝いの会には新学術領域から石川さん・柏谷さん・佐藤さん・野村さんにもご参加いただきました。また、OBの中にも野島さん・井澤さんなど新学術の関係者もおられ、人のつながりが研究のつながりにも発展して行くのだという認識を新たにしました。会では、参加できなかった方の近況報告のスライドが上映されたり、それぞれの時代での研究室のマル秘写真が公開されたりと、和気あいあいとしたものになりました。また前野さんからも受章の裏話など伺いました。紫綬褒章の実物も拝見することができました。

受章を機に、前野さんのますますのご活躍を祈念しております。(文責、米澤 進吾・石田 憲二)



9月のお祝いのOB会での集合写真。



お祝いの会に前野さんが紫綬褒章の実物(＋ユーマンとの写真)を持ってきて下さいました。

山影 相（名古屋大学 大学院工学研究科）

## 第8回日本物理学会若手奨励賞

### ●受賞理由

#### トポロジカル絶縁体の輸送理論における先駆的研究



このたび、トポロジカル絶縁体・超伝導体における輸送理論の研究で第8回日本物理学会若手奨励賞（領域4）を受賞しました。通常の電子とは異なり、トポロジカル絶縁体はその表面にディラック電子、トポロジカル超伝導体の表面ではマヨラナ粒子が現れることが知られており、これらの新奇粒子が示す輸送現象あるいは電磁応答現象はデバイス応用の観点からも注目を集めています。相転移の立場から見ると、トポロジカル相は対称性の破れを伴わない、すなわち従来のランダウ理論とは異なる相分類であり、トポロジカル相転移の臨界現象も多くの研究者の興味を惹きつけてきました。その一例として、乱れによって誘起されたトポロジカル絶縁体（トポロジカルアンダーソン絶縁体と呼ばれる）が系がクリーンな場合には実現しない新しい相ではないかという予想がありましたが、我々はこれが正しくないことを示しました。一方で、乱れによって通常絶縁体→金属→トポロジカル絶縁体→金属→通常絶縁体といった多重転移が起こるという豊富な相構造があることも明らかにしました。また、トポロジカル超伝導体ではその表面に着目すると、特徴的な臨界現象が起きることも分かりました。トポロジカル超伝導体から通常の超伝導体へ相転移すると表面のマヨラナ粒子は消失しますが、転移と同時に消えてしまうか、転移点直上では生き残っているか、という二通りの臨界性があることが明らかになりました。後者の場合にはマヨラナ粒子の寄与により、転移近傍で表面を介した電気伝導が増大されます。この臨界性はこれまでは知られていませんでしたが、近年盛んに実験が行われているスピン軌道相互作用とs波超伝導体から作製したトポロジカル超伝導体ではその新しい臨界現象が起きることも判明しました。さらに、ドーピングされたトポロジカル絶縁体におけるトポロジカル超伝導状態の輸送現象も調べ、表面状態のエネルギー分散の構造が変化（リフシツク転移に対応）し、そこで表面の状態密度が巨大になることを明らかにしました。これも表面における臨界現象として解釈できます。この現象に起因して、3次元のトポロジカル超伝導体と常伝導体の接合系におけるトンネルコンダクタンスは零電圧でピークを示します。この結果から、大阪大の安藤グループの $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるポイントコンタクトの実験で見られたコンダクタンスの零電圧ピークが、トポロジカル超伝導状態を強く示唆するものであることが分かります。

ここまで述べてきたように、トポロジカル相は様々な相構造や表面臨界現象を示すことが分かってきました。これを契機として、さらにトポロジカル絶縁体・超伝導体の相転移とその臨界現象の探索やそれらの統一的理解といった研究分野が広がっていくことを期待しています。

### ▲一言コメント

受賞おめでとうございます。新学術領域博士研究員として名大に来ていただいたことに深く感謝しております。おかげさまで、超伝導トポロジカル絶縁体の研究で新しい成果を出すことができました。また、多くの大学院生との議論をしてくださり、マヨラナフェルミオンの非可換統計性、トポロジカル結晶絶縁体の薄膜、超伝導トポロジカル結晶絶縁体のアンドレーエフ束縛状態などで成果を出すことができました。（文責、田仲 由喜夫）

岩澤 英明（広島大学 放射光科学研究センター）

## 第8回日本物理学会若手奨励賞

### ●受賞理由

### 高分解能角度分解光電子分光による強相関電子系の多体相互作用の研究



角度分解光電子分光（Angle resolved photoemission spectroscopy: 以下 ARPES）を用いた「多体相互作用」に関する研究に対して、第8回日本物理学会若手奨励賞（領域5）を受賞しました。近年、ARPESの高分解能化が進んだことで、低エネルギーの準粒子の運動に関わる「電子・ボゾン相互作用」（ボゾン：格子振動や磁気揺らぎなど）に対する研究が、銅酸化物高温超伝導体を中心に広く行われるようになりました。しかし、これまでのARPESを用いた「電子・ボゾン相互作用」の評価においては、強相関電子系の電子状態に大きな影響を与える「電子相関」が定量的に扱われていなかったために、多体相互作用の強さは正しく評価されていませんでした。本研究では、統一的な視点から電子相関と電子・ボゾン相互作用の評価を行い、電子相関と電子・ボゾン相互作用の各々の強さを定量的に測る手法（=ものさし）の開発に成功しました。これにより、典型的な強相関電子系であるルテニウム酸化物超伝導体（ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ）において、電子相関と電子・ボゾン相互作用の強さ、ならびに、準粒子の有効質量の増大に対する各相互作用の寄与を定量的に評価することが出来ました。今後、この相互作用の強さの「ものさし」を様々な物質に応用することで、物性と相互作用の強さの関連性が見えてくるのではないかと期待しています。

### ▲一言コメント

従来、フェルミ面が複数混在する「マルチバンド」系の超伝導体では、各々のバンドが絡み合い、バンドの分散関係を正しく決定することが困難でした。その結果、これまでの研究では、マルチバンド系超伝導体に働く多体相互作用の定量性に多くの論争が起きていました。今回、受賞の対象となった岩澤氏の $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ における多体相互作用に関する一連の取り組みは、放射光の直線偏光特性や励起光エネルギーの変性を駆使することにより、特定の準粒子バンドを選択・分離測定することが出来ることを示しました。岩澤氏の研究成果は、マルチバンド系超伝導体の多体効果の定量評価を可能にし、これまでの論争を解決できるものと期待しています。この受賞をバネとして、物性科学研究を牽引するような更なるご活躍を期待しています。（文責、相浦 義弘）

## スピン三重項超流動体の固有軌道角運動量

石川 修六 / 大阪市立大学大学院 理学研究科 教授

超流動  $^3\text{He}$  -A 相のクーパー対状態は、両極にノードを持つ軸対称なギャップ構造を有し、クーパー対は軸方向に大きさ  $l$  の軌道角運動量（固有角運動量 Intrinsic Angular Momentum ; IAM) を持つ。超流動  $^3\text{He}$  -B 相のクーパー対も同じ大きさの軌道角運動量を持つが、量子力学的に許容される 3 つの成分（軌道量子化軸に対して +1, 0, -1) を持つクーパー対が存在している。しかし A 相のクーパー対は 1 つの成分しかもたないという違いがある。このため、B 相ではクーパー対状態の全固有軌道角運動量は液体全体では常にゼロとなるが、A 相ではゼロではない状況が考えられる。何らかの条件で A 相でのクーパー対の固有軌道角運動量の向きを揃えることが出来たときに、巨視的な量として検出できるかどうかということが超流動発見以来の未解決問題である。数多くの理論的推察がなされ、巨視的な大きさの固有軌道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がこれまで続いてきた。この問題の解決を図るためにこれまで行って来た実験について少しまとめてみる。

ここでの巨視的な大きさは大きさにクーパー対の数を変えたオーダーの大きさのことであり、巨視的ではないというのはこれより  $10^6$  ほど小さい大きさとなることを意味する。また、A 相ではクーパー対の軌道角運動量はいりオーダーパラメータであり、以後  $\vec{l}$  と表記することにする。

### 1. どのようにして軌道角運動量の向きを揃えるか。

超流動  $^3\text{He}$  -A 相のクーパー対状態は両極にノードを持つ軸対称なエネルギーギャップ異方性を持つ。そしてこの軸を軌道量子化軸としたときに 1 つの成分を全てのクーパー対が持つ。クーパー対の大きさがコヒーレンス長 ( $\xi_0$ : 20nm ~ 60nm) であるので、相対的なヘリウム原子の（古典的な）回転運動がこの固有軌道角運動を形成すると考えると、容器の壁のような平面の直ぐ近くでは回転軸が平面に垂直となることが有利であることは簡単に推測される。この直感は凝縮状態でも正しくて、 $\vec{l}$  は壁に垂直となることは非常に強い境界条件である。従って、A 相では壁を利用すると  $\vec{l}$  の向きを揃え易くなる。

ちなみに B 相でも状況は同じだが、3 つの成分があるために軌道角運動の量子化軸が壁に垂直となることが境界条件となる。このとき凝縮エネルギーの損を少なくするために、3 成分の内 1 つの成分はもはや回転運動が出来ない向きとなるためにそのクーパー対では対破壊が起こるが、全固有軌道角運動量はゼロのままである。

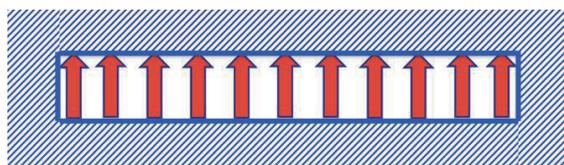


図 1: 狭い隙間の平行平板内の  $\vec{l}$  (赤色矢印)

狭い隙間の平行平板に挟まれる A 相を考える。実験を想定するので液体を閉じ込めねばならないために、断面は横に長い長方形をした円柱状の超流動体となる (図 1)。上下の壁が  $\vec{l}$  の向きを揃える働きをする。

ここで注意せねばならないことは左右の壁近傍での、 $\vec{l}$  の振る舞いである。上下の壁と同様にこの壁に対しても  $\vec{l}$  は垂直となるので、図 2-a のような状況となる。

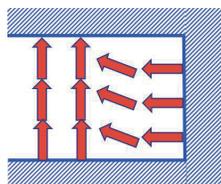


図 2-a: 図 1 の端部分を拡大

$\vec{l}$  の向きは連続的に変化するが、十分広い上下の壁を準備すればこの端の寄与は無視できるように思われる。必要な平板間隔は双極子コヒーレンス長 ( $\xi_0 \sim 10 \mu\text{m}$ ) 程度なので作成は容易である。端の寄与をなくして至る所同じ向き  $\vec{l}$  のとするために非常に狭い間隔 (コヒーレンス長程度) を準備することが有利となると考えがちだが、この場合は端でエネルギーギャップがつぶれる (図 2-b)。

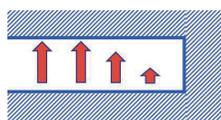
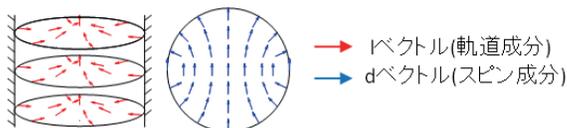


図 2-b: コヒーレンス長程度の隙間の場合、端でエネルギーギャップがつぶれる (正確さに欠けるがイメージ図である)

その結果、端の壁に沿って質量流が流れて、この回転質量流がちょうど内側の全固有軌道角運動量を打ち消すことが示されるために得策ではない。また、どのようにして、液全体の角運動量という純粋に力学的な量を検出するかは別の問題であり、図1では困難である。

## 2. どのようにして固有角運動量を検出するか。

図1に示したような  $\vec{l}$  の実空間での向きの変化は一般に  $\vec{l}$  テクスチャーと呼ばれる。このようなオーダーパラメータの空間変化はエネルギーの増大を含むので、変化が穏やかとなるようなテクスチャーが実現されている。 $\vec{l}$  は2つの互いに直交するベクトル  $\vec{m}, \vec{n}$  のベクトル積で定義される。端の壁に沿って1周するときに  $\vec{l}$  が円柱容器の中心を常に向いていても、 $\vec{m}, \vec{n}$  はいつも同じ向きを向かず  $\vec{l}$  の周りに回転し、容器を1周すると  $\vec{m}, \vec{n}$  は  $2\pi$  の整数倍だけ回転することがある。このテクスチャー構造を Mermin-Ho (M-H) テクスチャーと呼ぶ [1]。



Mermin-Ho hyperbolic

図3：Mermin-Ho(hyperbolic) テクスチャー

実際の実験では、このM-Hテクスチャーを利用して力学量である角運動量を検出することとし、図1の容器を縦方向に引っ張った細い円筒容器を試料セルとして作成した。図3にこのときのM-Hテクスチャーを示す。上下の壁はなくなり、容器の上下端でバルク液体に繋がるが、直径に比べて十分長くすればテクスチャーへの影響は無視できる。円筒容器の側面が  $\vec{l}$  の向きを揃える役目をするが、赤い矢印のベクトル的な足し算を考えると全体として  $\vec{l}$  の向きを円筒容器の軸方向に概ね揃えたことになる。これを回転する超低温装置にセットして、核磁気共鳴法により、M-Hテクスチャーで励起されるスピン波の共鳴周波数が回転角速度にどのように依存して変化するかを詳細に調べることにより、固有軌道角運動量問題に決着を付けることとした。(どのようにM-Hテクスチャーを作るかについては省略する。参考文献を参照 [2].)

角速度  $\vec{\Omega}$  で回転する系でのエネルギー  $E'$  は静止系でのエネルギーと角運動量より次式で記述される。

$$E' = E - \vec{\Omega} \cdot \vec{L}$$

この式は超流体が容器の回転に対して一緒に回転するように渦が安定化するかどうかを判断するときにも用いられる。今は、回転に対して  $E'$  を最小とするためにはどのようにテクスチャーを変化させて  $\vec{L}$  を変えるかの判断に使うのである。M-Hテクスチャーは回転質量流を有しているので、流れによる角運動量と固有軌道角運動量との起源の異なる2つの軌道角運動量がこの  $\vec{L}$  に寄与することになる。

回転によるテクスチャーの変化は図1の容器でも起こるだろうが、スピン波信号は小さく、変化は観測出来ないと予想し、図3の細い円筒容器を用いた。この場合は容器内のほとんどの領域で  $\vec{l}$  は空間変化しているためにスピン波信号も大きく、かつ大きな変化が期待できる。 $\vec{l}$  テクスチャーの変化はNMRポテンシャルを変化させ、そこに束縛されるスピン波共鳴周波数の変化を引き起こす。回転によりテクスチャーが僅かに変化するとしたが、回転質量流による軌道角運動量と、固有軌道角運動量では、 $E'$  を最小にするためのテクスチャーの変化が逆であるということが重要な点である。従って、最初に準備するM-Hテクスチャーの素性を正しく理解出来ていれば、回転に対するスピン波共鳴周波数の変化から得られる結論の解釈に困難さはない。M-Hテクスチャーでの超流動A相が角運動量を持っており、回転に対する非対称な応答の向きが確認できればよいのである。

## 3. いくつかの実験結果

実験で利用するM-Hテクスチャーを制御して実現できるかどうか、また回転によって渦が侵入するかどうかなど(本実験では渦が侵入してはならない)、基本的なことを明確にしておく必要があり、円筒容器の直径の選択は重要である。直径が100  $\mu\text{m}$  と200  $\mu\text{m}$  の容器を準備した。回転系でのエネルギーの式を用いる評価予想通り、200  $\mu\text{m}$  容器ではA相の渦が侵入したが [3]、100  $\mu\text{m}$  容器では侵入はなかった(使用した物性研の回転超低温装置は最大  $\sim 10\text{rad/s}$ )。[3] のときのものとは異なる200  $\mu\text{m}$  容器で、回転によって量子渦が1本づつ容器内に入出入りする様子を図4に示した。

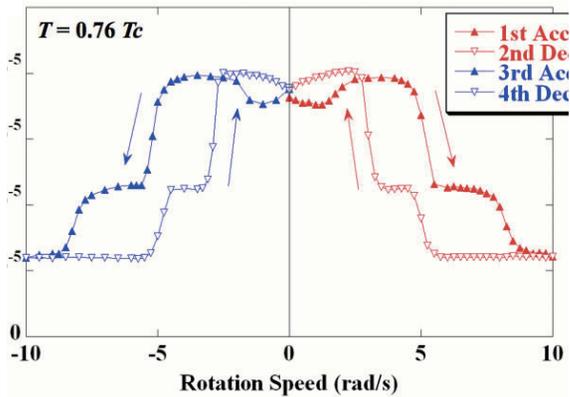


図4：NMR信号強度の階段状の変化が量子渦1本の出入りに対応

詳しく述べないが、量子渦を安定化/不安定化する角速度は図4にあるようにヒステリシスを示すことが特徴である。また、 $100\ \mu\text{m}$ では期待したM-Hテクスチャーの中心部分でのスピン波励起信号を観測した。図5に+5rad/sで実現したM-Hテクスチャーの中心部分でのスピン波励起信号の共鳴周波数の回転速度変化を示す。実験結果はIAMがあるときの理論計算結果と良い一致を示し、IAMがない場合とは変化の向きが逆であることが明らかである。

WEB 非公開

図5：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。

#### 4. 実験結果が意味すること

超流動 $^3\text{He}$ -A相の発見以来の未解決問題に対して肯定的な結論を出したものと考えている。以前に行われた実験では、IAMは観測出来るほどの巨視的な大きさではないという否定的な結論であった[4]。測定手段は我々のものとは全く異なり、この方法でIAMが観測可能かどうかに関しては良く分からない。測定方法について議論する余地はないが、我々は $\vec{l}$ の向きを静的にコントロールしたが、以前の実験では $\vec{l}$ の向きを振動させていた。本質的な困難さは、IAMの大きさが巨視的であるかどうかと、それを観測出来る測定方法かどうかの区別が出来ていなかったことにあったと考えている。以前の報告は、IAMの存在を否定したのではなく、測定できる方法ではなかったのではないかと理解している[5]。

#### 参考文献

- [1] "The Superfluid Helium 3", D. Vollhardt and P. Wolfe, Taylor & Francis(1990).
- [2] T. Kunimatsu et al. JLTTP **171** 280-286 (2013).
- [3] R. Ishiguro et al. PRL **93** 125301(2004).
- [4] A. J. Manninen, et al. PRL **77** 5086 (1996).
- [5] G. Volovik から、 $\vec{l}$ の向きを振動させる方法では観測できないだろうとのコメントがあった。

#### 著者紹介



#### いしかわ・おさむ

1957年 山梨県出身  
 1980年 京都大学理学部卒業、1986年 同大学院理学研究科博士後期課程単位取得退学、1986年より 大阪市立大学理学部助手、同講師、助教授、准教授を経て2009年より現職。大学院生時より超低温物理学の実験を行ってきた。2012年より低温工学・超電導学会関西支部長を務めている。

## 奇周波数クーパー対の磁気応答

東谷 誠二 / 広島大学大学院総合科学研究科 准教授

超伝導・超流動状態は、一般に、偶周波数状態と奇周波数状態に大別できる [1]。多くの超伝導金属で実現するスピン一重項  $s$  波状態や超流動<sup>3</sup>He のスピン三重項  $p$  波状態は、偶周波数状態の代表例である。奇周波数状態は、端的に言えば、同時刻相関をもたないクーパー対のボーズ凝縮状態である。この種の特殊な超伝導・超流動状態は、粒子間相互作用の遅延効果により安定化する可能性がある。現在、重い電子系物質などでその実現可能性が議論されている [2]。

奇周波数超伝導研究の一風変わったアプローチとして、超伝導体を含む接合系を使って人工的に奇周波数クーパー対を作り出す方法が提案されている [3]。超伝導を示さない通常の金属（常伝導金属）を超伝導体に接合すると、接合面を通して超伝導体側からクーパー対がしみ出してくる。近接効果と呼ばれるこのトンネル現象のために、常伝導金属も超伝導性を示すようになる。このような近接構造のしみ出し領域に奇周波数クーパー対が生成されるのである。

二種類の生成法が提案されている。

その一つは、強磁性体を超伝導体に接合することによって実現する。接合する超伝導体は従来型のスピン一重項  $s$  波超伝導金属でよい。この接合系の特徴は、強磁性体中でスピン空間の回転対称性が破れる点にある。そのために、強磁性体にしみ出したスピン一重項  $s$  波対からスピン三重項  $s$  波対が生成され、このクーパー対は奇周波数対称性をもつことがパウリの原理から要請されるのである [4]。スピン三重項  $s$  波対を構成する二電子は、空間的にではなく、時間的に避け合うことでパウリの原理に従っている。

二つめは、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のようなスピン三重項超伝導体を接合し、常伝導金属にスピン三重項クーパー対を供給する方法である [5]。常伝導金属は、普通そうであるように、不純物を含む“汚い金属”であると仮定する。

一般に、接合系では並進対称性が破れるため、 $s$  波、 $p$  波、 $d$  波・・・といった様々な軌道対称性をもつクーパー対が境界面に共存する [6]。これらのスピン三重項対は常伝導体中に拡散していくが、そのとき異方的な非  $s$  波対は不純物散乱によって破壊され、スピン三重項  $s$  波対だけが生き残る。上で述べたように、これは奇周波数クーパー対である。

このような近接構造を利用すると、我々が現在手に入れることのできる材料を組み合わせると、奇周波数クーパー対の物理を研究することができる。まずは、理論で予想されている「近接系の奇周波数  $s$  波対」を検出することが重要である。そのためには、近接効果の理論を用いて、奇周波数状態に特徴的な物性を見いだす必要がある。このような動機のもとに行われた最近の理論研究を紹介するのが本稿の目的である。

ところで、そもそも従来からの近接効果はどのように検証されてきたのだろうか。まずはその研究の歴史を振り返っておきたい。全てを網羅することはできないので、ここでは、本稿のタイトルに即して、磁気応答に関する過去の研究に注目する。

話は 1960 年代まで遡る。Berezinskii によって初めて奇周波数状態が論じられたのが 1974 年だから [1]、まだ周波数対称性という概念のなかった時代の話である。その頃に、近接効果に関する多くの先駆的理論研究が de Gennes らによってなされた [7]。そのひとつに、接合系のマイスナー効果の研究がある。その理論は後の実験で見事に検証されることになる。次のような現象が観測されたのである。常伝導金属と超伝導体の接合系に弱い磁場を印加し冷却していくと、あたかも超伝導体の体積が膨張していくかのように、反磁性帯磁率が温度変化する。この実験結果は、クーパー対が常伝導金属中にしみ出し、そのしみ出し距離が温度の低下とともに長くなると考えると自然に理解できる

ものであった。観測されたしみ出し距離の温度依存性は、理論の予言と整合することが示された [8]。当初はGL理論に基づく de Gennes らの定式化を使って実験が解析されたが、80年代に、準古典グリーン関数を用いた接合系の微視的理論が整備され、90年代に入ると、コンピュータの高性能化と低価格化も手伝って、準古典論に基づく詳細な数値計算が報告されるようになり [9-12]、実験は定量的な理論によってさらに強く裏付けられた。

マイスナー効果には、奇周波数クーパー対の奇妙な側面が現れる。普通の（偶周波数対称性をもつ）クーパー対は反磁性電流を運ぶ。この超伝導電流によって物質内部の磁場が遮蔽されるのが通常のマイスナー効果であり、この現象を通して従来の近接効果が検証されたことを上で述べた。一方、接合系の奇周波数  $s$  波クーパー対が運ぶ超伝導電流を計算してみると、それは常磁性電流であるという結果が出てくる [13, 14]。このことから次のような現象が接合系で起こると予想される。すなわち、近接効果によって誘起された超伝導が奇周波数  $s$  波対に支配されている場合には、磁場が常伝導金属中に振動しながら侵入する [13]。常磁性マイスナー効果とか負のマイスナー効果と呼ばれるこの現象を検証することは、超伝導物性物理学の極めて重要なテーマである。

常磁性マイスナー効果は、言わば、奇周波数クーパー対が生み出す軌道磁性であるが、では、スピン磁性には何か異常が現れるのであろうか。

この問題を検討するために、図 1 の上段に示したような「超流動近接構造」の磁気応答が調べられた [15]。超流動  $^3\text{He}$  が占める空間の一部に、エアロジェルという多孔質材料が組み込まれている系である [6]。エアロジェルの不規則な網目構造による不純物効果のため

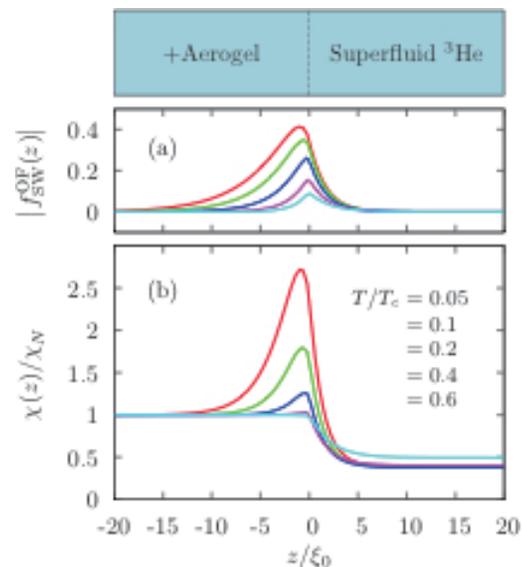


図 1 : エアロジェルと超流動  $^3\text{He}$  で構成される近接構造。(a) 奇周波数  $s$  波クーパー対振幅の空間依存性。(b) 局所スピン帯磁率。

に、この多孔体中に染み込んだ液体部分は“汚い”フェルミ常流動状態になっている。そして、図 1 (a) のように、そこには近接効果で生成された奇周波数  $s$  波クーパー対が存在する。電荷のないこの中性超流動系は、マイスナー効果のような軌道磁性を示さないで、スピン磁性を調べるのに適している。

この系の局所スピン帯磁率を計算すると、図 1 (b) の結果が得られる。エアロジェルとバルク超流動  $^3\text{He}$  との境界付近に現れるピークが特徴的である。降温とともに、そのピーク値は増大し、同時にピークの裾がエアロジェルの内部に広がっていく。このピーク構造の振る舞いと図 1 (a) に示した奇周波数  $s$  波対振幅の温度変化は明らかに相関している。さらに詳しい解析によって、帯磁率のピークが間違いなく奇周波数  $s$  波対の形成に由来していることが明らかにされた [15]。

エアロジェル中にしみ出した奇周波数  $s$  波クーパー対のスピンの状態を見ると、 $\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$  状態になっていることがわかる。このような反平行スピン対が組まると、スピン帯磁率が減少すると考えるのが自然であるが、奇周波数状態では逆に増加するのである。

以上、奇周波数クーパー対の磁気応答について、近接系を舞台にした最近の理論研究を紹介した。奇周波数クーパー対は、軌道磁性を見ても、スピン磁性を見ても、偶周波数クーパー対とは正反対の応答をすることが明らかになってきた。現在、本新学術領域 B01 班代表者の石川修六氏を中心に、 $^3\text{He}$  の奇周波数対による異常なスピン常磁性（増強パウリ常磁性）の検証実験が進められており、興味深い結果が出てきている。一方、私の知る限り、常磁性マイスナー効果を検証する試みはまだ報告されていない。常磁性マイスナー効果は、奇周波数クーパー対が「負の超流動密度」を生み出す現象と捉えることもできる。超流動 $^3\text{He}$  を用いたその検出法を考案できると面白い。

## 参考文献

- [1] V.L. Berezinskii, JETP Lett. **20**, 287 (1974).
- [2] 本新学術領域 NEWSLETTER No. 3, 三宅和正, トピックス「奇周波数バルク超伝導について」
- [3] 本新学術領域 NEWSLETTER No. 2, 浅野泰寛, トピックス

「奇周波数クーパーペア」

- [4] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, Phys. Rev. Lett. **86**, 4096 (2001).
- [5] Y. Tanaka and A. A. Golubov, Phys. Rev. Lett. **98**, 037003 (2007).
- [6] S. Higashitani, Y. Nagato, and K. Nagai, J. Low Temp. Phys. **155**, 83 (2009).
- [7] Orsay Group on Superconductivity, Quantum Fluids: Proc. Sussex Univ. Symp. 1965, ed. D. F. Brewer (North-Holland, Amsterdam, 1966) p. 26.
- [8] Y. Oda and H. Nagano, Solid State Commun. **35**, 631 (1980).
- [9] S. Higashitani and K. Nagai, J. Phys. Soc. Jpn. **64**, 549 (1995).
- [10] W. Belzig, C. Bruder, and A. L. Fauchère, Phys. Rev. B **58**, 14531 (1998).
- [11] F. B. Müller-Allinger, A. C. Mota, and W. Belzig, Phys. Rev. B **59**, 8887 (1999).
- [12] J. Hara, M. Ashida, S. Higashitani, and K. Nagai, J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 3493 (2000).
- [13] T. Yokoyama, Y. Tanaka, and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **106**, 246601 (2011).
- [14] Y. Asano, A. A. Golubov, Y. V. Fominov, and Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **107**, 087001 (2011).
- [15] S. Higashitani, H. Takeuchi, S. Matsuo, Y. Nagato, and K. Nagai, Phys. Rev. Lett. **110**, 175301 (2013).

## 著者紹介



### ひがしたに・せいじ

1966年山口県出身。1991年理学修士（山口大学）。1994年博士（学術）（広島大学）。広島大学総合科学部助手などを経て2008年より現職。超伝導・超流動体の界面物性に興味をもっている。

## Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のトポロジカル超伝導性とトンネル効果

柏谷 聡 / 産業技術総合研究所 電子光技術部門 首席研究員

### 1. トポロジカル超伝導

近年トポロジカル超伝導体が実在するかどうかに関心が高まっている。トポロジカル絶縁体はバンド構造に依存してトポロジが定義されるのに対して、トポロジカル超伝導体では超伝導ギャップ構造に依存してトポロジが定義されるため、トポロジカル超伝導性の同定は超伝導ペア対称性の決定にほぼ等価である。しかし銅酸化物超伝導体の例に見られるとおり、現実の新奇超伝導体において超伝導ペア対称性を確定させることは多くの場合極めて難しい。実際、 $p$ 波超流動性が理論的にも確定している <sup>3</sup>He を除いて、トポロジカル超伝導の確定に向けて多くの実験的努力が続けられている途上である。現在候補になっているのは、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>、1次元ナノワイヤー、Cu-doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>、中心対称性の破れた超伝導体などである。トンネル効果では超伝導体 / 絶縁体 / 正常金属 (N/I/S) 接合と超伝導体 / 絶縁体 / 超伝導体 (S/I/S、ジョセフソン) 接合を舞台として研究が進められているが、両手法ともトポロジカル超伝導性の確定に極めて重要な役割を果たす。本稿では Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> を念頭に、2次元電子状態を有する超伝導体において、トポロジカル超伝導性の検証手法を説明し、実験の現状、及び今後の課題について簡単にまとめる。

### 2. トンネル分光とバルク・エッジ対応

トポロジカル超伝導に付随する重要な特性のひとつは、バルク・エッジ対応と呼ばれ、バルク内のトポロジカル不変量に対応するエッジ状態が、界面のギャップレス状態として現れる性質である [1]。これを2次元超伝導体に適用するならば、バルク内では超伝導ギャップの開いた状態であるが、一方で2次元面に垂直な界面であるエッジにはギャップの閉じたエッジ状態が存在することになる。このギャップの閉じた状態の起源は、異方的超伝導体に特有なアンドレーエフ束縛状態 (ABS) と呼ばれる表面状態であり、銅酸化物の  $d$  波検証実験以来、広く研究がなされてきた。この ABS は N/I/S 接合を用いたトンネル分光法によって実験的に観察可能であるため、異方的超伝導体では各種方位を有する N/I/S 接合が研究されてきた [2]。ABS の分散関係は、トポロジカル超伝導性と強い相関がある。これが視覚的にわかるように、各種超伝導対称性に対して、トンネルコンダクタンスの入射角依存性をまとめたものを図 1 に示す [3]。トンネルコンダクタンスは単純な1バンドモデルを用いて、Blonder-Tinkham-Klapwijk (BTK) 表式を拡張することにより計算した。ギャップ内に赤色で示された領域は ABS の形成による

コンダクタンスピークに対応し、ABS がフェルミレベルを横切る場合にトポロジカル超伝導となる。またそれぞれに対応するトンネルコンダクタンス (入射角に関する積分を行った結果) を図 2 に示した。注意すべきことは、 $d_{xy}+is$  波のように、ギャップ内に ABS が存在してもトポロジカル超伝導でない場合も存在する。またカイラル  $d$  波のように、トポロジカル超伝導であれば必ずゼロバイアスコンダクタンスピークになるとは限らないことである。特に Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のように複雑なフェルミ面を有する場合には、バンドが複数存在し、方位や界面状態に依存して、多様なスペクトルの出現が期待される。矢田らはこの多バンド状態のコンダクタンスを詳細に解析する手法を開発し、トンネルスペクトルから超伝導発現をドミナントに担うペアの情報が得られることを明らかにしている [4]。

実験的には Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のトンネル分光では、すでに過去報告を行っているように、ドーム型のピークの他にも、サンプルに依存していくつかの特徴的なピーク構造が得られることがわかっている [5]。いずれの形状もブロードなギャップ内状態の存在を示唆しており、そこから現状で得られる結論は、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> はカイラル  $p$  波またはヘリカル  $p$  波超伝導体であるということである。しかし現在までにピーク形状のサンプル依存性の起源に関しては、十分には解明されていない。今後さらにトンネル分光実験を重ねていくことにより、ピーク形状に関する系統的な実験を行い、上記理論との対応を明確にしていく必要がある。また実験で観察されるトンネルコンダクタンスは波数に関する積分量であるため、ABS の分散関係を明らかにできないことは、銅酸化物超伝導体以来の長年の課題である。そのため光電子分光のような波数分解能を有する分光手法による ABS の同定は、きわめて重要であると考えられる。

### 3. ジョセフソン効果とカイラルドメイン

トンネル分光が ABS の形成を通して内的な位相の検出を行うのに対して、ジョセフソン効果は電流が直接位相差の関数になっており、より曖昧さの少ない超伝導位相の検出が可能と言える。スピン3重項 / 絶縁体 / 1重項  $s$  波ジョセフソン接合を例に考えるならば、ジョセフソン電流の1次の成分の有無から、スピン3重項超伝導状態を記述する  $d$  ベクトルの向きの検出が可能であることが理論的には知られている [6]。またコーナー接合と呼ばれる異なる方位にまたがって形成されたジョセフソン接合を用いることにより、内的な位相の干渉効果を臨界電流 ( $I_c$ ) の外部磁場 ( $H$ ) 変調特性

として捉えることができる [7]。コーナー接合は、銅酸化物超伝導体のペア対称性の決定にもきわめて重要な役割を果たしたことは周知のとおりである [8]。しかし  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  に関しては、過去の実験においてジョセフソン効果の実験は困難に直面している。上記の銅酸化物超伝導体でみごとな干渉特性を観察したイリノイ大学のグループの報告では、ジョセフソン接合の  $I_c$  が時間とともに急激に変化する、いわゆるテレグラフノイズ的なふるまいや、外部磁場変化に対して特異なヒステリシス特性を示している [9]。また  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の弱結合の実験においても、臨界電流とリトラップ電流の大小関係の逆転という、特異なジョセフソン接合性質が観測されている [10]。これらの結果は印加磁場、電流、あるいは熱揺らぎによっても、カイラルドメインが容易に動いてしまうことに起因すると考えられる [11]。そのため実験的には、「真のジョセフソン特性」をできる条件を見出すことが重要課題であった。

我々はトンネル分光にて開発した接合作成技術に大幅な改善を行い、ジョセフソン接合に適用することにより、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Nb}$  接合の作成に成功した [12]。当初得られた特性は、イリノイ大学と類似した不安定な  $I_c$  特性であり、「真のジョセフソン特性」の測定は困難であった。しかし、界面の品質の向上を進め、超伝導電流が均一に流れる条件を探索し、さらに系統的に接合サイズを変化させることにより、接合特性が顕著に変化することがわかってきた [13]。図 3 には同一の接合を用いて、接合サイズを徐々に小さくしていった場合の  $I_c$ - $H$  特性を示している。接合幅が  $55\ \mu\text{m}$  の場合には、 $I_c$ - $H$  はきわめてランダムな特性を示しているのに対して、 $10\ \mu\text{m}$  ではイリノイ大の報告と類似したヒステリシス型が現れる。さらに  $5.8\ \mu\text{m}$  まで微小化すると、 $I_c$ - $H$  はむしろ従来のジョセフソン接合で知られているような conventional な振る舞いへ収束していく様子が観察できた。この傾向は再現性があり、異なるバッチで作成した接合においても数  $\mu\text{m}$  程度の接合において、極めてきれいな  $I_c$ - $H$  特性（フラウンフォーファーパターン）が観察できている。これらの結果は、カイラルドメインがおおよそ数  $\mu\text{m}$  程度のサイズを有し、そのサイズの接合では単一ドメインのジョセフソン接合となり、「真のジョセフソン特性」が観測できていることを示唆する。カイラルドメインサイズとして数  $\mu\text{m}$  程度という値は、過去の他の実験とおおよそ合致する結果である。

現在、上記実験により抽出された条件を有するジョセフソン接合やコーナー接合を詳細に解析することにより、真の  $I_c$ - $H$  特性やシャピロステップが明らかになりつつあり、そこから  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトポロジカル超伝導性に関する同定が、近日中に行えるものと期待している。

#### 4. 展望と今後の課題

本新学術領域研究の課題のひとつである  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトポロジカル超伝導性の同定に向けた、トンネル効果

を用いた研究の現状と課題を簡単にまとめた。上記に加えて  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の接合系には多くの課題が残されている。それらは、近接効果に伴う奇周波数電子対の検出、トポロジカルエッジカレントの検出、半整数を含めた磁束状態の解明、エッジまたは半整数磁束量子中に存在するマヨラナフェルミオンおよびその非可換性の検出などである。これらの新奇現象はいずれも本質的にはトポロジカル超伝導性とリンクしており、トポロジカル量子現象として位置づけられる。特にマヨラナフェルミオンはトポロジカル量子ビット実現のための必須要素であり、その検証は世界中で精力的に進められている。これらの解明を通して、凝縮系の新たな概念が開拓され、さらに新概念に基づくデバイス開発や、計測応用へと発展させていくことが最終的な目標である。

#### 謝辞

本研究は、前野悦輝氏（京大）、田仲由喜夫氏（名大）、浅野泰寛氏（北大）、高柳英明氏（東理大）、石黒亮輔氏（理研）、永合祐輔氏（東理大）、柏谷裕美氏（産総研）、齋藤広大氏（産総研）、小柳正男氏（産総研）、馬渡康則氏（産総研）、川畑史郎氏（産総研）との共同研究および議論に基づいております。ここに御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 例 えば、Y. Tanaka, M. Sato, N. Nagaosa, *Journal of the Physical Society of Japan* **81**, 011013 (2012).
- [2] S. Kashiwaya and Y. Tanaka, *Rep. Prog. Phys.* **63**, 1641 (2000).
- [3] S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, K. Saitoh, and Y. Tanaka, *Physica E*, **55**, 25(2014).
- [4] K. Yada, A. A. Golubov, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, arXiv:1311.4682.
- [5] S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and Y. Maeno, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 077003 (2011).
- [6] Y. Asano, Y. Tanaka, M. Sigrist, and S. Kashiwaya, *Phys. Rev. B* **71**, 214501 (2005).
- [7] V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, A. Barone, *Phys. Rev. B* **36**, 235 (1987).
- [8] D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, W. C. Lee, D. M. Ginsberg, A. J. Leggett, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2134 (1993).
- [9] F. Kidwingira, J. D. Strand, D. J. Van Harlingen, and Y. Maeno, *Science* **314**, 1267 (2006).
- [10] H. Kambara, T. Matsumoto, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, and Y. Maeno, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 074708 (2010).
- [11] M. S. Anwar, T. Nakamura, S. Yonezawa, M. Yakabe, R. Ishiguro, H. Takayanagi, and Y. Maeno, *Sci. Rep.* **3**, 2480 (2013).
- [12] K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, Y. Mawatari, Y. Tanaka, and Y. Maeno, *Appl. Phys. Express* **5**, 113101 (2012).
- [13] K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, Y. Mawatari, Y. Tanaka, Y. Maeno, in preparation.

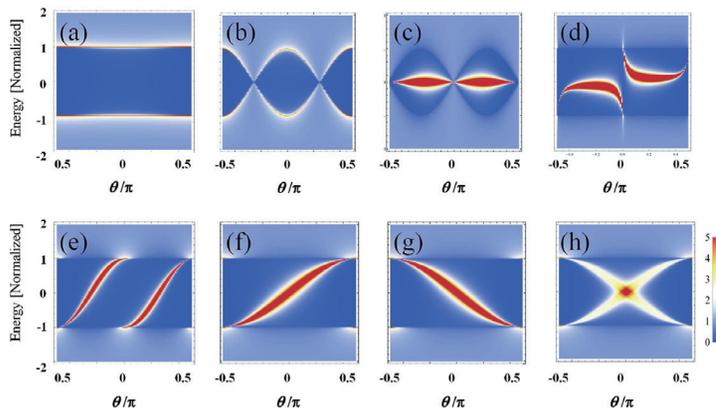


図1：各種ペア対称性を有する超伝導体のトンネルコンダクタンスの入射角度依存性。横軸は準粒子の入射角度、縦軸はエネルギー、色は正規化されたコンダクタンスを表す。ギャップ内の赤の領域がアンドレーエフ束縛状態に対応する。

(a)  $s$  波、(b)  $d_{x^2-y^2}$  波、(c)  $d_{xy}$  波、(d)  $d_{xy}+is$  波、(e) カイラル  $d$  波、(f) カイラル  $p$  波 ( $L_z=1$ )、(g) カイラル  $p$  波 ( $L_z=-1$ )、(h) ヘリカル  $p$  波。

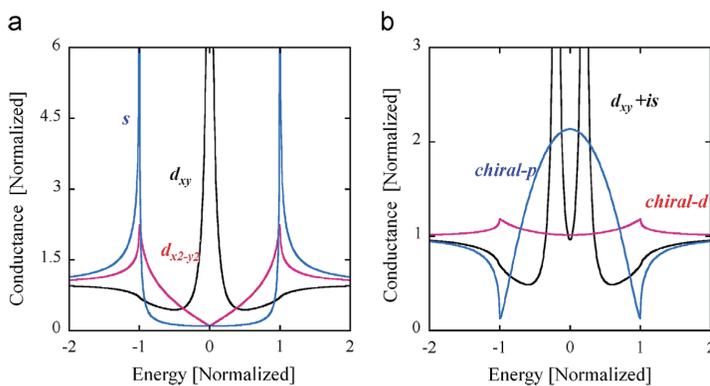


図2：各種ペア対称性に関して計算された N/I/S 接合のトンネルコンダクタンス。カイラル  $p$  波とヘリカル  $p$  波はまったく同じコンダクタンスとなるが、磁場応答では差が生じる。 $d_{xy}+is$  波はギャップ内にピークが現れ、アンドレーエフ束縛状態は存在するが、トポロジカル超伝導体ではない。

WEB 非公開

図3： $Sr_2RuO_4/Nb$  接合のサイズ依存性、(a)  $55 \mu m$ 、(b)  $10 \mu m$ 、(c)  $5.8 \mu m$ 、サイズが微小化するにつれて、カイラル  $p$  波 /  $s$  波ジョセフソン接合に期待される反転対称性（図中の矢印に対応する折り返し）が回復し、カイラルドメイン運動の影響がなくなったことがわかる。

著者紹介



かしわや・さとし

1962 年生まれ 東京都出身。  
1988 年東京大学工学系大学院修了、1988 年電子技術総合研究所入所、2001 年独立行政法人、産業技術総合研究所、2013 年、現職。低温物理、超伝導、トンネル効果の分野で研究を行っています。

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

野村 晋太郎 / 筑波大学 数理物質系 物理学域 准教授

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

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

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

[2] S. Nomura et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 096803 (2004).



のむら・しんたろう

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

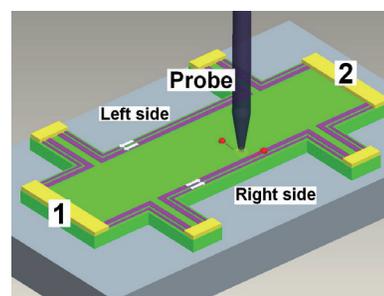


図 1：近接場走査型光学顕微鏡を用いたカイラルエッジ状態のマッピングの測定方法の概略図。

## スピン三重項超伝導体 $UPt_3$ の準粒子低エネルギー励起構造の解明

井澤 公一 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授

これまで強相関電子系でみられる異常な金属状態や超伝導状態などの特異な量子現象に興味をもち研究してきました。特に超伝導では、従来のBCS理論で説明困難な超伝導（非従来型超伝導）のメカニズムの解明を目指し、熱輸送係数や比熱の磁場方向依存性の精密測定からクーパ対の“形”（対称性）を調べてきました。

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

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

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



いざわ・こういち

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

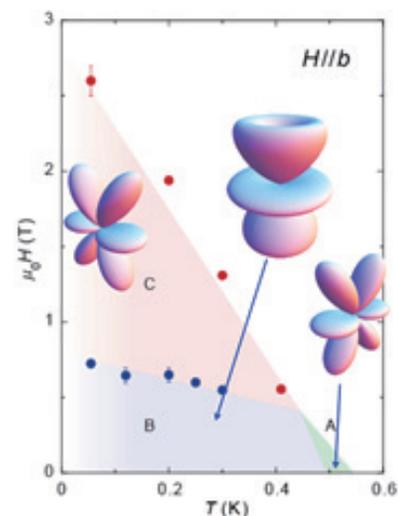


図1:  $UPt_3$  の相図と角度分解熱伝導率測定により決定した各相での超伝導対関数。

## ルテニウム酸化物超伝導体のバルク・表面における電子・スピン状態の解明

岩澤 英明 / 広島大学 放射光科学研究センター 助教

固体が示す超伝導をはじめとした様々な興味深い現象は、固体中で電子がどのように運動しているのか、という事と密接に関わっています。この固体中の電子の振る舞い（エネルギー・運動量）を調べる最も直接的な実験手法が、角度分解光電子分光（ARPES）です。これまでの研究では、銅酸化物高温超伝導体やルテニウム酸化物超伝導体（ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ）中で、どのように電子が運動しているのかを、ARPESにより精密に調べてきました。近年では、電子の運動を数 meV の精度で精密に調べることが可能となったことで、固体中の電子が、どのように相互作用（＝電子と他の電子の間の相互作用や電子と格子振動の間の相互作用など）を受けているのか、また、そのような相互作用が超伝導を担うクーパ対の形成にどう関与しているのか、という問題に興味をもって研究を進めています。

本公募研究課題では、ルテニウム酸化物超伝導体（ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ）の電子状態および電子の持つスピンの状態を明らかにすることを目的とします。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  は時間反転対称性の破れたカイラル  $p$  波のスピン三重項超伝導状態をとることが有力視されています。従って、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のバルク・表面における電子・スピン状態を理解することが、スピン三重項超伝導の表面・界面で起こりうる新奇量子現象を理解するための基盤の形成に繋がるのではないかと期待しています。

本公募研究課題では、広島大学放射光科学研究センターが有する世界最高水準の高分解能 ARPES 装置ならびに超低速電子線回折（Very Low Energy Electron Diffraction: VLEED）型スピン分解 ARPES 装置（[図 1](#)）を駆使して、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のバルク・表面の電子・スピン状態の解明に取り組みます。



いわさわ・ひであき

1980 年生まれ、千葉出身。2008 年東京理科大学理学研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、広島大学放射光科学研究センター研究員、同特任助教を経て、現職。小さい頃から大学まで部活で続けていたサッカーが今でも趣味です。



図 1：世界最高効率の VLEED 型スピン分解光電子分光装置

## トンネル現象を用いた重い電子系の多重超伝導相の研究

住山 昭彦 / 兵庫県立大学 大学院物質理学研究科 教授

私がこれまで研究してきた、重い電子系超伝導体と呼ばれる Ce 化合物や U 化合物では、超伝導電子対が従来型のスピン 1 重項  $s$  波とは異なる状態にあると考えられており、その中には本研究で扱う  $UPt_3$  や  $UBe_{13}$  のように、スピン 3 重項状態である可能性が高く、かつ複数の超伝導相を示す物質があります。私は、ジョセフソン効果と点接合分光という 2 つのトンネル現象を利用して、この多重超伝導相の解明を目指しています。前者のジョセフソン効果は、調べたい超伝導体と従来型の超伝導体との間に薄い常伝導金属を挟んだジョセフソン接合を流れる超伝導電流を測定するもので、秩序変数の位相やスピン 3 重項電子対のスピンの向きの情報が得られます (図 1 (a))。また、後者の点接合分光は、ピエゾ素子を用いて試料に常伝導金属の針を接触させ、その微分抵抗を測定するもので、エネルギー・ギャップの情報が得られます (図 1 (b))。

$UPt_3$  については、温度と磁場に依存して A (高温低磁場) 相、B (低温低磁場) 相、C (低温高磁場) 相の 3 つの相に分かれ、秩序変数として、 $E_{1u}$  と  $E_{2u}$  対称性を持つ候補が提案されています。我々の B 相におけるジョセフソン効果の結果は  $E_{1u}$  を支持していますが [1]、本研究では他の相、特に C 相の研究をするため、高圧を印加することにより低磁場で C 相を出現させ、磁場に弱いジョセフソン効果の研究を実現させます。

一方、 $UBe_{13}$  については、 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  が  $x$  のある範囲で 2 つの超伝導相を示すことが報告されていましたが、比熱の測定では  $UBe_{13}$  でも 2 つの相転移の可能性が示唆されており [2]、本研究ではその検証を目指しています。最近の研究で、点接合の微分抵抗は、 $UBe_{13}$  の転移温度  $T_c \sim 0.9$  K 以下と 0.6 K 以下で減少する 2 段階の転移を示しており、第 2 の超伝導転移が検出できたのではないかと考えております。

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

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



すみやま・あきひこ

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

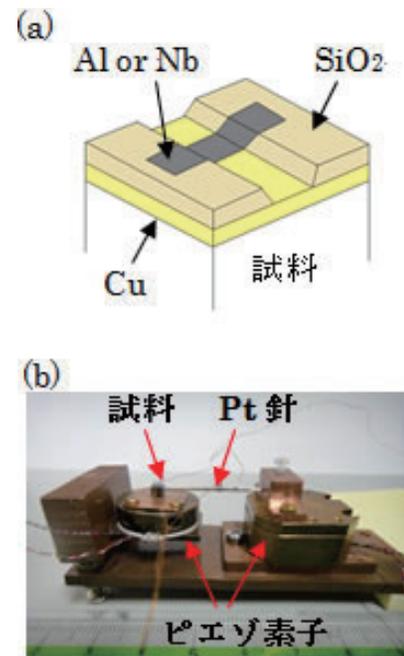


図 1 (a) ジョセフソン素子の概略図と (b) ピエゾ素子を用いた点接合形成器具。

## カイラル $P$ 波 $S$ 波超伝導ハイブリッドSQUIDによる カイラル超伝導位相状態の研究

石黒 亮輔 / 理化学研究所 創発物性科学研究センター 協力研究員

A01 班の公募研究に参加させていただいています。私が本公募研究で行っているのは通常の $s$ 波超伝導体のニオブとカイラル $p$ 波超伝導体の $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ を用いたマイクロメートルサイズの単一超伝導ループによるハイブリッド超伝導位相干渉計 (SQUID) の研究です。私はこのハイブリッド SQUID によってカイラル $p$ 波超伝導体の超伝導位相を検出し、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導対称性の検証、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と Ru の共晶に出現する 3K 相の超伝導対称性についての検証を行います。また、このハイブリッド SQUID には磁束量子が半分大ききで現れる半整数量子渦の実現も期待されています。半整数量子渦はマヨラナフェルミオンとの関連しており、このハイブリッド SQUID の研究をトポロジカル量子計算につなげることができればと考えています。

これまでの研究で、このハイブリッド SQUID の臨界電流の磁場依存性から高次のジョセフソン電流の存在や、一部の温度領域において SQUID の位相が  $180$  度シフトした  $\pi$  SQUID 状態の観測など、カイラル超伝導体の超伝導対称性を反映した現象が観測されています。またこの小さな SQUID の  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  部においてもカイラルドメインが複数存在していることも明らかになったため、さらにサイズを小さくすることで単一のカイラルドメインの  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  を実現し、分かりやすくかつ制御性に優れた素子を開発し、研究を進めていきたいと思います。



いしぐる・りょうすけ

1973 年生まれ 神奈川県出身。  
1997 年京都大学卒業  
2003 年。京都大学大学院理学研究科博士課程修了 2003 年パリ高等師範学校 博士研究員、海外特別研究員。2006 年大阪市立大学 博士研究員。2008 年東京理科大学理学部応用物理学科 嘱託助教。2013 年 現職。低温物理学の分野で研究を行っています。

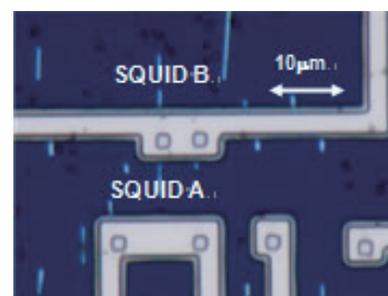


図 1：フォトリソグラフィーによるハイブリッド SQUID。  
 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru 共晶と Nb 配線によって立体的な超伝導ループを構成。

## 超流動ヘリウム3中のトポロジカルオブジェクトの制御と創出

佐々木 豊 / 京都大学 低温物質科学研究センター 教授

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

本領域では、超低温MRI撮影装置ULTMRIを発展させて超流動ヘリウム3のテクスチャーなど空間不均質な秩序構造の直接測定手段を開発することにより、テクスチャー中に生成する欠陥や量子渦などのトポロジカルオブジェクトの構造や生成消滅機構などについて研究しています。また外場による変形のダイナミクスなどを調べることでテクスチャー制御の可能性を追求したいと思っています。

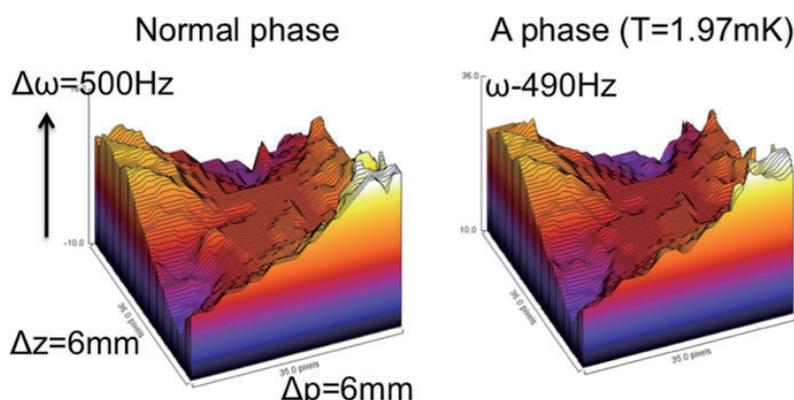
通常のMRI撮影では信号源となる核スピンの密度の空間分布のみを取得するのですが、現在開発中の新手法ULTMRSIでは共鳴周波数の空間分布も同時に取得することができ、その情報から空間不均質な秩序状態の空間変化を直接知ることができます。この世界初の測定法を利用して、超流動ヘリウム中に現れるトポロジカルオブジェクトを実空間で可視化する計画を進めています。

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



ささき・ゆたか

1961年大阪府出身。  
1983年京都大学理学部卒業、  
1988年同大学院理学研究科博士後期課程研究指導認定退学、  
同大学文部技官、1990年米国カリフォルニア大バークレー校博士研究員、1993年京都大学理学部助手、2002年京都大学低温物質科学研究センター助教授、准教授を経て2012年より教授。趣味はものづくり全般と飲み食いでしょうか。写真の背景はアイラ島のBowmore蒸留所の蔵。



## トポロジカル絶縁体および関連物質のスピ分解 ARPES

佐藤 宇史 / 東北大学 大学院理学研究科 准教授

トポロジカル絶縁体とその関連物質の高分解能スピ分解角度分解光電子分光 (angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES) 実験を行っています。電子は「エネルギー」「運動量」「スピン」という自由度を持っていますが、スピ分解 ARPES という手法は、この物理量のすべてを決定できる非常に強力な実験手法です。しかしながら、これまでは効率の低さのため肝心のスピ分解が大変難しく、トポロジカル物質をはじめとする新機能物質の電子状態解明に向けて大きな障害となってきました。この問題を克服するため、東北大学において「スピ分解高分解能光電子分光装置」(図1)の開発を行い、様々な改良の結果、スピ分解時において 8 meV という世界最高のエネルギー分解能を達成しました。現在は、本装置や高輝度放射光を用いて、トポロジカル絶縁体とその関連物質の電子構造の解明を行っています。

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

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



さとう・たかふみ

秋田県出身: 東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了: 現在、同研究科准教授。

料理が趣味。調味料の微妙なブレンドが実験家の腕の見せ所。

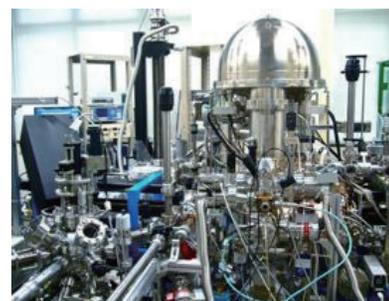


図1: 超高分解能スピ分解光電子分光装置

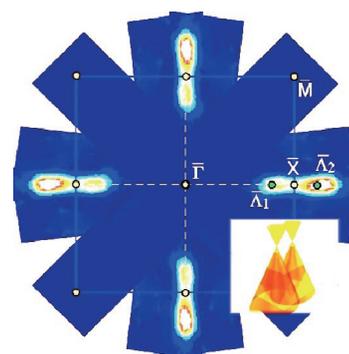


図2: SnTe のフェルミ面と二重ディラックコーン

## スピンプンプによるトポロジカル絶縁体への スピン流注入と逆スピホール効果

塩見 雄毅 / 東北大学 金属材料研究所 助教

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

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

今年度は、まずバルク結晶のトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$  | Ni-Fe 合金接合系を用いて、スピン注入実験を行いました。上記で説明した通り、スピン注入誘起電圧信号は、注入するスピンの向きに依存するため、磁場に対して奇の対称性をもつことが期待されます。我々は、 $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$  試料において、磁場に対して偶のゼーベック信号に加え、磁場に対して奇の信号が低温で見られることを確認しました。 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  などにおける対照実験の結果との比較により、この信号が、世界で初めてとなる、トポロジカル絶縁体表面状態におけるスピン注入誘起電圧信号であることを実証しました [1]。これまでのスピントロニクスの研究は、スピン流が非保存量であるため、ナノメートルスケールの薄膜構造を用いて行われてきましたが、トポロジカル絶縁体は天然の疑似薄膜構造をもつため、バルク結晶でもスピントロニクス実験が可能であることがわかりました。

今後は、今回の研究結果を発展させ、表面状態の非自明なトポロジ的性質がより顕著に現れるような新奇現象の開拓、またそのスピントロニクス・デバイス応用を目指し、研究を進めていくつもりです。

[1] Y. Shiomi, K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, Kouji Segawa, Yoichi Ando, and E. Saitoh, "Bulk topological insulators as inborn spintronics detectors", arXiv:1312.7091 (2013).



しおみ・ゆうき

三重県出身。2012年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。その後、東北大学原子分子材料科学高等研究機構助教を経て、現職。仙台は寒いと感じる今日この頃です。

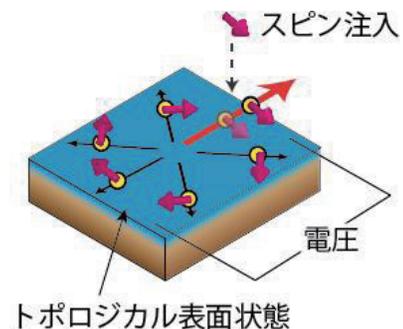


図1：トポロジカル絶縁体へのスピン注入と誘起される電圧信号

## 空間反転対称性の破れを人工的に制御した 重い電子系超伝導体の物性研究

芝内 孝禎 / 京都大学大学院理学研究科 准教授

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

新学術領域では、我々が世界ではじめて成功したCeを含む重い電子系エピタキシャル薄膜成長の技術 [1,2] を用いて、人工的に空間反転対称性の破れを制御した超格子構造を作製し、その物性測定から空間反転対称性の破れの効果を明らかにすることを目指します。図1は重い電子系超伝導体CeCoIn<sub>5</sub>と、同じ結晶構造を持つ通常金属YbCoIn<sub>5</sub>の超格子の一例です [2]。このような超格子において、特に、f電子と伝導電子の混成による重い電子状態が実現するCe原子を含む層の層数を固定し、通常の金属状態であるYb層の層数に変調をかけることにより、反転対称性の破れを制御することが可能となります。

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

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

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

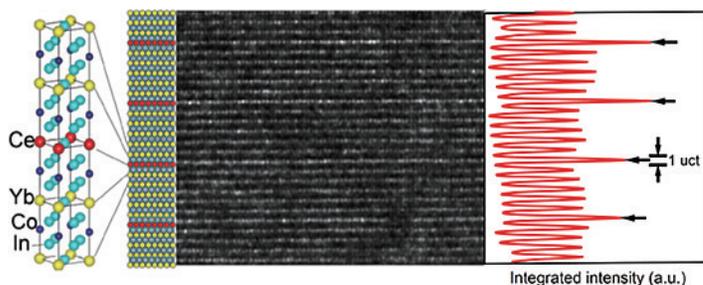


図1：重い電子系超伝導体CeCoIn<sub>5</sub>と、同じ結晶構造を持つ通常金属YbCoIn<sub>5</sub>の超格子の透過型電子顕微鏡像とその強度を横方向に積分したもの(右)。



しばうち・たかさだ

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

## 原子層制御技術による3次元トポロジカル絶縁体のスピン機能創出

安藤 裕一郎 / 大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教

3次元トポロジカル絶縁体の表面状態には熱平衡状態でも純スピンの流が存在すると言われていました。また、電子の運動量とスピン角運動量に強い相関があり、電流を印加するだけで電流方向に依存したスピン流を生成できると期待されています。これらの特性はスピントロニクス分野において魅力的であり、3次元トポロジカル絶縁体を用いた新奇スピndeバイスの実現が望まれています。私は当該デバイスの実現を目指し、表面状態に起因するスピン流の電気的検出を試みています。スピン特性は強磁性体/3次元トポロジカル絶縁体ヘテロ界面を形成することにより、電気的に検出することができます。しかし、検出に用いる強磁性体のスピン特性はヘテロ界面状態の劣化により著しく低下します。従って、3次元トポロジカル絶縁体のスピン機能発現にはヘテロ界面の精密制御が鍵となります。本研究ではこれまでのスピントロニクス研究で培った界面制御技術を駆使し、3次元トポロジカル絶縁体におけるスピン機能の発現に適したヘテロ界面の実現を目指します。

実験にはCO1班の大阪大学・安藤・瀬川グループにご提供いただいたバルク単結晶3次元トポロジカル絶縁体 ( $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  等) を用いています。スコッチテープ法により数10 nmに薄片化した試料に、微細加工プロセスにより数100 nmスケール強磁性体・非磁性体電極を配置しデバイスを形成します。これまでは強磁性体電極にパーマロイ ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) を用いた素子を用いて、界面抵抗の磁化方向依存性 (磁気抵抗効果) を評価してきました。その結果、表面伝導が支配的な低温 ( $\sim 30$  K) において、強磁性体の磁化の向き・印加電流の極性に依存して界面抵抗が変化することが判明しました。この挙動はバルク伝導が顕在化する室温では消失します。これらの結果から、トポロジカル絶縁体中に印加された電流により生成されたスピン流が、ヘテロ界面においてスピン依存伝導を示すことにより磁気抵抗効果が観測されたと考えられます。この磁気抵抗効果を定量的に評価することにより、3次元トポロジカル絶縁体のスピン特性を解明できると期待されます。今後はより精密なスピン特性の評価を行う他、液体窒素温度での強磁性体形成や、界面トンネル絶縁膜を挿入したデバイスを作製し、スピン特性の高効率検出に適したヘテロ界面の実現を目指します。



あんどう・ゆういちろう

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

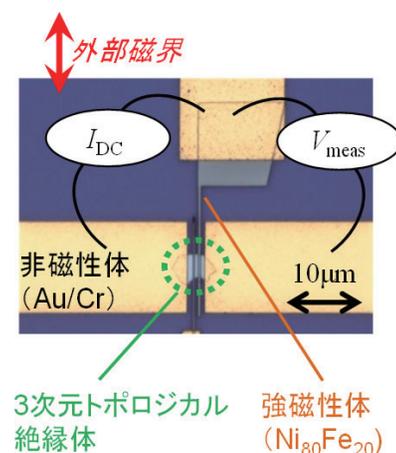


図1: 3次元トポロジカル絶縁体を用いたスピndeバイスの光学顕微鏡像。

## 量子ホール系におけるエッジ状態とトポロジカル励起の研究

福田 昭 / 兵庫医科大学 医学部物理学教室 准教授

超低温における低次元量子凝縮系の物性に興味を持ち、研究を続けて来ました。京都大学における大学院時代には、絶対零度まで永久気体として存在する偏極原子状水素の2次元超流動の探索を行いました。理化学研究所では、液体ヘリウム上に浮かんだ2次元電子の研究を行いました。近年は、半導体接合界面における2次元電子系が、強磁場・超低温で起こす特異な量子現象である、「量子ホール効果」に興味を持ち、特に2次元電子系を2枚近接配置した2層系量子ホール効果における量子現象を中心に実験を行っています。最近では、分数量子ホール効果における動的核スピン偏極の研究や、2次元電子系の対象をグラフェンにまで広げて、研究を進めています。

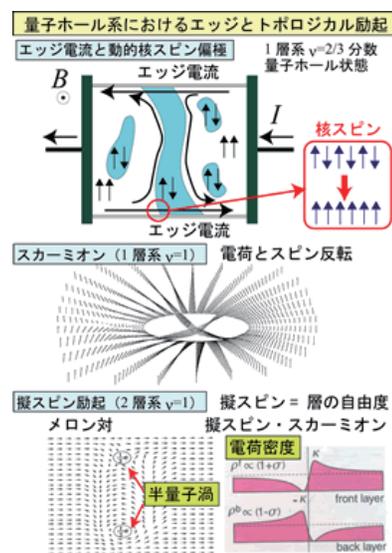
量子ホール状態、特に2層系量子ホール効果を中心に、ソリトン格子相 [1]、傾角反強磁性相 [2] や SU(4) スカームイオン [3] の発見、半量子渦対の乖離としての Kosterlitz-Thouless 転移の観測 [4]、層間核スピン拡散の測定 [5] などを行いました。今後は、電気伝導測定のみならず、動的核スピン偏極現象や磁気抵抗検出型 NMR などを用いて、エッジ状態での電子の散乱機構とエッジの動的変化過程、および半量子渦対や磁気ロトン、スカームイオンなどの量子ホール系特有のトポロジカルな励起状態の特定とその生成・消滅機構を解明します。トポロジカル絶縁体の研究グループとは、類似点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

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



ふくだ・あきら

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



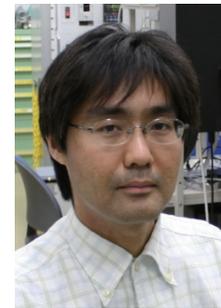
## 超格子バンドエンジニアリングを用いた トポロジカル絶縁体の実現

松野 丈夫 / 理化学研究所 基幹研究所 専任研究員

5d 電子系であるイリジウム酸化物は、スピン - 軌道相互作用が約 0.5 eV と大きく、かつ電子相関とも競合するという特徴を持ちます。このことから、「電子相関の効いたトポロジカル絶縁体」という物質の新たな状態が生まれる可能性が理論的に指摘されています。本研究では原子層レベルで制御可能な薄膜合成技術を駆使して、イリジウム酸化物においてトポロジカル絶縁体を実現することを目的としています。

スピン - 軌道相互作用と電子相関との競合は、従来遍歴的であると信じられてきたイリジウム酸化物に予想外の基底状態を実現させることが近年明らかになってきました。一例として、二次元的構造をとる  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  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  $\text{SrIrO}_3$  は格子歪みとスピン - 軌道相互作用の結合により半金属となります。前期では、 $\text{SrIrO}_3$  と  $\text{SrTiO}_3$  からなる人工超格子薄膜  $[(\text{SrIrO}_3)_m, \text{SrTiO}_3]$  を  $\text{SrTiO}_3(001)$  基板上に作製し、 $m$  を変化させることで次元性制御によるモット絶縁体 - 半金属転移を実現しました。これは人工超格子によるバンド構造制御、すなわち超格子バンドエンジニアリングの好例です。

前期の成果を活かして現在取り組んでいるのは、右に示すような (111) 方向に積み重なった  $[(\text{SrIrO}_3)_2, (\text{SrTiO}_3)_2]$  超格子の作製です。この構造では Ir 原子の配列がハニカム格子と等価になり、その特殊性からトポロジカルな性質を持つことが予測されています。ところが、このような Ir と Ti の原子配列は熱力学的に不安定ですので、通常の合成法では実現が困難です。一層ずつ積層を制御できる薄膜合成法によってのみ実現可能な、究極の超格子バンドエンジニアリングと言えます。実績のある (001) 方向に比べて (111) 方向への積層は格段に難しいため苦戦はしていますが、目標に向けて一歩ずつ近づいています。



まつの・じょうぶ

2001 年 東京大学大学院理学系研究科修了、産業技術総合研究所博士研究員等を経て、2005 年理化学研究所研究員、2008 年より同専任研究員。最近はずっかりご無沙汰ですが、学生時代に茶道をかじっておりました。

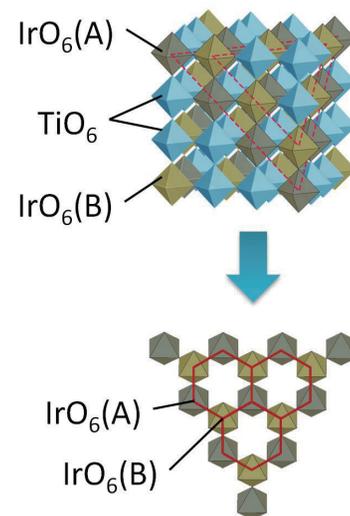


図 1 : (111) 方向に積層した人工超格子  $[(\text{SrIrO}_3)_2, (\text{SrTiO}_3)_2]$  の結晶構造。Ir 原子のみを抜き出すとハニカム格子を形成している。

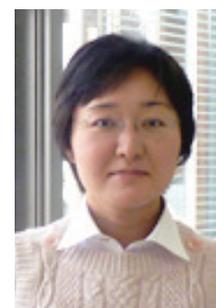
## 多重極限下の電子・熱物性測定と結晶構造解析 による圧力誘起トポロジカル超伝導の研究

大村 彩子 / 新潟大学 研究推進機構 超域学術院

ビスマス (Bi) は数万気圧という到達可能な圧力領域で超伝導を発現し、その転移温度 ( $T_c$ ) は 7 - 8 K で単体としては比較的高く、さらに高圧側では圧力に伴い  $T_c$  が上昇することが知られています。この性質を受けて我々のグループでは Bi を主な構成元素とする半導体や半金属に着目し、高圧下での放射光 X 線回折や分光法、電気抵抗測定を実験手法として、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  や Bi-Sb 全率固溶合金での圧力誘起超伝導を探索してきました。その後、これらの物質が 3 次元トポロジカル絶縁体として注目されるようになり、現在では高圧物性も広く研究されるようになってきました。

本公募研究では、トポロジカル絶縁体における圧力誘起超伝導の探索および転移機構の解明を目指しています。前述したように、 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  や  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  等の  $\text{A}_2\text{B}_3$  型トポロジカル絶縁体では既に超伝導が観測されています。我々のグループでは、図 1 に示すように  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  で 6 GPa 以上 (1 GPa~1 万気圧) の圧力領域で超伝導を見出しました。また、室温での圧力誘起構造相転移との比較から、超伝導は高圧結晶相 (図中の  $\text{C}2/m$  構造) に起因すると報告してきました。しかし、他のグループからは 3 GPa 以上の圧力領域、つまりトポロジカル絶縁体相の  $R-3m$  構造から超伝導が発現するとの報告もあります。この相違はキャリア密度等の試料固体差に加えて、層状構造の圧縮に効く各測定での静水圧性の差 (圧縮環境の差) が要因のひとつとして考えられています。そのために本課題の研究期間において、低温高圧力下で複数の輸送特性が測定可能なシステムや結晶構造との同時測定法の構築も目指しています。最近では、3 次元ラッシュバ物質  $\text{BiTeX}$  ( $X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) において数万気圧での圧力誘起トポロジカル相転移 (trivial  $\rightarrow$  topological) が理論予測されており、トポロジカル量子現象の研究分野で圧力が貢献できる場が増えてきました。我々は共同研究者とともに、電気抵抗測定、結晶構造解析、バンド計算からトポロジカル相転移の探索を始めています。

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



おおむら・あやこ

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

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$  における物性・構造の圧力変化

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

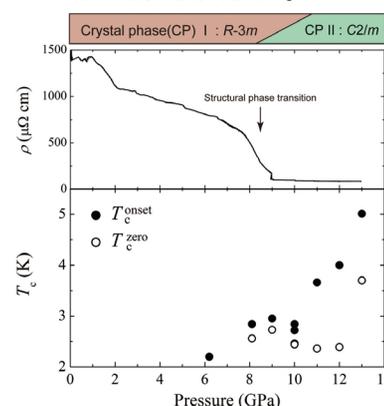


図 1 :  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  の物性と結晶構造における圧力効果

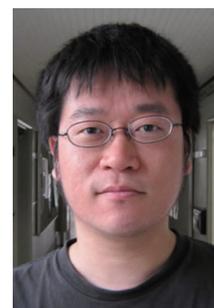
## 強磁性体／超伝導体接合におけるスピントロニクス

横山 毅人 / 東京工業大学 大学院理工学研究科

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

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

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



よこやま・たけひと

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

## トポロジカル超伝導マヨラナ準粒子励起の操作と新奇機能の理論探索

胡 暁 / 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 ユニット長

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

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

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

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

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



ふ・しおー

1961年中国安徽省生まれ。1979年中国北京大学物理系に入学。中退して1981年に東京大学に入学、1990年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。東北大学金属材料研究所助手・助教授、旧科学技術庁金属材料技術研究所主任研究員を経て、2007年から現職。筑波大学連携大学院教授も兼務。

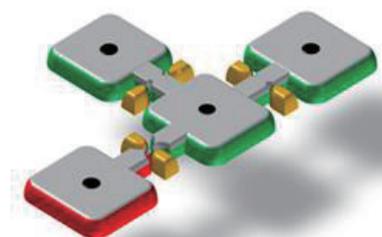


図1：マヨラナ準粒子の位置交換を行うデバイス

## カイラル $p$ 波超流動体の固有角運動量とエッジ流の解明

押川 正毅 / 東京大学物性研究所 教授

カイラル $p$ 波超流動体あるいは超伝導体は、ヘリウム3の超流動状態を記述するものとして、また $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導状態を記述するものとして重要な系である。また、近年はトポロジカル超流動の観点からも注目を集めている。カイラル $p$ 波超流動体については、以前より「固有角運動量のパラドックス」が知られていた。これは、超流動体の全角運動量を問うものである。カイラル $p$ 波超流動体では、2つのフェルミ粒子が相対角運動量1のクーパー対を作る。従って、フェルミ粒子の個数を $N$ とすれば、クーパー対の数は $N/2$ であり、全角運動量も $N/2$ になりそうである。一方、対形成によるギャップの大きさは、通常はフェルミエネルギーに比べて非常に小さい。従って、フェルミ面から離れた(エネルギーが対形成ギャップよりも高い)フェルミ粒子は対形成に参加せず、クーパー対形成はフェルミ面の近くでのみ起きるとも考えられる。すると、超流動体の全角運動量は $N/2$ に比べて強く抑制されると考えられる。これら2つの直観的な描像にそれぞれ対応する具体的な計算結果も報告された。両者の間の矛盾を解明し、与えられた状況下での全角運動量の値を理論的に正しく求めることが一つの目標になる。これは物性物理学における基本問題であり、数十年にわたって研究されてきたが、解決には至っていなかった[1]。

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

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

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

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



おしかわ・まさき

1994年 東京大学大学院理学系研究科博士課程中退、1995年博士(理学)

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

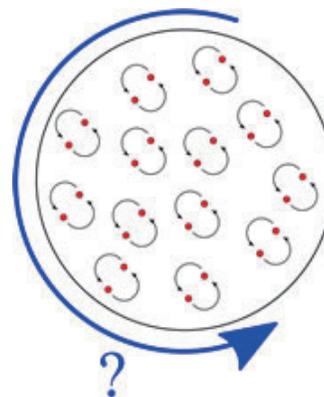


図1: カイラル超流動体の固有角運動量問題。 $N$ 個のフェルミ粒子全てがクーパー対を形成するとすれば、系の全角運動量は $N/2$ ( $p$ 波の場合)となる。しかし、この結果がどの範囲まで成立するかは自明ではない。

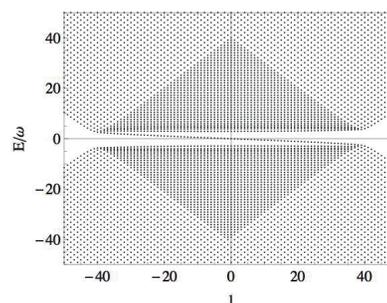


図2: 回転対称な2次元無限井戸型ポテンシャル中のカイラル $p$ 波超流動体のエネルギースペクトル。対形成ギャップが開いているが、ギャップ中のエネルギー準位としてエッジ状態が存在している。

## 超流動 $^3\text{He}$ A 相 B 相また重い電子系超伝導体 $\text{UPt}_3$ を用いた トポロジカル現象の理論研究

町田 一成 / 岡山大学 大学院自然科学研究科特命 教授 (研究)

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

私の当該領域におけるミッションの一つはこの離散化された渦芯束縛状態をいかに観測するかを理論的に解明することである。ごく最近 STM/STS 実験が Cu-doped  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  に対して行われた [1,2,3]。渦近傍の局所状態密度の観測によりその特徴的な空間構造から渦芯束縛 Majorana 準粒子の可能性が指摘された。こうした実験を吟味する中で、上のミッションを達成する所存である。

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

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

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



まちだ・かずしげ

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

## 素粒子論的手法によるトポロジカル励起の研究

新田 宗土 / 慶應義塾大学 日吉物理学教室 准教授

物理学や科学の分野において、数学のトポロジーの重要性が増してきています。トポロジーとは、大きさや形にはこだわらない繋がり方のみを対象にした柔らかい幾何学です。A駅からB駅まで行くのに、どれくらい時間がかかるかは無視して、行けるかどうかや何通りの行き方があるのかを考えるのはトポロジーの問題です。18世紀のプロイセン王国にケーニヒスベルクという都市がありました。7つの橋がかかっていたのですが、すべての橋を一回だけ渡って全部の橋を渡れるかと言う問題がありました。大数学者オイラーは、トポロジーの一分野のグラフ理論を使って、それが不可能であることを示しました。

私は、渦の研究を行っています。渦と言っても、皆さんが日常よく目にするあの渦、台風や竜巻、あるいはお風呂の水を流した時に出来る渦も流体の渦とは、少しだけ違っています。普通の水などとは違い、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、粘性のないさらさらの流れが実現します。これをかき混ぜてやった場合に出来る渦は、「量子化された渦」なんです。この渦は、トポロジーで特徴づけられる渦です。杭にロープが何回巻きつけて結ぶことを考えると、整数回しか巻き付けません。1.5回だと結ぶことが出来ませんね。量子化された渦はそのようなものです。

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

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



にった・むねと

出身 大阪府  
経歴 大阪大学大学院卒業、東京工業大学、アメリカ・パーデュー大学でポストドクを経て、現在にいたる。  
趣味はデジカメなど。今年度は日々の授業から解放されて、伸び伸びと研究させていただいています。

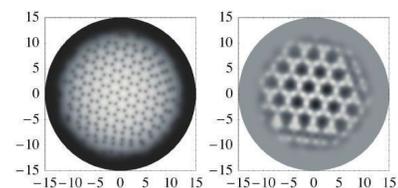


図1：渦格子

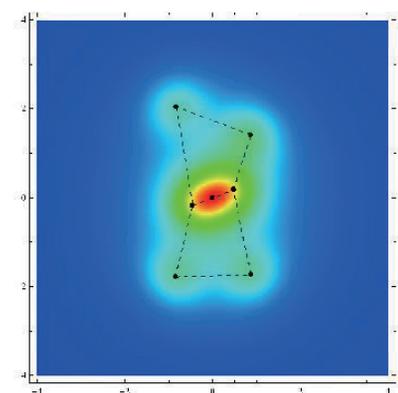


図2：渦グラフ

## トポロジカル凝縮相における量子交差相関現象

野村 健太郎 / 東北大学 金属材料研究所 准教授



のむら・けんたろう

神奈川県出身

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

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

トポロジカル絶縁体の興味深い現象としてトポロジカル電気磁気効果あるいは量子交差相関応答と呼ばれるものがあります。まずトポロジカル絶縁体の表面に磁性不純物をドーピングするなどして表面を量子ホール状態にします。図1にありますように、電場をかけると、表面量子ホール電流が試料の周りを循環し、内部に磁場あるいは磁気モーメントを作ります。同様に磁場をかけると内部に電気分極が発生する事が示せます。電場(磁場)で磁化(電気分極)を誘起するというように、電気的自由度と磁気的自由度が交差した形で応答するのが特徴です。

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

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

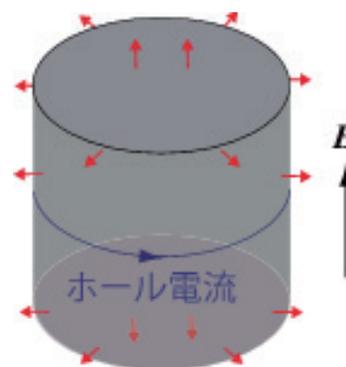


図1：トポロジカル絶縁体に電場をかけると表面に量子化ホール電流が流れる

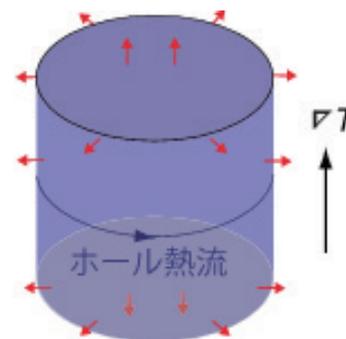


図2：トポロジカル超伝導体に温度勾配をかけると表面に量子化ホール熱流が流れる

## 多軌道モデルに基づくパリティがない超伝導の理論研究

柳瀬 陽一 / 新潟大学理学部物理学科 准教授



やなせ・よういち

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

大学院に入学したあと最初に取り組んだテーマが、重い電子系スピン三重項超伝導体における  $d$  ベクトルの理論を作ることでした。いま思えばあまりにも無謀なテーマを前にあえなく撃沈しましたが、幸いにして銅酸化物高温超伝導体における異常金属相の研究で学位を取得することができました。その後、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  を研究対象として  $d$  ベクトルの計算をできたことはとても大きな喜びでした。その後、FFLO 超伝導、パリティがない超伝導、ランダム系の超伝導絶縁体転移、冷却原子気体の Angular-FFLO 超流動などの研究を、強相関効果や量子臨界性、アンダーソン局在との関連を含めて行いました。現在はスピン三重項超伝導体の分数量子渦、ネマティック秩序と共存するカイラル超伝導体の量子渦、局所的なパリティがない系のエキゾチック超伝導と磁気電気結合量子相、多軌道系のパリティがない超伝導、スピン軌道相互作用が誘起するネマティック秩序相、などの研究を進めています。現在の研究対象としている物質は、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$ 、人工超格子  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ 、 $\text{NdRu}_2\text{Al}_{10}$ 、 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 、 $\text{SrTiO}_3$  ヘテロ構造などですが、物質の個性とその普遍性をつなぐ学問を追求する以上、今後も対象が広がっていくのは自然なことと考えています。

最近力を入れているテーマの一つが、軌道自由度がありなおかつパリティがない超伝導の研究です。そもそも、パリティがない超伝導の源となる反対称スピン軌道相互作用は軌道自由度から生じます。しかし、軌道自由度があるモデルを用いてパリティがない超伝導を研究した例はこれまでありませんでした。昨年我々が  $\text{SrTiO}_3$  ヘテロ構造を対象として行った研究では、軌道自由度と空間反転対称性の欠如の協奏効果に由来するエキゾチックな超伝導相が見つかりました。また、最近では多軌道系に特有のトポロジカル超伝導相もあることが分かってきました。今後は新学術領域の実験グループとも連携し、新しい超伝導相を予言・解明する理論研究に取り組みたいと思います。

福岡県北九州市出身。2000年京都大学理学研究科博士課程中退。東京大学理学系研究科に勤めたのち、現在は新潟大学理学部准教授。学生時代から現在に至るまでオリエンテーリングという競技をしています。他にトレイルランニング、自転車、沢登りなどを趣味としていますが、今年は何れもお休みです。

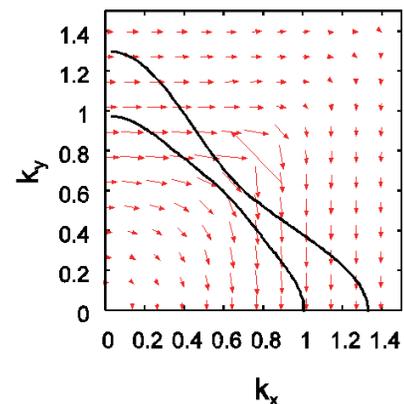


図1： $\text{SrTiO}_3$  ヘテロ構造におけるラッシュバ分裂したフェルミ面とそのスピン構造

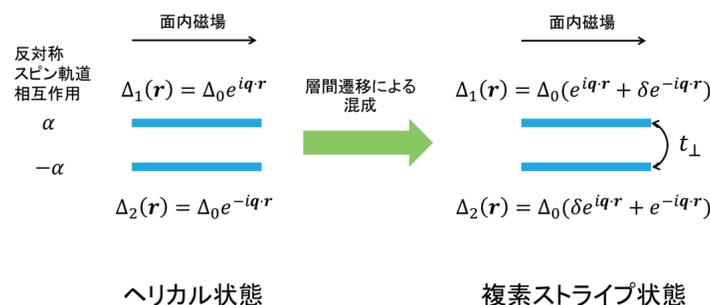


図2：人工超格子  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  における複素ストライプ相

## 空間反転対称性の破れた電子系のトポロジカル相とマヨラナ・フェルミオン

藤本 聡 / 京都大学 大学院理学研究院物理学・宇宙物理学専攻 准教授

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

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

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



ふじもと・さとし

大阪府出身。京都大学大学院理学研究科博士課程修了。同大助手、助教を経て現職。主に強相関電子系の新奇な超伝導、磁性、およびトポロジカルな量子現象に興味がある。

# 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

## 2013

### Jan. 2014

Physica E 特別号 “Recent activity about Topological insulators, superconductors and Majorana fermions” (ゲスト Editor 田仲) が 2014 年 1 月に出版されました。本学術領域から 9 名が執筆に携わりました。

### Nov. 2013

D01 班山影が第 8 回 (2014) 日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。

A01 班岩澤が第 8 回 (2014) 日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。

### Jul. 2013

超流動  $^3\text{He-A}$  でのカイラリティ破れの直接観測を報告した 池上 (B 班分担者) らの論文が Science 誌に掲載されました。

野村 (B01)、東谷 (B01) 等の論文 “Surface Majorana Cone of the Superfluid  $^3\text{He B Phase}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 013602 (2011) が、J. Phys. Soc. Jpn. の Most Cited Articles in 2012 from Vol. 80 (2011) に選ばれました。

山影 (D01)、井村 (D01) 等の論文 “Disorder-Induced Multiple Transition Involving Z2 Topological Insulator”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 053703 (2011) が、J. Phys. Soc. Jpn. の Most Cited Articles in 2012 from Vol. 80 (2011) に選ばれました。

### Jun. 2013

本新学術領域は物性研究所の第 7 回国際ワークショップ「Emergent Quantum Phases in Condensed Matter」を協賛することになりました。

### May. 2013

領域代表前野悦輝が「紫綬褒章」を受賞いたしました。

本領域アドバイザーのレゲット教授による特別講義が京都大学で行われました。

### Apr. 2013

野村 (B01)、東谷 (B01) 等の論文 “Surface Majorana Cone of the Superfluid  $^3\text{He B Phase}$ ”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 013602 (2011) が、第 18 回日本物理学会論文賞を受賞しました。

### Mar. 2013

佐藤 (D01)、瀬川 (C01)、安藤 (C01) が第 17 回超伝導科学技術賞「トポロジカル超伝導体の理論と実証」を受賞しました。

### Feb. 2013

A01 班 米澤・前野らのルテニウム酸化物における超伝導一次相転移の発見の論文が Physical Review Letters 誌に掲載され、日刊工業新聞や京大ホームページで紹介されました。

B01 班の野村竜司が平成 24 年度東工大理学系若手研究奨励賞「トポロジカル超流動ヘリウム 3 の表面マヨラナコーンの発見」を受賞しました。

## 小沢 英之

名古屋大学 大学院工学研究科 修士課程 1年

滞在先：岡山大学大学院 自然科学研究科  
(派遣元研究者：佐藤 昌利、受入研究者：水島 健)

## DO1 → DO1

ヘリウム3は極低温まで液体でクリーンな系であり、そのB相は典型的なトポロジカル超流動・超伝導体である。ヘリウム3のB相の非自明なトポロジは「隠れた離散対称性」によって保護されており [1]、また東工大の奥田・野村グループによってB相での横波音響インピーダンスの測定 [2] が行われるなど、ヘリウム3のトポロジカルな性質の理解が急速に深まっている。

私はこれまで佐藤准教授の下で「結晶が持つ対称性」によって保護された表面状態を持つ絶縁体である「トポロジカル結晶絶縁体」に焦点を当てて研究を行ってきた。私は研究の視野をトポロジカル超流動体ヘリウム3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んだ。滞在する研究室については、超流動ヘリウム3のトポロジカルな性質を学び、さらに最新の研究状況を把握するために岡山大学の水島助教の研究室を選び、2013年7月20日から10日間滞在した。

超流動ヘリウム3の準粒子状態は、Bogoliubov-deGennes (BdG) ハミルトニアン固有状態として与えられる。しかしながら、任意の3次元空間内でBdG方程式を数値的に解くことは現在の計算環境では不可能に近い。そのために、対称性の高い状況を想定して計算を行う必要があり、今回は特別な直交関数系を用いてBdG方程式を解く方法を採用した。

滞在中は水島先生が作成されたテキストを参考に私がプログラムを作成し、水島先生にレビューしていただくサイクルを繰り返し、研究を進めた。はじめに円筒座標系において有効な直交関数であるBessel関数を用いてBdG方程式を解く方法を習得した。その後、計算精度が高精度であり任意の境界条件を適用できるdiscrete variable representation法を用いたプログラムを作成した。さらに量子渦(磁束渦)状態という空間的非一様な超伝導状態の電子状態を計算するための方法

本プログラムは、本領域に属する研究室の大学院生や若手研究者が、領域に属する他機関の研究室に2週間程度滞在中、その分野の研究の日常を体験することで、自身の視野を広げると同時に、受入研究室の同世代の研究者に刺激を与えることを目的とする制度です。若手研究者間の直接的な交流によって、異分野の研究融合を触発し、領域に属する研究室の中に、トポロジカル量子現象の追求という学際的視野を醸成する効果が期待されています。

も習得し、ヘリウム3のB相の表面状態の計算を行った。今回の滞在では岡山大学の同世代の学生の方と自分の「トポロジカル結晶絶縁体」の研究や学生の方の「超伝導体における渦糸状態」の研究についてなど幅広い議論を行うこともできた。自分の研究をわかりやすく相手に伝えることの難しさに苦労する一方、「トポロジカル量子現象」の分野として自分の研究を俯瞰できた。また学生の方の研究に触れたことで、最新の超伝導、超流動体の研究への理解を深めることができた。

今後は今回習得した計算手法を用いて、ヘリウム3のB相に関してトポロジカル不変量に直接的に起因した物理現象の計算を行いたい。

最後に充実した研究環境を与えていただいた本プログラムに感謝いたします。

[1] T. Mizushima, M. Sato, and K. Machida Phys. Rev. Lett. **109**, 165301 (2012)

[2] Y. Okuda and R. Nomura J. Phys.: Cond. Matt. **24**, 343201-1-19 (2012)



水島先生(右から2番目)と筆者(真ん中)。研究室の学生の方とも活発な議論をさせていただきました。

## 塩崎 謙

京都大学 大学院理学研究科 博士課程 2年

滞在先：名古屋大学 大学院工学研究科

(派遣元研究者：藤本 聡、受入研究者：佐藤 昌利)

## DO1 → DO1

最近、新しいトポジカル相として結晶対称性など系固有の対称性を使った新しいトポジカル相が提案されています。私は当初、結晶点群・空間群のような空間的な対称性によって保護されたトポジカル絶縁体・超伝導体（トポジカル結晶絶縁体・超伝導体）については、その安定性の観点から詳細に調べる意義について懐疑的でした。トポジカル絶縁体・超伝導体の重要な性質の一つは、バルクの非自明なトポロジーに起因した表面ギャップレス状態の存在と、そのギャップレス状態が不純物や表面のラフネスに対して強固に守られるという点です。ところが、空間的な対称性は不純物や表面のラフネスによって容易に破れるため、そのトポジカルな安定性が現実の物質系で実現するか不明だった為です。しかし、鏡映対称性によって守られた表面ギャップレス状態の観測がなされ、また、空間的に非局所な対称性であっても平均的に対称性が保たれていれば局在を起こさないとの理論的な結果を知るに至り、自分でもトポジカル結晶絶縁体について興味を持ち始めていました。そんな折、若手滞在プログラムにより、トポジカル結晶超伝導体について研究を行っている名古屋大学の佐藤先生の下でトポジカル結晶絶縁体・超伝導体に関して研究する機会を頂きました。

さてトポジカル結晶絶縁体・超伝導体に関連する問題の一つに、その分類そのものが残されており、滞在中にこの分類問題に取り組むことにしました。空間的でない局所な対称性に対するトポジカル絶縁体の分類問題は Schnyder らと Kitaev により解かれましたが、一般の空間群に対するトポジカル絶縁体の分類問題は非常に難しい問題であり、現状では、ある特定の対称性クラスにのみ注目し定義可能なトポジカル数を定義するという場当たり的な方法論を取ることがほとんどでした。私たちは、もっと統一的な結果を得るために、森本さんと古崎先生による Altland-Zirnbauer の 10 通りの対称性クラスに付加的な鏡映対称性を有するトポジカル絶縁体の分類問題の解決方法に注目しました [1]。彼らの方法はトポジカル絶縁体の分類問題を Clifford 代数の拡大問題（ギャップレスの Dirac フェルミオンに対して、考えている対称性のもと互いに断熱的に移り変わらない質量項の導入の仕方がどれだけあるかを系統的に計算す



滞在中の開かれたミニワークショップにて発表の機会を頂きました。上はその様子です。

る手法）と見なす方法であり、場当たりのではなく、決まった（しかも簡単な）手続きでトポジカル・クラスの計算ができる点に利点があります。そこで、森本さんと古崎先生の結果を他の対称性クラスへの拡張を試みました。計算してみると、Clifford 代数による分類方法の適用範囲は鏡映対称性に留まらず、一般の order-two の対称性（2回で元に戻る対称性変換）に対して可能であることが分かりました。これは C2 の回転対称性、空間反転対称性、またそれらの（磁気空間群のような）反ユニタリ対称性が含まれます。分類表を作り、既存の結果と付きあわせて Clifford 代数による分類に矛盾がないことを確かめました。

以上は滞在中に得られた結果ですが、私は結果に満足していませんでした。というのも、どうやら Clifford 代数で order-two の対称性の分類はある程度系統的に可能であることを確かめましたが、分類表を眺めていると何らかの規則に従って分類が決まっているはずだと思うようになったからです。滞在後、この背後に潜んでいる規則を抽出できる分類方法がないかと考え、Teo と Kane の論文 [2] で紹介されている、異なる次元と対称性クラス間の同相写像を構成する方法を検討しました。その結果、任意の order-two の対称性を有するトポジカル結晶絶縁体は、Altland-Zirnbauer の 10 通りの対称性クラスのラベルに加えて、さらに補助的な 4 通りのラベルを導入するだけで全て尽くされることがわかりました。以上で order-two のトポジカル結晶絶縁体の分類問題に関して一定の理解が得られ、今回の結果を論文にまとめる運びとなりました。

最後になりましたが、このような機会を与えて下さった新学術領域の若手滞在プログラムに感謝致します。また受け入れ先教員の佐藤先生のみならず、田仲先生、小林さん、田仲研の皆さんに感謝致します。滞在中、食事に誘って頂くなど、いろいろとお気遣い頂きました。また、理化学研究所の森本さんには幾度と議論して頂きました。この場を借りて皆様方にお礼申し上げます。

[1] T. Morimoto and A. Furusaki, Phys. Rev. B **88**, 125129 (2013).

[2] J. C. Y. Teo and C. L. Kane, Phys. Rev. B **82**, 115120 (2010).

## 2013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 ● CIFAR

## ● 第11回集中連携研究会

## 「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」

2013年6月7日（京都大学）

第11回集中連携研究会は、2013年6月7日に京都大学にてA班の今後2年間の戦略をまとめるための会議として行われた。翌日には $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ に関する第12回の集中連携会議が開催されるため、この会議ではA班における今後の方針によりフォーカスした会議という位置づけである。

まず前野悦輝氏が新学術領域全体の趣旨説明と目指すものに関して、Topological moleculeやブラックホール、社会観にまでtopologicalの概念が拡張しうる可能性に言及した。引き続き前野悦輝氏より、「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のトポロジカル超伝導性」のタイトルで、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  3K相に作成したジョセフソン接合の特異なジョセフソン効果に関して、 $I_c$ の揺らぎがドメイン運動に起源を有することが示された。石黒亮輔氏は「カイラル $p$ 波 $s$ 波超伝導ハイブリッド SQUIDによるカイラル超伝導位相状態の研究」として、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  3K相に作成したジョセフソン接合をループ構造にすることにより SQUID を作成し、この SQUID 変調特性が  $T_c$  近傍で位相がパイシフトを示す様子が報告され、odd パリティ観測の可能性に関して言及した。浅野泰寛氏は「スピン3重項超伝導体のジョセフソン効果」に関して、ジョセフソン電流に界面のスピン軌道相互作用の与える影響、およびマヨナラフェルミオンと奇周波電子対の密接な関係に関して、明快な解説を行った。柏谷聡は「トンネル効果によるトポロジカル超伝導の検出」に関して、トンネル分光のスペクトルとトポロジカル超伝導性の相関に関して $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ を例にして示した。

住山 昭彦氏は「トンネル現象を用いた重い電子系の多重超伝導相の研究」として $\text{UPt}_3$ などの重い電子系超伝導体に関するトンネル分光への展望を示した。岩澤英明氏は「ルテニウム酸化物超伝導体のバルク・表面における電子・スピン状態の解明」として、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のARPESの詳細な解析により、従来の電子格子相互作用の解析方法に欠陥があることを指摘し、その改善方法が示された。この結果は $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のみに限定した結果ではなく、非常に多くの物質の解析の見直しにつながる重要な結果である。入江宏氏からは「 $(\text{In},\text{Mn})\text{As}/\text{Nb}$  接合を用いた奇周波数クーパ対の生成」として、

強磁性体中に染み出した奇周波数電子対の観察可能性、および $(\text{In},\text{Mn})\text{As}/\text{Nb}$ の輸送特性が示された。横山毅人氏は「強磁性体/超伝導体接合におけるスピントロニクス」として、強磁性体中の奇周波数電子対の性質、特にスピン偏極や磁化に働くトルクの性質に関する理論が示された。野村晋太郎氏は「量子ホール系カイラルエッジ状態の空間分解分光研究」として、磁場中の2次元電子ガスのエッジ状態が空間的に変調していることを、SNOMを用いた観察により示した。強磁場中2次元電子ガスは $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ と同様に時間反転対称性が破れたトポロジカル状態であり、今後の研究を進める上で両物質の比較は極めて重要である。胡曉氏は「トポロジカル超伝導マヨナラ準粒子励起の操作と新奇機能の理論探索」として、結合のチューニングが可能なアイランド状の超伝導ネットワークを用いたトポロジカル量子ビット構築の理論を示した。最後に石田憲二氏により「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のNMR」に関して、長年問題にされていた低磁場での性質や $H_c2$ 近傍でのNMR信号の性質に関する解析結果が示された。

公募研究は、住山、横山両氏を除いてメンバーが大幅に入れ替わっており、特にARPESやSNOMといった新しい実験手法を有するメンバーが加わり、実験アプローチの層が厚くなった。また2次元電子ガスやマヨナラロジックへの研究も加わることにより、より一般的なトポロジカル現象や応用可能性への追求という視点が加えられることになり、今後2年の期間にさらに新しい展開が期待できるようになった。

(文責、柏谷聡)

第11回集中連携研究会



## ● 第12回集中連携研究会

「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性とトポロジカル超伝導」

2013年6月8日（京都大学）

第12回集中連携研究会は第11回の翌日に開催した。トポロジカル超伝導体の典型としてのクーパー対の軌道状態が時間反転対称性を破る「カイラル超伝導体」の最有力候補である $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性を真に確定するために必要な実験や理論について、関係の本新学術領域メンバーに加えて領域外からも研究者を招へいして参加者約30名で集中的な討論を行った。

まず前野悦輝（京大、領域代表・A01）が新学術領域全体の趣旨説明を行った後、「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性」について現状と問題点をまとめた。NMRから得られたスピン三重項性の証拠の信頼性が高いことを含め一次証拠とみなせるものと、重要な二次証拠とに分けて整理し、一次証拠のさらなる強化と、位相敏感な実験や半整数フラクソイド実験の重要性などをまとめた。また1次相転移や上部臨界磁場の抑制メカニズム解明などの未解決問題について現状を解説した。続いて髭本亘（原子力機構、新学術「USM」のメンバー）は「 $\mu\text{SR}$ から見た $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性」の題目で、時間反転対称性の破れた超伝導の証拠であるミュオンスピン回転のこれまでの結果をまとめ、 $\mu$ -やミュオン・ナイトシフト測定の可能性などの展望も行った。米澤進吾（京大、A01）は「バルク測定から見た $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性」をテーマに上部臨界磁場や諸物性の磁場応答の面内異方性に着目した講演を行った。柏谷聡（産総研、A01）は「接合系の実験から見た $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性」についてこれまでの知見をまとめ、ジョゼフソン電流の超伝導位相差依存性から超伝導対称性を決定する概念や、コーナー接合や磁場・電流方向の同時反転での対称性の破れについて議論した。

午後のセッションでは、まず野村拓司（SPRING8）は「微視的理論から見た $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性」について、これまでの様々な理論提案のレビューを行うとともに、実際とは少し異なるフェルミ面を仮定し、特にファンホープ特異点付近の状態密度を増大させるとp波超伝導が不安定になることなどを議論した。町田一成（岡山大、D03）は「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の理論：スピン三重項の立場から」、上部臨界磁場の異方性をパウリ対破壊効果で説

明した。柳瀬陽一（新潟大、D04）は「 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の理論：スピン三重項の立場から」、クーパー対に対するスピン軌道相互作用の効果の小さい理由や、面に垂直磁場でのヘリカル超伝導状態の可能性などを提唱した。

休憩後のセッションでは、井澤公一（東工大、A01）が「 $\text{UPt}_3$ の超伝導対称性理解の現状 Review」として、奇パリティ（スピン三重項）超伝導対称性の枠内で、長年の「定説」を覆す新たな超伝導対称性の有力証拠となる熱伝導率の実験結果を含めてレビューを行い、従来の定説を支持する実験と新たな解釈との関係についても議論した。橘高俊一郎（東大物性研）は「 $\text{UPt}_3$ の磁場中比熱」について最近のデータを基に、熱伝導率の結果から期待される磁場方向に対する2回対称性がまだ観測されていないこと、またナイトシフトからは理解できない上部臨界磁場の抑制効果について $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ との類似性を議論した。また $\text{UPt}_3$ がヘリウムB相と類似のトポロジカル超伝導と認識できる点も議論した。最後に藤本聡（京大、D04）は「カイラル超伝導の熱ホール効果と $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ との関連」として、カイラルエッジ状態のマヨラナモードの担う、熱流に対して垂直方向の温度差がトポロジカルに保護された物理量であることと、3つのバンドからなる $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ での観測可能性について議論した。

これらの集中的な討論を通して、カイラル超伝導体の最有力候補である $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導対称性を真に確定するために必要な実験や理論についての指針が確認できた。カイラル・スピン三重項超伝導状態の根拠となる実験的証拠を精査する共に、これまでのシナリオで説明が困難な実験事実を明確にし、それらも含めて説明できる総合的な「対案」があるのかについて認識が深まった。プロジェクトの残り2年間で、どこに焦点を当てて目的達成を目指すのかの指針が確認できた。また、従来の超伝導対称性シナリオの見直しを迫る実験的証拠が挙がった $\text{UPt}_3$ について、これまで蓄積されてきた実験事実が新たなスピン三重項超伝導対称性でどのように説明できるのかも吟味でき、新しい解釈が世界的なコンセンサスを得るための方向性も明らかになった。

（文責、前野悦輝）

第12回集中連携研究会



### ● 第 13 回集中連携研究会

#### 「トポロジカル電子流体の新奇現象」

2013 年 6 月 14・15 日（岡山大学）

領域代表と C 班代表が趣旨説明等を行った後、計画班メンバー 5 名、公募代表者 8 名、関連する理論班（D04）公募代表者 3 名が講演を行った。計画班メンバーは前半に得られた成果、特に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や単結晶作製の試み、トポロジカル絶縁体とそれに関連する超伝導体の作製と物性解明、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  におけるトポロジカル超伝導状態の探索・実証、様々な界面超伝導の探索、などについて報告を行った後に、後半の目標と具体的な取り組みについて講演した。公募班メンバーは計画班と相補的なテーマ、特にトポロジカル物質の人工的な設計、スピン流の注入や検出、エッジ流（状態）の計測について、その背景と今後 2 年間の計画について発表した。また、D04 代表者らはトポロジカル相における電磁交差相関現象や A01 班の中心テーマにも関連するトポロジカル超伝導体の熱ホール効果等についての研究計画の発表と展望を行った。

特筆すべきは、領域発足後に発展した概念やトポロジカル状態を実証する新しい方法などに関する発表が多く、本研究分野における日進月歩の進展ぶりを実感できたことである。プログラムを組むに当たっては、公募研究者の講演時間を 5 分間長めに設定し、研究課題の背景を丁寧に説明していただいた。また、すべての講演に十分な質疑時間を確保した。その上、全体討議の時間帯に、質問し損ねたことさらに突っ込んだ討議を行い、上記の諸問題に対する認識を深めた。

（文責、鄭国慶）

第 13 回集中連携研究会



### ● 第 14 回集中連携研究会

#### 「トポロジカル凝縮系の理論」

2013 年 6 月 22・23 日（名古屋大学）

第 14 回集中連携研究会は理論グループ D 班の研究会であった。理論のグループは計画研究 D01 班（田仲、上田、水島、佐藤、連携：川上、小口、井村、川口）、公募研究 D02 班（横山、胡）、公募研究 D03 班（押川、町田、新田）、公募研究 D04 班（野村、藤本、柳瀬）から構成されている。D02 班、D03 班、D04 班はそれぞれ A01 班、B01 班、C01 班との連携が強く期待されている。

トポロジカル量子現象の分野は理論的進展が早く、特に新奇な概念についての理解の共有は新しい研究領域を開拓する上で不可欠である。研究会は田仲の全体説明の後、計画研究 7 名、公募研究 8 名の発表で行われた。

初日の最初のセッションは超伝導トポロジカル絶縁体（田仲）、スピノール BEC の相転移とボソン系の量子ホール効果（上田）、超流動  $^3\text{He}$  のエッジ状態とカ

イラル対称性（水島）についての講演が紹介された。安藤（C班）らが精力的に実験を行っている超伝導トポロジカル絶縁体  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  は本領域の主要な成果の1つである。また BEC のボゾン系の量子ホール効果は新しいテーマであり、超流動  $^3\text{He}$  において新奇な量子相転移が予言されている。

引き続き、ミラー対称性による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のエッジ状態（佐藤）、マヨラナ準粒子操作と新奇トポロジカル物質（胡）、超流体の固有角運動量（押川）の講演が行われた。トポロジカル周期表にカイラル対称性という分類が存在する。これはハミルトニアンと反交換する演算の存在を表わすもので、零エネルギーエッジ状態の判断をする上で重要な役割をする。この概念と、A01 班の主要トピックであるカイラル  $p$  波超伝導のカイラルとは概念の異なるものであり、分野外の方にはわかりづらい可能性があり、用語の使い方に対する注意が必要であると感じた。またミラー対称性を加えることで、従来の周期表では分類できないエッジ状態、トポロジカル数を定義できるようになったのも最近の進歩である。

初日最後のセッションでは、スピン3重項超伝導体  $\text{UPt}_3$ （町田）、新奇なトポロジカル励起（新田）、パリティがない超伝導体における新量子相（柳瀬）、反転対称性の破れた系のマヨラナフェルミオン（藤本）の発表が行われた。 $\text{UPt}_3$  は古くから知られた超伝導体であるが、トポロジカル相としてどのようなエッジ状態が実現されているのか解明されるとより理解が深くなるといえる。パリティがない超伝導には様々な新奇な状態の可能性が期待されそうである。

2日目の最初のセッションは、トポロジカル現象における交差相関効果（野村）、強磁性体・超伝導体接合における奇周波数ペア（横山）、トポロジカルモット絶縁体（川上）、トポロジカル絶縁体のエッジ状態（井村）、

トポロジカル物質のバンド計算（小口）の発表が行われた。奇周波数ペアの研究は本新学術領域の主要テーマの1つであり、理論研究だけでなく実験研究の幅広い発展を期待したい。交差相関効果は、マルチフェロイック系で盛んになっている分野であり、トポロジカル量子物理の次の方向性の1つかもしいない。またトポロジカルモット絶縁体は、強相関電子系の観点からも興味ある系であり、今後の発展が期待される。

最後のセッションでは、その後の討論の時間では、トポロジカル近藤絶縁体（川上）、ミラー対称性とマヨラナフェルミオン（佐藤）、トポロジカル量子現象を俯瞰する数学的スキームの可能性（上田）が話題に取り上げられ活発な議論が行われた。

今回の会議では、議論の時間が十分に設けられ理解は深まった。トポロジカル周期表に現れるカイラル対称性が様々な問題に現れることが明確になった。またミラー対称性の重要性も認知されたといえる。さらに新物質への展開もあり、将来を見据えた極めて意義のある研究会となった。

（文責、田仲 由喜夫）

#### 第14回集中連携研究会



### ● 第 15 回集中連携研究会

#### 「トポロジカル超流体の新奇界面現象」

2013 年 6 月 29 日（大阪市立大学）

これまでの 3 年間の成果を基にして、今後の 2 年間の計画半 B01「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の研究の方向生について検討するために、分担者、公募研究者、関連する連携研究者が集まり戦略会議を開いた。6 月 29 日の 1 日だけの研究会を開催し、22 名の参加であった。

午前中は超流動ヘリウム 3 の A 相での量子渦に関連する 3 件の講演であった。國松（大阪市大）は、本質的に量子渦状態である円筒容器内の特殊なテクスチャー（Mermin-Ho 型テクスチャー）での“固有角運動量の検出”実験に関する講演、高木（福井大）は、その実験での NMR 応答周波数及び、“半整数量子渦”が実現できたときの NMR 応答周波数に関する理論講演、多田（東大物性研）はカイラル超流体における固有角運動量に関する理論講演であった。固有角運動量の大きさに関する実験より、巨視的な量であるということを経験してきたが、D 班公募押川との共同研究者である多田の講演は、2 次元系でのモデル計算としてカイラル超流体ではこれを支持する結果を得たものであった半整数量子渦での NMR 共鳴周波数は今後の実験遂行上の参考になると考えられた。

午後の前半は、進めてきた界面での新奇現象としての“奇周波数  $s$  波クーパー対状態”および“表面マヨラナ状態”に関する 3 件の講演であった。石川（大阪市大）は、次の講演者である東谷（広島大）が提案した不純物界面（エアロジェル界面）で予想された新奇近接現象である“奇周波数  $s$  波クーパー対”の出現に起因する帯磁率測定実験に関する講演、東谷はその帯磁率に関する理論講演、野村（東工大）は表面に出現するマヨラナ状態と磁気効果に関する実験講演であった。エアロジェル界面での磁化の温度変化の実験結果と非常に似た振る舞いとなること理論的に示されたが、定量的なことに関しては検討が必要であるより低温での測定が期待されるという議論であった。マヨラナ状態への磁気効果については実験準備に関する講演であった。

午後の中間では、2 つの理論講演があった。三宅（豊田理研）はカルテット、セクステット凝縮の GL 理論を展開しその可能性を議論した。中原（近畿大）は、半整数量子渦の出現を念頭に置いて回転下での渦糸状態の変化が角速度に対して起こることを議論し、半整数量子渦の測定方法のアイデアを提案した。

午後の後半では 3 件の講演があった。池上（理研）は A 相の自由表面直下に感度がある測定方法で得られた、A 相での固有マグナス力の観測とカイラリティの測定結果についての実験講演、佐々木（京都大）は新しい NMR 測定法（共鳴周波数の実空間分布の検出）を用いたトポロジカルオブジェクトの研究についての実験講演、竹内（大阪市大）は相分離した 2 成分 BEC における南部—ゴールドストーンモードに関する理論講演、であった。

今後の 2 年間での実験研究テーマに「半整数量子渦の検出」、「表面マヨラナ状態の磁気効果」、「超流動ヘリウム 3 自由表面での界面現象」等が新たに加わり、研究遂行上の問題点について実験理論の両面から議論を行ったことは大変有意義であった。研究分担者、連携研究者に新たに加わったメンバーと共同して研究を進めて行くスタートが出来た研究会であったと考えている。最後に、本研究会を成功は、研究室の院生（木村君、近藤君、森岡君）と菊池さん（秘書）の協力の賜でありこの場を借りて感謝します。

（文責、石川 修六）

第 15 回集中連携研究会



## ●第4回領域研究会報告

2013年12月19日ー12月21日

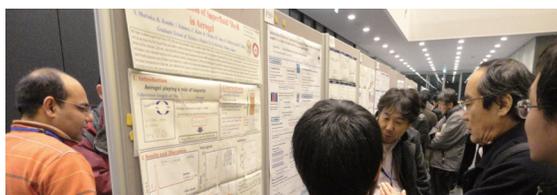
(名古屋大学 ES 総合館)

2013年の暮れも押し迫った名古屋に参加者126名を集め、名古屋大学 ES 総合館にて第4回領域研究会が開催された。年末の忙しい時期に重なるということもあり、皆さんに参加していただけるか心配な面もあったが、忙しい時期にも関わらず多数の方に日程調整していただき、盛況に開催することができた。冒頭に領域アドバイザーの安藤恒也氏に挨拶をいただき、続いて領域代表の前野氏による新学術領域全体の紹介、また、田仲氏による後期公募班メンバーの紹介が行われた。これらに引き続き、40件の口頭発表および58件のポスター講演が行われた。

新学術領域の活動も後半に入り、発足当初目指した方向の他に、今後の新たな方向性も探りたいということで、今回の領域研究会では、領域メンバーに限らず、領域外の方を多数招待し講演していただいた。まず、物性物理の分野以外から、東北大学の井上邦男氏（素粒子）、岩手大学名誉教授の高塚龍之氏（原子核）の二方に、それぞれ、素粒子におけるマヨラナ粒子探索および中性子星の超流動に関する講演をいただいた。井上氏の講演は、日本が世界に誇るニュートリノ実験施設のある神岡を舞台に、カムランド検出器でニュートリノがマヨラナ粒子であることの検証実験がどのように進められているかという現状報告であり、巨大科学のスケールの大きさに圧倒される思いであった。現在、物性物理の分野でもマヨラナ粒子が研究の大きな潮流となっているが、本家本元の素粒子の分野でもそう遠くない未来にマヨラナ粒子の発見が報告されるのではないかと期待できるものであった。また、高塚氏の講演は、パルサーの発見を契機に始まった中性子星研究の歴史を振り返り、 $^3\text{He}$ の超流動状態発見に先んじて提出された中性子星内部での  $p$  波超流動の理論の紹介を中心に、関連する中性子星現象の解説もなされ、中性子星における超流動状態研究のパイオニアとしての貴重な話を伺うことができ、大変有意義であった。



また、トポロジカル物質の応用に関する話題として、産総研の富永淳二氏に超格子型相変化メモリの話をしていただいた。この物質は、トポロジカル絶縁体である  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  と通常絶縁体である  $\text{GeTe}$  との積層構造で作られる物質で、従来の相変化メモリでは発現しえない巨大磁気抵抗変化を示すことから、新時代の相変化メモリとして実用化の段階にある物質である。すでに応用物理学会や磁気学会では大きな話題となっているようであるが、トポロジカル絶縁体起源の新物質として本領域研究会でも話題を提供していただいた。富永氏の講演では、この物質発見の経緯とともに、その異常な性質が報告された。当初トポロジカル物質と無関係な応用的視点から発見されたこの物質が、現在トポロジカル量子現象の視点からその物性の解明が検討されているということから、トポロジカル量子現象の波及効果の大きさを感じさせるものであった。その物性にはまだ未解明な点も多いが、今後本領域として取り組むべき物質であるという感触を受けた。



その他、領域外のメンバーとしては、理論では、東工大の村上修一氏によるワイル半金属の理論につながるトポロジカル相転移の理論の話、岡隆氏（東大）による光誘起のトポロジカル相および量子重力理論であるストリング理論の物性への応用の話、江澤雅彦氏（東大）によるシリセンのトポロジカル現象の理論、紺谷浩氏（名大）による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  超伝導機構の新理論が紹介され、それぞれ刺激的な話を聞かせていただきました。また、実験の方では、島野亮氏（東大）による超伝導クーパ対に伴うヒッグスモードの検証という見事な実験を伺うことができました。また、物性物理におけるマヨラナ励起の実証は、今回の領域研究会の中心テーマの一つであった。本研究会では、佐々木聡氏（大阪大）、大岩彰氏（東大）、高橋義朗氏（京大）を招待し、それぞれ、トポロジカル絶縁体由来の新奇超伝導体（ $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ ）、ナノワイヤ系におけるマヨラナゼロモード検出に関する実験の現状、冷却原子におけるマヨラナモード実現の現状、について詳しく話をさせていただきました。先に紹介した井上氏の講演、更には領域メンバーである柏谷氏による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  におけるジョセフソン効果の実験、野村竜司氏による  $^3\text{He-B}$  相の音響インピーダンスの実験も合わせ、多様な系で同時に実験が進められているマヨラナ粒子および関連する実験の最前線の話題を一度に伺う貴重な機会を得ることができ、領域全体でその類似性・相違を共有できたのではないかと思います。

今後の領域の発展にはポスドク以下の若手研究者の活躍が不可欠であるが、本研究会では、矢田啓司氏（名大）による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトンネル伝導の新理論、森本高裕氏（理研）、塩崎謙氏（京大）による新しいトポロ

ジカル周期表の発表があった。それぞれ複雑な理論を他分野の参加者や実験家向けに分かりやすく理解できるように工夫がなされており、今後大きな活躍が期待できるものであった。なお、塩崎氏の研究成果は本領域の「若手相互滞在プログラム」によるものである。

領域メンバーに関する発表に関しては、新たな領域メンバーが加わったこともあり、今まで以上に多彩なテーマに渡る研究成果が発表された。特に小口氏（大阪大）による Bi 表面の Rashba 型の一次元状態の解析は以前より佐藤氏ら東北大のグループが見出していた ARPES の信号を領域内の連携により見事に解明したものであり、新学術領域内の連携が更に進んでいるとの印象を受けた。また、時間上の制約から、すべての口頭発表希望に答えることはできなかったが、多数の方による非常に質の高いポスター発表がなされた。初日と二日目の 1 分間プレビューに引き続き確保されたポスター講演の時間のみならず、口頭発表の合間の休憩時間にも活発な議論がポスター会場のあちらこちらで繰り広げられた。個々に報告された内容については、添付のプログラムを参照していただきたい。今後も領域全体としてのアクティビティを向上させ、2014 年暮れに京都で開催される TOP2014 で更なる発展の報告がなされることを願ってやまない。

最後に、本会議の開催にあたり、新学術領域事務局の伊藤さん、児玉さん、研究室秘書の三輪さん、木村さんをはじめとし、大成さん、ポスドク、学生の皆様など多くの方にお世話になりました。深く感謝いたします。

（文責、佐藤 昌利）



# 第4回領域研究会 プログラム

## 2013年12月19日(木)

10:00 ~ 10:30	Registration (30分)
10:30	Opening (10分)
10:40 ~ 11:30	座長：安藤 陽一 アドバイザー挨拶 福山 寛 (10分)
10:50	19AM-1 領域の趣旨説明と最近の成果 前野 悦輝 A (30分)
11:20	19AM-2 公募研究紹介 田中 由喜夫 D (10分)
11:30 ~ 12:35	座長：安藤 陽一
11:30	19AM-3 $^{87}\text{Sr}$ & $^{99}\text{Ru}$ Knight-Shift Measurements on Superconducting $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 石田 憲二 A (20分)
11:50	19AM-4 超流動 $^3\text{He-A}$ におけるカイラリティの直接観測 池上 弘樹 B (15分)
12:05	19AM-5 カイラル超伝導体におけるBerry位相揺らぎによる巨大Nernst効果 藤本 聡 D04 (15分)
12:20	19AM-6 Microscopic theory of tunneling conductance in $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 矢田 圭司 (15分)
13:45 ~ 14:45	座長：浅野 泰寛
13:40	19PM-1 超格子型相変化メモリ $[(\text{GeTe})_2(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_m$ に隠されたトポロジカル絶縁体特性と構造相転移による磁気特性の発現 富永 淳二 (30分)
14:10	19PM-2 トポロジカル超伝導候補物質のNMR法による研究 鄭 国慶 C (20分)
14:30	19PM-3 Topological Superconductivity in Bulk in Superconducting Topological Insulators 佐々木 聡 (15分)
15:20 ~ 16:20	座長：上田 正仁
15:20	19PM-4 ダブルベータ崩壊とニュートリノのマヨラナ粒子性検証 井上 邦雄 (30分)
15:50	19PM-5 中性子星の超流動 高塚 龍之 (30分)
16:20 ~ 18:30	座長：水島 健、稲田 佳彦
16:20	Poster Preview A (40分)
17:00	Poster Session A (90分)

## 2013年12月20日(金)

9:20 ~ 10:55	座長：鄭 国慶
9:20	20AM-1 Accessing the Topological Surface States 安藤 陽一 C (30分)
9:50	20AM-2 ワイル半金属とトポロジカル相転移 村上 修一 (30分)
10:20	20AM-3 Josephson current through the semiconductor nanowires coupled to superconductor 大岩 顕 (20分)
10:40	20AM-4 スピン分裂した量子ホール系 カイラルエッジ状態の光学的検出 野村 晋太郎 A (15分)
11:25 ~ 12:45	座長：田中 由喜夫
11:25	20AM-5 高強度テラヘルツ波パルスで駆動されるs波超伝導体の超高速非平衡ダイナミクス 島野 亮 (30分)
11:55	20AM-6 相関ディラック系の非線形光学応答とゲージ・重力対応 岡 隆史 (20分)
12:15	20AM-7 冷却原子気体におけるトポロジカル励起 上田 正仁 D (30分)
14:00 ~ 15:40	座長：佐藤 昌利
14:00	20PM-1 シリセンにおけるトポロジカル量子現象：対称性に保護されたトポロジカル荷電 江澤 雅彦 (20分)
14:20	20PM-2 Nonequilibrium dynamics of superfluid $^3\text{He}$ in a confined geometry 水島 健 D (15分)

14:35	20PM-3 超流動 $^3\text{He-B}$ 相の表面束縛状態に対する磁気効果 野村 竜司 B (15分)
14:50	20PM-4 Possible topological superfluid using ultracold ytterbium atoms 高橋 義朗 (30分)
15:20	20PM-5 トポロジカル超伝導体におけるジョセフソン効果 柏谷 聡 A (20分)
16:20 ~ 18:30	座長：上野 和紀、野島 勉
16:20	Poster Preview B (40分)
17:00	Poster Session B (90分)

## 2013年12月21日(土)

9:20 ~ 10:35	座長：石川 修六
9:20	21AM-1 Topological superconductivity and Majorana fermions in composite systems 永長 直人 C (30分)
9:50	21AM-2 トポロジカル凝縮相における量子交差相関現象 野村 健太郎 D04 (15分)
10:05	21AM-3 Classification of topological insulators and superconductors with reflection symmetries 森本 高裕 (15分)
10:20	21AM-4 $\text{UPt}_3$ の熱ホール効果 町田 洋 (15分)
11:05 ~ 12:45	座長：柏谷 聡
11:05	21AM-5 奇周波数クーパー対とは 田中 由喜夫 D (30分)
11:35	21AM-6 超流動 $^3\text{He-B}$ 相に接するエアロジェル中の奇周波数クーパー対 石川 修六 B (20分)
11:55	21AM-7 奇周波数クーパー対のスピン磁性 東谷 誠二 B (15分)
12:10	21AM-8 Nb/InAs-2DEG 接合界面における奇周波数電子対の探索 入江 宏 A (15分)
12:25	21AM-9 奇周波数クーパー対の物理 浅野 泰寛 A (20分)
14:00 ~ 15:35	座長：柏谷 聡
14:00	21PM-1 対称性とトポロジー：トポロジカル相の最近の話題 佐藤 昌利 D (30分)
14:30	21PM-2 酸化物半導体を用いたp型,n型電気二重層トランジスタ 上野 和紀 C (15分)
14:45	21PM-3 トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体における、対称性によって守られた表面・欠陥ギャップレス状態の分類 塩崎 謙 (15分)
15:00	21PM-4 Quasi-classical Theory of the Mermin-Ho Texture of Superfluid $^3\text{He-A}$ in a Cylinder 永井 克彦 (15分)
15:15	21PM-5 Edge Transport in the InAs/GaSb Topological Insulating Phase 村木 康二 A (20分)
16:05 ~ 17:45	座長：前野 悦輝
16:05	21PM-6 Bi表面における真性一次元Rashba状態 小口 多美夫 D (15分)
16:20	21PM-7 Spin-electricity conversion effect in permalloy/topological-insulator devices 塩見 雄毅 C (15分)
16:35	21PM-8 Orbital fluctuation mediated spin triplet superconductivity in $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 紺谷 浩 (15分)
16:50	21PM-9 Controllable Rashba spin-orbit interaction in heavyfermion superlattices 芝内 孝禎 C (15分)
17:05	21PM-10 トポロジカル絶縁体における相関効果 川上 則雄 D (30分)
17:35	Closing (10分)

# 第4回領域研究会

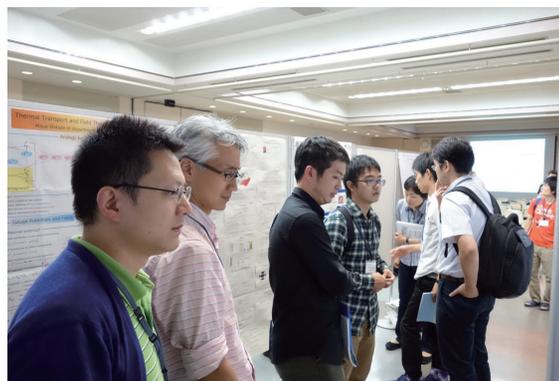
## ポスタープレビュー講演

PA-1	Dynamic behavior of Nb/Ru/Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> junctions in different configurations ムハマド・シャーバズ・アンワー	PB-1	Nambu-Goldstone modes and Higgs modes localized on vortices or solitons 新田 宗土
PA-2	トポロジカルクリスタル絶縁体 Pb <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> Te の有限サイズ効果 小沢 英之	PB-2	強磁場域での有機ディラック電子系における量子ホール強磁性相の安定性 長田 俊人
PA-3	Phase diagram and DOS scaling in topological insulators 井村 健一郎	PB-3	SrTiO <sub>3</sub> ヘテロ構造における多軌道型エキゾチック超伝導 柳瀬 陽一
PA-4	空間反転対称性の破れたパリティ混合超伝導体 Li <sub>2</sub> T <sub>3</sub> B (T: Pt, Pd) の非磁性不純物効果の異常性 包 桂芝	PB-4	スキルミオンの消失過程により誘起される電流の理論的研究 高嶋 梨菜
PA-5	Investigation of Half-Quantum Vortices under a Tilted Magnetic Field 木村 豊	PB-5	Development of a measurement instrument for thermal conductivity tensor of Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> 柴田 大輔
PA-6	Optical Hall Conductivity in the Kane-Mele-Hubbard Model 遠藤 伸明起	PB-6	High-resolution ARPES study of topological crystalline insulator Pb <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> Te 田中 祐輔
PA-7	超伝導トポロジカル結晶絶縁体 In-SnTe の表面状態の理論 橋本 樹	PB-7	3次元ランジュバ物質 BiTeBr における圧力誘起トポロジカル相転移 大村 彩子
PA-8	Nambu-Goldstone Modes in Segregated Bose-Einstein Condensates 竹内 宏光	PB-8	Dirac-fermion-induced parity mixing in superconducting topological insulators 水島 健
PA-9	Texture Transition of Superfluid <sup>3</sup> He B-like Phase in Aerogel 森岡 悠	PB-9	準周期ポテンシャルを持つ1次元光格子系中のトポロジカル相への相互作用効果 松田 冬樹
PA-10	BCS-BEC Crossover in Two-Dimensional Attractive Hubbard Model under Magnetic Field 鶴田 篤史	PB-10	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> の超伝導秩序変数検証に向けた一軸的歪み装置の作製 西村 佳悟
PA-11	多成分 GL モデルに基づく Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> と URu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> における磁場中超伝導状態の解析 高松 周平	PB-11	トポロジカル絶縁体 pn 接合の量子輸送理論 山影 相
PA-12	Physics of axion strings in topological matter 菊池 徹	PB-12	Charge transport in RSOC junctions with single helicity band occupation Bo Lu
PA-13	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> と s 波超伝導ハイブリッド SQUID による超伝導位相と時間反転対称性の破れ 石黒 亮輔	PB-13	カイラル超流動体の固有角運動量とエッジ状態 押川 正毅
PA-14	Broken inversion symmetry and nematic order induced by spin-orbit coupling 人見 尚典	PB-14	空間反転対称性の破れた超伝導体 Li <sub>2</sub> (Pd <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> ) <sub>3</sub> B におけるフォノン異常と異方的超伝導ギャップ 江口 学
PA-15	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> のスピン分解光電子分光 岩澤 英明	PB-15	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> 微小リングの磁気抵抗および電流-電圧特性 中村 有志
PA-16	超伝導トポロジカル絶縁体におけるトンネルコンダクタンスの解析的な表式 鷹見 翔太	PB-16	Detection of spin resistance in three-dimensional topological insulator 安藤 裕一郎
PA-17	Internal Distance between Aerogel Strands and Odd-Frequency Cooper Pairing in Liquid <sup>3</sup> He 近藤 健二	PB-17	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> におけるトポロジカル結晶超伝導の理論 上野 雄司
PA-18	Development of micro SQUID for detection of half-quantum vortex in Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> 永合 祐輔	PB-18	Multiple Half-Quantum Vortices in Rotating Superfluid <sup>3</sup> He 中原 幹夫
PA-19	イオンゲルを用いたトポロジカル絶縁体への電気二重層ドーピング実験 瀬川 耕司	PB-19	U 化合物の多重超伝導相におけるトンネル現象 住山 昭彦
PA-20	UPt <sub>3</sub> as a Topological Crystalline Superconductor 堤 康雅	PB-20	強磁性体 / トポロジカル絶縁体接合系における磁気抵抗効果 田口 勝久
PA-21	SrTiO <sub>3</sub> 電界誘起伝導界面における磁気秩序の可能性 野島 勉	PB-21	Field theoretical approach to symmetry protected topological phase in spin systems 高吉 慎太郎
PA-22	Electrically-tunable topological insulator in perovskite material WU Longhua	PB-22	SQUID による Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> エッジ電流の探索 柏谷 聡
PA-23	Topological Superconductivity with Magnetic Material Attached on s-wave Superconductor 中河西 翔	PB-23	Three-dimensional symmetry breaking topological states 羽部 哲朗
PA-24	Correlation Effect in Non-centrosymmetric System 丸山 大輔	PB-24	Topological Blount theorem of odd-parity superconductors 小林 伸吾
PA-25	SrTiO <sub>3</sub> (111) 面上のイリジウム酸化物薄膜成長 ~トポロジカル絶縁体に向けて~ 松野 丈夫	PB-25	スピン3重項超伝導体 Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> における超伝導誘起磁化 三宅 和正
PA-26	Symmetry-Protected Topological Superconductivity in Staggered Rashba System 吉田 智大	PB-26	Josephson effect and junction-size dependence of Nb/Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> in-plane junctions 齋藤 広大
PA-27	Texture and NMR Spectrum of a Half Quantized Vortex in Superfluid <sup>3</sup> He A-phase 高木 丈夫	PB-27	Unified description of Dirac electrons on a curved surface of strong topological insulators 高根 美武
PA-28	トポロジカル超伝導ナノワイヤにおけるジョセフソン電流とマルチバンドの効果 白石 泰基	PB-28	時間反転対称ゲージ場中の二成分ボース気体のグローバル相図 古川 俊輔
PA-29	In-plane magnetic-field anisotropy of the superconducting state of Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> 米澤 進吾		
PA-30	2層系 ν = 1 量子ホール状態における SU(4) スカームイオンのスピン緩和 福田 昭		

## ●第2回若手国際会議報告

2013年10月22日ー10月26日

(カルチャーリゾートフェストーネ)



ポスターセッションの様子

**国**際ワークショップ「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象に関する若手国際会議」は、2013年10月22日から5日間にわたり、沖縄県宜野湾市のホテル・カルチャーリゾート・フェストーネで行われた（ちなみにこのホテルの名前は後で重要になるので覚えておいていただきたい）。会議は第2回目にあたり、2年前の第1回に引き続いて若手研究者による組織委員が運営し、参加者も国内外の若手研究者であるという、まさに「若手研究者による若手研究者のための会議」であった。今回は1回目と異なり、国際アドバイザー委員会（IAC）を組織しその委員に招待講演者の推薦をしていただいたが、このIAC委員も全員若手研究者であった。海外からの参加者を含め大部分が会場のホテルに宿泊し、文字通り寝食をともにしながらトポロジカル量子物理に関する最新の研究成果について議論した。

参加人数としては、当初は60名程度を想定していたが、締切時には申込数は90名以上に達した。そのため、当初の想定よりも会議の規模がだいぶ大きくなり、「全員が同じホテルに泊まる」という方針を変更するなどの対応が必要で、組織委員としてはうれしい悲鳴であった。会議期間中は台風27号が沖縄に接近しただけでなく28号まで発生し<sup>\*1</sup>、欠席者が増えることが心配された。しかし、実際にはほとんどキャンセルは無く、このことから参加者のこの会議への大きな期待感が感じられた。最終的な参加者は87名で、海外からの参加者は12名であった。国内の機関に在籍する外国人も含めると20名近く、全参加者の約1/4が外国人という、「国際会議」の名に恥じない雰囲気であった。

**△**議では、トポロジカル物質系についての講演・討議が行われた。特に、トポロジカル量子現象の分野の爆発的な進展をけん引しているトポロジカル

オーラルセッションの様子



絶縁体に関して、角度分解光電子分光（ARPES）や走査トンネル分光（STS）の最新の実験結果が報告され、そのほか、多くの実験や理論の講演があった。また、これらのトポロジカル絶縁体に元素をドーブして超伝導を引き起こすという興味深い研究結果も議論された。また、トポロジカル超伝導に関して、バルク系や人工微細構造系など、多くの対象が議論された。最も古くから研究されているトポロジカル物質である超流動ヘリウム3に関しては、ヘリウム3のA相でカイラリティーの直接観測に成功した実験を始めとして、幾つかの実験結果が報告されるとともに、複数の理論提案がなされた。他にも、冷却原子気体・量子ホール効果・磁性体などの系について活発な議論が行われた。また、多くの対象を包括的に理解するための理論や、それら理論に電子間相互作用を導入する試みなど、最近の進展が熱心に議論された。これ以上細かい内容は、記事が固くなりすぎるのでご容赦いただいて、もし知りたい方は周りの出席者にお尋ね頂きたい。

**△**議の大きな目的の一つは、国内外のトポロジカル物質系の研究者の横のつながりを形成するというものであった。そのために、先述のように、会議は大部分の参加者が同じホテルに宿泊して行われた。実際に、議論は、口頭発表やポスター発表だけでなくコーヒープレイクや食事の時間も随時行われ、一部の参加者が真夜中過ぎまで議論を続ける姿も見られた。このように、合宿形式の長所が十分に発揮されていた会議だと感じた。

また、参加者のつながりを深めるための企画も多々行った。初日にはGet-Together Dinnerと称してホテルの外に繰り出し、参加者に日本の居酒屋スタイルを堪能してもらった。2日目には夕食でバーベキューが予定されていたが、台風のため中止に。予め焼かれた肉をバイキング形式で食べる形になった。このときは食材が足りなくなり、筆者は焼き肉のたれをかけたご飯を食べる羽目になった（これはこれでおいしかった）。また、参加者による自発的な懇親会も每晚開かれていた。通常、このような合宿形式での研究会ではある部屋が「飲み部屋」に設定されることが多いが、今回のホテルは宿泊に関しては貸し切り状態であったため、他の宿泊客に気兼ねする必要が無く、3階廊下のロビーで懇親会をすることができた<sup>\*2</sup>。おかげで飲

み部屋のメンバーの睡眠が妨げられることもなく、より健康的な会議となった<sup>※3</sup>。あと、強風の中「海を見ながら飲むぞー（意識）」といって出て行ったグループがいたようだが、無事に帰ってきてくれてよかった。

4日目の午後に行ったエクスカージョンは沖縄の人気観光スポットである「美ら海水族館」へのバスツアーを行った。この時点では台風は沖縄から遠ざかりつつあり、強い風は残っているもののエクスカージョンは敢行することが出来た。しかし、ここで、バスを2台（2つのバス会社から1台ずつ）頼んでいたのに1台が来ないというアクシデントが発生した。バス会社とやり取りする中で、そのバスは「カヌチャリゾート」という、似て非なるホテルに行ってしまうことが判明した<sup>※4</sup>。ちなみにこの「カヌチャリゾート」は沖縄本島の中央やや北寄りに位置しており、我々の「カルチャーリゾート」からは1時間以上かかる。我々からみると、むしろ目的地の美ら海水族館の方角にあるホテルである。仕方が無いので、組織委員以外の人間をなるべく1台目のバスに詰め込んで、組織委員関係者の多くは「カヌチャ」から高速道路を引き返してきた2台目のバスで出かけた。2台目のバスのメンバーは予定していた「道の駅」での買い物などが出来なかったものの、水族館観光は無事に堪能できた。有名な大水槽はやはり迫力があってよかった。

バンケットはエクスカージョン後に行った。沖縄の料理なども含まれた立食形式で、オリオンビールと泡盛 (!) が飲み放題という、いろんな意味で沖縄気分を味わえるパーティーだった。バンケット中にはポスター賞の発表も行われた。ポスター賞は参加者からの投票を基に選ばれ、最優秀賞受賞者には Leggett 教授の教科書「Quantum Liquid」（直筆サイン入り）、優秀賞受賞者には Volovik 教授の「The Universe in a Helium Droplet」（これはサイン無し）、3位には京大名物の「素数物差し」が、それぞれ賞状とともに授与された。最優秀ポスターに選ばれたのは、なんとまだ修士1年（大阪大学）の濱崎氏であった。トポロジカル絶縁体と強磁性体を用いたデバイスという意欲的な発表内容が評価された。「（賞品の教科書を手にして）Quantum Liquid は全然分かりませんがこれから頑張ります！」と元気にあいさつされた濱崎氏の笑顔が印象的であった。今後の活躍に期待したい。

参加者からのアンケートによると、「How do you evaluate this workshop?」という質問に関して27名中19名が「Very Good」、8名が「Good」と回答し、参加者がこのワークショップを非常に高く評価していることが分かる。また、アンケート以外にも、「横のつながりが出来た」「発表の質が非常に高かった」などという意見を聞いている<sup>※5</sup>。今回は「スケジュールがきつい」という声が結構あったのだが、今回はそういったこともなく、多くの参加者の方が非常に満足して頂いたという確かな手ごたえが感じられた。

非常にアクティブな雰囲気での会議が無事に終わることができ、本当にホッとしている。会議参加者の多さや、会議での活発な議論を見ると、この分野が若い研究者を広く強く惹きつけていることが伝わってきた。こういう中にいられるというのは非常に幸せなことである。

最後ではあるが、金銭的な支援を頂いた公益財団法人京都大学教育研究振興財団および Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) にこの場をお借りして感謝したい。また、組織委員長の大役を見事に務められた水島さん、副委員長としてホテルや総括班との調整を担当された野村さん、見事なプログラムを組んでいただいたプログラム委員長の佐藤さん、分厚い概要集を完成して頂いた上野さん、エクスカージョンの仕掛け人の瀬川さん、別のホテルとの間の移動の手配など地味に大変な仕事を手掛けて頂いた小原さん、Web ページの整備だけでなく当日の現場でのこまごました仕事に飛び回って頂いた俣野さん、APCTP との連絡役になっていただいた瀧本さん、それから、会議成功の陰の立役者であった秘書の伊藤さん、本当にお疲れさまでした！

- ※ 1. 「トポロジカル欠陥の相互作用云々」と喜ぶ人もいた（結構いた）。
- ※ 2. ちなみに、2階のロビーはまじめなディスカッションスペースとなっていた。午前0時過ぎ、「3階」のメンバーは「2階ではまだフェルミレベルについて話している」と驚嘆していた。
- ※ 3. それでも朝食時には二日酔い気味の顔も散見された。
- ※ 4. 契約書をよく見ると確かに「カヌチャ」と書いてあったので、我々の方にも非があるのは間違いない。
- ※ 5. 「ビッグボスたちがいないのがすごく良かったぜ（意識）」と話してくれた人もいた。

（文責、米澤 進吾）



# INTERNATIONAL WORKSHOP FOR YOUNG RESEARCHERS ON TOPOLOGICAL QUANTUM PHENOMENA IN CONDENSED MATTER WITH BROKEN SYMMETRIES



## PROGRAM

### 22ND OCTOBER (TUESDAY)

Registration 17:00 – 19:00  
Get-Together Dinner 19:00 – 21:00

### 23RD OCTOBER (WEDNESDAY)

Breakfast 7:30 – 8:30

Chair: Kouji Segawa

Wed-0. 9:30 – 9:40

T. Mizushima (Okayama Univ.)  
"Opening"

Wed-1. 9:40 – 10:40

Satoshi Sasaki (ISIR, Osaka Univ.)  
"Conductance Spectroscopy  
on Superconducting Topological  
Insulator Families"

Break 10:40 – 11:00

Wed-3 11:00 – 11:30

Takafumi Sato (Dept. Phys., Tohoku Univ.)  
"High-resolution ARPES study of  
novel topological insulators"

Wed-4 11:30 – 12:00

Koichi Izawa (Dept. Phys., Tokyo  
Institute of Technology)  
"Identifying the node position in the gap  
function of  $U\text{Pt}_3$  in the Brillouin Zone"

Lunch 12:00 – 14:00

Chair: Kazunori Ueno

Wed-5 14:00 – 14:30

Takehito Yokoyama (Dept. Phys.,  
Tokyo Institute of Technology)  
"Odd frequency pairing in  
superconducting junctions"

Wed-6 14:30 – 15:00

Jun Sung Kim (POSTECH)  
"Quantum oscillations of Bi-based Dirac  
materials at high magnetic fields"

Wed-7 15:00 – 15:30

Vidya Madhavan (Boston College)  
"Broken symmetry and Mass acquisition  
in topological crystalline insulators"

Break 15:30 – 16:00

Chair: Kazuaki Matano

Wed-8 16:00 – 16:30

Hiroaki Kusunose (Dept. Phys.,  
Ehime Univ.)  
"Fundamental Aspect of Odd-Frequency  
Superconductivity"

Wed-9 16:30 – 17:00

Joseph Maciejko (Princeton Univ.)  
"Topological order in correlated  
topological insulators"

Wed-10 17:00 – 17:30

Ai Yamakage (Dept. Appl. Phys.,  
Nagoya Univ.)  
"Transport theory for topological  
superconductors"

Poster-A 17:30 – 19:30 (Odd Poster Numbers)

Dinner 19:30 – 21:30

### 24RD OCTOBER (THURSDAY)

Breakfast 7:30 – 8:30

Chair: Masatoshi Sato

Thu-1. 9:00 – 10:00

Kam Tuen Law (Dept. Phys., Hong Kong  
Univ. of Science and Technology)  
"BDI Class Topological Superconductors  
and Generating Correlated Spin Currents  
in Quantum Anomalous Hall Insulators"

Break 10:00 – 10:30

Thu-2 10:30 – 11:00

Shunsuke Furukawa (Dept. Phys.,  
Univ. of Tokyo)  
"Entanglement spectra in topological  
phases and coupled  
Tomonaga-Luttinger liquids"

Thu-3 11:00 – 11:30

Hiroki Ikegami (RIKEN)  
"Direct Detection of Chirality in Superfluid  
 $^3\text{He-A}$ "

Thu-4 11:30 – 12:00

Yong-Il Shin (Dept. Phys. and Astronomy,  
Seoul National Univ.)  
"Spinor Bose-Einstein Condensates with  
Skyrmion Spin Textures"

Lunch 12:00 – 14:00

Chair: Shingo Yonezawa

Thu-5 14:00 – 14:30

Youichi Yanase (Niigata Univ.)  
"Exotic superconducting phases in  
multi-orbital non-centrosymmetric  
systems: Discussions of  $\text{SrTiO}_3$   
nanostructure and  $\text{CeCoIn}_5$  superlattice"

Thu-6 14:30 – 15:00

Hong Yao (Tsinghua University)  
"Topological superconductivity close to  
type-II van Hove singularities in 2D"

Thu-7 15:00 – 15:30

Jianting Ye (RIKEN)  
"Two-dimensional Novel Electronics on  
Nanosheets"

Break 15:30 – 16:00

Chair: Tetsuya Takimoto

Thu-8 16:00 – 16:40

Michikazu Kobayashi (Dept. Phys.,  
Kyoto Univ.)  
"Topological excitations and dynamical  
behavior in Bose-Einstein condensates  
and other systems"

Thu-9 16:40 – 17:10

Akira Oiwa (Dept. Appl. Phys., Univ. Tokyo)  
"Topological superconductivity and  
Majorana Fermions in Semiconductor  
Nanowires"

Thu-10 17:10 – 17:30

Daiju Terasawa (Dept. Phys.,  
Hyogo College of Medicine)  
"Spin relaxations in  $\text{SU}(4)$  skyrmions in the  
bilayer quantum Hall system"

Dinner 18:30 – 19:30

Poster-A 19:30 – 21:30 (Even Poster Numbers)

### 25TH OCTOBER (FRIDAY)

Breakfast 7:30 – 8:30

Chair: Ryuji Nomura

Fri-1. 9:00 – 10:00

Mikhail Silaev (Institute for physics of  
microstructures of Russian Academy  
of Sciences)  
"Topological invariants and zero fermionic  
modes in superfluid  $^3\text{He}$  and topological  
superconductors"

Break 10:00 – 10:20

Fri-2 10:20 – 10:50

Takuto Kawakami (NIMS)  
"Vortices in Topological Superfluid  $^3\text{He}$ "  
Takashi Mukaiyama (Univ. of  
Electro-Communications)

Fri-3 10:50 – 11:20

"Toward realization of p-wave superfluid  
in an ultracold Fermi gas of  $^6\text{Li}$  atoms"  
Oleg Tretiakov (IMR, Tohoku Univ.)  
"Topologically Protected Domain-Wall  
Dynamics in Ferromagnets and  
Antiferromagnets"

Fri-4 11:20 – 11:50

Lunch in bus & Excursion 12:00 – 19:00

Banquet 19:30 – 21:30

### 26TH NOVEMBER (SATURDAY)

Breakfast 7:30 – 8:30

Chair: Takeshi Mizushima

Sat-1. 9:00 – 10:00

Shinsei Ryu (Dept. Phys., Univ. Illinois)  
"Symmetry-protected topological phases  
and generalized Laughlin's argument"

Break 10:00 – 10:20

Sat-2 10:30 – 11:00

Takashi Oka (Dept. Appl. Phys.,  
Univ. of Tokyo)  
"Floquet theory of photo-induced  
topological phase transitions"

Sat-3 11:00 – 11:30

Christopher Bell (SLAC National  
Accelerator Laboratory)  
"Low density, high mobility 2D  
superconductivity and magnetism"

Sat-4 11:30 – 11:50

Masafumi Udagawa (Dept. Appl.  
Phys., Univ. of Tokyo)  
"Topological defects in pyrochlore  
conductors"

Sat-5 11:50 – 12:00

Ryuji Nomura (Dept. Phys., Tokyo  
Institute of Technology)  
"Final Remark"

INTERNATIONAL WORKSHOP FOR YOUNG RESEARCHERS ON  
 TOPOLOGICAL QUANTUM PHENOMENA IN  
 CONDENSED MATTER WITH BROKEN SYMMETRIES  
 POSTER PRESENTATION



- P-01 Y. AKAGI (Dept. Appl. Phys., Univ. Tokyo)  
 "Magnon Hall Effect in a Chern Insulator with Spin Scalar Chiral Ordering"
- P-02 M. ANWAR (Dept. Phys., Kyoto Univ.)  
 "Dynamic behavior of Nb/Ru/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> junctions"
- P-03 G. EGUCHI (Grad. School of Eng. Sci., Osaka Univ.)  
 "Phonon anomaly and anisotropic superconducting gap in non-centrosymmetric Li<sub>2</sub>(Pd<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>)<sub>3</sub>B"
- P-04 A. FUKUDA (Dept. Phys., Hyogo College of Medicine)  
 "Kosterlitz-Thouless-type pseudospin transition in the n = 1 bilayer quantum Hall state"
- P-05 J. GOUCHI (Grad. School of Mater. Sci., Univ. of Hyogo)  
 "Josephson effect in the multiple superconducting phases of UPt<sub>3</sub> under pressure"
- P-06 T. HAMASAKI (Grad. School of Eng. Sci., Osaka Univ.)  
 "Fabrication of ferromagnetic/topological insulator spin devices for detection of spin current in topological surface state"
- P-07 T. HASHIMOTO (Dept. Appl. Phys., Nagoya Univ.)  
 "A Calculation of the Electronic States for the Topological Crystalline Superconductor"
- P-08 S. HAYAMI (Dept. Appl. Phys., Univ. Tokyo)  
 "3D Dirac Electrons and Peculiar Surface States on a Cubic Lattice"
- P-09 R. ISHIGURO (CEMS, RIKEN)  
 "Time Reversal Symmetry Breaking in SQUID with Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>, Nb and Nb/Ru/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> junctions"
- P-10 H. IWASAWA (Hiroshima Univ.)  
 "Spin-resolved ARPES study in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"
- P-11 J. KASAI (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "Visualizing topological objects in superfluid <sup>3</sup>He by "MRSI" technique"
- P-12 Y. KIMURA (Grad. School of Sci., Osaka City Univ.)  
 "Half-Quantum Vortices between Parallel Plates in Superfluid <sup>3</sup>He-A Phase"
- P-13 S. KOBAYASHI (Dept. Appl. Phys., Nagoya Univ.)  
 "Symmetry protected nodes in topological crystalline superconductors"
- P-14 M. KOMATSU (Tsukuba Univ.)  
 "Effect of Te Substitution on Se in Superconducting Topological Insulator Cu<sub>0.22</sub>Bi<sub>1.78</sub>(Te,Se<sub>1-x</sub>)<sub>3</sub>"
- P-15 K. KONDO (Grad. School of Sci., Osaka City Univ.)  
 "Odd-Frequency Cooper Pairing in Liquid <sup>3</sup>He at Aerogel Interface
- P-16 T. KUNIMATSU (Grad. School of Sci., Osaka City Univ.)  
 "Textures of chiral superfluid <sup>3</sup>He-A phase and detection of Intrinsic Angular Momentum"
- P-17 D. KUREBAYASHI (IMR, Tohoku Univ.)  
 "Weyl semimetal phase in solid-solution zero-gap semiconductors"
- P-18 K. KURODA (Grad. School of Sci., Hiroshima Univ.)  
 "Bulk carrier manipulation of ideal topological insulator TlBiSe<sub>2</sub> in reversible spin current regime "
- P-19 B. LI (Kyushu Univ.)  
 "Vortex-Antivortex-Pair Lattice in Spin-Orbit Coupled Bose-Einstein Condensates "
- P-20 Y. MASAKI (Dept. Phys., Univ. Tokyo)  
 "Impurity Effect on Levels Bounded in a Vortex Core in Topological Superconductors"
- P-21 K. MATANO (Dept. Phys., Okayama Univ.)  
 "NMR/NQR studies on non-centrosymmetric and locally non-centrosymmetric superconductors"
- P-22 F. MATSUDA (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "DMRG study of interacting bosons in optical lattices: Topological aspects of quasiperiodic systems"
- P-23 J. MATSUNO (RIKEN,CEMS)  
 "Tuning of the spin-orbit Mott state by using artificial superlattices"
- P-24 T. MIZOGUCHI (Dept. Phys., Univ. Tokyo)  
 "Unique spin Hall effect due to the combination of orbital degrees of freedom and inversion-symmetry breaking"
- P-25 T. MORIMOTO (RIKEN)  
 "Topological classification with additional symmetries from Clifford algebra"
- P-26 Y. MORIOKA (Grad. School of Sci., Osaka City Univ.)  
 "Texture Transition of Superfluid <sup>3</sup>He-B phase in Aerogel"
- P-27 M. NAKAGAWA (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "Topological Kondo insulator in cold-atomic systems: proposal for dynamical realization"
- P-28 R. NAKAI (WPI-AIMR, Tohoku Univ.)  
 "Thermal conductivity of the surface of topological superconductors"
- P-29 S. NAKOSAI (Dept. Appl. Phys., Univ. Tokyo)  
 "p-wave superconducting states with magnetic moments on a conventional s-wave superconductor"
- P-30 J. NASU (Dept. of Appl. Phys., Univ. Tokyo)  
 "Topological characterization of a finite-temperature phase transition in a 3D extension of the Kitaev model"
- P-31 R. NOMURA (Dept. Phys., Tokyo Inst. Tech.)  
 "Observation of Surface Majorana Cone of Superfluid <sup>3</sup>He B Phase"
- P-32 M. NOVAK (ISIR, Osaka Univ.)  
 "Phase diagram of Sn<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Te - a Topological Superconductor candidate"
- P-33 A. OHMURA (Niigata Univ.)  
 "Pressure-induced Superconducting Transition in Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se"
- P-34 A. PRZYSIEZNA (University of Gdansk)  
 "Self-organization of nontrivial lattices for topologically insulating states"
- P-35 K. SAITOH (AIST)  
 "Josephson effect and junction-size dependence of Nb/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> in-plane junctions"
- P-36 M. SATO (Dept. Appl. Phys. Nagoya Univ.)  
 "Symmetry Protected Majorana Fermions"
- P-37 K. SEGAWA (ISIR, Osaka Univ.)  
 "Ionic-liquid gating experiment on topological insulators"
- P-38 T. SEKIHARA (Dept. Phys., Univ. Tokyo)  
 "Two-dimensional superconductivity with broken inversion symmetry in one-atomic-layer metal films on cleaved GaAs surfaces"
- P-39 A. SEKINE (IMR, Tohoku Univ.)  
 "Strong Coupling Analysis of a Correlated Three-Dimensional Topological Insulator"
- P-40 Y. SHIMIZU (IMR, Tohoku Univ.)  
 "Quantum thermal Hall effect of Majorana Fermions on the surface of a topological superconductor"
- P-41 K. SHIOZAKI (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "Electromagnetic and Thermal Responses of Z Topological Insulators and Superconductors in Odd Spatial Dimension"
- P-42 T. SHIRAIISHI (Dept. Appl. Phys., Nagoya Univ.)  
 "Josephson current in Topological Superconducting nanowire"
- P-43 A. SHITADE (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "Thermal Transport and Field Theory in a Curved Spacetime"
- P-44 H. SUMIYOSHI (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "Giant Nernst Effect due to Chiral Superconductors Fluctuations"
- P-45 Y. SUZUKI (Tsukuba Univ.)  
 "Magnetoresistance and Hall effect measurements of Bismuth Selenides"
- P-46 K. TAGUCHI (Dept. Appl. Phys., Nagoya Univ.)  
 "Magnetoresistance in a junction of two ferromagnets on the surface of topological insulators"
- P-47 M. TAKAHASHI (Gakushuin Univ.)  
 "Devil's Staircase Structure of the FFLO Phases in Two-Band Superconductors"
- P-48 O. A. TRETIAKOV (IMR, Tohoku Univ.)  
 "Magnetolectric Effect in Topological Insulator Films Beyond Linear Response Regime"
- P-49 Y. TSUTSUMI (RIKEN)  
 "UPt<sub>3</sub> as a Topological Crystalline Superconductor"
- P-50 Y. UENO (Dept. Appl. Phys., Nagoya Univ.)  
 "Topological crystalline superconductor : Theory and Application to Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"
- P-51 Z. WANG (Sun Yat-Sen University)  
 "Fidelity in topological superconductors with end Majorana fermions"
- P-52 L. WU (WPI-MANA, NIMS)  
 "Spin-selective topological insulator from antiferromagnetic order"
- P-53 F. YANG (ISIR, Osaka Univ.)  
 "The gating of topological insulator thin films and exfoliated crystals"
- P-54 S. YONEZAWA (Dept. Phys., Kyoto Univ.)  
 "Specific-heat and magnetocaloric-effect study of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>"
- P-55 T. YOSHIDA (Dept. Phys., Kyoto University)  
 "Correlation effects on edge states in an extended Su-Schrieffer-Heeger model"



## ●第7回 物性科学領域横断研究会

2013年12月1日ー12月2日

(東京大学武田先端知ビル)

東京大学根津キャンパス、武田先端知ビルにて2013年12月1-2の日程で開催された。参加領域は「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」、「分子アーキテクニクス」、「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」、「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」、「原子層科学」、「コンピューティクスによる物質デザイン」の6領域の共催による。また同時に凝縮系科学賞授賞式&受賞講演も執り行われた。

まず秋光純氏のあいさつに続き、佐野雅己氏のゆらぎと構造の協奏領域のレビューが行われた。非平衡状態を記述する定理として、アインシュタインの関係式、揺動散逸定理、揺らぎの定理の関係が示され、ミクロとマクロの取り扱いの違いなど、より一般的な立場からの相転移に関して明快な説明が示された。小林研介氏は「固体素子における非平衡ゆらぎ」について解説を行い、電流揺らぎの中に現れる非平衡雑音であるショットノイズに関して、固体素子での測定データ、およびスピンショットノイズという新しい概念についての明快な説明を行った。水野大介氏は「生き物の非平衡揺らぎの統計分布と力学特性」について、ミオシンの生成脱離をベースにして、非平衡ゲル中における非平衡揺らぎはTruncated Levy分布に従うことを示した。

分子アーキテクニクス領域に関しては、冨田博一氏が領域レビューとして、分子エレクトロニクスの展望と分子レベルでのゼーベック係数測定など、浅井美博氏は「非平衡量子伝導理論の進展-単分子接合計測実験との比較-」として、第一原理芸さんによる分子レベルのZT係数やブレークジャンクションの最新の進展に関して、葛西誠也氏は「ゆらぎと共存する非線形デバイス」としてストキャスティック共鳴の応用によるバイオ計算およびアメーバアルゴリズムという新しい概念に関して解説した。

2日目のトポロジカル量子現象領域に関しては、前野悦輝氏が領域レビューとして、Great topological expansionの展望、柏谷が $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ におけるトポロジカル超伝導性の実験的な検証に関して、また上田正仁氏は「冷却原子気体におけるトポロジカル量子現象」について、BECのフェッシュバハ共鳴のチューニングを用いたトポロジカル構造の実現と理論との比較に関する解説を行った。

超低速ミュオンに関しては、鳥養映子氏が領域レビューを行い、JPARCに構築される最高性能ミュオン顕微鏡を用いた内部場、分布揺らぎの可視化に関して、髭本亘氏は「マイクロミュオンビームによる磁性と超伝導研究」に関して、Ru系やかご状物質の特性に関して $\mu\text{SR}$ による超伝導観察のレビューを行った。下村浩一郎氏は「 $\mu\text{SR}$ 法で探る半導体・絶縁体中での水素

電子状態」に関して、孤立水素の観察を通して $\text{SrTiO}_3$ や $\text{TiO}_2$ などの特性に関する結果を解説した。

原子層科学領域は長汐晃輔氏が領域レビューを行い、グラフェンによるactiveデバイスの展望やポテンシャルに関して説明し、特にヘキサゴナルBN上のグラフェンを中心とした研究展開を説明した。越野幹人氏は「強磁場中原子薄膜のエキゾチックな電子物性」としてtwisted bilayer grapheneなどについて、また山本倫久氏は「グラフェン超伝導接合とバレー分裂」として、鏡面アンドレーエフ反射やバレーホール効果の観察への展望などの解説を行った。

最後にコンピューティクス領域に関しては、押山淳氏が領域レビューを行い、計算の性能に合わせた最適化の戦略に関して、常行真司氏は「第一原理からの熱科学：非調和格子振動のモデリングと熱伝導計算」としてナノ構造体の熱伝導を第一原理計算により求める試みに関して、また矢花一浩氏は「高強度パルス光と物質の相互作用に対する第一原理計算」として、光の強度が強まることによる物質との相互作用とダイナミクスを、シミュレーション結果に基づいて明快に解説した。

並行して行われた第8回凝縮系科学賞は、13名の候補者の内、実験部門では東北大金研の内田健一氏が「スピンゼーベック効果の発見とスピン熱流物理の展開」、理論部門では電通大の伏屋雄紀氏が「固体中ディラック電子系の量子輸送現象の理論的研究」が受賞者に選ばれた。自薦他薦の違いや論文誌の違いは全く考慮せず、純粹に論文の内容が評価されたことと選考の経緯が説明され、凝縮系科学賞の価値を再認識した。授賞式に引き続いて行われた受賞記念講演では、受賞された両氏ともに研究の契機や理解について独自の視点から説明があった。例えば、スピンゼーベック効果のファインマンラチェットとの類似性や、熱力学的な反磁性電流と定常非平衡現象としての輸送現象の関係などが説明され、記念講演ならではの興味深い話が聞けたことが印象的であった。クロージングには、福山秀敏氏が学術会議の夢ロードマップと新学術領域研究の内容を比して、若い研究者が広い分野への視野を有することの必要性を訴えた。

全体として、従来の凝縮系の流れに基づく研究のみならず、生体の揺らぎにまで踏み込んだ新しい分野への広がりも示され、同時に行われたポスター発表も大変質が高く、時間を超えても各所で議論が続けられるほどの盛り上がりであり、個人的には大変勉強になった研究会であり、来年度以降の開催に関しても大いに期待される。

(文責、柏谷 聡)

## ● CIFAR 報告

2013年5月6日ー5月11日

(バンクーバー)



バンクーバーの街並み。街中でも自然が多く、背後には雄大な山々がそびえる。

近藤、橋本、山影の三人は、2013年5月6日から11日にかけて、バンクーバーの Coast Plaza Hotel & Suites にて開催されたカナダ高等研究機構 (CIFAR) Quantum Materials のサマースクール (6日ー8日) と国際会議 (9日ー11日) に海外の関連プロジェクトとの連携の一環として派遣された。本稿ではそのときの様子を紹介する。

日本から9時間、飛行機の窓から見えたのは森の木々とビルが織りなす自然豊かな街並と壮大な山脈であった。ホテルの近くには、東京ドーム300個分もの広大なスタンレーパークがあり、野生のリスや白鳥、アライグマ、そして、ビーバーまでもが生息しており、都会の真ん中とは思えないほど自然が広がっている。バンクーバーは普段曇りが多いらしいが、我々がバンクーバーに滞在した1週間は天候に恵まれ、とても過ごしやすい日々だった。

CIFAR Quantum Materials はナノ・メソスコピック系から銅酸化物・鉄ヒ素超伝導体などの強相関系までの物性物理の多彩な分野を含んでおり、参加者の専門・興味も多様である。したがってサマースクールの講義を成功させるには一筋縄ではいかないように思われた。しかし、予想を遙かに超えて、サマースクールのプログラムは非常にうまくつくられていた。講義は基礎的な事項から各論までバランス良く構成されており、その内容も入念に準備されていた。各講師は入門的なテキストブックの第1、2章に相当する内容を一時間かけてじっくり、また、独創的な説明の仕方でも講義されていた。近藤は $^3\text{He}$ の実験研究を行っているが、講義の中ではトポロジカル超流動など $^3\text{He}$ と関連した話題にも触れていたのでもって参考になった。橋本は普段、理論研究を行っているので、ARPES や STM などの実験方法を詳しく聞けたのは勉強になった。山影はトポロジカル絶縁体・超伝導体の理論が専門であるが、出身の研究室は強相関 $f$ 電子系の研究室であり、強相関電子・磁性の講義などは学生の頃を思い出した

つとでも面白く聞くことができた。9日からは、メインの会議が開始した。トポロジカル絶縁体、超伝導体の研究を行なっている橋本にとっては、Franz 教授の Weyl semimetal の話は興味深かった。ポスター発表では、研究に関連のある人から、たまたま知り合った人まで、多くの人に興味を持っていただけた。多くの人とディスカッションでき鍛えられたと感じている。

このスクールの会議の特徴として、キャリアパスについてのパネル討論会がある。あらかじめ質問を受け付けておき、そのテーマに沿って企業研究者、大学教員等のパネリストがコメントするという形式で進められた。多くの質問は物理学の研究者として生き残っていけるか、物理学を学んで何に活かせるのかという不安からのものであり、こうした状況は世界共通のようである。日本の多くの大学では博士課程進学者の減少が問題になっている。一方で、海外では雇用に関する年齢による差別などは少なく、博士課程卒業者の雇用の窓口がある程度広い。日本の大学で度々議論されるこのような問題を解決する窓口の一つは、グローバル化にあるのかもしれない。なお、もちろんであるが、パネル討論会で結論が一つに収斂されたわけではなく、その主な目的は、現状の認識と共有であった。

会議は午後5時半に終わるが、この時期のバンクーバーは日が長い。夕食としてビーチ沿いのオープンレストランで食べたフィッシュアンドチップスはとてもおいしかったが、7時だというのに日差しが強くなかなか厄介であった。夜9時になりようやく日が沈む。このときの、スタンレーパークからみる紫色に染まるダウンタウンの景色はとても神秘的だった。

海外で行われる国際会議に出席するのは初めてで、あらゆるものが新鮮でよい体験でした。新学術領域および CIFAR の皆様にはこのような貴重な機会をいただき、この場を借りて改めてお礼申し上げます。

(文責、近藤 健二・橋本 樹・山影 相)

ポスタープレビューの様子。左から 近藤・橋本・山影。



## 今後の会議予定

## ●集中連携研究会

第16回集中連携研究会：2014年6月14日（土）－6月16日（月）予定  
2014年度、更に2回程度開催予定。

## ●第8回物性科学領域横断研究会

2014年11月に開催予定。

## ●領域国際会議（TQP2014）

日時：2014年12月16日（火）－12月20日（土）  
会場：京都大学 百周年時計台記念館

詳細は決定し次第、ウェブサイト上で告知します。

本領域ウェブサイトでは、研究の詳細、研究会情報、市民向け科学講座ページなどを紹介しています。  
ぜひご来訪ください。

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

The screenshot shows a web browser window displaying the website for the Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries research group. The page layout includes a sidebar with navigation links such as 'ホーム', '理念・目的', '研究概要', 'メンバー', '研究イベント', '最新のページ', '研究成果', '募集', 'トピックス一覧', 'リンク集', 'お問い合わせ・その他', and 'メンバー専用'. The main content area features a large image of three interlocking rings (red, yellow, blue) on a grid background, with mathematical equations  $A_{ij}(k) = \sum_{\alpha} U_{i\alpha}(k) U_{j\alpha}^*(k)$  and  $\chi_{\text{max}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\text{BZ}} F_{ij}(k)$  displayed. Below the image is a 'トピックス' section with a list of recent news items, including reports on experiments at the Institute of Physics and the Japanese Physical Society. The footer contains copyright information for the year 2014.

## アメリカ滞在記

水島 健 / 岡山大学自然科学研究科 数理物理学専攻 助教



2012年10月から2013年3月までの半年間、イリノイ州のエバンストンにあるノースウェスタン大学のJames Sauls氏の研究室に滞在する機会を得ました。2013年の夏にもエバンストンを再訪して数週間滞した後、Sauls氏が主催するコロラド州アスペンでの滞在型ワークショップにも3週間参加しました。ここでは、現地での研究や生活環境等について紹介します。固い内容では無いので、コーヒー片手に軽く目を通していただければ幸いです。

### きっかけ

きっかけは、2012年3月にスロバキアで開催されたヨーロッパのプロジェクト「Microkelvin」の報告会でした。この研究会は、首都のブラチスラバから北東に60kmほどいったところにあるスモーレニス城という中世の古城が会議場兼宿泊施設という非常にユニークなものでした。ナノ物理やトポロジカル超伝導をキーワードとした研究会で、日本からは野村竜司さんも招待されていました。その研究会にて、超流動 $^3\text{He}$ のトポロジカル相についての講演をした直ぐ後にSaulsさんが駆け寄ってきて議論したのが今回の滞在のきっかけでした。いきなり、「長期間うちに来られないか?」、「いつから?どのくらいの期間来られるか?」と矢継ぎ早に聞かれ、その場で話がどんどん進んでいったのを覚えています。

Saulsさんは $^3\text{He}$ や重い電子系等の超伝導特性や輸送現象の解明や準古典理論の発展に多大な貢献をされてきた方です。また、多くの研究者を輩出されています。準古典理論はフェルミ液体論の超伝導・超流動版といったもので、フェルミ面近傍の電子状態のみに

注目した理論です。超流動・超伝導の界面・表面や磁束渦の電子状態や輸送現象を定量的に研究するための非常に強力な手法ですが、私がかつと研究対象としていた冷却原子気体には適用できないこともあり、個人的にはあまりなじみの無かった理論でした。この機会に準古典理論を自分のものにして、さらには超流動 $^3\text{He}$ や超伝導物質系に見識を広めるためにも今回の滞在を決めました。帰国後に運良く学内の公募に採用され、10月から渡米することになりました。

### エバンストンとシカゴ

ノースウェスタン大学があるエバンストンは、シカゴの直ぐ北に隣接した小さな自治体です。2009年にQFSの会議が同大学で開催されたので、ご存知の方も多いと思われます。ミシガン湖に面した大学を中心に住居やスーパー・レストラン等の生活圏も徒歩圏内に集中しており、非常にまとまった生活しやすい街です。街の人も非常に温厚な人が多いという印象で、治安等の心配も全くありませんでした。現地では妻と一緒にスポーツジムに通う等、エバンストンライフを満喫しているようでした。シカゴのダウンタウンまでは地下鉄で40-50分で結ばれており、滞在期間中はほぼ毎週末ダウンタウンに繰り出していました。シカゴ周辺にはカナダから流れてくる寒気を遮る山等がなく、冬場の気温は常に-10度近くです。さらにシカゴは「風の街」と呼ばれる程に風の強いところのため、冬場の体感温度は恐ろしいものでした。一方で、美術館や博物館等の屋内施設が充実しており、冬場でも十分に楽しめました。また、シカゴには移民が多いためか、いろんな国の料理や豊富な種類の地ビールやビール醸造所があり、ビール好き・食べ歩き好きとしては非常に楽しいところでした。おかげで帰国後はしばらく体重計に乗れませんでした...



冬はちょうどアメフトのシーズンでした。アメフト部はあまり強くはないようですが、ファンは熱狂的です。スタジアムは大学のカラーである紫で覆われます。

## ノースウェスタン大学での研究

ノースウェスタン大学は 1851 年に創立された私立の総合大学です。冬に訪れたときにはミシガン湖は凍っており、キャンパスも寒々しい印象しかありませんでしたが、夏に再訪した際にはキャンパスは緑に覆われており、そこから眺めるミシガン湖の風景は格別なものでした。ノースウェスタン大学には「ケログ」と呼ばれる世界的にも有名な経営大学院があり、日本人も多く留学しているようです。理学部物理学科には NMR を用いた超流動・超伝導研究を行っている William Halperin 氏や超流動  $^3\text{He}$  の重鎮である John Ketterson 氏らが在籍しており、理論グループと密接に共同研究を進めています。滞在期間中も何度か共同ミーティングに参加させていただきました。凝縮系理論グループは Sauls さんの他に、若手の Assistant Prof. の Jense Koch 氏と Leggett-Garg 不等式で有名な Anupam Garg 氏が所属しています。私が訪問したときには 2 名の PD と 10 名ほどの大学院生が理論グループに在籍していましたが、学生の半数以上は中国からの留学生でした。彼らは非常に熱心で、一回りほど年齢は違いますが、彼らとの議論からたくさん刺激を受けました。

今回の滞中に際して、私の方からは「制限空間中の超流動  $^3\text{He}$  におけるスピンドYNAMICS」という研究テーマを持っていきました。制限空間中の超流動  $^3\text{He}$  では系の厚さや磁場等によって多重トポロジカル相転移が起こります。また、非自明なバルクトポロジーに起因したイジング的な磁気応答やスピン流の存在が理論的に予言されており、トポロジカル量子現象の宝庫です。一方で、このような量子現象は主に表面近傍のサブミクロンスケールの領域で現れるため、局所的なプローブ法の確立が急務の課題です。現地で Sauls さんと議論していく中で、スピンドYNAMICSに加えて、ゼロ音波も表面マヨラナ状態のプローブとして有効だろうということがわかりました。密度揺らぎである縦波ゼロ音波は表面マヨラナ状態とは結合しませんが、



エバンストン郊外で開催されたラビーニャ野外音楽祭の前に研究室のメンバーでピクニック... ですが、何故か Sauls さんが書き上げたばかりの論文を持ってきて、「さあ、物理の話を始めよう」となりました。

一方で、横波ゼロ音波はクーパー対の集団励起を媒介しながら伝搬するカレントの揺らぎです。しかもその波長はコヒーレンス長と同程度であるために、表面状態のプローブとして十分に使えることが期待されます。今回の滞在中のテーマとして、サブミクロンスケールの空間変化を取り込んだ非平衡ダイナミクスの研究を進めました。この研究はドメイン構造・量子渦へ拡張や、さらには、超伝導体での非平衡ダイナミクスの研究へ発展させることができると期待しており、中長期的に取り組めるテーマであると考えています。

滞在中は常に Sauls さんや研究室メンバーからの暖かいサポートがありました。クリスマスディナーや野外音楽祭など、様々な行事に誘って頂いたおかげで楽しい思い出ができました。特に、Sauls さんのスリルのあるドライブは印象深い思い出の一つです。かなりスピードを出す上に、助手席や後部座席に座っている私や妻の方に体を向けてしゃべりかけてきます... おそらく私たちの英語力が拙いためだと思いますが、こちらとしては会話どころではなく、ハラハラとしたのを思い出します。また、音楽祭からの帰路ではスピード違反で捕まってしまいました。何卒、安全運転で。

## アスペン

2013年の夏にエバンストンを再訪した後に、コロラド州アスペンにある物理学センターで開催された滞在型ワークショップに参加する機会がありました。このワークショップはSaulsさんとEgor Babaevさんが主催したもので、多成分超流動・超伝導やトポジカル超伝導がキーワードでした。ワークショップ中は定期的にセミナーが行われ、私も多成分超伝導体でのFFLO状態について講演しました。中でも、超流動 $^3\text{He}$ でのマヨラナ粒子の観測について熱心に議論され、Suk-Bum ChungさんやSaulsさんが理論面から講演した後に、超流動 $^3\text{He}$ の実験家であるJohn Saundersさんが実験の現状と展望について詳細に解説されました。このワークショップの特徴は講演が基本的に黒板で行われるということにあり、そのため聞く方としても内容を理解しやすかったです。また、滞在中は各自に机と黒板が与えられ、定期的なセミナー以外は自由に研究するもよし、他の人に議論を吹っかけるもよしといった環境です。研究者にとっては天国のような環境で、エバンストンから持ち込んだ研究テーマを色々な人と議論しながら進めることができました。

アスペンはロッキー山脈の中の標高2,400mにある小さな町です。夏は避暑地、冬はスキーのために、主に裕福層や有名人が別荘を構える高級リゾート地だそ



アスペン物理学センター。アスペンの樹々に囲まれた静かな場所で、天気の良い日は芝生の上で研究をする人も多かったです。



休日の山登りメンバー：左から Agterberg、Fogelstrom、Vorontsov。皆さん相当な健脚です。

うです。私が滞在した8月終わりから9月は観光シーズンからはずれていたために町は比較的静かで、気候もやや肌寒かったです。物理学センターは町のはずれの、アスペンの樹々に囲まれた綺麗な場所にあります。周りは4,000m近くの山々に囲まれており、町からは幾つものトレイルが郊外や山の中に延びています。センターからはマウンテンバイクが貸与されるので、週末はサイクリングやハイキングを楽しむことができ、研究の合間に良いリフレッシュができました。Saulsさんはこの近くの出身らしく、色々良い観光スポットを紹介してもらいました。また、センターでは毎週、BBQなどのような家族と楽しめるイベントが用意されており、家族に対してもケアが行き届いたしっかりとした運営体制が整っていると感じました。このような施設を是非日本にも、と切に願っています。

## 最後に

滞在期間中はSaulsさんやPDのDavid Fergusonさん、大学院生のHao Wuさんに公私共々大変お世話になりました。大学やエバンストンでの生活について相談に応じて頂きました。今回の滞在の一番の収穫は、様々な研究者と出会うことができ、多くの刺激を受けたことです。このような機会を与えていただいた岡山大学と、不在中の業務を快く引き受けて頂いた市岡優典教授に感謝致します。

## アンドレーエフ束縛状態を研究して 田仲 由喜夫 / 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

前野さんをはじめ総括班、トポロジカル事務局の皆様のおかげで、新学術領域研究も順調に進み、先日は名大で領域研究会が実施されました。素晴らしい発表が口頭発表・ポスター発表で行われ、参加していただいた皆様に深く感謝しています。今では超伝導のエッジ状態というのは広く使われるようになっていますが、25年前から見るとずいぶん発展したように感じています。私が大学院の修士のころは、アンドレーエフ束縛状態 (ABS) は決して familiar な概念ではなく、修士論文を纏める際に、BdG 方程式を中嶋先生の教科書で勉強して式のチェックをして理解するのに相当苦労しました。特に6章は複雑で、スピンの添字まできちんとチェックするのは容易なことではなかったように記憶しています。今から思うと物理的イメージがなかったのですごくしんどかったです。またマクミランの近接効果の論文を読んで、(非トポロジカルな) ABS の計算を確認しましたが、この当時は電子ホール空間に拡張された量子力学の演習問題以上の意味は感じることはできなかったです。

その後、92年に超伝導量子ドットの計算を行った際に、磁束の本数で(ほぼ)零エネルギー状態がでたりでなかったりする偶奇則には気付き ABS には何かがあるように感じたのですが、とてもトポロジを議論することはできませんでした。94年以降柏谷さんと  $d$  波のトンネル効果の研究を行って、符号変化という直観的な描像でミッドギャップ ABS が整理される事を解明したのは一つの転機でした。 $d$  波のトンネル効果、ジョセフソン効果の研究を発展させて、カイラル  $p$  波超伝導のトンネル効果の計算を97年に行うことができました。しかし、エッジ状態としてのトポロジカルな理解は、当時は十分ではなかったです。00年に当時 NTT の高柳さんがメゾスコピック国際会議を開き、その後アンドレーエフ反射をアニメーションで紹介するわかりやすいビデオを作られたことで、直観的な理解が普及したように感じています。この会議に刺激されて、研究を拡散伝導領域に拡張しようと思い、Nazarov さんと拡散伝導領域・異方的超伝導体接合の理論の研究

を始めました。この研究が発展して、スピン3重項超伝導体の近接効果は非常に異常なものであることがわかりました。しかし、直観的な理解を得ることは04年の段階では難しく、国際会議などで話しても中々浸透しませんでした。その後、Golubov さんとの共同研究で異常な近接効果の正体が奇周波数ペアとして理解されることが明らかになり、格段に面白くなりました。上田さんらとの議論によって、奇周波数ペアが対称性の破れという観点で広く存在することが明確になり、様々な問題を見通し良く整理することができるようになったと思います。また東谷さんらの計算で、超流動ヘリウム3において奇周波数ペアによる異常な近接効果が存在することも予言され、超流動研究の新しい流れになっていると思います。

2008年ごろ、トポロジカル超伝導の流行が日本に浸透してきて、笠さん、古崎さんらの有名な周期表の論文が発表されました。マヨラナフェルミオンという概念が盛んに議論されるようになり、永長さんのグループといくつかの論文を書くきっかけとなりました。今の理解は、マヨラナフェルミオンとは特殊な ABS に他ならず、マヨラナフェルミオンがいるときは必ず奇周波数ペアは存在するということだと思っています。特に半導体ナノワイヤを超伝導体にのせた系での浅野さんの計算でこの点は顕著に示されていると思います。また、安藤さんが実験的に明らかにした超伝導トポロジカル絶縁体の ABS は複雑な分散を持ち、フラット、カイラル、ヘリカルでは整理されない新種のものであるように思います。最近院生の橋本さんの行っている超伝導ミラー結晶絶縁体の ABS をプロットした図をみて、大変に複雑なのに驚きました。まだ私はよくわからないので、ぜひ理解したいと思います。80年代に比べると、はるかに ABS の理解が進んだと思います。背後に対称性の破れとトポロジカル不変量があり、1つの計算結果でも見方を変えるとより深くより楽しく理解できるように感じています。

本領域の研究費によって得られた成果を出版される際には、以下の例文にありますような謝辞をお願いいたします。スペースが許す限り、なるべく（1）でお願いします。ただし以下で課題番号は、A01: 22103002, B01: 22103003, C01: 22103004, D01: 22103005, 公募研究: 25103701 - 25103724 です。

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

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

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

編 集

後 記

関東では記録的な大雪が降って、外を見るとまだ完全な雪景色です。雪のピークの時間にちょうど長距離移動が重なって、雪国の地吹雪に出会ったように、街中で遭難するのではないかというような大変な思いをしました。そんな悪魔のような雪でも、一つ一つの結晶を見ると、すばらしい美しさに目を引かれます。Wiki で雪の結晶の研究を調べてみると、その歴史は大変古く、紀元前の書物にすでに記載があるそうです。有名なベントレー氏の美しい写真や、中谷宇吉郎氏のすばらしい研究は、小学生でも良く知られております。このように物の形状を学問しようとする研究は大変歴史があります。これは人間の視覚が、規則性を美しいと認識する直感的能力を持っているからではないかと思えます。一方形状の視覚的トリックを使ったエッシャーの作品は、我々の直感的理解が如何に錯覚にとらわれやすいのかという典型例としてよく使われます。

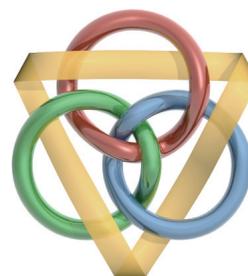
本学術領域のトポロジカル量子現象の研究も、まさしく形状の分類に起源を発しており、それが凝縮系物理における常識と反したマヨラナ粒子や非可換性などの検証まで広がっている世界観の確立を目指しております。このような先進的な概念が、エッシャーの絵のように単なる錯覚で終わってしまわないためには、まだまだ多くの努力が必要です。残りの研究期間を、気を引き締めて進めていかねばと思っております。

本ニュースレター冊子の制作に当たっては、筆者の方々に多大なる手間をおかけしておりますので、ここに謝意を申し上げます。またレイアウトを行っていただいた児玉知子さんには、大変長い時間を割いてすばらしい冊子に仕上げてください、また共同編集者の田仲由喜夫さん、齋藤広大さん、山影相さんにも大変なご苦勞をおかけしました。ここに心よりお礼申し上げます。

(文責、柏谷 聡)

# NEWSLETTER No.4

領域ロゴの意味するもの



- 2 巻頭言  
最終年度へ向けて / 安藤 恒也 (領域アドバイザー)  
時間反転と鏡面反転 / 前野 悦輝 (京都大学)
- 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  
前野 悦輝 (京都大学) / 紫綬褒章  
山影 相 (名古屋大学) / 第8回日本物理学会若手奨励賞  
岩澤 英明 (広島大学) / 第8回日本物理学会若手奨励賞
- 15 トピックス  
スピン三重項超流動体の固有軌道角運動量 / 石川 修六 (大阪市立大学)  
奇周波数クーパー対の磁気応答 / 東谷 誠二 (広島大学)  
 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のトポロジカル超伝導性とトンネル効果 /  
柏谷 聡 (産業技術総合研究所)
- 24 公募班研究紹介 (A01~D04)
- 45 2013年ピックアップトピックス
- 46 若手相互滞在プログラム報告  
小沢 英之 (名古屋大学) / 塩崎 謙 (京都大学)
- 48 2013年度研究会報告  
第11回~第15回集中連携研究会 / 第4回領域研究会 / 若手国際会議  
第7回物性科学領域横断研究会 / CIFAR 報告
- 63 お知らせ  
今後の会議予定
- 64 コラム  
アメリカ滞在記 / 水島 健 (岡山大学)  
アンドレーエフ束縛状態を研究して / 田仲 由喜夫 (名古屋大学)

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。

編集後記

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4号

発行日：2014年2月25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：児玉 知子)

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](mailto:topology-office@scphys.kyoto-u.ac.jp)

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