

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

# 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象

TOPOLOGICAL QUANTUM PHENOMENA IN CONDENSED MATTER WITH BROKEN SYMMETRIES

## *NEWSLETTER* No. 2

ニュースレター / 第 2 号

第 2 回領域研究会 岡山大学創立五十周年記念館



FEBRUARY 2012

トポロジカルな物質観と新しい“周期表”を目指して

研究計画班 ABCD トピックス

領域メンバー受賞ニュース

▽第 5 回日本物理学会若手奨励賞(横山 毅人 / 沙川 貴大) ▲井上リサーチアワード(川口 由紀)

トピックス

△奇周波数クーパーペア

▼トポロジカル超流動  $^3\text{He-B}$  相の表面マヨラナコーン

△トポロジカル超伝導体  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の単結晶試料作製

若手相互滞在プログラム報告

新メンバー紹介

2011 年度研究会報告

△第 5 回 ~ 第 7 回集中連携研究会 ▲第 1 回若手国際会議 ▽第 2 回領域研究会

# NEWSLETTER No.2

## CONTENTS

### 2 巻頭言

トポロジカルな物質観と新しい“周期表”を目指して

### 3 今年度の計画研究班トピックス

計画研究班 A01、B01、C01、D01

### 15 公募研究メンバー紹介

### 16 受賞ニュース

川口 由紀 (東京大学 / 井上リサーチアワード)

沙川 貴大 (東京大学 / 第5回日本物理学会若手奨励賞)

横山 毅人 (東京工業大学 / 第5回日本物理学会若手奨励賞)

### 18 トピックス

奇周波数クーパーペア (浅野 泰寛)

トポロジカル超流動  $^3\text{He-B}$  相の表面マヨラナコーン (野村 竜司)

トポロジカル超伝導体  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の単結晶試料作製 (瀬川 耕司)

2011年ピックアップトピックス

### 31 若手相互滞在プログラム報告

秋山 綱紀 (東京工業大学)

伊井 彰宏 (名古屋大学)

包 桂芝 (岡山大学)

### 34 新規採用研究者の紹介

山影 相 (名古屋大学) / 齋藤 広大 (産業技術総合研究所)

古川 俊輔 (東京大学) / 竹内 宏光 (広島大学)

國松 貴之 (大阪市立大学)

### 39 2011年度研究会報告

第5回～第7回集中連携研究会 / 第1回若手国際会議 / 第2回領域研究会

### 51 お知らせ

今後の会議予定、成果報告方法変更のお知らせ

## トポロジカルな物質観と新しい“周期表”を目指して

前野 悦輝／京都大学大学院理学研究科（領域代表・A01 班計画代表者）

**絶**縁体といえば、これまではバンド絶縁体とモット絶縁体、さらに加えるならば不純物による弱局在型の絶縁相などという分類でした。それを「トポロジカルに自明な絶縁体」と非自明な「トポロジカル絶縁体」に分類してしまおうというアイデアは、今斬新な潮流を生み出しています。この分類は超伝導や超流動の分野で以前から知られていたいくつかの特異な状態を「トポロジカル超伝導体・超流動体」の特質として再評価することにもつながっており、「新しい物質観」としての広がりを見せ始めています。これはBCS型超伝導、非従来型（異方的）超伝導という分類を一旦リセットしてしまうような楽しい発想です。

トポロジカル物質の分類には、Cartanによる系の対称性に基づく数学的に厳密な表がよく用いられ、系の空間次元性をふまえた現実物質との対応づけが、いわば“トポロジカル物質の周期表”として知られるようになりました。この表によってトポロジカルな絶縁体、超伝導体、超流動体の既知物質との対応づけが一目で行えるようになり、また未発見の対応物質についての提案にもなっています。この表は元素の周期表でいえば、メンデレーエフによる短周期表（1869年）に対応するのかもしれませんが。

現在の表は、粒子間の相互作用を無視した場合のハミルトニアンに対称性に基づくもので、しかも運動量空間で閉じることのないフル・エネルギーギャップ状態に限った分類です。しかしながら現実物質の魅力の多くは、粒子間相互作用やノードを持つ超伝導エネルギーギャップなどにあり、この表には厳密には含まれないものも重要です。

さて元素の周期表とのアナロジーをもう少し続けてみましょう。様々な周期表を提案した同時代の科学者の中で、メンデレーエフの名前だけが今日広く認知されている理由には、彼がその短周期表に基づき、当時未発見の元素とその性質をいくつか予言した役割が大きいとされています。メンデレーエフの周期表も、その後ヴェルナーの提案（1905年）に基づく長周期表に置き換えられました。しかし、現在

世界中で広く使われているこの長周期表にも欠点があります。遷移金属元素の列が単純元素の列を切り裂いて割り込んでいたり、希土類元素・アクチノイド元素が別の表に分離していたり、またメンデレーエフの短周期表で考慮されていたイオン化価数の類似元素が表現できなくなったりしています。

“トポロジカル物質の周期表”にも大いに発展の余地がありそうです。指針となるキーワードのひとつになりそうなのが、「バルク・エッジ対応」です。物質の塊の中身（バルク）がトポロジカルに非自明な波動関数を持っている場合、その表面や界面（エッジ）には対応する“エッジ状態”が現れます。そのカイラル・エッジ状態、ヘリカル・エッジ状態という分類には、面白いことに超流動体、超伝導体、絶縁体の枠を超えて共通概念が通用します。現在の表に含まれないエッジ状態として、高温超伝導体のようにノードをもつギャップに特有の「フラット・エッジ状態」という認識も本新学術領域のメンバーの佐藤氏らによって示されています。数学的厳密性の重要性は言うまでもないですが、それとは対極的な発想で、現実物質の示す量子現象の分類観点からじっくり納得できる「トポロジカル周期表」を皆さんと一緒に創っていくことも、とても楽しみです。

本新学術領域「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（H22-H26年度）はもうすぐ3年目の活動に入ります。この1年間を振り返ると、なんとといっても震災と原発事故で研究活動にも大いなる影響がありました。仙台をはじめとして、困難を乗り越えて復興の努力をされている皆さんにお見舞い申し上げますとともに、本領域からの継続した支援活動も行う所存です。その中でH23年度にスタートした公募研究には活発な精鋭メンバーが揃い、先日の領域研究会でもその活躍を大いにアピールしていただきました。H24年5月には名古屋大学で領域国際会議を開催します。この分野のめまぐるしいほどの世界的研究展開の成果が一同に集うものと大いに期待しています。

計画研究 A01

時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

前野 悦輝 / 京都大学大学院理学研究科 教授

研究計画 A 01 「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」の目的は、電子のスピンの活性によって時間反転対称性が破れた超伝導体のバルク物性の理解を極め、その界面や表面で顕在化する新奇な量子現象を開拓することである。具体的にはスピン三重項超伝導体の実験的証拠の揃ったルテニウム酸化物を舞台とする研究、また従来型の超伝導体と強磁性体とのハイブリッド構造体を舞台とする研究を展開する。ルテニウム酸化物の超伝導についてはレビュー論文を発表した [1]。以下では今年度の主な成果からいくつかのトピックを選んで紹介する。

1.  $Sr_2RuO_4$  のエッジ状態

時間反転対称性の破れた「カイラル」 $p$  波超伝導体は典型的な「トポロジカル超伝導体」の一つである。ルテニウム酸化物超伝導体  $Sr_2RuO_4$  は、これまでの研究からカイラル超伝導状態が実現している根拠が強く、そのバルク状態に対応して界面にはカイラル・エッジ電流をともなうエッジ状態が現れると期待されていた。柏谷 (A01 分担者) らは、 $Sr_2RuO_4$  の微小単結晶に金を蒸着して微細加工技術を駆使することで、良質の SIN (超伝導体 / 絶縁体 / 常伝導体) 接合を作って 図 1(a) に示すような準粒子トンネルスペクトルを観測することに成功した [2]。いくつかの特有のスペクトル形状のゼロバイアス・コンダクタンスピーク (ZBCP) が得られたが、マルチバンドを考慮した解析の結果、それらがすべてギャップ内のエネルギーに広く分布する準粒子状態密度を反映したものであり、カイラル・エッジ状態として解釈できることを明らかにした ( 図 1(b) )。これと対照的に、 $d$  波超伝導体の  $YBa_2Cu_3O_7$  では、電流が [110] 方向のときのみ

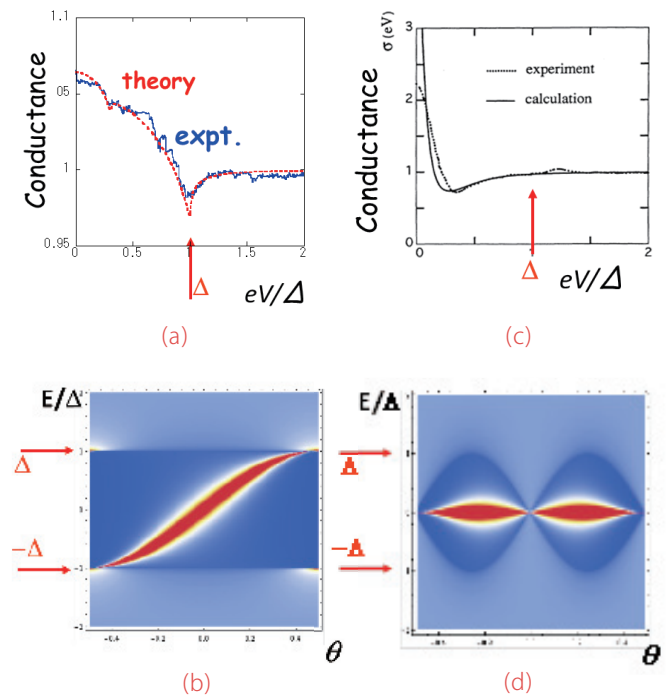


図 1 : (a)  $Sr_2RuO_4$  を用いた SIN 接合の 0.55 K におけるコンダクタンス・スペクトル。超伝導ギャップの中に幅広く状態密度が生じている。(b) カイラル  $p$  波超伝導体のカイラル・エッジ状態の分散関係。(c) 高温超伝導体  $YBa_2Cu_3O_7$  の接合の 3 K におけるスペクトル。コンダクタンス・ピークのエネルギーは超伝導ギャップより小さな範囲にとどまる。(d)  $d$  波超伝導体で期待されるフラットバンド・エッジ状態の分散関係。[2] より。

超伝導ギャップエネルギーに比べて非常に小さなエネルギー幅で ZBCP が生じる ( 図 1(c) )。実はこれも 図 1(d) に示すような「フラットバンド・エッジ状態」として、バルク・エッジ対応で理解できる状態である [3]。

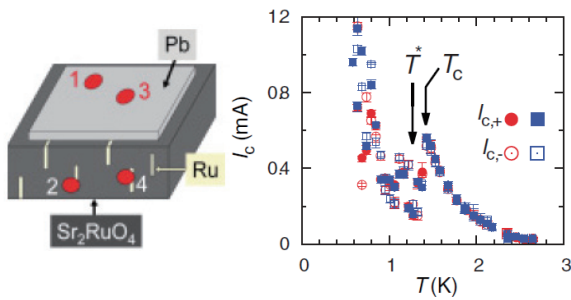


図2: (a) Ru を介した  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と Pb の SNS' 接合。  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の表面の性質から、Pb は Ru 析出物のみを通じて  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と接合している。 (b) 特異な温度依存性を示す臨界電流。

## 2. トポロジカル超伝導接合

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と従来型超伝導体の接合素子における臨界電流の特異な振る舞いは 10 年以上前に報告されていた。本領域での研究から、この現象を生み出す素子配置は以前の認識とは異なる図 2(a) に示すもので、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru 共晶結晶中の Ru を介して両超伝導体が干渉していることが明らかになった [4]。すなわち仲介する Ru 金属によって接合面が一周して閉じた形状になっていることが重要で、その周りの超伝導位相の巻き付き数によって図 2(b) のような臨界電流の振る舞いが記述できる。

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導は、Ru との共晶界面付近で臨界温度  $T_c=3$  K 程度まで上昇するが、転移温度付近では通常の  $p$  波状態で、その超伝導位相の巻き付き数は図 3(a) のように Ru に近接効果で誘起された  $s$  波と同じと考えられる。ところが 1.5 K 以下での  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のバルク超伝導転移と共に、接合界面の超伝導にも図 3(b) のように位相巻き付き数が非自明な数となる転移が起こり、それが臨界電流の著しい低下をもたらすと説明できる。さらに低温では図 3(c) のような  $s$  波の波動関数の位相歪によって、 $p$  波と  $s$  波の間での干渉が弱まることで、臨界電流が再び上昇する振る舞いも理解できる。この位相干渉効果のシナリオから「トポロジカル超伝導接合」という概念が生まれる。このように  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のカイラル  $p$  波超伝導状態に対して、それに付随する現象によって実証が深まったといえる。

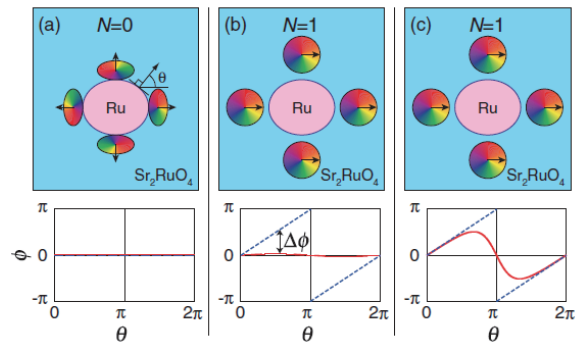


図3: (a)-(c) 温度低下に伴って変化する  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と Ru の超伝導位相。  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のバルク超伝導が起こると Ru 周りの位相巻き付き数が  $N=0$  (a) から 1 (b, c) へと変化する。

## 3. 半整数フラクソイドに対応する磁束の飛び

光学カンチレバーによる  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の微小結晶リングの高感度磁化測定により、通常の整数フラクソイドの量子化に加えて、半整数フラクソイドに対応する磁化の飛びが観測された [5]。イコール・スピン・ペアリング (ESP) のスピン三重項超伝導で予想される半整数量子渦に関連した状態の生成と期待され、マヨラナ型準粒子などのトポロジカル励起の実現が期待される。

## 4. 奇周波クーパー対の示す異常な表面インピーダンス

超伝導体の表面インピーダンス ( $Z = R - iX$ ) は、磁場侵入長の決定などに用いられる。実部レジスタンス ( $R$ ) は準粒子の抵抗を表し、虚部リアクタンス ( $X$ ) は電磁場に対する凝縮体の応答を表す。浅野 (A01 分担者) らは金属とスピン三重項超伝導体の NS 接合では、金属中に近接効果でスピン三重項  $s$  波、すなわち奇周波数クーパー対が浸み出し、図 4 に示すように通常とは逆の  $R > X$  の振る舞いが低温・低周波数領域で現れることを示した [6]。この特異な表面インピーダンスは、スピン三重項超伝導体の判定に有力な手段として期待される。

## 5. 超伝導体と強磁性体の接合での奇周波対状態

散逸のある金属中に浸み出す  $s$  波のスピン三重項ペアリングに加えて、スピン一重項  $s$  波超伝導体から強磁性体中に浸み出すスピン三重項  $s$  波ペアリングも奇周

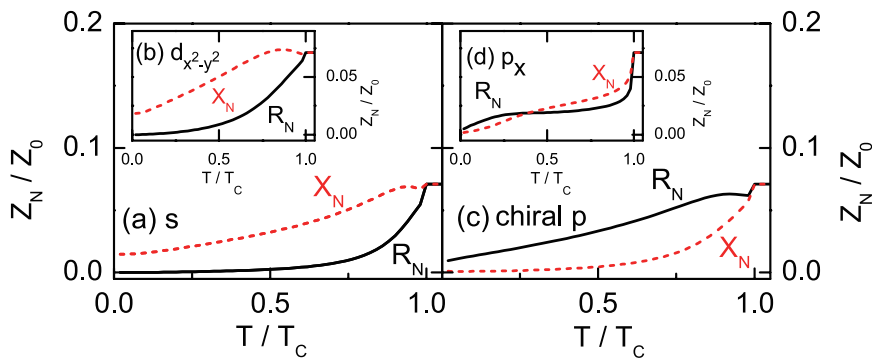


図4: 金属 / 超伝導体 (NS) 接合の表面インピーダンス。カイラル  $p$  波超伝導体の場合にのみ、レジスタンス  $R$  がリアクタンス  $X$  より大きくなる異常が予想される [6]。

波超伝導状態で、これらの実証が待たれる。赤崎 (AO1 分担者) らは強磁性半導体と  $s$  波超伝導体の接合でこの観測を試みてきた [7]。最近はさらに、強磁性体から常磁性半導体の 2 次元電子ガス (2DEG) にスピン偏極キャリアを注入することで、 $s$  波超伝導体 / 半導体 / 強磁性体 (S/Sm/F) 接合でも奇周波数ペアリングが現れるかどうかを検証するため、ZBCP の観測を通じた測定を進めている。

## 6. その他の成果

このほかの研究活動についていくつかふれると：米澤 (AO1 連携研究者) らは  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の小さな結晶を用いての熱磁気効果・磁場中比熱の測定を進めており、上部臨界磁場付近での超伝導転移の詳細を明らかにしつつある。また住山 (AO1 連携研究者) らは、ウラン化合物のスピン三重項超伝導体と従来型  $s$  波超伝導体の SNS' 接合を用いて、ジョゼフソン電流の選択則から秩序変数  $d$  ベクトルの方位確定を進めている。神田 (AO1 連携研究者) らは、グラフェンの電子状態のディラック点に起因する新奇現象を開拓するため、超伝導体や強磁性との接合において問題となるフェルミ面ピン止め効果を軽減するための素子構造の研究を進めている。

[1] "Evaluation of spin-triplet superconductivity in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ",

Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, K. Ishida,

J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011009-1-29 (Jan. 2012).

[2] "Edge states of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  detected by in-plane tunneling spectroscopy",

S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, Y. Maeno,

Phys. Rev. Lett. 107, 077003-1-4 (Aug. 2011).

[3] "トポロジカル超伝導現象", 佐藤昌利, 柏谷聡, 前野悦輝, 固体物理 46, 479-491 (Sep. 2011).

[4] "Topological competition of superconductivity in Pb/Ru/ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  junctions",

T. Nakamura, R. Nakagawa, T. Yamagishi, T. Terashima, S. Yonezawa, M. Sigrist, Y. Maeno,

Phys. Rev. B 84, 060512(R)-1-4 (Aug. 2011).

[5] "Observation of half-height magnetization steps in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ",

J. Jang, D.G. Ferguson, V. Vakaryuk, R. Budakian, S.B. Chung, P.M. Goldbart, Y. Maeno,

Science 311, 186-188 (Jan. 2011).

[6] "Unconventional surface impedance of a normal-metal film covering a spin-triplet superconductor due to odd-frequency Cooper pairs",

Y. Asano, A. A. Golubov, Y. V. Fominov, Y. Tanaka,

Phys. Rev. Lett. 107, 087001-1-4 (Aug. 2011).

[7] "Evaluation of spin polarization in  $p\text{-In}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{As}$  using Andreev reflection spectroscopy including inverse proximity effect",

T. Akazaki, T. Yokoyama, Y. Tanaka, H. Munekata, H. Takayanagi,

Phys. Rev. B 83, 155212-1-9 (Apr. 2011).

計画研究 B01

# 「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の最近のトピックス

石川 修六 / 大阪市立大学大学院理学研究科 教授

B01 班では、スピン三重項超流動体である超流動  $^3\text{He}$  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ます。今年度は2年目であり、いくつかの成果が得られ始めています。以下に最近の研究の中からいくつかのトピックをまとめました。

## 1. エアロジェル界面での新奇近接効果

超流動  $^3\text{He}$  B 相中にエアロジェルという物質を浸すとエアロジェル内の液体  $^3\text{He}$  の超流動性が抑制される。エアロジェル界面を挟んで超流動  $^3\text{He}$  B 相と常流動相が接するとき、常流動相側に奇周波数クーパーペアが出現することが東谷等によって予想されている [1]。これは田仲等によるカイラル  $p$  波超伝導と拡散正常金属との接合と同じである [2]。奇周波数クーパーペアに起因する界面での帯磁率の増大が予想されているので [3]、石川等はこの奇周波数クーパーペア探索の実験を NMR 法を用いて行った。現時点では帯磁率の増大は観測されていないが、興味深い現象を観測している。圧力が 25 気圧程度では、エアロジェル内の超流動転移はバルク液体の転移温度よりかなり低い温度で起こる。このときバルク液体は B 相である。磁場勾配下での測定が示したことは、エアロジェル内でエアロジェル界面に接する付近の液体は超流動に転移しにくいことである。一方、界面に接するバルク側液体は完全に超流動転移している。何が原因で超流動転移しないのかを明らかにするための実験を継続中である。

## 2. 回転する超流動 $^3\text{He}$ A 相のテクスチャー

細い円筒容器内での超流動  $^3\text{He}$ -A 相では、円筒容器界面の影響を受け、特徴的な秩序変数の織目構造 (テクスチャー) が出現する。いくつかの可能なテクスチャーのうち Mermin-Ho(hyperbolic) 型のテクスチャーを利用した回転実験を行うことにより、超流動発見以来の A 相での固有角運動量の問題を解決できると考えている。石川、國松、久保田等は、その前段階での実験として、東大物性研究所の回転冷凍機 (久保田研究室) に 0.1mm の直径の一本の円筒容器からなる試料セルを設置し、テクスチャーの同定を cw-NMR 法で行なった。NMR 測定では、テクスチャーのために双極子相互作用ポテンシャルが空間的に歪み、そこにトラップされたスピン波をサテライト信号として観測する。その共鳴周波数は、双極子相互作用ポテンシャルの空間歪み、すなわちテクスチャーの構造を反映している [4]。現在、A 相の形成過程の違い (昇温過程 or 冷却過程・静止下 or 回転下での相転移) から、3 種類の異なる NMR スペクトルの確認が出来た。最近の高木によるスピン波共鳴周波数の数値計算結果

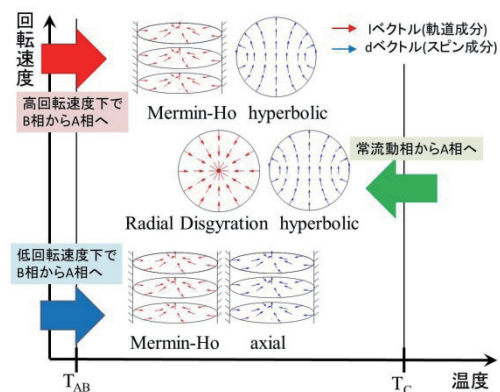


図 1 : 円筒容器内超流動  $^3\text{He}$  A 相のテクスチャー

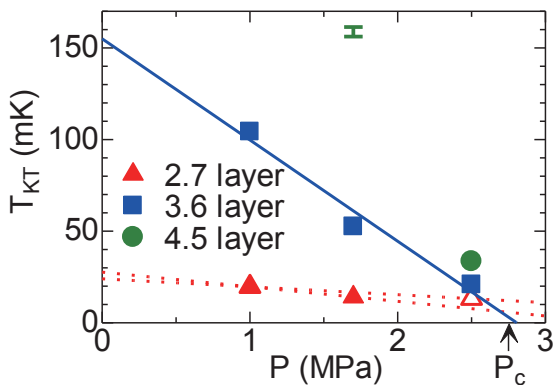


図2：<sup>4</sup>He 薄膜の超流動転移温度の圧力変化

[5] と観測されたサテライト信号の共鳴周波数と比較して、対応する3種類のテクスチャー構造を明らかにした(図1)。常流動相から超流動への転移で Radial Disgyration(hyperbolic) 型のテクスチャーが出現する測定結果は、堤らの自由エネルギーの数値計算結果と合致するものである[6]。

### 3. 強相関<sup>4</sup>He 薄膜における Kosterlitz-Thouless 転移の抑制と量子臨界性

これまで<sup>4</sup>He 薄膜の超流動転移の研究は精力的に進められてきたが、弱相関領域と見なせる飽和蒸気圧下での研究が主であった。この超流動転移は、量子渦 - 反渦の対形成にともなうトポロジカル相転移(Kosterlitz-Thouless 転移、KT 転移)であることが確立している。しかし、強相関効果は明らかにされて来ず、また<sup>4</sup>He 薄膜中で粒子相関を強める方法も知られていなかった。野村等はバルク<sup>3</sup>He 液体で加圧された<sup>4</sup>He 薄膜が、強相関効果を示すのではないかと考え実験を行った。加圧下で超流動薄膜が超流動転移する温度は、観測する周波数に依存し、その周波数依存性は動的KT 転移理論で良く説明できることがわかった。これは加圧下においても超流動転移がKT 転移であることを示している。一方で、転移温度は飽和蒸気圧下に比べて大きく抑制されることを見出した(図2)。この転移温度の抑制は、高压で粒子密度が増大し、相関が強くなったことに起因すると考えられる。

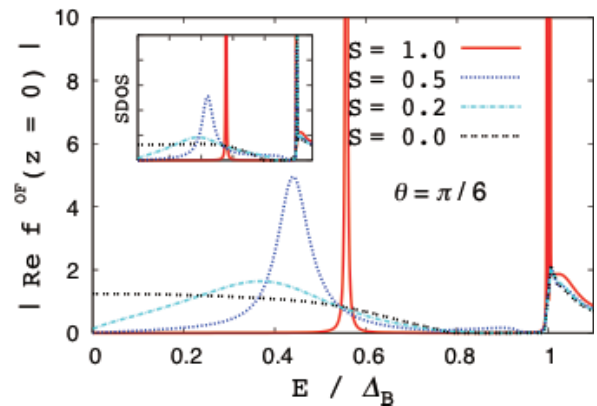


図3：奇周波数ペア振幅とギャップ内状態密度

転移温度が圧力に比例して減少し、約 27.5 気圧において消失する量子臨界的な振る舞いを発見した[7]。バルク<sup>4</sup>He の結晶化圧力は 25 気圧であり、臨界圧力付近の<sup>4</sup>He 薄膜の固体 - 常流動 - 超流動相図の詳細や乱れの影響を明らかにするのは今後の課題である。

### 4. 奇周波数クーパーペアとアンドレーエフ束縛状態密度との対応

東谷等の最近の理論研究から、アンドレーエフ束縛状態と奇周波数クーパーペアの間に密接な関係があること、超流動ヘリウム 3 B 相の界面に奇周波数クーパーペアが形成されることが明らかになってきた[8]。図3に、超流動ヘリウム 3 B 相界面の奇周波数クーパーペア振幅と表面状態密度 (SDOS) のエネルギー依存性を示した。SDOS に見られるギャップ内状態密度は、アンドレーエフ束縛状態に起因する。バルクのエネルギーギャップ以下の低エネルギー領域で、奇周波数ペア振幅とギャップ内状態密度は同様なエネルギー依存性をもつことがわかる。(界面垂直向きから測った角度  $\theta = \pi/6$  の散乱であり、 $S$  は鏡面散乱の度合いを表し、 $S = 1$  が完全鏡面散乱である。) また、ゼロエネルギー極限で両者の値は厳密に一致する。超流動ヘリウム 3 B 相の SDOS にギャップ内状態密度が存在することは、東工大の実験グループによる横波音響インピーダンス測定によって観測されている。この実験は、超流動ヘリウム 3 B 相の界面には、アン





ドレーエフ束縛状態とともに、奇周波数クーパーペアが存在していることを実証していると言える。

### 5. 奇周波数超伝導

三宅等は奇周波数超伝導の開闢以来の病理とも言うべき「負マイスナー効果の問題」を解決した。これは、特筆すべき成果である。そのポイントは、奇周波数超伝導が通常の偶周波数超伝導に勝って実現するためには異常な遅延効果が必要となるが、そのような状況を量子統計力学的に正しく記述するにはハミルトニアンではなくラグランジアンにもとづく経路積分の方法による記述が不可欠であったことである [9]。もう一つの発展は、奇周波数超伝導は特殊な現象ではなく、ギャップレスなスピノル波（南部モード）をもつ反強磁性と共存する超伝導状態でかなり普遍的に実現していることが分かってきたことである。多層系銅酸化物高温超伝導体でこのような状態が確認されたのは今後の大きな発展を予想させる。

### 6. カイラル $p$ 波超伝導体の固有磁気モーメント

三宅等はカイラル $p$ 波超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  を念頭に次近接に位置する電子に引力が働く 2 次元正方タイトバインディングモデル（サイト数  $13 \times 13 = 169$ ）に対して Bogolubov-de Gennes 方程式を解いて固有磁気モーメントの大きさを求め、 $M \sim \mu_B N$  であることを示した。更に、マイスナーカレントからの磁気モーメントへの寄与を独立に計算したところ、計算精度の範囲で固有磁気モーメントをほぼ打ち消すことが分かった。系のサイズを小さくするとその打ち消しは不完全となり自発的な磁気モーメントは観測可能になると考えられる。

### 7. その他の成果

他の研究活動として、東條（B01 班公募研究者）等は、スピン自由度を有するボース凝縮（スピノルボース凝縮）での研究のために、スピンの操作が可能な光トラップ中で原子気体ボース凝縮体を光スプーンでかき混ぜて、量子渦の生成・観測に成功した。今後、低磁場スピノル状態での新奇量子渦生成を目指す研究を進めている。

- [1] "Proximity Effect between a Dirty Fermi Liquid and Superfluid  $^3\text{He}$ "  
S. Higashitani *et al.*, JLTTP 155 83 (2009).
- [2] "Anomalous Josephson Effect between Even- and Odd-Frequency Superconductors"  
Y. Tanaka *et al.*, PRL 99 037005 (2007).
- [3] S. Higashitani, private communication.
- [4] "Mermin-Ho Texture and Its Transverse NMR Spectrum in a Rotating Cylinder"  
T. Takagi, JPSJ 65 1722 (1996)
- [5] T. Takagi, private communication.
- [6] "Singular Vortex in Narrow Cylinders of Superfluid  $^3\text{He}$ -A Phase"  
Y. Tsutsumi and K. Machida, JPSJ 78 114606 (2009).
- [7] "Strong Suppression of the Kosterlitz-Thouless Transition in a  $^4\text{He}$  Film under High Pressure"  
S. Murakawa, *et al.* PRL 108, 025302 (2012)
- [8] "Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid  $^3\text{He}$ "  
S. Higashitani *et al.*, PRB 85, 024524 (2012)
- [9] "On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity"  
H. Kusunose *et al.*, JPSJ 80 054702 (2011).

計画研究 C01

## トポロジカル絶縁体におけるディラック電子性質の解明とラシュバ型スピン軌道相互作用の強い表面超伝導の発見

鄭 国慶 / 岡山大学大学院自然科学研究科 教授

本計画班では空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用 (SOI) が織り成す新奇なトポロジカル量子現象を、(1) 空間反転対称性の破れた超伝導体、(2) 電場誘起表面超伝導体、(3) トポロジカル絶縁体、において探究します。ここでは、本年度に大きな進展のあった研究課題 (2) と (3) のトピックスについて紹介します。

### 1. トポロジカル絶縁体

ここ数年、トポロジカル絶縁体と呼ばれる従来の物質の状態とは全く異なる新しい状態が発見され、大きな話題になっています。トポロジカル絶縁体は、バルクは絶縁体であるのに対して、そのエッジ (表面) に特殊な金属状態が現われ、電子は質量ゼロのディラック電子となってディラックコーンと呼ばれるエネルギー状態を形成します。これまでに提案されているトポロジカル絶縁体を利用した革新的なデバイスの多くは、このディラック電子に意図的に質量を持たせてその運動を制御する事を必要とします。またこれが実現されると、半整数量子ホール効果や磁気単極子等の様々な特異量子現象が実現される可能性も理論的に指摘されています。しかしながら、ディラック電子に質

量を持たせる事は非常に困難で、これまでは、結晶に磁性不純物を添加したり強磁場を印加したりして、時間反転対称性を破る事が唯一の方法と考えられてきました。

今回、C01 班の東北大学の佐藤と大阪大学の瀬

川・安藤らの共同研究グループは、トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  と、通常の絶縁体  $\text{TlBiS}_2$  の固溶系である  $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$  の高品質大型単結晶の育成に成功し、高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) によってディラックコーンのエネルギー分散を高精度で決定しました (図 1)。その結果、この系は、 $x=0.5$  を境にしてトポロジカル相 ( $x > 0.5$ ) から非トポロジカル相 ( $x < 0.5$ ) への量子相転移を示す事が明らかになりました。また、図 2 に示すように、 $\text{TlBiSe}_2 (x = 1.0)$  においてディ

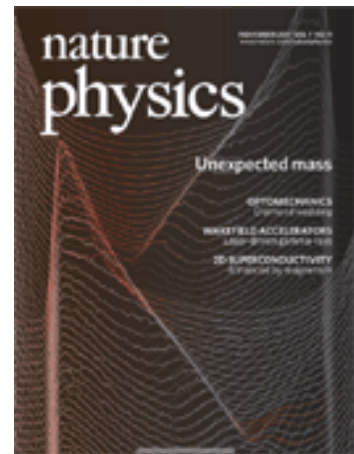


図 1 : Nature Phys. の表紙を飾った佐藤氏らの成果

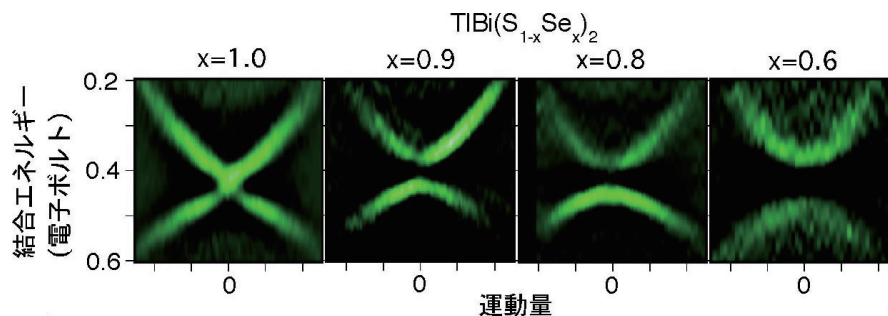


図 2 : ARPES によって決定した  $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$  のトポロジカル相における  $\tau$  点近傍の表面バンドのエネルギー分散。明るい部分がバンドに対応する

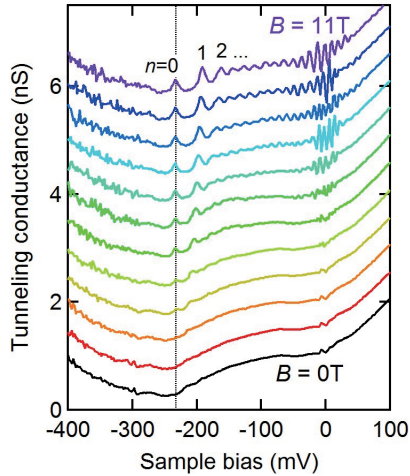


図3：トンネルスペクトルに現れる  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の Landau 準位

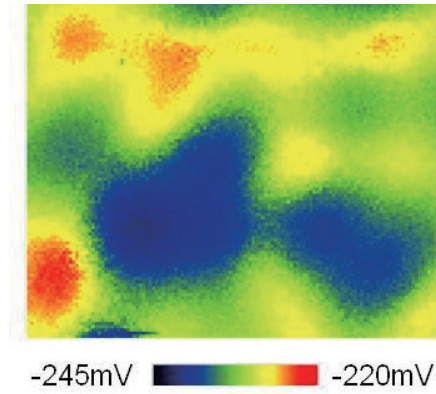


図4： $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の Dirac 点エネルギーの空間分布

ラックコーン的なX字型を示す表面バンドのエネルギー分散が、S置換によってバンドが上下に分裂してエネルギーギャップが生じることがわかりました。また、エネルギーギャップの大きさは、xの減少に伴い単調に増加する事もわかりました。このことは、 $\text{TlBiSe}_2$ のSeを非磁性不純物であるSで置換しただけで結晶表面におけるディラック電子が質量を獲得し、さらにS/Se組成比の調整によってその質量を自在に制御できることを示しています。以上の実験結果は、これまでの常識を覆して時間反転対称性を明示的に破らなくてもディラック電子が質量を持つ事を初めて示したものです。

一方、理研の花栗らの研究グループは、STM/STSを用いてDirac電子の性質を調べています。STM/STSを用いると表面状態を選択的に測定できる他、磁場効果の研究や、高い空間分解能を生かした不純物状態のイメージングも可能にしています。

代表的なトポロジカル絶縁体である $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ に対して磁場中でトンネル分光を行い、トンネルスペクトル

に多数のLandau準位を観測しました(図3)。これらの準位は、1) 最低Landau準位が磁場に依存せず、2) その他の準位のエネルギーが準位指数と磁場の関数としてsub-linearな振る舞いを示すことから、表面Dirac電子に起因すると結論できます。分光イメージングを行い、電子状態の空間分布を詳細に調べることにも成功しました。最低Landau準位エネルギー、すなわち、Dirac点のエネルギーをマッピングしたところ、Dirac点が深く局所的な電子濃度が高い場所は、Se欠損と思われる欠陥が多い場所と対応していることがわかりました。この結果は、Se欠陥がドナーとして働き、ポテンシャル分布を決定していることが示唆されます。さらに、実空間におけるLandau軌道はポテンシャルの極小点、あるいは極大点に巻きつくように局在し、Landau準位エネルギーではドリフト状態を形成するという、量子Hall状態で期待される振る舞いも観測されています。

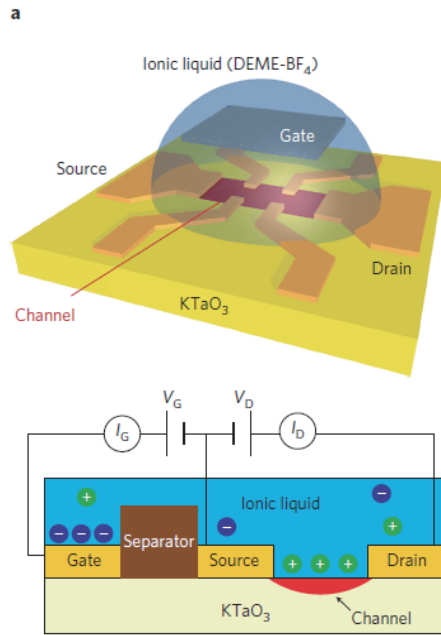
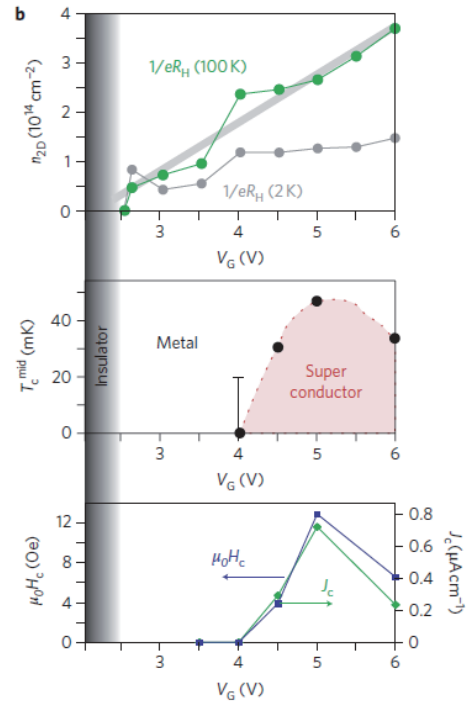


図5：電気二重層トランジスタ

## 2. 電場効果による表面超伝導

上野と野島のグループは電気二重層トランジスタ構造(図5)をSrTiO<sub>3</sub>(100)表面上に作製することにより、電界効果のみで絶縁体表面を超伝導体に変換することに成功してきました(図6) [1]。最近では、化学ドーピングの方法では観測例のない、KTaO<sub>3</sub>(100)表面の超伝導も電界効果により発見しました [2]。これらは本研究手法が新超伝導物質探索にも優れたポテンシャルを発揮することを示しています。一方、電界誘起超伝導の母体となる二次元電子ガス系に目を向けると、電場(三角ポテンシャル)によって電子が束縛され空間反転対称性が破れている(ラシュバ型スピン軌道相互作用が働く)という、従来の金属薄膜超伝導体とは本質的に異なる下地が整っており、新奇な超伝導状態および発現機構が期待されます。その一つとして注目しているのが、超伝導の自己組織化ともいふべき現象です。SrTiO<sub>3</sub>(100)の電界誘起超伝導の性質を詳しく調べると、超伝導有効厚さや超伝導転移温度が、常伝導状態でのキャリア面密度にほとんど依存しないとい

図6：KTaO<sub>3</sub>(100)表面超伝導の転移温度と輸送特性

う、特異な性質が観測されます。系が超伝導に転移する際、エネルギー的に最適になるよう(最も $T_c$ が高くなる)ところを目指して、その電子状態が自己組織化的に変調すると仮定すると実験結果をうまく説明できます(論文執筆中)。

[1] "Electric-field-induced superconductivity in an insulator", K. Ueno, *et al.*, Nature Mater. **7**, 855 (2008).

[2] "Discovery of superconductivity in KTaO<sub>3</sub> by electrostatic carrier doping", K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa and M. Kawasaki, Nature Nanotech. **6**, 208 (2011).

計画研究 D01

トポロジカル凝縮系の理論

田中 由喜夫 / 名古屋大学大学院工学研究科 准教授

本研究計画「トポロジカル凝縮系の理論」の目的は、非自明なエッジ（表面・界面）状態を持つ、超伝導・超流動系、ボーズ・アインシュタイン凝縮体、トポロジカル絶縁体の研究を通じて、これらの異なった物質系に共通した普遍的な物理を探索し、トポロジカル量子現象に関する凝縮系物理学の新概念の構築を目指すことである。具体的には、対称性の破れた超伝導体のエッジ状態の研究、奇周波数クーパ対の理論、冷却原子気体におけるトポロジカル量子現象、超流動・超伝導におけるマヨラナフェルミオン、トポロジカル量子現象における数値構造、関連した話題などを研究対象とする。以下に今年度の主な成果からいくつかのトピックを選んで紹介する。

1. 超伝導トポロジカル絶縁体のトンネル分光

(田中・佐藤)

トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  は、Cu を挿入しバルクキャリアを導入すると、超伝導状態となることが知られている。本研究では、このトポロジカル絶縁体由来の超伝導体（超伝導トポロジカル絶縁体）の表面状態を調べた [1,2]。図 1 左に示すように、この系の (111) 表面にはギャップ関数の対称性に依存して、様々な分散をもつマヨラナフェルミオンが現れることが理論的に予言されている [2]。我々は、理論的に予言されているすべてのギャップ関数に対し、超伝導トポロジカル絶縁体・常伝導接合のトンネル伝導度を詳細に計算した。(図 1 右にマヨラナフェルミオンが存在する場合のトンネル伝導度の様子を示す。赤、緑、青は接合面のトンネル障壁

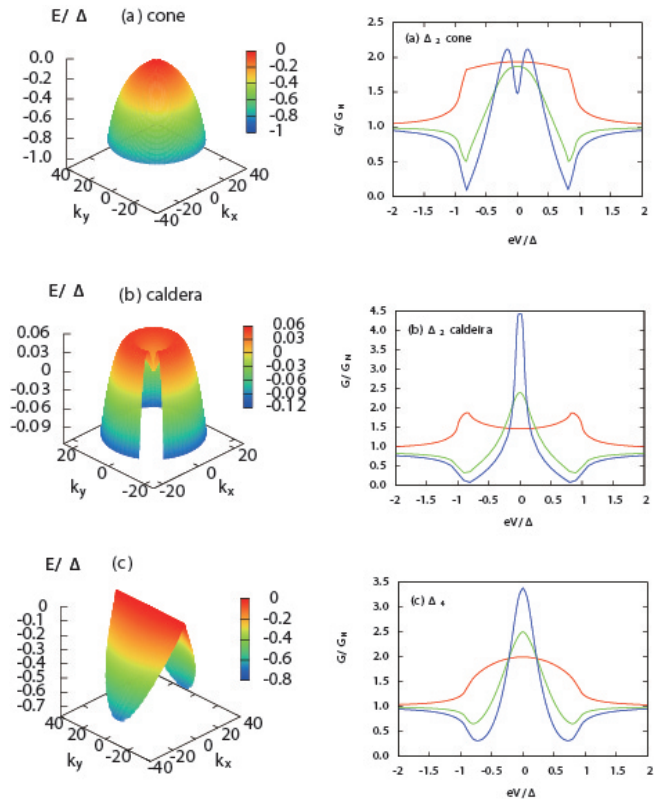


図 1：超伝導トポロジカル絶縁体  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の (111) 表面に現れる様々な分散関係をもつマヨラナフェルミオン（左）とそれが示すトンネルコンダクタンスの振る舞い（右）

の違いに対応。赤、緑、青の順でトンネル障壁が高くなる。）この結果、本新学術領域 D 班瀬川らが実験で得たゼロバイアスピークがトポロジカル超伝導体固有の表面状態であるマヨラナフェルミオンに起因することを強く支持する結果を得た。

2. フラットバンドをもつアンドレーエフ束縛状態の理論 (佐藤・田中)

銅酸化物超伝導体のような時間反転対称な異方的超伝導体の境界には、しばしば平坦なバンドをもつゼロエネルギーアンドレーエフ束縛状態が現

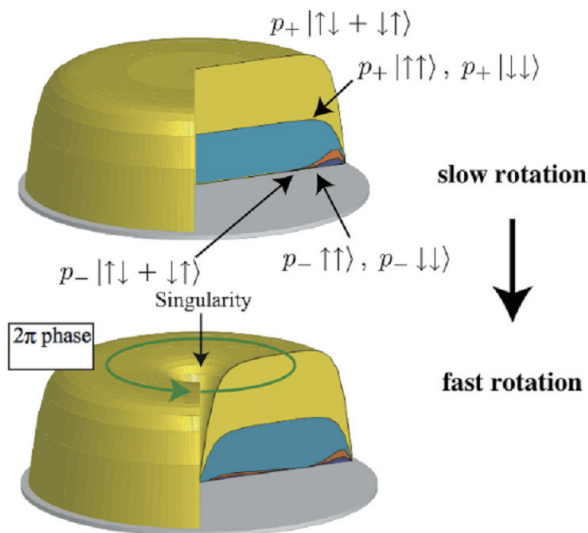


図2：回転超流動<sup>3</sup>Heにて安定化する状態の例：  
低回転で安定となる空間一様なA相（上）と回転下にて現れる  
整数量子渦状態（下）

れる。本研究では、このような場合の束縛状態の一般論をアティア・シンガーの指数定理の形で定式化した[3]。また、空間反転対称性の破れた超伝導体にしばしば現れるラインノードの存在と、平坦なバンドをもつゼロエネルギー束縛状態の関係を明らかにした。

### 3. スピノールボース・アインシュタイン凝縮

（上田、川口）

ボーズアインシュタイン凝縮体（BEC）は相互作用パラメータの大小によって非常にたくさんの量子相を持つが、これを数的に一つ一つ求めるためには膨大な計算をする必要がある。我々はそのような基底状態および定常状態を量子相の対称性を利用することによって系統的に求めた[4]。この方法により相互作用パラメータに依存しない不活性状態（inert state）のみならず、それらに依存する状態も求めることに成功した。特に、スピン3のBECにおいては、これまで知られていなかった量子相を見出した。

### 4. マヨラナフェルミオンに関する最近の研究

（水島）

回転下の超流動<sup>3</sup>He-A相では秩序変数 $d$ ベクトルの自由度に起因して半整数量子渦が存在する。この芯にはスピン偏極したマヨラナフェルミオンが局在しており、その特異な性質により半整数量子渦の統計性が非可換になることが期待されている。これまで超流動<sup>3</sup>Heでは、スピン流を伴う半整数量子渦が質量流のみを伴う整数量子渦より安定化することが指摘されてきた（図2）。一方で、高圧下でのA相ではスピン揺らぎのフィードバック効果に起因した強結合効果が顕著となる。文献[5]では強結合効果を取り込んだGinzburg-Landau理論に基づき半整数量子渦の安定性を明らかにした。結果として、強結合効果は半整数量子渦の安定化に対して不利に働くことを示した。また、競合する整数量子渦はスピン自由度を持つマヨラナフェルミオンを伴うため、その統計性は可換統計に従うことを明らかにした。



### 5. グラフェン接合におけるジョセフソン電流の理論 (井村)

近年、グラフェンを介して2つの超伝導体を結合させたジョセフソン接合が注目を集めている。グラフェンは原子1層分の超薄膜であるから、接合は膜上に2つの超伝導電極を載せることによって構成される。広島大学の高根と井村は、最近この「平面的な素子構造」を取り込んだ理論模型を初めて提案し、ジョセフソン電流を計算するための一般的公式を導出した [6]。平面的素子構造はグラフェンが理想的な2次元電子系であることの顕著な反映であるが、既存の理論体系では相対論的なバンド分散の影響のみが考慮されていた。この定式化によって、実験的に得られている臨界電流の温度依存性との整合性も得られた。

### 6. 強磁性接合における異常マイスナー効果 (横山、田仲)

強磁性体・超伝導体接合においては、スピン空間反転対称性の破れにより強磁性体中には奇周波数電子対が誘起されることが知られている。常伝導体・強磁性絶縁体・超伝導体接合においても界面におけるスピン依存透過過程により、常伝導体中に奇周波数電子対が誘起される。奇周波数電子対が存在するために、磁気応答が非線形なものとなりパラマグネティック磁化率が大きくなることが示された [7]。

- [1] "Topological Superconductivity in  $Cu_xBi_2Se_3$ ", S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, K. Yada, Y. Tanaka, M. Sato, Y. Ando, Phys. Rev. Lett. **107**, 217001 (2011).
- [2] "Theory of Tunneling Spectroscopy in Superconducting Topological Insulator", A. Yamakage, K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, arXiv:1112.5036.
- [3] "Theory of Andreev bound states with flat dispersions", M. Sato, Y. Tanaka, K. Yada, Yokoyama, Phys. Rev. B **83**, 224511 (2011)
- [4] "Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates", Y. Kawaguchi and M. Ueda, Phys. Rev. A **84**, 053616 (2011).
- [5] "Zero Energy Modes and Statistics of Vortices in Spinful Chiral p-Wave Superfluids", T. Kawakami, T. Mizushima, and K. Machida", J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 044603 (2011).
- [6] "Josephson Current through a Planar Junction of Graphene," Y. Takane, K.-I. Imura, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 043702 (2011).



## 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

公募研究メンバー（平成23年度～平成24年度）

### A01： 時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

研究代表者	神田 晶伸	筑波大学 大学院数理物質科学研究科
		「グラフェンでできた超伝導／強磁性／超伝導接合における磁性と超伝導の競合」
	天谷 建一	信州大学 教育学部
		「一軸応力下比熱・磁歪測定によるスピン三重項超伝導二段転移の解明」
	住山 昭彦	兵庫県立大学 大学院物質理学研究科
		「ジョセフソン効果による時間反転対称性の破れた超伝導状態の検証」

### B01： スピン三重項超流動体の新奇界面現象

研究代表者	松本 宏一	金沢大学 理工研究域 数物科学系
		「不均一超流動ヘリウム3における奇周波数状態をもたらす磁氣的性質の研究」
	佐々木 豊	京都大学 低温物質科学研究センター
		「超流動ヘリウム3中のトポロジカルオブジェクトの検出と制御」
	吉川 豊	京都大学 大学院理学研究科
		「2次元光格子中の冷却イッテルビウム原子におけるゲージ場創生の新技術」
	東條 謙	学習院大学 理学部
		「微小磁場中スピノルボーズ凝縮体を用いた新奇量子渦の実現」
	池上 弘樹	独立行政法人 理化学研究所
		「イオンを用いた超流動ヘリウム3自由表面新奇現象の研究」

### C01： 空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象

研究代表者	佐藤 宇史	東北大学 大学院理学研究科
		「高分解能スピン分解ARPESによるトポロジカル絶縁体における微細電子構造の研究」
	村中 隆弘	青山学院大学 理工学部
		「p、f電子系トポロジカル超伝導の探索」
	松野 丈夫	独立行政法人 理化学研究所
		「イリジウム酸化物薄膜を舞台としたトポロジカル絶縁体の物質開発」
	花栗 哲郎	独立行政法人 理化学研究所
		「分光イメージング走査型トンネル顕微鏡によるトポロジカル絶縁体の研究」

### D02-D04： トポロジカル凝縮系の理論

研究代表者		
D02 (A01)	福井 隆裕	筑波大学 理学部
		「トポロジカルな欠陥に局在するマヨラナ状態と指数定理」
	川畑 史郎	独立行政法人 産業技術総合研究所
		「対称性の破れた磁性体・超伝導体ナノ接合系における量子輸送理論」
D03 (B01)	高木 丈夫	福井大学 大学院工学研究科
		「超流動 <sup>3</sup> Heにおける秩序変数とNMRスペクトルの計算」
	新田 宗土	慶応大学 日吉物理学教室 商学部
		「素粒子論的手法によるトポロジカル励起の研究」
D04 (C01)	横山 毅人	東京工業大学 大学院理工学研究科
		「空間反転対称性の破れた超伝導体の渦糸状態におけるトポロジカル量子現象」
	井村 健一郎	広島大学 大学院先端物質科学研究科
		「トポロジカル絶縁体／超伝導におけるメソスコピック効果の理論」
	田中 秋広	独立行政法人 物質・材料研究機構
		「トポロジカル場の理論による凝縮系の新規量子現象の探索」



本年も本新研究領域から素晴らしい業績が多く発信され、若手から3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。

川口 由紀（東京大学 大学院理学系研究科）

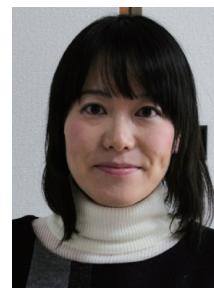
井上リサーチアワード

●受賞理由

「スピノールBECにおける量子多体効果の研究」

川口由紀さんは、スピンという内部自由度を持った原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体（BEC）の量子多体効果に関する研究に対して、井上リサーチアワードを受賞されました。井上リサーチアワードは自然科学の基礎的研究で優れた業績を挙げた将来性豊かな若手研究者の支援を目的としたものであり、物理学分野では川口さんが初めての受賞になります。通常のBECとは異なり、メソスコピック系で実現されるフラグメントBECでは複数の1粒子状態にマクロな数の原子が凝縮する結果、非自明な凝縮状態が生じます。川口さんは、マクロな系からメソスコピック系へと系のサイズを連続的に変化させることで、対称性の破れ・回復、すなわちフラグメントBECの出現と崩壊が制御できる点に着目し、量子揺らぎおよび熱揺らぎによる対称性の破れと回復のダイナミクスを明らかにする研究を進めています。このようなダイナミクスの研究は、宇宙・高エネルギー物理から超伝導・超流動まで自発的に対称性の破れた系全般に広く波及効果を及ぼすものと期待されます。

（文責、上田 正仁）



沙川 貴大（東京大学 大学院理学系研究科）

第5回日本物理学会若手奨励賞

●受賞理由

フィードバック制御がある系の情報と熱力学の展開

沙川貴大氏はフィードバック制御がある系において情報と熱力学を結び付ける情報熱力学の研究に対して第5回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。もしもミクロな知的生物が存在して気体分子の速度を識別できれば、熱力学の第二法則が破れてしまう—これがマックスウェルが150年前に指摘したパラドックスである。沙川氏はマックスウェルのデーモンが情報の測定と消去に必要な仕事を、量子測定理論と熱力学を組み合わせることによって導くことに成功し、ミクロなレベルの情報処理が熱力学の第二法則と矛盾しないことを示しました。また、同じ理論的枠組みでJarzynskiの等式をフィードバック制御が存在する場合に拡張しました。これらの予言は最近になってコロイド粒子を用いて実験的に確認されました。

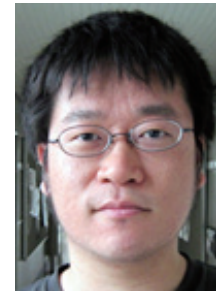
（文責、上田 正仁）



横山 毅人 (東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻)  
第5回日本物理学会若手奨励賞

● 受賞理由

強磁性体 / 超伝導体接合の理論



強磁性体 / 超伝導体接合の研究はスピントロニクス分野の発展とともに注目を集めており、磁性と超伝導が共存する系の研究は、実験技術の進歩と連動して飛躍的に進んできた。従来、磁性と超伝導は単に競合するものにとらえられていたが、横山氏は磁性と超伝導の間の非自明な関係を様々な視点から示した。特に、(1) 奇周波数超伝導、(2) スピン物性、(3) “相対論的” 効果という観点からの種々の予言を行った。これらの業績に対して、第5回日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。

拡散伝導領域にある強磁性体中に侵入するクーパー対は有限の運動量を持つため、その近接効果是非磁性金属における近接効果とは質的に異なる事が知られている。特に、2001年ドイツのルール大学のEfetovらのグループによって強磁性体 / 超伝導体接合において奇周波数(時間について奇関数の)トリプレットクーパー対が発現することが予言され、国際的に注目を集めることになったが、横山氏はこの重要な問題に初期の段階から取り組んだ。特に、強磁性体 / 超伝導体接合系における近接効果を研究し、強磁性体領域に形成される共鳴状態の性質を調べ、準粒子状態密度にゼロエネルギーピークが現れる条件を明らかにした。さらに、奇周波数トリプレット超伝導の状態密度との関係について調べ、トリプレットクーパー対の存在が、強磁性体中の状態密度のゼロエネルギーピークとして反映されることを明らかにした。また、強磁性体中に誘起された奇周波数トリプレットクーパー対の示す異常なマイスナー効果や、非磁性体 / 超伝導体接合においても界面の散乱行列がスピン依存性を持つ場合には奇周波数トリプレットクーパー対が現れることなども明らかにした。現在NTTを中心とする実験グループにより横山氏の理論的予言の実験的な検証が進められており、奇周波数超伝導の研究の新たな展開が期待されています。

(文責、柏谷 聡)



## 奇周波数クーパーペア

浅野泰寛／北海道大学大学院工学研究院 准教授

「奇周波数クーパーペア」[1]という言葉で表される粒子の物理描像は把握しづらい。それ故、奇周波数ペアは将に「奇」なるものと思われてきた経緯がある。それを払拭し、「奇周波数ペア」という描像を用いて得られるはじめた超伝導現象を概観するのが本稿の目的である。

### その奇なる由

はじめにお断りしておくが、この章では少々「ややこしい」話をする。超伝導を担うクーパーペアは2つの電子から成っており、ペア関数の対称性は、スピン1重項偶パリティとスピン3重項奇パリティに分類される。この分類は電子の持つ自由度のうち「スピン( $s$ )」と「空間座標( $r$ )」に着目し、フェルミ統計に従う電子の消滅演算子 $\phi(s,r)$ が互いに反交換することを考慮して得られる。「ペア関数」というあいまいな表現を用いたが、これは超伝導平均場理論において、消滅演算子2個の積を統計平均した異常グリーン関数を指す。即ち、ペア関数はそれを構成する2電子の入れ替えに関して反対称でなくてはならない。

問題をややこしくしている要因は2つある。まず消滅演算子2個の積を統計平均するという意味である。もとより超伝導は量子多体系の基底状態の一つであり、統計平均とは基本的にアボガドロ数程度の電子が相互作用して選んだ基底状態に関する平均になっている。「消滅演算子2個の積」は、状態に作用する際に電子を2個消すので、電子数が定まっている状態で平均するとゼロになるはずである。こうした非対角秩序と呼ばれる平均が有限に残るのは、電子数が定まらない状態、即ち超伝導状態で平均したときである。つまり超伝導状態は決して2電子だけで作れず、ペア関数を定義すると同時に超伝導状態も定義している。

次に演算子の反交換関係は同時刻においてのみ定義されていることである。しかし物理現象には因果関係があり、時刻の異なる複数の演算子の統計平均を表すためには場の量子論の方法を用いる必要がある。この方法を用いるとペア関数は一般化され、初めて「時間」の自由度が現れる。時間依存性はハイゼンベルグ演算子の定義に従って、演算子は $\phi(s,r,\tau)$ という具合に時間を含むことになり、フェルミ統計はペア関数が「スピン」「座標」「時間」の同時入れ替えのもとで反対称になることを要請する。ここでは実時間の代わりに虚時間 $\tau$ を用いたが議論の本質は変わらない。

冒頭の分類を拡張すれば、時間の入れ替えに関して対称な場合(偶周波ペア)と反対称な場合(奇周波ペア)に分類される事になる。「偶周波ペア」「奇周波ペア」という呼び方は虚時間を松原周波数へとフーリエ変換したときに、ペア関数がそれぞれ、松原周波数の偶関数あるいは奇関数になっていることを反映している。ペア関数は2電子の「スピン」に関して1重項か3重項、「座標」に関して偶パリティか奇パリティ、「時間」に関して偶周波数か奇周波数、に分類できるので合計 $2^3=8$ の分類が可能に思えるが、電子の従うフェルミ統計のために可能な分類は(1)偶周波数スピン1重項偶パリティ、(2)偶周波数スピン3重項奇パリティ、(3)奇周波数スピン3重項偶パリティ、(4)奇周波数スピン1重項奇パリティの4種類になる。ここまでの議論で、奇周波ペアが「存在してもいい」ことは示したが、「存在しなければならない」理由にはなっていない。またこのような一般論ではその物理描像がつかみづらい。さらに、誰もが認める奇周波数超伝導体が未だ発見されていない。これらのややこしい事情が奇周波数ペアを「奇」あるいは「希」なるものとしてしている理由である。

## その奇なる現

粗い表現をすれば、前節の議論は考察する電子系にスピン反転散乱が無く、並進対称性が保たれている場合に正しい。例えば超伝導体と金属や強磁性体を接合するような空間的に不均一な系やスピン散乱のある系を考察すると、4種類のペアが混ざること気づく、といっても直ぐに気づいたわけではなく、2001年のことである [2]。私は当時、論文の著者である Bergeret 本人と議論して、奇周波数ペアなるものを初めて耳にしたのだが、恥ずかしながら彼の主張が全く理解できなかった事を記憶している。

クーパーペアが接合面を通して金属や強磁性体へしみ出す現象を近接効果と呼んでいる。普通の金属には不純物が多く含まれていて、電子は等方的に拡散する。このような「汚い金属」では、ペアの軌道対称性は偶パリティの中でも等方的な  $s$  波に限られる。別の表現をすると、金属中で異方的な軌道対称性のペアは壊れてしまう。さて、磁化の向きが空間的に変化するような強磁性体と金属超伝導体を接合すると、接合を通して強磁性体にしみ出すペアはスピン反転散乱のためにスピン 1 重項からスピン 3 重項に化ける。このときの対称性はスピン 3 重項  $s$  波だから、フェルミ統計の要請に従うためには奇周波数ペアにしかなり得ない、はずである [2]。

この推論が正しいことは、ハーフメタルという大きな磁化を持つ磁性体を金属超伝導体で挟んだ場合のジョセフソン効果で検証された [3]。ハーフメタルは、例えば、上向きスピンの電子に対しては金属であるが、下向きスピンの電子に対しては絶縁体となる強磁性体である。スピン 1 重項ペアは上向きと下向き両方のスピンからできているので、ハーフメタルを通り抜けてジョセフソン電流を運べないはずである。しかし実験は確かにジョセフソン効果を示しており、実験を

説明するにはどうしても上向きスピンの 2 電子からなる奇周波数スピン 3 重項ペアが必要なのである [4]。この議論の中で興味深いのは、超伝導体自身は偶周波数スピン 1 重項  $s$  波という普通の超伝導体であるにもかかわらず、強磁性体の中に奇周波数ペアが勝手に現れる点である。

もう一つ、接合を用いた奇周波数ペアの作り方があ。それは金属とスピン 3 重項超伝導体を接合させる方法である。領域代表の前野氏らが発見した  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導はスピン 3 重項の例である [5]。また  $^3\text{He}$  の超流動はスピン 3 重項ペアが担っていることが分かっている。スピン 3 重項超伝導体の内部では軌道部の奇パリティ  $p$  波対称性が、2 電子の入れ替えに対するペア関数の反対称性を担っている。しかし、金属にしみ出したペアのペア関数の軌道部は偶パリティ  $s$  波に変わってしまうので、失った反対称性を補償するために周波数部が奇周波数対称性にならざるを得ない。即ちスピン 3 重項超伝導体・超流動体の近接効果で現れるペアは純粋に奇周波数ペアなのである。また、奇周波数ペアは接合だけでなく、空間的に不均一な超伝導体にはかならず存在する事が分かっている。たとえば超伝導体の表面や磁束渦糸の内部にも存在する [6]。だからけっして「希」な存在ではないのである。

このように偶周波数超伝導体を母体としてできる奇周波数ペアは、スピン反転散乱や空間的に不均一性のある系で偶周波数ペアに混ざるようにして現れる少々奇妙な存在であるといえる。しかしスピン 3 重項超伝導体の近接効果のように混ざりものない純粋な奇周波数ペアを取り出すことも出来るわけで、奇周波数ペアの物理は超伝導現象の重要な一部分なのである。上に磁束渦糸中心に奇周波数ペアがいると書いたが、これは奇妙に思われないだろうか？教科書を読むと、クーパーペアは磁場に敏感で、弱い磁場は排除できる

が、強い磁場の下では壊れてしまう事が良く知られている。では、奇周波ペアがどうして磁束芯という磁場の強い所を選んで現れるのだろうか？

### その奇なる質

超伝導電流 ( $J$ ) とベクトルポテンシャル ( $A$ ) を結ぶロンドン方程式  $J = -(ne^2/mc) A$  は超伝導現象の電磁気学的な異常を記述する基本方程式である。これとマクスウエルの方程式を連立させて解くことにより、マイスナー効果を説明することが出来る。即ちクーパーペアが磁場を排除するため、弱い磁場は超伝導体中で指数関数的に減衰する。その際に不可欠なのは方程式右辺の負符号である。右辺の比例係数は、電荷 ( $e$ )、電子の質量 ( $m$ )、光速 ( $c$ )、クーパーペアの密度 ( $n$ ) などすべて正の物理量で書けており、右辺にある比例係数の負符号は絶対に変わらない、と思われている。しかし超伝導の平均場理論が正しいとすると、近接効果によって現れる奇周波数ペアは見かけ上不可避免的に「負の密度」を持ってしまふ事が分かっている。電磁気学的に異常なマイスナー効果が消えたことで、奇周波数ペアが正常な電磁気学的性質を回復するのではなく、もっと異常な電磁応答を示すのである。これがパラマグネティック・マイスナー効果と呼ばれる現象であり [7]、誤謬を犯すことを恐れずに表現すれば、奇周波数ペアは磁場をより強く引き入れる性質があるといえる。

この性質を良く反映する観測量が表面インピーダンス  $Z=R-iX$  である。表面インピーダンスは低い周波数の電磁場に超伝導体はどう応答したかを表す量で、 $R$  は表面抵抗、 $X$  はリアクタンスと呼ばれ電磁波の吸収に関係する量である。理論的に、 $Z$  は線形応答の複素伝導率  $\sigma_1+i\sigma_2$  から計算できる。電磁場の周波数が

十分低い場合には、複素伝導率の虚部  $\sigma_2$  がペア密度  $n$  に比例するのである。通常の偶周波数ペアの場合、ペア密度  $n$  は正なので  $\sigma_2$  も正となり、その結果  $R < X$  という極めて普遍的な関係が導かれる。超伝導なのだから抵抗がとても小さいのは合理的である。その一方で、「負のペア密度」をもつ奇周波数ペアの場合、 $\sigma_2$  が負になり、 $R > X$  という直感的に理解しがたい関係を示すことが理論的に予言された [8]。

前にも述べたとおり、スピン 3 重項超伝導体と金属を接合させると、金属中には純粋な奇周波数ペアがしみ出す。一方スピン 1 重項超伝導体と金属を接合させると、金属中には純粋な偶周波数ペアがしみ出す。超伝導体と金属の接合で異常な関係式  $R > X$  が観測されれば、それは超伝導体がスピン 3 重項対称性を持つことと同値である。即ちペアの周波数対称性 (偶か奇)、ペア密度の符号 (正か負)、インピーダンスの大小 ( $R < X$  か  $R > X$ ) は完全に 1 対 1 の関係になっており、インピーダンスの測定はスピン 1 重項超伝導とスピン 3 重項超伝導を明快に峻別する yes/no 実験の一つになっているのである [9]。奇周波数ペアが持つ異常な電磁気学的性質がこの主張の背景をなしている。

### むすび

本領域計画班構成員の中では田仲氏、柏谷氏、赤崎氏、浅野が超伝導接合における奇周波ペアの研究、石川氏、東谷氏がエアロジェル中の  $^3\text{He}$  における奇周波数ペアの研究に携わっている。また三宅氏が奇周波数超伝導そのものの研究を行っており、鄭氏のグループが重い電子系の超伝導体において観測したゼロギャップ超伝導状態に興味深い解釈を与えている。世の中を見渡してみても、公募で加わっていただいた方々や各氏の関係者を含め、これほどの陣容で奇周波

数ペアを調べているグループは無い。議論を重ねつつ互いに知見を補足しあいながら「奇周波数ペア」の物理をより成熟させるのが、我々の使命かと考えている。

#### 参考文献

- [1] V. L. Berezinskii, JETP Lett. 20, 287 (1974).
- [2] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, Phys. Rev. Lett. 86, 4096 (2001).
- [3] R. S. Keizer et. al., *Nature* 439, 825 (2006).
- [4] Y. Asano, Y. Tanaka, and A. A. Golubov, Phys. Rev. Lett. 98, 107002 (2007).
- [5] Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, *Nature* 372, 532 (1994).
- [6] T. Yokoyama, Y. Tanaka, and A. A. Golubov, Phys. Rev. B 78, 012508 (2008).
- [7] Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B 72, 140503(R) (2005).
- [8] Y. Asano, A. A. Golubov, Y. Fominov, and Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. 107, 087001 (2011).
- [9] Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya, Phys. Rev. Lett. 99, 067005 (2007).

#### 著者紹介



#### あさの・やすひろ

1965年愛知県出身。1995年名古屋大学工学研究科応用物理学専攻後期博士課程修了。北海道大学工学研究科助手、講師を経て2011年から現職。物性理論とくに超伝導現象論を専門としている。物理学の根本的な現象を、機能性に結びつけるような研究をしたい。

トポロジカル超流動  $^3\text{He}$ -B 相の表面マヨラナコーン

野村 竜司 / 東京工業大学大学院理工学科 助教

1937年にエットーレ・マヨラナは、粒子と反粒子が等価なスピン  $1/2$  を持つ中性素粒子（マヨラナフェルミオンと呼ばれる）の存在を提唱した。近年、これと同様の性質を持つ準粒子状態が、ある種の超流動・超伝導体の表面に実現しているのではないかと指摘され、その探索が活発になされている。これまで銅酸化物高温超伝導体をはじめとした異方的超伝導体の表面に、アンドレーエフ束縛状態という低エネルギー準粒子状態が生じ、トンネルコンダクタンスのゼロエネルギーにピークを作ることは知られていた。超伝導オーダーパラメーターの符号の角度依存性にもなう、準粒子干渉効果として理解可能で、その存在条件などもまとめられている [1]。異方的対状態の中でも、スピン 3 重項  $P$  波超流動・超伝導体における表面アンドレーエフ束縛状態が、新たな注目を集めているのだ。トポロジカル絶縁体や量子（スピン）ホール系物質で生じるギャップレスのエッジ状態などと同様に、バルクのトポロジカルな性質を反映して生じる表面状態として表面アンドレーエフ束縛状態が理解可能であるとの提案（バルク-エッジ対応と呼ばれる）がなされたことに端を発する。しかも、この表面アンドレーエフ束縛状態は、マヨラナフェルミオンであるというのである [2,3,4,5,6]。トポロジカル  $P$  波対凝縮体の表面状態研究の機運が盛り上がっている。

では超流動  $^3\text{He}$  を用いて、表面状態を研究することの意義は何であろうか。  $P$  波超伝導体ではないかと考えられている物質は多数存在するが、その対称性が完全に決定されているものは少ない。一方で、超流動  $^3\text{He}$  のバルク状態は、スピン 3 重項  $P$  波対状態として確立しており、複数の安定相の対称性も曖昧さ無しに完全に分っている。不純物や格子欠陥などの影響を受けない様々な高精度の実験との整合性から、スピン 3 重項  $P$  波対状態は確立しているのである。発見の初期になされた NMR 実験のみならず、スピン超流動流、スピンジョセフソン効果、多彩なオーダーパラメーター集団モードや量子渦など、スピン 3 重項  $P$  波

対状態に固有の多様な物理現象が研究されてきた歴史がある。バルク状態に曖昧さが無い超流動  $^3\text{He}$  は、表面状態の物理を攻略するのにも、理想的物質であると言えるだろう。正しく計算された理論は実験と合うはずであり、未知パラメーターの微調整によって理論と実験を合わせるという余地はない。合わない理論は間違っていることになるので、ある意味、決着のつく系である（はずである）。はたして超流動  $^3\text{He}$  は、本当にトポロジカル超流体であろうか？線形分散を持ったギャップレス表面束縛状態（マヨラナコーンと呼ばれる）の存在が、実験的に示されれば良いと考えられる。ただし、電荷を持たない超流動  $^3\text{He}$  では、当然ながらコンダクタンス測定は意味がない。 $^3\text{He}$  の表面状態を調べる手段は長らく存在せず、理論的考察は進められていたが、実験的には最近まで研究されて来なかった。

傍から見てみると、超伝導体では対状態の決定は、なかなか時間がかかるように見受けられる。電荷、磁性、欠陥、バンド構造、強相関などの様々な要因で、バルクの振る舞いが複雑であることが原因なのであろう。もちろん、これらの要因が超伝導体の物理を豊にしているに違いないが、対の対称性の決定という点においては、ことを複雑にしているに違いない。超伝導体においては、トンネルコンダクタンス測定により表面アンドレーエフ束縛状態の振る舞いを調べ、そこからバルクの対状態を推定するという手法は、高温超伝導体をはじめとして広く取られてきた。超流動  $^3\text{He}$  と比較すると、言わば逆向きのアプローチであるが、現在でもトポロジカル超伝導体の研究に活かされている重要な手法である。

長らく実験的には手付かずであった超流動  $^3\text{He}$  の表面アンドレーエフ束縛状態であるが、我々は横波音響抵抗測定が表面アンドレーエフ束縛状態を感度よく捉え、その表面状態密度の分光的情報が得られることを明らかにした [7,8,9]。また壁の境界条件を  $^4\text{He}$  薄膜でコートすることにより制御し、鏡面度が大きい時に、マヨラナフェルミオンの特徴の一つである線形分散関

係を持ったギャップレス状態が生じることを明らかにした [10,11]。

**横**波音響抵抗とは、 $\Pi$ を液体が壁に及ぼすずれ応力、 $u$ を壁の振動速度としたとき、 $Z = \Pi / u$ で定義される複素量である。ずれ振動する壁と液体との横運動量の受け渡しの目安であり、液体の最も基本的な応答の一つである。流体力学が成り立つ低周波では、粘性測定と等価であり分りやすい。実際に実験を行った超低温・高周波では無衝突領域であるため、粘性との単純な関係は無くなる。熱励起された準粒子の散乱や対生成機構が、 $Z$ に効いてくる。液体  $^3\text{He}$  中に浸した水晶振動子の共鳴線幅から実部 ( $Z'$ ) を、共鳴周波数変化から虚部 ( $Z''$ ) を求めることができる。水晶振動子の共鳴周波数は 10 から 100 MHz 程度であり、超流動  $^3\text{He}$  のギャップエネルギー  $\Delta$  と同程度であるため、表面に存在する束縛状態のエネルギー構造を分光的に明らかにできる。縦波ではバルクに超音波が伝播してしまうために、表面状態を捉えることはできない。横波を使うことは、ミソである。

まずは、準粒子散乱の境界条件を表す鏡面度  $S$  について説明しておく。これは壁での鏡面散乱の起こる確率を表し、 $S = 1$  が全ての準粒子が鏡面散乱する極限、 $S = 0$  が全ての準粒子が等方的に散乱する拡散的極限となる。中間の値の時は、両者の寄与が  $S : 1 - S$  の割合となることを意味するパラメーターである。壁での準粒子散乱を特徴付ける長さスケールはフェルミ波長であり、原子レベルのラフネスが準粒子の非鏡面散

乱に効いてくる。したがって何の処理もしていない壁の表面は十分に粗く、 $S = 0$  の拡散的散乱の極限にあると考えられる。超流動  $^3\text{He}$  を用いた表面状態の研究で便利な点は、振動子壁を超流動  $^4\text{He}$  薄膜でコートすることにより  $S$  を制御できることである。膜厚を変えることにより、 $S$  を連続的に変えることが可能である。また  $S$  の値は、常流動  $^3\text{He}$  の横波音響抵抗の測定から、実験的に決めることができる。超伝導体を用いた研究では実現困難な、境界条件（あるいは乱れと言っても良いだろうが）に対する表面アンドレーエフ束縛状態の系統的变化を調べることが可能となる。

理論で期待される境界条件への依存性を見てみよう。図 1 は、長登らによって計算された超流動  $^3\text{He}$ -B 相の表面における角度分解状態密度の理論計算である [11,12,13]。エネルギーの原点はフェルミエネルギーである。壁に平行な運動量成分とエネルギーに対しての状態密度が、いくつかの  $S$  に対して示されている。運動量に対しても連続分布であるが、この図では見やすさのために間引いている。 $S = 1$  では非常にシャープな線形分散が見られるが、これがマヨラナコーンである。 $S = 0$  では壁に沿った方向での並進対称性が破れるため、エネルギー巾が広がりマヨラナコーンは見とれない。しかし、中間程度のラフネス、例えば  $S = 0.5$  では、エネルギー巾は多少広がっているが、マヨラナコーンははっきりと見える。マヨラナコーンの構造は、ある程度境界条件を変えても安定に残ることが分る。

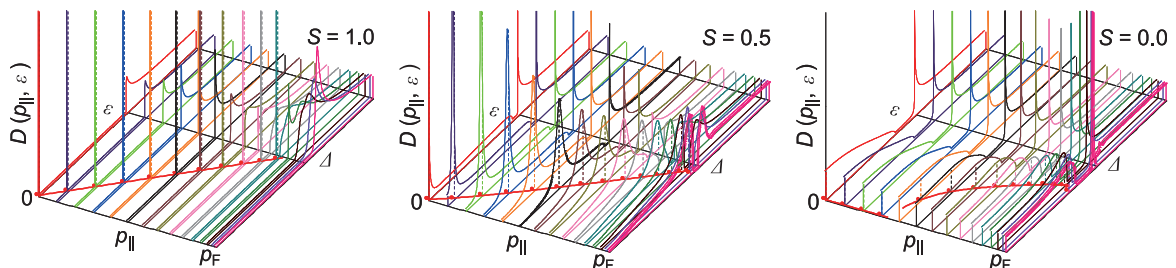


図 1.  $S$  を変えたときの角度分解表面状態密度の理論計算



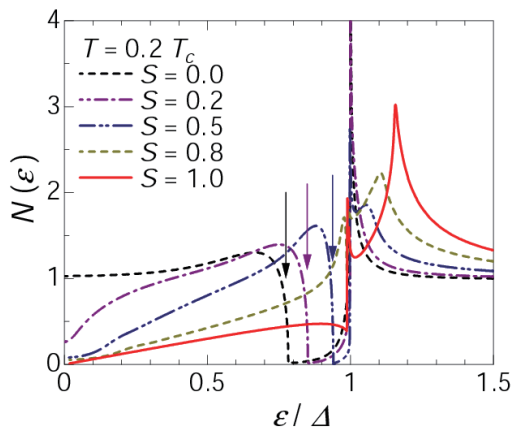


図2. 角度平均した表面状態密度の理論計算

次に図2に示した角度平均した状態密度の振る舞いを見てみよう [11,12,13]。S = 1 では、線形分散関係を反映した、エネルギーに比例する低エネルギー状態密度が現れる。S = 0 では、ほぼ平坦な状態密度を取り、上端でシャープに0に落ちるといった特異な振る舞いをする。矢印で示したこの上端のエネルギーを  $\Delta^*$  と呼ぶことにする。 $\Delta^*$  と  $\Delta$  の間のエネルギーには状態が現れず、小さなギャップが現れるという特徴がある。S が0から1へと大きくなるに従い、ゼロエネルギー状態密度は減少し、 $\Delta^*$  は増加してギャップレスになるという系統的变化を理論は予測する。 $\Delta^*$  と  $\Delta$  の間にギャップが生じることは、いくつかのグループがセルフコンシステントな計算から示していた。しかし、その物理的機構は良く分っていなかった。最近、長登らは、ラフネスによる散乱過程を考え、エネルギー  $\Delta$  以下の束縛状態と  $\Delta$  以上のボゴリョフモード間に生じるレベル反発に起因するギャップ構造であるとの説明を与えた [14]。また同様なラフネスによるギャップの生成は、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のような2次元的 ABM 状態でも期待できる P 波対状態に普遍的な振る舞いの可能性があるが、まだ超伝導体での報告は無いようである。

トポロジカル超流動・超伝導体の表面状態は、乱れに対してロバストであると標語的に言われることは良くある。しかし、具体的に意味することが必ずしも明

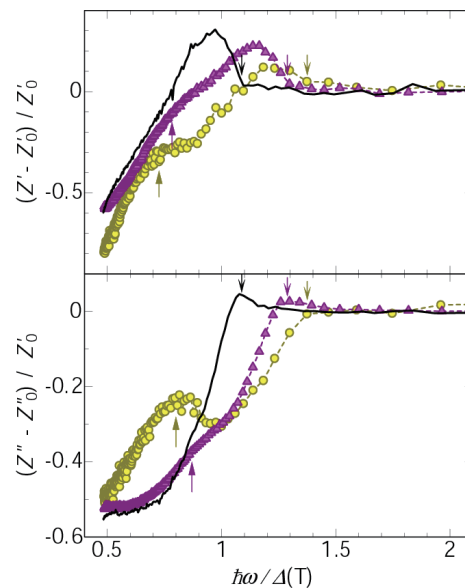


図3. 横波音響抵抗のエネルギー依存性の実験結果

確にされていないと感じるのだが、どうであろうか？我々の観測した、S を変えたときに生じる表面状態の変化は、表面状態のロバスト性という観点からも明らかにすべき重要な問題と考えている。

図3には、Z の測定結果をいくつかの S の値に対し示してある [11]。横軸は  $\Delta(T)$  でスケールしたエネルギー依存性にしてあるが、高温が高エネルギー、低温が低エネルギーに対応しており、温度依存性と本質的には変わらない。図4は Z のエネルギー依存性の理論であり、S 依存性も含めて実験の特徴を全て再現している。特徴的な振る舞いが、対破壊エネルギー  $2\Delta$  よりも低エネルギーで現れていることに注意して頂きたい。バルク B 相では、 $\Delta$  以下には状態は存在しない。したがって、 $2\Delta$  以下の低エネルギーで Z に構造が現れるという実験事実は、表面に低エネルギー準粒子状態が存在するということの直接の証拠である。

まず S = 0 での Z の測定結果の振る舞いを見ていくことにしよう [11]。下矢印で示すエネルギーには、実部にキック、虚部にピークがある。これらは理論でも再現されており、 $\Delta + \Delta^*$  のエネルギーで現れている。 $\Delta^*$  は S が小さいときに現れる、表面状態密度のシャープな上端のエネルギーであった。このキック、ピークは  $\Delta + \Delta^*$  のエネルギーを境に対破壊の様相が大きく変化することともなう、弱い特異性の現れとして理

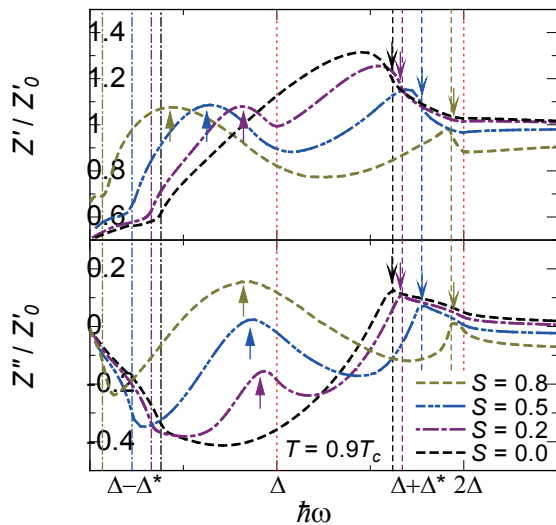


図4. 横波音響抵抗のエネルギー依存性の理論計算

解できることが、理論で分かっている。つまり図2で示した表面状態密度のサブギャップ構造を実験的に捉えたことになる。

$S$ が大きくなるにしたがい、キंक、ピークの位置が高エネルギーにシフトしていることがわかる。これは $S$ が大きくなるに従い、 $\Delta^*$ が大きくなっていることを示しており、理論の予測する $\Delta^*$ の $S$ 依存性と符合する。実験から $S$ の関数として $\Delta^*$ を決めることも可能で、 $S$ が十分大きいときに $\Delta = \Delta^*$ 、つまりラフネスが小さくなると表面状態がギャップレスになることが実験的にも確かめられた [9]。

次に低エネルギーでの $Z$ の振る舞いを見てみよう。 $S = 0$ では低エネルギーで単調に減少しているが、 $S$ が大きくなるにつれ、上矢印で示した新たなピークが成長するのが見える。この変化も理論で再現されており、熱励起された表面準粒子の非弾性散乱に起因することが示されている。図4の理論を見れば、 $Z$ の低エネルギーピークは $\Delta - \Delta^*$ から大きくなり始め、 $\Delta$ 付近で減少していることが分る。マヨラナコーンがそこそこはっきり見える $S = 0.5$ で考えてみると、図2の表面状態密度はゼロエネルギーで非常に小さく、また $\Delta^*$ 直下に極大を持っている。したがって、音響エネルギー $\Delta$ を受けとって $\Delta$ 以上のボゴリェボフモードに励起される低エネルギーの準粒子数は、 $S = 0$ の場合と比べ

て少なくなる。また $\Delta - \Delta^*$ の音響エネルギーを受けとって $\Delta$ 以上に励起される、極大付近の熱準粒子の占有数は多くなる。 $Z$ の低エネルギーピークが $\Delta - \Delta^*$ から $\Delta$ 程度のエネルギー巾を持っていることは、マヨラナコーンの顕在化にともなう、表面状態密度の構造変化から直感的に理解可能である。もちろん $Z$ の理解には、単なる状態密度ではなく、横運動量の受け渡しを考慮しないとイケないので、この説明は単純すぎる。本質的に重要なのは、束縛状態の準粒子分散関係の変化である。

**壁**のラフネスを変えたときの $Z$ の系統的変化は、超流動 $^3\text{He}$ の表面アンドレーエフ束縛状態の角度分解状態密度変化としてよく説明できた。したがってラフネスが小さい時に、超流動 $^3\text{He}$ の表面にマヨラナコーンが生じることが実験的に示されたと言って良い。理論の予測するように、スピン3重項P波超流動 $^3\text{He-B}$ 相は、確かにトポロジカル超流動体であった [10,11]。バルク状態に曖昧さの無いP波対状態で、電子系に先駆けて表面のギャップレス線形分散関係が確認できた意義は大きいと考える。

マヨラナフェルミオンの重要な性質の一つ、線形分散関係は示されたが、より直接的なマヨラナ性の検証は次の課題である。マヨラナ性の帰結としてB相の表面状態の自由度が半減しているため、磁気レスポンス

が異方的になるとの予測があるので [3,4,6,15]、その検証を行ないたい。またヘリカル状態であるために、B相のマヨラナフェルミオンは表面スピンを運んでいるはずであるが、この検出方法も考案できると面白い。

実際の研究の進展は、この解説で書いたように一本道でスムーズに進んだわけではなかった。我々が実験で見出したZのキック・ピーク構造の解釈に悩んでいた時に、理論で表面状態を考慮すると再現することが示された。またSが大きい時に理論が予言した低エネルギーのピークが、実際に<sup>4</sup>He薄膜コートの実験で確認された。B相のマヨラナフェルミオンの話題が出たのは、さらにその後のことであった。実験と理論が抜きつ抜かれつしながら進展する様を見ることが出来たのは、貴重な体験であった。理論面でお世話になった広島大学の長登康氏、東谷誠二氏、松尾繁政氏、山本幹雄氏、永井克彦氏に感謝申し上げます。なおこの研究は東京工業大学奥田研究室で行なわれた。

#### 参考文献

- [1] S. Kashiwaya and Y. Tanaka, Rep. Prog. Phys. **63**, 1641 (2000).
- [2] A. P. Schnyder *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 195125 (2008).
- [3] S. B. Chung and S. C. Zhang, Phys. Rev. Lett. **103**, 235301 (2009).
- [4] T. Mizushima and K. Machida, J. Low Temp. Phys. **162**, 204 (2011).
- [5] Y. Tsutsumi *et al.*, J. Low Temp. Phys. **162**, 196 (2011).
- [6] Y. Nagato *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 123603 (2009).
- [7] Y. Aoki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 075301 (2005).
- [8] M. Saitoh *et al.*, Phys. Rev. B **74**, 220505(R) (2006).
- [9] Y. Wada *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 214516 (2008).
- [10] S. Murakawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 155301 (2009).
- [11] S. Murakawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 013602 (2011).
- [12] Y. Nagato *et al.*, J. Low Temp. Phys. **110**, 1135 (1998).
- [13] K. Nagai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 111003 (2008).
- [14] Y. Nagato *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 113706 (2011).
- [15] R. Shindou *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 180505 (2010).

#### 著者紹介



#### のむら・りゅうじ

1968年大阪府出身。91年京都大学理学部卒業、98年京都大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学、00年博士（理学）。Northwestern大学研究員を経て現職。量子液体・固体の動的現象に興味を持っている。

トポロジカル超伝導体  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の単結晶試料作製

瀬川 耕司 / 大阪大学 産業科学研究所 准教授

トポロジカル絶縁体をベースとした超伝導体である  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  は 2009 年に Princeton 大学の Cava 教授のグループによって発見され、プレプリントサーバーに投稿されたことによりそれ以来さかんに研究されている [1]。この系はトポロジカル絶縁体として知られる  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [2] に Cu をインターカレートした系で、ドーブされたトポロジカル絶縁体と言ってよい。キャリアドーブされてもこの系のトポロジカルに非自明な価電子バンドはその構造を保つことが明らかになっており [3]、この系が時間反転対称性を保ったトポロジカル超伝導体であると期待されていた [4]。

私の所属する安藤研究室ではこの  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  という物質の単結晶について、これまでで最高の超伝導特性を示す試料作製の方法を確立し、様々な成果をあげることができた [5-7]。ここでは単結晶試料の作製法に焦点をあて、ふだん発表では触れない当時の経緯も含めて紹介したい。

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  は発見時の発表では Melt-growth 法によって単結晶が作製されていた。この手法は  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  等と同じものであり、調和熔融する化合物に適用される至って単純なものである。酸素と反応させないため石英管への封入が必要となることが面倒ではあるが、一連の化合物の融点はだいたい  $800^\circ\text{C}$  以下と低く、石英管と試料との反応を考えなくてよいため、封入する石英管そのものを先の尖った形のつぼと見立てて結晶を成長させることができる。また、電気炉内に自然につく温度勾配を使った成長ができるため、特殊な設備は全く必要としない。

しかし、そうしてできた  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の単結晶であるが、帯磁率で超伝導による反磁性を観測することに成功はしたものの信号は小さいものとどまり、電気抵抗の消失を当研究室で観測することは当時全くできなかった。原因として考えられることは 2 つあり、1 つは試料の超伝導そのものが弱いこと、そしてもう 1 つは試料が空気中で劣化することである。後者につい

ては最初の論文 [1] でも指摘されていたので簡易型グローブバッグを用いて端子付けを行ったが電気抵抗の消失はおろか超伝導転移に伴う抵抗率の減少さえ観測することができなかった。

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  における Cu は周期的な結晶格子の一部となるよりは van der Waals ギャップをもつ層状化合物である  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の層間に半ば孤立して存在すると考えられている。このことを、Cu が「インターカレート (intercalate) される」と表現するが、Melt-growth 法ではすべての Cu がインターカレートされるわけではなく、その一部は結晶内の Bi を置換してしまうと考えられる。Cu は +1 価あるいは +2 価であるのに対し Bi は基本的に +3 価であるため、この Cu-Bi 相互置換は n 型キャリアを減少させ、また結晶構造の乱れを増やしてしまう可能性がある。それに対し、電気化学的手法により Cu インターカレーションを  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  単結晶に対して付加的に行うことによって相互置換の問題を解決し、より良い超伝導特性を示す試料を得られると期待してわれわれは電気化学的手法による試料作製を試みた。そのセットアップの概念図を [図 1](#) に示す。

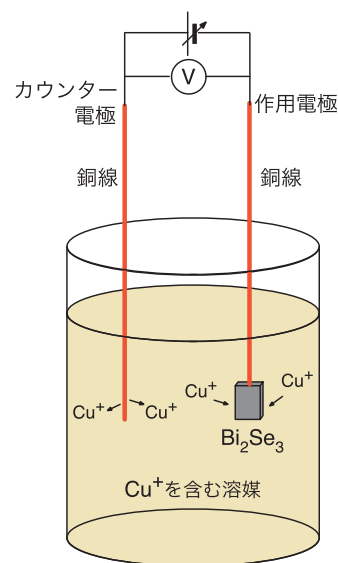


図 1: Cu インターカレーション用電気化学セットアップの概念図

当研究室では高温超伝導銅酸化物研究のために電気化学的な酸素注入を試みたことがあり、その名残で手製の電気化学のセットアップが残っていたことは幸運であった。電気化学には電解液が必要で、最初は硫酸銅水溶液を用いて試料作製を試みたが超伝導を観測することはできなかった。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  が空気中で劣化して超伝導を示さなくなる理由として空気中の酸素か水のいずれかとの反応によるものが考えられるが、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の超伝導体を作製するには水を排除する必要があることがこの結果から示唆された。よって次に我々は、試料作製のプロセスから水を徹底的に排除するために可能な限りすべての作業をグローブボックス内で行うことに決めた。具体的には、電気化学専用グローブボックスを購入し、それに端子を導入することによりグローブボックス内で同時に最大6個の試料について電気化学インターカレートを行うことができる装置を立ち上げた。溶媒には水を使えないのでアセトニトリルを使用し、純度 99.99% のヨウ化銅 (CuI) を飽和するまで溶解させた [6]。

ここまでして作製した  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  はめでたく超伝導を…とほしかったところだが、期待に反して試料はまたしても超伝導を示さなかった。試料の質量はインターカレート後に問題なく増えており、表面にめっきされてしまった形跡もないため、最後の手段として試料をアニールすることを試みた。そのアニールが成功し、こうしてやっと、超伝導を示す試料が電気化学的に合成できたのである。

**幸**いなことに一連の試料では比較的大きな反磁性磁化率が観測され、そこから見積もられる超伝導体積分率は 40% を超えるところまで到達した。次の課題は電気抵抗消失の観測であったが、別のグローブボックスを購入して端子付け作業もすべてその中で行った。その結果、比較的容易に電気抵抗の消失を観測することができた (図 2)。ただし、電気化学的手法による単結晶においてもアニールは行っているため

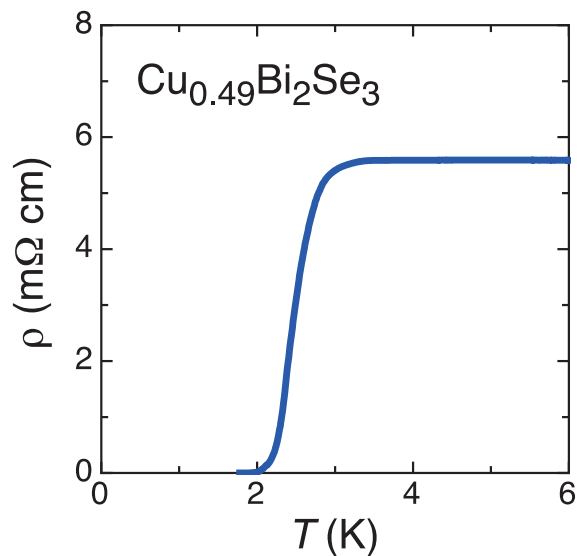


図 2 : 最初に電気抵抗消失を観測した結果。x が大きい組成は乱れが多く常伝導状態の抵抗率が高い。

$\text{Cu-Bi}$  の相互置換が完全に抑えられるわけではなく、乱れを減少させることができたわけではない。この手法で超伝導特性を改良できた原因は正確にはわかっていないが、Melt-growth 法に比べればより多くの Cu が効果的にインターカレートされている可能性は高いと考えられる。ちなみに Melt-growth 法で作製した単結晶でもアニールによって超伝導特性を改善することができるが、当研究室で実験した限り電気化学的手法によるものには遠く及ばない。

上述したように反磁性や電気抵抗の消失で試料の基礎的特性は確かめられたが、一連の試料における最初の特筆すべき成果は超伝導転移による異常が比熱で観測できたことであった。もともとこの  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  はキャリア濃度が  $10^{20}(\text{cm}^{-3})$  台と小さいものであるため、電子比熱の寄与が小さい。そのため、ゼロ磁場下での比熱から磁場で超伝導を抑制した場合の比熱を差し引くことにより、ようやく比熱の温度依存性に飛びを観測することができた (図 3)。この事実から、この系にお

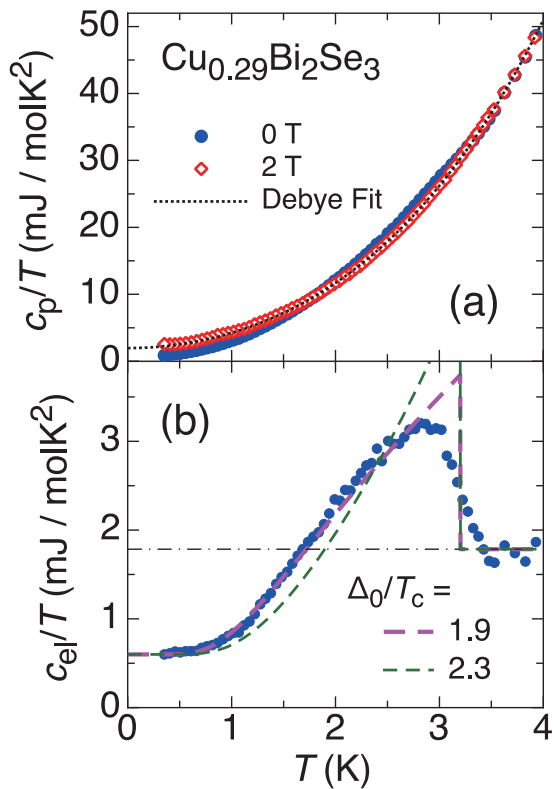


図3:  $\text{Cu}_{0.29}\text{Bi}_2\text{Se}_3$  における比熱の温度依存性。(b) はゼロ磁場における比熱から磁場中のそれを差し引いた電子の寄与を示す。点線は強結合 BCS によるフィッティングの結果である。

ける超伝導がバルクによるものであることがようやく明らかになった。また、比熱の温度依存性から超伝導ギャップはフルギャップであることが示唆され、この物質がトポロジカル超伝導体であることと矛盾しない結果であった [5]。

その後、これらの試料を用いてソフトポイントコンタクト実験を行ったところゼロバイアスコンダクタンスピークが観測され、この系がトポロジカル超伝導体であると結論することができた [7]。NMR 測定や光電子分光実験も共同研究によって現在進行中であり、超伝導ギャップについてさらなる知見が得られる等の成果が今後も期待される。

本研究はクリーナー・マルクス (M. Kriener)、任之 (Zhi Ren)、佐々木聡、安藤陽一の各氏との共同研究である。

- [1] Y.S. Hor *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 104, 057001 (2010).
- [2] H. Zhang *et al.*, *Nature Physics* 5, 438 (2009).
- [3] L. A. Wray *et al.*, *Nature Physics* 6, 855 (2010).
- [4] L. Fu and E. Berg, *Phys. Rev. Lett.* 105, 097001 (2010).
- [5] M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 106, 127004 (2011).
- [6] M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando *et al.*, *Phys. Rev. B* 84, 054513 (2011).
- [7] S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 107, 217001 (2011).

## 著者紹介



### せがわ・こうじ

1971年東京都生まれ。94年京都大学理学部卒業、96年京都大学大学院理学系研究科修士課程修了。05年博士(理学)。(財)電力中央研究所主任研究員などを経て2008年から現職。専門は単結晶作製と輸送特性の測定。

# 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

## Jan. 2012

「トポロジカル物質に注目」、「電子材料研究の視点が変わり変わった」2012年1月3日の日本経済新聞（電子版）に、安藤陽一教授（C01班）らの発見、永長直人教授（C01班）のコメント、前野悦輝教授（A01班）による本新学術領域研究の活動コメントなどが取り上げられました

## Jan. 2012

田仲（D01班代表）、佐藤（D01班）、永長（C01班）による超伝導における対称性とトポロジ（奇周波数クーパー対とエッジ状態）に関するレビュー論文が J. Phys. Soc. Jpn. の超伝導特集号に出版されました

## Jan. 2012

前野（領域代表）、米澤（A01班）、石田（A01班）らによるルテニウム酸化物超伝導のレビュー論文が J. Phys. Soc. Jpn. の超伝導特集号に出版されました

## Nov. 2011

C01班佐藤らのタリウム系トポロジカル絶縁体におけるディラック電子の質量獲得に関する論文が Nature Physics に出版されました。また実験結果がその表紙を飾りました

## Nov. 2011

トポロジカル絶縁体の関連物質におけるトポロジカル超伝導を初めて確認した C01班瀬川らの論文が、物理学上の重要な進展を伝える米国物理学会のオンライン雑誌 Physics で紹介されました

## Oct. 2011

トポロジカル絶縁体の特性向上を報告した C01班瀬川らの論文が、物理学上の重要な進展を伝える米国物理学会のオンライン雑誌 Physics で紹介されました

## Jul. 2011

日本物理学会誌 2011年7月号に前野（A01班代表）・岩佐（C01班連携）らの記事「超伝導 100周年」が掲載されました

## Jul. 2011

公募研究 D04班井村らの論文「グラフェンを用いた超伝導ジョセフソン素子の特性解析」が日本物理学会誌で注目論文として取り上げられました

## Jun. 2011

C01班上野、野島、岩佐らの論文がネイチャー・ナノテクノロジー 電子版（5月22日）に掲載されました

## Jun. 2011

佐藤（C01公募）、安藤、瀬川（C01）らによるトポロジカル絶縁体の電子スピンの挙動に関する論文が Physical Review Letters 106号に掲載されました



## 秋山 綱紀

東京工業大学 大学院理工学研究科 博士後期課程 1 年

滞在先：大阪市立大学 大学院理学研究科

(派遣元研究者：野村 竜司、受入研究者：石川 修六)

## BO1 → BO1

**超**流動<sup>3</sup>He B 相における表面アンドレーエフ束縛状態のマヨラナ性に起因する磁気異方性を検証する実験の準備を進めている。現在研究に用いている横波音響インピーダンス測定では、磁場の方向に応じてインピーダンスの振る舞いが異なると予測しているが、理論的な検討はまだ十分になされていない。一方で、帯磁率の磁気異方性が存在するという理論予測はされており、その観点からの研究も検討している。そのためには NMR による帯磁率測定を行えば良いのだが、近年我々は超音波測定を主に行ってきた。そこで、超流動<sup>3</sup>He の NMR 実験を数多く行ってきた大阪市立大学に出向いて、実験のノウハウを伝授してもらうことにした。

滞在は一週間で、まず始めに現在進行中の我々の平行平板実験の進捗状況を説明し、アドバイスをもらった。続いて、大阪市立大学で現在行われている NMR 実験を見学して、超低温下での NMR 実験のセルや回路、マグネットやピックアップコイルなどの基礎的な事項について学んだ。さらに、過去に大阪市立大学で行われた平行平板実験の詳細を学位論文で勉強し、疑問点を質問することで補足説明を受けた。以上から、今後の注意点や直面すると予想される課題や問題点を明確にすることができた。

NMR 信号は非常に微弱なので、表面帯磁率を測るには多数の平行平板を用意する必要がある。また、表面の影響が大きく表れるのはコヒーレンス長の数倍ほどなので、平行平板の間隔として数  $\mu\text{m}$  ほどが求められる。さらに、充填率を考慮すると、平行平板シートの厚さ自体もなるべく薄いことが望まれる。こういった厳しい条件で実験セルを作製するには、高い技術と工夫が求められる。我々は、既存のやり方を参考にしながらも更に高精度の平行平板を作製するべく作業の改

良を図った。平行平板作製自体は本プログラムの前に完成しており、その手順や改良点を石川教授に説明し、張力をかけて平行平板シートの歪みを排除した点や平行平板のスペーサーとして使用するビーズの除去の提案などで高い評価をいただいた。平行平板の綺麗な断面をどのようにして得るかという目下の課題にも、ひとつの解決策を示してもらった。

現在大阪市立大学の NMR 実験は、レーザー冷却系を除けば最低温記録を保持している二段核断熱消磁冷凍機で行われている。本プログラムの間は測定中であり、実際に実験セルや実験空間を直接見ることはかなわなかったが、主に測定回路や測定装置などの説明をしていただいた。しかし、測定中だからこそ感じ取れるノイズとの戦いや共鳴ピークのあるべき姿について学ぶことができた。これは今後実験していくうえで非常に貴重な財産になるだろうと思う。

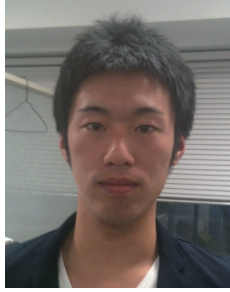
三月上旬という、研究室にとっては卒業研究などで忙しい時期にお邪魔することになり、大阪市立大学石川教授および低温研究室の皆様にご迷惑をかけた。さらに学位論文を中心として数多くの資料を提供



NMR 測定が行われている二段核断熱消磁冷凍機本体。ノイズとの戦いの日々でした。

していただき、歓迎会まで開いていただいた。この場を借りて改めて深く感謝を申し上げます。また、このような機会を設けてくださった新学術領域の若手相互滞在プログラムに感謝いたします。





## 伊井 彰宏

名古屋大学大学院 工学研究科 修士課程 1 年

滞在先：東京大学 物性研究所

(派遣元研究者：田仲 由喜夫、受入研究者：押川 正毅)

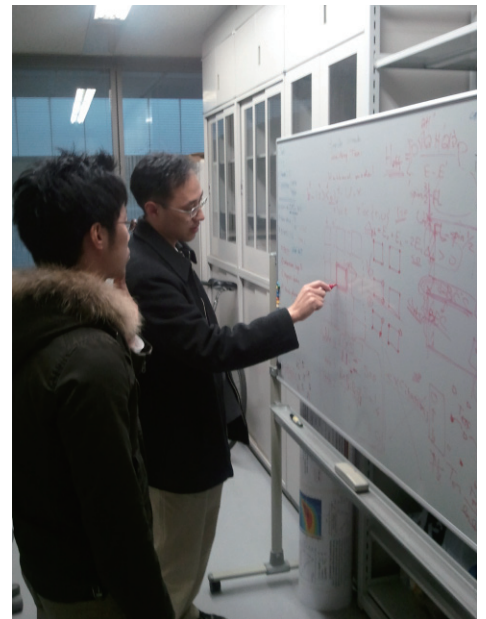
## DO1 → DO1

我々の研究では、量子異常ホール絶縁体/ $s$ 波超伝導体接合系においてカイラル Majorana エッジ状態が発現するという理論的提案に基づき、状態密度などの数値計算を行なっている。滞在当时、エッジ状態の振る舞いをトポロジカル量子数の1つである1次元巻き付き数で説明するというテーマで論文[1]を執筆中であり、その内容や今後の方針について、押川教授、並びに同じく物性研所属である佐藤助教に大変有益な助言を頂いた。具体的には、Zeeman 磁場の項を加えた際の振る舞いの解析や、超伝導体を  $s$  波から  $d$  波に変えた際に予想されるエッジ状態などである。また、超伝導体の渦核における Majorana 型励起がなぜ量子計算に応用できるかなど、基本となる物理的理解も深めることができたと思う。最終日には研究室のセミナーで発表する機会も頂いた。拙い英語で聞き苦しかったことと思うが、押川研究室の皆様は熱心に議論していただき、ありがたい経験となった。修士2年間を通して英語で口頭発表をしたのは、私にはこの滞在先が唯一の機会であった。

押川研究室は留学生が多く、団らんなどにおいても公用語が英語であった。普段の私の研究室ではありえない環境であり、それがすごく新鮮で、かつ貴重なものだと感じた。滞在中同室であった台湾出身のツイさんとの会話も印象に残っている。今後博士後期やPDなどを考えているならば、早いうちにアメリカなどに留学したほうが良い、といったアドバイスを頂いた。結局その後企業に就職することとなったが、当時進路に悩んでいた私にとっては貴重な判断材料となった。

突然のお話にも関わらず受け入れをしてくださり、議論や発表の場を多く用意して下さった押川教授、並びに研究室の皆様へ感謝したい。内容の濃い1週間で、その後の研究を進める上でも有意義な滞在先となった。

[1] Phys. Rev. B 83, 224524 (2010)



(左)筆者。押川研PD(当時)のツイさん(右)との議論風景。英語で自分の研究を説明するのが大変でした；)

### 若手相互滞在プログラム

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週間程度滞在先し、その分野の研究の日常を体験することで、自身の視野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を広げると同時に、受入研究です。

若手研究者間の直接的な交を流によって、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。



## 包 桂芝

岡山大学 大学院自然科学研究科 博士課程 1 年

滞在先：京都大学 大学院理学研究科

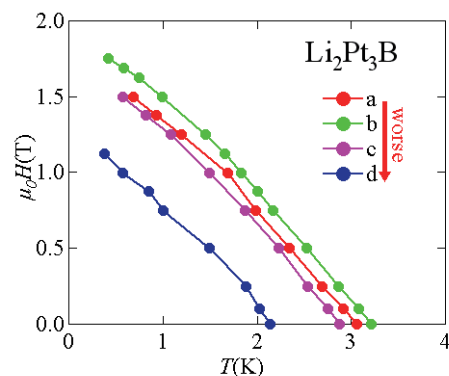
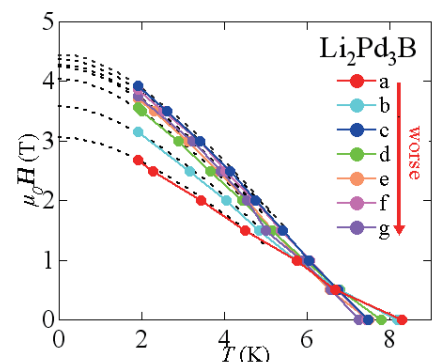
(派遣元研究者：稲田 佳彦、受入研究者：前野 悦輝)

CO1 → AO1

空間反転対称性の破れた結晶構造で発現する超伝導ではパリティ混合超伝導の実現の可能性が期待されており、興味深い研究対象になっています。私たちの研究している空間反転対称性の破れた超伝導体  $\text{Li}_2\text{T}_3\text{B}$  はスピン一重項状態とスピン三重項状態がパリティ混合する超伝導体として注目されています。 $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  はスピン三重項と一重項が約 2 : 1 の割合で混合する超伝導であり、同じ結晶構造をもつ  $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$  はスピン一重項が約 8 割を占める超伝導であることが示唆されています [1]。通常の  $s$  波超伝導は非磁性不純物にあまり影響を受けず、超伝導対関数に符号反転を伴う非  $s$  波超伝導は非磁性不純物に敏感であることが知られていますが、パリティ混合超伝導状態では不純物効果がどのように効くのかは明らかになっていません。また、我々は非磁性不純物効果を利用してパリティ混合の割合を制御できると期待しています。そこで、今回、B を Al 置換し、不純物や結晶欠陥の異なる試料を準備して、超伝導相図の非磁性不純物依存性を調べることにしました。 $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  の転移温度は 3K 以下なので、詳しく調べるために、京都大学の前野研究室に訪問して、 $^3\text{He}$  冷凍機オプションが整備された PPMS を使用して実験しました。

図 1 に示すように、 $s$  波超伝導が支配的と示唆される  $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$  とスピン三重項が 6 割位を占める  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  では超伝導相図の不純物依存性が異なることがわかりました。 $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$  で観測される  $H_{c2}(0)$  の増大は、単元素の  $s$  波超伝導でピパードが議論した振る舞いと類似であり、非磁性不純物効果も  $s$  波的な振る舞いが強く観測されています。これに対して、スピン三重項超伝導が支配的であると期待されている  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  では、フェルミ面上での超伝導ギャップの平均が減少し、超伝導状態が弱くなる傾向がわかります。た

図 1：パリティ混合超伝導体  $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$  と  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  の超伝導相図の試料依存性



だし、 $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  でも非磁性不純物効果による超伝導転移温度の低下については期待されるほど大きくなく、パリティ混合の影響があるのか、これから詳しく調べて明らかにする必要があります。パリティ混合の割合が変化するのも含め、他の実験手段を利用した実験も行い、詳しい解析を進める予定です。

今回の実験では PPMS の不具合もあり、その対応も含めて前野研究室の江口さんには大変お世話になりました。若手相互滞在プログラムを利用することで、他の研究室に行って一緒に実験したり、勉強したりして楽しかった。私の研究について、前野先生、米澤先生の指導と江口さんと一緒に実験している間にいろいろ議論していただいたことが非常にいい勉強になりました。私の場合、1 週間以上の子連れの出張でしたので、前野先生にも気を使っただき、西村さんには保育園の手配等、研究に集中できるように多くの配慮をして頂いて大変助かりました。ありがとうございました。今回の滞在は留学生として勉強している私にとって非常に有意義な経験でした。

[1] Yuan H Q, *et al.* Phys. Rev. Lett. 97 017006 .2006



追伸：前野研究室の実験室が大変きれいに整理整頓されていて参考になりました。岡山でも、実験室を整えてよい環境を作るようにがんばろうと思います

前野研の実験室の棚。キレイ！

## 山影 相

名古屋大学 大学院工学研究科

(受入研究者：D01 田仲 由喜夫)

大学院博士課程ではトポロジカル絶縁体の輸送現象、特にアンダーソン局在の臨界性や pn 接合における電流・スピンの振る舞いを理論的に研究していました。トポロジカル絶縁体の駆動力でもある特徴的な性質の一つが強いスピン軌道相互作用とそのエネルギーバンド構造ですが、これに由来した乱れ誘起の金属・絶縁体多重転移や、対称性による電子の完全反射・完全透過といった現象を明らかにしてきました。

2011年4月からは田仲先生の下でトポロジカル絶縁体・超伝導体の研究に携わっています。これら二つの系は非自明なトポロジをもち、ギャップレスな表面状態を形成するという点で類似しており、トポロジカル絶縁体の研究で培った経験を十二分に活かしてトポロジカル超伝導体、あるいはトポロジカル絶縁体と競合した系の輸送現象などを研究していく予定です。こうした具体的な物理量を実験結果と照らし合わせていくことで、トポロジカル絶縁体・超伝導体をもつ新奇な性質を検証できると考えています。

名古屋大学に移ってからは、ラッシュバスピン軌道相互作用とゼーマン効果をもつ超伝導における端状態が新しい臨界性をもつことや、実験的には  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  において見出された超伝導トポロジカル絶縁体のトンネル分光の理論を提案しました。

新学術領域で多くの関連した研究を学べること、また研究者と議論・共同研究できるのが楽しみです。



やまかげ・あい

2008年日本学術振興会特別研究員(DC1)、2011年東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了、2011年4月より現職である名古屋大学大学院工学研究科 研究員。  
名古屋へ移る際に手放したギターを買い直そうかと思案中。

### 受入研究者からひとこと

山影さんは大変注意深く解析し洞察力の深い方だと思います。最初に一緒に行った計算が、Rashba 超伝導体のエッジ状態の計算でした。解析的に波動関数も求めるのが困難な問題で未解決でしたが、Mathematica を巧みに駆使して、エッジ状態の解析、接合の微分コンダクタンスの計算を行いました。また大阪大学の安藤教授から依頼されたトポロジカル超伝導のトンネル効果の研究でも Mathematica と数値計算を駆使することで、トンネル効果の実験の解析がなんとかできました。山影さんは、東北大学時代にトポロジカル絶縁体の輸送現象(アンダーソン局在)の計算で鍛えられているので、かなり難しい問題もそれなりのスピードで解析できるように感じます。私も若いころアンダーソン局在の勉強をしたことがありますが、論文を書いたことはなく、山影さんの博士論文の成果は輝いて見えました。新学術領域のおかげで優秀な方に名古屋に来てもらうことができ、領域代表者の前野先生をはじめ総括班の皆様には感謝しております。トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導の分野は、現在激しい競争にあるので、何をやるべきか見極めて、新学術領域に貢献したいと考えています。

## 齋藤 広大

独立行政法人産業技術総合研究所

(受入研究者：A01 柏谷 聡)

**本** 新学術領域以前は、極低温環境下で動作する走査プローブ顕微鏡 (SPM) を開発し、その応用としてナノスケールの摩擦研究を行ってきました。特に、2つの物体がナノスケールでは接触していない（斥力が働いていない）時に生じる、非接触摩擦という現象に興味を持って研究を進めてきました。この現象は、物質表面の伝導電子が寄与する現象と考えられてきましたが、その起源は未解決な問題の1つでした。開発した極低温 SPM を用いて、超伝導体および絶縁体表面と、金属探針の間に生じる非接触摩擦を測定した結果、超伝導体・絶縁体双方の表面において巨大な非接触摩擦が存在し、さらに探針-試料間の距離が数 nm のとき、その摩擦が極大を示すことを見出しました。この結果は、非接触摩擦に試料の伝導性が寄与しない新奇なメカニズムが存在することを示唆しています。

本領域では、時間反転対称性の破れた超伝導体における界面現象の研究を行います。ルテニウム酸化物超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のペアポテンシャルは、時間反転対称性の破れたカイラル  $p$  波であることが有力視されており、ペアポテンシャルの異方性に起因する新奇な表面・界面現象の観測が期待されます。私達のグループでは、微細加工により微小なトンネル・ジョセフソン接合を作製し、その輸送特性を研究することで、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のペアポテンシャルの対称性を確立し、また新物理現象の発見・解明を目指したいと考えています。

これまで行ってきた研究とは趣が異なりますが、本領域の発展に少しでも貢献できるように精進したいと思います。

### 受入研究者からひとこと

研究所の環境は大学とはだいぶ違うので、最初はとまどうかもしれませんが、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の接合のプロセスは徐々に安定しつつあるので、ぜひ良い測定を行ってくれることを期待しています。日々実験から学んで成長して頂ければと思います。



さいとう・こうた

2005年慶應義塾大学理工学部物理学卒業、2007年慶應義塾大学大学院理工学研究科前期博士課程修了、2008年 - 2010年慶應義塾大学グローバルCOEプログラム研究員、2011年慶應義塾大学大学院博士課程修了 博士(理学)、同年4月より産業技術総合研究所特別研究員、現在に至る。趣味は音楽鑑賞とギター演奏です。

## 古川 俊輔

東京大学 大学院理学系研究科

(受入研究者：D01 上田 正仁)

理論班の研究者として 2011 年 7 月に着任しました。私のトポロジカル量子現象の研究経験は、大学院時代の量子スピン液体の研究にさかのぼります。量子スピン液体には、通常の局所的秩序変数によっては特徴づけられない隠れた構造「トポロジカル秩序」があると考えられています。量子情報の道具などを使って、基底状態波動関数からトポロジカル秩序をどのように検出すべきかが取り組んだ課題でした。

ポストドクになってからは、トポロジカル秩序への興味は持ちつつも、量子スピン系に関して広く研究を行いました。マルチフェロイクス系やフラストレート磁性体の最新の実験に関係した理論に取り組む一方、共形場理論と量子エンタングルメントの関係といった理論概念の発展にも取り組みました。

現職では、対象を冷却原子系に変えて、再び、トポロジカル秩序の研究を開始しました。冷却原子系では、粒子の統計性、内部自由度にバラエティがあり、電子系とは異なったトポロジカル相の実現が期待されます。現在は、高速回転するスピン 1・ボゾン気体に現れる分数量子ホール状態の理論研究を進めています。

トポロジカル量子現象の研究の面白さ・難しさは大学院時代に経験済みですが、これまでに積み上げてきたものを総動員して、新しい研究に挑戦したいと思います。



ふるかわ・しゅんすけ

2007 年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期過程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員、トロント大学ポストドクトラル・フェローを経て、2011 年より現職の東京大学理学系研究科研究員。研究の合間に水泳で汗を流しています。

### 受入研究者からひとこと

古川俊輔さんは固体物理におけるトポロジカル量子現象の研究の経験を活かして冷却原子気体における新たな研究テーマの開拓を目指して研究しています。ご活躍を大いに期待しています。

## 竹内 宏光

広島大学 大学院総合研究科

(受入研究者：B01 東谷 誠二)

2011年4月に広島大学東谷研究室に移ってくる前は、冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における超流動や量子渦・ドメイン壁などの位相欠陥に関する励起状態やダイナミクスに興味を持って研究を進めてきました。私のこれまでの研究の中には、超流動ヘリウムで行われてきた研究を参考に着想したものが多くあるため、本学術領域をきっかけにこの分野に参入できたことを大変うれしく思います。

2011年度の前半は、エアロジェル中の液体ヘリウム3の音波について研究を行いました。液体ヘリウム3は超流動転移温度より少し上の温度では、ランダウのフェルミ液体論に従うことが知られており、低温側で量子統計性によって流体の構成要素である準粒子の平均自由行程が温度の二乗に反比例して長くなります。ところが、エアロジェル中では準粒子の自由行程がエアロジェルを構成する数珠状のシリカ粒子（図参照）との散乱によって制限されます（Knudsen領域）。一方、高温側で自由行程が数珠の太さより短くなると、数珠まわりの準粒子の流れが流体力学的に記述されます（流体力学的領域）。この研究では、この二つの領域のクロスオーバーが、音波の減衰率の温度依存性に強く影響することを、フロリダ大学の実験グループと共同で明らかにしました。

2011年度の後半からは、超流動相における界面や渦に局在した準粒子の研究に興味を持って研究を進めていきます。また、新学術の研究会や若手相互滞在プログラムを利用して、新学術の主題であるトポロジーとの関連について理解を深めていきたいと思っています。

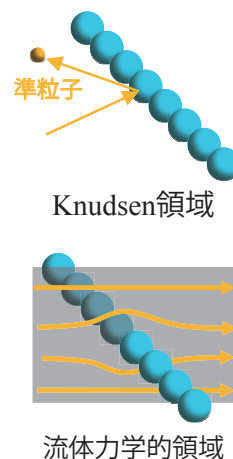


たけうち・ひろみつ

2010年3月大阪市立大学大学院理学研究科修士（理学）、2010年4月大阪市立大学大学院理学研究科特任助教、2011年4月広島大学大学院総合科学研究科博士研究員、現在に至る。広島大学がある東広島市の西条は日本酒で有名な町です。折角なので西条に数多くある銘柄を全て飲み比べたいと思います。

### 受入研究者からひとこと

竹内氏は、冷却原子気体を中心に多くの独創的な研究を行ってきた若手研究者です。本領域 B01 班で展開される超流動<sup>3</sup>Heの新奇物性研究に新風を吹きこんでくれると期待しています。



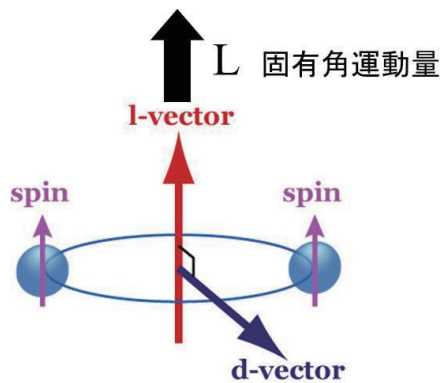
## 國松 貴之

大阪市立大学 大学院理学研究科

(受入研究者：B01 石川 修六)

2011年4月より、研究計画 B01「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」において、細い円筒容器内における回転超流動 $^3\text{He}$ の研究を担当しています。研究目的は、細い円筒容器界面の影響を大きく受ける軌道部分秩序変数による織目構造(テクスチャー)の同定と、回転に対するテクスチャーの応答から、超流動 $^3\text{He}$ の未解決問題の一つである固有角運動量を検出することです。この軌道部分秩序変数は、超流動 $^3\text{He}$ -A相の異方的なクーパー対がもつ対角運動量です。固有角運動量問題は、クーパー対1つ1つが持つ異方軸に平行な対角運動量(大きさがプランク定数であり非常に小さい)が、異方軸が揃ったテクスチャーが実現した時に、巨視的な角運動量として現れるかどうか、という問題です。 $s$ 波超伝導状態では現れないフェルミ球内部のクーパー対形成に関係しています。

私は現在、東大物性研究所にある回転核断熱消磁希釈冷凍機(久保田研究室)を用いて、cw-NMR実験を行なっています。京都大学大学院在学中に、エアロジェル中の回転超流動 $^3\text{He}$ におけるテクスチャーの研究で博士論文を書きました。その際にも、この冷凍機で実験を行なっています。私にとっては頼もしい相棒です。固有角運動量の検出は、この冷凍機建設当初(2001年)からの研究目標の1つです。本新学術領域研究で、この問題の解決を成果として残せるよう、より一層努力していきたいと思っています。



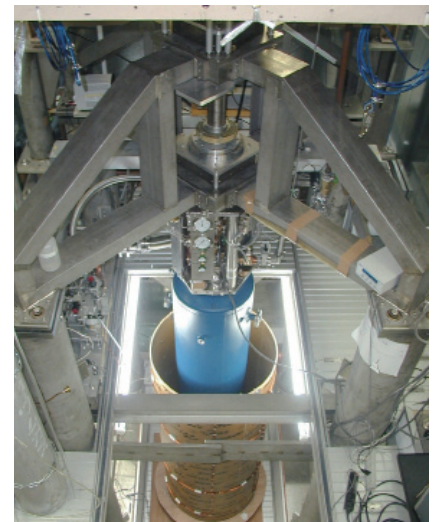
くにまつ・たかゆき

1975年生まれ。大阪府出身。1998年京都大学卒。2008年京都大学大学院理学研究科第一物理学教室博士後期課程修了。大阪大学校物理研究センター教務補佐員、特任研究員を経て、現職。趣味はスキー。大学在籍時、SAJ1級資格を得たものの、最近は腕がなまる一方。

### 受入研究者からひとこと

暫く超低温研究から離れていたが、再び研究の第一線に復帰し、強力に研究を推し進めてくれています。

回転核断熱消磁冷凍機





## 2011 年度開催▽研究会報告

第5回集中連携研究会

● 集中連携研究会 ● 若手国際会議 ● 領域研究会・国際会議

## ● 第5回集中連携研究会

2011年7月1日・2日（大阪市立大文化交流センター）

今年度の最初に開いた集中連携研究会では、主に A01 班と B01 班の研究課題や研究対象に関連する、“スピン三重項超流体の秩序変数”が作り出す多彩な物理現象にテーマを当てました。また副題として“固有軌道角運動量、エッジ流、半整数量子渦”のキーワードを挙げました。プログラムに示すようにこれらに関連するものも含めて全部で13件の講演がありました。講演内容に限定した質疑応答だけでなく幅広い議論ができるように、各セッション後半に別途議論のための自由討論時間20分を設けました。

## ○7月1日●

10:00～10:10 Opening

固有角運動量の概念再検討（10:10～12:30）座長 石川修六

10:10～11:25「カイラルフェルミ超流動状態での固有角運動量と固有磁気モーメント」（基調講演）

三宅和正（大阪大学）（45+30）

11:25～12:05「Mermin-Ho 構造と Intrinsic Angular Momentum」

高木 丈夫（福井大学）（20+20）

12:05～12:30 自由討論

12:30～13:30 ランチ

 $^3\text{He}$ -A 相の texture と固有角運動量探索（13:30～15:20）

座長 前野悦輝

13:30～14:30「超流動ヘリウム 3-A 相の固有角運動量探索の現状」

石川 修六（大阪市立大学）（35+25）

14:30～15:00「Quasi-classical theory of the Mermin-Ho Texture」

永井 克彦（広島大学）（20+10）

15:00～15:20 自由討論

15:20～15:50 coffee break

Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> におけるカイラルエッジ電流／超流動  $^3\text{He}$  のエッジ質量流の探索 前半（15:50～17:20）座長 三宅和正15:50～16:50「Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のカイラルエッジ電流」

前野 悦輝（京都大学）（35+25）

16:50～17:20「Rough Surface effect on the 2-D  $k_x+ik_y$  Superconductor」

永井 克彦（広島大学）（20+10）

後半（17:20～18:40）座長 野村竜司

17:20～17:50「Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> のエッジ状態」

柏谷 聡（産総研）（20+10）

17:50～18:20「超流動  $^3\text{He}$ -A 相のエッジ流による角運動量」

堤 康雄（岡山大学）（20+10）

18:20～18:40 自由討論

19:00～ 夕食会

## ▼7月2日○

異方的超伝導状態の  $d$ -ベクトルの向き決定についての現状（10:00～12:30）座長 東谷誠二10:00～10:50「Knight-shift 測定から考えられる Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の  $d$ -vector」

石田 憲二（京都大学）（30+20）

10:50～11:40「奇パリティ超伝導体 UPt<sub>3</sub>・UBe<sub>13</sub> の NMR」

藤 秀樹（神戸大学）（30+20）

11:40～12:10「角度分解熱伝導率測定による UPt<sub>3</sub> の超伝導ギャップ構造の決定」

町田 洋（東工大）（20+10）

12:10～12:30 自由討論

12:30～13:30 ランチ

異方的超流動／超伝導での半整数量子渦（13:30～15:30）

座長 柏谷聡

13:30～14:20「スピン三重項超伝導体における半整数量子渦」

米澤 進吾（京都大学）（30+20）

14:20～15:10「スピン 3 重項  $p$  波超流動体における半整数量子渦」

水島 健（岡山大学）（30+20）

15:10～15:30 自由討論

15:30～ Closing



研究会は5セッションで構成されていました。

- ・固有角運動量の概念再検討
- ・ $^3\text{He}$ -A相の texture と固有角運動量探索
- ・ $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ におけるカイラルエッジ電流／超流動 $^3\text{He}$ のエッジ質量流の探索
- ・異方的超伝導状態の  $d$ -ベクトルの向きの決定についての現状
- ・異方的超流動／超伝導での半整数量子渦

異方的超流動体・超伝導体を特徴づける秩序変数としてオーダーパラメータベクトルが用いられます。このベクトルに重点を置いた研究会であったともいえます。セッションごとの概略と議論点を次にまとめます。

#### 固有角運動量の概念再検討

三宅が研究会の基調講演となる講演を行いました。一般的なカイラルフェルミ超流体の固有角運動量とは何かと、カイラル超伝導体の固有磁気モーメントがマイスナー電流によって遮蔽されるかどうかについてです。高木は超流動 $^3\text{He}$ -A相の状態を表すベクトル（クーパー対の軌道角運動量ベクトルとスピンの向きに関するベクトル）の細い円筒容器内での織り目構造（テクスチャー）を解説し、その1つである Mermin-Ho 型織り目構造を利用した固有軌道角運動量の観測に関する講演をしました。

#### $^3\text{He}$ -A相の texture と固有角運動量探索

石川が、細い円筒容器内での超流動 $^3\text{He}$ -A相のテクスチャーをNMR法により同定する方法と、Mermin-Ho型テクスチャーを用いての回転実験によりどのように固有角運動量を探索するかについて講演しました。永井は準古典理論で円筒容器内での Mermin-Ho 型テクチャーについて議論しました。

これら2つのセッションでの議論から、固有角運動量についての理論計算での基本となる部分（エネルギー密度、角運動量）について統一見解をまとめることが重要であることが分かりました。

#### $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ におけるカイラルエッジ電流／超流動 $^3\text{He}$ のエッジ質量流の探索

前野が $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ におけるカイラルエッジ状態とエッジ電流についての短いレビューを行いました。現時点でのエッジ電流検証について講演しました。永井がカイラル超伝導・超流動一般のエッジ流に関し講演しました。柏谷が $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のエッジ状態を示す実験について説明し、エッジ電流の観測の現状について講演しました。堤は平行平板

内の超流動ヘリウム3 A相でのエッジ質量流について講演しました。

これらの講演では、アンドレーエフ束縛状態が形成されるようなカイラル状態でのエッジ流について議論されました。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ ではマイスナー電流による打ち消しがあるが（小さなサイズでは打ち消しが不十分となる指摘もあった）、超流動ヘリウム3ではそれはないので、原理的には観測出来そうだと認識されました。しかし実の量は非常に小さいので測定方法は工夫が必要です。

#### 異方的超伝導状態の $d$ -ベクトルの向きの決定についての現状

石田はカイラル超伝導 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のスピンの異方軸の向きを結晶が決めているのではなく、外部磁場の向きが決めていることを実験は示しているという講演を行いました。藤は $\text{UPt}_3$ に対するNMR測定より、ラインノード以外にポイントノードが存在することを示す講演を行いました。町田は、 $\text{UPt}_3$ に対する熱伝導測定の結果より、この奇パリティの秩序状態がカイラルではなく超流動ヘリウム3 B相の planar state と同じとなるという講演を行いました。これらの議論より超伝導体 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ を含む奇パリティの超伝導物質（ $\text{UPt}_3$ 、 $\text{UBe}_{13}$ ）のギャップ構造についてまだ研究の余地があることが示されました。

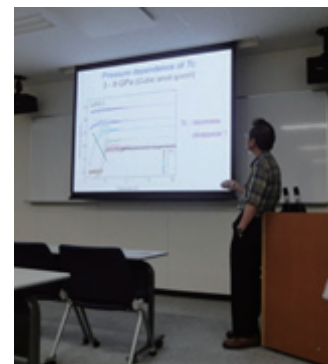
#### 異方的超流動／超伝導での半整数量子渦

米澤がスピン三重項  $p$  波超伝導体中での半整数量子渦の概説と、小さなバルク試料を用い、ESPに平行な磁場を作用することによって観測が可能となる指摘を行い、最近の実験結果について講演を行いました。水島が超流動ヘリウム3 A相での半整数量子渦について概説を行い、フェルミ液体効果は半整数量子渦と相性が良いが強結合効果とは相性は良くないことを指摘し、低圧力・薄膜状態での観測の可能性を示す講演を行いました。

各セッションでは理論と実験の講演があり、非常に深い議論に繋がったと思います。本研究会では講演時間を長くするだけでなく、個別の質疑応答の時間も長くし、さらにセッション毎の質疑時間を設けたため、全体としての質問や複数の講演にまたがる質問が可能となり多面的な議論が見受けられました。多くの方が参加した食事会でも質疑時間が多かったことは良かったという声が多く聞かれました。

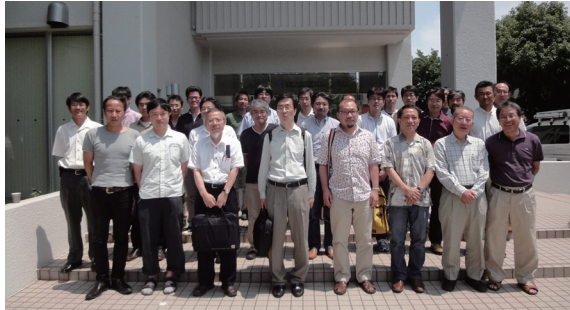
（文責、石川 修六）

片野さんの講演



● 第 6 回集中連携研究会

2011 年 7 月 25 日・26 日（大阪大学シグマホール）



Non-centrosymmetric Superconductors: Materials and Mechanisms と題した集中連携研究会が 2011 年 7 月 25 日 - 26 日に大阪大学シグマホールで行なわれた。本研究会は、新学術領域研究「重い電子の形成」との共催を得て、さらに、公募研究代表者や新学術領域以外の研究者にも広く呼び掛けを行った結果、30 名以上の参加者により空間反転対称性の破れた超伝導体（NCS 超伝導体）に関して幅広く議論できた会合であった。

初日は電子相関の弱い物質系に焦点を絞り、物質開発の現状と精密な物性測定について議論が行われた。原田氏（岡山大）は  $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$  におけるスピン軌道相互作用の制御、とりわけ結晶構造の制御がスピン三重項状態出現にとって重要であることを報告した。領域外から参加した竹屋氏（物材機構）、片野氏（埼玉大）、野上氏（岡山大）及び小林氏（岡山大）は、 $\text{LaNiC}_2$  や  $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  などの新しい NCS 超伝導体を紹介した。

2 日目は理論的な側面と重い電子系関係の物質と物性についての討議が行われた。とくに、佐藤氏（東大物性研）は Q&A 形式で、NCS 超伝導体のトポロジカルな側面についてわかりやすく解説した。新学術領域研究「重い電子の形成」のメンバーである摂待氏（阪大理）と木村氏（東北大）は重い電子系 NCS 超伝導体  $\text{CeIrSi}_3$  や  $\text{CeRhSi}_3$  などについてレビューを行い、相互作用の弱い NCS 超伝導体との対比を行った。さらに同じく新学術領域研究「重い電子の形成」メンバーの柳瀬氏（新潟大）はスピン軌道相互作用について概観し、局所的に空間反転対称性が破れた場合に期待される新しい物性について講演した。

6 つのセッションと懇談会での議論を通じ、当該分野の研究進捗状況を知ることができた。また、分野間・領域内外の交流も深められ、今後の展望を開いていくために有意義な研究会であった。以下に研究会のプログラムを示す。

（文責、鄭国慶）

● 7 月 25 日△

セッション 1

- 1) 13:00 ~ 13:05
- 2) 13:05 ~ 13:35

座長：鄭 国慶（岡山大）

はじめに（鄭 国慶）

$\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$  におけるスピン軌道相互作用の制御とスピン三重項状態

原田 翔太（岡山大）

- 3) 13:35 ~ 14:05

Li-Rh-B 系における空間反転対称性の破れた新超伝導相と周辺物質

竹屋 浩幸（物材機構）

- 4) 14:05 ~ 14:35

$p$ 、 $d$  電子系反転対称性の破れた超伝導体の開発 村中 隆弘（青山学院大）

セッション 2

- 5) 14:55 ~ 15:25

座長：竹屋浩幸（物材機構）

$\text{CaIrSi}_3$  と  $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$  の比熱と H-T 相図

江口 学（京大理）

- 6) 15:25 ~ 15:50

空間および時間反転対称の破れた系、 $\text{LaNiC}_2$  の超伝導と圧力効果

片野 進（埼玉大）

- 7) 15:50 ~ 16:15

反転対称のない超伝導体  $\text{LaNiC}_2$  の元素置換効果と周辺の電荷密度波

野上 由夫（岡山大）

セッション 3

- 8) 16:35 ~ 17:05

座長：藤本聡（京大理）

$\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$  の圧力誘起相と超伝導

小林 達生（岡山大）

- 9) 17:05 ~ 17:30

$\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$  のバンド構造

獅子堂 達也（広島大）

- 10) 17:30 ~ 18:00

反転対称性の破れた超伝導におけるスピン 1 重項・3 重項の競合

矢田 圭司（名古屋大工）

- 18:30 ~ 21:00

懇談会

▽ 7 月 26 日●

セッション 4

- 11) 9:00 ~ 9:35

座長：田仲由喜夫（名大工）

空間反転対称性の破れた超伝導体のトポロジカルな性質

佐藤昌利（東大物性研）

- 12) 9:35 ~ 10:10

反転対称性のない電子系におけるトポロジカル秩序

藤本聡（京大理）

- 13) 10:10 ~ 10:40

トポロジカル超伝導体のエッジ状態の理論

山影 相（名大工）

セッション 5

- 14) 11:00 ~ 11:30

座長：柳瀬陽一（新潟大）

重い電子系の反対称スピン軌道相互佐用と磁気破壊

木村 憲彰（東北大）

- 15) 11:30 ~ 12:00

空間反転対称性の破れた圧力誘起超伝導体  $\text{CeIrSi}_3$  と関連物質のフェルミ面と超伝導

摂待 力生（阪大理）

- 16) 12:00 ~ 12:30

空間反転対称性の破れた重い電子系超伝導体の NMR

椋田 秀和（阪大基礎工）

セッション 6

- 17) 13:40 ~ 14:15

座長：伏屋 雄紀（阪大基礎工）

局所的に空間反転対称性が破れた超伝導：多層系超伝導体を例として

柳瀬陽一（新潟大）

- 18) 14:15 ~ 14:45

重い電子系超伝導体  $\text{CePt}_3\text{Si}$ 、及び同一構造の  $\text{LaPt}_3\text{Si}$  におけるジョセフソン効果

住山 昭彦（兵庫県立大）

- 19) 14:45 ~ 15:15

交替磁場中の超伝導の理論

重田 圭介（名大工）

- 20) 15:15 ~ 15:20

おわりに（前野 悦輝）



● 第7回集中連携研究会

2011年9月8日・9日・10日(名古屋大学大学院工学研究科)

超伝導のクーパーペアの波動関数(ペア振幅とも呼ばれる)は、表1に示されるように、2電子の入れ替えに関して反対称である。スピンの入れ替えで反対称のものをシングレット、対称のものをトリプレット、座標の入れ替えに関して対称のものを偶パリティ(*s*波*d*波など)反対称のものを奇パリティ(*p*波など)と呼ぶ。よく知られているクーパーペアは、時間の入れ替えすなわち周波数(松原周波数)に関しては偶関数で、偶周波数スピン1重項偶パリティ(ESE)ペアと偶周波数スピン3重項奇パリティ(ETO)ペアである。しかしフェルミ統計に基づけば、奇周波数スピン3重項偶パリティ(OE)ペアと奇周波数スピン1重項奇パリティ(OSO)ペアが存在することが許される。(表1)

最近の研究で、奇周波数クーパー対は不均一な超伝導体に普遍的に存在することが理論的に確立した[1-2]。また強相関電子系において、バルクの状態においてさえも存在の可能性があることがいくつかの理論で指摘されている。本集中連携研究会の目的は、奇周波数クーパー対に関して、理論研究の現状を共有してどのようにして検出すればいいのか、理論的に何をすればいいのか、未解明な新奇な概念の探索などを討論することであった。(1)強磁性性接合における奇周波数電子対(2)スピン3重項超伝導の異常近接効果(3)超流動ヘリウム3エアロジェル(4)奇周波数ギャップ関数(5)関連した話題 について集中的

に討論した。

初日は、田仲による奇周波数クーパー対のオーバービューの後、強磁性体/超伝導体接合系を中心に討論された。浅野による現状のレビューの後、実験では赤崎(磁性半導体接合)、神田(グラフェン接合)、理論では浅野(現状のまとめ)、横山(異常磁気応答などの最近の進展)の講演が行われた。横山の講演では、常伝導・強磁性層・超伝導接合の磁気応答が巨大パラマグネティックマイスナー効果になるという顕著な内容であった。

2日目は、前半はスピン3重項超伝導のトンネル効果(柏谷)、近接効果の実験(中村、石黒)、理論(浅野)の現状が紹介された。浅野は奇周波数クーパー対が作り出す異常近接効果が表面インピーダンスに異常を作り出すことを示した。午前後半は、低温STMの実験の現状が紹介された。花栗(銅酸化物の不均一性、磁束)、松井(超低温STM)の実験が紹介された。柏谷によるSr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>におけるアンドレーエフ束縛状態(ABS)観測の実験の成果は顕著な成果で、長年実験の困難であったこの物質のABSが観測されたことは重要である。午後は、超流動ヘリウム3のセッションが行われ、東谷、水島が奇周波数と状態密度のユニークな関係を導いた。東谷は、零エネルギーの状態密度が零でないこと自体が、奇周波数クーパー対の存在を表していることを示すという重要な理論結果を指摘した。これは、不均一性が普遍的に奇周波数クーパー対を作り出すことをさらにはっきりさせた結果といえる。石川、野村からエアロジェルやマヨラナコーンの実験の

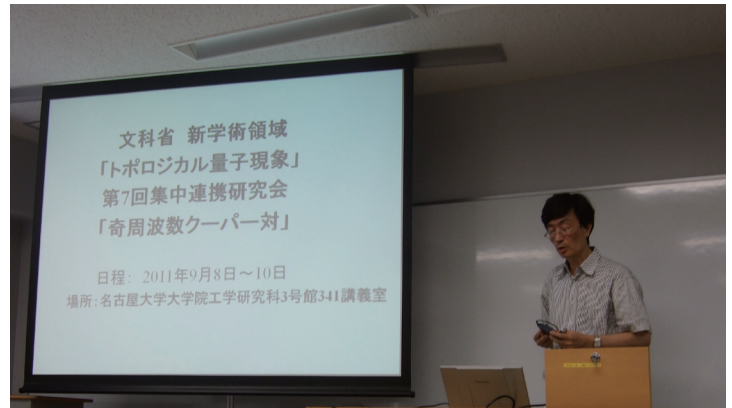
+ 対称, - 反対称

	周波数 (時間)	スピン	軌道	全体	超伝導状態
ESE	+(偶)	-(1重項)	+(偶)	-	金属超伝導 銅酸化物
ETO	+(偶)	+(3重項)	-(奇)	-	ヘリウム3 Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub>
OE	-(奇)	+(3重項)	+(偶)	-	バルクでは 未確認
OSO	-(奇)	-(1重項)	-(奇)	-	バルクでは 未確認

現状が報告された。

最終日は、前半は佐藤（エッジ状態の数理構造）、林（磁束系の奇周波数ペア）の講演が行われた。最後のセッションでは、バルクに現れる奇周波数ペアの講演が三宅、伏屋、重田によって行われ、バルクに存在する奇周波数ペアとエッジに局所的に形成されるそれとの違いが鮮明になった。特にバルクの系で長年懸案であったパラマグネティックマイスナー効果の問題は、汎関数積分理論により解決されるということが示されバルクの奇周波数ギャップ関数探索に勢いづける内容となった。

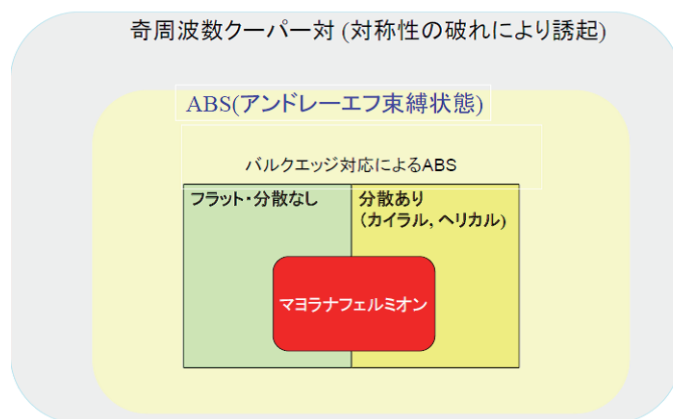
研究会の結果、アンドレーエフ束縛状態、奇周波数クーパー対、バルクエッジ対応の関係がかなり明確になり、研究の方向性、特に実験で明らかにすべきことなどについても議論が行われた。今回の集中連携研究会を開催した意義は極めて大きかった。研究会の結果、対称性の破れによってバルクの偶周波数ペア（ディアマグネティックな磁気応答を示す）から作られる奇周波数ペア（パラマグネティック）と自発的対称性の破れによってバルクに誘起される奇周波数ペア（ディアマグネティック）の2種類の奇周波数クーパー対の存在が可能であることが示された。2種のクーパー対の示す様々な性質の違いを対照させた理論研究は必要となると感じる。一方すでに知られている対称性の破れによって生じる奇周波数クーパー対の研究に関しては、異常近接効果による局所状態密度の零電圧ピーク、異常マイスナー効果、異常表面インピーダンスなど今後実験的に検証されるべき内容が数多くあ



る。最近赤崎のグループで観測されている強磁性体接合の零電圧ピークは奇周波数クーパー対の存在を示す実験的証拠となりつつあり、理論実験のさらなる研究が必要と思われる。最後に対称性の破れにより誘起された奇周波数ペア、アンドレーエフ束縛状態、トポロジカルに意味のあるバルクエッジ対応の結果得られるアンドレーエフ束縛状態、マヨラナフェルミオンの関係を以下の表にまとめる。

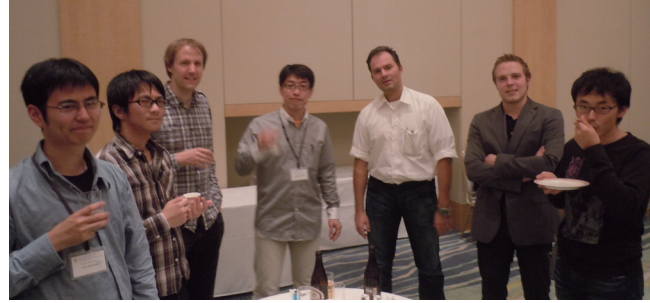
- [1] 田仲由喜夫 柏谷聡 物理学会誌 Vol. 64, No. 7 527 (2009).
- [2] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.81, No. 1 011013 (2012).

(文責、田仲 由喜夫)



## ● 第1回若手国際会議報告

2011年11月1日ー11月5日（ラフォーレ琵琶湖）



### 第一回の International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries

（いわゆる若手国際会議）が、滋賀県守山市のラフォーレ琵琶湖において開催された。組織委員会の構成は新学術領域メンバーの若手を中心であり、プログラムの編成から実際の運営まで、新学術領域事務局の補助のもとで、若手が中心になって行なった。また講演者を含む参加者は、ほぼ全て若手であった（ただし若手の定義は、必ずしも明確でない）のでここでは措いておく。

日程は2011年11月1日（火）夜にラフォーレ琵琶湖に集合し、2日（水）の朝から5日（土）の昼までのプログラムであった。参加人数は67人であり、その国別の内訳は、日本57、中国3、アメリカ3、韓国1、オランダ1、オーストリア1、ドイツ1であった。海外

からの参加者10人は招待講演者である。また発表数は、口頭発表が30、そのうち招待講演が24で一般講演が6、ポスター発表が35であった。また、この会議は、韓国の Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) の External Activity Program として採択され、その援助を受けて開催することが出来た。

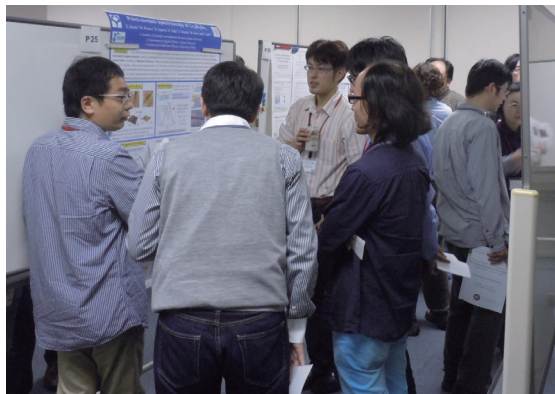
凝縮系物理学において、トポロジカルに特徴付けられる新量子現象の研究が、急速に進展しつつある。しかし、その対象とする物質は、超伝導体、超流動体、絶縁体、冷却原子気体と多岐に渡り、若手研究者が自身の専門を超えて全体を把握することは容易ではない。トポロジカル量子現象の理解を、若手研究者の間で共有することが、この会議の目的の一つであった。したがって講演者には、あらかじめ専門外の若手にも理解しやすいように、長めのイントロダクショ

ンを含めていただくように依頼した。初歩から最先端の進展まで広くカバーした講演が多く、若手の理解も深まったと思われる。会議後に行なったアンケートでも、講演の分りやすさに関しては概ね高評価であった。講演者の皆さんには、お礼申し上げたい。ただし、時間的にハードであったとのアンケートの回答がいくつかあった。張り切って詰め込みすぎたきらいもあるので、次の機会にはもう少し休憩を多く挟むようにしたい。

ポスター発表は2、3日の夕食後に2時間ずつ行

なった。ポスター発表の労に報いるために、ポスター賞の表彰を行なうこととした。受賞者は参加者全員による投票で決定し、以下の3発表が受賞した。お祝い申し上げる。

ポスター会場で侃侃諤諤



#### S. Sasaki (ISIR, Osaka Univ.)

"Point-contact spectroscopy of  $Cu_xBi_2Se_3$ "

#### T. Nakamura (Dept. Phys., Kyoto Univ.)

"Topological phase competition in Pb/Ru/Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> junctions"

#### T. Kawakami (Dept. Phys., Okayama Univ.)

"Textures of Bose Einstein condensates with non-Abelian gauge fields"

投票は接戦であり、選に漏れた発表を含めて、多くの興味深い発表がなされた。ポスター発表者の皆さんにお礼申し上げたい。

この会議のもう一つの目的は、トポロジカル量子現象を研究する、国内・国外の若手間の交流をはかることであった。このため、会議は町中を避けて合宿形式とし、参加者全員が寝起きを共に出来るよう、

会議と宿泊が一ヶ所で出来る陸の孤島の会場で行なうこととした。ラフォーレ琵琶湖は、琵琶湖畔で眺めも良く施設も整い、行き帰りの不便を除けば、この目的に適う良い会場であった。また4日の午後には、エクスカーションで比叡山延暦寺に行った。紅葉には少し早かったようであるが、良いリフレッシュになり、参加者が打ち解けるのにも役立ったと思われる。その夜に

はバンケットを開催し、前野領域代表にも参加していただいた。ポスター賞の発表はこのバンケットの場で行なわれ、受賞者には前野代表よりすてきな賞品が授与された。受賞者には、いきなり英語で挨拶をというムチャ振りでも申し訳なかったが、無事切り抜けていただけなのは幸いであった。

**折**角の合宿形式の会議であるので、プログラム外でも交流の機会が持てるように心がけた。分野の特徴というものはあるようで、どうも超伝導分野ではこのような会議でも、プログラムが終わればあまり部屋から出てこないという話を聞いた（本当でしょうか?）。真偽の程は明らかでないが、そのような話を聞く（聞かせられる?）というのは、そうはならないようにどうにかせよという期待の表れであると判断するのが正しいであろう。会議の前に、広義のヘリウム研究者10人ほどに、部屋呑み用のアルコールを担いで来てくれるようお願いした。そのお陰で、海外招待者も交えての4日間の飲み会は楽しいものとなった。重い酒瓶を担いで来てくれた皆さんと、有無を言わず遅くまで部屋を提供させられた加藤千秋氏、和才将大氏に感謝申し上げます。

これまでは全く分野外であったため顔も名前も知らなかった若手の間で、交流が進んだことは間違いな



い。この若手国際会議をきっかけとして、新たなトポロジカル量子現象研究の気運が盛り上がり、将来の共同研究が生まれることを望みたい。

最後に、若手だけの国際会議という貴重な機会を与えていただいた新学術領域関係者の皆さんとAPCTPに感謝申し上げます。組織委員会として会議運営をいただいた新学術領域メンバーの水島健氏、佐藤昌利氏、米澤進吾氏、上野和紀氏、瀬川耕司氏、また領域外から組織委員会に加わっていただいた瀧本哲也氏、戸塚圭介氏にも感謝申し上げます。また領域事務局の皆さんには、会議の運営面で大変助けて頂きましたので、お礼申し上げます。

(文責、野村 竜司)



延暦寺で

## ● 第2回領域研究会

2011年12月17日-12月19日（岡山大学 創立五十周年記念館）

**本**領域研究がスタートしておよそ1年半が経過し、今年度からは公募研究による研究者も合流したため、第2回領域研究会は公募班も加えたフルメンバーとしての初の領域研究会として開催された。場所は岡山大学、50周年記念館、参加者109名、発表件数は口頭39件、ポスター53件での白熱した議論が行われた。トポロジカル量子現象は研究開始時と比較して物性研究としての注目度が格段に高まってきており、ホットな成果に関する発表が連続し、屋外の寒さとは打って変わって、会場は活気のある議論が繰り広げられた。

まず会議の冒頭において、領域代表の前野よりトポロジカル物質に関する分類表に関するコメントがあり、これから行われる議論にとっての最も重要な視点の一つが示された。それに引き続いて行われた発表を物理の項目ごとに発表を要約する。

**奇周波数ペア**：赤崎、横山らにより強磁性/超伝導接合系における輸送特性に関する議論が行われ、スピン偏極した2次元電子ガス中にしめだしたペアの磁場応答およびゼロバイアス異常の起源としての奇周波数ペアの可能性の実験と理論の対応が議論された。浅野は表面インピーダンスにより奇周波数が観測される可能性を示した。また三宅は重い電子系や強磁性超伝導共存相における、バルク状態としての奇周波数超伝導の発現について議論を行った。東谷は準古典グリーン関数と奇周波数ペア振幅の関係式を提示し、石川はダーティーとみなせるエアロジェル中への超流動ヘリウムの近接効果に関する実験を説明した。

**超流動ヘリウム**：国松、高木らによりにおける固有角運動量に関する実験と理論が示され、実験的にNMRにて観測されている信号が固有角運動に由来している可能性が示唆された。水島は超流動ヘリウムB相においてマヨラナフェルミオンを観測する可能性、久保田はスーパーソリッド、永合は振動ワイヤーによる渦形成に関する実験を議論した。

**トポロジカル絶縁体**：田仲、佐々木、岩瀬によりCu<sub>x</sub>Bi<sub>2-x</sub>Se<sub>3</sub>において発見された超伝導が、スピン3重項超伝導であり、ポイントコンタクトによるゼロバイアスピークが観測されるのは、トポロジカル超伝導が発現している可能性を示唆していることを示され



た。また松野はSrIrO<sub>3</sub>の異常な半金属特性、瀬川はBi<sub>1.5</sub>Sb<sub>0.5</sub>Te<sub>1.7</sub>Se<sub>1.3</sub>とTlSb<sub>0.8</sub>Bi<sub>0.2</sub>Te<sub>2</sub>の輸送特性、佐藤はARPESでの表面電子状態観測により、マスレスのディラックコーンに質量を与えて、ギャップを開ける新しい方法について、また新藤はトポロジカル絶縁体からバンド絶縁体への転移に関する議論を行った。

**Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>**：米澤による熱磁効果は、永らく議論の続いている低温高磁場の相転移が1次相転移である可能性を強く示唆し、柏谷はトンネル分光によるカイラルエッジ状態の観測について、また前野は半整数磁束量子やトポロジカル接合などの新奇な性質を概観した。

**冷却原子気体**：上田は2体では束縛状態にならないが、3体で初めて束縛状態になるエフィモフ状態の理論と実験の解説、川口はスピン3のスピノールBECの理論、東條は多成分BECにおける量子渦の実験を解説し、新田は、スピノール及び多成分BECの位相励起および多成分BECにおける渦の分子構造の理論を示した。

**NCS 超伝導**：俣野はLi<sub>2</sub>(Pt<sub>1-x</sub>Pd<sub>x</sub>)<sub>3</sub>Bの実験結果、また獅子堂はバンド間をまたぐスピン軌道相互作用を取り入れたバンド計算の議論を行った。

**量子ホール系**：音は量子ホール状態のスピン状態を、カー効果を用いたマッピングにより実空間表示した結果について、また村木は5/2の分数量子ホール状



実行委員長を務めた鄭さん

## WORKSHOPS AND MEETINGS

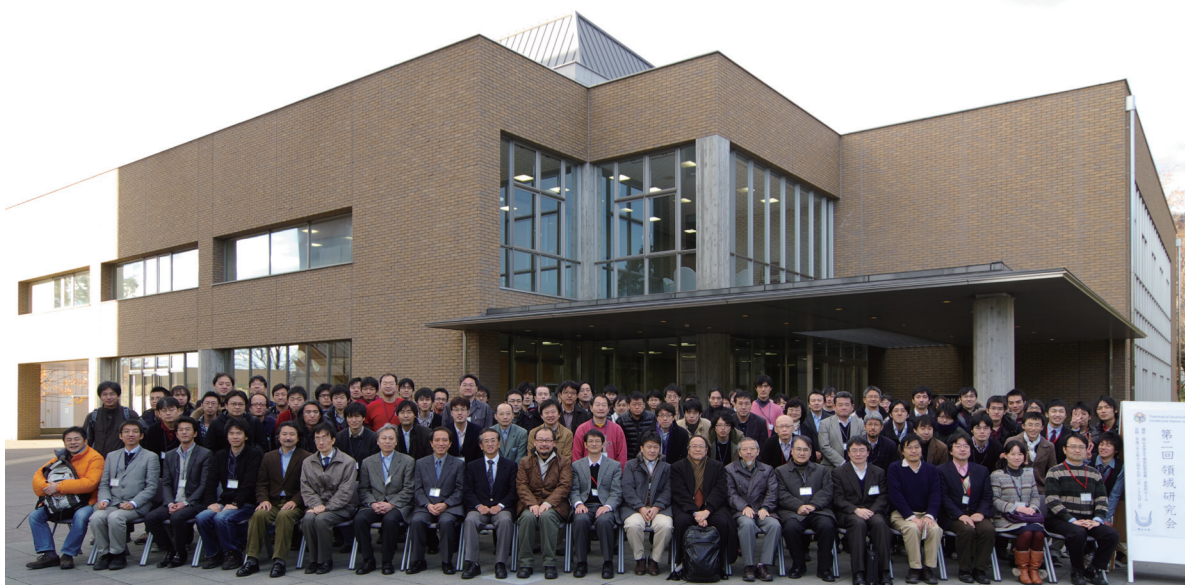
態が完全偏極していることを NMR の実験により明らかにした。

超伝導新奇物性：野島は  $\text{SrTiO}_3$  における電界誘起超伝導の有効厚みが自己組織化により決まっている可能性を指摘し、井澤は  $\text{UPt}_3$  のギャップ対称性が従来考えられてきた結果と異なり  $E_{1u}$  であることをクリアに示した。神田は、グラフェンの近接効果の観測の実験的な難点とそれを解決するためのアイデアを提示し、住山は  $\text{UPt}_3$ 、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  のジョセフソン効果とギャップ対称性に関する解析を示した。また丹田はメビウス帯などの実空間のトポロジーを持った超伝導の性質について解説した。

トポロジー基礎理論：井村は weak なトポロジカル絶縁体とワイル半金属についての考察、押川はハルデンギャップ相などの量子スピン系におけるトポロジカル秩序とエッジ状態の関係に関する理論、福井はトポロジカル欠陥とマヨラナゼロモードに関する指数定理、田中はトポロジカル絶縁体・量子スピン系におけるアクシオンストリングの理論、佐藤はノードのあるトポロジカル超伝導体の分類、およびマヨラナフェルミオンの性質に関する理論を示した。

全体として、奇周波数ペアとトポロジカル絶縁体関連の発表が多く、これらの研究の進展の早さが印象づけられた。また理論と実験の連携が明確になっており、本分野の研究を新学術領域研究として進めることの意義を感じさせる会議であった。会議を細やかな気遣いで円滑に運営していただいた鄭研究室関係者の皆様、プログラムの編成の責任者である石川氏に感謝いたします。

(文責、柏谷 聡)





## 第2回領域研究会 プログラム



### ●▼ 2010年12月17日(土) ●○

10:30	Opening	
10:30 ~ 11:40	座長 安藤 陽一	
10:40	アドバイザー挨拶	家 泰弘
10:50 17AM-1	領域成果	前野 悦輝 (30分)
11:20 17AM-2	公募研究紹介	田仲 由喜夫 (10分)
11:30 17AM-3	領域Webからのお知らせ	浅野 泰寛 (10分)
11:40 ~ 12:20	奇周波数クーパー対	座長 田仲 由喜夫
11:40 17AM-4	超伝導体/半導体/強磁性体接合における輸送特性	赤崎 達志 (20分)
12:00 17AM-5	強磁性体/超伝導体接合における奇周波数ペア	横山 毅人 (20分)
13:30 ~ 14:40	エキゾチック凝縮現象I	座長 野村 竜司
13:30 17PM-1	細い円筒容器中の回転超流動ヘリウム3のテクスチャーの安定化と固有各運動量	國松 貴之 (20分)
13:50 17PM-2	Intrinsic angular momentum of superfluid $^3\text{He}$ A-phase	高木 丈夫 (15分)
14:05 17PM-3	Role of the order parameter manifold on surface Majorana fermions in topological superfluid $^3\text{He}$ -B	水島 健 (20分)
14:25 17PM-4	$\text{SrTiO}_3$ における電界誘起表面超伝導の有効厚さ	野島 勉 (15分)
15:10 ~ 16:30	トポロジカル超伝導	座長 浅野 泰寛
15:10 17PM-5	スピン軌道相互作用によるアンドレーエフ束縛状態の理論	田仲 由喜夫 (30分)
15:40 17PM-6	$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のトポロジカル超伝導性~ポイントコンタクト分光	佐々木 聡 (15分)
15:55 17PM-7	NMR study of superconducting Cu-doped topological insulator	岩瀬 文達 (15分)
16:10 17PM-8	磁気熱量効果で明らかになった $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導一次相転移	米澤 進吾 (20分)

### ●○ 2011年12月18日(日) ▲●

09:00 ~ 10:20	エキゾチック凝縮現象II	座長 前野 悦輝
09:00 18AM-1	奇周波数超伝導性: その起源と偏在性	三宅 和正 (30分)
09:30 18AM-2	フェルミオンリチウムのエフィモフ状態	上田 正仁 (30分)
10:00 18AM-3	角度分解熱伝導率でみた重い電子系超伝導体 $\text{UPt}_3$ の超伝導対称性	井澤 公一 (20分)
10:50 ~ 12:00	スピン軌道相互作用I	座長 上田 正仁
10:50 18AM-4	強いスピン・軌道相互作用を持つIr酸化物超格子の物性制御	松野 丈夫 (15分)

11:05 18AM-5	トポロジカル絶縁体およびワイル半金属におけるスピン Berry 位相	井村 健一郎 (15分)
11:20 18AM-6	輸送特性測定によるトポロジカル絶縁体の研究	瀬川 耕司 (20分)
11:40 18AM-7	トポロジカル量子相転移近傍におけるディラック電子の質量獲得	佐藤 宇史 (20分)
14:00 ~ 15:10	奇周波数クーパー対II	座長 鄭 国慶
14:00 18PM-1	奇周波数クーパー対が示す異常な表面インピーダンス	浅野 泰寛 (20分)
14:20 18PM-2	超流動 $^3\text{He}$ における奇周波数クーパー対	東谷 誠二 (20分)
14:40 18PM-3	エアロジェル中での超流動ヘリウム3の近接効果	石川 修六 (30分)
15:40 ~ 14:30	スピン軌道相互作用II	座長 安藤 陽一
15:40 18PM-4	トポロジカルバンド絶縁体における乱れの効果と熱電性能指数	進藤 龍一 (15分)
15:55 18PM-5	空間反転対称性の破れた超伝導体の NMR/NQR	俣野 和明 (20分)
15:15 18PM-6	First-principles study of $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$ and $\text{Li}_2\text{Pt}_3$	獅子堂 達也 (15分)

### ●○ 2011年12月19日(月) ○●

09:20 ~ 10:20	バルク・エッジ対応I	座長 佐藤 昌利
09:00 19AM-1	量子スピン系におけるトポロジカル相とエッジ状態	押川 正毅 (30分)
09:30 19AM-2	トポロジカルな欠陥に伴うマヨラナ・ゼロモードと指数定理	福井 隆裕 (15分)
09:45 19AM-3	トポロジカル絶縁体・量子スピン系における"アクションストリング"	田中 秋広 (15分)
10:00 19AM-4	量子ホール系のスピン偏極電流イメージング	音 賢一 (20分)
10:50 ~ 12:15	新奇量子現象	座長 東谷 誠二
10:50 19AM-5	Vortex lines penetration and Landau like state above the expected $\Omega_{ci}$ in hcp He	久保田 実 (20分)
11:10 19AM-6	振動物体による超流動 $^3\text{He}$ -B 相の量子渦核生成	永合 祐輔 (15分)
11:25 19AM-7	素粒子論的見地でのトポロジカル励起	新田 宗土 (15分)
11:40 19AM-8	スピン3ボーズ・アインシュタイン凝縮体における対称性とトポロジカル励起	川口 由紀 (20分)

12:00	19AM-9	多成分ボースアインシュタイン凝縮体を用いた量子渦生成	東條 賢 (15分)
13:30 ~ 14:50		バルク・エッジ対応 II	座長 田仲由喜夫
13:30	19PM-1	ノードのあるトポロジカル超伝導体におけるマヨラナフェルミオン	佐藤 昌利 (30分)
14:00	19PM-2	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> のカイラルエッジ状態	柏谷 聡 (20分)
14:20	19PM-3	$\nu=5/2$ 分数量子ホール系における非アーベリアン状態の可能性	村木 康二 (30分)
15:20 ~ 15:55		エキゾチック近接効果	座長 柏谷 聡
15:20	19PM-4	U化合物超伝導体のジョセフソン効果の磁場特性	住山 昭彦 (15分)
15:35	19PM-5	グラフェン接合系におけるゲート電界効果	神田 晶申 (20分)
15:55 ~ 16:45		実空間トポロジー	座長 石川 修六
15:55	19PM-6	トポロジカルマター	丹田 聡 (30分)
16:25	19PM-7	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> のトポロジカル超伝導現象	前野 悦輝 (20分)
16:45		Closing	鄭 国慶 (10分)

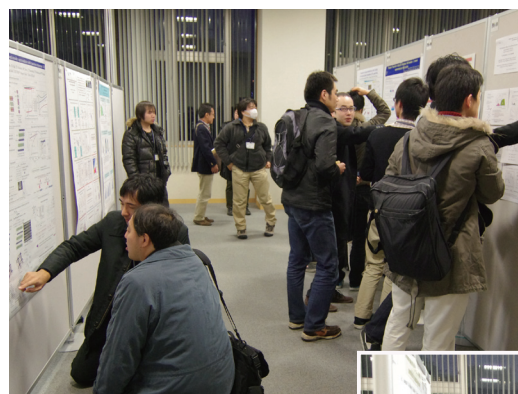


写真上から：  
講演中の  
井澤さん  
川口さん  
松野さん

## ▼ポスター講演▲

PA1	Frictional Relaxation Dynamics of Counterflows in two-component Bose-Einstein Condensates	竹内 宏光
PA2	Interaction between half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates	竹内 宏光
PA3	人工ゲージ場中における SU(2) 対称 BEC の Skyrmion の安定性	川上 拓人
PA4	Entanglement entropy between two coupled Tomonaga-Luttinger liquids	古川 俊輔
PA5	Evidence of Diluted Superfluid <sup>3</sup> He in Aerogel	佐々木 豊
PA6	平行平板内に閉じ込められた超流動 <sup>3</sup> He 中の第 4 音波共鳴	加藤 千秋
PA7	電場誘起表面超伝導での局所電子状態の理論評価	市岡 優典
PA8	Ga クラストレート化合物の超伝導	村中 隆弘
PA9	量子異常 Hall 絶縁体 / s 波超伝導体接合における輸送現象	伊井 彰宏
PA10	重い電子超伝導体 CeCu <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> における Ni 置換効果	池田 陽一
PA11	格子コプラズマ転移から見た CaFe <sub>2</sub> As <sub>2</sub> における超伝導と磁性の関係	檀浦 匡隆
PA12	構造相転移の抑制によって発現する BaNi <sub>2</sub> As <sub>2</sub> の超伝導	工藤 一貴
PA13	スピン軌道相互作用が生む新しい超伝導 --- Li <sub>2</sub> Pt <sub>3</sub> B の超伝導機構として	伏屋 雄紀
PA14	Rashba 系における時間反転対称なトポロジカル超伝導	中河西 翔
PA15	トリプレット超伝導体はいつ非ユニタリーになるか	柳澤 孝
PA16	空間反転対称性を持たない超伝導体 CaIrSi <sub>3</sub> の単結晶育成と超伝導特性	江口 学
PA17	Spin Currents and Spontaneous Magnetization at Twin Boundaries of Noncentrosymmetric Superconductors	荒畑 恵美子
PA18	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> の熱磁効果測定用高感度装置の開発	梶川 知宏
PA19	Sr <sub>2</sub> RuO <sub>4</sub> の上部臨界磁場直下の超伝導異常	天谷 健一
PA20	カイラル p 波超伝導における H//ab での渦糸状態のアイレンバーガー理論による研究	石原 将裕

- PA21 超流動  $^3\text{He}$  自由表下にトラップされた電子バブルの移動度 池上 弘樹
- PA22 量子極限にある超伝導体の渦芯近傍における奇周波数 Cooper 対 臺野 剛士
- PA23 トポロジカル超伝導接合におけるトンネル分光の理論的研究 田沼 慶忠
- PA24 トポロジカル絶縁体の格子モデルにおける表面状態の有限サイズ効果 海老原 和人
- PA25 トポロジカル絶縁体によるスピントルク 酒井 章雄
- PA26 さまざまな結晶方位での  $\text{SrTiO}_3$  電場誘起超伝導 上野 和紀
- PB1 極低温イッテルビウム原子中での人工ゲージ場創成 吉川 豊
- PB2 スピノル BEC における量子渦コア状態の分類 小林 伸吾
- PB3 強相関  $^4\text{He}$  薄膜における KT 転移の抑制と量子臨界性 野村 竜司
- PB4 Drag Force on a High Porosity Aerogel in Liquid  $^3\text{He}$  竹内 宏光
- PB5 Angular momentum by edge mass current in superfluid  $^3\text{He}$  A-phase 堤 康雅
- PB6 ディラック電子を用いたスピン偏極伝導 伏屋 雄紀
- PB7 カイラル超伝導状態における自発磁化の理論 鶴田 篤史
- PB8  $\text{IrTe}_2$  と  $\text{SrSi}_2$  における構造相転移の抑制による超伝導発見 卞 舜生
- PB9 サイリック  $d$  波超伝導での表面束縛状態と自発電流 石川 昌樹
- PB10 非一様磁化構造への超伝導近接効果に関する準古典理論 川畑 史郎
- PB11 ヒ素の化学を利用した鉄系超伝導体の新物質開発 野原 実
- PB12 転移温度 38 K を占める鉄白金系高温超伝導体の発見 工藤 一貴
- PB13 超伝導  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  におけるトポロジカルな表面状態 矢田 圭司
- PB14 空間反転対称性のない超伝導体  $\text{Li}_2\text{T}_3\text{B}(\text{T}=\text{Pt},\text{Pd})$  の結晶合成 石井 亮太
- PB15 空間反転対称性の破れた超伝導体  $\text{Li}_2\text{T}_3\text{B}(\text{Pt},\text{Pd})$  の非磁性不純物効果 包 桂芝
- PB16 空間反転対称性の破れた超伝導体  $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$  のスピン軌道相互作用とスピン三重項状態 原田 翔太
- PB17 一軸性圧力下での  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  と  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  の基底状態の変化 谷口 晴香
- PB18 スピン三重項  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  を用いた One-hole bridge の製作 山岡 義史
- PB19  $\text{Nb}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  マイクロジョセフソン接合におけるジョセフソン電流接合サイズ依存性 齋藤 広大
- PB20 カイラル超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のエッジにおけるマヨラナフェルミオン 延兼 啓純
- PB21  $^3\text{He}$  のエアロジェル界面における超流動性の異常な抑制 小川 翔輝
- PB22 量子臨界点近傍における奇周波数由来のギャップレス超伝導の NMR 法による研究 川崎 慎司
- PB23 トポロジカル絶縁体中の線欠陥におけるギャップレス励起 塩崎 謙
- PB24 超伝導トポロジカル絶縁体におけるトンネル分光の理論 山影 相
- PB25  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  及び  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  における Landau 量子化 花栗 哲郎
- PB26  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  の高圧下ホール効果 荒木 新吾
- PB27 Pomeranchuk Instability of Spin-Antisymmetric Channel in  $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  吉岡 由宇



一方舞台裏では…

準備に奮闘の岡大の皆さん。  
お疲れ様でした！



今後の会議予定



● 第3回領域研究会・国際会議

International Conference of Topological Quantum Phenomena (TQP2012)

会場：名古屋大学 ES 総合館

日時：2012年5月16日－5月20日

参加申し込み

登録開始：2012年2月1日

発表者の登録締切・概要原稿締切：2012年3月31日

発表しない場合の登録締切：2012年4月20日

主な会議トピックス

- スピン三重項ペアリング (d-ベクトル, 固有軌道角運動量など)
- 反転対称性の破れた系でのパリティ混合超伝導
- 奇周波数ペアリング超伝導・超流動
- 表面・界面での超伝導・超流動
- トポロジカル超伝導体・超流動体、トポロジカル絶縁体のエッジ状態
- 超伝導体・超流動体、冷却原子系のトポロジカル励起
- 新奇なトポロジカル量子現象

主な招待講演者

Jan Aarts (Leiden Univ. / Netherlands)

Hideo Aoki (Univ. Tokyo / Japan)

Raffi Budakian (Univ. Illinois, Urbana-Champaign / USA)

Konstantin B. Efetov (Ruhr-Uni.Bochum / Germany)

Akira Furusaki (RIKEN / Japan)

Alexander Golubov (Univ. Twente / Netherlands)

Victor Gurarie (Univ. Colorado / USA)

Anthony J. Leggett (Univ. Illinois, Urbana-Champaign / USA)

Koji Muraki (NTT Basic Research Lab. / Japan)

Naoto Nagaosa (Univ. Tokyo / Japan)

Manfred Sigrist (ETH Zurich / Switzerland)

Dale J. Van Harlingen (Univ. Illinois, Urbana-Champaign / USA)

Grigori Volovik (Aalto Univ. / Finland)

Shoucheng Zhang (Stanford Univ. / USA)

<http://www.topological-qp.jp/tqp2012/index.html>

● 集中連携研究会

「冷却原子気体のトポロジー」

会場：東京大学

日程：2012年

連絡先：上田 正仁 (東京大学)

「トポロジカル超伝導・超流動」

会場：大阪大学 吹田キャンパス

日程：2012年12月13日・14日 (予定)

連絡先：安藤 陽一 (大阪大学)・石川 修六 (大阪市立大学)

● 若手国際会議

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

会場：未定

H25年度 (2013年)

● 今後の領域研究会の予定

詳細は決定し次第、ウェブサイト上で告知します。

H25年度：2013年12月 東京大学

H26年度：2015年3月 京都大学

## 成果報告方法変更のお知らせ

本領域では皆様に成果報告をお願いしておりますが、報告の方法が変わりますのでお知らせいたします。報告事項は、論文、招待講演、著書、受賞、報道、特許、アウトリーチ、その他です。これまでも論文、受賞、報道は随時、それ以外は年度末に報告いただきましたが、すべての項目に渡って随時報告となります。

### (1) 報告方法を変更する理由

研究成果の動向を把握する上で、出来るだけ新鮮な情報を収集したく、すべて随時報告に改めることといたしました。また、市民講座など活動に先立って広報すべき報告事項もあります。皆様には負担をおかけしますが、ご協力をお願いいたします。

### (2) 新しい報告の方法

報告には必要な項目を記したエクセルファイルを用います。報告すべき成果がありましたら、直ちに追加記入のうえ下記までご返送ください。エクセルファイルの他に、論文のPDF、新聞記事のPDFなど関連する電子ファイルも併せてお送りください。特にアウトリーチ活動は、活動に先立ち、行事予定が決まり次第お知らせ下さい。報告方法の詳細は「研究成果」のページをご覧ください。

送り先：領域事務局 topology-office@scphys.kyoto-u.ac.jp

### (3) エクセルファイルの管理

基本的にはエクセルファイルは各年度に一つとします。報告事項を追加記入し返送した後は、各自で管理願います。次に報告事項が発生した際、お手元のエクセルファイルに追加記入し、追加部分をハイライトしてお送り下さい。エクセルファイルは本領域 WEB の「研究成果」のページからダウンロード願います。

## 編 集

## 後 記

東日本大震災に振り回された一年が終わろうとしている。私が所属する産総研も地震では大きな被害を受け、本棚や装置の壊れる様を目の当たりにした。それに加えて TV で見た被災地の被害状況は忘れることはできず、実験が止まっている半年間に、自分が科学者として何の役に立てるかを心から考えさせられた。一方、2011 年は超伝導 100 周年という節目の年にあたり、超伝導が次の世紀への歩みだしを始める節目の年であった。トポロジー（位相幾何学）は Wikipedia によると 250 年の歴史を持っており、いずれも研究領域としては新しいものとは言い難い。しかしトポロジカル超伝導という考え方は、今

世紀に入って急速に興味をもたれるようになり、マヨラナフェルミオンや非可換渦など、数多くの新奇現象に関する理論的提言がなされてきた。超伝導に限らず、Topological materials として、トポロジカル絶縁体、超流動ヘリウム、BEC なども含めて、凝縮系における一つのフィールドの確立へ確実に歩みつつあるように感じる。しかしこの流れが単なる流行で終わるのかどうかは、普遍的概念を確立するだけではなく、我々の実生活へつながる何らかの価値の創出が不可欠であろう。新領域研究の後半ではぜひそのような成果を出していきたいと願っております。

(文責、柏谷 聡)

# International conference on topological quantum phenomena

May 16-20, 2012 Nagoya, Japan



## International conference on Topological Quantum Phenomena

<http://www.topological-qp.jp/tqp2012/index.html>

May 16-May 20, 2012

E & S Building, Higashiyama Campus, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

Coming up!  
Coming up!

### Important Dates

- Registration open : **February 1st, 2012**
- Early registration deadline  
(for those who require a visa) : **March 16th, 2012**
- Registration and abstract submission deadline : **March 31th, 2012** (for those presenting)
- Registration deadline : **April 20th, 2012** (for those who are not presenting)

### Scope

Topology is a concept and method enabling the classification of shape by continuous deformation. We are interested in quantum phenomena, where the shape subject to continuous deformation is based on the symmetries and phases of the quantum mechanical wave functions.

Up to now, well known examples of quantum phenomena characterized by topology are quantization of vortices in superconductors and superfluids, Aharonov-Bohm effect of interference of electron wave functions, quantum Hall effect, fractional quantum Hall effects.

Stimulated by the discovery of topological insulator, quantum phenomena for which underlying topology plays fundamental becomes an important major frontier in modern condensed matter physics. The aim of this conference is to pursue and deepen the physics of topological quantum phenomena over a vast variety of material systems.

The topic of this conference is as follows.

- Spin-triplet pairing (d-vector, intrinsic angular momentum, etc.)
- Parity-mixing pairing in non-centrosymmetric systems
- Odd-frequency pairing in superconductors and superfluids
- Novel surface/interface superconductivity and superfluidity
- Edge states in superconductors, superfluids, and topological insulators
- Topological excitations in superconductors, superfluids, and cold atom
- Novel topological phenomena
- Other relevant topics

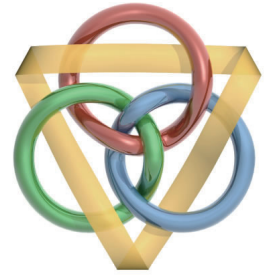
### Invited Speakers

- Jan Aarts (Leiden Univ. / Netherlands)
- Yoichi Ando (Osaka Univ. / Japan)
- Hideo Aoki (Univ. Tokyo / Japan)
- Raffi Budakian (Univ. Illinois, Urbana-Champaign / USA)
- Konstantin B. Efetov (Ruhr-Uni.Bochum / Germany)
- Takeshi Fukuhara  
(MPI Quantum Optics, Garching / Germany)
- Akira Furusaki (RIKEN / Japan)
- Alexander Golubov (Univ. Twente / Netherlands)
- Victor Gurarie (Univ. Colorado / USA)
- Tetsuo Hanaguri (RIKEN / Japan)
- Seiji Higashitani (Hiroshima Univ. / Japan)
- Osamu Ishikawa (Osaka City Univ. / Japan)
- Koichi Izawa (Tokyo Institute of Technology / Japan)
- Satoshi Kashiwaya (AIST / Japan)
- Anthony J. Leggett (Univ. Illinois, Urbana-Champaign / USA)
- Kazumasa Miyake (Osaka Univ. / Japan)
- Takeshi Mizushima (Okayama Univ. / Japan)
- Koji Muraki (NTT Basic Research Lab. / Japan)
- Naoto Nagaosa (Univ. Tokyo / Japan)
- Masatoshi Sato (ISSP, Univ. Tokyo / Japan)
- Manfred Sigrist (ETH Zurich / Switzerland)
- Masahito Ueda (Univ. Tokyo / Japan)
- Kazunori Ueno (Univ. Tokyo / Japan)
- Dale J. Van Harlingen  
(Univ. Illinois, Urbana-Champaign / USA)
- Grigori Volovik (Aalto Univ. / Finland)
- Shingo Yonezawa (Kyoto Univ. / Japan)
- Shoucheng Zhang (Stanford Univ. / USA)
- Guo-qing Zheng (Okayama Univ. / Japan)

# NEWSLETTER No.2

- 2 巻頭言  
トポロジカルな物質観と新しい“周期表”を目指して
- 3 今年度の計画研究班トピックス  
計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 15 公募研究メンバー紹介
- 8 受賞ニュース  
横山 毅人 (東京工業大学)  
川口 由紀 (東京大学) / 沙川 貴大 (東京大学)
- 10 トピックス  
奇周波数クーパーペア (浅野 泰寛)  
トポロジカル超流動  $^3\text{He-B}$  相の表面マヨラナコーン (野村 竜司)  
トポロジカル超伝導体  $\text{CuxBi}_2\text{Se}_3$  の単結晶試料作製 (瀬川 耕司)  
2011年ピックアップトピックス
- 27 若手相互滞在プログラム報告  
秋山 綱紀 (東京工業大学) / 伊井 彰宏 (名古屋大学)  
包 桂芝 (岡山大学)
- 30 新規採用研究者の紹介  
山影 相 (名古屋大学) / 齋藤 広大 (産業技術総合研究所)  
古川 俊輔 (東京大学) / 竹内 宏光 (広島大学)  
國松 貴之 (大阪市立大学)
- 35 2011年度研究会報告  
第5回~第7回集中連携研究会、若手国際会議、第2回領域研究会
- 47 今後の会議予定 / 編集後記

## 領域ロゴの意味するもの



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。

本領域ウェブサイトでは、研究紹介、研究会情報、市民向けサイエンス講座などを掲載しています。ぜひご来訪ください。

## 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2号

発行日：2012年2月15日

発行：「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」総括班

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

領域事務局：〒602-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学 大学院理学研究科 物理学第一教室 固体量子物性研究室内

TEL/FAX: 075-753-3783

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

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

Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries

あなたは 19243 回目の訪問者です (Since Sep 1, 2010).

トピックス一覧

- 2012/1/6 前野 (領域代表)、主澤 (A01班)、石田 (A01班) によるルネサンス型量子物性学の新展開が J. Phys. Soc. Jpn. の誌面特集裏面に掲載されました。
- 2012/1/6 田仲 (D01班代表)、佐藤 (D01班)、永長 (C01班) による超伝導における対称性とボロメ (前掲波数クーパー対とエンタングルメント) に関するシ...

研究イベント情報

- 2012/May/16-20 TOP2012 トポロジカル量子現象国際会議 名古屋大学 ES36 会場
- 2011/Dec/17-19 第2回領域研究会(平成23年度) 岡山大学 (終了)