

領域略称名：トポロジカル量子
領域番号：2202

平成24年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る研究経過等の報告書

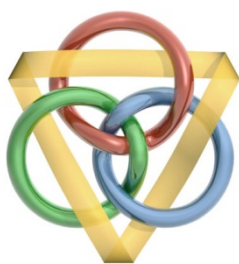
「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」

(領域設定期間)
平成22年～平成26年

平成24年6月

領域代表者 京都大学・大学院理学研究科・教授・前野 悦輝

中間評価に関する評価資料である本報告書冊子を文科省 HP で公開するにあたり、著作権や論文未発表情報などの観点から WEB 公開にふさわしくない個所には処理を施してあります。



新学術領域研究 2202

対称性の破れた凝縮系における トポロジカル量子現象

目次

1. 研究領域の目的及び概要.....	1
2. 研究の進展状況.....	2
3. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策.....	3
4. 主な研究成果.....	4
5. 研究成果の公表の状況.....	15
(1) 主な論文等一覧について.....	15
(2) ホームページについて.....	20
(3) 公開発表について.....	22
(4) 「国民との科学・技術対話」について.....	26
6. 研究組織と各研究項目の連携状況.....	28
7. 研究費の使用状況.....	33
8. 今後の研究領域の推進方策.....	34
9. 総括班評価者による評価の状況.....	35

1. 研究領域の目的及び概要

研究領域名	対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象
研究期間	平成 22 年度－平成 26 年度
領域代表者	京都大学大学院理学研究科・教授・前野悦輝
補助金交付額 (直接経費)	平成 22 年度：157,800 千円 平成 23 年度：221,000 千円 (内公募研究：38,300 千円) 平成 24 年度：168,100 千円 (内公募研究：37,800 千円) 平成 25 年度：89,000 千円 平成 26 年度：84,600 千円

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)の目的は、超伝導体、超流動体、絶縁体などの量子凝縮系でしばしば発現する、トポロジカルに特徴付けられる量子現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、「トポロジカル量子物理学」という新たな学術領域の形成を目指すことにある。

本領域の研究対象は、凝縮体のかたまり「バルク」そのものの対称性破れに物理学の重要課題を含む超伝導体や超流動体、絶縁体、冷却原子系など、そしてトポロジカルな新奇現象が発現する舞台として「エッジ」と名付けられるそれらの表面・界面である。「エッジ」でのトポロジカル量子現象の理解には、「バルク」で創発する量子現象の徹底的な理解が第一ステップとなる。

トポロジカル量子現象の物理は、異分野交流・連携によって真のシナジー効果が最大限に発揮できるフェイズにある。本領域では当該の各分野で世界をリードする研究者を結集し、異分野連携を格段に強化することで新学術分野を一気に構築する。トポロジカル量子現象の物理は、純粋にアカデミックな研究対象としての価値に留まらず、スピントロニクスや量子コンピュータなど、将来の高度な応用科学にとっても重要な基礎となると期待される。

組織の主構成は、研究対象の物質系に即した 3 つの計画研究 A,B,C と、それらに太い横糸が通る形で普遍概念を統合する理論班 D からなる：

- A01： 時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象
- B01： スピン三重項超流動体の新奇界面現象
- C01： 空間反転対称性を破る量子流体の新奇現象
- D01： トポロジカル凝縮系の理論

さらに公募研究 (A01, B01, C01; D02, D03, D04) とし、各計画研究のテーマに沿って相補的な手法・テーマでトポロジカル量子現象を開拓する研究者らを取り込む。

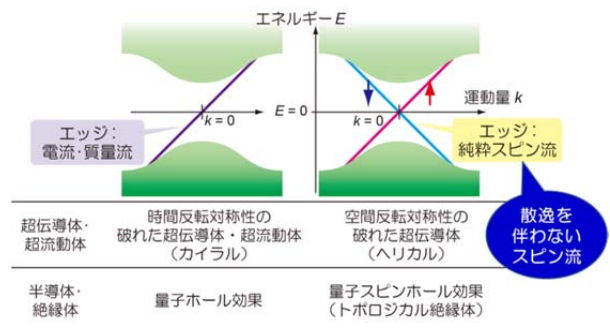
分野横断研究の推進、また若手人材育成の方策として、以下の取り組みを行う。

(1) 連携による分野横断研究とアナロジーの追求

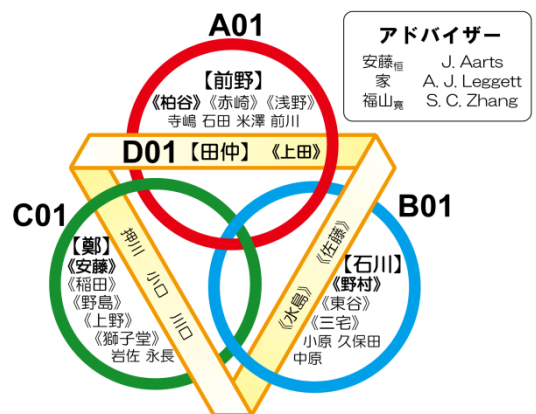
「トポロジカル量子現象」の共通視点のもと、鍵となる物理概念について、テーマを絞った小規模「集中連携研究会」を開催する。毎年の「領域研究会」(H24、H26 年度は国際会議)は公開で開催し、分野横断的研究成果を最大限に反映できるセッション立てで行う。

(2) 新学術領域を担う若手人材育成を通じた研究融合

「若手相互滞在プログラム」や「若手国際会議」等による若手研究者間での直接的な深い交流を通じて、異分野間の研究融合を触発する。そして分野横断型の研究視点と国際性をもった人材を育成する。



図：多様なトポロジカル量子状態のエッジ流。



3. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策

【これまで研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するためにとった対応策、また、現在問題となっている点がある場合には、それを解決するための今後の対応策等について記載。】

【震災対応】

これまでで最大の不測の事態は H23 年 3 月の震災である。本領域では新学術の研究ミッションの成果を期限内に滞りなく進めるために、すぐに組織をあげて被災地の研究者に対して研究環境の復興支援を行った。A01 班からは、班を超えた共同研究を行っていた C 班の東北大メンバー（野島・上野）に対して、研究遂行に支障が出ぬよう、破損装置を買い替える補助を H22 年度予算で緊急的に行った。また A01 班内では京大の実験装置を使用するためにつくばの産総研から領域雇用の PD 研究者の滞在を受け入れた。B01 班の研究遂行の主力装置である東大物性研の回転超低温冷凍機は、機械的にしっかりしていたためか、幸いなことに被害がほとんどなかった。C01 班では被災した班員（野島）に対して、破損した装置を修理するために、H23 年度の配分額を当初予定より 170 万円増額した。D01 班では分担者佐藤（東大物性研）を名大に何度か招聘し共同研究を促進した。

震災に伴い、多くの学会・研究会の開催予定が変更になった。H22 年度には H23 年 3 月の物理学会（新潟大学）が中止になった。これに伴い同会期中に開催予定であった総括班会議は H23 年度になってから 4 月中旬に京大で開催した。5 月に東京で開催予定の「公募研究キックオフ研究会」も中止にせざるを得なかったが、これは 9 月の日本物理学会の会期前日に富山市で開催し、学術調査官にも臨席いただいて、公募代表者ほぼ全員による研究計画の発表会を行い、引き続き総括班会議も行った。H23 年度の「若手国際会議」は当初、関東地方で開催の予定であったが、海外からの交通や電力事情の見通しが不透明であったので、早期の段階で関西地方の開催に変更した。

予算的には H23 年度の第一次交付金が 70% という緊急事態が発生した。人件費の確保のため、実験系では物品費が執行できなくなった例も多く発生した。これらに対しては、第 2 次で交付が復活した後、迅速に必要な物品を購入する等して対応できた。また特に理論系では大学院生の研究補助に対する謝金の縮小や、海外渡航・海外招へいの計画のキャンセルをせざるを得なかった。H24 年度になっていくつかの計画を復活実施しているが、資金繰りに苦労している。なお上記の若手国際会議の開催はアジア太平洋物理学研究センター（APCTP）との共催で資金の追加確保ができていたために、最小限の影響で済んだ。

【新学術領域のゆるぎない構築のために】

発足時には、まだ萌芽の要素もあった「トポロジカル量子現象」を体系的に研究するのはかなり野心的な側面もあった。幸いなことに、我々の予見をも超えたこの 2 年間の世界的な研究発展によって、当該テーマは現在の物理学研究において重要な課題と認識されるまでに成長した。その中で世界に先駆けて新学術領域開拓の視点で始動した本プロジェクトは、我が国の得意とするユニークな分野も取り込んだ独自性も発揮しており、国際的にも一目置かれる先導的成果をすでに挙げている（後述 9 のアドバイザーコメント）。しかしその後、海外でも同様のプロジェクトが潤沢な予算措置のもとで展開されている。先発した本プロジェクトの成果を「新学術領域開拓」から「確立」までゆるぎないものにするには、我が国のプロジェクトが世界に先駆けて解散してしまったのでは問題である。現状の我が国の制度では、5 年間で基本的に打ち切られ、再採択されるには大幅な組織替えとテーマ替えを余儀なくされる。科学技術推進の国策としての制度上、脆弱な要素が懸念される。その改善策として、期限を迎える新学術領域研究の中から特に継続の有効性が認められるプロジェクトには 3 年間程度の継続予算を認めるような制度改革を切望する。



領域ロゴの意味するもの

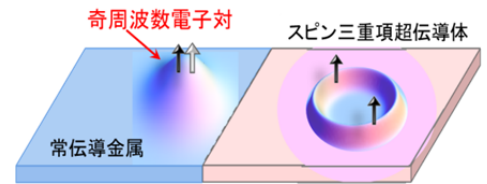
三つの輪はそれぞれ計画研究 A,B,C を表し、異なる物質系での研究の連携を表現している。このボロメの輪（ボロメアの輪、Borromean rings）を貫く 3 回ひねりのメビウスの帯（Möbius band）は計画研究 D を表し、個々の物質系を超えた概念の融合や普遍法則の探求を表現している。

4. 主な研究成果

[これまでの主な研究成果について、研究項目毎に2～3頁程度を目安とし、図表等を用いて分かりやすく記載。]

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」の目標達成に向けて、超伝導体、超流動体、絶縁体、冷却原子気体におけるトポロジカル量子現象の実証が着々と進んでおり、新学術領域組織ならではの分野横断的共同研究が進んでいる。具体的には：

- (1) 「エッジ状態」、特に超流動 ^3He で表面マヨラナ型準粒子励起状態が実証されたこと；
- (2) 「奇周波数ペアリング状態」が予期されていた以上に様々な状況や物質系で遍在することがわかり、さらに実験・理論両面から近接効果やゼロエネルギー束縛状態と奇周波数ペアリングの密接な普遍関係がわかってきたこと；
- (3) ドーピングによって超伝導化したトポロジカル絶縁体も、「トポロジカル超伝導体」である可能性が指摘され、実験・理論研究が連携して進展していること；
- (4) 「半整数量子渦」の実験的証拠が挙げられたこと；
- (5) スピン三重項超流体での未解決問題「固有軌道角運動量」の実測の糸口が見えてきたこと；
- (6) 冷却原子系でのトポロジカル励起について体系的な研究が進展したこと、などが挙げられる。



図：超伝導接合系での奇周波数ペアリング

最近提唱されている「トポロジカル物質の周期表」で実証されつつある物質は、本領域ならではの独自性の高いものも含めそのほとんどを網羅している。これらの研究成果から、最近数年間のうちに世界的に急速に発展が始まったトポロジカル量子現象の研究において、本領域がすでに世界を先導する役割の一翼を担うに至っている。

Cartan label	T 時間反転 対称性	C 粒子-反粒 子対称性	S カイラル 対称性	系の次元性		
				1	2	3
A (unitary)	0	0	0	0	\mathbb{Z} IQHE (整数量子ホール効果)	0
AIII (ch. unit)	0	0	1	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}
AI (orthogonal)	+1	0	0	0	0	0
BDI (ch. orth.)	+1	+1	1	\mathbb{Z}	0	0
D (BdG)	0	+1	0	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z} p+ip SC/SF Sr_2RuO_4 , $^3\text{He-A}$	0
DIII (BdG)	-1	+1	1	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}_2 Rashba NCS-SC (2次元NCS超伝導体)	\mathbb{Z} $^3\text{He-B}$
AII (symplectic)	-1	0	0	0	\mathbb{Z}_2 QSHE (量子スピンホール効果、 2次元トポロジカル絶縁体)	\mathbb{Z}_2 3D-TI (3次元トポロジカル 絶縁体)
CII (ch. sympl.)	-1	-1	0	$2\mathbb{Z}$	0	\mathbb{Z}_2
C (BdG)	0	-1	0	0	$2\mathbb{Z}$ $d+id$ SC (2次元カイラルd波 超伝導体)	0
CI (BdG)	+1	-1	1	0	0	$2\mathbb{Z}$

表：現在提唱されている「トポロジカル物質の周期表」(Ryu et al., New J. Phys. 12 (2010) 065005)。相互作用のないフルギャップのフェルミ粒子系の対称性をもとにしている。トポロジーの種類を表す変数 $0, \mathbb{Z}, \mathbb{Z}_2, 2\mathbb{Z}$ が系の空間次元の変化に沿って斜め下に繰り返し並ぶ。実例の知られるようになった物質は、太線で囲った通り本領域の研究でほぼ網羅している。特に本領域オリジナルのものも多い。一方、この「周期表」では説明のつかない現象もいくつも明らかになり、現在の分類を拡張する必要性が出てきた。

【A01】時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 超伝導のスピン三重項性を吟味するレビュー論文を出版することができた(論文 A-2)。これは2003年のReviews of Modern Physics誌レビュー論文【A.P. Mackenzie and Y. Maeno, 引用件数 578】発表以降の研究成果を集大成するもので、核磁気共鳴実験などによるスピン三重項超伝導の証拠についても吟味を深めた。 Sr_2RuO_4 微結晶による研究は当初計画以上のペースで多角的に進行中である。トポロジカル超伝導の研究が世界的に加速しており、ルテニウム酸化物への注目度は高い。また強磁性体と超伝導体の接合実験もゼロエネルギーでのコンダクタンスピークが磁性半導体の接合で実験的に初めて実証できたことなど、計画以上の成果が上がっている。

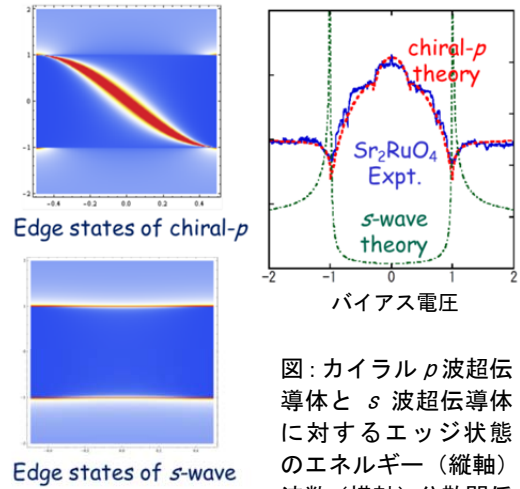
このように、微結晶や超伝導接合の実験技術が大いに向上したので、今後はトポロジカル超伝導の起源となる超伝導内部位相を直接観察するための研究を重点的に推進する予定である。以下では領域発足以降得られた成果の概要を説明する。

【1. Sr₂RuO₄の微小単結晶を用いた新現象探索】（柏谷、前野、浅野、米澤<連携>、田仲<D01>）

超伝導における新奇なトポロジカル量子現象の代表例と位置づけられる以下の二つの現象について大きな進展を遂げた。

【1-1. トポロジカル・エッジ状態の観測】

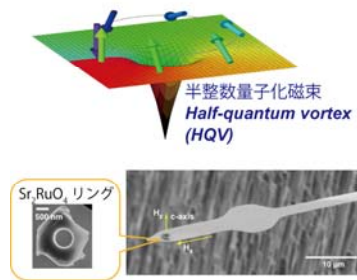
Sr₂RuO₄と金を用いたSIN接合のトンネル分光の詳しい測定と解析により、カイラル・エッジ状態密度の存在を抽出することに成功した（論文 A-4）。これは Sr₂RuO₄/Au 接合において、右図のように通常の s 波超伝導体で期待されるギャップ構造のBCS型のトンネルスペクトルではなく、コンダクタンスピークが観察されることにより検証された。エッジ状態としては、s 波ではエネルギーギャップとなっている領域に、トポロジカルな起源を有するカイラル・エッジ状態が形成され、これをトンネル効果にて観察していることに対応すると解釈される。この結果は、Sr₂RuO₄がカイラル p 波対称性を有するトポロジカル超伝導体であることを強く示唆する。この実験結果の解析には D01 班の田仲も連携した。



図：カイラル p 波超伝導体と s 波超伝導体に対するエッジ状態のエネルギー（縦軸）波数（横軸）分散関係（左図）、およびトンネル効果コンダクタンス（右図）。実験データは、超伝導エネルギーギャップ内に幅広く状態密度があることを示す。

【1-2. 半フラクソイド状態の観測】

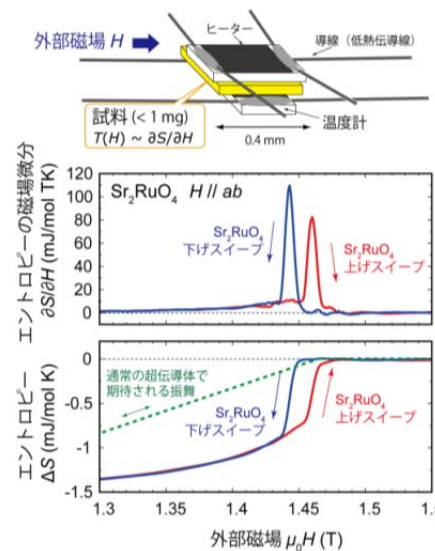
Sr₂RuO₄微小リングの磁気トルク測定から、半磁束量子（Half Quantum Vortex; HQV）に関連する半整数フラクソイド（Half Quantum Fluxoid; HQF）状態が誘起されることを示す結果を得て、Science 誌に発表した（論文 A-12）。これはイリノイ大学との共同研究の成果である。半整数フラクソイドは非可換な統計性を持つことが理論的に示唆されており、量子コンピュータの基本素子となる「トポロジカル量子ビット」への発展も期待されている。



図：HQV の模式図（左上）と Sr₂RuO₄ リングの高感度磁気トルク測定（右および左下）。HQV は超伝導の軌道位相（底面の色で表されている）とスピニ位相（矢印とその色で表されている）がそれぞれ π の位相変化を伴う渦糸である。左下の写真のように微小な結晶リングをカンチレバーに乗せてトルク測定を行うと、右図のようにリングに平行な外部磁場を同時に印加した時に半分の高さのステップが観測された。このステップが HQF に対応する。

導電特性測定による HQF のさらなる検証に向けて、前野・米澤らは微結晶リングの超伝導転移温度の磁場中振動を観測するための実験を開始している。磁気トルクの実験結果や理論考察によると、HQF 状態の実現には小さく薄い結晶が必要となる。このための、微小結晶をリング状に加工して電極を取り付ける技術開発にも目途が立った。

【2. Sr₂RuO₄のバルク超伝導体の未解決現象説明に向けて】（前野、石田<連携>、米澤<連携>、天谷<公募>;三宅<B01>）



図：Sr₂RuO₄の熱磁効果測定結果。低温では上部臨界磁場近傍で超伝導-常伝導転移が不可逆的になっていくこととエントロピーが不連続変化することを明らかにした。これらは一次相転移の特徴である。

前野・米澤らは、熱磁効果測定という手法から、磁場を RuO₂ 面に平行に印加した場合の超伝導転移が、通常の超伝導体と異なり一次相転移になっていることを初めて示した（論文投稿中）。この結果は Sr₂RuO₄ のスピン三重項超伝導がこれまでに知られていないメカニズムで磁場と相互作用していることを示唆しており、Sr₂RuO₄ のトポロジカル量子現象を理解する上で基本的で重要な成果である。この超伝導転移の問題は、公募班の天谷らも磁気測定・熱測定などによって研究を進めており、そこから新たな知見が得られつつある。また、前野・米澤らは一軸性圧力効果によって Sr₂RuO₄ やその類縁物質の電子状態を直接制御する方法を開拓している。特に、Sr₂RuO₄ の単結晶に一軸圧力を印加することによって、超伝導転移温度 T_c を、元の 1.5 K から 3 K まで倍増させることに成功した。さらに、Sr₂RuO₄ のスピン三重項ベクトル秩序変数を確定させるための中性子回折による磁束格子の国際共同研究も進めている。

【3. 接合での量子干渉効果および奇周波対状態の検出】

（前野、寺嶋、柏谷、浅野、田仲〈D01〉；住山〈公募〉）

Sr₂RuO₄-Ru 共晶と従来型の超伝導体との超伝導接合素子で、実空間におけるトポロジーを利用することによってカイラル p 波状態のトポロジカルな特徴を顕在化させる量子干渉効果を再現性良く観測し「トポロジカル超伝導接合」として論文発表した（論文 A-1、A-6）。さらに p 波超伝導証明となる π 接合超伝導量子干渉素子の動作を実証する実験も進めた。また、Sr₂RuO₄ と金属の接合で予想される奇周波数状態ではクーパー対の密度が見かけ負になることを利用し、表面インピーダンス測定から奇周波数対の存在を実験検証可能という理論提案も行った（論文 A-7）。これらも A 班と D 班の共同研究の成果である。

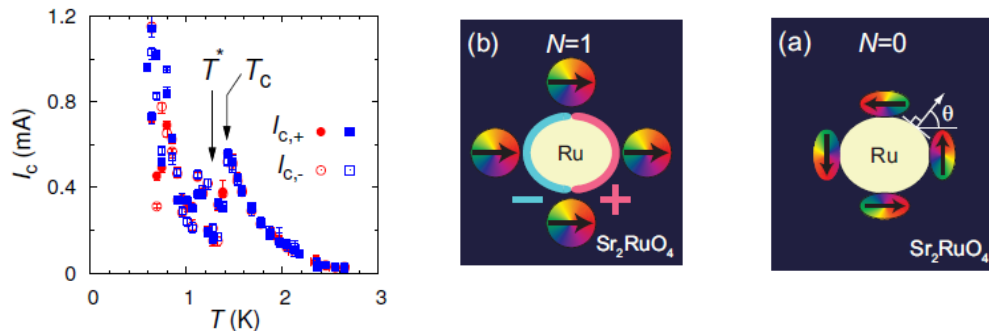


図: Sr₂RuO₄-Ru-Pb トポロジカル超伝導接合素子で観測された量子干渉効果による臨界電流 I_c の抑制。右はこの干渉効果を生じる原因と考えられるカイラル p 波超伝導のトポロジカル相転移の模式図。

重い電子系超伝導体の UPt₃ は、Sr₂RuO₄ と同様にスピン三重項超伝導体と考えられており、Sr₂RuO₄ や超流動 ³He の好対照物質である。住山は素子作製方法の改善により s 波超伝導体と UPt₃ の間のジョセフソン効果にフラウンホーファー回折図形（右図）の現れる良質の接合素子を得ることに成功した。提案されている超伝導対称性と電流方向とを比較すると、UPt₃ におけるカイラルではない超伝導状態の実現を示唆している。

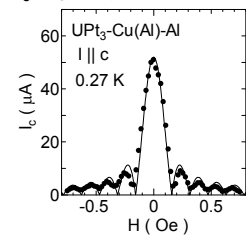


図: UPt₃-Al ジョセフソン接合素子の磁場特性に現れたフラウンホーファー形の干渉。

【4. 強磁性体を含む超伝導接合系での奇周波数超伝導状態】

（赤崎、柏谷、浅野、川畑〈公募 D02〉）

強磁性半導体 p -InMnAs と s 波超伝導体 Nb の強磁性/超伝導 (F/S) 接合で、強磁性体内に誘起される奇周波数スピン三重項状態の研究を理論・実験両面から進めた（論文 A-10、A-13）。半導体を用いることで制御性の高い強磁性が得られるのが特徴である。導入した 3 軸ベクトル磁石を用いて、接合素子の微分コンダクタン

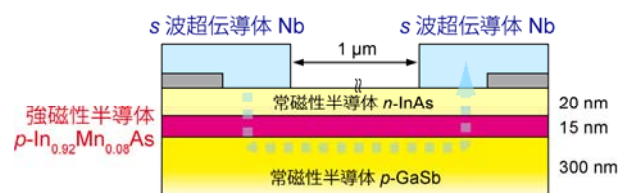


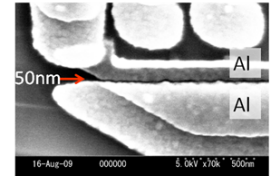
図: Nb/ n -InAs/ p -InMnAs 接合の模式図。薄い水色の矢印は、この接合における電流の流れ方を示す。

スーバイアス電圧特性を測定した。微分コンダクタンスは、従来のスピン-重項偶周波数クーパ対が近接効果により F 中に侵入した場合に形成されるミニギャップ構造ではなく、ゼロバイアス近傍にピーク構造を示す。このゼロバイアス・コンダクタンスピークは、スピン三重項 s 波の奇周波数クーパ対が F 中に侵入した場合に理論的に予想される局所状態密度のピークと、その磁場依存性を含めて定性的に一致している。

【5. グラフェンにおける超伝導近接効果】(神田 <公募>)

単層のグラファイトであるグラフェンは、トポロジカル絶縁体と同様ディラック型分散を持つ電子を持っているが、(1) スピン軌道相互作用が弱い、(2) キャリア濃度が低い、(3) クラマース点ではないところに 2 つのディラック点を持つ、等の大きい違いもある。従って、トポロジカル絶縁体と対照的な参照系として重要である。このグラフェンでは「相対論的なジョセフソン効果」が予言されており、その実現は非常に重要である。神田らはグラフェンの化学ポテンシャルを多層構造を用いて制御しながら、効率的に超伝導電子をグラフェンへ注入する手法を開拓している(論文 A-8)。

バリスティックグラフェン
ジョセフソン接合



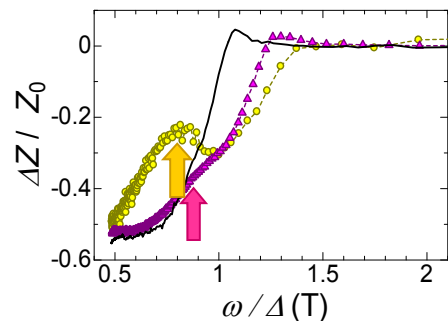
図：グラフェンと Al で作成したジョセフソン接合素子。

【B01】スピン三重項超流動体の新奇界面現象

【1. 表面マヨラナコーン】(野村、東谷)

超流動 $^3\text{He-B}$ 相が真にトポロジカル超流動体であることを示す、表面マヨラナコーンの存在を実験的に確立した。この成果は、トポロジカル超流動体の重要な性質であるバルク・エッジ対応を初めて示すものである(論文 B-9)。

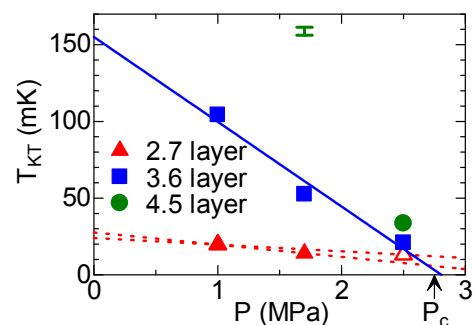
^4He 薄膜で壁をコートして鏡面度が約 0.8 の境界条件を実現し、超流動 $^3\text{He-B}$ 相の横波音響インピーダンスの低エネルギーピークを観測した(右図の矢印部)。このピークはマヨナラコーンに起因する特異性である。



図：音響インピーダンスのエネルギー依存性。実線・三角・丸印の順で壁の鏡面度が大きくなるにつれ、低エネルギーにピークが成長した。理論との比較から、このピークはマヨナラコーンの存在に起因することが分かった。

【2. 新奇界面超流動状態】(野村)

電場誘起表面超伝導が SrTiO_3 や KTaO_3 絶縁体表面に誘起できたが、別の新奇表面超流動体も見いだした。 ^3He のマヨナラコーン検出に ^4He 薄膜を壁にコートして用いたが、この液体 ^3He 下の ^4He 薄膜がトポロジカル相転移の一種である KT 転移を起こし、2 次元超流体となることにより壁の鏡面度が上昇することが分かった。またその超流動転移温度が ^3He の圧力により抑制され、量子臨界点以上の高圧で、強相関効果により超流動性が消失することを明らかにした。電子系における高圧下でのモット絶縁相転移に類似した、量子臨界現象を示す強相関 ^4He 薄膜という新奇表面超流動の発見である(論文 B-4)。



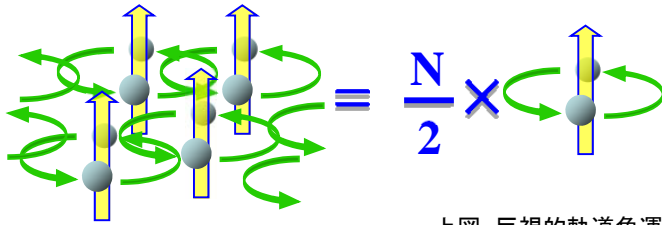
図：3 種の膜厚の ^4He 薄膜の超流動転移温度の ^3He 圧力依存性。加圧による強相関効果で超流動転移温度が抑制され、量子臨界圧力 $P_c=2.8\text{MPa}$ 以上で超流動性が消失した。

【3. カイラル超流動状態の基本問題】

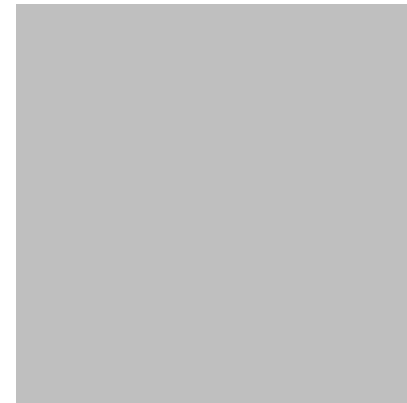
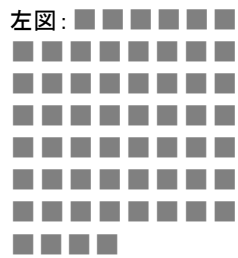
[3-1. ■■■■■■■■■■■■トポロジカルオブジェクトの局所観測] (■■■■■■■■佐々木 <公募>)



佐々木は、超流動³Heの中に出現するトポロジカルオブジェクトを可視化し制御する研究の基幹技術となる周波数分解MRI法を開発してきたが、常流動状態の液体³Heを用いた実験でこの測定技法に成功した。



上図：巨視的軌道角運動量の概念図。緑色矢印はクーパー対の回転、黄色矢印は軌道角運動量を示す。



[3-2. 固有軌道角運動量]

(石川、高木〈公募〉)

超流動³He-A相はスピン三重項カイラル p 波超流動であることが詳細に確立されているトポロジカル超流動体の一つである。すべてのクーパー対の軌道角運動量が同じ状態にある。軌道角運動量の大きさはクーパー対あたりプランク定数程度の微量である。しかし全クーパー対 ($N/2$ 個) の角運動量が単純加算されて巨視的量となるかどうかは、専門家の意見も二分したままの基礎的未解決問題である。これが³He-A相の固有角運動量問題である。高木の提案に基づき東大物性研究所で行った実験で、細い円筒容器内に Mermin-Ho 型の秩序変数の網目構造を安定につくることに成功した。

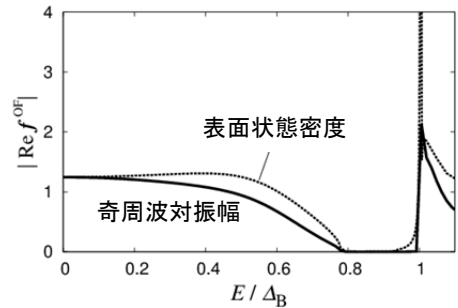
核磁気共鳴周波数の回転応答は、巨視的軌道角運動量が観測された場合の計算結果と良い一致を示す。さらなるデータの集積によって、積年の問題に遂に終止符を打てる見通しが立った。

【4. 奇周波数ペアリング】

[4-1. 界面での奇周波数超流動状態]

(石川、東谷、松本〈公募〉)

東谷は、右図に示すようにゼロエネルギー状態密度と奇周波数対振幅との対応関係を厳密に導いた。この対応関係に基づき、野村らのアンドレーエフ表面束縛状態に関する従来の実験結果を再検討することで、超流動³Heの表面に実際に奇周波数クーパー対が形成されていることを明らかにした(論文B-3)。これは田仲らが理論的に予想していた p 波超伝導体の表面における奇周波数対形成と対応するものである。さらに東谷は、トポロジカル超流動³He-B相内に導入されたエアロジェル界面に、並進対称性の破れに伴う奇周波数状態が出現することを予想した。石川は、この奇周波数クーパー対の出現を検出するために、核磁気共鳴法によりエアロジェル界面の帯磁率測定を行ったところ、非常に低温で帯磁率の増加を観測した。この増加はB相界面でのマヨナラ・イジングスピンとも関連する現象と考えられており、さらなる研究を進めている。松本は、石川が用いているものより充填率の高いエアロジェル中で、奇周波数状態で予想される帯磁率の増大を検証するために、SQUID(超伝導量子干渉素子)を用いた精密測定装置を開発して実験を始めている。

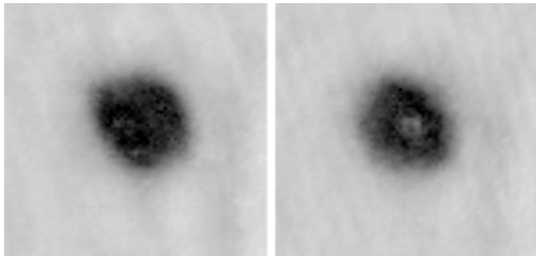


図：超流動³He-B相における表面奇周波数対振幅のエネルギー依存性。破線は表面状態密度。両者はエネルギーがゼロの極限で厳密に一致する。

[4-2. バルクの奇周波数超流動状態] (三宅)

エッジ、磁束芯などに局在する奇周波数状態とは異なり、バルクでの奇周波数対形成には強い遅延効果をもつ特殊なペアリング相互作用が必要である。バルクで奇周波数超伝導体の実現性を理論的に研究するためには、時間に依存しないハミルトニアンを用いた記述は実質的に困難である。そこでラ

グランジアンに基づくファイマンの経路積分の方法を用いることで、マイスナー効果を示す奇周波数超伝導が存在できることを理論的に確立した。さらに自己エネルギーの効果を取り入れても基底状態で奇周波数超伝導状態がバルクで安定に存在することを示すことに成功した（論文 B-6）。



図：ボース凝縮対中の量子渦。濃い部分は凝縮体密度が大きい。左はスプーンなし、右はスプーンあり。右図の中心部の低密度領域が量子渦芯。

【5. 原子気体 BEC のトポロジカル現象】

（東條〈公募〉、吉川〈公募〉、新田〈公募 D03〉）

多成分ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) のトポロジカル欠陥に関するいくつかの基礎的な研究を行った。東條は、ボース凝縮体を光ポテンシャル (光スプーン) でかき混ぜ、BEC 中に量子渦を生成させた。これによりトポロジカル欠陥である量子渦生成が多成分ボース凝縮対中でも可能であることを初めて示した。吉川は、量子縮退した冷却イッテルビウム原子中に、光によって誘起される実効的なゲージ場を創生することを目的として研究を進め、2

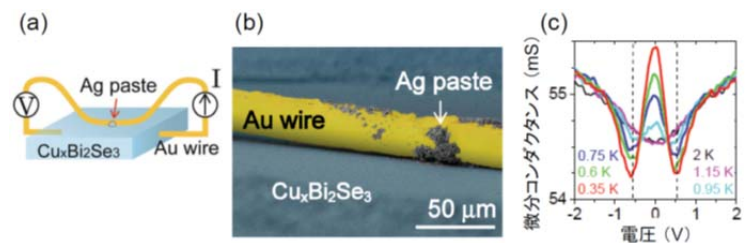
次元ポテンシャル中に量子縮退気体をロードすることに成功した。新田は、多成分及び2成分 BEC の様々な種類のトポロジカル欠陥について、ホモトピー理論を用いて調べた。具体的には、渦の存在下における Abe ホモトピーを用いたトポロジカルな影響、2成分 BEC でのブレーン・反ブレーンの対消滅、通常のボルテックスの渦芯に他の成分が閉じ込められているボルトン、3次元スカーミオンの生成、ゲージ場のもとでの3次元スカーミオンの安定性などを調べた。ブレーンの候補の1つとしてトポロジカル超流動体である $^3\text{He-A}$ 相と B 相との「A-B 界面」が考えられる（論文 D-5、D03-2）。

【C01】空間反転対称性を破る量子流体の新奇現象

【1. ドープ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】

（瀬川、鄭、安藤〈連携〉、田仲〈D01〉、佐藤〈D01〉）

2009年に発見された $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ という超伝導体はトポロジカル絶縁体を舞台としており、価電子バンドのトポロジーという観点から注目を集めてきた。瀬川・安藤らは、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の試料を電気化学的手法で作製することにより、初めて電気抵抗の完全消失や比熱の異常を観測するなど、超伝導特性を大幅に向上させた（論文 C-9）。また、それらの試料を使ってソフトポイントコンタクト分光という手法によりゼロバイアスコンダクタンスピークを観測し、田仲・佐藤との共同研究で、観測結果がトポロジカル超伝導によるものであることを示した（上図、論文 C-4）。この結果は超伝導を誘起したトポロジカル絶縁体も「トポロジカル超伝導体」の一つになりうることを示す成果であり、米国のメディア Science News の記事で紹介されるなど注目を集めている。さらに、鄭らは、瀬川・安



図：(a)ソフトポイントコンタクト分光実験の概略図。(b)実際に形成されたポイントコンタクトの電子顕微鏡写真（着色処理あり）。(c)微分コンダクタンスのゼロエネルギーピーク。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 超伝導体においては、この特異ピークの観測がトポロジカル超伝導の確証となる。

図：左は $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の相図。赤丸が高いバルク絶縁性の得られる組成を示す。右は一連の物質における電気抵抗率の温度依存性。

藤らの作成した試料の核磁気共鳴（NMR）測定を行い、Cu がインターカレートしたサイトと Bi/Cu 固溶サイトの Se-NMR 信号を分別することに成功し、Cu ドープの微視的機構を明らかにしつつある。

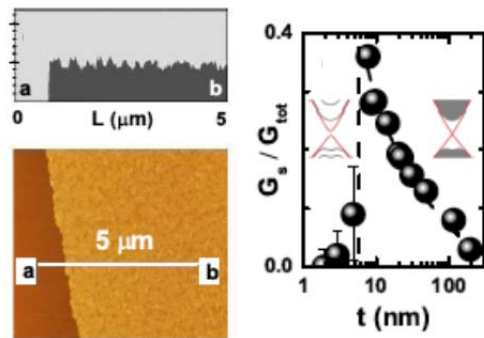
【2. トポロジカル絶縁体の物質開発】

[2-1. 高いバルク絶縁性を持つトポロジカル絶縁体の発見]（瀬川、安藤〈連携〉）

トポロジカル絶縁体は、価電子バンドのトポロジーの違いによって通常の絶縁体と「連続的につながる」ことができず、その境界である表面に興味深い金属的な表面状態が現れる物質である。本新学術領域による研究がスタートした当時、 Bi_2Se_3 がトポロジカル絶縁体であることが光電子分光により明らかになってきたが、この物質は Se 欠損によりバルクのキャリアがドーピングされてしまうのが避けられないため、輸送特性などの非分光的手法では、興味深い表面状態をバルクの信号と分離して観測することが困難であった。それに対し瀬川らは類縁物質である $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ という化合物でバルク絶縁性が顕著な試料を合成し（論文 C-12）、さらに $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ という一連の化合物の中で系統的に組成を変化させることでバルク絶縁性と表面状態のディラックコーンの位置を最適化できることを発見した（論文 C-3、C-5）。これらの成果によりトポロジカル絶縁体の表面状態の研究に関してこれまでで最も有力な舞台が提供されたと言うことができ、現在その成果が世界の研究コミュニティ全体で使われ始めているところである。

[2-2. MBE 装置を用いたトポロジカル絶縁体の純良薄膜成長]（瀬川、安藤〈連携〉）

H22 年度に導入した MBE 薄膜作製装置を用いて、トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の純良薄膜作製に成功し、成果が出始めたところである。 Bi_2Se_3 の純良薄膜について膜厚を系統的に変えて作製し、その表面伝導を測定したところ、膜厚がある閾値以下になると表面伝導が急劇に消失し、トポロジカル量子相転移が起きていると考えられることがわかった。この成果は論文として投稿中である。

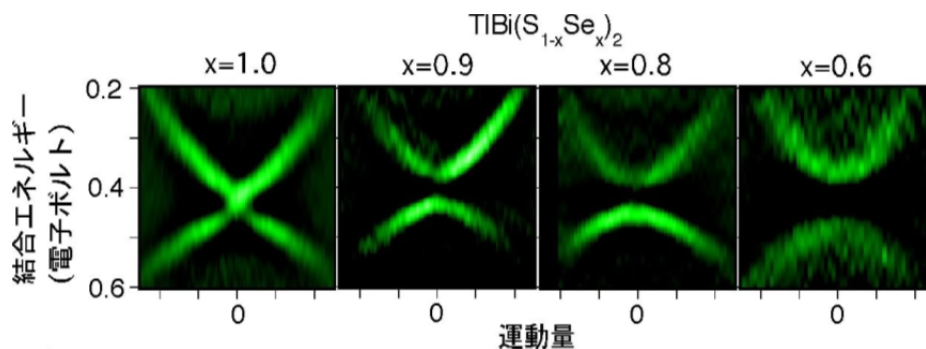


左図： Bi_2Se_3 薄膜の AFM プロファイルとスキャン画像。良質な薄膜であることがわかる。
右図：表面コンダクタンスの膜厚依存性。膜厚がある閾値を下回ると表面伝導が急激に消失していることがわかる。

【3. トポロジカル絶縁体表面状態の解明】

[3-1. トポロジカル絶縁体 $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ の電子状態の解明]（瀬川、安藤〈連携〉、佐藤〈公募〉）

佐藤らは瀬川・安藤らとの共同研究で、タリウム系 3 元カルコゲナイド $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ の高分解能角度分解光電子分光実験を行い、 $x=0.5$ においてトポロジカル相 ($x > 0.5$) から通常の絶縁相 ($x < 0.5$) へのトポロジカル量子相転移を示すことを明らかにした。また、 $x > 0.5$ の量子相転移近傍において、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獲得することを初めて明らかにした（下図、論文 C-7）。



図：高分解能角度分解光電子分光による $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ の電子状態。 $x > 0.5$ のトポロジカル絶縁相でも予想外のエネルギーギャップが生じている。

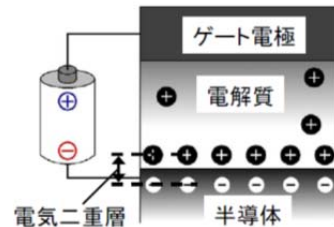
[3-2. トポロジカル絶縁体の表面 Dirac 状態に対する磁場効果] (花栗 <公募>)

花栗らは、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて、トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の磁場中電子状態の空間分布を詳細に調べた。ディラック点のエネルギーは、Se欠損近傍で深くなっていることがわかった。この結果は、Se欠損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を示唆する。さらに、実空間におけるランダウ軌道は、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、ランダウ準位エネルギーではドリフト状態を形成するという、量子ホール状態で期待される振る舞いを観測した。

【4. 電場誘起表面超伝導】

(野島、上野、前野 <A01>、米澤 <A01 連携>)

野島・上野は、電気二重層トランジスタ構造 (右上図) を用いることにより、これまでの SrTiO_3 表面だけでなく、化学ドーピングでは報告例のない KTaO_3 表面でも電界効果による超伝導誘起に成功した (論文 C-10)。さらに、A01 班の前野グループとの班間共同研究により (写真)、 SrTiO_3 の電界誘起超伝導に対する臨界磁場の測定を行い、この系の純粋な 2 次元性 (右下図) だけでなく、バルクにはない自己組織化機能を見出した (論文執筆中)。野島が導入したベクトルマグネットは、 SrTiO_3 表面超伝導のより詳細な磁場中輸送特性測定だけでなく、 KTaO_3 をはじめとする、スピン軌道相互作用の強い系で発現する電界誘起超伝導の新奇性開拓に用いられる。



図：電気二重層トランジスタ構造。

【5. 空間反転対称性の破れた超伝導体】

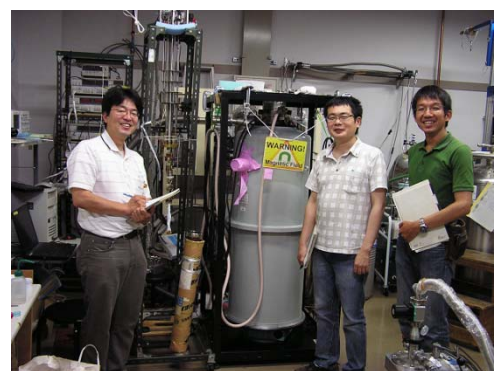
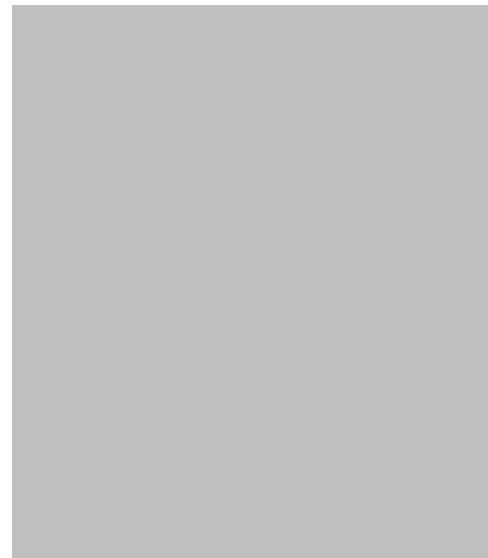
(鄭、稲田、前野 <A01>)

空間反転対称性の破れた (NCS) 超伝導体 $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ を作製し、スピン軌道相互作用の変化と超伝導状態の変遷を調べそれらの間の関係を明らかにした (鄭・稲田)。 x を変化させた試料を NMR 法により精密に調べた結果、超伝導対称性が $x \sim 0.8$ を境に急激に変わることを明らかにした。すなわち、 $x < 0.8$ の領域ではスピン一重項で等方的なギャップをもつ状態が支配的で、 $x > 0.8$ の領域ではスピン三重項で異方的なギャップをもつ状態が支配的であることを見出した。その背後にある原因を究明するために、結晶構造の解析を X 線リートベルト法により行った。その結果、 $\text{Pt}(\text{Pd})\text{B}_6$ 八面体の歪みが $x > 0.8$ では急激に増大することを見出した。この歪みの増大がスピン軌道相互作用を増大させることを第一原理バンド計算により確認し、それがスピン三重項混成の主原因であることを明らかにした (論文投稿中)。また A01 班の前野と連携して超伝導相の磁場-温度相図の詳細を明らかにした (論文 C-6)。

この他にも LaPtBi や BiPd などの NCS 超伝導体を作製して、超伝導ギャップの対称性などを明らかにし、局所的な結晶のひずみがスピン軌道相互作用を増大させるのに有効であることを明らかにした。

【6. バルク系での奇周波超伝導状態】 (鄭、三宅 <B01>)

奇周波数ペアリングは超伝導/磁性体の界面等で実現するが、バルク試料でも実現することを明らかにした。鄭らは鉄砒素系超伝導体 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ では反強磁性状態 ($T_N = 45 \text{ K}$) と超伝導 ($T_c = 15 \text{ K}$)



図：若手相互滞在プログラムによる C 班と京都大学 A 班との共同研究のひとつ。左から野島、上野、米澤 <A01 連携>。

が共存するが、共存する磁性の影響で、超伝導ギャップが完全には開かないことを見出した (arXiv:1204.2434v1 及び論文 C-14)。B01 班の三宅の理論と照らし合わせると、この実験結果は奇周波数超伝導状態が実現しているというシナリオと合致する。

【D01, D02-04】トポロジカル凝縮系の理論

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、奇周波数ペアリングに関する研究成果に代表される多くの成果を出した。これらについては繰り返しては述べてない。ここで特に強調しておきたいのは、D 班の介在によって実験各班の間の連携が促進された例がいくつもあるという点である。このことは、本新学術領域においてシナジー効果が非常に効果的に表れていることを示している。他方、以下に述べるように D 班主導の理論研究成果も多数あげた。

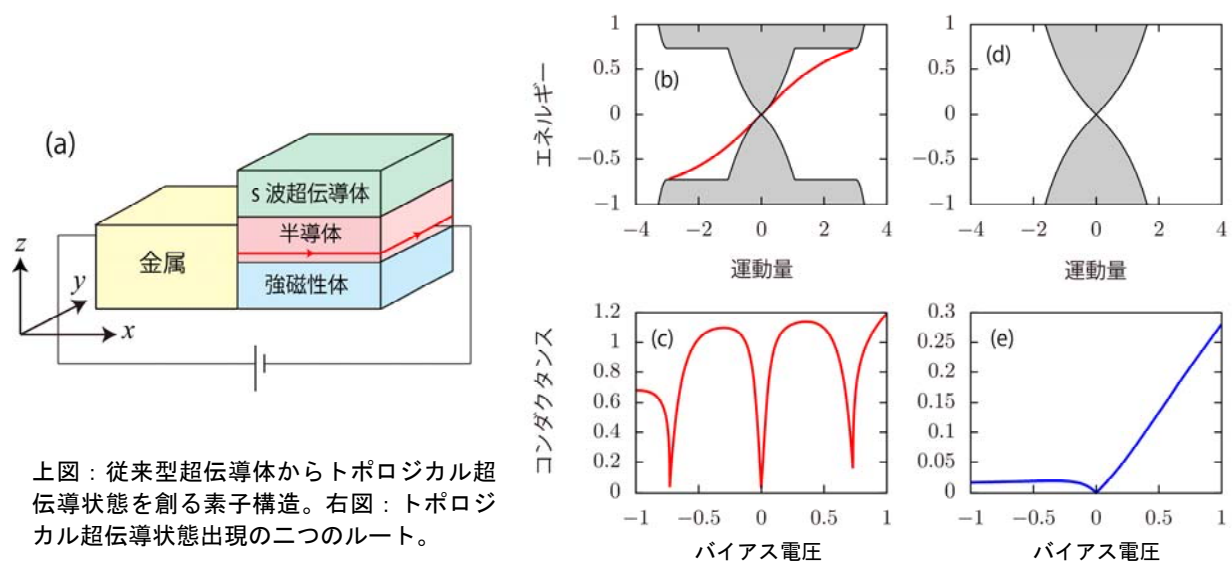
また、田仲、佐藤は永長 (C01 連携) と奇周波数ペアリングとトポロジカル超伝導の総説を執筆した (論文 D-4)。この総説は本領域活動の成果も含めて研究の現状と課題を紹介しており、今後の領域研究活動の指針となると期待される。

【1. トポロジカル量子臨界性の研究】

[1-1. 強磁性体-半導体-超伝導体接合におけるエッジ状態の臨界性]

(田仲、佐藤、横山 (公募)、川畑 (公募)、井村 (公募)、田中 (公募); A01 班と連携)

近年、佐藤は異方的超伝導を用いなくとも、スピン軌道相互作用により従来型 s 波超伝導体からカイラルエッジ状態が作れることを明らかにした [M. Sato *et al*, Phys. Rev. Lett. **103**, 020401 (2009).]. 同様の機構から半導体 2 次元電子ガスを強磁性体と従来型 s 波超伝導体接合系でサンドイッチした系 (下図 (a)) でもカイラルエッジ状態が存在することが理論的に示せる。田仲、永長 (C01 連携) は、この系のエッジ状態および常伝導金属との接合のトンネル効果を研究し、エッジ状態形成における量子臨界性を理論的に解明した (論文 D-3)。その結果、エッジ状態が強磁性体の交換磁場および 2 次元電子ガスの化学ポテンシャルにより制御可能であることが明らかになった。これはトポロジカルに自明な状態からトポロジカル超伝導状態が出現する場合の振舞いを明らかにした重要な成果といえる。この系では臨界点直上までエッジ状態が残っている場合 (下図 (b))、消える場合 (下図 (d)) の二通りの臨界性がある。前者はこれまでのトポロジカル超伝導体とは異なる新しい臨界性を示す。これらの違いは下図 (a) のような金属/超伝導体接合で、トンネルコンダクタンスの違い (下図 (c)(e)) に現れる。



強磁性の作りだす近接効果に関しては、さらに他のいくつかの状況についても研究を行った。横山、田仲、永長は常伝導金属・磁性膜・超伝導体接合において、常伝導金属に現れる奇周波数電子対に起

因する異常な磁場応答を予言した（論文 D04-5）。川畑は、非一様な磁化を持つ強磁性体/超伝導（SF）接合において長距離にわたって侵入する奇周波数クーパー対が、ゼロエネルギーに状態密度ピークを普遍的に作り出すことを浅野（A01）、田仲と明らかにした。横山は、強磁性体/トリプレット超伝導体接合において、磁化のダイナミクスにより電流が駆動されることを明らかにした（論文 D04-3）。

井村はトポロジカル絶縁体の表面状態の研究を行い、結晶転位に沿ってギャップレスの1次元ヘリカル状態ができることを予言した。田中は、トポロジカル絶縁体に関する有効理論の研究を行った。円偏光レーザー光の照射により、従来型絶縁体を量子スピンホール相へと断熱的に駆動するスキームと、予想される相図を提案した（論文 D04-1）。

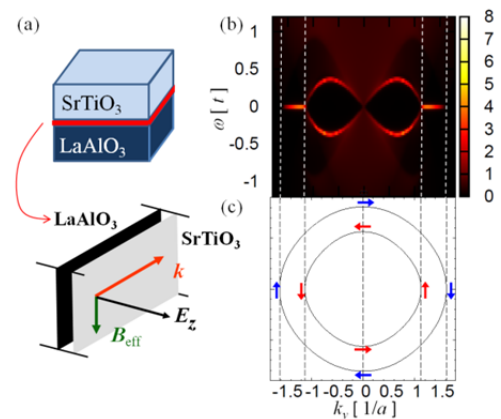
[1-2. スピン三重項超流動におけるトポロジカル転移]（水島、佐藤；B01班と連携）

水島は、制限空間中の超流動³He-A相ではクーパー対のスピン自由度に起因して、整数量子渦の統計性が印加磁場の角度に敏感であることを明らかにした（論文 D-8）。また、水島、佐藤は、超流動³He-B相の表面に出現するマヨラナフェルミオンが、ある臨界磁場において突然消失することを示した。そしてこれが離散対称性の自発的破れに伴うトポロジカル相転移であることを明らかにした。この新奇な量子相転移近傍ではスピン帯磁率に異常が期待されるため、B01班で計画している制限空間中の超流動³He-Bの実験において観測が期待される。

【2. 空間反転対称性の破れた超伝導体（NCS 超伝導体）】（田仲、佐藤；C01班と連携）

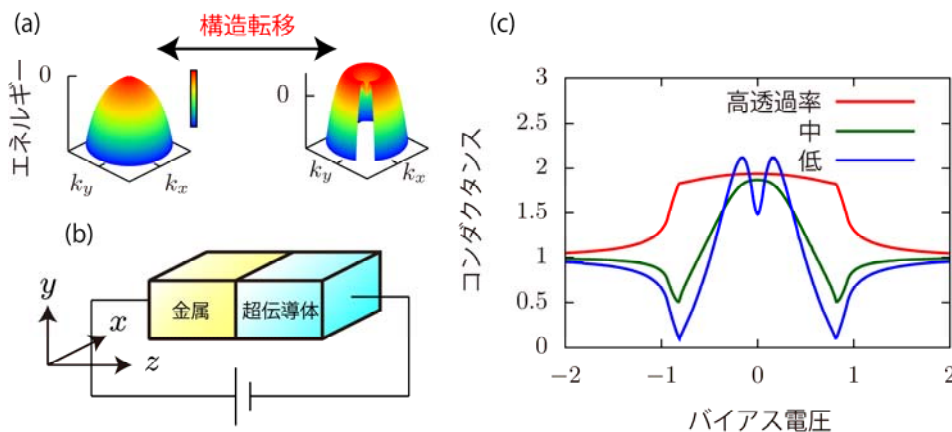
田仲、佐藤は、反転対称性の破れた（NCS）超伝導体において、分散のないマヨナラ型準粒子励起が存在することを示した。これはスピン軌道相互作用による効果で、NCS超伝導体で有力となる*d*波と*p*波の混合した状態に起因する（論文 D-13）。

また、酸化物の界面（右図(a)）では反転対称性が破れるため、スピン軌道相互作用によってフェルミ面が分裂し（図(c)）、超伝導状態として*d*波と*p*波の混じった状態も出現しうる。その場合、片方のフェルミ面が消える運動量に対して、分散を持たないマヨラナ型準粒子状態が周囲のエッジに形成される（右図(b)）（論文 D-7）。



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

前述のように、トポロジカル絶縁体であるBi₂Se₃にCuを挿入すると、キャリアドープにより金属化し、低温で超伝導状態になる。田仲・佐藤は瀬川（C01）・安藤（C01連携）らの協力のもと、Cu_xBi₂Se₃がエッジ状態をもつトポロジカル超伝導体であることを明らかにした（論文 D-1）。表面マヨラナフェルミオンのエネルギー分散関係が、トポロジカル絶縁体由来の構造変化（下図(a)）を起こすことを示し、瀬川らが観測したトンネルコンダクタンス（下図(b)は素子の模式図）のゼロバイアスピークを説明した（下図(c)）。



【4. 内部（スピン）自由度を持ったボース・アインシュタイン凝縮体の理論】

（上田、川口〈連携〉、新田〈公募 D03〉、福井〈公募 D02〉；B01 班と連携）

近年、 ^{52}Cr , ^{164}Dy , ^{168}Er といった大きい角運動量を持った原子のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現している。これら内部自由度が大きい系では、相互作用パラメータに依存して様々な磁性を示す相が出現するため、エネルギーを最小化する方法で基底状態を求めるのは容易ではない。そこで上田らは、対称性をもとに、スピン自由度を持った BEC の基底状態を求める方法を開拓した。この方法をスピン 3 の BEC に適用し、先行研究では見落とされていた相を発見した（論文 D-5）。

また、 ^{23}Na の BEC はポラー相とよばれる非磁性の量子相にあることが知られており、この相では量子渦と点欠陥（モノポール）というトポロジカルな励起が存在する。上田らは、新田と協力して、これらが共存する場合には、従来のホモトピー理論では無矛盾な記述ができないことを指摘し、Abe ホモトピーというこれまで物理学ではほとんど用いられていない数学を用いることにより矛盾無く記述できることを示した（論文 D-6）。

新田は、水島らと共同で、ゲージ場のある場合の 3 次元スカーミオンの安定性を吟味した（論文 D03-1）。またマヨナラ・フェルミオンが複数局在化した場合と、ディラック・フェルミオンが単独で局在化した場合を比較して調べた（論文 D03-2）。さらに、新田(公募 D03)、福井〈公募 D02〉は共同で、トポロジカル量子現象の 普遍性、アナロジーを追求して、物性物理にとどまらず、ハドロン物質のカラー超伝導などにおける非可換渦の振る舞いについても研究した（論文 D02-1）。

【5. トポロジカル量子現象に内在する普遍的概念、数理構造の研究】（佐藤、田仲、福井〈公募 D02〉）

一般に励起条件を作るのに有限のエネルギーを必要とする系では、占有状態を使ってトポロジカル数を定義することができる。このトポロジカル数がゼロでない場合には、その系の表面にはギャップレス状態が現れることが知られており、バルク・エッジ対応と呼ばれている。佐藤らは、系のトポロジカルな性質に着目し、フラットバンド・エッジ状態がトポロジカル・エッジ状態の一つであることを、指数定理を用いて明らかにした（論文 D-7）。これはこれまで知られているトポロジカル周期表の拡張を要請するという意義がある。福井らは、トポロジカル超伝導体に現れるマヨラナフェルミオンを主に指数定理の立場から研究した（論文 D04-4）。またクォーク物質で期待されるカラー超伝導の非可換渦糸の周りのゼロモード（論文 D02-1）や、トポロジカル絶縁体／超伝導体ヘテロ接合系におけるゼロエネルギー状態の研究も行った。これらの研究は、トポロジカル量子現象の数理的構造の基礎付けを与えるために重要である。

5. 研究成果の公表の状況

(1) 主な論文等一覧について

領域全体での発表論文数：141 編

(以下に主要論文 63 編を記載)

【A01】時間反転対称性を破る超伝導体

1. "Essential Configuration of Pb/Ru/Sr₂RuO₄ Junctions Exhibiting Anomalous Superconducting Interference"
*T. Nakamura, T. Sumi, S. Yonezawa, T. Terashima, M. Sigrist, H. Kaneyasu, Y. Maeno,
Journal of the Physical Society of Japan **81**, 064708-1-6 (Jun. 2012). 【トポロジカル超伝導素子に関する詳細報告】
2. "Evaluation of Spin-Triplet Superconductivity in Sr₂RuO₄"
*Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S. Yonezawa, K. Ishida,
Journal of the Physical Society of Japan **81**, 011009-1-29 (Jan. 2012).
【2003年以降のSr₂RuO₄の研究成果を網羅するレビュー論文】
3. "Near-Field Optical Mapping of Quantum Hall Edge States"
*H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, S. Nomura,
Physical Review Letters **107**, 256803-1-5 (Dec. 2011).
【量子ホール状態のエッジ状態を光学的な手法を用いて実空間観察し、エッジ状態に対する disorder の影響を明らかにした】
4. "Edge States of Sr₂RuO₄ Detected by In-Plane Tunneling Spectroscopy"
*S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, Y. Maeno,
Physical Review Letters **107**, 077003-1-4 (Aug. 2011).
【Sr₂RuO₄のエッジをトンネル分光により観察し、カイラル・エッジ状態の形成、およびトポロジカル超伝導性を確認した】
5. "Josephson effect in noncentrosymmetric superconductor junctions"
*Y. Asano, S. Yamano,
Physical Review B **84**, 064526-1-6 (Aug. 2011).
【NCS超伝導体のジョセフソン効果がs波成分とp波成分の混合比に依存して複雑なふるまいを示すことを理論的に解明】
6. "Topological competition of superconductivity in Pb/Ru/Sr₂RuO₄ junctions"
*T. Nakamura, R. Nakagawa, T. Yamagishi, T. Terashima, S. Yonezawa, M. Sigrist, Y. Maeno,
Physical Review B **84**, 060512(R)-1-4 (Aug. 2011).
【Sr₂RuO₄-Ru共晶を用いたPb/Ru/Sr₂RuO₄接合において、Ruの周辺のギャップ状態の変化に伴い、トポロジカルなジョセフソン効果が発現することを解明】
7. "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,
Physical Review Letters **107**, 087001-1-4 (Aug. 2011).
【奇周波数超伝導電子対が表面インピーダンスに特異な効果をもたらすことを理論的に解明し、実験への指針を与えた】
8. "Introducing Nonuniform Strain to Graphene Using Dielectric Nanopillars"
H. Tomori, *A. Kanda, H. Goto, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi, S. Moriyama, E. Watanabe, D. Tsuya,
Applied Physics Express **4**, 075102-1-3 (Jul. 2011).
【ディラック電子系にギャップを開ける基礎技術として、局所ひずみをもつグラフェン素子の作成プロセス開発に成功】
9. "Spin Josephson effect with a single superconductor"
*P. M. R. Bydon, Y. Asano, C. Timm,
Physical Review B **83**, 180504-1-4 (May 2011).
【スピン三重項超伝導体/強磁性体の積層構造で出現するスピンジョセフソン効果およびdベクトルのリセッション効果を理論的に解明】
10. "Evaluation of spin polarization in p-In_{0.96}Mn_{0.04}As using Andreev reflection spectroscopy including inverse proximity effect"
*T. Akazaki, T. Yokoyama, Y. Tanaka, H. Munekata, H. Takayanagi,
Physical Review B **83**, 155212-1-9 (Apr. 2011).

- 【Nb と強磁性半導体接合において、強く偏極した電流の存在、および逆近接効果を実験的に解明した】
11. "Crystallographic and superconducting properties of the fully gapped noncentrosymmetric 5d-electron superconductors CaMSi_3 ($M = \text{Ir, Pt}$)"
*G. Eguchi, D.C. Peets, M. Kriener, Y. Maeno, E. Nishibori, Y. Kumazawa, K. Banno, S. Maki, H. Sawa,
Physical Review B **83**, 024512 (Jan. 2011).
【NCS 超伝導体の CaIrSi_3 と CaPtSi_3 がフルギャップを持つことを解明】
 12. "Observation of half-height magnetization steps in Sr_2RuO_4 "
J. Jang, D.G. Ferguson, V. Vakaryuk, *R. Budakian, S.B. Chung, P.M. Goldbart, Y. Maeno,
Science **311**, 186-188 (Jan. 2011).
【ミクロな Sr_2RuO_4 リングにトラップされた磁束量子が半整数になる領域が存在することを示し、スピン三重項状態であることを検証。被引用数 13】
 13. "Theory of quantum transport in Josephson junctions with a ferromagnetic insulator"
*S. Kawabata, Y. Asano,
Low Temperature Physics **36**, 915-919 (Dec. 2010).
【強磁性絶縁体をバリアとするジョセフソン接合において観察される、原子層数に依存した $0-\pi$ 転移に関する理論】
 14. "DC Current Driven Critical Current Variation in Sr_2RuO_4 -Ru Junction Proved by Local Transport Measurements"
*H. Kambara, T. Matsumoto, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Maeno,
Journal of the Physical Society of Japan **79**, 74708-1-5 (Jul. 2010).
【 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶の超伝導局所臨界電流の測定により、カイラルドメインが電流により移動することを解明】
 15. "Tunneling between Two Helical Superconductors via Majorana Edge Channels"
*Y. Asano, Y. Tanaka, N. Nagaosa,
Physical Review Letters **105**, 56402-1-4 (Jul. 2010).
【2つのヘリカル超伝導体間に流れるジョセフソン電流に、マヨラナモードおよびスピン軌道相互作用の及ぼす影響を解明】
- 【B01】スピン三重項超流動体
1. Properties of Odd-frequency Superconductivity near Antiferromagnetic Quantum Critical Point",
T. Harada, Y. Fuseya, and K. Miyake,
Journal Physical Society of Japan. Suppl. **81** (2012), in press.
 2. "Knudsen-to-Hydrodynamic Crossover in Liquid ^3He in a High-Porosity Aerogel"
H. Takeuchi, S. Higashitani, K. Nagai, H. C. Choi, B. H. Moon, N. Masuhara, M.W. Meisel, Y. Lee, N. Mulders,
Physical Review Letters **108**, 225307-1-5 (Jun. 2012).
【エアロジェル中の ^3He の超音波減衰機構の解明】
 3. "Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid ^3He "
*S. Higashitani, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, S. Murakawa, R. Nomura, Y. Okuda,
Physical Review B **85**, 024524-1-5 (Jan. 2012).
【表面奇周波数対状態と局所状態密度の対応関係の理論的解明】
 4. "Strong Suppression of the Kosterlitz-Thouless Transition in a ^4He Film under High Pressure"
*S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, Y. Wada, Y. Tamura, R. Nomura, Y. Okuda,
Physical Review Letters **108**, 025302-1-4 (Jan. 2012).
【強相関 ^4He 薄膜の超流動転移と量子臨界点の発見】
 5. "Subgap in the Edge States of Two-Dimensional Chiral Superconductor with Rough Surface"
Y. Nagato, S. Higashitani, K. Nagai,
Journal of the Physical Society of Japan **80**, 113706-1-4 (Oct. 2011).
【表面ラフネスがトポロジカル超伝導・超流動体のエッジ状態に与える影響の解明】
 6. "On the Puzzle of Odd-Frequency Superconductivity"
H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake,
Journal of the Physical Society of Japan **80**, 054702-1-7 (May. 2011).
【長年未解明であったバルク奇周波数状態の問題点の解明】
 7. "Possible Odd-Frequency Superconductivity in Strong-Coupling Electron-Phonon Systems"
H. Kusunose, Y. Fuseya, K. Miyake,

- Journal of the Physical Society of Japan **80**, 044711-1-6 (Apr. 2011).
8. "Surface Andreev bound states of the superfluid ^3He B phase"
R. Nomura, S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, K. Akiyama, M. Saitoh, Y. Aoki, Y. Okuda,
Physica E **43**, 718-721 (Jan. 2011).
 9. "Surface Majorana Cone of the Superfluid ^3He -B Phase"
S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, M. Saitoh, Y. Aoki, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, K. Nagai,
Journal of the Physical Society of Japan **80**, 013602-1-4 (Dec. 2010).
【表面マヨラナコーンの存在を確定的にした実験論文。JPSJ 編集者推薦論文】
 10. "Acoustic Resonance of Superfluid ^3He in Parallel Plates"
K. Obara, C. Kato, S. Sasamoto, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, S. Higashitani, K. Nagai,
Journal of Low Temperature Physics **162**, 190-195 (Nov. 2010).
 11. "Frictional motion of normal-fluid component of superfluid ^3He in aerogel"
K. Obara, C. Kato, T. Matsukura, Y. Nago, R. Kado, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata, S. Higashitani, K. Nagai,
Physical Review B **82**, 054521-1-7 (Aug. 2010).
【不純物中での第 4 音波減衰機構として摩擦を導入し、実験の解釈を行った】
 12. "Vortex generation induced by low-frequency wire vibration in superfluid ^3He -B"
Y. Nago, M. Inui, R. Kado, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, T. Hata,
Physical Review B **82**, 224511-1-7 (Aug. 2010).
【超流動ヘリウム 3 中での運動物体による渦生成と乱流現象の観測】

【C01】空間反転対称性を破る量子流体

1. "Fermi level tuning and a large activation gap achieved in the topological insulator $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ by Sn doping"
Z. Ren, A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and *Y. Ando, Physical Review B **85** 155301 (2012).

【Editor's suggestion】

2. "Topological Surface States in Lead-Based Ternary Telluride $\text{Pb}(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_4$ "
*S. Souma, K. Eto, M. Nomura, K. Nakayama, T. Sato, T. Takahashi, K. Segawa, Y. Ando,
Physical Review Letters **108**, 116801-1-5 (Mar. 2012).
3. "Tunable Dirac cone in the topological insulator $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ "
T. Arakane, *T. Sato, S. Souma, K. Kosaka, K. Nakayama, M. Komatsu, T. Takahashi, Zhi Ren, K. Segawa, Y. Ando,
Nature Communications **3**, 636-1-5 (Jan. 2012).
【Nature Asia-Pacific の注目論文に選ばれる】
4. "Topological Superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ "
S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, K. Yada, Y. Tanaka, M. Sato, *Y. Ando,
Physical Review Letters **107**, 217001-1-5 (Nov. 2011). 【被引用 14 回】
5. "Optimizing $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ solid solutions to approach the intrinsic topological insulator regime"
*Z. Ren, A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and Y. Ando, Physical Review B **84** 165311-1-6 (Oct. 2011).
【被引用 6 回, Editor's suggestion, 米国物理学会のオンライン雑誌 Physics で紹介される】

Physics 掲載図

6. "Magnetic phase diagram of $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ by ac susceptometry"
*D. C. Peets, G. Eguchi, M. Kriener, S. Harada, Sk. Md. Shamsuzzamen, Y. Inada, G.-Q. Zheng, and Y. Maeno,
Physical Review B **84**, 054521-1-5 (Aug. 2011).
【A01との共同研究成果】
7. "Unexpected Mass Acquisition of Dirac

- Fermions at the Quantum Phase Transition of a Topological Insulator”
- *T. Sato, K. Segawa, K. Kosaka, S. Souma, K. Nakayama, K. Eto, T. Minami, *Y. Ando and T. Takahashi,
Nature Physics **7**, 840-844 (Aug. 2011).
【被引用 5 回、画像が Nature Physics 誌の表紙に採用される、科学新聞にて紹介される】
8. “Evolution of surface states in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys across the topological phase transition”
*H. Guo, K. Sugawara, A. Takayama, S. Souma, T. Sato, N. Satoh, A. Ohnishi, M. Kitaura, M. Sasaki, Q.-K. Xue, and T. Takahashi
Physical Review B **83**, 201104R-1-4 (May 2011).
9. “Bulk Superconducting Phase with a Full Energy Gap in the Doped Topological Insulator $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”
*M. Kriener, K. Segawa, Z. Ren, S. Sasaki and Y. Ando, Physical Review Letters **106**, 127004-1-4 (Mar. 2011). 【被引用 18 回】
10. “Discovery of superconductivity in KTaO_3 by electrostatic carrier doping”
K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, *M. Kawasaki,
Nature Nanotechnology **6**, 408-412 (Jul. 2011).
【電場誘起キャリアドーピングで初めて誘起される超伝導の発見。被引用回数 8】
11. “Direct Measurement of the Out-of-Plane Spin Texture in the Dirac-Cone Surface State of a Topological Insulator”
*S. Souma, K. Kosaka, T. Sato, M. Komatsu, A. Takayama, T. Takahashi, M. Kriener, K. Segawa and Y. Ando, Physical Review Letters **106** 216803 (May 2011).
【被引用 15 回、日刊工業新聞、科学新聞にて紹介される】
12. “Large Bulk Resistivity and Surface Quantum Oscillations in the Topological Insulator $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ ”
Z. Ren, A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and *Y. Ando,
Physical Review B **82**, 241306-1-4 (Dec. 2010).
【被引用 40 回、Editor’s suggestion, 米国物理学会のオンライン雑誌 Physics で紹介される】
13. “ ^{11}B and ^{195}Pt NMR study of the superconductors $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ without inversion symmetry”
*S. Harada, Y. Inada, G.-Q. Zheng,
Physica C **470** (Nov. 2010) 1089–1091.
14. “~~Pressure-induced unconventional — superconductivity near a quantum critical point in CaFe_2As_2 ”~~
~~*S. Kawasaki, T. Tabuchi, X.F. Wang, X.H. Chen and Guo-qing Zheng~~
~~Superconductor Science and Technology **23**, 054004-1-5 (May 2010).~~
~~【鉄砒素系超伝導体における奇周波数超伝導状態の観測に関する報告、被引用9回】~~
- 【D 班】トポロジカル凝縮系の理論**
1. "Theory of tunneling conductance and surface-state transition in superconducting topological insulators"
*A. Yamakage, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka: Physical Review B **85**, 180509(R) (May 2012).
【3 次元のトポロジカル超伝導体における新しいトンネル分光の理論を提案】
2. "Bose Gases with Nonzero Spin"
M. Ueda,
Annual Review of Condensed Matter Physics **3**, 263-283 (Mar. 2012).
【スピノール BEC に関する総合報告】
3. "Evolution of Edge States and Critical Phenomena in the Rashba Superconductor with Magnetization"
*A. Yamakage, Y. Tanaka, and N. Nagaosa:
Physical Review Letters **108**, 087003 (Feb. 2012) 【トポロジカル超伝導体における新しい臨界性を発見】
4. “Symmetry and Topology in Superconductors – Odd-Frequency Pairing and Edge States”
*Y. Tanaka, M. Sato, N. Nagaosa,
Journal of the Physical Society of Japan **81**, 011013 (Jan. 2012).
【奇周波数ペアリングとトポロジカル超伝導体に関するレビュー】
5. "Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates"
*Y. Kawaguchi, M. Ueda,
Physical Review A **84**, 053616-1-19 (Nov. 2011).
6. "Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices"

- *S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, M. Ueda,
Nuclear Physics B **856**, 577-606 (Nov. 2011)
【トポロジカル励起間の非自明な影響の問題を数学的に解決】
7. "Topology of Andreev bound states with flat dispersion"
*M. Sato, Y. Tanaka, K. Yada, T. Yokoyama,
Physical Review B **83**, 224511-1-22 (Jun. 2011)
【高温超伝導体や空間反転対称性の破れた超伝導体に現れる平坦なエネルギー分散を持つエッジ状態の理論】
8. "Zero energy modes and statistics of vortices in spinful chiral p -wave superconductors"
*T. Kawakami, T. Mizushima, K. Machida,
Journal of the Physical Society of Japan **80**,
044603-1-12 (Apr. 2011).
【制限空間中の ^3He における半整数渦の安定性の定量的評価と整数渦の統計性を示した】
9. "Surface density of states and topological edge states in noncentrosymmetric superconductors"
*K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, T. Yokoyama,
Physical Review B **83**, 064505-1-9 (Feb. 2011)
【空間反転対称性の破れた超伝導体に現れる平坦な分散をもつエッジ状態の理論】
10. "Majorana edge modes of superfluid ^3He A phase in a slab"
*Y. Tsutsumi, T. Mizushima, M. Ichioka, K. Machida,
Journal of the Physical Society of Japan **79**,
113601-1-4 (Nov. 2010).
【制限空間中の超流動 ^3He においてフラットバンド状のマヨラナ粒子の存在を指摘】
11. "Existence of Majorana Fermions and Topological Order in Nodal Superconductors with Spin-Orbit Interactions in External Magnetic Fields"
*M. Sato, S. Fujimoto,
Physical Review Letters **105**, 217001-1-4 (Nov. 2010).
【ノードのある超伝導体におけるマヨラナフェルミオンの実現可能性をはじめて指摘】
12. "Non-Abelian topological orders and Majorana fermions in spin-singlet superconductors"
*M. Sato, Y. Takahashi, S. Fujimoto,
Physical Review B **82**, 134521-1-28 (Oct. 2010).
【スピン一重項超伝導状態を使いマヨラナフェルミオンを実現する機構の解明】
13. "Anomalous Andreev Bound State in Noncentrosymmetric Superconductors"
*Y. Tanaka, Y. Mizuno, T. Yokoyama, K. Yada,
M. Sato,
Physical Review Letters **105**, 097002-1-4 (Aug. 2010).
- 【D02 班】**
1. "Index theorem and Majorana zero modes along a non-Abelian vortex in a color superconductor"
*T. Fujiwara, T. Fukui, M. Nitta, S. Yasui,
Physical Review D **84**, 076002-1-18 (Oct. 2011).
2. "Macroscopic quantum tunneling induced by a spontaneous field in intrinsic Josephson junctions"
*Y. Chizaki, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, T. Koyama, S. Kawabata,
Physica C **471**, 758-759 (May. 2011).
- 【D03 班】**
1. "Stable Skyrmions in SU(2) Gauged Bose-Einstein Condensates"
*T. Kawakami, T. Mizushima, M. Nitta, K. Machida
To be published in Physical Review Letters **108**
(Jun. 2012).
【3次元スカラーミオンが非可換ゲージ場中で基底状態として安定し得る初めての例】
2. Dirac returns: Non-Abelian statistics of vortices with Dirac fermions"
*S. Yasui, K. Itakura, M. Nitta
Nuclear Physics B **859**, 261-268 (Feb. 2012).
- 【D04 班】**
1. "Photoinduced spin Chern number change in a two-dimensional quantum spin Hall insulator with broken spin rotational symmetry"
*J. Inoue, A. Tanaka,
Physical Review B **85**, 125425-1-7 (Mar. 2012)
2. "Spin Berry phase in anisotropic topological insulators"
*K. Imura, Y. Takane, A. Tanaka,
Physical Review B **84**, 195406-1-8 (Dec. 2011)
3. "Charge pumping due to triplet vector chirality in ferromagnet/triplet superconductor junctions"
T. Yokoyama,
Physical Review B **84**, 132504-1-4 (Oct. 2011).
4. "Majorana bound state of a Bogoliubov-de

Gennes-Dirac Hamiltonian in arbitrary dimensions"

*[K. Imura](#), [T. Fukui](#), T. Fujiwara,
Nuclear Physics B **854**, 306-320 (Sep. 2011).
【D02 班との連携】

5. "Anomalous Meissner Effect in a Normal-Metal-Superconductor Junction with a Spin-Active Interface"

*[T. Yokoyama](#), [Y. Tanaka](#), N. Nagaosa,
Physical Review Letters **106**, 246601-1-4 (Jun. 2011).
【C01 班 D01 班との連携】

【著書、和文解説記事】

領域メンバー（連携研究者・公募研究者含む）による和文解説記事として、日本物理学会誌に7篇、「固体物理」誌に9編、「パリティ」誌に5編（2編の英訳含）などが掲載済みである。特に領域内連携活動の結果を紹介するものとして、佐藤（D班）・柏谷（A班）・前野（A班）による「ト

ポロジカル超伝導現象」(固体物理2011年9月号)や、「固体物理」誌2010年11月号の「特集号 デイラック電子系の固体物理」における安藤（C班）・永長（C班）・田仲（D班）によるトポロジカル絶縁体や超伝導体に関する一連の記事などが挙げられる。

著書に関して、上田（D班）は物性物理学の全貌を網羅する「物性物理学ハンドブック」（2012年、朝倉書店）の編集を務め、この書中では領域メンバー6名が執筆を担当した。また、同じく上田は原子気体のボーズアインシュタイン凝縮を基礎から説明する英語の単行本「Fundamentals and New Frontiers of Bose-Einstein Condensation」（2010年、World Scientific Publishing Company）を著した。これは広く教科書として利用されている。前野（領域代表）は超伝導発見100周年を記念して編纂された「100 Years of Superconductivity」（2011年、CRC Press, Taylor & Francis Group）のルテニウム酸化物超伝導の節を担当執筆した。

（2）ホームページについて

【ホームページで公開している研究成果に関する情報、ホームページへのアクセス数など、研究成果の公表に関するホームページの活用状況を記載。】

本領域では当初から、専門家や一般向けの広報だけでなく、領域メンバーとの双方向情報媒体としてのウェブサイトの役割も重視し、シンプルさを心がけつつ、内容やデザインに工夫を凝らしている (<http://www.topological-qp.jp/>)。

また、トポロジカル量子現象の新分野が世界的にも活性化することを見越して、英語での情報発信にも力を入れてきた。すでに日本語ページへのアクセス数は25,000件を超え、英語ページへのアクセス数も5,000件に迫っている。

領域会議や各種プログラムについては、案内とともに実施後の報告も掲載し、活動内容や成果について、広く知ってもらえるよう努めている。また、領域全体の活動記録ともなるよう、関係者のニュースやトピック、成果論文リスト等は、常時収集してウェブサイト

The screenshot shows the homepage of the website. At the top, there is a header with the title "Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries" and a navigation menu with "ホーム" and "English". Below the header is a large image of three interlocking rings in red, yellow, and blue. To the left of the image is a sidebar with a navigation menu: "ホーム", "理念・目的", "研究概要", "メンバー", "研究イベント", "若手のページ", "研究成果", "募集", "トピックス一覧", and "お問合せ・その他". Below the sidebar is a section for "トピックス" (Topics) with a list of recent news items: "2012/4/2 B01班の吉川と村川が第6回日本物理学会若手奨励賞を受賞しました", "2012/2/15 ニュースレター第2号を発行しました。", "2012/2/1 TOP2012トポロジカル量子現象国際会議の申込受付を開始しました。", and "2012/1/6 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". Below the topics section is a section for "研究イベント情報" (Research Event Information) with a list of events: "2012/Jun/4-5 第8回集中連携研究会「冷却原子気体とトポロジー」 東京大学 本郷キャンパス (終了)".

に随時更新掲載している。

このウェブサイトは重要な機能として、会議への参加自動登録システムを備えている。この機能は領域研究会、領域国際会議、若手国際会議で用いているほか、他の新学術領域（・特定領域）との交流を図る年1回開催の「物性科学横断研究会」の参加者登録にも利用していただいている。

さらに「国民との科学・技術対話」の媒体の一つとしての役割も重視し、「市民とサイエンス」と名付けたサイトを作って、トポロジカル現象を含めて一般の人にも興味を持ってもらえる内容を掲載している。

以下ではホームページのサイドメニュー（前頁図）毎にその内容を紹介する。

「**理念・目的**」領域発足の理念と目的、研究課題とその目標、計画研究班設置の理由、目標達成に向けた運営体制に関してその概要を説明している。

「**研究概要**」各計画研究班における研究課題と目標の詳細を述べている。また年度ごとの研究進捗状況を計画研究班ごとにまとめ（トピックス）、研究の動向、班を越えた連携関係が把握出来るよう努めている。本領域では冊子体の News Letter を年1度発行しており、そこには主要メンバーによる解説記事を多数掲載している。これらの記事をホームページにも配置に工夫して掲載し、より広範な背景の研究者が領域の概要を把握しやすいよう工夫している。

「**メンバー**」領域研究に携わる研究者を紹介している。研究者ごとに個別のページ（プロフィール）を設け、背景となる専門分野、領域における役割、到達目標などを表明し有機的な組織作りに役立てている。領域雇用の PD もそれぞれプロフィールを掲載している。

「**研究成果**」領域研究活動で得られた研究成果のすべてを（論文、招待講演、受賞、報道、書籍）に分けて掲載し、随時更新している。班を超えた**連携の成果がわかるよう、共著者名に班ごとの色分け**をしている。

「**研究イベント**」本領域が今後主催する研究イベント（集中連携研究会、領域研究会、国際会議等）に関する情報（趣旨、プログラム、参加申し込み方法、締め切り）をまとめ、同時にこれまで開催されたイベントについて、議論の内容や得られた成果が報告されている。イベントへの参加登録や概要原稿の提出はホームページ上から行い、参加者データを自動的に取得できる。

「**若手のページ**」若手研究者の育成は領域活動の柱の一つであり、若手の活動成果（若手相互滞在記、受賞ニュース、若手国際会議報告）をまとめて、若手研究者の活躍をクローズアップしている。本領域が行う若手研究者のための事業の申請書や報告書の書式がダウンロードでき、申請手続きの簡素化を助けている。

「**募集**」公募研究募集の際には、文科省の「研究概要」説明文書に URL を記載したホームページで、公募内容についてさらに詳しい説明を加えている。また PD の公募情報も掲載している。国際公募の PD については英語版のページ情報からの応募があり、PD に採用している。

「**市民とサイエンス**」（右図） 研究者向けのページに加え、クイズや図解を通してトポロジーとは何かを科学的背景を持たない一般の閲覧者に対して解説している。右に示



したページでは、簡単なクイズから、トポロジーの考え方の本質に触れられるクイズまでそろえ、同時に解答の説明を行っている。さらに何故「トポロジカル量子現象」という課題に挑むのか、領域活動が将来どのように知的財産形成に資するのか、に関して平易な解説を試みている。また、アウトリーチ活動の情報や科学動画の YouTube サイトへのリンクも張っている。

「その他」領域メンバーの活動に便宜を図るため、領域ロゴ、論文への科研費謝辞のひな形、一般講演で使用するためのトポロジカル現象紹介のパワーポイントファイル、などもホームページから簡単にダウンロードできるようにしている。

(3) 公開発表について

[・国内外でのシンポジウムやセミナーの開催状況（開催日時・場所、参加者数等）を記載。
・国内外の会議等での招待講演による発表の状況は必ず記載。]

ここでは、公開の研究会・シンポジウム、国際会議等での招待講演、国内会議での招待講演、そして領域関係者の受賞について順に記載する。

【研究会・シンポジウム】

本領域主催の公開の研究会・シンポジウムは、これまでのところ「領域研究会」と「領域国際会議」、「若手国際会議」である。また毎年1回の「物性科学領域横断研究会」にも参画している。なお6で述べる「集中連携研究会」は未公開の研究成果の発表を含む研究戦略の研究会のため、原則として非公開としている。

[平成 22 年度]

1. 第 4 回 物性科学領域横断研究会（平成 22 年 11 月 13 - 15 日、東京大学、147 名）
本領域を含む 7 領域が相互の情報交換のために合同で開催する研究会
2. 第 1 回 領域研究会「トポロジカル量子現象」（平成 22 年 12 月 18 - 20 日、京都大学、149 名）

[平成 23 年度]

1. International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena*
（若手国際会議、平成 23 年 11 月 1 - 5 日、ラフォーレ琵琶湖、68 名、うち海外機関からは 10 名）※写真左
2. 第 5 回 物性科学領域横断研究会（平成 23 年 11 月 19 - 20 日、東北大学、110 名）
本領域を含む 7 領域が合同で開催。会議ウェブサイト作成・参加登録管理を担当※中央図
3. 第 2 回 領域研究会「トポロジカル量子現象」（平成 23 年 12 月 17 - 19 日、岡山大学、109 名）

[平成 24 年度]

1. International Conference on Topological Quantum Phenomena*
（領域国際会議、平成 24 年 5 月 16 - 20 日、名古屋大学、162 名、うち海外機関からは 13 名、国内機関を含む外国人研究者は合計 32 名）※写真右

* 国際会議を含む領域研究会では、ポスター講演者に各 1 分間の口頭プレビュー講演の機会を与えている。そして参加者からの投票をもとにした「ポスター賞」を設けている。国際会議 TQP2012 からは、これまで国際的にもほとんど例がないと思われる、1 分間プレビューの内容に焦点を絞った「ポスタープレビュー賞」を新設した。



若手国際会議参加者集合写真



領域横断研究会 WEB サイト



TQP2012 ポスター賞表彰

【国際会議等での招待講演】
計画研究代表者、分担者、公募研究代表者の国際
会議招待講演は 71 件。(国内招待講演は 23 件。)

国際会議招待講演のうち 42 件を以下に示す。

【A01】時間反転対称性を破る超伝導体

1. Y. Maeno, "Topological Aspects of Superconductivity in Sr_2RuO_4 "
Physics Departmental Seminar at the University of Illinois, Urbana-Champaign, Urbana, USA, 2011/Nov/7. 【伝統のある物理学セミナー】
2. Y. Asano, "Odd-frequency Cooper Pairs and Their Effects on Surface Impedance"
Superconductivity and Magnetism (SM-2011), Kishinev, Moldova 2011/Oct/7-10.
3. Y. Maeno, "Topological Aspects of Superconductivity in Sr_2RuO_4 "
The 2011 Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2011)-Commemorating 100 Years of Superconductivity, Cambridge, UK, 2011/Aug/30-Sep/3. 【超伝導研究分野の主要国際会議の基調講演。今回は特に超伝導発見 100 周年の特別企画で、ルテニウム酸化物の超伝導が取り上げられた。】
4. Y. Maeno, "Topological Superconducting Junctions with Sr_2RuO_4 "
International Conference on Novel Superconductivity (ICNS), Tainan, Taiwan, 2011/Aug/4-9.
5. Y. Asano, "Anomalous Surface Impedance due to Odd-frequency Cooper Pairs"
7th International Workshop on Nanomagnetism & Superconductivity, Coma-ruga, Spain, 2011/Jul/3-8
6. Y. Asano, "Anomalous Surface Impedance due to Odd-frequency Cooper Pairs",
8th International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials, Chongqing China, 2011/Jun/8-11.
7. Y. Maeno, "Spin-Triplet Superconductivity"
100th Anniversary of Superconductivity: Hot Topics and Future Directions
Leiden, the Netherlands, 2011/Apr/4-8. 【超伝導発見の地ライデンで、100 周年祝賀行事に合わせて開催された研究会での招待講演】
8. Y. Maeno, "Quantized Vortices in Sr_2RuO_4 "
Conference on Frontiers of Condensed Matter

Physics, Stockholm, Sweden, 2011/Jan1-8.

9. Y. Asano, "Tunneling between Two Helical superconductors via Majorana Edge Channels"
Superconductivity and Magnetism: Hybrid proximity nanostructures and intrinsic phenomena, Paestum, Italy, 2010/Sep/5-11.
10. Y. Maeno, "Interference between the Even-Parity Superconductivity and the Superconductivity of Sr_2RuO_4 "
Superconductivity and Magnetism: Hybrid proximity nanostructures and intrinsic phenomena, Paestum, Italy, 2010/Sep/5-11.

【B01】スピン三重項超流動体

1. R. Nomura, "Andreev-Majorana bound states on the superfluid $^3\text{He-B}$ surface"
Microkelvin workshop 2012, Smolenice, Slovakia, 2012/Mar/19-23
2. R. Nomura, "Surface Majorana Cone of the Superfluid $^3\text{He B}$ Phase"
ULT2011, the new frontiers of low temperature physics, Daejeon, Korea, 2011/Aug/19-22
3. H. Ikegami, "Ultra-low Temperature Mobility of Electron Bubbles Formed below the Free Surface of Superfluid $^3\text{He-B}$ "
26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011/Aug/10-17. 【低温物理学分野の国際会議。領域メンバー複数名が招待講演】
4. H. Takeuchi, S. Higashitani, K. Nagai, "Drag Force on a High Porosity Aerogel in Liquid ^3He "
26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011/Aug/10-17. 【低温物理学分野の国際会議。領域メンバー複数名が招待講演】
5. O. Ishikawa, "Proximity effect at the interface between superfluid $^3\text{He-B}$ and aerogel of 97.5% porosity"
26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011/Aug/10-17. 【低温物理学分野の国際会議。領域メンバー複数名が招待講演】
6. S. Higashitani, "Proximity induced odd frequency pair in liquid ^3He in aerogel"
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2010), Grenoble, France, 2010/Aug/1-7.

【C01】空間反転対称性を破る量子流体

1. K. Ueno, "Emergence of superconductivity by electrostatic carrier doping"
2012 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, 2012/Apr/9-13. 【材料科学で世界最大規模の会議での招待講演】
2. K. Segawa, "Synthesis and Characterization of New Topological Insulators"
APS March Meeting 2012, Boston, USA, 2012/Feb/28-Mar/2.
3. G.Q. Zheng, "Exotic Superconducting State Coexisting with an Antiferromagnetic Order: NQR study under pressure in $\text{Ce}(\text{Rh}_{1-x}\text{Ir}_x)\text{In}_5$ "
International workshop on Heavy Fermion Physics: Perspective and Outlook, Beijing, China, 2012/Jan/7-9. 【奇周波数超伝導状態を示唆する実験結果について講演】
4. T. Shishido, "Fermi surface and spin texture of the noncentrosymmetric superconductors $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$ and $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$ "
Kanazawa U – JAIST joint meeting on computational science, 北陸先端科学技術大学院大学, 2011/Dec/21.
5. K. Ueno, "Two-dimensional superconductivity at an electrolyte/insulator interface"
ICAM Workshop on "New frontiers in the physics of two dimensional electron system"
Buenos Aires, Argentina, 2011/Nov/23-25.
【大きく発展しつつある酸化物界面の新現象や界面超伝導の若手を集めた会議で、唯一の日本人として発表】
6. K. Ueno, "Development of a New Superconductor by Electric Field Effect",
BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, China, 2011/Oct/23-26.
【アジア圏を中心に若手の気鋭の研究者を集めて行われた会議での招待講演】
7. K. Segawa, "Physical properties of bulk-superconducting $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ "
24th International Conference on Superconductivity (ISS2011), タワーホール船堀 (東京都), 2011/Oct/24-26.
8. G.Q. Zheng, "Non-centrosymmetric compounds as possible candidates for topological superconductors",
Kavli International Workshop on "Topological Insulator and Topological Superconductor", Beijing, China, 2011 /Aug/9-Sep/2.

【空間反転対称性の破れた超伝導体の非従来型超伝導状態及びそのトポロジカルな側面やスピン軌道相互作用について講演】

9. K. Ueno, "Emergence of new phases on oxide surfaces by electric-field charge accumulation"
SPIE photonics west 2011, San Francisco, USA, 2011/Jan/22-27.
【半導体、薄膜超構造を集めた大規模なコンファレンスでの招待講演。酸化物界面の新現象として電場誘起超伝導を報告】
10. Y. Ando, "Novel transport properties of Bi-Sb and other topological insulators"
Workshop on Topological Insulators and Superconductors, Princeton, USA, 2010/Nov/3-5.

【D01-04】トポロジカル凝縮系の理論

1. M. Ueda, "Topological Aspects in Ultracold Atoms"
Aspen Center for Physics 2012 Winter Conferences: Condensed Matter Physics, Aspen, USA, 2012/Jan/8-14.
2. M. Nitta, "Interaction of Vortices in BEC and QCD",
Maths-Physics Meeting around Bose Einstein condensates, Paris, 2011/Nov/30-Dec/2.
3. M. Ueda, "Topological Aspects in Ultracold Atoms"
34th International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT34), Pohang, Korea, 2011/Nov/7-11.
4. Y. Tanaka, "Current status of odd-frequency pairing in superconductors",
Humbolt Kolleg & Symposium "NANO-2011, Kishiniev, 2011/Oct/6-9.
5. K. Imura, "Spin Berry phase in topological insulators and Weyl semimetals",
Topological Insulators and Superconductors, Santa Barbara, USA, 2011/Sep/19-Dec/16.
6. M. Sato, "Non-Abelian topological orders in superconducting states"
Topological Insulators and Superconductors, Santa Barbara, USA, 2011/Sep/19-Dec/16.
7. M. Ueda, "Topological aspects in ultracold atoms"
Annual Meeting of UK Cold-atom/Condensed Matter Network, Nottingham, UK, 2011/Sep/5-7.

8. S. Kawabata, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, A. S. Vasenko, A. A. Golubov, Y. Asano, "Theory of Josephson transport through ferromagnetic insulators and semiconductors"
Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2011), Moscow, Russia, 2011/Aug/21-25.
9. Y. Tanaka, "Recent topics about topological superconductivity"
,Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2011), Moskow, Russia, 2011/Aug/21-25.
10. T. Mizushima, T. Kawakami, Y. Tsutsumi, M. Ichioka, K. Machida, "Majorana Fermions Bound at Vortices and Surface of Superfluid ^3He "
The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, China, 2011/Aug/10-17. 【低温物理学分野の国際会議。領域メンバー複数名が招待講演】
11. Y. Tanaka, "Topological surface state in non-centrosymmetric superconductors",
7th International workshop on Nanomagnetism and superconductivity, Coma-Ruga, 2011/Jul/3-7.
12. M. Ueda, "Topological aspects of spinor Bose gases",
Quantum Magnetism in Ultracold Atoms, Haifa, Israel, 2011/May/15-19.
13. M. Ueda, "Introduction to spinor quantum gases"
Conference on Cold Atoms, Semiconductor Polaritons and Nanoscience, Crete, Greece, 2011/May/2-6.
14. M. Ueda, "Topological excitations in Bose-Einstein condensates",
The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem), Honolulu, USA, 2010/Dec/15-20.
15. M. Ueda, "Topological Excitations in Bose-Einstein condensates",
Quantum solids, liquids, and gases, Stockholm, Sweden, 2010/Aug/15-22.
16. M. Sato, "Majorana Fermions and Non-Abelian Topological Order in Noncentrosymmetric Superconductors"
2010 Workshop on Quantum Condensation (QC10), Hsinchu, Taiwan, 2010/Aug/9-20.

【国内招待講演】

計画研究代表者、分担者、公募研究代表者の国内招待講演 23 件。領域関係者（公募研究代表者・計画研究連携研究者含む）による、領域活動に関する日本物理学会シンポジウム招待講演としては 14 件がある。紙数の関係で、それらのうち本研究領域の研究連携活動を特徴づけるものとして、2012 年 3 月の日本物理学会第 67 回年次大会における以下の 2 件のシンポジウムを挙げる。

- 「奇周波数クーパー対の物理」（本領域より、浅野（A01）・田仲（D01）・柏谷（A01）・石川（B01）・赤崎（A01）が講演）。
- 「多様な物質に現れる量子渦のダイナミクス」（素粒子物理分野と物性物理分野の共催；新田（D03）らが企画提案し、本領域より水島（D01）・佐藤（D01）が講演）。

【受賞】

「メンバーの受賞リスト等を見ると、領域代表、研究代表者から、若手メンバーまで各種の表彰を受けており、研究の質の高さや若手人材の成長ぶりが窺える。」（アドバイザーコメント）

1. 村川智（B01）第 6 回日本物理学会若手奨励賞
「超流動ヘリウム 3 の表面状態、特にマヨナラ準粒子状態の解明」2012 年 3 月。
2. 吉川豊（B01）第 6 回日本物理学会若手奨励賞
「超放射ラマン散乱を用いた物質波のコヒーレント制御」2012 年 3 月。
3. 川口由紀（D01）第 4 回井上リサーチアワード「スピノール BEC における量子多体効果の研究」2012 年 2 月。
4. 上野和紀（C01）第 21 回トーキン科学技術振興財団研究奨励賞
“New material development method by electric field-effect”2011 年 1 月。
5. 岩佐義宏（C01）上野和紀（C01）、他 2 名
第 14 回超伝導科学技術賞
“Discovery of electric field induced superconductivity”2011 年 4 月。
6. 上田正仁（D01）APS Outstanding Referees
2011 年 3 月。
7. 佐藤昌利（D01）東京大学物性研究所所長賞（ISSP 学術奨励賞）
“Study of topological superconductors”
2011 年 3 月。

8. 前野悦輝 (A01) 2010 年度仁科記念賞
 “Discovery of Spin-Triplet Superconductor - Ruthenium Oxide” 2010 年 12 月.
9. 横山毅人 (D04) 第 5 回日本物理学会若手奨賞
 「強磁性体/超伝導体接合における近接効果」
- 2010 年 11 月.
10. 沙川貴大 (D01) 第 5 回日本物理学会若手奨励賞「フィードバック制御がある系の情報と熱力学の展開」2010 年 11 月.

(4)「国民との科学・技術対話」について

【「国民との科学・技術対話」(研究者が研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する活動)の実施内容及びその際に行った参加者の満足度や難易度などについてのアンケート調査結果(参加者数や参加者の属性(性別・年齢等)を含む)について記載。】

本領域のメンバーはそれぞれが多くのアウトリーチ啓発活動に関わっているため、それに加えての本領域主催の特別なイベントはこれまで開催していない。しかし、それぞれの講演等で「トポロジーとは何か」「トポロジカルな自然観とはどのようなものか」などについてわかりやすく説明するようメンバーに伝えており、市民講座等で使うための講演スライドのひな形も HP のメンバー専用ページからダウンロードできる。また領域独自のイベント開催の代わりに、最近の情報伝達の手段として親しみ・有効性が急速に増しているウェブサイトを利用した広報活動にも力を入れている。以下、これらを順に紹介する。

【活動実施内容】

まず具体例を挙げて、実施内容を説明する。

1. 高校生や中学生などを対象としたアウトリーチ活動では、実際に高校や中学に出向き行った出張授業が 5 件で、その例は：
 - ・「物理学への招待」(2011 年 11 月 7 日@私立聖光学院中学校・高等学校)
 講師：安藤陽一、参加対象：中高生、参加人数：約 300 名。
 また、大学が主催する中学高校生向けの啓発活動に参加する形で行った講演が 4 件で、その例は：
 - ・「絶対零度で流れる液体：超流動」「東大理学部で考える女子中高生の未来」(2011 年 10 月 2 日@東京大学小柴ホール) 講師：川口由紀、参加対象：中高校生女子。
 これらでは、超伝導や超流動などの話題を含めて、自然の不思議かつ美しい姿、科学の奥深さや自然科学研究の魅力を伝えてきた。
2. 現職の教員向けに、自然科学の授業を行う際に必要な知識・知見を伝える講演会も 6 件実施した。
 - ・「目に見えない理科学的事象を子供たちに伝える工夫(電気、光、音、放射線と粒子概念を中心に)」(2011 年 8 月 24 日@岡山大学教育学部) 講師：稲田佳彦、参加対象：小中高等学校教員、20 名。
 - ・コアサイエンスティーチャー現職教員対象理科研修講座「磁石の性質、電流の働き」(2011 年 10 月 1 日@信州大学教育学部附属松本中学校) 講師：天谷健一、参加対象：小中高等学校教員。
3. 一般の方々にも開かれた講演会も 6 件実施している。例として、
 - ・「超伝導の発見と 100 年の歩み」西宮湯川記念科学セミナー
 (2011 年 12 月 3 日@西宮市フレンテホール) 講師：前野悦輝、
 - ・「材料科学が拓く東北の未来」(2011 年 12 月 3 日@東北大学金属材料研究所) 講師：野島勉。
 これら市民向けの講演会では、自然科学における最先端研究の平易な解説から、その意義、社会生活への波及効果を示し、いま社会が抱える科学技術の諸問題をあぶり出す内容でも講演した。

【アンケート調査】

次にアンケート調査の結果をまとめる。アンケート調査は4件の講演会で実施した。(この他、公開の領域研究会・若手国際会議でも合計4回のアンケートを実施している。)調査の例として領域代表の前野悦輝が実施した「西宮湯川記念科学セミナー」で行ったアンケート調査(回収総数198)から、参加者の意見を拾うことにする。講演は超伝導の歴史やトポロジカルな物質観についてのスライドを用いた講義に加えて、超伝導現象を目で見て体験する演示実験も含めた。よく行われる超伝導体を使った磁気浮上の実演はもちろん、電気抵抗が低温でゼロになる実験をステージ上で行い、大スクリーンにデータを投影しながら300人近い聴衆に実験の臨場感を体験してもらった。年齢分布から、第2の人生を歩む余裕のある世代の旺盛な知識欲が覗える。性別調査からは7割以上が男性であり、女性の参加が少ない。難易度は(1)わかりやすかった(62%) (2)どちらかといえばわかりやすかった(32%)、が併せて95%を越える結果となった。セミナーに参加した充実度は、理解のし易さを反映して、有意義であったという回答が98%に上っている。理解の容易さと充実度の強い相関は、他アンケート調査にも現れている。

「講演で面白かった話題」に対する回答では約半数の98名が演示実験を挙げている。一見することによって、先端科学を身近に感じられる傾向がはっきりと出ている。以下に、アンケートに寄せられた意見を紹介する：

- ・トポロジカルという新しい考え方が提示されたが、ものの本質とは何かということを考えると、これまでの概念にとらわれずに、自由に発想することの必要性が感じられた。[60歳代/男性]
 - ・なぜ銅酸化物だけTC(超伝導転移温度)が高いのか?銅のどのような性質に起因しているのか?トポロジーと超伝導の関係。[40歳代/女性] (下線部は補填)
 - ・キュリー夫人らが100年以上前に、(放射性元素の放射能を)ONにはできてもOFFには出来ないこと説明しているのに原発をやっている意味がわからないと思った! [10歳代/性別未入力] (下線部補填)
- これら出張授業・セミナーの概要はすぐ下で述べるように、ホームページ「市民とサイエンス」のページを設けて発信している。出張授業や市民講座の機会に領域ホームページへのアクセスを誘った。

【ホームページの利用：市民とサイエンス】 http://www.topological-qp.jp/event_public/index.html

その構成は：

1. トポロジカルってなに? : 本領域の目的についてごく簡単に解説。5(2)で図を含めて紹介した。
2. サイエンス広場(生徒の皆さん向けのイベント情報) : 高校出前授業を含め17件の実施情報を掲載。
3. サイエンスカフェとレクチャー(一般の方向けのイベント情報) : 8件を掲載。講演録のダウンロードもできる。例として: 日本物理学会2010年度公開講座「超伝導からみる科学技術の最先端」(2010年11月6日@東京大学本郷キャンパス)、講師: 前野(A01、領域代表)。
4. WEBでサイエンス(リンクやダウンロード) : 領域メンバーが作成した、科学動画(YouTube)、講義ノート、プレゼンテーションなどの資料を紹介。
5. ニュースになったサイエンス : 領域メンバーの活動の新聞報道等を報告。新聞報道は12件を掲載。例として「超省エネの切り札か『トポロジカル物質』に注目」(2012年1月3日、日本経済新聞電子版)。前野、安藤(C01、連携)、永長(C01、連携)への取材に基づく記事。

【課題と提言】

アウトリーチ活動を通してあぶり出された課題と領域からの提言をまとめる。海外アドバイザーのコメントとして、アウトリーチ活動の対象を例えば高校生や教師など思い切って絞り込んではどうかの提案もいただいている。課題としては、講演会やホームページ上のサイエンスコンテンツへ一般市民の関心をどのように喚起するか、また、長期的なサイエンス・コミュニケーションへどのように発展させるか、が挙げられる。前者に対しては、サイエンスコンテンツを提供するホームページが一覧検索できるハブとなるページの公的開設が有効であろう。後者については、例えば「中学生・高校生に、ノーベル賞に輝いた科学業績を平易に解説し科学への興味を喚起する機会が恒常的にあることが望ましい」とするならば、サイエンス・コミュニケーション活動を財政的に支える制度の整備、学位取得者が教員やサイエンス・コミュニケーターとなるための道筋の確保などの施策が必要だと考えている。

6. 研究組織と各研究項目の連携状況

[・研究領域の設定目的の達成に向け、これまでどのように研究項目間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたかを具体的に記載。・各研究項目の研究課題名および、計画研究・公募研究（公募研究は研究代表者のみ）に参画している研究者の所属職氏名を記載。]

【対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象】

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

研究代表者：前野悦輝（京大・教授）
研究分担者：柏谷聡（産総研・主任研究員）、
赤崎達志（NTT 基礎研・主幹研究員）、
浅野泰寛（北大・准教授）
連携研究者：寺嶋孝仁（京大・教授）、
米澤進吾（同・助教）、石田憲二（同・教授）、
前川禎道（原研・センター長）
公募研究代表者：神田晶伸（筑波大・准教授）、
天谷健一（信州大・准教授）、
住山昭彦（兵庫県立大・教授）

計画研究 B01

スピン三重項超流動体の新奇界面現象

研究代表者：石川修六（阪市大・教授）
研究分担者：野村竜司（東工大・助教）、
東谷誠二（広大・准教授）、
三宅和正（阪大・教授）
連携研究者：小原顕（阪市大・講師）、
久保田実（東大・准教授）、
中原幹夫（近大・教授）、
公募研究代表者：松本宏一（金沢大・教授）、
佐々木豊（京大・准教授）、吉川豊（同・助教）、
東條賢（中央大・准教授）、
池上弘樹（理研・専任研究員）

計画研究 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：鄭国慶（岡大・教授）
研究分担者：瀬川耕司（阪大・准教授）、稲田佳彦
（岡大・教授）、野島勉（東北大・准教授）、
上野和紀（東大・准教授）、獅子堂達也（広大・
助教）
連携研究者：安藤陽一（阪大・教授）、岩佐義宏（東
大・教授）、横谷尚睦（-H23 岡大・教授）、
俣野和明（H24- 同・助教）、
永長直人（東大・教授）
公募研究代表者：佐藤宇史（東北大・准教授）、
村中隆弘（電通大・准教授）、松野丈夫（理研・
専任研究員）、花栗哲郎（理研・専任研究員）

計画研究 D01

トポロジカル凝縮系の理論

研究代表者：田仲由喜夫（名大・教授）、
研究分担者：上田正仁（東大・教授）、水島健（岡
大・助教）、佐藤昌利（名大・准教授）
連携研究者：押川正毅（東大・教授）、小口多美夫
（阪大・教授）、川口由紀（東大・助教）
公募研究代表者（D02-D04）：福井隆裕（茨城大・
教授）、川畑史郎（産総研・主任研究員）、高木
丈夫（福井大・教授）、新田宗土（慶大・准教授）、
横山毅人（東工大・助教）、井村健一郎（広大・
助教）、田中秋広（物材機構・研究員）

本プロジェクトでは新学術領域の構築に向かって、従来の学会領域の枠を実質的に超えての新概念の共有と共同研究によるシナジー効果を最大限に生かした活動を展開している。その企画・運営を担うのが計画研究の代表者4名を含む9名から構成される「総括班」で、日ごろから電子メールを利用して、領域各プログラムの企画や審査も行っている。PD申請や各種プログラムの申請に対する審査方法等は前もって明文化しており、総括班メンバー各自の運営担当内容も決めている：PD審査、集中連携研究会採択、若手相互滞在審査、WEB・広報、News Letter編集、若手国際会議企画、などである。また日本物理学会の年2回の開催期間や、年1回の領域研究会の開催期間を利用して、毎年3回程度「総括班会議」を開催している。この会議を通じて総括班メンバーはX00総括班の予算・決算を含めた領域活動に関わる重要情報を共有し、研究戦略を練る場ともなっている。京大に設置した「領域事務局」のスタッフは、領域運営の企画・運営の全般を国際的な対応も含めて補佐し、WEBの作成・更新、さらに冊子体のNews Letterのレイアウトなども行っている。

活動推進の軸となる研究会活動が「集中連携研究会」(Intensive Interactive Workshops)であり、これについては次に記す。その後には新学術領域プロジェクトならではの連携による研究成果、そして若手研究者育成の状況について述べる。

【集中連携研究会】

計画研究班の内外の連携、および公募研究班との連携の強化に目的を定めた研究会で、原則非公開で行う。初年度は計画班ごとの班内連携強化に主眼を置いて4回開催した。平成23年度以降は、複数の計画班テーマにまたがる共通概念を主題とする小規模の研究会として開催している。計画研究の代表者4名は、領域全体の研究動向を的確に把握するため、H23年度以降の集中連携研究会には出席を原則義務付けている。

[平成22年度]

- ・第1回：「時間反転対称性の破れた超伝導体の新奇界面現象」（平成22年7月10日、京都大東京オフィス、参加人数：9名）領域発足にあたり、計画研究A01班の認識共有を深めるために開催。
- ・第2回：「スピン軌道相互作用」（平成22年7月27日、岡山大学、12名）
- ・第3回：「トポロジカル凝縮系の理論」（平成22年9月4日、名古屋大学、20名）
- ・第4回：「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」（平成22年9月13日、大阪市大文化交流センター、8名）
- ・領域キックオフミーティング（平成22年9月22日、大阪市大学術情報総合センター、40名）メンバー顔合わせ（代表、分担、連携研究者）、領域立ち上げの役割分担打ち合わせ、各計画研究の研究計画の紹介。

[平成23年度]

- ・第5回：「固有軌道角運動量とエッジ流」（平成23年7月1・2日、大阪市大文化交流センター、45名）
- ・第6回：「Non-centrosymmetric Superconductors: Materials and Mechanisms」（平成23年7月25・26日、大阪大学、35名）新学術領域「重い電子系の形成と秩序化」との共催。
- ・第7回：「奇周波数クーパー対」（平成23年9月8-10日、名古屋大学、40名）
- ・公募研究キックオフミーティング（平成23年9月20日、カナルパークホテル富山、28名）公募代表者に対する領域の目的や運営の確認説明と、公募代表者による研究計画の発表会。

[平成24年度]

- ・第8回：「冷却原子気体とトポロジー」（平成24年6月4・5日、東京大学、36名）
- ・第9回：「トポロジカル超伝導・超流動」（平成24年12月13・14日、大阪大学）

H25年度以降は「エッジ流」、「非可換量子渦」、「トポロジカル量子臨界現象」などについて異なる物質系にまたがる研究会を開催する予定である。

【新学術組織ならではの連携による研究成果】

超伝導、超流動、絶縁体、冷却原子などにまたがる共通テーマとしての「トポロジカル量子現象」の研究が、本格的な広がりや深化を始めており、新学術領域組織ならではの研究成果が次々と生まれている。特に「奇周波数ペアリング」、「半量子渦やマヨラナ準粒子」、「エッジ流」などで、物質系を超えた概念共有のもたらす成果が実感できる。さらに、当初は計画していなかったがごく最近になって、「トポロジカル量子臨界点」の研究の重要性も認識されるようになった。これら分野融合の成果は、論文総数141編に対して、複数の研究項目（班）のメンバーによる共著論文の数が42編、計画研究と公募研究にまたがる共著論文の数が32編などの成果にも表れている。

【1. 奇周波数ペアリングをめぐる連携】

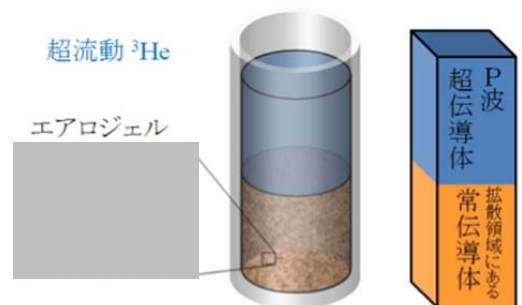
【1-1. 奇周波数ペアリングの出現範囲の研究：A-B-C-Dの連携】

奇周波数ペアリングをめぐる田仲（D01）を中心とする研究展開は、本領域の誇る代表的成果の一つである。まず、異方的超伝導体と常伝導金属のS/N接合界面でのアンドレーエフ束縛状態とそれに伴うゼロエネルギー状態密度が、超伝導近接効果と表裏一体の現象であることが認識されるようになった。そして、本領域研究で「トポロジカル超伝導体のエッジ状態」という視点を得たことで、近接効果の実体の分類についても認識が深まった。そして接合系や磁束系など一般に不均一超伝導なら必然的に生じる奇周波数ペアリングと、バルク・エッジ対応に基づくトポロジカル超流体

固有のエッジ状態に伴う奇周波数ペアリングがあることなどが明確になった。これを契機に、本領域では分野間の共通認識による連携や研究連鎖のうねりが起こっている。まずエネルギーギャップにノードをもつ高温超伝導体などでも、波数の方向によっては従来の「トポロジカル物質の周期表」では分類できないエッジ状態（フラットバンド・エッジ状態）が現れるという基礎付けができた（佐藤：D01）。これにより従来から知られていた実験結果が普遍的視点で再理解できる。下記の超流動 ^3He での奇周波数ペアリング状態の検証に向けての研究も着々と進んでいる（石川：B01、松本：B01 公募、東谷：B01）。また奇周波数ペアリング状態では、「負のマイスナー効果」というパラドックスがあったが、接合系に対しては、空間的に局在した奇周波数ペアリングによる異常な電磁応答現象となって現れることを理論的に示した（浅野：A01、田仲：D01、横山：D04 公募）。また三宅（B01）らは、バルク超伝導体での奇周波数ペアリング安定化に関する理論基礎付けを行って「負のマイスナー効果」の問題に解決を与えた。鄭（C01）らは、鉄系超伝導体でも奇周波バルク対の存在可能性を実験から指摘している。

[1-2. ^3He -B 相 の奇周波数ペアリング：B-A-D の連携]

スピン三重項 p 波超伝導体と常伝導金属の S/N 接合系とのアナロジーに立った超流動 ^3He の研究が進展している。近年、気泡物質（エアロジェル）中の液体ヘリウムの研究で、不純物を含む金属中の超伝導とのアナロジーが認識されているが、本領域では、S/N 接合界面での奇周波数ペアリング状態と同様、「奇周波数超流動状態」の出現を実証しようとする研究を進めている。これは超流動実験の石川（B01）・松本（B01 公募）、超流動理論の東谷（B01 理論）と、超伝導理論の浅野（A01）・田仲（D01）との交流によって初めて生まれた研究テーマである。さらに東谷は、 ^3He についてアンドレーエフ束縛状態に伴うゼロエネルギー状態密度が、奇周波数ペアリングの振幅と密接に対応しているという厳密な関係式を導くのに成功し、超伝導接合に対しても新たな知見をもたらした。

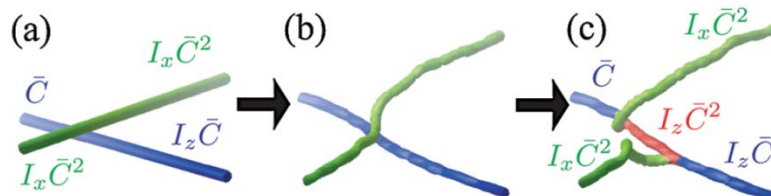


図：奇周波数ペアリングの出現が予想される超流動 ^3He と超伝導のアナロジー。

[2. トポロジカル物質特有の励起状態をめぐる連携]

[2-1. 半量子渦を含む非可換量子渦をめぐる異なる系での共通概念構築：A-B-D の連携]

スピン三重項超流体で可能となる半整数量子渦について、 Sr_2RuO_4 の微小結晶リングでの半整数フラクソイド状態の観測成功（前野：A01）を受けて、超流動 ^3He -A 相（石川：B01）でも半整数量子渦の初めての観測に向けた動機が高まっている。この渦中心にはマヨラナ型準粒子励起が予想されており、渦交換に伴う非可換統計性についての理論研究も進行中である（中原：B01 連携、水島：D01）。さらに冷却原子系での非可換渦の衝突に伴うラング形成などの特異性の研究（上田：D01、川口：D01 連携、新田：D04 公募）も含めて、領域全体での研究連携意識が高まっている。



図：非可換量子渦の衝突の様子。(a) 交換しない2本の渦糸（青と緑）が衝突すると、干切れたりすり抜けたりせず、(c) 間にラング（rung）と呼ばれる第3の渦糸（赤）が現れ、渦のネットワーク構造が生じる。Kobayashi et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 115301 (2009)より。

[2-2. 超流動³Heの表面マヨラナ準粒子励起：B-Dの連携]

超流動ヘリウムのトポロジカル超流動性を決定づけたのは、B01の野村（東工大）らの実験に対する、B01の東谷（広大）らの定量的理論による強力な連携の賜物である。またこのエッジ状態では磁場中の磁気異方性が現れることが米国の理論家から指摘されたが、D01の水島・佐藤らは観測のための詳細な理論を展開することで、磁場によって時間反転対称性が破れた状態でも表面マヨラナフェルミオンが安定に存在する機構について基礎付けを行った。この過程で磁場中のトポロジカル状態は従来の「トポロジカル物質の周期表」では分類できない状態であることも浮かび上がってきた。この成果は以下で述べるトポロジカル量子臨界現象にも関連している。このように、超流動³Heがトポロジカル物質であることを実証するという意識を共有することで研究内容が加速的に深化している。

[3. トポロジカル量子臨界現象をめぐる連携：D-A-B-Cの連携]

外部パラメータによってトポロジカルな量子状態が通常の状態に変化する場合、それを量子相転移や量子臨界現象として扱えるのか？ またそれに伴う対称性の破れや秩序変数とトポロジカル不変量との関係はどうなっているのか？ これらは本プロジェクトの研究領域名である「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」の根源にかかわる問題である。「4. 主な研究成果」で述べたD班による超伝導接合系および超流動³Heにおけるトポロジカル量子相転移の予言は、A班およびB班の実験で直接検証が可能のはずである。またC班の3-1の実験成果では、組成変化によってトポロジカル絶縁相が通常の絶縁相に移り変わる臨界点付近で、予想外のエネルギーギャップ形成が起こっている。このように「トポロジカル量子相転移・量子臨界現象」の物理は明らかに胎動期に入っており、物質系を超えた連携により、今にも大きな展開が生まれそうである。

[4. スピン三重項超流体の固有軌道角運動量とエッジ流：A-B-Dの連携]

時間反転対称性を破るスピン三重項超流体が巨視的軌道角運動量をもつかどうかは、超流動³He-A相の物理に残された未解決問題である。この問題の解決に向けて石川（B01）のもとで着々と研究が進展している。この問題はまだ観測されていない超流動³He-Aの界面でのエッジ質量流や超伝導Sr₂RuO₄の界面でのエッジ電流の大きさに密接に関わっている。高木（D03 公募）はヘリウムについて実験に即した理論計算を行っており、三宅（B01）は両系について比較理論を展開している。Sr₂RuO₄界面での実験（前野、米澤、柏谷：A01）とも合わせて、領域内での連携研究を幅広く展開している。

[5. その他のテーマでの連携例]

[5-1. 超伝導トポロジカル絶縁体：C01 実験・理論と D01 理論の連携]

トポロジカル絶縁体にキャリアドーピングした超伝導体について、C01班の瀬川・安藤らが試料の質向上によってその超伝導状態を詳しく明らかにした成果に対して、D01班の田仲・佐藤がすぐさま連携して、超伝導トポロジカル絶縁体も「トポロジカル超伝導体」の一つになりうるという斬新な認識の基礎付けをこの超伝導体の具体的電子構造に基づいて行った。その結果はPhysical Review Lettersに共著論文で発表した。C01班の鄭も、ドーピングしたキャリアの電子状態をNMR（核磁気共鳴）測定で明らかにすべく連携している。

[5-2. 反転対称性のない（NCS）超伝導体をめぐる共同研究：C-Aの連携]

NCS超伝導体Li₂(Pd,Pt)₃Bにおけるスピン一重項-三重項混合超伝導状態の検証をめぐって、鄭（C01）、稲田（C01）、俣野（C01 連携）と前野（A01）の実験グループ間での共同研究も進んでいる。C01で作成の試料を用いてA01で低温磁化率や比熱の測定を行い、Pt組成近傍でのフォノン変化の検出や超伝導磁場-温度相図の構築などで連携して共著論文も発表した。なお、この連携研究では岡山大と京都大の間で「若手相互滞在プログラム」による大学院生の双方向交換滞在を行った。

【新学術連携による若手研究者の育成】

若手研究者が既存分野の枠を超えて活躍する例が目立ち始めており、「若手国際会議」の組織・運営を通じて培ったメンバー間の研究交流も着実に育んでいる。領域の目的とする「分野横断型の研究視点と国際性をもった人材の育成」が順調に進んでいる。具体例として、D 班の研究分担者水島は、もともと冷却原子系理論の専門家だが、新学術領域の活動から B 班や A 班に密接に関連したトポロジカル超流動・超伝導の分野で顕著な研究成果を挙げている。また B 班の PD の竹内も、もともと冷却原子系の流体力学理論が専門であるが、超流動体の奇周波数ペアリング状態理解の基礎となる、エアロジェル中の常流動 ^3He の超音波減衰理論を展開し、Physical Review Letters 誌に論文掲載された（論文 B-2）。

本領域の若手研究者の活躍は 5（3）に記載した受賞リストにも反映され（アドバイザーコメント）、以下のように領域発足後の昇任人事の例も多い：

計画研究： 上野（東北大助教→東大准教授）、佐藤（東大物性研助教→名大准教授）、
侯野（領域雇用岡山大特任助教→岡山大助教）、

公募研究： 東條（学習院大助教→中央大准教授）、村中（青学大助教→電通大准教授）。

なお総括班メンバーでは田仲（名大）が准教授から教授に昇格した。

また「若手相互滞在プログラム」では、既存領域を超えた将来の研究の担い手を育むきっかけを提供すると同時に、領域グループ間の交流の契機ともなることをねらっている。これまで 10 件の実施例には以下が含まれる：超伝導体や磁性体の固体 NMR 専門家が、超流動ヘリウムの NMR の公募研究グループに滞在して、手法の相違や MRI 測定の実際を学んだ（C 班→B 班）；女性大学院生が、他大学の低温装置を用いての測定を行った。滞在中には幼児のデイケア施設も手配し、育児中の女性研究者の活動範囲の拡大に貢献した（C 班→A 班）；理論専攻の大学院生が実験研究室に滞在し、対応する超伝導トポロジカル絶縁体の試料作製を体験した（D 班→C 班）。

8. 今後の研究領域の推進方策

[これまでの研究成果に照らして、今後どのように研究領域を推進し、領域設定時の目的を達成していくのか。]

【海外の関連プロジェクトとの国際連携の推進】

2004-5年に始まるトポロジカル絶縁体の発見を契機として、2010年以降、超伝導体・超流動体も取り込んだ研究再構築の大きなうねりが世界中で起こり始めている。トポロジカル量子現象を統合して横断的に研究を進めるプロジェクトとして、本新学術領域は国際的にも大いに注目されている（アドバイザーコメント）。海外でも同様のプロジェクトが立ち上がりつつあるので、当初計画には無かったが、研究期間の後半ではそれらのプロジェクトとも国際交流・国際連携することで、本領域の目的である「トポロジカル量子物理学」の構築に向けて一層の加速を図りたい。

具体的には以下との相互国際連携をプロジェクト同士のレベルで進める。

1. Topological Protection and Non-Equilibrium States in Strongly Correlated Electron Systems (TOPNES), 代表者: A.P. Mackenzie (Univ. of St. Andrews, UK) 2011-2017.

前野（本領域代表）は Collaborative Partner である。

2. Quantum Materials Project, 代表者: L. Taillefer (Univ. Sherbrooke, Canada), 2012 (更新) -2017. カナダ高等研究機構 (CIFAR) の全国プロジェクトで、超伝導、冷却原子、トポロジカル絶縁体などの研究者を取り込んでいる。前野は Foreign Associate Member.

3. Coalition for the Application of Topological Insulators, 代表者: Shoucheng. Zhang (Stanford Univ., USA), 2011-. 国防高等研究計画局 (DARPA) の研究プロジェクトで、トポロジカル絶縁体とその応用に焦点を当てている。代表の Zhang 教授は本領域のアドバイザー。

4. Functional Correlated Electronic Materials, the Manipulation of their Topological Quantum Properties, and Applications, 代表者: Ying Liu (上海交通大/Penn State Univ., China/USA), 2012-2016. 発足したばかりのプロジェクト。Liu 教授と前野は15年間以上に渡る共同研究者で、両プロジェクトの連携に関しても打ち合わせを始めている。

このような国際研究展開を加速するために、今年度からアドバイザーの追加および国際連携研究者 (Foreign Associate Members) の導入を計画している。

【公募研究】

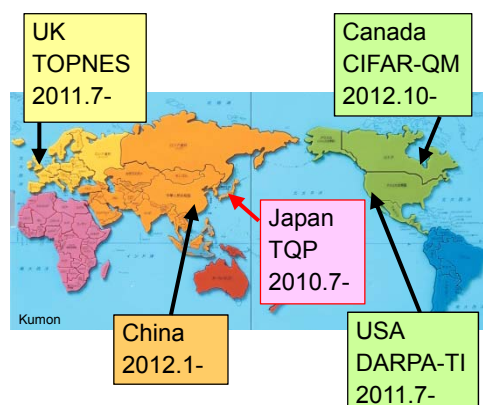
公募研究は前期(H23-24年度)採択分に対しては H24 年度末までに「公募研究成果報告会」を開催する予定である。後期(H25-26年度)の公募に関しては、前期と同じ枠組み、すなわち実験系は A01-C01、理論系は D02 (A01 関連)、D03 (B01 関連)、D04 (C01 関連) の枠で行う。

【領域内連携プロジェクトの推進】

「集中連携研究会」は分野横断・融合を進める研究連携の推進に計画通り機能している。研究会のテーマとして H24 年度の開催テーマは「冷却原子系のトポロジカル励起」、「トポロジカル超伝導・超流動」である。H25 年度以降は「エッジ流」、「非可換量子渦」、「トポロジカル量子臨界現象」などについて異なる物質系にまたがる研究会を開催する予定である。「領域研究会」は H25 年度については名大で、H26 年度は国際会議 TQP2014 として京大で開催予定である。

【若手研究者育成プログラムの強化】

第2回目の「若手国際会議」はアジア太平洋物理学研究センター (APCTP) との共催で H25 年10月に沖縄で開催予定であり、組織委員会を立ち上げて準備を進めている。国際アドバイザーからもコメントのあった「若手相互滞在プログラム」については、事前に研究計画を十分練っているため短期滞在でも効果は得られており、また申請手続きと審査過程をさらに簡素化する改善を図った。



図：トポロジカル量子現象に関して、世界各国で始動したプロジェクトの例。本領域は他には無い分野のテーマも取り込んでおり、組織発足時期の点からも世界を先導しているといえる（アドバイザーコメント）。

9. 総括班評価者による評価の状況

3名の国内アドバイザーおよび3名の海外アドバイザーから7件の評価を受けている。

【安藤恒也氏】（東京工業大学工学研究科・教授、トポロジカル量子現象の先駆けである量子ホール効果の理論に関する世界的権威、1982年仁科記念賞）H22 成果に関するコメント

1. 研究に関して：実験的研究と理論グループが「トポロジカル」をキーワードとした新しい現象の発見を目指すとともに、普遍概念を創出することを目的としている。異分野の連携・融合により、国際的に優れた新しい研究が発展する可能性を秘めており、この試みが成功することを期待する。
2. 領域運営に関して：若手相互滞在プログラムは領域内の異分野間の交流と共同研究、若手育成の面で大いに役立つと期待される。さらに、若手国際会議も新しい試みで、若手研究者が幅広い視点で将来の研究方向性を決めることを可能とするなど、育成面で重要な役割を果たすものと考えられる。
3. その他：この領域では異分野間の共同研究が推進されるような運営が行われており、第一回領域研究会での議論もこの危惧を感じさせないものであった。

【家泰弘氏】（東京大学物性研究所・所長 教授、日本物理学会会長、メゾスコピック物理学の世界的権威）、H22 成果に関するコメント

1. 研究に関して：領域発足当初とは思えないほど、数多くの優れた成果が既に出ていると見受けられました。新学術領域としては個々の研究グループの足し算以上の成果が期待されるので、そのあたりを意識しつつ5年間の活動を推進されることを望みます。
2. 領域運営に関して：領域申請に際してたいへんに良く練られたことがうかがえる組織になっており、相互滞在プログラムなど、若手の活動を重視した領域運営は評価されるでしょう。

【安藤恒也氏】 H23 成果に関するコメント

1. 研究に関して：実験と理論グループが「トポロジカル」をキーワードとした新しい現象の発見を目指すとともに、普遍概念を創出することを目的としている。もちろん、トポロジー自身は決して新しい概念ではない。しかし、これまでに知られていた現象や物質を分類する見方としては斬新なものであり、それにより新しい現象を生み出す、あるいはそのための新物質を開発するための指針としての役割は大いに期待できる。
2. 領域運営に関して：若手相互滞在プログラム、若手国際会議は領域内の異分野間の交流と共同研究、若手育成の面で大いに役立つことが期待される。領域のホームページも充実しており、研究成果その他が随時更新されるのでグループ内の研究活性化に大いに有用であろう。トポロジカル超伝導に関しては、超伝導発見100周年にちなんで *Journal of the Physical Society of Japan* の Special Topics にも取り上げられ、超伝導研究の重要な潮流となっている。
3. その他：「トポロジカル量子物理学」が一般に認識されるためには、より新しい現象や普遍的物理概念が生まれてくることに加えて、現実の生活に役立つようなデバイスあるいは物質材料などが生まれてくることも不可欠であろう。

【家泰弘氏】 H23 成果に関するコメント

1. 研究に関して：本領域を構成するメンバーから多くの優れた成果が生み出されている。メンバーの受賞リスト等を見ると、領域代表、研究代表者から、若手メンバーまで各種の表彰を受けており、研究の質の高さや若手人材の成長ぶりが窺える。世界を先導する研究が展開されており、今後の更なる発展が楽しみである。
2. 領域運営に関して：研究班間の連携や、他の新学術領域研究との連携にも務めており、総括班のコアメンバーの役割分担もうまく機能しているように思われる。パブリック・アウトリーチ活動も適切に行われている。新学術領域のお手本となるような研究成果、領域運営であると言える。

International Advisory Report（国際会議 TQP2012 開催時に評価を受けた）

【Prof. J. Aarts】（Leiden University、低温物理の世界的拠点であるライデン大学カメリン・オネス研究所で、強磁性と超伝導に関する研究分野で世界を牽引）

1. 研究に関して：本プロジェクトの開始時期は極めて有効であった。この2年間で、トポロジカル量子現象は世界的に主要な研究テーマとなったが、本プロジェクトにより領域メンバーはこの分野の最先端で活躍する役割を担うことができている。TQP2012ではこの利点が最大限に活かされ、重要な研究成果が多数報告された。この研究分野の展開により、最盛期を過ぎたと一見思われていたヘリウム研究分野が再び研究の最前線に浮上しうることを再認識できた。分野横断による相互涵養の効果が最大限に得られるよう、異なる分野から核となるテーマを巧みに取り込んでいる。また、プロジェクトの規模もすこぶる適切といえる。組織編成の面では、公募研究を組み入れていることを特に評価したい。公募は、領域外の重要な研究成果を取り込み、新奇な技術を活用し、将来有望な若手研究者に機会を与えるのに有力な手段である。
2. 運営に関して：集中連携研究会や若手相互滞在プログラムは、継続実施が重要であるにもかかわらず、事務的手間が煩雑という印象を与えてしまい、結局思ったほどは活用されずに終わりがちである。総括班で、企画が継続にかつ有効に活用されるよう検討を重ねる必要がある。しかし全体的に本領域研究では、そのような事が起らぬように、プロジェクトならではの相乗的成果を生み出すために有効と考えられるあらゆる方策が実施されているようである。
3. その他：アウトリーチ活動の重要な設問は、対象をどの層に絞るかということだろう。対象となるグループを例えば高校生や教員に絞り、ウェブサイトもこれに対応した内容で構成し、関連機関に領域のウェブサイトへリンクを張ってもらうのがより効果的かもしれない。注意したい点は、通常多くの関連機関が非常に似通った情報を同じ層に向けて発信しようとしていることだ。



領域国際会議 TQP2012 (名大) の会期中に開催したアドバイザーミーティング。左から (敬称略) : S. Zhang、安藤恒也、J. Aarts、福山寛、A.J. Leggett。

【Prof.A.J.Leggett】(The Univ. of Illinois, Urbana-Champaign、超流動・超伝導の理論の世界的指導者。³Heのスピン三重項超流動の理論で2003年ノーベル物理学賞受賞)

1. 研究に関して：本領域は、急展開するトポロジカル量子現象の研究分野において、日本の物理学界特有の強みを、理論および実験の両面において巧く発展させている。なかでも印象的なのは、もしこのプロジェクトが実現していなければばらばらのままだったと思われる各研究分野間に「共通の文化」を築くのに成功したことである。世界的に見ても固有のまたはそれに近い専門知識に関する分野(例えば、 Sr_2RuO_4 、回転容器中の超流動³He、奇周波ペアリングなど)に引き続き焦点を合わせるのが賢明と思われる。方策としてだが、「奇周波ペアリングの普遍的出現の確立」は「～の出現範囲の研究」などとして、進行中の研究が結論ありきのもとの誤解されないような表現にするのも一考に値すると思われる。(本領域からの返答：誤解を受けないように検討します。)
2. 運営に関して：現在までの活動を見る限り、非常に成功していると評価できる。「重い電子系」研究と連携した研究会の実施は、特に興味深い活動である。国際会議に関しては、最近名古屋大学で開催された TQP2012 は、非常によくまとまっており、有意義であった。唯一の疑問をいえば、院生・PDを対象とした「若手相互滞在プログラム」の滞在期間が1-2週間というは短すぎる。(本領域からの返答：短期間で次の展開の契機となる成果も挙るよう、周到な準備を指導しております。)

【Prof. S. Zhang】(Stanford University、トポロジカル絶縁体理論の創始者の一人、DARPAによるトポトロニクスプロジェクトリーダー)

1. 研究に関して：トポロジーが研究対象としては比較的あいまいだった時期から始動した本プロジェクトは、先見性と展望に満ちているといえる。トポロジカル絶縁体、超流動³He-B相、反転対称性をもたない超伝導体、および普遍性理論といった、固体物理の異なる分野にわたる共通のテーマをまとめ、研究連携すべく独自に編成されている。国際会議 TQP2012 で講演された研究結果が著しく優れているだけでなく、ポスター発表も若い世代の素晴らしい活気にあふれたものである。
2. 運営に関して：近年、数多くのトポロジカル物理の国際会議に出席しているが、本領域の TQP2012 は、トップレベルの内容というべきである。本会議で講演されたテーマはすべて、この分野における最先端の研究である。また、ポスター発表の質の高さも非常に印象的であった。

研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）

平成 22 年度に発足した新学術領域研究（研究領域提案型）としての研究成果の公表状況は以下のとおりであるので、一部修正して再掲する。

中間「報告書」第 18 頁の以下の論文は、本領域科研費の交付内定日以前に出版されたものなので、削除する。

14. “Pressure-induced unconventional superconductivity near a quantum critical point in CaFe_2As_2 ”,

*S. Kawasaki, T Tabuchi, X.F.Wang, X H Chen and Guo-qing Zheng,

Superconductor Science and Technology **23**, 054004-1-5 (May 2010).

【鉄砒素系超伝導体における奇周波数超伝導状態の観測に関する報告, 被引用9回】