

対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求

佐藤 宇史 / 東北大学大学院理学研究科 准教授

計画研究 B01「対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求」の目的は、対称性とスピン軌道相互作用を起源とする新しい種類のトポロジカル物質を探索するとともに、トポロジカル物質が発現する新奇量子現象やエキゾチック準粒子の性質を解明することである。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. 新奇トポロジカル半金属

ワイル半金属は、時間あるいは空間反転対称性を破り、バンドのスピン縮退を解くことで得られる新たなトポロジカル半金属相である [1]。最近、空間反転対称性を持たない TaAs 系物質がワイル半金属であると理論予測がなされ、精力的に研究が行われている。これらの物質群の中で最もスピン軌道相互作用の小さい NbP 単結晶の ARPES 実験を行い、表面バンド構造を決定した [2]。図 1 に示すように、NbP の表面電子構造は、終端面の種類により劇的に変化することが明らかになった。P 終端面においては、X 点まわりの tadpole 型のフェルミ面が観測されるのに対し、Nb 終端面では X 点を取り囲む全く別のフェルミ面が観測された。バルクワイルノードの射影点は表面状態の詳細にかかわらず同一であることから、Nb/P 終端面におけるフェルミ面の交点位置からワイルノードの位置とフェルミアークを見出した。これらの結果は、NbP が空間反転対称性を破る新型のワイル半金属であることを示している。

新しい種類のトポロジカル半金属として最近注目されているのが線ノード半金属である。ワイル半金属では伝導帯と価電子帯が「点」で縮退するのに対して、線ノード半金属では「線」上に縮退が起こる。線ノード

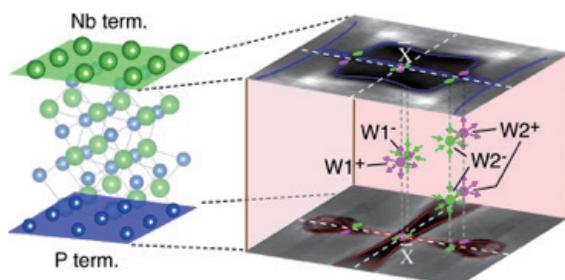


図 1: NbP の Nb 終端面 (上) と P 終端面 (下) の表面フェルミ面とバルクワイルノード (W1, W2)。

ド半金属相が実現する具体的な物質が幾つか理論的に提案されているが、それらを実験的に同定した例は殆ど無い。Si の正方格子を有する層状物質 HfSiS の電子構造を ARPES で決定し、この物質がグライド対称性によって保護された線ノードを有するトポロジカル半金属であることを明らかにした。さらに線ノード近傍で、一次元的に縮退線が伸びる X 字型の表面状態「ディラックノードアーク」(図 2) を観測した [3]。

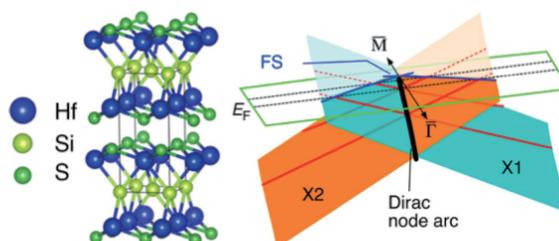


図 2: HfSiS (左) とディラックノードアーク (右)。

2. トポロジカル絶縁体スピンデバイス

トポロジカル絶縁体の表面状態の特徴の一つに、運動量とスピンの向きが 1 対 1 に対応するスピン - 運動量ロッキングというものがある。このスピン偏極を観測するために、強磁性電極による輸送特性の測定が試みられてきたが、スピン - 運動量ロッキングによりスピン緩和長が平均自由行程と等しくなってしまうために微細加工が必要であるという事情もあり、初めての観測の報告は 2013 年とかなり遅い時期になってからであった。具体的には、試料表面で電流をある方向に流した場合、強磁性電極の磁化の向きに応じた信号が輸送特性に観測される結果がこれまでに複数報告されている。

トポロジカル絶縁体の表面状態のキャリアは、化学ポテンシャルの位置によって n 型と p 型のどちらの符号も取りうる。キャリア符号の反転とともにスピンの向きも反転するが、電流に対する応答では同じ電流に対して粒子の流れが n 型と p 型で逆方向になるため、キャリアの符号を反転させても観測される信号は反転せず、スピントランジスタにつながるような応答は期待できない。しかし実験では、その信号の向きに正と負の 2 通りの観測の報告がこれまでにあり、今回の実験では、どのような状況で信号の向きが変わるかを明らかにした (図 3)[4]。

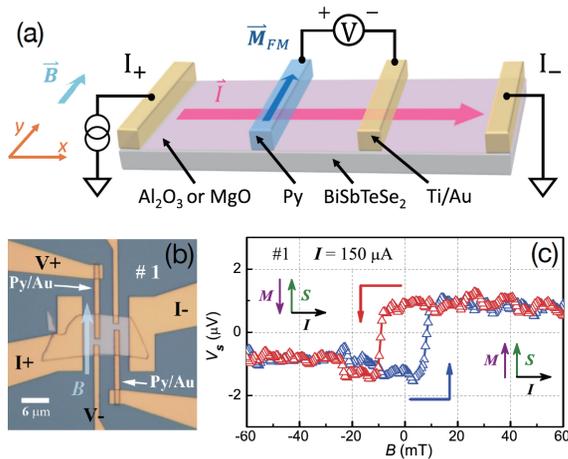


図3: (a) 測定概念図。(b) BiSbTeSe₂ 試料上に作製したデバイスの例。(c) 観測された輸送特性。この試料はバルク伝導性があり、信号が逆に出ている。

バルク絶縁性に乏しい試料では表面における強いバンドベンディングによってバルクバンドのラシュバ分裂が起き、そのバンドにおけるスピンの向きがトポロジカルな表面状態の逆になることから観測される信号が逆向きになることが起こりうる。この知見は今後のスピントランジスタ実現に役立つことが期待される。

3. トポロジカル超伝導接合

トポロジカル超伝導の最有力候補である Sr₂RuO₄ と Nb のハイブリッド構造による超伝導ループとジョセフソン接合を作製し (図4)、dc-SQUID の干渉パターンから超伝導状態に関する情報の抽出を行った [5]。3K 相、Sr₂RuO₄、Ru 金属相が異なる温度で超伝導転移を起こすため多彩な干渉パターンが観察されたが、電流パスの変化、および臨界電流のメカニズムに関して、適切なモデルを構築することにより、干渉パターンの全温度領域の特性を説明できた。一方 Sr₂RuO₄ がトポロジカル超伝導であることの積極的な証拠を検出するには至っていない。

また、トポロジカル超伝導性の決定的な証拠となるエッジ電流を検出するための scanning SQUID を構築し、デバイス内の電流分布のマッピングが可能なることを、磁束量子のピンニング力の極めて弱いタンゲストンカーバイド膜を用いて検証した [6]。この技術を進

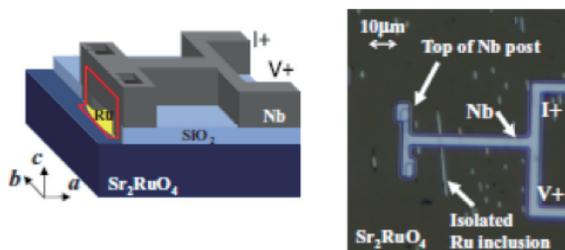


図4: Sr₂RuO₄ と Nb のハイブリッド構造による超伝導ループとジョセフソン接合。

めることによりトポロジカルエッジ電流の検出が可能になると期待される。Scanning SQUID は場所分解能を有する電流分布測定が可能である一方で、試料と SQUID 間距離をサブミクロンまで短くすることは極めて困難であるため、場所と磁場分解能に制限が生じる。これを克服するために、SQUID アレーを構成し、その上に直接ミクロン程度のサイズの Sr₂RuO₄ 試料を直接設置することにより高分解能の実現を目指している。今回は、マイクロアレーを実際に作製して特性の評価を行い、試料中の磁場分布の測定が十分可能であることを示した [7]。

4. トポロジカル絶縁体薄膜の作製と電子状態評価

薄膜の組成を分子線エピタキシー法 (MBE) で精密に制御することで、トポロジカル相転移やワイル半金属の制御手法確立を目的とした研究を行っている。特に、電子構造の変化を ARPES で確認しながら、電気伝導特性を合わせて議論することで、将来的な物質設計に発展させることは有用な技術になるものと期待できる。現在までに、真空一貫搬送による MBE による薄膜合成 (塚崎) と ARPES による電子状態評価 (佐藤宇) のフィードバックシステムの構築が順調に進み、図5に示す (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ の薄膜合成と ARPES 評価を実施した。その結果、Sb 組成の増加に伴い、フェル

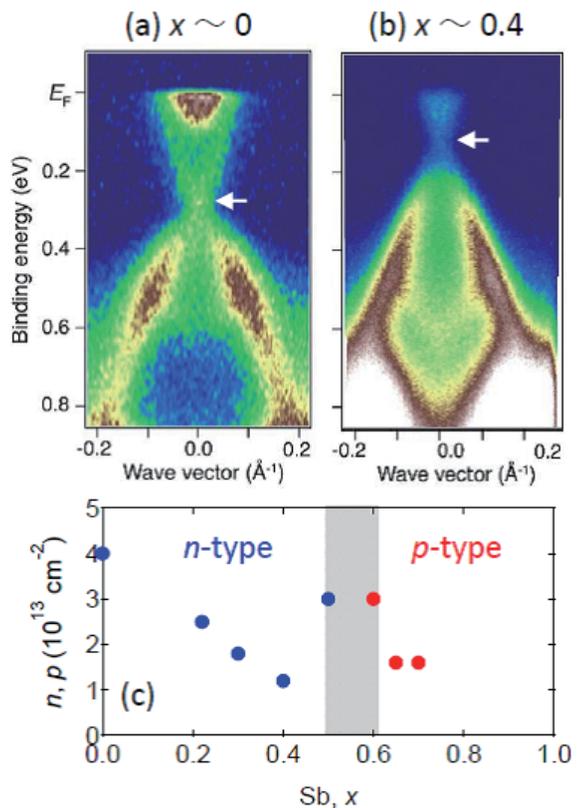


図5: (a),(b) (Bi_{1-x}Sb_x)₂Se₃ の ARPES データ [(a)x~0.2, (b)x~0.4]。(c) Hall 効果測定で求めた電子濃度と正孔濃度の Sb 濃度依存性。

TOPICS

ミ準位が価電子帯にシフトする様子を観測した [図 5(a),(b)]。また、Hall 効果測定の結果においても p 型伝導性を確認しており [図 5(c)]、Bi₂Se₃ ベースの混晶薄膜においても、組成の調整でディラック点近傍にフェルミ準位を制御できる可能性を示した。なお、これらの結果は、さらなる Sb 組成の増加を実現することで、トポロジカル相転移の可能性を検証する土台が整ったことを意味しており、今後の精密組成制御と物性理解によって、トポロジカル相転移の制御手法への指針となることが期待される。

5. 奇周波数クーパー対の理論

5-1.2 重量子ドット・超伝導クーパー対接合

2 重量子ドット・超伝導接合系は、クーパー対スプリッターとして関心が集まっている系である。この系でドットのエネルギー準位、ドットと電極、ドットと超伝導体の結合の大きさを制御することによって、誘起される奇周波数クーパー対を制御できることを明らかにした [8]。特に、2つの量子ドットのレベルがフェルミ準位に位置する共鳴条件を満たす際には、非局所アンドレーエフ過程が奇周波数検出に有効であることが分かった。図 6 のような接合で、左から右の電極に流れる電流には、非局所アンドレーエフ反射 (crossed Andreev reflection) と電子のトンネル過程 (co-tunneling) の両者が寄与するが、共鳴条件を満たす際に零電圧で非局所アンドレーエフ反射による正のコンダクタンスを示すことが、ドットの自由度に関して符号変化する奇周波数クーパー対が存在することに対応することを明らかにした [8]。

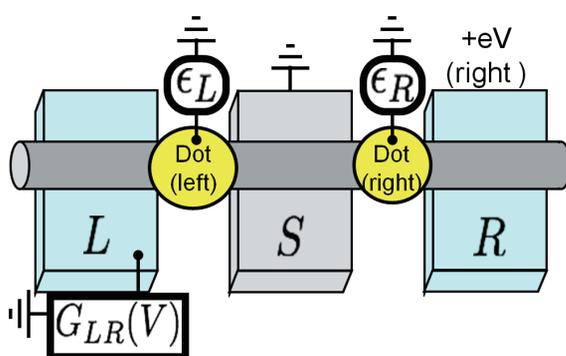


図 6: 非局所コンダクタンスの測定の概念図。

5-2. 2 チャンネル近藤格子における奇周波数クーパー対接合の理論

2 チャンネル近藤格子においては奇周波数ギャップ関数が得られることが星野らにより得られていたが、この系と通常の超伝導体あるいは奇周波数 s 波クーパー対をエッジ状態として持つ p 波超伝導体との接

合系のジョセフソン効果の計算が行われた。得られた結果には虚数を含むような項は現れず物理的なものであった [9]。バルクで奇周波数ギャップ関数が存在する際には、非一様な系であることが必要であることが確認された。

- [1] “物質のなかのワイル粒子”, 相馬清吾, パリティ「物理科学この一年」2017 年 1 月号.
- [2] “Direct observation of non-equivalent Fermi-arc states of opposite surfaces in noncentrosymmetric Weyl semimetal NbP”, S. Souma et al., Phys. Rev. B **93** (2016) 161112R (Editors' suggestion).
- [3] “Dirac-node arc in the topological line-node semimetal HfSiS”, D. Takane et al., Phys. Rev. B **94** (2016) 121108R.
- [4] “Switching of charge-current-induced spin polarization in the topological insulator BiSbTeSe₂”, F. Yang et al., Phys. Rev. B **94** (2016) 075304.
- [5] “Evolution of supercurrent path in Nb/Ru/Sr₂RuO₄ dc-SQUIDS”, Y. Nago et al., Phys. Rev. B **94** (2016) 054501.
- [6] “Development of Magnetization Measurement Devices Using Micro-dc-SQUIDS and a SrRuO Microplate”, Y. Nagao et al., J. Low Temp. Phys. **183** (2016) 292.
- [7] “Development of a Two-Dimensional Micro-SQUID Array for Investigation of Magnetization Spatial Distribution”, D. Sakuma et al., J. Low Temp. Phys. **183** (2016) 300.
- [8] “All-electrical generation and control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots”, P. Burset et al., Phys. Rev. B **93** (2016) 201402.
- [9] “Tunneling and Josephson effects in odd-frequency superconductor junctions: A study on multichannel Kondo chain”, S. Hoshino, K. Yada, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **93** (2016) 224511.