

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 Bi_2Se_3 は、Cu を挿入した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

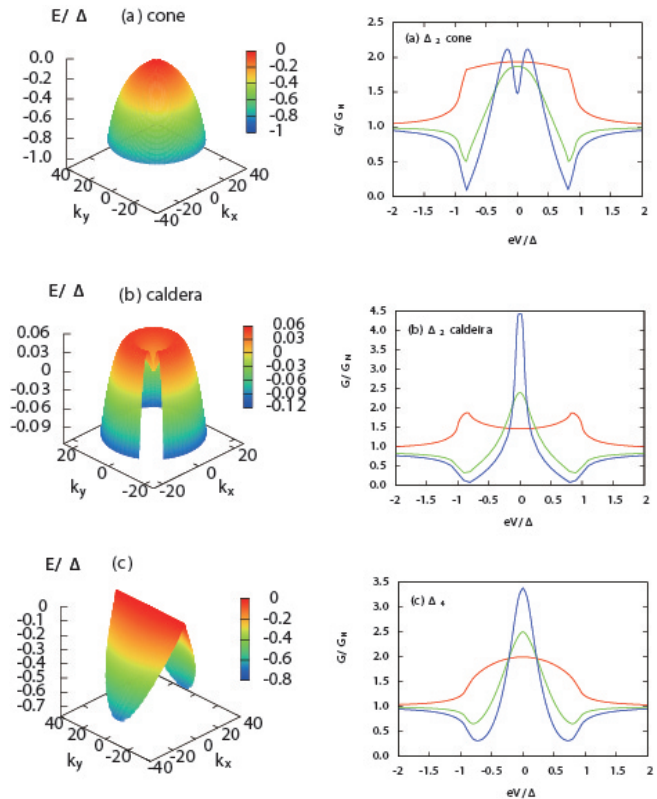


図 1: 超伝導トポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の (111) 表面に現れる様々な分散関係をもつマヨラナフェルミオン (左) とそれが示すトンネルコンダクタンスの振る舞い (右)

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

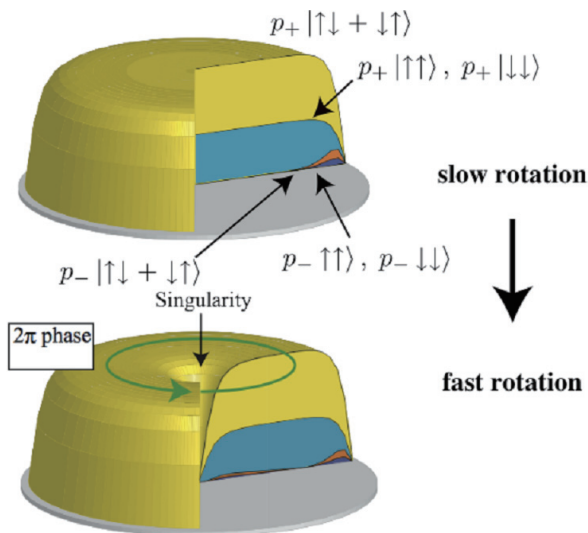


図2：回転超流動 ${}^3\text{He}$ にて安定化する状態の例：
 低回転で安定となる空間一様なA相（上）と回転下にて現れる
 整数量子渦状態（下）

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、これを数値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 ${}^3\text{He}$ -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 ${}^3\text{He}$ 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」を取り込んだ理論モデルを初めて提案し、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).