

計画研究 D01

トポロジカル凝縮系の理論

田仲 由喜夫 / 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

理論家で構成される D 班は、すでに A-C 班の項目で述べてきたように、各班の実験・理論グループとの共同研究を有効に推し進めて研究を行っている。また D 班独自の成果も多数あげた。

1. トポロジカル結晶超伝導体の理論 (佐藤、田仲、水島)

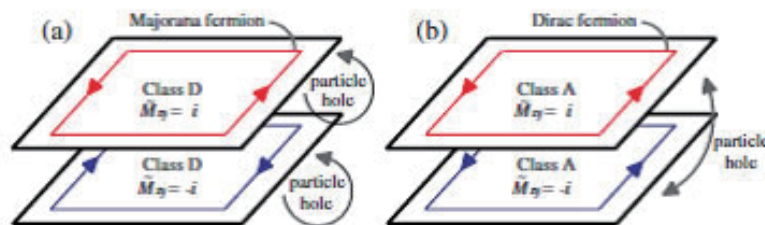
トポロジカル相探求の新しい方向として物質固有の対称性を使った相構造が注目を集めている。佐藤・田仲は物質固有の対称性として結晶対称性を考慮した時、どのような新しいトポロジカル超伝導体が可能かを探求した。特にミラー対称性を考慮した場合、ギャップ関数のミラー変換に対する変換性によって、得られるギャップレス状態がマヨラナフェルミオンになるか、ディラックフェルミオンになるか明らかにし、この理論を Sr_2RuO_4 に応用して、 d ベクトルの回転によって得られるディラックフェルミオンからマヨラナフェルミオンへのトポロジカル量子転移が得られることを明らかにした [1]。更に、佐藤は水島、山影と共にこの理論を $^3\text{He-A}$ 相や UPt_3 へ応用し、その適用範囲が広いことを明らかにした [2,3]。

特に、 UPt_3 の低温低磁場で現れる B 相の超伝導状態はミラー変換と時間反転の同時操作の下で不変性を保つ状態である。B 相ではこの離散対称性に起因した

カイラル対称性が保たれており、故に、トポロジカル相であることがわかった。結果として、B 相表面では離散対称性によって守られたマヨラナ粒子を伴うが、その性質は Sr_2RuO_4 や $^3\text{He-A}$ のそれとは異なる。その表面マヨラナ粒子はイジング的な磁場応答を示し、特定の方向に印加された磁場によってのみ表面マヨラナ状態はギャップを開ける。マヨラナイジングスピンはトンネル効果等を用いて検出可能であることを指摘した。

2. カイラル p 波超伝導体 Sr_2RuO_4 のトンネル効果の理論 (田仲、柏谷 (A 班))

田仲は、矢田と Sr_2RuO_4 のトンネル効果の理論を研究した。矢田による今回の計算は、3 バンドの効果、スピン軌道相互作用をとりいれ、これまでの格子 Green 関数の計算では困難であった現実的な超伝導 Gap の値をいれた計算を行った点に特徴がある。 α バンド β バンドのギャップ関数が γ バンドよりも大きい方が柏谷氏によるトンネル効果の実験を再現しやすいことを見出した [4]。



図：ミラーセクターに対する 2 通りの電子・正孔対称性。

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

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

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

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

5. 冷却原子気体の理論 (上田)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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