

トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

佐藤 昌利 / 京都大学 基礎物理学研究所 教授

【強相関トポロジカル絶縁体の理論】(川上)

川上らは、トポロジカル絶縁体への相関効果を系統的に調べた。特に、トポロジカルモット絶縁体と呼ばれる、相関効果により実現される絶縁相に注目した [1]。この相では、バルクは通常のトポロジカル絶縁体と同じであるが、エッジ状態のみがモット絶縁体となる。特に 2 次元の場合を系統的に調べ、温度がある程度高い場合エッジ状態は電子的でありフェルミ統計に従うが、温度が低下するとエッジ状態はスピン集団励起に移行しボーズ統計に従う。このように温度変化により、エッジ状態の統計性にクロスオーバーがみられる。これはトポロジーと相関効果により初めて現れる現象である。この研究を 2 次元の「弱いトポロジカル絶縁体」にも応用し、相互作用によるトポロジカル分類の reduction $Z \rightarrow Z_4$ の例を示した [2]。また、トポロジカル近藤絶縁体 SmB_6 で観測されたスペクトルの奇妙な温度依存性は、強相関とトポロジーのからみあいにより説明できることを明らかにした [3]。

【p-波コンタクトテンソルの提案】(上田)

フェッシュバハ共鳴により s 波散乱長が発散するユニタリ極限近傍においては Tan の関係式と呼ばれる普遍的な関係式が短距離の相関を特徴づけること知られているが、上田らはトポロジカル超流動が期待される p 波の場合に同様な関係式が成立するかどうかを調べた。その結果、軸対称性が自発的あるいは外部ポテンシャルなどにより破れている p 波フェルミ気体においては、フェッシュバハ共鳴近傍において 9 成分からなる p 波コンタクトテンソルによって短距離相関が完全に特徴づけられることを見出した。また、それを実験的に観測する方法の提案を行った [4]。

【エフィモフ物理における少数多体物理の汎関数繰り込み群における研究】(上田)

共鳴的相互作用をする原子気体においては、2 体の束縛状態が存在しない領域で 3 体の束縛状態が存在しうることがエフィモフによって指摘されている。エフィモフ物理は繰り込み群的な観点からは、固定点ではなくリミットサイクルで特徴づけられるという著しい特徴を持つ。更に、各エフィモフ状態に対して 1 対の 4 量体が付随するという興味深い現象が数値的に知

られていた。上田らはこの現象を汎関数繰り込み群を用いて、エフィモフ状態の半分の周期を持つリミットサイクルとして理解できることを初めて示し、また、それが理論スペースにおける巻き数というトポロジカルな性質から理解できる可能性を指摘した [5]。

【光誘起のカイラル磁気効果】(佐藤昌・田仲 (B01))

ワイル半金属において、円偏光によって生じる新しい種類のカイラル磁気効果が存在することを指摘した。円偏光レーザーを照射するだけで、ワイルフェルミオンのカイラリティーによって、レーザーの照射方向と平行あるいは反平行な方向に電気が流れることを明らかにした [6]。

【蜂の巣格子単層物質のエッジ状態の研究】(佐藤昌・田仲 (B01))

シリセン、ゲルマネン、スタネンは、グラフェンと類似の蜂の巣格子単層物質であるが、その構成原子の大きさゆえに、グラフェンと異なり完全な平坦ではなく、上下方向にわずかに座屈した構造をとる。本研究では、この座屈構造による軌道混合がこれらの物質のトポロジカル表面状態に大きな影響を与えることを指摘した [7]。

【ディラック金属におけるトポロジカル超伝導性】(佐藤昌、前野 (A01)、田仲 (B01))

ディラック金属では、スピン軌道相互作用により異なる角運動量をもつ軌道混成がディラック点近傍で生じる。佐藤昌は、田仲 (B 班) とともにこの特異な構造によって、トポロジカル超伝導性が発現しうることが明らかにした [8]。また、前野 (A01) らが発見したディラック半金属由来の超伝導体 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ にこの理論を適用し、トポロジカル超伝導体である可能性を示唆した [9]。

【非共形空間群によって守られたトポロジカル超伝導ノードの研究】(佐藤昌、柳瀬 (D02 公募))

従来から、スピン軌道相互作用の強い重い電子系ではスピン三重項超伝導体が安定なラインノードを持っていないという定理(いわゆるブランツの定理)が知られている一方、実験では UPt_3 がラインノードをもつス

ピン三重項超伝導体として振舞っていることが問題となっていた。本研究では、K理論を用いて、非共形空間群を考えるとスピン三重項超伝導であってもラインノードが安定に存在することを示し、実際に $U(1)_T$ においてスピン三重項かつラインノードが安定に存在するモデルを与えた [10]。

【中性子星における 3P_2 超流動 状態のトポロジー】(水島・新田)

水島・新田らは中性子星内部で実現されているとされる 3P_2 超流動 状態のトポロジーについて議論した [11]。中性子星内部は高密度の中性子で構成されており、クーパー対の全角運動量が $J=2$ であるスピン 3 重項 p 波超流動状態の存在が示唆されている。弱結合極限のゼロ磁場下では ${}^3\text{He-B}$ と類似したトポロジカル構造を持つ 1 軸性ネマティック相が安定化するが、磁場下では D_2 対称な 2 軸性ネマティック相と D_4 対称な 2 軸性ネマティック相が安定化する可能性があることがわかった。さらに、強結合効果を取り込むことで非ユニタリ状態であるサイクリック相が安定化する。ネマティック相では 2 次元マヨラナ粒子が表面などに局在するが、サイクリック相では 3 次元マヨラナ粒子が現れることが明らかとなった。

【 3P_2 超流動における渦】(新田)

中性子星内部では中性子が超流動状態になっているが、特に内部の高密度領域では 3P_2 ペアリングと呼ばれる、スピントリプレット、軌道角運動量が 2 で全角運動量が 2 という状態になっている。この領域において Ginzburg-Landau 理論の範囲において、任意の大きさの外部磁場下での基底状態を決定し、整数渦の構造を詳しく調べた [12]。また、マグネターと呼ばれる非常に強い磁場をもった中性子星では、 D_4 二軸性ネマティック相が基底状態となり、半整数非アーベリアン渦が現れることを指摘し、半整数渦の構造を詳しく調べた [13]。さらに、整数渦の低エネルギー有効理論がダブル・サイン・ゴルドン模型になること示し、その上のキंकの上で自発磁化が反転することを見出した [14]。

【カラー超伝導における渦】(新田)

物質が非常に高密度になるとクォークがペアを組んでカラー超伝導状態になる。ここでは、金属超伝導の類似として、Meissner 効果によって非アーベリアン渦と呼ばれるカラー磁束が存在する。そこで、非アーベリアン渦の周りには Aharonov-Bohm 効果があ

ることを発見した [15]。また、非アーベリアン渦には、マヨラナフェルミオンが局在するが、同時に南部 Goldstone モードも局在する。これらの相互作用を決定した [16]。さらに、渦に局在する南部 Goldstone モードの低エネルギー有効理論はこれまで特異ゲージで構成されていたが、特異ゲージを取らずに構成した [17]。

【超流動ヘリウム 3-B 相におけるホール応答】(西田)

超流動ヘリウム 3-B 相の低エネルギーの有効場の理論を構築することで、系に外部磁場を印加した際にホール粘性が現れることを示した。特に、ホール粘性は系に誘起される軌道角運動量密度により決まること、その軌道角運動量密度の大きさは外部磁場と帯磁率により決まることを示した。また、系にホール粘性が生じたことの物理的帰結として音波に横波成分が混ざること示し、その大きさを定量的に見積もった [18]。

川上は野村健太郎 (B01) 著「トポロジカル絶縁体・超伝導体」(丸善, 2016) の編集を行った。また、佐藤昌は藤本 (A01)[19] および安藤 (B01 連携)[20] それぞれとトポロジカル超伝導体に関するレビュー論文を執筆した。

- [1] T. Yoshida and N. Kawakami, Phys. Rev. B **94**, 085149 (2016); H.-Q. Wu et al., Phys. Rev. B **94**, 165121 (2016).
- [2] T. Yoshida and N. Kawakami, arXiv:1610.04650.
- [3] R. Peters et al., Phys. Rev. B **93**, 235159 (2016).
- [4] S. M. Yoshida and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 033611 (2016).
- [5] Y. Horinouchi and M. Ueda, Phys. Rev. A **94**, 050702(R) (2016).
- [6] K.Taguchi, T. Imaeda, M. Sato, and Y. Tanaka, Phys. Rev. B **93**, 201202(R)(2016).
- [7] A.Hattori, S. Tanaya, K. Yada, M. Araidani, M. Sato, Y. Hatsugai, K. Shiraishi, and Y. Tanaka, arXiv:1604.04717.
- [8] T. Hashimoto, S. Kobayashi, Y. Tanaka, and M. Sato, Phys. Rev. B **94**, 014510 (2016).
- [9] M. Oudah et al, Nat. Commu. **7**, 13617 (2016).
- [10] S. Kobayashi, Y. Yanase, and M. Sato, Phys. Rev. B **94**, 134512 (2016).
- [11] T. Mizushima, K. Masuda, and M. Nitta, arXiv:1607.07266.
- [12] K.Masuda, and M.Nitta, Phys.Rev. C **93** 035804 (2016).
- [13] K.Masuda, and M.Nitta, arXiv:1602.07050.
- [14] C.Chatterjee, M.Haberichter, and M.Nitta, arXiv:1612.05588.
- [15] C.Chatterjee, and M. Nitta, Phys.Rev. D **93**,065050 (2016).
- [16] C.Chatterjee, N.Cipriani, and M.Nitta, Phys. Rev. D **93**, 065046 (2016).
- [17] C.Chatterjee, and M.Nitta, arXiv:1612.09419.
- [18] K. Fujii and Y. Nishida, arXiv:1610.06330.
- [19] M. Sato and S. Fujimoto, J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 072001