

## 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

計画研究 D01「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」は、トポロジカル量子相とそこに発現するエキゾチック準粒子の基本的性質を理論的に解明し、さらに個々の物質の詳細によらない普遍的な物理現象と法則を探究することを目的としています。特に、既存の枠組みを超えた発想と分野を越えた概念の融合により、より広い観点から基礎学理の構築を目指しています。以下に本年度得られた成果をまとめます。

### 【強相関電子系・非平衡系におけるトポロジカル相転移】(川上)

川上らは、強相関電子系におけるトポロジカル相転移の理論研究を行いました。特に、重い電子系超格子  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  のトポロジカル超伝導とそれに付随するマヨラナ準粒子の性質を調べました [1]。その結果、 $\text{YbCoIn}_5$  の枚数を増やしていくと 4 枚目でトポロジカル相から自明相に相転移が生じ得ることを示しました。(D02 の柳瀬および本領域ポスドクの吉田らとの共同研究)。また、銅酸化物高温超伝導体の薄膜に円偏光レーザーを照射することでトポロジカル超伝導が誘起されること (D02 柳瀬氏らとの共同研究) [2]、さらに近藤絶縁体  $\text{SmB}_6$  にレーザーを照射することで種々のワイル半金属が誘起されることを示しました [3]。また、D04 の小布施らと協力することで、PT 対称性をもつ開放系の量子ウォークでトポロジカル相が実現することを理論的に提案し、実験的に検証しました [4]。

### 【冷却原子気体理論】(上田)

パリティ-時間 (PT) 対称な相互作用の強い冷却原子系において、PT 対称性の破れと量子臨界現象が競合する結果発現する新奇物理現象の探索を行いました。その結果、PT 対称性が破れた 2 次元量子臨界相において超流動相関が増強されることを見出しました。これは、Berezinskii-Kosterlitz-Thouless の臨界現象と著しい対照をなしています [5]。また、PT 対称な非エルミートな系においては、環境に散逸した情報を完全に取り戻すことができ一方で、PT 対称性

が破れた相においてはいかなる情報の回復もできないことを示しました。このことは、PT 対称の臨界点が、系と環境との情報の流れの可逆-不可逆性の分かれ目となることを示しています [6]。

### 【トポロジカル結晶物質の定式化】(佐藤昌)

現実の物質のトポロジカルな性質を明らかにするために、時間反転対称性や超伝導体をもつ対称性である電子・正孔対称性の他に、個々の物質がもつ結晶対称性を考慮にいれ、トポロジカル結晶物質の理論を数学の理論である K 理論を使い定式化しました。これは、あらゆる空間群および磁性空間群を考慮に入れることができ、非従来型超伝導体も系統的に取り扱い可能となっています [7]。これは数学者 (五味氏) らとの共同研究による成果です。

### 【トポロジカル超伝導体のレビュー】(佐藤昌)

トポロジカル超伝導体の理論および実験の現状を、B01 の連携研究者であったケルン大学の安藤氏とともに入門的内容からはじめてまとめました [8]。

### 【ヘリカルマヨラナフェルミオンの異方的磁気応答】(佐藤昌)

時間反転対称なトポロジカル超伝導体の表面に現れるヘリカルマヨラナフェルミオンは、ゼーマン磁場により時間反転対称性を破ることで、磁場の方向に依存して、ギャップが生じるような応答をします。本研究では、B01 の田仲氏と協力することで、結晶対称性に依存して、どのような異方的磁気応答が生じるかを明らかにしました [9]。

### 【中性子星内部 ${}^3\text{P}_2$ 超流動および $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$ のトポロジジー】(水島、新田)

水島と新田は、中性子星内部の  ${}^3\text{P}_2$  超流動状態がトポロジカル超流動体であることを明らかにしました [10]。  $10^{15}\text{G}$  にも及ぶ磁場を伴う中性子星内部では、1 軸性ネマティック状態から 2 軸性ネマティック状態へ相転移することを示しました。さらに、2 軸性ネマ

ティック状態も2つの相に細分化され、温度の低下とともに  $D_4$  対称な状態から  $D_2$  状態への相転移が起ることを見出しました。これらすべてのネマティック状態は DIII クラスに分類され、マヨラナ準粒子が存在します。さらに、水島と新田は、 $U_{1-x}Th_xBe_1_3$  について研究を行いました [11]。この物質では、ドーピングに応じて、異なる3つの超伝導相が存在します。3つの相が  $^3P_2$  超流動相の秩序状態と同じであることを指摘し、そのトポロジーや表面状態を議論しました。特に、サイクリック相とよばれる非ユニタリ状態に注目し、チャーン数やカイラル対称性によって守られた巻きつき数を導入することで、その複雑な表面アーク構造を明らかにしました。本研究は D01 研究項目内連携による成果です。

#### 【超流動 $^3He-B$ におけるボース・フェルミ励起】(水島)

$^3He-B$  は典型的な DIII トポロジカル超流動体であり、低エネルギー準粒子はマヨラナ粒子として振舞います。一方で、Nambu-Goldstone ボソンや Higgs ボソンなど様々なボース型励起が存在します。水島はこれらボソン励起とフェルミ励起の質量ギャップの間には南部総和則が成り立つことを示しました [12]。さらに、表面に束縛された massive Higgs ボソンが存在すること、それらのボソン励起とマヨラナ粒子間の結合に関する選択則が存在すること等を明らかにしました [13]。これらは、Topo-Q による REP プログラムの支援による成果です。

#### 【マヨラナ・フェルミオンと超対称性】(新田)

トポロジカル超伝導ワイヤーの端にはゼロエネルギーのマヨラナ・フェルミオンが局在しますが、十分離れていない場合は相互作用によりエネルギーを持ちます。ジョセフソン結合で相互作用している複数のマヨラナ・フェルミオンがリング状になっている場合、たった一つの相互作用を操作することで、全体に非局所的なゼロ・エネルギーのマヨラナ・フェルミオンが現れることを見出し、超対称性が現れることを示しました。またマヨラナ・フェルミオンの検出に応用できることを示しました [14]。

#### 【冷却原子気体における共形対称性と有質量南部ゴールドストーンモード】(新田)

$2+1$  次元の非線形シュレディンガー方程式に非相対論的共形対称性 (シュレディンガー対称性) がある

ことは知られていますが、冷却原子のようなトラッピング・ポテンシャルがある場合、通常はその対称性が陽に破られると思われがちであるが、実は修正した対称性があります。我々は、最も一般的な修正したシュレディンガー対称性を構成し、さらにそれが基底状態で自発的に破れていること、それに伴う南部ゴールドストーンモードが有限質量であることを示しました [15]。さらに、空間3次元で、トラッピング・ポテンシャルが3方向に伸びている場合に適用することで、3方向に伝播する有質量南部ゴールドストーンモードを調べました [16]。

#### 【相互作用するフェルミオンのカシミール力】(新田)

有限区間において、線形近似したボゴリューボフ・ドジャン方程式の自己無頓着な厳密解析解を構成しました。さらに、カシミール力の計算し、結合定数の変化に対して、カシミール力の符号が変わりうることを発見しました [17]。

#### 【 $^3P_2$ 超流動の渦のソリトン励起】(新田)

中性子がペアを組んで超流動状態になることは、中性子星の内部で実現されており、特に密度が高い場合は、 $^3P_2$  ペアリングが実現されていると思われています。 $^3P_2$  超流動の渦糸解を構成し、低エネルギー励起を調べることで、ダブル・サインゴルドン模型が現れることを発見し、キック解を構成しました [18]。

#### 【カラー超伝導の非アーベリアン渦の有効理論】(新田)

物質が非常に高密度になると、クォークがペア組むをカラー超伝導状態になります。この状態には、非アーベリアン渦が実現しています。渦の低エネルギーの有効理論は CP(2) 模型になることが知られていますが、これまでは特異ゲージによる計算しかありませんでした。今回は、これをレギュラーゲージで計算を実行することで有効理論を構成しました [19]。

#### 【ジョセフソン接合の場の理論による定式化】(新田)

ジョセフソン接合を、場の理論におけるドメイン壁で構成することで、ジョセフソン接合系を場の理論で扱う方法を提唱しました。磁場をかけた場合、ジョセフソン渦が絶縁体に入り込みますが、ジョセフソン渦のダイナミクスを解析的に扱うことが出来るようになりました。特に、3つの超伝導体がフラストレーション

ンのある場合に分数ジョセフソン渦が現れることがわかりました [20]。

【反平行磁場中における 2 次元フェルミ気体】 (西田)

反平行磁場中における 2 次元フェルミ気体の相構造について研究を行いました [21]。その結果、超流動相と量子スピンホール絶縁体相が現れること、それらは 2 次相転移で接していること、その普遍クラスは希薄ボース気体あるいは XY 模型のものになること、などを見出しました。また、反平行磁場の存在によって超流動ギャップが著しく大きくなることも示し、冷却原子を用いた実現可能性について議論しました。

- [1] "Fate of Majorana Modes in  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  Superlattices: A Test Bed for the Reduction of Topological Classification"  
T. Yoshida, A. Daido, Y. Yanase and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **118**, 147001 (2017).
- [2] "Laser-induced topological superconductivity in cuprate thin films"  
K. Takasan, A. Daido, N. Kawakami, and Y. Yanase, Phys. Rev. B **95**, 134508 (2017).
- [3] "Laser-irradiated Kondo insulators: Controlling the Kondo effect and topological phases"  
K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **96**, 115120 (2017).
- [4] "Observation of topological edge states in parity-time-symmetric quantum walks"  
L. Xiao et al., Nat. Phys. **13**, 4204 (2017).
- [5] "Parity-time-symmetric quantum critical phenomena"  
Y. Ashida, S. Furukawa, and M. Ueda, Nat. Commun. **8**, 15791 (2017).
- [6] "Information Retrieval and Criticality in Parity-Time-Symmetric Systems"  
K. Kawabata, Y. Ashida, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **119**, 190401 (2017).
- [7] "Topological crystalline materials: General formulation, module structure, and wallpaper groups"  
K. Shiozaki, M. Sato, K. Gomi, Phys. Rev. B **95**, 235425 (2017).
- [8] "Majorana Fermions and Topology in Superconductors"  
M. Sato, Y. Ando, Rev. Mod. Phys. **80**, 076501 (2017).
- [9] "Anisotropic Magnetic Responses of Topological Crystalline Superconductors"  
Y. Xiong, A. Yamakage, S. Kobayashi, M. Sato, Y. Tanaka, Crystal, **7**, 00058 (2017).
- [10] " $^3\text{P}_2$  superfluids are topological"  
T. Mizushima, K. Masuda, and M. Nitta, Phys. Rev. B **95**, 140503(R) (2017).
- [11] "Topology and symmetry of surface Majorana arcs in cyclic superconductors"  
T. Mizushima and M. Nitta, Phys. Rev. B **97**, 024506 (2018).
- [12] "On the Nambu fermion-boson relations for superfluid  $^3\text{He}$ "  
J. A. Sauls and T. Mizushima, Phys. Rev. B **95**, 094515 (2017).
- [13] "Bosonic Surface States and Acoustic Spectroscopy of Confined Superfluid  $^3\text{He-B}$ "  
T. Mizushima and J. A. Sauls, arXiv:1801.02277.
- [14] "Supersymmetry in closed chains of coupled Majorana modes"  
Z. Huang, S. Shimasaki, and M. Nitta, Phys. Rev. B **96**, 220504 (2017).
- [15] "Conformal symmetry of trapped Bose-Einstein condensates and massive Nambu-Goldstone modes"  
K. Ohashi, T. Fujimori, and M. Nitta, Phys. Rev. A **96**, 051601 (2017).
- [16] "Two-dimensional Schrödinger symmetry and three-dimensional breathers and Kelvin-ripple complexes as quasi-massive-Nambu-Goldstone modes"  
D. A. Takahashi, K. Ohashi, T. Fujimori, and M. Nitta, Phys. Rev. A **96**, 023626 (2017).
- [17] "Sign Flip in the Casimir Force for Interacting Fermion Systems"  
A. Flachi, M. Nitta, S. Takada, and R. Yoshii, Phys. Rev. Lett. **119**, 031601 (2017).
- [18] "Collective excitations of a quantized vortex in  $^3\text{P}_2$  superfluids in neutron stars"  
C. Chatterjee, M. Haberichter, and M. Nitta, Phys. Rev. C **96**, 055807 (2017).
- [19] "Low-energy effective worldsheet theory of a non-Abelian vortex in high-density QCD revisited: A regular gauge construction"  
C. Chatterjee, and M. Nitta, Phys. Rev. D **95**, 085013 (2017).
- [20] "Field theoretical model of multilayered Josephson junction and dynamics of Josephson vortices"  
T. Fujimori, H. Iida, and M. Nitta, Phys. Rev. B **94**, 104504 (2016).
- [21] "Two-dimensional Fermi gas in antiparallel magnetic fields"  
T. Anzai and Y. Nishida, Phys. Rev. A **95**, 051603 (2017).