

## トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 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、さらにそれらの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。

### 【強相関および非平衡系におけるトポロジカル現象】(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、強相関効果がトポロジカルな性質を決定的に変える現象として、相互作用による冷却フェルミ原子系でのトポロジカルZ分類のブレイクダウン [1]、サウレスポンプのブレイクダウン [2] を明らかにしました。さらに、強相関系の新たなトポロジカルな性質として重い電子系の非エルミート性に着目した性質を明らかにしました (図1) [3]。これは Liang Fu らの最近の指摘に刺激されたもので、今後、大きく研究が進展していくテーマであると思います。また、非平衡系で初めて実現する時間結晶に新たな実現方法を提案しました [4]。

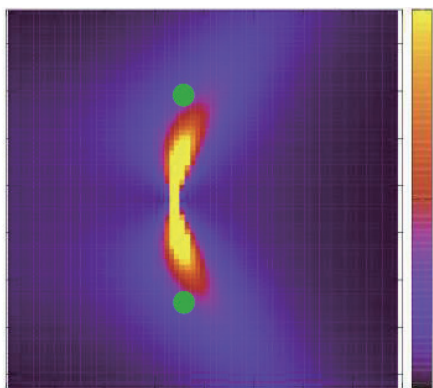


図1: 近藤格子模型における非エルミート由来のフェルミアークと例外点。文献 [3] より転載。

### 【非エルミートハミルトニアン系のトポロジカル相の分類と非エルミート近藤問題】(上田)

上田らは、非平衡開放系を記述する有効モデルである非エルミートハミルトニアンが発現するトポロジカル相の分類を行いました。有効ハミルトニアンが非エルミートな系はパリティ時間対称な系、ボース・アインシュタイン凝縮系、エキシトナーポラリトン系など多くの例が知られていますが、トポロジカル相の系統的な分類はこれまでなされていませんでした。我々は、非エルミート系におけるエネルギーギャップやトポロジカル相の概念を明確化し、それに基づいて非エルミート系のトポロジカル相の分類を行い、さらにバルク-エッジ対応について議論しました [5]。非エルミート系ではエネルギーが複素数になるために時間反転対称性と粒子-正孔対称性がトポロジカルに統一されるという著しい性質があり、非エルミート系に特有のトポロジカル相を生みます [6]。

アルカリ原子を使った近藤系は非弾性散乱が重要になると予想され、非エルミート系の近藤ハミルトニアンで記述されます。この系では、繰り込み群フローが出発点に戻るというg定理を破る特異な振る舞いを見出しました [7] (図2、川上らとの共同研究)。

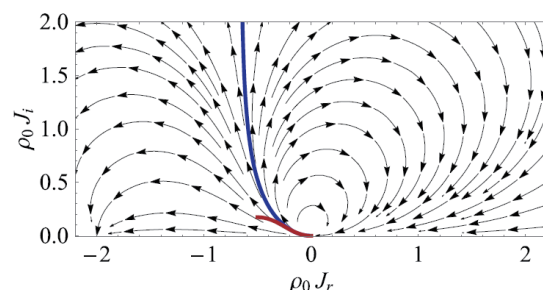


図2: 非エルミート近藤模型の繰り込み群フローを2ループオーダーで計算したもの。青(赤)の曲線は繰り込み群方程式の解析解(ペーテ仮設解)から得られた臨界曲線。文献 [7] の図1より転載。

## TOPICS

### 【トポロジカル超伝導の研究】(佐藤)

トポロジカル物質のような強いスピン軌道相互作用をもつ系では、電子の軌道角運動量とスピンの混成が生じ、そのために通常のスピン 1/2 電子でなく、スピン 3/2 のような高次スピンを持つ電子が存在します。佐藤らは、トポロジカル相を実現する新しい物質系として、高次スピンをもつ系を考え、そのトポロジカル絶縁体およびトポロジカル超伝導体の理論を展開しました (図 3) [8,9]。特に、A01 の前野らによるアンチペロブスカイト構造をもつ酸化物超伝導体  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$  の発見に動機を得て、スピン 3/2 電子のトポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体の理論を構築し、これらの系では高次スピンに由来する高次のトポロジカル数をもつ超伝導体を実現されることを見出しました。さらに  $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$  がトポロジカル量子相転移近傍にあり、そのため特異なノード構造をもつことを明らかにしました。また、ディラック半金属のトポロジカル超伝導体の理論を鉄系超伝導体 FeSe に応用し、FeSe が複数のトポロジカル超伝導相を同時に持ちうることを提案しました [10]。また、D02 の柳瀬との共同で、非共形型結晶対称性によって守られた超伝導体ノード構造のトポロジカルな構造を解析しました [11]。

### 【ワイル超伝導における異常な輸送現象】(水島)

水島らは、ワイル超伝導体におけるトンネル現象や熱輸送現象についての研究を行いました。重い電子系  $\text{U}_{1-x}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$  の非ユニタリー超伝導状態において、その非自明なチャーン数や巻きつき数と表面フェルミアークの関係性を議論し、これらの特徴がトンネル伝導度の測定を通して観測可能であることを示しました (D01 新田との共同研究) [12]。また、A01 の藤本らと共同でワイル超伝導体におけるカイラル電磁場応答や熱輸送現象についての研究を行いました [13,14]。特に、従来の超伝導の輸送現象研究において用いられる準古典 Keldysh 理論へ torsion 磁場や Berry 曲率の効果を取り入れました。この拡張された理論を用いて、ワイル超伝導体において一般に負の熱磁気抵抗が存在することを明らかにしました。

### 【超伝導体と素粒子模型におけるヒッグスモード】(新田)

超伝導体におけるヒッグスモードが現れる条件を対称性の観点から明らかにしました [15]。素粒子の標準模型を越える模型の一つの 2 ヒッグスダブルレット模型において、トポロジカルに安定な非アーベリアン渦が存在し、ドメイン壁に接合していることを示し現象論的制限を議論しました (図 4) [16]。さらに、その渦の構造を詳しく解析しました [17]。

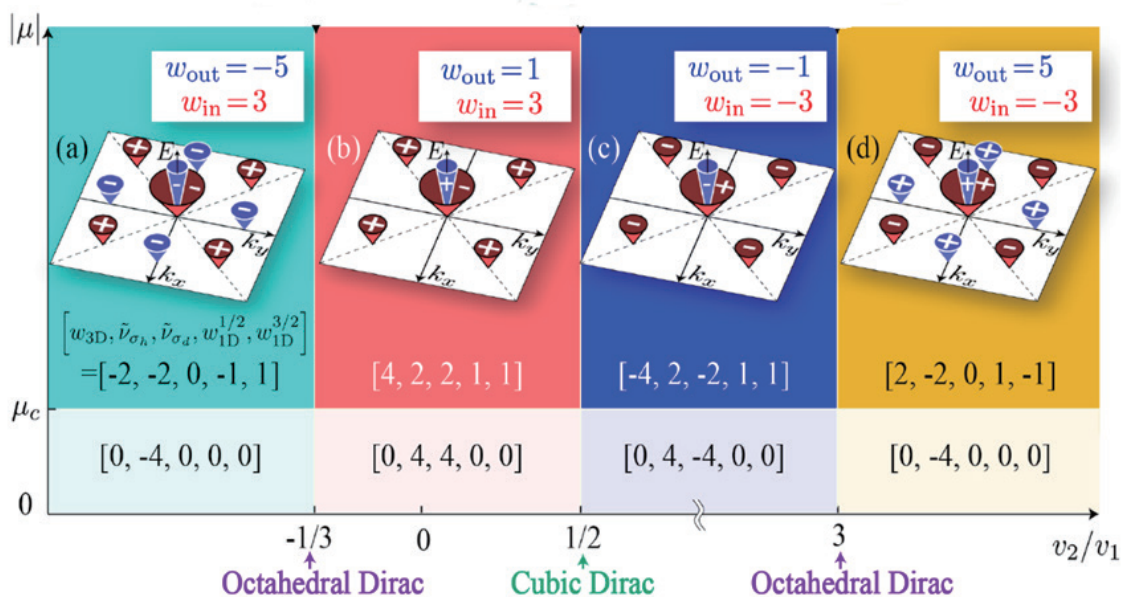


図 3: ドープしたスピン 3/2 トポロジカル絶縁体のトポロジカル超伝導相。文献 [8] より転載。

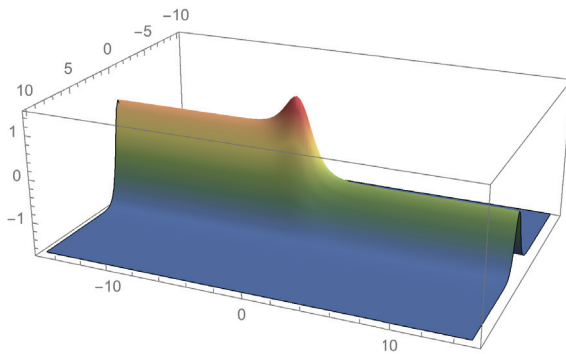


図4：素粒子の2ヒッグス模型における非アーベリアン渦とドメイン壁の接合。文献 [16] より転載

### 【3 + 1次元におけるボソン・フェルミオン間の双対性】(西田)

西田らは、ボソン・フェルミオン間の双対性に関する理論研究を行いました。特に、3+1次元において、自由なディラックフェルミオンと真空角  $\theta = \pi$  を伴うスカラー QED が双対であること、フェルミオン側におけるトポロジカル相転移がボソン側におけるヒッグス・閉じ込め相転移に対応していること、前者におけるディラックフェルミオンは後者におけるスカラーボソンとダイオン対の複合粒子として実現されていること、などを新たに提唱しました [18]。また、散乱長が時間空間的に変化する場合の流体力学に関する理論研究も行いました。その結果、散乱長の変化が流体の膨張収縮と対応するように体積粘性を伴って応力テンソルに現れることを見出しました [19]。現在、この理論的成果に基づいて体積粘性を測定するための実験が進行中です。

- [1] T. Yoshida, I. Danshita, R. Peters and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **121**, 025301 (2018).
- [2] M. Nakagawa, T. Yoshida, R. Peters, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **98**, 115147 (2018).
- [3] T. Yoshida, R. Peters and N. Kawakami, Phys. Rev. B **98**, 035141 (2018).
- [4] K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **121**, 093001 (2018).
- [5] Z. Gong, Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda, Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).
- [6] K. Kawabata, S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda, Nat. Commun. **10**, 297 (2019).
- [7] M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **121**, 203001 (2018).
- [8] T. Kawakami, T. Okamura, S. Kobayashi, and M. Sato, Phys. Rev. X **8**, 041026 (2018).
- [9] I. Kuzmenko, T. Kuzmenko, Y. Avishai, and M. Sato, Phys. Rev. B **98**, 165139 (2018).
- [10] Z. Peng et al, Nature Physics **15**, 41 (2019).
- [11] S. Kobayashi, S. Sumita, Y. Yanase, and M. Sato, Phys. Rev. B **97**, 180504(R) (2018).
- [12] T. Mizushima and M. Nitta, Phys. Rev. B **97**, 024506 (2018).
- [13] T. Matsushita, T. Liu, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **97**, 134519 (2018).
- [14] T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima, A. Tsuruta, and S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. **121**, 207002 (2018).
- [15] S. Tsuchiya, D. Yamamoto, R. Yoshii and M. Nitta, Phys. Rev. B **98**, 094503 (2018).
- [16] M. Eto, M. Kurachi and M. Nitta, Phys. Lett. B **785**, 447 (2018).
- [17] M. Eto, M. Kurachi and M. Nitta, JHEP **1808**, 195 (2018).
- [18] T. Furusawa and Y. Nishida, arXiv:1810.11808.
- [19] K. Fujii and Y. Nishida, Phys. Rev. A **98**, 063634 (2018).