

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。

【強相関系における非エルミート量子現象】

川上らは、強相関電子系における非エルミートトポロジカル現象の理論研究を行いました。まず、2バンドの重い電子系において、温度上昇により一粒子スペクトルに非エルミート系特有の例外点とそれに付随したフェルミアークが現れることを示しました [1]。その結果を、カイラル対称性をもつ強相関系（パイロクロア格子）に拡張し、カイラル対称性に守られた例外トラスが出現することを示しました [2]。また、上田らと協力して、散逸効果を複素引力相互作用として取り込んだ非

エルミート超伝導の平均場理論を構築し、散逸の増加にともなって、例外線で特徴づけられるリエントラント超伝導転移が出現することを示しました [3]。

【非エルミート系およびフロケ系のトポロジカル相と多体局在】

上田らは、非エルミート系のトポロジカル相の研究とその多体効果の研究を行いました (図1)。具体的には、2次元の非エルミート系で高次トポロジカル絶縁体のコーナー状態が4つのコーナーのうちの1か所でゼロエネルギーの局在モードを持つことを示しました [4]。非エルミート系では一般にエネルギー固有値は複素数になりますが、時間反転対称な系では多体局在が起こるとエネルギー固有値が実数へと転移することを見出しました [5]。Nielsen-Ninomiya の定理によると格子系ではワイルフェルミオンは単独では存在できません。しかし、周期的に駆動された3次元格子系ではワイルフェルミオンを単独で創り出すことができ、カイラル磁気効果を生じることを示しました [6]。

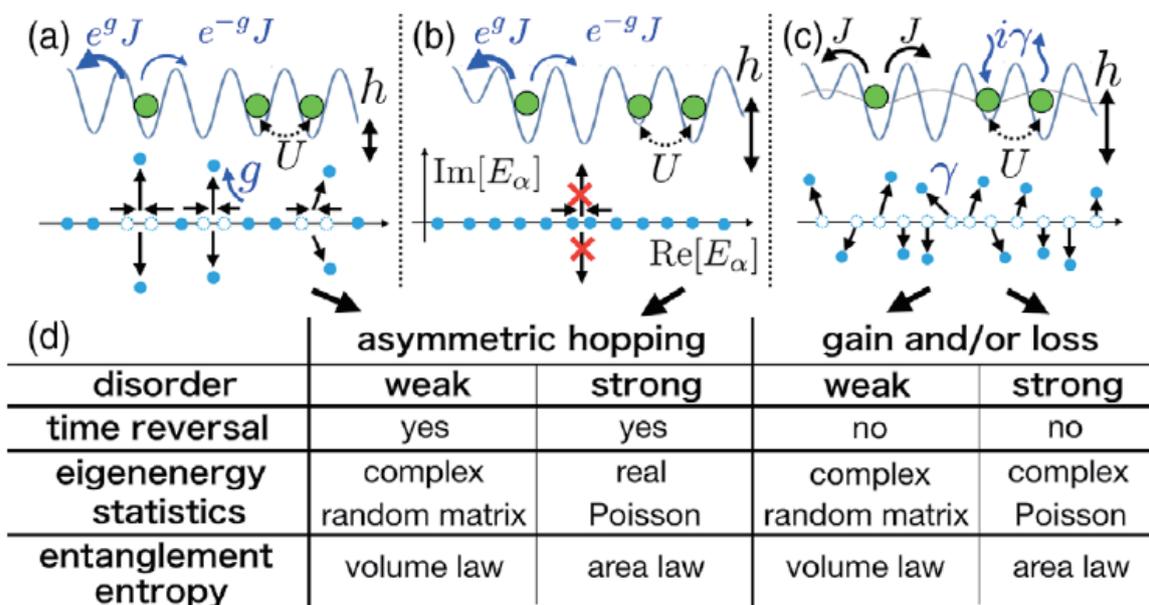


図1：(a) 非対称ホッピングモデルでは2個の実固有値が摂動の影響で複素共役対になる。(b) しかし、乱れが強くなり多体局在を起こすと固有値は実数にとどまる。(c) 系が外界とエネルギーのやり取りをすると、エネルギーは個別に複素数となる。(d) 対応する準位統計とエンタングルメントエントロピー。

佐藤らは、非エルミートトポロジカル相の分類理論を提出しました。まず、上田らとの共同研究において、非エルミート系特有の対称性およびギャップ構造を特定し、それに基づき非エルミートトポロジカル相の分類を行いました[7]。さらに、非エルミート系特有のギャップレス構造である例外点のトポロジカルな分類を与え、その応用として、トポロジカルダンベル(図2)という「端に例

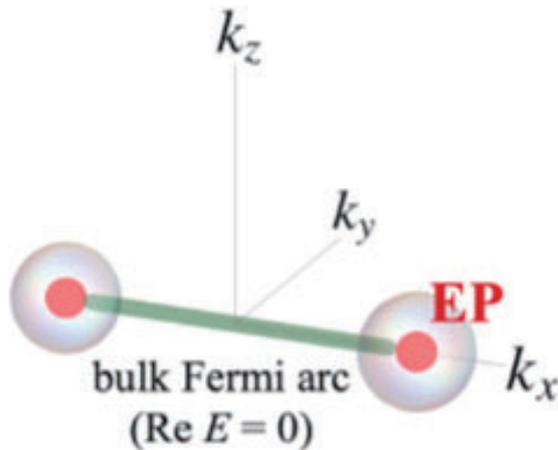


図2：トポロジカルダンベル

外点をもつライン上のギャップレス構造」が可能であることを初めて見出しました[8]。また、非エルミート型のスピン軌道相互作用をもつ超伝導

ナノワイヤを調べ、無限小の摂動によりトポロジカル相転移が生じるという興味深い現象を報告しました[9]。

【マヨラナフェルミオンの磁気応答理論】

佐藤らは、B01 班の田仲との共同研究において、マヨラナ励起の磁気応答理論を構築し、高次スピン超伝導体において磁気八重極の応答が可能となることを見出しました[10]。

【ネマティック超伝導】

水島らは、 $M_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($M=\text{Cu}, \text{Sr}, \text{Nb}$) に代表されるネマティック超伝導における Higgs ボソンや電磁応答についての理論研究を行いました (A01 藤本らとの共同研究、図3)。特に、フェルミ面の形状変化によってネマティック・カイラル相転移が引き起こされること、Chiral Higgs モードというボソン励起がソフト化することなどを示しました[11]。ボソン励起のソフト化は電磁波吸収スペクトルにて観測可能であることを指摘しました。さらに、新田らとの共同研究により中性子星内部において D_2 対称な 2 軸性ネマティック超流動から D_4 対称な状態への相転移が存在することを示し、量子渦に束縛された準粒子構造[12] や異常なユニバーサリティクラスを明らかにしました[13]。

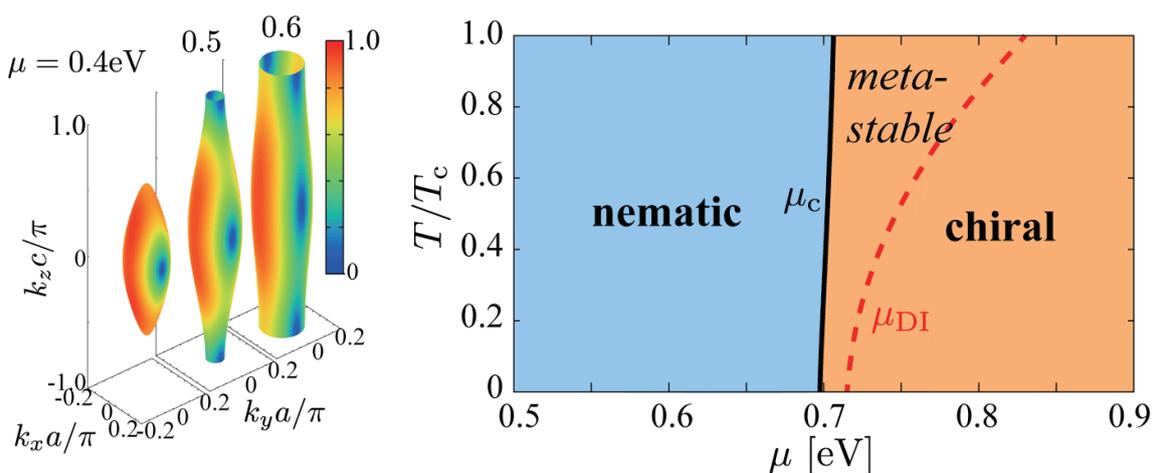


図3：フェルミ面形状変化(左)とネマティック・カイラル相転移(右)

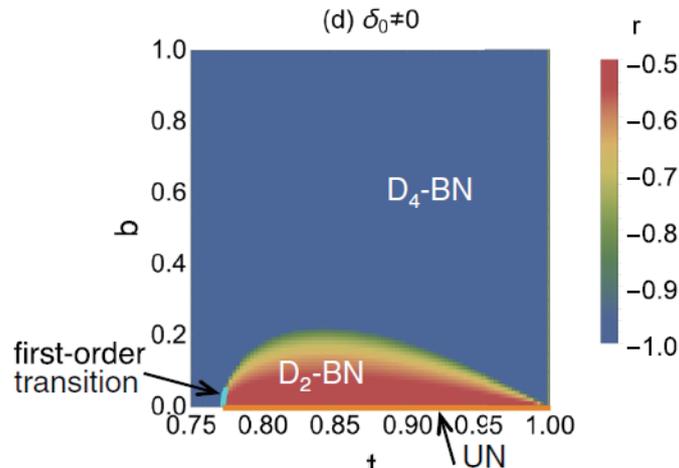


図4：中性子内部の磁場温度相図

【中性子星におけるスピン3重項P波中性子超流動】

新田らは、中性子星内部で実現されていると期待されている、スピン3重項P波(3P_2)の中性子超流動のGinzburg-Landau理論の高磁場の補正を計算しました[14]。これにより、マグネターなどの磁場の強い中性子星内部が扱えるようになりました。また、オーダーパラメーターの8次までの展開を求め、安定で唯一な基底状態を求めることに成功し磁場温度相図を決定しました(図4)[15]。

【反平行磁場中の2次元フェルミ気体の理論研究】

西田らは、反平行磁場中のフェルミ気体の理論研究を行いました[16]。特に、スピン間に粒子数のインバランスがある場合を考え、Larkin-Ovchinnikov状態よりもFulde-Ferrell状態がエネルギー的に安定になることを弱結合領域で示し、その基底状態の相図を平均場近似を用いて明らかにしました。また、2次元と3次元のフェルミ気体において、体積粘性とずれ粘性のスペクトル関数を久保公式と量子ビリアル展開を用いて計算しました[17]。その結果、ずれ粘性はボルツマン方程式を用いた計算結果と一致するものの、体積粘性は一致しないこと、ユニタリー領域で非解析的な振る舞いを示すこと、などを示しました。

- [1] T. Yoshida, R. Peters, N. Kawakawmi, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B **99**, 121101(R) (2019).
- [2] K. Kimura, T. Yoshida, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **100**, 115124-1-10 (2019).
- [3] K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasan, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **123**, 123601 (2019).
- [4] T. Liu, Y-R. Zhang, Q. Ai, Z. Gong, K. Kawabata, M. Ueda, and F. Nori, Phys. Rev. Lett. **122**, 076801 (2019).
- [5] R. Hamazaki, K. Kawabata, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 090603 (2019).
- [6] S. Higashikawa, M. Nakagawa, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 066403 (2019).
- [7] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, M. Sato, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).
- [8] K. Kawabata, T. Bessho, M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 066405 (2019).
- [9] N. Okuma, M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 097701 (2019).
- [10] S. Kobayashi, A. Yamakage, Y. Tanaka, M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 097002 (2019).
- [11] H. Uematsu, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, and J. A. Sauls, Phys. Rev. Lett. **123**, 237001 (2019).
- [12] Y. Masaki, T. Mizushima, and M. Nitta, arXiv:1908.06215.
- [13] T. Mizushima, S. Yasui, and M. Nitta, arXiv:1908.07944.
- [14] S. Yasui, C. Chatterjee, M. Nitta, Phys. Rev. C **99**, 035213 (2019).
- [15] S. Yasui, C. Chatterjee, M. Kobayashi, M. Nitta, Phys. Rev. C **100**, 025204 (2019).
- [16] T. Anzai and Y. Nishida, Phys. Rev. A **100**, 043615 (2019).
- [17] Y. Nishida, Annals of Physics **410**, 167949 (2019).