

開放量子系における新規な強相関トポロジカル物性の探索

Novel Correlated Topological Properties of Open Quantum Systems

京都大学	吉田 恒也
研究期間	2024 年 4 月 6 日～2025 年 3 月 27 日
滞在研究機関	Institute for Theoretical Physics, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland
共同研究者等	Prof. Manfred Sigrist, Prof. Titus Neupert, and Prof. Tomáš Bzdušek
区分	個人 B

Open quantum systems coupled to environments are described by a non-Hermitian matrix. In these years, such systems are extensively analyzed because of their unique topological phenomena which are not observed in closed systems. Although strong correlations enrich topological phenomena in closed systems, topology of correlated open quantum systems are not sufficiently explored. The aim of this project is to analyze topology of open systems with particular emphasis on strong correlations. Specifically, we have obtained the following results: (i) Discovery of non-Hermitian Mott skin effects; (ii) Hinge skin effect of quasi-particles; (iii) Non-Hermitian Z4 skin effects with glide symmetry; (iv) Topology of multifold exceptional points. In non-Hermitian Mott skin effects, interplay between strong correlations and non-Hermitian topology plays an essential role; due to the spin-charge separation induced by correlations, skin modes are observed only in the spin degrees of freedom. The emergence of the Mott skin effect is demonstrated by analyzing the one-dimensional Bose-Hubbard model with one- and two-body losses. Our numerical analysis of the full Liouvillian have elucidated the dynamical spin accumulation induced by skin modes.

研究目的

環境と結合した開放系では、系を記述する行列が非エルミートとなる。そこでは、開放系特有のトポロジカル物性がみられ、ここ数年で集中的に研究がなされてきた。また、孤立系の研究では、強相関効果がトポロジカル物性を多様化することが報告されている一方、開放系のトポロジカル物性の研究は自由粒子系の研究が大半である。本研究の目的は、現在急速に進展しつつある非エルミートトポロジーの研究で、強相関効果などの視点から新規物性の探索を行う。特に、非エルミート性が本質的に効いたトポロジカル物性の典型例である非エルミート表皮効果や例外点に焦点を当てた解析をおこなう。

研究経過

本研究課題の成果は主に 4 つある。(i)非エルミートモット表皮効果の提案 (ii)重い電子系における準

粒子の非エルミートトポロジー (iii) グライド対称性に保護された、非エルミート Z4 表皮効果 (iv) 多重例外点のトポロジー。以下、成果ごとに詳細を述べる。

(i)非エルミートモット表皮効果の提案(論文[1],口頭発表[1,2]): 一次元系の非エルミート表皮効果はバルクのトポロジーにより、ほぼ全ての固有状態が試料端に局在する現象であり、バルクの非エルミートトポロジーにより誘起される。本課題では、非エルミート表皮効果に対する強相関効果を解析した。一体・二体ロスのある一次元ボースハバード模型における解析の結果、強相関効果のもとではスピン-電荷分離により、電荷は一樣であるが、スピン自由度のみが試料端に局在する非エルミートモット表皮効果という新しい現象を提案した(図 1)。また、リンドブラッド方程式を数値的に解くことにより、モット

表皮効果に起因して試料端における動的なスピン蓄積が起きることも実証した。

(ii) 重い電子系における準粒子の非エルミートトポロジー(論文[2]): 電子間の相互作用が強い f-電子系では有効質量が数百から数千倍程度になった重い電子という準粒子が形成される。この準粒子は強相関効果により有限の寿命をもち、非エルミート行列で記述される。本課題では、重い電子系の一種である Smb6 を念頭においた模型を動的平均場理論+数値繰り込み群により解析した。その結果、強相関効果により三次元系の表面において例外点が発現し、それに誘起された非自明な非エルミートトポロジーが、ヒンジにおいて非エルミート表皮効果を誘起することを明らかにした。

(iii) 非エルミート Z4 表皮効果(論文[3]): 上でも述べたように非エルミート表皮効果はバルクのトポロジーに誘起された試料端における固有ベクトルの局在現象である。非エルミートトポロジーの研究は近年急速に進展したが、半並進操作で記述されるノンシンモロフィック対称性で護られたトポロジーの解明はほとんどおこなわれていなかった。本研究では、孤立系の知見を活用し、半並進と鏡映操作の積で記述されるグライド対称性に護られた系を解析した。解析の結果、グライド対称性に保護された Z4 トポロジーが非エルミート表皮効果を誘起することを、模型を実際に数値的に解くことで実証した。

(iv) 多重例外点のトポロジー(論文[4,5]): 非エルミート系に特有の素励起として例外点があげられる。そこでは 2 つ以上の固有値が縮退し、分散関係のべきが分数になる。この固有値の縮退点は非エルミートトポロジーによって護られている。2 つのバンドが縮退する例外点のトポロジーはこれまでの研究で明らかとなっていた。それに加え、ここ数年の研究で、3 つ以上の固有値が縮退する多重例外点の発現も報告されてきた。しかし、この多重例外点のトポロジーについては系統的な特徴付けの方法がなく、特に対称性が無い場合の多重例外点のトポロジーは未解明であった。本研究では、固有値を決定する特性方程式の n 重解($n>2$)を記述する終結式によって定義されるワインディング数を任意の次元において導入し、特徴付けの方法を提案した。またこの方法により、音響メタマテリアルにおいて実験的に報告されているバンド縮退点が、対称性を要求しない 3 重例外点であることを解明した。

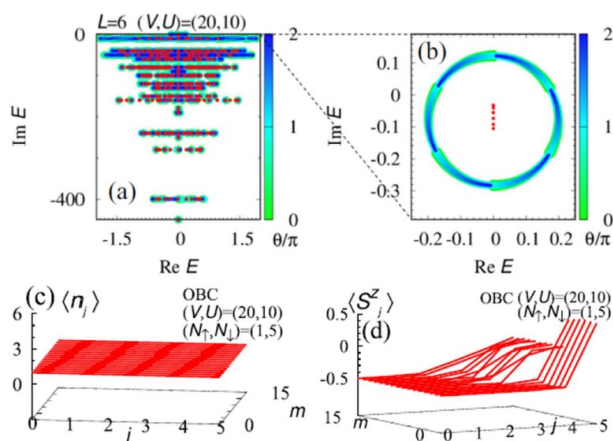


図1: 一体・二体ロスのある一次元ボース/ハバード模型の非エルミート有効ハミルトニアンの数値データ。(a,b) スピンひねり境界条件のもとでの固有ベクトルのスペクトル。(c,d) 電荷・スピンの空間分布。 j はサイト、 m は右固有ベクトルのラベル (論文[1]より引用)。

この研究をさらに発展させ、ホブフトポロジー(とその高次元への拡張)によって護られた、ホブフ例外点という新しいクラスのトポジカル素励起を発見した。とくに対称性の無い 3 重ホブフ例外点は、通常の多重例外点のことであり Z2 トポロジーによって護られている。このため、対称性の無い 3 重ホブフ例外点は、それ自身の反粒子として振る舞う。さらに、高次ホモトピーを活用して、Z3, Z12 など多様トポロジー有する素励起の存在を明らかにした。

考察

本研究では、開放系特有のトポロジーにおける強相関効果を中心に解析を行った。特に、非エルミートモット表皮効果は強相関系特有の現象である。このような新規物性の冷却原子系などでの実装・観測へ向けた理論提案は今後の課題である。

研究の発表,

口頭発表

1. Tsuneya Yoshida "Non-Hermitian Skin Effects in a Bosonic Chain with Strong Correlations" Trends in the Theory of Quantum Materials, University of Fribourg, 2024/06/19 (招待講演)
2. Tsuneya Yoshida "Non-Hermitian Mott skin effect in a bosonic chain" Non-Hermitian topology, geometry and symmetry across physical platforms Simons Center, Stony Brook, 2024/09/24 (招待講演)
3. Tsuneya Yoshida "Abelian Topology of Multifold Exceptional Points" APS Global Physics Summit, Anaheim Convention Center, 2025/03/18

誌上発表

1. Tsuneya Yoshida, Song-Bo Zhang, Titus Neupert, Norio Kawakami "Non-hermitian mott skin effect" Phys. Rev. Lett. 133, 076502 (2024).
2. Robert Peters and Tsuneya Yoshida "Hinge non-Hermitian skin effect in the single-particle properties of a strongly correlated f-electron system" Phys. Rev. B 110, 125114 (2024).
3. Sho Ishikawa and Tsuneya Yoshida "Non-Hermitian Z4 skin effect protected by glide symmetry" Phys. Rev. B 110, 115301 (2024).
4. Tsuneya Yoshida, J. Lukas K. Konig, Lukas Rodland, Emil J. Bergholtz, Marcus Stalhammar "Winding Topology of Multifold Exceptional Points" Phys. Rev. Research 7, L012021 (2025).
5. Tsuneya Yoshida, Emil J Bergholtz, Tomáš Bzdušek "Hopf Exceptional Points" arXiv:2504.13012.