



Title	開放量子系における非平衡トポジカル相 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	河崎, 真樹男
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15344号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89500
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Makio_Kawasaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 河崎 真樹男

学位論文題名

開放量子系における非平衡トポロジカル相

(Nonequilibrium topological phases in open quantum systems)

近年、トポロジカル相と呼ばれる新たな物質相が注目を集めている。トポロジカル相は系の大域的な性質を反映したトポロジカル不変量により特徴づけることができ、非自明なトポロジカル相を有する物質は、その表面にエッジ状態と呼ばれる特殊な表面状態を有する。この関係はバルク-エッジ対応と呼ばれ、トポロジカル相において普遍的な関係となる。トポロジカル不変量やエッジ状態は、系の大域的な性質を変えない摂動などに対して頑強である。このことを反映して、非自明なトポロジカル相を有する物質では、試料の詳細に依らないホール伝導度の量子化、無散逸なスピンの実現など、従来の物質相とは異なる性質を有する。この頑強性から、トポロジカル相は基礎物理的な興味だけでなく、量子コンピュータ等への産業応用も期待されている。トポロジカル相はハミルトニアンの対称性により分類することができ、時間反転対称性・粒子正孔対称性・カイラル対称性の三種の対称性の有無から、ハミルトニアンは 10 種類の対称性クラスに分類される。

これまで、トポロジカル相を含む多くの物質相に関する理論・実験研究の多くは孤立平衡系を対象としてきた。しかし、近年では実験技術が進歩したことにより、光学系や冷却原子等の人工量子系を用いることで物質相をシミュレートすることが可能となった。これらの系では系の非平衡ダイナミクスを直接観測することが可能である他、着目系の外部との相互作用を調節することにより、制御された散逸を誘起することができる。そのため、人工量子系を用いることで、これまで考えられてこなかった非平衡系や開放系での物質相を調べるのが実験的にも可能となり、理論・実験の双方から精力的な研究が行われ、新奇物質相が明らかにされている。

トポロジカル相に関しても、非平衡系や開放系への拡張が考えられている。光の増幅や減衰を含む古典光学系や連続測定下にある量子系の時間発展は非エルミート・シュレディンガー方程式で記述することができるため、開放系のトポロジカル相として、非エルミートなハミルトニアンで記述される非エルミート系のトポロジカル相が調べられた。孤立平衡系のトポロジカル相は 10 種類の対称性クラスで分類されていたが、非エルミート系ではその非エルミート性により対称性の数が増加し、38 種類の対称性クラスによりトポロジカル相が分類される。更に、孤立系では物質内部の性質は系の境界条件に依存しないのに対し、非エルミート系ではこの限りではなく、孤立平衡系と同様の意味でのバルク-エッジ対応が成立しない場合が存在する。これらの事実により、非エルミート系では孤立平衡系より多様なトポロジカル相が実現する。非エルミート系の顕著な性質であるバルク-エッジ対応の破れは、物質内部の性質に境界条件依存性がある場合の報告が殆どであり、他の機構によるバルク-エッジ対応の破れの解明が課題となる。

また、多くの開放量子系では連続測定が行われていないため、その時間発展は非エルミート・シュレディンガー方程式ではなく、多くの場合は密度演算子の時間発展方程式である GKSL 方程式に従う。そのため、開放量子系のトポロジカル相を調べるためには、GKSL 方程式を特徴づける Lindblad 演算子をトポロジーに基づいて解析する必要がある。GKSL 方程式は数学的な変換

により非エルミート・シュレディンガー方程式に対応づけられるため、非エルミート・ハミルトニアンの分類理論を用いることで、リンドブラディアンの特異点分類を行える。しかし、先行研究 [S. Lieu, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 040401 (2020)] において、リンドブラディアンが非エルミートな構造を有しているにも関わらず、リンドブラディアンの分類される対称性クラスが孤立平衡系と同数である 10 種類になることが報告された。この結果は、非エルミート系の場合と異なり、開放量子系のトポロジカル相は孤立平衡系とほぼ等しくなることを意味する。しかし、前述したように、非平衡開放系では物質相の性質も変化し得ることから、孤立平衡系に対応物のないトポロジカル相の存在を明らかにすることが、非平衡開放系の物性を明らかにする上で重要な課題となる。

本論文では、前述した二つの課題に取り組むことで、開放系の新奇トポロジカル相を明らかにした。先行研究では、開放量子系の物理的制約により、非エルミート行列の分類で本質的な役割を果たす副格子対称性がリンドブラディアンに対して成立しないことを用いて、リンドブラディアンのトポロジカルな分類が行われた。これに対し、複素平面上での固有値のシフトを導入することで、リンドブラディアンに対して副格子対称性が定義可能であることを示した。これにより、先行研究で棄却された対称性クラスがリンドブラディアンに対して実現可能となり、リンドブラディアンの分類される対称性クラスが増大することを示した。更に、既存理論では開放量子系の緩和ダイナミクスのトポロジカルな分類が行われていたが、非エルミート系に特有の対称性である PT 対称性を用いることにより、定常状態としてエッジ状態が実現可能であることも示した。また、本論文では非エルミート系におけるバルク-エッジ対応の破れの新たな機構を発見した。多重エッジ状態を有する非エルミートなモデルに摂動を印加して対称性クラスを変化させることにより、あるパラメータ領域ではバルク-エッジ対応が破れることを示した。この機構はバルク状態の境界条件依存性を必要とせず、先行研究とは異なる機構となる。本論文は全 7 章から構成されており、各章の概要は以下ようになる。

第 1 章は序論であり、本論文の主題である非平衡トポロジカル相に対する研究の背景や現状を述べ、現在の研究の問題点を概説する。

第 2 章では開放量子系や非エルミート系の取扱いを説明する。

第 3 章では孤立平衡系及び非エルミート系のトポロジカル相を説明する。

第 4 章では、リンドブラディアンに対して実現可能な副格子対称性である、シフトした副格子対称性を提案する。シフトした副格子対称性の一般論を説明した後、この対称性を有する具体的なモデルを構築し、具体例を通してその性質を実証する。

第 5 章では、PT 対称性を有するリンドブラディアンのトポロジカル相を調べる。非エルミート・トポロジカル相における PT 対称性の役割を述べた後に、リンドブラディアンに対する PT 対称性を定義する。定義した PT 対称性を有するような開放量子系のモデルを構築し、数値計算を行うことにより、開放量子系においてもエッジ状態が定常状態として存在可能であることを示す。

第 6 章では、多重エッジ状態に起因した非エルミート系でのバルク-エッジ対応の破れを提案する。摂動を印加することで、多重エッジ状態が許されるトポロジカル相から単一エッジ状態のみが許されるトポロジカル相に相転移させ、非エルミート系特有の構造である例外点を通過しないパラメータ変化に対して、多重エッジ状態が安定に存在することを示す。

第 7 章はまとめであり、本論文での研究結果をまとめると共に、今後の課題についても述べる。