



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_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 河崎 真樹男

審査担当者 主査教授 矢久保 考介
副査教授 明楽 浩史
副査准教授 小林 淳
副査准教授 小布施 秀明

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られ、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。トポロジカル相はハミルトニアンの有する対称性により、10種類の対称性クラスを用いて分類される。更に、近年では光学系や冷却原子等の人工量子系で非平衡系・開放系の物質相を調べることが実験的にも可能となり、精力的な研究が行われている。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おり、開放量子系の時間発展を記述する GKSL 方程式を特徴づける Lindblad 方程式のトポロジカルな分類が行われている。先行研究 [S. Lieu, et al., Phys. Rev. Lett. 24, 040401 (2020)] において、Lindblad 方程式は非エルミートな構造を有しているにも関わらず、Lindblad 方程式の分類される対称性クラスは、非エルミート行列の分類される 38 種類ではなく、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。この結果は開放量子系と孤立平衡系のトポロジカル相がほぼ等しくなることを意味するが、非平衡開放系では物質相の性質も変化し得るため、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っていた。また、連続測定下にある量子系の時間発展は非エルミートなハミルトニアンにより記述ができる。そのような非エルミート系では物質内部の性質が系の境界条件に依存する必要があるため、孤立平衡系と同様の意味でのバルク-エッジ対応が存在しない場合が存在し、孤立平衡系より多様なトポロジカル相が実現する。非エルミート系におけるバルク-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っていた。

本論文で著者は、先行研究で棄却された対称性クラスが Lindblad 方程式に対して実現可能であることを示し、開放量子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 Lindblad 方程式に対して成立しないことを用いて、Lindblad 方程式のトポロジカルな分類が行われた。これに対して著者は、複素平面上での固有値のシフトを導入することで、Lindblad 方程式に対して副格子対称性が定義可能であることを示している。これにより、副格子対称性の付加された対称性クラスが Lindblad 方程式に対して実現可能となり、Lindblad 方程式の分類される

対称性クラスが増大することを示している。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、著者は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ている。また、本論文で著者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状態が境界条件依存性を有さないにも関わらず、バルク-エッジ対応が破れることを示している。

本論文は全 7 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。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と現状、及び既存研究の問題点を概説している。第 2 章では、開放量子系や非エルミート系の理論を説明している。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に関して説明している。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が提案されている。シフトした副格子対称性に対する一般論が説明された後、この対称性を有するモデルが具体的に構築され、その性質が議論されている。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が調べられている。非エルミート・トポロジカル相における PT 対称性の役割が述べられた後に、リンドブラディアンに対する PT 対称性が導入される。導入された PT 対称性を有する開放量子系のモデルが構築され、エッジ状態が定常状態として存在可能であることが示されている。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-エッジ対応の破れが提案されている。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、非エルミート性に起因した反線形対称性が保たれる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が示されている。第 7 章は結論であり、本論文で得られた研究成果がまとめると共に、今後の課題についても述べられている。

これを要するに著者は、開放量子系や非エルミート系において、孤立平衡系に対応物のないトポロジカル相を理論的に明らかにした上、その理論を様々な開放量子系・非エルミート系に対して適用可能にしたものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。