



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Dual Symmetry Classification and Z2 Point-gap Topology in Non-Hermitian Systems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	姜, 治宇; Jiang, Zhiyu
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16337号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94897
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Zhiyu_Jiang_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 姜 治宇

審査担当者 主査 准教授 小布施 秀明
副査 教授 矢久保 考介
副査 教授 浅野 泰寛

学位論文題名

Dual Symmetry Classification and $\mathbb{Z}_2$ Point-gap Topology in Non-Hermitian Systems
(非エルミート系における双対対称性分類と $\mathbb{Z}_2$ ポイントギャップ・トポロジカル相)

近年、非エルミート系の研究は、系と環境との相互作用、すなわち流入出の寄与がる開放系における新奇物理現象の発現の可能性から大きな注目を集めている。エネルギー Spektral が複素エネルギー平面に現れるため、非エルミート系はエルミート系に比べて豊富なトポロジカル相を示す。これらの非エルミート系は、ライン・ギャップとポイント・ギャップという2つの異なる種類のエネルギーギャップが存在する。非エルミート系の特徴であるポイント・ギャップは、すべての固有状態が固定境界付近に局在する非エルミートスキン効果などの特異な現象を引き起こす。非エルミート・ハミルトニアンの特称性クラスによって、トポロジカル数が $\mathbb{Z}$ となるポイント・ギャップと $\mathbb{Z}_2$ となるポイント・ギャップの2種類のポイント・ギャップが存在する。エルミート系では、 $\mathbb{Z}_2$ トポロジカル相は、量子スピンホール絶縁体やマジョラナ・フェルミオンなどの理論的・実験的に広く研究されているが、非エルミート系における $\mathbb{Z}_2$ ポイント・ギャップ・トポロジカル相は理論・実験研究ともほとんど進んでいない。しかしながら、エルミート系では、 $\mathbb{Z}_2$ トポロジカル相の研究がトポロジカル絶縁体の研究発展を大きく牽引したことから、本論文では、非エルミート系の $\mathbb{Z}_2$ 点ギャップ・トポロジーの理論、応用、実験的実現方法の提案を目的に研究を行った。

本論文で著者は、第一部で、非エルミート系の対称性分類の拡張を提案した。非エルミート系は、非エルミート・ハミルトニアンの対称性と非ユニタリー時間発展演算子の対称性の2つの方法で分類できる。これは、非エルミート・ハミルトニアンと非ユニタリー時間発展演算子の間に数学的定義の厳密な違いはないという事実に基づいている。この提案手法を dual symmetry classification と呼ぶ。

次に、非ユニタリー量子ウォークを定義する時間発展演算子に dual symmetry classification を適用することで、量子系においても非エルミートな $\mathbb{Z}_2$ 点ギャップトポロジーを研究するための実験系の提案を目的とした研究を行った。時間発展演算子を非エルミート・ハミルトニアンとして扱うことで、時間反転対称性を持つ非ユニタリー量子ウォークを定義することが可能になり、その非ユニタリー量子ウォークが $\mathbb{Z}_2$ ポイント・ギャップと $\mathbb{Z}_2$ 非エルミート・スキン効果を示すことを明らかにした。

最後に著者は、孤立系のエルミート系の物理現象に対しても、非エルミート系の観点から研究を行なうことが重要であることを示した。ここでは、 $\mathbb{Z}_2$ ポイント・ギャップ・トポロジーを用いることにより、なぜエルミートな系において、 $\mathbb{Z}_2$ トポロジカル相を有する系を偶数回積層した系に対して頑健であるかを系統的に理解できることを示した。

これら一連の研究を通して、非エルミート系の対称性分類法を拡張し、 $\mathbb{Z}_2$ 点ギャップ・トポロジカル相独特な時間発展特性性を明らかにし、さらに非エルミート系の観点からエルミート・トポロジカル系を研究することの重要性を示しました。これらの研究成果は、非エルミート系における新しいトポロジカル現象の理論的基礎を提供し、非エルミートトポロジカル相、さらにはエルミートトポロジカル相の研究発展を加速すると考えられる。

本論文は全 8 章で構成されており、第 1 章は序論である。第 2 章では、開放量子系を記述するための 2 つの枠組み、すなわちリンドブラッド・マスター方程式と非エルミート・ハミルトニアンを説明する。第 3 章と第 4 章では、エルミート系と非エルミート系におけるトポロジカル相の概要と、それぞれの対称性の分類について述べる。本論文の主な結果は第 5 章、第 6 章、第 7 章に詳述する、第 5 章では、dual symmetry classification の概念を提案し、非エルミート系の対称性分類を拡張する。第 6 章では非ユニタリー量子ウォークを定義し、そのトポロジーとダイナミクスを調べる。第 7 章では、積層したエルミート系における $\mathbb{Z}_2$ トポロジーの頑健性を解析する。最後に、第 8 章で、まとめと今後の展望を述べる。

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 $\mathbb{Z}_2$ トポロジカル相を理論的に研究した上で、開放系における系の新しい分類方法や実験系の提案、さらには孤立系の物理現象を非エルミート系の観点から明らかにしたものであり、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。