



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Three-Dimensional Topological States in the Absence of Fundamental Symmetries [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	羽部, 哲朗
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11436号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55383
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Tetsuro_Habe_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 羽部 哲朗

審査担当者 主 査 准教授 浅野 泰寛
副 査 教 授 矢久保 考介
副 査 教 授 丹田 聡
副 査 准教授 鈴浦 秀勝

学位論文題名

Three-Dimensional Topological States in the Absence of Fundamental Symmetries

(対称性の破れた三次元系におけるトポロジカル相)

「トポロジカルに非自明な電子状態」という概念に基づく、物質の新たな分類法の提唱以来、我々の物質観は大きく変容を遂げた。物質中の電子状態は量子力学的な波動関数で表現されるが、絶縁体のように励起に禁制帯をもつ物質では、電子が占有している状態の波動関数からトポロジカル数を定義することが出来る。このトポロジカル数が自明な値であるゼロの場合には、絶縁体は従来のバンド理論で示唆される普通の絶縁体に分類される。その一方、トポロジカル数がゼロ以外の非自明な整数値になる場合には、トポロジカル絶縁体と呼ばれ前者と区別される。非自明なトポロジカル数で特徴付けられる電子系は、系の詳細によらない普遍的な性質をもつことが知られている。トポロジカルに非自明な絶縁体や超伝導体は、それぞれトポロジカル絶縁体およびトポロジカル超伝導体と呼ばれ、これらトポロジカル物質に関する研究は、物性物理学における中心課題の一つになりつつある。

トポロジカル相の有無は物質の空間次元性や電子系の基本的な対称性に対する不変性と密接な関係がある。ここで、基本的な対称性とは時間反転対称性、粒子-ホール対称性、副格子対称性と鏡映対称性である。理論的には、物質の次元性と電子系の持つ対称性を用いて、トポロジカル相の有無が分類され表にまとめられている。また実験的には、次元性や対称性を制御することによって新たなトポロジカル相の実現を試みている。しかし、現実的に如何なる物質で、如何なるトポロジカル相が可能なのか、未だにその全容は明らかでない。この分類表に従うと、3次元でトポロジカル相が存在するためには、何らかの基本的な対称性に対する電子状態の不変性が不可欠である事が知られていた。

本論文では、基礎的な対称性がすべて破れた3次元系においても新規なトポロジカル相が存在する事を理論的に示し、このトポロジカル相が「ブリルアンゾーン内の部分空間で定義されたトポロジカル数」で特徴づけられることを明らかにした。また、実際に Bi₂Se₃ というトポロジカル絶縁体や、超流動 ³He-³B 相に磁場を印加した系で新規なトポロジカル相が実現することを具体的に示した。これまで不可能と思われてきた状況におけるトポロジカル相の出現を理論的に示したこの研究は、物質の分類法に新たな視点を付加する極めて優れた成果になっている。トポロジカル物質は、これまで絶縁体や超伝導体など、励起に禁制帯を持つ物質に限られると考えられていた。本論文では、トポロジカルに非自明な半金属が定義可能な概念であり、その具体的な例を示した。トポロジカル物質の概念を禁制帯の無い物質群へも拡張したこの研究は、特筆すべき先進性を有してい

る。「ブリルアンゾーン内の部分空間で定義されたトポロジカル数」という概念を拡張し、これを新しい分類法の処方箋とすることにより、従来の分類法では区別できなかった2つのトポロジカル物質を区別することに成功した。これによって、提案した処方箋が極めて汎用的であり、現実の物質ごとに多様に使い分けられることを示した。実験的には純良なトポロジカル物質が作成可能になりつつあり、本論文で予言されたトポロジカル相の確認が期待されている。

トポロジカル物質の特徴の一つとして、その表面において禁制帯の中に電子状態が現れる事が知られており、この性質はバルク - 境界対応と呼ばれている。具体的に、3次元トポロジカル物質の2次元表面には、相対論的なディラック電子で記述される金属的な2次元電子系が広がっている。線型分散をもつこの金属状態はディラック円錐と呼ばれている。ディラック円錐の頂点にあたる部分はディラック点と呼ばれ、素粒子論では電子と陽電子の境界に相当している。トポロジカル絶縁体が時間反転対称性を保っている限り、トポロジカル物質分類法から、このディラック点は必ず存在する事が証明されている。しかし、ディラック点が消滅した実験が示され、理論と実験の相違を埋める必要があった。本論文では、電子系がダイナミクスをもつボーズ場と結合する場合、本来あるべきはずのディラック点が消滅することを理論的に示した。ディラック電子系は電子が電荷を持つ事により光子場と相互作用する。その結果、上下のディラック円錐が互いに離れてしまい、その結果ディラック点が消滅する。電子系がボーズ場の自由度と相互作用する場合には、トポロジカル分類法を見直さねばならないことを示唆するこの研究は、新たな研究領域の方向性を示すものとして高く評価できる。

これらを要するに、著者はトポロジカル物質に関する新たな分類法の新知見を得たものであり、物性物理学の進展に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があるものと認める。