

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	トポロジカル半金属およびギャップレス超伝導体のトポロジカル相転移
Title(English)	Topological phase transitions of topological semimetals and gapless superconductors
著者(和文)	奥川亮
Author(English)	Ryo Okugawa
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10721号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:村上 修一,西田 祐介,古賀 昌久,西森 秀稔,平原 徹
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10721号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻:	物性物理学	専攻	申請学位 (専攻分野):	博士	(理学)
Department of			Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名:	奥川 亮		指導教員 (主):	村上 修一	
Student's Name			Academic Supervisor(main)		
			指導教員 (副):	金森 英人	
			Academic Supervisor (sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

トポロジカル相とは、波動関数の非自明なトポロジーに由来した新奇な現象を示す量子相である。その例として、トポロジーに保護された表面状態などの性質を示す。特に、トポロジカル半金属をはじめとしたギャップレスなトポロジカル相が新しい量子相として注目されている。それらのトポロジカル相を発見するためには、体系的に物質を探索する方法を確立することが不可欠である。したがって、本博士論文では、トポロジカル半金属やギャップレス超伝導体のトポロジカル相転移について研究を行った。また、その特徴的な表面状態とトポロジカル相転移の関係についても議論した。

最初に、空間反転対称性の破れたワイル半金属と 3 次元トポロジカル絶縁体の相転移における表面状態の変化を調べた。その 2 相を特徴付ける表面状態として、ワイル半金属はフェルミアーキを持ち、トポロジカル絶縁体はディラックコーンを持つ。したがって、その表面状態の構造およびフェルミアーキとディラックコーンの関係性を明らかにする。まず一般的な表面状態の構造を見るために、ワイル半金属・絶縁体相転移を記述する 2 バンド有効ハミルトニアンを構築した。そして、この有効ハミルトニアンからワイル半金属におけるフェルミアーキの一般的なバンド構造を明らかにした。次に、ワイル半金属とトポロジカル絶縁体を示す格子モデルを用いることで表面状態の変化を調べた。その結果、系がワイル半金属相からトポロジカル絶縁体相に相転移する場合には、二つのフェルミアーキが一つのディラックコーンになることを明らかにした。そして、この格子モデルのバンド構造は有効ハミルトニアンの結果と一致することも示した。また、ワイル半金属のフェルミアーキの構造は表面の形状に依存することも見出した。

次に、スピンレス系におけるトポロジカルノーダルライン半金属とワイル半金属の一般的な相転移を調べた。トポロジカルノーダルライン半金属は時間反転対称性及び空間反転対称性を持たねばならない一方で、スピンレスワイル半金属はそのどちらかを破っている必要がある。ゆえに、時間反転対称性または空間反転対称性のどちらかを破ることで、二つのトポロジカル半金属相の間で相転移が起こることが期待される。そこで、その一般的な相転移を調べるために、まずノーダルライン半金属のバンド構造を波数空間における形状や位置にしたがって分類を行った。その結果、ノーダルラインが一つの時間反転不変運動量を囲んでいるときには、時間反転対称性を破るといつでもスピンレスワイル半金属になることを示した。一方で、空間反転対称性を破る場合には、形状等に依らず一般的に絶縁体になることを示した。さらに、ノーダルライン半金属のバンド構造と結晶対称性の関係も調べた。その結果、2 重回転対称性を系が持つ場合には、多くの系でノーダルラインがその回転軸を通るかその軸に垂直な鏡映面上に現れることを示した。この性質を利用すると、空間反転対称性を破った場合にもトポロジカル半金属相が保護されることが

示される。もしノーダルラインが 2 回回転対称軸と交差している場合には、2 回回転対称性を保ったまま空間反転対称性を破ることによってスピンレスワイル半金属が実現される。その一方で、ノーダルラインが鏡映面上にある場合には、鏡映対称性が残っている限り時間反転対称性または空間反転対称性が破れてもノーダルライン自身が鏡映対称性によって保護される。この結果は普遍的であり、トポロジカル半金属の予言に有用であると期待される。

最後に、時間反転対称性を破る鏡映対称な 3 次元超伝導体のトポロジカル相転移を調べた。このような超伝導体においては、トポロジカルに自明な超伝導相に加えて、ワイル超伝導相およびトポロジカル結晶超伝導相と呼ばれるトポロジカル相が実現可能である。本研究では、奇パリティまたは空間反転対称性の破れた超伝導体ならば、自明な超伝導相とトポロジカル結晶超伝導相の間に必ずワイル超伝導相が出現することを示した。この結果は 2 バンド有効ハミルトニアンを構築し、トポロジカル相転移の様子を調べることで証明される。さらに、出現するワイル超伝導相がどのようにトポロジカル結晶超伝導相へ相転移が可能であるかを一般的に調べた。その結果、ワイルノードの軌跡が二つの相の間の相転移を決定することを明らかにした。また、二つの相の間で相転移が起きる場合に、ワイル超伝導相とトポロジカル結晶超伝導の間の表面状態の変化も調べた。ワイル超伝導相はマヨラナアーク、トポロジカル結晶超伝導相はマヨラナコーンと呼ばれる表面状態を持つ。もしワイル超伝導相がトポロジカル結晶超伝導相に入ったときには、マヨラナアークがマヨラナコーンになることを明らかにした。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：	物性物理学	専攻
Department of		
学生氏名：	奥川 亮	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野)：	博士	(理学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員 (主)：	村上 修一	
Academic Supervisor(main)		
指導教員 (副)：	金森 英人	
Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Topological materials have attracted attention in condensed matter physics because of various topological properties. As a manifestation of the topological nontriviality, topological surface states appear in the topological materials. To investigate the characteristic properties, we need to establish a way to search for the topological materials systematically. Therefore, in this thesis, we study topological phase transitions involving topological semimetals and gapless superconductors.

Firstly, we study band evolution of surface states when a topological phase transition happens from a Weyl semimetal phase to a topological insulator phase. To see the band evolution, we focus on time-reversal invariant systems without inversion symmetry, where both of the Weyl semimetal and the topological insulator can be realized. By using an effective Hamiltonian and a lattice model, we reveal a relationship between the Weyl semimetal and the topological insulator in view of the surface states.

Secondly, we clarify a general phase transition from a topological nodal line semimetal phase to spinless Weyl semimetal phase. We classify topological nodal-lines according to their locations and shapes in the three-dimensional Brillouin zone in order to elucidate the topological phase transition. From the classification, we show that the phase transition under symmetry breaking varies depending on the type of the nodal lines. Furthermore, we discuss how crystallographic symmetries affect the topological phase transition in the topological nodal-line semimetal.

Finally, we investigate topological phase transitions in three-dimensional odd-parity or noncentrosymmetric superconductors with mirror symmetry when the system breaks time-reversal symmetry. In the three-dimensional superconductors with mirror symmetry, Weyl superconductor and topological crystalline superconductor phases are realizable as well as a trivial superconductor phase. To clarify a relationship among these superconducting phases, we construct a universal topological phase diagram in the mirror-symmetric superconductors. As a result, it is shown that the Weyl superconductor phase generally appears between the trivial and the topological crystalline superconductor phases. We also demonstrate how a trajectory of the Weyl nodes determines topological invariants which characterize the topological phases.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).