

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05141

研究課題名（和文）対称性によって守られたトポロジカル量子相の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study of symmetry-protected topological phases

研究代表者

古崎 昭 (Furusaki, Akira)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

研究者番号：10238678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体の分類が、電子間相互作用によって自由電子系のトポロジカル相の分類表からどのように変更されるかを理論的に明らかにした。相互作用する（表面）ディラック電子の安定性の解析から、強相関電子系における秩序相の形成と、競合する相間の量子相転移について議論した。また、結晶のもつ空間群対称性によって守られたバンド縮退をもつトポロジカル半金属について一般論と具体例を議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類に対する電子間相互作用の影響を明らかにすることは、対称性によって守られたトポロジカル相の一般論構築への一つの足掛かりを与える。また、トポロジカル半金属に関する研究は、空間群対称性で守られたバンド縮退を（いくつかの空間群について）一般的に論じており、トポロジカル物質探索に指針を与える。これらのトポロジカル絶縁体・超伝導体・半金属は、特異な電磁応答をもつデバイスにつながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The effect of interactions on the classification of topological insulators and superconductors was theoretically studied, and it was clarified how the free-fermion classification should be modified. Competing phases and quantum phase transitions in strongly correlated electron systems were studied for simple models through the mapping to massless Dirac fermions interacting with bosonic fields. In addition, topological semimetals having band degeneracies protected by crystalline symmetries were studied.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジカル絶縁体 トポロジカル超伝導体 電子間相互作用 量子相転移 トポロジカル半金属 空間群対称性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

結晶の並進対称性や点群対称性を仮定しない強いトポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体の分類理論は、時間反転・粒子正孔・カイラル対称性を用いて自由フェルミオンに対してよく知られていた。その後、結晶の空間群対称性と時間反転対称性のもとで安定なトポロジカル結晶絶縁体の理論と実験研究が進み、ワイル半金属物質がいくつか見つかった。一方、電子間相互作用によってトポロジカル相の分類は自由フェルミオンのものから変化することも徐々にわかってきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時間反転対称性・粒子正孔対称性や結晶の空間群対称性のもとでトポロジカルに安定な新奇量子相の理論的探求である。バンド理論や平均場理論で記述されるトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に加えて、電子間相互作用が強い系におけるトポロジカル相を研究対象とする。トポロジカル絶縁体・超伝導体に対しては、結晶のもつ鏡映や回転などの対称性を考慮したトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類理論を構築し、その特徴的な物性を明らかにする。さらに、ディラック半金属やワイル半金属の分類とその具体例の探索を行う。電子相関の強いトポロジカル相に対しては、分類理論の結晶の対称性を含めた場合への拡張や具体的な模型構築を行う。

3. 研究の方法

主に解析的なアプローチによって理論研究を進める。トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に対する基本的な理論模型は、有限質量のディラック・フェルミオンである。ディラック・フェルミオン模型から出発して、簡単な空間対称性や電子間相互作用の効果を取り入れた模型を考え、その物性を議論する。対称性で許される質量項が一つだけのとき、このディラック・フェルミオン系は質量項の符号の正負によってトポロジカルに異なる相にある。鏡映のような2乗すると恒等演算子に比例する対称操作はディラック・フェルミオン模型に自然に入る。また、電子間相互作用を質量項の2乗の形でとれば、ボゾン場によってその相互作用項を質量項とボゾン場の相互作用に書き直すことができる。したがって、対称性とディラック質量に関する解析から、トポロジカル相の分類や安定性を議論できる。空間群対称性を考慮するには格子模型を考える必要があるが、運動量空間の特定の点付近の解析にはディラック・ハミルトニアンが有効である。適宜、数値計算を用いる。

4. 研究成果

(1) トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類に対する電子相関効果。

自由フェルミオンのトポロジカル相の分類が相互作用によってどのように変化を受けるかをディラック・ハミルトニアンから出発して議論した。(ハバード・ストラトノビッチ)ボゾン場と結合した質量項として相互作用を表し、ディラック・ハミルトニアンの行列次元の大きさと対称性によって許される質量項の数に対する考察から、奇数次元で相分類がZのものから相互作用によって Z_n に変わることを示した。ここで、 n は空間次元や対称性に依存する自然数である。我々の結果は、以前から知られていた結果(1次元BDIクラスでZから Z_8 へ、3次元DIIIクラスでZから Z_{16} へ分類が変わること)を含み、より一般の場合に拡張するものである。また、時間反転と鏡映対称性によって守られた3次元トポロジカル結晶絶縁体の分類が Z_8 になることを示した。さらに、鏡映対称性で守られた2次元ボーズ粒子系のトポロジカル相を分類した。

(2) ディラック半金属のトポロジカル数。

3次元ディラック半金属において、価電子バンドと伝導バンドが接する点は、時間反転と空間反転の対称性に加えて回転対称性があることによって安定化する。回転軸上のディラック点に対してトポロジカル・チャージを定義して、ディラック点の分類を行った。

(3) トポロジカル電気磁気効果。

トポロジカル絶縁体の特徴づけるトポロジカル電気磁気効果に関して研究した。磁場中で電気分極が生じる電気磁気効果の実験検証には、磁場中のトポロジカル絶縁体薄膜でランダウ充填率 $\nu = 0$ の状態にある量子ホール絶縁体が有望であることを指摘した。

(4) 非共形対称性に守られたトポロジカル半金属。

時間反転対称でスピン軌道相互作用の強い3次元電子系において、価電子バンドと伝導バンドが点または線状に接触している半金属が安定に存在するメカニズムを、2回らせんや映進の変換を含む空間群をもつ結晶に対して明らかにした。そのような対称性をもつ空間群のいくつか(No. 11, 19, 61, 198, 205)に対してバンド構造の一般的な形を考察し、ブリルアン・ゾーンの中で対称性の高い点や線におけるバンド縮退を議論した。

(5) 相互作用するマヨラナ粒子系のストライプ秩序。

トポロジカル超伝導体の磁束には零エネルギーのマヨラナ束縛状態が生じる。磁束が正方格子を組んでいる場合に対して、相互作用するマヨラナ粒子系の基底状態相図をイジング模型への変換とモンテカルロ計算を用いることによって決定し、格子の離散的回転対称性を自発的に破ったストライプ相を発見した。

(6) 結合ワイヤー模型による高次元トポロジカル相の構成。

空間的に配列した1次元臨界系を結合させることによって、2次元や3次元のトポロジカル相

を構成する方法 (coupled wire approach) を応用した。2次元分数量子ホール系の階層構造を構成し、これまで複合粒子描像を coupled wire approach で表現した。また、分数励起をもつ 3次元模型を構成し、基底状態の縮退度と低エネルギー励起を議論した。

(7) ギンズブルグ・ランダウ理論の枠組みを超える量子相転移。

最近接及び次近接反交換相互作用をもつ 1次元スピン 1/2 量子 XYZ 模型の基底状態相図と量子相転移を、ボゾン化法と密度行列繰り込み群によって調べた。この模型の基底状態相図は 3つの Ising 秩序相と 1つのダイマー相をもち、それぞれの相で励起状態にはギャップが開いている。異なる相の間の量子相転移はガウシアン模型で記述される連続相転移である。低エネルギー有効模型は競合する非線形項をもつサインゴルドン模型の一種となり、相図中の SU(2)対称な点のまわりで 1ループの繰り込み群の解析を行うことにより、上記の結果は理解できる。また、XYZ 模型は Jordan-Wigner フェルミオンで表すと Ising 秩序とダイマー秩序を質量項としてもつディラック・フェルミオン模型に帰着し、二つの秩序に対応するボゾン場の有効理論が上述のサインゴルドン模型の拡張になることを示した。さらに、3次元格子模型に対して理論を拡張し、4次元トポロジカル絶縁体の 3次元表面におけるディラック電子系の競合する秩序間の量子相転移を議論した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mudry Christopher, Furusaki Akira, Morimoto Takahiro, Hikihara Toshiya	4. 巻 99
2. 論文標題 Quantum phase transitions beyond Landau-Ginzburg theory in one-dimensional space revisited	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.205153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fuji Yohei, Furusaki Akira	4. 巻 99
2. 論文標題 From coupled wires to coupled layers: Model with three-dimensional fractional excitations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 241107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.241107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kamiya Y., Furusaki A., Teo J. C. Y., Chern G.-W.	4. 巻 98
2. 論文標題 Majorana stripe order on the surface of a three-dimensional topological insulator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161409-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.98.161409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Fuji Yohei, Furusaki Akira	4. 巻 99
2. 論文標題 Quantum Hall hierarchy from coupled wires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035130-1-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.035130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furusaki Akira	4. 巻 62
2. 論文標題 Weyl points and Dirac lines protected by multiple screw rotations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Bulletin	6. 最初と最後の頁 788 ~ 794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scib.2017.05.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bohm-Jung Yang, Troels Arnfred Bojesen, Takahiro Morimoto, and Akira Furusaki	4. 巻 95
2. 論文標題 Topological semimetals protected by off-centered symmetries in nonsymmorphic crystals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.075135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahiro Morimoto, Akira Furusaki, and Naoto Nagaosa	4. 巻 92
2. 論文標題 Topological magnetoelectric effects in thin films of topological insulators	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.085113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneya Yoshida and Akira Furusaki	4. 巻 92
2. 論文標題 Correlation effects on topological crystalline insulators	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.085114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahiro Morimoto, Akira Furusaki, and Christopher Mudry	4. 巻 92
2. 論文標題 Breakdown of the topological classification Z for gapped phases of noninteracting fermions by quartic interactions	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.125104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bohm-Jung Yang, Takahiro Morimoto, and Akira Furusaki	4. 巻 92
2. 論文標題 Topological charges of three-dimensional Dirac semimetals with rotation symmetry	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.165120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tsuneya Yoshida, Takahiro Morimoto, and Akira Furusaki	4. 巻 92
2. 論文標題 Bosonic symmetry-protected topological phases with reflection symmetry	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.245122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Quantum phase transitions beyond Landau-Ginzburg theory in one dimension revisited
3. 学会等名 IBSPCS-KIAS International Workshop on Frustrated Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 引原俊哉、Christopher Mudry、古崎昭、森本高裕
2. 発表標題 spin-1/2 J1-J2 XYZ鎖における非GL的量子臨界相転移
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤陽平、古崎昭
2. 発表標題 3次元的な分数励起を持つ量子細線の模型
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会2
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Fractional charge bound to a vortex in two-dimensional topological crystalline insulators
3. 学会等名 Euler Symposium on Theoretical and Mathematical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Quantum Hall hierarchy from coupled wires
3. 学会等名 Symposium on Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Quantum Hall hierarchy from coupled wires
3. 学会等名 International Workshop on New Paradigms in Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Quantum Hall hierarchy from coupled wires
3. 学会等名 Perspectives in Topological Phases: From Condensed Matter to High-Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Reduction of the classification of free-fermion topological phases by interactions
3. 学会等名 Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤陽平、古崎昭
2. 発表標題 量子細線から作る分数量子Hall状態の階層構造I
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤陽平、古崎昭
2. 発表標題 量子細線から作る分数量子Hall状態の階層構造II：複合Fermi液体とPfaffian状態
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Breakdown of free-fermion classification of topological insulators and superconductors
3. 学会等名 KITS workshop on "Topological States and Phase Transitions in Strongly Correlated Systems" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Effects of interactions on the free-fermion topological classification
3. 学会等名 Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 紙屋佳知, Gia-Wei Chern, Jeffrey Teo, 古崎昭
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体表面上の正方格子マヨラナ・フェルミオン系と量子コンパスモデル
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshitomo Kamiya, Akira Furusaki, Jeffrey Teo, Gia-Wwi Chern
2. 発表標題 Majorana Stripe Order at the Surface of a 3D topological Insulator
3. 学会等名 APS March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Reduction of the classification of topological insulators and superconductors by quartic interactions
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Reduction of the classification of topological insulators and superconductors by quartic interactions
3. 学会等名 ICTP Conference on Interactions and Topology in Dirac Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉田恒也、古崎昭
2. 発表標題 トポロジカル結晶絶縁体における相関効果
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Akira Furusaki
2. 発表標題 Topological charge of Dirac semimetals with rotation symmetry
3. 学会等名 Physics of bulk-edge correspondence & its universality workshop 2015 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----