

令和 2 年 5 月 16 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H03700

研究課題名(和文)トポロジカル絶縁体のスケーリング理論

研究課題名(英文)Scaling theory of topological insulators

研究代表者

大槻 東巳(Ohtsuki, Tomi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：50201976

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文):トポロジカルな物質,特に3次元トポロジカル絶縁体が相転移を起こす場合,バンドギャップが閉じる。このバンドギャップが閉じた瞬間,ディラック半金属やワイル半金属(ここではトポロジカル半金属と呼ぶ)が現れる。これらの半金属は,ランダムネスに対してある程度頑強であるが,やがて非トポロジカルな金属へと相転移する。このトポロジカル半金属と金属の相転移は,状態密度のスケーリング理論で記述できる。本研究では,この状態密度スケーリングが,様々な状況で有効であることを示し,またこれに付随した物理量のスケーリング,例えば群速度や電気伝導度の臨界的な振る舞いを議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル物質は近年非常に多くの興味を集めている。一方,トポロジカル数は並進対称性が存在するクリーンな系で定義されており,ランダムな系での振る舞いは自明ではない。本研究ではランダムネスが存在する場合にも適用可能な状態密度のスケーリングなどを用いて,トポロジカルな系の相転移を統一的に記述した。

研究成果の概要(英文):At the phase transition of topological insulators in three dimensions, the band gap closes and Dirac/Weyl semimetal phases are realized. These topological semimetals are robust against randomness, but eventually undergo diffusive metal transition. The critical behavior of this semimetal-diffusive metal transition is described by the density of state scaling.

In this study, we have demonstrated that the scaling of the density of states is valid in many situations. In addition, scaling behaviors of conductance/group velocity is discussed.

研究分野:物性理論

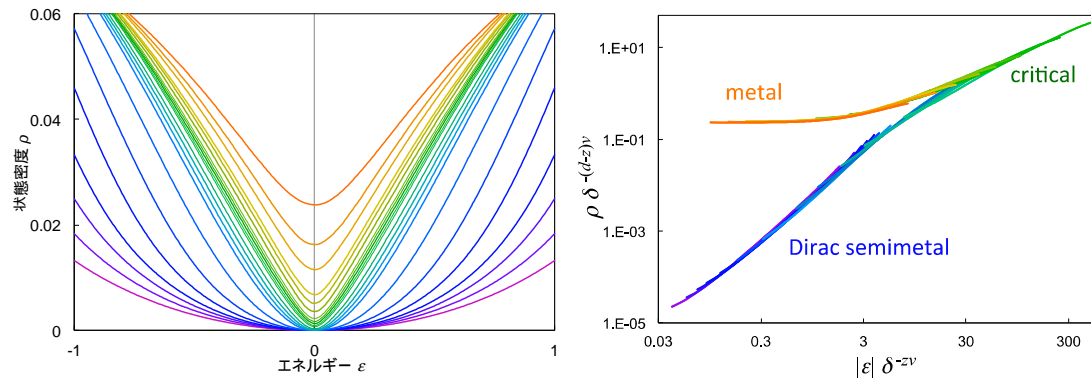
キーワード:トポロジカル絶縁体 ワイル半金属 ディラック半金属 スケーリング理論 量子相転移 状態密度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、物性物理ではトポロジカル絶縁体という新奇な物質が注目を集めている。トポロジカル数は並進対称性の存在するクリーンな系で定義されているが、実際には並進対称性が破れたランダムな系でも存在することが知られていた。

申請者らはトポロジカル系が相転移を起こす際、バンドギャップが閉じ、ディラック半金属相が現れること、これらがランダムネスを強くするとやがて金属に転移することを示し、その量子相転移が状態密度のスケールリングで記述できることを指摘した。左図は状態密度の計算結果で、ランダムネスを強くしていくと放物線型の状態密度の曲率が大きくなり、やがて状態密度はエネルギー0で有限になる金属相へと転移することを示している。この振る舞いを横軸、縦軸をスケール変換することにより統一的に表したものが右図である (Phys. Rev. Lett. 112, 01640 (2014))。この成功を受け、この相転移が他の物質・系にも適用できるか、また、これと類似したスケールリング理論が組み立てられないかを議論した。



2. 研究の目的

ランダムネスが存在するトポロジカル系の量子相転移を記述するスケールリング理論を構築する。この研究の背景となったものは、強いトポロジカル絶縁体と弱いトポロジカル絶縁体の相境界に現れるディラック半金属が、通常の金属へと転移する様子を記述したものである。これが、ワイル半金属にも適用できるか、また、強いトポロジカル絶縁体と弱いトポロジカル絶縁体の相境界以外にどのような相転移を記述できるかを議論する。

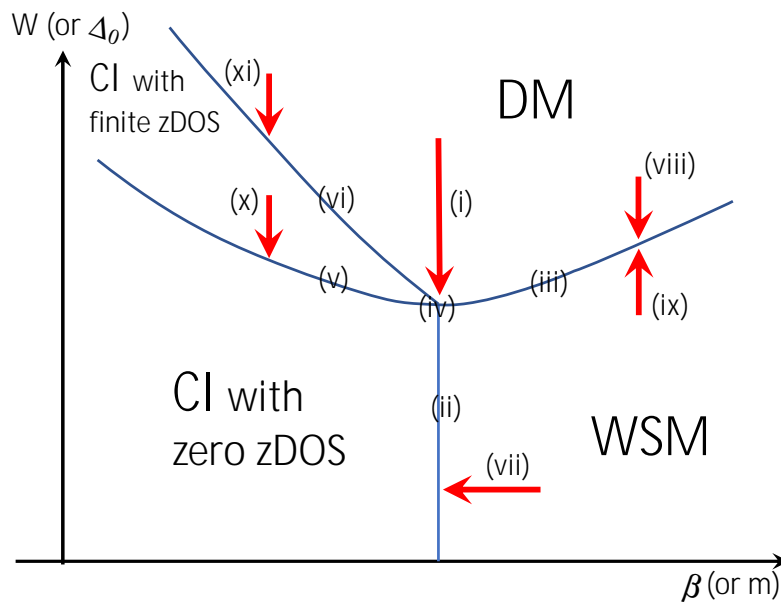
3. 研究の方法

本研究で使う手法はコンピュータシミュレーションとその結果のスケールリング解析である。コンピュータシミュレーションでは、転送行列法、グリーン関数法で局在長を計算するほか、カーネル多項式法で状態密度、および局所状態密度を計算する。また、モデルはトポロジカル絶縁体のモデルのほか、2次元チャーン絶縁体を層状に積み上げた3次元ワイル半金属のモデルを用いる。

状態密度のほか、この相転移の記述が正しければ、ディラック、ワイル半金属における電子の群速度もスケールリング則に従うはずである。そのため、本研究では波束を時間発展させ、そのダイナミクスを解析するシミュレーションも行った。

4. 研究成果

- (1) 状態密度のスケールリングがワイル半金属の量子相転移にも適用可能であることを実証できた。
- (2) 下図のようなワイル半金属の相図（横軸は質量パラメータ，縦軸はランダムネスの強さ）を詳細に議論して，(i)から(xi)における状態密度，速度のスケールリングを明らかにした。
- (3) 図の(ii)に沿って，通常のスケールリングとは異なる異方的なスケールリングが現れることを示した。
- (4) これらの研究と並行して，トポロジカルなマグノンのスケールリング解析を行い，これが量子ホール系と同じ普遍クラスであることを示した。
- (5) 相転移直上での波動関数のマルチフラクタル性に起因する近藤温度の分布を計算した。
- (6) ワイル状態が運動量空間の点でなく線で広がっている場合の相転移，特に粒子・正孔対称性を保つランダムネスがある場合の新しいタイプのアンダーソン転移を調べた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 大槻東巳, 真野智裕	4. 巻 53
2. 論文標題 多層畳み込みニューラルネットワークによるランダム電子系の相図	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 447-454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Keith Slevin, Tomi Ohtsuki	4. 巻 87
2. 論文標題 Critical Exponent of the Anderson Transition Using Massively Parallel Supercomputing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 094703, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.094703	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 大槻東巳	4. 巻 33
2. 論文標題 機械学習・深層学習と物性物理	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 パリティ	6. 最初と最後の頁 6-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 X. Luo, T. Ohtsuki, R. Shindou	4. 巻 98
2. 論文標題 Unconventional scaling theory in disorder-driven quantum phase transition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 020201, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.020201	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 X. Luo, B. Xu, T. Ohtsuki, R. Shindou	4. 巻 97
2. 論文標題 Quantum multicriticality in disordered Weyl semimetals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045129-1, 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.045129	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 Tomi Ohtsuki, Tomoki Ohtsuki	4. 巻 86
2. 論文標題 Deep Learning the Quantum Phase Transitions in Random Electron Systems: Applications to Three Dimensions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 44708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.044708	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 B. Xu, T. Ohtsuki, R. Shindou	4. 巻 94
2. 論文標題 Integer quantum magnon Hall plateau-plateau transition in a spin-ice model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.220403	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 Y. Yoshimura, W. Onishi, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K.-I. Imura	4. 巻 94
2. 論文標題 Comparative study of Weyl semimetal and topological/Chern insulators: Thin-film point of view	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.235414	査読の有無 無
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 K. Slevin, T. Ohtsuki	4. 巻 85
2. 論文標題 Estimate of the Critical Exponent of the Anderson Transition in the Three and Four-Dimensional Unitary Universality Classes	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.104712	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 Tomoki Ohtsuki, Tomi Ohtsuki	4. 巻 85
2. 論文標題 Deep Learning the Quantum Phase Transitions in Random Two-Dimensional Electron Systems	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.123706	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 小林浩二, 大槻東巳, 井村健一郎	4. 巻 51
2. 論文標題 乱れのある3次元トポロジカル物質における量子相転移	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 S. Liu, T. Ohtsuki, R Shindou	4. 巻 116
2. 論文標題 Effect of disorder in a three dimensional layered Chern insulator	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 66401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.116.066401	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 K. Kobayashi, Y. Yoshimura, K.-I. Imura, T. Ohtsuki	4. 巻 92
2. 論文標題 Dimensional crossover of transport characteristics in topological insulator nanofilms	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.92.235407	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 V. Sacksteder, T. Ohtsuki, K. Kobayashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Modification and Control of Topological Insulator Surface States Using Surface Disorder	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 64006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.3.064006	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 Mano Tomohiro, Ohtsuki Tomi	4. 巻 88
2. 論文標題 Application of Convolutional Neural Network to Quantum Percolation in Topological Insulators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123704 ~ 123704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.123704	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 Luo Xunlong, Xu Baolong, Ohtsuki Tomi, Shindou Ryuichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Critical behavior of Anderson transitions in three-dimensional orthogonal classes with particle-hole symmetries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020202, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.020202	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 Slevin Keith、Kettemann Stefan、Ohtsuki Tomi	4. 巻 92
2. 論文標題 Multifractality and the distribution of the Kondo temperature at the Anderson transition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The European Physical Journal B	6. 最初と最後の頁 281-1,281-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjb/e2019-100478-1	査読の有無 無
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9件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Tomi Ohtsuki
2. 発表標題 Detecting topological and non-topological quantum phase transitions using neural network
3. 学会等名 Edge Reconstruction: Transport and Quantum Phase Transitions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ohtsuki
2. 発表標題 Applications of deep 3D convolutional neural network to Anderson and quantum percolation models
3. 学会等名 Anderson Localization and Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ohtsuki
2. 発表標題 Detection of Quantum Phase Transitions in Disordered Systems Using Convolutional Neural Network
3. 学会等名 日本物理学会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大槻東巳
2. 発表標題 深層学習によるランダムなトポロジカル物質相の判定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomi Ohtsuki
2. 発表標題 Effect of disorder in three dimensional layered Chern insulator
3. 学会等名 Recent progress and perspectives in topological insulators: quantum Hall effects, ballistic vs. diffusive regimes and Anderson transitions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomi Ohtsuki
2. 発表標題 Scaling of Dirac/Weyl semimetal to metal transition
3. 学会等名 Anderson Localization in Topological Insulators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Ohtsuki
2. 発表標題 Disordered Chern insulator and Weyl semimetal
3. 学会等名 Spectra of Random Operators and Related Topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 T. Ohtsuki
2. 発表標題 Disordered single and multi-layered Chern insulators
3. 学会等名 Physics of bulk-edge correspondence & its universality From solid state physics to cold atoms (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 T. Ohtsuki
2. 発表標題 Semimetal to metal transi-on in topological insulators and superconductors
3. 学会等名 Intl Workshop on "Delocalisation Transitions in Disordered Systems" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Koji Kobayashi, Tomi Ohtsuki, Ken-Ichiro Imura	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Wiley online library	5. 総ページ数 49
3. 書名 Advanced Topological Insulators	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>www.ph.sophia.ac.jp/~tomi "Modification and Control of Topological Insulator Surface States Using Surface Disorder", "Quantum multicriticality in disordered Weyl semimetals"は、Physical ReviewからEditors' Suggestionsに選ばれている。</p>
--

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
研究分担者	SLEVIN KEITH (Slevin Keith) (90294149)	大阪大学・理学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	井村 健一郎 (Imura Ken-Ichiro) (90391870)	広島大学・先端物質科学研究科・助教 (15401)	