

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740211

研究課題名(和文)量子凝縮系におけるトポロジカル熱力学応答

研究課題名(英文)Topological Thermal Responses of Quantum Condensed Matter Systems

研究代表者

野村 健太郎(Nomura, Kentaro)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：00455776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル絶縁体・超伝導体の熱応答に関する理論的研究をおこなった。トポロジカル超伝導体の表面ではマヨラナ型準粒子励起が生じる。表面マヨラナ準粒子ハミルトニアンに基づき自己無道着ボルン近似の下で乱れた表面状態における状態密度と熱伝導率を計算し、トポロジカル超伝導体の熱伝導特性を明らかにした。温度勾配によって軌道角運動量が誘起される、あるいは試料の力学的回転によって熱分極が発生するといった熱と力学的回転の間の交差相関応答を場の理論の方法で解析した。トポロジカル絶縁体中の電子相関の問題を格子ゲージ理論の手法を用いて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have performed theoretical studies of thermal responses of topological insulators and topological superconductors. On the surface of topological superconductors Majorana quasiparticle excitations are realized. We have clarified the thermal transport by computing the density of states and the thermal conductivities using the self-consistent Born approximation. Basing on the field theoretical approaches, we have studied the cross-correlated responses between thermal gradients and mechanical rotation. The interaction effects of electrons in topological insulators were studied using the lattice gauge theory.

研究分野：数物系

科研費の分科・細目：物性I

キーワード：トポロジカル絶縁体 トポロジカル超伝導体 熱伝導

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した2年前は、物質の新しい物質の量子状態としてトポロジカル絶縁体に関する理論的予測およびその実験的観測が発表され、多くの研究者の注目を集める状況であった。トポロジカルに非自明であり、通常の物質とは異なる事は、トポロジカル不変量によって特徴付けられる。3次元物質として Bi_2Se_3 がトポロジカル絶縁体物質であることが角度分解光実験によって明らかにされた。一方、トポロジカル絶縁体の超伝導類似物に相当するトポロジカル超伝導体の研究が始まり、銅をインターカレーとした Bi_2Se_3 で観測された超伝導状態がトポロジカルに非自明な、トポロジカル超伝導体であることが理論的に予言された。このような背景の下でコミュニティでは次の研究段階が模索されていた。特にトポロジカルに非自明な事に起因する現象の発見が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的はトポロジカル絶縁体およびトポロジカル超伝導体における熱応答の理論を構築し、質的に新しいトポロジカル量子現象を予言する事であった。なぜ熱応答に着目したかは、トポロジカル超伝導体ではゲージ対称性が自発的に破れた相になっており、そのため電荷保存則が理論的に成立せず、そのため電磁応答から有益な情報が取り出せないという問題に端を発する。超伝導体では電荷保存則が成立しなくても、エネルギー保存則は成立するため、熱流あるいはエネルギー流に対する応答に超伝導体のトポロジカルな特徴が現れる事を期待した。それに加え、トポロジカル超伝導体の表面ではギャップレスのマヨラナ型準粒子が実現する事が理論的に示されているが、このマヨラナ準粒子は電荷中性であるため、その伝導現象は電気伝導ではなく、熱伝導として現れるのが自然である。そこで本研究では、まずマヨラナ粒子に対する熱伝導率(対角熱伝導率およびホール熱伝導率)を計算する理論を構築する事を目標とした。さらにこれを使い、熱伝導率を具体的に計算する事を目指した。量子ホール系やトポロジカル絶縁体ではトポロジカル不変量が交差相関応答に現れる事に着目し、トポロジカル超伝導体における熱現象の中で、非自明な交差相関応答を見つけ、その理論を構築した。これらの解析は相互作用を無視した状況で行われるが、相互作用の効果を場の量子論の方法を用いた解析を試みた。

3. 研究の方法

トポロジカル超伝導体の表面ではマヨラナ型準粒子が実現するが、そのマヨラナ粒子

の熱伝導率を、本研究で初めて導出した「拡張 Weidemann-Franz 則」と線形応答理論を用いて計算する方法を開発した。これによって乱れたトポロジカル超伝導体表面における対角熱伝導率を自己無道着ボルン近似を用いて計算した。また時間反転対称性を破る摂動として磁場や磁気モーメントと結合したトポロジカル超伝導体の熱ホール伝導率を格子模型を用いて計算する方法を開発し、用いた。

電子相関を扱う際には、通常よく用いられる平均場近似に加え、格子ゲージ理論の分野で開発された強結合展開法を用いた。後者は相互作用の強い系を非摂動的に扱う事が可能であり、これによって相互作用と変数とする相関を完成させる事が可能となる。

4. 研究成果

マヨラナ粒子の熱伝導(文献1)

3次元トポロジカル超伝導体の表面において実現するマヨラナ型準粒子による熱伝導率および状態密度の計算を行った。乱れとして、超伝導オーダーパラメータが空間的に揺らいだ状況を考え、Bogoliubov-de Gennes 方程式をグリーン関数と自己無道着近似を用いて解いた。これにより乱れのあるトポロジカル超伝導体表面におけるマヨラナ粒子の状態密度と熱伝導率を計算した。特に乱れの無い極限では、熱伝導率は通常のディラック電子の伝導率の半分の値が得られた。これはマヨラナ粒子がディラック粒子の「半分」の自由度を持つ事に起因する。この結果は文献(1)として出版されている。

次に時間反転対称性を破ったトポロジカル超伝導体表面におけるマヨラナ粒子の量子異常熱ホール効果を調べた。時間反転対称性を破る方法として、(i)磁氣的相互作用を導入する方法と、(ii)複素数値のオーダーパラメータをもつ s 波超伝導体をトポロジカル超伝導体の表面に結合させる方法の両方を採用した。その結果、(i)と(ii)では異なった熱伝導率の量子化則を得た。

バルク状態のもつトポロジカル不変量と表面における量子化熱ホール伝導率を比較したところ、(ii)の状況での熱ホール伝導率の量子化値がバルクのトポロジカル不変量と一致した。このようにこれまでは純粋な理論的枠組みでしか議論されなかったトポロジカル不変量が実際の熱伝導率として現れる事を明らかにした。この仕事は、Physical Review B に現在投稿中であり、プレプリントは <http://arxiv.org/abs/1403.1021> にて公開されている。

電磁熱交差相関応答(文献2)

トポロジカル絶縁体の興味深い特徴としてトポロジカル電気磁気効果あるいは量子交差相関応答とよばれる現象がある。トポロジカル絶縁体に電場をかけると磁気モー

ントが発生する。同様に、磁場をかけると内部に電気分極が発生する。

電場(磁場)で磁化(電気分極)を誘起するというように、電気的自由度と磁気的自由度が交差した形で応答するのが特徴である。本研究では、この交差相関応答を拡張し、温度勾配によって軌道角運動量が誘起される、あるいは試料の力学的回転によって熱分極が発生するといった熱と力学的回転の間の交差相関応答を予言する理論を構築した。

この現象の背後には熱勾配が重力と等価であるという、一般化された等価原理がある。上述の電磁応答に加え、重力に対する応答にトポロジカル不変量が生じる事を明らかにした。したがって量子化されたホール伝導率が連続変形の下で変わらないように、非自明なトポロジに起因する量子化交差相関の関係も連続変形に対し不変となる。これらの関係はトポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体の他にも近年の素粒子物理学の重量なテーマであるDブレーンの物理にも現れる事を示し、物性系から素粒子系を含む広いトポロジカルなクラスが交差相関応答で特徴付けられる事を明らかにした。

乱れの効果(3,4,8,9)

スピン軌道相互作用は乱れの物理でも様々な効果をもたらす。トポロジカル絶縁体および超伝導体はその特殊なバンド構造に起因するが、乱れの影響は重要となる。特にトポロジカル絶縁相から自明な絶縁相や金属相などへの相転移が乱れによって引き起こされる。このトポロジカル相転移における臨界現象を輸送現象の観点から明らかにした。得られた臨海指数は2.7であり、このことからトポロジカル絶縁体から金属相への転移は、2次元におけるシンプレクティッククラスで知られる転移点と同じユニバーサリティクラスに属する事が示唆された。加えて乱れによって起こるトポロジカル・アンダーソン絶縁相と金属相の間の転移点も同様のユニバーサリティクラスに属する(文献4)。このように2次元系では数値シミュレーションが3次元に比べよく機能する。われわれは転送行列法を用いて乱れた3次元トポロジカル絶縁体の相構造を明らかにした(文献8)。また磁気抵抗への量子補正からバンド構造に関する知見を得る事ができる。実際、実験的に得られた磁気抵抗の磁場依存性から3層グラフェンのスピン軌道相互作用やWSe₂のバンド構造を明らかにした。

電子間相互作用の効果(5,6,7,10)

近年、理論的に提案されたほとんどすべてのトポロジカル状態は相互作用を無視した系である。我々は相互作用を入れた場合の相関を調べ、相互作用が本質的役割を担って実現する新しい量子状態が存在する事を発見した。この状態は高エネルギー物理学の格子ゲージ理論で提案されている対称性の破れ

た状態とアナロジーがある(文献6)。同様の状態がダイヤモンド格子における反強磁性状態でも実現する事を明らかにした。後者の研究成果はPhysical Review B誌に投稿中であり、その原稿のプレプリントは<http://arxiv.org/abs/1401.4523>にて公開してある。

これまで知られているトポロジカル絶縁体はビスマス系の化合物でp軌道からなる電子状態が本質的である。この系に関してはオンサイトのハバード型相関エネルギーはそれほど大きくはない。したがって相対的に長距離クーロン相互作用が重要となる。特にディラック電子系ではフェルミ準位における状態密度がゼロであるため、遮蔽効果が抑制されるので長距離クーロン相互作用は重要である。長距離クーロン相互作用の下での3次元トポロジカル絶縁体の安定性を格子ゲージ理論の枠組みで調べた。その結果トポロジカル絶縁体状態は強い長距離クーロン相互作用に対しても頑強であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10件)

1. R. Nakai, K. Nomura

“Disorder effects on thermal transport on the surface of topological superconductors by the self-consistent Born approximation”

Phys. Rev. B 89, 064503 – 1-9 (2014).

[査読有]

2. A. Furusaki, N. Nagaosa, K. Nomura, S. Ryu, T. Takayanagi,

“Electromagnetic and thermal responses in topological matter: topological terms, quantum anomalies and D-branes”

Comptes Rendus Physique 14, 871-883 (2013). [査読有]

3. H. Yuan, M. S. Baharamy, K. Morimoto, S. Wu, K. Nomura, B.-J. Yang, H. Shimotani, R. Suzuki, M. Toh, C. Kloc, X. Xu R. Arita, N. Nagaosa, Y. Iwasa

“Zeeman-type spin splitting controlled by an electric field”

Nature Physics 9, 563-569 (2013). [査読有]

4. A. Yamakage, K. Nomura, K.-I. Imura, Y. Kuramoto,
“Criticality of the metal–topological insulator transition driven by disorder”

Phys. Rev. B 87, 205141 – 1-11 (2013). [査読有]

5. A. Sekine, T. Z. Nakano, Y. Araki, K. Nomura

“Strong Coupling Expansion in a Correlated Three-Dimensional Topological Insulator”

Phys. Rev. B 87, 165142 – 1-9 (2013). [査読有]

6. A. Sekine, K. Nomura
“Electron Correlation Induced Spontaneous Symmetry Breaking and Weyl Semimetal Phase in a Strongly Spin-Orbit Coupled System”

J. Phys. Soc. Jpn. 82, 033702 – 1-4 (2013). [査読有]

7. T. Ito, K. Nomura, N. Shibata
“Quasi-Particle Tunneling in Anti-Pfaffian Quantum Hall State”

J. Phys. Soc. Jpn. 81, 083705 – 1-4 (2012). [査読有]

8. S. Ryu, K. Nomura
“Disorder-induced quantum phase transitions in three-dimensional topological insulators and superconductors”

Phys. Rev. B 85, 155138 – 1-18 (2012).

[査読有]

9. Z. Chen, H. Yuan, Y. Zhang, K. Nomura, T. Gao, Y. Gao, H. Shimotani, Z. Liu, Y. Iwasa

“Tunable Spin–Orbit Interaction in Trilayer Graphene Exemplified in Electric-Double-Layer Transistors”

Nano Lett., 12, 2212-2216 (2012). [査読有]

10. T. Ito, K. Nomura, N. Shibata
“Quantum Phase Transitions Induced by the Spin–Orbit Interaction in the $N = 1$ Landau Level”

J. Phys. Soc. Jpn. 81, 058002 – 1-7 (2012). [査読有]

{学会発表}(計 6件)

1. (招待講演) 野村健太郎
“ゼロギャップ半導体におけるワイル半金属相とスピン物性”

日本物理学会年次大会 領域4 チュートリアル講演

2014/3/28 東海大学

2. (招待講演) Kentaro Nomura
“Thermal current induced orbital angular momentum in topological states”

14th REIMEI Workshop on Spin Currents and Related Phenomena

Feb. 10-13, 2014, Institut Laue-Langevin

3. (招待講演) Kentaro Nomura
“Quantum Cross-Correlated Responses of Topological Matters”

International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with

Broken Symmetries 2013

Oct. 23-26, 2013, Ginowan City, Okinawa,
Japan

4. (招待講演) Kentaro Nomura

“Electromagnetic and thermal responses
in topological insulators and
superconductors”

7th ISSP International Workshop and
Symposium

Emergent Quantum Phases in
Condensed Matter

June 12-14, 2013 ISSP The University of
Tokyo, Kashiwa, Japan

5. (招待講演) Kentaro Nomura

“Thermally induced mechanical motion
of topological insulators and
superconductors”

8th ASRC International Workshop on
Spin Mechanics

Feb 24-26, 2013 Tokai, Japan

6. (招待講演) 野村健太郎

“トポロジカル絶縁体・超伝導体：概論”

日本物理学会秋季大会 領域 4, 領域 6,
領域 8, 領域 9 合同シンポジウム

主題：トポロジカル絶縁体・超伝導体研究
の最近の進展と今後の展望

2012/9/18 横浜国立大学

〔図書〕(計 1 件)

“ Physics of Graphene ” , edited by H. Aoki
and M. S. Dresselhaus, Springer (2014),
350 Pages,
Chapter 9, Symmetry Breaking in
Graphene’s Quantum Hall Regime: The
Competition Between Interactions and
Disorder,
Y. Barlas, A.H. MacDonald, and K. Nomura,
Page 301-326.

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
野村 健太郎 (Nomura Kentaro)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：00455776