

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05130

研究課題名(和文) トポロジカル絶縁体表面のディラック電子系に対するメソスコピック効果

研究課題名(英文) Mesoscopic effects on Dirac electrons on the surface of topological insulators

研究代表者

高根 美武 (Takane, Yositake)

広島大学・先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40254388

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：弱い(および強い)トポロジカル絶縁体表面に現われる特異なディラック電子状態の振る舞いを様々な状況において理論的に考察し、メソスコピック効果が新奇な電気伝導現象を引き起こすことを示した。特に、弱いトポロジカル絶縁体表面に原子レベルの微視的なステップ構造が存在する場合、ある条件の下で擬完全伝導チャンネルが発現し、電気伝導特性が大幅に向上することを明らかにした。加えて、ワイル半金属やグラフェンなどのトポロジカルなディラック電子系においても、様々なメソスコピック現象がその電気伝導特性に重要な影響を与えることを示した。

研究成果の概要(英文)：By theoretically studying exotic Dirac electron states on the surface of weak, as well as strong, topological insulators in various situations, we have shown that mesoscopic effects manifest themselves in the electron transport properties of Dirac electrons, leading to notable new phenomena. In particular, in the presence of an atomic step structure on the surface of a weak topological insulator, a pseudo perfectly conducting channel is stabilized under a certain condition, giving rise to a significant increase in the electron conductivity of the system. In addition, we have also shown that various mesoscopic phenomena significantly affect the electron transport properties of Weyl semimetal and graphene systems.

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

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体とは、固有関数のトポロジカルな性質により発現する特異なバンド絶縁体である。最大の特徴は、バルクは絶縁体でありながら表面にのみギャップレスな2次元(2D)電子系が現れることである。この表面電子は質量ゼロのディラック方程式に従うのでディラック電子と呼ばれ、ディラック錐と呼ばれる円錐状のエネルギー分散を持つ。トポロジカル絶縁体は強いトポロジカル絶縁体(STI)と弱いトポロジカル絶縁体(WTI)に二分され、表面電子の振る舞いは両者で定性的に異なる。STIのディラック電子は系の表面全体に現れ、ただ一つ(厳密には奇数個)のディラック錐をもつ。一方、WTIのディラック電子は特定の表面にのみ現れ、二つ(厳密には偶数個)のディラック錐をもつ。

量子細線状のトポロジカル絶縁体に焦点を絞り、ディラック電子に対する既知のメゾスコピック効果について言及しておく。STIの量子細線では励起スペクトルに有限サイズギャップが生じるが、これは表面電子が細線を周方向に一回りする際に付着するベリー位相に起因する。そのため、十分長い乱れたSTIはアンダーソン局在を起こして絶縁体化する。STIのディラック電子は乱れによって局在しないと考えられているが、メゾスコピック効果によって状況は一変し得るのである。一方、WTIの量子細線では系を構成する原子層数の偶奇が重要である。偶数なら表面ディラック電子のスペクトルには有限サイズギャップが開いて局在し、奇数ならギャップレスで金属的、と予想されている。

2. 研究の目的

上記のように、メゾスコピック効果はディラック電子に重要な影響を与える。しかし、その理論的な検討は立ち遅れており、特にWTIにおける研究例は僅少である。その理由の一つはWTIの表面状態を記述する有効的な2Dモデルの不在にあり、事実、従来の研究はほとんど3D格子モデルを用いた数値解析で占められる。この状況を打開するため、当申請者はバルクのWTIに対する3D格子モデルから出発して表面ディラック電子に対する2D有効モデルを導出した。これを用いればWTIにおけるメゾスコピック効果を容易に検討できると期待される。本研究の目的は、この2D有効モデルを活用し、様々なメゾスコピック効果がディラック系の電子物性(特に電気伝導)に及ぼす影響を明らかにすることである。

3. 研究の方法

以下に列挙する具体的な研究課題を通して、トポロジカル絶縁体表面のディラック電子系に対するメゾスコピック効果を多面的に解明する。

- [1] 弱いトポロジカル絶縁体(WTI)表面におけるランダウ準位のスペクトル。
- [2] WTI表面に作製した量子細線ネットワークにおける電気伝導特性。
- [3] 原子ステップ構造をもつWTI表面におけるバンド分散と電気伝導。
- [4] 乱れを含む強いトポロジカル絶縁体(STI)表面のディラック電子系における電気伝導度の数値シミュレーション。

全ての研究課題が2D有効モデルの活用を前提としており、それなくして効率的な遂行は望めない。

4. 研究成果

上記[1]-[4]だけでなく、当初は予定していなかったディラック電子系に関する課題(ワイル半金属やグラフェン関連)についても成果を挙げた。以下、論文として出版した成果について簡潔に記述する。

- [1] 弱いトポロジカル絶縁体(WTI)表面のディラック電子系におけるランダウ量子化について考察し、強磁場領域において二つのバレーの存在を反映する特異な振る舞いが生じることを明らかにした。
- [2] WTI表面に作製した量子細線ネットワークの電気伝導特性が、各細線を構成する原子層数の偶奇性に強く依存することを明らかにした。
- [3] 原子ステップ構造があるWTI表面における電気伝導特性を数値シミュレーションによって検討し、ある条件を満たすステップ構造のもとで擬完全伝導チャンネルが発現することを明らかにした。
- [4] STI表面に現れる表面ディラック電子系において、乱れの弱い領域では幅方向の境界条件に依存した非普遍的な振る舞いが生じることを示した。また、清浄極限が不安定固定点に対応することを見出した。

以下は当初は予定していなかった課題に関する成果である。

- [5] ワイル半金属における異常な電気磁気応答に関して、連続極限のディラック模型に基づいた解析結果と格子模型に基づいた解析結果が互いに矛盾することが知られていた。その原因を解明し正しい記述を与える処方箋を与えた。
- [6] グラフェン・ナノリボン系における完全伝導チャンネルに対する位相緩和の影響を数値的に検討し、位相緩和が完全伝導チャンネルを安定化させることを見出した。

[7] ワイル半金属のカイラル表面状態に対する乱れの影響について考察した。ホール・バー状に電極を配置したワイル半金属におけるホール・コンダクタンスを数値的に計算し、乱れがある臨界値より小さいならカイラル表面状態は安定に存在し、異常量子ホール効果が発現することを示した。
[8] 二層グラフェンと超伝導体との接合系における微分コンダクタンスを解析し、従来知られていなかった共鳴的な電気伝導現象が生じ得ることを示した。
[9] 表面にステップ構造のあるワイル半金属において、ステップ端に沿ってカイラルな表面状態が現れる条件を明らかにした。
[10] ワイル半金属の風変わりな電子状態は単純なワイル方程式では記述できないことが知られている。この困難を解決する理論的な手法を開発した。
[11] POSTEC のグループが作製したグラフェン・ジョセフソン接合の特性解析を行ない、世界最高の強固なジョセフソン結合の実現を立証した。

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 12件)

1. Landau levels on a surface of weak topological insulators, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 084710/1-9 (2015) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.084710>

2. Manipulating quantum channels in weak topological insulator nano-architectures, A. Matsumoto, T. Arita, Y. Takane, Y. Yoshimura, and K.-I. Imura, Phys. Rev. B 92, 195424/1-14 (2015) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.195424>

3. Dephasing-induced stabilization of a perfectly conducting channel in disordered graphene nanoribbons with zigzag edges, Y. Shimomura and Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 014704/1-6 (2016) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.014704>

4. Regularization of a massless Dirac model to describe anomalous electromagnetic response of Weyl semimetals, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 013706/1-5 (2016) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.013706>

5. Weak topological insulators with step edges: Subband engineering and its effect on electron transport, T. Arita and Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 033706/1-5 (2016) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.033706>

6. Time-dependent Ginzburg-Landau equation and Boltzmann transport equation for charge-density-wave conductors, Y. Takane, M. Hayashi, and H. Ebisawa, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 084709/1-7 (2016) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.084709>

7. Finite-size scaling analysis of the conductivity of Dirac electrons on a surface of disordered topological insulators, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 094715/1-5 (2016) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.094715>

8. Disorder effect on chiral edge modes and anomalous Hall conductance in Weyl semimetals, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 124711/1-8 (2016) 査読有.
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.124711>

9. Andreev reflection in a bilayer graphene junction: Role of spatial variation of the charge neutrality point, Y. Takane, K. Yarimizu, and A. Kanda, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 064707/1-8 (2017) 査読有.
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.064707>

10. Chiral surface states on the step edge in a Weyl semimetal, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 104709/1-6 (2017) 査読有.
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.104709>

11. Regularized framework of a Weyl equation for describing a Weyl semimetal: Application to the case with a screw dislocation, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 123708/1-5 (2017) 査読有.
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.123708>

12. Short ballistic Josephson coupling in planar graphene junctions with inhomogeneous carrier doping, J. Park, J. H. Lee, G.-H. Lee, Y. Takane, K.-I. Imura, T. Taniguchi, K. Watanabe, and H.-J. Lee, Phys. Rev. Lett. 120, 077701/1-6 (2018) 査読有.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.077701>

〔学会発表〕(計 11件)

1. Dephasing effect on a perfectly conducting channel in disordered graphene nanoribbons with zigzag edges, Y. Shimomura and Y. Takane, Hilton Waikoloa Village (USA), ISANN 2015, Dec. 1, 2015.

2. Electron transport on a surface of weak topological insulators with step edges, T. Arita and Y. Takane, Hilton Waikoloa Village (USA), ISANN 2015, Dec. 1, 2015.

3. ワイル半金属の風変わりな電気磁気応答と底抜けディラック模型の正則化, 高根美武, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学, Mar. 19, 2016.

4. 位相緩和によるジグザグ GNR 完全伝導チャンネルの安定化, 下村祐司, 高根美武, 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学, Mar. 22, 2016.

5. Influence of Disorder on Chiral Edge Modes in Weyl Semimetals, Y. Takane, 京都大学, Physics of bulk-edge correspondence and its universality, Sep. 13, 2016.

6. ステップ構造を有する弱いトポロジカル絶縁体の電気伝導特性, 高根美武, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, Sep. 13, 2016.

7. グラフェン垂直接合におけるジョセフソン電流, 高根美武, 第24回渦糸物理国内会議, あきた芸術村, Nov. 29, 2016.

8. ワイル半金属のカイラル端状態に対する乱れの効果, 高根美武, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, Mar. 20, 2017.

9. 二層グラフェン接合におけるアンドレーエフ反射, 高根美武, 鎌水勝秀, 神田晶申, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手大学, Sep. 21, 2017.

10. ワイル方程式でワイル半金属を記述する方法: 螺旋転位を含む系への応用,

高根美武, 日本物理学会 第73回年次大会, 東京理科大学, Mar. 24, 2018.

11. 螺旋転位を導入したワイル半金属の電子状態, 児玉健太郎, 高根美武, 日本物理学会 第73回年次大会, 東京理科大学, Mar. 24, 2018.

〔図書〕(計 0件)

〔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
高根 美武 (TAKANE, Yositate)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授
研究者番号: 40254388

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
井村 健一郎 (IMURA, Ken-Ichiro)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教
研究者番号: 90391870

(4) 研究協力者
()