

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540375

研究課題名(和文)ディラック電子系に対する超伝導近接効果

研究課題名(英文) Superconducting proximity effect on Dirac electron systems

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)： グラフェンやトポロジカル絶縁体の表面に現れる二次元ディラック電子系に対する超伝導近接効果について理論的に検討した。グラフェンを介したジョセフソン効果を記述する汎用性の高い準古典理論を定式化し、また、ディラック電子系に対する近接効果を記述する一般的な有効モデルを導出した。これらの理論的枠組みを用いれば、従来の現象論的なモデルに基づいた議論を越えたより精密な解析が可能である。関連する課題として、トポロジカル絶縁体表面に現れるディラック電子系を記述する理論に取り組み、多くの成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)： We have investigated the superconducting proximity effect on Dirac electrons which appear in graphene sheets and topological insulators. We have developed a general quasi-classical theory of the Josephson effect in graphene, and have derived a general effective model for Dirac electrons under the superconducting proximity effect. These theoretical frameworks enable us to accurately describe the proximity effect in Dirac electron systems beyond ordinary phenomenological models.

As the subject related to those mentioned above, we have also developed the theoretical framework to describe Dirac electrons on a surface of topological insulators.

研究分野：物性物理学

キーワード：物性理論

## 1. 研究開始当初の背景

グラフェンにおける超伝導近接効果の研究は 2000 年代中盤まで遡ることができるが、この研究計画を温めた 2010 年度においても近接効果の理論的枠組みには幾つかの不十分な点が残されていた。一つ目は、グラフェン系に対する準古典グリーン関数法が定式化されていないことであった。準古典グリーン関数法は近接効果を記述する枠組みとして広く用いられている優れた手法であるが、グラフェン系に対しては理論の整備が立ち遅れていたのである。二つ目は、近接効果を取り込む際に用いられたモデルにある。従来のモデルではグラフェン中に定数の有効対ポテンシャルを導入して現象論的に近接効果を表現していたが、これでは超伝導体とグラフェン間の結合の強弱などを取り込むことが出来ない。

グラフェン中の電子は質量ゼロのディラック方程式で記述されるため、ディラック電子と呼ばれる。当時、グラフェン以外の物質系においても二次元的なディラック電子系が発見されており、代表例はトポロジカル絶縁体 (TI) 表面に現れるディラック電子系である。トポロジカル絶縁体は強い TI と弱い TI に二分され、前者の場合は表面全体にディラック電子が出現し、後者は積層構造を有し側面のみディラック電子が現れる。このような特異なディラック電子系も、近接効果の研究対象として興味深いと考えていた。

## 2. 研究の目的

グラフェンにおける超伝導近接効果に関しては、上で述べたように主として二つの問題点が残されていた。一つは準古典グリーン関数法が定式化されていないこと、もう一つは定数の有効対ポテンシャルを用いたモデルが不十分なことである。これらの問題点を解決し、近接効果を記述するより優れた理論的枠組みを構築することを主たる目的と設定した。

また、研究対象とする物理系をグラフェンに限定せず、強いトポロジカル絶縁体および弱いトポロジカル絶縁体にまで拡張し、その表面ディラック電子系に対する近接効果についても、得られた枠組みを応用することを構想した。

## 3. 研究の方法

第一の課題は、グラフェン系におけるジョセフソン電流の公式を準古典グリーン関数法に基づいて導出することである。この際、グラフェン中に定数の有効対ポテンシャルを導入する従来のモデルを越えるため、代わりに近接効果を表現する自己エネルギーを

導入することにした。自己エネルギーは、超伝導体とグラフェン間にトンネル結合を仮定すれば微視的に評価することが出来る。これに基づいて準古典グリーン関数法を定式化し、ジョセフソン電流の公式を導出する。第二の課題は、二次元ディラック電子系に対する超伝導近接効果を記述する一般的な有効モデルを導出することである。二次元ディラック電子系が層状のバルク超伝導体と平面的に結合した微視的モデルから出発し、超伝導体の自由度を消去することによって有効モデルを導出する。これこそが本研究の中心的な課題と見なすことが出来る。第三の課題は、ヘリカルな一次元ディラック電子系における超伝導近接効果を記述する理論を定式化することである。一次元系では電子間相互作用の影響が本質的に重要であり、系は朝永-Luttinger 液体理論によって記述される。これを近接効果を取り込んで定式化し、様々な物理量に対する影響を考察する。

## 4. 研究成果

1. グラフェン系におけるジョセフソン電流  
グラフェン系に対する準古典グリーン関数法を定式化し、また、超伝導近接効果を表す自己エネルギーを導出した。これらを用いて清浄極限における単層および二層グラフェンを介した DC ジョセフソン電流の簡便な公式の導出に成功した。得られた公式はグラフェンと超伝導体間の結合強度をパラメータとして含み、強結合極限において従来の結果を再現する。つまり、従来の定数対ポテンシャル・モデルに基づいた解析は強結合極限でしか正当化され得ないことが明らかとなった。

不純物などによる乱れの効果については検討することが出来なかった。これは今後の課題である。

### 2. 一般的な有効モデルの導出

任意の二次元ディラック電子系に対する超伝導近接効果を記述する一般的な有効モデルを導出した。このモデルにもディラック電子系と超伝導体間の結合強度を特徴づけるパラメータが含まれており、強結合から弱結合の極限まで統一的に議論することが可能となった。また、従来のモデルでは記述できなかった、バルク超伝導体のギャップ構造がディラック電子系に与える影響も適切に取り込めるようになった。このモデルを近接効果ディラック電子系の状態密度の計算に応用し、その有用性を明らかにした。

### 3. 一次元ディラック系における近接効果

超伝導近接効果を取り込んで、ヘリカルな朝永-Luttinger 液体理論を構築した。この枠組みは、二次元量子スピン・ホール絶縁体の一次元エッジチャンネルを超伝導体と接合し

た系に適用可能である。また、これを用いて、一次元ディラック電子系から構成されたジョセフソン接合における局所状態密度を解析した。その結果、超伝導電極の周辺では、近接効果と相互作用効果の協調により低エネルギー領域の状態密度が顕著に増大することを見出した。一方、電極から十分離れた場所では、状態密度は基本的には減少するが、非自明なエネルギー依存性が生じることを示した。

#### 4. トポロジカル絶縁体のディラック電子系

発展的な課題として、トポロジカル絶縁体表面に現れる二次元ディラック電子系の振る舞いを様々な状況において解析した。例えば、折れ曲がった表面を持つ強いトポロジカル絶縁体におけるディラック電子の振る舞いについて解析を進め、ディラック点近傍では鋭角的な角においても後方散乱が生じないことを示した。また、この議論を任意の湾曲した表面に一般化し、任意の表面電子系に適用できる一般的なディラック方程式を導出した。また、弱いトポロジカル絶縁体表面のディラック電子系を記述する簾型の有効ディラック方程式を導出した。これらの成果はトポロジカル絶縁体における近接効果を記述する際の出発点として有用であると考えている。

#### 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 13 件)

1. Noninvasive metallic state, K.-I. Imura and Y. Takane, JPS Conf. Proc. 4, 013005 (2015) (4 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJP.4.013005>.
2. Effective model for massless Dirac electrons on a surface of weak topological insulators, T. Arita and Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 124716 (2014) (7 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.124716>.
3. Delocalization of surface Dirac electrons in disordered weak topological insulators Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 103706 (2014) (4 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.103706>.
4. Local density of states in a helical Tomonaga-Luttinger liquid of loop and Josephson junction geometries, Y. Takane, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 044714 (2014) (6 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.044714>.

5. One-dimensional topological insulator: A model for studying finite-size effects in topological insulator thin films, M. Okamoto, Y. Takane, and K.-I. Imura, Phys. Rev. B 89, 125425 (2014) (9 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.125425>.
6. Superconducting proximity effect on a two-dimensional Dirac electron system Y. Takane and R. Ando, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 014706 (2014) (7 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.014706>.
7. Perfectly conducting channel on the dark surface of weak topological insulators, Y. Yoshimura, A. Matsumoto, Y. Takane, and K.-I. Imura, Phys. Rev. B 88, 045408 (2013) (4 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.88.045408>.
8. Unified description of Dirac electrons on a curved surface of topological insulators, Y. Takane and K.-I. Imura, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 074712 (2013) (8 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.074712>.
9. Protection of the surface states in topological insulators: Berry phase perspective, K.-I. Imura and Y. Takane, Phys. Rev. B 87, 205409 (2013) (6 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.205409>.
10. Finite-size energy gap in weak and strong topological insulators, K.-I. Imura, M. Okamoto, Y. Yoshimura, Y. Takane, and T. Ohtsuki, Phys. Rev. B 86, 245436 (2012) (15 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.245436>.
11. Spherical topological insulator, K.-I. Imura, Y. Yoshimura, Y. Takane, and T. Fukui, Phys. Rev. B 86, 235119 (2012) (12 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.235119>.
12. Dirac electrons on a sharply edged surface of topological insulators, Y. Takane and K.-I. Imura, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 093705 (2012) (4 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.235119>.
13. Quasiclassical theory of the Josephson effect in ballistic graphene junctions, Y. Takane and K.-I. Imura, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 094707 (2012) (13 pages), 査読有, <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.094707>.

〔学会発表〕(計 14 件)

1. 乱れを含む弱いトポロジカル絶縁体表面における電気伝導度,  
高根美武, 日本物理学会, 早稲田大, Mar 21 (2015).
2. Delocalization of surface Dirac electrons in disordered weak topological insulators,  
Y. Takane, Int. Conf. Topological Quantum Phenomena, 京都大, Dec 17 (2014).
3. 弱いトポロジカル絶縁体の表面状態に対する有効 2 次元モデル,  
有田貴志, 高根美武, 日本物理学会, 中部大, Sep 8 (2014).
4. 有限長のヘリカル Tomonaga-Luttinger 液体における局所状態密度,  
高根美武, 日本物理学会, 中部大, Sep 8 (2014).
5. ヘリカル朝永-Luttinger 液体から成るジョセフソン接合における局所状態密度,  
高根美武, 第 22 回渦糸物理国内会議, ハイランドふらの, Jul 10 (2014).
6. 2 次元ディラック電子系に対する超伝導近接効果,  
高根美武, 安東涼, 日本物理学会, 東海大, Mar 27 (2014).
7. トポロジカル絶縁体表面における自発的 AB 効果と表面状態の頑強性,  
吉村幸徳, 井村健一郎, 高根美武, 日本物理学会, 東海大, Mar 27 (2014).
8. トポロジカル絶縁体の表面電子系に対する一般化したディラック方程式,  
高根美武, 井村健一郎, 日本物理学会, 徳島大, Sep 27 (2013).
9. かどで跳ね返る (vs. 跳ね返らない) Dirac 電子,  
井村健一郎, 岡本真由子, 吉村幸徳, 高根美武, 日本物理学会, 徳島大, Sep 27 (2013).
10. 弱いトポロジカル絶縁体の「暗い」表面に現れる完全伝導チャンネル,  
吉村幸徳, 松本哲彦, 井村健一郎, 高根美武, 日本物理学会, 広島大, Mar 27 (2013).
11. しみ込め(ま)ない金属状態  
井村健一郎, 高根美武, 日本物理学会, 広島大, Mar 27 (2013)
12. 折れ曲がったトポロジカル絶縁体表面におけるディラック電子,  
高根美武, 井村健一郎, 日本物理学会, 横国大, Sep 20 (2012).

13. 球状トポロジカル絶縁体の表面状態,  
井村健一郎, 吉村幸徳, 高根美武, 福井隆裕,  
日本物理学会, 横国大, Sep 20 (2012)

14. Noninvasive Metallic State,  
K.-I. Imura and Y. Takane, Int. Symp. Nanoscience and Quantum Physics 東工大,  
Dec 17 (2012).

〔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:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/takane/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(4) 研究協力者

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