

平成30年6月20日現在

機関番号：13901
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2017
課題番号：15K13498
研究課題名(和文) ワイル半金属における量子輸送現象の理論

研究課題名(英文) Theory of transport in Weyl semimetal

研究代表者

田仲 由喜夫 (Tanaka, Yukio)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40212039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：通常絶縁体からトポロジカル絶縁体への量子相転移点近傍で「ディラック半金属」や「ワイル半金属」と呼ばれるギャップレス電子系が現れることが知られている。これらの系ではスピンと運動量の自由度が結合した結果新奇現象が現れる。本研究では、ワイル半金属および関連物質における量子現象の研究を行った。例えば、1)ワイル半金属における光磁気応答 2)トポロジカル絶縁体超格子におけるアクシオン電磁気学 3)光らせん波におけるトポロジカル絶縁体表面上のスピン構造生成 などである。ワイル半金属の研究においては円偏光の電場の非線形効果の作る実効的な磁場が巨大なカイラル磁気効果を作り出すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is known that so called Weyl semimetal and Dirac semimetal are realized near the quantum critical point between conventional insulator and topological insulator. In these systems, novel quantum phenomena emerges due to the spin-momentum locking. In this research, we have studied several quantum phenomena in Weyl semimetal and relevant systems where spin-momentum locking is strong. For example, we have predicted (1)Photovoltaic chiral magnetic effect in Weyl semimetals, (2) Electromagnetic effects induced by time-dependent axion field (3)Spin and charge transport induced by a twisted light beam on the surface of a topological insulator. As regards (1), we have theoretically predicted current generation in Weyl semimetals when circularly polarized light is applied. The electric field of the light can drive a huge amount of effective magnetic field.

研究分野：凝縮系物理学理論

キーワード：ワイル半金属 トポロジカル絶縁体 アクシオン スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

近年、内部は絶縁体でありながら、その表面が金属状態となる物質群-トポロジカル絶縁体-が注目を集めている。トポロジカル絶縁体では、その内部と外部の波動関数のトポロジーの違いから、ギャップレスモードである表面ディラック電子が現れる。この表面ディラック電子は、様々な物質で実際にその存在が確認され、多くの研究者の研究対象となっている。その一方、トポロジーにより、表面でなくバルクの3次元ディラック電子を実現する系が新たな研究対象として議論され始めている。例えば、スピン軌道相互作用やバンド幅など物質のパラメータをコントロールし、通常の絶縁体からトポロジカル絶縁体へ量子相転移を起こすと、量子相転移点で系のギャップが閉じ、「ディラック半金属」や「ワイル半金属」と呼ばれるギャップレス電子系が現れることが知られている。この系は、バルクで実現されるという点でグラフェンや有機導体のディラック電子系に近いが、その一方、2次元でなく3次元物質で実現される点、またスピン軌道相互作用が本質的に重要な点が大きく異なる。ワイル半金属は、トポロジカル絶縁体超格子、 $Y_2Ir_2O_7$ などでの実現が有力視されている。ワイル半金属には、カイラリティの異なる2種類の2成分ディラック電子(ワイル電子)が存在し、その流れの差から軸性流が生じる。軸性流は、ジュール熱を伴わず、電子の情報を運ぶことができるために、低消費電力デバイスへの将来の応用が期待できる。軸性流および関連した「量子異常」(アノマリー)は、高エネルギー物理で研究されてきたが、ワイル半金属は、この概念を実証する格好の舞台となっている。

2. 研究の目的

ワイル半金属とよばれる3次元バルクで2成分ディラック電子を実現する新しい物質群の物性を解明する。特に、これらの物質が

バンド絶縁体とトポロジカル絶縁体の相境界に出現することに着目し、量子臨界性起源の新奇な磁気抵抗効果、電磁応答を理論的に探究する。また電子のスピンと運動量の結合が作り出す新奇な物性を関連物質も含めて研究を行う。関連物質としては、トポロジカル絶縁体表面、ディラック半金属、Rashba強磁性体などである。また新奇な半金属の研究も行う。

3. 研究の方法

ワイル半金属および関連物質の物性の理解を深めること、ワイル半金属同様にスピン・運動量結合効果の強い物質の物性を明らかにすることを目標として以下のテーマに沿って研究を行う。1)ワイル半金属における異常電磁応答の理論 2)ラインノード半金属における光誘起 3)ワイル半金属が実現されるトポロジカル絶縁体超格子におけるアクシオン伝導 4)スピン・運動量結合が重要な役割を果たす強磁性 Rashba 金属のトンネル効果の理論 といった問題を課題とした。

4. 研究成果

1. 光誘起カイラル磁気効果の理論的研究 [1]

ワイル半金属は運動量空間における Berry 位相によるモノポール電荷 ± 1 のエネルギー分散を持つ物質であり、その物質の輸送現象に興味を持たれている。中でもカイラル磁気効果(CME)が注目を集めている。本研究では、円偏光の電場の非線形効果の創る実効的な磁場に着目し、その磁場による CME を明らかにした。その実効的な磁場は数十テスラの巨大な磁束密度となり得るため、従来よりも巨大な CME を引き起こすことを示した。これは、従来と違い、散逸を伴う電流が誘起されることも解明した。

2. アクシオン電磁気の理論

アキシオン効果による電磁応答研究を行った。トポロジカル絶縁体と磁性絶縁体の超格子において磁場を積層方向に印加することで、ワイル半金属の状況が実現され、非自明な電気磁気効果(磁場による電流駆動/電流による磁場誘起)が存在することを理論的に予言した。この電気磁気効果は物質中におけるアキシオンの時間変化に起因することを示し高エネルギー物理学に現れるアキシオンとの違いを明らかにした。

3. 光らせん波による新奇なスピン構造の生成[2]

トポロジカル絶縁体(TI)表面にはスピンと運動量の密接な関係が存在する。その表面に電場を誘起することでスピン偏極を創ることができるが、そのスピン偏極は空間的に一様である。本研究で、光らせん波を使って、空間的に非一様なスピン偏極構造をTI表面に創る方法を理論的に示した。光らせん波の持つスピン角運動量と軌道角運動量がスピン偏極構造に反映することを明らかにした。

4. ラインノード半金属における光誘起異常[3]

ワイル半金属は点ノードの分散であるのに対して、ラインノード半金属は線ノードの分散を持つ。これらの分散のノードの違いが輸送現象に影響を与えることが知られている。本研究では円偏光を時間反転対称性のあるラインノード半金属に照射することによって、ラインノード半金属の線ノードの分散を点ノードの分散に変化させることができることを理論的に提案した。このノードの変化は光の照射方向とカイラリティに依存することから、このノードの変化は円偏光の持つ旋光性と時間反転対称性によるものであることを明らかにした。さらにこのノードの変化を検出する方法について議論した。

5. Dirac半金属における超伝導の理論[4]

我々はワイル半金属において時間反転対称性が破れた場合において、もしs波の超伝導ギャップを誘起したとするとフラットバンドなトポロジカル超伝導が実現されることを2015年に予言した[5]。この理論をDirac半金属へと発展させた。軌道間のペアリングが支配的な時にポイントノードを持ついくつかの導状態が実現されることが明らかになり、バルクや表面状態を比べることで識別できることが明らかになった。

6. 強磁性・Rashba金属のトンネル効果の理論

Rashba型のスピン軌道相互作用(RSOC)と磁化(M)が共存した系(強磁性 Rashba 金属[FRM])におけるトンネルコンダクタンスの理論研究を行った。この系にはRSOCとMの大きさによって、以下の3つの電子状態、通常 Rashba 金属状態(NRM)、異常 Rashba 金属状態(ARM)、Rashba リング金属状態(RRM)が存在する。NRMは2つの異なる向きにスピンが旋回したスピン構造を持ったスピン分裂バンドによるフェルミ面を持つ状態である。一方でARMでは1つのスピン分裂バンドのみがフェルミ面が構成されている。FRMと金属を接合した系において上記3つの電子状態に起因したスピン依存伝導特性(トンネルコンダクタンス)を計算し、ARM, RRMにおけるゲート電圧依存性を状態密度の観点から解析した[6]。

またスピン軌道相互作用による非自明なエッジ状態が期待されている単原子層物質(シリセン・ゲルマネン・スタネン)の計算を行い、多軌道効果の重要性を明らかにした[7]。

[参考文献]

[1]K. Taguchi, T. Imaeda, M. Sato and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 93, 201202(R) (2016)

[2]K. Shintani, K. Taguchi, Y. Tanaka, and Y.

Kawaguchi, Phys. Rev. B 93, 195415 (2016)
[3]K. Taguchi, D.H. Xu, A. Yamakage, and K. T. Law, Phys. Rev. B **94**, 155206 (2016).
[4]T. Hashimoto, S. Kobayashi, Y. Tanaka, and M. Sato, Phys. Rev. B 94, 014510 (2016)
[5]Bo Lu, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. 114, 096804 (2015).
[6]D.Oshima, K. Taguchi, and Y. Tanaka, J. Phys. Soc. Jpn., 87, 034710 (2018).
[7]A. Hattori, S. Tanaya, K. Yada, M. Araidai, M. Sato, Y. Hatsugai, K. Shiraishi and Y. Tanaka, J. Phys. Condens. Matter 29 115302 (2017).

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6件)(すべて査読あり)

[1]Tunneling conductance in two-dimensional junctions between a normal metal and a ferromagnetic Rashba metal

Daisuke Oshima, Katsuhisa Taguchi, and Yukio Tanaka, J. Phys. Soc. Jpn., 87, 034710 (2018)
(<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.034710>)

[2]Edge states of hydrogen terminated monolayer materials: silicene, germanene and stanene ribbons, Ayami Hattori, Sho Tanaya, Keiji Yada, Masaaki Araidai, Masatoshi Sato, Yasuhiro Hatsugai, Kenji Shiraishi and Yukio Tanaka, J. Phys. Condens. Matter 29 115302 (2017)
(doi:10.1088/1361-648X/aa57e0)

[3]Photovoltaic anomalous Hall effect in line-node semimetals, Katsuhisa Taguchi, Dong-Hui Xu, Ai Yamakage, and K. T. Law, Phys. Rev. B 94, 155206 (2016).
(DOI: 10.1103/PhysRevB.94.155206)

[4]Superconductivity in doped Dirac semimetals, Tatsuki Hashimoto, Shingo Kobayashi, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato, Phys. Rev. B 94, 014510 (2016)
(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.014510>)

[5]Photovoltaic chiral magnetic effect in Weyl semimetals, Katsuhisa Taguchi, Tatsushi Imaeda, Masatoshi Sato, and Yukio Tanaka Phys. Rev. B 93, 201202(R) (2016)
(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.201202>)

[6]Spin and charge transport induced by a twisted light beam on the surface of a topological insulator Kunitaka Shintani, Katsuhisa Taguchi, Yukio Tanaka, and Yuki Kawaguchi Phys. Rev. B 93, 195415 (2016)
(<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.195415>)

[学会発表](計5件)

(1) ラッシュバ型スピン軌道相互作用と交換相互作用の共存する系でのトンネルコンダクタンスの計算, 大島大介, 田口勝久, 田仲由喜夫 日本物理学会 岩手大学 2017年9月23日

(2)トポロジカル相転移点近傍におけるアク

シオニックな不安定性, 今枝立至、川口由紀、田仲由喜夫、佐藤昌利 第10回 物性科学領域横断研究会(領域合同研究会) 神戸大学 2016年12月9日

(3)Possibility of topological quantum field effect transistor of silicene, germanene and stanene nanoribbons, Ayami Hattori, Masaaki Araidai, Masatoshi Sato, Yukio Tanaka, International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017) Tokyo, Japan, May 10 2017

(4) ワイル半金属のスピン輸送の理論 田口勝久,日本物理学会、大阪、2015年9月17日.

(5) "Recent Topic in Weyl semimetal" Y. Tanaka, GeneExpression Systems & Appasani Research Conferences, Physical Sciences Symposia on Crystal/Graphene Science, Quantum Science, (Cambridge, USA, 2015/Sep/21-22) September 21 2015.

[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
<http://www.rover.nuap.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田仲由喜夫(Tanaka Yukio)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 40212039

(2)研究分担者

佐藤昌利(Sato Masatoshi)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号: 30313117

(3)研究分担者

田口勝久(Taguchi Katsuhisa)
名古屋大学・工学研究科・研究員

研究者番号：90725194

(3)連携研究者
()

研究者番号：

(4)研究協力者
()