

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011年度～2012年度

課題番号：23740269

研究課題名（和文）固体中ディラック電子が生む新しい伝導現象の開拓

研究課題名（英文）Development of novel transport phenomena generated by Dirac electrons in solids

研究代表者

伏屋 雄紀（FUSEYA YUKI）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00377954

研究成果の概要（和文）：固体中ディラック電子のスピントランスポルト現象を線形応答理論と久保公式に基づき、理論的に研究した。円偏光を用いれば、完全スピントランスポルト電流が可能であることが示された。また、ディラック電子系では、スピントランスポルト絶縁体を実現することも示された。驚くべきことに、このスピントランスポルト絶縁体の表式は反磁性磁化率と全く同じもので記述されることが分かった。実験との協同により、30テスラまでの角度分解ランダウスペクトルは拡張ディラックモデルで正確にフィットできること、および謎のピーク構造は双晶効果として理解できることを示した。

研究成果の概要（英文）：Spin-transport phenomena of Dirac electrons in solids are investigated on the basis of the linear response theory and the Kubo formula. It is shown that the fully spin-polarized electric current is possible by using the circularly polarized light. It is also shown that the spin-Hall insulator is achieved for the Dirac electron systems. Surprisingly, it is found that the formula of the spin-Hall insulator has the exactly same form as that of the diamagnetic susceptibility. By the collaboration with the experimental group, it is shown that the angle resolved Landau spectrum can be correctly fitted by the extended Dirac model up to 30 tesla, and the mysterious peak structure can be understood as the twinning effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：ディラック電子，スピントランスポルト相互作用，スピントランスポルト

## 1. 研究開始当初の背景

一般に電気伝導は固体中を自由に行き来する伝導電子が担う。これはフェルミ準位近傍の電子がバンド内遷移によって電気伝導を生み出すことに対応する。しかしビスマスを代表とする固体中ディラック電子系<sup>\*</sup>では、通常無視できるほど小さい「バンド間遷移」が特殊な寄与をもたらすことが、研究代表者らの研究で分かってきた。

（※電子の運動が相対論的量子力学のディラック方程式に従う）

ラック方程式に従う）

その特殊な寄与とは、バンド間遷移によるホール電流であり、通常電流とは著しく異なり、不純物にほとんど影響されることがない性質を持つ。この性質のため、エネルギー散逸の極めて小さい電流である（微小散逸電流と呼ぶ）ことが強く期待される。しかもこのバンド間遷移は、スピントランスポルト相互作用を介しているため、通常は関係のない電子スピンの情報が電流に含まれていることが予想され

る。

ただしこのバンド間遷移による微少散逸ホール電流は、このまま(直流電流)では常に通常電流と混成するため、バンド間遷移の寄与のみを取り出すことは困難であり、散逸の小さい電流は絵に描いた餅であった。更に電子スピンの情報が含まれているとはいえ、それがどのような形で含まれているかについては全く理解されていなかった。

## 2. 研究の目的

固体中ディラック電子の特殊な性質を利用し、これまでにない新しい伝導機構の開拓を目指す。その中で、バンド間遷移の影響に特に着目して研究を進めた。

より具体的には、次の3点について重点的に研究を進めることを目的とした。

(1) 微少散逸電流を効率よく取り出すため、交流電流におけるバンド間遷移の性質を調べる。

(2) 交流では、電場でスピンが制御できる可能性があるため、スピン偏極電流についても調べる。

(3) 最終的にはこれらの新しい輸送現象(微少散逸電流、スピン偏極電流)を実際にビスマスで観測できることを目指し、実験と高い定量性をもって合致する理論結果を得る。

## 3. 研究の方法

効率的に研究を行うため、(1)理想ディラック電子が生む新種電流、(2)ビスマス中ディラック電子が生む輸送現象の定量的計算、の2段階に研究を分けて進めた。それぞれの研究課題における具体的な研究方法はしたの通りである。

### (1) 理想ディラック電子が生む新種電流

- ① 遷移行列要素、選択則の計算  
遷移行列要素計算は、伝導度計算の核となる。本研究ではWolff理論(1964)に基づき、ディラック電子の行列要素を計算した。元のWolff理論はバンド内遷移に焦点を絞ったものであるが、本研究ではバンド間遷移にも拡張して計算を行った。
- ② 交流電流(光学伝導度)の計算  
前項での行列要素と選択則をもとに、久保公式から交流電流を数値計算によって求めた。全体の伝導度をバンド内遷移・バンド間遷移の寄与と分けることで、それぞれの性質を明らかにした。これか

ら微少散逸電流を含む割合を様々な状況において求めた。

- ③ 【追加課題】スピンホール効果の計算  
当初計画にはなかったが、(A-2)交流( $\omega > 0$ )におけるスピン偏極電流の研究を進めた結果、直流( $\omega = 0$ )では、純スピン流が得られる可能性がでてきたので、同様の理論手法により、スピンホール効果を計算した。

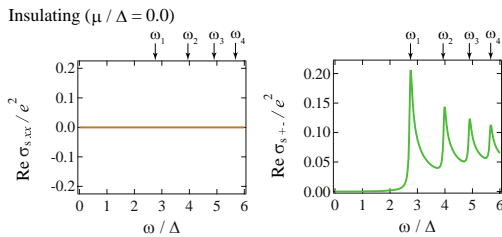
### (2) ビスマス中ディラック電子が生む輸送現象の定量的計算

- ① バンド構造の解析  
ビスマスのバンド構造は量子振動の観測により詳細な情報が得られる。旧来はSmith-Baraff-Rowell (SBR) 模型がビスマスのバンド構造解析の標準的な模型であった。しかしこの模型では高々±10°程度の角度範囲しか正しく解析できなかった。一方、最新のより高精度な角度異存量子振動(角度分解ランダウスベクトル)実験の結果は全方位で測定が行われ、SBR模型では対処できない。そこで本研究ではWolff模型に基づき、ディラック電子の特性を完全に取り込んで角度分解ランダウスベクトルを解析できる、新しい「拡張ディラック模型」を導入し、これによりこれまでにない高精度な理論解析を可能とした。
  - ② ビスマスの定量的物性予測  
上記拡張ディラック模型に基づき、磁場の強度(第1段階:12テスラまで;第2段階28テスラまで)および角度(全方位角)を変化させた量子振動スペクトルの実験データを数値計算により解析した。
  - ③ 【追加課題】ビスマスにおける双晶効果の計算  
ビスマスでは、1電子状態だけを考えると全く理解できない、“謎のピーク構造”が実験的に見つかっていた。このピーク構造の解明のために、双晶効果を取り入れた角度分解ランダウスベクトルの計算を行った。
- ## 4. 研究成果
- ### (1) 理想ディラック電子が生む新種電流
- ① ディラック電子の遷移行列要素を計算し、選択則を導いた。通常は軌道遷移のみが許されるのに対し、ディラック電子が内包するスピン軌道相互作用のため、スピン遷移も新たに起こることを明ら

かにした．以下に述べるスピン物性は，全てこのスピン遷移項が元で実現される．

- ② 得られた選択則に基づき，動的伝導度（光学伝導度）の計算を久保公式により行った．通常の縦偏光を用いた光学伝導度では，スピン偏極した電流が得られないのに対し，円偏光を用いればスピン偏極した新種の電流が得られることを発見した【図1】．振動数を調節すれば，100%スピン偏極した「完全スピン偏極電流」が得られることも分かった．この新しい電流はバンド間遷移によってのみ生み出され，不純物にほとんど散乱されない．これにより，直流では混成していた通常電流と微少散逸電流が交流によって完全に分離されることを示した．

この発見により，非磁性物質に光を照射することで完全スピン偏極電流を流すことができ，新しいデバイス開発への道が切り開かれた．この新規メカニズムは光で制御でき，散逸も少ないことから，デバイスの微少化および省エネルギー化に大きな利点をもっている．

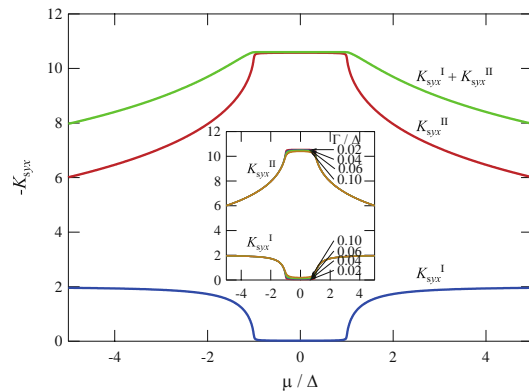


【図1】スピン偏極電流の振動数依存性．(左)縦偏光を用いた場合；(右)円偏光を用いた場合． $\omega_1$ の振動数では，100%スピン偏極した電流が流れる．

- ③ 【追加課題】当初計画には含まれていなかったが，前項の交流（動的）スピン偏極電流の研究で得た知見を更に発展させれば，直流（静的伝導度）におけるスピン流の可能性を調べることが分かったので，これについても研究を行った．その結果，ディラック電子系では非常に大きなスピンホール流が得られることを初めて見いだした．しかもそのスピンホール流は次に挙げるような，これまで知られていない，驚くべき性質を持っていることが明らかとなった【図2】．(イ)キャリア数が少なくなるにつれ増大し，絶縁体領域で最大値をとる．そしてスピンホール絶縁体を実現する．(ロ)ディラック電子が生むスピンホール流は全てバンド間遷移からの寄与で，バンド内

遷移の寄与はゼロである．(ハ)絶縁体では反磁性電流とスピンホール流の表式が厳密に一致する．

本研究で得られたスピンホール絶縁体を用いれば，通常電流を一切流すことなく（つまり散逸を発生することなく）純スピン流のみを流すことができ，無散逸なスピン流を得ることができる．これは②で得られたスピン偏極電流とはまた別種の電流で，直流で散逸のないスピン流が可能となる．



【図2】スピンホール伝導度の化学ポテンシャル依存性． $|\mu/\Delta| < 1$ が絶縁体領域．

## (2) ビスマス中ディラック電子が生む輸送現象の定量的計算

- ① 最新の角度分解ランダウスpekトルの実験を解析するため，新たに「拡張ディラック模型」を導入した．この模型では，スピン軌道相互作用の効果を正しく取り込み，ディラック電子の特性を考慮できる上，実験で観測されている小さなスピン分裂をも説明することができる模型で，従来提案されてきた有効模型の中で実験結果をもっとも精度よく解析することが可能となった．
- ② 第1段階として12テスラまでの角度分解ランダウスpekトル測定の結果を新しく導入した拡張ディラック模型を用いて解析し，全方位角に対して非常に高精度で実験と一致する理論結果が得られた．この解析に基づき，有効質量やg因子など各種変数を過去最高精度で同定した．（この結果はPhys. Rev. B誌において発表し，Editor's suggestionに選ばれた）

第2段階としては30テスラまでの測定結果を解析した．12テスラまでの解析で用いた質量テンソルの値を全く

変更することなく、30テスラまでの測定をフィットできることが分かった。すなわち、30テスラという強磁場においても、ビスマスの電子状態は1電子状態で記述できることが明らかになった。このことは、強磁場中で大きくなると“信じられてきた”電子相関の効果が、ビスマスにおいては一切見出されない、という新たな知見を生み出した。更に、15テスラ以上では、伝導帯と価電子帯の最低ランダウ準位間の混成効果が顕著になることも新たに分かった。

- ③ 【追加課題】ただし、上記1電子状態では唯一理解できない“謎のピーク構造”の問題は依然として残っていた。このピークの起源として、これまで三次元分数量子ホール効果などの可能性が議論されてきたが、決定打を欠いた状態が5年ほど続いていた。

このピーク構造の解明については、当初計画に含まれていなかったが、我々は30テスラまでの角度分解ランダウスペクトルの測定結果を拡張ディラックモデルに基づいて詳しく解析した結果、謎のピーク構造の正体は、双晶の効果であることを突き止めた。(本結果は米国科学アカデミー紀要に掲載された)

## 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 Y. Fuseya, M. Ogata, H. Fukuyama:  
“Spin-Hall Effect and Diamagnetism of Dirac Electrons”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 93704. 査読あり. DOI: 10.1143/JPSJ.81.093704
- ② Z. Zhu, B. Fauque, L. Malone, A. B. Antunes, Y. Fuseya, K. Behnia:” Landau spectrum and twin boundaries of bismuth in the extreme quantum limit”, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **109** (2012) 14813. 査読あり.  
DOI:10.1073/pnas.1209197109
- ③ Y. Fuseya, M. Ogata, H. Fukuyama:  
“Spin-Polarization in Magneto-Optical Conductivity of Dirac Electrons”, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 13704. DOI: 10.1143/JPSJ.81.013704
- ④ 伏屋雄紀, 小形正男, 福山秀敏: 固体物理, 47 (2012) 193. 査読あり.
- ⑤ Z. Zhu, B. Fauque, Y. Fuseya, K. Behnia: “Angle-resolved Landau

spectrum of electrons and holes in bismuth”, Phys. Rev. B **84** (2011) 115137. 査読あり.

DOI:10.1103/PhysRevB.84.115137

[学会発表] (計12件)

- ① 伏屋雄紀, Z. Zhu, B. Fauque, K. Behnia: 「ビスマス量子極限における”additional peak”構造の起源」, 日本物理学会, 広島大学, 2013年3月26日~29日
- ② 伏屋雄紀, 小形正男, 福山秀敏: 「ビスマスにおけるディラック電子のスピンホール効果」, 日本物理学会, 横浜国立大学, 2012年9月18日~21日
- ③ 伏屋雄紀, Z. Zhu, B. Fauque, K. Behnia: 「ビスマス有効モデルの構築と角度分解ランダウスペクトルの解析」 日本物理学会, 関西学院大学, 2012年3月25日
- ④ 伏屋雄紀: 「ビスマスにおけるディラック電子」, 日本物理学会, 富山大学, 2011年9月22日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伏屋雄紀 (FUSEYA YUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 00377954