

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01850

研究課題名(和文) 強スピン軌道結合系における劇的スピン応答の制御

研究課題名(英文) Control of drastic spin-responses in strongly spin-orbit coupled systems

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 強スピン軌道結合系の典型物質の一つであるPbTeにおいて、スピン分裂変数 M_{zc} で特徴付けられるスピン状態を明らかにした。計算には、代表者が独自に開発した磁場中固体電子の量子化されたエネルギーを正確に計算する手法「 $-matrix$ 法」を用いた。従来は、 M_{zc} は磁場に依存しないと考えられていたが、スピン軌道結合が強い場合、大きく磁場に依存することを初めて見出した。(2) もう一つの典型物質Biにおいて、非常に大きなスピン-電荷変換効率(スピンホール角 $\theta_{sh}=0.24$) を達成した。さらにこの大きなスピン変換を「非常に大きな値」と「ほぼゼロ」の間で劇的に制御することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結晶中の相対論効果(スピン軌道結合)と、それにより変化する磁気モーメントは、非磁性の半金属・半導体でスピン応答の核となる。しかし、磁気モーメントが具体的にどのように変わるかについては、まだ詳細が分かっていない。本研究では、スピン軌道結合の強い物質の磁気モーメントを理論・実験両面で詳細に調べ、その知見を元に劇的にスピン応答を制御することに成功した。このことは、従来考慮されてこなかった、磁気モーメントの特殊な性質を活かした、劇的なスピン応答が可能であることを強く示唆するもので、本研究により、新しいスピントロニクスの方角性が示された。

研究成果の概要(英文)：(1) We clarified the spin state, which is characterized by the spin-splitting parameter M_{zc} , in PbTe, one of the typical materials of the strongly spin-orbit coupled systems. For the calculation, we used the " $-matrix$ method", a method developed by Fuseya to accurately calculate the quantized energy of electrons in a solid under a magnetic field. It has been believed that M_{zc} is independent of the magnetic field. However, we found for the first time that M_{zc} largely depends on the magnetic field when the spin-orbit coupling is strong. (2) We achieved a substantial spin-charge conversion efficiency (spin Hall angle $\theta_{sh}=0.24$) in Bi, another strongly spin-orbit coupled material. We also succeeded in drastically controlling this large spin conversion between "substantial value" and "negligibly zero".

研究分野：物性理論

キーワード：スピン軌道結合 磁気モーメント スピンホール効果 スピン変換 磁気抵抗

1. 研究開始当初の背景

非磁性の半金属・半導体でスピン応答の核となるのは、スピン軌道結合 (SOC) である。結晶中での SOC が、スピン応答の担い手である磁気モーメントを大きくしたり異方的にしたりする。本研究課題の主目的であるスピン応答を制御するには、各物質における SOC による磁気モーメントの変調効果 (軌道ゼーマン効果) を明らかにする必要がある。しかし、軌道ゼーマン効果を物質固有の電子状態に基づいて正確に計算する理論手法がなく、半世紀以上大きな進展がなかった。

この理論的空白のため、せっかくの実験結果を十分に解析できず、より大きなスピン応答を得るための指針も得難い状況であった。例えば強 SOC 系の典型物質である Bi のスピンホール効果では、世界各地の研究グループで全く異なる結果の報告が相次いでいる。結果が大きく食い違う原因は明らかになっておらず、混乱した状況が続いている。

2. 研究の目的

本研究では、独自に開発した理論手法を駆使し、結晶 SOC が (1) スピン状態と (2) スピン緩和に及ぼす影響を明らかにする。さらにその知見を活かして (3) スピン応答を制御し、大きな応答の獲得を目指す。また、本課題の測定において不可欠な磁気抵抗などの電流磁気効果についても、物質固有の電子状態を元に定量的理解を深める。

3. 研究の方法

(1) 代表者が独自に開発した磁場中固体電子に対する行列力学 (π -matrix 法) を用いて、各物質のバンド計算を元にランダウ量子化されたエネルギーを求める。そこから SOC に由来する軌道ゼーマン効果を算出する。実験的には、強磁場下で電気抵抗や磁化率を測定し、得られた量子振動からサイクロトロンエネルギーとゼーマンエネルギーを求める。

(2) 従来の氷上-ラーキン-長岡 (HLN) 理論を強 SOC 系にも適用出来るように拡張する。これを元に磁気抵抗測定の結果から、強い SOC の効果を考慮した上で正確なスピン緩和長を求める。

(3) スピン応答の具体例として、スピンホール効果を用いたスピン-電荷変換を取り上げる。これまで分担者 (白石) が用いてきたスピンポンピングによるスピン注入だけでなく、スピントルク-強磁性共鳴や調和ホール測定も用いて、スピン変換効率を多角的に精度よく決定する。

(4) ボルツマン方程式に基づく従来の電流磁気効果の理論を大幅に拡張し、物質固有のエネルギー分散を正確に取り入れた電流磁気輸送係数を計算する。これを元に電流磁気効果測定の結果を定量的に解析する。

4. 研究成果

(1) スピン状態の解明

結晶 SOC の効果が最も直接的に現れるのは、ゼーマン分裂であり、実験的には量子振動においてスピン分裂変数 M_{zc} として測定される。研究開始当初、分担者 (徳永) は劇的スピン応答を示す有力物質の 1 つである、PbTe のスピン状態 (スピン分裂変数 M_{zc}) を初めて実験的に決定した。得られた値は $M_{zc}=0.52-0.57$ で、それまでの理論予測値 $M_{zc}=0.83$ と大きく異なっていた。

研究開始当初、実験と理論の不一致の原因は不明であったが、本研究を遂行し、代表者

(伏屋) と徳永とが議論を重ねることで、理論の適用範囲に問題があることが浮かび上がった。理論予測値は摂動論に基づいており、低磁場領域にしか適用されない。一方、実験は 55T までの強磁場測定を基にしている。従来理論

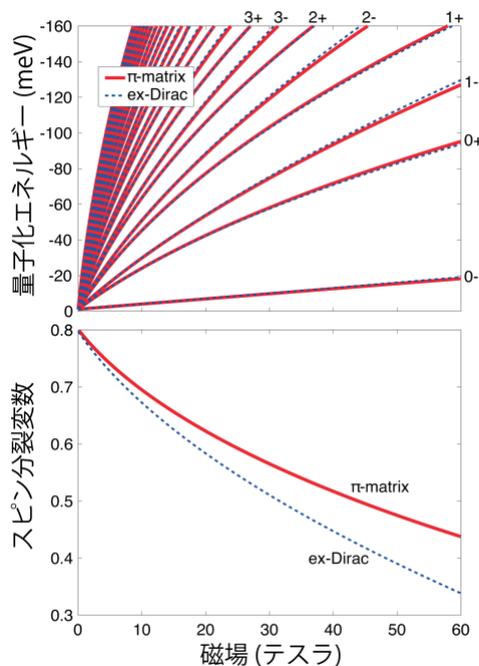


図 1. π -matrix 法を用いた PbTe のランダウ量子化 (上) と、そこから求まるスピン分裂変数 (下). 従来常識に反して、スピン分裂変数が磁場によって大きく減少する。

では、 M_{zc} は磁場に依存しないのでこの差異は問題でないと考えられていた。しかし、強 SOC 系ではこの従来常識が破れていたことが今回初めて明らかとなった。

伏屋は、非摂動論に基づいて M_{zc} を計算出来る新しい手法「 π -matrix 法」を独自に開発した。これにより、弱磁場から強磁場領域までシームレスにランダウ量子化エネルギー、スピン分裂変数が計算出来るようになった。この新手法を用いて PbTe のスピン分裂変数を計算したところ、従来常識とは大きく異なり、0-55T までの間で $M_{zc}=0.83-0.46$ と、スピン分裂変数が大きく変化することが明らかとなった (図 1 下)。

本研究により、 M_{zc} の測定手法について新たな理解を得ることも出来た。 M_{zc} を実験的に求める手法は、ゼーマン分裂を直接求める方法と fan-diagram を用いる方法の 2 種類がある。従来は、両者は同じ値をとるものと考えられてきた。しかし本研究により、両者は原理的に異なる値をとることが分かった。この成果により、 M_{zc} の測定値を正確に解析し、より正確なスピン状態の情報を得られることとなった。

(2) 強スピン軌道結合系のスピン緩和長

スピン緩和長を求めるには、弱局在解析が有効である。SOC を伴う不純物散乱が、二次元系では弱反局在を生むことはよく知られている。氷上-ラーキン-長岡 (HLN) 理論で導かれた公式を用いて、電気伝導度の量子補正からスピン緩和長を見積もることが出来る (弱局在解析)。HLN 理論が有効なのは、ほとんど自由な金属電子が、スピン軌道結合の強い不純物原子に散乱される場合である (希薄 SOC 系)。

スピントロニクスやトポロジカル物質科学では、HLN 理論を用いてスピン緩和長を見積もる解析が標準的に行われている。しかし強スピン軌道結合系では、不純物ではなく、ホストの金属自体が強い SOC を伴っている。その様な SOC 格子は、希薄 SOC 系とは逆の極限にあるといってもよく、HLN 理論が妥当であるかは自明でない。

本研究では、SOC 格子の典型として、二次元ディラック電子系を取り上げ、電気伝導度の量子補正を計算した (図 2)。その結果、希薄 SOC 系の逆の極限であるにもかかわらず、SOC 格子系でも弱反局在が起こることが明らかとなった。SOC 系の弱局在では、バンド間 SOC 効果がバンド間一重項クーペロンの寄与を顕著にすることが分かった。フェルミエネルギーやバンドギャップの大きさが変われば、弱反局在から弱局在へとクロスオーバーすることも明らかとなった。この理論を元に、従来の弱局在解析から見積もったスピン緩和長が大きく修正される可能性を示した。

(3) スピン応答の制御

SOC が生む数あるスピン機能の中で、スピン-電荷変換は基礎から応用にわたる多くの研究者の興味を惹いている。スピン変換の効率を表す指標にスピンホール角 θ_{SH} がある。SOC 由来のスピン変換であるため、原子 SOC の大きい重い元素での研究が活発に進められている。例えば β -Ta, β -W, Pt のスピンホール角はそれぞれ $\theta_{SH}=0.12, 0.33, 0.08$ と報告されている。この中では Pt が最大の SOC (0.63eV) を持つ。本研究では、安全な元素で最も SOC が大きい Bi (1.5eV) を用いた高効率スピン変換を目指して研究を進めた。

①スピントルク-強磁性共鳴

これまでに我々を含む複数グループで Bi のスピン変換の報告があるが、その変換効率は非常に小さい値 ($\theta_{SH} \ll 0.1$) にとどまっている。過去の報告で用いられた試料の品質や測定法はまちまちで、測定値の信頼度にもバラツキがあった。そこでまず本研究では、スピン変換測定で最も確立された測定法であるスピントルク-強磁性共鳴 (ST-FMR) 法を採用した。基板にはパーマロイ ($Ni_{80}Fe_{20}$) を用い、膜厚を変えながら慎重な測定を行った。その結果、従来報告を大きく上回る $\theta_{SH}=0.05$ を得ることに成功した。

②結晶方位の制御

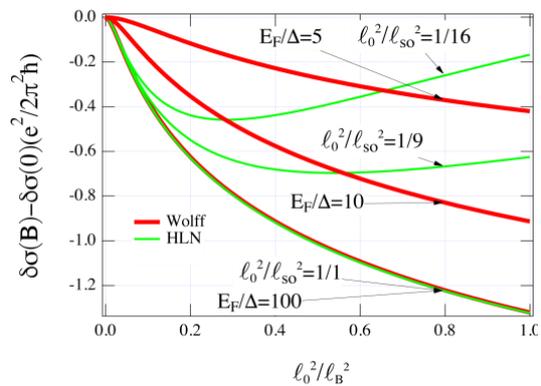


図 2. 量子補正における希薄 SOC 系 (HLN) と SOC 格子系 (Wolff) の違い。

次に我々は、結晶方位に注目した。Bi を含む V 族ニクトゲンは、その特殊な電子状態から共有結合と金属結合が拮抗し、構造不安定性が高い。バルクの Bi は立方晶をわずかに歪ませた菱面体構造をとる。Bi 薄膜で最も安定な方位は菱面体(111)方向であるが、薄膜では不安定性がさらに増大し、複数の構造が混在することも報告されている。これまでの報告で θ_{SH} の値にバラツキがあったのは、結晶方位制御の不十分さにあった可能性が高い。

我々は、わずかに薄膜成長条件を変えるだけで Bi 薄膜の結晶方位を (111) と (110) との間で制御できる技術を確認した。この技術と ST-FMR 法とを用いて同条件下での Bi (111) と Bi (110) 薄膜のスピントランスミット率を比較した。その結果、Bi (111) ではほぼ $\theta_{SH}=0.0$ であるのに対し、Bi (110) では非常に大きな $\theta_{SH}=0.24$ が得られることを明らかにした。調和ホール測定による検証も行い、この値が確かなものであることを確認した。

このようにスピントランスミット率が結晶方位によってまさに桁違いの異方性を生むことは、今回が初めての報告となる。第一原理計算による Bi (111) と Bi (110) の電子状態計算の結果とも合わせ、この異方性は、正孔の極めて異方的な g 因子 (図 3) によるものであると結論した。正孔の面内 g 因子は、Bi (110) では $g=62.7$ であるのに対し、Bi (111) ではほぼゼロである。

これはまさに本研究が注目した、強 SOC 系の異常 g 因子が生む劇的スピントランスミット率を体現した結果である。研究開始当初は主に g 因子の大きさに注目していたが、その異方性を利用することで、想定外に劇的なスピントランスミット率の変化を実現することに成功した。このことは、スピントランスミット率の制御に g 因子の制御が極めて有効であることを強く示唆しており、スピントランスミット率にこれまで考えられてこなかった、新しい道を拓いたこととなる。

(4) 電流磁気効果の新しい展開

本研究の二本の柱であった、スピン状態測定とスピン輸送測定の実験解析を進める上で、その基盤となる電流磁気抵抗の理論研究を進めた。その結果、当初計画を大きく超える、新しい展開が広がった。

①マルチバレー系の大きな縦磁気抵抗

縦磁気抵抗とは、電流に平行な磁場を加えたときの電気抵抗の変化を指す。その場合ローレンツ力が働かないため、縦磁気抵抗は非常に小さいと考えられる。しかし、(1)でも取り扱った PbTe などでは、60 年前から非常に大きな縦磁気抵抗が観測され、その起源がずっと謎のままであった。PbTe はブリルアンゾーン内に 4 つの異方的な楕円体フェルミ面を持つ。このこと自体、フェルミオロジーではよく知られた事実であったが、磁気抵抗計算の複雑さのため、マルチバレーの特徴を正確に反映した計算はなされてこなかった。

我々はマルチバレー系の計算の複雑さを大幅に軽減する、テンソル表現の磁気抵抗理論を新たに採用した。古典論に基づく運動方程式から導いたテンソル表現の磁気抵抗理論を元に、PbTe のマルチバレーの特徴を正確に捉えた計算を行った。その結果、図 4 の通り、実験と定量的によく一致する結果を得た。この結果から、大きな縦磁気抵抗の起源が、有効質量の非対角成分にあったことを突き止めた。さらにこの成果は、続くワイル半金属における負の磁気抵抗へと繋がる展開を見せた。

②ワイル半金属における負の磁気抵抗

強スピン軌道結合系では、スピン輸送だけでなく、磁気抵抗に代表される電流磁気効

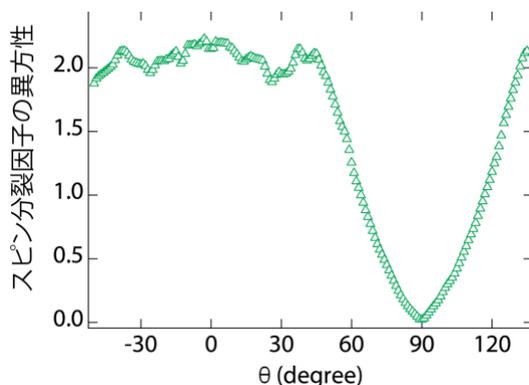


図 3. Bi のスピンスplit因子の異方性. (角度分解ラマン分光測定による) この異方性は g 因子の異方性に直接対応する。

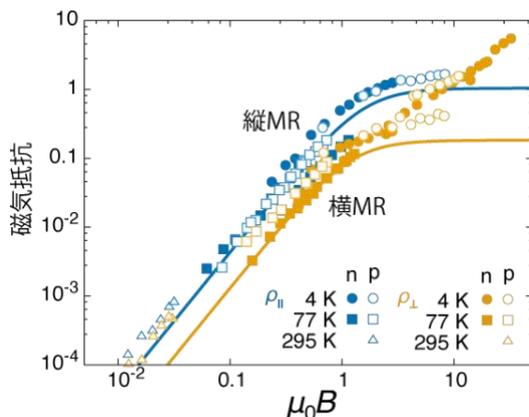


図 4. PbTe の縦・横磁気抵抗. シンボルは実験、実線は今回の理論計算. 試料依存性のある 4K 強磁場の横 MR を除き、実験と理論がよく一致する。

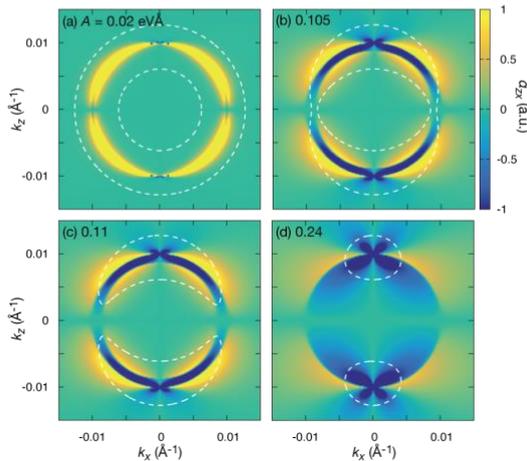
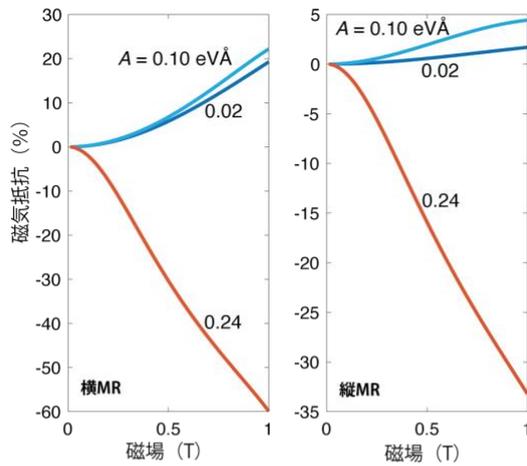


図5. (上) ワイル半金属の磁気抵抗. (下) 有効質量の非対角成分 α_{xy} の波数依存性. ワイル成分 A が大きいほど、負の領域 (青) が広がり、負の磁気抵抗を生む.

我々の理論はワイル半金属に限られたものではない. ①②の結果を総合すると、非対角有効質量が、これまでに知られていない、非自明な電流磁気効果を生むことが強く示唆される. 今後、より幅広い物質系で非対角有効質量に着目した研究を進めれば、新しい電流磁気効果が見出される可能性が高い.

果が大きな応答を見せる. 特にワイル電子系では、素粒子論で提案されたカイラル異常が、負の縦磁気抵抗となって現れることが予想され、大変活発に研究が進められている. 実際、複数のトポジカル物質で負の縦磁気抵抗が観測され、従来の電流磁気効果の半古典論では説明できないことから、カイラル異常の証拠であると考えられている.

しかし、別の可能性もまだ残されている. 従来の半古典論が異常な電流磁気効果を説明できないのは、単純な楕円体のフェルミ面を仮定しており、実際の物質の詳細なバンド構造を考慮していないことが原因である可能性が高い. とすれば、詳細なバンド構造を考慮した理論に基づいて電流磁気効果の計算を行えば、実験を説明できる可能性がある.

我々は、物質固有の特徴 (特にバンド構造) をできる限り正確に取り込むために、従来理論手法を拡張し、それによって各物質に対する電流磁気効果を定量的に評価出来る理論手法を整備した. その理論を用いてワイル半金属のバンド構造を正確に考慮して電流磁気効果を計算したところ、負の縦磁気抵抗が得られることを明らかにした (図5). この理論には、カイラル異常やベリー位相などの量子効果は一切含まれておらず、ボルツマン方程式に基づく半古典効果だけで説明できたことになる. この異常な電流磁気効果の起源は①と同様で、やはり有効質量の非対角成分が鍵となっていることが明らかになった.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsushima Masayuki, Miwa Shinji, Sakamoto Shoya, Shinjo Teruya, Ohshima Ryo, Ando Yuichiro, Fuseya Yuki, Shiraishi Masashi	4. 巻 117
2. 論文標題 Sizable spin-transfer torque in the Bi/Ni80Fe20 bilayer film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 042407 ~ 042407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009798	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamada Akiyoshi, Fuseya Yuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Angular dependence of magnetoresistance and planar Hall effect in semimetals in strong magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125148-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.125148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mitani Yuki, Fuseya Yuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Large longitudinal magnetoresistance of multivalley systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 345802 ~ 345802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab8b9a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Izaki Yuki, Fuseya Yuki	4. 巻 123
2. 論文標題 Nonperturbative Matrix Mechanics Approach to Spin-Split Landau Levels and the g Factor in Spin-Orbit Coupled Solids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 156403-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.156403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayasaka Hiroshi, Fuseya Yuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Weak anti-localization in spin-orbit coupled lattice systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 16LT01 ~ 16LT01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab686a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akiba Kazuto, Kobayashi Kaya, Kobayashi Tatsuo C., Koezuka Ryo, Miyake Atsushi, Gouchi Jun, Uwatoko Yoshiya, Tokunaga Masashi	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnetotransport properties of tellurium under extreme conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245111-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.245111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fuseya Yuki, Katsuno Hiroyasu, Behnia Kamran, Kapitulnik Aharon	4. 巻 17
2. 論文標題 Nanoscale Turing patterns in a bismuth monolayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1031 ~ 1036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01288-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kang Woun, Spathef Felix, Fauque Benoit, Fuseya Yuki, Behnia Kamran	4. 巻 13
2. 論文標題 Boundary conductance in macroscopic bismuth crystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-27721-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamada Akiyoshi、Fuseya Yuki	4. 巻 105
2. 論文標題 Negative magnetoresistance and sign change of the planar Hall effect due to negative off-diagonal effective mass in Weyl semimetals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205207-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.205207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Collignon Clement、Awashima Yudai、Ravi、Lin Xiao、Rischau Carl Willem、Acheche Anissa、Vignolle Baptiste、Proust Cyril、Fuseya Yuki、Behnia Kamran、Fauque Benoit	4. 巻 5
2. 論文標題 Quasi-isotropic orbital magnetoresistance in lightly doped SrTiO3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 065002-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.5.065002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yuki Fuseya
2. 発表標題 Matrix mechanics in high magnetic fields
3. 学会等名 ARHMF2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akiyoshi Amada, Yuki Fuseya
2. 発表標題 Angular dependence of magnetoresistance and planar Hall effect in semimetals in strong magnetic fields
3. 学会等名 ARHMF2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Izaki, Yuki Fuseya
2. 発表標題 Nonperturbative Matrix Mechanics Approach to Spin-Split Landau Levels
3. 学会等名 ARHMF2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Mitani, Yuki Fuseya
2. 発表標題 Large longitudinal magnetoresistance in multi-valley systems
3. 学会等名 ARHMF2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudai Awashima, Yuki Fuseya
2. 発表標題 Theoretical study on magnetoresistance with a single closed Fermi surface
3. 学会等名 ARHMF2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 粟島裕大, C. Collignon, B. Fauque, 伏屋雄紀
2. 発表標題 SrTiO ₃ における磁気抵抗の線形性と温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹端寛治, 今中康貴, 山田暉馨, 伏屋雄紀, 木下雄斗, 徳永将史
2. 発表標題 量子極限化におけるBiのサイクロトロン共鳴
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田暉馨, 伏屋雄紀
2. 発表標題 精密決定されたランダウ準位に基づくBi磁気抵抗の異方性解析
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪崎優喜, 伏屋雄紀
2. 発表標題 Cd3As2 におけるスピン分裂ランダウ準位の非摂動理論
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田暉馨, 伏屋雄紀
2. 発表標題 ランダウ量子化した半金属キャリアの電流磁気効果
3. 学会等名 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Fuseya
2. 発表標題 New microscopic theory of g-factor and its application to PbTe
3. 学会等名 Spin-Orbit Interaction of G-factor 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Fuseya
2. 発表標題 Topology of Material and Spin-Resolved Quantum Oscillations
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Izaki, Yuki Fuseya
2. 発表標題 Anomalous Zeeman effect in strongly spin-orbit coupled systems
3. 学会等名 PASPS-24
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三谷優樹, 伏屋雄紀
2. 発表標題 大きな縦磁気抵抗効果について: PbTeを例として
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伏屋雄紀
2. 発表標題 スピン分解量子振動と物質のトポロジー：PbTeとBiの場合
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伏屋雄紀
2. 発表標題 スピン軌道固体のg因子とトポロジー：ディラック電子を超えて
3. 学会等名 分子研研究会「有機ディラック電子系におけるトポロジカル現象と新規物性開拓」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Fuseya
2. 発表標題 Nanoscale Turing patterns in a bismuth monolayer
3. 学会等名 International conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akiyoshi Yamada, Yuki Fuseya
2. 発表標題 Orbital origin of negative magnetoresistance and planar Hall effect in Weyl electron systems
3. 学会等名 International conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹端寛治, 今中康貴, 山田暉馨, 伏屋雄紀, 木下雄斗, 徳永将史
2. 発表標題 量子極限下におけるBiのサイクロトロン共鳴 II
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村省吾, 伏屋雄紀
2. 発表標題 量子極限におけるディラック電子の磁化
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田暉馨, 伏屋雄紀
2. 発表標題 ワイル電子系における軌道由来の負の磁気抵抗とプレーナーホール効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伏屋雄紀, 勝野弘康, K. Behnia, A. Kapitulnik
2. 発表標題 ナノスケールのチューリング・パターン：単層ピスマスの形態形成
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅香雄哉, 菊地樹, 伏屋雄紀
2. 発表標題 BiSb系におけるトポロジカルヘテロ構造の表面状態
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 粟島裕大, 伏屋雄紀
2. 発表標題 フェルミ面の曲率変化とホール係数の関係
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下雄斗, 藤田琢也, 栗原綾佑, 三宅厚志, 猪崎優喜, 伏屋雄紀, 徳永将史
2. 発表標題 パルス強磁場を用いた量子極限下Bi-Sb混晶における電子状態の研究II
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橘風夢, 細井優, 下澤雅明, 木下雄斗, 徳永将史, 伏屋雄紀, 井澤公一
2. 発表標題 半金属ピスマスにおける電気抵抗率の歪み応答
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細井優, 橘風夢, 下澤雅明, 木下雄斗, 徳永将史, 伏屋雄紀, 井澤公一
2. 発表標題 半金属ピスマスにおける弾性抵抗率の磁場応答
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伏屋雄紀
2. 発表標題 半金属・半導体の磁気抵抗：半古典論でどこまで理解出来るか？
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伏屋雄紀, 勝野弘康, Kamran Behnia, Aharon Kapitulnik
2. 発表標題 ナノスケールのチューリング・パターン: 単層 ピスマスの形態形成
3. 学会等名 第50回結晶成長国内会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伏屋雄紀
2. 発表標題 強スピン軌道結合系のg因子, 量子振動と磁気抵抗
3. 学会等名 物質・材料研究機構ワークショップ「超伝導物質, トポロジカル物質」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Fuseya, Hiroyasu Katsuno, Kamran Behnia, Aharon Kapitulnik
2. 発表標題 Nanoscale Turing patterns in bismuth monolayer
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伏屋雄紀
2. 発表標題 磁場中固体電子の量子論：スピン軌道結合の効果
3. 学会等名 強磁場オンライン研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	白石 誠司 (Shiraishi Masashi) (30397682)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究 分担者	徳永 将史 (Tokunaga Masashi) (50300885)	東京大学・物性研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Spin-Orbit Interaction and G-factor 2019	開催年 2019年～2019年
--	--------------------

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	ESPCI Paris Tech	College de France		
米国	Stanford University			