

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02108

研究課題名(和文)ディラック電子系物質におけるマルチフェロイクス開拓

研究課題名(英文)Multiferroics in Dirac electron materials

研究代表者

小形 正男(Ogata, Masao)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：60185501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：理論と実験とが密な連携を取りつつ、ディラック電子系物質が示すマルチフェロイクスについて以下の点を明らかにした。1)ディラック電子系では相対論的な対称性のために、誘電率と電場応答、反磁性軌道磁化率などの間に顕著な相関がある。同時に帯磁率の厳密な表式を見出した。2)ビスマスにおける内因性スピンホール効果に関して、磁気モーメントに対する基礎的理論を確立した。また実験的には作成した薄膜を用いてスピン流の振る舞いを明らかにした。3)有機伝導体ディラック電子系では、NMRの結果を電子相関によるものとして解釈した。またディラック点のループの存在を示した。実験的には磁気抵抗からバレーの自由度の関与を見出した。

研究成果の概要(英文)：We clarified the following points about the multiferroics realized in the Dirac electron materials. 1) Due to the relativistic symmetry of the Dirac electron system, there is a remarkable relationship between the dielectric constant, responses to the magnetic and electric fields, and diamagnetic orbital susceptibility. An exact formalism of the magnetic susceptibility has been obtained. 2) About the intrinsic spin Hall effect in bismuth, a basic theory about the magnetic moment is established. Experimentally, the behavior of the spin current is clarified by using the thin film of bismuth. 3) In the Dirac electron systems in organic conductors, the results of NMR are interpreted by the electron correlation. The existence of the loop of Dirac points is shown. Experimentally, the valley degrees of freedom are found in the analysis of the magneto-resistivity.

研究分野：固体物理学

キーワード：ディラック電子 マルチフェロイクス

## 1. 研究開始当初の背景

近年スピン軌道相互作用が生む新奇物性が、スピントロニクス、マルチフェロイクス、トポロジカル絶縁体など幅広い分野で強い関心を持たれている。スピン軌道相互作用は相対論的量子力学におけるディラック方程式から得られるものであるが、固体中の電子の運動がディラック方程式で記述されるディラック電子系物質は、このスピン軌道相互作用の本質を深く追求する恰好の舞台となっている。ビスマスはディラック電子系物質の典型として古くから知られているが、近年上記分野におけるスピン軌道相互作用への強い関心から、再び注目を集めている。

本研究計画のグループは世界に先駆けてビスマス中のディラック電子の新奇物性を明らかにしてきた。平成 24-26 年度の基盤研究 A「固体中のディラック電子」(理論だけの研究組織)では 4 種類の物質中ディラック電子について研究を行ったが、その中で特にビスマスについて大きな成果が得られた。ビスマスでは 6p 軌道による大きなスピン軌道相互作用とバンド間効果により、絶縁体において内因性スピンホール効果が実現し、従来の 100 倍ものスピン流が理論的に予測されること[1,2]、スピンホール伝導度と反磁性磁化率が厳密に比例すること[1]が明らかにされた。

スピンホール効果とは電場によってスピン流が生じることなので、上記結果はビスマスが大きなマルチフェロイクス(交差相関)をもつ新しい有力候補であることを示している。さらに最近、ビスマス類似のディラック電子系を持つ物質群 La<sub>3</sub>As<sub>2</sub>, SrMnBi<sub>2</sub> なども見いだされ、この分野は今後実験・理論ともに急速な発展が見込まれると考えられる。

また日本で発見されたディラック電子系として、有機伝導体におけるものがある[3]。この系はギャップが 0(ワイル電子)・擬 2 次元系であること等の相違があるが、ビスマスにおけるディラック電子系の特別な例となっている。さらに電荷秩序状態近傍ということで、電子相関が効いているという別な要素も持っている。このため、ビスマスとともに有機伝導体中ディラック電子系のマルチフェロイクスも探究することは有益であると考えられる。さらに、グラフェンやトポロジ

カル絶縁体の表面状態とは異なりバルクの実験が可能で、理論との比較ができるという点もビスマスと類似している。

[1] Y.Fuseya, M. Ogata, H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 093704 (2012).

[2] Y.Fuseya, M. Ogata, H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 074702 (2014).

[3] レビューとして、K. Kajita, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 072002 (2014).

## 2. 研究の目的

以下の 3 点に絞って研究の目的とした。

- (1) ディラック電子系特有のマルチフェロイックな物性の開拓
- (2) 内因性スピンホール効果の実験的検出と微視的機構の解明
- (3) 有機伝導体ディラック電子系での電子相関効果とマルチフェロイクス

## 3. 研究の方法

本科研究費研究計画では、実験と理論から構成される研究組織を立ち上げ、定期的に意見交換・アイデアや成果の交換を行い、密接な連携を実現することとした。

本研究計画ではディラック電子系のマルチフェロイクスに絞って計画を立てたが、それでも熱流、スピン流、スピンホール効果、磁場誘起電荷秩序など多岐にわたる現象が対象となる。しかし研究目的は相互に密接に関連しており、各分担者が一体となって効果的に研究を遂行できる。これまでの研究では理論のみで新奇物性の予言を行ってきたが、今後は実験との比較が不可欠になってくるので、本研究計画では分担者として実験グループを含め、実験と理論との間での密な連携を実現し、相乗効果によって飛躍的な発展を目指す。また途中で臨機応変に分担者間の共同研究、実験との共同研究を進めていく。

## 4. 研究成果

- (1) ディラック電子系特有のマルチフェロイックな物性の開拓に関して

質量が等方的な場合と、質量異方性のある場合両方について、ディラックハミルトニアンに基づき、ディラック電子系物質の誘電率と電場応答、反磁性軌道磁化率などの間に相対論的な対称性による顕著な相関があることを見出した。

ビスマスの誘電率を定量的に説明するとともに、絶縁体である Bi-Sb 合金の動的誘電率の周波数依存性を予言した。

スピン軌道相互作用、時間・空間反転対称性の破れの効果を一般的に含む厳密な帯磁率の表式を導き出した。またパイエルス位相による方法を厳密化した。

ディラック電子の超伝導状態におけるマイスナー効果を調べ、その結果、バンド間効果を起源とする非自明なマイスナー効果を示すことを発見した。

ディラック電子系における磁氣的性質と電氣的性質の間の相対論的な対称性に基づいて、核磁気共鳴に関する理論を構築した。とりわけ、核スピンと電子の間の磁氣的・電氣的（電気四重極）相互作用によって生じるスピン格子緩和率の定量的な比較を行い、核磁気共鳴における軌道効果の重要性を明らかにした。

Bi-Sb の核スピン緩和率を念頭に、反磁性軌道電流に起因する核スピン緩和率を計算し、高温で  $T$  の 3 乗に比例する温度依存性を得た。

## (2) 内因性スピンホール効果の実験的検出と微視的機構の解明について

スピンホール効果を定量的に予測するには磁気モーメントの評価が欠かせないので、PbTe や SnTe の磁気モーメントの大きさ及び異方性を定量的に求めた。また、強磁場中 Bi における磁気伝導度の上昇が 100% バレー分極によるものであることを示した。

ビスマスにおける正孔のスピン磁気モーメントの大きさ・異方性の起源について、多バンドの効果を  $k \cdot p$  理論に基づき解析することによって明らかにした。

スピン軌道結合の効果を相対論的に取り扱い、強いスピン軌道結合の場合の弱局在の理論研究を進め、ディラック電子系ではスピン拡散長が長くなりうることを示した。

ディラック電子系の表面状態を理論的に調べ、解析解を得た。その結果、表面状態の侵入長は長く、比較的厚い膜厚でも薄膜両面の表面状態が干渉して表面状態にギャップが開くことが分かった。

実験的には、磁性絶縁体イットリウム-鉄-ガーネット上にビスマス薄膜を成長させ、逆ラシュバ-エーデルシュタイン効果と逆

スピンホール効果の相関を明らかにした。

Fe(100)上に高配向 Bi ((111)のテクスチャ構造)が成長することを元に、Fe から高配向 Bi へのスピン流注入をスピンポンピング法で行い、高配向 Bi のスピン流・電流変換機能を精査した。

高品質多結晶 Bi と Ag を磁性絶縁膜上に成長させ、Bi/Ag 界面で発現するラシュバ場由来のスピン変換現象を定量的に評価した。

## (3) 有機伝導体ディラック電子系での電子相関効果とマルチフェロイクスについて

分子性ディラック電子系の NMR で観測されたフェリ磁性分極におけるバンド間揺らぎの役割を理論的に解明し、短距離クーロン相互作用による散乱の重要性を明らかにした。

ラシュバ型スピン軌道相互作用を有するディラック系では、空間変化する静的な軌道磁場がスピン分極を誘起し、逆にゼーマン磁場が平衡電流を誘起することを示した。

有機ディラック電子系においてスピン格子緩和時間の特異な温度依存性の起源が長距離クーロン斥力であることを明らかにした。この電子相関効果は、エキシトン転移の前駆的な揺らぎを引き起こす。

ディラック点の出現に関して、分子間のホッピングパラメータの相互の関係を調べ、偶奇の縮退で生じるディラック電子の位置付けを明らかにした。

単位胞に 4 分子を含む有機導体および、多分子から構成される 3 次元導体のディラック点について調べ、偶奇 2 種類の波動関数が存在することが出現にとって本質であることを見いだした。

単一成分分子性導体において、波数空間内でのディラック点のループの存在を証明し、有効モデルを導出した。さらにこの系での、スピン磁化率の温度依存性・絶対零度での異方的電気伝導度の圧力依存性を調べた。

実験的には、-(BEDTTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の高圧力下での面内伝導度異方性および面間磁気抵抗の磁場方向依存性から、この系のディラックコーンの傾き度合を決定した。

層間磁気抵抗の実験からバレーの自由度が自発的に破れる相転移現象を示唆する結果を得た。また、2 次元面平行磁場下で層間磁気抵抗にコヒーレンスピークを検出し、

ゼーマン効果による撓んだシリンダー状フェルミ面が誘起されることを議論した。

#### 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42件)

(1) Y. Fuseya and H. Fukuyama, “Analytical Solutions for the Surface States of  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0 < x < 0.1$ )” *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 044710-1-10 (2018). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.87.044710>.

(2) Y. Suzumura, “Effect of Long-Range Coulomb Interaction on NMR Shift in Massless Dirac Electrons of Organic Conductor” *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 024705-1-9 (2018). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.87.024705>.

(3) D. Ohki, G. Matsuno, Y. Omori and A. Kobayashi, “Optical Conductivity in a Two-Dimensional Extended Hubbard Model for an Organic Dirac Electron System - (BEDT-TTF)213” *Crystals* 8, 137 (2018). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.3390/cryst8030137>.

(4) N. Tajima, “Effects of Carrier Doping on the Transport in the Dirac Electron System - (BEDT-TTF)213 under High Pressure” *Crystals* 8, 126-1-17 (2018). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.3390/cryst8030126>.

(5) N. Tajima and T. Morinari, “Tilted Dirac Cone Effect on Interlayer Magnetoresistance in - (BEDT-TTF)213” *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 045002-1-2 (2018). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.87.045002>.

(6) M. Ogata, “Theory of Magnetization in Bloch Electron Systems” *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 044713-1-18 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.044713>.

(7) T. Kariyado and M. Ogata, “Evolution of Band Topology by Competing Band Overlap and Spin-Orbit Coupling: Twin Dirac Cones in  $\text{Ba}_3\text{SnO}$  as a Prototype” *Phys. Rev. Materials*, 1, 061201-1-5 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.061201>.

(8) H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama, “Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems” *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 083702-1-4 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.083702>.

(9) T. Hirose, H. Maebashi, M. Ogata, and H. Fukuyama, “Nuclear Spin Relaxation Time Due to the Orbital Currents in Dirac Electron Systems” *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 063705-1-4 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.063705>.

(10) Z. Zhu, J. Wang, H. Zuo, B. Fauque, R. D. McDonald, Y. Fuseya, and K. Behnia, “Emptying Dirac valleys in bismuth using high magnetic fields” *Nature Communications* 8, 15297-1-7 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms15297>.

(11) R. Kato and Y. Suzumura, “Novel Dirac Electron in Single-Component Molecular Conductor  $[\text{Pd}(\text{dddt})_2]$  (dddt = 5,6-dihydro-1,4-dithiin-2,3-dithiolate)” *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 064705-1-7 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.064705>.

(12) Y. Suzumura and R. Kato, “Magnetic susceptibility of Dirac electrons in single-component molecular conductor  $[\text{Pd}(\text{dddt})_2]$  under pressure” *J. J. Appl. Phys.* 56, 05FB02-1-6 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/10.7567/JJAP.56.05FB02>.

(13) Y. Suzumura and R. Kato, “Anisotropic Conductivity of Nodal Line Semimetal in Single-Component Molecular Conductor  $[\text{Pd}(\text{dddt})_2]$ ” *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 124710-1-6 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.124710>.

(14) M. Hirata, K. Ishikawa, G. Matsuno, A. Kobayashi, K. Miyagawa, M. Tamura, C. Berthier, K. Kanoda, “Anomalous spin correlations and excitonic instability of interacting 2D Weyl fermions” *Science* 358, 1403-1406 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.1126/science.aan5351>.

(15) Y. Omori, G. Matsuno, A. Kobayashi, “Longitudinal Conductivity on Edge and Domain Wall of Molecular Dirac Electron System - (BEDT-TTF)213” *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 074708-1-6 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.074708>.

(16) T. Itou, E. Watanabe, S. Maegawa, A. Tajima, N. Tajima, K. Kubo, R. Kato, K. Kanoda, “Slow dynamics of electrons at a metal-Mott insulator boundary in an organic system with disorder” *Sci. Adv.* 3, e1601594-1-6 (2017). 査読有 DOI:<http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1601594>.

- (17) E. Tisserond, J. N. Fuchs, M. O. Goerbig, P. Auban-Senzier, C. Meziere, P. Batail, Y. Kawasugi, M. Suda, H. M. Yamamoto, R. Kato, N. Tajima and M. Monteverde, "Aperiodic quantum oscillations of particle-hole asymmetric Dirac cones" *EPL* 119, 67001-1-5 (2017). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/119/67001.
- (18) R. Kato, H.B. Cui, T. Tsumuraya, T. Miyazaki, and Y. Suzumura, "Emergence of the Dirac Electron System in a Single-Component Molecular Conductor under High Pressure" *J. Am. Chem. Soc.* 139, 1770-1773 (2017). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1021/jacs.6b12187.
- (19) G. Matsuno and A. Kobayashi, "Effect of Interband Fluctuation on Spin Susceptibility in Molecular Dirac Fermion System -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>" *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 014705-1-8 (2017). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.014705.
- (20) M. Matsushima, Y. Ando, S. Dushenko, R. Ohshima, R. Kumamoto, T. Shinjo, and M. Shiraishi, "Quantitative investigation of the inverse Rashba-Edelstein effect in Bi/Ag and Ag/Bi on YIG" *Appl. Phys. Lett.* 110, 072404-1-4 (2017). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.4976691.
- (21) M. Ogata, "Orbital Magnetism of Bloch Electrons: III. Application to Graphene" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 104708-1-10 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.104708.
- (22) M. Ogata, "Orbital Magnetism of Bloch Electrons: II. Application to Single-Band Models and Corrections to Landau-Peierls Susceptibility" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 064709-1-11 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.064709.
- (23) H. Matsuura and M. Ogata, "Theory of Orbital Susceptibility in the Tight-Binding Model: Corrections to the Peierls Phase" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 074709-1-11 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.074709.
- (24) N. Okuma and M. Ogata, "Unconventional Spin Hall Effect and Axial Current Generation in a Dirac Semimetal" *Phys. Rev. B* 93, 140205-1-4 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.140205.
- (25) N. Yoshioka, H. Matsuura, and M. Ogata, "Quantum Hall Effect of Massless Dirac Fermions and Free Fermions in Hofstadter's Butterfly" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 064712-1-6 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.064712.
- (26) Y. Tanaka and M. Ogata, "Correlation Effects on Charge Order and Zero-Gap State in the Organic Conductor -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 104706-1-6 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.104706.
- (27) H. Hayasaka and Y. Fuseya, "Crystal line spin-orbit interaction and the Zeeman splitting in Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te" *J. of Phys. Cond. Mat.* 28, 31LT01-1-5 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/28/31/31LT01.
- (28) H. Emoto, Y. Ando, G. Eguchi, R. Ohshima, E. Shikoh, Y. Fuseya, T. Shinjo, and M. Shiraishi, "Transport and spin conversion of multicarriers in semimetal bismuth" *Phys. Rev. B* 93, 174428-1-5 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.174428.
- (29) Y. Suzumura, "Analysis of Dirac Point in the Organic Conductor -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 053708-1-5 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.053708.
- (30) M. Hirata, K. Ishikawa, K. Miyagawa, M. Tamura, C. Berthier, D. Basko, A. Kobayashi, G. Matsuno and K. Kanoda, "Observation of an anisotropic Dirac cone reshaping and ferrimagnetic spin polarization in an organic conductor" *Nature Communications* 7, 12666-1-14 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1038/ncomms12666.
- (31) G. Matsuno, Y. Omori, T. Eguchi and A. Kobayashi, "Topological Domain Wall and Valley Hall Effect in Charge Ordered Phase of Molecular Dirac Fermion System -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 094710-1-7 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.094710.
- (32) S. Sugiura, K. Shimada, N. Tajima, Y. Nishio, T. Terashima, T. Isono, A. Kobayashi, B. Zhou, R. Kato, and S. Uji, "Charge Transport in Antiferromagnetic Insulating Phase of Two-Dimensional Organic Conductor -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>2</sub>" *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 064703-1-6 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.0

64703.

(33) Sugiura, K. Shimada, N. Tajima, Y. Nishio, T. Terashima, T. Isono, R. Kato, and S. Uji, "Magnetic Torque Studies in Two-Dimensional Organic Conductor  $-(\text{BETS})_2\text{FeCl}_2$ " J. Phys. Soc. Jpn. 85, 014702-1-6 (2016). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.014702.

(34) M. Ogata, and H. Fukuyama, "Orbital Magnetism of Bloch Electrons: I. General Formula" J. Phys. Soc. Jpn. 84, 124708-1-13 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.124708.

(35) T. Mizoguchi and M. Ogata, "Meissner Effect of Dirac Electrons in Superconducting State Due to Inter-Band Effect" J. Phys. Soc. Jpn. 84, 084704-1-7 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.084704.

(36) I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura, "Longitudinal conductivity of a three-dimensional Dirac electron gas" J. Phys.: Conf. Ser. 603, 012009-1-12 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/603/012009.

(37) F. Piechon, Y. Suzumura and T. Morinari, "Plaquette chirality patterns for robust zero-gap states in  $\pi$ -organic conductor" J. Phys.: Conf. Ser. 603, 012010-1-14 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/603/012010.

(38) Y. Suzumura, I. Proskurin, and M. Ogata, "Reflectance of Dirac electrons in organic conductor" J. Phys.: Conf. Ser. 603, 012011-1-10 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/603/012011.

(39) I. Proskurin, M. Ogata, and Y. Suzumura, "Longitudinal conductivity of massless fermions with tilted Dirac cone in magnetic field" Phys. Rev. B 91, 195413-1-14 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.195413.

(40) Y. Fuseya, Z. Zhu, B. Fauque, W. Kang, B. Lenoir, K. Behnia, "Origin of the Large Anisotropic g Factor of Holes in Bismuth" Phys. Rev. Lett. 115, 216401-1-5 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.216401.

(41) A. Collaudin, B. Fauque, Y. Fuseya, W. Kang, K. Behnia, "Angle Dependence of

the Orbital Magnetoresistance in Bismuth" Phys. Rev. X 5, 021022-1-15 (2015). 査読有 DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.5.021022.

(42) A. Kobayash, "Helical Surface State in Multilayer Massless Dirac Fermion System" JPSJ News Comments 12, 07 (2015). 査読無し DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJNC.12.07.

[学会発表](計144件)

(1) M. Ogata and H. Maebashi, "Charge dynamics of Dirac electrons: Large permittivity, and NMR  $1/T_1$  due to orbital motion" International Workshop on "Frontiers of Research in Quantum Materials" 2017.12.18-20 (Stuttgart, Germany)

(2) Y. Fuseya, "Valleys and their nematicity in bulk bismuth" International conference on Strongly Correlated Electron Systems 2017.7.17-21 (Prague, Czech)

他

2017年

国際会議 21 (うち招待講演7)

日本物理学会 29

2016年

国際会議 12

日本物理学会 46

2015年

国際会議 11 (うち招待講演4)

日本物理学会 25

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小形 正男[Masao Ogata]

(東京大学・理学系研究科・教授)

研究者番号: 60185501

(2) 研究分担者

福山 秀敏[Hidetoshi Fukuyama] (東京理科大学・理学部・教授) 研究者番号: 10004441

鈴木 順三[Yoshikazu Suzumura] (名古屋大学・理学研究科・教授) 研究者番号: 90108449

小林 晃人[Akito Kobayashi] (名古屋大学・理学研究科・准教授) 研究者番号: 80335009

伏屋 雄紀 [Yuki Fuseya] (電気通信大学・情報理工学研究科・准教授) 研究者番号: 00377954

白石 誠司 [Seiji Shiraishi] (京都大学・工学系研究科・教授) 研究者番号: 30397682

田嶋 尚也 [Naoya Tajima] (東邦大学・理学部・准教授) 研究者番号: 40316930