

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01162

研究課題名(和文) 磁気応答、輸送現象に対する多バンド間効果

研究課題名(英文) Many-band effect in magnetic responses and transport properties

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：固体中の電子は無限個のバンドの途中まで詰まっている状態である。多くの場合はフェルミ面付近の単一バンドだけで物性が理解されるが、磁気応答や輸送現象の中には、多バンド間の効果によって初めて理解できるものも多い。最近、ディラック電子系物質や励起子絶縁体の候補物質などにおいて、バンド間効果による特異な応答が理論的に明らかになってきた。本研究では、多バンド間効果という統一的な観点から以下の4点を明らかにした。(1) 磁場下の電気伝導度に対する多バンド効果、(2) 局在ワニエ軌道と相性のよい軌道帯磁率の公式の導出、(3) いくつかのノーダルライン物質の物性の解明、(4) 励起子絶縁体と光誘起ダイナミクス。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多バンド効果という統一的な観点から、磁気応答や輸送現象、光誘起ダイナミクスについて種々の研究成果が得られた。とくに磁場下での輸送係数に対する多バンド効果の一般論や、局在軌道を用いた軌道帯磁率の新公式が得られたことは、今後の応用が期待できる。さらに、いくつかのノーダルライン物質の物性が明らかになったが、これらはノーダルライン物質の特定、新奇物性の開拓に役に立つと考えられる。また励起子絶縁体の熱応答特性、光誘起ダイナミクスによるトポロジカル相転移やディラック点のコントロールなども、さらなる研究の発展に役立つ。今後、系統的に新奇性能をもつ物質材料を創り出すときの指針に繋がると期待される。

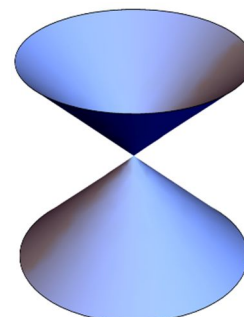
研究成果の概要(英文)：Electrons in solids occupy the part of the infinite number of bands. Many electrical properties can be understood in terms of a single band near the Fermi energy. However, there are several physical quantities such as magnetic responses and transport properties, which can be understood in terms of the multi-band effects. Recently, the peculiar responses due to the multi-band effect have been clarified theoretically in Dirac electron systems and excitonic insulators. In this project, we clarified the following four points in a unified picture of the multi-band effect. (1) The multi-band effect in the conductivity under a magnetic field. (2) Derivation of the new formula for the orbital magnetic susceptibility using localized orbitals. (3) Physical properties in several nodal-line materials. (4) Excitonic insulators and photoinduced dynamics of Dirac electrons.

研究分野：物性理論

キーワード：多バンド効果 軌道磁性 輸送係数

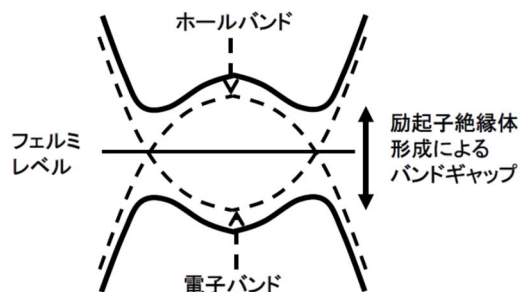
1. 研究開始当初の背景

物質の磁気応答、輸送現象は多くの場合、単一バンドによるフェルミ液体論で議論されている。しかし、特異な応答を示す物質として質量のないディラック電子型の分散を示すグラフェン(右図)や半金属、励起子絶縁体などが盛んに議論されるようになっていた。これらの物質における応答は単一バンドでは説明できず、多バンド(少なくとも2バンド)が深く関与していると考えられていた。



たとえばグラフェンを表すモデルでは、温度を下げると帯磁率は負に発散し(巨大反磁性)、同時に電気伝導度は不純物によらず物理定数のみに依存する普遍的な値を示すことが知られていた。グラフェンの場合フェルミ面は1点しかなく、これらの性質は右図の上半分の電子バンドと下半分のホールバンドとの2つのバンド間効果によって生じる。ワイル半金属状態も空間反転対称性や時間発展対称性を破った場合に生じる同様な状態である。

一般的に、半金属は電子のバンドとホールのバンドによる2つのフェルミ面が共存する物質であるが、典型的な半金属であるビスマスが非常に大きな反磁性を示すことが長年の謎だった。また、ビスマスにSbをドーブすると絶縁体になってフェルミ面が消失するが、この時に反磁性の大きさが最大となることが知られていた。このことは、明らかにフェルミ面を持った場合のランダウの軌道反磁性の理論では説明できないものであり、バンド間効果が主要項であることを明確に示している。



さらに半金属や半導体中の電子とホール間のクーロン相互作用を考慮すると、電子 - ホール対(励起子)が形成され、励起子絶縁体(右図)と呼ばれる状態が実現する可能性がある。励起子絶縁体の理論は超伝導のBCS理論と強い類似性を持ち、この多バンド系における電子状態や外場応答にも非常に興味を持たれる。実験的には、以前からいくつかの候補物質が調べられてきたが、励起子絶縁体であることを決定づける実験はまだなされていなかった。

多バンドの効果を理論的に扱うには、電流演算子のバンド間の行列要素が重要な役割を果たす(軌道磁性も電子がローレンツ力によって作る電流に起因する現象なので、電流演算子が関与する)。電流演算子の同一バンド間の行列要素は電子の群速度に比例するが、異なるバンド間の行列要素は(バンド間)ベリー接続そのものである。さらにベリー接続から得られるベリー曲率が、異常ホール効果や磁気応答に効くということがわかってきていた。

研究開始当初、研究代表者のグループでは、多バンドのプロッホ波動関数をあからさまに用いた形での軌道磁性および帯磁率の一般的な表式を導いた段階だった。この新しい表式においては、ランダウ・パイエルのフェルミ面からくる軌道帯磁率と、それ以外の寄与との関係が明確になった。さらに、スピン軌道相互作用、空間・時間反転対称性の破れ、ベリー曲率の寄与なども統一的に理解された。ただしこれは一般論であり、具体的な物質への適用は今後の課題だった。また、輸送係数に対する多バンドの効果に関しては、ビスマスにおけるホール係数・スピンホール係数についての研究があるが、一般的には未解明の問題が多く残されていた。

以上のように、バンド間効果はいろいろな局面で面白い現象を与えるが、未だ分かっていないことも多いと考えられていた。このため本研究課題では、多バンド間効果が磁気応答や輸送係数にどのように効いてくるか、多バンドという観点から新しい物理量や現象を見出すことはできるかということを中心課題とした。これらの問題は以前からの大きな問題であるが、ベリー曲率との関連など様々なことが分かってきていたので、現代的な視点から問題に挑戦する時期に到達していると考えた。

2. 研究の目的

上記のような研究背景のもとに、本研究では、多バンド間効果という統一的な観点から以下の4点に絞って研究の目的とした。

輸送係数に対する多バンド間効果の一般論の開拓

第一原理計算（バンド計算）を利用したバンド間総和則を満たす有効モデルの導出

ワイル半金属における多バンド間効果

パイエルス位相の補正を正しく取り入れた励起子絶縁体の光誘起ダイナミクス

3. 研究の方法

研究の方法は、場の理論・グリーン関数の方法、第一原理計算、タイトバインディング模型、久保公式を用いた線形応答理論、フロケ理論などを用いた。以下の研究成果の各項目について、その研究のために使われた手法を説明する。

4. 研究成果

輸送係数に対する多バンド間効果の一般論

輸送係数に対する多バンド間効果を調べるために、場の理論・グリーン関数の方法を用いて磁場下の電気伝導度の一般公式を求め、不純物散乱の効果が弱い領域で評価した[1]。不純物散乱の効果の最低次において、縦伝導度（磁気抵抗）やホール係数は古典的なボルツマン方程式の結果を再現するが、より高次の寄与においてベリー曲率や軌道磁気モーメントの効果が現れることが分かった。これらのベリー曲率と軌道磁気モーメントの効果は、多バンドからの寄与によって生じるものであることが明らかになった。さらに、この結果を用いて傾いたワイル半金属の伝導度を議論した。

上記の一般論を応用して、質量のある（エネルギーギャップがある）ディラック電子系について、スピンの関与した特異な輸送現象を明らかにした [2]。スピン軌道相互作用によってディラック分散にギャップが開いた場合、一般にトポロジカルな量であるスピンの依存したベリー曲率が生じる。この場合にはスピンホール効果や磁場中のスピン伝導度など、スピン流が関与した物理量にベリー曲率の寄与が典型的に現れることがわかった。この現象は、擬2次元有機導体である α -(BETS)₂I₃において期待でき、そのスピンホール伝導度の大きさはPtに匹敵する大きなものであると評価された。

第一原理計算（バンド計算）を利用したバンド間総和則を満たす有効モデルの導出

近年物質ごとの個性を取り込んで物性を議論する際には第一原理計算に基づく最局在ワニエ軌道を導出し、フェルミ面近傍の有効モデルを構築することが広く行われている。一方、基礎的かつ重要な物性のひとつとして軌道帯磁率があるが、その計算においてはバンド間効果が重要であり、フェルミ面近傍だけではなく、多くのバンドからの寄与を考慮することが必要である。ただし、バンド間効果は総和則を駆使することにより原子反磁性など局所的な寄与に繰り込める

ことが知られている。以上を鑑み、本研究では局在軌道を用いた低エネルギーモデルに対し、総和則によりできる限りバンド間効果を取りこんだ形で軌道帯磁率を計算する手法の開発を試みた。まずはグリーン関数を用いて解析的に公式を導出し、その後数値計算のためのプログラムの開発を行った。

その結果、ゲージ不変性をあらわに取り込んだ形でグリーン関数を磁場に関して展開することによって、最局在ワニエ軌道と相性の良い軌道帯磁率の公式を導出することに成功した [3]。この公式は隣接する軌道間の移動積分に対する磁場による補正や、磁場によって誘起される軌道間の重なり積分などの実空間での局所的な物理量を用いて計算を行う形になっており、これまでに知られていたベリー接続など波数空間の情報から計算を行う公式と相補的なものとなっている。我々の公式には、軌道帯磁率に対するランダウ・パイエルス項とその他の項への分解が明快であるといった利点がある。また、総和則を用いた理論において、バンド間効果の一部が原子反磁性など局所的な項に還元されることが知られているが、局在基底を用いた新公式では局所的な寄与が自然に現れる。導いた新公式の有用性は軌道帯磁率の厳密な計算が容易な強束縛モデルを用いた数値的な研究により検証した。これによって、ワニエ軌道の局在性が良い場合には、バンド間効果が上手く局所項に繰り込めること、及びその反対の事象としてワニエ軌道の局在性が悪い場合には、バンド間効果をあらわに取り込む必要があることが確認された。

ワイル半金属における多バンド効果

最近、空間反転対称性や時間発展対称性を破っている物質中で、質量のないディラック電子型の分散を示すワイル半金属が提唱され、新奇物性を担う可能性が議論されている。さらにディラック型の分散が波数空間で連続的につながったノーダルライン物質の候補も考えられている。これらも多バンドの1つの典型物質といえる。

ノーダルライン物質は「ドラムヘッド表面状態」と呼ばれる特徴的な表面状態を持つが、この表面状態が出現するか否かは表面の詳細に依存する。そのため、バルクの物理量を用いてノーダルライン物質の特徴を捉えることが必要である。我々は新たな視点として、軌道磁化率とホール伝導度に着目した。この2つの物理量にはノーダルライン物質特有の特異的な化学ポテンシャル依存性があり、さらに、この特異的振る舞いは波数空間内でのノーダルラインの配置に対応して強い磁場角度依存性を示すことがわかった [4]。この結果は、実験によるノーダルラインの有無の判定、およびその波数空間内での配置の決定を可能にする。

HMTSF-TCNQという分子性導体は、約30Kで電荷密度波転移する有機電荷移動錯体として知られている。この物質に対して第一原理計算を行い、開いたノーダルラインをもつトポロジカル半金属であることがわかった [5]。さらにタイトバインディングモデルを作り、福山公式によって軌道帯磁率を調べたところ、質量ゼロのディラック電子系と類似の化学ポテンシャル依存性を示すことがわかった。また、電荷密度波転移温度以下では、格子変位によってノーダルラインが変形されてループ状に変形されることが明らかになった。その結果、軌道帯磁率には低温で大きな反磁性のプラトーが現れた。バンド間効果、不純物散乱およびノーダルラインの変形を考慮した我々の計算結果は、実験で得られている帯磁率について絶対値を含めてよく再現した。

また、量子電磁力学との類似性を用いて、ディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質には時空の対称性を反映した電磁双対性が現れることを示し、電気伝導度(電気応答)と軌道磁化率(磁気応答)の間に成り立つ次元によらない関係式を導いた。特に二次元の場合はコンダクタンスが量子化されるため、電磁双対性で結ばれる軌道反磁性は質量ギャップまたは温度に反比例することになる。実際、二次元有機ディラック電子系 $(\text{BETS})_2\text{I}_3$ のスピン磁化率と軌道磁化率の実験値が理論値と定量的に一致することを示し、軌道磁化率と電気伝導度の間にこの電磁双

対性に対応した強い相関があることを見出した [6]。

パイルス位相の補正を正しく取り入れた励起子絶縁体の光誘起ダイナミクス

半導体や半金属中で、電子と正孔がクーロン力によって束縛状態(エキシトン)を形成し、それがBEC的あるいはBCS的に凝縮した状態はエキシトニック絶縁体と呼ばれる。エキシトンは電荷をもたないがエネルギーを持つため、電流には寄与しないが熱流には寄与する。このため従来の理論とは異なる熱応答を示す可能性がある。実際、エキシトニック絶縁体の候補物質である $\text{TmSe}_{0.45}\text{Te}_{0.55}$ において、低温での熱伝導率の特異な振る舞いが報告されている。我々はこのエキシトニック絶縁体の熱伝導率について理論的に計算した。Sommerfeld-Bethe関係式が成立すると特異な振る舞いは現れないが、相互作用を正しく取り入れた熱流演算子を用いることによって Sommerfeld-Bethe関係式を破る寄与が現れることが分かった。これは、エキシトニック絶縁体特有の寄与である [7]。

近年、光誘起ダイナミクスとして、フロケ理論を用いた光誘起トポロジカル相転移をしらべた。我々は $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ における傾いたDirac coneに対して光を照射したときの振る舞いをフロケ理論を用いて解析した。その結果、円偏光レーザーを照射したときはChern絶縁体への相転移が起こることを予言した。また直線偏光を照射した場合は、2つのDirac点が近づき、さらに強度の増大に伴い対消滅することを予言した。円偏光と直線偏光の間とも言える楕円偏光を照射したときは2つのDirac点の衝突・崩壊を伴うChern絶縁体から通常のバンド絶縁体へのトポロジカル相転移を示した [8,9]。

- [1] V. Konye and M. Ogata, “Microscopic theory of magnetoconductivity at low magnetic fields in terms of Berry curvature and orbital magnetic moment” Phys. Rev. Research **3**, 033076 (2021).
- [2] M. Ogata S. Ozaki and H. Matsuura, “Anomalous Spin Transport Properties of Gapped Dirac Electrons with Tilting” J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 023708 (2022).
- [3] T. Kariyado H. Matsuura and M. Ogata, “Disentangling Orbital Magnetic Susceptibility with Wannier Functions” J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 124708 (2021).
- [4] I. Tateishi V. Konye H. Matsuura and M. Ogata, “Characteristic singular behaviors of nodal line materials emerging in orbital magnetic susceptibility and Hall conductivity” Phys. Rev. B **104**, 035113 (2021).
- [5] S. Ozaki I. Tateishi H. Matsuura M. Ogata and K. Hiraki, “Nodal-line semimetal HMTSF-TCNQ: Anomalous orbital diamagnetism and charge density wave” Phys. Rev. B **104**, 155202 (2021).
- [6] S. Fujiyama H. Maebashi N. Tajima T. Tsumuraya H.-B. Cui M. Ogata and R. Kato, “Large diamagnetism and electromagnetic duality in two-dimensional Dirac electron system” Phys. Rev. Lett. **128**, 027201 (2022).
- [7] S. Takarada M. Ogata and H. Matsuura, “Theory of thermal conductivity on excitonic insulator” Phys. Rev. B **104**, 165122 (2021).
- [8] K. Kitayama M. Mochizuki Y. Tanaka and M. Ogata, “Floquet Theory of Photoinduced Topological phase Transitions in the Organic Salt α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ Irradiated with Elliptically Polarized Light” J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 104705 (2021).
- [9] K. Kitayama M. Mochizuki Y. Tanaka and M. Ogata, “Predicted photoinduced pair annihilation of emergent magnetic charges in the organic salt α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ irradiated by linearly polarized light” Phys. Rev. B **104**, 075127 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 S. Ozaki and M. Ogata	4. 巻 3
2. 論文標題 Universal quantization of the magnetic susceptibility jump at a topological phase transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 013058-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.013058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y. Suzumura and M. Ogata	4. 巻 90
2. 論文標題 Anomalous conductivity of two-dimensional Dirac electrons in organic conductor under pressure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 044709-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.044709	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 Y. Suzumura, R. Kato, and M. Ogata	4. 巻 10
2. 論文標題 Electric transport of nodal line semimetals in single-component molecular conductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 862-1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/cryst10100862	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 S. Suetsugu, K. Kitagawa, T. Kariyado, A. W. Rost, J. Nuss, C. Muhle, M. Ogata, and H. Takagi	4. 巻 103
2. 論文標題 Giant orbital diamagnetism of three-dimensional Dirac electrons in Sr3PbO antiperovskite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115117-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.115117	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 V. Konye and M. Ogata	4. 巻 98
2. 論文標題 Magnetoresistance of a three-dimensional Dirac gas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 195420-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.195420	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 H. Maebashi, T. Hirokawa, M. Ogata, and H. Fukuyama	4. 巻 未定
2. 論文標題 Nuclear Magnetic Relaxation and Knight Shift Due to Orbital Interaction in Dirac Electron Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. Solids	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpccs.2017.12.034	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 I. Tateishi and H. Matsuura	4. 巻 87
2. 論文標題 Face Centered Cubic SnSe as a Z2 Trivial Dirac Nodal Line Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 073702-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.073702	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 V. Konye and M. Ogata	4. 巻 3
2. 論文標題 Microscopic theory of magnetoconductivity at low magnetic fields in terms of Berry curvature and orbital magnetic moment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 033076-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toshikaze Kariyado, Hiroyasu Matsuura, and Masao Ogata	4. 巻 90
2. 論文標題 Disentangling Orbital Magnetic Susceptibility with Wannier Functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 124708-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.124708	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 I. Tateishi, V. K'onoye, H. Matsuura, and M. Ogata	4. 巻 104
2. 論文標題 Characteristic singular behaviors of nodal line materials emerging in orbital magnetic susceptibility and Hall conductivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 035113-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.035113	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 S. Ozaki, I. Tateishi, H. Matsuura, M. Ogata, and K. Hiraki	4. 巻 104
2. 論文標題 Nodal-line semimetal HMTSF-TCNQ: Anomalous orbital diamagnetism and charge density wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 155202-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.155202	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 S. Takarada, M. Ogata, and H. Matsuura	4. 巻 104
2. 論文標題 Theory of thermal conductivity on excitonic insulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 165122-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.165122	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 K. Kitayama, Y. Tanaka, M. Ogata, and M. Mochizuki	4. 巻 90
2. 論文標題 Floquet Theory of Photoinduced Topological phase Transitions in the Organic Salt -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ Irradiated with Elliptically Polarized Light	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 104705-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.104705	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 K. Kitayama, M. Mochizuki, Y. Tanaka, and M. Ogata	4. 巻 104
2. 論文標題 Predicted photoinduced pair annihilation of emergent magnetic charges in the organic salt -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ irradiated by linearly polarized light	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 075127-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.075127	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 Masashi Hosoi, Ikuma Tateishi, Hiroyasu Matsuura, and Masao Ogata	4. 巻 105
2. 論文標題 Thin films of topological nodal line semimetals as a candidate for efficient thermoelectric converters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 085406-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.085406	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 M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura	4. 巻 91
2. 論文標題 Anomalous Spin Transport Properties of Gapped Dirac Electrons with Tilting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 023708-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.023708	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Fujiyama, H. Maebashi, N. Tajima, T. Tsumuraya, H.-B. Cui, M. Ogata, and R. Kato	4. 巻 128
2. 論文標題 Large diamagnetism and electromagnetic duality in two-dimensional Dirac electron system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 027201-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.027201	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 -

〔学会発表〕 計50件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 小形正男、V. Konye
2. 発表標題 弱磁場磁気抵抗：一般論とディラック系への応用
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤山茂樹, 前橋英明, 崔亨波, 圓谷貴夫, 小形正男, 加藤礼三
2. 発表標題 常圧二次元ディラック電子系 -(BETS)213 の軌道磁性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 V. Konye and M. Ogata
2. 発表標題 Microscopic theory of magnetoconductivity at low magnetic fields in terms of Berry curvature and orbital magnetic moment
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎壮駿、小形正男
2. 発表標題 擬一次元系における軌道磁性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 V. Konye、小形正男
2. 発表標題 ベリー曲率と軌道磁気モーメントに関連した低磁場極限での磁気抵抗
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前橋英明、藤山茂樹、小形正男
2. 発表標題 二次元ディラック電子系の電磁双対性：大きな軌道反磁性と量子化されたコンダクタンスを結ぶ関係
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立石幾真, Viktor Konye, 松浦弘泰, 小形正男
2. 発表標題 ノーダルライン半金属におけるホール伝導度と磁場角度依存性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人
2. 発表標題 有機導体における創発的反平行磁束量子ペアの光誘起対消滅の理論予言
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前橋英明
2. 発表標題 常圧二次元ディラック電子系 -(BETS) ₂ I ₃ の軌道磁性：理論の立場から
3. 学会等名 科研費合同研究会「分子性導体でみられる異常軌道磁化率の研究会」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kitayama, Y. Tanaka, M. Ogata, and M. Mochizuki
2. 発表標題 Predicted pair annihilation of emergent antiparallel magnetic fuxes in an organic conductor
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊宿俊風
2. 発表標題 ワニエ関数を用いた軌道磁化率のゲージ不変な定式化
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Maebashi M. Ogata and H. Fukuyama
2. 発表標題 Quantum Electrodynamics in Solids: Dielectric and Diamagnetic Properties of Dirac Materials
3. 学会等名 International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Maebashi M. Ogata and H. Fukuyama
2. 発表標題 Duality between dielectricity and diamagnetism in Dirac materials in analogy with quantum electrodynamics
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Tateishi
2. 発表標題 Nodal-line semimetal and Topological Crystalline Insulator
3. 学会等名 International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Tateishi
2. 発表標題 Nodal-line semimetal and Topological Crystalline Insulator
3. 学会等名 Workshop "Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 V. Konye
2. 発表標題 Magnetoresistance of a Three-dimensional Dirac Electron Gas
3. 学会等名 Workshop "Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前橋英明、広沢智紀、小形正男
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体の核磁気共鳴：表面電子状態の軌道効果
3. 学会等名 日本物理学会・秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前橋英明、小形正男、福山秀敏
2. 発表標題 ディラック電子系物質の分極テンソルとプラズマモード
3. 学会等名 日本物理学会・秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 広沢智紀、前橋英明、小形正男
2. 発表標題 不純物下のワイル半金属における軌道核スピン緩和率とその臨界点近傍での振る舞いの研究
3. 学会等名 日本物理学会・秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立石幾真
2. 発表標題 Z2自明なノーダルライン半金属とトポロジカル結晶絶縁体の対応
3. 学会等名 日本物理学会・秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末次祥大、北川健太郎、苅宿俊風、葉山慶平、A. W. Rost、J. Nuss、C. Muhle、小形正男、高木英典
2. 発表標題 アンチペロブスカイトSr3Pb0における3次元ディラック電子の巨大軌道反磁性I
3. 学会等名 日本物理学会・秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 V. Konye and M. Ogata
2. 発表標題 Transport properties of Dirac electrons in a magnetic field
3. 学会等名 日本物理学会・第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立石幾真
2. 発表標題 Ca2As等におけるノーダルラインと表面状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会・第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾崎壮駿、小形正男
2. 発表標題 ギャップのあるグラフェンにおける軌道磁性
3. 学会等名 日本物理学会・第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末次祥大、北川健太郎、苅宿俊風、葉山慶平、A. W. Rost、J. Nuss、C. Muhle、小形正男、高木英典
2. 発表標題 アンチペロブスカイトSr3Pb0における3次元ディラック電子の巨大軌道反磁性II
3. 学会等名 日本物理学会・第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Maebashi and M. Ogata
2. 発表標題 Diamagnetic Currents in Weyl Systems
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ozaki and M. Ogata
2. 発表標題 Magnetic Susceptibility Quantization of Orbital-Zeeman Cross term in 2D Insulators
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 V. K"onye and M. Ogata
2. 発表標題 Nodal line semimetals in a magnetic field
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ozaki and M. Ogata
2. 発表標題 Berry Curvature Contribution to Magnetization in a Honeycomb Lattice Model
3. 学会等名 New Trends in Topological Insulators 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ozaki and M. Ogata
2. 発表標題 Berry Curvature Contribution to Magnetization in a Honeycomb Lattice Model
3. 学会等名 Recent Progress in Gra-phene and 2D Materials Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾崎壮駿、小形正男
2. 発表標題 2次元絶縁体における軌道-ゼーマン交差帯磁率の量子化
3. 学会等名 第13回物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前橋英明、小形正男
2. 発表標題 ディラック電子系の反磁性電流
3. 学会等名 第13回物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前橋英明、小形正男
2. 発表標題 ディラック電子系の電磁応答に対するゲージ不変な定式化
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小形正男、松浦弘泰、立石幾真
2. 発表標題 ノーダルライン物質の物性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮藤大輔、松浦弘泰、小形正男
2. 発表標題 擬一次元有機錯体HMTSF-TCNQの軌道磁性に関する理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮藤大輔、松浦弘泰、小形正男
2. 発表標題 擬一次元有機錯体HMTSF-TCNQの異常物性の理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 V. K'onnye H. Matsuura I. Tateishi and M. Ogata
2. 発表標題 Nodal Line Semimetal in a Magnetic Field
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 實田真太、小形正男、松浦弘泰
2. 発表標題 エキシトニック絶縁体の熱伝導率に関する理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎壮駿、小形正男
2. 発表標題 軌道-ゼーマン交差帯磁率の量子化の理論とトポロジカル絶縁体に対するその応用
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Ogata
2. 発表標題 Theory of Dirac electrons
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2021 (AC2MP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小形正男
2. 発表標題 固体中のディラック電子系
3. 学会等名 分子性固体オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Ozaki I. Tateishi, H. Matsuura M. Ogata and K. Hiraki
2. 発表標題 Nodal-line semimetal HMTSF-TCNQ: Anomalous orbital diamagnetism and charge density wave
3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小形正男
2. 発表標題 有機ディラック電子系における低磁場輸送係数
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎壮駿、立石幾真、松浦弘泰、小形正男、開康一
2. 発表標題 ノーダルライン半金属HMTSF-TCNQにおける電荷密度波と異常な軌道反磁性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人
2. 発表標題 楕円偏光を照射した有機導体におけるDirac点の対消滅とトポロジカル相転移の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人
2. 発表標題 有機導体 α -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ における光誘起トポロジカル相転移の理論研究
3. 学会等名 第66回物性若手夏の学校
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人
2. 発表標題 有機導体における創発的反平行磁束量子ペアの光誘起対消滅の理論的予言
3. 学会等名 第66回物性若手夏の学校
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北山圭亮、田中康寛、小形正男、望月維人
2. 発表標題 有機導体 -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ における光誘起トポロジカル相転移の理論研究
3. 学会等名 ISSP短期研究会「分子性固体研究の拡がり：新物質と新現象」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小形正男
2. 発表標題 固体中のディラック電子
3. 学会等名 東京理科大学、博士共通特別講義：物理学からみる理学の世界（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎壮駿、小形正男
2. 発表標題 Kane-Mele模型におけるスピンと軌道の複合的な磁気応答とトポロジカル秩序
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022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	苅宿 俊風 (Kariyado Toshikaze) (60711281)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテク トニクス研究拠点・主任研究員 (82108)	

