

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2022
課題番号：18K03482
研究課題名（和文）物質中の量子電磁力学：ディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質の動的応答

研究課題名（英文）Quantum Electrodynamics in Solids: Dynamical Properties of Dirac and Weyl Materials

研究代表者
前橋 英明 (MAEBASHI, Hideaki)
東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：30361661
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：量子電磁力学と対応した場の理論的手法（物質中のQED）を用いてディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質の動的応答に関する理論研究を行い、以下のような成果を得た：（1）ディラック電子系物質における電気応答と磁気応答の間に成立する関係を明らかにした。（2）ワイルフェルミオン系物質の軌道電流に起因する核磁気緩和の理論を構築し、それに対する乱れの効果を明らかにした。（3）分子性固体（BETS）213とHMTSF-TCNQが示す大きな軌道反磁性の定量的評価を行い、実験結果とよく一致することを示した。（4）多様なディラック電子系関連物質の輸送特性や熱電特性を理論的に予言した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ディラック電子系物質と量子電磁力学（QED）では特徴的な長さやエネルギーの尺度が大きく異なるにもかかわらず、それらの電気的性質と磁気的性質の間には共通の関係があるという階層構造を明確にしたという点で学術的意義がある。さらに、本研究で見出したディラック電子系物質における軌道反磁性と電気伝導の間に成立する関係等の基礎学理、またディラック電子系関連物質の発見や解析は、磁性と輸送が絡んだ社会的ニーズがある新奇機能性物質を開拓する際の指針につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：Theoretical studies on the dynamical responses of Dirac-Weyl fermion systems have been carried out using field-theoretical methods (QED in solids) corresponding to quantum electrodynamics, and the following results were obtained: (1) The relationship between the electric and magnetic responses in Dirac electron systems was clarified. (2) We developed a theory of nuclear magnetic relaxation due to orbital currents in Weyl fermion systems and clarified the effect of disorder on it. (3) The large orbital diamagnetisms of molecular solids (BETS)213 and HMTSF-TCNQ were quantitatively evaluated and found to be in good agreement with experimental results. (4) The transport and thermoelectric properties of various Dirac-type materials were theoretically predicted.

研究分野：物性理論

キーワード：ディラック電子系 ワイルフェルミオン系 量子電磁力学 軌道磁性 核磁気緩和 ノーダルライン半金属

1. 研究開始当初の背景

(1) ディラック電子系物質の電子の運動は、電子質量 m 、光速 c の代わりに有効質量 m^* と速度 c^* をもつディラック方程式によって記述される。そのため、ディラック電子系物質と量子電磁力学 (QED) との間には非常によく対応がある。ただしディラック電子系物質の質量ギャップ Δ は 10 meV 程度であり、QED のそれの約 1 億分の 1 である。表 1 に代表的なディラック電子系物質であるビスマスおよび分子性固体 α -(BETS)₂I₃ と QED との対応を示す。一番下の行に示した比誘電率 ϵ/ϵ_0 は電荷の繰り込み因子 Z_3 の逆数と等価であり、ビスマスと α -(BETS)₂I₃ の Δ 依存性の違いは電子系の次元の違いから生じる。ここで後者の α -(BETS)₂I₃ は、研究開始当初はディラック電子系物質として認識されておらず、以下で述べるように本研究によって初めてディラック電子系と同一とされた物質である。前者のビスマスは歴史上最初のディラック電子系物質であり、その大きな反磁性はバンド間磁場効果によって説明されていた。研究代表者はさらに、(i) QED における $1/Z_3$ の発散 (紫外発散) と対応してビスマスは大きな誘電率を示すこと、(ii) QED における電気と磁気の対称性 (電磁双対性) と対応してビスマスの動的誘電率と動的磁化率の間には単純な比例関係があることを明らかにしていた。しかし、ビスマス以外のディラック電子系物質、たとえば、強い異方性もち (電磁場は三次元であるが) 電子系は二次元とみなされるディラック電子系物質での電磁双対性に対応した関係は明らかではなかった。

表 1 ディラック電子系物質と QED の対応表

	Bismuth	α -(BETS) ₂ I ₃	QED
$\Delta = m^* c^{*2}$	$\sim 10^{-2}$ eV	$\sim 10^{-2}$ eV	$\sim 10^6$ eV
c^*/c	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-4}$	1
m^*/m	$\sim 10^{-2}$	~ 0.3	1
$\epsilon/\epsilon_0 = Z_3^{-1}$	$\propto -\ln \Delta$	$\propto \Delta^0$	∞

(2) ディラック電子系物質の中でも、ヒ素化タンタル (TaAs) やリン化タンタル (TaP) のように、質量ギャップがゼロで 2 重縮退が解けている特別な場合はワイルフェルミオン系物質と呼ばれる。研究開始当初は、新しいディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質の探索が活発に行われていた状況であり、質量ギャップゼロの点が波数空間で線状に存在するノーダルライン半金属の理論や物質も提案されていた。本研究で注目した α -(BETS)₂I₃ や HMTSF-TCNQ は古くから知られていた物質であるが、これらの物質がディラック電子系やノーダルライン半金属であるとは認識されていなかった。

2. 研究の目的

ディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質と QED との対応関係を用いて、これらの物質に特有な動的応答を明らかにし、その結果を用いて軌道磁化率や核磁気緩和などの定量的な理論予測を行うことを研究の目的とした。ただし、QED とは異なり現実のディラック・ワイル物質には必ず異方性がある。とくに、分子性固体 α -(BETS)₂I₃ や HMTSF-TCNQ では強い異方性をもつことが本質的なので、それを考慮して理論を構築する。また、ディラック電子系関連物質の多様性を理解する上で輸送現象や熱電効果も重要であるので、それらについても理論予測を行った。具体的には以下の 4 つの解明を目的とした。

- ディラック電子系物質における電気応答と磁気応答の間に成立する関係 (電磁双対性)
- 軌道電流による核磁気緩和率の理論と乱れの効果
- 分子性固体 α -(BETS)₂I₃ と HMTSF-TCNQ の大きな軌道反磁性
- ディラック電子系関連物質の輸送特性と熱電特性

3. 研究の方法

(1) 物性理論における標準的な手法に従ってディラック電子系・ワイルフェルミオン系の動的応答関数を計算すると、ゲージ不変性が破れてしまうという困難があることが知られていた。一方、QED は電磁双対性をもつゲージ不変な場の理論であり、そのような困難をもたない。本研究では、QED と対応したゲージ不変な場の理論 (物質中の QED) を研究の方法とした。

(2) 分子性固体 α -(BETS)₂I₃ と HMTSF-TCNQ の研究に関しては、第一原理計算や有効模型を用いた電子状態や磁化率の解析を行うとともに、理論と実験の相互フィードバックを行いながら研究を進めるといった方法をとった。

4. 研究成果

(1) ディラック電子系物質における電磁双対性

化学ポテンシャル μ が伝導帯あるいは価電子帯にある金属的な場合の三次元(3D)ディラック電子系について、任意の波数・振動数に対する動的誘電率と動的磁化率の厳密な表式を得た。この表式の質量ゼロの極限から、ワイルフェルミオン系の動的誘電率と動的磁化率の厳密な表式も得た。得られた動的誘電率のゼロ点からプラズマモードの分散関係を明らかにするとともに、プラズマ振動数から金属的な場合の誘電的性質を特徴づける背景誘電率と呼ばれる量を導出した。さらに、ディラック電子系・ワイルフェルミオン系の背景誘電率の μ 依存性を求め、背景誘電率はバンド間磁場効果の結果として知られる大きな反磁性の増大にともなって増大していくことを見出した。このような大きな反磁性と連動した背景誘電率の増大は、QEDにおける電磁双対性と対応しており、QEDの真空に対応する絶縁体の場合だけでなく、金属的な場合にも定性的に成り立つことを見出した。

表1に示したように、3Dディラック電子系ではQEDの紫外発散と対応して誘電率 ϵ が増大する。一方、二次元(2D)ディラック電子系では ϵ は増大せず、その代わりにコンダクタンスが量子化される。このように次元によってディラック電子系の電氣的性質は大きく異なるにもかかわらず、ディラック電子系の電氣的性質と磁氣的性質の間には、QEDのローレンツ共変性に対応する次元によらない普遍的な関係があることを見出した。とくに軌道磁化率 χ_{orb} と振動数 ω に依存する動的電気伝導度 $\sigma(\omega)$ の電磁双対性を表す関係式

$$\chi_{\text{orb}} = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{c^*}{c}\right)^2 \int_{2\Delta/\hbar}^{\infty} \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega^2} d\omega$$

を導いた。 $\sigma(\omega) \geq 0$ であり右辺にマイナス符号があるので、 χ_{orb} は必ず負(反磁性)になる。また、次元解析より D 次元で $\sigma(\omega) \propto \omega^{D-2}$ であるので、 $\Delta \rightarrow 0$ で $\chi_{\text{orb}} \rightarrow -\infty$ となる。このようにディラック電子系の大きな軌道反磁性は動的電気伝導度の振動数依存性と関係づけられることがわかった。結果を表2にまとめる(d はバルク2Dディラック電子系物質の伝導面間の距離)。

表2 ディラック電子系の軌道磁化率、誘電率、動的電気伝導度

	χ_{orb}	ϵ	$\sigma(\omega \gg 2\Delta/\hbar)$
3D	$\propto \ln \Delta$	$\propto -\ln \Delta$	$\sim (e^2/h)\omega/c^*$
2D	$\propto -1/\Delta$	$\propto \Delta^0$	$\sim e^2/hd$

(2) 軌道電流による核磁気緩和率の理論と乱れの効果

核磁気共鳴におけるスピン-格子緩和時間 T_1 は原子核を取り囲む電子系の動的性質を検知する重要な量である。一般に、核磁気緩和率は $1/T_1 T = (1/T_1 T)_{\text{spin}} + (1/T_1 T)_{\text{orb}} + (1/T_1 T)_{\text{Q}}$ のようにスピン(spin)、軌道(orb)、電気四重極(Q)からの寄与に分離することができる。多くの金属ではスピンからの寄与 $(1/T_1 T)_{\text{spin}}$ が支配的であるのに対して、ディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質ではその大きな軌道反磁性から期待されるように軌道電流からの寄与 $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ が支配的になる。本研究では、(1)の研究で得られた動的誘電率と動的磁化率の厳密な表式を用いて、ディラック電子系・ワイルフェルミオン系の $(1/T_1 T)_{\text{Q}}$ と $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ の厳密な表式を導出した。その結果、ディラック電子系・ワイルフェルミオン系物質の $(1/T_1 T)_{\text{Q}}$ は $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ と比べて無視できるほど小さいことがわかった。また、ワイルフェルミオン系の $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ は、表3に示すような特徴的な温度 T 、化学ポテンシャル μ 依存性を示すことがわかった。ここで $E = \max[k_B T, \mu]$ であり、 ω_0 は原子核のラーモア振動数である。表3には $(1/T_1 T)_{\text{spin}}$ の E 依存性も示してあり、低温では次元によらず、スピンよりも軌道電流からの寄与の方が支配的になることがわかる。

表3 ワイルフェルミオン系の核磁気緩和率の温度 T 、化学ポテンシャル μ 依存性 ($E = \max[k_B T, \mu]$)

	$(1/T_1 T)_{\text{spin}}$	$(1/T_1 T)_{\text{orb}}$
3D	E^4	$E^2 \ln \frac{E}{\hbar\omega_0}$
2D	E^2	$E \ln \frac{E}{\hbar\omega_0}$

以上は乱れないクリーンな系の結果であるが、三次元では不純物や欠陥などによる乱れの強さ W がある非ゼロの値 W_c のときワイルノードが消失し、動的臨界指数 z と ν に支配される量子臨界点(QCP)が現れることが知られている(図1参照)。そこで、この乱れによって誘起されるQCP近傍での軌道電流による核磁気緩和率 $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ を自己無撞着ボロン近似(SCBA)、自己無撞着T行列近似(SCTA)、スケーリング仮説を用いて調べた。その結果、乱れないクリーンなワイルフェルミオン系の $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ は三次元の場合、(弱い対数依存性を無視すると)温度の二乗に比例するのに対して、図1の T - W 相図に示した領域Iでは動的臨界指数 z に支配されるべき依存性を示し、SCBAとSCTAの範囲では(クリーンな二次系の場合と同様)温度に比例することを明らかにした。図1のカラーコードの数値はSCBAによって評価した $(1/T_1 T)_{\text{orb}}$ の $\mu = 0$ での温度

に関するベキ指数である。図1の領域I、II、IIIにおける $(1/T_1T)_{\text{orb}}$ の $E = \max[k_B T, \mu]$ 依存性を表4にまとめた。 $\tau(E)$ は不純物散乱によるワイルフェルミオンの緩和時間であり、エネルギー依存性をもつ。また、SCBAとSCTAの結果はスケーリング仮説の $z = 2$ 、 $\nu = 1$ に対応する。さらに領域IIで不純物濃度は低い但不純物ポテンシャルの強さが大きい場合、すなわちSCTAが有効である場合は化学ポテンシャルの温度依存性が重要となり、降温とともに $(1/T_1T)_{\text{orb}}$ が一定値(コリン八則)から上方へ大きくずれていくことを示した。これはワイルフェルミオン系物質TaPの核磁気共鳴の実験で観測されている $1/T_1T$ の異常と矛盾しないことがわかった。

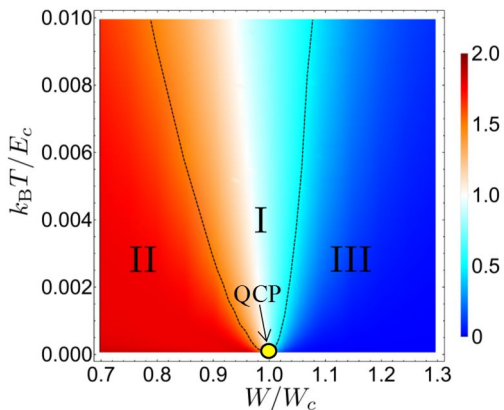


図1 乱れたワイルフェルミオン系(3D)の温度(T) - 乱れ(W)相図

表4 乱れたワイルフェルミオン系(3D)の領域I、II、IIIにおける軌道電流による核磁気緩和率 $(1/T_1T)_{\text{orb}}$ の $E = \max[k_B T, \mu]$ 依存性

	SCBA & SCTA	Scaling ansatz
I	$E \ln \frac{E\tau(E)}{h}$	$E^{\frac{2}{z}}$
II	$E^2 \ln \frac{E\tau(E)}{h}$	E^2
III	$(W - W_c)^2$	$(W - W_c)^{2\nu}$

(3) 分子性固体 α -(BETS)₂I₃とHMTSF-TCNQの大きな軌道反磁性

実験家と協力し、 α -(BETS)₂I₃が常圧バルクの二次元ディラック電子系物質であること、HMTSF-TCNQが非常に異方性の強いディラック電子系関連物質であるノーダルライン半金属であることを同定した。これらの物質はどちらも、ディラック電子系特有の性質である大きな軌道反磁性を示す(図2、図3参照)。それぞれについて以下に記す。

(i) α -(BETS)₂I₃

50 K程度の質量ギャップ Δ をもつ常圧バルクの二次元ディラック電子系であることを示すとともに、磁化率、電気伝導度、スピン-格子緩和時間などの実験データ全てを包括する基礎理論として物質中のQEDを提案し、この理論が予言する軌道磁化率と電気伝導度との電磁双対性が確かに成り立っていることを明らかにした。とくに単結晶試料の磁化測定を行い、伝導面に垂直な方向と平行な方向の異方性を利用することにより、スピン磁化率 χ_{spin} と軌道磁化率 χ_{orb} を正確に分離した。そのため、 χ_{spin} と χ_{orb} のそれぞれについて理論と実験の定量的な比較が可能となった。結果を図2に示す。シンボルが実験値、実線が理論値であり、磁化率の単位 χ_0 は非相対論的二次元電子ガスのスピン磁化率である。質量ギャップ Δ より高温($T > 50$ K)の広い温度領域で理論と実験が非常によく一致していることを見出した。

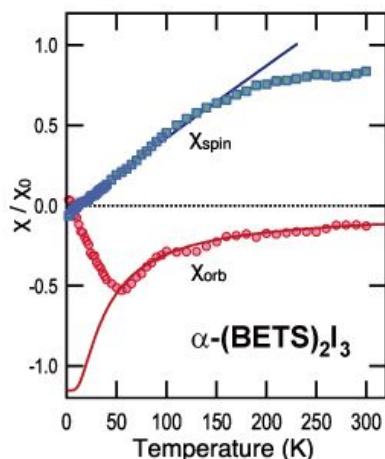


図2 ディラック電子系物質 α -(BETS)₂I₃(単結晶)のスピン磁化率と軌道磁化率

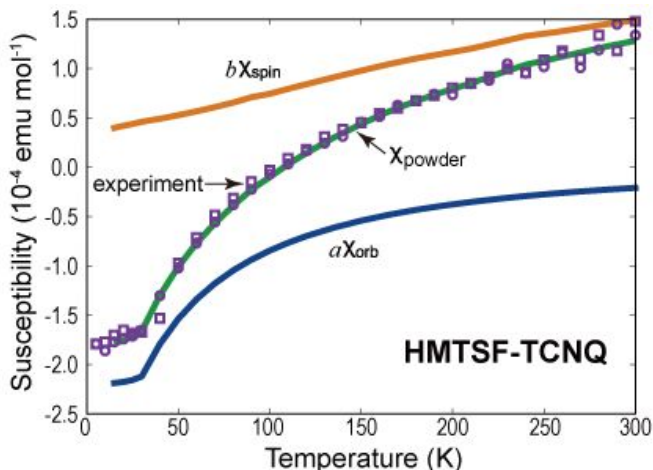


図3 ノーダルライン半金属HMTSF-TCNQ(粉末)の磁化率

(ii) HMTSF-TCNQ

第一原理計算により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を示すとともに、低エネルギー電子状態を記述するタイトバインディング模型を作り、スピン-格子緩和時間 T_1 と磁化率を評価した。とくにスピン磁化率 χ_{spin} と軌道磁化率 χ_{orb} の理論値を経験的なパラメーターを一切用いずに評価することに成功し、粉末試料の磁化率 χ_{powder} の実験値と比較した。結果を図3に示す。シンボルは実験値、実線は理論値である。一般に $\chi_{\text{powder}} = a\chi_{\text{orb}} + b\chi_{\text{spin}}$ のように表すことができるが、 $a = 0.4$ 、 $b = 2.1$ とすると理論値と実験値は極めて高い精度で一致することを見出した。また、およそ 30 K 以下では電荷密度波が生じることが実験から知られていたが、この時の磁化率の温度依存性は電荷密度波形成に伴うノーダルラインの形状変化(開いたノーダルラインから閉じたノーダルラインへと変化)が重要な役割をしていることがわかった。

(4) ディラック電子系関連物質の輸送特性と熱電特性

ディラック電子系関連物質の多様性を理解するために、ディラック電子系、ワイルフェルミオン系、ノーダルライン半金属の輸送現象や熱電効果の理論研究を行った。それぞれについて以下に記す。

(i) ディラック電子系

常圧バルクの二次元ディラック電子系 $-(\text{BETS})_2\text{I}_3$ の質量ギャップの起源はスピン軌道相互作用であり、トポロジカルな量であるスピンに依存したベリー曲率が生じることが指摘されている。このような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を示し、 $-(\text{BETS})_2\text{I}_3$ 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となる可能性を指摘した。

(ii) ワイルフェルミオン系

ワイルフェルミオン系あるいは質量ゼロのディラック電子系はディラックコーンの傾き (tilting) に応じて、(I) 楕円状のフェルミ面を持つ系、(II) 双曲線状のフェルミ面を持つ系、(III) それらの「臨界点」(“QCP”) である系に区分される(図4参照)。このうち臨界点近傍のタイプ I に属する系が最も大きな熱電効果を示すことを見出した。

タイプ II ワイル半金属 WP_2 ではウィーデマン・フランツ則の破れが観測されており、これは電子とホール間のクーロン引力に起因する非弾性散乱によって説明されている。そのようなウィーデマン・フランツ則が破れた半金属における熱電効果を研究した。その結果、電子数とホール数が異なる非補償半金属では熱電性能が著しく向上する可能性があることを見出した。

(iii) ノーダルライン半金属

ノーダルライン半金属の有効模型を用いてホール伝導率の磁場角度依存性を解析した。その結果、ホール伝導率はノーダルライン半金属特有の化学ポテンシャル依存性があるとともに、ノーダルラインの波数空間内での配置に依存して強い磁場角度依存性を示すことを明らかにした。

ノーダルライン半金属の薄膜では、図5に示したようにノーダルライン半金属に由来したドラムヘッド型のトポロジカルな表面状態が鋭い状態密度を与え、結果として、この鋭い状態密度に由来した大きなゼーベック係数が現れることを明らかにした。さらに、その表面状態が乱れに強いことを利用することでバルクの熱伝導度の寄与を大きく抑制できることを提案し、 $ZT = 10$ 程度の無次元熱電指数が実現される可能性を指摘した。

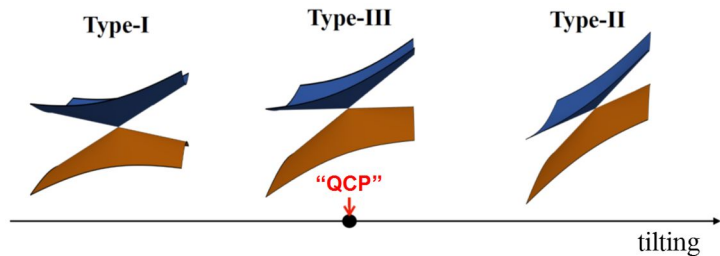


図4 タイプ I、II、III の質量ゼロのディラック電子系

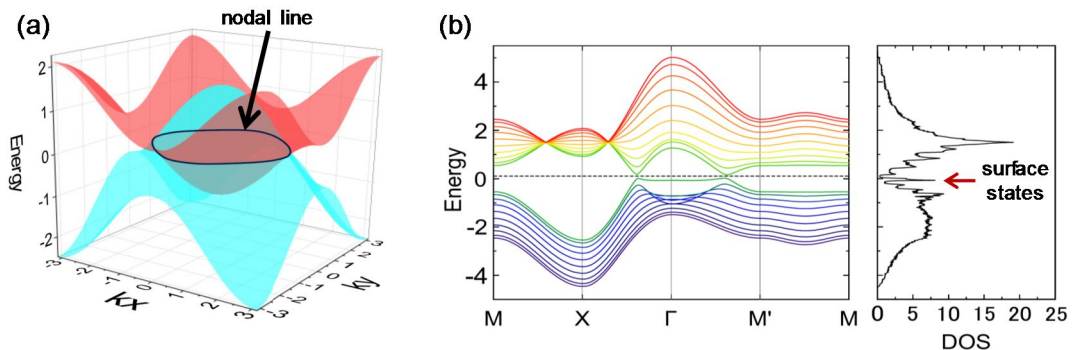


図5 ノーダルライン半金属のバルクでの電子状態(a)と薄膜でのバンド構造と状態密度(b)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahashi Keigo, Matsuura Hiroyasu, Maebashi Hideaki, Ogata Masao	4. 巻 107
2. 論文標題 Thermoelectric properties in semimetals with inelastic electron-hole scattering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115158/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.115158	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 Mizoguchi Tomonari, Matsuura Hiroyasu, Ogata Masao	4. 巻 105
2. 論文標題 Thermoelectric transport of type-I, II, and III massless Dirac fermions in a two-dimensional lattice model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205203/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.205203	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 尾崎 壮駿、立石 幾真、松浦 弘泰、小形 正男	4. 巻 77
2. 論文標題 分子性導体におけるノーダルラインとそれによる軌道帯磁率	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 751 ~ 756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.77.11_751	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 Fujiiyama S., Maebashi H., Tajima N., Tsumuraya T., Cui H-B., Ogata M., Kato R.	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 Physical Review Letters	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 -

1. 著者名 Ogata Masao, Ozaki Soshun, Matsuura Hiroyasu	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 Journal of the Physical Society of Japan	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 Hosoi Masashi, Tateishi Ikuma, Matsuura Hiroyasu, Ogata Masao	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 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085406/1-9
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 Ozaki S., Tateishi I., Matsuura H., Ogata M., Hiraki K.	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 Physical Review 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 松浦弘泰, 前橋英明, 小形正男, 福山秀敏	4. 巻 55
2. 論文標題 フォノンドラッグによるゼーベック効果-Boltzmann 理論を超えて-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 325-335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Tomoki Hirose, Hideaki Maebashi, and Masao Ogata	4. 巻 101
2. 論文標題 Nuclear spin relaxation rate near the disorder-driven quantum critical point in Weyl fermion systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155103/1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.155103	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 Hiroyasu Matsuura, Hideaki Maebashi, Masao Ogata, and Hidetoshi Fukuyama	4. 巻 88
2. 論文標題 Effect of Phonon Drag on Seebeck Coefficient Based on Linear Response Theory: Application to FeSb ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074601/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.074601	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 Hideaki Maebashi, Tomoki Hirose, Masao Ogata, and Hidetoshi Fukuyama	4. 巻 128
2. 論文標題 Nuclear magnetic relaxation and Knight shift due to orbital interaction in Dirac electron systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 138-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.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 Ikuma Tateishi and Hiroyasu Matsuura	4. 巻 87
2. 論文標題 Face Centered Cubic SnSe as a Z ₂ Trivial Dirac Nodal Line Material	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of 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 -

〔学会発表〕 計51件（うち招待講演 12件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 高橋慶伍、松浦弘泰、前橋英明、小形正男
2. 発表標題 電子ホール散乱を持つ半金属の磁場下でのHall Lorenz 比
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Takahashi, H. Matsuura, H. Maebashi, and M. Ogata
2. 発表標題 Transport in semimetals: contribution from electron-hole scattering
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎壯駿、立石幾真、松浦弘泰、是常隆、小形正男
2. 発表標題 エネルギー上下のあるノーダルライン半金属における軌道帯磁率
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura
2. 発表標題 Topological nature and anomalous spin transport properties of Dirac electrons in organic conductors
3. 学会等名 2nd Global Summit on Condensed Matter Physics (CONMAT2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Ogata, S. Ozaki, and H. Matsuura
2. 発表標題 Anomalous spin transport properties and orbital magnetic susceptibility in gapped Dirac electrons with tilting
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋慶伍、松浦弘泰、前橋英明、小形正男
2. 発表標題 半金属における熱電効果の理論的研究: 電子ホール散乱の寄与
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 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 Joint Conference: 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-24/MSS-20) (国際学会)
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 ノードルライン半金属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2021年秋季大会
4. 発表年 2021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 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021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 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021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2020年秋季大会
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)213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 前橋英明, 広沢智紀, 小形正男, 福山秀敏
2. 発表標題 質量のない擬二次元ディラック電子系の軌道電流に起因する核磁気緩和
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Viktor Konye, Hiroyasu Matsuura, Ikuma Tateishi, and Masao Ogata
2. 発表標題 Nodal Line Semimetal in a Magnetic Field
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideaki Maebashi and Masao 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 Tomoki Hirose, Hideaki Maebashi, and Masao Ogata
2. 発表標題 Nuclear spin lattice relaxation rate near the disorder-driven quantum critical point in Weyl fermion 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 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 Hiroyasu Matsuura, Hideaki Maebashi, Masao Ogata, and Hidetoshi Fukuyama
2. 発表標題 Phonon-Drag Thermoelectric Effects in FeSb ₂ Based on Linear Response Theory
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (国際学会)
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2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦弘泰, 前橋英明, 小形正男, 福山秀敏
2. 発表標題 ピスマスにおける巨大ネルンスト効果の理論的研究
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 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2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前橋英明
2. 発表標題 ディラック・ワイル・トポロジカル物質の軌道電流に起因する核磁気緩和率
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奇物性開拓」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Maebashi, Masao Ogata, and Hidetoshi 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 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Maebashi, Masao Ogata, and Hidetoshi 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" (BEC2018X) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoki Hirose, Hideaki Maebashi, and Masao Ogata
2. 発表標題 Nuclear-spin relaxation rate near the disorder-driven quantum critical point in Weyl fermion systems
3. 学会等名 International workshop "Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts" (BEC2018X) (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2018年秋季大会
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2018年秋季大会
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2018年秋季大会
4. 発表年 2018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	松浦 弘泰 (MATSUURA Hiroyasu) (40596607)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (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0件

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
---------	---------