

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：24506
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2021～2023
課題番号：21K03475
研究課題名(和文) 高圧下におけるディラック半金属/トポロジカル絶縁体のバンド構造と磁気効果

研究課題名(英文) Study of band structure and magnetic effects on Dirac semimetals and topological insulators under high pressure

研究代表者
水戸 毅 (MITO, Takeshi)
兵庫県立大学・理学研究科・教授

研究者番号：70335420
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル物質を核磁気共鳴(NMR)法で研究し、この領域を開拓する重要な成果が得られた。圧力誘起ディラック半金属候補である黒リンにおいて、ランダウ準位 $n=0$ (ゼロモード)の存在を示す磁場効果の実験的証拠を得た。圧力誘起トポロジカル近藤絶縁体(TKI)候補であるSmSについて、半導体状態での電子相関とバンド構造を定量的に議論し、2GPa超高压相での反強磁性秩序機構が遍歴描像で理解できることを示した。TKI候補であるSmB6と複数のEuワイル半金属候補物質の測定で飛躍的な成果を得た。ベイズ推論と第一原理計算の先駆的導入により、これまで到達できなかった高い信頼性と深い議論を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

- は研究成果欄と対応： NMR測定によるゼロモード観測が、ディラック電子の存否とその次元性の判断に有効であることを示した。長年不明であった半導体状態におけるクーロン斥力、バンド幅やギャップ等について初めて微視的かつ定量的な議論を行った。局在描像による磁気秩序が多い希土類化合物において、SmSはそれに適合しないことを示す実験的証拠を得た。SmB6の表面由来の特性や、EuMg₂Bi₂、EuP₃等の磁気秩序構造や内場の磁場変化を測定する技術に躍進があった。計算による状態密度や電場勾配と実験データとの比較、ベイズ推論によるデータの成分分離や実験の効率化に多大な可能性があることを示した。

研究成果の概要(英文)：Topological materials have been studied by a nuclear magnetic resonance (NMR) technique, and important results have been obtained that open up this area of research. (1) We obtained experimental evidence of magnetic field effects in black phosphorus, a candidate material for a pressure-induced Dirac semimetal, indicating the existence of the Landau level $n=0$ (zero mode). (2) In the pressure-induced topological Kondo insulator (TKI) candidate material SmS, we quantitatively discussed electronic correlations and band structure in the semiconducting state and showed that the mechanism of antiferromagnetic ordering in a high-pressure phase above 2 GPa is understood within the itinerant picture. (3) We have made significant progress in the measurements of TKI candidate SmB6 and several Eu Weyl semimetallic candidates. (iv) Pioneering introduction of Bayesian inference and first-principles calculations enabled high reliability and detailed discussion previously unattainable.

研究分野：実験固体物理学

キーワード：ディラック半金属 トポロジカル近藤絶縁体 核磁気共鳴 高圧 ベイズ推論 第一原理計算 ワイル半金属

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

金属中の伝導電子は全て同一と考えられがちだが、実際は見かけの質量が通常金属の1000倍にも達するもの(重い電子系)や、逆にまるで質量が無いかの如く振る舞うものがある。後者はディラック電子と呼ばれ、物質中を高速で移動することから、次世代の低消費電力型高速デバイス等への発展が期待される。ディラック電子物質は、基礎科学的興味と応用のポテンシャルの高さから精力的に研究がなされている。ディラック電子はグラフェンの他、2次元層状物質の有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_2$ などにおいて現れる。しかし、その発生には

- ・エネルギーと電子の波動性を示す波数の間の線形バンド分散
- ・その分散の先端(ディラック点)がフェルミ準位近傍にあること

が要件となり、自然状態のままこれらを満たす物質は少ない。そのため、物質を圧縮することでバンド構造をチューニングできる圧力効果が大変有効であるが、問題は高圧下においてそのバンド分散を観測できる実験手段が殆どないことである。

また、ディラック電子が出現する別の物質系にトポロジカル絶縁体(以降 TI と略記)がある。特に、申請者がこれまで研究を続けてきた近藤半導体が、電子間の強い相互作用の結果として TI となる強相関 TI 物質であるとして注目されている。しかし、TI においてディラック電子が出現するのは試料表面であり、その観測法には必ず制限が生じる。また、角度分解光電子分光 (ARPES) 等の表面敏感な実験手法は高圧下測定に不向きであり、高圧下でバンド分散を観測できないという同じ問題が生じる。

2. 研究の目的

[学術的問い]

- 高圧下においても電子バンド構造を観測できないか。またそれは、フェルミ準位近傍の微細なバンド構造を敏感に検出するために、低エネルギーな特性を持つプローブであることが理想である。・・・[研究の第一段階]
- TI における表面伝導(ディラック電子)の寄与を高圧下でも検出できる新たな実験手法はないか。・・・[研究の第二段階]

これらを解決する新たな実験手法を確立し、ディラック電子研究を大きく推進させる。

[目的]

本研究では、低エネルギープローブであり高圧下測定も可能な核磁気共鳴(NMR)測定に、第一原理計算と特異なランダウ準位に基づく解析と、その他独自技術を組み合わせ、ディラック電子が生じるバンド構造とそれが引き起こす現象を精査する。

3. 研究の方法

ディラック電子(或いは TI)研究において重要な次の3物質を対象とし、それぞれに重要な位置づけをする。NMR に高圧技術やその他独自技術を組合せ、当該分野を推進する。

[黒リン] ...圧力変化によって通常半導体から半金属状態に転移し、ディラック状態形成の様子をつぶさに追跡できる理想的な3次元ディラック電子物質である。しかし、伝導電子密度が少ない半導体状態では NMR 測定が難しく、その問題を克服し、本研究では NMR 測定と解析を徹底的に行い、電子バンド構造の分析精度を極めるための標準物質と位置付ける。

[SmB₆] ...代表的な強相関 TI 物質候補であり、ARPES 測定等により常圧でディラック状態形成が報告されている。本研究では、核スピン拡散(一種のスピン流)を介する表面特性伝播の機構を新たに考慮し、TI 特有の表面伝導の寄与が NMR によって如何に検出されるかを検証する標準試料と位置付ける。

[SmS] ...SmB₆と同様、'60年代より知られる典型的近藤半導体で、数少ない強相関 TI 物質の候補。通常の SmS は NMR に適さず、同位体 ³³S 濃縮試料を用いることで NMR 測定を可能にする。本物質最大の特徴は、2つの圧力スイッチング効果、つまり 0.6GPa の高圧下で非 TI - TI 転移 (Sm 価数転移)、2GPa で非磁性 - 磁性転移を示すことで、その前後を比較することで効果的に TI 特性、磁気効果抽出することができる。

実験手法上の改良だけでなく、データ解析にも独自性を追求する。NMR 測定による核スピン格子緩和時間とナイトシフトはフェルミ準位近傍の電子状態密度に密接に関係する量だが、過去の殆どの NMR 研究では非常に単純化された状態密度モデルに基づき解析されていた。本研究では第一原理計算による現実的な状態密度に基づく解析手法を導入し、バンド構造解析の精度を高める。

表面領域の観測が重要な TI 物質研究を可能にするために、強相関 TI 物質を中心に表面特性を検出する NMR 実験手法を開発する。具体的には、NMR 測定では信号強度は観測する試料領域の体積に比例するため、表面領域の体積分率を強調することが問題解決の糸口となる。つまり、試料のナノサイズ化（薄膜やナノ粒子など）の導入を試みる。

4. 研究成果

- 1) 黒リンの半金属状態(1.63GPa)において、磁場増大に伴ってフェルミエネルギー E_F 近傍の状態密度が異常に増強される事実を見出した。核スピン - 格子緩和率 $1/T_1$ を温度 T で除した $1/T_1T$ は、 E_F 近傍の状態密度の二乗に比例する物理量である。我々は、 ^{31}P -NMR 測定によって得られた 4.2K での $1/T_1T$ が磁場増大に伴って増大する極めて珍しい現象を見出したが、これが 3 次元ディラック電子系に特有のランダウ準位 $n=0$ (ゼロモード) に相当する状態密度の磁場依存性を考慮することで説明されることが分かった。実際、 $1/T_1T$ の増大は理論的に予測される磁場の二乗に近い。また、 $1/T_1T$ の温度依存性がランダウ準位 $n=0$ と $n=1$ を考慮することで良く説明されることも、上記の理解が妥当であることを強く支持する。本結果は、NMR 測定によってゼロモードを観測しその磁場依存性を調べることが、ディラックフェルミオンの存否とその次元性の新たな判断基準となることを提言するものとなった。本研究では、長谷川氏(兵庫県立大院理)から理論的サポートを受け、主に Fujii *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 076401 (2023)にて結果を報告した。また、半導体 - 半金属転移圧力により近い 1.40GPa においても 1.63GPa の結果と同様の磁場、温度依存性が観測されたが、定量的な差があり、その差はディラックフェルミオンのフェルミ速度の違いとして理解可能であることを示した。
- 2) ^{33}S 同位体で 98%まで濃縮した SmS 粉末試料を用いて、1.5 - 4.2GPa の高圧領域で ^{33}S -NMR を行った。測定試料は芳賀氏(原研先端研)の提供により、3GPa 以上の高圧下実験は北川氏(東大院理)との共同研究である。低温下で半導体基底状態を示す 1.5GPa の圧力下において、実験で得られた $1/T_1$ の温度依存性を周期アンダーソン(PAM)模型に基づいた計算との比較を行い、バンド幅、ギャップの大きさ、相関エネルギー、混成エネルギーについて半定量的な知見を得ることに成功した。また、同様に強相関 TI 物質候補物質である SmB_6 (常圧下)の実験結果についても同じ解析法で比較を行うことで、SmS(1.5GPa)は SmB_6 よりも小さいバンド幅、ギャップをもつことが分かった。PAM 模型に基づく計算は武藤氏(島根大総理工)との共同研究である。低温下で磁気秩序状態を基底にもつ 3.2GPa 以上の高圧下データからは、磁気秩序機構が弱い遍歴反強磁性体の範疇で理解できることが結論された。具体的には、局在電子系の磁気秩序温度以上で通常見られる磁化率の Curie 則が全く観測されず、また 4.2GPa の高圧域まで、100K 以上の高温状態は 1.5GPa の弱相関状態と大きく変わらないことが示された。これらの結果は、主に Yoshida *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 013702 (2024)にて報告した。
- 3) SmB_6 の単結晶試料について磁場印加方向を精密に制御した ^{11}B -NMR 測定を行い、約 10K 以下では混成の発達だけでは理解できない現象が観測され、低温下では新たな電子状態が出現している可能性を示唆した (Nishikawa *et al.*, Interactions **245**(1) 17にて報告)。単結晶試料は伊賀氏(茨城大院理工)の提供による。また、同試料の ^{11}B -NMR と ^{10}B -NMR 測定結果の比較から、低温で現れる異常な低エネルギー揺らぎの増大は、核スピン拡散(核スピン流)の寄与であることを明らかにした。この核スピン拡散は強磁場中でも観測されることから、試料中に含まれる磁性不純物というよりは本質的な表面特性に起因している可能性が高い。さらに、表面領域の信号を強調できる薄膜試料の NMR 測定に初めて成功した。 ^{11}B -NMR の予備測定段階では、表面由来の核スピン拡散機構に合致する結果が得られている。エピタキシャル結晶性による薄膜試料は宍戸氏(大阪公立大院工)の提供による。薄膜試料の NMR 測定は過去に報告例が殆どなく、本成果は将来の新しい研究領域を開拓するものである。
- 4) 複数の反強磁性 Eu 化合物の Eu-NMR 測定を行った。これらの内、 α - EuP_3 と EuMg_2Bi_2 は反強磁性状態に磁場を印加することによって強制強磁性状態が誘起され、バンド分裂によってワイル点が E_F 近傍に出現する、磁場印加によって制御可能な磁性ワイル半金属であると期待される。加えて、 EuZn_2P_2 は磁場の印加によって大きな負の磁気抵抗を示し、 Eu_2BiS_4 は一次元構造を有する物質であるが、同様に比較的小さな磁場印加で強制強磁性状態に移行する。一般に、磁気秩序状態で自発的な超微細磁場が存在するとき、外部磁場を印加しなくともゼロ磁場 NMR が可能であるが、Eu の大きな磁気モーメントが揺らぐ Eu 磁気秩序物質の Eu-NMR 測定は、緩和時間が非常に短く信号観測が容易ではない。本研究では、反強磁性状態にさらに磁場を印加することで磁気揺らが抑えられることに着目し、小さな単結晶試料(Eu_2BiS_4 以外)でも信号観測を容易にした。さらに、共鳴周波数の外部磁場依存性を測定することで、強制強磁性状態を Eu-NMR でも確認し、Eu 超微細磁場の磁場依存性を実測するとともにそれが生じる機構が内殻偏極によることを明らかにした。
- 5) 第一原理計算を研究グループ内で自在に行える体制を構築し、特に(1)において $1/T_1$ の実験データが計算による状態密度を用いて再現できること、つまり計算結果の信ぴょう性の高さを確認し、バンド構造の詳細について議論することを可能にした。また、第一原理計算によって得られた電荷分布に基づいて計算される観測核位置での電場勾配を、核四重極相互作用の実験データ解析に有効利用した。

強相関電子系の NMR データ解析に先駆的にベイズ推論を導入し、特に(2)において、多成分を含む実験データの成分分離と成分数の決定を信頼性高く実行可能にした。また、ベイズ推論の導入によって、従来に比して大幅に少ないデータ数であっても NMR パラメータが精度よく決定できることを示すなど、ベイズ推論と NMR 測定の組合せが新しい研究手法を開拓する可能性を示した。ベイズ推論の導入については、岡田氏(東京大院新領域)や水牧氏(熊本大理)等から支援を受けた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 水戸 毅, 吉田 章吾	4. 巻 32
2. 論文標題 Sm化合物における特異な非磁性 - 磁性転移: SmSの33S-NMR研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 高圧力の科学と技術	6. 最初と最後の頁 3-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.32.3	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 Takeshi Mito, Hiroki Mori, Keisuke Miyamoto, Taichi Tanaka, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Fumitoshi Iga, and Hisatomo Harima	4. 巻 92
2. 論文標題 Symmetry Analysis of Zero-Field Antiferroquadrupole Order in CeB6: Extremely Low-Frequency 11B-NQR Study	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 034702-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.034702	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 Takuto Fujii, Yusuke Nakai, Michihiro Hirata, Yasumasa Hasegawa, Yuichi Akahama, Koichi Ueda, and Takeshi Mito	4. 巻 130
2. 論文標題 Giant Density of States Enhancement Driven by a Zero-Mode Landau Level in Semimetallic Black Phosphorus under Pressure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 076401-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.076401	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 Hajime Ueda, Shun Katakami, Shogo Yoshida, Takehide Koyama, Yusuke Nakai, Takeshi Mito, Masaichiro Mizumaki, and Masato Okada,	4. 巻 92
2. 論文標題 Bayesian Approach to T1 Analysis in NMR Spectroscopy with Applications to Solid State Physics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054002-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.054002	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 Yusuke Nakai, Takuto Fujii, Yusuke Koshita, Yuichi Akahama, Koichi Ueda, and Takeshi Mito	4. 巻 38
2. 論文標題 Anisotropy of Electronic States in Single Crystalline Black Phosphorus Studied by 31P NMR	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011074-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.38.011074	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 Shogo Yoshida, Kentaro Kitagawa, Takehide Koyama, Haruhiko Yamada, Yoshinori Haga, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, and Takeshi Mito	4. 巻 38
2. 論文標題 Nonmagnetic-magnetic Transition in SmS Studied by 33S-NMR under High Pressure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011093-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.38.011093	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 Takeshi Mito, Taiki Nakayama, Keisuke Miyamoto, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Slavomir Gabani, Gabriel Pristas, Karol Flachbart, Konral Siemensmeyer, and Natalia Shitsevalova	4. 巻 38
2. 論文標題 NMR Study on the Shastry-Sutherland Magnet TmB4	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011109-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.38.011109	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 S. Yoshida, T. Koyama, H. Yamada, Y. Nakai, K. Ueda, T. Mito, K. Kitagawa, and Y. Haga	4. 巻 103
2. 論文標題 Nonmagnetic-magnetic transition and magnetically ordered structure in SmS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physcal Review B	6. 最初と最後の頁 155153-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.155153	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 T. Fujii, K. Iwamoto, Y. Nakai, T. Shiratsu, H. Yao, K. Ueda, and T. Mito	4. 巻 105
2. 論文標題 NMR evidence for energy gap opening in thiol-capped platinum nanoparticles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physcal Review B	6. 最初と最後の頁 L121401-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.L121401	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. Ueda, S. Katakami, M. Okada, S. Yoshida, Y. Nakai, T. Mito, M. Mizumaki	4. 巻 357
2. 論文標題 Efficient NMR measurement and data analysis supported by the Bayesian inference: The case of the heavy fermion compound YbCo ₂ Zn ₂₀	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Magnetic Resonance	6. 最初と最後の頁 107585-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmr.2023.107585	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 Shogo Yoshida, Hajime Ueda, Tetsuya Mutou, Shun Katakami, Masato Okada, Yuichi Yokoyama, Masaichiro Mizumaki, Naoka Hiraoka, Kentaro Kitagawa, Yoshinori Haga, Takuto Fujii, Yusuke Nakai, Takeshi Mito	4. 巻 93
2. 論文標題 Unique Band Structure of Pressure Induced Semiconducting State in SmS Characterized by 33S-Nuclear Magnetic Resonance Measurements	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 013702-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.93.013702	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 Nishikawa Tomoki, Fujii Takuto, Nakai Yusuke, Mito Takeshi, Iga Fumitoshi	4. 巻 245(1)
2. 論文標題 Angle-controlled 11B-NMR studies of Kondo insulator SmB ₆	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Interactions	6. 最初と最後の頁 17-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-024-01858-5	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 Shota Nakanishi, Yusuke Nakai, Yosuke Goto, Yoshikazu Mizuguchi, Takuto Fujii, Takeshi Mito	4. 巻 93
2. 論文標題 Site-Selective NMR/NQR Study on Layered Tin Pnictide Superconductor NaSn ₂ Pn ₂ (Pn = P and As)	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 023703-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.023703	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 Yusuke Nakai, Takuto Fujii, Yu Yamane, Hijiri Mizutani, Akira Yamaguchi, Akihiko Sumiyama, Takeshi Mito	4. 巻 245(1)
2. 論文標題 71Ga NMR study on hexagonal La ₃ FeGa ₅ S ₇ with a chiral crystal structure	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Interactions	6. 最初と最後の頁 45-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-024-01891-4	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33件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yusuke Nakai, Takuto Fujii, Kenta Fujiwara, Michihiro Hirata, Yasumasa Hasegawa, Yuichi Akahama, Koichi Ueda, Takeshi Mito
2. 発表標題 High-field NMR study of black phosphorous under hydrostatic pressure
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shogo Yoshida, Kentaro Kitagawa, Takehide Koyama, Haruhiko Yamada, Yoshinori Haga, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Takeshi Mito
2. 発表標題 Systematic NMR Study of Intermediate Valence Compound SmS
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi Mito, Taiki Nakayama, Keisuke Miyamoto, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Slavomir Gabani, Gabriel Pristas, Karol Flachbart, Konral Siemensmeyer, Natalia Shitsevalova
2. 発表標題 NMR study on the Shastry-Sutherland Magnet TmB4
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田章吾, 北川健太郎, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 芳賀芳範
2. 発表標題 金色相SmSの低温, 高圧下で現れるギャップ状態と磁気秩序状態の ³³ S-NMR測定による研究
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 水谷聖, 中井祐介, 水戸毅, Md. Riad Kasem, 水口佳一
2. 発表標題 高エントロピー合金型超伝導体TrZr ₂ (Tr = 遷移金属)のNQRによる局所構造の研究
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 西川智稀, 吉田章吾, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 伊賀文俊
2. 発表標題 近藤絶縁体SmB ₆ におけるNMR緩和率の磁場角度依存性
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 横山駿, 中井祐介, 水戸毅, メイヨーアレックス浩, 高橋英史, 石渡晋太郎
2. 発表標題 トポロジカル半金属 -EuP3のNMRによる研究
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 藤原健太, 藤井拓斗, 中井祐介, 上田光一, 赤浜裕一, 水戸毅
2. 発表標題 圧力誘起半導体-半金属転移近傍におけるディラック電子系物質黒リンの31P-NMRによる研究
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 吉田章吾, 平岡奈緒香, 北川健太郎, 武藤哲也, 芳賀芳範C, 中井祐介, 水戸毅
2. 発表標題 SmS金色相における特異なギャップ状態 -高圧下における33S-NMRと帯磁率の研究-
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 水谷聖, 中井祐介, 水戸毅, Md. Riad Kasem, 水口佳一
2. 発表標題 TrZr2(Tr = 遷移金属)における高エントロピー合金化サイトのNMR/NQRから見た局所構造・電子状態の研究
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 上田朔, 片上舜, 吉田章吾, 中井祐介, 水戸毅, 水牧仁一朗, 岡田真人
2. 発表標題 核磁気共鳴法へのデータ駆動科学的手法の開発
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 中山大輝, 宮元慧介, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 他4名
2. 発表標題 シャストリーサザランド格子反強磁性体TmB ₄ が示す磁気プラトー領域近傍での磁気揺らぎの発達
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 藤井拓斗, 安岡弘志, R. K. Ranjith, M. O. Ajeesh, D. Kashinathan, M. Schmidt, 水戸毅, 他5名
2. 発表標題 超伝導を示すワイル半金属1T-MoTe ₂ の高圧下NMRによる研究
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 藤原健太, 藤井拓斗, 中井祐介, 上田光一, 赤浜裕一, 水戸毅
2. 発表標題 圧力誘起半導体-半金属転移近傍におけるディラック電子系物質黒リンの ³¹ P-NMRによる研究
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 上田光一, 中井祐介, 水戸毅, 小原孝夫
2. 発表標題 CDWと超伝導を示すLu ₅ Ir ₄ Si ₁₀ のLu NMR IV
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 吉田章吾, 遠藤宏太, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 北川健太郎, 芳賀芳範
2. 発表標題 高压下33S-NMR測定によるSmS金色相の低温ギャップ状態
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 中西祥太, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 後藤陽介, 水口佳一
2. 発表標題 75As-NQR測定によるNaSn ₂ As ₂ の低温領域における異常の観測
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 上田光一, 中井祐介, 水戸毅, 小原孝夫
2. 発表標題 CDWと超伝導を示すLu ₅ Ir ₄ Si ₁₀ のLu NMR V
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山大輝, 宮元慧介, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 他4名
2. 発表標題 シャストリーサザーランド格子反強磁性体TmB4の磁気プラトー領域近傍における11B-NMRによる研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田章吾, 北川健太郎, 山田陽彦, 小山岳秀, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 芳賀芳範
2. 発表標題 金色相SmSの低温, 高圧下で現れるギャップ状態と磁気秩序状態の33S-NMR測定による研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西祥太, 中井祐介, 上田光一, 水戸毅, 後藤陽介, 水口佳一
2. 発表標題 層状超伝導体NaSn2As2のNMR・NQR測定で見る低温領域の異常
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shogo Yoshida, Naoka Hiraoka, Kentaro Kitagawa, Tetsuya Mutou, Yoshinori Haga, Yusuke Nakai, Takeshi Mito
2. 発表標題 Anomalously weak magnetism near a pressure-induced magnetic transition in SmS
3. 学会等名 The 10th International Workshop on the Dual Nature of f-Electrons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeshi Mito, Hiroki Mori, Keisuke Miyamoto, Taichi Tanaka, Yusuke Nakai, Koichi Ueda, Fumitoshi Iga, Hisatomo Harima
2. 発表標題 A Possible New Phase in Zero-field Region in Antiferro-quadrupole Ordered Phase of CeB6
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shota Nakanishi, Yusuke Nakai, Takeshi Mito, Yosuke Goto, Yoshikazu Mizuguchi
2. 発表標題 Low-Temperature Anomalies in Novel Layered Superconductor NaSn2As2 Detected by NMR/NQR
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Nakai, Takuto Fujii, Kenta Fujiwara, Michihiro Hirata, Yasumasa Hasegawa, Takuji Nomura, Yuichi Akahama, Takeshi Mito
2. 発表標題 Unraveling the Nature of Dirac Fermions in Black Phosphorus through Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子廉, 山根悠, 藤井拓斗, 中井祐介, 山口明, 住山昭彦, 水戸毅
2. 発表標題 擬一次元Eu化合物Eu2BiS4のNMRによる研究
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田章吾, 合田翔, 平岡奈緒香, 北川健太郎, 武藤哲也, 上田朔, 片上舜, 岡田真人, 横山優一, 水牧仁一朗, 芳賀芳範, 藤井拓斗, 中井祐介, 水戸毅
2. 発表標題 SmS金色相における特異なギャップ状態
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西川智稀, 藤井拓斗, 中井祐介, 水戸毅, 伊賀文俊
2. 発表標題 近藤絶縁体SmB6単結晶試料の角度制御NMR測定
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横山駿, 藤井拓斗, 中井祐介, 水戸毅, メイヨーアレックス浩, 高橋英史, 石渡晋太郎
2. 発表標題 トポロジカル磁性半金属 -EuP3の角度分解31P-NMR測定
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nishikawa Tomoki, Fujii Takuto, Nakai Yusuke, Mito Takeshi, Iga Fumitoshi
2. 発表標題 Angle-controlled 11B-NMR studies of Kondo insulator SmB6
3. 学会等名 International Conference on Hyperfine Interactions and their Applications (HYPERFINE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakai Yusuke, Fujii Takuto, Yamane Yu, Mizutani Hijiri, Yamaguchi Akira, Sumiyama Akihiko, Mito Takeshi
2. 発表標題 69,71Ga-NMR study on the magnetism in a Hexagonal Chiral material La3FeGaS7
3. 学会等名 International Conference on Hyperfine Interactions and their Applications (HYPERFINE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西川智稀, 藤井拓斗, 中井祐介, 水戸毅, 伊賀文俊
2. 発表標題 11B-NMR測定で観測される近藤絶縁体SmB6の低温異常
3. 学会等名 日本物理学会 2024 年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 横山駿, 藤井拓斗, 中井祐介, 近藤雅起, 酒井英明, 花咲徳亮, 水戸毅
2. 発表標題 磁性ワイル半金属候補物質 EuMg2Bi2のEu-NMRによる研究
3. 学会等名 日本物理学会 2024 年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

兵庫県立大学 電磁物性学講座 https://sites.google.com/view/u-hyogo-nmr/home

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
研究協力者	中井 祐介 (Nakai Yusuke)		
研究協力者	藤井 拓斗 (Fujii Takuto)		
研究協力者	吉田 章吾 (Yoshida Shogo)		
研究協力者	北川 健太郎 (Kitagawa Kentaro)		
研究協力者	芳賀 芳範 (Haga Yoshinori)		
研究協力者	伊賀 文敏 (Iga Fumitoshi)		
研究協力者	長谷川 泰正 (Hasegawa Yasumasa)		
研究協力者	赤浜 裕一 (Akahama Yuichi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	岡田 真人 (Okada Masato)		
研究協力者	水牧 仁一朗 (Mizumaki Masaichiro)		

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			
ウクライナ	ウクライナ国立科学アカデミー			
スロバキア	スロバキア科学アカデミー			
ドイツ	マックスプランク研究所	ゲーテ大学		