

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03448

研究課題名（和文）量子振動による遍歴する $j=3/2$ フェルミオンの検出研究課題名（英文）Probing itinerant $j=3/2$ fermions with quantum oscillations

研究代表者

野原 実 (Nohara, Minoru)

広島大学・先進理工系科学研究科（先）・教授

研究者番号：70272531

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）：ハーフホイスラー合金における磁化の量子振動ド・ハース-ファン・アルフェン (dHvA) 効果を世界に先駆けて観測した。LuPtBi, YPtBi, LuPdBi, ScPdBiの単結晶を育成し、このなかのLuPtBiにおける成果である。サイクロトロン有効質量は $m^* = 0.05-0.09m_0$ であった。第一原理計算との比較から、この量子振動が小さなフェルミ面（電子ポケット）に由来することが明らかになった。さらにLuPtBiとLuPdBiにおいて超伝導を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常の金属はスピン角運動量 $s = 1/2$ を有する電子が電気伝導を担っている。ところが、LuPtBiなどのハーフホイスラー合金においては、Biの強いスピン軌道相互作用に起因して、全角運動量 $j = 3/2$ のフェルミオンが電気伝導を担うと考えられている。本研究は、この伝導する $j = 3/2$ フェルミオンの実験的検出につながる第一歩である。さらに従来の $s = 1/2$ 電子のクーパー対形成による超伝導ではなく、 $j = 3/2$ フェルミオンが対形成したエキゾチック超伝導の実現にもつながる。

研究成果の概要（英文）：We pioneered the observation of quantum oscillations, known as the de Haas-van Alphen (dHvA) effect, in half-Heusler alloys. Single crystals of LuPtBi, YPtBi, LuPdBi, and ScPdBi were grown, with the results obtained specifically in LuPtBi. The cyclotron effective mass was found to be $m^* = 0.05-0.09m_0$. Comparison with first-principles calculations revealed that these quantum oscillations originate from small Fermi surfaces (electron pockets). Furthermore, superconductivity was observed in LuPtBi and LuPdBi.

研究分野：低温物理学

キーワード： $J=3/2$ フェルミオン フェルミ面 スピン軌道相互作用 量子振動 軌道交差

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

電子はスピン角運動量 $s = 1/2$ を持つ。電子が原子核に束縛されると軌道角運動量 l を獲得する。さらにスピン軌道結合により全角運動量 j が良い量子数になる。例えば、 $l = 1$ の Bi $6p$ 原子軌道は強いスピン軌道結合により $j = 1/2$ と $3/2$ 軌道に分裂する。この電子が原子核からの束縛を離れ、結晶中を遍歴するとき、電子は $s = 1/2$ のスピンを担って遍歴するのだろうか。それとも全角運動量 j を保持したまま遍歴するのであろうか。

この状況を具現化する化合物が、ハーフホイスラー合金 REPtBi (RE は Y や Lu などの希土類元素) である。この化合物はトポロジカル半金属であり、Bi $6p, j = 3/2$ 原子軌道 (Γ_8 軌道) を起源とする $j_z = \pm 3/2$ ホールバンドと $j_z = \pm 1/2$ 電子バンドがブリルアンゾーンの Γ 点で接し、ここにフェルミ準位が位置する。 Γ 点でのバンド縮退は結晶の立方対称性により保護されている[1,2]。ここで、巨大磁気抵抗効果や非自明な表面状態が観測された。さらに $T_c = 1$ K 程度の超伝導が観測され[3-5]、 $j = 3/2$ フェルミオンのクーパ対形成が理論的に議論されていた[6]。これらの研究をさらに進めるためには、まず「伝導する $j = 3/2$ フェルミオンは存在するのか、その特徴はどこに現れるのか、実験で捉えることができるのか」という問いに答える必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、伝導する $j = 3/2$ フェルミオンの特徴が、結晶空間反転対称性の破れに起因したフェルミ面のスピン分裂に現れることを実験的に示すことである。そのために、ハーフホイスラー合金の高品質単結晶を育成し、ド・ハースファン・アルフェン (dHvA) 効果などの量子振動における「軌道交差」現象を調べることにした。

結晶に空間反転対称性があると、バンド (フェルミ面) はスピン縮退する。空間反転対称性が破れると、反対称スピン軌道相互作用によってフェルミ面がスピン分裂するが、別の対称性のため、ブリルアンゾーンの特定の場所で縮退が残る (バンドが交差する)。立方晶系におけるバルクの空間反転対称性の破れに起因した反対称スピン軌道相互作用は、今日ドレッセルハウス型スピン軌道相互作用と呼ばれている。Dresselhaus は空間反転対称性が破れた閃亜鉛鉱構造 HgTe のバンド構造を調べた[7]。ハーフホイスラー合金 YPtBi と同様、HgTe はトポロジカル半金属で、両者は同様なバンド構造を有する。反対称スピン軌道相互作用によりこれらの全てのバンドがスピン分裂するが、ブリルアンゾーンの Δ 軸 ($[100]$ 軸) 上では、分裂したバンドの全てが交差する。 Σ 軸 ($[110]$ 軸) 上では全てのバンドが交差しない。ところが Λ 軸 ($[111]$ 軸) 上では、 $j_z = \pm 1/2$ バンドは交差するが、 $j_z = \pm 3/2$ バンドは交差しない。このように、伝導する $j = 3/2$ フェルミオンの特徴は Λ 軸におけるバンド交差 (軌道交差) の有無に現れる (図 1)。このスピン分裂したフェルミ面の交差は、dHvA 効果などの量子振動に現れる「軌道交差現象」によって検出すること可能である[8]。

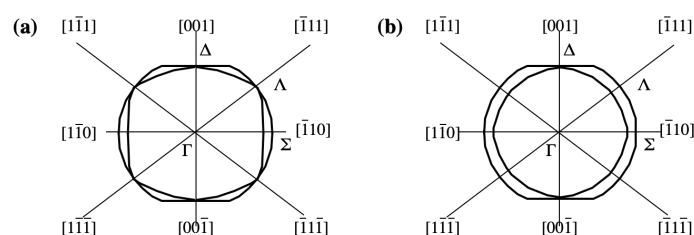


図 1. (a) $j_z = \pm 1/2$ フェルミ面および (b) $j_z = \pm 3/2$ フェルミ面の (110) 面におけるスピン分裂。両者の違いは Λ 軸におけるバンド交差 (軌道交差) の有無である。

3. 研究の方法

研究チームは、単結晶育成と量子振動の実験を行う野原実と菅原仁の 2 つの実験グループと、第一原理計算を行う播磨尚朝の理論グループから構成される。実験グループは (1) ハーフホイスラー合金 YPtBi などの純良結晶をフラックス法により育成し、(2) dHvA 効果およびシェブニコフド・ハース (SdH) 効果の量子振動実験により、フェルミ面の形状を調べる。これらの実験によりフェルミ面の極値断面積が得られるが、軌道交差に起因して複数の極値断面積が観測されると考えられる。理論グループは (3) 第一原理計算によって、YPtBi などの空間反転対称性が破れた系におけるバンドのスピン分裂と軌道交差を調べる。

4. 研究成果

(1) ハーフホイスラー合金の単結晶育成

菅原らと菅原らは、ハーフホイスラー合金 LuPtBi, YPtBi, LuPdBi, ScPdBi の単結晶試料を Bi フラックス法により得た。フェルミ準位近傍における原子軌道は、 $s = 1/2$ の Γ_6 軌道と $j = 3/2$ の Γ_8 軌道からなる。それらのエネルギーの大小関係が、 $E(\Gamma_6) > E(\Gamma_8)$ であれば、ナローギャップ半導体になる。一方で、軌道エネルギーが反転し $E(\Gamma_6) < E(\Gamma_8)$ となると、 Γ_8 軌道に属する 2 つの軌道に由来するバンド ($j_z = \pm 3/2$ ホールバンドと $j_z = \pm 1/2$ 電子バンド) がブリルアンゾーンの Γ 点で接し、これが結晶の立方対称性で保護されるため、トポロジカル半金属になる。図 2(a) に、軌道エネルギー差 $E(\Gamma_6) - E(\Gamma_8)$ を格子定数に対してプロットしたものを示す。図の上半分がナローギャップ半導体、下半分がトポロジカル半金属に対応する。本研究によって育成した結晶は、ナローギャップ半導体 (ScPdBi) とトポロジカル半金属 (LuPdBi, YPtBi, LuPtBi) の領域をカバーし、さらに軌道反転が小さい LuPdBi から大きい LuPtBi までカバーしている。これにより、ハーフホイスラー合金における電子構造を系統的に研究することが可能となった。

菅原らは LuPtBi において純良結晶を得た。図 2(b) に示すように残留抵抗比 (RRR) は約 2.6 と大きくないが、図 2(c) に示すように磁気抵抗比 (MR) が約 20 と大きい。これはキャリアの寿命が長く、また有効質量 m^* が軽いことを示している。これにより、量子振動の観測が可能となった。

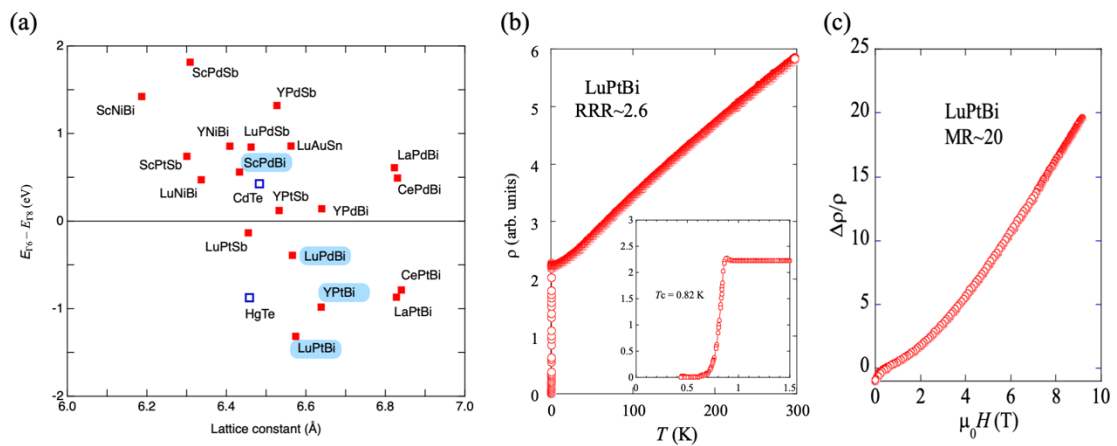


図 2.(a) ハーフホイスラー合金における軌道エネルギーの差 $E(\Gamma_6) - E(\Gamma_8)$ と格子定数[1]。本研究では ScPdBi, LuPdBi, YPtBi, LuPtBi の単結晶を得た。(b) LuPtBi 単結晶の電気抵抗率の温度依存性と (c) 磁気抵抗効果。

(2) ハーフホイスラー合金におけるド・ハース-ファン・アルフェン効果の初観測

菅原らは LuPtBi において dHvA 効果を観測し、フェルミ面の詳細を明らかにした。図 3(a) は磁場変調法およびメンブレン法による dHvA 振動とその FFT スペクトルである。図 3(b) は実験で観測された dHvA 振動数の角度依存性 (赤丸) である。dHvA 振動数が 16~43 T の小さなフェルミ面が存在し、サイクロトロン有効質量は $m^* = 0.05 \sim 0.09 m_0$ と見積もられた。播磨らは第一原理計算により図 3(c) のフェルミ面を得た。 Γ 点を中心とする 2 つのホール面と、 Γ 点から放射上に伸びた計 16 の電子面である。これらのフェルミ面から期待される dHvA 振動の角度依存性を図 3(b) に示した。これより実験で観測された dHvA 振動は第 55 および 56 バンドに由来する電子面によるものであることが明らかとなった。今後の軌道交差の観測に繋がる成果である。

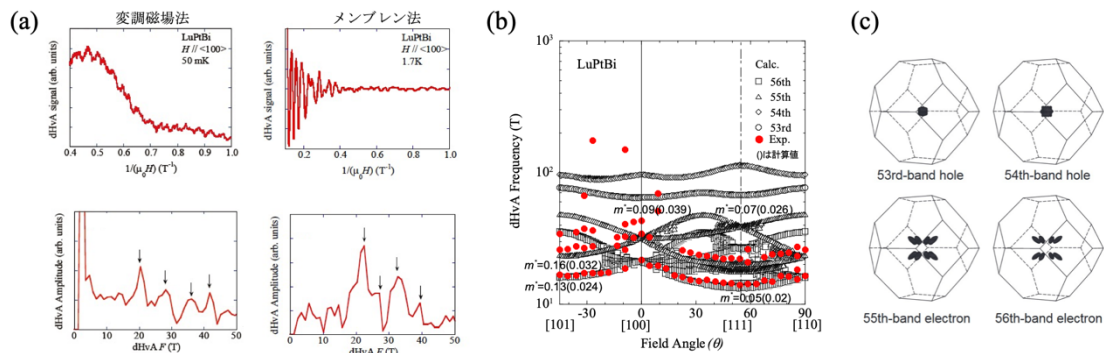


図 3.(a) ハーフホイスラー合金 LuPtBi における dHvA 振動と FFT スペクトル。(b) dHvA 振動数の角度依存性の実験値と第一原理計算による値。(c) 第一原理計算によるホール面と電子面。

(3) ハーフホイスラー合金における超伝導の観測

菅原らは LuPtBi において超伝導を観測した。図 2(b)に示すように、オンセットの超伝導転移温度は $T_c = 0.82$ K であった。これは Tafti らの報告と一致した。野原らは LuPdBi において超伝導を観測した。図 4 に電気抵抗率の温度依存性を示す。電気抵抗率がゼロとなる温度から決定した転移温度は $T_c = 1.6$ K であった。この転移温度は Nakajima らの報告と一致した[5]。さらに磁場中における測定から、上部臨界磁場は、図 3(b)から分かるように、2 T 以上に達した。上部臨界磁場がパウリ極限の磁場 $H_P = 1.86T_c \sim 3$ T を超えるか興味を持たれる。

ハーフホイスラー合金における超伝導の観測は、 $j=3/2$ フェルミオンにおけるクーパ対形成の研究につながるという意義がある。すなわち、従来の $s = 1/2$ 電子においては、一重項 (全スピン $S=0$) や三重項 (全スピン $S=1$) のクーパ対が形成された。 $j=3/2$ においては、さらに高次の対形成、例えば 7 重項 (全角運動量 $J=3$) などが理論的に提案されている。一方で、ハーフホイスラー合金の超伝導においては、転移温度で比熱の変化が観測されないという問題がある[5]。トポロジカル半金属であるため電子状態密度が極めて小さく、超伝導に伴う変化の検出が難しいという事情がある。しかしながら、超伝導の熱力学的な証拠となる比熱変化の検出は重要であり、継続して研究を行う必要がある。

野原らは関連化合物 PtBi₂ の研究を進めた。PtBi₂ は空間反転対称性が破れた結晶構造 (極性構造) を有し、0.6 K で超伝導を示す。本研究では Bi の一部を Se/Te で置換すると、結晶構造における空間反転対称性が回復し、超伝導転移温度が 2.4 K まで上昇することを明らかにした。PtBi₂ は極性構造に起因して、スピン軌道相互作用がラシュバ型になる。一方で LuPtBi などのハーフホイスラー合金は、ドレッセルハウス型となる。このため、スピン軌道相互作用の違いに応じて、フェルミ面のスピン分裂および超伝導がどのような影響を受けるのかを比較するためのモデル物質となる。

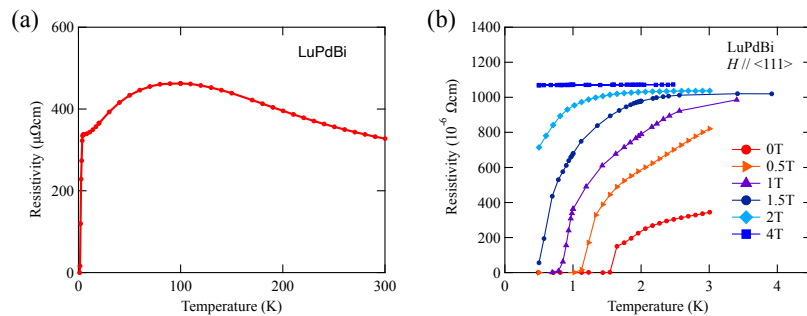


図 4. (a) LuPdBi における電気抵抗率の温度依存性と (b) 磁場中における電気抵抗率。

(4) カイラル結晶における第一原理計算の展開

播磨らは、カイラル構造を有する NbGe₂ における第一原理計算を行い、反対称スピン軌道相互作用に由来したフェルミ面のスピン分裂を見いだした。さらにブリルアンゾーンの H 点と M 点にバンド分散の鞍点が存在し、これに起因して、フェルミ準位において電子状態密度に van Hove 特異点が現れることを示した。これらは、NbGe₂ における強い電子格子相互作用と、それに伴う電子輸送特性の流体力学的挙動や、超伝導 ($T_c = 2$ K) の理解に寄与するものである。

参考文献

- [1] S. Chadov et al., Nat. Mat. **9**, 541 (2010).
- [2] H. Lin et al., Nat. Mat. **9**, 549 (2010).
- [3] N. P. Butch et al., Phys. Rev. B **84**, 220504(R) (2011).
- [4] F. F. Tafti et al., Phys. Rev. B **87**, 184504 (2013).
- [5] Y. Nakajima et al., Sci. Adv. **1**, e1500242 (2015).
- [6] P. M. R. Brydon et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 177001 (2016).
- [7] G. Dresselhaus, Phys. Rev. **100**, 580 (1955).
- [8] N. Kimura et al., J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 114708 (2018).

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 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takaki Kensuke, Yamamoto Mayu, Nakajima Masamichi, Takeuchi Tetsuya, Nguyen Hoang Yen, Nohara Minoru, Kishioji Yasuhiro, Fujii Takahiro, Yoshino Kentaro, Miyasaka Shigeki, Kudo Kazutaka	4. 巻 91
2. 論文標題 Enhanced Superconductivity in Close Proximity to Polar-Nonpolar Structural Phase Transition in Se/Te-Substituted PtBi ₂	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 034703-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.034703	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 Manago Masahiro, Motoyama Gaku, Nishigori Shijo, Fujiwara Kenji, Kinjo Katsuki, Kitagawa Shunsaku, Ishida Kenji, Akiba Kazuto, Araki Shingo, Kobayashi Tatsuo C., Harima Hisatomo	4. 巻 91
2. 論文標題 Site Split of Antiferromagnetic δ -Mn Revealed by 55Mn Nuclear Magnetic Resonance	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 113701-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.113701	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 Sato Yoshiki J., Honda Fuminori, Pospisil Jiir, Nakamura Ai, Valiska Michal, Shimizu Yusei, Maurya Arvind, Homma Yoshiya, Li Dexin, Sechovsky Vladimir, Harima Hisatomo, Aoki Dai	4. 巻 91
2. 論文標題 Single-Crystal Growth and Fermi Surface Properties of LaPd ₂ Si ₂ : Comparison with Pressure-Induced Heavy-Fermion Superconductor CePd ₂ Si ₂	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 114708-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.114708	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 Nakamura Naoki, Yanuma Ayano, Chiba Yuma, Omura Rumi, Higashinaka Ryuji, Harima Hisatomo, Aoki Yuji, Matsuda Tatsuma D.	4. 巻 92
2. 論文標題 Fermi Surface and Superconducting Properties of δ -IrSn ₄ , δ -RhSn ₄ , IrGe ₄ , and RhGe ₄ with Trigonal Chiral Structure	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 034701-1~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.034701	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 Sato Yoshiki J., Nakamura Ai, Nishinakayama Rei, Okazaki Ryuji, Harima Hisatomo, Aoki Dai	4. 巻 108
2. 論文標題 Fermi surface topology and electronic transport properties of chiral crystal NbGe ₂ with strong electron-phonon interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235115-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.235115	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 Maurya Arvind, Harima Hisatomo, Honda Fuminori, Shimizu Yusei, Sato Yoshiki J., Nakamura Ai, Li Dexin, Homma Yoshiya, Aoki Dai	4. 巻 92
2. 論文標題 Superconductivity in Noncentrosymmetric LaNiZn Single Crystal	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 043703-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.043703	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 Ramakrishnan Sitaram, Bao Jinke, Eisele Claudio, Patra Bikash, Nohara Minoru, Bag Biplab, Noohinejad Leila, Tolkiehn Martin, Paulmann Carsten, Schaller Achim M., Rekiş Toms, Kotla Surya Rohith, Schonleber Andreas, Thamizhavel Arumugam, Singh Bahadur, Ramakrishnan Srinivasan, van Smaalen Sander	4. 巻 35
2. 論文標題 Coupling between Charge Density Wave Ordering and Magnetism in Ho ₂ Ir ₃ Si ₅	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 1980~1990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.2c03297	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 Takeuchi Tetsuya, Honda Fuminori, Aoki Dai, Haga Yoshinori, Kida Takanori, Narumi Yasuo, Hagiwara Masayuki, Kindo Koichi, Karube Kosuke, Harima Hisatomo, Onuki Yoshichika	4. 巻 93
2. 論文標題 Field-induced Insulator-Metal Transition in EuTe ₂	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 044708-1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.044708	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 Afzal Md Asif, Onuki Yoshichika, Aoki Dai, Harima Hisatomo, Higashinaka Ryuji, Aoki Yuji, Matsuda Tatsuma D.	4. 巻 93
2. 論文標題 Large Cyclotron Effective Masses in Antiferromagnet SmTi ₂ Al ₁₀ Compared with Conventional Masses in Ferromagnet SmNi ₂ Cd ₂₀ and Antiferromagnet SmPd ₂ Cd ₂₀	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 054710-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.054710	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 Ryohei Matsumoto, Ei Murakami, Ryohei Oishi, Sitaram Ramakrishnan, Atsutoshi Ikeda, Shingo Yonezawa, Toshiro Takabatake, Takahiro Onimaru, and Minoru Nohara	4. 巻 93
2. 論文標題 Superconductivity in Metal-Rich Antimonide Zr ₆ FeSb ₂	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 065001-1~2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.065001	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 野原 実
2. 発表標題 jフェルミオン伝導物質の開発
3. 学会等名 第548回物性セミナー、広島大学
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Matsushita, T. Yamakawa, and M. Nohara
2. 発表標題 Exploration of Superconductivity in NiTe ₂ and Related Compounds
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 Hisatomo HARIMA
2. 発表標題 On the Phase Transition of URhSn
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 Hisatomo Harima, Koki Numa, Ai Nakamura, Yoshiya Homma, Dai Aoki
2. 発表標題 Fermi Surfaces of CeRh ₂ As ₂ and LaRh ₂ As ₂
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 長瀬雄太郎、Sitaram Ramakrishnan、野原実
2. 発表標題 Sr(Fe _{1-x} Ni _x) ₂ P ₂ におけるP ₂ 分子の形成と解離を伴う構造相転移
3. 学会等名 日本セラミックス協会第36回秋季シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Ramakrishnan, T. Yamakawa, R. Oishi, Y. Shimura, T. Onimaru, A. Thamizhavel, S. Ramakrishnan, and M. Nohara
2. 発表標題 An inverse correlation between the density of states and superconducting T _c in non-centrosymmetric LaPt _x Si _{2-x}
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 長瀬雄太郎, Sitaram Ramakrishnan, 野原実
2. 発表標題 超伝導体SrNi ₂ P ₂ におけるP ₂ 分子解離を伴う構造相転移の化学置換による抑制
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 三嶋竜太, 松岡英一, 青木大, 播磨尚朝, 菅原仁
2. 発表標題 LuPtBiのdHvA効果測定
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 松下真大, Sitaram Ramakrishnan, 野原実
2. 発表標題 van der Waals 型層状化合物Nb ₂ Se ₂ Cの合成と物性
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 松本峻平, 村上瑛, S. Ramakrishnan, 米澤進吾, 高畠敏郎, 鬼丸孝博, 野原実
2. 発表標題 Zr ₆ CoAl ₂ 型構造を有するメタルリッチ化合物Zr ₆ FeSb ₂ の超伝導
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 中西青空, 小手川恒, 藤秀樹, 菅原仁, 播磨尚朝
2. 発表標題 圧力誘起超伝導体CeSb2の核磁気共鳴法による研究
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〕

-

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	菅原 仁 (Sugawara Hitoshi) (60264587)	神戸大学・理学研究科・教授 (14501)	
研究分担者	播磨 尚朝 (Harima Hisatomo) (50211496)	神戸大学・理学研究科・教授 (14501)	

	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	ラマクリシュナン シタラム (Ramakrishnan Sitaram)	広島大学・先進理工系科学研究科・助教 (15401)	

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

インド	Tata Institute of Fundamental Research	Mizoram University		
ドイツ	University of Bayreuth			
チェコ	Charles University			