

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01837

研究課題名（和文）多軌道電子系を持つ量子物質で発現する新奇物性の探究

研究課題名（英文）Study on novel physical properties of quantum materials with multi-orbital electron systems

研究代表者

伊藤 正行 (Itoh, Masayuki)

名古屋大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：90176363

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多軌道電子系を持つ量子物質とその関連物質を対象に、スピン軌道相互作用、軌道間の相互作用、電子ホール相互作用、電子格子相互作用などが重要な役割を果たす新奇な量子物性の発現機構の解明を目指した研究を行った。特に、微視的な観点から量子物性を研究する上で有効な核磁気共鳴法と核四重極共鳴法を主たる実験手段として用いた。その結果、Kitaevスピン液体の素励起、バナジウム酸化物の金属絶縁体転移、鉄系化合物の新奇磁性、励起子絶縁体における新奇物性、ディラック半金属やワイル半金属の新奇物性などに対して発現機構の理解を進めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で主たる研究手段として用いた核磁気共鳴法と核四重極共鳴法は、物性発現機構を研究する上で微視的かつ選択的に測定できる特徴を持っている。この手法の特徴を生かして、本研究を開始した当初未解明であった遷移金属化合物・酸化物における多軌道電子系とその関連物質で発現する新奇な量子物性の発現機構の解明に貢献することができた。また、多軌道電子系のみならず関連する量子物質の研究も行い、研究の裾野を広げることができたことも意義がある。さらに、申請者のグループが開発を進めてきた核磁気共鳴測定法である軌道分解核磁気共鳴法などは、本研究で対象とした強相関電子系物質以外を研究する上でも役に立つことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study we studied exotic phenomena for which spin-orbit, orbital-orbital, electron-hole, and electron-lattice interactions play important roles in quantum materials with multi-orbital electron systems and related materials. In particular, nuclear magnetic resonance and nuclear quadrupole resonance techniques which are useful for investigating the phenomena from a microscopic viewpoint were utilized as main experimental techniques. Consequently, we contributed to understanding mechanisms of the exotic phenomena such as elementary excitations in Kitaev spin liquids, metal-insulator transition in vanadium oxides, novel magnetism of Fe-based compounds, excitonic condensation in excitonic insulators, and novel properties of Dirac and Weyl half metals.

研究分野：強相関電子系物理学

キーワード：強相関電子系 多軌道電子系 量子物質 Kitaevスピン液体 励起子絶縁体 鉄系化合物 核磁気共鳴 核四重極共鳴

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

電子間に強いクーロン相互作用が働く強相関電子系の分野では、電子が持つスピン・電荷・軌道の内部自由度が存在し、これらが競合や協調して新奇な物性が現れ、物性物理学の研究を牽引してきた。中でも、多軌道電子系では、多軌道性が重要な役目を果たす新奇な量子物性が出現する。研究を開始した当初、多軌道電子系を持つ量子物質やその関連物質では、強いスピン軌道相互作用、軌道間相互作用、電子ホール相互作用、電子格子相互作用が新奇な物性を発現することが強く認識されるようになっていた。強いスピン軌道相互作用を持つ $4d \cdot 5d$ 電子系では、基底状態としてスピン液体を厳密解として持つキタエフモデルの候補物質が見つかり、スピン液体の物理に新展開をもたらそうとしていた。鉄系超伝導体は、多軌道 $3d$ 電子系を持ち、多軌道効果が重要である。この鉄系超伝導体関連物質は新たな量子物性を示す系が探索されていた。そのような系の一つとして、ラダー型構造を持つ鉄系化合物は特異なスピン構造を持ち、鉄系超伝導体の親物質で出現するスピン構造との関連から興味を持たれていた。一方、関連物質の物理として、電子ホール相互作用が強い半導体や半金属では、励起子凝縮による励起子絶縁体が存在することが指摘されていたが、現実の候補物質はほとんどなく、実験研究は進んでいなかった。しかし、有力候補物質が発見され、励起子凝縮の物理が大きく進展しようとしていた。このように、研究開始当初、多軌道電子系を持つ量子物質や関連物質では、スピン軌道相互作用、軌道間相互作用などが重要な役目を果たす遷移金属化合物で、新奇物性が数多く見出されており、多軌道系の物理は、新たな展開を迎えようとしていた。

2. 研究の目的

本研究では、多軌道電子系を持つ量子物質およびその関連物質を対象に、スピン軌道相互作用、軌道間相互作用、電子ホール相互作用、電子格子相互作用などが重要な役割を果たす多彩なエキゾチックな物性の発現機構の解明を目的とした研究を行った。具体的には、(1)キタエフスピン液体候補物質の素励起、(2)酸化バナジウムの金属絶縁体転移と軌道状態、(3)ラダー型構造を持つ鉄系絶縁体化合物の新奇磁性、(4)励起子絶縁体候補物質の励起子凝縮、(5)ディラック半金属やワイル金属の新奇物性などの発現機構の解明を目指した。また、多軌道電子系のみにとどまらず、関連する量子物質の物性発現機構の解明も積極的にとり上げ、研究の裾野を広げることも目指した。

3. 研究の方法

本研究では、核磁気共鳴(NMR)法や核四重極共鳴(NQR)法を主たる実験手段として用い、微視的な観点から多彩な量子物質の物性を探究した。特に、私たちが開発を進めて来た軌道分解 NMR 法、励起子凝縮の NMR による観測法、ネマティック揺らぎの NMR による測定法など先進的な NMR 法を駆使した。また、本研究でとり上げた研究課題は、研究の促進と展開を積極的にはかるため、本研究組織に属さない実験・理論研究者との共同研究として実施したのも多くあり、ここに、共同研究者の皆様へ感謝申し上げる。

4. 研究成果

(1)キタエフスピン液体候補物質の素励起とスピン液体物質の探索

ハニカム格子上のキタエフモデルで記述される量子スピン系は、基底状態として厳密なスピン液体状態をとることが知られている。この系は、マヨロナフェルミオンを用いて記述することができ、励起状態として、遍歴的なマヨロナ励起と局在的なフラックス励起が存在する。実際の候補物質として $-RuCl_3$ などの候補物質が見出され、活発な研究が展開されていた。

本研究では、 $-RuCl_3$ の単結晶試料を用いて、Cl 核の NMR および NQR 実験を行った。まず、常磁性温度領域のナイトシフトと核スピン格子緩和率 $1/T_1$ の測定を行い、マヨロナフェルミオン励起と Z_2 フラックス励起間のクロスオーバーに対応したと考えられる振る舞いを見出した。次に、スピン液体相の素励起について調べた。図 1 は、低温領域で磁場を b 軸方向に磁場を印加したときの $1/T_1$ を温度 T で割った $(T/T_1)^{-1}$ の温度・磁場に対する等高線プロットである。反強磁性相の高磁場側に磁場誘起スピン液体相が存在することを示している。さらに、核スピン格子緩和率の温度依存性と磁場依存性の測定を行い、磁気励起について調べた。その結果得られた反強磁性相のマグノンギャップとスピン液体相で観測されたスピンギャップの磁場変化を図 2 に示

す。スピン液体相では、2種類のギャップを持った磁気励起が発達していることが観測された。この観測されたギャップは、2つの素励起間の磁場誘起混成の結果現れていると考えられる。

RuCl_3 のClをBrやIと置換した RuX_3 ($X=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)は、新しいスピン液体候補物質としての可能性があり、その磁性に興味を持たれた。本研究では、NMRとNQRを用いて、それらの微視的な磁性を調べた。その結果、 RuBr_3 は、Br核の $1/T_1$ の臨界発散が観測され $T_N=34\text{K}$ で反強磁性転移を起こすことを見出した。また、NQR測定から $-\text{RuCl}_3$ で存在したような構造相転移がないことを明らかにした。転移温度がBrで上昇することは、非キタエフ相互作用が、ClをBrに置換により変化するためと考えられる。一方、 RuI_3 は、パウリ常磁性を示すことをI核の核スピン格子緩和率の測定から得た。このように、 X をClからIに変化させると、その物性は大きく変わる。

他のスピン液体候補物質の探索も行った。金属有機構造体の一つであるCu-CAT-1は、Cuイオンがカゴメ格子を形成する量子スピン系である。この系の磁気基底状態の解明を目的として、H核のNMR実験、磁化率、比熱などの測定を超低温温度域まで測定し、磁場温度相図を作成した。その結果、量子スピン液体相、量子臨界相および両相のクロスオーバー領域が存在することを見出した。

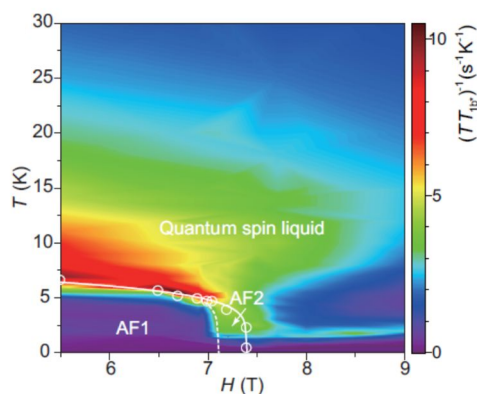


図1. $-\text{RuCl}_3$ における $H//b$ 方向に磁場を印加した $(1/T_{1b^r})^{-1}$ の温度・磁場に対する等高線プロット

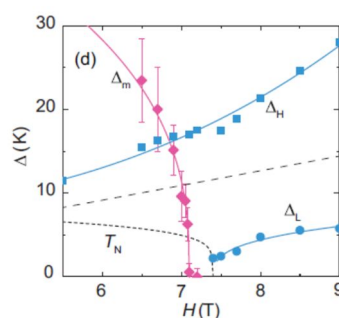


図2. マグノンギャップ Δ_m およびスピンギャップ Δ_H , Δ_L の磁場変化

(2) バナジウム酸化物 VO_2 の金属絶縁体転移と軌道状態

酸化バナジウム VO_2 の金属絶縁体転移は、その起源について電子相関か電子格子相互作用なのかの論争が長年続いて来た。本研究では、軌道分解NMR法を用いて、高温金属相と低温絶縁体の相軌道状態について調べた。単結晶試料を用いてV核のナイトシフト、電気四重極周波数、超微視相互作用定数テンソルの精密測定を行い、金属相と絶縁体相の $3d$ 軌道の占有率(表1参照)を得ることに成功した。その結果、占有率は金属絶縁体転移に伴ってスイッチし、絶縁体相では、スピンギャップを得て安定化するように軌道状態の再構築が起きていることが明らかになった。絶縁体相では、単純なモット絶縁体とは対照的に、複雑な格子変位が配位子場によって支配された非対称な局在分子軌道を作っていると考えられる。

Methods	R phase	M_1 phase
	$d_{ } : d_{yz} : d_{zx}$	$d_{ } : d_{yz} : d_{zx}$
Knight shift	0.27 : 0.41 : 0.32	0.7 : 0.1 : 0.2
hyperfine	0.23 : 0.44 : 0.33	
electric quadrupole	0.49 : 0.24 : 0.26	0.71 : 0.15 : 0.14

表1. ナイトシフト、超微細相互作用定数および電気四重極周波数テンソルから得られた VO_2 における金属相(R相)と絶縁体相(M_1 相)の $3d$ 軌道の占有率

(3) ラダー型構造を持つ鉄系絶縁体化合物の新奇磁性

ラダー型構造を持つ鉄系絶縁体化合物は、 BaFe_2S_3 と BaFe_2Se_3 において高圧下で超伝導が発見され、注目を集めた。また、 BaFe_2Se_3 ではブロック型、 BaFe_2S_3 や CsFe_2Se_3 ではストライプ型の特異なスピン構造が現れ、鉄系超伝導体母物質のスピン構造との関連から、 AFe_2X_3 ($A=\text{Ba}, \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$;

X=S, Se, Te)系の磁性に興味を持たれた。この系の磁性について統一的な理解のために、詳細な磁性の解明が求められていた。

本研究では、CsFe₂Se₃を対象に、Cs核とSe核の角度分解NMR実験を行い、微視的な磁性を調べた。特に、局所対称性に基づいたスペクトル解析から、各CsサイトとSeサイトの内部磁場とスピン構造を決定した。その結果、 $T_{N1}=176.5\text{K}$ で常磁性から非整合なスピン構造を持つ磁気秩序相に二次相転移を起こし、さらに $T_{N2}=148.5\text{--}152.0\text{K}$ で整合スピン構造を持つ磁気秩序相に一次転移する逐次転移を見出した。 T_{N2} 以下のスピン構造は、中性子散乱実験から提案されたスピン構造と同等であるが、磁気ベクトルが異なる二つのドメイン構造が存在することが分かった(図3(a),(b)参照)。この磁気ドメイン構造は、A副格子とB副格子間の分子場がキャンセルすることに起因すると考えられる(図3(c)参照)。 T_{N1} と T_{N2} の間の温度領域では、非整合型のスピン構造を持つことを明らかにした。これらのスピン構造は、5軌道ハバードモデルに基づいた理論研究などで指摘されている特異なスピン構造の一つとして出現している可能性があることを指摘した。

CsFe₂Se₃のFeの形式的価数は+2.5であり、遍歴性も持つことが期待されるにもかかわらず、絶縁体になる起源が未解明であった。特に、ホールがどのサイトに入るのかいくつかのモデルが提案されていた。本研究では、Se核のNMR実験から、ホールはSeサイトではなくFeサイトに入るを見出し、この結果に基づいて電子状態に対して分子軌道モデルや二重交換モデルを提案した。

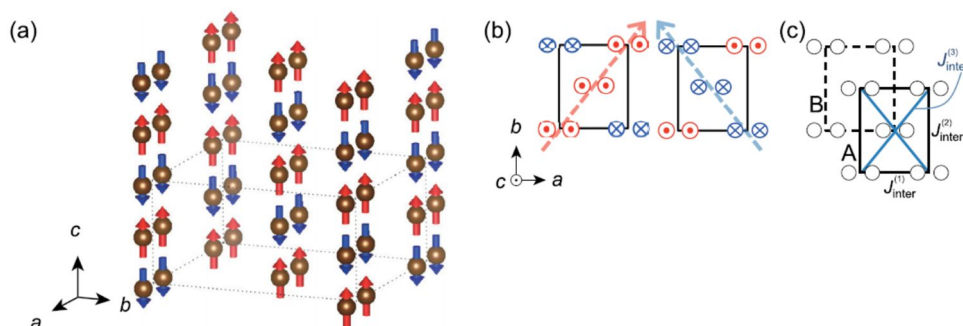


図3. CsFe₂Se₃の(a)低温相($T < T_{N2}$)の磁気構造、(b)二つの磁気ドメイン構造、および、(c)A格子とB格子間の交換相互作用

(4) 励起子絶縁体候補物質の励起子凝縮

励起子絶縁体転移を示す候補物質として、Ta₂NiSe₅が見出されて以来、励起子絶縁体転移の研究は大きな進展を見せた。常圧下のみならず高圧下の研究も行われ、3GPaで層間のスライディングを伴った構造相転移を起こし、絶縁体相から半金属相に転移することが知られている。さらに、約8GPaで超伝導が発現する。しかし、温度圧力相図上で、電子凝縮に関連した電子相図は明らかになっていなかった。

本研究では、この系の励起子凝縮について調べるために、まず、高圧下のSe核のNMR実験を行った。その結果、3GPa以下の圧力領域では、核スピン格子緩和率 $1/T_1$ は転移温度 T_c より高温の温度 T で減少し始めるとともにギャップ的な温度変化を示し、また、 T_c およびギャップエネルギーとともに圧力を加えると抑制される振る舞いが観測された。一方、3GPa以上の高圧領域では、 T 以上で、半金属であることに対応した $T_1 T = \text{const.}$ の振る舞いが観測された。さらに、 $1/T_1$ は T 以下で減少し始め、 T_c で異常を示すとともにギャップ的な温度変化を示した後、低温で再び $T_1 T = \text{const.}$ となった。これは、低温まで半金属状態をとるが、状態密度が減少することに対応している。 T_c と T は圧力を大きくすると減少する。3GPa以下の T は、励起子揺らぎが発達する温度(preformed excitonの形成温度)と考えられる。圧力は価電子帯と伝導帯間のエネルギーギャップ E_g を変えており、一般的な温度- E_g 相図上でTa₂NiSe₅の高圧相図をどのように理解できるかを明らかにすることは今後重要である。次に、Ta核のNQR実験も行い、常圧下で、 $1/T_1$ が高温から転移温度に向かって、発散的なピークを示すことが見出された。NQRは電荷自由度をモニターしており、 $1/T_1$ の振る舞いは T_c で電荷ゆらぎが発散的振る舞いをするを示しており、Se核のスピンギャップ的な振る舞いとは異なる。

励起子絶縁体の不純物効果の研究は、励起子凝縮を理解する上で有益な情報を与えることが期待できる。Ta₂NiSe₅の不純物効果を調べるため、CoとVをドーピングした系のSe核のNMR実験を行った。NMRスペクトルと核スピン格子緩和率の測定から、励起子凝縮相のスピンギャップ温度に対する不純物効果などを調べた。Coは、励起子凝縮に対して、磁性不純物として働き、Vは非磁性不純物として働く可能性が大きいことを見出した。

(5) ディラック半金属・ワイル半金属の新奇物性

相対論的ディラックフェルミオンは、グラファイトや半金属ビスマス合金で見られるように室温で反磁性を示す。本研究では、半金属ビスマス合金 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0.008-0.16$) 中に対して、磁化測定と Bi 核の NMR 実験を行い、ディラックフェルミオンに固有の反磁性軌道磁化率を観測した。また、Bi 核の超微細相互作用定数から、有効軌道半径を評価することに成功した。さらに、図 4 に示すように、核スピン格子緩和率 $1/T_1$ の温度変化は、広い温度範囲で、軌道励起に起因する ρ の温度変化を示すことを見出した。このように、小さく開くギャップに対して軌道反磁性と低エネルギーの軌道励起がロバストであることを示している。

反転対称性が破れたワイル半金属は、線形交差エネルギーバンドのベリー曲率による特異な電磁応答を示す。本研究では、ワイル半金属 WTe_2 を対象に、Te 核の NMR 測定からバルク状態における低エネルギー励起を調べた。Te 核のスピン帯磁率はサイトに依存し、また、核スピン格子緩和率を温度 T で割った $(T_1 T)^{-1}$ の温度変化は、直線的に交差するバンドの周りに現れるワイルフェルミオンを特徴づける温度変化を示した。

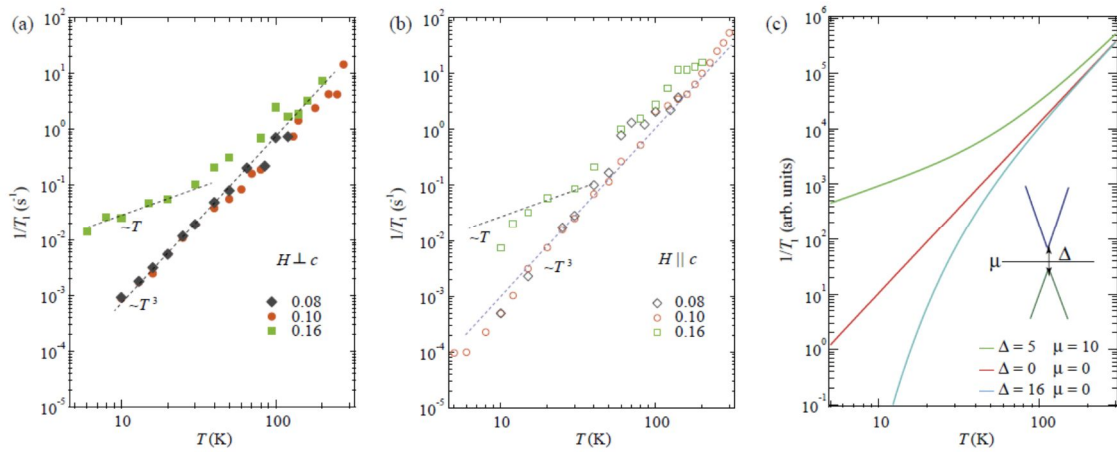


図 4. 半金属ビスマス合金 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x=0.008-0.16$) における (a) 磁場を c 面に印加した $1/T_1$ の温度変化、(b) 磁場を c 軸方向に印加した $1/T_1$ の温度変化、および、(c) 三次元ディラックフェルミオンに対する $1/T_1$ の理論計算 (ギャップの大きさ、 μ 化学ポテンシャル)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Yokoo, Y. Watanabe, M. Kumazaki, M. Itoh, and Y. Shimizu	4. 巻 91
2. 論文標題 Site-dependent local spin susceptibility and low-energy excitation in a Weyl semimetal WTe2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 054701/1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.054701	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. Imai, K. Nawa, Y. Shimizu, W. Yamada, H. Fujihara, T. Aoyama, R. Takahashi, D. Okuyama, T. Ohashi, M. Hagihala, S. Torii, D. Morikawa, M. Terauchi, T. Kawamata, M. Kato, H. Gotou, M. Itoh, T. J. Sato, and K. Ohgushi	4. 巻 105
2. 論文標題 Zigzag magnetic order in the Kitaev spin-liquid candidate material RuBr3 with a honeycomb lattice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 L041112/1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.L041112	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. Ueda, Y. Kobayashi, and M. Itoh	4. 巻 305
2. 論文標題 Tailoring a new oxyhydride, CaVO3-xHx, with ordered hydride anions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Solid State Chem.	6. 最初と最後の頁 122685/1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jssc.2021.122685	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. Shimizu, M. Maesato, M. Yoshida, M. Takigawa, M. Itoh, A. Otsuka, H. Yamochi, Y. Yoshida, G. Kawaguchi, D. Graf, and G. Saito	4. 巻 3
2. 論文標題 Magnetic field driven transition between valence bond solid and antiferromagnetic order in a distorted triangular lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 023145/1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.023145	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 K. Nawa, Y. Imai, Y. Yamaji, H. Fujihara, W. Yamada, R. Takahashi, T. Hiraoka, M. Hagihala, S. Torii, T. Aoyama, T. Ohashi, Y. Shimizu, H. Gotou, M. Itoh, K. Ohgushi, and T. J. Sato	4. 巻 90
2. 論文標題 Strongly electron-correlated semimetal Ru13 with a layered honeycomb structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 123703/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.123703	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. Watanabe, M. Kumazaki, H. Ezure, T. Sasagawa, R. Cava, M. Itoh, and Y. Shimizu	4. 巻 90
2. 論文標題 Local observations of orbital diamagnetism and excitation in three-dimensional Dirac fermion systems Bi1-xSbx	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 053701/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.053701	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 T. Katsufuji, M. Miyake, M. Naka, M. Mochizuki, S. Kogo, T. Kajita, Y. Shimizu, M. Itoh, T. Hasegawa, S. Shimose, S. Noguchi, T. Saiki, T. Sato, and F. Kagawa	4. 巻 3
2. 論文標題 Orbital and magnetic ordering and domain-wall conduction in ferrimagnet La5Mo4O16	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 013105/1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013105	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 M. Murase, K. Okada, Y. Kobayashi, Y. Hirata, K. Hashizume, T. Aoyama, K. Ohgushi, and M. Itoh	4. 巻 102
2. 論文標題 Successive magnetic transitions and spin structure in the two-leg ladder compound CsFe2Se3 observed by 133Cs and 77Se NMR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 014433/1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.014433	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. Shimizu, T. Jin-no, F. Iwase, M. Itoh, and Y. Ueda	4. 巻 101
2. 論文標題 Occupation switching of d orbitals in vanadium dioxide probed via hyperfine interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 245123/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.245123	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. Ueda, M. Murase, Y. Kobayashi, M. Itoh, T. Yajima, T. Yamaguchi, R. Takahashi, K. Sugimoto, and Y. Ohta	4. 巻 89
2. 論文標題 Observation of a novel phase transition in Sr7Re4O19	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 054703/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.054703	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. Nagai, T. Jinno, J. Yoshitake, J. Nasu, Y. Motome, M. Itoh, and Y. Shimizu	4. 巻 101
2. 論文標題 Two-step gap opening across the quantum critical point in the Kitaev honeycomb magnet -RuCl3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 020414(R)/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.020414	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42件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 清水康弘, 山本純哉, 小林義明, 松下琢, 伊藤正行, 求幸年, 那須謙治, 山中隆義, 木俣基, 佐々木孝彦
2. 発表標題 -RuCl3におけるスピン励起の異方性
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 劉子揚, 清水康弘, 松下琢, 伊藤正行, 丸岡うらら, 中埜彰俊, 寺崎一郎, 小林義明
2. 発表標題 Ta核NQRによる励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の圧力誘起金属相の電子状態の研究
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 Z. Liu, Y. Shimizu, T. Matsushita, M. Itoh, U. Maruoka, A. Nakano, I. Terasaki, and Y. Kobayashi
2. 発表標題 Study of pressure-induced phase transition of excitonic insulator candidate material Ta ₂ NiSe ₅ by Ta-NQR
3. 学会等名 令和4年度新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Shimizu, J. Yamamoto, Kobayashi Y., T. Matsushita, M. Itoh, J. Nasu, Y. Motome, T. Yamanaka, M. Kimata, and T. Sasaki
2. 発表標題 Anisotropy of spin excitations in RuCl_3
3. 学会等名 令和4年度新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉子揚, 清水康弘, 松下琢, 伊藤正行, 丸岡うらら, 中埜彰俊, 寺崎一郎, 小林義明
2. 発表標題 励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の圧力誘起金属相の研究 -Ta NQR-
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 佐藤晴耕, 山石開人, 赤津光洋, 根本祐一, 山本裕介, 小林義明, 伊藤正行
2. 発表標題 超音波による1T-TiSe ₂ のd-p混成がもたらす構造相転移の研究
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 Azimjon A. Temurjonov, 松下琢, 清水康弘, 伊藤正行, 小林義明, 檜枝光憲, 和田信雄
2. 発表標題 ナノトンネル中に形成した1次元 ³ He流体のスピン拡散
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 J. Yamamoto, Y. Shimizu, Y. Nagai, Y. Kobayashi, M. Itoh, T. Matsushita, J. Nasu, and Y. Motome
2. 発表標題 NMR evidence for Majorana gap in the Kitaev magnet
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 A. A. Temurjonov, T. Matsushita, K. Amaike, R. Inagaki, M. Hieda, N. Wada, Y. Shimizu, Y. Kobayashi, and M. Itoh
2. 発表標題 Influence of precoated ⁴ He layer on the ³ He dimerization in nanopores
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 T. Matsushita, A. A. Temurjonov, R. Shibatsuji, Y. Shimizu, Y. Kobayashi, M. Itoh, M. Hieda, and N. Wada
2. 発表標題 Examination of possible Tomonaga-Luttinger liquid behavior for 1D ^3He formed in nanochannels
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 H. Sato, K. Yamaishi, M. Akatsu, Y. Nemoto, Y. Yamamoto, Y. Kobayashi, and M. Itoh
2. 発表標題 Ultrasonic study of structural phase transition in 1T-TiSe_2
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 Y. Imai, H. Fujihara, F. Sato, W. Yamada, T. Aoyama, K. Nawa, T. Hiraoka, R. Takahashi, D. Okuyama, Y. Shimizu, T. Ohashi, Y. Yamaji, M. Hagihala, S. Torii, H. Gotou, T. Kawamata, M. Kato, M. Itoh, T. J. Sato, and K. Ohgushi
2. 発表標題 New Kitaev spin liquid candidate ruthenium halides RuX_3 ($X = \text{Br}, \text{I}$) with a honeycomb lattice
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 Z. Liu, K. Aoki, S. Kawai, Y. Shimizu, T. Matsushita, M. Itoh, and Y. Kobayashi
2. 発表標題 ^{77}Se NMR studies of excitonic insulator candidate Ta_2NiSe_5 under high 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 T. Matsushita, A. A. Temurjonov, R. Shibatsuji, Y. Shimizu, Y. Kobayashi, M. Itoh, M. Hieda, and N. Wada
2. 発表標題 NMR study of 1D 3He in nanochannels
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸本涼太, 松下琢, 清水康弘, 小林義明, 伊藤正行, 和田信雄, 三角勇気, 張中岳, 阿波賀邦夫, 山口明, 山根悠, 住山昭彦, 榊原俊郎, 土射津昌久
2. 発表標題 量子スピン液体候補カゴメ格子磁性体Cu-CAT-1の臨界的な比熱と磁性
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 劉子揚, 清水康弘, 松下琢, 伊藤正行, 丸岡うらら, 中埜彰俊, 寺崎一郎, 小林義明
2. 発表標題 励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の圧力下電子状態 - Ta NQR -
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 丸本涼太, 松下琢, 清水康弘, 伊藤正行, 小林義明, 三角勇気, 張中岳, 阿波賀邦夫, 山口明, 山根悠, 住山昭彦, 土射津昌久, 和田信雄
2. 発表標題 量子スピン液体候補カゴメ格子磁性体Cu-CAT-1の磁場中比熱測定
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 但野公亮, 小林義明, 伊藤正行, 清水康弘, 松下琢, 豊田真幸
2. 発表標題 Ba(Fe _{1-x} Cox) ₂ As ₂ の ⁵⁹ Co NMRによる不純物サイトの電子ネマティック状態の観測
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 劉子揚, 清水康弘, 松下琢, 伊藤正行, 丸岡うらら, 中埜彰俊, 寺崎一郎, 小林義明
2. 発表標題 励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の静的, 動的電荷状態
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 山本純哉, 清水康弘, 小林義明, 松下琢, 伊藤正行, 那須謙治, 求幸年
2. 発表標題 -RuCl ₃ におけるスピン励起の異方性
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 丸本涼太, 松下琢, 張中岳, 山口明, 榊原俊郎, 三角勇気, 阿波賀邦夫, 土射津昌久, 清水康弘, 伊藤正行, 和田信雄
2. 発表標題 スピン液体候補カゴメ格子磁性体Cu-CAT-1の磁場中帯磁率と磁化曲線
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 丸本涼太, 松下琢, 清水康弘, 伊藤正行, 三角勇氣, 張中岳, 阿波賀邦夫, 山口明, 土射津昌久, 和田信雄
2. 発表標題 スピン液体候補カゴメ格子磁性体Cu-CAT-1の1H NMR
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 安藤優, 清水康弘, 伊藤正行
2. 発表標題 四重極核スピンをを用いた離散時間結晶
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 熊崎将司, 清水康弘, 伊藤正行, 近藤雅起, 酒井英明, 花咲徳亮
2. 発表標題 NMRによるDirac半金属BaMnX ₂ (X=Bi, Sb) の量子ホール状態の観測
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 青木一弘, 小林義明, 伊藤正行, 佐野純佳, 広瀬雄介, 接待力生
2. 発表標題 励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の元素置換効果 - ⁷⁷ Se-NMR研究
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 劉子揚, 小林義明, 清水康弘, 伊藤正行
2. 発表標題 励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の181Ta-NQRによる電子状態の研究
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 赤津光洋, 佐藤晴耕, 山石開人, 根本祐一, 山本裕介, 小林義明, 伊藤正行
2. 発表標題 超音波による1T-TiSe ₂ の格子不安定性の研究
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 國枝和輝, 小林義明, 稲富健太, 伊藤正行
2. 発表標題 NMRから見たチタンオキシニクタイトBaTi ₂ As ₂ Oの低温秩序相の電子状態 -面内異方的圧力効果-
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 大橋尚将, 清水康弘, 伊藤正行, 片岡亨太, 平井大悟郎, 広井善二
2. 発表標題 Kitaevスピン液体候補物質Ru _{1-x} O _s Cl ₃ の核四重極共鳴
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 清水康弘, 大橋尚将, 伊藤正行, 山田和奏, 藤原秀行, 今井良宗, 大串研也
2. 発表標題 -RuX ₃ (X=Br, I)における核四重極共鳴およびゼロ磁場NMR
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 林洋心, 小林義明, 伊藤正行, 出口和彦, 伊豫彰
2. 発表標題 鉄ヒ素超伝導体(La _{0.5-x} Na _{0.5+x})Fe ₂ As ₂ のホールドープ領域(x=0~0.3)での磁気励起状態
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 山口明, 三角勇氣, 張中岳, 阿波賀邦夫, 土射津昌久, 丸本涼太, 清水康弘, 伊藤正行, 松下琢, 和田信雄
2. 発表標題 カゴメ格子磁性体Cu-CAT-1の超低温物性(III)
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 根本祐一, 佐藤晴耕, 赤津光洋, 山本裕介, 小林義明, 伊藤正行
2. 発表標題 超音波によるダイカルコゲナイド1T-TiSe ₂ の弾性定数測定
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 劉子揚, 國枝和輝, 河合俊輔, 小林義明, 清水康弘, 伊藤正行
2. 発表標題 NMRから見た励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ の压力下電子状態
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 S. Kawai, Y. Kobayashi, Y. Shimizu, and M. Itoh
2. 発表標題 77Se-NMR study of the excitonic insulator Ta ₂ NiSe ₅ under high pressure
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kobayashi, Y. Kobayashi, and M. Itoh
2. 発表標題 77Se-NMR studies of the iron-based superconductor FeSe under high pressure
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nemoto, H. Sato, M. Akatsu, Y. Yamamoto, Y. Kobayashi, and M. Itoh
2. 発表標題 Ultrasonic investigation of lattice instability in 1T-TiSe ₂
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊崎将司, 清水康弘, 伊藤正行, 増田英俊, 酒井英明, 石渡晋太郎
2. 発表標題 ディラック半金属EuMnBi ₂ の量子ホール状態における209Bi NMR
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 横尾理樹, 清水康弘, 伊藤正行
2. 発表標題 ワイル半金属WTe ₂ のNMRによる磁気特性の研究
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 村瀬美奈, 小林義明, 岡田薫, 伊藤正行, 平田靖透, 橋詰和樹, 青山拓也, 大串研也
2. 発表標題 NMRによる梯子型鉄系化合物CsFe ₂ Se ₃ の磁気構造と電子状態の研究
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 國枝和輝, 小林義明, 稲富健太, 伊藤正行
2. 発表標題 チタンオキシニクタイトBaTi ₂ As ₂ Oの低温相の結晶構造及び電子状態の解明
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 林洋心, 小林義明, 伊藤正行
2. 発表標題 鉄系超伝導体(La _{0.5-x} Na _{0.5+x})Fe ₂ As ₂ の75As-NMR
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019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	小林 義明 (Kobayashi Yoshiaki) (60262846)	名古屋大学・理学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	清水 康弘 (Shimizu Yasuhiro) (00415184)	名古屋大学・理学研究科・講師 (13901)	
研究分担者	松下 琢 (Matsushita Taku) (00283458)	名古屋大学・理学研究科・講師 (13901)	

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		
米国	プリンストン大学		