

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04017

研究課題名(和文) j-j結合描像に基づくf電子多体系の多極子秩序と超伝導に関する微視的理論

研究課題名(英文) Microscopic theory for multipole ordering and superconductivity in f-electron many-body systems on the basis of a j-j coupling scheme

研究代表者

堀田 貴嗣 (Hotta, Takashi)

東京都立大学・理学研究科・教授

研究者番号：00262163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：複数のf電子を持つ希土類及びアクチノイドイオンを含む化合物では、非フェルミ液体状態や多極子秩序状態などの興味深い現象が引き起こされる。本研究では、j-j結合描像に立脚し、まず一電子状態を規定し、然る後にクーロン相互作用を取り入れるという立場で、複数f電子系の磁性や超伝導に対する微視的理論を展開した。例えば、非フェルミ液体状態を基底状態に持つ2チャンネル近藤効果に注目し、従来知られていたf電子が2個のPrイオンだけでなく、f電子が3個のNdイオンの場合でも2チャンネル近藤効果が起こることを発見した。さらに、f電子が4個のPuあるいはNpイオンの場合にも、2チャンネル近藤効果が起こることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複数のf電子を持つ希土類及びアクチノイドイオンを含む化合物において、さまざまな興味深い現象が生じることは1980年代から知られていたが、その理解はLS結合描像に基づく現象論的なものにとどまることが多く、微視的な理解はそれほど進んでいなかった。本研究において、j-j結合描像を積極的に活用し、複数のf電子を持つ希土類及びアクチノイドイオンを含む化合物の磁性や超伝導の微視的理論を展開したことの意義は大きい。特に、f電子が2個よりも多い場合にも理論を拡張し、従来知られていなかったNdイオンでの2チャンネル近藤効果を見出したことは重要な成果である。今後、重希土類系へのさらなる理論の展開も期待される。

研究成果の概要(英文)：In the compounds containing rare-earth or actinide ion with plural numbers of f electrons, it has been well known that there occur some intriguing phenomena such as non-Fermi liquid state, multipole ordering, and unconventional superconductivity. In the present research project, we have developed microscopic theories for magnetism and superconductivity for the system with plural numbers of f electrons based on a j-j coupling scheme. Namely, first we define one-f-electron state characterized by total angular momentum and then, we include Coulomb interactions among such f-electron states. For instance, we remark two-channel Kondo effect which has been well known as a source of non-Fermi liquid state. In addition to the case of Pr ion including two f electrons, we have discovered the two-channel Kondo effect for the case of Nd ion including three f electrons. Moreover, also for the case of Np or Pu ion including four f electrons, we have shown the emergence of two-channel Kondo effect.

研究分野：物性理論

キーワード：2チャンネル近藤効果 j-j結合描像 多極子 非フェルミ液体 量子臨界点 強相関f電子 非クラマース二重項 超伝導

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

重い電子系の研究は、国内外を問わず、Ce系化合物で着実に進展してきた。しかし、Pr系やU系の磁性や超伝導の微視的観点からの研究はあまり進んで来なかった。複数のf電子を持つイオンの場合、通常、多体f電子状態はLS結合描像で扱われるが、クーロン相互作用が十分大きいとして、まずフント則による多電子状態を構成し、次にスピン軌道相互作用を考慮する。f電子が局在している場合はそれで問題ないが、f電子が伝導電子と混成して遍歴し始めると、LS結合描像では途端に扱いが難しくなる。1980年代に発見された多くのU系化合物の超伝導に対する理解が、未だに現象論を脱却しえない主な原因もそこにある。また、最近発見されたPrT₂X₂₀ (Tは遷移金属, X=Al, Zn)の超伝導に関しては、電気四極子の揺らぎの関与が期待されているが、まだ完全な理解には至っていないように見受けられる。現実のf電子物質では、スピン軌道相互作用もクーロン相互作用も有限であり、その場合の多極子秩序構造や超伝導対形成機構を明らかにすることは、f電子系の研究にとって重要である。また、2チャンネル近藤効果のような非フェルミ液体状態をもたらす現象のさらなる理解も、量子臨界性の研究の観点から重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、クーロン相互作用もスピン・軌道相互作用も有限な現実的な領域で計算を実行する。一つのイオンの電子状態については、これまでに良く知られていたLS結合描像に基づく結晶場理論を改訂して用いる。スピン軌道相互作用のある3次元7軌道f電子模型に基づいてPr系の磁性や超伝導を微視的観点から議論することは、これまで殆ど手をつけられていない研究テーマであり、本研究が先駆けとなる。

複数のf電子を持つ希土類及びアクチノイドイオンでは、クーロン相互作用、スピン軌道相互作用、立方結晶場ポテンシャルの競合によって非クラマース二重項が基底状態になることがある。これは電気四極子自由度を持ち、磁気モーメントとは異なる物性の源となる。本研究では、j-j結合描像に基づいて、まず、立方晶非クラマース系の磁性や超伝導を微視的観点から解明する。具体的には、スピン軌道相互作用のある3次元7軌道f電子模型やΓ₃非クラマース系に対する有効モデルを解析することにより、立方晶系のPrPb₃の非整合四極子秩序やPrT₂X₂₀のΓ₃四極子物性を明らかにする。さらに、立方晶非クラマース系に限らず、U系や超ウラン系にも本理論を適用し、アクチノイド化合物の多極子秩序や超伝導の微視的理論を展開する。

3. 研究の方法

スピン軌道相互作用のある3次元7軌道f電子模型を平均場近似や乱雑位相近似によって解析し、PrPb₃の格子非整合四極子秩序を微視的観点から解明する。また、数値的研究のために、j-j結合描像に基づいてΓ₃非クラマース系に対する微視的有効モデルを構築する。その後、乱雑位相近似で有効電子間相互作用を計算し、多極子秩序構造を決定するスキームや超伝導ギャップ方程式を解く手法を完成させる。これらの理論をU系や超ウラン系に適用し、多極子秩序および超伝導状態を明らかにする。また、7軌道f電子モデルを数値繰り込み群法によって解析し、マルチチャンネル近藤効果の出現の様子を調べ、フェルミ液体状態と非フェルミ液体状態間の量子臨界性に着目した研究を行う。さらに、Γ₃非クラマース系のモデルを数値計算手法によって解析し、PrT₂X₂₀を念頭に、Γ₃四極子秩序相を微視的観点から明らかにする。

4. 研究成果

(1) Nd系における2チャンネル近藤効果

1980年、NozièresとBlandinは、1つの不純物スピンを複数のチャンネルの伝導電子が過剰に遮蔽するとき、非フェルミ液体状態が生じ、物理量の温度依存性に低温でさまざまな異常が現れる可能性を指摘した。1987年、Coxは、四極子自由度を巧みに利用して、Γ₃基底状態をもつ立方晶U系化合物において2チャンネル近藤効果が実際に起こることを示した。その後、U系からPr系へと対象物質は広がり、f²系を舞台に2チャンネル四極子近藤効果の研究が盛んに行われてきた。四極子自由度を利用するCoxのアイデアは秀逸であるが、NozièresとBlandinが考えた磁気的な2チャンネル近藤効果は、実際の系では見つからないのだろうか、という素朴な疑問が残る。また、f²系でΓ₃基底状態をもつ物質だけでなく、他にも対象物質を広げることができれば、2チャンネル近藤効果の研究がさらに進むことが期待される。

そこで、本研究では、Γ₈伝導電子と混成する7軌道アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって先入観なく解析することにした。今の場合、局所f電子数nを1から13まで自由に変えることができるが、対応する希土類イオンにおけるクーロン相互作用やスピン・軌道相互作用の値を用い結晶場ポテンシャルをパラメータとして考えた。モデルの妥当性を確認するために、まず、Pr³⁺イオンを念頭に、n=2の場合を調べた。その結果、Coxの指摘どおり、Γ₃基底状態の場合に残留エントロピー-0.5log2が現れ、2チャンネル近藤効果が生じることを確認した。図1(a)のようにj-j結合描像に基づいて考えると、Γ₃状態はΓ₇とΓ₈軌道をまたぐ2種類の一重項から

成り、その縮退は Γ_8 状態の軌道自由度に由来していることがわかり、軌道（四極子）近藤効果が起こることになる。n=2 の結果からモデルは妥当であると考え、電子数をさまざまに変えて計算を続行した。その結果、Nd³⁺イオンに対応する n=3 で、 Γ_6 基底状態の場合に、2 チャンネル近藤効果が現れることを発見した。再び j-j 結合描像に基づいて考えると、図 1(b)のように Γ_6 状態は、 f^2 の Γ_3 状態に Γ_8 電子を 1 つ付け加えた形をしており、 Γ_8 伝導電子との混成を考えると、 Γ_7 電子の磁気モーメントを Γ_8 の 2 種類のチャンネルの伝導電子が遮蔽する形になる。これはまさに、Nozières と Blandin が最初に考えた磁気的な 2 チャンネル近藤効果になっている。今後、Nd を含む 1-2-20 系でこのような磁気的な 2 チャンネル近藤効果が観測される可能性が期待される。

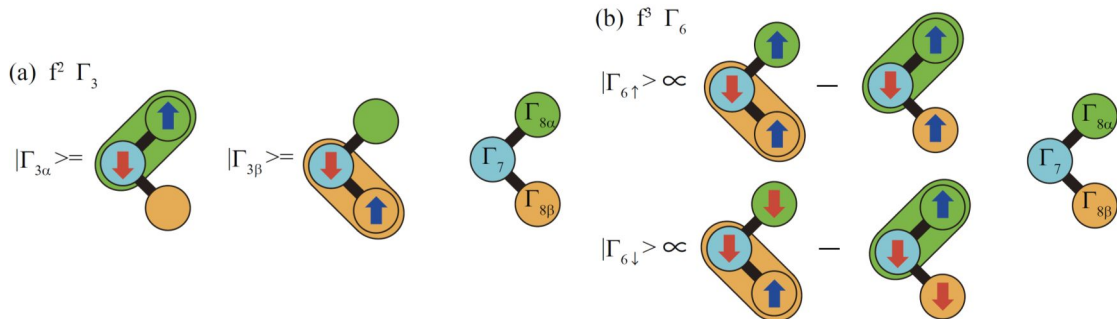


図 1 : (a) j-j 結合描像に基づく f^2 の Γ_3 二重項。 (b) j-j 結合描像に基づく f^3 の Γ_6 二重項。

(2) 超ウラン系における 2 チャンネル近藤効果

2 チャンネル近藤効果は、非フェルミ液体状態に起因する新奇物性の理解の観点から、長年にわたって研究されている。この 2 チャンネル近藤効果が現実にかかる可能性について、1987 年にコックスが、立方晶系 U 化合物を念頭に、 Γ_3 結晶場基底状態を持つ f^2 電子系において四極子自由度に関する 2 チャンネル近藤効果が生じることを指摘した。当初、U 化合物で実験研究がなされたが、その後、研究の舞台は Pr 化合物に移った。そして、1-2-20 系と呼ばれる PrT₂Al₂₀ (T は遷移金属) において、2 チャンネル近藤効果に特徴的な物理量の振る舞いが発見されるに至っている。最近、 f^2 以外の希土類あるいはアクチノイド系において、2 チャンネル近藤効果が生じる可能性を考察しているが、j-j 結合描像に基づいて考えると、 f^2 と f^4 の間に擬似的な電子・正孔関係があることから、 Γ_3 結晶場基底状態を持つ f^4 電子系においても、2 チャンネル近藤効果が生じる可能性があることに気づいた。そこで、 Γ_8 の 2 バンド伝導電子と混成する 7 軌道アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、局所 f 電子数が 4 で Γ_3 結晶場基底状態の場合に、2 チャンネル近藤効果に特徴的な $0.5 \log 2$ の残留エントロピーが現れることを見出した。対応する物質について、 $5f^4$ となる Np³⁺ あるいは Pu⁴⁺ イオンを含む立方晶系超ウラン化合物、たとえば、Np 1-2-20 系の合成や実験が期待できると考えられる。

(3) 2 軌道不純物アンダーソンモデルの量子臨界点

近藤効果は、不純物スピンと伝導電子が近藤・芳田一重項を形成してスピン自由度が消失する過程であると理解されているが、不純物がスピンだけでなく軌道の自由度も持つ場合、たとえば、2 つの不純物スピンの 2 種類の伝導電子と混成する場合、局所一重項状態と近藤・芳田一重項状態の間に競合が生じ、量子臨界点が現れることが知られている。量子臨界点近傍では、量子臨界揺らぎによってさまざまな新奇な物性が生じる可能性があり、現在に至るまで盛んに研究されている。そこで、2 軌道不純物アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、量子臨界点の出現の様子を調べた。立方対称下で局所電子数が 2 の場合、2 軌道不純物サイトの基底状態は Γ_1 一重項、 Γ_3 二重項、 Γ_5 三重項の 3 種類に分かれる。このうち、 Γ_1 一重項が上に述べた局所一重項状態にあたる。繰り込みを行う出発点となる状態を Γ_1 から Γ_5 に変化させると、途中で量子臨界点が現れることは既知である。 Γ_3 状態を出発点にして繰り込みを進めると、軌道に関する近藤・芳田一重項が出現することを確認し、さらに、繰り込みの出発点を Γ_1 から Γ_3 に変化させた場合でも、途中で量子臨界点が現れることを見出した。そして、相互作用パラメータを変化させた場合に、 Γ_1 と Γ_5 の間の量子臨界点は、 Γ_1 と Γ_3 の間のそれと連続的につながっていて、相図上で量子臨界曲線を形成することを見出した。

(4) 2 チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の間に現れる量子臨界点

Γ_7 と Γ_8 の 3 本の伝導電子バンドと混成する 7 軌道不純物アンダーソンモデルを数値繰り込み群法によって解析し、2 チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の間の量子臨界点の出現について考察した。ここで考えるモデルは、局所 f 電子項、伝導電子項、混成項から構成されるが、このうち、局所 f 電子項は、クーロン相互作用項、スピン・軌道結合項、結晶場ポテンシャル項から成る。伝導電子項は、 Γ_7 と Γ_8 の 3 本の伝導電子バンドから成り、バンド幅の半分をエネルギー

一単位とする。局在 f 電子と伝導電子の混成は、同じ対称性をもつ軌道間でのみ生じるとし、混成の強さは Γ_7 と Γ_8 で等しいと仮定した。

局所 f 電子数 $n=2$ の Pr^{3+} イオンの場合、局所基底状態は Γ_1 一重項、 Γ_3 二重項、 Γ_5 三重項の 3 種類であるが、適当な大きさの伝導電子との混成を考えると Γ_3 二重項の領域において $0.5\log 2$ の残留エントロピーで特徴づけられる、四極子自由度由来の非磁性の 2 チャンネル近藤状態が現れる。一方、 Γ_1 の領域とその近傍では結晶場一重項状態が、 Γ_5 の領域とその近傍では近藤一重項状態が現れ、これらはともにフェルミ液体状態である。

まず、結晶場パラメータを変えることにより、 Γ_1 の結晶場一重項状態から Γ_5 の近藤一重項状態に基底状態を変化させるとき、先行研究でよく知られているように、その狭間に $0.5\log 2$ の残留エントロピーで特徴づけられる量子臨界点が現れることを確認した。次に、 Γ_3 の領域から Γ_1 の領域に、あるいは Γ_3 の領域から Γ_5 の領域に局所基底状態を変化させると、いずれの場合も、 $\varphi=(\sqrt{5}+1)/2$ として、 $\log \varphi$ という残留エントロピーをもつ量子臨界点が現れることを見出した。同様の結果は、結晶場パラメータを固定して混成の大きさを変えたときにも得られた。さらに、 $n=3$ の Nd^{3+} イオンの場合、 Γ_6 二重項の局所基底状態の領域に現れる磁気的な 2 チャンネル近藤状態の近傍でも、 $\log \varphi$ の残留エントロピーをもつ状態を見出した。以上のことから、2 チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の間に、 $\log \varphi$ の残留エントロピーで特徴づけられる量子臨界点が現れると考えられる。

(5) 非クラマース二重項系の多極子相互作用

f 電子系の多極子自由度、特に八極子自由度に関する研究は、結晶場基底状態が Γ_8 である系を主な対象として行われてきた。これは、 Γ_8 四重項には八極子自由度を持つだけの大きな自由度があるためである。実際、 NpO_2 や $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{B}_6$ といった Γ_8 系で八極子秩序が発見されてきたという歴史がある。ただし、四重項のような大きな自由度は、八極子以上の高次多極子の自由度を持つための十分条件ではあるが、必要条件ではないことに注意する必要がある。もし、単重項ではなく、かつ双極子のような低次のモーメントを持たない場合には、必然的に高次の多極子モーメントによってその自由度は記述される。実際、非クラマース二重項 Γ_3 は双極子モーメントを持たず、四極子自由度と八極子自由度で記述される。また、双極子モーメントを持たないという点は、 Γ_3 系が高次多極子を研究する上でよい舞台になっているともいえる。この様な Γ_3 系でどの様な多極子相互作用が典型的となるかを調べるために、我々は f^2 の Γ_3 結晶場状態を記述する単純化されたモデルを考え、多極子相互作用を導いた。

このモデルでは、一電子状態として全角運動量 $j=5/2$ の状態を考え、二電子状態として Γ_3 が結晶場基底状態になるような電子間相互作用を取り入れた。そして、この Γ_3 イオン間の電子の跳び移り積分に関する 2 次摂動論を用いて、多極子相互作用を導出した。得られた多極子相互作用は、単純立方格子では四極子相互作用、体心立方格子と面心立方格子では八極子相互作用が主要な相互作用となった。これは、 Γ_8 系での多極子相互作用と共通する結果となっている。

(6) Γ_3 四極子秩序における多極子ネスティング機構

PrPb_3 における奇妙な格子非整合 Γ_3 四極子秩序は 2004 年に発見されたが、その微視的な機構は解明されていなかった。この問題に対し、フェルミ面のネスティングと Γ_3 四極子秩序の関係に注目して研究を行った。具体的には、 Γ_7 軌道と Γ_8 軌道で構成される 3 軌道ハバードモデルを解析し、 Γ_3 四極子秩序が現れるには、局所基底状態が Γ_3 二重項になっていることが必要条件であることを見出した。そして、 Γ_3 二重項が局所基底状態になるような有効電子間相互作用を導入すると、格子非整合な Γ_3 四極子秩序が四極子密度波状態として自然に現れることを見出した。四極子密度波状態の秩序変数と秩序ベクトルは跳び移り積分によって異なるが、乱雑位相近似の感受率が発散する秩序ベクトルは、基本的に相互作用がない自由電子系の場合の感受率のピーク構造で決まっていることを見出し、感受率のピーク構造とフェルミ面の関係に着目した。そして、格子非整合な Γ_3 四極子秩序が現れる領域では、フェルミ面上で Γ_7 軌道密度と Γ_8 軌道密度が多い領域が秩序ベクトルによって結びついて、感受率に大きな寄与をもたらすことを見出した。多極子密度とフェルミ面のネスティングの両方が関係していることから、これを多極子ネスティングと定義し、 f^2 電子系の Γ_3 四極子密度波状態を理解する上で重要な見方となる可能性を指摘した。

(7) 反強四極子秩序下における交差応答

新奇機能を持つ新材料の開発には、物質それぞれの性質を同定し外場に対してどのような応答を示すかを知ることが重要である。近年、反転対称性の破れた結晶構造を持つ物質群が注目を集めており、その交差応答（電場（磁場）により磁気（電気）モーメントを誘起）が盛んに研究されている。一方、強相関 f 電子系においては Pr 化合物における軌道秩序（四極子秩序）が精力的に研究されている。本研究では、この Pr 化合物がダイヤモンド構造の元で反強四極子秩序を形成することで電気磁気効果が発現することを提案し、その異方性を用いることで、四極子秩

序変数を同定できることを理論的に示した。このことによって、反強四極子秩序の同定に向けての新たな方向性が生まれ、今後の実験研究が活性化することが期待できる。また、この秩序状態が異なる電荷を帯びた逆巻のソレノイドの秩序とみなすことができることを見出し、電気磁気効果の直感的な理解についても知見が得られた。

(8) 局所クーバー対による非従来型超伝導

多軌道系における超伝導は近年の鉄ヒ素系高温超伝導の発見に象徴されるように、ますますその重要性が認識されてきている。従来型の超伝導とは、フォノンがクーバー対を媒介し、基本的には同一サイトの引力を実現し、相対角運動量が s 波のものである。本研究では、多軌道系において、超伝導を担うクーバー対が局所的に形成された場合にも、異方的なノードを持つ非従来型の超伝導が実現することを微視的なモデルから出発して示した。

具体的には、微視的なモデルとして単純立方格子上の 2 軌道 (Γ_8) のハバードモデルを考え、乱雑位相近似を適用し、超伝導転移温度および、多極子密度波の転移温度を見積もった。四極子秩序状態の近傍に現れる、「従来型」の異方的超伝導とともに、広いパラメータ領域において、上述の局所クーバー対が起源となる異方的超伝導が形成されることを明らかにした。また、強相関 f 電子系における低エネルギー有効相互作用について系統的に導出する理論を構築し、結晶場準位と関連した非自明なパラメータ領域が出現することを明らかにした。

(9) 密度行列くりこみ群による異方的近藤格子モデルの横磁場効果の解析

強磁性超伝導体 URhGe では、そのイジング強磁性相の内部で超伝導が現れ、強磁性と超伝導が微視的に共存していると考えられており、近年盛んに研究がなされている。興味深いことにイジング軸に垂直に（横）磁場を印加すると、通常のように超伝導が一旦消失した後、キュリー温度が 0 になる磁場付近で再び現れることが知られている。また、再出現後の超伝導転移温度は零磁場でのそれよりも高く、磁場下での超伝導状態を実験、理論の両面から明らかにすることは、重要な課題となっている。

本研究では、伝導電子とイジングスピンの結合した時にどのような相が横磁場中で現れるかを調べるために、横磁場を印加した 1 次元の $S=1$ 異方的近藤格子モデルを密度行列くりこみ群法を用いて解析した。伝導電子数とともに種々の相が現れるが、特にクォーターフィリングより小さいフィリングで強磁性が安定化することがわかった。この領域で横磁場の効果を調べたところ、磁気モーメントが磁場の向きに倒れていく過程で、近藤“プラトー”相、および朝永ラッティンジャー液体相があり、完全偏極した相に達することがわかった。強磁性と近藤“プラトー”相は通常の 2 次元イジングユニバーサリティクラスの二次転移であり、近藤“プラトー”相では伝導電子と局在スピンの強い反強磁性相関を保つことで磁化過程にプラトーのような領域が出現する。また、このことを反映してスピンギャップが有限に開いていることがわかった。朝永ラッティンジャー液体相へは一次転移で転移し、基本的にギャップレスな振る舞いをする。今後、偏極相まで出現するこれらの相や相境界などで、超伝導揺らぎがどのような振る舞いをするのかを調べ、URhGe の超伝導機構について詳細な検討を行う。

(10) プルトニウム化合物の超伝導の微視的理論研究

2001 年に CeCoIn_5 が転移温度 $T_c=2.3\text{K}$ で超伝導になることが発見され、注目を集めたが、翌 2002 年に、 PuCoGa_5 において $T_c=18.5\text{K}$ という重い電子系としては高温の超伝導が発見された。これらの結晶構造の擬 2 次元性を考慮すると、銅酸化物高温超伝導体と同様に、磁気ゆらぎによる d 波対形成の可能性が高いと考えられる。そうだとすると、 T_c は電子系のエネルギーでスケールされるので、Ce の $4f$ 電子系よりは遍歴性の強い Pu の $5f$ 電子系の方が高い T_c を示す、というのはもっともらしく思われる。しかし、2012 年に PuCoIn_5 が合成されたが、 $T_c=2.5\text{K}$ であり、 PuCoGa_5 ではなく CeCoIn_5 とほぼ同じであった。これにより、Pu-115 の“高温”超伝導をどのように理解すればよいのか、という点が再び問題になっていた。

本研究では、 Pu^{3+} の $5f$ 電子状態を $j-j$ 結合描像に基づいて考察し、 Γ_6 と Γ_7 の 2 軌道に関する 2 次元正方格子上のモデルを構築した。2 つの軌道状態は、全角運動量 $j=5/2$ の z 成分で指定される状態 $|j_z\rangle$ を用いて、 $|\Gamma_6\rangle_{\pm} = |\pm 1/2\rangle$ 、 $|\Gamma_7\rangle_{\pm} = \cos\theta|\pm 5/2\rangle + \sin\theta|\mp 3/2\rangle$ と表される。ここで、下付きの \pm は時間反転対称性から導入される擬スピンを表し、 θ は Γ_7 軌道の変形具合を表すパラメータである。この 2 軌道モデルにオンサイトクーロン相互作用を導入し、乱雑位相近似を適用して解析した。スピンおよび軌道感受率を計算してネール温度 T_N を求め、ギャップ方程式を数値的に解いて超伝導転移温度 T_c を計算した。 θ には、 Γ_7 が局在軌道となる特別な値 θ_0 があり、 θ_0 の近傍に磁気秩序ベクトル (π, π) の反強磁性状態が、さらにその周辺に d 波超伝導状態がそれぞれ現れることを見出した。そして、115 系に対する θ が θ_0 に近い値を取ることから、115 系において、 θ のわずかな違いで T_c が大きく変化する可能性があることを指摘した

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ichikawa Akihiro, Hotta Takashi	4. 巻 87
2. 論文標題 Impurity Effects in Nodal Extended- and Nodeless-d-Wave Superconductors: Gap Symmetry of BiS2-Based Layered Superconductors	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 114706 ~ 114706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.114706	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 Yamamura Ryosuke, Hotta Takashi	4. 巻 88
2. 論文標題 Microscopic Theory of Γ Quadrupole Ordering in Pr Compounds on the Basis of a d - d Coupling Scheme	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 034715 ~ 034715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.034715	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 Suzuki Katsuhiko, Usui Hidetomo, Kuroki Kazuhiko, Nomoto Takuya, Hattori Kazumasa, Ikeda Hiroaki	4. 巻 88
2. 論文標題 Electronic Structure and Superconducting Gap Structure in BiS2-based Layered Superconductors	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 041008 ~ 041008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.041008	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 野本拓也, 服部一匡, 池田浩章	4. 巻 74
2. 論文標題 最近の研究から「多軌道・多自由度系超伝導体の対称性とノード構造」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 146-151
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 Hotta Takashi	4. 巻 86
2. 論文標題 Two-Channel Kondo Effect Emerging from Nd Ions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 083704 ~ 083704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.083704	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 Hattori Kazumasa, Nomoto Takuya, Hotta Takashi, Ikeda Hiroaki	4. 巻 86
2. 論文標題 Local Nodal Cooper Pairs in Multiorbital Systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 113702 ~ 113702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.113702	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 Kubo Katsunori, Hotta Takashi	4. 巻 969
2. 論文標題 Multipole interactions of 3 non-Kramers doublet systems on cubic lattices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012096 ~ 012096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012096	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 Hotta Takashi	4. 巻 536
2. 論文標題 Kondo effect in the seven-orbital Anderson model hybridized with 8 conduction electrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 203 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.07.064	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 Yamamura Ryosuke, Hotta Takashi	4. 巻 536
2. 論文標題 Mean-field theory for multipole ordering in f-electron systems on the basis of a j-j coupling scheme	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physica B: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 6~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2017.10.090	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 Kubo Katsunori, Hotta Takashi	4. 巻 95
2. 論文標題 Influence of lattice structure on multipole interactions in 3 non-Kramers doublet systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054425-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.054425	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 Matsui Dai, Hotta Takashi	4. 巻 30
2. 論文標題 Two-Channel Kondo Effect Emerging from Np and Pu Ions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011125-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011125	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 Suzuki Kohei, Hattori Kazumasa	4. 巻 89
2. 論文標題 Superconducting Correlations in the One-Dimensional Kondo Lattice Models under Magnetic Fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034703~034703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.034703	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 Ishitobi Takayuki, Hattori Kazumasa	4. 巻 88
2. 論文標題 Magnetoelectric Effects and Charge-Imbalanced Solenoids: Antiferro Quadrupole Orders in a Diamond Structure	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 063708 ~ 063708
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.063708	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 Hotta Takashi	4. 巻 89
2. 論文標題 Quantum Critical Point between Two-Channel Kondo and Fermi-Liquid Phases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114706 ~ 114706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114706	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 Tsunetsugu Hirokazu, Ishitobi Takayuki, Hattori Kazumasa	4. 巻 90
2. 論文標題 Quadrupole Orders on the fcc Lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 043701 ~ 043701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.043701	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30件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 石飛尊之, 服部一匡
2. 発表標題 ダイヤモンド構造上の反強四極子秩序と光学ジャイロトロピー効果
3. 学会等名 新学術領域研究 J-Physics トピカルミーティング ものづくりシリーズ 第3回「物質探索最前線」, 首都大学東京南大沢キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村憲吾, 堀田貴嗣
2. 発表標題 2軌道アンダーソンモデルの近藤効果とスピン・軌道感受率の研究
3. 学会等名 新学術領域研究 J-Physics トピカルミーティング ものづくりシリーズ 第3回「物質探索最前線」, 首都大学東京南大沢キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村憲吾, 堀田貴嗣
2. 発表標題 数値くりこみ群法による2軌道アンダーソンモデルの近藤効果の研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石飛尊之, 服部一匡
2. 発表標題 ダイヤモンド構造上の反強四極子秩序と光学ジャイロトロピー効果
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山村諒祐, 堀田貴嗣
2. 発表標題 Pr化合物における 3四極子秩序: フェルミ面構造と軌道密度
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石飛尊之, 服部一匡
2. 発表標題 ダイヤモンド構造上の四極子近藤格子モデルの平均場近似による解析と交差応答
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝尾義輝, 堀田貴嗣
2. 発表標題 j-j結合描像に基づくプルトニウム化合物の磁気異方性の理解
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta
2. 発表標題 Microscopic Theory of 3 Quadrupole Ordering in Pr Compounds on the Basis of a j-j Coupling Scheme
3. 学会等名 APS March meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山村諒祐, 堀田貴嗣
2. 発表標題 スピン・軌道相互作用のある7軌道ハバードモデルに基づく多極子秩序状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会, 岩手大学盛岡キャンパス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀田貴嗣
2. 発表標題 Nd系の2チャンネル近藤効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会, 岩手大学盛岡キャンパス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山村諒祐, 堀田貴嗣
2. 発表標題 j-j結合描像に基づくPr化合物の四極子秩序状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2018年第73回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀田貴嗣
2. 発表標題 重希土類系の2チャンネル近藤効果
3. 学会等名 日本物理学会 2018年第73回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta
2. 発表標題 Mean-field theory for multipole ordering in f-electron systems on the basis of a j-j coupling scheme
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017), プラハ, チェコ (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Hotta
2. 発表標題 Kondo Effect in the Seven-Orbital Anderson Model Hybridized with 8 Conduction Electrons
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2017), プラハ, チェコ (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Katsunori Kubo and Takashi Hotta
2. 発表標題 Multipole interactions of 3 non-Kramers doublet systems on cubic lattices
3. 学会等名 The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), イェーテボリ, スウェーデン (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryosuke Yamamura and Takashi Hotta
2. 発表標題 Mean-field phase diagram for multipole ordering in f2-electron systems on the basis of a j-j coupling scheme
3. 学会等名 J-Physics 2017 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena, 八幡平ロイヤルホテル, 岩手 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部一匡, 野本拓也, 堀田貴嗣, 池田浩章
2. 発表標題 結晶場準位構造による超伝導安定化機構
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松井大, 堀田貴嗣
2. 発表標題 パイエルス・アンダーソンモデルにおける電気双極子感受率の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2017年第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山村諒祐, 堀田貴嗣
2. 発表標題 平均場近似による 8ハバードモデルの多極子秩序の微視的理解
3. 学会等名 日本物理学会 2017年第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久保勝規, 堀田貴嗣
2. 発表標題 非クラマース二重項系の多極子相互作用
3. 学会等名 日本物理学会 2017年第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木浩平, 服部一匡
2. 発表標題 イジング異方性を持った横磁場中の一次元近藤格子模型における超伝導相関
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝尾義輝, 堀田貴嗣
2. 発表標題 プルトニウム化合物の超伝導の微視的理論: 2軌道モデルに基づく解析
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田貴嗣
2. 発表標題 2チャンネル近藤状態とフェルミ液体状態の狭間に現れる量子臨界点
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ishitobi and K. Hattori
2. 発表標題 Current-Induced Magnetization on a Diamond Structure under Antiferro Quadrupole Orders
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 K. Suzuki and K. Hattori
2. 発表標題 Superconducting Fluctuations in S=1 One-Dimensional Kondo Lattice Model under Transverse Magnetic Fields
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 D. Matsui and T. Hotta
2. 発表標題 Two-Channel Kondo Effect Emerging from Np and Pu Ions
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 K. Suzuki and K. Hattori
2. 発表標題 Superconducting fluctuations in S=1 one-dimensional Kondo lattice model under transverse magnetic fields
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田貴嗣
2. 発表標題 2チャンネル近藤状態，結晶場一重項状態及び近藤一重項状態の間の量子臨界点
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 堀川亮，堀田貴嗣
2. 発表標題 BiS2系層状超伝導体の超伝導転移温度に対する軌道分裂の効果
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 石飛尊之, 服部一匡
2. 発表標題 非磁性cubic項に誘起される新奇多極子秩序相
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京都立大学理学研究科物理学専攻強相関電子論研究室ホームページ
<https://scet-phys.wixsite.com/home/>
 東京都立大学理学研究科超伝導理工学研究センター
<http://www.tmu-beyond.tokyo/superconductivity-science-and-engineering/>

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	服部 一匡 (Hattori Kazumasa) (30456199)	東京都立大学・理学研究科・准教授 (22604)	

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