

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：22604

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20102008

研究課題名（和文）f 電子の多自由度性に創出する新奇な量子秩序と超伝導の理論

研究課題名（英文）Theory of exotic quantum order and novel superconductivity emerging from multi degrees of freedom of f electron

研究代表者

堀田 貴嗣 (HOTTA TAKASHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00262163

研究成果の概要（和文）：電子の見かけ上の質量が数百倍から千倍に増大する重い電子現象は希土類およびアクチノイド化合物で現れるが、これまで、電子の遍歴性と局在性の競合に基づいて理解されてきた。本研究では、電荷とスピンの加えて、軌道や格子の自由度も絡んだ電子の多自由度性を考慮した新型の重い電子形成機構を明らかにした。また、スピンと軌道が複合した多極子の秩序、価数揺らぎによる量子臨界現象、非調和格子振動による超伝導、軌道縮退系の軌道揺らぎ超伝導を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Heavy electron phenomena emerge in rare-earth and actinide compounds, when f electron exhibits huge effective mass which is a few hundred or thousand times as large as the bare electron mass. Thus far, the heavy electron state has been understood by the competition between itinerant and localized nature of f electron. In this research, we have clarified new heavy-electron mechanisms due to multi degrees of freedom such as f-electron orbital and phonon in addition to spin and charge. We have also developed the theory of ordering of multipole as spin-orbital complex, quantum criticality due to valence fluctuations, superconductivity due to anharmonic phonons, and orbital-fluctuation-induced superconductivity in orbital degenerate systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	25,800,000	7,740,000	33,540,000
2010年度	25,800,000	7,740,000	33,540,000
2011年度	22,000,000	6,600,000	28,600,000
2012年度	22,400,000	6,720,000	29,120,000
総計	98,800,000	29,640,000	128,440,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：4303・4302

キーワード：重い電子、超伝導、磁性、軌道縮退、ラットリング

1. 研究開始当初の背景

希土類やアクチノイドイオンを含む化合物では、局在的な f 電子が、周囲の配位子の s、p、d 電子との混成効果によって一部フェルミ準位上に引き摺り出されることがあ

る。その結果、f 電子は低温で幅の狭いバンドを形成し、多体電子状態を保ちながら集団的に動き出すことが明らかにされ、「重い電子」と呼ばれる新しい物理概念が生み出されてきた。このような局在 f 電子と遍歴 d 電子

(あるいは p、s 電子) との混成や f 電子間の強いクーロン反発の結果生じる特異な電子状態は、一般に「強相関電子状態」と呼ばれ、銅酸化物高温超伝導体に代表される 3d 電子系のそれとともに、近年、多くの実験的・理論的研究の中心課題となっている。

そのような強相関電子系においては、電子の遍歴性と局在性の競合が豊富な物理の源泉となる。特に f 電子系においては、f 電子の磁気モーメントが伝導電子のスピンによって打ち消される近藤効果と、伝導電子を媒介として働く f 電子間の RKKY 相互作用とが競合する。これによって、反強磁性相とフェルミ液体相の間の量子相転移が圧力などの外部パラメータによって制御される、いわゆる Doniach の相図が得られる。さらに、相転移が起こる量子臨界点近傍において異方的超伝導が発現すると理解され、量子臨界性が重い電子系を理解するカギとなっていた。

しかし、以上の基本概念は主に、Ce 系のようにクラマース縮退がある場合の研究がベースになっている。Pr や U 化合物のように、クラマース縮退がない場合でもしばしば重い電子は観測されるが、その理解は立ち遅れている。一般に、希土類およびアクチノイドイオンでは軌道自由度が存在するが、軌道の自由度を含めた近藤効果や量子臨界現象の理解が必要とされている。実際、多くの f 電子系に対する実験から、軌道縮退に起因する複数のフェルミ面を持つ電子状態が明らかになっており、強相関電子系の多様な物性を理解するには、軌道縮退を考慮することが本質的に重要であると考えられる。さらに f 電子の場合は、スピン・軌道相互作用が強いためスピンと軌道自由度が複合化した多極子自由度が活性になる。すなわち f 電子系では、遍歴・局在の二重性と電子の多自由度性が絡み合って、多彩な物性が発現することが期待されるのである。

また、電子の二重性と多自由度性に加えて、近年、f 電子とフォノンの相互作用に再び注目が集まっている。強相関電子系という言葉に端的に表れているように、重い電子形成機構はこれまで、もっぱらクーロン相互作用に基づいて理解されてきたが、最近、ラットリングと呼ばれる非調和性局所フォノンに由来する重い電子の可能性がクローズアップされている。電子の有効質量の著しい増加の原因として、当初から電子格子相互作用と電子間相互作用の二つが考えられていたのであるが、これまで後者が強調され、前者は副次的位置に止められるか、あるいは無視されることが多かった。しかし、電子・ラットリング相互作用の問題において再び、両者をもとに考える必要が明らかになりつつあるのである。

以上のように、f 電子系の物性研究におい

て、電子の二重性と多自由度性(多極子自由度、フォノン自由度)の絡み合いによって発現する多彩な物性や、新物質の発見に伴う新現象の理解が求められていた。

2. 研究の目的

理論班の研究目的は、本新学術領域研究の実験グループの実験結果の解釈はもちろん、場の量子論的手法や数値計算手法を駆使して、超伝導および磁性に関する新概念の確立を目指すことであった。具体的には以下の 6 項目である。

(1) 重い電子の形成機構: 電子ラットリング相互作用に起因した重い電子状態の理論的研究。多極子自由度に関する近藤効果の解明とその実験的検出方法の提案。

(2) 複雑な系の秩序: 複数の自由度が競合する系の秩序パラメータの解明。

(3) 重い電子系のエキゾチック磁性: 多極子秩序やスピン・電荷・軌道秩序の現象論および微視的理論による理解。また、多極子秩序相近傍の量子臨界物性の解明。

(4) 重い電子系の超伝導: 多極子揺らぎや電子ラットリング相互作用による新奇な超伝導の解明。空間反転対称性のない系における超伝導特性の解明。

(5) 重い電子系の量子輸送現象: 軌道自由度のある強相関電子系の輸送係数の計算と重い電子系の輸送実験結果の理解。電子ラットリング系の熱電効果の理論。

(6) 量子多体系の新しい計算手法: 新しい連続時間モンテカルロ法の開発と有効不純物問題への適用。密度行列繰り込み群法に基づく計算手法と動的物理量の計算スキームの開発。

3. 研究の方法

理論モデルを構築し、それを数値的手法と解析的手法を駆使して解析することにより、実験結果と比較しながら研究を遂行した。理論モデルとしては、アンダーソン模型、周期アンダーソン模型、ハバード模型が中心であるが、多くの場合、軌道自由度をきちんと考慮した。電子ラットリング系に対しては、局所非調和原子振動と電子の結合を考慮した。

モデルを数値的に解く手法としては、数値繰り込み群法、密度行列繰り込み群法、厳密対角化法、量子モンテカルロ法を用いた。解析的手法については、場の理論に基づく摂動論的方法(乱雑位相近似、揺らぎ交換近似)をはじめとして、動的平均場理論を用いた。また、新しい手法として連続時間モンテカルロ法を開発し、それを用いた研究を行った。

4. 研究成果

(1) に関して、上田や堀田らを中心に、公募研究の服部一匡氏も共同で、カゴ状物質

においてラットリングと呼ばれる内包イオンの非調和振動が関与する近藤効果の研究が進んだ。振動の自由度を考慮することにより、自動的に2つ以上の部分波が関与することになり、局在スピンを遮蔽する伝導電子のチャンネルは複数となる。フォノンを伴う混成と伴わない混成が拮抗するとき2チャンネル近藤効果が実現する。振動する磁性イオンの近藤効果の基底状態を数値繰り込み群の手法を用いて解析した結果を図1にまとめた。

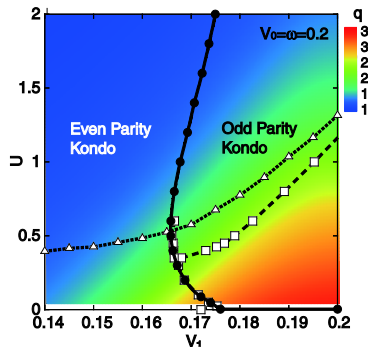


図1: 金属中で振動する磁性イオンの近藤効果の基底状態相図。

局在軌道のクーロン斥力 U が大きい場合は磁気モーメントが発生するが、それは基底状態で s 部分波、およびフォノンを伴う p 波の部分波によって遮蔽され、両者が拮抗するとき非フェルミ液体の2チャンネル近藤効果の不安定固定点を実現する。この分岐は弱結合領域まで連続的に存在し基底状態の二つの相の間の境界をなしている。2つの基底状態はパリティの違いによって特徴づけられる。弱結合領域の近藤効果は磁気モーメントではなく電気双極子モーメントの近藤効果および2チャンネル近藤効果として特徴づけられることが明らかになった。

三宅らは、新しい電荷近藤効果の理論を展開した。具体的には、主量子数の大きい電子配置をとるイオンでは電子間クーロン相互作用によるペアホッピング項が局所クーロン斥力に比べて無視できず、その項の多体効果によって電荷近藤効果が生じることを数値繰り込み群の方法で示した。また、電荷近藤効果とスピン近藤効果を示す領域の境界で新しいタイプの非フェルミ液体状態が存在することがわかった。

川上らは、フラストレーションの強い電子系において、モット転移近傍の金属相に重い電子が形成されることを、三角格子およびカゴメ格子ハバード模型にクラスタ動的平均場理論を適用して示した。

小形らは、軌道自由度をもつ強相関係である $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の電子状態解析を行った。具体的には、 $x=0.5$ 近傍の重い電子の挙動の起源を理解するため、 $x < 1.5$ で誘起される RuO_6 八

面体歪みの一種である rotation の効果を Ru の $4d$ 軌道と 0 の $2p$ 軌道の波動関数の重なり積分の変化として考慮した、 Ru の t_{2g} 軌道からなるハバード模型を用いて研究を行った。その結果、この系の重い電子が、全軌道が絶縁体になるモット絶縁体への臨界性として有効質量を増大させる $d_{xz} \cdot d_{yz}$ 軌道と、複数のモードのスピン揺らぎの増大による臨界的な電子・正孔散乱として有効質量を増大させる d_{xy} 軌道によることを明らかにした。

(2) については、トポロジカル相との関連で研究が進んだ。整数スピンの1次元量子反強磁性体や1次元近藤格子系などにおいて、ハルデン相と呼ばれるギャップを持つ相が存在することが知られているが、押川らは、そのハルデン相を保護する対称性を明らかにした。これらの対称性によるハルデン相の保護は、物理的にはそれぞれ別の機構によって解釈できるが、それら全てのケースがエンタングルメントスペクトルの二重縮退によって特徴づけられることも示した。重い電子そのものの秩序にまでは研究が至らなかったが、複雑な相を特徴付けるトポロジカル量の概念の確立に貢献することができた。

(3) については、多極子秩序の理解が進んだことが大きい。楠瀬と倉本は、マクスウェル方程式を満たす物理的な電気・磁気多極子と通常用いられる等価演算子との関係を明らかにし、等価演算子法を一般の多極子に拡張することに成功した。楠瀬は、A01-001 班の播磨氏と共同で、隠れた秩序の代表物質 URu_2Si_2 の有力な秩序変数とその帰結としての物性、および、秩序下での超伝導対称性について詳細に考察し、実験結果の合理的説明を与えた。

倉本らは、非クラマース2重項を結晶場基底状態にもつ近藤格子を、連続時間量子モンテカルロ (CT-QMC) 法と動的平均場理論

(DMFT) を組み合わせて研究し、新しいタイプの秩序状態を見出した。モデルとして、伝導帯が非クラマース2重項に対応して軌道縮退しており、サイトあたり1個の伝導電子があるものとする。この場合、時間反転対称性は破れているが、磁気モーメントのない秩序が発生することを見出した。この秩序では、局在電子の擬スピン (軌道モーメント) と伝導電子の擬スピンの内積が2つの軌道で異なる。これは遍歴八極子の秩序変数に対応する。この複合秩序は隠れた秩序の候補になる。さらに、この複合秩序は、伝導電子の軌道モーメントの奇振動数秩序に対応している。本結果は複合秩序と奇振動秩序の関係を具体的に示したものである。

また、倉本らは、偶数電子の結晶場状態を持つ一般化近藤格子の新しい秩序状態に関して、CT-QMC 法と DMFT を組み合わせて、 $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ のスカラー秩序の微視的理解を達成

した。具体的には、結晶場1重項と近藤1重項のサイトが交替的に整列したモデルを提案し、静的・動的物理量が実験結果と定性的に対応することを示した。上記の交替秩序の転移点以下で、急速に重い電子のエネルギーバンドが形成されることを見出した。これは、通常の近藤格子の重いバンド形成が電子秩序とは関係なく徐々に生じることと対照的である。

三宅は、公募研究の渡辺真仁氏と共同で、新しい量子臨界性の研究を進めた。局在f電子と伝導電子のクーロン相互作用 U_{fc} を含む拡張周期アンダーソンモデルはf電子の価数転移の臨界点の存在を内包するが、臨界温度がゼロの近傍で新しいクラスの量子臨界性を示すことを、スレーブボソンの平均場により局所相関を取り込んだ上で価数揺らぎに関するモード結合理論に基づいて示した。これは、 β -YbAlB₄やYbRh₂Si₂などで観測されていた反強磁性量子臨界点の振る舞いとは異なる量子臨界性を統一的に説明できる理論であり、当該分野のブレークスルーと云える。

さらに、三宅らは、Kondo-Yosida一重項と f^2 の結晶場一重項との競合により生じる量子臨界点近傍では磁場に鈍感な非フェルミ液体状態が存在することを、正方対称をもつ2軌道アンダーソンモデルに対する数値繰り込み群の方法により示した。これはUBe₁₃において観測された比熱係数の対数的温度依存性が磁場に鈍感な事実を理解するための出発点となり得る成果である。

(4)について、川上らは、公募研究の藤本聡氏と共同研究で、空間反転対称性の欠如した超伝導体CeRhSi₃やCeIrSi₃の上部臨界磁場の異常なふるまいの起源を、反強磁性量子臨界点近傍での量子ゆらぎに基づき明らかにした。

三宅は、渡辺氏と共同で、CeRhIn₅に加圧したときに $P=2.35$ GPa近傍で生じるdHvA振動の周期の変化(フェルミ面の変化)を、Ceの価数の急激なクロスオーバーに伴い反強磁性が消失することで起こることを説明した。具体的には、f-cクーロン相互作用 U_{fc} を含む拡張周期アンダーソンモデルにスレーブボソン近似を適用し、反強磁性磁化に関する平均場近似の範囲で示した。

堀田は、 β パイロクロア酸化物を念頭において、電子・ラットリング系の超伝導を研究した。その結果、非調和性の増大によってゲストイオンに対するポテンシャルの底が平らで幅が広くなると、系が弱結合から強結合状態に移り変わり、質量増強因子が増大するとともに超伝導転移温度が上昇することを見出した。

2007年に発見された鉄系超伝導体は、複数フェルミ面をもつ超伝導という意味で、重い

電子系との接点があり、本新学術領域研究でも、紺谷を中心に理論研究が進んだ。鉄系超伝導体はd電子の5軌道2次元系であり、3次元系である重い電子系よりも理論解析が容易であるという利点がある。ゆえに、鉄系超伝導体の研究は、重い電子系における多重極秩序(揺らぎ)を理解する上で貴重な知見をもたらすものと期待できる。特に、鉄系超伝導体の正常状態において、軌道揺らぎ(電荷四重極揺らぎ)の重要性を示唆する実験が相次いで報告された。これらはクーロン相互作用 U の乱雑位相近似(RPA)では理解できない。紺谷らは、電子格子相互作用により四重極相互作用 g が生じることを見出し、軌道揺らぎの発現を議論した。得られた U - g 状態相図を図2に示す。また、軌道揺らぎにより発現が期待される符号反転のないS波超伝導状態(S_{++} 波状態)の不純物効果や中性子散乱も議論した。

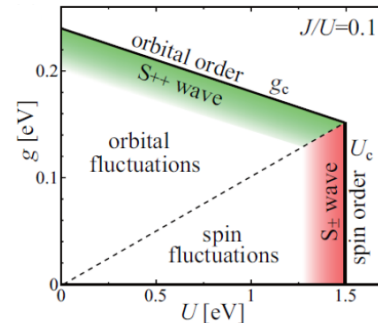


図2 クーロン相互作用 U +四重極相互作用 g 模型における g - U 相図。

(5)に関しては、重い電子系の輸送係数の計算にまでは研究が至らなかったが、一定の進展があった。三宅は、公募研究の服部一匡氏と共同で、2不純物アンダーソンモデルのKondo-Yosida一重項とRKKY一重項との競合により生じる量子臨界点の近傍において、磁化率や比熱係数のみならず、f電子の価数感受率が発散的に増大することを数値繰り込み群の方法を用いて示した。これは、いくつかの重い電子化合物の加圧下で反強磁性転移温度 T_N と近藤温度 T_K が一致する圧力付近で残留抵抗が顕著なピーク構造を示す実験的事実を定性的に説明する。

また、輸送現象を考える上で、保存則を満たすようにバーテックス補正を考慮することが重要になってくるが、鉄系超伝導体を舞台に、多軌道系におけるバーテックス補正の研究に重要な進展があった。紺谷らは、平均場近似を超えた多体効果であるバーテックス補正によって軌道揺らぎが出現する機構を見出した。

一方、楠瀬は、局所バーテックス近似により、パウリ原理を満たす自己無撞着な二体揺らぎの微視的な数値手法を開発し、中相関領域まで有効な近似であることを確認した。ま

た、量子臨界点近傍で現象論的 SCR 理論を再現することを示した。

(6) に関して、柴田らは、長距離相互作用のある電子系の数値計算の精度を向上させるために、エネルギースケールを空間的に変化させ、フェルミ面近傍の電子状態を稠密にするとともに、端の状態をバルクの部分とエネルギー的に分離する新しい計算方法を考案した。この方法は、並進対称な波動関数を端のあるハミルトニアンから求める方法を応用したもので、エネルギースケールを空間的に変化させているにも関わらず、化学ポテンシャルを適切に与えることで一様周期系の並進対称な波動関数を得ることができる。これにより、サイズ効果と境界の効果を同時に消去し、従来の方法では困難であった有限サイズの影響を受けていない電荷やスピンの感受率等の外場に対する正しい応答関数の計算が可能となった。

楠瀬と倉本は、公募研究の大槻純也氏と共同で、CT-QMC 法を拡張発展させ、DMFT と組み合わせ、近藤格子模型（置換希釈系を含む）の相図（図 3）、特に 1/4 フィリングに現れる電荷秩序相の存在を明らかにした。また、温度依存性を詳細に検討し、準粒子形成による小さなフェルミ面から大きなフェルミ面への発達を明瞭に示した。

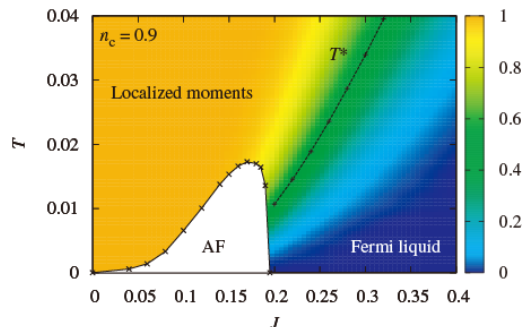


図 3 近藤格子模型の相図。

これまで、当初計画に基づいて、理論班の研究成果を紹介してきた。ページ数の関係で全ての成果を記すことはできなかったが、当初計画は概ね実行されたと考えている。しかし、先に述べたとおり、(5) の重い電子系の輸送現象の研究への取り組みが遅れた。

今後について、(5) とも関連して、電子・ラトリング系の熱電効果の理論研究が重要な問題であると考えている。また、ウラン系の超伝導の理解は残された課題であり、ネプツニウム系やプルトニウム系の超伝導と合わせて、微視的観点からの研究が待ち望まれている。さらに、量子臨界現象と関連して、今後、多極子秩序相近傍の超伝導にも研究の手がのびていくことを期待している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 185 件)

① S. Onari and H. Kontani: “Self-consistent Vertex Correction Analysis for Iron-based Superconductors: Mechanism of Coulomb Interaction-Driven Orbital Fluctuations”, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 137001-1-5.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.137001

② T. Hotta and K. Ueda: “Electric Dipolar Kondo Effect Emerging from a Vibrating Magnetic Ion”, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 247214-1-5.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.247214

③ S. Hoshino, J. Otsuki and Y. Kuramoto: “Diagonal Composite Order in a Two-Channel Kondo Lattice”, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 247202-1-5.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.247202

④ K. Oshiba and T. Hotta: “Strong-Coupling Theory of Rattling-Induced Superconductivity”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 094712-1-8.

DOI: 10.1143/JPSJ.80.094712

⑤ N. Shibata and C. Hotta: “Grand canonical finite-size numerical approaches: A route to measuring bulk properties in an applied field”, Phys. Rev. B **86** (2011) 041108-1-5 (R).

DOI: 10.1103/PhysRevB.86.041108

⑥ S. Watanabe and K. Miyake: “Quantum Valence Criticality as an Origin of Unconventional Critical Phenomena”, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 186403-1-4.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.186403

⑦ Y. Tada, N. Kawakami and S. Fujimoto: “Spin fluctuations and superconductivity in noncentrosymmetric heavy fermion systems CeRhSi₃ and CeIrSi₃”, Phys. Rev. B **81** (2010) 104506-1-16.

DOI: 10.1103/PhysRevB.81.104506

⑧ H. Kusunose: “Self-Consistent Fluctuation Theory for Strongly Correlated Electron Systems”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 094707-1-13.

DOI: 10.1143/JPSJ.79.094707

⑨ F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg, and M. Oshikawa: “Entanglement spectrum of a topological phase in one dimension”, Phys. Rev. B **81** (2010) 064439-1-10.

DOI: 10.1103/PhysRevB.81.064439

⑩ H. Watanabe and M. Ogata: “Fermi-Surface Reconstruction in the Periodic Anderson Model”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 024715-1-8.

DOI: 10.1143/JPSJ.78.024715

〔学会発表〕(計 410 件)

- ① M. Oshikawa: “Ground-state Energies of Spinless Free Fermions and Hard-core Bosons”, KITP Program: “Frustrated Magnetism and Quantum Spin Liquids: From Theory and Models to Experiments”, August 30, 2010, University of California, Santa Barbara, U. S. A. (招待講演)
- ② H. Kontani: “Orbital fluctuation theory in Fe-based superconductors”, 26th International Conference on Low Temperature Physics, August 13, 2011, Beijing, P. R. China. (招待講演)
- ③ H. Kusunose: “Antiferro Hexadecapole Scenario for the Hidden Order in URu_2Si_2 ”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2011), August 31, 2011, Cambridge, UK.
- ④ 堀田貴嗣: 「近藤効果の新展開: 電子とラットリングの新たな出会い」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (シンポジウム講演)
- ⑤ Y. Kuramoto: “Nature of antiferromagnetism in Kondo lattice”, Japan-Germany Seminar on New quantum states and phenomena in condensed matter, September 13, 2010, Hiroshima. (招待講演)
- ⑥ K. Miyake: “Roles of critical valence fluctuations in Ce- and Yb-based heavy fermion metals”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2010), July 1, 2010, Santa Fe, New Mexico, U. S. A. (招待講演)
- ⑦ 川上則雄: 「多バンド相関電子系における多体効果」, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29 日, 立教学院池袋キャンパス (シンポジウム講演)
- ⑧ 上田和夫: 「近藤効果の系譜 - 重い電子系と量子ドット -」, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29 日, 立教学院池袋キャンパス (レビューセッション講演)

〔図書〕(計 5 件)

- ① 上田和夫、朝倉書店、「物性物理学ハンドブック」、2012 年、pp.175-182
- ② 佐藤憲昭、三宅和正、名古屋大学出版会、「磁性と超伝導の物理—重い電子系の理解のために」、2012 年、400 ページ
- ③ 上田和夫、裳華房、「磁性入門」、2011 年、167 ページ
- ④ 倉本義夫、朝倉書店、「量子多体物理学」、2009 年、179 ページ
- ⑤ Y. Kuramoto and Y. Kato, Cambridge University Press, “Dynamics of One-Dimensional Quantum Systems: Inverse-Square Interaction Models”, 2009

年, 488 ページ

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

URL <http://www.heavy-electrons.jp/>

ひらめき☆ときめきサイエンス

「ようこそ、マテリアルサイエンスの世界へ
～超伝導・超流動と磁石の不思議発見～」
実施代表者: 堀田貴嗣、2012 年 11 月 3 日、
首都大学東京南大沢キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 貴嗣 (HOTTA TAKASHI)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 00262163

(2) 研究分担者

楠瀬 博明 (KUSUNOSE HIROAKI)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 00292201

柴田 尚和 (SHIBATA NAOKAZU)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 40302385

押川 正毅 (OSHIKAWA MASAHI)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号: 50262043

紺谷 浩 (KONTANI HIROSHI)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号: 90272553

(H20: 連携研究者)

川上 則雄 (KAWAKAMI NORIO)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号: 10169683

(H20: 連携研究者)

倉本 義夫 (KURAMOTO YOSHIO)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号: 70111250

(H20: 連携研究者)

上田 和夫 (UEDA KAZUO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号: 70114395

(H20-H21: 連携研究者)

(3) 連携研究者

三宅 和正 (MIYAKE KAZUMASA)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号: 90109265

小形 正男 (OGATA MASAO)

東京大学・理学研究科・教授

研究者番号: 60185501