

自己評価報告書

平成 23 年 4 月 25 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・准教授

研究者番号：0026216

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. 研究計画の概要

近年の物質開発の急速な進展や測定装置の長足の進歩により、f 電子系において新しい超伝導や磁性現象が次々と発見されている。そのような多様な秩序相を理解するには、遍歴・局在の対立という従来の概念では不十分であり、電荷とスピンに f 電子の軌道や格子の自由度も絡み合った多自由度性が重要な要素となる。本計画研究では、新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」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した研究を行う。特に、長年の問題であるクラマース縮退がない場合の重い電子の形成機構を多極子の観点から明らかにし、フォノン自由度による重い電子形成の可能性を探究する。超伝導に関しては、多極子揺らぎや電子ラットリング相互作用による特異な超伝導、反転対称性のない系の超伝導の解明が重要な問題である。さらに、多自由度電子系の量子輸送現象の研究、秩序相の検出に関わる基礎理論研究、d 電子系も含めた軌道縮退電子系の重い電子状態の研究なども行う。また、数値繰り込み群法や動的平均場理論の改良、連続時間モンテカルロ法の発展など、新しい理論計算手法の開発も行う。

2. 研究の進捗状況

(1) 電子・ラットリング系の研究では、電子比熱係数を数値繰り込み群によって解析し、ラットリングによる重い電子状態では近藤温度に逆同位体効果が出現することを示した。また、金属中で振動する磁性イオンに対する拡張アンダーソンモデルを導出し、s 波近藤効果、p 波近藤効果、Yu-Anderson 型強結

合系の近藤効果の関連を明らかにした。

(2) 複数の自由度が競合する系の秩序変数の研究では、エンタングルメントスペクトルを用いた量子相の同定を提案し、特に 1 次元系ではスペクトルの縮退が非自明な相を特徴付けることを示した。

(3) 重い電子系の磁性と超伝導の研究では、 β -YbAlB₄ や YbRh₂Si₂ など観測されている新しいクラスの非フェルミ的振舞は価数の量子臨界現象として総合的に矛盾なく理解できることを示した。また、希土類化合物における重い電子および近藤絶縁体形成に対する伝導電子間相互作用の効果を明らかにした。さらに、空間反転対称性の欠如した超伝導体 CeRh(Ir)Si₃ や強磁性超伝導体 UCoGe の異常な振舞いの起源を明らかにした。

(4) 軌道自由度のある強相関電子系の研究では、鉄系超伝導体における軌道揺らぎの起源として電子・格子相互作用に着目し、軌道揺らぎの理論を提唱した。また、これらの物質では、軌道自由度に由来する異常ホール効果やスピンホール効果といった特異な量子輸送現象が発現することを示した。

(5) 量子多体系の新しい計算手法の開発では、連続時間量子モンテカルロ法のアルゴリズムを拡張して、近藤格子を一般化したモデルへ適用できるようにした。

3. 現在までの達成度

② おおむね順調に進展している。

(理由) 中間評価では、“前半の取り組みとしては質、量ともに十分な研究成果が上がっている”として A 評価であった。特に、“ラットリング”と呼ばれる結晶構造中の「かご」に閉じ込められた原子の非調和振動が生み出す新現象に関しては、着実な進展が見られ

る”とのコメントは、本計画班の貢献が評価されている。また、“本領域独自の博士研究員登用法”が評価されたが、これは、本計画班で編み出した公募制度に基づくポストクの採用である。

4. 今後の研究の推進方策

さまざまなf電子モデルを、場の量子論的手法や数値計算手法を駆使して解析し、以下のような点を明らかにするとともに、新しい数値計算手法の開発も行う。

- (1) ラットリングに起因した重い電子の形成機構：引き続き、非調和格子振動（ラットリング）による重い電子状態とその性質を、数値繰り込み群法や動的平均場近似法などを用いて調べる。
- (2) 複数の自由度が競合する系の秩序パラメータの解明：新たに開発したエンタングルメントスペクトルの構造による相の分類を近藤格子模型に適用し、重い電子系の新奇な秩序を同定する。
- (3) 重い電子系のエキゾチック磁性：引き続き、多極子秩序相とその近傍の量子臨界物性を現象論と微視的理論の両面から明らかにする。また、多軌道電子系における磁気・軌道・電荷秩序の競合や共存を、揺らぎ交換近似や動的平均場近似を用いて調べる。
- (4) 軌道自由度のある強相関電子系の超伝導の理論：引き続き、f電子系に対する軌道縮退周期アンダーソンモデルや多軌道ハバード模型を、乱雑位相近似や揺らぎ交換近似、動的平均場近似あるいは変分モンテカルロ法などを駆使して解析し、その超伝導の特徴を明らかにする。
- (5) 軌道自由度のある強相関電子系の量子輸送現象の解明：多軌道ハバード・ホルスタイン模型を揺らぎ交換近似に基づいて解析し、電気抵抗やホール係数などの各種輸送係数の計算を行う。
- (6) 量子多体系の新しい計算手法の開発：磁場中量子2次元系に応用してきた密度行列繰り込み群の新しい計算法を重い電子系に適用し、重い電子系における量子相転移の特徴を明らかにする。

5. 代表的な研究成果

(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 89 件)

- ① H. Kusunose: “Self-Consistent Fluctuation Theory for Strongly Correlated Electron Systems”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 094707-1-094707-13.
- ② H. Kontani and S. Onari: “Orbital-Fluctuation-Mediated Superconductivity in Iron Pnictides:

Analysis of the Five-Orbital Hubbard-Holstein Model”, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 157001-1-157001-4.

- ③ F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg, and M. Oshikawa: “Entanglement spectrum of a topological phase in one dimension”, Phys. Rev. B **81** (2010) 064439-1-064439-10.
- ④ N. Shibata and K. Nomura: “Fractional Quantum Hall Effects in Graphene and Its Bilayer”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 104708-1-104708-7.
- ⑤ H. Watanabe and M. Ogata: “Fermi Surface Reconstruction in the Periodic Anderson Model”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 024715-1-024715-8.

[学会発表] (計 182 件)

- ① 堀田真嗣: 「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)
- ② 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)
- ③ 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)
- ④ 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)
- ⑤ 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 2 件)

- ① 倉本義夫, 朝倉書店, 「量子多体物理学」, 2009 年, 179 ページ
- ② Y. Kuramoto and Y. Kato, Cambridge University Press, “Dynamics of One-Dimensional Quantum Systems: Inverse-Square Interaction Models”, 2009 年, 488 ページ

[その他]

ホームページ

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