

自己評価報告書

平成 23 年 5 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20224008

研究課題名（和文） 重い電子化合物の新奇超伝導状態の解明

研究課題名（英文） Novel superconducting states of heavy-fermion compounds

研究代表者

松田 祐司 (MATSUDA YUJI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50199816

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：重い電子、人工超格子、新奇超伝導

1. 研究計画の概要

f 電子を持つ Ce などの希土類元素や U などのアクチノイド元素を含む金属間化合物では、 f 電子と伝導電子の近藤効果による混成のために狭いバンドが形成され、電子の有効質量が自由電子の 100 倍以上重くなったいわゆる「重い電子状態」が実現される。このような系で超伝導電子対が形成されると、強いクーロン斥力のため通常の超伝導とは異なる対称性を持った異方的な超伝導状態が実現する。実際、重い電子系化合物では、これまでに異常な超伝導相が発見されており、その超伝導状態は多種多様で想像していたものよりもはるかに興味あるものとなっている事が明らかになってきた。さらにその超伝導状態はいわゆる磁氣的秩序状態（量子臨界点）近傍で生じることが多く、超伝導の舞台となるノーマル状態も従来のフェルミ液体とは大きく異なる振る舞いを示すこともわかってきている。

本研究の目的は、上述した超伝導状態を解明するために、これまでに前例のない重い電子系の人工超格子を作製して新奇超伝導状態を創出すること、さらに従来の実験手法の分解能を上げるだけでなく新しい実験手法を開発し、様々な新奇超伝導状態やノーマル状態における異常な電氣的、磁氣的状態を解明することである。

2. 研究の進捗状況

(1) 重い電子の人工超格子による 2 次元閉じこめ

CeIn₃/LaIn₃人工超格子の作製を分子線ビームエピタキシー法を用いて行った。超高真空中で Ce, La, In をエピタキシャル成長させた。こうして出来た超格子に対し主として電

気抵抗、磁気抵抗、ホール効果の輸送現象の測定を行った。その結果 3 次元では反強磁性秩序を示した CeIn₃ は膜圧の減少に伴い、転移温度が下降し 2 枚膜になったところで反強磁性が消失し、その近辺で非フェルミ流体的な挙動が観測された。さらに CeCoIn₅/YbCoIn₅人工超格子薄膜のエピタキシャル成長にも成功した。世界初の例となる大きな成果として、①Ce系化合物のエピタキシャル成長と 2 次元人工超格子②重い電子の量子臨界性の次元制御③2 次元近藤格子の実現④重い電子の 2 次元超伝導と異常に強い対形成相互作用を持つ超強結合超伝導の人工的創出、に成功した。

(2) URu₂Si₂の隠れた秩序相の解明

URu₂Si₂は 18K において 2 次相転移を示すが、相転移温度以下は隠れた秩序相と呼ばれ、どのような秩序状態が形成されているのか四半世紀の謎であった。我々は磁気トルクを結晶軸に対し様々な方向に磁場をかけて超高度で測定する方法を開発し、隠れた秩序相においてどのような対称性が破れているのかを解明した。最も大きな成果は、隠れた秩序において電子系の回転対称性が破れていることを解明したことである。これは、隠れた秩序相の秩序変数を決定できる極めて重要な鍵となると考える。

(3) CeCoIn₅における FFL0 状態の解明

パウリ常磁性効果の強い超伝導体では、上部臨界磁場近傍において超伝導電子対が有限の運動量を持った電子対に相転移を起こし、超伝導秩序変数が空間的に変調を受けた FFL0 状態が実現されることが理論的に予測されていた。この状態は 40 年前に予測され

ていたものの、これまでその強い証拠がなかった。重い電子系超伝導体CeCoIn₅では、低温強磁場中において新しい超伝導相が存在することが知られており、FFLO状態にある可能性が示唆されていた。我々は超純良単結晶試料を作製し、微小ホールプローブと核磁気共鳴法を用いて低温強磁場相の磁気構造と核磁気共鳴スペクトラムを詳細に解析した。その結果CeCoIn₅の低温強磁場相はFFLO相であり、FFLO状態はSDW状態と共存している強い証拠を得た。これは40年来その存在が予言されていた超伝導の大きな問題の一つを解決する大きな一歩になると考える。

3. 現在までの達成度

- ①当初の計画以上に進展している。
(理由)

目的の一つである人工超格子の作製に関しては、目標通りの2次元近藤格子の作製を達成することが出来、超伝導化にも成功している。さらに2次元重い電子系超伝導超格子は、バルクのものよりも強い引力相互作用を持った強結合超伝導体であることが現在明らかになりつつあり、当初全く予期せぬ振る舞いを示す非常に興味ある結果が得られている。もう一つの目的である重い電子系の新奇超伝導状態の解明に関しては、CeCoIn₅のFFLO状態やUCoGeの強磁性超伝導状態の研究などで大きな成果も得られ、十分に目標を達成しつつあると考える。このように、両者ともに順調に研究が進展しており、当初の目標を十分に達成できる成果を得ることが出来ると考える。

4. 今後の研究の推進方策

基本的に当初の研究計画・方法を変更することなく、人工超格子の作製、新奇超伝導状態の解明、重い電子の新しい秩序状態の研究、鉄ヒ素系化合物の研究、量子スピン液体の研究を行いたい。

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37件)

- ① "Rotational Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of URu₂Si₂", R. Okazaki, T. Shibauchi, H. J. Shi, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, and Y. Matsuda, Science 331, 439-442 (2011). 査読有
- ② "Highly Mobile Gapless Excitations in a Two-Dimensional Candidate Quantum Spin Liquid", M. Yamashita, N. Nakata, Y. Senshu, M. Nagata, H. M. Yamamoto, R. Kato, T. Shibauchi, and Y. Matsuda,

- Science 328, 1246-1248 (2010). 査読有
- ③ "Tuning the Dimensionality of the Heavy Fermion Compound CeIn₃", H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, H. Kontani, T. Terashima, and Y. Matsuda, Science 327, 980-983 (2010). 査読有
- ④ "Anisotropic Magnetic Fluctuations in the Ferromagnetic Superconductor UCoGe Studied by Direction-Dependent ⁵⁹Co NMR Measurements", Y. Ihara, T. Hattori, K. Ishida, Y. Nakai, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh, Phys. Rev. Lett. 105 (2010). 査読有
- ⑤ "Microwave Penetration Depth and Quasiparticle Conductivity of PrFeAsO_{1-y} Single Crystals: Evidence for a Full-Gap Superconductor", K. Hashimoto, T. Shibauchi, T. Kato, K. Ikada, R. Okazaki, H. Shishido, M. Ishikado, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, S. Shamoto, and Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett. 102, 017002 (2009). 査読有

[学会発表] (計46件)

- ① Yuji Matsuda (Organizer), "Determining gap nodal structure in isovalent doped BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂" and "Summary talk", Iron-based superconductors, Santa Barbara, California, USA, January 9-21, 2011.
- ② Yuji Matsuda, "Evolution of transport properties, Fermi surface, magnetic properties and superconducting gap structure of BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", Workshop on Emergent Quantum States in Complex Correlated Matter, Dresden, Germany, August 23-27, 2010.
- ③ Yuji Matsuda, "Elementary Excitations of Two-Dimensional Quantum Spin Liquid", Workshop on Principles and Design of Strongly Correlated Electronic Systems, Trieste, Italy, August 8-13, 2010.
- ④ Yuji Matsuda, "Two-Dimensional Confinement of Heavy Fermion in Artificial Superlattice", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Santa Fe, New Mexico, USA, June 27-July 2, 2010.
- ⑤ Yuji Matsuda, "Heavy Fermions in Flatland", International Workshop on Superconductivity in Reduced Dimensions, Salzburg, Austria, May 4-8, 2010.
- ⑥ Yuji Matsuda, "Quantum Critical Phenomena and Unconventional Superconductivity in Fe-pnictides", American Physical Society March Meeting, Portland, Oregon, USA, March 15-18, 2010.