

重い電子化合物の新奇超伝導状態の解明

Novel superconducting states of heavy-fermion compounds

松田祐司 (MATSUDA YUJI)

京都大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

本研究ではこれまでに前例のない、f 電子を含む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。

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. 研究開始当初の背景

f 電子を含むいわゆる重い電子系化合物では、最も電子相関の強い金属状態が実現される。この系では異方的超伝導状態や、非フェルミ流体的挙動、量子臨界現象など様々な興味ある振る舞いが観測される。これまで知られている重い電子系化合物はすべて3次元の電子構造を持っていた。

2. 研究の目的

一般に2次元系では、相互作用がゆっくりと減衰するために、3次元では観測されなかった現象が観測される。本研究の目的は、重い電子を2次元空間に閉じこめる試みを行うことである。またその他にも、様々な重い電子化合物で観測される新奇超伝導状態を様々な方法で研究を行う事を目的とする。

3. 研究の方法

MBEによりCe系化合物と通常の金属を交互に積層成長させた人工超格子を作製することにより、重い電子を2次元に閉じこめる。主として輸送現象の測定により、物性を測定する。

4. これまでの成果

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。さらに最近では 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、(1)Ce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 (3)2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。

URu₂Si₂ の隠れた秩序相の解明の研究を行った。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感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。これは四半世紀の謎であった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。

UCoGe の強磁性超伝導の研究を行った。UCoGe では強磁性と超伝導が共存していることが知られている。しかしながらこの共存が微視的なレベルで共存しているのかどうか、論争になっていた。我々は核磁気共鳴法によりこの系のノーマル状態と超伝導状態の詳細な研究を行った。その結果強磁性と超伝導はミクロなレベルで共存すること。そしてノーマル状態におけるイジング的な磁気揺らぎが超伝導発現機構と密接に関係していることを示した。これらの結果は、強磁性超伝導のミクロな発現機構と新奇超伝導状態を理解する上で重要である。

CeCoIn₅ における FFL0 状態の研究を行った。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、FFL0 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 FFL0 相であり、FFL0 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。

これらの他に鉄系超伝導体の研究を行い、超伝導ギャップ構造の決定、磁気量子臨界点の存在を実験的に示した。これは鉄系超伝導体の超伝導発現機構を知る上で重要である。

また 2 次元 3 角格子上で実現される量子スピン液体状態における極低温における素励起の研究を行った。その結果ギャップレスでほとんど散乱を受けない励起が存在することを明らかにした。これは未知の量子凝縮体を理解する上で鍵となる実験結果である。

5. 今後の計画

これまでの研究で生じた問題は基本的にほぼ解決できており、順調に研究が進んでいる。さらに当初の目標を超える研究の進展があり、予定以上の成果を得ることが出来たと考える。平成 23 年度及びそれ以降は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。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

"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).

"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).

"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).

"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).

"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).

ホームページ等

<http://kotai2.scpphys.kyoto-u.ac.jp/index.php>