

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 10 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） 重い電子系化合物の新奇超伝導状態の解明

研究課題名（英文） Novel superconducting state 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

研究成果の概要（和文）：本研究においては分子線エピタキシー法により f 電子からなる重い電子を 2 次元に閉じ込めることに成功した。そして CeIn₃/LaIn₃ 超格子において量子臨界性の次元制御に初めて成功しただけでなく CeCoIn₅/YbCoIn₅ 超格子において 2 次元の重い電子を超伝導にすることにも成功した。2 次元に閉じこめた重い電子の超伝導は極めて特異なものであることを発見した。

研究成果の概要（英文）：We have succeeded a two dimensional confinement of heavy fermion by using molecular beam epitaxy technique. We fabricate superlattices of CeIn₃/LaIn₃ and CeCoIn₅/YbCoIn₅. In the former, we have succeeded a dimensional tuning of the quantum criticality. In the latter, we found that two dimensional heavy fermion exhibit highly unusual superconductivity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	54,000,000	16,200,000	70,200,000
2009年度	48,800,000	14,640,000	63,440,000
2010年度	40,800,000	12,240,000	53,040,000
2011年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2012年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
総計	165,200,000	49,560,000	214,760,000

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：強相関係

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、電子の有効質量が自由電子の数百倍に達する。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 次元的な電子構造を持っていた。実際、銅酸化物高温超伝導体や、鉄ヒ素系高温超伝導体、有機超伝導体は 2 次

元的な層状構造を持っておりこれらの系では、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様々な興味ある超伝導状態が観測されている。

2. 研究の目的

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し、さらにこれまで類を見ない

新しい実験手法を開発することである。特に以下の2つの研究に主眼を置く。

1) 重い電子系化合物の人工超格子を分子線エピタキシー法(MBE)を用いて作製することにより、自然界に存在しない低次元強相関電子系を創出し、その物性についての詳細な研究を行う。これまでに発見されている重い電子系化合物はすべて3次元物質であり、重い電子を2次元に閉じこめる試みは、これまで国内外で前例が無くそのような電子系がどのような物性を示すかは、今のところほとんど理解されていない。2次元の重い電子系の問題は、2次元近藤格子系における磁性、超伝導、量子臨界性、非フェルミ流体的振る舞いといった量子多体問題の最も基本的な問題を含んでいる。電子は狭いところに閉じこめられると相互作用がより強くなるため、3次元より2次元へと低次元化することで相互作用の変化や揺らぎの効果の増大が期待できる。実際、銅酸化物高温超伝導体では、超伝導を担うCuO₂面が別の層で隔てられた擬2次元構造を持つことが知られており、その低次元性が高温超伝導や常伝導状態にみられる異常物性の原因の一つであると考えられている。本研究では量子臨界点近傍にあり、異方的超伝導、磁気秩序、非フェルミ流体的振る舞いといった興味ある物性を示す重い電子化合物であるCeIn₃とCeMIn₅(M=Co, Rh)を基本ユニットとする超格子を中心に研究する。具体的には

i) Ce系の重い電子系化合物と、類似した構造のLa系金属化合物か絶縁体を積層構造させた人工超格子を作製し電子輸送現象、磁化、核磁気共鳴(NMR)等の測定を行い、どのような電子状態が形成されているかを解明する。特に3次元で磁気秩序を示す系を2次元化することにより、磁気揺らぎが増大し磁性秩序が抑えられた結果、新超伝導相が出現するかどうかを詳細に研究する。

ii) 重い電子の超格子作製によりバルクの系では不可能であった様々な新奇超伝導状態を作ることが出来る。例えばCeCoIn₅では超伝導秩序変数が空間的に不均一になったFFLO状態が実現されているが、コヒーレンス長よりも薄いCeCoIn₅の超薄膜を作製し平行磁場をかけることで、軌道効果(渦糸)が消失した完全パウリ極限の異常超伝導状態を作ることができる。さらに3種類の異なる化合物A, B, Cを繰り返して積層成長させたトリコロール超伝導超格子を作製することにより、人工的に空間反転対称性が破れた系を作ることができる。このような系ではスピン一重項と三重項成分が混合した特

異な超伝導状態が出現することが知られている。このように人工超格子により新奇超伝導状態の理解を格段に進歩させる。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。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。

3. 研究の方法

重い電子系超伝導体で発見されたエキゾチックな超伝導状態の解明を目的として、分子線エピタキシー法(MBE)によりこれまでに前例のない人工超格子を創出し、その物性制御についての研究を行う。さらにこれまで試みられたことのない実験手法を開発する。Ce系の重い電子系化合物を基本ユニットとした人工超格子を作製することにより、重い電子を2次元に閉じこめた新奇強相関電子系を創り出し、その物性についての研究を行う。また分子線ビームで蒸着する化合物の組み合わせを変え、FFLO状態や空間反転対称性の破れたエキゾチックな超伝導状態などを人工的に創り出す。これらの物性を電子輸送現象、磁化測定、核磁気共鳴、等により系統的に研究する。

4. 研究成果

世界で初めて重い電子を2次元に閉じこめることに成功した。CeIn₃を2次元にすることに成功し次元性を3次元から2次元にすることにより次元制御による量子臨界性の制御に成功した。さらにCeCoIn₅を2次元化し、特異な超伝導状態をつくり出すことに成功した。またURu₂Si₂は18Kで隠れた秩序と呼ばれる、未知の秩序状態を示すが、これがどのような状態か30年近い謎であった。我々は新しいトルク測定法により、この隠れた秩序相で結晶の回転対称性を破るネマティック電子状態が実現していることを解明した。このほか鉄ヒ素系高温超伝導体は重い電子系超伝導体と類似した相図を持っているが、この系において超伝導ドーム中に量子臨界点が存在することを、精密な磁場侵入長測定、量子振動測定により解明した。

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 6 3 件)

(1) "A sharp peak of the zero-temperature penetration depth at optimal composition in the iron-based superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$ "

K. Hashimoto, K. Cho, T. Shibauchi, S. Kasahara, Y. Mizukami, R. Katsumata, Y. Tsuruhara, T. Terashima, H. Ikeda, M. A. Tanatar, H. Kitano, N. Salovich, R. W. Giannetta, P. Walmsley, A. Carrington, R. Prozorov, and Y. Matsuda
Science 336, 1554-1557 (2012), 査読有
DOI: 10.1126/science.1219821

(2) "Electronic nematicity above the structural and superconducting transition in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$ "

S. Kasahara, H. J. Shi, K. Hashimoto, S. Tonegawa, Y. Mizukami, T. Shibauchi, K. Sugimoto, T. Fukuda, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, and Y. Matsuda
Nature 486, 382-385 (2012), 査読有
DOI:10.1038/nature11178

(3) "Emergent Rank-5 'Nematic' Order in URu_2Si_2 "

H. Ikeda, M.-T. Suzuki, R. Arita, T. Takimoto, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
Nature Physics 8, 528-533 (2012), 査読有
DOI:10.1038/nphys2330

(4) "Extremely strong-coupling superconductivity in artificial two-dimensional Kondo lattices"

Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimozawa, S. Yasumoto, D. Watanabe, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani, and Y. Matsuda
Nature Physics 7, 849-853 (2011), 査読有
DOI:10.1038/nphys2112

(5) "Rotational Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of URu_2Si_2 "

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
DOI:10.1126/science.1197358

(6) "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
DOI:10.1126/science.1188200

(7) "Tuning the Dimensionality of the Heavy Fermion Compound CeIn_3 "

H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima, and Y. Matsuda
Science 327, 980-983 (2010), 査読有
DOI:10.1126/science.1183376

(8) "Thermal-transport measurements in a quantum spin-liquid state of the frustrated triangular magnet $k\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ "

M. Yamashita, N. Nakata, Y. Kasahara, T. Sasaki, N. Yoneyama, N. Kobayashi, S. Fujimoto, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
Nature Physics 5, 44-47 (2009), 査読有
DOI:10.1038/nphys1134

〔学会発表〕 (計 1 2 3 件)

すべて招待講演

(1) Yuji Matsuda, Quantum spin liquid, 3rd Japan-Israel Binational Workshop on Quantum Phenomena, 2013年3月11日~3月13日、沖縄

(2) Yuji Matsuda, Two dimensional confinement of heavy fermion in artificial superlattices, REIMEI-Workshop: Heavy Fermion Superconductivity explored by anisotropic magnetic fluctuations in actinide compounds, 2013年2月18日~2月19日、東京

(3) Yuji Matsuda, Superconducting gap structure, hidden quantum criticality and nematic transition in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$, Bristol-Kyoto Symposium, 2013年1月9日~1月13日、ブリストル (イギリス)

(4) Yuji Matsuda, Novel Pauli paramagnetic quantum phase in a Mott insulator, Exotic Phases of Frustrated Magnets Conference, 2012年10月8日~10月12日、サンタバーバラ (アメリカ)

(5) Yuji Matsuda, Two dimensional confinement of heavy fermion in artificial superlattices, Materials and Mechanism of Superconductivity, 2012年7月29日~8月3日、ワシントン DC (アメリカ)

(6) Yuji Matsuda, Nematic transition and quantum critical point in iron-pnictide superconductors, Japanese-German Symposium, 2012年7月14日~7月17日、伊豆

(7)Yuji Matsuda, Quantum criticality and electronic nematic phase in iron-pnictides, 19th International Conference on Magnetism with Strongly Correlated Electron Systems, 2012年7月8日～7月13日、プサン (韓国)

(8)Yuji Matsuda, Novel Pauli-paramagnetic quantum phase in a Mott insulator, International Workshop Itinerant Spin-orbital Systems: from Magnetic Frustration to Novel Superconductivity, 2012年5月20日～5月25日、ドレスデン(ドイツ)

(9)Yuji Matsuda, Superconducting gap structure of iron-pnictide superconductors, International Conference on Superconductivity and Magnetism, 2012年4月29日～5月4日、イスタンブール (トルコ)

[図書] (計2件)

松田祐司、N T S 出版、超伝導現象と高温超伝導、2013、490-501

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

石田 憲二 (ISHIDA KENJI)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：90243196

芝内 孝禎 (SHIBAUCHI TAKASADA)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：00251356

寺嶋 孝仁 (TERASHIMA TAKAHITO)
京都大学・低温物質科学研究センター・教授
研究者番号：40252506