

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800177

研究課題名(和文)f電子系超格子についての理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study on f-electron superlattice

研究代表者

多田 靖啓 (Tada, Yasuhiro)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：20609937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本補助事業では、f電子の自由度が重要となる人工超格子における電子相関効果について、研究を行った。研究内容は、主に、(1)近藤効果と電気抵抗、(2)反強磁性と超伝導、(3)強磁性についてである。(1)近藤効果が超格子構造によってどのように影響を受けるかを調べ、また、そこで形成された重い電子の電子輸送について議論した。(2)超格子における反強磁性的有効磁気相互作用と近藤効果の競合を解析した。また、遍歴的なスピン揺らぎの性質、及び、それが引き起こす超伝導についても研究を行った。(3)近藤超格子における、強磁性量子臨界点の可能性や磁気抵抗効果を議論した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have studied correlation effects in f-electron superlattices. We have investigated (1) Kondo effect and electrical resistivity, (2) antiferromagnetism and superconductivity, and (3) ferromagnetism. (1) Impacts of superlattice structures on Kondo effect have been examined. Resistivity of the heavy fermions formed in the superlattice was also studied. (2) We have discussed the competition between antiferromagnetic RKKY interaction and Kondo effect. Superconductivity mediated by itinerant spin fluctuations was also discussed. (3) We have studied a possible ferromagnetic quantum critical point and magnetoresistance in Kondo superlattices.

研究分野：磁性、超伝導、電子相関

キーワード：超格子 f電子 電子相関 超伝導 磁性 近藤効果

1. 研究開始当初の背景

f 電子を含む化合物を舞台にした重い電子系は、強相関多体系の典型例として活発に研究されてきた。2010 年に京都大学の実験グループが重い電子系物質 CeIn_3 を用いた人工超格子を世界で初めて作成し、その強相関効果を超格子構造によって制御できることを示した。これまで、重い電子系と超格子系は別々の分野として研究されてきたが、これにより、その両者を統合する新たな舞台が提供されることになった。

一方、理論的には、バルクの重い電子系に対する研究や、超格子構造だけを取り入れた研究は数多く存在するが、その両方を考慮に入れた研究はほとんど存在しなかった。実験をより正確に理解し、新しい物理を見出すためには、これら両方を扱うような理論的取扱いが必要であった。

2. 研究の目的

上に述べたように、f 電子系超格子を正しく理解し、それを発展させるためには、電子間相互作用と超格子構造の両方を取り扱う必要がある。本研究の目的は、f 電子系超格子における多体効果を理解することである。具体的には、まず、すでに存在する実験結果を、通常バルク f 電子系の研究や超格子系の研究を踏まえた上で、理論的立場から理解することが大切である。さらに、実験に先駆けて、新しい現象を理論的に予言することを目的とする。

3. 研究の方法

f 電子系超格子の多体効果を理解するためには、通常バルク f 電子系の性質と超格子の両方を議論できるモデルを扱う必要がある。本研究では、f 電子系の基本的モデルである周期アンダーソンモデルや近藤格子モデルを、超格子上で定義し、それらを適切な近似的方法を用いて研究を行った。具体的な近似方法としては、局所的なスピン揺らぎに関しては非一様動的平均場近似 (IDMFT)、空間的に広がった遍歴スピン揺らぎについてはスピン揺らぎ交換近似 (FLEX) を用いて、解析を行った。これらの近似は、バルク重い電子系において標準的な近似手法であり、それらを超格子系に適切に適用すれば、バルク系同様に信頼性の高い結果を与えるものと期待される。

4. 研究成果

(1) [雑誌論文] まず我々は、重い電子系の最も基本的な物理現象である、近藤効果について、近藤格子モデルに対して IDMFT を用いて、絶対零度付近に温度を固定した研究を行った。今回用いた近藤格子は、通常の格子系ではハーフフィリングで近藤絶縁体を記述し、その 1 粒子スペクトルギャップは exponential 的に開くことが知られている。しかし、超格子上ではギャップの開き方はベ

キ的であり、これはスパーサー層によって近藤効果が弱められていることを示す。また、スパーサー層の厚さを一層ずつ変えていくと、近藤効果が強まったり弱まったりすることが見出された。これは、超格子構造に由来する、離れた f 電子層間の近藤効果の干渉効果である。このような近藤効果の理解は、f 電子系超格子の基礎になるとと思われる。

(2) [雑誌論文] 次に調べたのは、近藤効果の温度依存性とそれに伴う電荷自由度の次元クロスオーバーである。周期的アンダーソンモデルを用い、常磁性金属の領域について IDMFT を用いて議論した。高温から温度を下げていくと近藤効果が発現するが、それにとまって現れる重いバンドは、局所近似である IDMFT の範囲内でも特徴的な波数依存性を持ち、超格子性を強く反映したものであることを示した。また、電気抵抗を計算することによって、温度による電荷自由度の次元クロスオーバーについて議論した。上記研究 (1) と同様に、電子状態を正しく理解することは、磁気秩序や超伝導などの研究の基礎となるものである。

(3) [雑誌論文] さらに、 $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ 超格子における超伝導を念頭に、FLEX を用いて遍歴スピン揺らぎや超超伝導の計算を行った。スピン揺らぎは、スパーサー層の厚さに依存した波数依存性を持ち、その最大強度は厚さが増すほど低下することが示された。これは、超格子構造によって、バルク系のもつ nesting が低下するためである。しかし、揺らぎを超格子の積層方向とは直交する 2 次元に射影したものは、バルク系におけるそれよりも増強されている。その結果、スピン揺らぎを媒介とした dx^2-y^2 超伝導は、バルク系よりも安定化することが分かった。一方、これまでの弱相関超格子系では、スパーサーとの近接効果のために、アクシデンタルな場合を除き、常に超格子系の超伝導転移温度はバルク系のそれよりも低かった。f 電子系超格子では、近接効果による超伝導性の低下よりも、スピン揺らぎの増強による安定化の方が優位になることができるという点が特徴的である。

(4) [雑誌論文] 重い電子系では、しばしば、近藤効果と磁気秩序の競合が中心的課題となる。先に行った FLEX による解析では、その近似のために近藤効果をうまく記述することが難しい。我々は、FLEX と相補的な計算として、IDMFT を用いた近藤超格子モデルにおける反強磁性の研究を行った。近藤結合が弱い場合に、スパーサー層をはさんで離れた f 電子の間には有効磁氣的相互作用を見積もると、弱相関系で期待されるような振る舞いが得られた。近藤結合を大きくすると、近藤効果と磁気相関が競合し、通常の磁気超格子での振る舞いからずれが生じる。特に、

スペーサー層の厚さ M に対し、 M と $M+1$ では同じ有効磁気相互作用を示す。これは、 M の値によって、反強磁性だけでなく近藤効果も even-odd 効果を示し、両者がキャンセルするために起こり、 f 電子系超格子に特徴的な振る舞いである。

(5) 近藤格子では、低フィリング領域では広く強磁性が安定化されることが知られている。実験的には強磁性 f 電子系超格子はまだ作成されていないが、バルク物質の中にも層状構造などを有し、いわば自然の超格子構造を持つような強磁性重い電子系物質が存在する。我々は、これらの系における強磁性を理解するために、超格子上で定義された近藤格子モデルを、IDMFT を用いて解析した。その結果、超格子構造によって強磁性が弱められ、絶対零度で連続的な量子相転移が起こることが分かった。通常近藤格子系では、絶対零度の量子相転移は強い不連続相転移であり、量子臨界揺らぎは記述できない。一方、実験的には強磁性量子臨界性を示す重い電子系物質はいくつも知られており、実験と理論の間には大きな隔たりがあった。本研究は、近藤格子モデルを自然に拡張することによって、強磁性の連続量子相転移が可能であることを示したものであり、重い電子系強磁性体の研究において意義のある成果と思われる。研究結果に関しては、現在、論文準備中である。

以下では、 f 電子系超格子とは直接は関係ないが、概念的あるいは技術的な共通性があり、本科研費のサポートを受けた研究結果について、簡単に述べる。

(6) [雑誌論文] 強磁性体においては、スピン自由度だけでなく軌道自由度に由来する磁化が存在する。中でも、物質の表面に沿って電流が流れることによる磁化は近年大きな注目を集めている。本研究では、そのような表面電流が乱れなどの表面条件に依存しない原因について議論した。本研究は、その後の超流動体における軌道角運動量の研究へと引き継がれている(現在、論文準備中)。

(7) [雑誌論文] 強磁性重い電子系 UCoGe においては、その磁場中磁気異方性や上部臨界磁場の異方性を理解することは、この系における磁性や超伝導の基本的理解のために重要である。本研究では、まず、結晶構造に由来するスピン軌道相互作用が与える磁気異方性について解析した。また、その結果をもとに超伝導の上部臨界磁場を解析し、磁場中で d ベクトルが回転する可能性についても議論した。

(8) [雑誌論文] 超伝導における基本的な2つの性質である、永久電流と $U(1)$ 対称性について議論した。永久電流の枠組みでしばし

ば言及される Bloch の定理について再考し、基底状態・平衡状態においてマクロな電流は流れないことを示した。また、 $U(1)$ ゲージ場と結合するフェルミオン系における Elitzur の定理についても議論し、特に、ほとんど全ての固定されたゲージ場配位に対して、クーパー対期待値や対応する相関関数がゼロになることを示した。

(9) [雑誌論文] 上記研究(8)では、特定のゲージにおけるクーパー対期待値については議論していないため、基本的なゲージ固定であるゲージにおけるクーパー対期待値について調べた。 $U(1)$ ゲージ場と結合するフェルミオン系を解析し、 $\beta > 0$ であれば、クーパー対相関は長距離で消えることを示した。

(10) [雑誌論文] 強磁性重い電子系超伝導体 UCoGe の最近の理論および実験的研究の発展に触発され、磁気的ドメインを持つイジング強磁性カイラル超伝導体について研究を行った。磁気ドメインに対応して超伝導のカイラリティが決まり、ドメインウォール(DW)には DW 電流が流れる。我々は、DW 電流を相殺するために、超伝導転移温度以下では常に Fulde-Ferrell 状態が安定化することを示した。また、ミクロな物理的起源として、エッジモードの存在に由来するクーパー対破壊効果を明らかにした。

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 10件)

Y. Tada, "Fulde-Ferrell state in a ferromagnetic chiral superconductor with magnetic domain walls", *Physical Review B* **97** (2018) 014519. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.014519> [査読有]

Y. Tada and T. Koma, "Decay of superconducting correlations for gauged electrons in dimensions $D \leq 4$ ", *Journal of Mathematical Physics* **59** (2018) 031905. <https://doi.org/10.1063/1.5029282> [査読有]

Y. Tada and T. Koma, "Two No-Go Theorems on Superconductivity", *Journal of Statistical Physics* **165** (2016) 455-470. <https://doi.org/10.1007/s10955-016-1629-2> [査読有]

Y. Tada, S. Takayoshi and S. Fujimoto, "Magnetism and superconductivity in ferromagnetic heavy-fermion system UCoGe under in-plane magnetic fields", Physical Review B **93** (2016) 174512 (1-7).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.174512> [査読有]

R. Peters, Y. Tada and N. Kawakami, "Magnetism in f-electron superlattices", Physical Review B **94** (2016) 205142(1-6).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.205142> [査読有]

Y. Tada, "Equilibrium surface current and role of U(1) symmetry: Sum rule and surface perturbations", Physical Review B **92** (2015) 104502 (1-15).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.104502> [査読有]

Y. Tada and R. Peters, "Spin fluctuations and superconductivity in layered f-electron superlattices", Physical Review B **92** (2015) 035129 (1-8).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.035129> [査読有]

石田憲二、服部泰佑、佐藤憲昭、出口和彦、多田靖啓、藤本聡、「ウラン系強磁性超伝導における強磁性ゆらぎが誘起するスピン三重項超伝導」、固体物理 **50** (2015) 123-132. [解説]

Y. Tada, R. Peters and M. Oshikawa, "Dimensional crossover in layered f-electron superlattices", Physical Review B **88** (2013) 235121 (1-7).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.235121> [査読有]

R. Peters, Y. Tada and N. Kawakami, "Kondo effect in f-electron superlattices", Physical Review B **88** (2013) 155134 (1-8).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.155134> [査読有]

[学会発表](計 7件)

多田靖啓, Frank Pol Imann、「カイラル超流動体におけるエッジ流と軌道角運動量」、日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年、岩手大学)

多田靖啓, 高麗徹、「ゲージ場と結合する超伝導体におけるクーパー対相関の減

衰」、日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年、岩手大学)

多田靖啓, 高麗徹、「超伝導における不可避定理:永久電流とU(1)対称性の破れ」、日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年、大阪大学)

多田靖啓、「平衡表面流における U(1)対称性の役割」、日本物理学会 2015 年秋季大会(2015 年、関西大学)

Yasuhiro Tada, "Anisotropic Upper Critical Fields in Heavy Fermion Superconductors", REIMEI-ICC-IMR Workshop, 2014 (2014 年、東北大学金属材料研究所)[招待講演]

多田靖啓, 藤本聡、「磁場中における重い電子系超伝導体 UCoGe」、日本物理学会 2014 年秋季大会(2014 年、中部大学)

Yasuhiro Tada, "Theoretical Study of Upper Critical Field and Magnetism in UCoGe", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, (2014 年、グルノーブル(フランス))

[図書](計 0件)

[産業財産権]なし

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

多田 靖啓 (TADA, Yasuhiro)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：20609937

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：

(4) 研究協力者

なし ()