

## 重い電子の人工制御

### Fabrication of Heavy Fermion Superlattices

課題番号：25220710

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

$f$  電子を含む希土類原子を原子一層単位で制御した人工超格子（近藤超格子）や超薄膜を作製し、自然界には存在しない強相関電子状態を創製する。これにより究極に強い電子相関を持つ人工2次元電子系において種々の異常な電子状態やエキゾチック超伝導状態を実現し、その詳細な研究を行う。

研究分野：数物系科学

キーワード：強相関系 超伝導・密度波 金属

#### 1. 研究開始当初の背景

$f$  電子を含む重い電子系化合物は、新奇超伝導状態や量子臨界現象など未解明の興味ある電子状態の宝庫である。特に  $f$  電子系で実現される重い電子状態では、究極に強い電子相関を持った金属状態が実現される。これまでの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。我々は、分子線エピタキシー(MBE)法により、 $f$  電子化合物を一層ごとに積み上げる技術を開発し、 $f$  電子を2次元に閉じこめた「近藤超格子」の作製に成功した。

#### 2. 研究の目的

本研究の目的は、究極に強い電子相関をもつ自然界には存在しない重い電子の人工2次元電子系を創り出し、種々の異常な電子状態やエキゾチック超伝導状態を実現し、その解明を行うことである。さらに、バルクの試料では実現できなかった原子レベルで平坦かつ清浄な表面を創り出し、極低温走査トンネル顕微鏡(STM)により「その場観察」を行う。これにより、重い電子系化合物の、バルクやインターフェースにおける電子状態の理解を格段に進歩させるだけでなく、トポロジカルな励起などの新しい素励起を持つエキゾチック超伝導状態の実現をめざす。さらに、薄膜や超格子だけでなく、バルクの重い電子系超伝導体や、鉄系超伝導体におけるエキゾチックな超伝導状態の解明も行う。

#### 3. 研究の方法

MBE装置とSTM装置を合体させた装置の開発を行うとともに、現有するMBE装置を用いて人工超格子と薄膜の作製を行う。さらに、これとともに、重い電子系化合物の熱

電効果を超高精度で測定する装置を開発する。また、Fe系高温超伝導体超純良単結晶を作製し、低温強磁場中での電子、熱輸送現象や熱電効果の測定により、電子構造の決定と特異な超伝導状態の研究を行う。

#### 4. これまでの成果

これまでに4つの大きな成果をあげた。

1) 重い電子系人工超格子（近藤超格子）の研究では、重い電子系超伝導体と通常金属を積層成長させた  $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ 、重い電子系反強磁性体と通常金属の超格子  $CeRhIn_5/YbRhIn_5$ 、3種類の異なる化合物のトリコロール人工超格子  $YbRhIn_5/CeCoIn_5/YbCoIn_5$ 、重い電子系超伝導と重い電子系反強磁性体のハイブリッド人工超格子  $CeRhIn_5/CeCoIn_5$  の作製を行い、超伝導特性と量子臨界性について詳細に研究を行った。特に、近藤超格子においては、重い電子と普通の電子のインターフェースにおける局所的な空間反転対称性の破れが非常に重要な役割を果たすことを発見した。さらに、トリコロール超格子では、空間反転対称性の破れによるラッシュバ分裂の大きさが人工的に制御できることを示した。これらの発見は、これまで実現されたことのないトポロジカル超伝導状態の実現に導くものである。またハイブリッド超格子では、 $d$  波超伝導体とスピン密度波金属が層状に交互に共存することを示し、このような系では、量子臨界層と非従来超伝導層が相互作用するというこれまでにはないユニークな現象が期待できることを示した。

2) 走査トンネル顕微鏡による重い電子系の研究では、超高真空中で成長させた薄膜の表面ではバルクよりも清浄な表面をはるかに容易に得ることができることがわかり、近藤混成ギャップや超伝導ギャップを明瞭に観測できるようになった。さらに、Ce 原子を La 原子で置換した、いわゆる「近藤ホール」の直接観測にも成功した。また、原子層程度の厚みしか持たない CeCoIn<sub>5</sub> のトンネル分光にも成功し、現在、そのような系におけるトポロジカルな素励起の検出を計画している。

3) カイラル超伝導体 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> における超巨大熱電効果の研究では、この系のネルンスト効果はガウス型の超伝導揺らぎから予測される大きさよりも百万倍大きいものであることを発見した。この超巨大なネルンスト係数は、カイラル超伝導体の持つ、ベリー位相の揺らぎによってもたらされることで、定量的に説明された。

4) 鉄系超伝導体の研究では、気相成長法により不純物のきわめて少ない FeSe の単結晶試料を作製することに成功した。この試料を用いて、我々は世界に先駆けて、この系のフェルミ面の決定を STM による準粒子干渉と量子振動により行った。その結果、この系ではフェルミエネルギーが超伝導ギャップと同じオーダーであり、BCS-BEC クロスオーバー領域にあることを発見した。これは固体電子において初めてのクロスオーバーの実現である。さらに、この系の低温高磁場で新しい未知の超伝導相が存在することを明らかにした。また、この系が非自明なベリー位相を持ったディラックコーンを持っていることを発見した。超伝導体でディラックコーンを持つ物質はこれが初めてであり、今後トポロジカルな側面の研究への展開が期待できる。

#### 5. 今後の計画

人工近藤超格子の研究で最も重要であると考えているのが、重い電子系超伝導体の界面の研究と、重い電子超伝導と量子臨界性の問題である。今後も引き続きこのテーマで研究を行うことを計画している。MBE 法により作製した重い電子系化合物に対するトンネル分光では、従来金属 YbCoIn<sub>5</sub> の上に原子層の厚みしかもたない重い電子超伝導体 CeCoIn<sub>5</sub> を成長させた 2 次元近藤格子の研究を行うことを計画している。エキゾチック超伝導状態の研究は、集束イオンビームによる微細加工技術と微小 SQUID を用いて、URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> における時間反転対称性の破れにともなうカイラルエッジ電流の直接観測を計画している。さらに、鉄系超伝導体 FeSe の研究では、BCS-BEC クロスオーバーに伴う擬ギャップ形成を核磁気共鳴、THz 分光の共同研究を通じて詳細に研究を行い、銅酸化物高温超伝導体や冷却原子との比較を行うことを計画している。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)  
受賞等

2014 年 仁科記念賞

2014 年 Highly cited researcher (Thomson Reuters)

3 年間に行った招待講演

国際会議 25 回

アメリカ物理学会 (招待講演) 2 回

日本物理学会 (シンポジウム) 3 回

論文 (当該グループが主体となって研究したもののみ)

- [1] (Review) M. Shimozawa, S.K.Goh, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, Reports on Progress in Physics in press.
- [2] Y. Tokiwa *et al.* Nature Commun. **7**, (2016).
- [3] T. Yamanaka *et al.* Phys. Rev. B **92**, 241105 (2015).
- [4] T. Yamashita *et al.* Nature Phys. **11**, 17 (2015).
- [5] M.D. Watson *et al.* Phys. Rev. Lett. **115**, 027006 (2015).
- [6] T. Watashige *et al.* Phys. Rev. X **5**, 031022 (2015).
- [7] M. Shimozawa *et al.* Phys. Rev. Lett. **112**, 156404 (2014).
- [8] Ying-Shuang Fu *et al.* Nature Phys. **10**, 815 (2014).
- [9] S. Tonegawa *et al.* Nature Commun. **5**, 4188 (2014).
- [10] (Review) T. Shibauchi, A. Carrington and Y. Matsuda, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **5**, 113 (2014).
- [11] Y. Mizukami *et al.* Nature Commun. **5**, 5657 (2014).
- [12] S. Kasahara *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA **111**, 16309 (2014).
- [13] D. Watanabe *et al.* Phys. Rev. B **89**, 115112 (2014).
- [14] S. Tonegawa *et al.* Phys. Rev. B **88**, 245131 (2013).
- [15] K. Hashimoto *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA **110**, 3293 (2013).

その他 21 編

ホームページ等

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

p