

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800190

研究課題名(和文) 異方的な重い電子系の新奇な量子臨界性と超伝導の研究

研究課題名(英文) Research on novel quantum criticality and superconductivity in anisotropic heavy fermions

研究代表者

松本 洋介 (MATSUMOTO, Yosuke)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：90422443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：価数揺動系  $\text{PrV}_2\text{Al}_{12}\text{O}_{20}$ 、 $\text{YbAlB}_4$ における重い電子形成の機構と、新奇な量子臨界性の起源を明らかにするため、これらの系の極めて大きな異方性に着目し、 $c$ 軸方向に磁場をかけたときのみ、重い電子の振舞いが約3 T以上の磁場で抑制される詳細を調べた。また、非磁性結晶場基底状態を持つ籠状物質 $\text{PrV}_2\text{Al}_{12}\text{O}_{20}$ において、電子軌道の量子揺らぎを起源とした新しい重い電子超伝導が実現していることを発見した。

研究成果の概要(英文)：The origin of unusual heavy fermion formation under the strong valence fluctuations in  $\text{PrV}_2\text{Al}_{12}\text{O}_{20}$ ,  $\text{YbAlB}_4$  has been investigated focusing on their strong anisotropy. We found the heavy fermion behavior is suppressed in the magnetic field above  $\sim 3$  T only along the  $c$ -axis. In addition, we found a novel heavy fermion superconductivity arising from quantum fluctuation of  $f$  electron's orbital degrees of freedom in  $\text{PrV}_2\text{Al}_{12}\text{O}_{20}$ , which is a cage-like compound with a non-magnetic crystal electric field ground doublet.

研究分野：低温物性物理学

キーワード：重い電子系 量子臨界現象 非従来型超伝導 非フェルミ液体

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、“量子臨界点近傍に形成される新しい量子相”としての異方的超伝導と非フェルミ液体に大きな関心が集まっている。これまで、重い電子系の量子臨界物質の多くは、整数価数の近藤格子系であり、強い価数揺動状態の下での量子臨界現象は見出されてこなかった。ところが、最近、我々のグループにより発見された新物質 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>は、Yb系初の重い電子超伝導体( $T_c = 80$  mK)であると同時に、強い価数揺動状態(Yb<sup>+2.75</sup>)と非フェルミ液体性、量子臨界性を併せ持つ希有な系として大きな注目を集めている。

(2) また最近の研究より、 $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の多形体で同じく価数揺動系の $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>も、強い価数揺動の下で重い電子の振舞いを示すこと、さらに高々3 Tの磁場中で異方的な非フェルミ液体の振舞いを示すことが明らかになってきた。

(3) さらに最近の研究より、これらの物質で伝導電子と  $f$  電子の混成が異方的であり、 $c$  軸方向にノードを持つと考えられることが理論的に指摘されている。これが実際に $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>において見つかった電気伝導度の極めて大きな異方性と良く合致する。興味深いことに、この異方的な  $cf$  混成が、価数揺動系における重い電子の形成や、量子臨界性の起源を探る上で一つの鍵となることが分かってきた。

### 2. 研究の目的

(1) 価数揺動系 $\alpha$ -,  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>における重い電子形成の機構と、新奇な量子臨界性の起源を明らかにするため、これらの系の示す極めて大きな異方性に着目する。

(2) 純良単結晶を用いた多角的な測定により、異方的な重い電子形成の詳細を明らかにすることで、“伝導電子と  $f$  電子の異方的な混成”による新奇な量子臨界性の可能性を検証する。以上の研究を通じて、“異方性による重い電子の異常物性発現”の典型例創出を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) アルミニウム自己フラックス法によって作製された価数揺動系 $\alpha$ -,  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の純良単結晶を用いて研究を行う。

(2) これらの物質が強い価数揺動の下で示す重い電子の振舞いについて、その異方性の詳細を比熱、磁化、磁気抵抗等の測定によって形成の明らかにする。

(3) これらの測定結果から、価数揺動系 $\alpha$ -,  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>における重い電子形成および、非従来型の量子臨界現象の起源を探る。

### 4. 研究成果

(1)  $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>は $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>とは対照的に零磁場下での基底状態はフェルミ液体であることが分かっているが、最近の研究から、 $c$  軸方向に磁場を印加した場合、約3 Tで異方的

な非フェルミ液体状態を伴う量子臨界的な振舞いを示すことが分かってきた。この詳細を調べる為、極低温度での比熱測定を行った。その結果、約3 Tの臨界磁場近傍においても比熱には顕著な非フェルミ液体性が現れないこと、しかしながら  $c$  軸方向に磁場をかけたときのみ、約3 T以上で重い電子が抑制されることが分かった。さらに緩和法比熱測定における内部緩和の時定数から、主に Al, B核の核スピン-格子緩和時間  $T_1$  が  $c$  軸方向に磁場をかけた時のみ、約3 T以上の磁場で大きく減少することを明らかにした。

(2) また、 $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>の横磁気抵抗を測定した。[110]方向に電流を流し、[-110]および  $c$  軸方向に磁場を印加し、測定を行った。その結果、両者の磁気抵抗は極めて異方的な振舞いを示すことが明らかになった。特に1 T以下の弱磁場における両者の大小関係から、 $cf$ 混成が面内に強いと考えられること、さらに  $c$  軸方向に磁場をかけた場合は3 T以上で重い電子が抑制されることにより、負の磁気抵抗が現れることを明らかにした。

(3) さらに、 $\alpha$ -,  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>の磁化について、 $c$  軸方向の磁場に対する振舞いを320 Kから20 mKの幅広い温度領域に対して詳細に調べた。その結果、両物質における約8 Kの温度スケールを持つ近藤格子(重い電子)的な振舞いが、数 T以上の磁場で抑制されること、さらにその際の特徴的な磁場の値が5.5 Tと決められることが分かった。また、近藤格子の抑制される磁場5.5 Tにおける両物質の磁化が0.2  $\mu_B$ と小さいことから、ごく一部の  $f$  電子のみがこれらの物質の重い電子の振舞いに寄与していることを明らかにした。

(4) 非磁性結晶場基底状態を持つ籠状物質PrTr<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>(TrはTiおよびV)はPr原子の持つ  $f$  電子と伝導電子の間の混成が強く、四極子近藤効果や軌道秩序の量子臨界点を研究する上で最適の系である。特に最終年度において我々は、これらの物質が多極子秩序相内で示す超伝導(転移温度はTi, Vに対して各々、200 mK, 50 mK)についてより詳細に実験を行い、これらがバルクの重い電子超伝導であることを明らかにした。特に、PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>の場合、上部臨界磁場曲線から見積もった準粒子有効質量が  $m^*/m_0 \sim 140$  まで増大し、電子比熱係数も0.9 J/K<sup>2</sup>mol、さらに超伝導転移に伴う比熱の飛びも0.3 J/K<sup>2</sup>molと非常に大きいことが分かった。この結果は、電子軌道の量子揺らぎを起源とした新しい重い電子超伝導が実現していることを示す画期的な結果である。そのため、これを最優先事項に据えて研究を進めた。さらに、より純良な単結晶試料を用いた比熱測定により、PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>の多極子秩序が、0.75 Kと0.65 Kの2段階転移になっていること、多極子転移温度より低温で比熱が温度の4乗に比例し、軌道揺らぎを反映した何らかのギャップレスモードが存在すること等を明らかにした。

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 6件)

- (1) Yosuke Matsumoto\*, K. Kuga, Y. Karaki, Y. Shimura, T. Sakakibara, M. Tokunaga, K. Kindo, and S. Nakatsuji, “Field evolution of quantum critical and heavy Fermi-liquid components in the magnetization of the mixed valence compound  $\beta$ -YbAlB<sub>4</sub>”, Journal of the Physical Society of Japan **84**, 024710 (1-7) (2015), 査読有り, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.024710>
- (2) T. Terashima\*, Y. H. Matsuda, K. Kuga, S. Suzuki, Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, A. Kondo, K. Kindo, N. Kawamura, M. Mizumaki and T. Inami, “Synchrotron X-ray spectroscopy study on the valence state and magnetization in  $\alpha$ -YbAl<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>B<sub>4</sub> ( $x = 0.115$ ) at low temperatures and high magnetic fields”, J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012020 (1-6) (2015), 査読有り, DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012020
- (3) M. Tsujimoto\*, Y. Matsumoto and S. Nakatsuji, “Anomalous specific heat behaviour in the quadrupolar Kondo system PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”, J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012023 (1-6) (2015), 査読有り, DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012023
- (4) Yosuke Matsumoto\*, Jinpyo Hong, Kentaro Kuga and Satoru Nakatsuji, “Anisotropic transverse magnetoresistivity in  $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>”, J. Phys.: Conf. Ser. **592**, 012086 (1-6) (2015), 査読有り, DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012086

- (5) Yosuke Matsumoto\*, Kuga Kentaro, Satoru Nakatsuji, “Suppression of the Heavy Fermion State in Magnetic Fields in the Mixed Valent  $\alpha$ -YbAlB<sub>4</sub>”, JPS Conf. Proc. **3**, 011076 (1-5) (2014), 査読有り, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCCP.3.011076>
- (6) Masaki Tsujimoto, Yosuke Matsumoto, Takahiro Tomita, Akito Sakai, and Satoru Nakatsuji\*, “Heavy Fermion Superconductivity in the Quadrupole Ordered State of PrV<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>”, Physical Review Letters **113**, 267001 (1-5) (2014), 査読有り, DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.267001>

[学会発表] (計 30 件)

- (1) Yosuke Matsumoto, Takahiro Tomita, Kentaro Kuga, Eoin C. T. O’Farrell, Yasuyuki Shimura and Satoru Nakatsuji, “Emergent critical phase in a correlated electron system”(招待講演), ISSP-MPIPES Joint Workshop, “Dynamics of Strongly Correlated Systems” (ISSP, Univ. of Tokyo, Chiba, Japan), 2015/3/31.
- (2) Yosuke Matsumoto, “Novel quantum criticality in YbAlB<sub>4</sub>: possible role of valence fluctuation and anisotropic hybridization”(招待講演), Quantum Materials Symposium 2015 (Muju, Korea), 2015/2/10.
- (3) Yosuke Matsumoto, Takahiro Tomita, Kentaro Kuga, Eoin C. T. O’Farrell, Yasuyuki Shimura and Satoru Nakatsuji, “Novel quantum criticality in valence fluctuating YbAlB<sub>4</sub> systems”(招待講演), Workshop on Recent Development

in the Kondo Problem (ISSP, Univ. of Tokyo, Chiba, Japan), 2015/1/9.

- (4) Y. Matsumoto, K. Kuga, E. C. T. O'Farrell, T. Tomita and S. Nakatsuji, "Valence fluctuation and strange metal phase in YbAlB<sub>4</sub>"(招待講演), Aspen Winter Conference "Beyond quasiparticles: New paradigms for quantum fluids" (Aspen, USA), 2014/1/13.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○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：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 洋介 (MATSUMOTO, Yosuke)  
東京大学・物性研究所・助教  
研究者番号：90422443

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：