

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887015

研究課題名(和文) 極限環境下におけるYb系重い電子化合物の異常金属状態の解明

研究課題名(英文) clarification of the anomalous metallic state in the yb based heavy fermion compounds under ultimate environment

研究代表者

志村 恭通 (Shimura, Yasuyuki)

東京大学・物性研究所・研究員

研究者番号：10713125

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：我々はPrV₂Al₂₀において高磁場下での磁気抵抗測定から電子軌道による量子臨界点に到達し、その量子臨界現象を見出した。この系は0.6 Kで電子軌道の秩序(四極子秩序)を示すことが知られているが、11 Teslaでこの秩序が崩壊することを明らかにした。そしてその臨界磁場に向かって、電子の持つ有効質量が発散的に増大すること発見し、また臨界磁場直上で従来の金属論に従わない異常な金属状態を観測した。さらに大きな有効質量の存在を高磁場で観測された量子振動から直接検出に成功した。またa-YbAlB₄において初めて重い電子系の量子極限状態への到達を示す磁気抵抗の振る舞いを観測した。

研究成果の概要(英文)：We found a field-tuned quantum criticality based solely on the quadrupolar(orbital) degrees of freedom in PrV₂Al₂₀ through the magneto-transport measurements up to 35 T by using the high DC magnetic field facilities at the National High Magnetic Field Laboratory. Our study on PrV₂Al₂₀ reveals the field-induced quadrupolar quantum criticality at the critical field H_c = 11 T applied along the [111] direction. Near H_c required to suppress the quadrupolar state, we found a marked enhancement of the resistivity, concomitant non-Fermi liquid (NFL) behavior in the vicinity of critical field, and a divergent quasiparticle effective mass as a function of the magnetic field toward critical field of 11 T. We also observed the quantum oscillation above H_c, indicating an evidently enhanced effective mass. These reveal the field induced quadrupolar quantum criticality where the competition between the nonmagnetic Kondo effect and the intersite quadrupolar coupling.

研究分野：強相関電子物性

キーワード：高磁場 圧力 イットルビウム 重い電子

1. 研究開始当初の背景

絶対零度において、圧力や磁場などで基底状態をコントロールすることで引き起こされる相転移を量子相転移といい、その転移点を量子臨界点と呼ぶ。そこでは物質中の電子たちが互いに強く相関を持つため、非常に大きな質量を持って物質中を動き回る “重い電子状態” が実現する。そして量子臨界点近傍では二つの隣り合う相の揺らぎによる非従来型の超伝導、あるいは電気抵抗率など様々な物理量がよく知られたフェルミ液体論に従わない特異な振舞を示すなど、様々な量子臨界現象がみられる。量子臨界現象は物性物理学において重要なトピックとなっている。これらの研究は主に磁気秩序相と非磁性相との境である “磁気” 量子臨界点近傍での研究でした。一方で磁性を伴わない秩序や相転移も存在する。しかしこれらの量子相転移や量子臨界現象はほとんど未解明であった。

2. 研究の目的

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の Pr イオンはその基底状態に軌道の自由度のみを持つ二重項を持つ。これは磁気的な自由度を持たないため、軌道の効果のみを研究することができる。この二重項の自由度は 0.6 K で電気四極子と呼ばれる電子軌道の秩序(四極子秩序)を起こすことで失われる。今回我々は磁場を印可することで軌道秩序を壊し、量子臨界点への到達を目指す。

また $\alpha\text{-YbAlB}_4$ の基底状態はフェルミ液体であることが知られている。注目すべきは $\alpha\text{-YbAlB}_4$ と類似構造を持つ物質として $\beta\text{-YbAlB}_4$ が存在する。これは唯一の Yb 系重い電子超伝導体であり、かつゼロ磁場での特異なバンド構造からくる異常金属状態がみられる。 β 型との構造/バンドの類似性から、 α 型に対して、磁場を印可することにより β 型で見られる異常金属状態に迫ることできる可能性が考えられる。本研究では磁場を用い

てこれらの化合物の量子相転移と量子臨界現象を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

量子臨界点に到達し、量子臨界現象を観測するためには、極低温に冷やし、かつ磁場などの外部パラメータを用いて、二つの相の境目である量子臨界点に到達する必要がある。しかし、非磁性の量子相転移はスピンによる通常の磁気的な量子相転移と異なり、磁場に対して敏感ではないため、高い磁場が必要不可欠である。そこで我々は米国国立高磁場研究所の水冷却電磁石を用いて、最大 35 T という高い磁場下での磁気抵抗効果の測定を行った。

測定した単結晶試料は希土類元素 Pr を含む化合物 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ と特異なフェルミ面を持つ Yb 系重い電子化合物 $\alpha\text{-YbAlB}_4$ である。これらの試料はそれぞれ Al の自己フラックス法によって単結晶試料の合成を行った。

4. 研究成果

(1).

まず我々は磁気抵抗測定から、約 11 T において軌道秩序相が崩壊することを明らかにした。そして、電気抵抗の温度依存性が 30 T から臨界磁場である 11 T に向かって劇的に強くなることを明らかにしました。電気抵抗率はフェルミ液体論によれば、温度の二乗で減少することがよく知られており、その比例係数が電子の有効質量に対応すると考えられている。そこで 30 T 以下の各磁場で温度依存性を測定したところ、この比例係数が臨界磁場である 11 T に向かって発散的に増大していることが分かった。これは量子臨界点が実際に臨界磁場である 11 T に存在していることを示す重要な証拠である。

一方で、量子臨界点直上の磁場ではその強い揺らぎを反映して、少なくとも約 0.4 K という極低温まで上凸の強い温度依存性が存在することを見出しました。これは通常金属の電気抵抗の振る舞いとは大きく異なる(非フェルミ液体)であり、磁場誘起の量子臨界現象の一つであると考えられる。

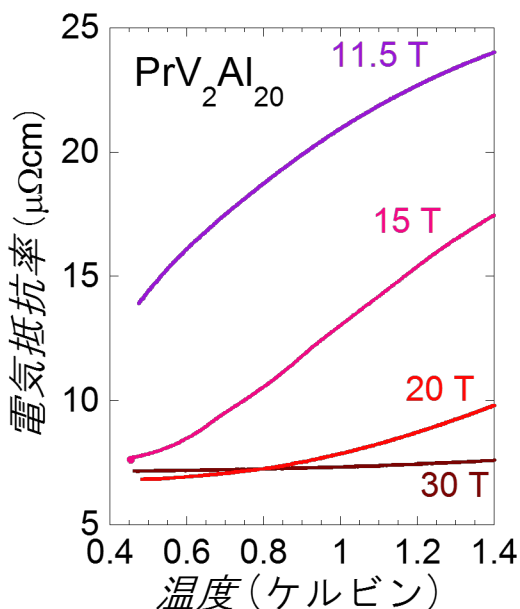


図 1: PrV₂Al₂₀ の様々な磁場中での電気抵抗の磁場依存性

さらに高磁場での電気抵抗の磁場依存性において量子振動を観測することに成功しました。そしてその解析から実際に約 10 倍もの大きな有効質量をもつ電子の存在を示す、より直接的な証拠を得た。本系は伝導電子と電子軌道が強く結びついた電子軌道による近藤効果の可能性が指摘されていたが、今回発見された大きな有効質量の存在はこれを強くサポートする結果だと考えられる。

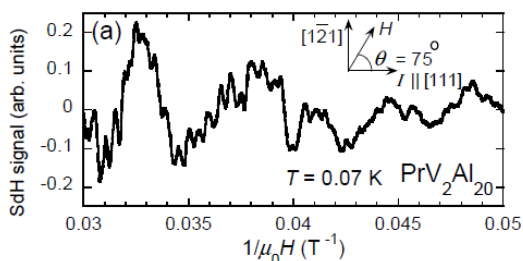


図 2. PrV₂Al₂₀ で見られた量子振動

これらの結果から今回観測された 11 T での量子臨界現象は、電子軌道の秩序と電子軌道の近藤効果との競合によって引き起こされている可能性が有力だと考えられる。本結果のほぼすべてを論文としてまとめた。

(2).

α -YbAlB₄ の磁気抵抗を測定したところ、15 T から 20 T にかけて、階段状の磁気抵抗の上昇がみられた。また同様の磁場範囲において、低磁場領域 (< 15 T) で見られた量子振動が消失した。一方で、磁化などのバルクの物理量には明確な異常は見られていない。これらの結果は磁場によってフェルミ面が変化していることを示唆している。

具体的には量子極限状態に到達していると考えられる。これは磁場を印可することでエネルギー準位が離散的になることで、最低エネルギー準位にすべての電子が落ち込む現象である。一般に通常金属の場合、この現象は一般に 10000 T 程度の磁場を印可しないと見えないことが知られている。しかし、本結果は驚くべきことにわずか 15 T 程度の磁場により極限状態に達している。このような量子極限状態の観測は Bi やグラファイトなど数例であり、特に重い電子系では初めてである。

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 4 件)

Y. Shimura, M. Tsujimoto, B. Zeng, L. Balicas, A. Sakai and S. Nakatsuji, "Field-Induced Quadrupolar Quantum Criticality in PrV₂Al₂₀", Phys. Rev. B Rapid Communication., 査読有, 掲載確定, 2015

Y. Shimura, M. Tsujimoto, B. Zeng, L. Balicas, A. Sakai and S. Nakatsuji, "Shubnikov de-Hass Oscillation in the Heavy fermion Superconductor PrV₂Al₂₀", J. Phys: Conf. Ser., 査読有, 592, 2015, 012026.

Y. 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 δ -YbAlB₄", J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, **84**, 2015, 024710.

B. Zeng, Q. R. Zhang, D. Rhodes, Y. Shimura, D. Watanabe, R. E. Baumbach, P. Schlottmann, T. Ebihara, and L. Balicas, "CeCu₂Ge₂: Challenging our understanding of quantum criticality", Phys. Rev. B, 査読有, **90**, 2014, 155101.

〔学会発表〕(計 5 件)

Y. Shimura, "Searching for the Field-Induced Non-Magnetic Phase Transition and the Quantum Criticality", ICAM Annual Conference 2015 (Invited), 2015 年 5 月、Lemont, Illinois, USA

志村 恭通, 辻本 真規, 酒井 明人, 富田 崇弘, Bin Zeng, Luis Balicas, 中辻知, "高磁場下における四極子近藤系 PrV₂Al₂₀ の電気抵抗測定", 日本物理学会, 2014 年 9 月、中部大学 春日井キャンパス (愛知県 春日井市 松本町)

Y. Shimura, "High-Magnetic-Field Transport Properties in the Quadrupole Kondo Lattice System PrV₂Al₂₀", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, 2014 年 7 月、Grenoble, France

志村恭通, 富田崇弘, 松林和幸, 上床美也, Luis Balicas, 中辻知, "重い電子系 a-YbAlB₄ の電気抵抗の圧力依存性", 日本物理学会, 2014 年 3 月、東海大学 湘南キャンパス (神奈川県 平塚市)

志村恭通, 富田崇弘, 松林和幸, 上床美也, 中辻知, "価数揺動系 YbAlB₄ の電気輸送特性の圧力依存性", 日本物理学会, 2013 年 9 月、徳島大学 常三島キャンパス (徳島県 徳島市 南常三島町)

〔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

<http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

志村 恭通 (SHIMURA Yasuyuki)
東京大学・物性研究所・研究員
研究者番号：10713125

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：