

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月21日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654109

研究課題名（和文） 遍歴電子メタ磁性物質の量子臨界点における新物性の開拓

研究課題名（英文） Novel Properties at the Quantum Critical Point in Itinerant Electron Metamagnet

研究代表者

木村 憲彰（KIMURA NORIAKI）

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：30292311

研究成果の概要（和文）：近年、磁性体の量子臨界点近傍で新しい磁気状態が見出されている。本研究では遍歴電子メタ磁性体である UCoAl に着目し、量子臨界点近傍の新奇な性質を明らかにすべく、温度-圧力-磁場を軸とした磁気相図および量子臨界点を決定した。さらに、その近傍で詳細な電気抵抗の測定を行い、これまで知られている非フェルミ液体状態とは異なる特異な電気抵抗の振る舞いを見出した。これらは、磁気的な量子臨界状態における新しい電子状態あるいは磁気状態を示唆する結果である。

研究成果の概要（英文）：Magnetic quantum criticality is one of the most intriguing phenomena in the condensed matter physics. In order to investigate its novel properties, we determined magnetic temperature-pressure-magnetic field phase diagram and the quantum critical end point (QCEP) of itinerant metamagnetic material UCoAl. We found unusual behavior in the electrical resistivity in the vicinity of the QCEP, which cannot be explained in terms of the non-Fermi liquid regime based on the SCR theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

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：強相関系

1. 研究開始当初の背景

鉄をはじめとする金属の強磁性は、圧力の印加とともに強磁性転移温度が下がり、連続相転移から1次相転移に変わる3重臨界点を経て、相転移がある圧力で絶対零度に落ち込むような温度-圧力相図を持つと考えられている。転移温度が絶対零度に一致する圧力を量子臨界点と呼び、量子相転移点近傍では、非フェルミ流体や強磁性と共存する超伝導などが見出されており、新しい量子基底状態の舞台として注目を集めている。

この相図に磁場の軸を加えると、3重臨界点でメタ磁性と呼ばれる1次相転移面が出現することが予想されている。ここで注目すべき

点は、3重臨界点からのびた臨界点が絶対零度になった点、すなわち量子臨界点である。Sr₃Ru₂O₇では磁気ネマティック相など新しい磁気状態が見出されつつあるが、一般的な強磁性金属の量子臨界点の性質はほとんど未解明とあってよい。

本研究では遍歴電子メタ磁性物質 UCoAl が量子臨界点に近いところに位置していることに着目し、圧力によって量子臨界点に到達可能であることを見出した。

2. 研究の目的

本研究では遍歴電子メタ磁性体 UCoAl の純良単結晶を用いて、圧力下の電気抵抗、磁気

抵抗の測定を行い、温度 - 圧力 - 磁場相図を作成し、遍歴磁性体の磁気相図を実験的に確認することを第1の目的とする。さらに、量子臨界点を特定し、その近傍で期待される新奇的な物性を探索することを第2の目的とする。

3. 研究の方法

UCoAl の単結晶育成はチョクラスキー法を用いて行う。育成した試料に対し評価を行い、常圧下での磁化と帯磁率の測定、および磁気抵抗の測定を行った。メタ磁性転移点および臨界点の定義を定めたのち、ピストンシリンダー型圧力セルによる高圧下での電気抵抗・磁気抵抗の測定を行った。測定結果より、温度 - 圧力 - 磁場相図を決定し、量子臨界点を求めた。さらに量子臨界点に至る電気抵抗の温度依存性から非フェルミ液体的挙動の有無を検証した。

4. 研究成果

始めにメタ磁性転移磁場あるいは臨界点として定義すべき点を決定するために、常圧下における磁化のコンター図を明らかにした(図1)。これと、磁気抵抗がピークを示す点および磁気抵抗の微分のピーク点を重ねることにより、両者がずれ始める点が臨界点であることがわかる。なお、本研究との共同研究により、核磁気共鳴(NMR)の測定が行われ、メタ磁性の振る舞いを示すc軸に垂直な面内で、特に臨界点近傍で、強い磁気揺らぎが観測され、求められた臨界指数は3次元イジングのユニバーサリティに属していることが明らかとなった。次に圧力下における温度 - 圧力 - 磁場相図を示す。1次相転移面は圧力の印加とともに

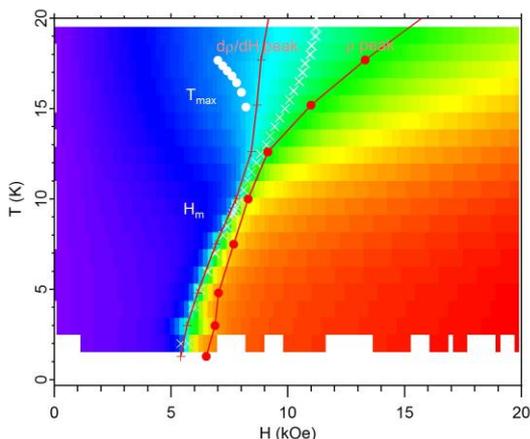


図1 UCoAl の磁化のコンター図。青から赤にかけて磁化の値が大きくなる。×は磁化曲線の微分がピークを持つ磁場、白丸は帯磁率がピークを持つ温度をあらわす。赤で示された丸と+は磁気抵抗がピークを示す磁場と磁気抵抗の微分がピークを示す磁場である。

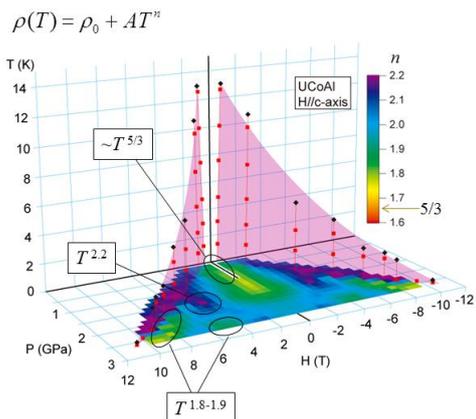


図2 UCoAl の温度 - 圧力 - 磁場相図。ピンクの面が1次相転移面をあらわす。圧力 - 磁場面に示したコンター図は電気抵抗の温度べきの大きさを表している。

高磁場側にシフトし、臨界温度は減少する。約 2.7GPa 付近で、臨界温度は絶対零度に落ち込む。この点が量子臨界点である。なお、フランスの研究グループでも同様な研究を行い、量子臨界点が 1.4GPa と報告しており、本研究と矛盾している。この点は今後検証をする必要がある。

電気抵抗の振る舞いに着目すると、常圧では常磁性状態で、電気抵抗は温度の 5/3 乗に比例する、いわゆるスピン揺らぎによる非フェルミ液体的な挙動をする。圧力の印加によって 5/3 乗の振る舞いは見られなくなり、2.2 乗や 1.8~1.9 乗の特異なべき則を示すようになる。これら特異な振る舞いは、これまで見出されてこなかった新しい性質である。さらに、量子臨界点近傍では、図3に示すように、磁気抵抗により明確な異常が見出された。この異常は絶対零度に近づくにつれて顕著になる。この振る舞いも温度のべき則同様これまでの考えでは理解できない現象であ

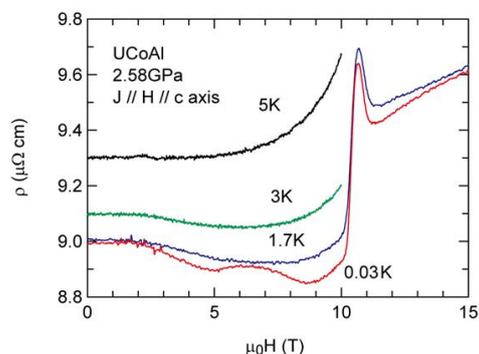


図3 UCoAl の量子臨界点近傍での磁気抵抗の温度変化。

る。磁気抵抗が磁気的な散乱のほかに電子構造に依存した物理量であることを考慮すると、これら量子臨界点近傍で見いだされる異常な振る舞いは、磁気状態及び電子構造の不安定性が量子臨界点近傍で誘起されていることを示唆している。

以上示したように、UCoAl の温度 - 圧力 - 磁場相図はこれまでの遍歴電子系の磁性体で予想される相図と定性的に一致しているにもかかわらず、量子臨界点近傍のかなり広い範囲でこれまでの理解では説明できない新奇な振る舞いが数多く見出された。これらを理解するためには、今後磁気測定など、他の測定による研究が必要であろう。また、共同研究によって磁性体の示す相図がよく知られた液体 - 気体の相図と対応・比較することが可能であることが示された。さらに、同じ遍歴電子系の強磁性物質 $ZrZn_2$ についても、共同研究により、その相図と量子臨界点近傍の物理の理解が進みつつある。今後、本研究を契機として、遍歴電子系における磁気的量子臨界の物理が展開されることが期待される。

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 23 件)

- ① N. Kabeya, H. Maekawa, K. Deguchi, N. Kimura, H. Aoki and N. K. Sato, Phase diagram of the itinerant-electron ferromagnet $ZrZn_2$, *physica status solidi (b)*, 査読有, 250, 2013, 654-656
DOI:10.1002/pssb.201200869
- ② H. Iida, T. Sugawara, H. Aoki and N. Kimura, Search for a quantum critical point in $CeRhSi_3$ via electrical resistivity, *physica status solidi (b)*, 査読有, 250, 2013, 502-505
DOI:10.1002/pssb.201200772
- ③ 木村憲彰, 空間反転対称性の破れた超伝導, *固体物理*, 査読有, 47, 2012, 593-606
- ④ M. Sutherland, R. P. Smith, N. Marcano, Y. Zou, S. E. Rowley, F. M. Grosche, N. Kimura, S. M. Hayden, S. Takashima, M. Nohara and H. Takagi, Transport and thermodynamic evidence for a marginal Fermi-liquid state in $ZrZn_2$, *Phys. Rev. B*, 査読有, 85, 2012, 035118/1-9
DOI:10.1103/PhysRevB.85.035118
- ⑤ T. Sugawara, H. Iida, H. Aoki and N. Kimura, Absence of Quantum Criticality and Presence of Superconducting Fluctuation in

Pressure-Induced Heavy-Fermion Superconductor $CeRhSi_3$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 81, 2012, 054711/1-6
DOI:10.1143/jpsj.81.054711

- ⑥ K. Karube, T. Hattori, S. Kitagawa, K. Ishida, N. Kimura and T. Komatsubara, Universality and critical behavior at the critical endpoint in the itinerant-electron metamagnet UCoAl, *Phys. Rev. B*, 査読有, 86, 2012, 024428/1-7
DOI:10.1103/PhysRevB.86.024428
- ⑦ N. Kabeya, H. Maekawa, K. Deguchi, N. Kimura, H. Aoki and N. K. Sato, Non-Fermi Liquid State Bounded by a Possible Electronic Topological Transition in $ZrZn_2$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 81, 2012, 073706/1-4
DOI:10.1143/jpsj.81.073706
- ⑧ T. Sugawara, N. Kimura and H. Aoki, Ac-Susceptibility of Heavy-Fermion Superconductor $CeRhSi_3$ under Pressure, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.*, 査読有, 80, 2011, SA067/1-3
DOI:10.1143/JPSJS.80SA.SA067
- ⑨ N. Kimura, T. Sugawara and H. Aoki, Magnetic and Superconducting Phase Diagram of Noncentrosymmetric $CeRhSi_3$, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl.*, 査読有, 80, 2011, SA019/1-6
DOI:10.1143/JPSJS.80SA.SA019
- ⑩ H. Iida, Y. Kadota, M. Kogure, T. Sugawara, H. Aoki and N. Kimura, Fermi Surface Properties and Antisymmetric Spin-Orbit Coupling in Noncentrosymmetric $CeCoSi_3$, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, 80, 2011, 083701/1-4
DOI:10.1143/jpsj.80.083701

[学会発表] (計 38 件)

- ① 前川浩隆, $ZrZn_2$ における Lifshitz 転移の Hall 効果による研究, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 29 日, 広島大学
- ② 飯田祐己, $CeRhSi_3$ の電子状態と超伝導 II, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学
- ③ 軽部皓介, ^{27}Al -NMR を用いた UCoAl におけるメタ磁性臨界現象の研究 (2), 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 21 日, 横浜国立大学
- ④ 木村憲彰, $CeRhSi_3$ における超伝導揺らぎの可能性, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 19 日, 横浜国立大学
- ⑤ N. Kabeya, Metamagnetic Transition in $ZrZn_2$, International Conference on

- Quantum Criticality and Novel Phases 2012, 2012年8月29日, DREIKÖNIGSKIRCHE(ドレスデン、ドイツ)
- ⑥ H. Iida, Verification of the Quantum Critical Point in CeRhSi_3 via Electrical Resistivity, International Conference on Quantum Criticality and Novel Phases 2012, 2012年8月27日, DREIKÖNIGSKIRCHE(ドレスデン、ドイツ)
- ⑦ K. Karube, ^{27}Al -NMR study for critical phenomena of metamagnetic transition in UCoAl , International Conference of Magnetism 2012, 2012年7月12日, BEXCO(プサン、韓国)
- ⑧ N. Kimura, Possible superconducting fluctuation in pressure-induced heavy fermion superconductor CeRhSi_3 , International Conference of Magnetism 2012, 2012年7月10日, BEXCO(プサン、韓国)
- ⑨ 軽部皓介, ^{27}Al -NMR を用いた UCoAl におけるメタ磁性臨界現象の研究, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学
- ⑩ 壁谷典幸, ZrZn_2 におけるマージナルな量子臨界点と Lifshitz 転移, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学
- ⑪ 前川浩隆, ZrZn_2 のメタ磁性近傍における輸送特性, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学
- ⑫ 飯田祐己, CeRhSi_3 の電子状態と超伝導, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学
- ⑬ N. Kimura, Novel Properties of Noncentrosymmetric Heavy-Fermion Superconductor CeRhSi_3 , TOKIMEKI 2011(International workshop on heavy fermions), 2011 年 11 月 26 日, 大阪大学
- ⑭ 壁谷典幸, ZrZn_2 の量子相転移点近傍における新奇秩序相, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日, 富山大学
- ⑮ L. Sibley, High Pressure Measurements on the Itinerant Ferromagnet ZrZn_2 , International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2011), 2011 年 9 月 2 日, University of Cambridge, Cambridge, UK
- ⑯ L. Sibley, High Pressure Measurements on the Itinerant Ferromagnet ZrZn_2 , International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2011 年 8 月 13 日, Beijing International

Convention Center, Beijing, China

[図書] (計 1 件)

N. Kimura and I. Bonalde (ed. M. Sigrist and E. Bauer), Springer, Non-Centrosymmetric Superconductors, 2012, 47 (pp.35-80)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 憲彰 (KIMURA NORIAKI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 30292311