

平成 22 年 4 月 8 日現在

研究種目：特別推進研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17002004

研究課題名（和文） マイクロ K 温度領域における量子臨界現象の研究

研究課題名（英文） Study of Quantum Critical Phenomena at Micro Kelvin Temperatures

研究代表者

鈴木 治彦 (SUZUKI HARUHIKO)

金沢大学・数物科学系・特任教授

研究者番号：50004370

研究成果の概要（和文）：絶対零度で起きる相転移、量子相転移が起る転移点近傍では量子ゆらぎが効いて来て特異な現象が現れる。これまでの測定は絶対0度よりはるかに高い温度でなされて来た。我々は重い電子系 CeRu₂Si₂、エアロジェル中の液体 3He の超流動、Pt 金属の核磁性という異なった系を研究代表者、分担者の3人がそれぞれ得意な分野を担当し超低温での研究を行った。多くの新しい知見、特に超低温でのみ得られる成果が出た。

研究成果の概要（英文）：We measured the temperature dependences of magnetic susceptibility, thermal expansion and magnetostriction of heavy Fermion compound CeRu₂Si₂ down to \cdot K temperature region. We observed the unconventional behavior, suggesting that this compound is very close to the Quantum Critical Point (QCP).

We also predicted the new QCP at higher pressure side for this compound.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	52,600,000	15,780,000	68,380,000
2006 年度	37,400,000	11,220,000	48,620,000
2007 年度	46,100,000	13,830,000	59,930,000
2008 年度	38,251,000	11,475,300	49,726,300
2009 年度	30,300,000	9,090,000	39,390,000
総計	204,651,000	61,395,300	296,046,300

研究分野：超低温物性

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：量子臨界現象、量子ゆらぎ、重い電子系、超流動 3He、エアロジェル、核磁性

1. 研究開始当初の背景

量子相転移、量子臨界現象の研究は物性物理の中心課題と言って良く、非常に活発に研究が行われている。特に重い電子系の研究は活発であるが殆どの研究の温度は 0.01K 以上

と高い。超流動 3He の研究の温度は低い量子臨界現象を目的とした研究は少ない。

2. 研究の目的

本来絶対零度近傍に於ける現象なので出来るだけ低い温度が重要であると考え、我々は少なくともマイクロK温度領域まで温度を下げて研究する。上記3つの異なる系、それぞれ特性温度がK, mK, \cdot Kと3桁ずつ異なる系を用いて研究し、新しい量子臨界現象の観測を期待し、さらにこの3つの系の結果を比較する事により量子臨界現象の本質を明らかにする。

3. 研究の方法

2台の核断熱消磁冷却装置を用いて試料を \cdot K温度領域まで冷却する。重い電子系 CeRu_2Si_2 はこれまで帯磁率、磁化の測定を行っていたので、熱膨張、磁歪の測定をする。

超流動 ^3He の研究はエアロジェルという液体 ^3He に理想的不純物として働く物質の中に入れ超音波で測定する。

Pt金属の核磁性は数100 \cdot K温度から試料の核スピン自体をもう一度核断熱消磁冷却を行い核スピン・オーダーを実現する。

4. 研究成果

(1)重い電子系 CeRu_2Si_2 は高温ではキュリーワイス則に従って帯磁率が低温で上昇し約6K以下では温度に依らない帯磁率即ちFermi液体的帯磁率を示す。図1の帯磁率はそれ以下、100mK以下の帯磁率で一定になった帯磁率からのずれを示している。ゼロ磁場では測定された最低温度150 \cdot Kまで帯磁率は上昇していた。しかしこの温度変化は既存の理論に合わない。また小さな磁場を掛けると帯磁率にピークを作るがこのピークの原因も分からなかった。そこで熱膨張と磁歪の測定を行った。

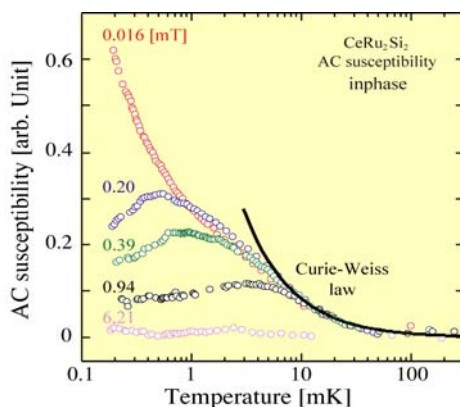
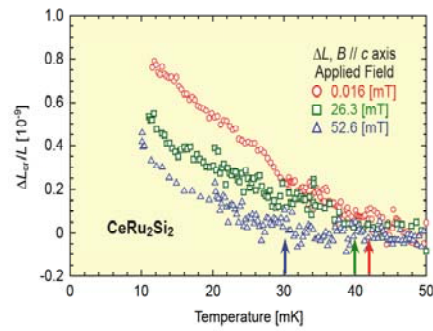


Fig. 1 CeRu_2Si_2 の交流帯磁率

下に熱膨張の結果を示している。高温(6K以下)のFermi液体状態では T^2 に良く合う。



熱膨張の T^2 変化からのずれ

これはそこからのずれを示している。帯磁率がずれて来たのに対応する。

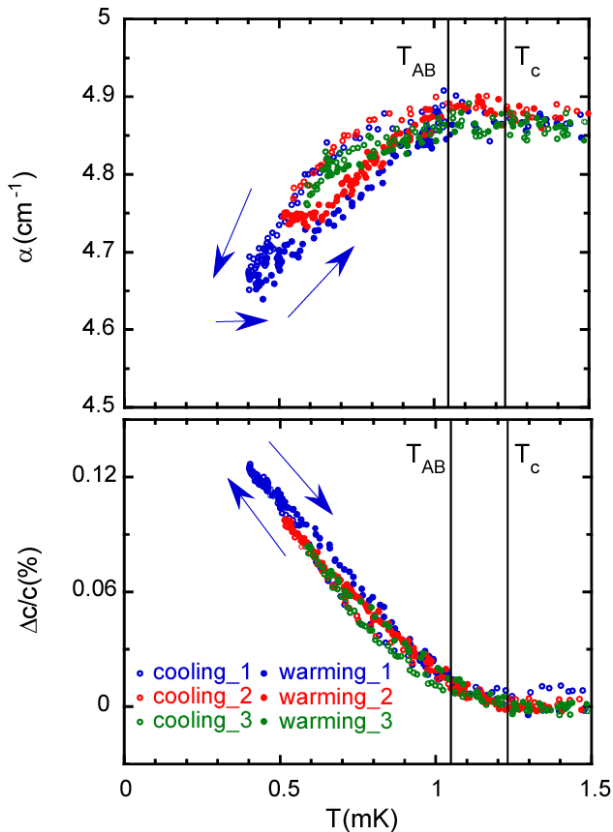
より低温では熱膨張の感度が無くなるので磁歪測定を行った。帯磁率がピークを作った後一定値になる。一定値が磁場に依存している。一方磁化測定の解析から有効質量 m^* が磁場に依存する事が分かりこれは一定帯磁率の磁場依存性に対応している事が分かった。熱膨張(比熱の情報を与える)が帯磁率のピークに対応して何の異常も示さない事からこの帯磁率のピークは相転移ではない事を示している。磁場中の低温における一定の帯磁率は磁場に依存している事から非フェルミ液体状態であると考えられる。(フェルミ液体状態は温度に依らない一定の帯磁率は磁場にもよらない、有効質量 m^* も磁場に依存しない。)この非フェルミ液体の帯磁率は量子臨界現象によるゆらぎによって生じている。それが温度変化しない一定値を与えるのは此のゆらぎが温度に依らないゆらぎ、即ち量子ゆらぎによるものである事を示している。磁場を掛けたときの帯磁率のピークは低温になるにしたがい熱ゆらぎが減少し(従って熱ゆらぎによる帯磁率も減少し)量子ゆらぎのみの領域にははいつて行く事を示している。帯磁率のピークは熱ゆらぎが効いている領域から量子ゆらぎのみの領域へのクロスオーバーとして理解出来る。このように量子ゆらぎのみの領域を観測出来たのは我々がマイクロKという超低温に於ける測定を行った為である。

一方負の熱膨張を理論を用いて解析すると圧力を増大する方向に量子臨界点(QCP)が存在する事を示している。一方置換系、RuをRhで約3%置換すると磁気QCPが現れる、即ち格子の増大(負の圧力)でQCPが現れると言う実験結果がある。そこで我々は我々が予測した圧力増大で現れるQCPを新QCPとして予言した。今後の実験が待たれる。

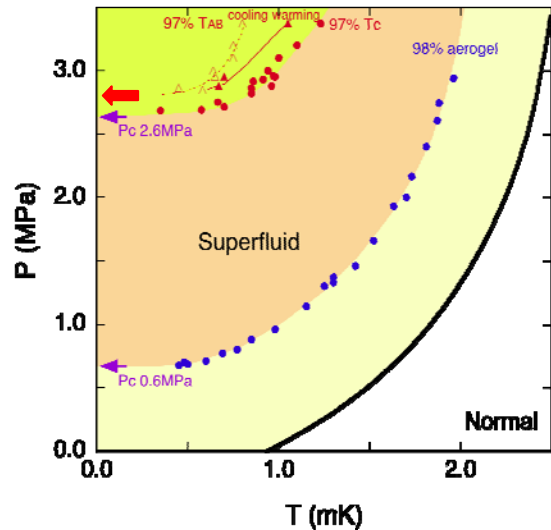
(2)空孔率97%エアロジェル中の液体 ^3He を超音波の吸収と音速の測定で超流動転移

点の測定を行なった。既に良く研究されているバルクの液体 3He とエアロジェル中の 3He を同時に測定する事により信頼出来るデータが得られた。核断熱消磁冷却によりマイクロ K 温度領域までの測定を行なった。

下に超音波吸収 α 及び音速 c の温度変化の測定結果を示す。此の図で T_c 以下で超流動 A 相が起こり、 T_{AB} 以下で A 相-B 相の転移が起る。A 相では吸収には変化が無く音速にのみ変化が出る。一方 A 相-B 相転移以下では吸収にも温度変化が現れる。また此の転移がヒステレシスを伴う事が分かる。これらを合わせて考えるとヒステレシスは測定した最低温度 $T/T_c \sim 0.4$ まで残り、この間は A 相と B 相が共存している事を示している。これは空孔率の大きな他のエアロジェル中 (97.5%, 98% など) の物に比べて随分広い。ゲル骨格の SiO₂ が太くなる事により局所的 2 次元性がもたらす、A-like 相の安定化によるものと考えられる。



以上の結果からエアロジェル中の液体 3He の相図は以下の図のようになるここに 98% エアロジェル中の液体 3He の図も同時に示してある。



量子臨界点の臨界圧力は $P_c \sim 2.6 \text{ MPa}$ と求まった。また此の図からややまだ不明確であるが AB 転移点の QCP、即ち $T=0\text{K}$ において AB 転移点の臨界圧力が存在する可能性が示唆された。

この実験で求められた T_c の抑制は Homogenous Isotropic Scattering Model (HISM) より小さい。むしろ Inhomogeneous Isotropic Scattering Model (IISM) で考えるべきで現在解析中である。

(3) ¹⁹⁵Pt 金属の核磁性；

期間内に核磁気秩序状態は観測出来なかったが、Pt 金属中の Fe 不純物に対する ¹⁹⁵Pt の濃度依存性、形状依存性などの基本的物性は明らかに出来た。

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 15 件)

1. K. Matsumoto, H. Tsubotya, K. Yoshino, S. Abe, H. Tsujii and H. Suzuki; Ultrasound Study of the Solid-Liquid Transition and Solid-Liquid Interface of 4He in Aerogel, J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 034601-1-7, 査読有り
2. N. Kuwata, K. Ohno, E. Kobayashi, Y. Sugita and H. Suzuki; Magnetic Properties of Enriched ¹⁹⁵Pt Metals, J. Low Temp. Phys., 155 (2009) 114-126 査読有り
3. Y. Luo, Q. Tao, Y. Li, X. Lin, G. Cao, Z. Xu, Y. Xue, H. Kaneko, A. V. Savinkov, H. Suzuki, C. Fang and J. Hu; Evidence of magnetically driven structural phase transition in RFeAsO (R = La, Sm, Gd, and Tb): A low-temperature x-ray diffraction

study, Phys. Rev. B 80 (2009) 224511-1-224511-5 査読有り

4. Koichi Matsumoto, Ayumi Matsuzaki, Koji Kamiya and Takenori Numazawa; Magnetocaloric effect, specific heat and entropy of iron-substituted gadolinium gallium garnets $Gd_3(Ga_{1-x}Fe_x)_5O_{12}$, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 11 (2009) 113002. 査読有り

5. A. V. Savinkov, S. L. Korableva, A. A. Rodinov, I. N. Kurkin, B. Z. Malkin, M. S. Tagirov, H. Suzuki, K. Matsumoto and S. Abe; Magnetic properties of Dy³⁺ ions and crystal field characterization in YF₃:Dy³⁺ and DyF₃ single crystals, J. Phys. Condens. Matter 20 (2008) 485220. 査読有り

6. J. Yoshida, S. Abe, D. Takahashi, Y. Segawa, Y. Komai, H. Tsujii, K. Matsumoto, H. Suzuki and Y. Onuki; Novel Quantum Criticality in CeRu₂Si₂ near Absolute Zero Observed by Thermal Expansion and Magnetostriction, Phys. Rev. Letters, 101 (2008) 256402. 査読有り

7. D. I. Abubakirov, K. Matsumoto, H. Suzuki and M. S. Tagirov; Anisotropic magnetization of the Van Vleck paramagnet LiTmF₄ at low temperatures and high magnetic fields, J. Phys.; Condens. Matter 20 (2008) 1-4. 査読有り

8. Yun Xue, Shumsun Naher, Fumiaki Hata, Hiroshi Kaneko, Haruhiko Suzuki and Yoshihiro Kino; Low Temperature X-ray Diffraction Study of ZnCr₂O₄ and Ni_{0.5}Zn_{0.5}Cr₂O₄, J. Low Temp. Phys. 151 (2008) 1193-1204 査読有り

9. K. Matsumoto, H. Tsuboya, K. Yoshino, S. Abe, H. Suzuki and D. A. Tayurskii; Possible Sound Mode Conversion in "Superfluid ⁴He-97%Open Aerogel" System, J. Low Temp. Physics. 148 (2007) 615-620 査読有り

10. M. Nishikawa, K. Yoshino, S. Abe, H. Suzuki, K. Matsumoto, D. A. Tayurskii and K. Tajiri; Pressure dependence of the sound velocity of He-4 in Aerogel, J. Phys. Chem. Solid 66 (2005) 1506-1508. 査読有り

11. Haruhiko Suzuki, Yun Xue, Akiko Hosomichi, Shumsun Naher, Fumiaki Hata and Hiroshi Kaneko; X-ray Diffraction Study of Correlated Electron System at Low Temperatures, J. of Superconductivity and Novel Magnetism, 19 (2006) 89-94. 査読有り

12. A. V. Savinkov, D. S. Irisov, B. Z. Malkin, K. R. Safiullin, H. Suzuki, M. S. Tagirov and D. A. Tayurskii; Anisotropic

magnetic susceptibility and crystal field analysis in the Van Vleck paramagnet PrF₃, J. Phys.: Condens. Matter 18 (2006) 6337-6347. 査読有り

13. Koichi Matsumoto, Masaaki Nishikawa, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, Dmitrii A. Tayurskii, Koji Tajiri; Superfluid transition and solidification of ⁴He in Aerogel, J. of Physics and Chemistry of Solids, 66 (2005) 1486-1489. 査読有り

14. Akiko Hosomichi, Yun Xue, Shumsun Naher, Fumiaki Hata, Hiroshi Kaneko, Haruhiko Suzuki; Negative thermal expansion in correlated electron system and Fermi liquid theory, J. of Physics and Chemistry of Solids, 66 (2005) 1583-1586. 査読有り

15. Y. Xue, S. Asada, A. Hosomichi, S. Naher, J. Xue, H. Kaneko, H. Suzuki, T. Muranaka and J. Akimitsu; X-ray diffraction study of MgB₂ at low temperatures, J. Low Temp. Physics, 138 (2005) 1105-1115 査読有り

[学会発表] (計 14 件)

1. H. Suzuki and Y. Xue: Quantum Phase Transition in Heavy Electron CeRu₂Si₂, 中国低温物理学会、中国、2009, 7, 29.

2. S. Abe, et al.: Nobel quantum criticality in CeRu₂Si₂ at ultralow temperatures observed by dilatometric measurements., ICM 2009, ドイツ、2009, 7, 28.

3. Oishi, M. Ohashi, H. Suzuki et al.: The magnetic volume magnetostriction of GdAl₂ with a cubic Laves structure, ICM 2009, ドイツ、2009, 7, 27.

4. K. Matsumoto, H. Tsuboya, K. Ohmori, S. Abe, H. Suzuki and D. A. Tayurskii; Frequency dependence of fast mode ultrasound attenuation of liquid ⁴He in aerogel, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 032054, オランダ、2008、8、11.

5. H. Tsujii, S. Mihara, S. Abe, H. Suzuki and K. Matsumoto; Acoustic properties of superfluid ³He in 97% aerogel, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 032114、オランダ、2008、8、11

6. J. Yoshida, S. Abe, A. Tada, H. Tsujii, K. Matsumoto, H. Suzuki and H. S. Suzuki; Magnetic susceptibility of PrMg₃ at ultra low temperatures, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 042241, オランダ、2008、8、8.

7. N. Kuwata, K. Ono, S. Abe, K. Matsumoto and H. Suzuki; Magnetic properties of

enriched 195Pt metals, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 042107、オランダ、2008、8、7.

8. K. Matsumoto, T. Kondo, S. Yoshioka, K Kamiya, and T. Numazawa: Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction, J. of Physics: Conference Series, (LT25) 150 (2009) 012028, オランダ、2008、8、8.

9. Y. Xue, H. Kaneko, Q. Tao, Z. Xu, N. Takeda, Y. Nemoto, T. Goto and H. Suzuki; Low temperature x-ray diffraction study on superconductivity, J. Physics, Conf. Series (LT25) 150 (2009) 052284, オランダ、2008、8、12.

10. S. Abe, D. Takahashi, J. Yoshida, K. Matsumoto, H. Suzuki and T. Kitai; Hyperfine Nuclear Magnetism of PrPb₃ in the Antiferro-Quadrupolar Ordered State, AIP Conf. Proc. (LT24) 850 (2006) 1293-1294. 米国、2005、8、16.

11. K. Matsumoto, K. Yoshino, M. Nishikawa, S. Abe, H. Suzuki and K. Tajiri; Solidification and Melting of ⁴He in Aerogel Observed by Ultrasound Propagation, AIP Conf. Proc. (LT24) 850 (2006) 1583-1584. 米国、2005、8、16

12. J. Yoshida, S. Abe, D. Takahashi, K. Matsumoto and H. Suzuki; Magnetic properties at small magnetic fields and ultra low temperatures, AIP Conf. Proc. (LT24) 850 (2006) 1171-1173. 米国、2005、8、15.

13. H. Suzuki, F. Hata, Y. Xue, H. Kaneko, A. Hosomichi, S. Abe, R. Higashinaka, S. Nakatsuji and Y. Maeno; Crystal Distortion of Dy₂Ti₂O₇ at the Spin Ice Transition Temperature, AIP Conf. Proc. (LT24) 850 (2006) 1109-1110. 米国、2005、8、15.

14. H. Suzuki, H. Aburano, R. Yamauchi, S. Abe, I. Watanabe; μ -SR study on CDW phase transition in K metal, Physica B, 374-375 (2006) 402-404. mSR 2005, 英国、2005、8、11.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 治彦 (SUZUKI HARUHIKO)
金沢大学・数物科学系・特任教授
研究者番号：50004370

(2) 研究分担者

松本 宏一 (MATSUMOTO KOICHI)
金沢大学・数物科学系・教授
研究者番号：10219496

阿部 聡 (ABE SATOSHI)
金沢大学・数物科学系・講師

研究者番号：60251914

辻井 宏之 (TSUJII HIROYUKI)
金沢大学・学校教育系・准教授
研究者番号：10392036