

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：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540367

研究課題名(和文) 超低温高圧多重極限環境における重い電子系物質の新しい量子相転移の研究

研究課題名(英文) Novel quantum critical phenomena of a heavy fermion compound at ultralow temperatures in magnetic fields

研究代表者

阿部 聡 (SATOSHI, ABE)

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号：60251914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：希釈冷凍機と超伝導磁石を用いた超低温および高磁場の多重極限環境の構築とキャパシタンス法を用いた高精度歪測定装置の開発を行ない、最低温度10mK、最大磁場9Tにおいて試料長変化率の測定精度を 10^{-10} まで向上させ、重い電子系物質における超低温および高磁場中での熱膨張・磁気歪精密測定から、量子相転移に起因する量子臨界現象を研究した。典型的な重い電子系物質であるCeRu₂Si₂において、フェルミ流体状態からの逸脱として現れる量子臨界寄与の温度および磁場依存性を測定し、超低温における量子臨界現象はこれまでに知られている反強磁性量子相転移とは異なる起源である可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed dilatometric measurements at millikelvin temperatures down to 10 mK in magnetic fields up to 9 T using 3He-4He dilution refrigerator and 9 T superconducting magnet. The dilatometer provides the extremely high resolution of $\Delta L/L \sim 10^{-10}$ using a ratio-transformer-based capacitance bridge. The quantum critical phenomena of the typical heavy Fermion compound CeRu₂Si₂ has been investigated by thermal expansion and magnetostriction measurements at millikelvin temperatures in magnetic fields. The temperature and magnetic field dependence of the critical contribution suggests the existence of an additional quantum critical point.

研究分野：低温物理学

キーワード：強相関電子系 低温物性 多重極限

1. 研究開始当初の背景

基底状態において起きる秩序-無秩序相転移である量子相転移は、秩序変数の熱的揺らぎが系を支配する古典的な相転移と異なり、絶対零度においても存在する量子的な揺らぎが重要である。量子相転移近傍で現れる量子臨界効果は、ミクロなモデルの詳細には関係なく、秩序変数の種類・次元などによって決まるユニバーサルな性質を示すため、実験・理論的研究が活発に行なわれてきた。

重い電子系では、局在磁気秩序をもたらす RKKY 相互作用と、伝導電子との混成により遍歴状態 (Fermi Liquid 状態) をもたらす近藤効果が拮抗し量子相転移を示すが、フェルミ面の状態密度が鋭いため、元素置換、圧力、磁場など温度以外の物理量により量子相転移の制御が容易であるため、多くの研究がなされてきた。その結果、遍歴性を保ったまま量子相転移するのではなく、量子相転移点で同時に遍歴性が消滅する新しいタイプの量子相転移や、磁気秩序相と重い電子系状態相の中間に超伝導相が出現する物質の存在などが明らかにされてきた。

典型的な重い電子系物質として知られている CeRu_2Si_2 は非磁性・非超伝導であり、スピン揺らぎの相関モデルや遍歴的量子相転移の例として着目され、常圧下で存在する 3 つの非整合短距離スピン相関が、わずかな元素置換によって長距離化し反強磁性スピン密度波秩序状態が出現する、すなわち、 CeRu_2Si_2 は常圧よりも負圧側(約-0.5GPa)に圧力誘起反強磁性量子臨界点を持ち、これまでに知られてきた多くの物性とその臨界効果として理解されてきた。

申請者のグループは最低温度 170mK まで CeRu_2Si_2 の帯磁率・磁化を測定した結果、それまでに知られていた反強磁性量子臨界点では解釈できない磁場に制御された新しい量子臨界現象を発見し、さらに、熱膨張・磁気歪を 0.5mK、52mT まで測定した結果、元素置換により出現する反強磁性量子相臨界点とは異なる新しい量子相転移点、常圧よりも高圧側に存在する可能性を指摘した。

CeRu_2Si_2 の超低温領域における量子臨界現象は、従来のスピン密度波量子相転移とは異なる新しいタイプの局所量子相転移として知られる YbRh_2Si_2 の磁場誘起量子相転移との類似性が指摘され、また、複数の量子相転移の共存はトポロジカル量子相転移の可能性も示唆されている。しかし、これまでの研究は常圧下、低磁場の測定に限られており、新しい量子臨界点や秩序状態についての詳細は未解明のままであり、超低温多重極限での測定が重要である。また、磁化容易軸に垂直な a 軸方向についての研究は限られ、新し

い量子臨界現象の結晶軸依存性の解明も重要である。

2. 研究の目的

量子的な揺らぎに起因する量子相転移とそれに伴う量子臨界現象は、相互作用がもたらす基底状態を理解する上で重要である。重い電子系物質では温度以外の物理量、特に圧力と磁場により、拮抗する相互作用の優劣を容易に変化させることができるため、量子相転移の研究対象系として極めて有効であり、また、超低温極限領域は熱的揺らぎが無視できるため量子揺らぎの研究に理想的な環境である。本研究課題の目的は、多重極限環境での熱膨張・磁歪精密測定から重い電子系物質の新しい量子臨界現象を明らかにすることである。

3. 研究の方法

- (1) 超低温・強磁場多重極限環境の構築
 ^3He - ^4He 希釈冷凍機および超伝導マグネットを用い、最低温度 10mK、最大磁場 9T での測定環境を構築した。
- (2) 高精度歪測定装置の開発
 熱膨張係数は温度に比例するため、超低温領域では温度変化による試料長の変化が微小になる。また、磁気異方性により磁化容易軸に垂直な方向の磁気歪みも微小になる。したがって、試料長変化の測定精度は 10^{-10} が必要となる。このため、キャパシタンス法を用いた歪み測定装置を開発した。
- (3) 熱膨張・磁歪精密測定
 典型的な重い電子系物質 CeRu_2Si_2 において、超低温・強磁場多重極限環境での磁化容易軸と垂直な方向の熱膨張・磁気歪精密測定を行なった。

4. 研究成果

- (1) 超低温・強磁場測定装置
 開発した超低温・強磁場装置を図 1 に示す。温度測定に用いた ^3He 融解圧力温度計は、磁場依存性が 2%以下(@25mK、5T)であるが、試料印加磁場 9T で磁場 20mT 以下の位置に設置した。試料への熱伝達部(図中 3)にはスリットを入れ、磁場掃印による渦電流発熱を抑制している。また、熱伝達部は U 字構造とし、温度計とは別な端のみを冷凍機に接続した。この構造より、高磁場中の試料温度測定の精度を向上させている。図 2 は磁場掃印に伴う渦電流による温度上昇

を示す。100mKにおいて、磁場掃員速度 $2 \times 10^{-4} \text{T/s}$ では約 $0.5 \mu\text{W}$ の渦電流発熱が生じ約 1%の温度上昇を示すが、掃員速度を 1/20 にすることで 0.5%以下となり、測定精度の範囲内で温度上昇を無視することが可能である。これらの成果は日本物理学会および第 27 回低温物理国際会議で報告した(学会発表 ~)とともに、論文 , で報告した。

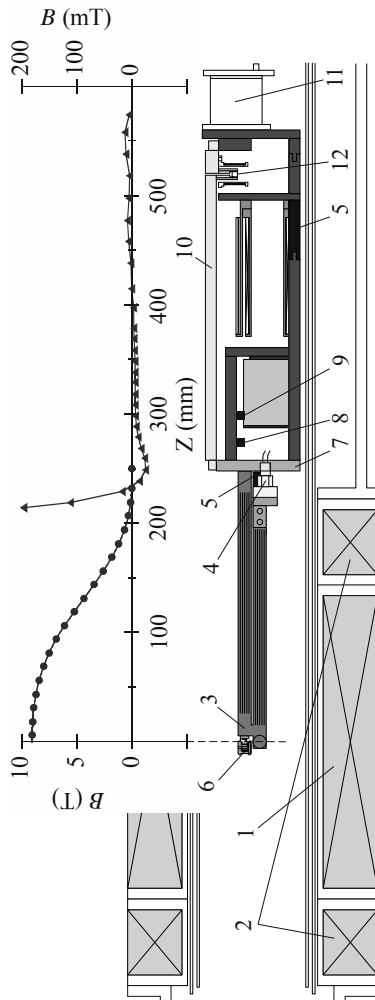


図 1: 超低温・強磁場実験装置と実験空間の磁場分布

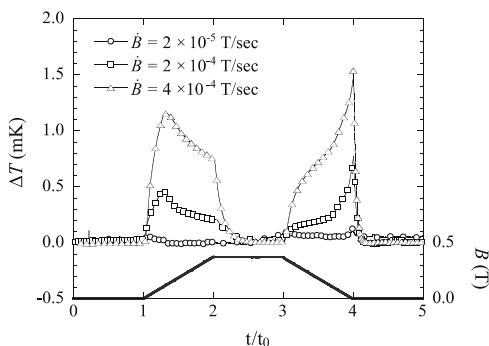


図 2: 磁場掃員での温度安定度

(2) 高精度歪み測定装置

キャパシタンス法とは、試料の一端に設置した平行平板電極と固定された電極とでキャパシタを構成することで、試料長変化を電極間隔変化に変換して測定する方法である。図 3 に開発したキャパシタンス式歪み測定セルの構造を示す。低温での試料の冷却、微小静電容量測定のために、試料セルは金属を用いる必要があり、試料とセル金属材料との試料長変化の差が測定される。このため熱膨張・磁歪が概知でかつ試料に比較して無視できるほど小さい銅をセル材料に用いている。また、試料キャパシタの静電容量測定において、参照キャパシタとインピーダンスブリッジを構成することで高精度測定が可能である。また、試料キャパシタと参照キャパシタを一体にしたセルにすることで、キャパシタのバックグラウンドの軽減が可能である。この成果は発表論文 , で報告した。

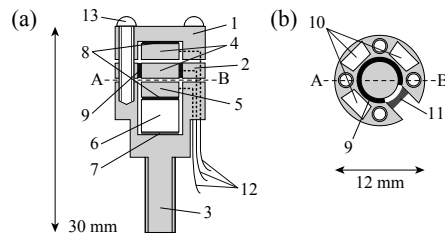


図 3: キャパシタンス式歪み測定装置

(3) 熱膨張・磁歪精密測定

典型的な重い電子系物質 CeRu_2Si_2 の磁化容易軸に垂直な a 軸方向に磁場を印加した時の a 軸方向の熱膨張・磁歪測定を、最低温度 10mK、最大磁場 9T まで行なった。

図 4 は熱膨張測定の結果で、110mK 以下の磁場中における試料長変化と温度依存性を示す。約 70mK 以上の温度領域では熱膨張は T^2 に比例しており、熱膨張係数 α_a は $\alpha_a/T = 2.8 \times 10^{-6} [\text{K}^{-2}]$ と表され、a 軸方向もフェルミ流体状態であることを示している。熱膨張係数の値は c 軸方

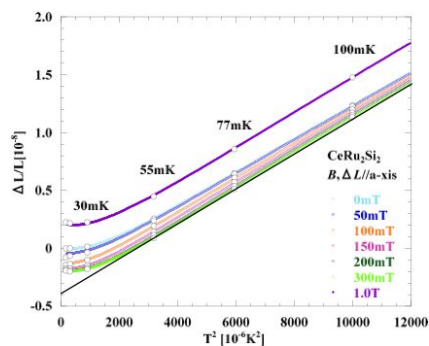


図 4: 磁場中での熱膨張の温度依存性

向の熱膨張係数の約 1/2 であり, 2K 以上での比 1/3.3 と同程度である。一方, 50mK 以下から, T^2 からのずれである非フェルミ流体効果があらわれ, 温度低下とともに逸脱が増大していることから, 臨界効果であることがわかる。

図 5 は等温磁歪測定の結果で, 温度一定で印加磁場を掃印したときの試料長変化と磁場依存性を示す。1T 以上の高磁場領域では, 磁歪は B^2 に比例しており, 磁歪係数 λ_a は $\lambda_a/B=1.3 \times 10^{-8} [T^{-2}]$ と表され, フェルミ流体状態であることが得られた。また, 得られた λ_a は, これまでに報告されている磁化容易軸方向の磁歪係数 λ_c の約 1/800 であり, 強い磁気異方性を持つことが明らかになった。また, 図ではしめされていないが, a 軸方向では 9T までメタ磁性を示さないことが明らかになった。

一方, 0.5T 以下から, 磁歪において B^2 からのずれである非フェルミ流体効果があらわれ, 低磁場でより顕著になる。また, この臨界寄与は 100mK 以下, 温度低下に伴い, より顕著になることが明らかになった。

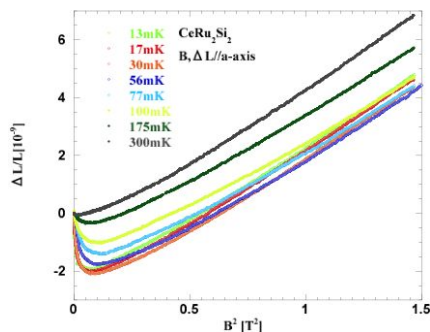


図 5 : 等温磁歪の磁場依存性

本研究で得られた a 軸熱膨張の臨界寄与の符号は, 以前測定された c 軸方向と同じく負である。臨界寄与の符号は圧力に対して等エントロピー線の勾配を与えることから, 正圧よりも高圧側に量子相転移点が存在することを示している。これまで $CeRu_2Si_2$ では元素置換系の研究から, 負圧側に反強磁性量子臨界点が存在することが明らかにされているが, 本研究により, a 軸でも負の臨界効果を示すことは, 高圧側の新しい量子相転移点の存在を支持する。また, 高磁場での磁歪係数に示されたように a 軸と c 軸は強い磁気異方性を持つにもかかわらず, 超低温の臨界寄与の大きさには軸異方性が現れないことから, 新しい量子相転移点による臨界寄与であることを示している。

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 5 件)

D. Inoue, D. Kaido, Y. Yoshikawa, M. Minegishi, K. Matsumoto, S. Abe, “Thermal expansion and magnetostriction measurements used high sensitive capacitive dilatometer at millikelvin temperatures”, *Journal of Physics Conf. Series* **500**, (2014) 032001, p1-5 (査読有)
doi:10.1088/1742-6596/568/3/032001

O. Iwakami, N. Kawata, M. Takeshita, Y. Yao, S. Abe, K. Matsumoto, “Thermal expansion and magnetostriction measurements using a Quantum Design physical property measurement system”, *Journal of Physics Conf. Series* **500**, (2014) 032002, p1-5 (査読有)
doi:10.1088/1742-6596/568/3/032002

O. Iwakami, Y. Namisashi, S. Abe, K. Matsumoto, G. Ano, M. Akatsu, K. Mitsumoto, Y. Nemoto, N. Takeda, T. Goto, H. Kitazawa, “Magnetic ordering of hyperfine-coupled nuclear and 4f-electron moments in clathrate compound $Pr_3Pd_{20}Ge_6$ ”, *Phys. Rev. B*, **90** (2014) 100402(R) p1-5 (査読有)
doi:10.1103/PhysRevB.90.100402

S. Abe, K. Matsumoto, “Nuclear demagnetization for ultra-low temperatures”, *Cryogenics*, **62**, (2014), p213-220 (査読有)
doi:10.1016/j.cryogenics.2014.04.004

S. Abe, F. Sasaki, T. Oonishi, D. Inoue, J. Yoshida, D. Takahashi, H. Tsujii, H. Suzuki, K. Matsumoto, “A compact capacitive dilatometer for thermal expansion and magnetostriction measurements at millikelvin temperatures”, *Cryogenics* **52**, (2012), p452-456 (査読有)
doi:10.1016/j.cryogenics.2012.04.008

[学会発表](計 3 件)

Daiki Inoue, Thermal expansion and magnetostriction measurements used high sensitive capacitive dilatometer at millikelvin temperatures, 27th International Conference of Low Temperature Physics, 2014 年 8 月 6 日~13 日, Buenos Aires

(Argentina)

井上大貴，超低温高磁場下における重い電子系 CeRu_2Si_2 の熱膨張・磁気歪精密測定，日本物理学会，2013 年 9 月 25 日～28 日，徳島大学（徳島県）

井上大貴，超低温・高磁場下における熱膨張・磁気歪精密測定による CeRu_2Si_2 量子臨界現象の研究，日本物理学会，2013 年 3 月 26 日～29 日，広島大学（広島県）

6．研究組織

(1)研究代表者

阿部 聡 (ABE SATOSHI)

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号：60251914

(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