

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18740232

研究課題名（和文）重い電子系における反強磁性量子相転移の臨界現象

研究課題名（英文）Critical phenomena of the antiferromagnetic quantum phase transition in heavy fermions

研究代表者

田畑吉計 (TABATA YOSHIKAZU)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00343244

研究成果の概要：重い電子系の基底状態が、通常金属と同じフェルミ液体から反強磁性秩序へと絶対零度で相転移する量子相転移の臨界現象を、典型的な重い電子系 CeRu_2Si_2 の置換物質を実験対象にして調べ、複数の反強磁性相とフェルミ液体相が存在する場合の複雑な臨界現象を観測した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,500,000	0	2,500,000
2007 年度	500,000	0	500,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	150,000	3,650,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：重い電子系, 量子相転移, 臨界現象, 中性子散乱実験

1. 研究開始当初の背景

近年の物性物理学の中心的トピックの一つに「量子相転移」がある。量子相転移は $T=0\text{K}$ で起こる相転移であり、量子相転移の起こる量子臨界点(QCP)で秩序状態を壊すのは、通常の古典相転移とは異なり、熱ゆらぎではなく量子ゆらぎである。その代表例は、「磁気秩序-常磁性フェルミ液体」の量子相転移である。この量子相転移の理論の歴史は古く、1970年代にまで遡る。一方、実験研究はその困難さから長らく行われなかったが、1990年代以降、圧力下の実験技術の向上などにより、盛んに行われるようになってきた。

重い電子系は相互作用のエネルギースケールが小さく、高温超伝導体などの d 電子系の強相関電子系に比べ、量子相転移を引き起こし易く、その研究が比較的容易な物質群である。その重い電子系での量子相転移の研究の成果として、磁気秩序(反強磁性)-常磁性フェルミ液体量子相転移には異なる 2 つの QCP(SDW QCP と locally critical QCP)がある可能性が実験、理論の両面から指摘された。研究代表者は、共同研究者と共に、典型的な重い電子系 CeRu_2Si_2 の Rh 置換系の量子相転移の臨界現象を中性子非弾性散乱実験によって調べ、その QCP が SDW QCP であることを実験的に示した。

CeRu_2Si_2 は、極低温($\sim 20\text{mK}$)まで磁気秩序

を示さない常磁性フェルミ液体の重い電子系であるが、3つの動的反強磁性相($q_1 = (0.3, 0, 0)$, $q_2 = (0.3, 0.3, 0)$, $q_3 = (0, 0, 0.35)$)を持つ、QCP近傍の物質であり、元素置換や圧力によって容易にQCPにコントロール出来、重い電子系の量子相転移を研究する上で、極めて良いモデルとなる物質である。

2. 研究の目的

前述の様に、重い電子系では2つの異なるQCPの存在が指摘されている。何故、異なるQCPが存在するのか、を解明することを最終的な目標として、典型的な重い電子系であるCeRu₂Si₂のRuサイト、Siサイトをそれぞれ、Rh、Geで置換することで、QCPにコントロールし、量子相転移の臨界現象を調べた。特に注目したのは、

(1) 1.で記載した様に、CeRu₂Si₂は3つの異なる反強磁性相を持ち、Rh置換とGe置換で異なる反強磁性相へ量子相転移することが過去には報告されている(Rh置換の場合は q_3 相、Ge置換の場合は q_1 相)。各々の量子相転移のユニバーサリティクラスは同じなのか否か。

(2) CeRu₂Si₂をRh、Geで置換した系Ce(Ru_{1-x}Rh_x)₂(Si_{1-y}Ge_y)₂(以下、CRRSGx/y)では、相図上に量子多重臨界点が存在することが期待できる。そこでの量子相転移の臨界現象は、他の量子相転移"線"上のものと異なるのか否か。

(3) CRRSGx/y系でlocally critical QCPは見えるか。
である。

3. 研究の方法

CRRSGx/y系の量子相転移を研究するために、Rh濃度x、Ge濃度yを細かく変えた単結晶試料をテトラーク炉を用いて作製し、

- (1) (圧力下)電気抵抗測定
- (2) (圧力下)磁化測定
- (3) (圧力下)中性子弾性散乱実験
- (4) 中性子非弾性散乱実験

を行った。中性子散乱実験は、日本原子力研究開発機構の改3号炉内に設置されている、東大物性研所有の3軸分光器ISSP-GPTAS及びISSP-HERで行った。

4. 研究成果

まず、CRRSGx/y系のRh低濃度領域($x < 0.05$)の試料に対し、Geを置換していくことで、フェルミ液体相と2つの異なる反強磁性相(q_1 相と q_3 相)の間の量子相転移を、主に中性子散乱実験で調べた。その結果、

(1) Ge置換によって現れる反強磁性相は(過去の報告とは異なり) q_1 相ではなく、Rh置換の場合と同じ q_3 相であり、CRRSGx/y系のxy相図上には、フェルミ液体相と q_3 相との間の量子相転移線(QCL)しか無い。

(2) フェルミ液体- q_3 相間のQCL近傍の量子臨界現象は、(当然のことながら)Rh置換の場合と同じ、SDW QCPで記述出来るモノである。

(3) さらにGe濃度を増やしていくと、過去に報告のあった q_1 相が現れるが、 q_1 相と q_3 相の間には、両磁気構造の線型的な重ね合わせで表されるdouble-q構造を持つ新たな反強磁性相(double-q相)が現れる。

等が分かった。

さらに、 $x=0.10$ の試料に対し、Ge置換及び圧力印加を行い、中性子散乱及び電気抵抗、磁化測定をする事で、CRRSGx/y系の磁気相図をより広いxy領域で調べた。その結果、

(4) $x=0.10$ 程度までRh濃度の濃い領域では、 q_3 相と q_1 相の間の相転移は1次転移的である。

(5) 圧力によって、 q_3 相からフェルミ液体相へ量子相転移する場合、その相転移はやはり1次転移的である。

(6) q_1 相の反強磁性モーメントは、観測した全濃度で $1\mu_B$ 以上と大きいのに対し、 q_3 相の場合は、 $0.1\mu_B$ から $1.5\mu_B$ とかなり幅広い値を持ち、 q_1 相が局在f電子による反強磁性という性格を持つのに対し、 q_3 相は遍歴f電子による反強磁性(重い電子のSDW)という性格を持つ事を示唆する。

などが分かった。以上の結果をまとめた、CRRSGx/y系の磁気相図を図.1に示す。

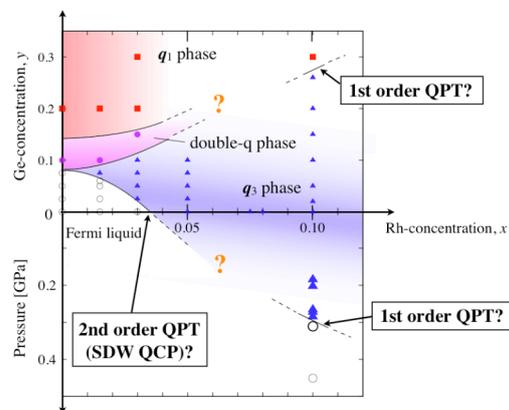


図.1 CRRSGx/y系の磁気相図(T = 0)

以上の様に、CRRSGx/y系では、SDW QCPで記述できる量子臨界現象が広く観測され

ることが分かる一方、(残念ながら)locally critical QCPや量子多重臨界点を観測することは出来なかった。図.1の相図を見れば分かる様に、Rh置換と逆方向の摂動を加えれば、フェルミ液体相、 q_3 相、double-q相の3相のぶつかる多重臨界点が現れそうである。Rh置換はdバンドに1つ余分に電子を入れる効果であることが過去の研究から分かっているので、dバンドから電子を抜く、即ち、Mo置換による研究によってそれが可能になると考えている。また、xの増大共に、フェルミ液体相- q_3 相の量子相転移が2次から1次に変化する振舞が見られている。その理由は不明であり、これをさらに詳しく調べる必要がある、と考えている。

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2件)

1. “Phase transition between the itinerant and the localized antiferromagnetic orders in $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ ”
C. Kanadani, Y. Tabata, T. Taniguchi, S. Kawarazaki, *J. Magn. Magn. Mater.* Vol.310, p.357-358 (2007)., 査読有

2. “Phase transition between the itinerant and the localized f-electron states in heavy fermion antiferromagnet $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ ”
Y. Tabata, C. Kanadani, R. Yamaki, T. Taniguchi, S. Kawarazaki, *Proceedings of the international symposium on topological aspects of critical systems and networks (World Scientific)*, Vol.166 012077 (2007)., 査読有

[学会発表] (計11件)

1. “圧力下磁化測定から見た重い電子系 $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ の局在遍歴相転移”
金谷親英, 斉藤敏明, 田畑吉計, 日本物理学会第64回年次大会 27aPS-30, 立教大学, 2009年3月27日

2. “重い電子系 $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ の量子相転移”
田口裕健, 田畑吉計, 中村裕之, 金谷親英, 日本物理学会2008年秋期大会 21aPS-41, 岩手大学, 2008年9月21日

3. “重い電子系 $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ における2つの異なる反強磁性相の競合”
田口裕健, 田畑吉計, 中村裕之, 大矢紫保,

谷口年史, 日本物理学会第63回年次大会 23pPSA-31, 近畿大学, 2008年3月23日

4. “重い電子系 $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ における量子二重臨界点の探索 II”

大矢紫保, 田畑吉計, 金谷親英, 田口裕健, 谷口年史, 中村裕之, 日本物理学会第62回年次大会 21pPSA-103, 北海道大学, 2007年9月21日

5. “重い電子反強磁性体 $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ における遍歴-局在相転移”

田畑吉計, 山木亮太, 金谷親英, 大矢紫保, 谷口年史, 河原崎修三, 日本物理学会2007年春期大会 19aWP-4, 鹿児島大学, 2007年3月19日

6. “重い電子系 $Ce(Ru_{1-x}Rh_x)_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ における量子二重臨界点の探索”

大矢紫保, 田畑吉計, 山木亮太, 金谷親英, 谷口年史, 河原崎修三, 日本物理学会2007年春期大会 18pPSB-45, 鹿児島大学, 2007年3月18日

7. “重い電子の反強磁性領域における遍歴・局在相転移”

金谷親英, 田畑吉計, 谷口年史, 河原崎修三, 日本物理学会2006年秋季大会 26aZR-9, 千葉大学西千葉キャンパス, 2006年9月26日

8. “重い電子反強磁性体 $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ における遍歴-局在相転移 II”

山木亮太, 金谷親英, 大矢紫保, 田畑吉計, 谷口年史, 河原崎修三, 日本物理学会2006年秋季大会 23pPSA-44, 千葉大学西千葉キャンパス, 2006年9月23日

9. “Phase transition between the itinerant- and the localized-antiferromagnetic orders in heavy fermion $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ ”
Y. Tabata, C. Kanadani, R. Yamaki, K. Yoshida, T. Taniguchi, S. Kawarazaki, Y. Uwatoko, QuBS2006 (ICM2006 Satellite Conference), Techno Community Square Ricotti Tokai, 2006年8月28日

10. “Phase transition between the itinerant and the localized antiferromagnetic orders in $Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ ”

C. Kanadani, Y. Tabata, T. Taniguchi, S. Kawarazaki, International Conference of Magnetism 2006 PSMo-B-086, Kyoto

International Conference Hall, 2006 年 9 月 21 日

11. “Neutron scattering study on the phase transition between the itinerant and the localized f-electron states in heavy fermion antiferromagnet

$Ce(Ru_{0.9}Rh_{0.1})_2(Si_{1-y}Ge_y)_2$ ”

Y. Tabata, C. Kanadani, R. Yamaki, K. Yoshida, T. Taniguchi, S. Kawarazaki., Y. Uwatoko, International Conference of Magnetism 2006 PSMo-C-135, Kyoto International Conference Hall, 2006 年 9 月 21 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田畑吉計 (TABATA YOSHIKAZU)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 00343244

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :