

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740195

研究課題名 (和文) 重い電子系化合物における反強磁性と超伝導の四重臨界点

研究課題名 (英文) Tetracritical point between antiferromagnetism and superconductivity in heavy-fermion systems

研究代表者

八島 光晴 (YASHIMA MITSU HARU)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：10397771

研究成果の概要 (和文)：ミクروسコピックな実験手段である NQR/NMR 法を用い、重い電子系化合物における超伝導の性質を調べた。重い電子系化合物 CeRhIn_5 では、四重臨界点近傍 (反強磁性と超伝導が拮抗する領域) で、重い電子系において反強磁性と超伝導のオーダーパラメーターが強く相関していることが分かり、超伝導発現に対する反強磁性相互作用の影響を詳しく捉えることができた。今回の成果は、重い電子系における超伝導発現機構の理論的解明に貢献できるものと期待される。

研究成果の概要 (英文)：We investigated the superconducting nature in the heavy-fermion systems, using the microscopic NMR/NQR method. We confirmed the strong coupling between the superconducting and antiferromagnetic order parameter around the tetracritical point, suggesting the close relationship between the superconductivity and the antiferromagnetic interactions. The present results give us a lot of important knowledge to theoretically solve the superconducting mechanism in the heavy-fermion systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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、超伝導

1. 研究開始当初の背景

申請者の研究は強相関電子系で発現する超伝導のメカニズムを解明することを目標に日々行われている。強相関電子系とは、銅酸化物高温超伝導体、重い電子系化合物、有機電気伝導物質等を含み、このような系で起きる超伝導現象にはある普遍性が存在する。それは、磁性相に近接する相として超伝導が発生するということである。この振る舞いは取りも直さず、磁性が超伝導発現に大きく影

響していること、そして磁性と超伝導の関係を明らかにしていくことが強相関電子系超伝導のメカニズム解明に繋がると期待することができる。今回の研究では特に重い電子系化合物における超伝導現象の解明を目指す。異なる元素を置換することで電子やホールをドーピングする銅酸化物高温超伝導体に比べ、一般的に重い電子系化合物は非常に純良性の良い結晶を作成しやすいため、不純物効果が抑えられ純粋な超伝導の性質を探るこ

とができると考えられている。

2. 研究の目的

申請者の博士後期課程における研究で、重い電子系化合物 CeRhIn_5 において超伝導と反強磁性の四重臨界点（反強磁性相、反強磁性と超伝導の共存相、超伝導相、常磁性相が接する点）が存在することを NQR 測定から実験的に実証することができた（下図参照）。磁場中ではごく最近ロスアラモスのグループによって四重臨界点の存在が示唆される結果が得られているが、ゼロ磁場において「超伝導転移温度 (T_c) > ネール点 (T_N)」の圧力領域では反強磁性磁気秩序が超伝導によって隠されると主張している[1]。しかし、先ほど申し上げたように、申請者のゼロ磁場における結果はロスアラモスの結果とは異なっており、ゼロ磁場においてさえ四重臨界点が存在することを確認している。実際、磁場中における四重臨界点の存在を議論するには注意が必要である。というのは、磁場中の超伝導体には磁束が侵入しているため、磁束のまわりで超伝導が抑制された部分のみで反強磁性が誘起されている可能性もあり、磁場中における四重臨界点の存在を取り扱うのは非常に難しいのである。この問題を解決するために、NMR 法のようなマイクロな視点で観測できる実験が強く待たれているというのが現在の状況である。

3. 研究の方法

(1) まず、重い電子系化合物 CeRhIn_5 の共存相における物性を調べることである。この物質に関してはすでに反強磁性と超伝導の四重臨界点が存在することが分かっているが、反強磁性と超伝導の共存相 (1.5 ~ 2.1 GPa) における詳しい性質はまだ明らかにされていない。そこで、NQR 測定によって、核スピン格子緩和率 $1/T_1$ の温度依存性を調べることにより、超伝導ギャップの大きさを求めてみる。また、内部磁場（反強磁性磁気モーメントに比例）の大きさも NQR スペクトル測定から見積もることができる。ここで、一旦整理しておくと、超伝導ギャップは超伝導のオーダーパラメーターに相当し、内部磁場の大きさは反強磁性磁気秩序のオーダーパラメーターに相当している。つまり、両者の温度依存性を調べることで、超伝導と反強磁性のオーダーパラメーターの間に、相関があるかどうかを知ることができると期待できる。

(2) Ce_2RhIn_8 は常圧で反強磁性 ($T_N = 2.8$ K) で 1 GPa 以上で超伝導が発現する重い電子系化合物で、 CeRhIn_5 同様に反強磁性と超伝導の四重臨界点が存在するかどうか注目して研究を進めていく予定である。今後、四重臨界点を持つ相図の例が多く発見されること

によって、反強磁性と超伝導の普遍的な関係を明らかになることを期待している。特に、 Ce_2RhIn_8 は CeRhIn_5 の関連物質であり、 CeRhIn_5 に比べ 3 次元的な結晶構造を持っている（立方晶の CeIn_3 に近い）ことが分かっている。このことから、次元性の違いが磁性や超伝導に与える影響を観測することが非常に重要であると思われる。 Ce_2RhIn_8 の ^{115}In 核は核スピン=9/2 を持っており、磁場を用いずに測定することができる。

4. 研究成果

(1) 重い電子系化合物 CeRhIn_5 における圧力下 NQR 測定から、超伝導転移温度 (T_c) と超伝導ギャップが、不整合な反強磁性磁気構造から整合な構造へ変化する圧力域 (P_m) で、急激に増大し始めることを突き止め、整合な反強磁性磁気構造が超伝導発現に有利に働くことを明らかにした。また、超伝導ギャップが増大すると同時に、反強磁性磁気モーメントが減少することも確認し、超伝導と反強磁性のオーダーパラメーターが密接にリンクしていることを示した。この結果は重い電子系における超伝導発現機構の解明に繋がると期待される。

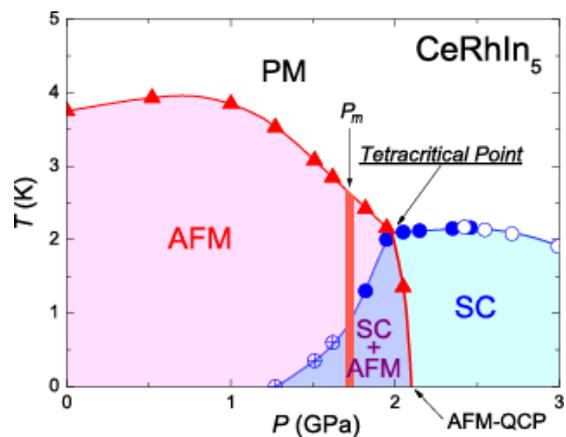


図 1 : CeRhIn_5 の圧力-温度相図

(AFM : 反強磁性、SC : 超伝導、PM : 常磁性、QCP : 量子臨界点)

(2) さらに、 CeRhIn_5 ($T_{c\text{max}} = 2.3$ K) より結晶構造的に 3 次元性の強まった Ce_2RhIn_8 ($T_{c\text{max}} = 0.9$ K) では、超伝導が発現する圧力 1.2 GPa 近傍で、スピン揺らぎの次元性が 3 次元的に変化することが分かった。つまり、 Ce_2RhIn_8 では 3 次元反強磁性スピンゆらぎを背景に超伝導が発現していることが明らかになり、反強磁性スピンゆらぎの次元性が T_c 増大に大きく影響することを示す重要結果が得られた。ちなみに、 CeCoIn_5 ($T_c = 2.3$ K) では準 2 次元的なスピン揺らぎが支配的である。

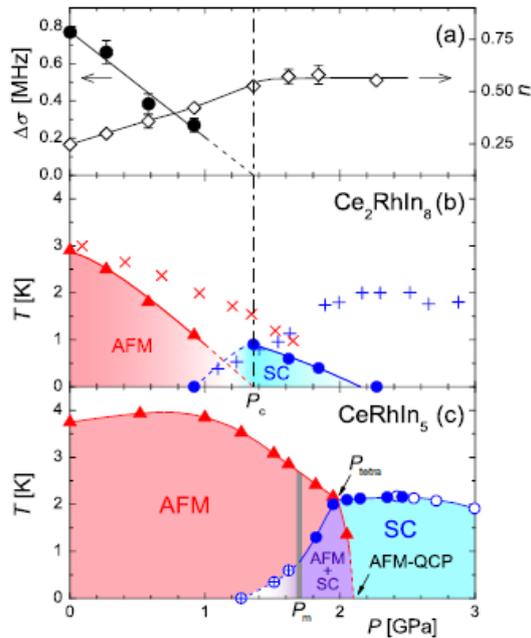


図 2 : (b) Ce_2RhIn_8 の圧力-温度相図 ($\Delta\sigma$: ここでは反強磁性磁気モーメントに比例する物理量とみなす。n: 反強磁性スピン揺らぎの次元性を示すパラメータ、 $n=0 \Rightarrow$ 2 次元的、 $n=1/2 \Rightarrow$ 3 次元的)

(3) 重い電子系超伝導体 CeCu_2Si_2 と同じ結晶構造を持つ鉄系超伝導体 $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ では、超伝導ギャップ構造を明らかにするために Fe-NMR 測定を行った。超伝導体では角度分解光電子分光測定からフルギャップ構造を示

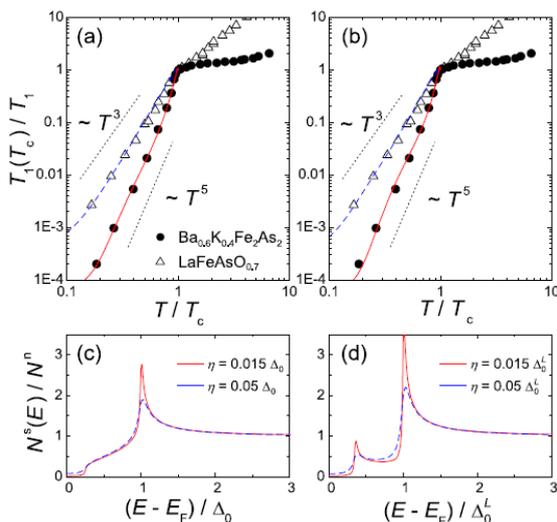


図 3 : $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ の $1/T_1$ の温度依存性とマルチフルギャップの状態密度モデル (マルチフルギャップモデルによって、 T_c 以下の $1/T_1$ の温度依存性をうまく説明することができる。比較参照用のために、 $\text{LaFeAsO}_{0.7}$ の結果も載せている。)

唆する結果が得られていたが、NMR 測定からは確認できず、混乱していた。そのような中、今回の測定により、NMR で初めてフルギャップ構造 ($1/T_1 \propto T^5$ に近い振る舞い) を示唆する結果が得られ、鉄系超伝導体のメカニズム解明に大きく寄与しうる重要な結果を得ることができた。この論文 (M. Yashima et al., J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 103702 (2009).) は、Journal of the Physical Society of Japan の注目論文 (Editor's Choice) に選ばれ、その成果が科学新聞 (2009 年 10 月 23 日付け) に掲載された。

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 Spin Susceptibility of Noncentrosymmetric Heavy-Fermion Superconductor CeIrSi_3 under Pressure: ^{29}Si Knight-Shift Study on Single Crystal ; H. Mukuda, T. Ohara, M. Yashima, Y. Kitaoka, R. Settai, Y. Onuki, K. M. Itoh and E. E. Haller ; Phys. Rev. Lett. **104**, 017002 (2010) ; 査読有。

② Origin of T_c Enhancement Induced by Doping Yttrium and Hydrogen into LaFeAsO-Based Superconductors: ^{57}Fe , ^{75}As , ^{139}La , and ^1H -NMR Studies ; H. Yamashita, H. Mukuda, M. Yashima, S. Furukawa, Y. Kitaoka, K. Miyazawa, P. M. Shirage, H. Eisaki, and A. Iyo ; J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 103703 (2010) ; 査読有。

③ Strong coupling between antiferromagnetic and superconducting order parameters of CeRhIn_5 studied by ^{115}In -nuclear quadrupole resonance spectroscopy ; M. Yashima H. Mukuda, Y. Y. Kitaoka, H. Shishido, R. Settai, and Y. Onuki ; Phys. Rev. B **79**, 214528 (2009) ; 査読有。

④ Strong Coupling Spin Singlet Superconductivity with Multiple Full Gaps in Hole-Doped $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ Probed by ^{57}Fe -NMR ; M. Yashima, H. Nishimura, H. Mukuda, Y. Kitaoka, K. Miyazawa, P. M. Shirage, K. Kihou, H. Kito, H. Eisaki, and A. Iyo ; J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 103702 (2009) ; 査読有。

⑤ Phase diagram for antiferromagnetism and superconductivity in the pressure-induced

heavy-fermion superconductor Ce_2RhIn_8 probed by ^{115}In -NQR ; M. Yashima, S. Taniguchi, H. Miyazaki, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Shishido, R. Settai and Y. Onuki ; Phys. Rev. B **80**, 184503 (2009) ; 査読有.

[学会発表] (計 3 1 件)

① 八島光晴、鉄系超伝導体 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ の Fe-NMR、日本物理学会、2011 年 3 月 28 日、新潟大学

② 八島光晴、重い電子系化合物 $CeRhIn_5$ と Ce_2RhIn_8 における In-NQR による研究、日本物理学会、2010 年 9 月 23 日、大阪府立大学

③ 八島光晴、NMR study on heavy fermion compound $CePtSi_2$ at ambient pressure、Strongly Correlated Electron Systems (SCES2010)、2010 年 7 月 1 日、Santa Fe (USA)

④ 八島光晴、Pressure-temperature phase diagram of superconductivity in heavy fermion compounds $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$ studied by In-NQR measurements、International conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials (GCOE)、2010 年 5 月 31 日、大阪大学

⑤ 八島光晴、 ^{115}In -NQR Study of the Novel Superconductivity in the Heavy-Fermion Compounds $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$ 、The 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-IX)、2009/09/08、京王プラザホテル (東京都)

⑥ 八島光晴、Pressure-Temperature Phase Diagram in Ce_2RhIn_8 Studied by In-NQR Measurements、The 18th International Conference on Magnetism (ICM2009)、2009/7/27、Karlsruhe (Germany)

⑦ 八島光晴、Novel Superconductivity in $CeIr(In_{1-x}Cd_x)_5$ Studied by In-NQR Measurements、The 18th International Conference on Magnetism (ICM2009)、2009/7/27、Karlsruhe (Germany)

⑧ 八島光晴、 $CeRhIn_5$ の磁気構造の圧力変化と超伝導の関係、日本物理学会、2008/9/22、岩手大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.kitaokalab.mp.es.osaka-u.ac.jp/index.html>

[jp/index.html](http://www.kitaokalab.mp.es.osaka-u.ac.jp/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八島 光晴 (YASHIMA MITSUHARU)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：10397771