

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740243

研究課題名(和文)重い電子系イットリウム化合物における量子臨界現象と結晶構造

研究課題名(英文)Quantum Critical Phenomena and the Crystal Structure in Yb-based heavy fermion system

研究代表者

富田 崇弘 (TOMITA, Takahiro)

東京大学・物性研究所・研究員

研究者番号：20437502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重い電子系Yb化合物で唯一価数揺動状態で超伝導が報告されている YbAlB₄ の量子臨界点近傍における超伝導近傍の相図、圧力誘起相転移の基底状態、高圧下での結晶構造を明らかにする事で、Yb系でしか現れない量子臨界点極近傍の新奇な超伝導機構の解明に繋がる結果が得られた。従来、重い電子系の超伝導は磁気秩序に隣接する形で現れている。しかし、今回得られた結果は、常圧で現れた80mKの重い電子超伝導状態が磁気秩序と孤立した状態で実現しており、その非フェルミ液体性は今までの量子臨界性物質とは全く異なる性質を持つ。これは、新しいタイプの超伝導発現機構ならびに量子臨界性の実現していると思われる。

研究成果の概要(英文)：We study the Yb based heavy fermion compounds, YbAlB₄, which is example of quantum criticality in a mixed-valence system at ambient pressure and superconducting transition at 80mK. Our investigation for the pressure vs temperature phase diagram for the superconducting state near quantum critical point (QCP), a pressure-induced magnetic order, and crystal structure under pressure lead to an important result for the Yb based heavy fermion superconducting system near QCP. Specially, the superconducting state is isolated and exists without connecting magnetic order where Normally, quantum criticality of an Yb-based heavy fermion system is found next to a magnetic order stabilized by application of pressure. Moreover, this non-Fermi liquid hidden by the superconducting state is robust against the pressure, which is ever known at all. But, it is thought that this Yb material exhibits a new type superconductivity and a unconventional quantum criticality.

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：量子臨界現象 イットリウム化合物 非フェルミ液体 重い電子系 X線回折

1. 研究開始当初の背景

Ce/U 系化合物の強い電子間クーロン相互作用により電子の有効質量が重くなる「重い電子系」と呼ばれる系で、**フェルミ液体と磁気秩序の競合**として生じる量子臨界現象の研究が盛んに行われている(ドニアック相図)。特に重い電子が**量子臨界点近傍で超伝導**を示す場合、強い電子相関を反映した異方的超伝導が現れており、CeCu₂Si₂, CeCoIn₅, CeIrIn₅, CePd₂Si₂, CeIn₃などのCe化合物を中心に新しいタイプの超伝導(非BCS型超伝導)が発見されてきた。これら非BCS型超伝導には必ず隣接する磁性相が存在するため、「超伝導」と「磁性」という一見相容れない関係性がこの超伝導の発現機構に重要な意味を持っている。このため多くの重い電子系超伝導体の場合、磁気ゆらぎを媒介とした超伝導状態が実現していると考えられている。しかもこれら超伝導相は反強磁性秩序近傍で現れるため、反強磁性的スピンゆらぎが超伝導の起源と考えられてきた。しかし、近年CeCu₂(Si,Ge)₂などで、Ceイオン価数の急激な増加を伴う異常な電子状態と超伝導転移の上昇が観測され、これが従来のスピンゆらぎでは説明できないことから、新しい非フォノン超伝導が存在するのではないかと議論されている。またUGe₂などでも強磁性相内で理論的にまだ説明のつかない隣接した超伝導相が見つかるなど、量子臨界点近傍の**超伝導は、隣接する量子現象と大きな関わり**を持つ新奇な超伝導機構が存在すると考えられており、近年世界的に脚光を浴びてきている。

2. 研究の目的

この純良な -YbAlB₄ を使用して、**量子臨界点・超伝導近傍の相図、圧力誘起相転移の基底状態、高圧下での結晶構造**を明らかにすることで、Yb系でしか現れない「**量子臨界点での異方的超伝導**」、「**安定な非フェルミ液体状**

態」、「**30 K を超える高い圧力誘起相転移の磁性**」という新奇な量子相の発現機構に対する統一的理解を目指すとともに、その結晶構造から超伝導機構を電子状態から明らかにする事である。本研究遂行のため、磁化・電気抵抗から、**超伝導転移近傍の圧力相図と圧力誘起相転移の基底状態**を、超高压発生装置を用いたX線測定によるリートベルト解析から体積膨張率と結晶構造を決定し、価数揺動状態に伴う電子状態の変化を明らかにする。これにより、他のCe/Yb/U系重い電子系超伝導物質と比べ価数揺動状態がいかに量子臨界に影響を与えているかの解明を行う。

3. 研究の方法

本研究では、重い電子系Yb化合物で唯一価数揺動状態で超伝導が報告されている -YbAlB₄ の量子臨界点近傍における**超伝導近傍の相図、圧力誘起相転移の基底状態、高圧下での結晶構造**を明らかにすることで、Yb系でしか現れない**量子臨界点極近傍の新奇な超伝導の機構**を解明することにある。本研究目的の遂行のため、高圧磁化・電気抵抗から、**超伝導転移近傍の圧力相図の決定と圧力誘起相転移の基底状態**を明らかにし、更に高圧X線測定によるリートベルト解析から**結晶構造を解析しその圧力下の電子状態**を調べるとともに、**体積膨張率**から価数揺動と超伝導の関連性を明らかにする。

4. 研究成果

-YbAlB₄ はYb化合物として、唯一超伝導を示す重い電子系物質であり、強い価数揺動(常圧で2.75)を持つと同時に、常圧でチューニングを必要としない量子臨界現象が現れる特異な物質である。この量子臨界状態の理解には、圧力や元素置換といったコントロールパラメータを制御しながらの物性測定が有効である。本物質の低温高圧電気抵抗測定から、非フェルミ液体が常圧から幅広い圧

力範囲で広がっていることが分かった。また、1 GPa 以上の高圧実験で、非フェルミ液体からフェルミ液体へのクロスオーバーも観測されている。

更に元素置換させることで、そのフェルミ液体・非フェルミ液体性に関する研究を低温で行った。数パーセントの Fe を Al サイトに置換することで、数 GPa の高圧実験と同程度の圧力効果が得られた。我々は、この元素置換効果を電気抵抗・比熱・磁化・格子定数から確認を行った。本研究にて得られた圧力・元素置換を図 1 に示す。超伝導状態が、磁気秩序と孤立した振る舞いを示しており、その非フェルミ液体性は今までの量子臨界物質とは全く異なる性質を持つことが分かった。

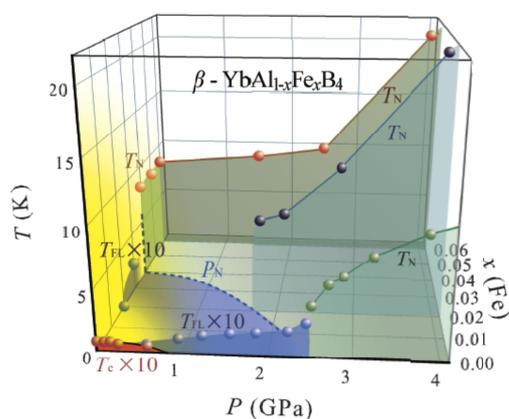


図 1: β -YbAl₄における相図

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)

Takahiro Tomita, Masaya Ebata, Hideto Soeda, Hiroki Takahashi, Hiroshi Fujihisa, Yoshito Gotoh, Yoshikazu Mizuguchi, Hiroki Izawa, Osuke Miura, Satoshi Demura, Keita Deguchi, and Yoshihiko Takano

“Pressure-Induced Enhancement of Superconductivity and Structural Transition in BiS₂-Layered LaO_{1-x}F_xBiS₂” Journal of the Physical Society of Japan, **83**, 063704 (2014).
(査読有)

DOI:10.7566/JPSJ.83.063704

Hiroki Takahashi, Takahiro Tomita, Hiroyuki Takahashi, Yoshikazu Mizuguchi, Yoshihiko Takano, Satoshi Nakano, Kazuyuki Matsubayashi, and Yoshiya Uwatoko. “High-pressure studies on T_c and crystal structure of iron chalcogenide superconductors.” Sci. Technol. Adv. Mater., **13**, 054401 (2012).
(査読有)

DOI:10.1088/1468-6996/13/5/054401

H. Takahashi, T. Tomita, H. Soeda, M. Ebata, K. Okuma, T. Hanna, Y. Muraba, S. Matsuishi, and H. Hosono, “High-Pressure Studies for Hydrogen Substituted CaFeAsF_{1-x}H_x and SmFeAsO_{1-x}H_x” J. Supercond. Nov. Magn., **25**, 1293-1296 (2012).
(査読有)

DOI:10.1007/s10948-012-1597-y

Takahiro Tomita, Hiroki Takahashi, Hiroyuki Takahashi, Hironari Okada, Yoshikazu Mizuguchi, Yoshihiko Takano, Kazuyuki Matsubayashi, and Yoshiya Uwatoko, “Superconducting Transitions and Crystal Structure for FeSe_{1-x}S_x (x=0.2) under Pressure” Journal of Physics:Conference Series **400**, 022125 (2012).
(査読有)

DOI:10.1088/1742-6596/400/2/022125

K. Okuma, M. Ebata, **T. Tomita**, H. Takahashi, T. Hanna, Y. Muraba, S. Matsuishi, and H. Hosono, “High-pressure studies for hydrogen substituted $\text{CaFeAsF}_{1-x}\text{H}_x$ ” *Journal of Physics:Conference Series* **400**, 022092 (2012).
(査読有)
DOI:10.1088/1742-6596/400/2/022092

[学会発表](計 12件)

冨田崇弘, 久我健太郎, 松本洋介, 中辻知, 松林和幸, 上床美也, “重い電子系 $-\text{YbAlB}_4$ におけるAl サイトのFe 置換効果と量子臨界性”, 日本物理学会 第69回年次大会, (日本・東海大学 湘南キャンパス(神奈川)、2014年03月27日~30日).

冨田崇弘, 高橋博樹, 藤久裕司, 後藤義人, 水口佳一, 高野義彦 “ $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の超伝導と結晶構造”, 日本高圧力学会 第54回高圧討論会, (日本・朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟)、2013年11月14日~16日).

冨田崇弘, 志村恭通、久我健太郎, 松本洋介, 高橋博樹, 中辻知 “低温高圧下における重い電子系 $-\text{YbAlB}_4$ の磁場依存性”, 日本物理学会2013年秋季大会, (日本・徳島大学・常三島キャンパス(徳島)、2013年09月25日~28日).

冨田崇弘 “Strange Metal Phase Without Magnetic Criticality”, 那須研究会・量子臨界における異常金属相, (日本・那須・リゾートホテルラフォーレ那須(栃

木)、2013年08月10日~11日).

冨田崇弘, 江畑政哉, 高橋博樹, 久我健太郎, 松本洋介, 中辻知, 松林和幸, 上床美也, “ $-\text{YbAlB}_4$ における量子臨界現象と圧力相図”, 日本物理学会第68回年次大会, (日本・広島大学・東広島キャンパス(広島)、2013年3月26日~29日).

冨田崇弘, 高橋博樹, 江畑政哉, “新しい低温装置を用いた新規超伝導体の構造決定”, 物構研サイエンスフェスタ, (日本・つくば国際会議場エポカル(茨城) 2013年03月14日~15日).

冨田崇弘, 高橋博樹, 江畑政哉, 久我健太郎, 中辻知, 松林和幸, 上床美也, “Strange Metal Phase Without Magnetic Criticality”, ISSP ワークショップ, 「強相関電子系における価数揺らぎと量子臨界性」(日本・東京大学物性研究所(千葉・柏)、2013年02月25日).

冨田崇弘 “高圧低温下でのX線装置を用いた新しい超伝導の研究”, 私学戦略プロジェクト「構造制御および電子状態制御に基づく新物質の開発」, (日本・日本大学文理学部(東京・世田谷)、2013年1月24日).

冨田崇弘, 高橋博樹, 江畑政哉, 久我健太郎, 中辻知, 松林和幸, 上床美也, “重い電子系Yb化合物 $-\text{YbAlB}_4$ の圧力誘起量子臨界現象”, 日本高圧力学会 第53回高圧討論会, (日本・大阪大学豊中キャンパス(大阪)、2012年11月7日~9日).

冨田崇弘, 高橋博樹, 江畑政哉, 松石聡, 半那拓, 村場善行, 細野秀雄, 中野智志, “高圧下における1111型超伝導体の超

伝導と結晶構造II”，日本物理学会2012年秋季大会，（日本・横浜国立大学(神奈川県)、2012年9月18日～21日)。

冨田崇弘 “低温高圧下の鉄系超伝導体の結晶構造”，研究・作業グループ「コヒーレント放射光を利用した新しい高圧力科学」第一回研究会，（日本・東京大学(東京)、2012年6月09日～10日)。

冨田崇弘 “低温高圧下における超伝導と結晶構造”，私学戦略第一回セミナー「構造制御および電子状態制御に基づく新物質の開発」，（日本・日本大学(東京・世田谷)、2012年6月07日)。

〔図書〕(計 1 件)

冨田崇弘、江畑政哉、高橋博樹，「高圧力の科学と技術」、特集「低温と高圧力下物性研究の未来」 日本高圧力学会・解説：高圧力下の低温X線回折実験，Vol. 22. No. 3, P222-228 (2012)。

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

なし

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

なし

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

冨田 崇弘 (TOMITA, Takahiro)

東京大学・物性研究所・研究員

研究者番号：20437502

(2) 研究分担者

なし

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし

()

研究者番号：