

異常金属相を持つ重い電子系 β -YbAlB₄ における圧力相図の解明Investigation for the phase diagram of β -YbAlB₄
showing Strange Metal Phase富田崇弘^{1,2}, 高橋博樹², 久我健太郎¹, 上床義也¹, 中辻知¹¹ 東京大学物性研究所 〒277-8581 柏市柏の葉 5-1-5² 日本大学文理学部、〒156-8550 世田谷区桜上水 3-25-40Takahiro Tomita^{1,2*}, Hiroki Takahashi², Kentaro Kuga¹,
Yoshiya Uwatoko¹, Satoru Nakatsuji¹¹University of Tokyo, Institute of Solid State Physics, Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa, 277-8581, Japan²Department of Physics, College of Humanities and Sciences, Nihon University, Setagaya, 156-8550, Japan

1 はじめに

重い電子系物質 β -YbAlB₄ は Yb 化合物として初の超伝導 ($T_c = 80$ mK) 物質であり、強い価数揺動 (常圧で 2.75) を示すことが分かっている。しかも磁化の精密測定の結果、 T/B スケーリング則が低温で得られており、常圧 0 磁場で非従来型の量子臨界点が実現すると考えられる。このため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として研究が精力的に進められている。[1, 2] 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。我々は過去の研究において残留抵抗比 $RRR = 300$ を超える非常に高純度な希土類金属間化合物 β -YbAlB₄ を合成し、絶対零度近傍の重い電子系超伝導とその金属状態を研究することで圧力相図 (図 1a) の作成を行った。[3] 図 1a の圧力相図において、超伝導は圧力とともに低下し 1 GPa ほどで消失。その直上の温度域で非フェルミ液体状態が常圧から 0.4 GPa の幅広い圧力範囲で広がっていることが分かった。これは超伝導相を微小磁場で完全消失させても同様の現象が起こる。[4-5] 従来、非フェルミ液体状態は臨界現象の点として現れるのが普通だが、今回の現象は幅広い非フェルミ液体相 (異常金属相) のように観測された。

圧力 1 GPa 以上の高圧電気抵抗測定において、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。(図 1b, c) 興味深いことは高圧 2 GPa 以上において反強磁性磁気秩序が発現しており、この磁気秩序が量子臨界点と離れていることにある。通常は磁気秩序に隣接する形で超伝導が発現するのが一般的であるが、このように超伝導相と磁気秩序の間でフェルミ液体が孤立して現れたことは今までに例がない。また、数パーセントの Fe を Al サイトに置換することで得られる圧力相図においても、母物質の高圧実験と同程度の圧力効果が得られるため、この振る舞いは本物質系 β -YbAl_{1-x}Fe_xB₄ にて現れる現象と思われる。

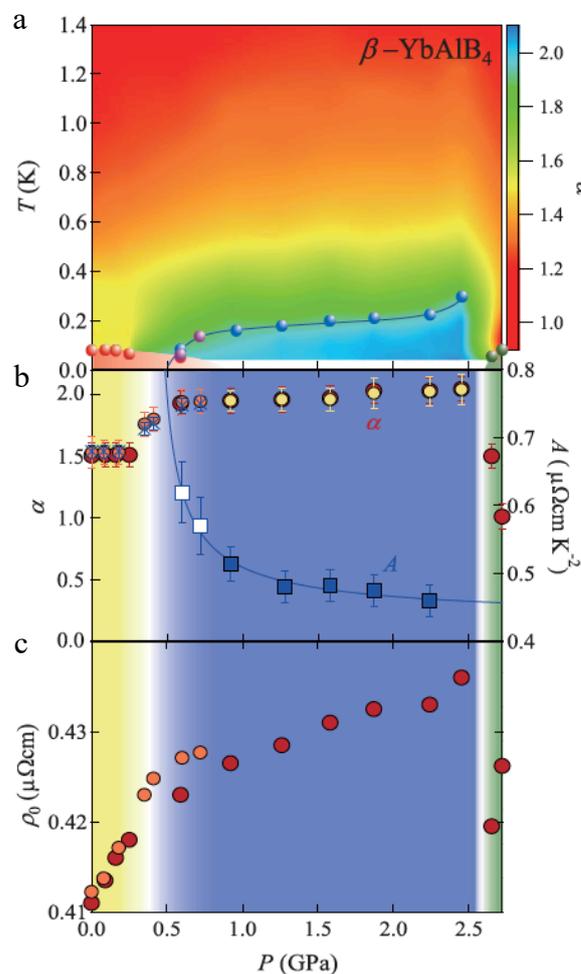


図 1: (a) 低温での電気抵抗から決定した 0 磁場の圧力相図。α は電気抵抗 $\rho = \rho_0 + AT^\alpha$ における温度の冪。赤が超伝導転移温度、青がフェルミ液体温度 ($\alpha = 2$)。 (b) 最低温での A 係数と冪 α の圧力依存性。 (c) 残留抵抗 ρ_0 の圧力依存性。黄色いバックのエリアが非フェルミ液体相、青がフェルミ液体相、緑が反強磁性秩序相。

今回、高圧中での構造を確認することで磁気秩序における磁気相転移が構造由来によるものかどうか、また Fe をドーブした際にどのような高圧構造変化が見られるかの研究を行った。

2 実験

今回 β -YbAlB₄ の単結晶試料を砕き粉末にした上で、放射光科学研究施設 (KEK PF) 並びに実験室系の特性 X 線を用いて X 線回折実験を行った。温度変化も同時に確認するため冷凍機を用い DAC (Diamond Anvil Cell) による低温高圧 X 線回折実験を行った。2 GPa 近傍の圧力領域に構造の変化が見られるかを確認するため、圧力媒体 Daphne7474 を使用して 10 GPa まで加圧実験を行った。[3]

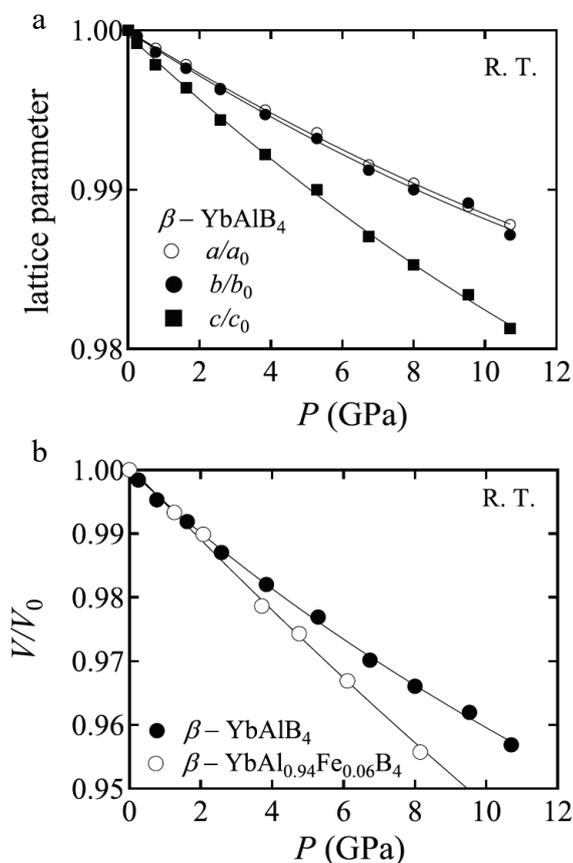


図 2 : (a) β -YbAlB₄(斜方晶 $Cmmm$)の室温における格子定数の圧力依存性並びに (b) 母物質 β -YbAlB₄ と Fe を Al サイト化学置換した β -YbAl_{1-x}Fe_xB₄ の格子定数の体積依存性。 ($x = 0.06$)

3 結果および考察

今回放射光 (PF) 並びに実験室系の特性 X 線実験から β -YbAlB₄ における結晶構造解析を室温で行った。図 2 にその結果を示す。まず、 ab 面内に比べて c 方向に大きな圧縮変化が起こることが分かった。これ

は ab 面内にある B (炭素) レイヤー面自身が比較的硬いことが原因と思われる。特に本物質は、磁性イオンである Yb 原子が c 軸方向に直線的に連なっている構造のため c 軸方向の Yb 間のボンド長が磁性イオンに与える影響は大きい。 ab 面内と面間の圧縮率の変化が大きいことは、本物質が歪みの効果に対して敏感に反応すると思われる。実際、高圧中の電気抵抗測定から得られた磁気秩序転移温度が圧力媒体に強く依存すること、またこの影響により重い電子系化合物で最大となる 30 K を超える反強磁性磁気転移を示すことが報告されている。これらの現象は異方的な圧縮率に起因すると考えられる。Fe 置換系においては、母物質と比べて圧縮しやすい傾向があることも分かった。(図 2a, b)

4 まとめ

今回我々は高圧 10 GPa までの電気抵抗測定並びに高圧下での結晶構造を調べた。この結果、2 GPa で得られた磁気秩序は構造相転移に伴う変化ではなく量子臨界現象由来の可能性と思われる。また実験結果から面内は硬く c 軸方向は圧縮しやすいことが分かった。これは歪みによる効果が顕著なマクロ測定の結果と一致する。[6] 同時に、Fe ドープ系の圧縮率が母物質より大きいことが分かった。今後、より詳細なリートベルト解析を用い構造パラメータを決定する予定である。

謝辞

中野智志博士には、放射光での X 線使用に関してご指導頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] S. Nakatsuji, K. Kuga, Y. Machida, T. Tayama, T. Sakakibara, Y. Karaki, H. Ishimoto, S. Yonezawa, Y. Maeno, E. Pearson, G. G. Lonzarich, L. Balicas, H. Lee, and Z. Fisk, *Nature Phys.* **4**, 603 (2008).
- [2] Y. Matsumoto, S. Nakatsuji, K. Kuga, Y. Karaki, N. Horie, Y. Shimura, T. Sakakibara, A. H. Nevidomskyy, P. Coleman, *Science* **331**, 316 (2011).
- [3] T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, P. Coleman, and S. Nakatsuji, *Science* **349**, 506-509 (2015).
- [4] T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, P. Coleman, and S. Nakatsuji, *Physics Procedia* **75**, 482-487 (2015).
- [5] T. Tomita, K. Kuga, Y. Uwatoko, and S. Nakatsuji, *J. Phys.: Conf. Ser.* **683**, 012007 (2016).
- [6] T. Tomita, Kentaro Kuga, Yoshiya Uwatoko, and Satoru Nakatsuji, *Phys. Rev. B* **94**, 245130 (2016).

* ttomita@issp.u-tokyo.ac.jp