

重い電子系イッテルビウム系化合物の強磁場における価数揺動現象

物質系専攻 47126027 寺島拓
指導教員：松田康弘（准教授）キーワード：強磁場、重い電子系、価数揺動、X線吸収スペクトル、 YbAlB_4

背景・目的

Ce や Yb のような $4f$ 電子を含む化合物の中には、低温で $4f$ 電子と伝導電子との強い相互作用(近藤効果)によって伝導電子の有効質量が数百倍程度に大きくなる重い電子系が発現する。 f 電子の相互作用には、 f 電子を遍歴的な重い電子系にする近藤効果と f 電子を局在化させ反強磁性秩序にしようとする RKKY 相互作用があり、その競合で量子臨界点(反強磁性転移温度 $T_N = 0$)が生ずる。量子臨界点近傍では、通常の重い電子系の振る舞いから外れた非フェルミ液体、非 BCS 超伝導などが発見されており、スピン揺らぎの理論で説明されている。

$\beta\text{-YbAlB}_4$ [1]は、Yb 系重い電子系で初めての超伝導物質であり、低温で非フェルミ液体性を示し量子臨界点近傍に位置すると考えられる。実際、極低温での磁化測定の結果からこの物質がゼロ圧力、ゼロ磁場で温度を下げるだけで量子臨界点に至るということが示された[2]。また類縁物質である $\alpha\text{-YbAlB}_4$ の Al を Fe で 1.4 % 置換した物質でも超伝導は示さないが、同様の量子臨界現象を示す[3]。またこの Fe ドープ量が増えると価数が増加し、その価数の変化でそれぞれ相が変わる。

しかしこの量子臨界付近の振る舞いは、従来のスピン揺らぎでは説明出来ないため、新しい理論が必要とされている。その量子臨界の新しい理論として価数の揺らぎの理論[4]が候補の一つとして挙げられている。実際、 $\beta\text{-YbAlB}_4$ は 20 K において価数が 2.75 と大きく揺らいでおり、価数揺動物質でありながら重い電子系であることがわかっている[5]。従来の理論において、量子臨界点近傍の振る舞いを示す物質の価数はほぼ 3 と整数で価数の変化はない。

この研究の目的はこの系での量子臨界現象の解明である。価数揺らぎの理論では、磁場によって量子臨界点を制御出来、物質が量子臨界点を通った場合、価数の転移と共に磁化においてメタ磁性が起こる。そのため磁化と価数を磁場下で測定ができれば、この系での量子臨界現象の解明につながると考えられる。しかし、価数揺動物質は一般的に f 電子と伝導電子との相互作用が強く磁場の効果が小さくなる。そのためにこの系の研究では強い磁場が必要である。

実験方法

対象物質は $\alpha\text{-YbFe}_x\text{Al}_{1-x}\text{B}_4$ ($x=0, 0.014, 0.04, 0.115$) である。 $x=0$ は価数揺動物質、 $x=0.014$ は量子臨界点近傍に位置、 x がそれ以上では反強磁性相だと考えられているためそれぞれの物質での強磁場での磁化、価数測定を行うことで量子臨界現象、Fe ドープ効果、価数の効果がわかると期待される。

磁化測定は物性研の強磁場施設において 55 T までは非破壊型マグネット、100 T までは破壊型一巻きコイル法を用いて行った。低温環境は液体 He 温度、減圧での 1.4 K までの測定である。磁場中価数は SPring-8 において、40 T 発生可能なミニチュアコイルを用いた X 線吸収を測定し、それぞれの磁場での X 線吸収スペクトルから求めている。

結果・考察

図1は、55 Tまでの磁化測定の結果である。それぞれの物質において50 Tでの磁化の値は約0.9程度である。通常の Yb^{3+} イオンの飽和磁化が4とくらべて小さい。このことは強い価数揺動のため磁場効果が小さいからだと考えられる。またそれぞれの物質で磁化曲線の傾きが変化している点が見られる。このことは図2の dM/dH で詳細に調べられ、矢印に示すように似た形があり、Feドーピングによってそれが移動しているように見える。

図3は $\alpha\text{-YbAlB}_4$ の95 Tまでの磁化測定の結果である。95 Tにおいても磁化の値は1.4程度で飽和までには至っていない。この系では基底状態が $J=5/2$ と通常の Yb^{3+} の $7/2$ とくらべて小さいという予想があり[6]、仮に $J=5/2$ であれば飽和磁化は $15/7$ なる。100 T磁場でも飽和までには至らないことからより強磁場が必要であることがわかる。しかし65 Tにおいて dM/dH においてブロードなピークが存在している。このことから量子臨界現象のメタ磁性であると考えられる。

図4は $\alpha\text{-YbFe}_x\text{Al}_{1-x}\text{B}_4$ ($x=0.014$)のX線吸収スペクトルの磁場依存性である。このグラフでは差は見ることが出来ないが、差分から2価に対応するエネルギーが減少し、3価に対応するエネルギーの増加が見られることから磁場によって価数が増加していることがわかる。またこれは図5の2価エネルギーでのX線吸収の磁場依存性において、約10 T程度での減少からもわかる。このことからこの物質では10 T程度で価数が変化することがわかる。同様に他のサンプルでも測定し、 $x=0$ では40 Tまでに価数の変化がないこと、 $x=0.04$ で約17 T、 $x=0.115$ では約22 Tで価数の変化を発見した。この価数変化の磁場は磁化測定で矢印とほぼ同じであることから、価数の変化が磁化に影響を与えていることがわかる。

$x=0.014$ は量子臨界点近傍にいと予測されているため、価数変化があるとすれば磁場に対して敏感でより小さい磁場であると考えられるが10 Tと比較的大きい結果となった。 $x=0$ での65 Tでのピークを量子臨界点と仮定すると $x=0.014$ での10 Tで量子臨界現象は微小なドーピングで量子臨界点を大きく移動させることを示唆している。つまり微小な濃度揺らぎが量子臨界点を大きく変えると予想される。また $x=0.04$ 、 0.115 は反強磁性秩序であるため $x=0.014$ までの量子臨界現象ではなく、フェルミ面の変化を伴うリフシツツ転移[7]の可能性が高く、価数の変化はフェルミ面の変化による影響によって間接的に起きていると考えられる。

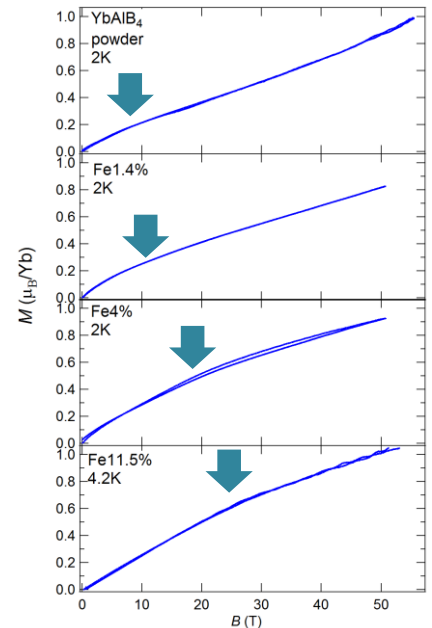


図1. $\alpha\text{-YbAlB}_4$ の磁化曲線 (~ 55 T)

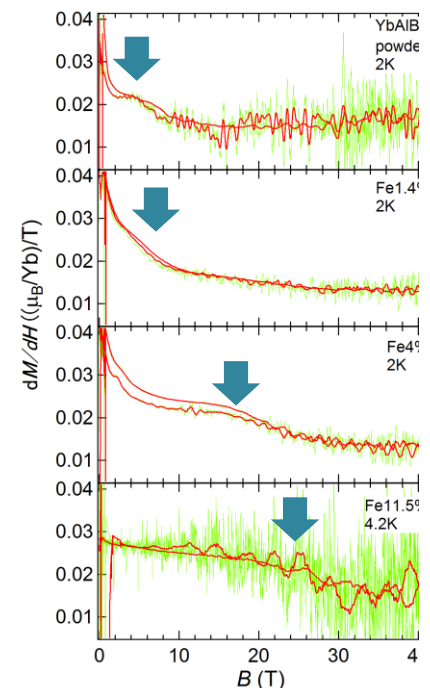


図2. $\alpha\text{-YbAlB}_4$ の dM/dH

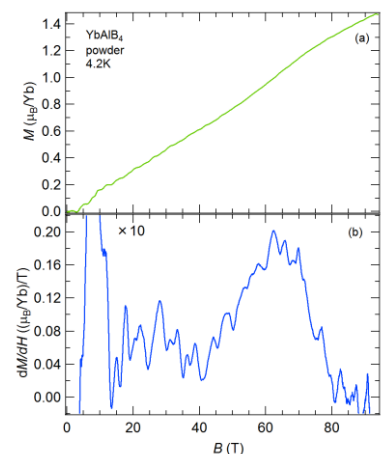


図3. $\alpha\text{-YbAlB}_4$ の磁化曲線 (~ 95 T)

発表ではその詳細を報告する予定である。また、磁化測定の結果との比較を行う事に加え、X線磁気円二色性 (XMCD) 測定においても興味深い結果についても議論する予定である。

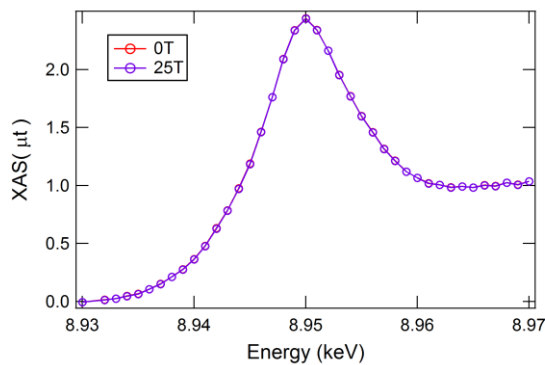


図 4. $x = 0.014$ の X 線吸収スペクトル

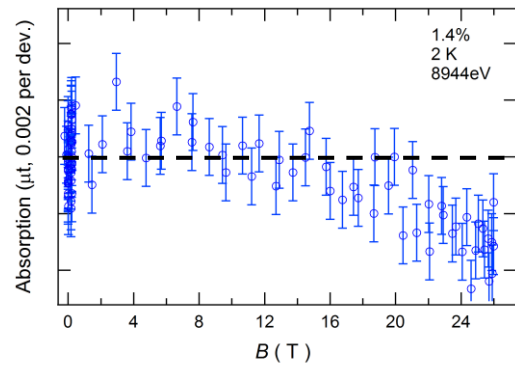


図 5. $x = 0.014$ の 8944eV での X 線吸収

参考文献

- [1]S. Nakatsuji et al., Nature physics **4** (2008) 603.
- [2]Y. Matsumoto et al., Science **331** (2011) 316.
- [3]K.Kuga et al., 博士論文(2010).
- [4]S. Watanabe et al., Phys. Rev. Lett. **105**, (2010) 186403.
- [5]M. Okawa et al., Phys. Rev. Lett. **104**, (2010) 247201.
- [6]Nevidomskyy A H et al., Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 077202.
- [7]M. I. Lifshitz. Sov. Phys. JETP **11** (1960) 1130

[学会・論文発表]

- 1. 第 66 回日本物理学会秋季大会 ポスター発表「 $\text{YbAl}_{0.885}\text{Fe}_{0.115}\text{B}_4$ の強磁場における価数と磁化」
- 2. 第 67 回日本物理学会春季大会 ポスター発表「縦型一巻きコイル法による Yb 系重い電子系物質の 100T 磁場での磁化過程」
- 3. 第 68 回日本物理学会秋季大会 口頭発表「 $\text{YbAl}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$ の強磁場磁化過程」
- 4. JPS プロシーディングス「Magnetization of Yb-based mixed valence compounds at megagauss field」掲載決定
- 5. 国際学会 SCES2013 ポスター発表「Magnetization of Yb-based mixed valence compounds at megagauss field」
- 6. 強磁場研究会 2013 ポスター発表「縦型一巻きコイル法による Yb 系重い電子系の磁化測定」
- 7. 第 69 回日本物理学会春季大会 「 $\text{YbAl}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$ の強磁場における価数と磁化 II」