

超強磁場における近藤絶縁体 YbB_{12} の相転移現象

物質系専攻 47-176014 柿田 頼輝

指導教員：松田 康弘 (准教授)

キーワード：近藤効果、磁場誘起絶縁体金属転移、超強磁場

【研究背景と目的】

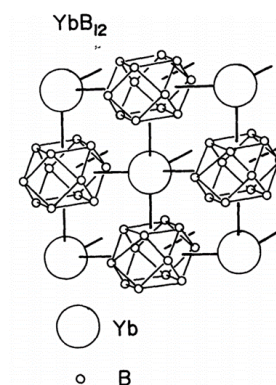
局在電子と遍歴電子の混成のような多体効果を根源とする様々な効果によって、超伝導、非フェルミ液体などの興味深い現象が発現することが知られている。近藤効果はそれらの重要な効果の一つとして知られており、様々な化合物において多様な現象の起源であることが発見されている。局在した軌道である $4f$ 軌道に電子を一つ持つため、Ce 系の化合物が主に研究対象とされてきたが、Yb 系の化合物も $4f$ 軌道に正孔を一つ持つため、同様な関心を持たれ、ここ 20 年の間に Yb 系の重い電子系化合物が多く、研究者の手によって精力的に研究が行われてきた。近藤絶縁体においては、低温でこの近藤効果が顕著になり、フェルミエネルギー上にエネルギーギャップが形成されることで金属から絶縁体へと転移する。

YbB_{12} は典型的な近藤絶縁体の一つとして知られており、35 年前に初めて合成された物質である[1]。図 1 のように単純な NaCl 型面心立方格子の結晶構造を取り、Yb イオンが $4f$ 軌道に 1 個だけホールを持つことから理論からのアプローチもしやすいため、 YbB_{12} に関する研究は理論、実験ともに盛んに行われてきた。

YbB_{12} は 80 K から 100 K 程度で電気抵抗が急激に上昇する[1]。それと同時に磁化率が極大を取り、その後冷却すると減少していく[3]。これらのことから、80 K 付近から近藤効果が顕著になり、近藤一重項が形成され、磁気モーメントが遮蔽されると同時にエネルギーギャップが形成されることがわかる。そのエネルギーギャップの大きさは光学電導度[4]、光電子分光測定[5]のそれぞれから 15 meV と見積もられている。このエネルギーギャップの形成機構は長年議論の対象となっており、主に $4f$ 電子と伝導電子の混成によるものだと考えられている[6]が、完全な理解は得られていない。

近藤効果は磁場を印加することによって抑制することが期待できる。そのため、磁場中における近藤絶縁体の電子・磁気状態の研究は興味深いと言える。 YbB_{12} は低温において磁場誘起絶縁体金属転移とメタ磁性転移が 60 T 付近で同時に観測される[2]。さらに最近では、実験で得られる転移磁場の値は、異方性を含めて定量的に結晶場分裂した f 電子の準位の磁場依存性から説明できることがわかった[7]。そのモデルは、磁場印加によるバンドのエネルギーシフトが結晶場における $4f$ 電子のエネルギー準位がゼーマン分裂することによって決定されるというものであり、これを用いることで実験と計算で得られる転移磁場の良い一致が得られる。

本研究は、長年議論の対象となっているエネルギーギャップの形成機構に関する議論を前進させることを目指し、 YbB_{12} のエネルギーギャップの温度依存性を決定することを目的とし、磁場誘起絶縁体金属転移に必要な転移磁場の温度依存性を詳しく調べた。

図 1 YbB_{12} の結晶構造[2]

【実験手法】

実験では、約 100 T のパルス磁場を用いて、4 K から 30 K までの YbB_{12} の磁化測定を行った。磁場印加には破壊型磁場発生法の一つである縦型一巻きコイル法を用いた。一巻きコイル法において磁化を測定するために誘導法を用いた。試料が外部磁場により磁化した際の信号をコイルに生じる誘導起電力として検出する方法である。誘導法では図 2 のような平行型ピックアップコイルを用いた。試料を入れていない状態では外部磁場により左右のコイルに生じるそれぞれの誘導起電力が打ち消しあうように対称に作られている。このピックアップコイルを用いることで破壊型磁場発生に伴う電氣的ノイズを減らし、試料の磁化信号を得ることができる。また、破壊型磁場発生には狭いサンプルスペース、限られた材質など多くの技術的制約が課されるため、これまでは冷媒の温度以外の温度で安定に温度制御をすることが困難であった。しかし、最近 0.1 K 単位で安定した温度制御可能なクライオスタットが導入されたため、破壊型磁場発生法において本研究が可能になった。

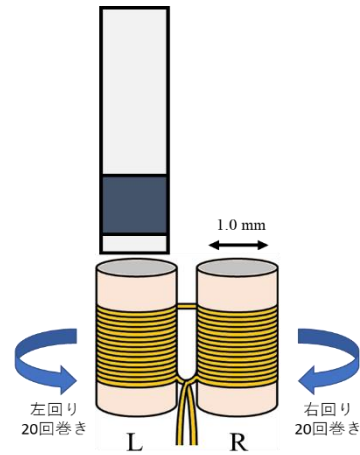


図 2 並行型ピックアップコイルの概略図

【結果と考察】

実験で得られた磁場上昇時の YbB_{12} の強磁場磁化過程の温度依存性を図 3 に示す。4 K から 15 K の温度領域において磁化過程は類似しており、転移磁場に顕著な温度依存性は観測されることが分かった。ただし、10 K 以上の温度領域では温度上昇とともに転移が不明瞭になる傾向になり、約 20 K 以上の温度では転移に伴う磁化の磁場微分 (dM/dB) のピーク構造が観測しづらくなり、25 K 以上において、ピーク構造はほぼ消失することが明らかになった。

ピーク構造をもとに転移磁場を決定した結果を図 4 に示す。転移磁場は 4 K から 22.5 K まで温度依存性を示さず、55 T 付近で一定であった。また、30 K 付近からピーク構造が不明瞭なため、転移磁場の決定ができなかった。このことから YbB_{12} のエネルギーギャップには温度依存性がなく、30 K 程度で消失することが分かった。エネルギーギャップの大

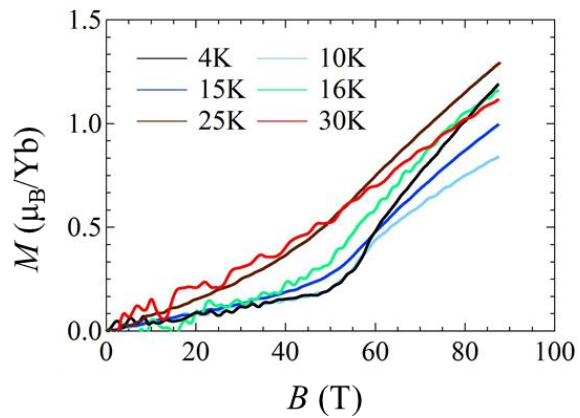


図 3 YbB_{12} の強磁場磁化過程の温度依存性

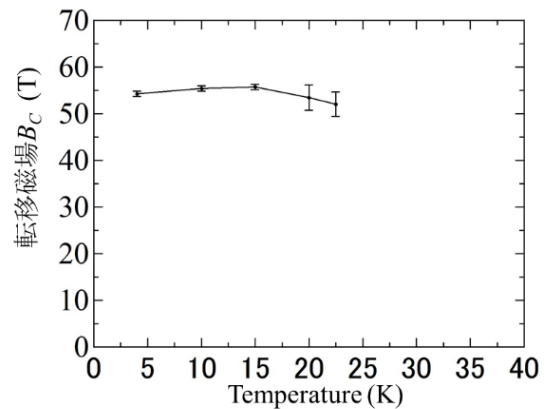


図 4 YbB_{12} の転移磁場の温度依存性

大きさが 15 meV(174 K)であることから、エネルギーギャップが 30K 程度で急激に見えなくなるこの原因が熱励起だけとは考えづらい。このような振る舞いは強相関電子系のギャップがつぶれる振る舞いに見られることがあることから、20 K から 30 K の間でバンドを占有する電子数に大きな変化があるのではないかと考えられる。

【結論】

本研究では、超強磁場発生法である破壊型一巻きコイル法を用いた 4 K から 30 K までの YbB₁₂ の磁化過程の温度依存性を測定した。結果、YbB₁₂ のメタ磁性転移を示すピーク構造は温度上昇に伴い不明瞭になり、30 K 付近では完全に判別できなくなった。さらに、YbB₁₂ のエネルギーギャップは 4 K から 22.5 K では温度にあまり依存せず、ほぼ一定であることもわかった。エネルギーギャップがギャップの大きさの 20%程度の温度で不明瞭になることは、ギャップ形成機構に電子相関効果が強く効いていることを示唆している。そのことが、ギャップの大きさに温度依存性がほとんど見られないことも説明すると考えられる。

【参考文献】

- [1] M. Kasaya, et al., J. Magn. Magn. Mater. **437**,31(1983).
- [2] K.Sugiyama et al.,JPSJ **57**,3946(1988).
- [3] F. Iga et al., J. Magn. Magn. Mater. **337**, 177(1998).
- [4] H. Okamura et al., J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1954 (2005).
- [5] M. Okawa et al., Phys. Rev. B **92**, 161108 (2015).
- [6] T. Saso and H. Harima, JPSJ **72**, 1131(2003).
- [7] T.T. Terashima et al., J. Phys. Soc. Jpn., **86**, 054710(2017).

【論文・学会発表】

1. 柿田頼輝 他, 「YbB₁₂ の 100 T 磁化曲線の温度依存性」, 強磁場コラボラトリ研究会 (物質・材料研究機構, 2017/11/29-30)
2. 柿田頼輝 他, 「YbB₁₂ の超強磁場磁化過程の温度依存性」, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学, 2018/3/22-25)
3. Y. Kakita et al., 「Temperature dependence of magnetization process of Kondo insulator YbB₁₂ in ultra-high magnetic fields up to 100 T」, The 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (柏の葉カンファレンスセンター, 2018/9/25-29)
4. 柿田頼輝 他, 「YbB₁₂ の超強磁場磁化過程の温度依存性 II」, 日本物理学会 秋季大会 (同志社大学, 2018/9/9-12)
5. 柿田頼輝 他, 「超強磁場下における YbB₁₂ の相転移現象」, 強磁場コラボラトリ研究会 (東北大学 金属材料研究所, 2018/11/26-27)
6. 柿田頼輝 他, 「YbB₁₂ の超強磁場磁化過程の温度依存性 III」, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学, 2019/3/14-17)