

低温熱膨張および磁歪測定による四極子近藤格子系 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ における

多極子秩序の研究

物質系専攻 47-166038 永岡 靖浩

指導教員 中辻 知 (教授)

キーワード：多極子、重い電子、軌道自由度、量子臨界現象、Pr系化合物

1. 研究背景と目的

近年、非従来型の異常ホール効果やスピン液体的振る舞いといった興味深い現象が Pr 系化合物で観測されている[1,2]。とりわけ、 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{Ti}, \text{V}$)という系は四極子近藤効果と呼ばれる伝導電子と軌道モーメント間の非常に強い混成に起因する特異な物理現象が注目を集めている。 [3]。

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ は $T_Q = 0.75$ K、 $T^* = 0.65$ Kにおいて多極子転移を示し、常圧下、 $T_c = 50$ mKで重い電子超伝導が発現することが知られている(図1,[4])。また、 T_Q 以上の温度領域では非フェルミ液体的な振る舞いも観測されており、これは四極子近藤効果を示唆している。さらに、 T_Q は $B_C \sim 11$ Tの磁場を[111]方向に印加した時に0 Kまで抑制され、電気抵抗率の振る舞いは B_C で非フェルミ液体的となる(図2,[5])。これは、磁場印加による量子臨界点の存在を示唆している。

量子臨界性の研究では、グリューナイゼン係数 $\Gamma \sim \frac{\beta}{c} = -\frac{1}{vT} \frac{(\partial S/\partial p)_T}{(\partial S/\partial T)_p}$ (β, C はそれぞれ熱膨張係数と比熱)が重要になってくる。なぜなら、グリューナイゼン係数は量子臨界点近傍では、符号反転や増大を見せることが分かっているからである[6,7]。

さらに、トロント大学の Yong Baek Kim らによる研究により、低温領域で四極子と八極子の混在した秩序相が存在している可能性が示唆されている(図3,[8])。

これらの量子臨界現象や多極子秩序を直接的に観測するには、格子歪みと直接カップルする熱膨張・磁歪測定が非常に適している。したがって本論文では極低温・高磁場下の熱膨張・磁歪測定を行い、その結果について議論する。

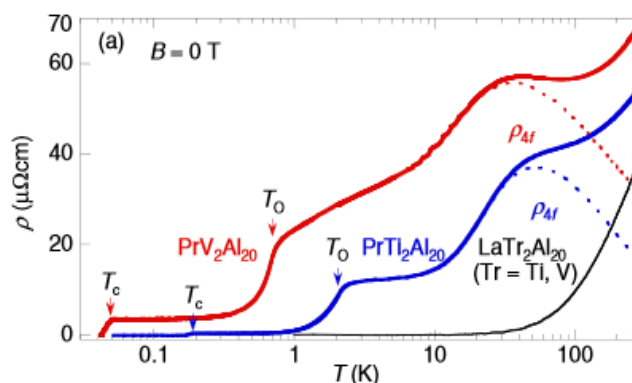


図1 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ の電気抵抗率[4]

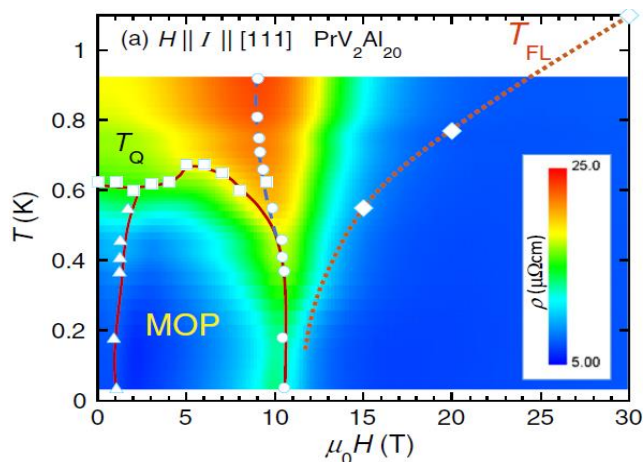


図2 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の B - T 相図[5]

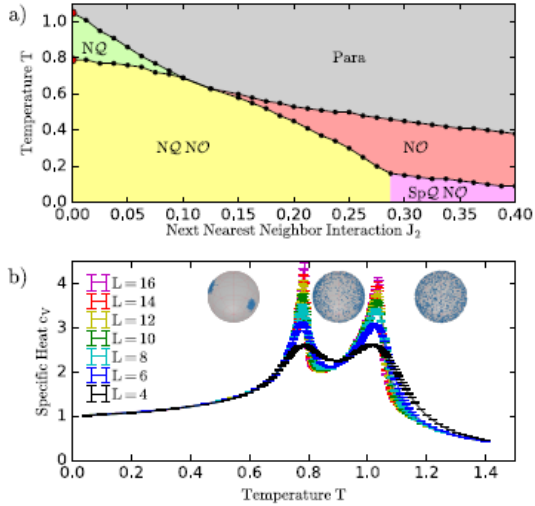


図3 理論から予想される温度相図[8] 精度の測定が可能である。また、長さ変化の測定方向は $L // [110], [111]$ 、磁場方向はいずれの測定方向に対しても $B // [111]$ の方向に印加した。測定における温度領域は $T = 0.07 \sim 4$ K、磁場範囲は $B = 0 \sim 16$ T である。

3. 実験結果と考察

・ $L // [110], B // [111]$ 方向の測定

熱膨張測定において $T_Q \sim 0.6$ K で多極子転移が確認された。この転移の絶対値は強四極子秩序を示す $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ より小さく、反強四極秩序を示す PrPb_3 と同程度であることから $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ が反強多極子秩序を示すという先行研究の結果と一致している。また、磁歪測定においては、図4のように $B_c \sim 11$ T でピークが確認されている。このピークは量子臨界点の存在を示唆していると考えることができる。また、転移温度 $T_Q \sim 0.6$ K 以上の温度領域でもピークがブロードになりながら残っていることから、量子臨界揺らぎが転移温度以上でも残っていることを示唆している。

・ $L // [111], B // [111]$ 方向の測定

この方向の測定においても、 $T_Q \sim 0.6$ K での多極子転移は確認された。磁歪測定では図5のように $L // [110]$ では確認されなかった、 $B \sim 2$ T のピークが確認されている。この低磁場でのピークは磁気抵抗測定においても確認されている。さらに、転移温度 $T_Q \sim 0.6$ K 以下における磁歪測定、 $B \sim 2$ T 以下における熱膨張測定いずれにおいてもヒ

2. 実験方法

$\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ の単結晶は Al セルフフラックス法を用いて合成した。合成したサンプルの中から、電気抵抗率測定によって求めた残留抵抗比 (RRR) が高いバッチを選び、そのバッチの中から 1mm 角以上の大きさで、比熱における二段転移が確認できる単結晶を選び測定を行った。熱膨張および磁歪測定はキャパシタン式熱膨張計 (dilatometer) を希釈冷凍機 (Kelvinox25) と 16 T マグネット内で用いて行った。キャパシタン式熱膨張計は、サンプルの長さ変化をキャパ

シタンスの変化として読み取ることで、 ~ 0.05 Å

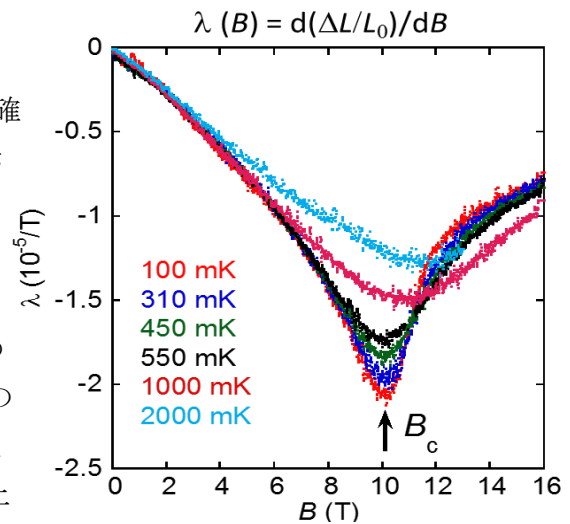


図4 $L // [110], B // [111]$ 方向の磁歪測定

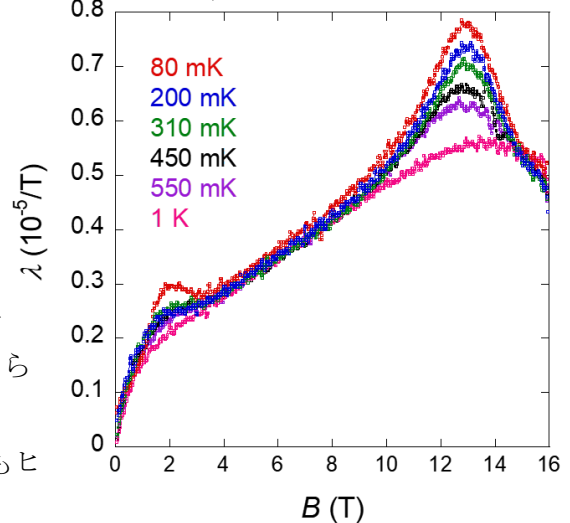


図5 $L // [111], B // [111]$ 方向の磁歪測定

ステリシスが観測されており(図 6)、この低磁場でのピークは、低磁場・低温領域で $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ が今まで考えられてきたような単純な反強四極子秩序ではなく、四極子と八極子が混在した状態で秩序している可能性を示唆している。

4. 結論

本研究において、 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ が $B_C \sim 11$ T で量子臨界的な振る舞いを示し、量子臨界揺らぎが転移温度 $T_Q \sim 0.6$ K 以上の温度領域でも残っていることが観測された。また、 $L // [111]$, $B // [111]$ 方向での測定で観測された $B \sim 2$ T におけるピークや、低磁場・低温でのヒステリシスの観測から、この系の基底状態は単純な反強四極子秩序ではない可能性が示唆された。1 節でも述べたように、この可能性は理論研究からも示唆されており [8]、さらなる多角的な実験によって検証する必要がある。

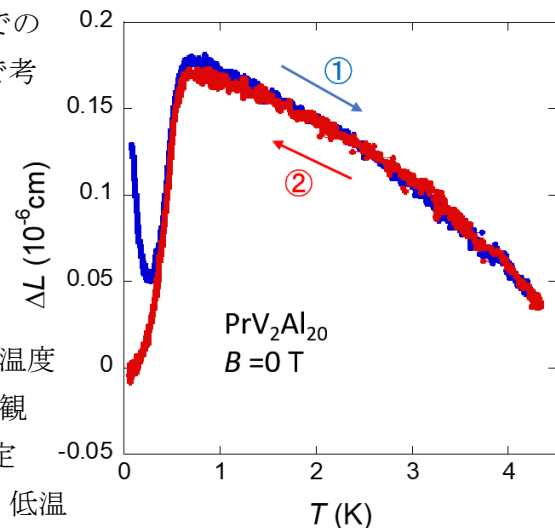


図 6 $L // [111]$ の熱膨張測定

参考文献

- [1] S. Nakatsuji, Y. Machida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 087204 (2006).
- [2] Y. Machida, S. Nakatsuji, S. Onoda, T. Tayama and T. Sakakibara, Nature **463**, 210 (2010).
- [3] A. Sakai and S. Nakatsuji, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 063701 (2011).
- [4] M. Tsujimoto, Y. Matsumoto, T. Tomita, A. Sakai, and S. Nakatsuji, Phys. Rev. Lett. **113**, 267001 (2014).
- [5] Y. Shimura, M. Tsujimoto, B. Zeng, L. Balicas, A. Sakai, and S. Nakatsuji, Phys. Rev. B, 91, 241102(R) (2015).
- [6] L. Zhu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 066404 (2003).
- [7] M. Garst and A. Rosch, Phys. Rev. B **72**, 205129 (2005).
- [8] F. Freyer and Y. B. Kim *et al.*, arXiv : 1709. 06094 (2017)

学会発表など

1. 日本物理学会 第 72 回年次大会 「四極子近藤格子 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ における低温熱膨張と磁歪」(口頭発表)
2. 日本物理学会 2017 年秋季大会 「四極子近藤格子 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ における低温熱膨張と磁歪その 2」(口頭発表)
3. J-Physics 2017 International Workshop on Multipole Physics and Related Phenomena 「Single crystal growth and thermal expansion measurement in Quadrupole Kondo Lattice $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ 」(ポスター発表)
4. J-Physics トピカルミーティング Exotic Phenomena in Itinerant Multipole Systems 「Thermal expansion and magnetostriction studies of multipole order $\text{Pr}T_2\text{Al}_{20}$ ($T = \text{Ti, V}$)」(口頭発表)

他 3 件