反強磁性超伝導体 UPt_3 の熱膨張の理論

今野理喜男*、小原雅樂***、伊藤豊治*、神田毅*、仲森昌也**、畑山伸訓*

Theory of thermal expansion of antiferromagnetic superconductor UPt_3

Konno Rikio*, Kohara Uta***, Toyoharu Itoh*, Kanda Takeshi*, Nakamori Masaya**, Hatayama Nobukuni*

Thermal expansion of antiferromagnetic superconductor UPt_3 was studied by using the Landau-Ginzburg expansion near the Neel temperature and the superconducting transition temperatures. We find that the thermal expansion coefficient has T-linear dependence near the transition temperatures.

Keyword　*Antiferromagnetic superconductor, thermal expansion, transition temperatures*

１．導入

反強磁性超伝導体 UPt_3 が、活発に研究されてきた[1-5]。超伝導転移温度は約 0.5K である。μSR の実験と中性子散乱の実験から、ネール温度は約 5K であることが実験的に見出された[4]。しかしながら、UPt_3 の物理的性質は、理論的には解明されていないように思われる。本論文で、UPt_3 のネール温度と超伝導転移温度付近の熱膨張をランダウーギンツブルグの自由エネルギーを用いて調べる。

次のセクションで、理論の定式化を行う。セクション 3 で、解析的な結果と数値計算の結果を示す。最後のセクションで、結果をまとめる。

２．定式化

Konno と Ueda によって、導かれた自由エネルギーから出発しましょう[2]。

$$F = \rho\left[-\frac{T_{c0}-T}{T_{c0}}|\Delta|^2 + b|\Delta|^4 + \gamma|\Delta|^2 B_Q^2 - \frac{1}{2}\frac{T_N-T}{T_N}\delta B_Q^2 - \frac{1}{4}\delta\frac{B_Q^4}{B_0^2}\right] \tag{1}$$

ここで、ρ は、電子の状態密度、Tc0 は磁気秩序がないときの超伝導転移温度、B_Q はスタッガードの交換磁場、⊿は超伝導ギャップ、γ は反強磁性と超伝導のカップリングを表す。T_N はネール温度である。B_0 は 0K のスタッガードの交換磁場である。

高橋の方法[6]を使って、熱膨張を求める。熱膨張と熱膨張係数は、

$$0 \le T \le T_c$$

$$\omega = -K\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial v}F + \rho\left[\frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{1}{T_{c0}}\right)T|\Delta|^2 + \frac{\partial b}{\partial v}|\Delta|^4 + \frac{\partial\gamma}{\partial v}|\Delta|^2 B_Q^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{1}{T_N}\right)T\delta B_Q^2 - \frac{1}{2}\frac{T_N-T}{T_N}\frac{\partial\delta}{\partial v}B_Q^2 + \frac{1}{4}\frac{\partial\delta}{\partial v}\frac{B_Q^4}{B_0^2} + \frac{1}{4}\delta\frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{1}{B_0^2}\right)B_Q^4\right]\right] \tag{2}$$

---

*近畿大学工業高等専門学校
総合システム工学科　共通教育科
**近畿大学工業高等専門学校
総合システム工学科　電気・電子系
***近畿大学工業高等専門学校　専攻科

$$\alpha = -K\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial V}\frac{\partial F}{\partial T} + \rho\left[\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_{c0}}\right)|\Delta|^2 + \frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_{c0}}\right)T\frac{\partial|\Delta|^2}{\partial T} + 2\frac{\partial b}{\partial V}|\Delta|^2\frac{\partial|\Delta|^2}{\partial T} + \frac{\partial\gamma}{\partial V}\frac{\partial|\Delta|^2}{\partial T}B_Q^2 + \frac{\partial\gamma}{\partial V}|\Delta|^2\frac{\partial B_Q^2}{\partial T} + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right)\delta B_Q^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right)T\delta\frac{\partial B_Q^2}{\partial T} + \frac{1}{2T_N}\frac{\partial\delta}{\partial V}B_Q^2 - \frac{1}{2}\frac{T_N - T}{T_N}\frac{\partial\delta}{\partial V}\frac{\partial B_Q^2}{\partial T} + \frac{1}{4}\frac{\partial\delta}{\partial V}\frac{\partial B_Q^2}{\partial T}\frac{1}{B_0^2} + \frac{1}{4}\delta\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{B_0^2}\right)\frac{\partial B_Q^4}{\partial T}\right]\right] \quad (3)$$

$T_c < T \leq T_N$において

$$\omega = -K\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial V}F + \rho\left[\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right)T\delta B_Q^2 - \frac{1}{2}\frac{T_N - T}{T_N}\frac{\partial\delta}{\partial V}B_Q^2 + \frac{1}{4}\frac{\partial\delta}{\partial V}\frac{B_Q^4}{B_0^2} + \frac{1}{4}\delta\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{B_0^2}\right)B_Q^4\right]\right] \quad (4)$$

$$\alpha = -K\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial V}\frac{\partial F}{\partial T} + \rho\left[\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right)\delta B_Q^2 + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right)T\delta\frac{\partial B_Q^2}{\partial T} + \frac{1}{2T_N}\frac{\partial\delta}{\partial V}B_Q^2 - \frac{1}{2}\frac{T_N - T}{T_N}\frac{\partial\delta}{\partial V}\frac{\partial B_Q^2}{\partial T} + \frac{1}{4}\frac{\partial\delta}{\partial V}\frac{\partial B_Q^2}{\partial T}\frac{1}{B_0^2}\frac{1}{4}\delta\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{B_0^2}\right)\frac{\partial B_Q^4}{\partial T}\right]\right] \quad (5)$$

3．結果

前のセクションで、熱膨張と熱膨張係数の表式を得た。このセクションでは、ネール温度と超伝導転移温度付近の熱膨張係数の温度依存性を議論する。

式(3)、式(5)から、ネール温度と超伝導転移温度付近の熱膨張係数の温度依存性は、線形の温度依存性を持つことがわかる。図 1、図 2 に数値計算の結果を示す。

図 1 で使用したパラメーターは、

$K = 1.69 \times 10^{-12}\frac{m^3}{J}$

$B_0 = 5.0J$,

$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial V} = 10^3\,{}^{1}/_{m^3}$,

$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right) = -10\,{}^{1}/_{Km^3}$,

$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_{co}}\right) = -10\,{}^{1}/_{Km^3}\frac{\partial\gamma}{\partial V} = 10^7\frac{1}{J^2m^3}$, ,

$\frac{\partial b}{\partial V} = 10^8\frac{1}{J^2m^3}$

$\frac{\partial\delta}{\partial V} = 10^{-8}\,{}^{1}/_{m^3}$

$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{B_0^2}\right) = -10\frac{1}{J^2m^3}$ である。

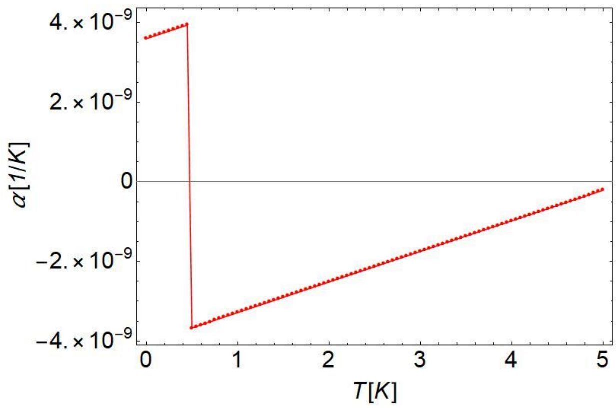

図 1 熱膨張係数の温度依存性

図 2 で使用したパラメーターは、

$K = 1.69 \times 10^{-12}\frac{m^3}{J}$

$B_0 = 5.0J$,

$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial V} = 10^3\,{}^{1}/_{m^3}$,

$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_N}\right) = -10\,{}^{1}/_{Km^3}$,

$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{T_{co}}\right) = -10\,{}^{1}/_{Km^3}$, $\frac{\partial\gamma}{\partial V} = 10^8\frac{1}{J^2m^3}$

$\frac{\partial b}{\partial V} = 10^8\frac{1}{J^2m^3}$, $\frac{\partial\delta}{\partial V} = 10^{-8}\,{}^{1}/_{m^3}$

$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{1}{B_0^2}\right) = -10\frac{1}{J^2m^3}$

である。

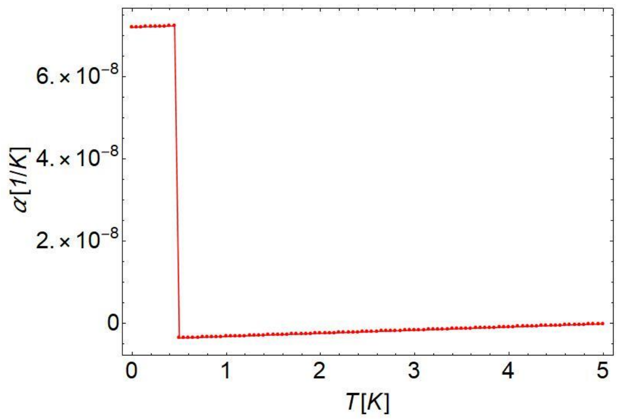

図 2 熱膨張係数の温度依存性

図 1、図 2 からわかるようにネール温度と超伝導転移温度で、熱膨張係数の飛びがあることがわかる。

4．まとめ

UPt3 のネール温度と超伝導転移温度近傍の熱膨張を調べた。ネール温度と超伝導転移温度近傍で、熱膨張係数は線形の温度依存性を持つことを見出した。ネール温度と超伝導転移温度で、熱膨張係数の飛びがあることを見出した。これは、秩序変数の消失のためである。ネール温度と超伝導転移温度近傍で、熱力学的なグリュナイゼンの関係式を満たすことを見出した。

参考文献

1) A. de Visser, A.A. Menovsky, and J.J.M. Franse, *Phys. Rev.* **B41**, 7304(1990).

2) R. Konno and K. Ueda, *Phys. Rev.* **B40**, 4329 (1989)

3) K. Machida, M. Ozaki, and T. Ohmi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **58**, 4116(1989).

4) M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. 63, 239 (1991).

5) R. Joyint and L. Tailefer, Rev. Mod. Phys. **74**, 235, (2002).

6) Y. Takahashi, Spin Fluctuation Theory of Itinerant Electron Magnetism, Springer, and references therein (2013).