

Sr_2RuO_4 の比熱

京大理 西崎 修司、池田伸一、前野悦輝

Sr_2RuO_4 は、初めて発見された銅を含まない層状ペロブスカイト構造を持つ超伝導体である(転移温度 $T_c \sim 1\text{K}$)。¹⁾銅酸化物高温超伝導体(HTSC)の中で典型的な $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ と同じ構造を持つため、HTSCの CuO_2 面と同様、 Sr_2RuO_4 も層状 RuO_2 面が超伝導に深くかかわっている。実際、量子振動効果の測定からフェルミ面が、2次元性の強い3枚の円筒面からなることが明らかになった。²⁾低温での電気抵抗は温度の2乗に比例することから、低温での準粒子の散乱は電子-格子散乱よりも、電子-電子散乱が支配的であることを示している。これらから、この物質の電子状態は、層状構造を反映して2次元性が強く表れ、また、電子相関の強いフェルミ液体としてよく記述できる。ペロブスカイト構造を持つ SrRuO_3 は、遍歴電子が強磁性を示し、スピンの揃いやすい傾向を持つ。このことから、 Sr_2RuO_4 についてもクーパーペアはスピン三重項のoddパリティの可能性が指摘されている。³⁾

我々は、この物質の波動関数の対称性に関する情報を得るため、 T_c 以下の比熱の測定を行った。⁴⁾測定には、浮遊帯域法により育成した単結晶試料を用いた。自作した熱緩和法カロリーメーターにより、0.3~2Kの温度範囲で Sr_2RuO_4 の比熱を測定した(図1)。図より、この試料の T_c は、1.13 Kである。

熱力学的要請から、エントロピーバランスを考慮に入れ、0.3Kから絶対零度までの比熱を外挿した。仮定として、エネルギーギャップが(1)等方的な場合と、(2)ラインノードがある場合のそれぞれを考えた。その結果、絶対零度での残留電子比熱係数を γ_0 として、いずれの場合でも大きな有限の値が残ることがわかる。 $\gamma_J = \gamma_N - \gamma_0$ を用いて、比熱のとり $\Delta C_p / \gamma_J T_c$ を導くと、それぞれ1.08、0.96となった。これらの値を、2次元ギャップ方程式から期待される値1.43、0.95とそれぞれ比べると、ラインノードがある方が矛盾がない。以下、ラインノードがあるものとして解析を進める。

この大きく残る γ_0 の試料依存性についてみる。非磁性不純物濃度と T_c との相関から、この物質では不純物がないときの T_{c0} は $T_{c0} = 1.35\text{K}$ である。⁵⁾図2に T_c/T_{c0} の値を γ_0/γ_N に対してプロットしたものを示す。同時にエネルギーギャップが、2次元

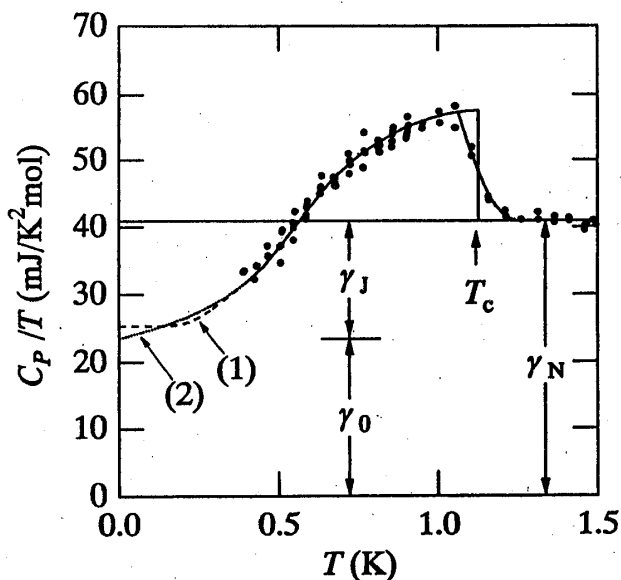


図1 温度 T に対する電子比熱 C_p / T 。このプロットの場合、面積がエントロピーに対応する。

$\Delta(k) = \Delta \cos(2\phi)$ の場合の計算値も載せる。⁶⁾ 非磁性不純物による共鳴散乱が起こる場合、 T_c の大きな減少と共に γ_0 も増大する様子がわかる。しかし、 T_c/T_∞ と大きな γ_0 の実験値をこの理論の範囲で説明するのは困難である。

この原因として、次の3つの可能性を考えてみる。第一に、結晶の欠陥など非磁性不純物以外の効果が超伝導を破壊することにより、 T_∞ が実際はもっと大きいにもかかわらず、小さく見積もりすぎている場合である。この場合、 $T_\infty = 1.7\text{K}$ でなければならない。ラインノードを持つ場合、並進対称性の乱れが超伝導性に大きく影響することから、この可能性もまだ捨てきれない。

2番目に、本質的に $\gamma_0 \neq 0$ の場合である。波数空間において面状のギャップレス領域がある場合、 γ_0 が有限に残る。特に、 Sr_2RuO_4 は3枚のフェルミ面を持っており、これらの1枚あるいは2枚のみで超伝導ギャップが開いているとすれば、この大きな γ_0 を説明可能である。⁷⁾ 例えば、3枚のフェルミ面のうち、最も面積の大きいもの(主に d_{xy} 軌道に基づく状態)のみが超伝導を起こしているとすれば、 $\gamma_0/\gamma_N = 43\%$ 残らなければならない。3番目として、oddパリティの場合だけ起こる、non-unitary状態である。この場合、 $\gamma_0/\gamma_N = 50\%$ である。この状態を表すエネルギーギャップは、Sigristら⁸⁾ や、Machidaら⁹⁾ により計算されている。

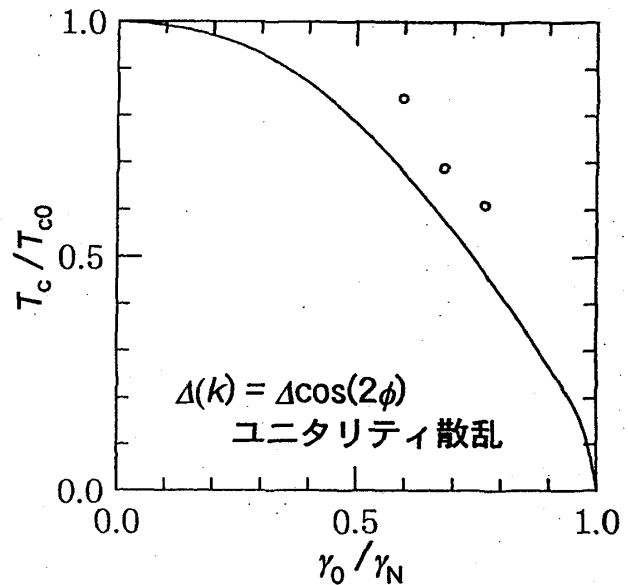


図2 残留電子比熱係数 γ_0/γ_N に対する T_c/T_∞ の図。○はそれぞれ、育成原料組成の異なる単結晶試料の測定結果である。

参考文献

1. Y.Maeno et al.: Nature 372 (1994) 532.
2. A.P.Mackenzie et al.: Phys. Rev. Lett. 76, (1996) 3786.
3. T.M.Rice and M.Sigrist: J. Phys. Condens. Matter 7 (1995) 643.
4. S.Nishizaki et al.: $\text{M}^2\text{S-HTSC-V}$, 1997, to be published in Physica C (1997).
5. A.P.Mackenzie et al.: preprint.
6. Y.Sun and K.Maki: Phys. Rev. B 51 (1995) 6059.
7. D.F.Agterberg, T.M.Rice and M.Sigrist: to be published in Phys. Rev. Lett. (1997).
8. M.Sigrist and M.E.Zhitomirsky: J. Phys. Soc. Jpn. 65 (1996) 3452.
9. K.Machida, M.Ozaki and T.Ohmi: J. Phys. Soc. Jpn. 65 (1996) 3720.