

重い電子の超伝導における不純物効果と励起スペクトル

16. 加藤勝, 恒藤敏彦 (京大理)  
周期的  $s-d$  モデルにおける超伝導
17. 尾崎正明 (京大理)  
Group Theoretical Analysis of the lattice Distortion in Anisotropic Superconductivity
18. 平島大, 生井沢寛 (東大教養)  
 $p$ -波超流体の集団励起
19. 糟谷忠雄  
ICAREA (Grenoble) に参加して (報告は物理学会誌)

7月31日(木)

20. 小林紀史, 竹ヶ原克彦, 糟谷忠雄 (東北大理)  
 $CeRh_3Bz$  の異常磁性
21. 倉本義夫 (東北大工)  
 $Tm$  及び  $U$  化合物の磁気的価数揺動状態
22. 笠井秀明 (阪大工), 吉森昭夫 (阪大基礎工)  
合金系の高密度近藤状態
23. 加藤勝, 恒藤敏彦 (京大理)  
Abrikosov の  $s-d$  模型に対する pseudo-fermion 法への comment
24. 糟谷忠雄 (東北大理)  
ICAREA に参加して (続き)

(上記プログラム中, 「ICAREA 報告」は学会誌(12月号)を参照して下さい。ここには掲載していません。)

## 1. Fermi Liquid Description for the Kondo Lattice System

日大・理工 三 沢 節 夫

4f および 5f 電子系をもつ Ce あるいは U などの化合物は, いわゆる重い電子系の特性を

示す。それらの化合物について豊富な実験データが集積し、理論的に解明すべき事柄が山積みされている。一方で、それらの実験データは極めて資料依存性が強く、実験者が異るごとに結果が異なり、何がその物質固有の性質であるか特定するのが困難である。このような段階では、微視的理論よりも前に現象論、例えば Landau によるフェルミ液体論が有効になる。

フェルミ液体論では、もともと物理量を分子論的に計算することはしないで、種々の物理量を準粒子間の相互作用 ( $f$  関数) などで関係づけ、それらの統一性を示すことが目標であった。

ここでは典型物質として  $\text{CeAl}_3$  と  $\text{UPt}_3$  を取り上げる。これらの物質では実験データのバラツキが少く、比較的信頼すべき結果が得られていて、後述するように、物理量の温度変化に関して、フェルミ液体効果による特異な現象が統一的に現れる。例えば電子比熱係数  $\gamma(T) = C/T$  ( $C$  は比熱,  $T$  は温度) はいずれも  $T^2 \ln T$  の温度変化を示し、 $\text{CeAl}_3$  で  $\gamma - \max$ ,  $\text{UPt}_3$  で  $\gamma - \min$  を示す。通例,  $\text{UPt}_3$  は、電気抵抗に  $\ln T$  依存性が見られないことから Kondo 格子系ではないと見なされている。 $\gamma - \min$  が電子フォノン相互作用に起因するとすれば、 $\text{UPt}_3$  が Ce 化合物などと異っていることの説明がつくが、帯磁率  $\chi$  の Stoner 因子がほぼ 3 であることは、やはり Kondo 格子系とみた方がよいと思われる。

重い電子系での極めて大きい電子比熱係数は、基本的には、不純物の場合の Kondo 効果に由来している。s-f 混成化された Kondo 共鳴準位が  $N$  個 (Ce イオン数) 集積して、フェルミ面附近に、狭い幅  $T_K$  (Kondo 温度) の高いピークの状態密度を与えるものとする。この考え方で、 $\text{CeAl}_3$  を始めとして多くの物質の  $\gamma$  および  $\chi$  の値が第 0 近似で説明できることは、よく知られている。この Kondo 共鳴準位を構成している粒子が Landau 流の準粒子である。

Kondo 共鳴準位モデルでは、Ce の場合、共鳴準位のピークはちょうどフェルミ・エネルギーに重なっていて、これを基にして比熱、帯磁率の温度変化を計算すると  $\gamma, \chi$  に  $\max$  は現れない。また、熱膨張係数  $\alpha$  の温度  $T$  に比例する係数を調べてみると

$$\alpha/T \propto \left(\frac{\phi}{N}\right)^2 \frac{1}{1 + \phi f_{\mu\mu}} \left\{ 1 - \frac{N\phi'}{\phi^2} + N \frac{\partial}{\partial \epsilon} f_{\epsilon\mu} \right\}_{\epsilon=\mu}$$

で与えられ、共鳴準位モデル ( $\phi' = 0, f \equiv 0$ ) では、 $\text{CeAl}_3$  とか  $\text{UPt}_3$  で観測されるような負の熱膨張係数が得られない。ここで  $\phi$  は状態密度,  $f_{\epsilon\epsilon'}$  は Landau の  $f$ -関数,  $\mu$  は化学ポテンシャルである。これらの矛盾を解決するには、フェルミ液体論に従って、準粒子間の相互作用を取り入れることが本質的である。

我々は準粒子の相互作用は準粒子間の散乱振巾で記述できると考え、そのパラメタとして

$k_F a$  ( $k_F$  はフェルミ波数,  $a$  は散乱振巾)をとる。熱膨張係数に合うように  $k_F a$  を決めると,  $\text{CeAl}_3$  で 0.73, 一方, 液体  $\text{He}^3$  では 1.60 である。熱膨張係数が負になるのは, 相互作用により, 運動量の低い状態がフェルミ面の上に励起されることによる。2体の分布関数のフーリエ成分にも  $k$  の大きい成分がきいてきて, 平均の2粒子間の距離が縮小する。このことから明らかなように, 負の膨張係数は, フェルミ面の存在と相互作用によって生ずる最も典型的なフェルミ液体効果である。

$\text{CeAl}_3$  を始めとして多くの Ce 化合物で物理量の温度変化に特異なことが現れる。 $\text{CeAl}_3$  では  $r$ -max,  $\chi$ -max,  $\alpha$ -min, 弾性定数の min 等である。これらの極大点あるいは極小点を Kondo 不純物の領域からコヒーレントなフェルミ液体に移る境界領域とみなす考えが支配的になっている<sup>1)</sup>。しかし, 筆者の考えでは, これらの極大・極小は, フェルミ液体効果による系の自由エネルギーの対数的依存性(フェルミ面の不連続の反映)から生ずるものであり, コヒーレンスの発生とは全く関係がない<sup>1)</sup>。例えば自由エネルギーは  $T^4 \ln u(T^2, H^2)$ ,  $T^2 H^2 \ln v(T^2, H^2)$  等の形をとる, ここで  $u(0,0) = v(0,0) = 0$ ,  $H$  は磁場。  $r, \chi, \alpha/T, c_i$  (弾性定数)等の温度変化は, 低温で  $T^2$  の巾までとると

$$\begin{aligned} g(T) &= g(0) + g_1 T^2 \ln(T/T_0) + g_2 T^2 \\ &= g(0) + g_1 T^2 \ln(T/T^*), \quad T^* = T_0 e^{-g_2/g_1} \end{aligned}$$

で与えられる。ここでは  $T_0$  は  $T_K$  のオーダーの有効フェルミ温度,  $T_{\max}$  または  $T_{\min}$  は  $T^*/\sqrt{e}$  できまる。  $g_1, g_2$  は物理量ごとに異なるので極大点または極小点はそれぞれ異なる。 $\text{CeAl}_3$  では  $r_{\max}, \chi_{\max}, (\alpha/T)_{\min}, (C_t)_{\min}$  はそれぞれ 0.37, 0.66, 0.77, 0.48K である。

フェルミ液体モデルの立場では, 種々の物理量に対する  $g_1$  の値が他の基本的量(例えば Landau パラミタ)から統一的に導かれることを示すことが要求される。現状では, それは, ほんの部分的にしか成功していない。とくに  $r$  に対して, Ce 化合物では液体  $\text{He}^3$  と異なって,  $g_1 < 0$  であることを示すことが重要である。これは今後の課題である。

Ce 化合物の物理量を計算するのに, 分子論的立場から基礎方程式を導いて, それを数値的に解く立場がある。その際, 数値的に対数的依存性が間違いなく出ているか否か, また, いろいろの過程から出る対数的依存項を全部足し上げているか否か確認することが重要である。

## 参 考 文 献

- 1) C.D. Bredl et al., Phys. Rev. Lett. 52 (1984) 1982.
- 2) S. Misawa, Solid State Commun. 58 (1986) 63.