

反強磁性相互作用によるGutzwiller の重い電子の繰り込み — 軽い準粒子の形成 —

北海道大学 大学院理学研究科 物理学専攻

大川房義¹

1 強相関電子系の類似性

希薄磁性合金系の強相関電子系の 1 粒子状態密度は 1 図に示す様に, 3 ピーク構造を持つ事は近藤効果の研究で良く知られている. また近藤効果が本質的で重要な役割を演じる f 電子系の重い電子系, いわゆる近藤格子系, でも同様の状態密度が実現していることはかなり早い時期から多くの人たちが推測していた. 同様の 3 ピーク構造はモット転移近傍の遷移金属でも実現していることは 1963 年発表の理論 [1, 2] に物理的考察を加えれば容易に結論できる. 事実, 強相関極限のハバード模型を補助 (スレイブ) 粒子の手法を用いて調べた理論 [3] では下部ハバードバンドのトップに狭いバンドの存在を示している. この類似性は強相関電子系一般で近藤効果が本質的に重要な役割を演じている事を示唆している.

ハバード模型の場合は広いバンドは上部・下部ハバードバンドであり, フェルミ準位上の狭いバンドはグッツヴィラーの重い準粒子バンドである. まず第一に言えることは, 上部・下部ハバードバンドにスペクトルの大部分を取られるので, グッツヴィラーバンドのスペクトル重は小さくならざるを得ない. この観点から, モット転移近傍の異常金属相での小さなデュリュエデ重は容易に理解できる. ここでは, モット転移近傍の小さなデュリュエデ重と小さな比熱係数という異常性を議論する. フェルミ液体論の枠組みでは, 小さな比熱係数は軽い準粒子が形成されていることを意味する.

2 近藤効果が合理的出発点

強相関電子系の理論として, 近藤効果を出発点とする理論構築が可能である. 最良の 1 サイト近似はアンダーソン模型を自己無撞着に決め, かつ解く問題に帰着する [4]. これは近藤効果の問題に他ならない. 最良の 1 サイト近似で無視された多サイト項は摂動的に考慮することができる. この取り扱い, 局所スピン揺動がサイト間交換相互作用で互いに相互作用しているとの近藤格子の物理描像の数学的表現に他ならない. この摂動理論は無限次元極限からの展開, $1/d$ 展開としても定式化できる. ここで d は空間次元数である.

最良の 1 サイト近似では周期系の量子スピン揺動の典型的エネルギー尺度として局所近藤温度, T_K , が定義できる. 強相関電子系の $1/d$ 展開理論では, 小さなパラメータとして $1/d$ 以外にも T_K/U が存在する [5]. ここでボルツマン定数は $k_B = 1$ の単位系を用いている.

¹E-mail: fohkawa@phys.sci.hokudai.ac.jp

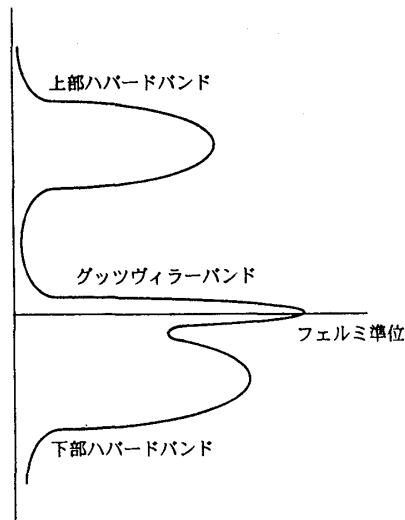


図 1: サイト当たりの電子数が 1 より少し少ない時のハバード模型の状態密度の模式図。裸の準位とそれより局所斥力 U だけ高い所に幅広いバンドと、フェルミ準位上に巾の狭い準粒子バンドとがある。希薄磁性合金系 (近藤効果) や近藤格子でも同じ様な状態密度が実現される。

3 遍歴電子系のキュリーワイス則の $1/d$ の最低次機構

従来, SCR 理論によりモード・モード結合効果が遍歴電子磁性体のキュリーワイス則を与えるという議論が幅広く受け容れられている [6]. モード・モード結合効果は $1/d$ の高次効果で無限次元では消える. 一方, 無限次元でも磁気的秩序が可能であり, 帯磁率は転移点に向かい発散していくと期待できる. $1/d$ の最低次でキュリーワイス則を与える機構が存在しそうである.

$1/d$ の最低次効果としては局所スピン揺動効果と多サイト項の磁気的分子場の項がある [7]. 局所スピン揺動効果は $T \gg T_K$ の高温領域で局在モーメント磁性のキュリーワイス則を与える. 遍歴電子系では 1 粒子状態密度の特徴がある場合に, 例えばフェルミ準位上に鋭いピークのある強磁性の場合あるいはフェルミ面がネステイングを示すような反強磁性の場合, 磁気的分子場の温度依存性がキュリーワイス則を与える. 驚くべきことに, 磁気的分子場の温度依存性が効いているときはモード・モード結合効果はキュリーワイス則を抑える方向に働く [8, 9, 10].

4 モット転移近傍での小さなデュリュデ重を持つ軽い準粒子

高温超伝導は重い準粒子と準粒子間の相互作用が求まれば説明できる [11]. 磁気的機構としては, 反強磁性揺動機構と超交換相互作用が提案されている. ボーズ粒子を交換するという場の理論の枠組みでは二つは本質的に同じものである事を示すのは容易である [11, 12].

反強磁性交換相互作用によるグッツヴィラーの重い電子の繰込みを計算することができる. 反強磁性揺動の発達の主因は超交換相互作用でありフェルミ面の形状も副次的に効いている. この繰込みで, 1 粒子自己エネルギーの波数依存性により低温で軽い準粒子が形成される [13]. 局所量子揺動効果の繰込みがエネルギー依存性からくると対照的である. この効果は文献 [8] で考慮しているモード・モード結合効果がキュリーワイス則

を抑える効果に他ならない。この効果はかなり高温から起こり始め、低温にむかって大きくなる。またフェルミ面上で大きくフェルミ面から離れると小さくなる擬ギャップ的振る舞いをする。また準粒子分散の鞍点近傍で大きく鞍点から離れると小さくなる。

参考文献

- [1] J. Hubbard, Proc. Roy. Soc. (London) A **276** (1963) 238.
- [2] M. C. Gutzwiller, Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 159.
- [3] F. J. Ohkawa, J Phys. Soc. Jpn. **58** (1989) 4156.
- [4] F. J. Ohkawa, J. Phys. Soc. Jpn. **61** (1992) 1615.
- [5] SCR 理論で議論の対象になっている典型的遍歴電子磁性体含め強相関電子系の比熱係数は $10 \text{ mJ/K}^2 \text{ mol}$ 以上はある。これから、 $T_K \simeq 0.1 \text{ eV}$ かそれより小さい。一方、 $U \gtrsim 5 \text{ eV}$ である。小さなパラメーター T_K/U は、大きくても 2×10^{-2} で、多くの物質では 10^{-2} より十分小さい。
- [6] T. Moriya, *Spin Fluctuations in Itinerant Electron Magnetism*, Springer Verlag 1985.
- [7] 電荷密度波 (CDW) の分子場に対応する項と等方的 s 波クーパ対形成の分子場に対応する項も $1/d$ に関して最低次効果である。これらは引力系 ($U < 0$) で問題になる。
- [8] K. Miyake and O. Narikiyo, J. Phys. Soc. Jpn. **63** (1994) 3821. この文献では局在モーメントの自由度と遍歴電子の自由度とが独立の自由度であると仮定し、二つの自由度を顕わに考慮した現象論、双対理論、を用いている。一方、 $1/d$ 展開理論では局在モーメントは高温あるいは高エネルギーで現れる自由度であり、遍歴電子は低温・低エネルギーで現れる自由度である。静的帯磁率の表式については双対理論と $1/d$ 展開理論とで類似している。しかし、動的帯磁率あるいは帯磁率の虚数部分になると違いが顕著になる。
- [9] 宮井英次, 学位論文 (北海道大学), 1999 年 2 月。
- [10] 磁氣的分子場の温度依存性を含め準粒子分散関係の特徴的な構造に由来する温度依存性は、従来の SCR 理論では無視されている。この依存性を考慮すれば、SCR 理論は $1/d$ 展開理論と定性的には同じ結果を与える。
- [11] F. J. Ohkawa, Phys. Rev. B **59** (1999) No. 13, April 1. (印刷中)
- [12] この相互作用の主たる部分は高エネルギーのボーズ粒子的励起, 上部・下部ハバードバンド間のスピンチャネル対励起, を仮想交換する過程から導かれる超交換相互作用である。この様な (4-5) eV にもなる高エネルギー励起過程に由来する効果をスピン揺動効果と呼ぶのは不適切と考える。
- [13] F. J. Ohkawa, Physica C **301** (1998) 264.