

15. 重い電子による超伝導の不純物効果と励起スペクトル

東大・物性研 今田正俊

弱結合領域にあって、コヒーレンス長が、格子定数に比べて大変長い超伝導体の不純物効果を議論するための理論として、Abrikosov-Gorkov (AG) 理論¹⁾が知られている。オーダーパラメータのゆらぎや空間変化を無視しているのがAG理論の特徴であり、等方的s波超伝導に対する非磁性不純物の効果は第一義的には重要でないという結論を導く。

一方、非等方的なs波超伝導の場合には、非磁性不純物が顕著な影響を与え得るという議論が大川-福山²⁾によってなされ、またp波超伝導体中の非磁性不純物についても、上田-Rice³⁾によって、等方的s波超伝導体中の磁性不純物と同様の顕著な効果があり得る等の議論がおこなわれた。以上の議論はすべて、AG理論をもとに、オーダーパラメータの空間的なゆらぎは考慮されていない。

有効質量の重い電子が超伝導を引き起こすときに、超伝導体の持つであろう重要な特徴の1つは、コヒーレンス長が短いということである。このことが、従来の超伝導と違った特徴を引き起こす可能性があるとするれば、それはまず第一には、超伝導転移温度付近で、オーダーパラメータのゆらぎが増大し、通常の状態場の取り扱いがよくなるという点であろう。しかしながら、現実にゆらぎの効果が顕著にあらわれるのは、コヒーレンス長が、格子定数と同じ程度の長さになった時であると考えられる。

コヒーレンス長が格子定数の10倍程度まで短くなった時に、より顕著に、従来の超伝導と違った特徴を示すと考えられる性質に、不純物に対する応答がある。ここで導入された不純物の役割は、いわば、オーダーパラメータのゆらぎの生じやすさを敏感に測定するためのプローブであるといえる。

不純物効果がAG理論の枠組を超えて、空間的なゆらぎが重要になってくるパラメータは、定性的には次のように評価される⁴⁾。不純物の近傍で、オーダーパラメータの振幅が大きく減少しているとすると、それはコヒーレンス長を程度のスケールで、遠方でのバルクなオーダーパラメータの値へと回復してゆく。このようなオーダーパラメータの空間変化を引き起こすことによって生ずる凝縮エネルギーの項は、オーダーパラメータの減少による損とその空間変化が生じたことによる損の和であり、おおざっぱには $E_F^2 / |\Delta|$ 程度の大きさと見積もられる。但し、 E_F は超伝導に関与している電子の“有効フェルミエネルギー”であり、 Δ はオーダー

パラメータである。オーダーパラメータを減少させようとするような不純物ポテンシャルの強さ V_{imp} と凝縮エネルギー $E_F^2/|A|$ の大小関係で、オーダーパラメータの顕著な空間変化が起こるかどうかは決まると考えられる。現実的に考えて、 $|A| \simeq 1\text{K}$ 程度と考えるならば、不純物ポテンシャルが凝縮エネルギーに匹敵する程度になりうるのは、 $E_F \lesssim 10 \sim 100 |A|$ であろう。この領域ではオーダーパラメータの空間的なゆらぎを無視することはできない。

ここで、“有効フェルミエネルギー” E_F あるいは重い有効質量を引き起こす、微視的原因あるいは個々のメカニズムには立ち入らないで、現象論的に期待される不純物効果について考察を行なう。本来的には、重い有効質量の電子は、顕著な多体効果によって生み出されるはずのもので、それらの個別の強い相互作用の詳細な検討が最終的には不可欠であり、重い質量のフェルミ液体をはじめから仮定するここでの議論は「出発点となる現象論」とみなすべきであろう。

さて、ボゴリューボフ・ドジャン方程式で E_F と A の比が $10 \sim 100$ 倍程度であると仮定して、デルタ関数的な不純物ポテンシャルがあるとき、不純物ポテンシャルの強さがある程度強ければ、オーダーパラメータの強い空間変化が生ずるだろうという直観的描像について述べたが、このことによる、最も顕著な影響の一つとして予想されるのは、励起スペクトルの変化である。オーダーパラメータが不純物近傍 ξ の範囲で減少する結果、不純物近傍に多数の束縛状態が生ずることを、計算によって示すことができる⁴⁾。 $E_F/A \sim 10 \sim 100$ 程度であれば励起状態のエネルギーの最小値（励起しきい値）はギャップの大きさの $1/10$ 程度となり、超伝導転移温度 T_C よりも一ケタ以上低い温度まで、不純物による束縛状態のためにある種のギャップ的ふるまいを示す。 ξ が格子定数に比べて1ケタ程度大きい場合には、かなり低い不純物濃度でも、この効果が顕著であることも示される。比熱は温度 $T \geq 0.05 T_C$ の範囲で、BCS理論の予想から大きくはずれ、単純でないふるまいを示すが、近似的に $C \sim T^\alpha$ 、 $2 \leq \alpha \leq 4$ に似たふるまいとなる。このことは有効質量の重い電子系での超伝導の性質をしらべる場合、非磁性的な不純物の効果を検討しておかなければならないことを意味する。

不純物近傍の束縛状態は、比熱だけでなく他の物理量へも大きな効果を持ち得る。たとえばNMRの緩和時間 T_1 は、スピン拡散による影響を受けて、単一指数則からはずれた緩和を示し得る。この事情は第二種超伝導体での磁束周辺の束縛状態の効果と似ていて興味深いと考えられるが、紙数もないのでここでは言及しない。

現実的に“重い電子”による超伝導が実現され、コヒーレンス長が短いときには、強いクーロン反発力と結晶構造のかねあいで、かなり異方的な超伝導状態になっていることも考慮しなければならない。異方性や異った対称性をもつ超伝導のオーダーと不純物効果のからみあいは、

次に考察すべき興味ある問題である。また非磁性不純物に限らず、磁性不純物が、超伝導に与える効果も、AG理論とは全く違った様相が、短いコヒーレンス長の場合には予想される。

参考文献

- 1) A. Abrikosov and L. P. Gor'kov, *Sov. Phys. JETP* **10** (1960) 593.
- 2) F. J. Ohkawa and H. Fukuyama, *J. Phys. Soc. Jpn.* **53** (1984) 4344.
- 3) K. Ueda and T. M. Rice, *Theory of Heavy Fermions and Valence Fluctuations*, ed. T. Kasuya and T. Saso (Springer, 1985) p. 267.
- 4) M. Imada, *J. Phys. Soc. Jpn.* **55** (1986) No. 10.

16. 周期的 s-d 模型における超伝導

京大・理 加藤 勝, 恒藤 敏彦

1. 導 入

重い電子系における超伝導について、異方的 s 波, p 波の可能性が周期的 Anderson 模型をもとに議論されてきたが、ここでは周期的 s-d 模型をもとにして、単純な s 波の Cooper 対を考えて、局在 moment の超伝導への影響を調べる。

2. モ デ ル

周期的 s-d 模型において s-d coupling が反強磁性的で、伝導電子の transfer energy より大きな場合には、moment の自由度による一粒子励起は容易に求められるので、非現実的ではあるが一つの model として強結合極限を考える。

tight binding 近似で周期的 s-d 模型を扱うが、広い s-band が存在するためには、局在 moment がない site が必要であり、図 1 にある 2 次元の格子を考え、 $J/W_1 \ll 1$, $J/W_2 \gg 1$ とする。

$$\mathcal{H} = -W_1 \sum_{(i,j)} C_{Ai\sigma}^+ C_{Aj\sigma} - W_2 \sum_{(i,j)} (C_{Ai\sigma}^+ C_{Bj\sigma} + \text{h.c.}) + J \sum_i \mathbf{S}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_{Bi} \quad (1)$$

局在 moment がある site では、moment と電子の spin との coupling により、8 つの固有