

多バンド系におけるフェルミ面間ネスティングによる超伝導

電気通信大学 量子・物質工学科 黒木和彦¹

1 フェルミ面間ネスティングによる超伝導

1.1 電子対散乱と超伝導

スピン揺らぎを媒介とする超伝導は重い電子系、酸化物、有機物などで実現している可能性があり、近年関心が高まっている。スピン揺らぎ機構では、フェルミ面上の電子対散乱 $(\mathbf{k}, -\mathbf{k}) \rightarrow (\mathbf{k}', -\mathbf{k}')$ を媒介するペアリング相互作用 $V(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$ がスピン揺らぎによって生まれる。その結果、

$$V_{\text{eff}} = - \frac{\sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}' \in \text{FS}} V(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \phi(\mathbf{k}) \phi(\mathbf{k}')}{\sum_{\mathbf{k} \in \text{FS}} \phi^2(\mathbf{k})} \quad (1)$$

という量が正で大きくなるようなギャップ ϕ を持つ超伝導が実現する。スピン揺らぎがフェルミ面のネスティングに起因する場合、そのネスティング・ベクトルを \mathbf{Q} として、 $\mathbf{k} - \mathbf{k}' \sim \mathbf{Q}$ 近傍の運動量移行がある電子対散乱が (1) 式において重要な寄与をする。スピン揺らぎの場合、 $V > 0$ なので (1) 式より、フェルミ面上で \mathbf{Q} の始点と終点ではギャップの符号が反転している必要がある (図 1(a)(b) 参照)。

1.2 フェルミ面間ネスティングによる超伝導の可能性

上記の議論を拡張して、複数の非連結なフェルミ面の間に適度なネスティングがある場合、それに起因するスピンや電荷揺らぎを媒介としてフェルミ面間の電子対散乱がおこり、超伝導になる可能性がある。 $V > 0$ である場合は、フェルミ面間でギャップの符号が反転した超伝導が実現することになる。そのような超伝導が起こっている可能性が理論的に提案されている例として梯子型物質、有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₂X、有機超伝導体 (TMTSF)₂X、Sr₂RuO₄、MgB₂ などがある。

2 高温超伝導の可能性

2.1 正方格子上のハバード模型

正方格子上のハバード模型の half-filled 近傍における $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導の T_C は、fluctuation exchange (FLEX) 近似によって $T_C \sim 0.03t$ 程度であると見積もられている。これを銅酸化物高温

¹ E-mail: kuroki@e-one.ucc.ac.jp

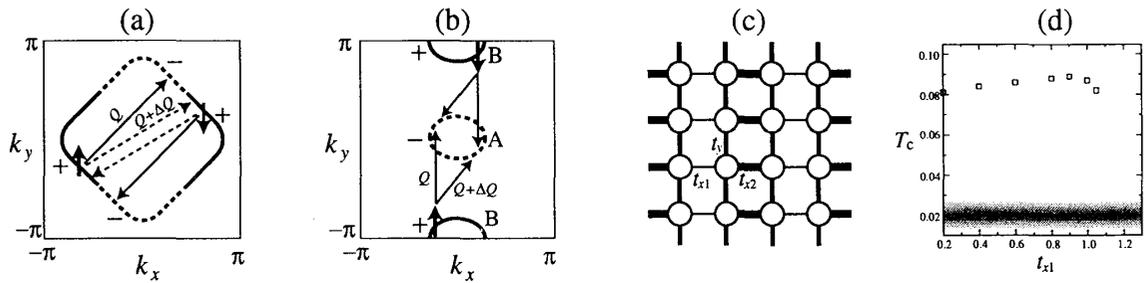


図 1: (a) 正方格子の half-filled 近傍におけるフェルミ面と $d_{x^2-y^2}$ 波ギャップの場合のフェルミ面上の電子対散乱。(b) ネストしたポケット状のフェルミ面がある場合のフェルミ面上の電子対散乱。(c) ネストしたポケット状のフェルミ面が生じる格子の例。(d)(c) の格子上のハバード模型の T_C を t_{x1} の関数としてプロット。 $t_y = 1, t_{x2} = 1.3$, オン・サイト相互作用 $U = 8$, バンド・フィリング $n = 0.95$ 。図中 hatching が施されている温度領域が正方格子上ハバード模型の典型的な T_C 。

超伝導体の模型と考えれば、100K 程度に相当するので、銅酸化物高温超伝導を説明する結果であるとは考えられるが、 t の 1/100 のオーダーという意味ではかなりの「低温」である。この原因の一つは $d_{x^2-y^2}$ 波ギャップの node がフェルミ面を切ることによって起因していると考えられる。すなわち、スピン揺らぎには広がりがあるため、図 1(a) の破線で表すような、始状態と終状態においてギャップが同符号になる電子対散乱が (1) 式に大きな負の寄与を与えるからである。

2.2 ネストしたポケット状フェルミ面による高温超伝導

上記の困難を克服するためには以下のような可能性が考えられる。例えば図 1(b) のように、二つのポケット状のフェルミ面が適度にネストして、それによって生ずるスピン揺らぎの広がりの程度がフェルミ面の大きさと同程度であるとすると、フェルミ面間で符号の反転したギャップを考えることによって、式 (1) に対する全ての大きな寄与は正になる [1]。これによって正方格子よりも高い T_C が得られる可能性がある。実際、図 1(c) のような格子上のハバード模型を考えると上記の条件が満たされるが、そのときに FLEX 近似によって見積もられる T_C は図 1(d) のように正方格子の場合に比べて 3 ~ 4 倍となる。

この例以外にも、ポケット状のフェルミ面間のネスティングに起因して高い T_C が得られる模型の例が見つけられている。このような機構の現実の物質での実現可能性について今後検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] K. Kuroki and R. Arita, Phys. Rev. B **63** 174507 (2001).