

低次元異常金属の開発

—高温超伝導体の理論的研究—

研究代表者 佐藤正俊 名大大学院理学研究科 教授

研究実行者 小林晃人、鶴田篤史、松浦民房、黒田義浩（名大）

銅酸化物高温超伝導体では超伝導相だけでなく金属相において特徴的な物性が観測されています。超伝導相では 100 K を超える高い超伝導転移温度 T_c と異方的な超伝導ギャップが観測されています。これは従来の超伝導の理論（BCS 理論）では説明がつかない新しい超伝導です。また T_c より高温側の幅広い領域は異常金属相と呼ばれています[1]。ここでは通常の金属とは全く異なる様々な物性が観測されています。中でも異常金属の本質と考えられる擬ギャップは核磁気共鳴（NMR）、中性子非弾性散乱、トンネルスペクトル、角度分解型光電子分光（ARPES）など様々な手段で観測され、注目を集めてきました。擬ギャップとは超伝導ギャップと同じ異方性を持つ緩やかなギャップ構造です。常温から出現して温度を下げると共に徐々に成長し、 T_c で超伝導ギャップに繋がります。従って擬ギャップは超伝導の先駆現象であると考えるのが自然です。しかし従来の超伝導では先駆現象は T_c のごく近傍でしか現れないことが知られており、擬ギャップのメカニズムは超伝導相のそれと共に大きな謎でした。

銅酸化物高温超伝導体の母物質はモット絶縁体の一種です。モット絶縁体とは、格子点あたり 1 個の伝導電子があり、かつ電子間のクーロン斥力 U が強く働く場合、電子同士が避け合って身動きが取れなくなったもので、遷移金属酸化物等で多く見られます。銅酸化物高温超伝導体では、ここにキャリアー（電子またはホール）を少量ドーピングすることにより超伝導相や異常金属相が現れます。従ってこれらのメカニズムを考えるためにはまずモット絶縁体近傍の金属状態を理解する必要があります。

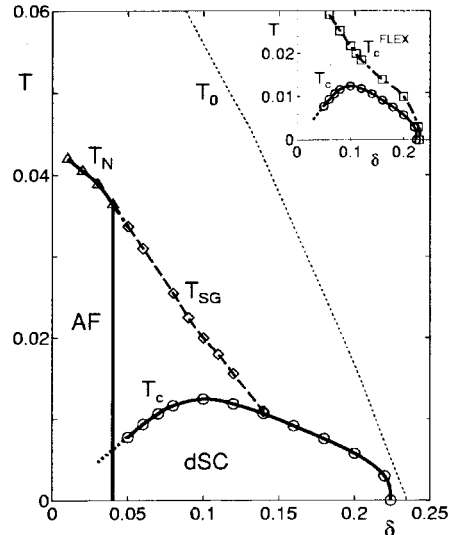
モット絶縁体にキャリアーを少量ドーピングすると準粒子励起の絶縁体ギャップの中に新しい準粒子状態（in-gap state）が形成され、それが電気伝導を担うことが d-p 模型における $1/N$ 展開理論[2]やハバード模型における動的平均場近似等により示されており、実験的にも確かめられています。in-gap state はいわゆる Zhang-Rice 一重項に対応する状態で、そのバンド幅 W はキャリアードーピング量 δ にほぼ比例します。この in-gap state における主要な相互作用は超交換相互作用 J_s および繰り込まれたクーロン斥力 U_{eff} ですが、実際に超伝導相や異常金属相が現れる δ が小さい領域では J_s が主要な相互作用です[3]。 J_s と Zhang-Rice 一重項に基づいた t-J 模型ではスレーブボソン平均場近似の相図が提案されています[4]。

私達は高温超伝導体の伝導電子系が 2 次元に近いことに着目し、低次元性のゆらぎによる擬ギャップのメカニズムを研究してきました。 J_s の存在は反強磁性を強く促しますが、系の 2 次元性のため相転移が障害さ

れ、その結果強い反強磁性ゆらぎと超伝導ゆらぎが生み出されます。ここで言う「ゆらぎ」とは、長距離秩序に至る手前で局所的に発達したり消えたりする短距離秩序のことです。私達は d-p 模型に基づき反強磁性ゆらぎを FLEX 近似で、超伝導ゆらぎを self-consistent t -matrix 近似で取り扱い、これらのゆらぎと準粒子状態をセルフコンシステントに解きました[5]。その結果得られた相図を下に示します。

$T \leq T_c$ の領域は $d_x^2-y^2$ 波超伝導相、 $T \leq T_N$ の領域は反強磁性相、 T_{sg} は NMR の $1/T_1T$ が極大となる温度です。反強磁性ゆらぎと超伝導ゆらぎは T_0 付近から現れ温度を下げると共に増大します。 $T \leq T_0$ の金属領域では超伝導ゆらぎによって準粒子スペクトルに擬ギャップが現れます。従ってこの領域が異常金属相に相当します。 $T_{sg} \leq T \leq T_0$ の領域では反強磁性ゆらぎが優勢ですが、 $T_c < T \leq T_{sg}$ の領域では逆に超伝導ゆらぎが優勢になります。

結論として、私達はモット絶縁体近傍・2次元性という高温超伝導体の2つの特徴から生み出されるゆらぎの効果をセルフコンシステントに解くことにより、実験による相図[1]とよく一致する結果を得ました。



- [1] M. Sato: *Physica C* **263** (1996) 271.
- [2] H. Jichu *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **59** (1990) 2820.
- [3] S. Fukagawa *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **67** (1998) 3536.
- [4] H. Fukuyama: *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **108** (1992) 287.
- [5] A. Kobayashi *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** (2001) 1214.