

銅酸化物高温超伝導体における擬ギャップと 磁場誘起電荷密度波— $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ の場合—

川崎 慎司 〈岡山大学大学院自然科学研究科 kawasaki@science.okayama-u.ac.jp〉

鄭 国慶 〈岡山大学大学院自然科学研究科 zheng@psun.phys.okayama-u.ac.jp〉

物性物理の主要問題の一つ「銅酸化物高温超伝導の発現機構」は、超伝導発見から30年を経た現在も未解明である。その一因として、超伝導の背景電子状態—異常金属相(擬ギャップ)—の起源が未解明なことが挙げられる。

銅酸化物高温超伝導体は、結晶構造に銅と酸素で構成される二次元面(CuO_2 面)を持ち、母物質は反強磁性モット絶縁体である。そして、 CuO_2 面へのキャリア(ホールあるいは電子)ドーピングで反強磁性を抑制することで超伝導が発現することが普遍的ルールとして知られている。また、モット絶縁体へのドーピングの方法として、酸素量の制御や価数の異なる元素への化学置換が知られるが、実験で求めたキャリア濃度(ドーピング量 p)で表すと、右下図のような普遍的な相図が得られる。相図のように、高温超伝導は反強磁性絶縁体と隣接して現れるため、これまでは磁性(スピン)と超伝導の関係を調べるのが研究の中心であった。

ところが最近、ホールドーブ型銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ (YBCO, 酸素量によるドーピング量制御)の不足ドーブ域($p \sim 1/8$)において、 CuO_2 面に垂直磁場($H \parallel c$)を印加し超伝導を抑制すると、長距離電荷密度波(CDW)が現れることが報告され、超伝導と競合した秩序として注目を集めた。この時、面内磁場($H \perp c$)ではCDWが観測されなかったため、混合状態における渦糸中心の局所電荷分布の空間的な重なり合いがCDWの起源であると考えられた。さらに、YBCO結晶固有の CuO 鎖における周期的酸素欠損や、単位胞に二枚ある CuO_2 面間相互作用といった構造的要因がCDW発現に関係しているという指摘もあった。また、そもそもこの磁場誘起

CDWは、ドーピング量 $p \sim 1/8$ 付近にしか存在しなかった。その後、共鳴/非共鳴X線散乱実験から、ゼロ磁場でも短距離CDW($\xi = 20 \sim 50 \text{ \AA}$)が生じていることが複数の銅酸化物系で見出されたものの、CDWと反強磁性や超伝導、そして擬ギャップとの関係ははっきりしていなかった。

我々は、単位胞に CuO_2 面が一枚で最も単純な銅酸化物の一つである $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ (Bi2201, $T_c^{\text{max}} = 32 \text{ K}$)に注目し、強磁場下核磁気共鳴(NMR)実験を行った。外部磁場は、渦糸の影響を避けるために CuO_2 面内($H \perp c$)に印加し、詳細にCu-NMR実験を行った。その結果、反強磁性と超伝導の境界領域($0.11 < p < 0.13$)において、 $H = 10 \text{ T}$ 以上の強磁場下で、長距離CDWによるCu-NMRスペクトルの分裂や、 $T_{\text{CDW}} \sim 50 \text{ K}$ でスピン格子緩和率を温度で割った $1/T_1 T$ に明瞭なピークを観測した。また、超伝導が発現する直前に反強磁性相に代わってCDW相が現れることを見出した。さらに、YBCOでの観測と異なり、CDWは超伝導ドームより高温で現れ、擬ギャップの閉じるドーピング量($p \sim 0.21$)よりも少ないドーピング量で消えてしまうことを明らかにした。

本研究で得られた結果は、磁場誘起CDWが渦糸状態の有無にかかわらず、反強磁性相に隣接する領域に広く存在することを示す。つまり、CDWは超伝導と競合ではなく共存した秩序である。特筆すべきは、CDW転移温度 T_{CDW} が反強磁性相に近いほど高く、擬ギャップ温度 T^* と正の相関を持つことである。これは、擬ギャップの起源に関わる新たな知見である。本研究成果は、高温超伝導の物理において、「スピン」に加えて、「電荷」の役割も今後焦点を当てるべき重要なものであることを示す。

—Keywords—

核磁気共鳴(NMR) :

外部磁場(ゼーマン効果)や電場勾配(電気四重極相互作用)による原子核スピンのエネルギー準位分裂を利用し、振動磁場($\sim \text{MHz}$)で共鳴吸収を起こす。注目原子核の周囲の電子が作る磁場(磁性)や電場(電荷密度波)の静的/動的な情報を得ることができる局所的プローブ。医療用MRIと原理は同じ。

銅酸化物高温超伝導体 :

1986年に発見された(1987年ノーベル物理学賞)常圧下で液体窒素の沸点以上の「高温」で超伝導を示す唯一の系。 CuO_2 面を持つという普遍的ルールに従い多くの物質系が合成された。母物質の銅の $3d$ 電子は、電子数が9にも関わらず、強いクーロン斥力のために局在化する(モット絶縁体)。元素置換により CuO_2 面にホール(p)をドーブすると反強磁性が抑制され、 $p > 0.05$ でドーム状の超伝導相が現れる。単位胞に CuO_2 面を一枚しか持たない系ではおよそ $p \sim 0.16$ (最適ドーブ)で最高 T_c が観測され、 0.16 以下(以上)を不足(過剰)ドーブ域と呼ぶ。また、電子ドーブ系でも超伝導が発現する。最高 T_c を持つホールドーブ型には、反強磁性と超伝導の共通背景電子状態として「擬ギャップ相」が存在する。図はこれまでのホールドーブ型銅酸化物高温超伝導体の一般的相図。

