

# 「低エネルギー放射光角度分解光電子分光および結合強度スペクトル解析を用いた銅酸化物高温超伝導体の準粒子繰り込み効果の解明」

大阪府立大学 大学院工学研究科  
安齋 太陽

## 研究背景と目的

超伝導は、金属を低温 (約  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) に冷やしたときに電気抵抗がゼロになる現象である。本研究で対象とした銅酸化物系の高温超伝導体は、液体窒素温度 ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) にて超伝導性を保つことができる物質であるが、超伝導へ転移する温度は依然として低い。室温程度の高い温度で超伝導を実現するためには、まず高温超伝導の発現機構を理解する必要がある。

超伝導は、電子が何らかのボソン励起と結合することで発現する。銅酸化物高温超伝導体では、そのボソンの正体が判明していない。これまでの研究から、ボソンの候補として格子振動 (フォノン) や磁気共鳴励起 (マグノン) などが提案されているが、決着はついていない。

電子とボソンが結合すると、電子の速度と寿命が低下する。その振る舞いは準粒子分散の繰り込み効果に現れる (図 1)。本研究では、

- 繰り込み構造を精度良く観測すること、
  - その構造からボソンの周波数と結合の強さを評価すること、
  - これらの実験情報からボソンの正体を明らかにすること、
- を目的とした。

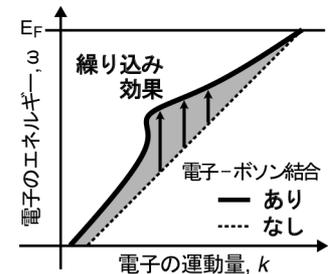


図 1、角度分解光電子スペクトルの準粒子分散に現れる繰り込み効果 (斜線部)。

## 研究内容

### ■ 低エネルギー放射光を活用した角度分解光電子分光実験の実施

角度分解光電子分光は、物質中を運動する電子のエネルギー  $\omega$  と運動量  $k$  を観測することができる実験手法である。私は、実験の励起光に低エネルギー領域 ( $h\nu = 7 \sim 8.5\text{ eV}$ ) の放射光を用いることで、従来の研究に比べて約 2 倍も高い実験分解能を得ることに成功した。試料は、繰り込み構造におけるマグノンの影響を排除する目的として、極過剰ドープ領域の  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) を用いた。その結果を図 2 (a) - (b) に示す。従来から観測されていた  $|\omega| \sim 78\text{ meV}$  や  $10\text{ meV}$  の繰り込み構造に加え、本研究にて初めて  $40\text{ meV}$  にも構造を観測

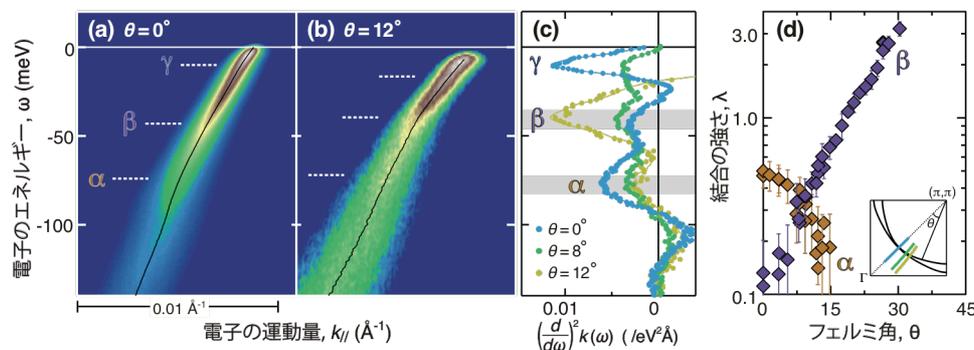


図2、(a) ノード方向 ( $\theta=0^{\circ}$ ) と (b) 中間領域 ( $\theta=12^{\circ}$ ) における極過剰ドープ Bi2212 の角度分解光電子スペクトル。(c) 運動量分布曲線のピーク位置から決定した準粒子分散 (図 a,b 中の黒線) の二階微分スペクトル。(d) 結合の強さ  $\lambda$  の運動量依存性。結合の強さは、繰り込み構造の前後のエネルギー位置における群速度の比から決定した。

した。この構造はノード ( $\theta = 0^\circ$ ) を離れるにつれて強く大きくなる。今後これらの構造を、高結合エネルギー側から順に  $\alpha, \beta, \gamma$  と表示する。

### ■ 結合強度スペクトル解析を用いた電子-ボソン結合の定量化

準粒子分散  $k(\omega)$  の二階微分スペクトル  $(d/d\omega)^2 k(\omega)$  を図 2 (c) に示す。 $\alpha$  および  $\beta$  構造のピーク位置 (ボソンの周波数) は運動量空間でほぼ変化しない一方、ピーク強度が大きく変化する。そこで、電子群速度の比から結合の強さ  $\lambda$  を評価した (図 2 (d))。その結果、両者の結合の強さの関係が、ノードとアンチ・ノード ( $\theta = 45^\circ$ ) で入れ替わることが判明した。

$\alpha$  と  $\beta$  構造は、キャリアのドーパ量に対しても特徴的な振る舞いを示す。図 3 に、ドーパ量が極過剰 (OD63)、過剰 (OD80)、最適 (OP91) の試料における結合強度スペクトルを示す。両構造の位置はドーパ量の減少とともに高結合エネルギー側へ移動し、それと同時にピーク強度の強弱が交代することが判明した。

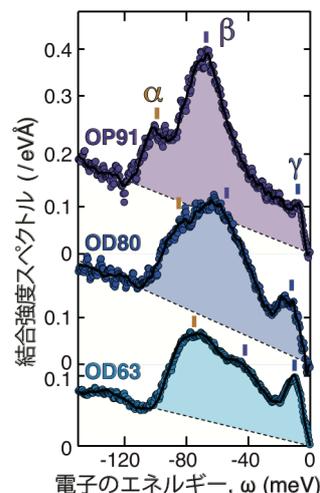


図 3、準粒子分散の逆速度を Kramers-Kronig 変換して導出した結合強度スペクトル。

### ■ $\alpha$ 構造と $\beta$ 構造の起源について考察

$\alpha$  構造と  $\beta$  構造を分離して観測したため、両者は異なる結合モードに由来すると断定できる。また、ドーパ量依存性の結果は、ノード方向の  $\sim 70$  meV の大きな構造が、OD63 と OP91 では別の結合モードに由来すると明示している。さらに、非弾性中性子散乱実験では、極過剰ドーパの試料の  $40 < |\omega| < 70$  meV にマグノンが観測されないため、 $\alpha$  構造に関してはマグノンの可能性を完全に排除できる。私は、これらの状況を理論計算 (T. P. Devereaux *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 117004 (2004)) と比較し、各構造を以下のように帰属した。

- 78 meV の  $\alpha$  構造は、Half-breathing フォノン・モード (図 4 上) との強い結合により形成された構造であると断定できる。
- 40 meV の  $\beta$  構造は、 $B_{1g}$  フォノン・モード (図 4 下) との結合が示唆される。しかし、現段階ではマグノンの可能性を排除できない。
- 10 meV の  $\gamma$  構造に関する結果は、過去の知見の延長線上にあるため、現段階で  $\gamma$  構造の起源を特定することはできない。

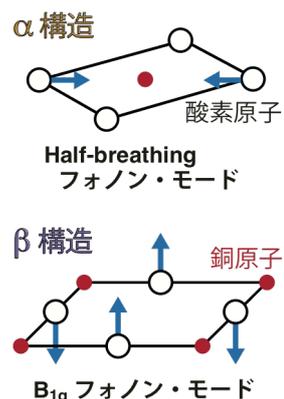


図 4、高温超伝導の舞台となる二次元  $\text{CuO}_2$  面の模式図。酸素原子が引き起こす代表的な格子振動を表している。

## 結論

極過剰ドーパ領域の Bi2212 にて、 $|\omega| \sim 40$  meV と  $\sim 78$  meV に繰り込み構造を観測した。前者は、最適ドーパ試料にて観測されていた  $\sim 65$  meV の大きな構造が、低結合エネルギー側へ移動して弱くなったものと同定される。一方、後者は、他のボソン・モードとの結合を明示しており、各種依存性の結果から Half-breathing フォノン・モードに帰属される。

極過剰ドーパ領域にて入れ替わりに台頭する 78 meV の構造は、銅酸化物高温超伝導体で強い電子-格子結合が生じていることを示す有力な証拠となる。