

LSCO 最適組成 Ni 置換試料における E_{cross} ピークの検証

Investigation of origin of peak at E_{cross} in Ni-doped optimum LSCO

松浦 直人¹⁾脇本 秀一²⁾

Masato MATSUURA

Shuuichi WAKIMOTO

¹⁾東北大学金属材料研究所²⁾日本原子力研究開発機構

非常に強度の強い偏極中性子を利用できる三軸型中性子分光器 TAS-1 を用いて、高温超伝導銅酸化物 $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ の Cu を Ni で置換した試料で見られる励起の起源を調べた。その結果、Ni 置換により反強磁性ゾーンセンター (π, π) に現れる磁気励起のエネルギーが T_c に比例して低下する事が明らかになった。この振る舞いは BCS 超伝導体において同位体置換によりフォノン周波数が低下する振る舞い (同位体置換) と類似しており、高温超伝導の磁性同位体効果と云える。さらにこの結果は、高温超伝導におけるクーパー対生成に格子整合な反強磁性揺らぎが重要な役割を果たしている事を強く示唆している。

キーワード : 高温超伝導、砂時計型磁気励起、磁性同位体効果

1. 目的

ホールドープ系高温超伝導銅酸化物では砂時計型の分散を持つ磁気励起が共通して観測されているが^{1,2)}、その起源や高温超伝導のメカニズムとの関わりは未だ明らかではない。そのような関わりを探る上で、不純物置換、特に Cu サイトの Zn, Ni 置換は、キャリア数、格子系にほとんど影響を与えずに磁性 (スピン) を変え、 T_c を制御できる為、有効な実験手法である。最近、我々は LSCO 系最適ドープ組成の磁気励起に対する Ni 置換効果を調べ、砂時計型の磁気励起の分散がくびれる部分にあたるエネルギー E_{cross} ($\sim 40\text{meV}$) が T_c に比例して低エネルギー側にシフトする事を明らかにしてきた³⁾。

Cu を Ni で 3% 置換する事により低エネルギーにシフトしたと考えられる E_{cross} ($\sim 15\text{meV}$) 付近のピークの起源が磁気的である事は、温度依存性、 Q 依存性などから検証したが、最も直接的で、最終的な検証は偏極非弾性中性子散乱実験を行うことである。 E_{cross} は、YBCO 系ではレゾナンスピークのエネルギーに相当し、 T_c で良くスケールされる重要なパラメタである。YBCO においても Ni 置換により T_c に比例して低エネルギーにシフトするピークがある事が報告されている⁴⁾。問題はそれが磁気的なピークかどうかである。LSCO 系での E_{cross} の低下を証明することは、LSCO 系の E_{cross} と YBCO 系の $E_{\text{resonance}}$ が基本的に同じ起源を持つことを証明するという点でも重要である。 E_{cross} 付近の励起ピークの起源について確かめる為に Ni を置換した LSCO 単結晶試料について偏極中性子非弾性散乱実験を行った。

2. 方法

試料は LSCO 最適ドープ組成 (Sr:15%) における Cu を Ni で 4% 置換した試料を用いた。Ni 4% 置換により T_c は 0 K 付近まで抑制される事から、もし E_{cross} が T_c に比例するのであれば比較的測定が容易な 0 meV 付近において反強磁性ゾーンセンター (π, π) に弾性散乱として観測することが出来る。本実験では、 $E=0$ から 20meV までの磁気励起の測定を試みた。今回の測定では、非常に中性子ビーム強度が小さく実験の難しい偏極非弾性散乱実験を行うため、2cc ($8\phi \times 40\text{mm}$) の良質単結晶を 4 本育成し、結晶の軸を揃えることにより 8cc の単結晶試料に相当する試料を用意した。また、偏極非弾性散乱実験は純粋に磁気的な成分を取り出す為、中性子のスピンを波数ベクトル Q と平行に向け、 $T=4\text{K}$ において測定を行った。

3. 研究成果

弾性散乱条件 ($E=0\text{meV}$) において、 $(1/2 \pm 0.1, 1/2, 0)$, $(1/2, 1/2 \pm 0.1, 0)$ に位置する格子非整合なピークと、反強磁性ゾーンセンター $(1/2, 1/2, 0)$ に位置する格子整合な磁気ピークが存在す

ることを偏極モードにより明らかにした。さらに非弾性散乱においても、励起エネルギー2 meV、18 meVにほぼ同じQに磁気励起ピークがある事を見出した。これら位置の変わらない磁気的なピークは、エネルギー0から18 meVまでエネルギー分散のない磁気励起ピークが連続的に存在している事を示している。格子非整合なQに現れるエネルギー分散のない低エネルギー磁気励起は高温超伝導体 LSCO 系の超伝導組成における特徴であるが、今回新たに明らかになったのは、格子非整合なピークに加えて格子整合なピークもエネルギー0から18 meVまで連続的に存在している事である。Niを置換していないLSCO試料($T_c \sim 38\text{K}$)では、このような格子整合なピークは40meV付近より高エネルギーで観測されている。我々は3%のNi置換により、このピークが T_c の低下($T_c = 12\text{K}$)に比例して30meVまで低下することを非偏極中性子散乱実験により既に明らかにしていた³⁾。今回の4% Ni置換試料に対する偏極中性子非弾性散乱実験から、さらなる T_c の低下($T_c \sim 0\text{K}$)によって格子整合なピークがエネルギー0まで低下した事が明らかになった。この事は、Ni置換が格子整合なピークの現れる最低エネルギーと超伝導転移温度 T_c を線形な関係を保ちながら低下させている事を示唆している。

4. 結論・考察

このNi置換による磁気励起エネルギー及び T_c に対する振る舞いはBCS超伝導体における同位体効果と非常に類似している。BCS超伝導体の同位体置換では、中性子数の違いから質量の異なる同位体を置換する事により T_c が質量 M のべき乗に反比例して減少する($T_c \sim 1/M^\alpha$: $\alpha \sim 0.5$)。質量 M が大きくなる事によりフォノン周波数は低下($f \sim 1/M^{0.5}$)する事から、クーパ対の生成にフォノンが重要な役割を果たしている事を示しており、同位体効果の発見はBCS理論の構築に重要な役割を果たした。Ni²⁺のスピン量子数(=1)はCu²⁺の1/2より大きく、格子系の同位体効果と同様にスピン系の磁気励起を遅くする可能性がある。そのようなマグノンの周波数の低下が、LSCO系のみならず⁴⁾、他の代表的な高温超伝導銅酸化物YBCO系においても T_c と線形な関係が確立している⁵⁾格子整合なピーク window に対して起こっていることは非常に興味深い。これらの事は、高温超伝導におけるクーパ対生成に格子非整合な反強磁性揺らぎが重要な役割を果たしている事を強く示唆している。

5. 引用(参照)文献等

- 1) J. M. Tranquada et al., Nature **429** (2004) 6991.
- 2) S. M. Hayden et al., Nature **429** (2004) 6991.
- 3) M. Matsuura et al., J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 114703.
- 4) M. Matsuda et al., Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 197001.
- 5) P. Dai et al., Phys. Rev. B **63** (2001) 54525.