

5-4 量子ビームの合わせ技で電子の動きを捉える — 3種の非弾性散乱による銅酸化物超伝導体のスピン・電荷励起 —

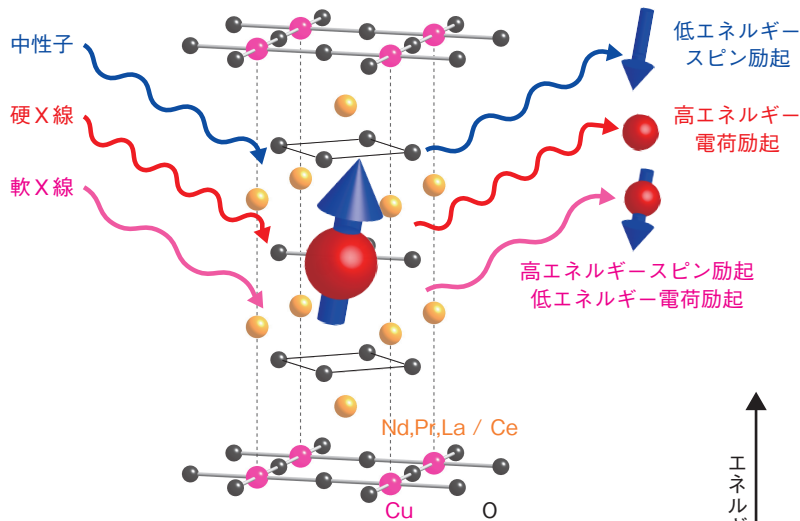


図 5-13 3種の量子ビームによる電子励起の役割分担
電子の電荷 (●) とスピン (→) の励起に対して3種の量子ビーム非弾性散乱に役割分担させました。背景にあるのは、測定試料である電子ドーパ型銅酸化物超伝導体 $(\text{Nd, Pr, La})_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の結晶構造です。

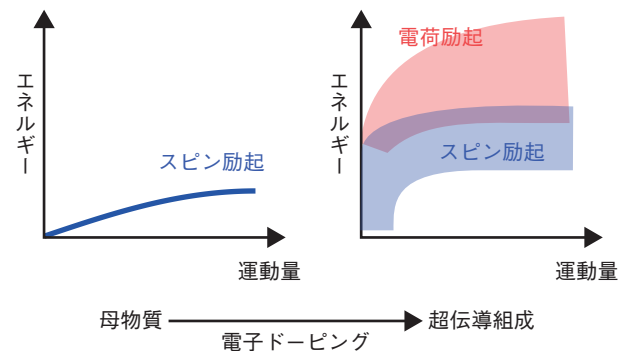


図 5-14 実験結果の概略図

母物質では鋭いスピン励起のみが観測されるのに対し、電子をドーパした超伝導組成では、幅が広がり高エネルギーにシフトしたスピン励起に加え、電荷励起が観測されました。

銅酸化物超伝導体は、現在知られている中では最も高い温度で超伝導体となる物質であり、発見から25年以上を経た今もなおその発現機構解明を目指した研究が続けられています。銅酸化物超伝導体の母物質は隣り合うスピンの向きに整列した反強磁性の絶縁体であり、そのような母物質に電荷（電子またはホール）をドーパすることで超伝導が発現します。したがって、電荷をドーパするにつれて反強磁性を担っていた電子のスピンやドーパされた電荷の動きがどのように変遷して行き、さらにその結果として超伝導となるか、また、それらの電子ドーパとホールドーパでの類似点、相違点を知ることが銅酸化物の超伝導を理解する鍵となります。

本研究では、図 5-13 に示すように3種の量子ビーム (J-PARC の中性子, ESRF の軟 X 線, SPring-8 の硬 X 線) を利用した非弾性散乱実験を相補的に行うことで幅広いエネルギー・運動量空間にわたるスピン・電荷励起を観測し、電子ドーパした銅酸化物超伝導体 $(\text{Nd, Pr, La})_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ における電子の動きの全体像を解明することができました。実験結果の概略を図 5-14 に示します。絶縁体の母物質ではスピン励起のみが観測

されサイン波型の分散を示します。電子をドーパするとスピン励起は高エネルギーにシフトし、幅が広がります。このようなスピン励起の変化は、励起エネルギーがほとんど変わらないホールドーパ型とは全く異なる結果です。また、スピン励起の高エネルギー側には理論的に予想されていた電荷励起が存在しており、その一部がスピン励起と同じエネルギーで重なり合っていることも分かりました。このようなスピン励起の高エネルギーへのシフトや電荷励起との重畳といった特徴は、ホールドーパ型に比べて電子ドーパ型銅酸化物中の電子がより動きやすい（遍歴的）状態であることを反映したものと考えられます。

今後、このような電子とホールの動きを統一的に記述するような理論モデルを構築することが銅酸化物における超伝導の議論の出発点となり、その結果として、超伝導の発現機構解明に近づくものと期待されます。また、本研究では、電子の動きを調べるための非弾性散乱において、放射光 X 線と中性子を相補利用した研究が有用であることを初めて示すことができました。

●参考文献

Ishii, K. et al., High-Energy Spin and Charge Excitations in Electron-Doped Copper Oxide Superconductors, Nature Communications, vol.5, 2014, p.3714-1-3714-8.