

■第10回日本放射光学会奨励賞受賞報告

共鳴非弾性 X 線散乱法による銅酸化物高温超伝導体の電子状態の研究

石井賢司 (日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門放射光科学研究ユニット)

銅酸化物高温超伝導体が発見されてから今年で20年になるが、いまだに数多くの研究が続けられている。もちろん、超伝導の発現機構を解明することは大きな問題であり、放射光のみならず J-PARC などを含めた量子ビームを利用した重要な研究課題の一つである。一方で、銅酸化物超伝導体は強相関電子系というより広範な研究対象の中における一物質群でもある。銅酸化物超伝導体の母物質は、電子間の強いクーロン反発(電子相関)が原因で絶縁体となったモット絶縁体という状態にある。そこに電荷(ホールもしくは電子)をドーブすることで超伝導が発現する。電子相関という多体効果が顕著になった強相関電子系では、通常の金属や半導体中での電子状態を良く記述できていた一体近似に基づくバンド理論が破綻する。多体効果を取り入れた電子状態の記述は難しい問題となっているが、その理解は超伝導などの物性の発現機構を解明するための出発点となるものである。従って、その特徴をいろいろな実験手法で測定し、理論を検証することは非常に重要である。

第三世代放射光光源の発展により、硬 X 線領域での共鳴非弾性 X 線散乱 (Resonant In-elastic X-ray Scattering, RIXS) を用いた研究がさかんに行われるようになってきている¹⁾。我々が研究対象としている 3d 遷移金属化合物では遷移金属の K 吸収端を利用することになり、フェルミ面近くの価電子が、中間状態でできた 1s 内殻正孔もしくは 4p 電子との相互作用によって電荷のチャンネルを通して励起されることになる。強相関電子系の特徴であるモット絶縁体の電荷ギャップ(モットギャップ)が観測できるまでエネルギー分解能が向上したことで、モット絶縁体やそれに電荷をドーブした系の電子状態の議論が可能となってきた²⁾。この手法の最大の特徴は励起の運動量依存性が観測可能という点にあり、モットギャップやドーブされた電荷のバンド内での励起の分散関係がわかる。また、偏光依存性から励起に関わる電子軌道の対称性に関する議論も可能である。

我々の研究の目的は、共鳴非弾性 X 線散乱によって強相関電子系の電子状態を明らかにすることである。特に、電荷ドーブによるモットギャップの変化や、ドーブされた電荷のモットギャップよりも低エネルギーでのダイナミクスに注目している。研究を行ってきた個々の物質の結果については、本誌の前々号でトピックスとして紹介する機会をいただいたので³⁾、ここでは割愛する。もしくは、原著

論文^{4,5)}を参照していただきたい。

我々の装置のエネルギー分解能は現在約 400 meV であるが、今後、エネルギー分解能をさらに向上させることにより新たな展開が期待できる。銅酸化物について言えば、最近、 T_c との相関が発見された光学フォノン⁶⁾や反強磁性交換相互作用の大きさはおよそ 100 meV である。その領域までエネルギー分解能を上げると、格子振動や磁気揺らぎのと結合した電荷のダイナミクスが観測できる可能性がある。格子振動、磁気揺らぎとも超伝導の発現機構として議論されており、それらを J-PARC での中性子非弾性散乱により観測しようという計画が進んでいる。X 線非弾性散乱は中性子とは相補的に、電荷の切り口から電子状態に関する情報を与えることができる手法として今後の発展が期待される。

謝辞

本研究は、遠藤康夫教授(1998年発足当時東北大学教授)が主催した戦略研究プロジェクト(CREST)に端を発しており、そこで建設された X 線非弾性散乱スペクトロメーター⁷⁾が測定に用いられています。その後、同じく遠藤教授に指針をいただき、2004年から銅酸化物高温超伝導体の研究を開始しました。そして、多くの共同研究者に恵まれ、本賞を受賞するに至りました。共同研究者である、稲見俊哉博士、大和田謙二博士、葛下かおり博士、Moritz Hoesch 博士、坪田雅己博士、水木純一郎博士(原子力機構放射光)、遠藤康夫教授(国際高等研、原研研究嘱託)、村上洋一教授(東北大、原研客員研究員)、筒井健二博士、遠山貴己助教授、前川禎通教授、山田和芳教授(東北大)、増井孝彦博士、田島節子教授(超電導工研、大阪大)に感謝したいと思います。また、それ以前に行っていたマンガン酸化物の研究⁸⁾で培われた理解や測定技術も、本研究を進める上でたいへん役立ちました。当時の共同研究者にも感謝致します。

参考文献

- 1) 小谷章雄: 放射光 **18**, 223 (2005).
- 2) M. Z. Hasan, E. D. Isaacs, Z.-X. Shen, L. L. Miller, K. Tsutsui, T. Tohyama and S. Maekawa: Science **288**, 1811 (2000).
- 3) 石井賢司: 放射光 **18**, 347 (2005).
- 4) K. Ishii, K. Tsutsui, Y. Endoh, T. Tohyama, K. Kuzushita, T. Inami, K. Ohwada, S. Maekawa, T. Masui, S. Tajima, Y. Murakami and J. Mizuki: Phys. Rev. Lett. **94**, 187002 (2005).

- 5) K. Ishii, K. Tsutsui, Y. Endoh, T. Tohyama, S. Maekawa, M. Hoesch, K. Kuzushita, M. Tsubota, T. Inami, J. Mizuki, Y. Murakami and K. Yamada: Phys. Rev. Lett. **94**, 207003 (2005).
- 6) T. Fukuda, J. Mizuki, K. Ikeuchi, K. Yamada, A. Q. R. Baron and S. Tsutsui: Phys. Rev. B **71**, 060501(R) (2005).
- 7) T. Inami, T. Fukuda, J. Mizuki, H. Nakao, T. Matsumura, K. Hirota, Y. Murakami and Y. Endoh: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **467-468**, 1081 (2001).
- 8) K. Ishii, T. Inami, K. Ohwada, K. Kuzushita, J. Mizuki, Y. Murakami, S. Ishihara, Y. Endoh, S. Maekawa, K. Hirota and Y. Moritomi: Phys. Rev. B **70**, 224437 (2004).

● 著者紹介 ●

**石井賢司**

日本原子力研究開発機構量子ビーム応用
研究部門放射光科学研究ユニット

E-mail: kenji@spring8.or.jp

専門：固体物理学，共鳴弾性・非弾性 X
線散乱による強相関電子系物質の研究

【略歴】

1999年東京大学大学院理学系研究科物
理学専攻博士課程修了，1999年日本学
術振興会未来開拓学術研究推進事業研究
プロジェクト博士研究員，2001年日本
原子力研究所放射光科学研究センター
(現日本原子力研究開発機構放射光科学
研究ユニット) 研究員，現在に至る。