



第10回 M2S 国際会議報告

東京大学大学院工学系研究科 為ヶ井 強
東北大学大学院工学研究科 足立 匡
日本原子力研究開発機構 永井佑紀

2. 実験(主に銅酸化物および鉄系超伝導体)(足立 匡)

銅酸化物の実験的レビューは L. Taillefer によって行われた(実際は, Taillefer グループの実験結果のレビューという感じであったが). 内容は, 主にフェルミ面の再構成に関連したもので, YBCO のアンダードープ領域(いわゆる 60 K 相)において, 2007年に報告されたホール抵抗のド・ハース振動だけでなく, ネルンスト係数, 比熱(S. Riggs), 超音波音速(C. Proust)でも強磁場下でド・ハース振動が観測された. 問題は, ド・ハース振動をもたらすフェルミ面であるが, Taillefer グループの主張は, いわゆる電荷ストライプ秩序が形成されることによって, フェルミ面が再構成されて生じるフェルミポケットである. 実際, YBCO の 60 K 相付近では, 非整合な電荷秩序が共鳴軟 X 線散乱と高エネルギー X 線散乱(E. Blackburn)で観測されている. これらの結果で興味深いのは, およそ 150 K 以下で, 電荷秩序の形成に伴って X 線散乱強度が増大するが, $T_c \sim 60$ K 以下では散乱強度が減少に転ずることである. さらに, 磁場を印加すると T_c 以下でも散乱強度が増大し続ける. これらは, 超伝導と電荷秩序が競合関係にあり, また, ド・ハース振動が観測される強磁場下では電荷秩序が安定していることを意味する. 一方, 前回の M2S 国際会議から継続する問題は, フェルミポケットが ARPES で観測

されるかどうかである. P. Johnson らはポケットが観測されたと主張していたが, APRES 業界でコンセンサスが得られているとは言い難いようである.

レビューでもう一つ興味深かったのは, 量子臨界点の問題である. Taillefer らは, ネルンスト係数と熱伝導率から上部臨界磁場 H_{c2} を見積もり, そのホール濃度依存性を調べた結果, アンダードープ領域では H_{c2} が著しく抑制されることを見いだした. T_c よりも高温で見られるいわゆる擬ギャップ相でクーパー対がインコヒーレントになっているならば, アンダードープ領域では H_{c2} は大きいはずである. したがって, 擬ギャップは超伝導の前駆現象ではなく, 超伝導と競合する秩序状態であり, 相図上で擬ギャップが消失する量子臨界点の周りで超伝導が発現すると主張していた. なお, 電子型超伝導体のアンダードープ領域でも H_{c2} が抑制されることから, 電子型でも量子臨界点が存在するとの報告もあった(F. F. Tafti). しかし, H_{c2} の見積もり方には議論があるので, さらなる研究が必要であろう.

量子臨界点に関して, Z.-X. Shen らは, Bi-2212 での ARPES から, 2つの量子臨界点(ホール濃度 $p \sim 0.09$ と 0.19)が超伝導が発現するホール濃度領域に存在すると主張した. $p < 0.09$ では, 何らかの秩序相の発達によってノード付近の超伝導ギャップの大きさが低下している. $p = 0.09 - 0.19$ ではノードのギャップの大きさが一定で, 擬ギャップ

相と超伝導相が混在した状態,そして, $p > 0.19$ では, 電子対のペアリングの強さが低下するためにノードのギャップが抑制された状態というものである. 個人的には, $p = 0.09 - 0.19$ でペアリングの強さが変わらないにもかかわらず, T_c がドーム状に変化する原因が気になった.

擬ギャップに関する研究では, 偏極中性子散乱などから報告されている時間反転対称性の破れの問題がある. 前回の M2S 会議での YBCO と Hg-1201 に続いて, 今回は, Y. Sidis らによって Bi-2212 でも擬ギャップ相で同様の磁気秩序が観測されたとの報告があった. これらが, C. Varma らが主張する軌道電流によるものかどうかは決着していないが, 少なくとも実験的には, 擬ギャップ相で何らかの磁気秩序が発達していることは間違いなさそうである(なお, LSCO でも 2 次元短距離秩序が観測されている). 一方, なぜか μ SR ではこの磁気秩序が観測されないが, J. E. Sonier によると, ミュオンと頂点酸素の結合状態が生成して, ミュオンの周りの局所環境が変化するためかもしれないとのことである.

N. E. Hussey らは, オーバードープ領域における電気抵抗率の解析から, 温度の 1 乗と 2 乗にそれぞれ比例する項の係数が, 以前報告した LSCO だけでなく, Tl-2201 と Bi-2201 でもホール濃度に対してユニバーサルに変化することを報告した. 注目すべきは, 温度の 1 乗に比例する項が, $p \sim 0.19$ だけでなくオーバードープ領域全体にわたって存在することで, いわゆる単純な量子臨界的描像とは異なると主張している. また, 量子臨界点よりも低ドープ側では, アンチノードのキャリアのインコヒーレンスが発達し, これが擬ギャップと関連するとのことである.

H. Mukuda らは, 多層系超伝導体の NMR の結果を報告した. 多層系では, ブロック層に近い 5 配位の Cu を含む Outer plane と平面 4 配位の Cu を含む Inner plane でホール濃度が異なると言われている. 興味深かったのは, 同じ 3 枚層の Bi-2223 と Hg-1223 を比較すると, Outer plane と Inner plane のホール濃度の差が小さい Hg-1223

の方が T_c が高いことである. Mukuda らは, ホール濃度の差をもっと小さくすれば, T_c はさらに向上するだろうと主張していた. 今回, T_c 向上の指針のようなポジティブな発表はほとんど聞かれなかったので, Mukuda らの発表は印象に残った. 一方, 多層系の研究は NMR がほとんどであるため, このテーマのさらなる発展と理解には, 他の実験プローブを用いた相補的な研究が不可欠であると感じた.

以上が, 筆者がカバーできた範囲での銅酸化物の主な内容である. 感想としては, 擬ギャップ相を超伝導と競合する秩序相とする見方が主流になりつつあるが, その秩序相が電荷ストライプ秩序なのか, その他の秩序相なのかは決着していないように思われる. また, 擬ギャップとフェルミ面の再構成, 磁気秩序などがどのように関係しているのかを明らかにする必要があると思われる. 今回の会議では, それぞれのグループが持論を展開するのみという傾向があったように思う. 今後は, 互いの実験結果の対比が大事であり, 収束に向けた努力が必要であると感じた.

最後に, 今回の M2S 会議で最も印象に残ったのが, 銅酸化物に関する講演件数の多さである. 最近の日本物理学会では, 鉄系超伝導体に関する発表に押されて, 銅酸化物の発表件数は決して多くない. 一方, 世界に目を向けると, まだまだ銅酸化物のメカニズムの解明を目指した研究が活発に行われている. 作製する試料の品質レベル, 測定技術レベルが世界最高水準にある日本も, 銅酸化物の研究を精力的に行い, メカニズムの解明に向けて世界をリードしていくべきであると強く感じた次第である.

鉄系超伝導体の実験的レビューは H.-H. Wen によって行われたが, さまざまな実験を網羅したすばらしいもので, 実験的現状を理解することができた参加者も多かったと思われる. この中で印象に残ったのは, 電子対のペアリングのメカニズムに関するものである. スピン揺らぎによるペアリング, すなわち s_{\pm} の対称性を支持する実験結

果が多いとのことであった。一方、不純物置換効果からは、H. Kontani らが主張する軌道揺らぎによるペアリング、すなわち s_{++} の対称性を主張する報告もあり、決着がついていないとのことである。また、 k 空間での超伝導ギャップは等方である、ギャップにノードがある、あるいは異方的なギャップがあるという報告が物質、あるいはドーピング量によってさまざまであることも、ペアリングのメカニズムの問題を複雑にしている気がする。今後は、どのようなケースでスピン揺らぎ、あるいは軌道揺らぎが顔を出すのかを明らかにするこ

とが重要に思われる。

最後に、このレビューで気づいたことは、Fe (Se,Te)系(11系)に関するものがそれほど多くなかったことである。FeAs 系の研究と比べて研究はそれほど進んでいないが、その原因は(過剰鉄などが無い)良質な試料を作製することが難しい点が挙げられるだろう。今後は、不純物置換効果(T. Inabe)などの研究を精力的に進めていき、FeAs 系、アルカリドーブ FeSe 系との相違点を明らかにしていくことが重要であろう。



写真1 主催者からの挨拶および参加者の総数・分布。



写真2 プレナリー講演会場の様子。