

論文審査の結果の要旨

氏名 吉田鉄平

修士吉田鉄平提出の本論文は高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ を角度分解光電子分より実験的に研究したもので、英文で8章からなる。

高温超伝導体の発見以来、高温超伝導発現機構の解明を旨として膨大な数の研究が行われてきた。機構の十分な解明は行われていないが、近年になって、光電子分光、特に角度分解型の実験技術の進歩によって、高温超伝導状態を引き起こす舞台となる電子状態に対する光電子分光からの知見が研究の進展に重要な役割を果たしている。実際、銅酸化物高温超伝導体では、電子が一様等方的にふるまうという単純な仮定が破れて運動量によって電子のふるまい方が全く異なっていたり、実空間で構造形成が行なわれたりする現象が近年になって頻りに観測されており、この非一様性や不均一性の起源とメカニズムを解明することが高温超伝導機構を解明する上でも不可欠の課題であると認識されるようになってきている。一電子スペクトルについての詳細な運動量依存性を明らかにできる唯一の実験手段として、角度分解光電子分光の今までの寄与と今後への期待は大きい。

この論文では $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における電子状態の変化をドーピング濃度 x の関数として詳細に追究したものである。この物質の角度分解光電子分光は今までも多くの研究があり、ドーピング濃度の増大に伴うホール型のフェルミ面から電子型のフェルミ面への変化などが捉えられてきた。銅酸化物高温超伝導体では、Bi 化合物なども含めて一般に、結晶構造上の特質から生じる2次元的な異方性に加えて、2次元面内においてもブリルアンゾーンの $(\pi/2, \pi/2)$ 方向に見られるべきフェルミ面と $(\pi, 0)$ 方向に見られるべきフェルミ面が顕著に異なるふるまいをすることが知られている。しかしながら、この LA 系物質では他の物質と異なってアンダードープ域で $(\pi/2, \pi/2)$ 方向にあるべきフェルミ面が同定できないという実験事実が蓄積し、他の銅酸化物に比べて特異であるという議論があった。一方 La 系化合物は絶縁体から過剰ドープ域までを同じ化合物のドーピングによって調べられるため系統的研究に適していることと、2層系 Bi と違って、2層のカップリングに伴う複雑さがないことなどの長所があり、徹底した系統的研究が望まれていた。この博士論文は、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ に対して、入射光電子のエネルギーと角度についての経験と努力を積み重ねたこと、また遷移行列要素効果を有効に取り入れる工夫を行なったことなどによって、従来見いだされなかった、あるいははっきりとは見えなかった $(\pi/2, \pi/2)$ 方向の分散を発見した。 $(\pi, 0)$ 方向に見られる擬ギャップや減衰の大きな構造とあわせて、幅広いドーピング濃度の範囲で初めて電子構造の変化を

系統的に調べたものと位置付けられる。

第一章の導入部に続いて、第二章では $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の示す基本的な性質がレビューされている。また第三章は光電子分光の実験手法の説明が行なわれている。オリジナルな研究内容は第四章から第七章まで展開され、第八章がまとめと今後の課題に充てられている。

第四章ではオーバードープ域が $x=0.22$ の場合について考察されている。上述の工夫によって $(\pi/2, \pi/2)$ 方向に鋭い一粒子スペクトルピークを初めて見い出すとともに、 $(\pi, 0)$ 方向のフラット分散の名残りについて従来以上の詳細な考察を行なった。

第五章ではアンダードープ域、 $x=0.03$ での実験結果が解析されている。このような少ないドーピング濃度にもかかわらず、論文提出者は、 $(\pi/2, \pi/2)$ 方向に鋭い一粒子ピークを観測することに成功した。 $(\pi/2, \pi/2)$ 方向の鋭いピークの一方で 0.3eV にもおよぶ大きな擬ギャップも $(\pi, 0)$ 方向に同時にはっきりと見られる点は注目に値する。この共存結果から、論文提出者は輸送現象を $(\pi/2, \pi/2)$ 方向の準粒子だけで説明する簡単な現象論にも言及している。絶縁体 ($x=0$) からオーバードープ域までの電子状態の変化を系統的に追える点が La 系の特質であり、論文提出者は実際にこの利点を生かして、電子状態が絶縁体状態から、ごくわずかなドーピングの領域を経て、オーバードープ域に至る間に、 $(\pi/2, \pi/2)$ 方向と、 $(\pi, 0)$ 方向の電子が著しく異なった振る舞いを示しながら変化していく様子を詳細に明らかにすることに成功している。

第六章では光電子スペクトルが中間ドーピング領域で示している「二成分的なふるまい」が解析されている。この「二成分的」ふるまいは Bi 化合物で見られる一成分的なものとは対照的であることが指摘されている。

第七章では超伝導ギャップの異方性が単純な $d_{x^2-y^2}$ の対称性に比べてノード付近の異方性が大きくなっていること、二層 Bi 系の実験結果と対照的に超伝導状態になっても $(\pi, 0)$ 方向にコヒーレントピークが成長しないこと、フラット分散の束縛エネルギーがいわゆる「大きな擬ギャップ」の大きさと一致していることが議論されている。

論文提出者は銅酸化物高温超伝導体、特に $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ に対して従来の角度分解光電子分光の実験に比べて、 29eV 以下ではなく 55eV という高い入射エネルギーの光を用いたこと、入射角をうまく選んだこと、遷移行列要素の違いを利用して第二ブリルアンゾーンのデータを用いたことなど、実験条件に独自の工夫を積み重ねて、質の高い実験データを得ることに成功した。この質の高さによって、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ では従来ははっきり見えていなかった $(\pi/2, \pi/2)$ 方向の一粒子スペクトルのピークをはじめははっきり捕える事に成功し、そのドーピング依存性を詳細に明らかにした。特に 3% というわずかなドーピング量のときにも $(\pi/2, \pi/2)$ 方向に明確な電子スペクトルの分散がフェルミ面を横切っていることを観測した点は注目に値する。このドーピング量の領域では、 $(\pi/2, \pi/2)$ 方向に見られるフェルミ面を横切る分散が、 $(\pi, 0)$ 方向に向かうと途中で消え、 $(\pi, 0)$ 方向に見られる 0.3eV もの大きさの「擬ギャップ」と共存していることが示

された。これは運動量によって電子の示す性質が異なることを明確に示した実験として意義があるとともに、このときの擬ギャップが大変大きいことから、その発生機構ひいては超伝導メカニズムとの関係に対して大きな問題提起をしていると評価できる。このように本論文は銅酸化物超伝導体の光電子分光の研究分野での研究の進展に大きく寄与している。

以上の成果について議論した結果、本論文審査委員会は全員一致で本研究が博士（理学）の学位論文として合格であると判定した。

なお本研究は、指導教官藤森淳教授をはじめ、溝川貴司助教授、Xingjiang Zhou 氏、中村元彦氏、Scot A.Keller 氏、P.V. Bogdanov 氏、Erdong Lu、Alessandra Lanzara 氏、Zahid Hussain 氏、井野明洋氏、永崎洋氏、Changyoung Kim 氏、Zhi-Xun Shen 氏、掛下照久氏、内田慎一氏との共同研究の部分があるが、上に述べた成果の主要部分について論文提出者が主たる寄与をなしたものであることが認められた。