

平成 21年 6月 4日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19740198

研究課題名（和文）

真空紫外レーザーを用いた高分解能角度分解光電子分光による高温超伝導体の研究

研究課題名（英文）

VUV laser angular resolved photoemission spectroscopy on high T_c superconductors

研究代表者

石坂 香子（ISHIZAKA KYOKO）

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：20376651

研究成果の概要：

真空紫外レーザー超高分解能光電子分光装置を用いて、高温超伝導銅酸化物の研究を行った。自然幅の小さいレーザーを用いることでこれまで報告された中で最も明瞭で鋭いスペクトルを得ることに成功し、超伝導ギャップのゼロ点（ノード）近傍の電子構造やキャリア特性を明らかにした。また、表面金属状態が強く内部の超伝導状態を覆い隠してしまうため従来光電子分光が困難だった $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 系において、バルク感 sensitivity を活かし、超伝導状態の直接観測に成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：高温超伝導

1. 研究開始当初の背景

光電子分光は光照射により個体内部の電子を取り出し、物質中の電子構造を直接観測する実験手法である。その実験技術の進歩は近年国内外で著しく、固体物性物理学の分野において不可欠なプローブとなっている。特に高温超伝導体の研究に関しては今なお新しい発表が次々のなされ、残された謎を説く最後の手段のひとつと考えられている。この中で当研究室における真空紫外レーザー（Nd:YVO₄ レーザー6倍波、6.994 eV）を励起光に用いた光電子分光システムは、超高分

解能（360 μeV 、世界最高）、高い冷却性能（2.9 K）、バルク感 sensitivity、高強度、といった特長を備えており、当時すでに低温超伝導体や重い電子系を初めとする様々な物質において数々の実績を出していた。しかしながら、レーザー光電子系を用いた角度分解光電子分光（ARPES）実験の実績は当時まだほとんど皆無であった。

2. 研究の目的

上記のレーザー光電子分光系を用いて、高温

超伝導体を対象とした ARPES を行うことを目的とした。特に、入射光の偏光制御を可能にすることで、これまで数多くの報告がある $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 系において高分解能を活かした高精度の ARPES を行い決定的なデータを得ること、さらにこれまで表面処理の困難さから敬遠されていた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 系でのバルク超伝導状態の直接観測、を具体的な目標として研究を行ってきた。

3. 研究の方法

まず、入射光学系に波長板を導入することにより、任意の直線および円偏光の選択を可能にする。これにより、遷移行列要素を積極的に利用し、バンド選択的な測定を行えるようにする。そのうえで、 $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) 系では最高分解能による角度分解光電子分光測定を行い、超伝導ギャップのゼロ点(ノード)付近の電子構造と準粒子特性の温度変化やホール濃度依存性を詳細に調べる。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 系では、偏光制御性およびバルク敏感性を活かし、表面状態に邪魔されないバルク 2 次元超伝導状態の直接観測を行う。超伝導ギャップの詳細な異方性やバンド分散の微細構造などを調べ、Bi 系や $(\text{La}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$ 系など他の ARPES 結果との比較を行い、高温超伝導体の物質間における系統性や普遍性を議論する。

4. 研究成果

(1) 偏光制御性

入射光学系に 1/2 波長板および 1/4 波長板を導入し、任意の直線・円偏光を選択できるようにした。市販の波長板により容易に偏光を制御できるのが低エネルギーレーザーを光電子分光に用いる利点のひとつである。直線偏光をそれぞれ Bi2212 試料に対して p, s 偏光配置にして角度分解光電子分光測定を行った結果を図 1 に示す。Bi2212 においては 2 枚の CuO_2 面の層間移動積分により結合・反結合バンドが分裂するが、p 偏光では反結合バンド、s 偏光では結合バンドがそれぞれ観測された。これにより、各バンド分散がその波動関数の対称性により明瞭な偏光

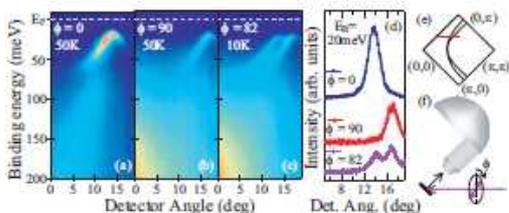


図 1 : Bi2212 における層間結合・反結合バンドの直線偏光依存性

配置依存性を示すことがわかり、これを利用したバンド選択的な観測が可能であることを確認した。

(2) Bi2212 におけるノード近傍の準粒子特性
Bi2212 系において最高分解能 (<1 meV, <0.002 Å) の ARPES 測定を行い、過剰ドープ試料においてこれまでで最も鋭い準粒子スペクトルを観測した(図 2)。そのスペク

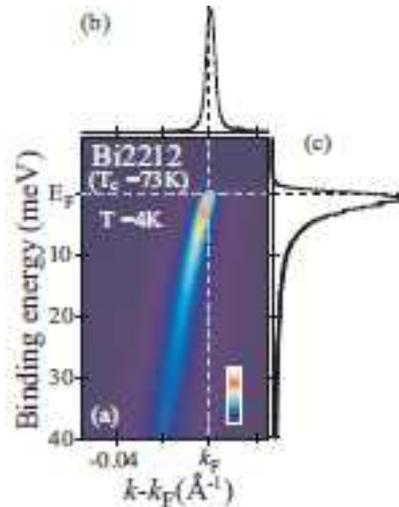


図 2 : Bi2212 で観測された最も鋭い準粒子スペクトル

トル幅は 4meV 程度であり、テラヘルツ伝導度から求められる散乱確率ともよく一致している。フェルミ準位における準粒子スペクトル形状はほぼ完全にひとつのローレンツ関数で再現される。これは準粒子がほぼ完全にコヒーレントな状態で記述されることを示している。また、このスペクトル幅が不足ドープ領域に向かい幅広くなる特徴的なドープ量依存性を見出した(図 3)。このホール濃度依存性は、近年走査型トンネル分光顕微鏡などで盛んに議論されている不足ドープ領域における空間的不均一の効果のコヒーレントな準粒子にも影響を与えていることを示唆している。

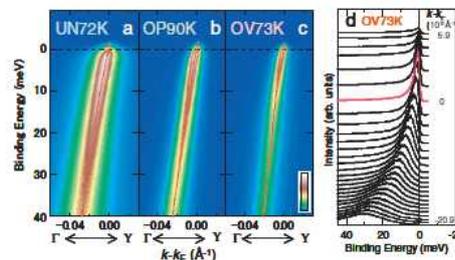


図 3 : Bi2212 における準粒子分散のドープ量依存性

(3) YBCO 系における超伝導電子状態
レーザー光電子分光装置を用いて YBCO の角度分解光電子分光を行った。その結果、従

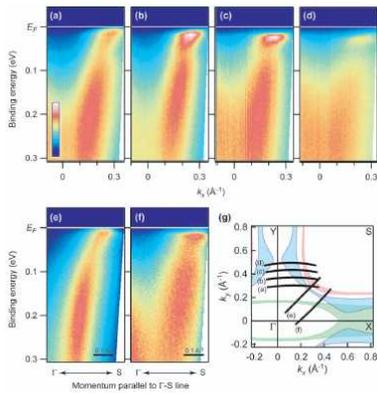


図4：YBCO で観測されたバルク超伝導状態のバンド分散

来光電子分光実験を阻んでいた強い表面状態はデータには現れず、バルク超伝導状態のみを観測することに成功した(図4)。フェルミ面は2次元 CuO₂ 面の層間結合・反結合バンドによる2枚が観測され、これらはバンド計算と比較的良好一致を示している。バンド分散には60meV付近に折れ曲がり(kink)が観測され、電子とボゾン(フォノンやマグノンなど)との相互作用が存在することを示唆している。このkink構造は、ノード近傍から離れるにつれ強い構造となって表れており、このような準粒子分散における相互作用の顕在化がBi2212や(La,Sr)₂CuO₄系などのホールドープ系全般に共通した振る舞いであることが改めて確認された。フェルミ面に沿って観測される超伝導ギャップのサイズは他の系と同様にd波であるが、ノード近傍でもギャップが閉じ切らず、有限に残る様子が観測された。これは、この系特有の3次元性や擬ギャップ相などが関連している可能性が考えられるが、今後の更なる理論的・実験的研究が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

M. Okawa, K. Ishizaka, H. Uchiyama, H. Tadatomo, T. Masui, S. Tajima, X.-Y. Wang, C.-T. Chen, S. Watanabe, A. Chainani, T. Saitoh, and S. Shin, Superconducting electronic state in optimally doped YBa₂Cu₃O_{7-δ} observed with laser-excited angle-resolved photoemission spectroscopy, *Physical Review B*, 79, 144528(1-7), 2009, 査読有

K. Ishizaka, T. Kiss, S. Izumi, M.

Okawa, T. Shimojima, A. Chainani, T. Togashi, S. Watanabe, C.-T. Chen, X. Y. Wang, T. Mochiku, T. Nakane, K. Hirata, and S. Shin, Doping dependence of nodal quasiparticles properties in high-T_c cuprates studied by laser-excited angular-resolved photoemission spectroscopy, *Physical Review B*, 77, 064522 (1-5), 2008, 査読有

T. Kiss, T. Shimojima, K. Ishizaka, A. Chainani, T. Togashi, T. Kanai, X.-Y. Wang, C.-T. Chen, S. Watanabe, and S. Shin, A versatile system for ultrahigh resolution, low temperature, and polarization dependent laser angle-resolved photoemission spectroscopy, *Review of Scientific Instruments*, 79, 023106(1-7), 2008, 査読有

〔学会発表〕(計 5件)

石坂香子、超高分解能レーザー光電子分光による固体電子物性の研究、第22回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2009年1月12日、東京大学本郷キャンパス

大川万里生、石坂香子 (以下11名) YBa₂Cu₃O_{7-δ}におけるバルク電子構造の温度依存性：レーザー励起角度分解光電子分光による測定、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月20日、岩手大学上田キャンパス

石坂香子 (以下10名) 高温超伝導体 Bi2212 におけるノード準粒子の温度依存性、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月21日、北海道大学札幌キャンパス

大川万里生、石坂香子 (以下9名) YBa₂Cu₃O_{7-δ} のレーザー励起角度分解光電子分光、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月21日、北海道大学札幌キャンパス

大川万里生、石坂香子 (以下9名) VUV laser-excited angle-resolved photoemission study on the superconducting state in YBa₂Cu₃O_{7-δ}, The 15th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics,

2007年7月30日、ドイツベルリン

6 . 研究組織

(1)研究代表者

石坂 香子 (ISHIZAKA KYOKO)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号： 20376651

(2)研究分担者

(3)連携研究者