

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740221

研究課題名（和文）高温超伝導体の擬ギャップ状態における折りたたまれたフェルミ面の観測

研究課題名（英文）Observation of folded Fermi surface in the pseudogap state of high- T_c superconductor

研究代表者

吉田 鉄平 (YOSHIDA TEPPEI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：10376600

研究成果の概要（和文）：高温超伝導体の擬ギャップ状態について角度分解光電子分光により調べた結果、次のような成果が得られた。(1) 超伝導ギャップと擬ギャップに対応する 2 つの異なる性質のギャップが共存していることが分かった。(2) 多層系のエネルギーギャップ構造を明らかにし、 T_c に良くスケールするパラメータを見出した。(3) 電子ドーピング系においてアニールにより T_c が上昇する一方、擬ギャップが消失することを見出した。これは擬ギャップと超伝導の競合を示唆している。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the pseudogap state of high- T_c superconductors by angle-resolved photoemission spectroscopy and have obtained experimental results as below. (1) We have observed a coexistence of two distinct energy gaps corresponding to the superconducting and pseudogap. (2) The energy gap structure of the multilayer cuprate has been clarified and we have found a parameter which scales with T_c . (3) While the T_c increases by annealing in the electron-doped cuprates, a disappearance of the pseudogap has been observed. This indicates a competition between the superconductivity and the pseudogap.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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, 角度分解光電子分光, 擬ギャップ

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導の発見から20年以上を経た現在においても超伝導のメカニズムについて決定的な証拠が得られておらず、世界中で機構解明を目指した研究競争が続いている。なかでも、フェルミ準位近傍の電子状態を直接

観測する角度分解光電子分光(ARPES)と走査トンネル分光(STM)による研究が目覚しく発展し、次々と電子状態の新しい情報をもたらしている。

高温超伝導体の電子状態における大きな問題は、超伝導転移温度より高い温度でも存

在するエネルギーギャップ、擬ギャップの存在である。擬ギャップの起源は大きく分けて2つの説がある。一つは、超伝導の前駆現象でクーパーペアが擬ギャップを形成していると考えられるものである。もう一つは、擬ギャップは超伝導と競合する秩序状態であると考えられるものである。近年のARPESやSTMの実験結果から、超伝導ギャップと擬ギャップの関係について理解に進展が見られた。アンダードープ領域では、低温においてエネルギーギャップの方向依存性が単純な*d*-波からずれており、超伝導と競合する秩序状態が存在することが示された。しかし擬ギャップを説明するために様々な秩序状態が理論的に予言されているものの、その起源は謎のままである。

電子状態の理論の多くは、フェルミ面が折りたたまれ小さなホールのフェルミ面が形成されることを予言している。この問題についてホール抵抗に量子振動が観測され、「小さなフェルミ面」の存在が示唆されている。しかし、ARPESでは「途切れている」大きなフェルミ面（フェルミアーク）が観測されており統一的な解釈は得られていない。フェルミ面が本当に途切れているのか、それとも、つながっているのか、高温超伝導体の基底状態を決定する根本的な問題である。

2. 研究の目的

上で述べたように高温超伝導体における擬ギャップの起源は未解決の問題である。高分解能 ARPES による精密測定により、小さなフェルミ面の存在の検証および擬ギャップ状態と超伝導との関係を理解し、擬ギャップの起源に迫る情報を得ることを目的とした。擬ギャップ、フェルミアークと超伝導の関係に関しては、超伝導転移温度の異なる物質系の電子状態を比較し、エネルギーギャップの情報から超伝導転移温度を決定する要因に迫る。また電子ドープ系とホールドープ系の擬ギャップを比較することで擬ギャップの起源について知見を得る。電子ドープ系では反強磁性相互作用によるフェルミ面の折りたたみが明瞭に観測されているが、ホールドープ系では同様のモデルでギャップを理解できない。精密測定により電子ドープ系の擬ギャップの特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

角度分解光電子分光を用いて、高温超伝導体のフェルミ準位近傍の準粒子構造、超伝導ギャップ、擬ギャップ状態の観測を行った。高分解能角度分解光電子分光を行うことができるスタンフォード大学放射光研究所

(SSRL) BL5-4、広島大学放射光センター (HiSOR) BL-9 およびフォトンファクトリー (PF) BL28-A で実験は行われた。特に測定温度は超伝導転移温度 T_c の上と下で測定し、超伝導ギャップ、擬ギャップの特徴を調べた。

4. 研究成果

超伝導と擬ギャップ、フェルミアークの関係について下記のような新しい知見が得られた。

(1) $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の擬ギャップと超伝導ギャップの共存。(arXiv:1208.2903)

先行研究によると最適ドープ領域の $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) の角度分解光電子分光 (ARPES) において明瞭な超伝導ピークがノードとアンチノードの中間付近で観測されているが、アンチノード付近には観測されていない。これは、アンチノード方向は小さなフェルミ面の外にあり超伝導が抑制されているため、と解釈することができる。この解釈を検証するためアンチノード付近において、LSCO ($x=0.14$, $T_c=35$ K) の超伝導ピークのシグナルを検出することを試みた。その結果、アンチノード付近の光電子スペクトルに擬ギャップに対応するブロードな構造と低エネルギー (~ 15 meV) の超伝導ギャップに対応する構造が観測された。超伝導ギャップの見積もりは図 1 (a1)-(a3) に示すように、 T_c 上下のスペクトルの比較と、エネルギー分解能も考慮して精密に求めた。超伝導ギャップに対応する構造のエネルギースケールはノード付近のギャップをアンチノード方向へ延長した *d*-波のギャップに近く、擬ギャップ構造のピーク位置より小さい [図 1(b)]。この結果は、超伝導ギャップと擬ギャップのエネルギースケールが明確に異なり、2 つの異なる性質のギャップが共存していることを示している。

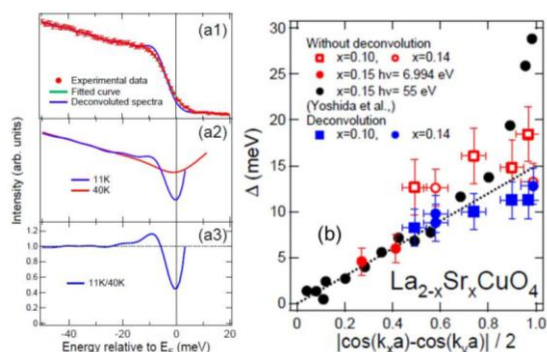


図 1 : LSCO の超伝導ギャップ構造。(a1)-(a3) オフノード付近の超伝導ギャップ。(b) 観測された超伝導ギャップの方向依存性 (青マーカー)。ほぼ *d*-波の依存性に一致している。

(2) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ の 2 成分ギャップ状態とフェルミアーク [Phys. Rev. B **85**, 104515 (2012)]

3 枚の CuO_2 面をもち、高い T_c (110 K) を示す $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ($\text{Bi}2223$) の電子構造を詳細に調べた。超伝導状態と常伝導状態で観測されたエネルギーギャップ及びエネルギーギャップの存在しない波数領域 (フェルミアーク領域) の間に関係を見出だし、LSCO の結果と合わせて T_c を決定する重要な秩序パラメータを見出した。図 2 に示すようにアンダードープ領域ではエネルギーギャップは d -波の依存性からずれている一方、過剰ドープ領域ではほぼ d -波の依存性に一致している。 T_c 直上の常伝導領域ではノード付近のエネルギーギャップがつぶれフェルミアークを形成する。 $\text{Bi}2223$ を含め様々な高温超伝導体で T_c 直上のフェルミアークの端点におけるエネルギーギャップを調べたところ T_c に良くスケールすることが分かった。このエネルギースケールは実効的な超伝導ギャップと考えられ超伝導転移温度をあたえる普遍的なパラメータであると言える。

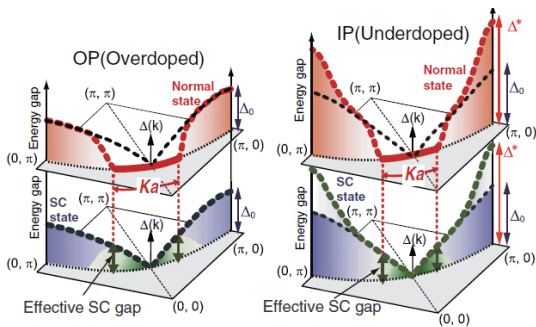


図 2 : $\text{Bi}2223$ の超伝導ギャップ構造。アンダードープ領域で d -波からの大きなずれが観測されている。ノード付近は常伝導状態でギャップがつぶれフェルミアークを形成している。

(3) 電子ドープ系の擬ギャップの消失

電子ドープ系の銅酸化物高温超伝導体である $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (PLCCO) の擬ギャップ構造の研究を行った。アニールされた最適組成 ($T_c=27\text{K}$) の試料は電子ドープ系に特徴的なホットスポット、擬ギャップが消失しておりフェルミ液体的な準粒子構造が観測された。これはアニールにより残留していた頂点酸素が除去された結果と理解できる。擬ギャップの消失と同時に、 T_c が上昇していることから電子ドープ系においても擬ギャップと超伝導は競合していることを示唆している。

小さいフェルミ面の確証は得られなかったが、以上のように擬ギャップ状態に関する理解が進んだと言える。アンダードープ領域

の擬ギャップ状態について情報がそろってきたので今後は情報の少ない過剰ドープ領域で超伝導が消失する様子を詳細に調べることが望まれる。

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 9 件)

- ① S. Ideta, T. Yoshida, M. Hashimoto, A. Fujimori, H. Anzai, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Takashima, K. M. Kojima, and S. Uchida: Effect of electron-phonon coupling in the ARPES spectra of the tri-layer cuprate $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$, J. Phys. Conf. Ser. **428**, 012039 (2013). (査読有)
- ② S. Ideta, T. Yoshida, I. Nishi, A. Fujimori, Y. Kotani, K. Ono, Y. Nakashima, S. Yamaichi, T. Sasagawa, M. Nakajima, K. Kihou, Y. Tomioka, C.H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Ito, S. Uchida, and R. Arita, “Dependence of carrier doping on the impurity potential in transition-metal-substituted FeAs-based superconductors”, Phys. Rev. Lett. **110**, 107007 (2013). (査読有)
- ③ S. Ideta, T. Yoshida, A. Fujimori, H. Anzai, T. Fujita, A. Ino, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, Z.-X. Shen, K. Takashima, K. Kojima, and S. Uchida, “Energy scale directly related to superconductivity in high- T_c cuprates: Universality from the temperature-dependent angle-resolved photoemission of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ”, Phys. Rev. B **85**, 104515 (2012). (査読有)
- ④ T. Yoshida, M. Hashimoto, I. M. Vishik, Z.-X. Shen, and A. Fujimori, “Pseudogap, superconducting gap, and Fermi arc in high- T_c cuprates revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy”, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011006 (2012). (査読有)
- ⑤ M. Yi, D.H. Lu, R.G. Moore, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Yoshida, A. Fujimori, and Z.-X. Shen, “Electronic reconstruction through the structural and magnetic transitions in detwinned NaFeAs ”, New J. Phys. **14**, 073019 (2012). (査読有)
- ⑥ S. Aizaki, T. Yoshida, K. Yoshimatsu, M. Takizawa, M. Minohara, S. Ideta, A. Fujimori, K. Gupta, P. Mahadevan, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Oshima, “Self-Energy on the Low- to High-Energy Electronic Structure of Correlated Metal SrVO_3 ”, Phys. Rev. Lett. **109**, 056401 (2012). (査読有)
- ⑦ A. F. Santander-Syro, M. Ikeda, T. Yoshida,

A. Fujimori, K. Ishizaka, M. Okawa, S. Shin, R.L. Greene, and N. Bontemps, "Coexistence of antiferromagnetism and superconductivity in the electron-doped cuprate $\text{Sm}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ ", Phys. Rev. Lett. **106**, 197002 (2011). (査読有)

- ⑧ T. Yoshida, M. Hashimoto, T. Takizawa, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, H. Eisaki, "Mass renormalization in the band width-controlled Mott-Hubbard systems SrVO_3 and CaVO_3 studied by angle-resolved photoemission spectroscopy", Phys. Rev. B, **82**, 085119 (2010). (査読有)
- ⑨ M. Ikeda, M. Takizawa, T. Yoshida, A. Fujimori, K. Segawa, and Y. Ando, "Chemical potential jump between the hole-doped and electron-doped sides of ambipolar high- T_c cuprate superconductors", Phys. Rev. B **82**, 020503(R) (2010). (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- ① M. Horio, Absence of pseudogap in the electron-doped cuprate superconductor $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ ($x=0.10$): Evolution of the electronic structure by annealing, A3 Foresight Program "Joint Research on Novel Properties of Complex Oxides" 2013 年 3 月 15 日, 東京大学 (招待講演)
- ② T. Yoshida, Anisotropic superconducting gap in the iron pnictide superconductor, Energy Materials Nanotechnology West Meeting (EMN West), 2013 年 01 月 07 日 ~ 2013 年 1 月 10 日, Houston, USA (招待講演)
- ③ T. Yoshida, Anisotropic superconducting gap of the iron-based superconductor studied by angle-resolved photoemission spectroscopy, Phase Separation and Superstripes in High Temperature Superconductors and Related Materials (Superstripes 2012), 2012 年 7 月 11 日 ~ 2012 年 7 月 18 日, Erice-Sicily, Italy (招待講演)
- ④ T. Yoshida, Anisotropic superconducting gap in the iron pnictide superconductor $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, International Conference on Heavy Electrons and Novel Quantum Phases (ICHN 2012) 2012 年 7 月 5 日, Gyeongju, Korea (招待講演)
- ⑤ T. Yoshida, An energy scale directly related to superconductivity in the high- T_c cuprate superconductors: Universality from the Fermi arc picture 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2011 年 8 月 13 日, 北京, 中国 (招

待講演)

- ⑥ T. Yoshida, "Correlated electronic structure of cuprate and iron-pnictide superconductors observed by ARPES", A seminar on New aspects of high- T_c superconductivity from Cuprates to Fe-based superconductors, 2010 年 7 月 3 日, 東京大学 (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://wyvern.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 鉄平 (YOSHIDA TEPPEI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：10376600