

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 4 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03741

研究課題名（和文）共鳴非弾性軟X線散乱による銅酸化物高温超伝導体の電荷ゆらぎ超伝導機構の研究

研究課題名（英文）Charge-fluctuation mechanism of high-temperature superconductivity in cuprates using resonant inelastic x-ray scattering

研究代表者

藤森 淳 (Fujimori, Atsushi)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・名誉教授

研究者番号：10209108

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：銅酸化物高温超伝導体における電荷秩序、電荷励起、フォノン異常を共鳴非弾性X線散乱で調べ、高温超伝導機構、擬ギャップ形成機構の解明につながる知見を得た。擬ギャップ相 フェルミ液体相間の量子相転移に伴う臨界的電荷ゆらぎとフォノン異常を、電荷秩序ピーク付近の低エネルギーで観測した。より高エネルギーでは、電荷揺らぎを媒介とする超伝導機構で予測される擬ギャップ相 超伝導相間のエキシトン・ピークの変化を検出した。さらに高エネルギーで、電荷の集団励起である音響型プラズモンをホールドープ型銅酸化物超伝導体で初めて観測した。また、角度分解光電子分光を用いて、擬ギャップ相におけるネマティック秩序を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発見から35年間の膨大な研究努力にもかかわらず未解決である銅酸化物高温超伝導体の超伝導発現機構と擬ギャップ形成機構を、従来主流であったスピン自由度に注目した研究から視点を変え、電荷ゆらぎに注目して解明を目指し成果を挙げた。実験手法として既に確立している角度分解光電子分光に加えて、新しい手法である共鳴非弾性X線散乱を高い分解能で利用し、電荷秩序、電荷励起、フォノン異常について新しい知見を得ることによって、電荷ゆらぎによる高温超伝導発現機構と擬ギャップ形成機構の確立に大きく近付いた。

研究成果の概要（英文）：Charge order, charge excitation, and phonon anomalies in cuprate high-temperature superconductors were studied by resonant inelastic x-ray scattering, and new insights into the superconductivity mechanism and the nature of the enigmatic pseudogap were obtained. Critical charge fluctuations and phonon anomalies associated with the quantum phase transition between the pseudogap phase and the Fermi-liquid phase were identified in the low-energy region near the charge-order peak. At higher energies, spectral changes in the exciton peak between the pseudogap phase and the superconducting phase were observed as predicted by the excitonic charge-fluctuation mechanism of superconductivity. At even higher energies, “acoustic plasmon”, a collective charge excitation of two-dimensional electron system was first observed in hole-doped cuprates. Using angle-resolved photoemission spectroscopy, a nematic electronic structure was identified in the pseudogap phase.

研究分野：物性物理実験

キーワード：高温超伝導体 共鳴軟X線非弾性散乱 角度分解光電子分光

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物における高温超伝導発現機構、擬ギャップ形成機構の解明を目指す研究では、これまで中性子散乱、NMR 等によるスピンゆらぎ、スピン・ダイナミクスの研究が活発に行われ、スピン自由度に注目した超伝導機構の研究が主流となっていた。一方、電荷ゆらぎに注目した研究に関しては、光電子分光による化学ポテンシャル・シフトの測定、電子ラマン散乱、光反射・吸収測定等により一様な(波数 $q=0$ の)電荷ゆらぎ、電荷ダイナミクスは調べられてきたものの、波数に依存した電荷ゆらぎ・電荷ダイナミクスの研究は有効な測定手段が少なく、その結果として電荷ゆらぎによる超伝導機構の理論的研究が遅れていた。しかし近年、共鳴非弾性 X 線散乱 (resonant inelastic x-ray scattering: RIXS) の高分解能化・高精度化が進み、波数に依存した電荷ダイナミクスを測定することが可能となりつつあった。一方理論面では、電荷ゆらぎ超伝導機構に関する大きな進展があった。強相関ハバード・モデルの数値計算から、電荷分離不安定性や、ダブロン(二重占有状態)とホロン(非占有状態)が作るペア(エキシトン)形成によるクーパ-対形成機構が提案されていた。

2. 研究の目的

モット絶縁体から超伝導体を経て過剰ドーブ・フェルミ液体にいたる銅酸化物の電荷ゆらぎを、共鳴軟 X 線散乱を用いて系統的に調べ、高温超伝導発現、擬ギャップ形成における電荷ゆらぎの役割を明らかにする。電荷ゆらぎによる超伝導は電荷の不安定性(電荷分離、電荷秩序、電子ネマティック秩序等)を内包しているため、超伝導相および隣接する電子相(モット絶縁相、擬ギャップ相、奇妙な金属(strange metal)相、フェルミ液体相)における電荷ゆらぎ、電荷ダイナミクスを波数(q)・エネルギー(ω)空間で調べる。とくに、最近提案されたエキシトン(ホロン-ダブロン・ペア)を介した電荷ゆらぎ超伝導機構を評価・検証する。

3. 研究の方法

高温超伝導、擬ギャップ形成の舞台であるキャリアがドーブされたモット絶縁体の電子励起、電荷秩序、フォノン異常がドーピングと共に q - ω 空間でどのように発展するか RIXS を用いて調べる。電子励起、電荷秩序、フォノン異常に関する準粒子(運動量 k 、エネルギー ε)は、角度分解光電子分光(angle-resolved photoemission spectroscopy: ARPES)で測定し、 $q = k_1 - k_2$, $\omega = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 関係式を用いて同定を行う。従来多くの RIXS 測定で利用されてきた Cu L_3 内殻吸収端はカバーする波数範囲 q が広く強度も強いという長所がある一方で、Cu イオンに局在した $d-d$ 励起が強いこと、電荷励起とスピン励起の分離が困難であること、分解能が不十分であるという欠点があった。これを補うために、酸素 K 内殻吸収端も併用して、高いエネルギー分解能、波数分解能で RIXS 測定を行い、電荷励起とスピン励起のそれぞれを調べる。この目的のために、台湾の放射光施設(National Synchrotron Radiation Research Center: NSRRC)の第三世代高輝度光源 Taiwan Photon Source (TPS) に建設され世界最高の分解能(<20 meV)を達成した RIXS ビームラインを利用する。ARPES 測定は分子研の UV-SOR など国内外の放射光施設で行う。

4. 研究成果

(1) RIXS を用いた銅酸化物高温超伝導体の研究

i. ホール・ドーブ型銅酸化物超伝導体の電荷秩序、電荷揺らぎ、およびドーブ量 19% 付近に存在すると考えられている量子臨界点(擬ギャップ相とフェルミ液体相の間の量子相転移点で、超伝導相に隠されている)との関係を明らかにするために、短距離電荷秩序による弾性散乱ピーク($q \sim (0.23, 0)$)付近を酸素 K 吸収端 RIXS で調べ、低エネルギー(<20 meV)の電荷揺らぎとフォノン異常を見出した。試料はドーブ量 15% の最適超伝導組成試料 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (LSCO) ($x=0.15$) を用いた。モデル計算による解析を行ったところ、電荷揺らぎが量子臨界的に振る舞う(ゆらぎの散乱確率が温度にほぼ比例する)ことが示され、最適超伝導組成(ドーブ量 15%)ですでに量子臨界点(ドーブ量 19%)の影響下にあることが示された。

ii. 電子正孔対(エキシトン)の生成・消滅を伴う電荷揺らぎによる高温超伝導および擬ギャップ形成の機構を検証するために、理論が予言する超伝導研究点移転より上(擬ギャップ相)と下(超伝導相)でのエキシトン励起による RIXS ス

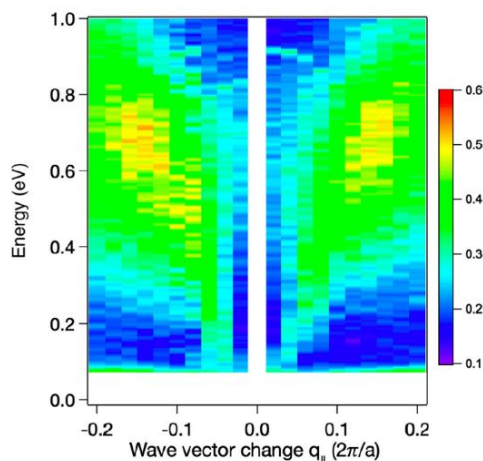


図1 酸素 K 内殻吸収端 RIXS で観測された $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ の音響プラズモン。横軸は運動量 q の CuO_2 面平行成分、縦軸は励起エネルギー [A. Singh et al., Phys. Rev. B **105**, 235105 (2022)].

ペクトルの変化を検証した。ホール・ドープ型超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) の最適ドープ試料について酸素 K 内殻および Cu L_3 内殻吸収端で RIXS 測定を行い、スペクトルの巨大な温度変化を見出した。スペクトルの温度変化は電荷分離不安定性を電子の分数化として表現する理論モデル“二成分フェルミオン・モデル”で半定量的に説明され、電荷揺らぎによる高温超伝導発現機構が支持された。

iii. 互いに長距離クーロン力を及ぼし合う二次元電子系の集合体に特有な電荷集団励起である“音響プラズモン”を、ホール・ドープ型銅酸化物超伝導体において初めて観測した。音響プラズモンの観測は、これまでは電子ドープ型銅酸化物の Cu L_3 吸収端 RIXS に限られ、ホール・ドープ型では観測されていなかった。本研究では試料として LSCO (組成 $x=0.12, 0.15$) を用いた。ホール・ドープ型銅酸化物超伝導体のキャリアーが酸素ホールであることに着目し、酸素 K 内殻吸収端で RIXS を測定したところ、高エネルギーまで強い共鳴増大が見られ、音響プラズモンの観測に成功した (図 1)。

iv. 電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体においても、従来の Cu L_3 吸収端ではなく酸素 K 吸収端で RIXS 測定を行い、音響プラズモンを観測した。プロテクト・アニールした $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ (PLCCO) (組成 $x=0, 0.1$) 試料を用いた。超伝導を示す $x=0.1$ 試料では音響プラズモンが観測されたのに対して、超伝導を示さず電気抵抗の高い $x=0$ 試料では音響プラズモン励起が観測されず、観測された構造がキャリアーの電荷集団励起であることを確認できた。但しその強度は弱く、キャリアーに酸素 p 軌道成分が少ないことが示唆された。これは、電子ドープ型銅酸化物超伝導体のキャリアーの主成分が銅 d 軌道に由来するという従来の考えを支持するものである。

(2) ARPES を用いた銅酸化物高温超伝導体の研究

i. 擬ギャップ形成機構のひとつとして最近提案され注目されているネマティック転移 (回転対称性の破れ) の可能性を調べるために、試料に弱い一軸性面内圧力をかけながら温度を変えて ARPES 測定を行い、擬ギャップ相において回転対称性が低下することを観測した (図 2)。最適ドープ Bi2212 を試料に選び、擬ギャップ相 ($T_c < T < T^*$) でバンド構造とフェルミ面が面内で異方的になることを観測した。擬ギャップ相のネマティック不安定性のため、微小な一軸性圧力でも電子状態に大きな異方性が生じたものと考えた。また、これまで報告されているネマティック転移温度と擬ギャップ温度 T^* を多くの物質について整理・比較したところ、ホール・ドープ量 10% 以上では擬ギャップ転移とネマティック転移がよく一致する一方で、10% 以下での擬ギャップ温度はネマティック転移温度より遙かに高温であることが示された。ドープ量 10% 以下での擬ギャップ形成には、RIXS 測定で支持された電子の分数化機構が必要と考えられる。

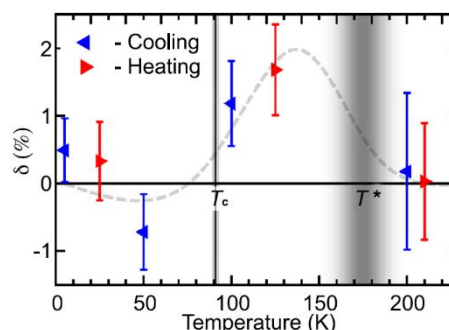


図 2 ARPES で観測した弱い一軸性圧力下における $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ フェルミ面形状非対称性 (パラメータ δ で表す) の温度変化 [S. Nakata et al., npj Quantum Mater. 6, 86 (2021)].

ii. APRES で観測したフェルミ面の面積からキャリアー・ドープ量を求める方法により、電子ドープ型銅酸化物超伝導体 PLCCO の正確な電子相図を作成した。(フェルミ面の差渡し $k_1 - k_2$ は RIXS 等で観測される電荷秩序 q とよく一致。) ドープ量 10% 以下では超伝導が発現せず、10% で急に有限の超伝導転移温度 T_c (~ 25 K) が出現し、有限な T_c はドープ量 25% 付近まで残ることを見出した。すなわち、これまで超伝導領域が狭いと考えられてきた電子ドープ型銅酸化物超伝導体において、ホール・ドープ型に比べて同程度かそれよりもさらにオーバードープ側に超伝導領域が広がっていることがわかった。一方、アンダードープ側の超伝導試料は、少なくとも 10% 程度の電子がドープされており、最近提唱されていたノン・ドープ超伝導を検証することはできなかった。

iii. 多層系銅酸化物高温超伝導体で最も T_c が高くなる三枚系物質で、隣り合う CuO_2 面の間で Bogoliubov 準粒子が混成することを見出した。 $T_c = 110$ K に達する $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (Bi2223) の ARPES 測定を行い、三層系における T_c の上昇の原因として、 CuO_2 面間の混成以外に電子フォノン相互作用とスピン揺らぎの増大が重要であることを指摘した。

(3) 銅酸化物高温超伝導体の理論モデル

二成分フェルミオン・モデルを含む銅酸化物超伝導体の理論モデルの多くは、より現実的で複雑な Cu 3d 軌道と酸素 p 軌道を含む“3 バンド・ハバード・モデル”ではなく、簡単化された 1 バンドのハバード・モデルを用いてきた。1 バンド・モデルの正当性と両モデルの関係を理解するために、両モデル間でパラメータを変換する簡易な方法を物理的考察に基づいて導出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 18件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Singh A., Huang H. Y., Lane Christopher, Li J. H., Okamoto J., Komiya S., Markiewicz Robert S., Bansil Arun, Lee T. K., Fujimori A., Chen C. T., Huang D. J.	4. 巻 105
2. 論文標題 Acoustic plasmons and conducting carriers in hole-doped cuprate superconductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235105-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.235105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Singh A., Huang H. Y., Xie J. D., Okamoto J., Chen C. T., Watanabe T., Fujimori A., Imada M., Huang D. J.	4. 巻 13
2. 論文標題 Unconventional exciton evolution from the pseudogap to superconducting phases in cuprates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 7906~1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-35210-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 藤森淳、中田勝	4. 巻 57
2. 論文標題 一軸性圧力下の高温超伝導体	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 297-306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sheshadri K., Malterre D., Fujimori A., Chainani A.	4. 巻 107
2. 論文標題 Connecting the one-band and three-band Hubbard models of cuprates via spectroscopy and scattering experiments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085125-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.085125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuzawa Yu, Morita Tomohiro, Arita Masashi, Giampietri Alessio, Kandyba Viktor, Barinov Alexey, Takahashi Akira, Nagakubo Yusuke, Adachi Tadashi, Koike Yoji, Fujimori Atsushi, Saini Naurang L., Mizokawa Takashi	4. 巻 90
2. 論文標題 Fermi Surface Geometry and Inhomogeneous Electronic States in Pr _{1.3-x} Ce _{0.7} CuO ₄ ($x = 0.05$) with Small Superconducting Volume Fraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054704 ~ 054704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.054704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Cao Hui, Guo Hongli, Shao Yu-Cheng, Liu Qixin, Feng Xuefei, Lu Qinwen, Wang Zhongping, Zhao Aidi, Fujimori Atsushi, Chuang Yi-De, Zhou Hua, Zhai Xiaofang	4. 巻 21
2. 論文標題 Realization of Electron Antidoping by Modulating the Breathing Distortion in BaBiO ₃	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3981 ~ 3988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00750	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okamoto J., Chainani A., Chen Z. Y., Huang H. Y., Singh A., Sasagawa T., Khomskii D. I., Fujimori A., Chen C. T., Huang D. J.	4. 巻 104
2. 論文標題 Evolution of valence- and spin-specific local distortions in La _{2-x} Sr _x CoO ₄	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054417-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.054417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakata S., Horio M., Koshiishi K., Hagiwara K., Lin C., Suzuki M., Ideta S., Tanaka K., Song D., Yoshida Y., Eisaki H., Fujimori A.	4. 巻 6
2. 論文標題 Nematicity in a cuprate superconductor revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy under uniaxial strain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 86-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-021-00390-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamaji Youhei, Yoshida Teppei, Fujimori Atsushi, Imada Masatoshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Hidden self-energies as origin of cuprate superconductivity revealed by machine learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043099-1~37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ideta S., Johnston S., Yoshida T., Tanaka K., Mori M., Anzai H., Ino A., Arita M., Namatame H., Taniguchi M., Ishida S., Takashima K., Kojima K.M., Devereaux T.P., Uchida S., Fujimori A.	4. 巻 127
2. 論文標題 Hybridization of Bogoliubov quasiparticles between adjacent CuO ₂ layers in the triple-layer cuprate Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀₊ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217004-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.217004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Huang H. Y., Singh A., Mou C. Y., Johnston S., Kemper A. F., van den Brink J., Chen P. J., Lee T. K., Okamoto J., Chu Y. Y., Li J. H., Komiya S., Komarek A. C., Fujimori A., Chen C. T., Huang D. J.	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantum Fluctuations of Charge Order Induce Phonon Softening in a Superconducting Cuprate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 041038-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.041038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hagiwara K., Ishikado M., Horio M., Koshiishi K., Nakata S., Ideta S., Tanaka K., Horiba K., Ono K., Kumigashira H., Yoshida T., Ishida S., Eisaki H., Shamoto S., Fujimori A.	4. 巻 3
2. 論文標題 Superconducting gap and pseudogap in the surface states of the iron-based superconductor PrFeAsO _{1-y} studied by angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043151-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Huang H. Y., Singh A., Wu C. I., Xie J. D., Okamoto J., Belik A. A., Kurmaev E., Fujimori A., Chen C. T., Streltsov S. V., Huang D. J.	4. 巻 7
2. 論文標題 Resonant inelastic X-ray scattering as a probe of Jeff=1/2 state in 3d transition-metal oxide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 33-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-022-00430-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Horio M., Kramer K. P., Wang Q., Zaidan A., von Arx K., Sutter D., Matt C. E., Sassa Y., Plumb N. C., Shi M., Hanff A., Mahatha S. K., Bentmann H., Reinert F., M., Rosnagel K., Rienks E., Vecchione A., Kawamata T., Adachi T., Koike Y., Fujimori A., Hoesch M., Chang J. et al.	4. 巻 102
2. 論文標題 Oxide Fermi liquid universality revealed by electron spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245153-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.245153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Lin C., Adachi T., Horio M., Ohgi T., Baqiya M. A., Kawamata T., Sato H., Sumura T., Koshiishi K., Nakata S., Shibata G., Hagiwara K., Suzuki M., Ono K., Horiba K., Kumigashira H., Ideta S., Tanaka K., Koike Y., Fujimori A.	4. 巻 3
2. 論文標題 Extended superconducting dome revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy of electron-doped cuprates prepared by the protect annealing method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013180-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Horio M., Koshiishi K., Nakata S., Hagiwara K., Ota Y., Okazaki K., Shin S., Ideta S., Tanaka K., Takahashi A., Ohgi T., Adachi T., Koike Y., Fujimori A.	4. 巻 100
2. 論文標題 d-wave superconducting gap observed in protect-annealed electron-doped cuprate superconductors Pr _{1.3-x} La _{0.7} Ce _x CuO ₄	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054517-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.054517	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lin Chun, Horio Masafumi, Kawamata Takayuki, Saito Shin, Koshiishi Keisuke, Sakamoto Shoya, Zhang Yujun, Yamamoto Kohei, Ikeda Keisuke, Hirata Yasuyuki, Takubo Kou, Wadati Hiroki, Yasui Akira, Takagi Yasumasa, Ikenaga Eiji, Adachi Tadashi, Koike Yoji, Fujimori Atsushi	4. 巻 88
2. 論文標題 Nature of Carrier Doping in $T_{d-1}La_{1.8-x}Eu_{0.2}Sr_xCuO_4$ Studied by X-Ray Photoemission and Absorption Spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 115004-1~2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.115004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki H., Kobayashi T., Miyasaka S., Okazaki K., Yoshida T., Horio M., Ambolode L. C. C., Ota Y., Yamamoto H., Shin S., Hashimoto M., Lu D. H., Shen Z.-X., Tajima S., Fujimori A.	4. 巻 9
2. 論文標題 Band-dependent superconducting gap in $SrFe_2(As_{0.65}P_{0.35})_2$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16418-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-52887-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 19件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 A. Fujimori
2. 発表標題 Electron fractionalization in the pseudogap state of cuprates revealed by resonant inelastic x-ray scattering
3. 学会等名 International Conference on Quantum Materials and Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Fujimori, A. Singh, M. Horio, S. Sakai, M. Imada, and D.-J. Huang
2. 発表標題 Spectroscopic manifestations of electron fractionalization in the pseudogap state of cuprates
3. 学会等名 Spectroscopies in Novel Superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Fujimori
2. 発表標題 Synchrotron-radiation spectroscopy of transition-metal oxides and high-temperature superconductors
3. 学会等名 Colloquium on Modern Problems of Condensed Matter Physics (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Fujimori and D. J. Huang
2. 発表標題 ARPES to RIXS studies of high-temperature superconductors
3. 学会等名 21st Taiwan-Japan-Korea Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Fujimori, A. Singh, H. Y. Huang, T. Watanabe, M. Imada, and D. J. Huang
2. 発表標題 Electron fractionalization in the pseudogap state of cuprates detected by RIXS
3. 学会等名 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Origin of perpendicular magnetic anisotropy in 2D materials studied by angle-dependent XMCD
3. 学会等名 Interdisciplinary Topics in Advanced Materials (ITAM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Material trends in the chemical bonding and electronic structure of quantum materials
3. 学会等名 Summer School of the IMPRS & MPI-UBC- UTokyo Center "Design and Synthesis of Quantum Materials" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Charge order and excitation in high-Tc cuprates studied by RIXS
3. 学会等名 International Conference on Fugaku project "Emergence and Functionality of Quantum Matter (EFQM 2020)" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Electronic nematic phases in Fe-based and cuprate superconductors,
3. 学会等名 Advances in Electron Spectroscopy - Experiment and Theory (AESET 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Origin of the pseudogap in electron-doped and hole-doped cuprates revealed by ARPES
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (FCES19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 ARPES studies of electronic nematic phases in cuprate and iron-based superconductors
3. 学会等名 Research Frontier of Advanced Spectroscopies for Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori, Suguru Nakata, and Keisuke Koshiishi
2. 発表標題 ARPES studies of electronic nematic phases in cuprate and iron-pnictide superconductors
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori, Suguru Nakata, and Keisuke Koshiishi
2. 発表標題 ARPES studies of electronic nematic phases in cuprate and iron-pnictide superconductors
3. 学会等名 Electron Correlation in Superconductors and Nanostructures (ECSN-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Nematicity in high-temperature superconductors probed by ARPES
3. 学会等名 20th Korea-Taiwan-Japan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Fujimori
2. 発表標題 Open issues and synchrotron radiation spectroscopy of electron-doped high-Tc cuprates
3. 学会等名 International Workshop for Synergetic Collaboration between Material and Synchrotron Science through IMR-MAX IV Joint Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤森 淳
2. 発表標題 軟X線分光で見る量子物質
3. 学会等名 東北大量子物質・放射光理学研究科放射光シンポジウム - 量子物質 科学のフロンティア (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Fujimori Group https://sites.google.com/view/fujimorigroup/home?authuser=0 TPS Beamlines - 41A Soft X-ray Scattering http://tpsbl.nsrcc.org.tw/bd_page.aspx?lang=en&port=41A&pid=1044 University of Zuerich - Johan Chang group https://www.physik.uzh.ch/groups/chang/</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	溝川 貴司 (Mizokawa Takashi) (90251397)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
台湾	国家同步輻射研究中心	国立清華大学		
ロシア連邦	Institute of Metal Physics			