

付録 A

La,P コドープ CaFe_2As_2 の 放射光角度分解光電子分光: 高 T_c に特徴的な 2 次元フェルミ 面トポロジーの観測

A.1 研究の背景

FeAs 系では高 T_c を示すホールドープ系 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ と電子ドープ系 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ でフェルミ面の次元性が異なっていることから、フェルミ面ネスティングが高 T_c に重要である超伝導モデルから期待される、フェルミ面の 2 次元性が高 T_c 鉄系超伝導体に共通した電子構造であるかはよくわかっていない。しかしながら、電子ドープ系はホールドープ系に比べ T_c が低いため ($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2: T_c = 38\text{K}$, $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2: T_c = 25\text{K}$)、3 次元フェルミ面が存在することが高 T_c 電子ドープ系の特徴であるかは明らかではない。そこで T_c とフェルミ面の次元性との関連性を明らかにするためには、 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ を上回る T_c をもつ電子ドープ系超伝導体とホールドープ系 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ との電子構造の比較が必要だと考えた。本研究では、岡山大学の野原研究室で発見された、122 型鉄系超伝導体の中で最高 $T_c = 45\text{K}$ を持つ La と P をコドープした電子ドープ CaFe_2As_2 に着目し[56]、この物質の 3 次元電子構造を解明するための ARPES 研究を行った。この新規鉄系超伝導体の持つ T_c は、これまで ARPES 研究がされてきたどの鉄系超伝導体よりも高いことから、ARPES によるこの超

伝導体の電子構造研究は、高い T_c を発現する鉄系超伝導体に特徴的なフェルミ面トポロジーを明らかにする上で重要であると考えられる。

A.2 実験条件

La,P コドープ CaFe_2As_2 の単結晶試料は岡山大学の野原実教授のグループから提供していただいた。測定試料はセルフフラックス法で作成されており [56]、磁化率測定から T_c は 45 K、超伝導体積分率は 75% と見積もられた。また SEM/EDX 測定から見積もられた組成は $\text{Ca}_{0.82}\text{La}_{0.18}\text{Fe}_2(\text{As}_{0.94}\text{P}_{0.06})_2$ である。角度分解光電子分光測定は、Photon Factory の BL-28A と広島大学放射光科学センター(HiSOR)の BL-9A で稼働している光エネルギー・偏光可変高分解能光電子分光装置を用いて行った。測定温度は $T = 60$ K に設定した。励起光は Photon Factory BL-28A では 40~86 eV の円偏光を、HiSOR BL-9A では 19-31 eV の円偏光及び直線偏光(s,p)を用いた。清浄試料表面は試料を (001) 面で劈開することにより得た。劈開および測定時の真空度は 3×10^{-8} Torr である。エネルギー分解能の見積もりとフェルミ準位の校正は、試料と等電位の基板上に蒸着した金のフェルミ端により行った。測定時のエネルギー分解能は 10-30 meV、角度分解能は 0.2 度に設定した。

A.3 実験結果と考察

A.3.1 Γ 点と Z 点のバンド構造

図 A.1(a-c) は 31 eV の光エネルギーで測定した Γ 点の偏光依存 ARPES 強度マップである。円偏光ではフェルミ準位を横切る 2 本のホールバンド(α_2, β)が観測された。s 偏光では α_2 バンドに加えてフェルミ準位を横切らないバンド(α_1)が観測された。 α_1 バンドの頂点の位置は -30 meV である。p 偏光では円偏光の測定と同じバンドが観測された。これらの結果から Γ 点ではフェルミ面を形成する 2 本のバンドと形成しない 1 本のバンドが存在していることがわかった。図 A.1(d-f) は 19 eV の光エネルギーで測定した Z 点の偏光依存 ARPES 強度マップである。円偏光では α_2, β バンド、s 偏光では α_1, α_2 、p 偏光では β バンドが観測されており、Z 点は Γ 点と同じバンドが存在していることがわかった。Z 点の α_1 バンドの頂点は -10 meV に位置しており(図 A.1(e))、は Γ 点に比べてフェルミ準位に近づいていることがわかる。しかしながらこのバンドは Z 点においてもフェルミ面は形成していない。一方で他のバンドにも Γ 点との差異が見られるが、

Z点においてもフェルミ面を形成していることがわかった。

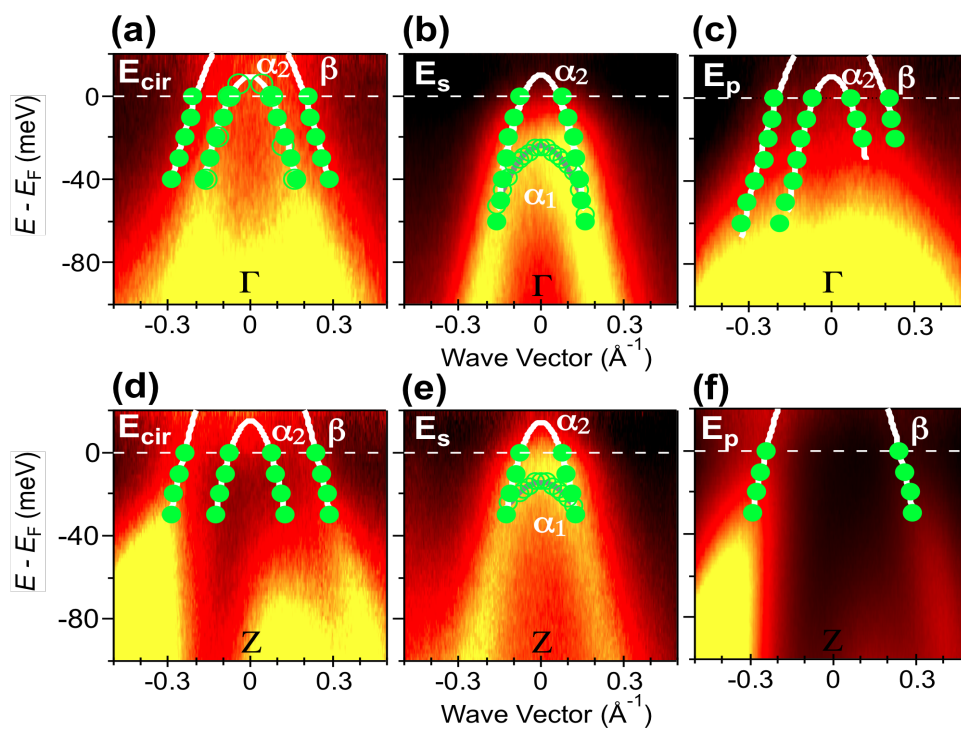


図 A.1 (a-c) Γ 点(31eV)での偏光依存 ARPES(円,s,p 偏光) (d-f)Z 点(19eV)での偏光依存 ARPES(円,s,p 偏光) 緑色の円は MDC(fill)及び EDC(open)のピーク位置、白線は MDC のピーク位置から得られたバンド分散。

A.3.2 Γ -Z 間のホールバンドの k_z 分散

Γ 点と Z 点で観測された 3 本のホールバンドの k_z 分散を測定するために、光エネルギー依存 ARPES 測定を行なった。図 A.2(a) は円偏光で測定した $k = 0 \text{ \AA}^{-1}$ における EDC スペクトルの光エネルギー依存性(40-86 eV)であり、ブリルアンゾーンの面直方向(Z- Γ -Z 間)の測定になっている。フェルミ準位近傍のピーク構造は α_1 バンドの頂点に対応している。図 A.2(a) から α_1 バンドは Γ から Z に近づくにつれてフェルミ準位に近づく k_z 分散を持つことが見て取れる。また Γ -Z 間のどの k_z 点においてもフェルミ順位を横切らないことから、 α_1 バンドはフェルミ面を形成しないことがわかる。図 A.2(b) はフェルミ準位における MDC スペクトルの光エネルギー依存性(19-31 eV)であり Z- Γ 間に対応する。全ての MDC スペクトルは 4 本のローレンツ関数でフィッティングすることができる。内側 2 本のローレンツ関数は α_2 バンドを、外側 2 本のローレンツ関数は β バンドに対応しており、ピーク位置はそれぞれのバンドのフェルミ波数に対応する。この結果から、 Γ 点と Z 点でフェルミ面を形成していた 2 本のホールバンドは Γ -Z の間においてもフェルミ準位を横切り、フェルミ面を形成していることがわかる。そしてこれらのバンドのフェルミ波数は光エネルギーによらずほぼ一定であることから、 α_2 バンドと β バンドの k_z 分散は弱く、そのフェルミ面形状はほぼ 2 次元であることがわかる(図 A.2(c))。

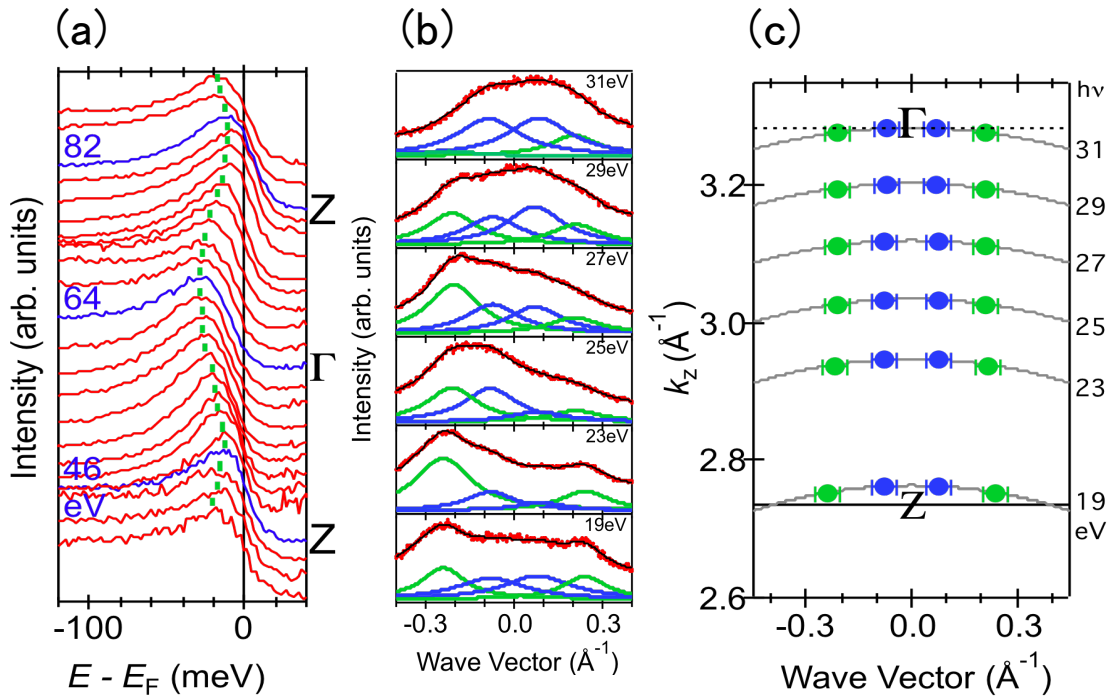


図 A.2 (a) $k=0 \text{ \AA}^{-1}$ における EDC スペクトルの光エネルギー依存性(40-86 eV) 緑の破線は α_1 バンドの k_z 分散を示している。(b)フェルミ準位における MDC の光エネルギー依存性(19-31 eV) 赤点は MDC スペクトル、黒曲線はローレンツ関数によるフィッティング結果、青色と緑色の曲線はフィッティングに用いたローレンツ関数であり、それぞれ α_2 、 β バンドに対応する。(c)(b)のフィッティングで得られた α_2 と β バンドのフェルミ波数(青点: α_2 , 緑点: β)を面直ブリアンゾーン上に示している。灰色の線は用いた光エネルギーにおける ARPES の測定範囲を示している

A.3.3 M点とA点のバンド構造

図 A.3はM点のバンド構造の測定結果である。図 A.3(a,b)はM点とA点の強度マップを、図 A.3(c,d)はそれらのMDCプロットである。強度マップからは電子バンドの兆候が見られ、MDC解析から2本の電子バンドの存在することが示唆される。この2本の電子バンドは24 eV(A点に対応)における偏光依存ARPES測定によって分離して観測することができた(図 A.3(d,e)の δ バンドと ϵ バンド)。この偏光依存ARPESの結果から、図 A.3(c,d)のMDC解析が妥当であり、円偏光ARPESデータが2本の電子バンドの存在を反映していることがわかる。

A.3.4 M-A間の電子バンドの k_z 分散

図 A.4(a,b)はそれぞれM点とA点における面内フェルミ面マッピングの結果である。2枚の電子バンドが形成する電子フェルミ面はそれぞれ楕円であり、M点からA点にかけて90度回転していることが分かる。この回転は、体心立方格子のブリルアンゾーンが持つ特徴を反映したものである。図 A.4(c)は図

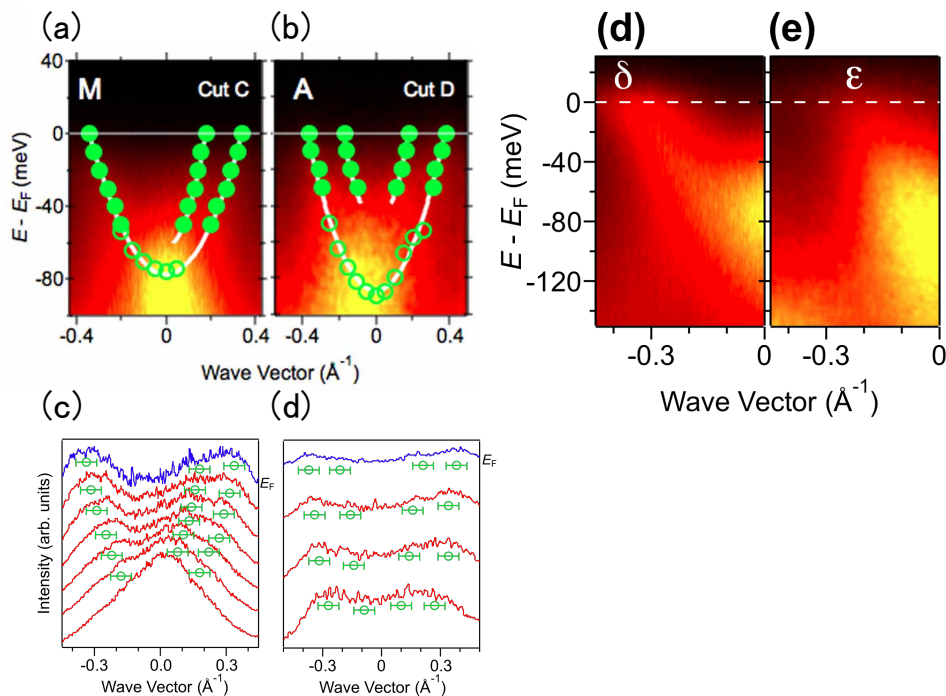


図 A.3 (a,b)M点(68 eV)とA点(86 eV)の円偏光ARPES強度マップ(c,d)(a,b)のMDCスペクトル、緑の円はMDC解析によって得られた2本の電子バンドのピーク位置(d,e)A点(24eV)の偏光依存ARPES強度マップ(p,s偏光)

A.3.4 M-A 間の電子バンドの k_z 分散

図 A.4(a,b)はそれぞれ M 点と A 点における面内フェルミ面マッピングの結果である。2 枚の電子バンドが形成する電子フェルミ面はそれぞれ楕円であり、M 点から A 点にかけて 90 度回転していることが分かる。この回転は、体心立方格子のブリルアンゾーンが持つ特徴を反映したものである。A.4(a)の cut C で測定した、フェルミ準位における電子バンド強度の光エネルギー依存性であり、電子フェルミ面の M-A 間における k_z 分散に対応する。図 A.4(c)から M 点と A 点の間でフェルミ波数が小さくなるような周期的な k_z 分散が見られるが、これは電子バンドの k_z 分散を示しているのではなく、楕円の形状をもつ電子フェルミ面が M-A 間で 90 度回転していることを反映している。したがって、2 枚の電子フェルミ面形状はほぼ 2 次元であることがわかる。

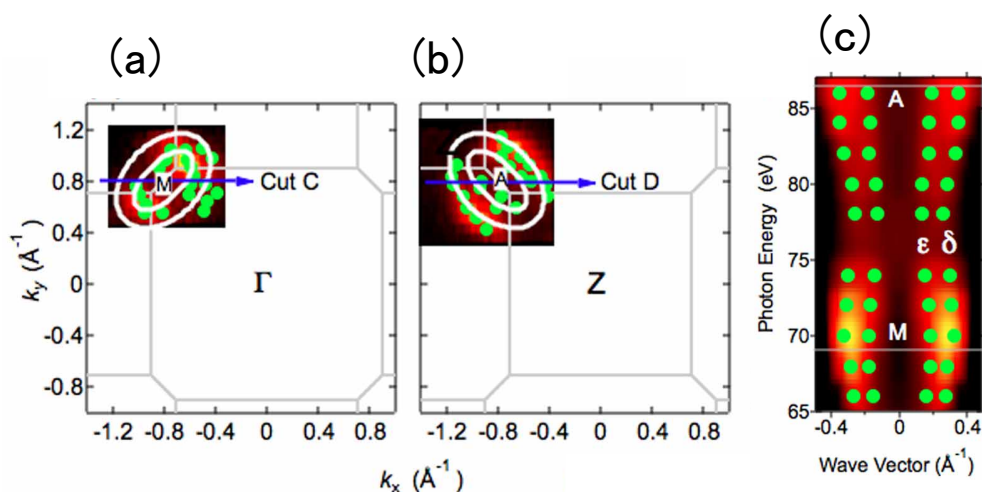


図 A.4 (a,b)M 点(68 eV)と A 点(86 eV)の面内フェルミ面マッピング(c)電子フェルミ面の面直方向(M-A 間)のマッピング。光エネルギーは 65-86 eV を用いた。緑の円は MDC 解析によって得られた 2 本の電子バンドのピーク位置。全て円偏光で測定した ARPES データである。

A.3.5 フェルミ面トポロジー

図 A.5 に APRES 測定によって得られたフェルミ面形状を示す。 $\Gamma(Z)$ 点に 2 枚のホールフェルミ面、 $M(A)$ 点に 2 枚の電子フェルミ面が存在し、全てのフェルミ面の形状はほぼ 2 次元であることが分かる。本研究で観測されたホールフェルミ面と電子フェルミ面の体積から見積もられるドーピング電子数は、Fe 1 個に対して 0.13 個である。この値は nominal な電子ドーピング量である 0.09 個に近いことから、測定結果がバルク電子構造を反映していることが分かる。また、母物質 CaFe_2As_2 の反強磁性ベクトル $(\pi/a, \pi/a, 2\pi/c)[115]$ だけホールのフェルミ面をシフトさせることで、外側のホールのフェルミ面 (β) と内側の電子的フェルミ面 (ϵ) が部分的にネスティングしていることがわかる。この結果からネスティングによる高 T_c 超伝導の可能性が示唆される。

電子ドーピング 122 系で最高 $T_c = 45 \text{ K}$ を持つ $\text{Ca}_{0.82}\text{La}_{0.18}\text{Fe}_2(\text{As}_{0.94}\text{P}_{0.06})_2$ において観測された 2 次元性の強いフェルミ面トポロジーは、ホールドーピング 122 型最高 $T_c = 38 \text{ K}$ の $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ においても ARPES により観測されている [52,53]。これらの結果は、2 次元フェルミ面トポロジーは高い T_c を持つ鉄系超伝導体においてドーピングしたキャリアの種類によらない特徴的な電子構造であることを示しており、ネスティングによる超伝導機構の妥当性を示唆している。

また、ARPES によって得られた $T_c = 25 \text{ K}$ を持つ電子ドーピング $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ と $T_c = 45 \text{ K}$ を持つ電子ドーピング型 $\text{Ca}_{0.82}\text{La}_{0.18}\text{Fe}_2(\text{As}_{0.94}\text{P}_{0.06})_2$ のフェルミ面トポロジーを比較することにより (図 A.6)、 Γ 点に存在する小さなホールのフェルミ面の形状に違いがあることが分かる。 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ において、内側のホール面は、 Γ 点周りにおいてフェルミ面が閉じており、その形状は 3 次元的である [54,55]。一方 $\text{Ca}_{0.82}\text{La}_{0.18}\text{Fe}_2(\text{As}_{0.94}\text{P}_{0.06})_2$ では、 Γ 点から Z 点までフェルミ面が切れずに残っておりほぼ 2 次元的である。これらの結果から、この小さなホールフェルミ面の 2 次元性の増強と、25 K から 45 K への T_c 向上との関連性が示唆される。

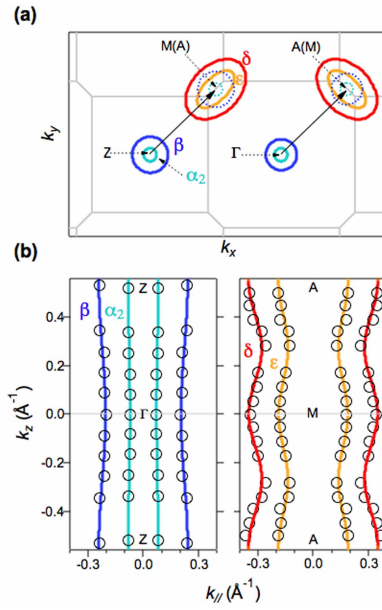


図 A.5 (a) $\text{Ca}_{0.82}\text{La}_{0.18}\text{Fe}_2(\text{As}_{0.94}\text{P}_{0.06})_2$ で観測されたフェルミ面の面内と(b)面直ブリルアンゾーンにおける形状。(a)において、ホール面(α_2, β)は円形を仮定している。また破線の円は反強磁性ベクトルだけシフトさせた Γ (Z)点のホール面を示している。(b)において、黒円は MDC 解析から得た α_2, β ホールバンドと ϵ, δ 電子バンドのフェルミ波数であり、 $k_z=0$ と $k_{\parallel}=0$ (high symmetry point)でフェルミ波数を対称化してある。

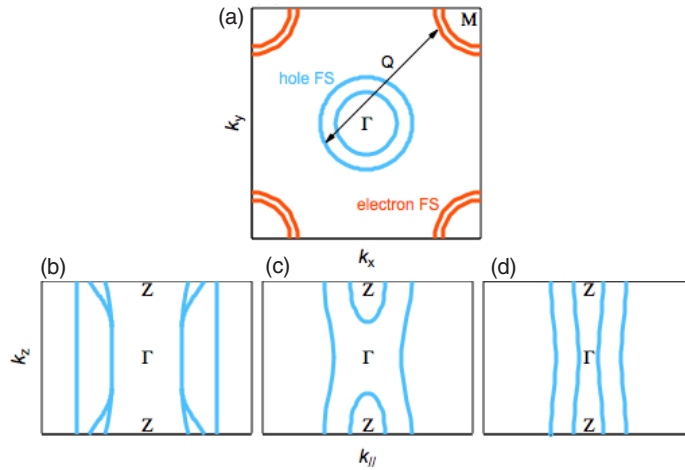


図 A.6 高 T_c 122 系の ARPES フェルミ面トポロジーの模式図 (a)面内ブリルアンゾーンにおけるフェルミ面形状 (b,c)面直ブリルアンゾーンにおける (b) $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($T_c = 38$ K)[52,53], (c) $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ($T_c = 25$ K)[54,55]と (d)La,P コドープ CaFe_2As_2 ($T_c = 45$ K)のフェルミ面形状

A.4 本章のまとめ

La,PコドープCaFe₂As₂において全てのフェルミ面の形状が2次元形状であることを明らかにし、ホールドープ系高 T_c 超伝導体 Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ と共通した特徴であることを見出した。

以上の実験結果から、2次元フェルミ面トポロジーはドープされたキャリアの種類によらず、高 T_c 鉄系超伝導体に共通した電子構造であり、ホール面とフェルミ面のネスティングが高 T_c 発現に重要であることが示唆された。

付録 B 研究業績

B.1 発表論文

第一著者

1. **Observation of a Hidden Hole-Like Band Approaching the Fermi Level in K-Doped Iron Selenide Superconductor**

Masanori Sunagawa, Kensei Terashima, Takahiro Hamada, Hirokazu Fujiwara, Tetsushi Fukura, Aya Takeda, Masashi Tanaka, Hiroyuki Takeya, Yoshihiko Takano, Masashi Arita, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Katsuhiko Suzuki, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Takanori Wakita, Yuji Muraoka, Takayoshi Yokoya
J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 073704 (2016).

2. **Comparative ARPES Study on Iron-Platinum-Arsenide Superconductor $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ ($x = 0.25$ and 0.42)**

Masanori Sunagawa, Rikiya Yoshida, Toshihiko Ishiga, Koji Tsubota, Taihei Jabuchi, Junki Sonoyama, Satomi Kakiya, Daisuke Mitsuoka, Kazutaka Kudo, Minoru Nohara, Kanta Ono, Hiroshi Kumigashira, Tamio Oguchi, Takanori Wakita, Yuji Muraoka, and Takayoshi Yokoya
J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 055001 (2015).

3. **Characteristic two-dimensional Fermi surface topology of high- T_c iron-based superconductors**

Masanori Sunagawa, Toshihiko Ishiga, Koji Tsubota, Taihei Jabuchi, Junki Sonoyama, Keita Iba, Kazutaka Kudo, Minoru Nohara, Kanta Ono, Hiroshi Kumigashira, Tomohiro Matsushita, Masashi Arita, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Takanori Wakita, Yuji Muraoka & Takayoshi Yokoya
Scientific Reports **4**, 4381 (2014).

第一著者以外

1. Comparative ARPES studied of $\text{LaO}_x\text{F}_{1-x}\text{BiS}_2$ ($x=0.23$ and 0.46)

K. Terashima, T. Wakita, M. Sunagawa, H. Fujiwara, T. Nagayama, K. Ono, H. Kumigashira, M. Nagao, S. Watauchi, I. Tanaka, H. Okazaki, Y. Takano, Y. Mizuguchi, H. Usui, K. Kuroki, Y. Muraoka and T. Yokoya
J. Phys: Conference Series **683**, 012002 (2016).

2. Bulk sensitive angle-resolved photoelectron spectroscopy on Nd(O,F)BiS_2

K. Terashima, J. Sonoyama, M. Sunagawa, H. Fujiwara, T. Nagayama, T. Muro, M. Nagao, S. Watauchi, I. Tanaka, H. Okazaki, Y. Takano, Y. Mizuguchi, H. Usui, K. Suzuki, K. Kuroki, T. Wakita, Y. Muraoka and T. Yokoya
J. Phys: Conference Series **683**, 012003 (2016)

3. Intrinsic spin polarized electronic structure of CrO_2 epitaxial film revealed by bulk-sensitive spin-resolved photoemission spectroscopy

Hirokazu Fujiwara, Masanori Sunagawa, Kensei Terashima, Tomoko Kittaka, Takanori Wakita, Yuji Muraoka, and Takayoshi Yokoya
Appl. Phys. Lett. **106**, 202404 (2015).

4. Preparation of TaO_2 thin films using NbO_2 template layers by a pulsed laser deposition technique

Y. Muraoka, Y. Fujimoto, M. Kameoka, Y. Matsuura, M. Sunagawa, K. Terashima, T. Wakita, T. Yokoya
Thin Solid Films **599**, 125 (2016).

5. Electronic Structures of $\text{CeM}_2\text{Al}_{10}$ ($M = \text{Fe, Ru, and Os}$) Studied by Soft X-ray Resonant and High-Resolution Photoemission Spectroscopies

Toshihiko Ishiga, Takanori Wakita, Rikiya Yoshida, Hiroyuki Okazaki, Koji Tsubota, Masanori Sunagawa, Kanta Uenaka, Kozo Okada, Hiroshi Kumigashira, Masaharu Oshima, Keisuke Yutani, Yuji Muro, Toshiro Takabatake, Yuji Muraoka, and Takayoshi Yokoya
J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 094717 (2014).

6. Proximity to Fermi-surface topological change in superconducting $\text{LaO}_{0.54}\text{F}_{0.46}\text{BiS}_2$

Kensei Terashima, Junki Sonoyama, Takanori Wakita, Masanori Sunagawa, Kanta Ono, Hiroshi Kumigashira, Takayuki Muro, Masanori Nagao, Satoshi Watauchi, Isao Tanaka, Hiroyuki Okazaki, Yoshihiko Takano, Osuke Miura, Yoshikazu Mizuguchi, Hidetomo Usui, Katsuhiko Suzuki, Kazuhiko Kuroki, Yuji Muraoka, and Takayoshi Yokoya
Phys. Rev. B **90**, 220512 (2014).

7. Soft x-ray photoemission study of new BiS_2 -layered superconductor $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$

S. Nagira, J. Sonoyama, T. Wakita, M. Sunagawa, Y. Izumi, T. Muro, H. Kumigashira, M. Oshima, K. Deguchi, H. Okazaki, Y. Takano, O. Miura, Y. Mizuguchi, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, K. Okada, Y. Muraoka, and T. Yokoya
J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 033703 (2014).

8. Collapsed tetragonal phase transition of $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{As}_2$ studied with photoemission spectroscopy

Koji Tsubota, Takanori Wakita, Hiroki Nagao, Chiaki Hiramatsu, Toshihiko Ishiga, Masanori Sunagawa, Kanta Ono, Hiroshi Kumigashira, Masataka Danura, Kazutaka Kudo, Minoru Nohara, Yuji Muraoka, Takayoshi Yokoya
J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 073705 (2013).

9. Translational symmetry breaking and gapping of heavy-quasiparticle pocket in URu_2Si_2

R. Yoshida, K. Tsubota, T. Ishiga, M. Sunagawa, J. Sonoyama, D. Aoki, J. Flouquet, T. Wakita, Y. Muraoka, and T. Yokoya
Sci. Rep. **3**, 2750/1-6 (2013).

10. Observation of Intrinsic Half-metallic Behavior of CrO_2 (100) Epitaxial Films by Bulk-sensitive Spin-resolved PES

Hirokazu Fujiwara, Masanori Sunagawa, Kensei Terashima, Tomoko Kittaka,

Takanori Wakita, Yuji Muraoka, and Takayoshi Yokoya

Accepted for publication on Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena.

B.2 学会発表

(国内学会)

1. $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ の角度分解光電子分光

砂川正典, 吉田力矢, 坪田幸士, 石賀敏彦, 蛇淵泰平, 園山純生, 垣谷知美, 光岡大輔, 工藤一貴, 野原実, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

京都大学基礎物理学研究所研究会「鉄系高温超伝導の物理～スピン・軌道・格子～」, P6, (京都大学吉田キャンパス湯川記念館, 2012年6月21日)

2. 角度分解光電子分光法による $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ の電子状態

砂川正典, 吉田力矢, 坪田幸士, 石賀敏彦, 蛇淵泰平, 園山純生, 垣谷知美, 光岡大輔, 工藤一貴, 野原実, 姜健, 岩澤英明, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 小野寛太, 組頭広志, 尾嶋正治, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会第67回年次大会, 20-aGA, (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012年9月20日)

3. 角度分解光電子分光法による La,P コドープ CaFe_2As_2 の電子状態

砂川正典, 石賀敏彦, 坪田幸士, 蛇淵泰平, 園山純生, 柳楽伸介, 伊庭恵太, 工藤一貴, 野原実, 小野寛太, 組頭広志, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

第1回物構研サイエンスフェスタ, 001A, (エポカルつくば, 2013年3月14日)

4. La,P コドープ CaFe_2As_2 の角度分解光電子分光

砂川正典, 石賀敏彦, 坪田幸士, 蛇淵泰平, 園山純生, 柳楽伸介, 伊庭恵太, 工藤一貴, 野原実, 小野寛太, 組頭広志, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会第68回年次大会, 26aXG-8, (広島大学東広島キャンパス, 2013年3月26日)

5. La,P コドープ CaFe_2As_2 の角度分解光電子分光 II

砂川正典, 蛇淵泰平, 園山純生, 藤原弘和, 伊庭恵太, 工藤一貴, 野原実, 小野寛太, 組頭広志, 有田将司, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会第 69 回年次大会, 26aEC-10, (徳島大学キャンパス, 2013 年 9 月 26 日)

6. $T_c = 45$ K を発現する電子ドープ CaFe_2As_2 の電子状態

砂川正典, 蛇淵泰平, 園山純生, 藤原弘和, 伊庭恵太, 工藤一貴, 野原実, 小野寛太, 組頭広志, 有田将司, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

京都大学基礎物理学研究所研究会「鉄系高温超伝導の物理～スピンと軌道の協奏～」, P5, (京都大学吉田キャンパス湯川記念館, 2013 年 10 月 8 日)

7. $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ の角度分解光電子分光

砂川正典, 寺嶋健成, 濱田貴裕, 藤原弘和, 田中将嗣, 竹屋浩幸, 高野義彦, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会 2014 年秋期大会, 26aXG-8, (広島大学東広島キャンパス, 2014 年 9 月 9 日)

8. $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ におけるホールフェルミ面の観測

砂川正典, 寺嶋健成, 濱田貴裕, 藤原弘和, 田中将嗣, 竹屋浩幸, 高野義彦, 有田将司, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 鈴木雄大, 臼井秀知, 黒木和彦, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会第 69 回年次大会, 26aEC-10, (徳島大学キャンパス, 2015 年 3 月 21 日)

9. $\text{K}_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ の角度分解光電子分光 II

砂川正典, 寺嶋健成, 濱田貴裕, 藤原弘和, 竹田彩, 福良哲司, 田中将嗣, 竹屋浩幸, 高野義彦, 有田将司, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 鈴木雄大, 臼井秀知, 黒木和彦, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会 2015 年秋季大会, 16aDB-6, (関西大学千里山キャンパス, 2015 年 9 月 16 日)

10. 角度分解光電子分光による $A_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ ($A=\text{K}, \text{Rb}$) の電子状態研究

砂川正典, 寺嶋健成, 濱田貴裕, 藤原弘和, 竹田彩, 福良哲司, 田中将嗣, 竹屋浩幸, 高野義彦, 有田将司, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 鈴木雄大, 臼井秀知, 黒木和彦, 脇田高德, 村岡祐治, 横谷尚睦

日本物理学会 2016 年春季大会, 15aJB-1, (金沢大学角間キャンパス, 2016 年 9 月 15 日)

(国際学会)

1. Electronic structure of iron-platinum-arsenide $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ studied by angle-resolved photoemission spectroscopy

M. Sunagawa, R. Yoshida, K. Tsubota, T. Ishiga, T. Jabuchi, J. Sonoyama, S. Kakiya, D. Mitsuoka, K. Kudo, M. Nohara, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ono, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Wakita, Y. Muraoka, and T. Yokoya

International Symposium on Physics and Chemistry of Novel Superconductors and Related Materials (Okayama, October 2012)

2. Angle-resolved photoemission spectroscopy study of high- T_c iron-based superconductor $\text{Ca}_{0.82}\text{La}_{0.18}\text{Fe}_2(\text{As}_{0.94}\text{P}_{0.06})_2$

M. Sunagawa, T. Ishiga, K. Tsubota, T. Jabuchi, J. Sonoyama, K. Iba, K. Kudo, M. Nohara, K. Ono, H. Kumigashira, T. Wakita, Y. Muraoka, and T. Yokoya

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, (Tokyo, August 2013)

3. Observation of the Two Dimensional Fermi Surface Topology in Electron-doped CaFe_2As_2 Superconductor with $T_c = 45$ K

M. Sunagawa, T. Jabuchi, J. Sonoyama, H. Fujiwara, K. Iba, K. Kudo, M. Nohara, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya, K. Ono, H. Kumigashira, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi

International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013, (Tokyo, November 2013)

4. Angle-resolved photoemission spectroscopy study of La and P co-doped CaFe_2As_2 superconductor

M. Sunagawa, T. Jabuchi, J. Sonoyama, K. Iba, K. Kudo, M. Nohara, K. Ono, H. Kumigashira, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Wakita, Y. Muraoka, and T. Yokoya

The 18th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, (Hiroshima, March 2014)

5. Electronic structure of $K_xFe_{2-y}Se_2$ superconductor studied by angle-resolved photoemission spectroscopy

M. Sunagawa, K. Terashima, T. Hamada, H. Fujiwara, M. Tanaka, H. Takeya, Y. Takano, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya

Ushimado International Workshop, (Okayama, November 2014)

6. Polarization and photon-energy dependent ARPES study on K-doped iron-selenide superconductor

M. Sunagawa, K. Terashima, T. Hamada, H. Fujiwara, M. Tanaka, H. Takeya, Y. Takano, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya

The 19th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, (Hiroshima, March 2015)

7. Electronic Structure of $A_xFe_{2-y}Se_2$ (A=K,Rb) superconductor studied by ARPES

M. Sunagawa, K. Terashima, T. Fukura, A. Takeda, H. Fujiwara, M. Tanaka, H. Takeya, Y. Takano, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya

International Workshop on Superconductivity and Related Functional Materials 2016, (Ibaraki, December 2016)

8. Angle-resolved Photoemission Spectroscopy Study on $Rb_xFe_{2-y}Se_2$ superconductor

M. Sunagawa, K. Terashima, T. Fukura, A. Takeda, H. Fujiwara, M. Tanaka, H. Takeya, Y. Takano, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya

『The 21th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation』、Hiroshima, Japan、 (March 2017)

9. Temperature-dependent Angle-resolved Photoemission Spectroscopy Study on $K_xFe_{2-y}Se_2$ superconductor

M. Sunagawa, K. Terashima, T. Fukura, A. Takeda, H. Fujiwara, M. Tanaka, H. Takeya, Y. Takano, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, T. Wakita, Y. Muraoka, T. Yokoya

『The 21th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation』、Hiroshima, Japan、 (March 2017)

参考文献

- [1] H. Hosono and K. Kuroki, *Physica C* **514**, 399-422 (2015).
- [2] S. Kakiya, K. Kudo, Y. Nishikubo, K. Oku, E. Nishibori, H. Sawa, T. Yamamoto, T. Nozaka, and M. Nohara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 093704 (2011).
- [3] K. Kudo, D. Mitsuoka, M. Takasuga, Y. Sugiyama, K. Sugawara, N. Katayama, H. Sawa, H. S. Kubo, K. Takamori, M. Ichioka, T. Fujii, T. Mizokawa, and M. Nohara, *Sci. Rep.* **3**, 3101 (2013).
- [4] N. Katayama, K. Kudo, S. Onari, T. Mizukami, K. Sugawara, Y. Sugiyama, Y. Kitahama, K. Iba, K. Fujimura, N. Nishimoto, M. Nohara, and H. Sawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **82**, 123702 (2013).
- [5] X. Wu, C. Le, Y. Liang, S. Qin, H. Fan, and J. Hu, *Phys. Rev. B* **89**, 205102 (2014).
- [6] M. Y. Li, Z. T. Liu, W. Zhou, H. F. Yang, D. W. Shen, W. Li, J. Jiang, X. H. Niu, B. P. Xie, Y. Sun, C. C. Fan, Q. Yao, J. S. Liu, Z. X. Shi, and X. M. Xie, *Phys. Rev. B* **91**, 045112 (2015).
- [7] A. Ricci, N. Poccia, G. Campi, B. Joseph, G. Arrighetti, L. Barba, M. Reynolds, M. Burghammer, H. Takeya, Y. Mizuguchi, Y. Takano, M. Colapietro, N. L. Saini, and A. Bianconi, *Phys. Rev. B* **84**, 060511(R) (2011).
- [8] M. Tanaka, Y. Yanagisawa, S. Denholme, M. Fujioka, S. Funahashi, Y. Matsushita, N. Ishizawa, T. Yamaguchi, H. Takeya, and Y. Takano, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 044710 (2016).
- [9] C. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Kito, M. T. Diaz, To. Ito, K. Kihou, H. Matsuhata, M. Braden, K. Yamada, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 083704 (2008).
- [10] Y. Mizuguchi, Y. Hara, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, K. Takeda, H. Kotegawa, H. Tou, and Y. Takano, *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 054013 (2010).
- [11] K. Kuroki, H. Usui, S. Onari, R. Arita, and H. Aoki, *Phys. Rev. B* **79**, 224511 (2009).
- [12] H. Usui, K. Suzuki, and K. Kuroki, *Sci. Rep.* **5**, 11399 (2015).

- [13] D. J. Singh, and M.-H. Du, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 237003 (2008).
- [14] K. Kuroki, S. Onari, R. Arita, H. Usui, Y. Tanaka, H. Kontani, and H. Aoki, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 087004 (2008).
- [15] P. Richard, T. Sato, K. Nakayama, T. Takahashi, and H. Ding, *Rep. Prog. Phys.* **74**, 124512 (2011).
- [16] Y. Kamihara, T. Watanabe, H. Masahiro, and H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008).
- [17] K. Haule, J. H. Shim, and G. Kotliar, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 226402 (2008).
- [18] I. Mazin *Nature* **464**, 183-186 (2010).
- [19] T. Kluge, Y. Koike, A. Fujiwara, M. Kato, T. Noji, and Y. Saito, *Phys. Rev. B* **52**, R727 (1995).
- [20] S. Nandi, M. G. Kim, A. Kreyssig, R. M. Fernandes, D. K. Pratt, A. Thaler, N. Ni, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, J. Schmalian, R. J. McQueeney, and A. I. Goldman, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 057006 (2010).
- [21] M. Nohara, S. Kakiya, K. Kudo, Y. Oshiro, S. Araki, T. C. Kobayashi, K. Oku, E. Nishibori, H. Sawa, *Solid State Commun.* **152**, 635 (2012).
- [22] J. M. Allred, K. M. Taddei, D. E. Bugaris, S. Avci, D. Y. Chung, H. Claus, C. dela Cruz, M. G. Kanatzidis, S. Rosenkranz, R. Osborn, and O. Chmaissem, *Phys. Rev. B* **90**, 104513 (2014).
- [23] T. J. Liu, J. Hu, B. Qian, D. Fobes, Z. Q. Mao, W. Bao, M. Reehuis, S. A. J. Kimber, K. Prokeš, S. Matas, D. N. Argyriou, A. Hiess, A. Rotaru, H. Pham, L. Spinu, Y. Qiu, V. Thampy, A. T. Savici, J. A. Rodriguez, C. Broholm, *Nat. Mater.* **9**, 718 (2010).
- [24] J. Dong, H. J. Zhang, G. Xu, Z. Li, G. Li, W. Z. Hu, D. Wu, G. F. Chen, X. Dai, J. L. Luo, Z. Fang, N. L. Wang, *Europhys. Lett.* **83**, 27007 (2008).
- [25] T Nomura, S W Kim, Y Kamihara, M Hirano, P V Sushko⁴, K Kato, M Takata, A L Shluger, H Hosono, *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 124028 (2008).
- [26] P. J. Hirschfeld, M. M. Korshunov, I. I. Mazin, *Rep. Prog. Phys.* **74**, 124508 (2011).
- [27] T. Yildirim, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 057010 (2008).
- [28] R. M. Fernandes, A. V. Chubukov, J. Schmalian, *Nat. Phys.* **10**, 97 (2014).
- [29] J.-H. Chu, J. G. Analytis, K. D. Greve, P. L. McMahon, Z. Islam, Y. Yamamoto, I. R. Fisher, *Science* **329**, 824 (2010).

- [30] C. Fang, H. Yao, W. Tsai, J. Hu, S. A. Kivelson, *Phys. Rev. B* **77**, 224509 (2008).
- [31] R. M. Fernandes, A. V. Chubukov, J. Knolle, I. Eremin, J. Schmalian, *Phys. Rev. B* **85**, 024534 (2012).
- [32] H. Yamase, R. Zeyher, *Phys. Rev. B* **88**, 180502(R) (2013).
- [33] M. Yi, D. Lu, J.-H. Chu, J. G. Analytis, A. P. Sorini, A. F. Kemper, B. Moritz, S.-K. Mo, R. G. Moore, M. Hashimoto, W.-S. Lee, Z. Hussain, T. P. Devereaux, I. R. Fisher, Z.-X. Shen, *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **108**, 6878–6883 (2011).
- [34] M. Yoshizawa, D. Kimura, T. Chiba, S. Simayi, Y. Nakanishi, K. Kihou, C.-H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, M. Nakajima, S. Uchida, *J. Phys. Soc. Jpn* **81**, 024604 (2012).
- [35] S. Onari, H. Kontani, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 137001 (2012).
- [36] C.-T. Chen, C. C. Tsuei, M. B. Ketchen, Z.-A. Ren, Z. X. Zhao, *Nat. Phys.* **6**, 260 (2010)
- [37] H.-J. Grafe, D. Paar, G. Lang, N. J. Curro, G. Behr, J. Werner, J. Hamann-Borrero, C. Hess, N. Leps, R. Klingeler, B. Büchner, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 047003 (2008).
- [38] K. Matano, Z.A. Ren, X.L. Dong, L.L. Sun, Z.X. Zhao, G. Zheng, *Europhys. Lett.* **83**, 57001 (2008).
- [39] K. Matano, Z. Li, G. L. Sun, D. L. Sun, C. T. Lin, M. Ichioka, G. Zheng, *Europhys. Lett.* **87**, 27012 (2009).
- [40] I. I. Mazin, D. J. Singh, M. D. Johannes, M. H. Du, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 057003 (2008).
- [41] Y. Yanagi, Y. Yamakawa, Y. Ōno, *Phys. Rev. B* **81**, 054518 (2010).
- [42] S. Onari, H. Kontani, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 157001 (2010).
- [43] A. D. Christianson, E. A. Goremychkin, R. Osborn, S. Rosenkranz, M. D. Lumsden, C. D. Malliakas, I. S. Todorov, H. Claus, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis, R. I. Bewley, T. Guidi, *Nature* **456**, 930 (2008).
- [44] D. S. Inosov, J. T. Park, P. Bourges, D. L. Sun, Y. Sidis, A. Schneidewind, K. Hradil, D. Haug, C. T. Lin, B. Keimer, V. Hinkov, *Nat. Phys.* **6**, 178 (2010).
- [45] T. Hanguri, S. Niitaka, K. Kuroki, H. Takagi, *Science* **328**, 474 (2010).
- [46] M. Sato, Y. Kobayashi, S. Lee, H. Takahashi, E. Satomi, Y. Miura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 014710 (2010)
- [47] S. Onari, H. Kontani, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 177001 (2009).
- [48] S. Onari, H. Kontani, *Phys. Rev. B* **84**, 144518 (2011).

- [49] I. Nishi, M. Ishikado, S. Ideta, W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, Y. Kotani, M. Kubota, K. Ono, M. Yi, D. H. Lu, R. Moore, Z.-X. Shen, A. Iyo, K. Kihou, H. Kito, H. Eisaki, S. Shamoto, R. Arita, *Phys. Rev. B* **84**, 014504
- [50] A. Charnukha, S. Thirupathaiah, V. B. Zabolotnyy, B. Büchner, N. D. Zhigadlo, B. Batlogg, A. N. Yaresko, S. V. Borisenko, *Sci. Rep.* **5**, 10392 (2015).
- [51] P. Zhang, J. Ma, T. Qian, Y. G. Shi, A. V. Fedorov, J. D. Denlinger, X. X. Wu, J. P. Hu, P. Richard, H. Ding, *Phys. Rev. B* **94**, 104517 (2016).
- [52] Y. Zhang, L. X. Yang, F. Chen, B. Zhou, X. F. Wang, X. H. Chen, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, J. P. Hu, B. P. Xie, D. L. Feng, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 117003 (2010).
- [53] Y-M. Xu, Y-B. Huang, X-Y. Cui, E. Razzoli, M. Radovic, M. Shi, G-F. Chen, P. Zheng, N-L. Wang, C-L. Zhang, P-C. Dai, J-P. Hu, Z. Wang, H. Ding, *Nat. Phys.* **7**, 198 (2011).
- [54] W. Malaeb, T. Yoshida, A. Fujimori, M. Kubota, K. Ono, K. Kihou, P. M. Shirage, H. Kito, A. Iyo, H. Eisaki, Y. Nakajima, T. Tamegai, R. Arita, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 123706 (2009).
- [55] C. Liu, A. D. Palczewski, R. S. Dhaka, Takeshi Kondo, R. M. Fernandes, E. D. Mun, H. Hodovanets, A. N. Thaler, J. Schmalian, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, A. Kaminski, *Phys. Rev. B* **84**, 020509(R) (2011).
- [56] K. Kudo, K. Iba, M. Takasuga, Y. Kitahama, J. Matsumura, M. Danura, Y. Nogami, M. Nohara, *Sci. Rep.* **3**, 1478 (2013).
- [57] H. Ding, P. Richard, K. Nakayama, T. Sugawara, T. Arakane, Y. Sekiba, A. Takayama, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, Z. Wang, X. Dai, Z. Fang, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, *Europhys. Lett.* **83**, 47001 (2008).
- [58] P. Zhang, P. Richard, T. Qian, X. Shi, J. Ma, L.-K. Zeng, X.-P. Wang, E. Rienks, C.-L. Zhang, Pengcheng Dai, Y.-Z. You, Z.-Y. Weng, X.-X. Wu, J.P. Hu, H. Ding, *Phys. Rev. X* **4**, 031001 (2014).
- [59] T. Shimojima, T. Shimojima, F. Sakaguchi, K. Ishizaka, Y. Ishida, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, C.-T. Chen, S. Watanabe, M. Arita, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, K. Ohgushi, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Chainani, S. Shin, *Science* **332**, 564 (2011).
- [60] J. G. Guo, S. F. Jin, G. Wang, S. C. Wang, K. X. Zhu, T. T. Zhou, M. He, and X. L. Chen, *Phys. Rev. B* **82**, 180520 (2010).
- [61] D. Fang, Z. Wang, H. Yang, J. Liu, Q. Deng, G. Ma, C. Meng, Y. Hu, H.-H. Wen,

- Nat. Commun. **4**, 1897 (2013).
- [62] Z. Shermadini, H. Luetkens, R. Khasanov, A. Krzton-Maziopa, K. Conder, E. Pomjakushina, H-H. Klauss, A. Amato, Phys. Rev. B **85**, 100501(R)
- [63] T. Ozaki, H. Takeya, H. Okazaki, K. Deguchi, S. Demura, Y. Kawasaki, H. Hara, T. Watanabe, T. Yamaguchi, Y. Takano, Europhys. Lett. **98**, 27002 (2012).
- [64] A. F. Ye, S. Chi, Wei Bao, X. F. Wang, J. J. Ying, X. H. Chen, H. D. Wang, C. H. Dong, M. Fang, Phys. Rev. Lett. **107**, 137003 (2011).
- [65] S Y. Texier, J. Deisenhofer, V. Tsurkan, A. Loidl, D. S. Inosov, G. Friemel, and J. Bobroff, Phys. Rev. Lett. **108**, 237002 (2012).
- [66] W. Li, H. Ding, P. Deng, K. Chang, C. Song, K. He, L. Wang, X. Ma, J. Hu, X. Chen, Q. Xue, Nat. Phys. **8**, 126 (2011).
- [67] M. Bendele, A. Barinov, B. Joseph, D. Innocenti, A. Iadecola, A. Bianconi, H. Takeya, Y. Mizuguchi, Y. Takano, T. Noji, T. Hatakeda, Y. Koike, M. Horio, A. Fujimori, D. Ootsuki, T. Mizokawa, N. L. Saini, Sci. Rep. **4**, 5592 (2014).
- [68] B. Zeng, B. Shen, G. F. Chen, J. B. He, D. M. Wang, C. H. Li, H. H. Wen, Phys. Rev. B **83**, 144511 (2011).
- [69] G. Friemel, J. T. Park, T. A. Maier, V. Tsurkan, Y. Li, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, A. Loidl, A. Ivanov, B. Keimer, D. S. Inosov, Phys. Rev. B **85**, 140511 (2012).
- [70] Q. Wang, J. T. Park, Y. Feng, Y. Shen, Y. Hao, B. Pan, J. W. Lynn, A. Ivanov, S. Chi, M. Matsuda, H. Cao, R. J. Birgeneau, D. V. Efremov, J. Zhao, Phys. Rev. Lett. **116**, 197004 (2016)
- [71] S. Onari, H. Kontani, M. Sato, Phys. Rev. B **81**, 060504 (2010).
- [72] L. Sun, X.J. Chen, J. Guo, P. Gao, Q.-Z. Huang, H. Wang, M. Fang, X. Chen, G. Chen, Q. Wu, C. Zhang, D. Gu, X. Dong, L. Wang, K. Yang, A. Li, X. Dai, H. Mao, Z. Zhao, Nature **483**, 67-69 (2011).
- [73] Y. Yamamoto, H. Yamaoka, M. Tanaka, H. Okazaki, T. Ozaki, Y. Takano, J. Lin, H. Fujita, T. Kagayama, K. Shimizu, N. Hiraoka, H. Ishii, Y. Liao, K. Tsuei, J. Mizuki, Sci. Rep. **6**, 30946 (2016).
- [74] J. Ying, L. Tang, V. Struzhkin, H. Mao, A. Gavriluk, A. Wang, X. Chen, X. Chen, arXiv:1501.00330 (2015).
- [75] D. Guterding, S. Backes, H. Jeschke, R. Valentí, Phys. Rev. B **91**, 140503(R) (2015).

- [76] L. Simonelli, T. Mizokawa, M. Moretti Sala, H. Takeya, Y. Mizuguchi, Y. Takano, G. Garbarino, G. Monaco, N. L. Saini, *Phys. Rev. B* **90**, 214516 (2014).
- [77] A. Ricci, N. Poccia, B. Joseph, D. Innocenti, G. Campi, A. Zozulya, F. Westermeier, A. Schavkan, F. Coneri, A. Biancoconi, H. Takeya, Y. Mizuguchi, Y. Takano, T. Mizokawa, M. Sprung, N. L. Saini, *Phys. Rev. B* **91**, 020503(R) (2015).
- [78] Y. Zhang, L. X. Yang, M. Xu, Z. R. Ye, F. Chen, C. He, H. C. Xu, J. Jiang, B. P. Xie, J. J. Ying, X. F. Wang, X. H. Chen, J. P. Hu, M. Matsunami, S. Kimura, D. L. Feng, *Nat. Mater.* **10**, 273 (2011).
- [79] X.-P. Wang, P. Richard, A. van Roekeghem, Y.-B. Huang, E. Razzoli, T. Qian, E. Rienks, S. Thirupathaiah, H.-D. Wang, C.-H. Dong, M.-H. Fang, M. Shi, H. Ding, *Europhys. Lett.* **99**, 67001 (2012).
- [80] M. Xu, Q. Q. Ge, R. Peng, Z. R. Ye, J. Jiang, F. Chen, X. P. Shen, B. P. Xie, Y. Zhang, A. F. Wang, X. F. Wang, X. H. Chen, D. L. Feng, *Phys. Rev. B* **85**, 220504 (2012).
- [81] M. Yi, D. H. Lu, R. Yu, S. C. Riggs, J.-H. Chu, B. Lv, Z. K. Liu, M. Lu, Y.-T. Cui, M. Hashimoto, S.-K. Mo, Z. Hussain, C. W. Chu, I. R. Fisher, Q. Si, Z.-X. Shen, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 067003 (2013).
- [82] T. A. Maier, S. Graser, P. J. Hirschfeld, and D. J. Scalapino, *Phys. Rev. B* **83**, 100515 (2011).
- [83] I. I. Mazin, *Phys. Rev. B* **84**, 024529 (2011).
- [84] M. Khodas and A. V. Chubukov, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 247003 (2012).
- [85] A. Kreisel, Y. Wang, T. A. Maier, P. J. Hirschfeld, and D. J. Scalapino, *Phys. Rev. B* **88**, 094522 (2013).
- [86] F. Wang, F. Yang, M. Gao, Z.-Y. Lu, T. Xiang, and D.-H. Lee, *Europhys. Lett.* **93**, 57003 (2011).
- [87] T. Saito, S. Onari, and H. Kontani, *Phys. Rev. B* **83**, 140512 (2011).
- [88] F. Hsu, J. Luo, K. Yeh, T. Chen, T. Huang, P. Wu, Y. Lee, Y. Huang, Y. Chu, D. Yan, M. Wu, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105**, 142621, (2008).
- [89] T. M. McQueen, A. J. Williams, P. W. Stephens, J. Tao, Y. Zhu, V. Ksenofontov, F. Casper, C. Felser, and R. J. Cava, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 057002 (2009).
- [90] K. Nakayama, Y. Miyata, G. N. Phan, T. Sato, Y. Tanabe, T. Urata, K. Tanigaki, and T. Takahashi, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 237001 (2014).
- [91] Y. Suzuki, T. Shimojima, T. Sonobe, A. Nakamura, M. Sakano, H. Tsuji, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, T. Watashige, R. Kobayashi, S.

- Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Yamakawa, H. Kontani, K. Ishizaka, *Phys. Rev. B* **92**, 205117 (2015).
- [92] S. Onari, Y. Yamakawa, H. Kontani, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 227001 (2016).
- [93] S. He, J. He, W. Zhang, L. Zhao, D. Liu, X. Liu, D. Mou, Y.-B. Ou, Q.-Y. Wang, Z. Li, L. Wang, Y. Peng, Y. Liu, C. Chen, L. Yu, G. Liu, X. Dong, J. Zhang, C. Chen, Z. Xu, X. Chen, X. Ma, Q. Xue, X. J. Zhou, *Nat. Mater.* **12**, 605 (2013).
- [94] J. Ge, Z. Liu, C. Liu, C.-L. Gao, D. Qian, Q.-K. Xue, Y. Liu, J.-F. Jia, *Nat. Mater.* **14**, 285 (2015).
- [95] Q. Wang, Z. Li, W. Zhang, Z. Zhang, J. Zhang, W. Li, H. Ding, Y. Ou, P. Deng, K. Chang, *Chin. Phys. Lett.* **29**, 037402 (2012).
- [96] D. F. Liu, W. H. Zhang, D. X. Mou, J. F. He, Y.-B. Ou, Q.-Y. Wang, Z. Li, L. Wang, L. Zhao, S. He, Y. Y. Peng, X. Liu, C. Y. Chen, L. Yu, G. D. Liu, X. L. Dong, J. Zhang, C. T. Chen, Z. Y. Xu, J. P. Hu, X. Chen, X. C. Ma, Q. Xue, and X. J. Zhou, *Nat. Commun.* **3**, 931 (2012).
- [97] S. Y. Tan, Y. Zhang, M. Xia, Z. R. Ye, F. Chen, X. Xie, R. Peng, D. F. Xu, Q. Fan, H. C. Xu, J. Jiang, T. Zhang, X. C. Lai, T. Xiang, J. P. Hu, B. P. Xie, and D. L. Feng, *Nat. Mater.* **12**, 634 (2013).
- [98] Z. Zhang, Y. Wang, Q. Song, C. Liu, R. Peng, K.A. Moler, D. L. Feng, Y. Wang, *Sci Bull.* **60**(14), 1301 (2015).
- [99] J. J. Lee, F. T. Schmitt, R. G. Moore, S. Johnston, Y.-T. Cui, W. Li, M. Yi, Z. K. Liu, M. Hashimoto, Y. Zhang, D. H. Lu, T. P. Devereaux, D.-H. Lee, Z.-X. Shen, *Nature* **515**, 245 (2014).
- [100] Y. Miyata, K. Nakayama, K. Sugawara, T. Sato, T. Takahashi, *Nat. Mater.* **14**, 775 (2015).
- [101] S. Rebec, T. Jia, C. Zhang, M. Hashimoto, D. Lu, R. Moore, Z. X. Shen, *arXiv:1606.09358* (2016).
- [102] E. Kisker, R. Clauberg, W. Gudat, *Rev. Sci. Instrum.* **53**, 1137 (1982).
- [103] T. Okuda, Y. Takeichi, Y. Maeda, A. Harasawa, I. Matsuda, T. Kinoshita, A. Kakizaki, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 123117 (2008).
- [104] P. Dudin, P. Lacovig, C. Fava, E. Nicolini, A. Bianco, G. Cautero, A. Barinov, *Synchrotron Rad.* **17**, 445-450 (2010).
- [105] F. J. Himpsel, *Adv. Phys.* **32**, 1 (1983).
- [106] E. W. Plummer and W. Eberhardt, "Angle-resolved photoemission as a tool for the study of surface", p557.
- [107] 伊達 宗行, 福山 秀敏, 安藤 恒也, 山田 耕作, 大学院物性物理, 「強相関

電子系」

- [108] Y. Zhang, F. Chen, C. He, B. Zhou, B. P. Xie, C. Fang, W. F. Tsai, X. H. Chen, H. Hayashi, J. Jiang, H. Iwasawa, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, J. P. Hu, and D. L. Feng, *Phys. Rev. B* **83**, 054510 (2011).
- [109] Z. R. Ye, Y. Zhang, F. Chen, M. Xu, J. Jiang, X.H. Niu, C.H.P. Wen, L.Y. Xing, X.C. Wang, C.Q. Jin, B.P. Xie, and D.L. Feng, *Phys. Rev. X* **4**, 031041 (2014).
- [110] Z. R. Ye, Y. Zhang, B.-P. Xi, and D. L. Feng, *Chin. Phys. B* **22**, 087407 (2013).
- [111] K. Suzuki, H. Usui, S. Iimura, Y. Sato, S. Matsuishi, H. Hosono, and K. Kuroki, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 027002 (2014).
- [112] F. Chen, M. Xu, Q. Q. Ge, Y. Zhang, Z. R. Ye, L. X. Yang, Juan Jiang, B. P. Xie, R. C. Che, M. Zhang, A. F. Wang, X. H. Chen, D. W. Shen, J. P. Hu, D. L. Feng, *Phys. Rev. X* **1**, 021020 (2011).
- [113] M. Yi, Z.-K. Liu, Y. Zhang, R. Yu, J.-X. Zhu, J. J. Lee, R. G. Moore, F. T. Schmitt, W. Li, S. C. Riggs, J.-H. Chu, B. Lv, J. Hu, M. Hashimoto, S.-K. Mo, Z. Hussain, Z. Q. Mao, C. W. Chu, I.R. Fisher, Q. Si, Z.-X. Shen, D. H. Lu, *Nat. Commun.* **6**, 7777 (2015).
- [114] E. Rotenberg, W. Theis, K. Horn, P. Gille, *Nature* **406**, 602 (2000).
- [115] C. Krellner, N. Caroca-Canales, A. Jesche, H. Rosner, A. Ormeci, C. Geibel, *Phys. Rev. B* **78**, 100504 (2008).