

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03688

研究課題名(和文) 超シャロウバンド物質における新奇電子状態と量子凝縮相

研究課題名(英文) Exotic electronic state and quantum condensate in superconductors with ultra-shallow bands

研究代表者

笠原 成 (Kasahara, Shigeru)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：10425556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超シャロウバンド物質である鉄系超伝導体FeSeに焦点をあて、その新奇な電子状態とBCS-BECクロスオーバー領域にある特異な量子凝縮相の解明を行うことを目的とした。その等原子価置換系であるFeSe_{1-x}S_xの純良単結晶の作製に成功し、これを基盤とした様々な精密測定を行うことで、BCS-BECクロスオーバー領域における前駆電子対の描像、磁場中ゼーマン分裂をもたらすスピン偏極状態と新奇超伝導状態、軌道自由度に伴う新しい量子臨界現象、など数多くの重要な発見をすることに成功を収めた。一連の研究成果は、非従来型超伝導体の物理に重要な知見をもたらすものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The superconducting semimetal FeSe has been found to be deep inside the BCS-BEC crossover regime. One of the significant achievements of this project is our successful growth of clean single crystals of FeSe_{1-x}S_x superconductors. Based on that, we have investigated their exotic electronic state and quantum condensate. In FeSe, experimental signatures of preformed Cooper pairing and emergence of a distinct field-induced superconducting phase with an unprecedented large spin imbalance have been discovered. In FeSe_{1-x}S_x superconductors, a novel type of quantum critical point (QCP) of pure nematic order without accompanying other orders is discovered. Moreover, a dramatic change in the superconducting gap structure is found across the nematic QCP of FeSe_{1-x}S_x. These fruitful findings obtained in this project provide pivotal information towards the understanding of exotic superconductors.

研究分野：固体電子物性

キーワード：非従来型超伝導、ネマティック相、超シャロウバンド、BCS-BECクロスオーバー、前駆電子対、超伝導揺らぎ、超伝導ギャップ構造、軌道自由度

1. 研究開始当初の背景

弱い引力相互作用により媒介されたフェルミ粒子対が凝縮する Bardeen – Cooper – Schrieffer (BCS) 状態と、ボース粒子そのものの凝縮である Bose-Einstein 凝縮 (BEC) は、対極の量子凝縮にある。両者は対形成の相互作用と粒子の運動エネルギーに応じて連続的に移行し、このクロスオーバー領域では電子対同士が強く相互作用し合った、非自明な量子凝縮状態が期待されている。BCS-BEC クロスオーバーは、高温超伝導や前駆電子対、擬ギャップ形成、新奇な量子凝縮状態の実現など、凝縮系物理学の重要問題に直結した未開拓物理のフロンティアである。しかしながら、これまでのクロスオーバー領域の研究は冷却原子ガスが主な発展舞台であり、物質中の電子系では相互作用の自由で連続な制御が困難なため、その進展が妨げられてきた。

鉄系超伝導の発見は、電子対形成に対するスピンと軌道の複合自由度の重要性とともに、電子相関や量子相転移、新奇秩序相の存在などの重要問題を研究する格好の舞台を与えた。一連の研究の中で、代表者らは、鉄カルコゲナイド FeSe ($T_c \sim 10$ K) が、バンド端からの有効フェルミエネルギー ε_F (或いはフェルミ温度 T_F) が異常に小さな超シャロウバンド物質であることを見出した [S. Kasahara *et al.*, *PNAS USA* (2014)]. 驚くべきことに、通常金属のフェルミ温度が $T_F \sim 10^5$ K であるのに対し、この物質のそれは僅か数十 K しかない。更にその超伝導は、これまでの物質での超伝導ギャップ Δ が $\Delta/\varepsilon_F \sim 10^{-3} - 10^{-5}$ であるのと対照的に、 $\Delta/\varepsilon_F \sim 1$ という逸脱した値を与える。これはこの系の量子凝縮相がまさに BCS-BEC クロスオーバー領域にあることを示唆する。このような超シャロウバンド超伝導では、磁場中でゼーマン分裂と超伝導ギャップ、更に電子系の有効フェルミエネルギーが拮抗した、これまでにない状態が実現でき、新奇な量子凝縮状態が出現することも期待される。この系の特異な電子状態の起源や量子凝縮状態には解明されるべき問題が山積しており、これらは“超シャロウバンド物質における新奇電子状態と量子凝縮相”という全く新しい未開拓の研究領域に繋がることが大きく期待される。

2. 研究の目的

本研究は、上記の代表者らによる成果に基づいており、超シャロウバンド構造という今までにない新奇電子状態の出現機構解明にはじまり、この特異な電子状態の下で実現する BCS-BEC クロスオーバー領域での量子凝縮相の解明、更にはその自由な制御によって、新たな研究領域の開拓を行うことを目的とした。より具体的には、超シャロウバンド物質である鉄系超伝導体 FeSe に焦点をあて、

- 超シャロウバンド構造を実現する新奇な

秩序状態、およびその出現機構の解明

- BCS-BEC クロスオーバー領域における前駆電子対と擬ギャップの検出と解明
- 磁場中ゼーマン分裂がもたらすスピン偏極状態と新奇超伝導状態の解明
- 電子状態制御による軌道自由度の量子臨界現象、及び BCS-BEC クロスオーバーの新展開

を中核的課題として研究を行なうことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、まず、化学蒸気輸送法による次世代純良単結晶の作製に取り組んだ。特に、FeSe において、Se 原子を等原子価の S で置換した FeSe_{1-x}S_x 系の純良単結晶を作製することで、電子状態を担う二次元 Fe 平面を乱すことなく化学的圧力を導入し、物理圧力下では不可能であった種々の精密実験を常圧下で可能とすることを試みた。これにより FeSe において $T_c \sim 90$ K で出現する構造相転移 (ネマティック相転移) を完全に抑制し、ネマティック相から非ネマティック相までの幅広い組成範囲に渡って、量子振動現象が観測されるほどの純良単結晶を得ることに成功した。この FeSe_{1-x}S_x 純良単結晶を基軸として、電子輸送測定、熱輸送測定、熱電係数測定、磁気トルク測定、走査型トンネル顕微鏡測定など、各種の精密物性測定による多角的に研究に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) BCS-BEC クロスオーバー領域における量子凝縮状態の研究

・クロスオーバー領域における前駆電子対の研究

BCS-BEC クロスオーバー領域では、超伝導転移温度(凝縮温度)より高温において前駆電子対 (preformed pairs) と呼ばれるクーバー対の前駆体が形成されることが理論提唱されている。前駆電子対やこれを起源とした擬ギャップ形成は、過去、冷却原子系や銅酸化物高温超伝導においても数多くの議論がされてきた凝縮系物理学の重要問題の一つだが、その存在の有無について、全くコンセンサスは得られていない。FeSe の超シャロウバンドを舞台として BCS-BEC クロスオーバー領域での前駆電子対の描像を見出せれば、物質の枠組みを超えた物理が開拓される。そこで本研究では FeSe において超高感度の磁気トルク測定、熱電係数測定、核磁気共鳴測定を行ない、超伝導転移温度以上における前駆電子対形成に関して研究を行った。まず、精密磁気トルク測定により、通常の高スピン揺らぎを大きく超える“巨大な超伝導揺らぎ”が超伝導転移温度より2倍以上高い $T^* \sim 20$ K から現れることを見出した。また熱電係数、及び核磁気共鳴測定からは、 T^* 以下の温度域において、状態密度の減少、即ち、擬ギャップ形成を示す結果を得るに至った。更に興味深

い特徴として、反磁性応答にみられる巨大超伝導揺らぎが弱磁場で急速に抑制されるのに対し、擬ギャップ的振る舞いについては高磁場まで顕著に存在することが明らかになった。これは、各々の前駆電子対の結びつきにあたる位相揺らぎが磁場中で急速に抑制されるのに対し、前駆電子対の存在そのものによってもたらされる擬ギャップは安定して磁場中でも存在することを示していると解釈できる。一連の結果は、BCS-BEC クロスオーバー領域での前駆電子対の描像について、新しい知見を与えるものと考えられる。

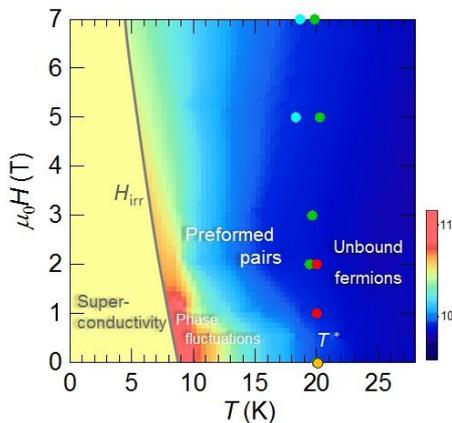


図 1. FeSe の温度-磁場相図。カラープロットは磁気トルクにみられる反磁性応答を示し、 T^* ($> T_c$) 以下の温度域において前駆電子対が形成されていると考えられる。

[S. Kasahara *et al.*, *Nat. commun.* (2015)].

・スピン偏極をもたらす新奇超伝導相の研究

FeSe のような BCS-BEC クロスオーバー領域にある超伝導では、強磁場中で従来の物質では実現し得ない大きなスピン偏極を誘起可能であり、Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態などの非自明な超伝導状態が実現することが期待される。本研究では、このような新奇超伝導状態の探索と解明を目的として、ドイツ・ドレスデン強磁場研究所において、最大 20 T までの熱伝導率および熱ホール効果の測定を行なった。詳細な磁場中測定の結果、この物質の超伝導状態では、およそ 1.5 K 以下の極低温において、上部臨界磁場

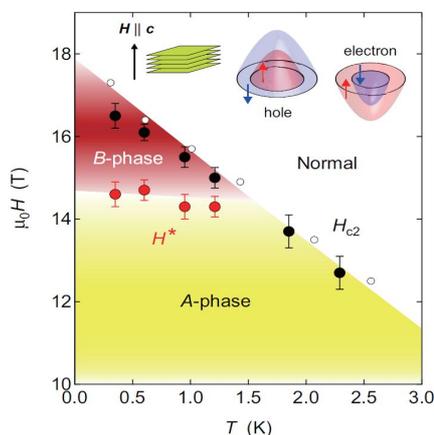


図 2. FeSe における低温-高磁場超伝導相。
[T. Watashige, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* (2015)].

とは明確に異なる異常が存在することが明らかになり、更に熱ホール角の解析によって、この異常磁場よりも高磁場下の超伝導状態では準粒子散乱に大きな変化が起きていることを見出した。これは、低温高磁場において超伝導ギャップの変調などを伴った何等かの不均一超伝導状態が実現していることを示しており、極めて小さなフェルミエネルギーと従来にない大きなスピン偏極に起因する新奇量子凝縮状態であると考えられる。

(2) ネマティック相と超伝導

・FeSe_{1-x}S_x におけるネマティック量子臨界点の実現

FeSe は約 90 K において Fe-3d 軌道の偏極を伴った正方晶から直方晶への構造相転移を起こし、電子状態に *ab* 面内での大きな異方性が生じる非磁性の「電子ネマティック秩序」を示す。本研究では Se サイトを等原子価の S で置換した FeSe_{1-x}S_x の純良単結晶を作成し、このネマティック秩序を完全に抑制することに成功をした。更に、弾性抵抗測定によってネマティック感受率を測定し、その変化を相図上の広い範囲にわたって詳細に調べることで、この系で非磁性のネマティック量子臨界点を実現していることを明らかにした。ネマティック量子臨界点近傍においては、電子系の異方性揺らぎ、即ちネマティック揺らぎが特異的増大を示すが、超伝導転移温度に増大は見られず、反強磁性量子臨界点近傍にみられる多くの非従来型超伝導体とは異なる振る舞いが得られた。また、研究を進める過程において、FeS_{1-x}S_x での化学圧力効果は、物理圧力とは異なる効果をもたらし、電子相図も物理圧力のそれとは異なることが明らかになった。特に圧力下では、ネマティック相とは別に反強磁性相がドーム状に出現し、これと競合するように高い転移温度をもった超伝導状態が実現することが明らかになった。一連の結果は、ネマティシティと磁性、および超伝導の共存・競合関係について重要な知見を与える結果である。

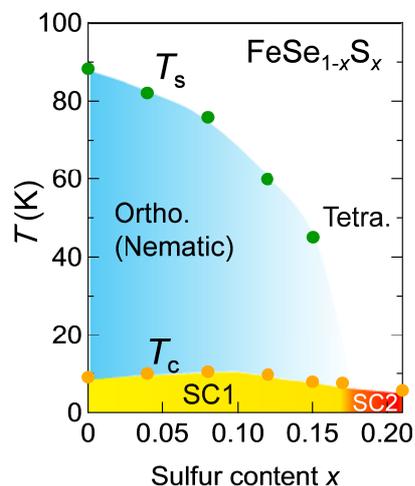


図 3. FeSe_{1-x}S_x における T - x 相図。
[Y. Sato *et al.*, *PNAS* (2018)].

・ネマティック量子臨界点と電子対形成の変化

FeSe のフェルミ面は最大でもブリルアンゾーンの 2-3% という非常に小さなポケットのみで構成されている。一方、この系の超伝導状態では BCS-BEC クロスオーバー領域にあるような極めて強い電子対形成相互作用が働いており、また、超伝導ギャップ関数は非常に異方的で、純良単結晶を用いた実験では偶発ノードが見出されている。この系の極めて小さなフェルミ面において、なぜ異方的に極めて強い電子対形成が実現し得るのかは極めて非自明であり、その理解のカギとなるのが電子状態のネマティシティであると考えられる。そこで本研究では、ネマティック相から非ネマティック相に渡り電子状態をコントロールできる $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ 系に着目し、準粒子励起に敏感な熱伝導率および比熱の磁場中精密測定を行うことで、超伝導ギャップ構造の変化を系統的に調べた。その結果、ネマティック相の電子対形成には軌道選択性が重要な役割を果たし、Fe の d 軌道の縮退が解けネマティシティが僅かでも現れると超伝導ギャップが非常に異方的になることが明らかになった。一方、ネマティック量子臨界点を越えた非ネマティック相でも異方的超伝導ギャップが形成されるが、これはネマティック相のものとは大きく異なることが明らかになった。本結果は、電子対形成において、ネマティック揺らぎの軌道依存性が大きな役割を果たしていることを示している [Y. Sato et al., PNAS (2018)]。

更に、走査型トンネル顕微鏡法/分光法を用いた準粒子干渉実験からは、この系の超伝導ギャップとネマティシティの変化を直接的に調べることに成功し、ネマティック相において電子状態が異方性をもつと、非ネマティック相に比べて超伝導ギャップが急激に大きくなり、電子対の結合が強くなることが明らかになった。この結果は、電子状態におけるネマティシティの有無が超伝導発現に多大な影響を与えていることを直接示しており、一連の結果は、鉄系超伝導の発現機構の理解に非常に重要な知見を与えると考えられる。

(3) 超シャロウバンド構造の解明：強磁場量子振動による電子状態の研究

$\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ 純良単結晶について、仏国・トゥールーズ強磁場研究所において 90 T までの超強磁場輸送現象測定を行なった。特に、量子極限に至るまで量子振動を観測することに成功し、そのランダウレベルの解析から電子バンドの一つについて非自明なベリー位相を観測した。これは、この系の秩序相で回転対称性を破った 4 つのディラック分散によって理解することができ、様々な議論がなされているこの系の電子状態と、ネマティック転移の発現機構について、理論面への強い制約を与える重要な結果である。

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 23 件)

1. "Two distinct superconducting pairing states divided by the nematic end point in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ", T. Hanaguri, K. Iwaya, Y. Kohsaka, T. Machida, T. Watashige, **S. Kasahara**, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Sci. Adv.* **4**, eaar6419 (2018).
2. "Abrupt change of the superconducting gap structure at the nematic critical point in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ", Y. Sato, **S. Kasahara**, T. Taniguchi, X.Z. Xing, Y. Kasahara, Y. Tokiwa, Y. Yamakawa, H. Kontani, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115**, 1227-1231 (2018).
3. "Superconducting Gap Anisotropy Sensitive to Nematic Domains in FeSe", T. Hashimoto, Y. Ota, H. Q. Yamamoto, Y. Suzuki, T. Shimojima, S. Watanabe, C. Chen, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi, K. Okazaki, S. Shin, *Nat. commun.* **9**, 282 (2018).
4. "Maximizing T_c by Tuning Nematicity and Magnetism in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ Superconductors", K. Matsuura, Y. Mizukami, Y. Arai, Y. Sugimura, N. Maejima, A. Machida, T. Watanuki, T. Fukuda, T. Yajima, Z. Hiroi, K. Y. Yip, Y. C. Chan, Q. Niu, S. Hosoi, K. Ishida, K. Mukasa, **S. Kasahara**, J.-G. Cheng, S. K. Goh, Y. Matsuda, Y. Uwatoko, T. Shibauchi, *Nat. commun.* **8**, 1143 (2017).
5. "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of the pseudogap in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ", Y. Sato, **S. Kasahara**, H. Murayama, Y. Kasahara, E.-G. Moon, T. Nishizaki, T. Loew, J. Porras, B. Keimer, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Nat. Phys.* **13**, 1074-1078 (2017).
6. "Weakening of the diamagnetic shielding in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ at high pressures" K. Y. Yip, Y. C. Chan, Q. Niu, K. Matsuura, Y. Mizukami, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi, S. K. Goh, *Phys. Rev. B* **96**, 020502(R) (2017).
7. "Impact of Disorder on the Superconducting Phase Diagram in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ " Y. Mizukami, M. Konczykowski, K. Matsuura, T. Watashige, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi,

- J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 083706 (2017).
8. "Quasiparticle Excitations in the Superconducting State of FeSe Probed by Thermal Hall Conductivity in the Vicinity of the BCS–BEC Crossover" T. Watashige, S. Arsenijević, T. Yamashita, D. Terazawa, T. Onishi, L. Opherden, **S. Kasahara**, Y. Tokiwa, Y. Kasahara, T. Shibauchi, H. v. Löhneysen, J. Wosnitza, Y. Matsuda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 014707 (2017).
 9. "Giant superconducting fluctuations in the compensated semimetal FeSe at the BCS-BEC crossover" **S. Kasahara**, T. Yamashita, A. Shi, R. Kobayashi, Y. Shimoyama, T. Watashige, K. Ishida, T. Terashima, T. Wolf, F. Hardy, C. Meingast, H. v. Löhneysen, A. Levchenko, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Nat. commun.* **7**, 12843 (2016).
 10. "Diamagnetic Vortex Barrier Stripes in Underdoped $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ", Yagil, Y. Lamhot, A. Almoalem, **S. Kasahara**, T. Watashige, T. Shibauchi, Y. Matsuda, O. M. Auslaender, *Phys. Rev. B* **94**, 064510 (2016).
 11. "Charge induced nematicity in FeSe", P. Massat, D. Farina, I. Paul, S. Karlsson, P. Strobel, P. Toulemonde, M.-A. Measson, M. Cazayous, A. Sacuto, **S. Kasahara**, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Y. Gallais, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 9177-9181 (2016).
 12. "Dome-shaped magnetic order competing with high-temperature superconductivity at high pressures in FeSe", J. P. Sun, K. Matsuura, G. Z. Ye, Y. Mizukami, M. Shimozawa, K. Matsubayashi, M. Yamashita, T. Watashige, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, J.-Q. Yan, B. C. Sales, Y. Uwatoko, J.-G. Cheng, T. Shibauchi, *Nature commun.* **7**, 12146 (2016).
*Highly Cited Paper (Top 1%), Web of Science.
 13. "Nematic Quantum Critical Point without Magnetism in $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ Superconductors", S. Hosoi, K. Matsuura, K. Ishida, H. Wang, Y. Mizukami, T. Watashige, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 8139-8143 (2016).
 14. "Magnetotransport study of the pressure-induced antiferromagnetic phase in FeSe", T. Terashima, N. Kikugawa, **S. Kasahara**, T. Watashige, Y. Matsuda, T. Shibauchi, S. Uji, *Phys. Rev. B* **93**, 180503(R) (2016).
 15. "Fermi surface reconstruction in FeSe under high pressure", T. Terashima, N. Kikugawa, A. Kiswandhi, D. Graf, E.-S. Choi, J. S. Brooks, **S. Kasahara**, T. Watashige, Y. Matsuda, T. Shibauchi, T. Wolf, A. E. Böhmer, F. Hardy, C. Meingast, H. v. Löhneysen, S. Uji, *Phys. Rev. B* **93**, 094505 (2016).
 16. "Nematic magnetoelastic effect contrasted between $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ and FeSe", Y. Hu, X. Ren, R. Zhang, H.-q. Luo, **S. Kasahara**, T. Watashige, T. Shibauchi, P. Dai, Y. Zhang, Y. Matsuda, Y. Li, *Phys. Rev. B* **93**, 060504(R) (2016).
 17. "Momentum-Dependent Sign Inversion of Orbital Order in Superconducting FeSe", 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).
 18. "Enhancement of Critical Current Density and Mechanism of Vortex Pinning in H^+ -Irradiated FeSe Single Crystal", Y. Sun, S. Pyon, T. Tamegai, R. Kobayashi, T. Watashige, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi, *Appl. Phys. Express* **8**, 113102 (2015).
 19. "Critical Current Density, Vortex Dynamics, and Phase Diagram of Single-Crystal FeSe", Y. Sun, S. Pyon, T. Tamegai, R. Kobayashi, T. Watashige, **S. Kasahara**, Y. Matsuda, T. Shibauchi, *Phys. Rev. B* **92**, 144509 (2015).
 20. "Evidence for Time-Reversal Symmetry Breaking of the Superconducting State near Twin-Boundary Interfaces in FeSe Revealed by Scanning Tunneling Spectroscopy", T. Watashige, Y. Tsutsumi, T. Hanaguri, Y. Kohsaka, **S. Kasahara**, A. Furusaki, M. Sigrist, C. Meingast, T. Wolf, H. v. Löhneysen, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. X* **5**, 031022 (2015).
 21. "Dichotomy between the Hole and Electron Behavior in Multiband Superconductor FeSe Probed by Ultrahigh Magnetic Fields", M. D. Watson, T. Yamashita, **S. Kasahara**, W. Knafo, M. Nardone, J. Beard, F. Hardy,

A. McCollam, A. Narayanan, S. F. Blake, T. Wolf, A. A. Haghighirad, C. Meingast, A. J. Schofield, H. von Löhneysen, Y. Matsuda, A. I. Coldea, and T. Shibauchi
Phys. Rev. Lett. **115**, 027006 (2015).

22. "Optical conductivity evidence of clean-limit superconductivity in LiFeAs", R. P. S. M. Lobo, G. Chanda, A. V. Pronin, J. Wosnitzer, **S. Kasahara**, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
Phys. Rev. B **91**, 174509 (2015).
23. "Pressure-Induced Antiferromagnetic Transition and Phase Diagram in FeSe", T. Terashima, N. Kikugawa, **S. Kasahara**, T. Watashige, T. Shibauchi, Y. Matsuda, T. Wolf, A. E. Bohmer, F. Hardy, C. Meingast, H. v. Löhneysen, and S. Uji,
J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 063701 (2015).
*Highly Cited Paper (Top 1%), Web of Science.

[学会発表](計10件)

- [1] (Invited talk) "Nematic transition at the onset of pseudogap in cuprates",
S. Kasahara, 2017 International Symposium on Superconductivity, Dec. 13-15, (2017). Tokyo, Japan.
- [2] (招待講演) "ネマティック秩序と非従来型超伝導",
笠原 成, 京都大学基礎物理学研究所研究会「超伝導研究の最先端: 多自由度、非平衡、電子相関、トポロジー、人工制御」, 2017年6月, 京都大学, 京都市.
- [3] (Invited talk) "Quasiparticle excitations of FeSe in the BCS-BEC crossover",
S. Kasahara, The 16th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (VORTEX2017), May. 28-Jun. 3rd, 2017. Natal, Brazil.
- [4] (招待講演) "ネマティック転移を伴う擬ギャップ相", **笠原 成**, 日本物理学会2017年年次大会, 2017年3月17-20日, 大阪大学, 大阪府豊中市.
- [5] (Invited talk) "BCS-BEC crossover in FeSe with small Fermi energies",
S. Kasahara, American Physical Society (APS) March Meeting, March 13-17, 2017. New Orleans, LA, USA.
- [6] (Invited talk) "Quasiparticle excitations of FeSe in the BCS-BEC crossover",

S. Kasahara, CEMS-QPEC Topical Meeting on Superconductivity under Extreme Conditions, Jan. 16-17, 2017. The Univ. of Tokyo, Japan.

- [7] (Invited talk) "Probing highly spin-polarized superconducting state of FeSe in the BCS-BEC crossover",
S. Kasahara, FFLO-Phase in Quantum Liquids, Quantum Gases, and Nuclear Matter (FFLO16), 20-24, Jul. 2016, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems (MPIPKS), Dresden, Germany.
- [8] (招待講演) "BCS-BEC クロスオーバー", 領域8シンポジウム"FeSeのエキゾチック超伝導",
笠原 成, 日本物理学会2016年年次大会, 2016年3月19-22日, 東北学院大学, 宮城県仙台市.
- [9] (Invited talk) "Electronic structure and giant superconducting fluctuations in FeSe",
S. Kasahara, Workshop on the two-dimensional chalcogenides: exotic electronic orders, superconductivity and magnetism, 31st, Aug. - 3rd, Sep 2015, IFW Dresden, Germany.
- [10] (Invited talk) "Electronic structure and the physics of the BCS-BEC crossover in FeSe",
S. Kasahara, Energy Materials Nanotechnology (EMN) Workshop on Iron and Iridium based Superconductivity, July 14-16, 2015, Qingdao, China.

[その他]

ホームページ等

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠原 成 (KASAHARA, Shigeru)
京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 助教
研究者番号: 10425556

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし