

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0160

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Exotic electroinc state and quantum condensate in ultra-shallow band materials
(Fostering Joint International Research)

研究代表者

笠原 成 (Shigeru, Kasahara)

京都大学・理学研究科・特定准教授

研究者番号：10425556

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間：5.5ヶ月

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、ドイツ・ドレスデン強磁場研究所、およびオランダ・ナイメーヘン強磁場研究所における極低温・強磁場中での熱輸送および電子輸送測定を通じて、BCS-BEC クロスオーバー領域にある量子凝縮状態の特異性の解明に取り組んだ。特に、未踏の極低温・強磁場環境における熱伝導率測定を確立し、FeSeにおいて低温高磁場中で一次相転移によって隔てられた新奇超伝導状態が実現していることを見出した。これは、有限の重心運動量を持ったクーパー対が形成されるFFLO状態の実現を示すものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでヘリウム3温度域において18Tを超える極限環境での熱伝導率の精密測定を行える環境は世界にもなかった。本研究では、世界屈指の強磁場施設の一つであるナイメーヘン強磁場研究所においてヘリウム3温度域、最大35テスラまでの強磁場熱伝導率測定を確立し、新奇な超伝導状態の探索と解明を可能とした。これは本研究で対象とした研究に留まらず、様々な系において未踏の実験を可能とした意義深いものといえる。

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. In this work, a team of scientists has investigated heat transports in FeSe in intensive fields up to 35 T and found compelling evidence of a distinct high-field superconducting phase which is separated from the usual superconducting phase via a first-order phase transition. This high-field phase is attributed to an exotic state, the so-called FFLO phase, first predicted in 1964. In the isovalently substituted FeSe_{1-x}S_x superconductors, the team found non-Fermi liquid charge transports in the vicinity of a novel type of quantum critical point (QCP) of pure nematic order without accompanying other orders. The set of anomalous charge transport properties show striking resemblance to those reported in high-T_c cuprates and heavy Fermion superconductors. A common set of anomalous charge transport properties captures a universal feature of the non-Fermi liquid transport properties near the QCP.

研究分野：凝縮系物理学実験

キーワード：超シャロウバンド 鉄系超伝導 BCS-BECクロスオーバー ネマティック量子臨界点 新奇超伝導相 軌道選択 FFLO状態 熱輸送測定

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系物質においては、しばしば従来超伝導とは異なる特異な超伝導状態・量子凝縮状態が実現し得る。このような研究は先端の凝縮系物理学における中心課題の一つであり、なかでも電子対の引力相互作用の変化がもたらす弱結合 BCS 状態から強結合 BEC 状態へのクロスオーバーは、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といえる。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。そのような中において、研究代表者らは、鉄系超伝導体の一つ FeSe ($T_c \sim 9$ 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 [S. Kasahara *et al.*, *PNAS* (2014).], 基盤研究(B)「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」(H.27-29 年度採択課題)を通じて、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研究に取り組んでいた。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、これまでの物質において超伝導ギャップ Δ が $\Delta/\epsilon_F \sim 10^{-3}$ - 10^{-5} という値にあったのと同様に、 $\Delta/\epsilon_F \sim 1$ 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。

このような非従来型超伝導の研究において、超伝導を抑制した際の電子状態を調べることができる強磁場実験は必要不可欠なものである。本研究では、このような背景のもと、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、国内では不可能な極低温・強磁場中での熱輸送測定および電子輸送測定を通じて、BCS-BEC クロスオーバー領域にある量子凝縮状態の特異性の解明を行うことを目的とした。更に、これらの強磁場測定を等原子価置換系である FeSe_{1-x}S_x系に展開することで、この系における軌道自由度がもたらす電子状態の特異性と、量子凝縮状態の異常を明らかにし、代表者が取り組む基盤研究(B)「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」を基課題として研究の進展に大きな拍車をかけることを目的とした。

本課題の開始以前より、代表者らは、欧州強磁場機構(European Magnetic Field Laboratory: EMFL)の一つであるドイツ・ドレスデン強磁場研究所(Hochfeld-Magnetlabor Dresden, HLD)において、極低温・強磁場中での熱輸送測定をはじめとした共同研究に取り組んでおり、同研究所を主たる渡航先として研究を開始した。また、研究が進む中で、同じく EMFL の構成拠点の一つであり、共同研究を展開していたオランダ・ナイメーヘン強磁場研究所(High Field Magnet Laboratory: HFML)を主たる渡航先の一つとして追加した。

2. 研究の目的

上述の背景のもと、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、ドイツ・ドレスデン強磁場研究所、およびオランダ・ナイメーヘン強磁場研究所における極低温・強磁場中での熱輸送および電子輸送測定を通じて、BCS-BEC クロスオーバー領域にある量子凝縮状態の特異性の解明を行うことを目的とした。更に、これらの強磁場測定を等原子価置換系である FeSe_{1-x}S_x系に展開することで、この系における軌道自由度がもたらす電子状態の特異性と、量子凝縮状態の異常を明らかにし、代表者が取り組む基盤研究(B)「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」を基課題として研究の進展に大きな拍車をかけることを目的とした。

3. 研究の方法

国内における研究

本研究では、強磁場研究所での予備実験として、まず化学蒸気輸送法による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、種々の精密実験を可能とした。これにより FeSe において $T_s \sim 90$ 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、国内においても電子輸送測定、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。

渡航先における研究

本研究の第一目的として、国内では不可能な強磁場中での熱輸送現象測定の確立があげ

られる。これまで、ヘリウム3温度域において18Tを超える極限環境での熱伝導測定を行える研究室は世界にも皆無であったが、渡航先であるドイツ・ドレスデン強磁場研究所においては、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ における20テスラまでの熱伝導率測定を進めるとともに、オランダ・ナイメーヘン強磁場研究所でのより高磁場下での測定に向けた準備をおこなった。さらにナイメーヘン強磁場研究所においては、ヘリウム3温度域において最大35テスラまでの熱伝導測定が可能な装置を開発した。極めて微小空間で断熱測定を行うことは困難であったが、装置の工夫により0.5Kの低温まで熱伝導率測定を行うことが可能となった。このような測定は、世界でも例がないものである。ドレスデン強磁場研究所およびナイメーヘン強磁場研究所への渡航は複数回に分けて行った。

4. 研究成果

(1) BCS-BEC クロスオーバー領域にある超伝導体の強磁場中における新奇超伝導相

鉄系超伝導体 FeSe は、BCS-BEC クロスオーバー領域にある超伝導体であるとともに、有限の重心運動量を持ったクーパー対が形成される Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 超伝導が実現する有力な候補物質である。FeSe における超伝導では、二次元鉄平面に平行に磁場を印加した際、極低温において上部臨界磁場が異常な増加を示すことが見出されている。対破壊効果はパウリ対破壊効果が支配的であると考えられ、また、本物質は非常に小さな有効フェルミエネルギーと大きな超伝導ギャップに起因した大きな Maki パラメータを有することから、極低温・高磁場において FFLO 状態が実現している可能性が十分に期待される。FFLO 状態では超伝導秩序変数が実空間で変調した並進対称性の破れた状態が実現するとされ、これは電子対がある種の液晶的な状態を持ったものとみることでもできる。このような FFLO 状態の探索は過去に様々な系で試みられてきたものの、その候補物質は数える程しかなかった。

本研究では、ナイメーヘン強磁場研究所において、最大磁場 35 T、最低温度域 0.5 K という未踏の熱伝導率測定が可能なシステムを新たに立ちあげ、FeSe の超純良単結晶を用いて、面内に磁場を印加した際の超伝導状態を調べた。その結果、熱伝導率に顕著な異常を観測し、およそ 2 K 以下、24 T 以上の低温高磁場域において一次相転移によって隔てられた FFLO 状態と考えられる新たな超伝導状態が実現していることを見出した(図1)[S. Kasahara *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* (2020)]. FeSe の FFLO 状態ではフェルミ面を構成する Fe の軌道成分に依存した特異な電子対形成が実現していると考えられ、今後、その特徴を解明していくことが重要になると考えられる。

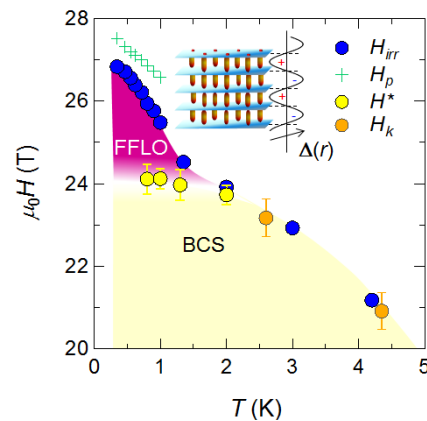


図1: FeSe の面内磁場中における温度磁場相図。24 T 以上の低温高磁場中で一次相転移によって隔てられた FFLO 状態が実現する[*Phys. Rev. Lett.* (2020)].

(2) ネマティック量子臨界揺らぎがもたらす異常金属状態と超伝導状態の変化

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 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ の純良単結晶の作製により、ネマティック秩序を絶対零度まで抑制したネマティック量子臨界点を実現し、その近傍における電子状態、および超伝導状態の詳細な変化を強磁場電子輸送測定、熱輸送測定、比熱測定によって調べた。

・ネマティック量子臨界点近傍における非フェルミ液体的電子状態

ナイメーヘン強磁場研究所において、強磁場下での電子輸送測定を行い、超伝導状態を抑制した常伝導状態における電子状態の変

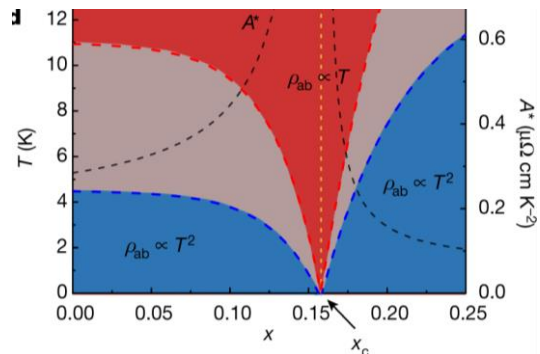


図2: $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)$ における電子相図。 $x \sim 0.16$ においてネマティック量子臨界点を持ち、その近傍では電気抵抗が温度の一乗に比例する振る舞いを示し、また電子の有効質量を反映する A^* 値が増大を示す。[*Nature* (2019).]

化を相図上の広い範囲にわたって詳細に調べた。その結果、この系では非磁性的なネマティック量子臨界点に関連した非フェルミ液体的電子状態(異常金属状態、またはストレンジメタルともいう)が実現していることを明らかにした[S. Licciardello *et al.*, *Nature* (2019); *Phys. Rev. Research* (2019)]。ネマティック量子臨界点では、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、これは有限の波数ベクトルをともなった反強磁性量子臨界点とは本質的に異なるものである。にもかかわらず、本研究で明らかになった非フェルミ液体的挙動は、多くの反強磁性量子臨界点近傍にみられそれと共通したものであり、これは極めて驚くべき結果と言える。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と考えられる。

・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、なぜ異方的で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、ここでは大きな残留状態密度を伴ったネマティック相の超伝導とは本質的に大きく異なる量子凝縮状態が実現していることが明らかになった[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有すると、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いる。

一連の結果は、ネマティック量子臨界揺らぎが超伝導に大きな影響を与えていることを初めて実験的に明らかにしたものであり、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。特に、非ネマティック相において実現する大きな残留状態密度をもった特異な凝縮状態については、当該分野において大きなインパクトをもたらす、この結果に対してボゴリューボフ・フェルミ面という新しい超伝導ギャップ構造が理論的に提案されるなどの注目を集めている。

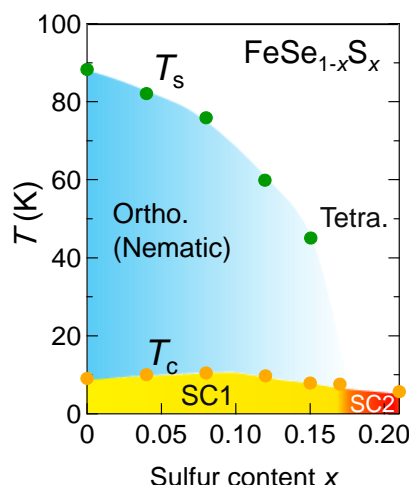


図3. $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ における T - x 相図。ネマティック相が抑制された量子臨界点を挟み超伝導ギャップ構造が大きく変化する。[PNAS (2018)].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Yamashita M., Sato Y., Tominaga T., Kasahara Y., Kasahara S., Cui H., Kato R., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 101
2. 論文標題 Presence and absence of itinerant gapless excitations in the quantum spin liquid candidate EtMe3Sb[Pd(dmit)2]2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140407(R)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.140407	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 Kasahara S., Sato Y., Licciardello S., ?ulo M., Arsenijevi? S., Ottenbros T., Tominaga T., B?ker J., Eremin I., Shibauchi T., Wosnitza J., Hussey N.?E., Matsuda Y.	4. 巻 124
2. 論文標題 Evidence for an Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State with Segmented Vortices in the BCS-BEC-Crossover Superconductor FeSe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 107001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.107001	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 Murayama H., Sato Y., Taniguchi T., Kurihara R., Xing X. Z., Huang W., Kasahara S., Kasahara Y., Kimchi I., Yoshida M., Iwasa Y., Mizukami Y., Shibauchi T., Konczykowski M., Matsuda Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Effect of quenched disorder on the quantum spin liquid state of the triangular-lattice antiferromagnet 1T-TaS2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013099	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 Yip King Yau, Ho Kin On, Yu King Yiu, Chen Yang, Zhang Wei, Kasahara S., Mizukami Y., Shibauchi T., Matsuda Y., Goh Swee K., Yang Sen	4. 巻 366
2. 論文標題 Measuring magnetic field texture in correlated electron systems under extreme conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1355 ~ 1359
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1126/science.aaw4278	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 Pellicciari Jonathan, Ishii Kenji, Huang Yaobo, Dantz Marcus, Lu Xingye, Olalde-Velasco Paul, Strocov Vladimir N., Kasahara Shigeru, Xing Lingyi, Wang Xiancheng, Jin Changqing, Matsuda Yuji, Shibauchi Takasada, Das Tanmoy, Schmitt Thorsten	4. 巻 2
2. 論文標題 Reciprocity between local moments and collective magnetic excitations in the phase diagram of BaFe ₂ (As _{1-x} P _x) ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s42005-019-0236-3	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 Suzuki Takeshi, Someya Takashi, Hashimoto Takahiro, Michimae Shoya, Watanabe Mari, Fujisawa Masami, Kanai Teruto, Ishii Nobuhisa, Itatani Jiro, Kasahara Shigeru, Matsuda Yuji, Shibauchi Takasada, Okazaki Kozo, Shin Shik	4. 巻 2
2. 論文標題 Photoinduced possible superconducting state with long-lived disproportionate band filling in FeSe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s42005-019-0219-4	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 Licciardello S., Maksimovic N., Ayres J., Buhot J., Culo M., Bryant B., Kasahara S., Matsuda Y., Shibauchi T., Nagarajan V., Analytis J. G., Hussey N. E.	4. 巻 1
2. 論文標題 Coexistence of orbital and quantum critical magnetoresistance in FeSe _{1-x} S _x	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023011-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.1.023011	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 Kitagawa Shunsaku, Kawamura Takeshi, Ishida Kenji, Mizukami Yuta, Kasahara Shigeru, Shibauchi Takasada, Terashima Takahito, Matsuda Yuji	4. 巻 100
2. 論文標題 Universal relationship between low-energy antiferromagnetic fluctuations and superconductivity in BaFe ₂ (As _{1-x} P _x) ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 60503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.060503	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 Murayama H., Sato Y., Kurihara R., Kasahara S., Mizukami Y., Kasahara Y., Uchiyama H., Yamamoto A., Moon E.-G., Cai J., Freyermuth J., Greven M., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 10
2. 論文標題 Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa ₂ CuO ₄ +	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1	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 Sato Y., Xiang Z., Kasahara Y., Taniguchi T., Kasahara S., Chen L., Asaba T., Tinsman C., Murayama H., Tanaka O., Mizukami Y., Shibauchi T., Iga F., Singleton J., Li Lu, Matsuda Y.	4. 巻 15
2. 論文標題 Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 954 ~ 959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41567-019-0552-2	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 Shimajima T., Suzuki Y., Nakamura A., Mitsuishi N., Kasahara S., Shibauchi T., Matsuda Y., Ishida Y., Shin S., Ishizaka K.	4. 巻 10
2. 論文標題 Ultrafast nematic-orbital excitation in FeSe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41467-019-09869-5	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 Hanaguri Tetsuo, Iwaya Katsuya, Kohsaka Yuhki, Machida Tadashi, Watashige Tatsuya, Kasahara Shigeru, Shibauchi Takasada, Matsuda Yuji	4. 巻 4
2. 論文標題 Two distinct superconducting pairing states divided by the nematic end point in FeSe _{1-x} S _x	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaar6419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1126/sciadv.aar6419	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 Coldea Amalia I., Blake Samuel F., Kasahara Shigeru, Haghhighirad Amir A., Watson Matthew D., Knafo William, Choi Eun Sang, McCollam Alix, Reiss Pascal, Yamashita Takuya, Bruma Mara, Speller Susannah C., Matsuda Yuji, Wolf Thomas, Shibauchi Takasada, Schofield Andrew J.	4. 巻 4
2. 論文標題 Evolution of the low-temperature Fermi surface of superconducting FeSe _{1-x} S _x across a nematic phase transition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41535-018-0141-0	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 Licciardello S., Buhot J., Lu J., Ayres J., Kasahara S., Matsuda Y., Shibauchi T., Hussey N. E.	4. 巻 567
2. 論文標題 Electrical resistivity across a nematic quantum critical point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 213 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41586-019-0923-y	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 Hanaguri T., Kasahara S., B?ker J., Eremin I., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 122
2. 論文標題 Quantum Vortex Core and Missing Pseudogap in the Multiband BCS-BEC Crossover Superconductor FeSe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 77001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.077001	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 Kuwayama Takanori, Matsuura Kohei, Mizukami Yuta, Kasahara Shigeru, Matsuda Yuji, Shibauchi Takasada, Uwatoko Yoshiya, Fujiwara Naoki	4. 巻 88
2. 論文標題 77Se-NMR Study under Pressure on 12%-S Doped FeSe	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 033703 ~ 033703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.033703	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 Sato Yuki, Kasahara Shigeru, Taniguchi Tomoya, Xing Xiangzhuo, Kasahara Yuichi, Tokiwa Yoshifumi, Yamakawa Youichi, Kontani Hiroshi, Shibauchi Takasada, Matsuda Yuji	4. 巻 115
2. 論文標題 Abrupt change of the superconducting gap structure at the nematic critical point in FeSe _{1-x} S _x	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 1227 ~ 1231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1073/pnas.1717331115	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 -

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 FeSeにおけるFFLO超伝導
3. 学会等名 第27回 渦糸物理 ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 FeSe における強磁場超伝導相: FFLO 状態
3. 学会等名 基研研究会 「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeru Kasahara
2. 発表標題 Nematic Phase Transition at the Onset of Pseudogap in Cuprates
3. 学会等名 Plasma 2019 Workshop, Jan. 18- 21, 2018. Univ. Central Florida, Orlando, FL, USA (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeru Kasahara
2. 発表標題 Nematic transition at the onset of pseudogap in cuprates
3. 学会等名 Energy and Environmental Applications (CMCEE-2018), Jul. 22-27, 2018, Suntec, Singapore (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeru Kasahara
2. 発表標題 Nematic transition at the onset of pseudogap in cuprates
3. 学会等名 International Workshop on Recent Progress in Superconductivity, Jul. 13-15, 2018, Peyongchang, Korea (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導体における新奇なネマティシティ
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会「多自由度電子状態と電子相関が生み出す新奇超伝導の物理」, 2018年5月7-9日, 京都大学, 京都市 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Kasahara
2. 発表標題 Quasiparticle excitations of FeSe in the vicinity of the BCS-BEC crossover
3. 学会等名 The 16th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors (VORTEX2017), Natal, Brazil. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 FeSe1-xSxにおける異方的超伝導ギャップ構造
3. 学会等名 京都大学・基研研究会「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」（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学量子凝縮物性研究室 http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/</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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Wosnitza Joachim (Wosnitza Joachim)	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf・Dresden High Magnetic Field Laboratory・Director	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	Hussey Nigel (Hussey Nigel)	Radboud University・Kruispad High Field Magnet Laboratory›・Professor	
その他の研究協力者	Arsenijevic Stefan (Arsenijevic Stefan)	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf・Dresden High Magnetic Field Laboratory・Staff	