

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01177

研究課題名(和文) 擬ギャップ状態における対称性の破れの解明

研究課題名(英文) Symmetry breaking phenomena in the pseudogap state of cuprates

研究代表者

笠原 成 (Kasahara, Shigeru)

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) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：銅酸化物高温超伝導体の膨大な研究において、相図上に広く出現する擬ギャップ状態の解明は、現代物理学における最重要課題の一つである。本研究では、最高感度の磁気トルク測定を駆使することにより、擬ギャップ状態における相転移現象と対称性の破れの解明に取り組んだ。正方晶構造を有する銅酸化物超伝導体 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4+d$ において、擬ギャップ状態での自発的回転対称性の破れを熱力学的に見出し、これが $[110]$ 方向に発達する特異なものであることを明らかにした。この結果は擬ギャップ相が Cu-O-Cu ボンド方向への相関も CDW 相とは異なる秩序相であり、 CDW のゆらぎや前駆現象ではないことを示す重要な結果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、擬ギャップ相での回転対称性の破れが系に依存することを示しており、現代物理学における最重要問題の一つとされる擬ギャップ状態の微視的起源を明らかにする上で極めて重要な結果と考えられる。さらに、本研究では新しい系として、 $5d$ イリジウム酸化物 Sr_2IrO_4 の隠れた秩序状態について、これが奇パリティのアナポール秩序であることを示した。これらはモット絶縁近傍において強く相互作用する電子系が示す新奇電子状態の存在を示したものであり、学術的に意義のあるものといえる。

研究成果の概要(英文)：Elucidating the nature of the pseudogap state that emerges in a wide range of the phase diagram of cuprate superconductors is one of the most enigmatic issues in modern condensed matter physics. Here, by using ultra-sensitive magnetic torque experiments, we investigate the pseudogap state of a tetragonal cuprate superconductor $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4+d$ (Hg1201) with only one CuO_2 layer per primitive cell. Our key findings are two-folded: First, we found a distinct two-fold in-plane anisotropy that sets in below the pseudogap temperature T^* , providing thermodynamic evidence for an electronic nematic transition. Second, we found that the nematic director in Hg1201 orients along the diagonal direction in the CuO_2 square lattice, in sharp contrast to the bond nematicity along the Cu-O-Cu direction. These results highlight that the pseudogap state is a distinct ordered phase, that is different from charge-density-wave or its precursors along the Cu-O-Cu bond direction.

研究分野：凝縮系物理学実験

キーワード：銅酸化物高温超伝導体 擬ギャップ相 回転対称性の破れ 電子ネマティック秩序 イリジウム酸化物
アナポール秩序 奇パリティ秩序 磁気トルク測定

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物高温超伝導体の発見から 30 年が経ち、研究は成熟期に入って久しい。そのような中、近年の実験技術の高度化により、銅酸化物超伝導体の電子相図の理解は新たな展開を迎えている。特に擬ギャップ状態に関して、これが相転移現象に伴った熱力学的秩序相であるとの描像が明らかになりつつあり、擬ギャップ温度 T^* での臨界現象や、 T^* 以下における面内回転対称性の破れ、時間反転対称性の破れの存在などが議論されている。また、擬ギャップ状態内部においては、並進対称性の破れた電荷密度波状態が発見されるなど、擬ギャップ状態の物理は大きく変化しようとしている。しかしながら、擬ギャップ温度 T^* の位置をはじめ、擬ギャップ状態が真に熱力学的秩序相であるのか、相転移に伴う主たる対称性の破れが何であるのか、更には電荷密度波や高温超伝導出現と擬ギャップ状態との関係など、擬ギャップ状態の理解には依然として様々な問題が山積しているのが現状であり、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ問題は、新奇電子状態や量子相転移、更に高温超伝導発現機構にまで直結した現代物理学における最重要問題の一つである。

そのような中、研究代表者らは、超高感度の磁気トルク測定を $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) 純単結晶において行ない、擬ギャップ温度 T^* において電子系が自発的に系の回転対称性を破る「電子ネマティック転移」が起きていることを熱力学的に見出してきた(図 1)[1]。ただし、YBCO では、キャリアドーピングに伴い Cu-O-Cu の一次元鎖が形成され、結晶の面内四回対称性が破れた直方晶構造を有する。この為、擬ギャップ状態での自発的回転対称性の破れを真に確立し、その特異性の理解を深化させるには正方晶系での研究が不可欠となる。また、YBCO は単位格子に二枚の CuO_2 面を有する bilayer 系であり、時間反転対称性の破れをもたらす軌道電流に立脚した理論では、単一 CuO_2 面における回転対称性は異なる方向に破れるとの指摘がなされている。従って、擬ギャップ状態における回転対称性や時間反転対称性の破れを解明するには、 CuO_2 面数の異なる系での系統的研究が必須となる。

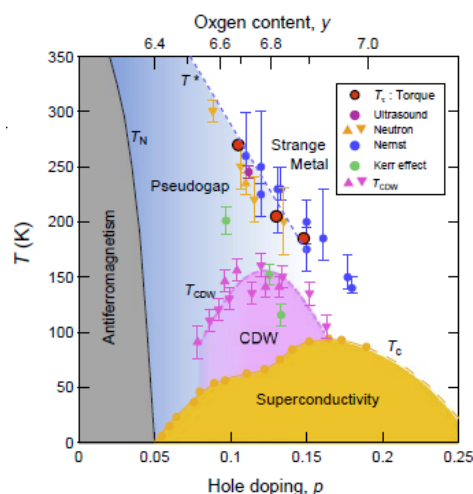


図 1: YBCO の温度-キャリア濃度相図。超高分解能磁気トルク測定により、擬ギャップ温度 T^* での電子ネマティック転移が明らかになっている [1]。

2. 研究の目的

本研究は、上記の代表者らの研究開始までに至る成果に基づいたものであり、急展開を迎えている銅酸化物超伝導体の擬ギャップ問題に対して、最高感度の磁気トルク測定を各種のキーマテリアルに駆使し測定を行うことで、擬ギャップ状態における相転移現象と対称性の破れの特異性を明らかにし、四半世紀を越えるこの重要問題を最終的な解明へと導くこととする。

特に、本研究で着目する「電子ネマティック転移」は強く相互作用しあう量子多体系が示す非自明な相転移について、対称性の破れに基づいた新しい理解を与えるものであり、液晶分野におけるネマティック液晶になぞらえて、電子系が格子系の回転対称性を自発的に破る新奇な電子状態への相転移を指す。電子ネマティック状態の理解は量子多体系の研究における新しい潮流となりつつあり、本研究で対象とする銅酸化物超伝導体の他にも、鉄系超伝導体、重い電子系超伝導体などにおいて、近年、活発な議論がなされている。

銅酸化物超伝導体の擬ギャップ問題に関して、これまでに 1 万を超える膨大な数の論文が存在ると言われている。それにも関わらず、今日に至るまで擬ギャップ状態が相転移現象によるものなのか、クロスオーバーによるものなのかさえ未解決の問題であった。本研究を通じて、擬ギャップ状態の相転移現象と回転対称性の破れの特異性を明らかにし、更に、擬ギャップ状態において同じく議論されている時間反転対称性の破れやポメラランチュク不安定性との関係、電荷密度波状態との関係を明らかにすることで、擬ギャップ状態の起源となる微視的モデルを特定することが期待できる。更に、擬ギャップ状態が熱力学的秩序相であるとするならば、その近傍で観測される異常金属状態や高温超伝導の出現に対して、この相転移の揺らぎと臨界現象が何らかの関与をしている可能性を示唆することになり、その解明は銅酸化物超伝導体のみならず、他の強相関電子系の物理に対しても極めて大きな波及効果をもたらすと期待される。

3. 研究の方法

正方晶構造を有する銅酸化物超伝導体をキーマテリアルとして、最高感度の精密磁気トルク測定を駆使した系統的な実験を行なう。擬ギャップ状態における回転対称性の破れの特異性を明らかにすることで、擬ギャップ状態の起源となる微視的モデルの同定を実現する。より具体的には

- 正方晶構造をもつ銅酸化物超伝導体における回転対称性の破れの検証
- CuO_2 面数の変化に伴う回転対称性の破れの変化
- ループ軌道電流による時間反転対称性の破れやポメランチュク不安定性などの理論との対比
- 擬ギャップ形成と電荷密度波状態との関係解明
- ネマティック量子臨界点と高温超伝導との関係解明

を中核的課題とした研究を行う。

磁気トルク測定は常磁性磁化率の異方性、即ち、対称性の破れに極めて敏感な熱力学測定である。ピエゾ抵抗式微小カンチレバーを用いることで SQUID 磁束計の数千倍以上の超高感度で系の磁気異方性を調べることが可能であり、磁気トルクの面内磁場方位依存性を精密測定することで、回転対称性の破れを反映した 2 回対称振動と、秩序変数の発達を反映した振幅の増大が期待される。更に、2 回対称振動の位相からは対称性の破れる方向の情報を引き出すことが可能であり、 Cu-O-Cu 方向に対称性が破れる場合には正弦波的な振舞いが、対角方向に対称性が破れる場合には余弦波的振舞いが期待される。

また、研究期間の後半においては、銅酸化物と非常に類似する結晶構造、電子構造を有する 5d イリジウム酸化物 $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ に着目し、反強磁性相よりも高温で出現されると報告があった「隠れた秩序」についての研究に取り組み、銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ相との対比的な研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 銅酸化物高温超伝導体 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+d}$ の擬ギャップ状態における新奇電子ネマティック秩序

本研究では、正方晶構造を有する銅酸化物超伝導体 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+d}$ に着目し、面内磁気トルクの精密測定を行なった[2]。Hg1201 においては輸送現象測定から YBCO などと共通した擬ギャップ的振舞いが報告されており、偏極中性子実験からは時間反転対称性の破れが議論されている。擬ギャップ状態内部では、電荷密度波相の存在も回折実験から報告されており、その相図はこれまで研究を行ってきた YBCO と非常に類似する。これらの系の精密磁気トルク測定を進めることで、正方晶系において真に回転対称性を破る電子ネマティック転移が実現しているかを明らかにすることを試みた。

本研究の結果、 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+d}$ においても T 以下において回転対称性の破れが確認され、擬ギャップ状態が自発的回転対称性の破れに伴った電子ネマティック相である熱力学的証拠を得た。さらに注目すべきことに、この物質の回転対称性の破れは、これまで銅酸化物で議論されてきた $[100]/[010]$ 方向 (Cu-O-Cu 方向) のネマティシティとは異なり、 $[110]$ 方向に発達していること、また電荷密度波 (CDW) 温度以下で強く抑制されることが明らかになった (図 2)。この結果は、擬ギャップ相が Cu-O-Cu ボンド方向への相関の発達を示す CDW 相とは別の機構によって生じた秩序相であり、CDW のゆらぎや前駆現象ではないという重要な結果を示している。本研究成果は、様々な論争がなされてきた擬ギャップ状態の起源について強い制約を与える非常に重要な結果と考えられる。

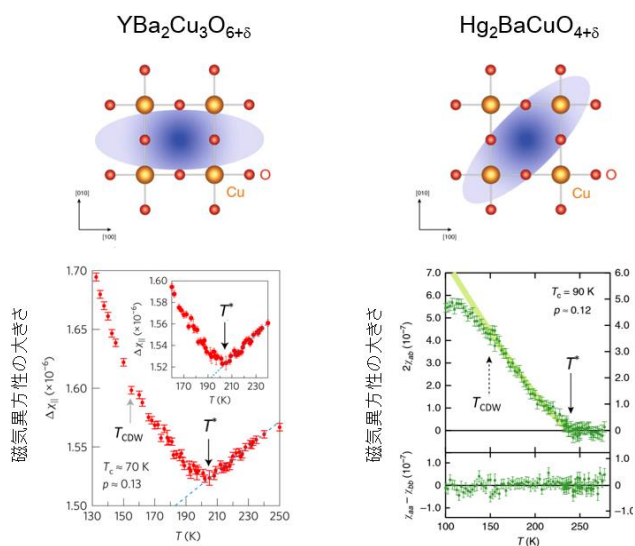


図 2: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ および $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+x}$ における CuO_2 面に対する面内回転対称性の破れのイメージ図(上図)と磁気異方性の温度依存性(下図) [1, 2]。

(2) 5dイリジウム酸化物 $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ におけるボンド方向型アナポール秩序

物質の電子状態において、時間および空間反転対称性の両者を自発的に破る奇パリティの『アナポール秩序』は、極めて稀有な新奇量子液晶状態である。アナポールが物質中において顕在化する可能性として、これまで銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ状態を舞台に、 CuO_2 面を流れるループ電流秩序が議論されてきたが、今日に至るまでそのコンセンサスは得られていない。その様な中、近年、5dイリジウム酸化物 Sr_2IrO_4 に高い注目が集まっている。 Sr_2IrO_4 は、銅酸化物高温超伝導体の母物質である La_2CuO_4 と非常に類似した結晶構造・電子構造・磁気構造を持ち、スピン軌道相互作用によって誘起される $J = 1/2$ の反強磁性モット絶縁体となる。更に、その Ir サイトを Rh に置換した $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ では、反強磁性相よりも高温において「隠れた秩序」と呼ばれる未知の電子状態が形成されていることが議論され始めており(図 3)、そこでは時間および空間反転対称性の破れた特異な電子状態が指摘されている。我々は、電子系の面内回転対称性の破れに敏感な超高感度の磁気トルク測定を行い、隠れた秩序の形成温度 T_Ω において、感受率の発散を伴わない「特異なネマティック秩序」が形成されていることを明らかにした[3]。これは以下に述べるように、奇パリティのアナポール秩序と考えられる。

まず本研究では、面内磁気トルク測定により、 T_Ω 以下において、顕著な二回対称振動が磁場角度依存性に出現することが明らかになった。これは T_Ω 以下において、電子系が格子系の回転対称性を破るネマティック状態が出現していることを示している。一方、磁気トルクと相補的なプローブであり、ネマティック揺らぎに敏感な弾性抵抗率を測定したところ、通常の強制的ネマティック秩序において期待されるネマティック感受率が転移温度に向かって発散する振舞いが見られないことが分かった。 T_Ω 以下において、奇パリティの電子秩序が形成されている場合、偶パリティの外場である歪みに対して、奇パリティの秩序変数は直接結合をしない。隠れた秩序状態がネマティック感受率の発散を伴わない回転対称性の破れた秩序状態であることは、これが奇パリティの秩序状態であり、さらに時間反転対称性が破れた状態であることから、その起源はループ電流秩序であると結論づけられる。興味深いことに、隠れた秩序状態での回転対称性の破れは、Ir-O-Ir ボンド方向に発達している(図 4 左)。これは銅酸化物で提唱されてきたような八面体内の二つの対角方向を ∞ 状にループ電流が流れることで[100]/[010]方向にアナポールが誘起される状態とは異なり、 $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ 構造の軌道電流パターンによって[110]方向へのアナポール秩序が実現していることを示唆する(図 4 右)。

本研究成果は、電子の結晶であるモット絶縁体状態から流動的な液体状態であるフェルミ液体へと変わる過程において、電子が局所的に動き出すことでナノメートルスケールの微弱な電流が自然発生し、原子の間を閉じたループ状に流れだす極めて不思議な電子状態を明らかにしたものと見える。

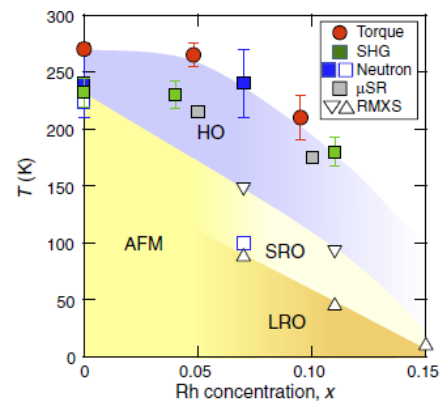


図 3: $\text{Sr}_2\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_4$ における温度-組成相図。反強磁性相(AFM)より高温に「隠れた秩序(HO)」と呼ばれる未知の電子状態が存在する。

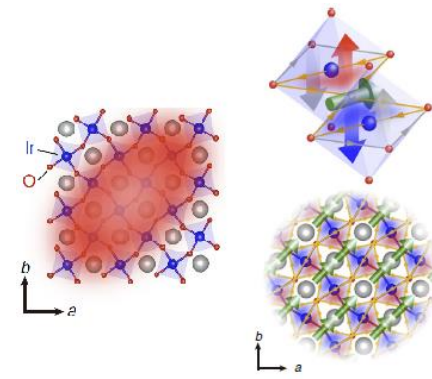


図 4: 隠れた秩序状態における対称性の破れ(左図)と軌道ループ電流(右図)によるアナポール秩序の模式図。

参考文献

- [1] Y. Sato, S. Kasahara, H. Murayama, Y. Kasahara, E.-G. Moon, T. Nishizaki, T. Loew, J. Porras, B. Keimer, T. Shibauchi and Y. Matsuda, *Nature Physics* **13**, 1074 (2017) [<https://doi.org/10.1038/nphys4205>].
- [2] H. Murayama, Y. Sato, R. Kurihara, S. Kasahara, Y. Mizukami, Y. Kasahara, H. Uchiyama, A. Yamamoto, E.-G. Moon, J. Cai, J. Freyermuth, M. Greven, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Nature Communications*, **10**, 3282 (2019) [<https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1>].
- [3] H. Murayama, Y. Sato, T. Taniguchi, R. Kurihara, X. Z. Xing, W. Huang, S. Kasahara, Y. Kasahara, I. Kimchi, M. Yoshida, Y. Iwasa, Y. Mizukami, T. Shibauchi, M. Konczykowski, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. X* **11**, 011021 (2021) [<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.11.011021>].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件/うち国際共著 13件/うちオープンアクセス 10件）

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 FeSe1-xSx	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 ear6419/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aar6419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 FeSe1-xSx 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 2/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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) 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., Boker 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 077001/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 Kawayama 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 033703/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 Haze Masahiro, Torii Yohei, Peters Robert, Kasahara Shigeru, Kasahara Yuichi, Shibauchi Takasada, Terashima Takahito, Matsuda Yuji	4. 巻 87
2. 論文標題 In Situ STM Observation of Nonmagnetic Impurity Effect in MBE-grown CeCoIn5 Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034702/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.034702	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 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 1946/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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) 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 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 3282/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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 060503(R)/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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) 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 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 115/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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 139/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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) 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 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-TaS ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013099/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 Kasahara S., Sato Y., Licciardello S., Culo M., Arsenijevic 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 107001/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 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)/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 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 Wu S.-F., Zhang W.-L., Thorsmolle V. K., Chen G. F., Tan G. T., Dai P. C., Shi Y. G., Jin C. Q., Shibauchi T., Kasahara S., Matsuda Y., Sefat A. S., Ding H., Richard P., Blumberg G.	4. 巻 2
2. 論文標題 In-plane electronic anisotropy resulted from ordered magnetic moment in iron-based superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033140/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033140	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 W. K., Hosoi S., Culo M., Kasahara S., Sato Y., Matsuura K., Mizukami Y., Berben M., Hussey N. E., Kontani H., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Non-Fermi liquid transport in the vicinity of the nematic quantum critical point of superconducting FeSe1?xSx	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033367/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033367	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 Hashimoto Takahiro, Ota Yuichi, Tsuzuki Akihiro, Nagashima Tsubaki, Fukushima Akiko, Kasahara Shigeru, Matsuda Yuji, Matsuura Kohei, Mizukami Yuta, Shibauchi Takasada, Shin Shik, Okazaki Kozo	4. 巻 6
2. 論文標題 Bose-Einstein condensation superconductivity induced by disappearance of the nematic state	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabb9052/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abb9052	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 Murayama H., Ishida K., Kurihara R., Ono T., Sato Y., Kasahara Y., Watanabe H., Yanase Y., Cao G., Mizukami Y., Shibauchi T., Matsuda Y., Kasahara S.	4. 巻 11
2. 論文標題 Bond Directional Anapole Order in a Spin-Orbit Coupled Mott Insulator Sr ₂ (Ir _{1-x} Rh _x)O ₄	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 011021/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.011021	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14件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 6件)

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) (国際学会)
4. 発表年 2019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) (国際学会)
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) (国際学会)
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 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 Materials Research Meeting (MRM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

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の強磁場熱輸送測定：FFLO状態
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 超シャロウバンド構造を有する鉄系超伝導体が示す新奇量子凝縮状態
3. 学会等名 東京大学物性研究所 ISSPワークショップ「量子物質研究の最近の進展と今後の展望」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 強磁場熱輸送測定によるFeSeのab面内磁場下におけるFFLO超伝導の観測
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigeru Kasahara
2. 発表標題 FFLO superconducting phases of FeSe studied in high-magnetic fields
3. 学会等名 ARHMF2020 & KINKEN Materials Science School 2020 for Young Scientists (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 イリジウム酸化物Sr2Ir1-xRhxO4におけるアナポール秩序と鉄系超伝導体FeSeにおけるFFLO状態
3. 学会等名 第14回 物性科学領域横断研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigeru Kasahara
2. 発表標題 Evidence for FFLO superconducting states in the BCS-BEC crossover superconductor FeSe
3. 学会等名 American Physical Society (APS) March Meeting 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠原成
2. 発表標題 FeSeにおけるBCS-BECクロスオーバーとFFLO超伝導
3. 学会等名 つくば-柏-本郷 超伝導かけしプロジェクト ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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
---------	---------