

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24684026

研究課題名(和文) 鉄系超伝導体におけるスピン及び軌道の物理と異常常伝導相の研究

研究課題名(英文) Studies on unusual normal state properties and spin/orbital physics in iron-based superconductors

研究代表者

笠原 成 (KASAHARA, SHIGERU)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10425556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,000,000円

研究成果の概要(和文)：鉄系超伝導体ではスピンや軌道の自由度が重要な役割を果たしている。この系の超伝導を理解するには、その多様な相図に隠されたスピンと軌道の揺らぎ、及びその秩序に起因した異常物性を実験的に捉え、超伝導との関係を明確にすることが必須であり、これには純良単結晶の創出と精密物性測定の融合が必要不可欠になる。本研究では、純良単結晶の育成、および、これと並行した各種精密物性測定技術を駆使した研究により、鉄系超伝導体を理解する上で重要と考えられる「量子臨界点」および「電子ネマティック相」の研究に焦点をあてた。また期間後半では、新たな系として鉄カルコゲナイドの異常な電子状態と量子凝縮相に関する研究に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：In iron-based superconductors, spin and orbital degrees of freedom play an important role. An important task in the community is thus to uncover the unusual normal state properties related to the spin/orbital degrees of freedom. In this work, we have focused on the studies of quantum critical point (QCP) hidden beneath the superconducting dome as well as the electronic nematic transition above there. Our studies based on clean single crystals of $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{Px})_2$ show the first evidence for the QCP beneath the superconducting dome, as well as the nematic transition in the normal state. These findings provide important clues for the understanding of iron-based superconductors. In the last year of this project, we have also investigated anomalous electronic properties and quantum condensate in iron-chalcogenides. In newly developed single crystals of FeSe, a cross-over from weakly coupled BCS state to tightly bound BEC state, as well as a possible new high-field phase have been found.

研究分野：固体電子物性

キーワード：鉄系超伝導 量子臨界点 電子ネマティック状態 擬ギャップ 多軌道自由度 超シャロウバンド BCS-BECクロスオーバー 新奇超伝導状態

1. 研究開始当初の背景

電子間の強いクーロン斥力や、スピン、或いは軌道の自由度などが複雑に絡み合った系では、従来にはない物性が創発されることがある。このような多体相互作用により生じる新奇物理現象の解明は、固体物理学における最重要課題の一つであり、2008年に発見された鉄系化合物の高温超伝導は、その顕著な例といえる。鉄系超伝導の物理において、その最大の問題は電子対の媒介起源であり、“スピン揺らぎ”による対形成機構と“軌道揺らぎ”による機構の対極する超伝導機構が提案されている。鉄系化合物において高い転移温度をもたらしているのは、スピンなのか、軌道なのか、その起源を解明するにあたって最も重要になるのは、各々の秩序とその揺らぎによって生じる異常物性を実験的に捉え、相図上に隠された揺らぎの広がりを超伝導との関係を明確にすることにある。

2. 研究の目的

鉄系超伝導体は、銅酸化物、重い電子系、有機超伝導に次ぐ新しい非従来型超伝導の物質群であり、その特徴は、スピンや軌道の自由度に起因する異常物性にある。上記の自由度が織りなす異常物性を実験的に見出し、超伝導発現との関連を明らかにすることは、電子対形成の起源を理解する上で極めて重要といえる。この為にはモデル物質となるべき明快かつ純良な系を基盤として、各種の精密物性測定を駆使することが必須となる。本研究では、純良単結晶を舞台として、鉄系超伝導体におけるスピン及び軌道の秩序とその揺らぎによって生じる異常物性を多角的実験により捉え、電子相図の理解と超伝導との関係を明確にすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、純良単結晶の育成、および、これと並行した各種精密物性測定技術を駆使した研究を行った。研究の基礎基盤となる対象物質には、鉄系超伝導体の中でも、特に純良な単結晶が得られる $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ にまず着目し、この系を中心とした研究を行った。 BaFe_2As_2 を母物質にもつ鉄系超伝導体 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ は、As サイトを等原子価の P 元素によって置換することで、キャリアドープを伴わずに反強磁性的スピン密度波 (SDW) 状態が抑制され、最高 31 K の超伝導が誘起される。この系では補償金属状態を保ったまま SDW 相から超伝導相の誘起/消失に至るまで系統的に得ることができ、鉄系超伝導を理解する上で重要なモデル物質といえる。この系を研究の中心として、特に鉄系超伝導を理解する鍵となる「超伝導ドーム中における量子臨界点」と「超伝導転移温度以上の温度における電子ネマティック相」の解明に焦点をあてた。また研究期間後半においては、新しい物質系への対応を掲げ、純良単結

晶の創出と迅速な精密測定により、得られた知見を物質設計や新奇現象の探索・解明に繋げていくことを計画した。一連の研究の中、新たに鉄カルコゲナイド FeSe の純良単結晶が開発され、各種精密測定を駆使することで、その特異な電子状態と量子凝縮状態についての研究を行った。

4. 研究成果

(1) 超伝導ドーム中における量子相転移

強相関電子系では、物理量の温度変化がしばしばフェルミ液体論から大きく逸脱した非フェルミ液体的振る舞いを示す。このような非フェルミ液体的振る舞いは、反強磁性秩序相などが消失する近傍で多く観測され、通常の熱的相転移とは異なり、絶対零度における量子揺らぎに起因した量子相転移(量子臨界点)とその臨界現象の側面として盛んに議論がされてきた。特に重要な点として、非従来型超伝導の多くが、このような反強磁性秩序近傍の非フェルミ液体的振る舞いが観測される周辺で出現することが挙げられ、このことは、量子臨界点とその揺らぎが非従来型超伝導に重要な役割をもたらしているという自然な発想につながる。しかしながら、過去の様々な系での研究を含め、非従来型超伝導と量子臨界点の関連を実験的に直接明示することは極めて困難であった。その最大の理由は、超伝導の存在によって多くの物理量は消失し、量子臨界点が超伝導ドーム中に存在するか否かの直接検証が困難となってしまう点にあった。

本研究で対象とした $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ では、構造・磁気相転移が消失する近傍において、非フェルミ液体的な輸送現象や、磁気量子振動から見積もられる電子の有効質量の増大、核磁気共鳴測定にみられる反強磁性揺らぎの増大など、様々な異常物性が見出され、同時に超伝導転移温度が最大となることが明らかになっている。これらは量子臨界点とその揺らぎの存在を示唆するものである。我々は量子臨界点の直接検証にあたって、超伝導の基礎的パラメータであるロンドン磁場侵入長に着目し、その組成依存性を詳細に調べることを行った。磁場侵入長はゼロ磁場、絶対零度極限における物理量であり、かつ、超伝導電子の有効質量を直接反映している。詳細な測定の結果、磁気秩序が消失し超伝導転移温度が最大となる最適組成において、磁場侵入長の絶対値が急激に大きくなり、その組成依存性に鋭い極大を示すことが明らかになった。この結果は超伝導相の中に量子臨界点が存在することを直接示すものであり、長年の未解決の問題に答えを与えるものと考えられる。また、この臨界点直上で超伝導転移温度が最大となることは、量子効果による

揺らぎの増大が超伝導転移温度を高める要因として強く関与していることを示唆する。[Science 336, 1554-1557 (2012).]

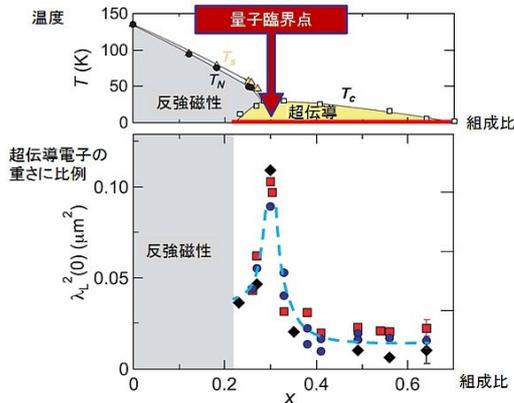


図 1: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ 単結晶における温度-組成相図と磁場侵入長の組成依存性。絶対零度で磁場侵入長の 2 乗(有効質量に比例)が量子相転移を反映して発散的に大きくなる。

(2) 超伝導転移温度以上の温度における電子ネマティック相

強相関電子系では、従来にない複雑な電子相が現れることが近年の研究から明らかになってきている。そのような電子相の一つとして、系の回転対称性を破って一軸的異方性を示す「電子ネマティック相」とよばれるものがあげられる。ネマティックという言葉は液晶の秩序相の一つに因んで付けられたものである。液晶でのネマティック相は、重心位置がばらばらであるが、棒状分子の方向が全体として異方性を持ち、ある方向を向いている状態となっている。このような状態は、並進対称性は破っていないが回転対称性を破った秩序状態とみなすことができる。これに対して、電子系でのネマティック秩序とは、広くは結晶格子から期待される回転対称性を電子系が自発的に破るような非自明な状態を呼んでおり、電子の多体系としての応答が異方性を示す場合を液晶の異方性になぞらえている。例えば、正方晶の結晶を持つ系では、格子は面内で 4 回対称性(C₄対称性)を持っているが、電子ネマティック相では結晶のもつ 4 回対称性を電子系が自発的に破る 2 回回転対称性を持つ。このような C₄対称性の破れた電子ネマティック相は、これまで銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ相で起こっているのではないかと議論がなされてきた。最近では、重い電子系超伝導体 URu₂Si₂の隠れた秩序相など、様々な強相関電子系において議論がなされており、電子間の強いクーロン斥力に加えて、スピンや多軌道自由度のもたらす新奇な秩序相といえる。

鉄系超伝導では、超伝導に隣接する反強磁性-斜方晶相に関して、最近、一軸圧力により非双晶化した単結晶での電気抵抗率測定や光学伝導度、角度分解光電子分光の測定が行

われ、顕著な面内異方性が報告されている。興味深いことにこの異方性は、これまで常磁性-正方晶相と考えられてきた $T > T_S$ の温度域においても存在しており、結晶がもつ C₄対称性から低下した電子系の状態、即ちネマティック状態が実現している可能性が示唆される。しかし、これらはすでに対称性の低下した低温の反強磁性-斜方晶相や、一軸圧力による非双晶化の下で行われており、この系において自発的な C₄対称性の破れであるネマティック秩序が形成されているのか否かを明らかにするには、 $T > T_S$ において一軸圧力による非双晶化を行わずに自発的な対称性の破れを調べなければならない。また、C₄対称性の破れが相転移現象として理解されるのか、さらには、超伝導発現とどのように関係するのかを明らかにする必要性があり、これには熱力学的な物理量を含めた相図上の広い範囲に渡る系統的实验が必要になる。このような目的に適合する実験手法として、磁気トルクによる高精度の面内異方性測定と、単結晶放射光 X 線回折を用いた構造評価に着目した。

その結果、BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ 純良単結晶を用いた一連の実験によって、従来考えられていた構造・磁気秩序相よりも高温領域において、結晶格子から期待される面内回転対称性を電子状態が自発的に破る「電子ネマティック相」が存在することが明らかになった。この対称性の破れた秩序相は超伝導相を覆うように広がっており、超伝導発現に関連している可能性が挙げられる。また光学伝導度測定や、角度分解光電子分光測定からは、状態密度の減少を示す擬ギャップが、同じ高温領域において現れることが明らかになった。ネマティック秩序の微視的起源の解明を含め、今後その理解が進み、鉄系超伝導の機構解明、更には新奇な物性物理の舞台の発掘へと繋がることを期待される。[Nature 486, 382-385 (2012).]

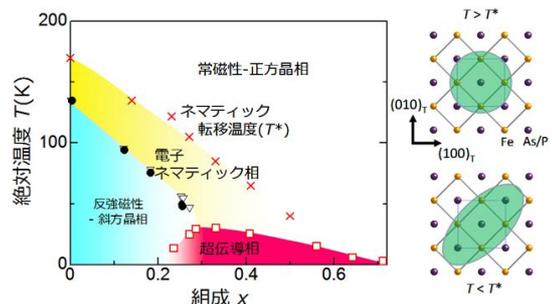


図 2: BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ 単結晶試料における温度-組成相図。4 回回転対称性が保たれていた状態(常磁性-正方晶相)から T^* 以下で回転対称性が破れたネマティック状態となり(電子ネマティック相)、より低温で並進対称性と時間反転対称性が破れた反強磁性相、またはゲージ対称性が破れた超伝導相へと転移する。

(3) FeSe における超シャロウバンド構造と BCS-BEC クロスオーバー

新たに開発された 11 系鉄カルコゲナイド超伝導体 FeSe ($T_c \sim 9.5$ K)の純良単結晶を用いて、熱伝導率、電子輸送現象、熱起電力、走査トンネル分光といった各種精密物性測定を行った。この物質が超シャロウバンド物質であることを見出すとともに、その超伝導が弱結合 BCS と強結合 BEC 状態のクロスオーバー領域にある特異な量子凝縮状態を与える可能性を明らかにした。

軌道秩序状態にあるこの物質が、バンド端からの有効フェルミエネルギー (或いはフェルミ温度) 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。驚くべきことに、通常金属のフェルミ温度が数万 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。同様の描像は高磁場量子振動測定の結果からも結論付けられる。

更にその超伝導状態では、フェルミエネルギーと超伝導ギャップがほぼ等しい特異な量子凝縮状態が実現していることを見出した。これまで知られている超伝導体では、超伝導ギャップがフェルミエネルギーに対して 5-6 桁小さいのに対し、この物質では異常な程に大きい。このことから、この物質の量子凝縮相が弱結合 BCS 状態から強結合 BEC 状態へのクロスオーバー領域にあると考えられる。

このような超シャロウバンド物質での超伝導では、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、これまでにない超伝導状態が実現することが期待される。希釈冷凍機温度域における熱伝導率測定を行ったところ、超伝導相内部の極低温高磁場において新たな量子凝縮状態への変化を示す異常が見出された。これらは超シャロウバンド構造という特異な電子状態を舞台とした BCS-BEC クロスオーバー領域にある量子凝縮状態の新しい展開を与えるものである。[Proc. Nat. Acad. Sci. USA. **111**, 16309-16313 (2014).]

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 21 件)

- "Fermi Surface of IrTe₂ in the Valence-Bond State as Determined by Quantum Oscillations", S. F. Blake, M. D. Watson, A. McCollam, S. Kasahara, R. D. Johnson, A. Narayanan, G. L. Pascut, K. Haule, V. Kiryukhin, T. Yamashita, D. Watanabe, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and A. I. Coldea [Phys. Rev. B **91**, 121105\(R\) \(2015\)](#).
- "Emergence of Orbital Nematicity in the Tetragonal Phase of BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", T. Iye, M.-H. Julien, H. Mayaffre, M. Horvatic, C. Berthier, K. Ishida, H. Ikeda, S. Kasahara, T. Shibauchi, and Y. Matsuda [J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 043705 \(2015\)](#).
*Editors' Choice
- "Local Characterization of Superconductivity in BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", Y. Lamhot, A. Yagil, N. Shapira, S. Kasahara, T. Watashige, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and O. M. Auslaender [Phys. Rev. B **91**, 060504\(R\) \(2015\)](#).
- "Structural Origin of the Anomalous Temperature Dependence of the Local Magnetic Moments in the CaFe₂As₂ Family of Materials", L. Ortenzi, H. Gretarsson, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, K. D. Finkelstein, W. Wu, S. R. Julian, Y.-J. Kim, I. I. Mazin, and L. Boeri [Phys. Rev. Lett. **114**, 047001 \(2015\)](#).
- "Anomalous Critical Fields in Quantum Critical Superconductors", C. Putzke, P. Walmsley, J. D. Fletcher, L. Malone, D. Vignolles, C. Proust, S. Badoux, P. See, H. E. Beere, D. A. Ritchie, S. Kasahara, Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and A. Carrington [Nature Commun. **5**, 5679 \(2014\)](#).
- "Anisotropy of the Superconducting Gap in the Iron-Based Superconductor BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", T. Yoshida, S. Ideta, T. Shimojima, W. Malaeb, K. Shinada, H. Suzuki, I. Nishi, A. Fujimori, K. Ishizaka, S. Shin, Y. Nakashima, H. Anzai, M. Arita, A. Ino, H. Namatame, M. Taniguchi, H. Kumigashira, K. Ono, S. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Ikeda, R. Arita, T. Saito, S. Onari, and H. Kontani [Sci. Rep. **4**, 7292 \(2014\)](#).
- "Disorder-Induced Topological Change of the Superconducting Gap Structure in Iron Pnictides", Y. Mizukami, M. Konczykowski, Y. Kawamoto, S. Kurata, S. Kasahara, K. Hashimoto, V. Mishra, A. Kreisler, Y. Wang, P. J. Hirschfeld, Y. Matsuda, and T. Shibauchi [Nature Commun. **5**, 5657 \(2014\)](#).
- "Field-Induced Superconducting Phase of FeSe in the BCS-BEC Crossover", S. Kasahara, T. Watashige, T. Hanaguri, Y. Kohsaka, T. Yamashita, Y. Shimoyama, Y. Mizukami, R. Endo, H. Ikeda, K. Aoyama, T. Terashima, S. Uji, T. Wolf, H. v.

- Loehneysen, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
[Proc. Natl. Acad. Sci. USA **111**, 16309-16313 \(2014\).](#)
9. "Anomalous Fermi Surface in FeSe Seen by Shubnikov-de Haas Oscillation Measurements", T. Terashima, N. Kikugawa, A. Kiswandhi, E.-S. Choi, J. S. Brooks, [S. Kasahara](#), T. Watashige, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda, T. Wolf, A. E. Bohmer, F. Hardy, C. Meingast, H. v. Lohneysen, and S. Uji
[Phys. Rev. B **90**, 144517 \(2014\).](#)
 10. "Infrared Pseudogap in Cuprate and Pnictide High-Temperature Superconductors", S. J. Moon, Y. S. Lee, A. A. Schafgans, A. V. Chubukov, [S. Kasahara](#), T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. A. Tanatar, R. Prozorov, A. Thaler, P. C. Canfield, S. L. Bud'ko, A. S. Sefat, D. Mandrus, K. Segawa, Y. Ando, D. N. Basov
[Phys. Rev. B **90**, 014503 \(2014\).](#)
 11. "Direct observation of lattice symmetry breaking at the hidden-order transition in URu₂Si₂", S. Tonegawa, [S. Kasahara](#), T. Fukuda, K. Sugimoto, N. Yasuda, Y. Tsuruhara, D. Watanabe, Y. Mizukami, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, Y. Matsuda, T. Shibauchi
[Nature Commun. **5**, 4188 \(2014\).](#)
 12. "Doping evolution of the quasiparticle excitations in heavily hole-doped Ba_{1-x}K_xFe₂As₂: A possible superconducting gap with sign-reversal between hole pockets", D. Watanabe, T. Yamashita, Y. Kawamoto, S. Kurata, Y. Mizukami, T. Ohta, [S. Kasahara](#), M. Yamashita, T. Saito, H. Fukazawa, Y. Kohori, S. Ishida, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, A. B. Vorontsov, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
[Phys. Rev. B **89**, 115112 \(2014\).](#)
 13. "Pseudogap formation above the superconducting dome in iron-pnictides" T. Shimojima, T. Sonobe, W. Malaeb, K. Shinada, A. Chainani, S. Shin, T. Yoshida, S. Ideta, A. Fujimori, H. Kumigashira, K. Ono, Y. Nakashima, H. Anzai, M. Arita, A. Ino, H. Namatame, M. Taniguchi, M. Nakajima, S. Uchida, Y. Tomioka, T. Ito, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, K. Ohgushi, [S. Kasahara](#), T. Terashima, H. Ikeda, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and K. Ishizaka
[Phys. Rev. B **89**, 045101 \(2014\).](#)
 14. "Quasiparticle Mass Enhancement Close to the Quantum Critical Point in BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", P. Walmsley, C. Putzke, L. Malone, I. Guillamon, D. Vignolles, C. Proust, S. Badoux, A.I. Coldea, M.D. Watson, [S. Kasahara](#), Y. Mizukami, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A. Carrington
[Phys. Rev. Lett. **110**, 257002 \(2013\).](#)
 15. "Normal-state spin dynamics in the iron-pnictide superconductors BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ and Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂ probed with NMR measurements", Y. Nakai, T. Iye, S. Kitagawa, K. Ishida, [S. Kasahara](#), T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ikeda, and T. Terashima
[Phys. Rev. B **87**, 174507 \(2013\).](#)
 16. "Disorder, critical currents, and vortex pinning energies in isovalently substituted BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", S. Demirdis, Y. Fasano, [S. Kasahara](#), T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, M. Konczykowski, H. Pastoriza, and C. J. van der Beek
[Phys. Rev. B **87**, 094506 \(2013\).](#)
 17. "Interplane resistivity of isovalent doped BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", M. A. Tanatar, K. Hashimoto, [S. Kasahara](#), T. Shibauchi, Y. Matsuda, and R. Prozorov
[Phys. Rev. B **87**, 104506 \(2013\).](#)
 18. "Thermodynamic phase diagram, phase competition, and uniaxial pressure effects in BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ studied by thermal expansion", A. E. Böhmer, P. Burger, F. Hardy, T. Wolf, P. Schweiss, R. Fromknecht, H. v. Löhneysen, C. Meingast, H. K. Mak, R. Lortz, [S. Kasahara](#), T. Terashima, T. Shibauchi, and Y. Matsuda
[Phys. Rev. B **86**, 094521 \(2012\).](#)
 19. "Infrared Measurement of the Pseudogap of P-Doped and Co-Doped High-Temperature BaFe₂As₂ Superconductors" S. J. Moon, A. A. Schafgans, [S. Kasahara](#), T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, M. A. Tanatar, R. Prozorov, A. Thaler, P. C. Canfield, A. S. Sefat, D. Mandrus, and D. N. Basov
[Phys. Rev. Lett. **109**, 027006 \(2012\).](#)
 20. "A sharp peak of the zero-temperature penetration depth at optimal composition in the iron-based superconductor BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂", K. Hashimoto, K. Cho, T. Shibauchi, [S. Kasahara](#), Y. Mizukami, R. Katsumata, Y. Tsuruhara, T. Terashima, H. Ikeda, M. A. Tanatar, H. Kitano, N. Salovich, R. W. Giannetta, P. Walmsley, A. Carrington, R. Prozorov, and Y. Matsuda

[Science 336, 1554-1557 \(2012\).](#)

21. "Electronic nematicity above the structural and superconducting transition in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ "
S. Kasahara, H. J. Shi, K. Hashimoto, S. Tonegawa, Y. Mizukami, T. Shibauchi, K. Sugimoto, T. Fukuda, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, and Y. Matsuda
[Nature 486, 382-385 \(2012\).](#)

[学会発表](計 11件)

1. "FeSe 純良単結晶における磁気トルク測定", 笠原成, 小林遼, 下山祐介, 綿重達哉, 山下卓也, 笠原裕一, 芝内孝禎, 松田祐司, Thomas Wolf, Hilbert v. Löhneysen, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21-24 日, 早稲田大学, 東京都新宿区.
2. "Preformed pairing in superconducting FeSe in the BCS-BEC cross-over regime", S. Kasahara, Y. Shimoyama, R. Kobayashi, T. Yamashita, T. Watashige, Y. Matsuda, T. Shibauchi, T. Wolf, A.E. Böhmer, F. Hardy, C. Meingast, H. v. Löhneysen, American Physical Society, March Meeting, March 2-6, San Antonio, TX, USA.
3. **(招待講演)** "FeSe における BCS-BEC クロスオーバー領域の超伝導", 笠原成, 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」, 2014 年 10 月, 京都大学, 京都市.
4. "FeSe 純良単結晶におけるパルス強磁場測定", 笠原成, 山下卓也, 下山祐介, 綿重達也, 小林遼, 芝内孝禎, 松田祐司, William Knafo, Matthew Watson, Amalia Coldea, Frederic Hardy, Christoph Meingast, Thomas Wolf, Hilbert v. Löhneysen, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7-10 日, 中部大学, 愛知県春日井市.
5. **(招待講演)** "Superconductivity in FeSe with Extremely Small Fermi Energy", S. Kasahara, Energy Materials Nanotechnology (EMN) Workshop on Iron and Iridium based Superconductivity, July 9-12, 2014, Cancun, Mexico.
6. **(招待講演)** "鉄系超伝導における量子臨界現象とネマティック電子状態の研究"
笠原成, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2013 年 03 月 27-30 日, 東海大学, 神奈川県平塚市.
7. "Nodal superconducting state in clean single crystals of FeSe", S. Kasahara, T.

Mikami, Y. Mizukami, Y. Kawamoto, S. Kurata, D. Watanabe, T. Shibauchi, Y. Matsuda, A.E. Bohmer, T. Wolf, C. Meingast, H. v. Löhneysen, American Physical Society March Meeting, March 3-7, 2014, Denver, Colorado, USA.

8. **(Invited Talk)** "Nodal s -wave superconductivity in iron based superconductors", S. Kasahara, IUMRS-ICA, Dec 16-20, 2013, Bangalore, India.
9. "FeSe 純良単結晶における磁場侵入長および熱伝導率測定", 笠原成, 渡邊大樹, 水上雄太, 三上拓也, 川本雄太, 藏田聡信, 芝内孝禎, 松田祐司, Anna Bohmer, Thomas Wolf, Peter Adelman, Christoph Meingast, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月 25-29 日, 徳島県徳島市.
10. **(Invited talk)** "Nematic transition and hidden quantum critical point in iron-pnictide superconductors", Shigeru Kasahara, American Physical Society March Meeting, March 18-22, 2013, Baltimore, Maryland, USA.
11. "Contrasts in the normal and superconducting properties of LiFeAs and LiFeP superconductors", S. Kasahara, K. Hashimoto, H. Ikeda, T. Terashima, Y. Matsuda and T. Shibauchi, The 10th international conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors ($\text{M}^2\text{S-HTSC}$), 29, Jul. - 3, Aug. 2012, Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA.

この他に共同研究発表 34 件

[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