

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654119

研究課題名（和文） 精密トルク測定による電子ネマティック相の研究

研究課題名（英文） Studies of electronic nematic phases by precision torque measurements

研究代表者

芝内 孝禎 (SHIBAUCHI TAKASADA)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00251356

研究成果の概要（和文）：本研究では、強相関電子系物質において議論されている、電子状態が結晶の持つ回転対称性を破る「電子ネマティック」状態を調べる新しい方法として、高感度な磁気測定が可能であるマイクロカンチレバーを用いた磁気トルクの色度依存性測定を用いた対称性の破れの検出を可能にした。実際に鉄系超伝導体の常伝導状態および重い電子系化合物  $URu_2Si_2$  の隠れた秩序相において、帯磁率の面内異方性を観測し、回転対称性の破れた電子ネマティック相の存在を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this project, we utilized the angular dependence of magnetic torque as a powerful probe of the “electronic nematicity”, which is a state with rotational symmetry breaking recently discussed in strongly correlated electron systems. By using highly sensitive micro cantilever technique, we found in-plane anisotropy of magnetic susceptibility in the normal state of iron-based superconductors as well as in the so-called hidden order phase of heavy-fermion compound  $URu_2Si_2$ . The results established the presence of electronic nematic states in these strongly correlated materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：強相関系

## 1. 研究開始当初の背景

「ネマティック」状態とは並進対称性は保ちながら回転対称性を破り異方性を示す秩序のことである。近年、高温超伝導体の擬ギャップ相、鉄ニクタイト系超伝導体の構造相転移近傍、 $Sr_3Ru_2O_7$  における量子臨界点近傍、重い電子系化合物  $URu_2Si_2$  の隠れた秩序相などの異常金属状態において、次々と電子状態が「ネマティック」性を示す電子ネマティック相の可能性が理論的、実験的に議論されており、大きな注目を浴びている。実験的には、バルク測定として電気抵抗やネルンスト効果などの輸送現象の異方性測定が主に議

論の対象となっているが、( $a$  軸と  $b$  軸が等価でない) 斜方晶の結晶を用いたり、一軸圧力を印可した状態での測定が多く、結晶の  $ab$  軸非等価性による異方性の効果を排除して電子系の異方性を議論することが困難であった。

電子的な起源によるネマティック相が存在するかどうかということは、ポメランチェック不安定性やストライプ秩序の融解などの新しい概念を伴った、自発的に面内回転対称性を破る新しい電子相の解明という、固体物理学における重要課題であり、その直接的な実験的検証が急務となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、 $5 \times 10^{-12}$  emu という非常に高感度な磁気測定が可能である、マイクロカンチレバーを用いた磁気トルク測定をこの問題に適用し、*ab* 軸が等価な微小純良単結晶試料の面内磁気異方性を観測し、電子ネマティック相の解明を目指す。以下に具体的な例を示す。

(1) 鉄ニクタイト系超伝導体では、正方晶-斜方晶構造相転移と反強磁性転移が接近して存在し、それぞれの転移温度が絶対零度に向かい消失する近辺で高温超伝導が実現するため、その出現機構として反強磁性揺らぎと軌道揺らぎの重要性が指摘されている。実際、斜方晶領域で大きな面内異方性が報告されており、正方晶の状態でも異方性があるネマティック相があるかどうかを解明することは、超伝導機構を理解する上で極めて重要である。

(2) 重い電子系超伝導体  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  では、17.5 K で 2 次相転移を示すことが 1985 年から知られているが、この転移でどのような対称性の破れがあるかが実験的に決定できておらず、「隠れた秩序」相とよばれている。この系の回転対称性が破れているかどうかの実験的研究はほとんど例が無く、本研究によりこれが明らかになれば四半世紀にわたる謎を解く鍵となることが期待される。

## 3. 研究の方法

本研究の特色は、磁気トルクの磁場角度依存性の精密測定を用いて、電子ネマティック相に現れる回転対称性の破れを面内磁気異方性で検知するという、全く新しいアプローチの研究を展開し、これまでほとんど明らかになっていない強相関電子系における異常金属相の電子ネマティック状態の詳細を解明する点にある。

### (1) 精密磁気トルク測定システムの開発

まず、マイクロカンチレバーとベクトルマグネットを組み合わせた精密磁気トルク測定システムの開発を行った。本研究で議論の中心となる角度依存性における 2 回対称性とは、*a* 軸からの角度  $\phi$  に対して  $\sin 2\phi$  (あるいは  $\cos 2\phi$ ) の角度依存性成分を指し、360 度の回転に対して 2 周期に相当する波となる。このような 2 回対称性成分は、試料の *ab* 面と磁場回転面がずれた場合にも現れるため、面内に対して正確に磁場の方向をあわせて回転させることが非常に重要となってくる。このため、本研究ではヘルムホルツ磁石とソレノイド磁石を組み合わせたベクトル型超伝導マグネットを用い、試料の *ab* 面と磁場を 0.02 度以下の精度で一致させた状態でクライオスタット上部に備えた回転機構によ

り角度回転を行う。万が一この精度以下での不一致による微小な 2 回対称性が検出されたとしても、その位相と温度依存性はネマティック相において出現する 2 回対称性とは一般的に異なるため、原理的に分離することが可能である。

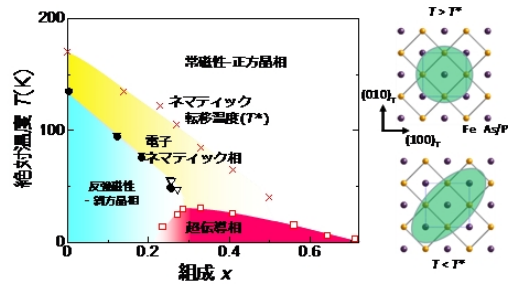
### (2) 精密磁気トルク測定システムによる電子ネマティック相の研究

前年度に開発した精密磁気トルク測定システムを用いて様々な正方晶電子系の異常金属相における微小純良単結晶試料の面内磁場角度回転測定を行い、2 回対称性の検出により電子ネマティック相の検証を行う。対象物質は鉄ニクタイト系超伝導体単結晶試料および重い電子系化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  である。鉄系超伝導体では、正方晶-斜方晶構造相転移よりも高温の正方晶の領域において、面内異方性が発生した電子ネマティック状態になっているかどうかをトルク測定から明らかにする。測定には、中でも非常に純良な単結晶試料が得られることが知られている等価元素置換系である  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  を用いて、P 置換量を広い範囲で変化させた単結晶試料で系統的な測定から、本質的にどのような電子状態が実現しているのかを明らかにする。重い電子系化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  では、トルクの面内異方性が「隠れた秩序」の転移温度以下で出現しているかどうかを明らかにすることで、起源が謎となっているこの 2 次相転移における対称性の破れに関する決定的な情報を得ることが期待できる。

## 4. 研究成果

成果として、微小カンチレバーを用いた磁気トルクの角度依存性測定システムを完成させ、鉄系超伝導体  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  の微小単結晶試料において角度依存性の温度変化の測定により、電子ネマティック相転移を見出すことに成功した。具体的には、転移温度が最大の超伝導を示す最適組成の試料において、転移温度 30 K よりはるかに高温の 80 K 程度からトルクの面内角度依存性に明確な 2 回対称性成分を観測した。このような 2 回対称成分は、4 回対称性をもつ正方晶の物質では通常期待されない振る舞いであり、電子系の対称性が方向性を示すネマティック状態となっていることを示す強い証拠である。これまで、鉄系超伝導体では、結晶構造が正方晶から斜方晶へと構造相転移することが、低置換の組成領域で報告されているが、この構造相転移は最適組成領域では見られなかった。さらに様々な組成について同様の測定を行ったところ、構造相転移温度よりも高温でトルクの 2 回対称性が現れることが明らかとなった。また、その転移温度は P 置換とともに系統的に低温へ向かってシフトしていき、超

伝導ドームを覆うように高置換領域まで延びていることがあきらかとなった。(下図参照) この結果は、鉄系超伝導体の相図上において、構造相転移とは別に電子系のネマティック相転移線がより高温に存在するという、新たな情報を与えるものであり、鉄系超伝導の発現機構を議論する上で重要な結果であると考えられる。さらにその磁場依存性測定により、電子ネマティック状態は磁場によって誘起されたものではなく、ゼロ磁場でも対称性を自発的に破る状態となっていることを強く示唆する結果を得ている。この結果は Nature 誌に掲載され大きな注目を浴びている。



さらに重い電子系化合物  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  では「隠れた秩序」相転移温度 17.5 K 以下で磁気トルクの面内異方性に  $\cos 2\phi$  の角度依存性が出現することを見出し、この秩序で面内 4 回回転対称性が破れることを明らかにした。さらに理論家との共同研究により、この系の Fermi 面を元にした第一原理計算から、このような面内回転対称性を破る  $E$  対称性の 32 極子の秩序が隠れた秩序の有力な候補であることを示した。この結果は長年の謎であった固体物理の難問に答えを与えるものである。

#### 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) 全て査読有り

[雑誌論文] (計 32 件)

1. 芝内孝禎, 笠原成, 松田祐司, 福田竜生, 杉本邦久, 「鉄系超伝導体の電子ネマティック転移と斜方歪み」  
日本結晶学会誌 **55** (2), 128-134 (2013).  
2013 年 4 月
2. M. A. Tanatar, K. Hashimoto, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and R. Prozorov, ``Interplane Resistivity of Isovalent Doped  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ '',  
Phys. Rev. B **87**, 104506 (2013). [5 pages]

10. 1103/PhysRevB. 87. 104506  
2013 年 3 月

3. K. Hashimoto, Y. Mizukami, R. Katsumata, H. Shishido, M. Yamashita, H. Ikeda, Y. Matsuda, J. A. Schlueter, J. D. Fletcher, A. Carrington, D. Gnida, D. Kaczorowski, and T. Shibauchi, ``Anomalous Superfluid Density in Quantum Critical Superconductors'',  
Proc. Natl. Acad. Sci. USA **110**, 3293-3297 (2013).

10. 1073/pnas. 1221976110  
2013 年 2 月

4. 芝内孝禎, 松田祐司, 「 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の隠れた秩序相における対称性の破れ」  
固体物理 **47** (11), 663-672 (2012).  
2012 年 11 月

5. M. Shimozawa, T. Watashige, S. Yasumoto, Y. Mizukami, H. Shishido, S. K. Goh, T. Terashima, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, ``Strong Suppression of Superconductivity by Divalent Ytterbium Kondo-Holes in  $\text{CeCoIn}_5$ '',  
Phys. Rev. B **86**, 144526 (2012). [5 pages]  
10. 1103/PhysRevB. 86. 144526  
2012 年 10 月

6. S. K. Goh, Y. Mizukami, H. Shishido, D. Watanabe, S. Yasumoto, M. Shimozawa, M. Yamashita, T. Terashima, Y. Yanase, T. Shibauchi, A. I. Buzdin, and Y. Matsuda, ``Anomalous Upper Critical Field in  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  Superlattices with Rashba-Type Heavy Fermion Interface'',  
Phys. Rev. Lett. **109**, 157006 (2012). [5 pages]  
10. 1103/PhysRevLett. 109. 157006  
2012 年 10 月

7. D. Watanabe, M. Yamashita, S. Tonegawa, Y. Oshima, H. M. Yamamoto, R. Kato, I. Sheikin, K. Behnia, T. Terashima, S. Uji, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, ``Novel Pauli-Paramagnetic Quantum Phase in a Mott Insulator'',  
Nature Commun. **3**, 1090 (2012). [6 pages]  
doi:10. 1038/ncomms2082  
2012 年 9 月

8. 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, ``Thermodynamic Phase Diagram, Phase Competition, and Uniaxial Pressure Effects in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  Studied by Thermal Expansion'', Phys. Rev. B **86**, 094521 (2012). [8 pages]  
10.1103/PhysRevB.86.094521  
2012年9月
9. K. Okazaki, Y. Ota, Y. Kotani, W. Malaeb, Y. Ishida, T. Shimojima, T. Kiss, S. Watanabe, C.-T. Chen, K. Kihou, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, T. Saito, H. Fukazawa, Y. Kohori, K. Hashimoto, T. Shibauchi, Y. Matsuda, H. Ikeda, H. Miyahara, R. Arita, A. Chainani, and S. Shin, ``Octet-Line Node structure of Superconducting Order Parameter in  $\text{KFe}_2\text{As}_2$ '', Science **337**, 1314-1317 (2012).  
10.1126/science.1222793  
2012年9月
10. S. Tonegawa, K. Hashimoto, K. Ikeda, Y. H. Lin, H. Shishido, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, ``Cyclotron Resonance in the Hidden-Order Phase of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ '', Phys. Rev. Lett. **109**, 036401 (2012). [5 pages]  
10.1103/PhysRevLett.109.036401  
2012年7月
11. 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, ``Measurement of an Energy Pseudogap for P-Doped and Co-Doped High-Temperature  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  Superconductors Using Infrared Spectroscopy'', Phys. Rev. Lett. **109**, 027006 (2012). [6 pages]  
10.1103/PhysRevLett.109.027006  
2012年7月
12. K. Hashimoto, K. Cho, T. Shibauchi, S. Kasahara, Y. Mizukami, R. Katsumata, Y. Tsuruhara, T. Terashima, H. Ikeda, M. A. Tanatar, H. Kitano, P. Walmsley, A. Carrington, R. Prozorov, and Y. Matsuda, ``A Sharp Peak of the Zero-Temperature Penetration Depth at Optimal Composition in the Iron-Based Superconductor  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ '', Science **336**, 1554-1557 (2012).  
10.1126/science.1219821  
2012年6月
13. 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, ``Electronic Nematicity above the Structural and Superconducting Transition in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ '', Nature **486**, 382-385 (2012).  
10.1038/nature11178  
2012年6月
14. H. Ikeda, M.-T. Suzuki, R. Arita, T. Takimoto, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, ``Emergent Rank-5 Nematic Order in  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ '', Nature Phys. **8**, 528-533 (2012).  
10.1038/nphys2330  
2012年6月
15. T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, ``Gradual Suppression of Antiferromagnetism in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ : Zero-Temperature Evidence for a Quantum Critical Point'', Phys. Rev. B **85**, 184505 (2012). [5 pages]  
10.1103/PhysRevB.85.184505  
2012年5月
16. S. Kasahara, K. Hashimoto, H. Ikeda, T. Terashima, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, ``Contrasts in Electron Correlations and Inelastic Scattering between  $\text{LiFeP}$  and  $\text{LiFeAs}$  Revealed by Charge Transport'', Phys. Rev. B **85**, 060503(R) (2012). [5 pages]  
10.1103/PhysRevB.85.060503  
2012年2月
17. T. Iye, Y. Nakai, S. Kitagawa, K. Ishida, S. Kasahara, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and T. Terashima, ``Microscopic Evidence of Direct Coupling between Magnetic and Superconducting Order Parameters in

BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub>’,

J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 033701 (2012). [4 pages]

10.1143/JPSJ.81.033701

2012年2月

18. K. Hashimoto, S. Kasahara, R. Katsumata, Y. Mizukami, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, A. Carrington, Y. Matsuda, and T. Shibauchi, ‘‘Nodal versus Nodeless Behaviors of the Order Parameters of LiFeP and LiFeAs Superconductors from Magnetic Penetration-Depth Measurements’’,

Phys. Rev. Lett. **108**, 047003 (2012). [5 pages]

10.1103/PhysRevLett.108.047003

2012年1月

19. C. Putzke, A. I. Coldea, I. Guillamon, D. Vignolles, A. McCollam, D. LeBoeuf, M. D. Watson, I. I. Mazin, S. Kasahara, T. Terashima, T. Shibauchi, Y. Matsuda, and A. Carrington, ‘‘de Haas-van Alphen Study of the Fermi Surfaces of Superconducting LiFeP and LiFeAs’’,

Phys. Rev. Lett. **108**, 047002 (2012). [5 pages]

10.1103/PhysRevLett.108.047002

2012年1月

20. Y. Wang, J. S. Kim, G. R. Stewart, P. J. Hirschfeld, S. Graser, S. Kasahara, T. Terashima, Y. Matsuda, T. Shibauchi, and I. Vekhter, ‘‘Volovik Effect in a Highly Anisotropic Multiband Superconductor: Experiment and Theory’’,

Phys. Rev. B **84**, 184524 (2011). [10 pages]

10.1103/PhysRevB.84.184524

2011年11月

21. T. Shibauchi, and Y. Matsuda, ‘‘Thermodynamic Evidence for Broken Four-fold Rotational Symmetry in the Hidden-Order Phase of URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>’’, Physica C **481**, 229-234 [Special Issue on Stripes and Electronic Liquid Crystals in Strongly Correlated Systems] (2012).

DOI: 10.1016/j.physc.2012.04.012

2012年11月

22. 芝内孝禎, 「バルク測定で見る強相関電子系における対称性の破れ～異方的超伝導から電子ネマティック状態まで」(第2回重い電子系若手秋の学校テキスト)

物性研究 **97**, 875-897 (2012).

2012年1月

23. 山下穰、芝内孝禎、松田祐司、「二次元量子スピン液体の熱輸送現象」

日本物理学会誌) **66**, 928-932 (2011).

2011年12月

24. Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimosawa, T. Yasumoto, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani, and Y. Matsuda, ‘‘Extremely Strong-Coupling Superconductivity in Artificial Two-Dimensional Kondo Lattices’’,

Nat. Phys. **7**, 849-853 (2011).

doi:10.1038/nphys2112

2011年10月

25. M. Yamashita, Y. Senshu, T. Shibauchi, S. Kasahara, K. Hashimoto, D. Watanabe, H. Ikeda, T. Terashima, I. Vekhter, A. B. Vorontsov, and Y. Matsuda, ‘‘Nodal Gap Structure of Superconducting BaFe<sub>2</sub>(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>)<sub>2</sub> from Angle-Resolved Thermal Conductivity in a Magnetic Field’’,

Phys. Rev. B **84**, 060507(R) (2011). [4 pages]

10.1103/PhysRevB.84.060507

2011年8月

26. B. J. Arnold, S. Kasahara, A. I. Coldea, T. Terashima, Y. Matsuda, T. Shibauchi, and A. Carrington, ‘‘Nesting of Electron and Hole Fermi Surfaces in Nonsuperconducting BaFe<sub>2</sub>P<sub>2</sub>’’,

Phys. Rev. B **83**, 220504(R) (2011). [4 pages]

10.1103/PhysRevB.83.220504

2011年6月

27. 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, and S. Shin, ‘‘Orbital-Independent Superconducting Gaps in Iron-Pnictides’’,

Science **332**, 564-567 (2011).

DOI: 10.1126/science.1202150

2011年4月

ほか5件

[学会発表] (計 21 件)

1. 芝内孝禎

「鉄系、銅系超伝導の実験」(招待講演)

日本物理学会第 68 回年次大会

2013 年 3 月 28 日

広島大学東広島キャンパス

2. Takasada Shibauchi

「Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ 」, (招待講演)

The March Meeting of the American Physical Society

2013 年 3 月 21 日

Baltimore, MD, USA

3. Takasada Shibauchi

「Antiferromagnetic Quantum Critical Point and Nematic Transition in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ 」, (招待講演)

International Symposium on Superconductivity 2012 (ISS2012),

2012 年 12 月 4 日

Funabori, Tokyo

4. Takasada Shibauchi

「Quantum Critical Phenomena in Strongly Correlated Electron Systems」, (招待講演)

Summit of Material Science 2012 (SMS2012),

2012 年 11 月 30 日

Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai

5. 芝内孝禎

「鉄ヒ素系超伝導体の隠れた量子臨界点とネマティック相転移」(招待講演)

日本物理学会秋季大会

2012 年 9 月 19 日

横浜国立大学

6. Takasada Shibauchi

「Exotic Superconductivity of Heavy Electrons in Artificial Two-Dimensional Kondo Lattices」, (招待講演)

International Conference on Quantum Criticality and Novel Phases (QCNP),

2012 年 8 月 29 日

Dresden, Germany

7. Takasada Shibauchi

「Quantum Critical Point Hidden beneath the Superconducting Dome of  $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$ 」, (招待講演)

International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S 2012),

2012 年 8 月 1 日

Washington DC, USA

8. Takasada Shibauchi

「Exotic Superconductivity of Heavy Electrons in Artificial Two-Dimensional Kondo Lattices」, (招待講演)

The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012) with Strongly Correlated Electron Systems (SCES),

2012 年 7 月 11 日

Busan, Korea

9. Takasada Shibauchi

「Symmetry Breaking in the Hidden Order Phase of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ 」, (招待講演)

International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2012),

2012 年 5 月 2 日

Istanbul, Turkey

10. Takasada Shibauchi

「Quantum Criticality and Superconducting Gap Structure in  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ 」, (招待講演)

26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26),

2011 年 8 月 15 日

Beijing, China

ほか 11 件

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芝内 孝禎 (SHIBAUCHI TAKASADA)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00251356