

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287070

研究課題名(和文)電子型誘電体における新奇な誘電性の探索と発現機構の解明

研究課題名(英文) Novel dielectric phenomena in electric ferroelectricity

研究代表者

石原 純夫 (Ishihara, Sumio)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30292262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：電子の電荷分布が空間の反転対称性を破ることで電気分極が発生する新しいタイプの強誘電体「電子型強誘電体」において、時間的・空間的に大きな分極揺らぎ、ならびに磁気双極子と電気双極子との相関に焦点を当て、通常誘電体との異なる新しい物性を理論的に明らかにした。特に、幾何学的フラストレーションのある系における大きな電荷揺らぎ、分子ダイマー構造を持つ系における電気磁気効果、電気分極揺らぎに起因する磁気秩序の不安定性について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Dielectric and magnetodielectric properties in “electronic ferroelectricity” were examined. In particular, large spacial and temporal dielectric fluctuations and correlation between magnetic and electric dipole moments were focused on. We revealed mainly large dielectric fluctuation in a geometrical frustrated lattice, a linear magnetodielectric effect in dimer-type organic molecular solids, and melting of the magnetic long range order due to dielectric fluctuations.

研究分野：固体物性理論

キーワード：強相関電子 誘電体 磁性体 光物性 電荷秩序 電気磁気効果

1. 研究開始当初の背景

「電子型誘電体」は、電子の電荷分布が空間の反転対称性を破ることで電気分極が発生する新しいタイプの強誘電体である。電子型誘電体の物性は「電子の物理」から理解する必要があり、誘電性、伝導性、磁性、光物性、電子格子相互作用などの要素が互いに絡み合い切り離せない“複合電子システム”と捉えられる。電気分極を担うのが質量の小さな電子であることは、電気分極に大きな揺らぎが生じこれが誘電性に重要な役割を果たすことを意味している。このため特異なマルチフェロイクス、高速な分極反転、本質的な分極クラスター、分極揺らぎ超伝導、金属絶縁体転移に伴う誘電異常など、従来の誘電体には見られない新奇で多様な物性が期待される

2. 研究の目的

電子型誘電体において「電子が分極を担うことが格子による分極を超えたとのよう新しい物性をもたらすか」を、次の点から明らかにする：[電子の軽い質量に起因する時間的・空間的に大きな分極揺らぎ]、[電子が持つスピン自由度による磁気双極子と電気双極子との相関]。

3. 研究の方法

- (1) スピン液体状態と電気分極揺らぎの相関についてスレーブ粒子法を用い電気分極揺らぎの効果を評価する。
- (2) 平均場近似法を用いて、強誘電相と常誘電相の境界における磁気秩序の安定性、スピン液体の実現の可能性を解析する。
- (3) 第一原理電子状態計算で得られたブロッホ関数をワニエ関数に射影することにより、とびうつり積分などの基本的な物理量を評価する。
- (4) 平均場近似による多種電子相の競合の可能性を調べ、より量子効果を取り込むために厳密対角化・変分モンテカルロ法を用いた定量性の高い数値計算を用いる。

4. 研究成果

- (1) 電子強誘電体を LuFe_2O_4 における電荷フラストレーション系における電荷ダイナミクスについて解析を行った。揺らぎにより実現する電荷秩序において広いエネルギー範囲に電荷スペクトルが分布すること、電荷秩序温度以下でも揺らぎが残ることを見出した。これらの結果は最近の光吸収スペクトルと共鳴非弾性 X 線散乱スペクトルの実験を説明する。
- (2) 分子ダイマー構造を持つ有機化合物において、電気磁気効果が発現する可能性を見出した。分子ダイマー内で電荷の偏りのある電気分極電荷秩序と反強磁性秩序が共存するとき、系の時間反転対称性、空間反転対称性のそれぞれは破れているが、その同時操作に対して不変であるこ

とを示した。これは線形電気磁気効果の可能性を示唆する。微視的な拡張ハバードモデルの解析によりこれを数値的に確かめた。この現象の背後にはトロイダルモーメントの秩序が存在することを指摘し、電荷ガラス状態においても電気磁気効果が発生することを示した。

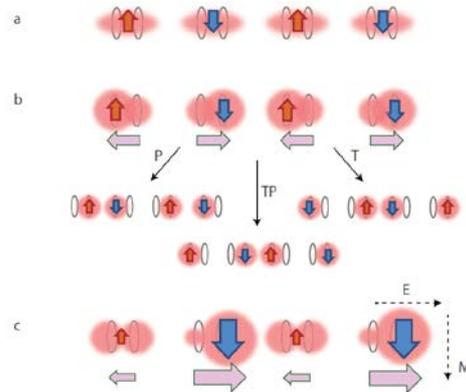


図1：ダイマー構造のある系におけるスピン電荷構造と対称性。a:電気非分極相、b:電気分極相と時間反転・空間判定操作、c:電場印加によるスピン電荷構造の変化。

- (3) 分子ダイマー構造を持つ有機化合物において、電子スピンと電荷自由度の間のエンタングルメントについて調べた。二つのスパイラルスピン構造が競合するパラメータ領域において、長距離秩序が不安定となることを示した。
- (4) ダイマー型分子導体における磁気構造と電荷構造を、電子相関効果を適切に取り扱うことで調べた。特に、反強磁性モット絶縁体、電気分極のある電荷秩序絶縁体、金属相の三者の競合について調べた。金属絶縁体転移近傍の金属相において、スピン揺らぎより電荷揺らぎが支配的となること、これが転移に向けて増大することを見出した。この現象はこれまでの弱結合理論の結果の再考察を促すものであり、分子ダイマー内の電荷自由度の重要性を改めて指摘した。
- (5) 電荷フラストレーション系の典型例である $\theta\text{-ET}_2\text{X}$ に対し拡張ハバードモデルにさらに長距離のクーロン斥力を加味したモデルを厳密対角化によって調べ、実験で見られている電荷揺らぎの波数を再現しこれが特徴的な「傾いたストライプ」構造を持つことを明らかにした。
- (6) Fe_3O_4 の低温の強誘電歪みについて電子状態計算を行い、複数の歪みモードの不安定性を調べた。X モードの歪みが全エネルギーを低下させ、低温の電荷秩序構造を安定化させることが明らかとなった。X モードの歪みは高温金属相のフェルミ面のネスティングと関わっており、金属絶縁体転移の駆動力になっていることが確かめられた。

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 34 件)

1. “Phase competition and superconductivity in κ -(BEDT-TTF)₂X: importance of intermolecular Coulomb interactions”, H. Watanabe, H. Seo, S. Yunoki, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 033703-1-5 (2017). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.104705>
2. “Influences of orientation on magnetoelectric coupling at La_{1-x}Sr_xMnO₃/BaTiO₃ interface from Ab initio calculations” T. T. Nguyen, K. Yamauchi, T. Oguchi, N. N. Hoang J. Electronic Materials, 1-7 (2017). 査読有, [10.1007/s11664-016-5277-8](https://doi.org/10.1007/s11664-016-5277-8)
3. “Spin and charge fluctuations near metal-insulator transition in dimer-type molecular solid”, N. Sato, T. Watanabe, M. Naka, S. Ishihara, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 053701-1-5 (2017). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.053701>
4. “Phase competition, solitons, and domain walls in neutral-ionic transition systems”, M. Tsuchiizul, H. Yoshioka H. Seo, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 104705-1-10 (2016). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.104705>
5. “Magnetic field effects in a correlated electron system with spin-state degree of freedom - Implication of an excitonic insulator -”, T. Tatsuno, E. Mizoguchi, J. Nasu, M. Naka, S. Ishihara J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 083706-1-5 (2016). 査読有, [10.7566/JPSJ.85.083706](http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.083706)
6. “Pulse excitation to continuous-wave excitation in a low-dimensional interacting quantum system”, A. Ono, H. Hashimoto, S. Ishihara, Phys. Rev. B **94**, 115152-1-8 (2016). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.115152>
7. “Quantum melting of magnetic order in an organic dimer-Mott insulating system”, M. Naka, S. Ishihara, Phys. Rev. B **93**, 195114-1-5 (2016). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.195114>
8. “Phase competition, solitons, and domain walls in neutral-ionic transition systems”, M. Tsuchiizul, H. Yoshioka, H. Seo, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 2016104705-1-10 (2016). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.104701>
9. “Magnetodielectric detection of magnetic quadrupole order in Ba(TiO)Cu₄(PO₄)₄ with Cu₄O₁₂ square cupolas”, K. Kimura, P. Babkevich, M. Sera, M. Toyoda, K. Yamauchi, G. S. Tucker, J. Martius, T. Fennell, P. Manuel, D. D. Khalyavin, R. D. Johnson, T. Nakano, Y. Nozue, H. M. Ronnow, T. Kimura, Nat. Comm. **7**, 13039/1-7 (2016). 査読有, [10.1038/ncomms13039](https://doi.org/10.1038/ncomms13039)
10. “Ultrafast response of plasma-like reflectivity edge in (TMTTF)₂AsF₆ driven by 7-fs, 1.5-cycle strong-light field”, Y. Naitoh, Y. Kawakami, T. Ishikawa, Y. Sagae, H. Itoh, K. Yamamoto, T. Sasaki, M. Dressel, S. Ishihara, Y. Tanaka, K. Yonemitsu, S. Iwai, Phys. Rev. B **93**, 165126-1-5 (2016). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.165126>
11. “Theory of valence transition in BiNiO₃”, M. Naka, H. Seo, Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **116**, 056402-1-4 (2016). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.056402>
12. “Phase diagram and collective excitation in excitonic insulator: from the orbital physics viewpoint” J. Nasu, T. Watanabe, M. Naka, S. Ishihara, Phys. Rev. B **93**, 205136-1-15 (2016). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.205136>
13. “Observation of momentum-resolved charge fluctuations proximate to the charge-order phase using resonant inelastic x-ray scattering”, M. Yoshida, K. Ishii, M. Naka, S. Ishihara, I. Jarrige, K. Ikeuchi, Y. Murakami, K. Kudo, Y. Koike, T. Nagata, Y. Fukada, N. Ikeda, J. Mizuki, Sci. Rep. **6**, 23611-1-8 (2015). 査読有, [10.1038/srep23611](https://doi.org/10.1038/srep23611)
14. “Photoinduced correlated electron dynamics in a two-leg ladder Hubbard system”, H. Hashimoto, S. Ishihara, Phys. Rev. B **93**, 165133-1-10 (2016). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.165133>
15. “Ultrafast electronic state conversion at room temperature utilizing hidden state in cuprate

- ladder system”, R. Fukaya, Y. Okimoto, M. Kunitomo, K. Onda, T. Ishikawa, S. Koshihara, H. Hashimoto, S. Ishihara, A. Isayama, H. Yui, T. Sasagawa Nat. Comm. **6**, 8519-1-7 (2015). 査読有, 10.1038/ncomms9519
16. “Magnetolectric effect in organic molecular solids”, M. Naka, S. Ishihara, Sci. Rep. **6**, 20781-1-7 (2015). 査読有, 10.1038/srep20781
 17. “Photo-induced phase transition in charge order systems -charge frustration and interplay with lattice-“, H. Hashimoto, H. Matsueda, H. Seo, S. Ishihara J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 113702-1-5 (2015). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.113702>
 18. “Absence of Jahn-Teller transition in the hexagonal Ba₃CuSb₂O₉ single crystal”, N. Katayama, K. Kimura, Y. Hanc, J. Nasue, N. Drichko, Y. Nakanishi, M. Halim, Y. Ishiguro, R. Satake, E. Nishibori, M. Yoshizawa, T. Nakano, Y. Nozue, Y. Wakabayashi, S. Ishihara, M. Hagiwara, H. Sawa, S. Nakatsuji, Proc. Natl. Acad. Sci. (USA) **112**, 9305-9309 (2015). 査読有, 10.1073/pnas.1508941112
 19. “Emergence of charge degrees of freedom under high pressure in the organic dimer-Mott insulator β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂”, K. Hashimoto, R. Kobayashi, H. Okamura, H. Taniguchi, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, S. Iguchi, M. Naka, S. Ishihara, T. Sasaki, Phys. Rev. B **92**, 085149-1-7 (2015). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.085149>
 20. “Charge dynamics in a correlated fermion system on a geometrically frustrated lattice”, M. Naka, S. Ishihara, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 023703-1-4 (2015). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.085149>
 21. “Fragment model study of molecular multiorbital system β' -X[Pd(dmit)₂]₂”, H. Seo, T. Tsumuraya, M. Tsuchiizu, T. Miyazaki, R. Kato, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 044716-1-10(2015). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.044716>
 22. “First-principles study of hydrogen-bonded molecular conductor κ -H₃(Cat-EDT-TTF/ST)₂“, T. Tsumuraya, H. Seo, R. Kato, T. Miyazaki, Phys. Rev. B **92**, 035102-1-9 (2015). 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.035102>
 23. “Resonating valence-bond state in an orbitally degenerate quantum magnet with dynamical Jahn-Teller effect”, J. Nasu, S. Ishihara, Phys. Rev. B **91**, 045117-1-8 (2015). 査読有, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.045117>
 24. “A-site-driven ferroelectricity in strained ferromagnetic La₂NiMnO₆ thin films”, R. Takahashi, I. Ohkubo, K. Yamauchi, M. Kitamura, Y. Sakurai, M. Oshima, T. Oguchi, Y. Cho, M. Lippmaa, Phys. Rev. B **91**, 134107-1-9 (2015). 査読有, 10.1103/PhysRevB.91.134107
 25. “Dynamical properties of interacting charge system on frustrated lattices”, M. Naka, H. Hashimoto, and S. Ishihara, Physica B **460**, 68-72 (2015). 査読有, Special Issue on Electronic Crystals <http://doi.org/10.1016/j.physb.2014.11.042>
 26. “Ab-initio prediction of magnetoelectricity in infinite-layer CaFeO₂ and MgFeO₂”, K. Yamauchi, T. Oguchi, S. Picozzi, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 094712-1-6 (2014). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.094712>
 27. 「分子性ダイマーモット絶縁体の特異な誘電・光応答と電子誘電性」、岩井伸一郎, 石原純夫、佐々木孝彦、固体物理 **50**, 59-74 (2015) 査読無
 28. “Optical freezing of charge motion in an organic conductor”, T. Ishikawa, Y. Sagae, Y. Naitoh, Y. Kawakami, H. Itoh, K. Yamamoto, K. Yakushi, H. Kishida, T. Sasaki, S. Ishihara, Y. Tanaka, K. Yonemitsu S. Iwai, Nat. Comm. **5**, 5528-1-6 (2014) 査読有, 10.1038/ncomms6528
 29. “Photo-Induced dynamics in charge-frustrated systems”, H. Hashimoto, H. Matsueda, H. Seo, S. Ishihara, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 123703-1-4 (2014) 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.123703>
 30. “Long-period charge correlations in charge-frustrated molecular theta-(BEDT-TTF)₂X”, M. Naka, H. Seo, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 053706-1-5(2014). 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.053706>
 31. “Magnetic field effect in one dimensional charge ordering systems”, Y. Otsuka, H. Seo, Y. Motome, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 083703 (2014). 査読有,

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.083703>

32. “Electronic ferroelectricity in molecular organic crystals”, S. Ishihara, *J. Phys.: Cond. Matt.* **26**, 493201-1-12 (2014). 査読有, 10.1088/0953-8984/26/49/493201

[学会発表] (計 87 件)

1. “平均場近似による電荷秩序系の光誘起初期ダイナミクスの研究 II” 妹尾仁嗣, 石原純夫, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日-20 日 (大阪大学豊中キャンパス、大阪市)
2. “ダイマーモット系の金属 絶縁体転移近傍における電荷・磁気ゆらぎ” 佐藤直道, 渡邊努, 中惇, 石原純夫, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日-20 日 (大阪大学豊中キャンパス、大阪市)
3. “Nonequilibrium spin and charge dynamics in low dimensional correlated systems” S. Ishihara and A. Ono, Nonequilibrium phenomena in quantum systems, 2016 年 12 月 17-21 日、(Krvavec, Slovenia)
4. “Transient correlated electron dynamics with multi degrees of freedom”, S. Ishihara, A. Ono, and H. Hashimoto, 2nd workshop on ultrafast dynamics in correlated systems, 2016 年 10 月 10 日-12 日 (PSI, Switzerland)
5. “平均場近似による電荷秩序系の光誘起初期ダイナミクスの研究” 妹尾仁嗣, 石原純夫, 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日-16 日 (金沢大学角間キャンパス、金沢)
6. “BiMO₃ (M:3d 遷移金属元素) の第一原理電子状態計算” 山内邦彦, 妹尾仁嗣, 中惇, 求幸年, 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日-16 日 (金沢大学角間キャンパス、金沢)
7. “Spin-valley coupling and topological phase transition in ferroelectric oxide hetero structures”, K. Yamauchi, 11th Korea-Japan Conference on Ferroelectrics (KJC-FE11), 2016 年 8 月 7 日-10 日、(Sungkyunkwan University, Seoul, Korea)
8. “Excitonic insulating state studied from orbital physics viewpoint” S. Ishihara, J. Nasu, T. Tatsuno, T. Watanabe, M. Naka, New Quantum Phases with Frustration and Entanglement, 2016 年 6 月 19 日-23 日、(Cracow, Poland)
9. “Dielectric and Magnetoelectric Effects in Organic Molecular Solid”, S. Ishihara, M. Naka, 13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF) and International Workshop on Relaxor Ferroelectrics 2016 (IWRF), 2016 年 6 月 19 日-24 日 (島根コンベンションセンター、松江)
10. “強誘電酸化物を用いたスピン・バレートロニクス の第一原理物質設計 “、山内邦彦、第一回ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, 2016 年 1 月 28 日-29 日 (東京理科大学神楽坂キャンパス、東京)
11. “Photoinduced Hidden States in Correlated Systems” S. Ishihara, J. Ohara, E. Iyoda, H. Hashimoto, H. Matsueda, H. Seo, Hidden Order in a Complex World: Past, Present and Future, 2015 年 10 月 1 日-3 日 (Oak Ridge, USA)
12. “プロトン-電子相関係における電荷・スピン状態”、中惇、石原純夫、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 16 日-19 日 (関西大学千里山キャンパス、大阪)
13. “変分モンテカルロ法による 2 軌道ハバード模型の励起子絶縁体の研究” 渡邊努、那須譲治、中惇、石原純夫、日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 16 日-19 日 (関西大学千里山キャンパス、大阪)
14. “Novel dielectric, magnetic and magnetodielectric effects in dimer-type organics salts”, S. Ishihara, M. Naka, T. Watanabe, J. Nasu, 11th International Conference on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM 2015), 2015 年 9 月 6 日-12 日 (Bad Gogging, Germany)
15. “Stripe-type charge order and destabilization of the threefold state in theta-(BEDT-TTF)₂X “、H. Seo, M. Naka, 11th International Conference on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM 2015), 2015 年 9 月 6 日-12 日 (Bad Gogging, Germany)
16. “ダイマーモット系における電荷自由度と非磁性状態” 中惇、渡邊努、那須譲治、石原純夫、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21 日-24 日 (早稲田大学早稲田キャンパス、東京)
17. “Photo-irradiation effect in frustrated charge ordered systems”, S. Ishihara, E. Iyoda, H. Hashimoto, Yukawa International Seminar (YKIS) 2014: “Real time dynamics in spin-charge correlated electron systems”, 2014 年 12 月 3 日-5 日 (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto)

18. “ダイマーマット絶縁体における特異な電気磁気効果”中惇, 石原純夫, 日本物理学会秋季大会 2014 年 9 月 7 日-10 日 (中部大学春日井キャンパス、春日井)
19. “ダイマー内電荷自由度を有する拡張ハバードモデルにおける電荷状態と磁気状態”渡邊努, 中惇, 那須謙治, 石原純夫, 日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月 7 日-10 日 (中部大学春日井キャンパス、春日井)
20. “巨大負熱膨張の理論: 金属間電荷移動と電荷秩序の観点から”妹尾仁嗣, 日本物理学会秋季大会、2014 年 9 月 7 日-10 日 (中部大学春日井キャンパス、春日井)
21. “多軌道系 $X[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ におけるスピンおよび電荷格子秩序相の競合”妹尾仁嗣, 日本物理学会秋季大会 2014 年 9 月 7 日-10 日 (中部大学春日井キャンパス、春日井)
22. “Electron and Ferroelectricity in Organic Solids” S. Ishihara, M. Naka, T. Watanabe, and J. Nasu, the 10th Japan-Korea Conference on Ferroelectrics (JKC-FE10), 2014 年 8 月 17 日 -20 日 (International Conference Center Hiroshima, Hiroshima)
23. “Electronic ferroelectricity in dimer-type organic crystals”, S. Ishihara, M. Naka, T. Watanabe, and J. Nasu, International School and Workshop on Electronic Crystal (ECRY-2014), 2014 年 8 月 11 日-23 日 (Cargese, France)
24. “Fragment model and phase competition in $\text{Pd}(\text{dmit})_2$ -based multi-orbital molecular conductors”, H. Seo, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals (ICSM2014), 2014 年 7 月 2 日, (Turku, Finland)
25. “Optical Control of Magnetism in Correlated Oxides” S. Ishihara, H. Hashimoto, E. Iyoda, J. Ohara, Y. Kanamori, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2014) 2014 年 6 月 29 日-7 月 3 日 (Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia)

[図書] (計 1 件)

S. Ishihara, ” Resonant x-ray scattering and Orbital degree of freedom in correlated electron systems”, P.1-P.46 “Resonant X-ray scattering in correlated systems”, Springer-Verlag Berlin, Eds. Y. Murakami and S. Ishihara,

[その他]

ホームページ等

http://cmpt-www.phys.tohoku.ac.jp/%7Eis_hihara/index_ja.html

研究会開催「電荷とスピンの織りなす時空間マルチスケール揺らぎ」2014 年 12 月 20 日 (岡山大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 純夫 (ISHIHARA, Sumio)
 東北大学・理学研究科・教授
 研究者番号: 30292262

(2) 研究分担者

妹尾 仁嗣 (SEO, Hitoshi)
 独立行政法人理化学研究所・古崎物性理論・研究室専任研究員
 研究者番号: 30415054

山内 邦彦 (YAMAUCHI, Kunihiko)
 大阪大学・産業科学研究所・助教
 研究者番号: 30415054

(3) 連携研究者

中 惇 (NAKA, Makoto)
 東北大学・理学研究科・助教
 研究者番号: 60708527

岩井 伸一郎 (IWAI, Shinichiro)
 東北大学・理学研究科・教授
 研究者番号: 60356524

佐々木 孝彦 (SASAKI, Takahiko)
 東北大学・理学研究科・教授
 研究者番号: 20241565

池田 直 (IKEDA, Naoshi)
 岡山大学・理学研究科・教授
 研究者番号: 00222894

(4) 研究協力者

松枝 宏明 (MATSUEDA, Hiroaki)
 仙台高等専門学校・専攻科・教授

松本 宗久 (MATSUMOTO, Munehisa)
 物質材料研究機構・博士研究員

渡邊 努 (WATANABE, Tsutomu)
 千葉工業大学・教育センター・講師