

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2008～ 2012

課題番号：20102007

研究課題名（和文）多極子自由度に由来する秩序と揺らぎの研究

研究課題名（英文）Orderings and fluctuations originated from multipole degrees of freedom

研究代表者

榊原 俊郎 (SAKAKIBARA TOSHIRO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：70162287

研究成果の概要（和文）：希土類やアクチノイド化合物における f 電子は、スピンと軌道の複合自由度である多極子を持つことがある。磁性体における磁気モーメントと同様、多極子モーメントは様々な秩序状態を形成し、物性に寄与すると考えられる。本研究課題は、このような多極子の秩序と揺らぎについての多くの新たな知見を得た。特に、多極子揺らぎによって引き起こされる可能性が指摘されていた、新たな機構による超伝導の発見に成功した。

研究成果の概要（英文）：In rare earth and actinoid compounds, f electrons may possess multipole moments, the complex degrees of freedom composed of spin and orbital. Like a magnetic moment in magnetic materials, multipole moments may exhibit a long-range ordering and play an essential role in low temperature properties of materials. In this research project, various new aspects of the multipole-related phenomena have been investigated. In particular, novel superconductivity mediated by multipole fluctuations has been discovered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	22,500,000	6,750,000	29,250,000
2009 年度	36,700,000	11,010,000	47,710,000
2010 年度	39,400,000	11,820,000	51,220,000
2011 年度	21,500,000	6,450,000	27,950,000
2012 年度	18,900,000	5,670,000	24,570,000
総計	139,000,000	41,700,000	180,700,000

研究分野：強相関電子系

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：強相関系、重い電子系、多極子

1. 研究開始当初の背景

f 電子化合物では非常に強いスピン・軌道相互作用の結果、全角運動量 J を用いて状態が記述される。局在した f 電子系の自由度は J に比例する磁気モーメントだけではなく、一般にスピンと軌道の複合自由度である多極子で表現され、全角運動量 J についての n 次の演算子で記述される。例えば軌道自由度

は電気四極子 ($n=2$) で表され、その自発的秩序化、すなわち軌道整列現象は四極子転移と呼ばれる。近年の研究では、さらに高次の多極子である磁気八極子 ($n=3$) や電気十六極子 ($n=4$) の自発的秩序が存在することがほぼ確実になった。しかしこれら高次多極子相はまだ実例が少なく、未解明な点が多い。一方 1980 年代に始まった重い電子系の研究

では、金属中の磁気モーメント間の相互作用による磁気秩序と伝導電子による磁気モーメントの遮蔽作用（近藤効果）との競合という描像で主に理解されてきた。例えばこの両者が拮抗する量子相転移点近傍において、重い電子状態や反強磁性揺らぎを媒介とする異方的超伝導状態が実現すると考えられている。これら従来型の重い電子形成における主役は磁氣的自由度である。しかし上述のように四極子をはじめ高次の多極子秩序という新しい秩序変数の存在により、多極子秩序に伴う量子相転移や多極子自由度による重い電子状態という、未開の物性現象へと発展する可能性が示唆される。

2. 研究の目的

(1) 多極子転移物質の探索とその秩序構造の解明：新規物質の探索や、既存物質で秩序変数が未解明のものについて系統的な実験を行い、磁場温度相図を明らかにし、新しいタイプの多極子秩序状態の発見と秩序変数の特定を目指す。

(2) 多極子秩序系の量子相転移と新奇超伝導の探索：圧力効果により多極子相から無秩序相への量子相転移の可能性を探る。さらに多極子の量子臨界点近傍における新奇超伝導相の実現を目指す。

(3) 多極子自由度による近藤効果の検証：非自明な多極子近藤効果のうちで最も基本となる四極子近藤効果の可能性を、典型物質の合成により実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) 新物質開発：多極子秩序を示す新たな物質の開発を行う。特に多極子自由度のみを持つ Γ_3 非磁性2重項基底状態を有する純良な立方晶Pr金属間化合物の探索に重点を置く。

(2) 極低温マクロ測定：秩序状態を探る上で基本となる、比熱や磁化などの熱力学量の測定を希釈冷凍機温度域まで行う。

(3) 超音波音速測定：超音波測定は対称化された弾性歪をプローブとして電荷秩序や十六極子秩序状態、四極子秩序状態を直接検知することができる。低温・高圧・強磁場中での弾性定数と超音波吸収係数の測定を通し、軌道や多極子自由度およびそれらの揺らぎの検出を行う。

(4) NMRによる多極子秩序の微視的観測：物質内の微小な磁場や電場勾配及びそれらの時間的揺らぎを観測できるNMR測定を高純度の単結晶試料を用いて行い、多極子相の微視的情報を得る。特にこれまで実験的困難さから十分な探索が行われていなかった複数5f電子を含む超ウラン化合物にも研究を進展させる。

(5) 高圧実験：多極子秩序系の圧力効果によって量子相転移を追求する。また多極子の

量子臨界点近傍における新奇超伝導の実現を目指す。

4. 研究成果

(1) Γ_3 基底状態を有する金属化合物の探索：最も重要な計画の一つは多極子自由度のみを有する立方晶 Γ_3 を基底状態に持つ純良な金属化合物の開発であった。中辻らは物質探索の結果、カゴ状構造を持つ $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ($T=\text{Ti}, \text{V}$)の単結晶作製に成功した。これらの化合物は2-0.6 Kの低温で四極子転移を示すことから、格子の乱れが少ないと考えられる。さらに興味深いことに、常圧下で四極子秩序と共存する超伝導転移が $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ ($T_c=0.2 \text{ K}$)において観測された。 Γ_3 基底状態が持つ多極子自由度が超伝導機構にどのように関与しているかが注目される。一方これらの系の四極子転移より上の温度領域において、比熱や電気抵抗、磁化率などに特異な温度依存性が見出され、四極子近藤効果との関係が注目される。

(2) $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の圧力誘起重い電子超伝導：上床らは小型化したキュービックアンビルセルを用いて、 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の電気抵抗、交流磁化率および比熱の測定を行った。その結果、約7 GPa以上で超伝導転移温度 T_c が急速に上昇し、8.7 GPaで1.1 Kに達することを見出した(図1)。また T_c での上部臨界磁場 B_{c2} の立ち上がりから $B_{c2}(0)$ が8.7 GPaで4.7 Tに達すること、準粒子の有効質量が $106m_0$ と非常に重いことがわかった。一方、四極子転移温度 T_Q ははじめ圧力とともに上昇したのち、7 GPa以上で急に下降に転じている。これらの結果からこの圧力誘起の重い電子超伝導は四極子転移の量子臨界点の近傍で現れている可能性が強く示唆され、新奇の現象として極めて注目される成果である。今後、より低圧力で類似の現象が実現できる系の探索が望まれる。

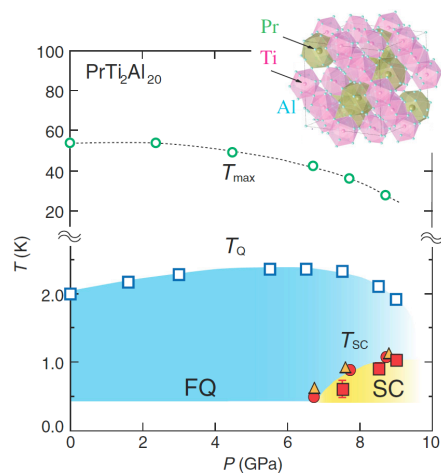


図1 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の圧力・温度相図。

(3) 充填スクッテルダイトにおける進展: 充填スクッテルダイト化合物 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ は約 63 K で電荷秩序を伴う十六極子転移を示し、立方対称性を保ちつつ Pr サイトが一重項基底状態 (Pr1) と三重項基底状態 (Pr2) の 2 種類に分かれる。このうち Pr2 サイトの比熱に 0.3 K 付近でショットキー異常が現れることが知られていたが、その原因は不明であった。青木らは Pr2 の基底状態を擬スピン 1 と考え、これが超微細相互作用を通して自身の核スピン ($I=5/2$) と結合し特異な複合多重項 ($F' = 7/2, 5/2, 3/2$) を形成することを突き止めた (図 2)。このモデルは低温比熱および磁化の温度磁場依存性を合理的に説明する。結晶固体中におけるこの様な「4f 電子-核スピン複合準位系」の実現は $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ が初めてである。本研究は、4f 電子と伝導電子、核スピンの三者が結合した新しいタイプの強相関係を開拓した。

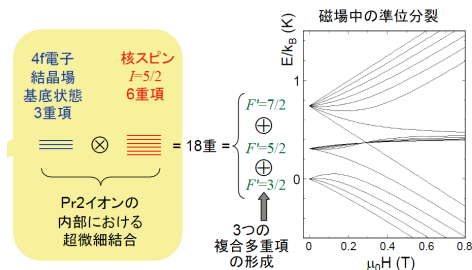


図 2. $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ における電荷秩序と f 電子・核スピン複合多重項の形成。

$\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ に磁場を [111] 方向に印加した場合、低温でスカラー型の秩序 (A 相) と現時点で秩序変数が不明な秩序相 (B 相) が存在することがわかっていた。青木らは電子輸送係数の詳細な磁場依存および温度依存の測定により、B 相の高磁場側に新たな C 相が存在することを見出した。相境界は 17 T にあり、磁場依存測定で観測されるヒステリシスから一次転移である。この二つの相の存在により、 $H//[111]$ における Pr イオンの f 電子基底状態が、互いに拮抗する複数の内部自由度を保持していることが明らかとなった。

(4) AmO_2 における低温相転移の微視的検証: 超ウラン化合物 AmO_2 における相転移の存在は 1975 年の帯磁率測定から示唆されていたが、中性子散乱やメスバウアー分光といった微視的測定手法では相転移が観測されていなかった。このため不純物相の可能性も含めその存在そのものが疑われていた。徳永は帯磁率で異常が報告されていた 8.5K 付近で、信号強度の急激な減少とそれに続くスペクトル線幅の急激な増大を観測し、低温での相転移の存在を微視的測定手法により初めて確認した。さらに最近、自己損

傷の少ない新しい試料において再実験を行い、低温の磁気状態が自己損傷に対して非常に敏感であることが確認された。 AmO_2 の結晶場基底状態としては NpO_2 と同じ Γ_8 基底を取りうるものが理論的に提唱されており、多極子秩序の可能性も示唆されている。

(5) $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ における隠れた高次多極子秩序: クラマース二重項系では磁気モーメントの自由度のみを考えるのが普通であるが、意外にも隠れた多極子が新奇秩序を引き起こす可能性が見出された。正方晶 $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ は Yb^{3+} イオンがシャストリー・サザーランド型格子を組む。 Yb イオンの結晶場基底状態はダイマー軸を量子化軸としてほぼ $|\pm 7/2\rangle$ からなる二重項で、第一励起準位は 70 K 離れている。このような特殊な電子状態により、 Yb ダイマー軸方向に強いイジング型磁気異方性を示すことが先行研究から知られていた。榊原らはこの物質の低温磁化を詳しく調べ、低温高磁場の II 相と呼ばれる相では磁化が連続的に増加し 2 次転移で飽和することを明らかにした。このような連続的な磁化はイジング的な磁気モーメントでは説明できず、高次多極子を非対角項に取り込んだ擬スピンのフロップ現象として II 相が理解できることがわかった。クラマース二重項系における隠れた多極子秩序の可能性を初めて指摘したものとして注目される成果である。

(6) $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ における磁場誘起多極子秩序: $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ は極めて大きな電子比熱係数 (約 8 J/mol K^2) を持つ重い電子化合物で、約 1 GPa 程度の圧力で磁気転移が誘起されることから量子臨界点のごく近傍に位置すると考えられている。榊原らは $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ の常圧下の低温磁化を詳細に調べた結果、[111] 方向の磁場下約 6 T 以上で新しい秩序相を見出した。この磁場誘起転移の機構はこの磁場方向にのみ存在する準位交差によるもので、 $\Gamma_6-\Gamma_8$ の擬六重項基底状態で説明される。 Yb 重い電子化合物における磁場誘起秩序の初めての例として注目される結果である。その後の詳細な研究により、磁場誘起相の秩序変数は 0_2^0 の反強四極子の可能性が高いことが指摘されている。

(7) 鉄系超伝導と軌道揺らぎ: 本領域発足後、鉄系超伝導体における軌道ゆらぎの重要性が明らかになった。鉄系超伝導体の超伝導相は構造的秩序や磁気秩序に隣接し、強相関係で観測される量子臨界点 (QCP) 近傍の超伝導とよく似た相図を有することが知られている。吉澤らは、鉄系超伝導の典型的物質で高品質な単結晶が提供されている $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ の弾性的性質の研究から超伝導発現機構の解明に取り組んだ。この物質の横波弾性定数 C_{66} は構造相転移に伴い大

大きな弾性異常を示す。これは電子的な原因によるもので、FeのCo置換により変化する。 C_{66} の温度依存性は磁性系のCurie-Weiss則に対応する、いわゆるJahn-Teller表式によって解析され、50 K程度の大きなJahn-Tellerエネルギー(E_{JT})を持つことがわかった。これは鉄の3d電子と格子との強固な結合を示唆する。 C_{66} の逆数である弾性コンプライアンス S_{66} は磁氣的QCP近傍における磁化率と酷似の振る舞いを示し、 T_c と相関関係を持つ(図3)。またバンド描像による弾性定数の解析から、QCPに近づくにつれてバンド幅の縮小、即ち有効質量の増大現象が観測された。これらの磁氣的QCPの特徴を再現する実験結果を「構造的量子臨界現象」と名づけた。本研究は構造の揺らぎとその原因である軌道の揺らぎが超伝導の発現に関与していることを強く示唆し、超伝導の新しい発現機構として軌道揺らぎの重要性にスポットライトを当てることになった。

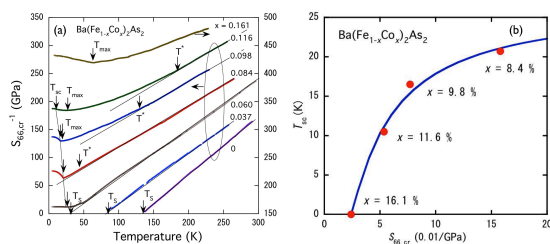


図3. (a) Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂のさまざまなCo濃度試料における弾性コンプライアンス S_{66} の異常部分の逆数の温度依存性。(b) オーバードープ領域における T_c と S_{66} の相関。

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 163 件)

- ① M. Yoshizawa, H. Mitamura, F. Shichinomiya, S. Fukuda, Y. Nakanishi, H. Sugawara, T. Sakakibara, and K. Kindo, High-Field Phase Diagram of SmRu₄P₁₂ Determined by Ultrasonic Measurements in Pulsed Magnetic Field up to 55 T, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 033602 (1-5) (2013) 査読有, DOI:10.7566/JPSJ.82.033602
- ② Y. Shimura, Y. Ohta, T. Sakakibara, A. Sakai, and S. Nakatsuji, Evidence of a High-Field Phase in PrV₂Al₂₀ in a [100] Magnetic Field, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 043705(1-4) (2013) 査読有, DOI:10.7566/JPSJ.82.043705
- ③ S. Kittaka, K. An, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Onuki, and K. Machida, Anomalous Field-Angle Dependence of the Specific Heat of Heavy-Fermion Superconductor UPt₃, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 024707(1-5) 査読有, DOI:10.7566/JPSJ.82.024707
- ④ H. Aoki, H. Sato, D. Kikuchi, H. Sugawara, A. Pourret, K. Behnia, S. Uji, T. Terashima, R. Higashinaka, and Y. Aoki, Characterization of the Mysterious High Field Ordered Phase around H//[111] and Finding of a New Phase Boundary in PrFe₄P₁₂, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 084703 (1-11) (2012) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.81.084703
- ⑤ T. Onimaru, N. Nagasawa, K. T. Matsumoto, K. Wakiya, K. Umeo, S. Kittaka, T. Sakakibara, Y. Matsushita, and T. Takabatake, Simultaneous superconducting and antiferroquadrupolar transitions in PrRh₂Zn₂₀, Phys. Rev. B 86 (2012) 184426(1-7) (2012) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.86.184426
- ⑥ Y. Shimura, T. Sakakibara, K. Iwakawa, K. Sugiyama, and Y. Onuki, Low Temperature Magnetization of Yb₂Pt₂Pb with the Shastry-Sutherland Type Lattice and a High-Rank Multipole Interaction, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 103601(1-4) (2012) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.81.103601
- ⑦ K. Matsubayashi, T. Tanaka, A. Sakai, S. Nakatsuji, Y. Kubo and Y. Uwatoko, Pressure-Induced Heavy Fermion Superconductivity in the Nonmagnetic Quadrupolar System PrTi₂Al₂₀, Phys. Rev. Lett. 109, 187004(1-5) (2012) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevLett.109.187004
- ⑧ A. Sakai, K. Kuga, and S. Nakatsuji, Superconductivity in the Ferroquadrupolar State in the Quadrupolar Kondo Lattice PrTi₂Al₂₀, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 083702 (1-4) (2012) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.81.083702
- ⑨ M. Yoshizawa, and S. Simayi, Anomalous elastic behavior and its correlation with superconductivity in iron-based superconductor Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂, Modern Phys. Lett. B 26, 1230011 (1-23) (2012) 査読有, DOI:10.1142/S0217984912300116
- ⑩ 吉澤正人, 柔らかくなるほど高くなる超伝導体転移温度—鉄系超伝導体における超伝導と構造揺らぎの不思議な関係—, 固体物理 47, 309-319 (2012) 査読無
- ⑪ 青木勇二, 菅原 仁, 佐藤英行, 充填スケッテルダイトにおける多極子物性 固体物理 47, 637-649 (2012) 査読無
- ⑫ 鬼丸孝博, 榎原俊郎, カゴ状化合物 Pr₁₋₂-20 系における非クラマース二重項

- と多彩な相転移現象, 固体物理 47, 565-576 (2012) 査読無
- ⑬ R. Miyazaki, Y. Aoki, R. Higashinaka, H. Sato, T. Yamashita and S. Ohara, Heavy quasiparticles formed in the ferromagnetic Yb layers in the Kondo helical magnet YbNi_3Al_9 as revealed by specific-heat measurements, Phys. Rev. B 86, 155106 (1-6) (2012) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.86.155106
- ⑭ J. Custers, K-A. Lorenzer, M. Müller, A. Prokofiev, A. Sidorenko, H. Winkler, A. M. Strydom, Y. Shimura, T. Sakakibara, R. Yu, Q. Si and S. Paschen, Destruction of the Kondo effect in the cubic heavy-fermion compound $\text{Ce}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$, Nat. Mater. 11, 189-194 (2012) 査読有, DOI:10.1038/nmat3214
- ⑮ T. J. Sato, S. Iyuka, Y. Nambu, T. Yamazaki, T. Hong, A. Sakai, and S. Nakatsuji, Ferroquadrupolar ordering in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$, Phys. Rev. B 86, 184419 (1-8) (2012) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.86.184419
- ⑯ S. Kittaka, Y. Aoki, T. Sakakibara, A. Sakai, S. Nakatsuji, Y. Tsutsumi, M. Ichioka and K. Machida, Superconducting gap structure of CeIrIn_5 from field-angle-resolved measurements of its specific heat, Phys. Rev. B 85, 060505(R) (1-4) (2012) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.85.060505
- ⑰ T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, and S. Ohara, Transport, Thermal, and Magnetic Properties of YbNi_3X_9 (X = Al, Ga): A Newly Synthesized Yb-Based Kondo Lattice System, J. Phys. Soc. Jpn. 81(3), 034705(1-8) (2012) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.81.034705
- ⑱ Y. Shimura, T. Sakakibara, S. Yoshiuchi, F. Honda, R. Settai, and Y. Onuki, Evidence of a Field-Induced Ordering in $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ in a [111] Magnetic Field, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 073707 (1-4) (2011) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.80.073707
- ⑲ A. Sakai and S. Nakatsuji, Strong valence fluctuation effects in $\text{SmTr}_2\text{Al}_{20}$ (Tr=Ti, V, Cr), Phys. Rev. B 84, 201106(R) (1-5) (2011) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.84.201106
- ⑳ A. Sakai and S. Nakatsuji, Kondo Effects and Multipolar Order in the Cubic $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ (Tr =Ti, V), J. Phys. Soc. Jpn. Lett. 80, 063701(1-4) (2011) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.80.063701
- ㉑ R. Higashinaka, T. Maruyama, A. Nakama, R. Miyazaki, Y. Aoki and H. Sato, Unusual Field-Insensitive Phase Transition and Kondo Behavior in $\text{SmTi}_2\text{Al}_{20}$, J. Phys. Soc. Jpn. 80(9), 093703(1-4) (2011) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.80.093703
- ㉒ Y. Tokunaga, Y. Saito, H. Sakai, S. Kambe, N. Sanada, R. Watanuki, K. Suzuki, Y. Kawasaki, and Y. Kishimoto, NMR Determination of Noncollinear Antiferromagnetic Structure in TbCoGa_5 , Phys. Rev. B 84, 214403(1-7) (2011) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.84.214403
- ㉓ T. Onimaru, K. T. Matsumoto, Y. F. Inoue, K. Umeo, T. Sakakibara, Y. Karaki, M. Kubota, and T. Takabatake, Antiferroquadrupolar Ordering in a Pr-based Superconductor $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$, Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. Lett. 106, 177001(1-4) (2011) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.177001
- ㉔ T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ninomiya, H. Luetkens, C. Baines, A. Sakai and S. Nakatsuji, μSR Evidence of Nonmagnetic Order and 141Pr Hyperfine-Enhanced Nuclear Magnetism in the Cubic Γ_3 Ground Doublet System $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 113703(1-4) (2011) 査読有, DOI:10.1143/JPSJ.80.113703
- ㉕ H. Chudo, Y. Tokunaga, S. Kambe, H. Sakai, Y. Haga, T. D. Matsuda, Y. Ōnuki, H. Yasuoka, D. Aoki and Y. Homma, and R. E. Walstedt, ^{237}Np nuclear relaxation rate in heavy fermion superconductor NpPd_5Al_2 , Phys. Rev. B 84, 094402(1-5) (2011) 査読有, DOI:10.1103/PhysRevB.84.094402
- ㉖ Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, R. Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato, f-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets in the Unconventional Charge Order Phase of Filled Skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 054704(1-7) (2010) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.80.054704
- ㉗ Y. Tokunaga, T. Nishi, S. Kambe, M. Nakada, A. Itoh, Y. Homma, H. Sakai, H. Chudo, NMR Evidence for the 8.5 K Phase Transition in Americium Dioxide, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 053705(1-4) (2010) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.79.053705
- ㉘ Y. Nakanishi, T. Fujino, K. Ito, M. Nakamura, M. Yoshizawa, Y. Saiga, M. Kosaka, Y. Uwatoko, Elastic constants of the single crystalline Yb based heavy-fermion compound $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$, Phys. Rev. B 80, 184418(1-6) (2009) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.80.184418
- ㉙ T. Morie, T. Sakakibara, H.S. Suzuki, H. Tanida and S. Takagi, Unusual Low Temperature Magnetization of a Cubic Γ_3 Non-Kramers Doublet Ground State Compound PrMg_3 - Evidence of a

Hybridization Effect, J. Phys. Soc. Jpn. **78**
(2009) 033705(1-4) (2009) 査読有,
DOI: 10.1143/JPSJ.78.033705

[学会発表] (計 456 件)

- ① Y. Uwatoko, Effect of pressure on the ferroquadrupole system $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$, SMEC2013, 2013.3.29, Miami, USA
 - ② M. Yoshizawa, Anomalous elastic properties in the iron-based superconductors $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ and $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)$, M2S 2012, 2012.8.2, Washington DC., USA
 - ③ R. Higashinaka, A. Nakama, R. Miyazaki, Y. Aoki and H. Sato, Unusual heavy fermion behavior in $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ (Tr = Nb, Ta) associated with Γ_{25} quadrupolar degrees of freedom, ICM2012, 2012.7.12, Busan, Korea
 - ④ K. Matsubayashi, Pressure and Magnetic-Field Induced Non-Fermi-Liquid Behavior in $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$, ICM2012., 2012.7.12. Busan, Korea
 - ⑤ Y. Shimura, T. Sakakibara, K. Iwakawa, K. Sugiyama, and Y. Onuki, Magnetization steps in $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ with the Shastry-Sutherland Lattice, ICM2012, 2012.7.10, Busan, Korea
 - ⑥ S. Kittaka, T. Sugiyama, Y. Shimura, T. Sakakibara, S. Matsuda, and A. Ochiai, Singlet-triplet crossover in the two-dimensional dimer spin system YbAl_3C_3 , ICM2012, 2012.7.10, Busan, Korea
 - ⑦ Y. Tokunaga, H. Sakai, and S. Kambe, Solid-state NMR Study of Actinide Dioxides, 2012 MRS Spring Meeting, 2012.4.11, San Francisco, USA
 - ⑧ M. Yoshizawa, Elastic properties of iron-based superconductor, ISS2011, 2011.10.25, Tokyo
 - ⑨ T. Sakakibara, Sign reversal of Field-Angle Resolved Heat Capacity Oscillations in a Heavy Fermion Superconductor CeCoIn_5 and $d_{x^2-y^2}$ Pairing Symmetry, The Korean Physical Society Autumn Meeting2011, 2011.10.20, Busan, Korea
 - ⑩ 青木勇二, 充填スクッテルダイトにおける磁場の影響を受けない重い電子状態, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011. 9. 21, 富山大学
 - ⑪ Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, R. Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato, f-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets of Pr Ions in Charge-Ordered Filled Skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$, SCES 2011, 2011.8.30, Cambridge, England
 - ⑫ Y. Tokunaga, NMR study of various actinide systems, J-Actinet Meeting 2011, 2011.9.2, Tohoku University Tokyo Office
 - ⑬ S. Nakatsuji, Novel Quantum Phases in 4f electron based Kondo Lattice Systems, IULT2011, 2011.8.19, Daejeon, Korea
 - ⑭ M. Yoshizawa, D. Kimura, T. Chiba, A. Ismayil, Y. Nakanishi, K. Kihou, M. Nakajima, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, and S. Uchida, Quantum Criticality and Superconductivity in $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ Investigated by Ultrasonic Measurements, LT26, 2011.8.16, Beijing, China
 - ⑮ Y. Uwatoko, Pressure induced physical phenomena of Ce and Yb Compounds, 26th Rare Earth Research Conference, 2011.6.20, Santa Fe, New Mexico, USA
 - ⑯ S. Nakatsuji, Quantum Critical Phases in Kondo Lattice Systems, 2011 Hangzhou Workshop on Quantum Matter - Unconventional Superconductivity and Electron Correlations, 2011.4.13, Hangzhou, China
 - ⑰ Y. Tokunaga, NMR studied of actinide dioxides, International conference, Pu futures 2010, 2010.9.21, Keystone, USA
 - ⑱ S. Nakatsuji, Y. Matsumoto, K. Kuga, T. Tomita, N. Horie, Quantum criticality in the valence fluctuating β - YbAlB_4 , SCES2010, 2010.6.29, Santa Fe, New Mexico, USA
 - ⑲ Y. Shimura, T. Sakakibara, K. Kuga, J. Y. Cho and J. Y. Chan, Low temperature magnetic properties of $\text{Pr}(\text{Cu,Ga})_{12.85}$, SCES2010, 2010.6.29, Santa Fe, New Mexico, USA
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
榊原 俊郎 (SAKAKIBARA TOSHIRO)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：70162287
 - (2) 研究分担者
吉澤 正人 (YOSHIKAWA MASAHIRO)
岩手大学・工学研究科・教授
研究者番号：30220619
青木 勇二 (AOKI YUJI)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号：20231772
徳永 陽 (TOKUNAGA YO)
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員
研究者番号：00354902
 - (3) 連携研究者
上床 美也 (UWATOKO YOSHIYA)
東京大学・物性研究所・准教授
研究者番号：40213524
中辻 知 (NAKATSUJI SATORU)
東京大学・物性研究所・准教授
研究者番号：70362431