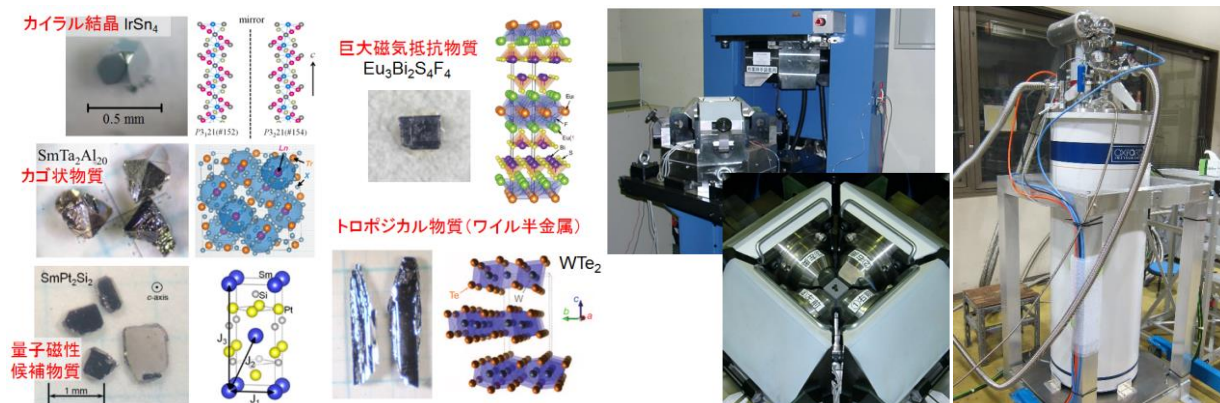


「電子物性研究室」が行っている研究

電子は電荷とスピンの自由度を持つ単純な素粒子です。しかし、膨大な数の電子が高密度で凝縮する固体中では、電子が強く相互作用し、互いに避けあいながら運動するため（強相関効果）、興味ある多彩で驚くべき現象が引き起こされます。超伝導、磁気秩序、金属絶縁体転移などは、このような量子力学的多体効果により、電子の集団が性質をがらりと変えて発現したものです。電子状態は、どのような元素がどのような周期的空間配列を成しているか（結晶構造）により決まるため、新たな結晶構造を持つ物質には、これまでにない新たな物性の発現が期待できます。私達の研究室では、新たな物質や新たな電子物性の探索と創出、発見した新規現象の機構解明を目指した実験的研究を行っています。

強相関効果が顕著に現れる物質の研究においては、*d* 電子や *f* 電子に着目します。これらの電子は結晶中で「電荷、軌道とスピン（あるいは多極子）」の自由度を持つため、これらの揺らぎや秩序化が、多彩で特異な電子状態を生み出します。非従来型超伝導（電子-格子相互作用に基づく従来のタイプとは異なり、磁性やその他の引力機構によりクーパ対が形成された特異な性質を持つ）、重い電子状態（電子が数 100~1000 倍の有効質量を持って結晶中を動き回る）、多極子（電子軌道）の揺らぎと秩序化、量子臨界現象（相転移温度が絶対ゼロ度近傍にあるため、量子揺らぎが顕著に現れる）、金属絶縁体転移、などがその例です。

私達の研究の特徴は、「新物質の合成、純良単結晶試料の育成、様々な物性測定（電気抵抗、磁化、比熱などの基礎物性から、学外施設を利用した極限環境下の測定を含めて）」など、幅広い実験を行いながら、新奇物性の発見やそのメカニズムの解明に挑戦している点です。特に強調したい私達の実験技術の特徴は2つあります。1つ目は、世界最高純度の結晶育成技術を有していることです。高圧合成炉、テトラアーク炉、FZ 炉、温度勾配炉等の装置を用いて、多様な化合物の合成に対応できます。また微小単結晶を用いた構造決定方法を確立しており、結晶中の原子位置を高い精度で決定することができます。これらの特色を活かしながら、新物質を探し出すパイオニア的研究拠点として国際的にも認識されています。2つ目の特色は、自前で育成した高純度単結晶を使い、極低温・強磁場等の極限環境下で電子輸送特性や磁気特性を精密測定できることです。実験室内の希釈冷凍機、断熱消磁冷凍機、³He 冷凍機、16T 超伝導磁石などの様々な機器に、独自の工夫を加えた測定システムを組み合わせ、電子輸送特性や比熱の高精度測定行っ



ています。さらに、SPring-8 東大物性研の強磁場施設、J-PARC などの学外実験設備を利用した実験、核磁気共鳴(NMR/NQR)、角度分解光電子分光(ARPES)、ミュオンスピン緩和(muSR)などの実験手法で国内・海外のグループと共同研究や交流を活発に行なっています。

主要な研究テーマ (現在進行中です)

(1) 新物質探索：新たな結晶構造を持つ希土類化合物を創出し、新たな超伝導、多極子秩序と揺らぎ、量子臨界現象などを開拓します。育成した高純度単結晶を用いて量子振動の観測を行い、フェルミ面の形状や準粒子有効質量を明らかにする実験 (フェルミオロジー研究) を進めています。

(2) トポロジカル物質は、近年大きく注目される新奇な電子状態が発現する系であり、世界的な研究が爆発的に進んでいます。この中の「ワイル半金属」の候補物質である遷移金属ダイカルコゲナイド系の純良単結晶を育成し、電子状態を調べています。WTe₂ においては、電気抵抗が磁場中で 1500000% も増大する巨大な磁気抵抗効果の観測や、電気抵抗の量子振動の観測を通してフェルミ面を見ることにも成功し、異常な伝導特性を持つキャリアの性質を調べています。

カイラル結晶構造を持つ化合物中には、クラマース・ワイルフェルミオンと名づけられたトポロジカル電子状態が特定の波数に現れることが理論的に示され、その実験的観測が重要な課題になっています。カイラル結晶構造を持つ化合物には、右手系と左手系の2つの相があります。我々は、 α -IrSn₄ において、両者が混ざっていない単ドメイン単結晶を作り別けることに成功しました (図1)。本系で見出された特異な磁気抵抗の解明や、右手系と左手系の相違を観測するための実験を進めています。

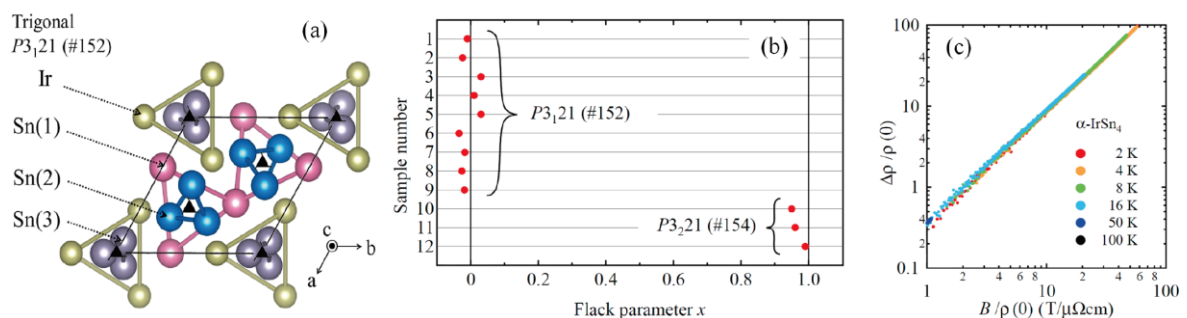
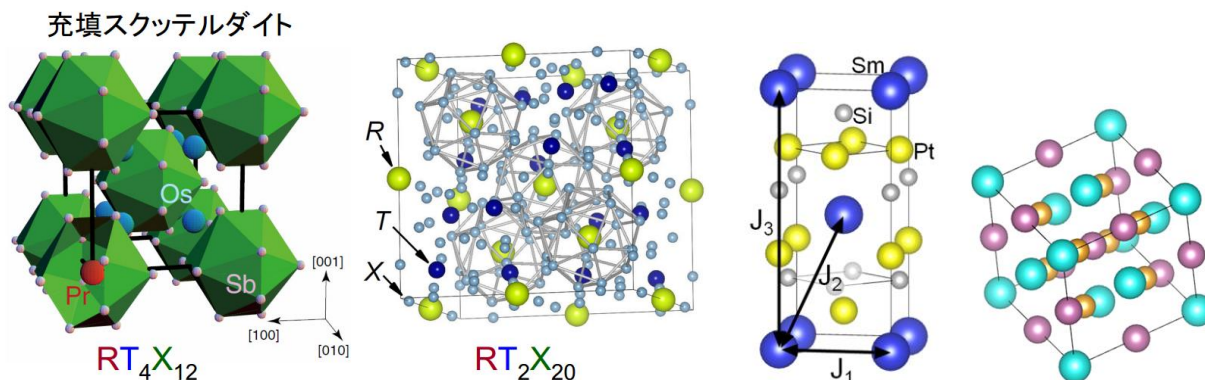


図 1: α -IrSn₄ の (a) カイラルな結晶構造, (b) X 線単結晶構造解析により求めた 12 個の単結晶粒の Flack parameter x [右手系と左手系が作り別けられていることの証拠], (c) 磁気抵抗の Kohler plot [$B^{-1.4}$ に比例して増大する異常性を示す].

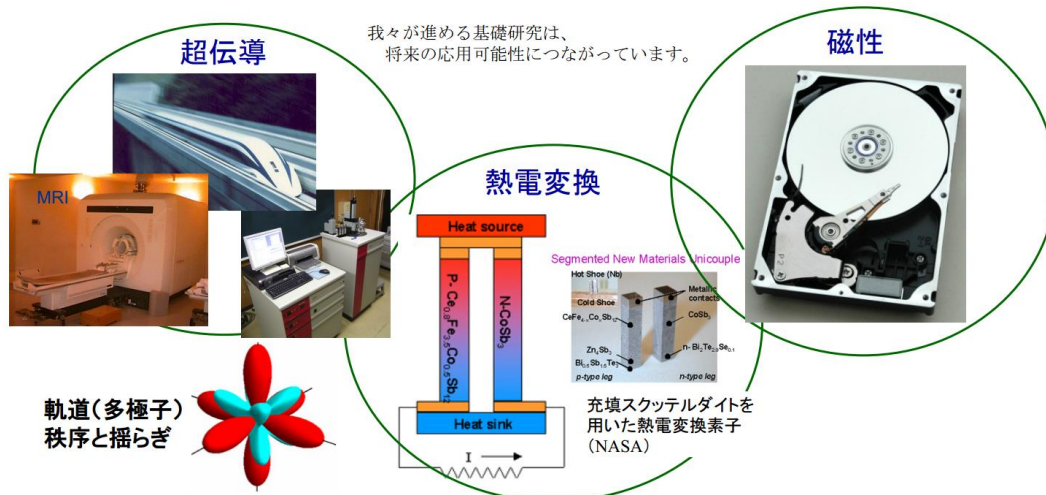
(3) 新規層状超伝導体における新たな超伝導特性の探索：銅酸化物系、Fe 系、BiS₂ 系などの層状超伝導体は、超伝導を担う伝導層とキャリア供給を担うブロック層が交互に積層する構造を持ちます。この様な層状物質系において、低次元性を反映した新奇な超伝導が発見されてきました。ブロック層が希土類イオンを含む超伝導体では、超伝導と磁性の相互作用が両者の共存や競合をもたらし、超伝導を多彩なものにします。単結晶試料を用いて各種物性測定を行い、新しいタイプの超伝導特性の開拓と発現機構の解明を進めています。

(4) 将来の新機能材料につながる基礎技術の創出を視野に入れながら、「カゴ状構造を持つ物質系」の物性探索を進めています。RT₄X₁₂系（充填スクッテルダイト）やRT₂X₂₀系などを対象としています。希土類イオンがカゴ状構造の中心で大きな振幅を持って局所的に振動している系（「ラットリング」と呼ばれる現象）では、熱を電気エネルギーに変換する熱電変換機能にこれが有効的に働くことが期待されています。ラットリングと電子系がどのように結合するのかは未解明の問題であり、これを解き明かそうと、ゼーベック係数を含む基礎物性測定、X線・中性子散乱を組み合わせた実験を進めています。

(5) SmやYbイオンを含む化合物の中には、電荷揺らぎが支配的となっているものがあります。最近私達は、「磁場の影響を受けない特異な磁気転移や量子臨界現象」を示す物質を幾つか発見しましたが、電荷揺らぎが関与している可能性があります。また、Prイオンを含む化合物では、多極子自由度に起因する強相関電子状態（多極子近藤状態）と推測される状態が発見されています。このような特定イオンを含む化合物の物性解明を、国内外の研究グループと共同で進めています。



これらの強相関電子系の研究は、現代物理学の基本的問題であり、他の研究分野とも強く関連しています（例えば、超伝導と超流動、冷却原子気体 BEC、中性子星の関係）。また、新しい機能性材料の創出につながる基本技術になる可能性も持っています（超伝導を利用した量子コンピュータ、熱電変換、磁気冷凍、金属絶縁体転移を利用したセンサー、など）。次世代の最先端技術への応用も意識しながら、研究を進めています。



最近の研究から

トピックスの紹介。下記の各項目をクリックして、リンク先をご参照ください。

- [トポジカル物質 ワイル半金属 \$WTe_2\$ の高純度単結晶：1,500,000 %に達する巨大な磁気抵抗](#)
- [4つの新規超伝導の発見：カゴ状構造を持つ \$LaTr_2Al_{20}\$ \(Tr=Ti, V, Nb, Ta\)](#)
- [磁場に鈍感な重い電子系化合物 \$SmTa_2Al_{20}\$ で見出されたコーラー則の破れと修正コーラー則の成立\(3次元立方晶電子系で初めて\)](#)
- [磁場に鈍感な重い電子系化合物 \$Sm_xLa_{1-x}Os_4Sb_{12}\$ で見出された \$\log T\$ 依存する Sm イオン価数](#)
- [新規超伝導体の母物質 \$CeOBiS_2\$ における量子臨界的挙動](#)
- [\$SmPt_2Si_2\$ における「揺らぐ磁気モーメント」を含む磁気秩序状態](#)
- [\$SmTa_2Al_{20}\$ における磁場に鈍感な強相関電子物性](#)

研究成果より

第 25 回日本物理学会論文賞 (2020 年)

"Extremely Large and Anisotropic Upper Critical Field and the Ferromagnetic Instability in UCoGe"
Dai Aoki, Tatsuma D. Matsuda, Valentin Taufour, Elena Hassinger, Georg Knebel, and Jacques Flouquet:
J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 113709 (2009).

第 22 回日本物理学会論文賞 (2017 年)

"Observation of Magnetic Monopoles in Spin Ice"
Hiroaki Kadowaki, Naohiro Doi, Yuji Aoki, Yoshikazu Tabata, Taku J. Sato, Jeffrey W. Lynn, Kazuyuki Matsuhira, and Zenji Hiroi:
J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 103706 (2009).

第 15 回日本物理学会論文賞 (2010 年)

"Exotic Heavy-Fermion State in Filled Skutterudite $SmOs_4Sb_{12}$ "
Shotaro Sanada, Yuji Aoki, Hidekazu Aoki, Akihisa Tsuchiya, Daisuke Kikuchi, Hitoshi Sugawara and Hideyuki Sato:
J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 246 (2005).

第 12 回日本物理学会論文賞 (2007 年)

"Evidence for Magnetic-field-induced Quadrupolar Ordering in the Heavy Fermion Superconductor $PrOs_4Sb_{12}$: Evidence for Field-Induced Phase Transition"
Masahumi Kohgi, Kazuaki Iwasa, Motoki Nakajima, Naoto Metoki, Shingo Araki, Nick Bernhoeft, Jean-Michel Mignot, Arsen Gukasov, Hideyuki Sato, Yuji Aoki, and Hitoshi Sugawara:
J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 1002 (2003).

日本物理学会欧文誌 J. Phys. Soc. Jpn. 注目論文 (2005、2006、2011、2014、2017 年)

"SnAs-based layered superconductor $NaSn_2As_2$ "
Y. Goto, A. Yamada, T.D. Matsuda, Y. Aoki, Y. Mizuguchi
J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123701 (2017) [4 Pages].

"Possible Existence of Partially Disordered Sm Ions in Magnetically Ordered State of Ising Magnet SmPt_2Si_2 : a Single Crystal Study"

K. Fushiya, T. D. Matsuda, R. Higashinaka, K. Akiyama, and Y. Aoki

J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 113708 (2014) [4 Pages].

"f-Electron-Nuclear Hyperfine-Coupled Multiplets in the Unconventional Charge Order Phase of Filled Skutterudite $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ "

Y. Aoki, T. Namiki, S.R. Saha, T. Tayama, T. Sakakibara, R. Shiina, H. Shiba, H. Sugawara and H. Sato

J. Phys. Soc. Jpn. **80** 054704 (2011) (7 pages).

"Multiband Superconductivity in Filled-Skutterudite Compounds ($\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x$) $\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$: An Sb Nuclear-Quadruple-Resonance (NQR) Study "

M. Yogi, T. Nagai, Y. Imamura, H. Mukuda, Y. Kitaoka, D. Kikuchi, H. Sugawara, Y. Aoki, H. Sato, and H. Harima:

J. Phys. Soc. Jpn. **75** 124702 (2006) (9 pages).

"Exotic Heavy-Fermion State in Filled Skutterudite $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ "

S. Sanada, Y. Aoki, H. Aoki, A. Tsuchiya, D. Kikuchi, H. Sugawara and H. Sato:

J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 246 (2005).

私達は、国内外の多くの研究グループと共同で研究を進めています。これまで共同研究を行った研究グループや施設は以下のとおりです。

国内：東京大学物性研究所、日本原子力研究機構、物質材料研究機構、高輝度光科学研究センター (SPring-8)、東大、早稲田大、東工大、阪大、神戸大、岡山大、広島大

海外：スタンフォード大、カリフォルニア大学 UCSD、国立高磁場研究所 (米国)、グルノーブル国立研究所 (フランス)、ウィーン工科大 (オーストリア)、スイス連邦工科大学 (スイス)、ローマ・ラ・サピエンツァ大 (イタリア)、キャヴェンディッシュ研究所・ケンブリッジ大 (英国)、欧州シンクロトロン放射光研究所 ESRF (フランス)、香港中文大学 (中国)、Universidade Federal do ABC (ブラジル)