

新物質科学研究部門

Division of New Materials Science

酸化物高温超伝導体、フラーレンやカーボンナノチューブ、有機伝導体などの例に見られるように、「新物質」の発見はこれまでに何度となく物質科学の新しい局面を開いてきた。新奇な物性現象の発見はまた将来の新しい素材やデバイスの開発にもつながる。新物質科学研究部門では、新しい物質を合成し、高度な技術を用いてその性質を測定することにより、新しい物質観につながる物性現象を発見し解明することを目標としている。

当部門は現在4つの研究室から成り、各研究室は自由な発想のもとに高品質の試料作成や精密物性測定、新しい物性測定技術の開発などを行いつつ、物性測定グループと試料作成グループとの部門枠を越えた連携も心がけている。特に物質設計評価施設とは強い協力関係を保ちながら研究を推進している。当部門では現在、遷移金属化合物、重い電子系物質、有機伝導体など強い電子相関を示す物質におけるスピン、軌道、電荷の秩序や揺らぎの効果がもたらす多彩な現象の解明を主要なテーマの1つとしており、極低温における輸送現象測定、精密磁化・比熱測定、核磁気共鳴、光学伝導度などにおいて高度な実験技術を駆使した研究が進められている。

Discoveries of new materials have often opened new horizons in materials science. High temperature oxide superconductors, carbon clusters and nanotubes, and organic conductors are good examples. New materials also lead to the future development of new devices and technologies. The goal of the Division of New Materials Science is to uncover novel phenomena that lead to new concepts of matter, through combined efforts of search, synthesis and characterization of new materials. Currently, our division consists of 4 groups. Although each group has its own research style and projects, we try to maintain close collaboration between those groups working on production of high quality materials and those working on advanced technology for measuring physical properties.

In particular, we keep strong collaboration with the Materials Design and Characterization Laboratory. One of the subjects of our current intensive research is the effects of strong electronic correlation, in particular, various ordered phases and fluctuations involving spin, charge and orbital degrees of freedom, in transition metal compounds heavy electron systems, f-electron compounds and organic conductors. Here, various advanced experimental techniques are employed, such as transport, magnetic and calorimetric measurements, nuclear magnetic resonance and optical measurements.

教授 Professor	瀧川 仁 TAKIGAWA, Masashi	助教 Research Associate	三田村 裕幸 MITAMURA, Hiroyuki	特任研究員 Project Researcher	冨田 崇弘 TOMITA, Takahiro
教授 Professor	榑原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	助教 Research Associate	吉田 誠 YOSHIDA, Makoto	特任研究員 Project Researcher	志村 恭通 SHIMURA, Yasuyuki
教授 Professor	森 初果 MORI, Hatsumi	助教 Research Associate	松本 洋介 MATSUMOTO, Yousuke	特任研究員 Project Researcher	清水 悠晴 SHIMIZU, Yusei
准教授 Associate Professor	中辻 知 NAKATSUJI, Satoru	助教 Research Associate	橘高 俊一郎 KITAKA, Shunichiro	特任研究員 Project Researcher	ティアン ザオミン TIAN, Zhaoming
准教授(客員) Visiting Associate Professor	松平 和之 MATSUHIRA, Kazuyuki	助教 Research Associate	上田 顕 UEDA, Akira	特任研究員 Project Researcher	武田 晃 TAKEDA, Hikaru
教授(外国人客員) Visiting Professor	ネヴィドムスキー アンドリ NEVIDOMSKYY, Andriy	教務職員 Technical Associate	村山 千壽子 MURAYAMA, Chizuko	特任研究員 Project Researcher	肥後 友也 HIGO, Tomoya
				特任研究員 Project Researcher	東野 寿樹 HIGASHINO, Toshiki
				特任研究員 Project Researcher	フィユアン マン HUIYUAN, Man

瀧川研究室

Takigawa Group

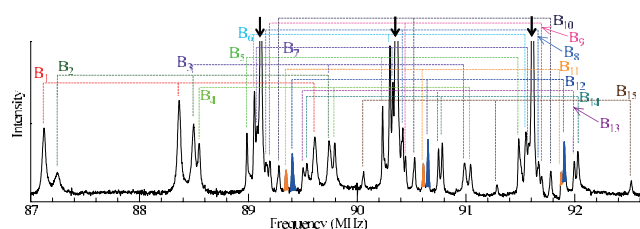


瀧川 仁
TAKIGAWA, Masashi
教授
Professor



吉田 誠
YOSHIDA, Makoto
助教
Research Associate

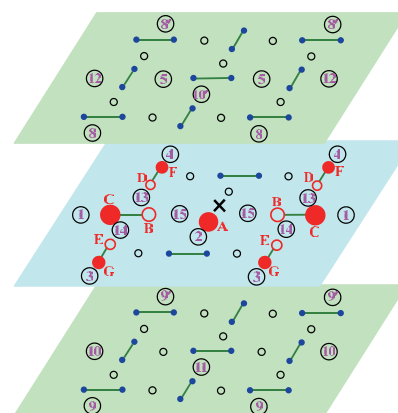
核磁気共鳴法 (NMR) を主な実験手段として、固体内の強い電子間相互作用に起因する現象を研究している。強相関電子系では、超伝導、強 (反強) 磁性、電荷秩序、軌道秩序といった多彩な秩序状態が拮抗しており、磁場・圧力などの外的条件を変えることでこれらの間の量子相転移が起こり得る。原子核は固有の磁気モーメントや電気四重極モーメントを持っており、これらは周囲の電子が作る磁場や電場勾配を感じている。このためNMRは、固体内電子のスピンの、電荷、軌道などの自由度が絡み合って現れる特異な秩序状態や揺らぎの性質を、ミクロに探る有力な実験手段となる。我々は色々な特色を持つパルスNMR測定装置を整備し、低温・強磁場・高圧などの外的環境条件と組み合わせ、遷移金属化合物、希土類化合物や有機固体を対象とした研究を行っている。



隣り合うスピン2量体が平面内で直交配列した量子磁性体 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ の、極低温・高磁場におけるホウ素 (B) 原子核のNMRスペクトル。測定に用いた試料は、磁性元素である銅 (Cu) のうち0.5%を非磁性元素である亜鉛 (Zn) で置き換え、意図的に不純物を導入してある。不純物から遠いスピン2量体はシングレットを形成するが、不純物によって孤立した銅スピンの周囲には、局所的な反強磁性磁化パターン (スピン・ポーラロン) が現れる。前者は内部磁場ゼロ付近の強い共鳴線 (図の矢印) として、後者はそれ以外の15種類の共鳴線によって実証される。

The boron NMR spectrum at a very low temperature and a high magnetic field obtained from $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$, a quantum magnet in which spin-dimers have a planer orthogonal configuration. The sample used in the measurement was intentionally doped with impurities by replacing 0.5 % of magnetic Cu by non-magnetic Zn. The spin-dimers far from impurities form singlet, however, those in the neighborhood of Zn impurity generate local staggered magnetization (spin polaron). While the former corresponds to the intense resonance lines with nearly zero internal field (shown by arrows), additional 15 resonance lines provide a fingerprint of the spin polaron generated by a Zn impurity.

We use nuclear magnetic resonance (NMR) as the major experimental tool to investigate exotic phenomena caused by strong electronic correlation in solids. A remarkable feature of strongly correlated electron systems is the competition among various kinds of ordering such as superconductivity, ferro- or antiferromagnetism, charge and orbital order. Quantum phase transitions between these ground states can be caused by changing the external parameters such as magnetic field or pressure. Nuclei have their own magnetic dipole and electric quadrupole moments, which couple to the magnetic field or electric field gradient produced by surrounding electrons. This makes NMR a powerful local probe for microscopic investigation of the exotic order and fluctuations of multiple degrees of freedom of electrons, i.e., spin, charge and orbital. We use various NMR spectrometers in different environment (low temperature, high magnetic field and high pressures) to investigate transition metal compounds, rare earth compounds, and organic solids.



NMRスペクトルの解析から得られた、亜鉛不純物の周りの銅スピンの分布の様子。×は亜鉛不純物を、赤い丸は銅原子を示す。また塗りつぶした赤丸は磁場と同じ向きのスピン、中抜き赤丸は磁場と反対向きのスピンを表し、丸の大きさはスピンの大きさを表す。黒丸はホウ素の位置を示し、その中の番号は左図のスペクトル線の番号に対応する。NMRスペクトルでは、亜鉛不純物と同じ原子層だけでなく、その上下に隣り合う原子層からの信号も観測されている。

Distribution of Cu-spin moments in the neighborhood of a Zn impurity obtained from analysis of the NMR spectrum. The location of the Zn impurity is indicated by × and red circles show Cu atoms. The solid (open) red circles indicate Cu spins directed along (opposite to) the external magnetic field. The black circles show boron sites, where the numbers show correspondence to the resonance lines in the NMR spectrum. In the NMR spectrum, not only the boron sites on the same layer as the Zn impurity but also the boron sites on the neighboring layers are observed.

研究テーマ Research Subjects

1. 低次元、フラストレート・スピン系のダイナミクスと量子相転移
Dynamics and quantum phase transitions in low dimensional or frustrated spin systems
2. 特異な超伝導体
Exotic superconductors
3. 強相関電子系における電荷・軌道・多極子の秩序と揺らぎ
Ordering and fluctuations of charge, orbital, and multipoles in strongly correlated electron systems
4. 磁性有機伝導体におけるスピンと電荷のダイナミクス
Spin and charge dynamics in magnetic organic conductors

榊原研究室

Sakakibara Group



榊原 俊郎
SAKAKIBARA, Toshiro
教授
Professor



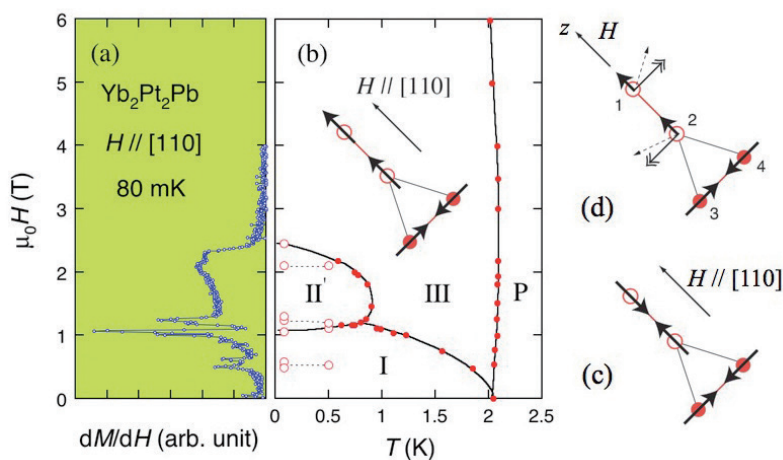
橘高 俊一郎
KITTTAKA, Shunichiro
助教
Research Associate



三田村 裕幸
MITAMURA, Hiroyuki
助教
Research Associate

物質の示す磁気現象は広い温度範囲にわたっている。その中で重い電子系などある種の物質系では1ケルビンよりも遙かに低い温度領域で興味深い性質を示す場合がある。このような温度領域では通常の磁気測定手段を適用することが困難なため未開拓の課題も多く、新しい物性現象が期待される。当研究室ではこのような低い特性温度を持つ様々な物質系の磁気物性の研究を行っている。具体的にはf電子化合物や重い電子系、量子スピン系およびフラストレートスピン系などが研究対象で、磁化や比熱測定を主な実験手段として研究している。この目的のために、我々は30ミリケルビンの極低温まで磁化測定が可能な高感度の磁力計や、異方的超伝導体のギャップ構造の特定に有効な角度分解の磁場中比熱測定装置など、独自の装置開発も行っている。

Magnetic phenomena in condensed matter can be observed at a wide range of temperatures. In heavy fermions and certain other systems, interesting magnetic behavior often occurs at low temperatures much below 1 K. Because of difficulty in making magnetic measurements at such low temperatures, little work has been done to date. Our interest is to research those magnetic materials having low characteristic temperatures, such as f-electron compounds, heavy fermions, quantum spin systems, and geometrically frustrated spin systems. To study these systems, we also develop necessary equipment. Equipment we have successfully developed includes: high sensitivity magnetometers which are operable even at extremely low temperatures down to the lowest of 30 mK, and equipment to perform angle-resolved specific heat measurements in a rotating magnetic field. The latter is an effective tool for investigating the nodal structures of anisotropic superconductors.



直交ダイマー構造を持つイジング反強磁性体 $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ の (a)80 mK における微分磁化率および (b) 磁気相図。磁場方向は [110] 方向。 (c) 弱磁場で予想される磁気構造 (I 相)。磁場と直交するダイマーの磁気秩序は磁場の影響を受けず (III 相、挿入図)、磁場に依存しない転移温度を示す。一方、II' 相では磁場に平行なダイマーは連続的に磁化が増加する。この振る舞いはイジングスピンモデルでは説明できず、高次多極子を非対角成分に持つ擬スピンのフロップの可能性が高い。 (d) は II' 相における磁気モーメントの概略図で、2 重矢印が高次の磁気多極子モーメントを表す。

Phase diagram and magnetic structures of an Ising antiferromagnet $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ having an orthogonal dimer structure. (a) differential susceptibility at 80 mK, (b) phase diagram (magnetic field direction of [110]), and (c) the expected collinear magnetic structure at low fields (phase I). The magnetic structure for the dimers perpendicular to the magnetic field is immune to H and the transition temperature is independent of H (phase III, inset). In phase II', magnetization of the dimers parallel to H increases continuously. This behavior, which does not conform to the Ising spin model, strongly suggests the occurrence of a "pseudospin flop" due to a hidden high-rank multipole moment. Figure (d) shows schematic diagram of magnetic moments (thick arrows) and high-rank multipole moments (double arrows) in phase II'.

研究テーマ Research Subjects

1. 重い電子化合物の磁性と超伝導
Magnetism and superconductivity in heavy electron systems
2. f 電子化合物の多極子自由度に由来する秩序と揺らぎ
Multipole orderings and fluctuations in f electron systems
3. フラストレート磁性体の磁化過程
Magnetization of geometrically frustrated magnets
4. 量子スピン系の基底状態
Ground state properties of quantum spin systems

森研究室

Mori Group



森 初果
MORI, Hatsumi
教授
Professor



上田 顕
UEDA Akira
助教
Research Associate

物質科学は、新しい概念を与える新物質の発見を契機に大きな発展を遂げている。

本研究室では、内部自由度をもつ分子を基盤とし、それら分子が凝縮した分子性物質において、分子自身の個性と、分子間の相互作用による自由度が相関した、特異な機能性（電子・プロトン伝導性、磁性、誘電性およびその光・電場による外場応答性）の開拓を行っている。

分子性物質の魅力は、1) 多彩な分子内および分子間の自由度が設計・制御可能であること、2) 電子間クーロン相互作用（電子相関）が大きく、電子の波動性（伝導性）と粒子性（磁性）が競合すること、3) 分子が非常に柔らかいため環境および外場応答性が大きく、光および電場による励起状態を経て特異な機能を発現することなどが挙げられる。

森グループでは、新しい有機超伝導体としてモット型 κ -ET₂Cu(NCS)₂ や電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆ (図1) を発見し、物性研究を行った。さらに最近では、水素結合プロトンと伝導電子が動的に連動して、伝導性と磁性の切り替え現象を示す純有機伝導体 (図2) を開発した。

Development of “materials science” is started from discoveries of novel materials with new concepts.

The development of novel functionalities (electron and proton conductivities, magnetism, dielectrics, and responses by external stimuli such as light and electric field) has been aimed based upon molecular materials with utilizing intra- and inter-molecular degrees of freedom.

The attractive points of molecular materials are 1) that a variety of intra- and inter-molecular degrees of freedoms are designable and controllable, 2) that large Coulomb interactions (electron correlation) reflect the magnetism (electron particle) as well as conductivity (electron wave) in molecular materials, and 3) that large responses by external stimuli are observable due to softness of molecules and strong electron-phonon coupling.

In Mori group, novel Mott-type organic superconductor κ -ET₂Cu(NCS)₂ and charge-ordered-type one β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆ have been developed and characterized (Fig. 1). Moreover, novel electron-proton coupled purely organic conductors, where conductivity and magnetism switching due to coupled deuteron and electron transfers, have been developed and characterized (Fig. 2).

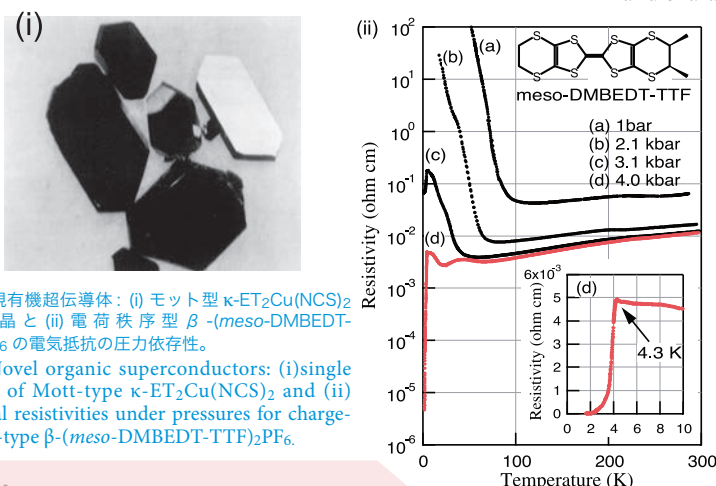


図1. 新規有機超伝導体: (i) モット型 κ -ET₂Cu(NCS)₂ の単結晶と (ii) 電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆ の電気抵抗の圧力依存性。
Fig.1. Novel organic superconductors: (i) single crystals of Mott-type κ -ET₂Cu(NCS)₂ and (ii) electrical resistivities under pressures for charge-ordered-type β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆.

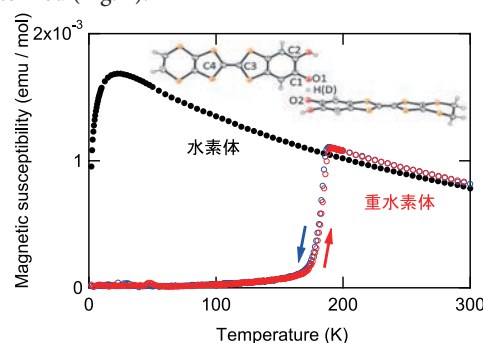


図2. 伝導電子と水素結合プロトンが相関する純有機伝導体 κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂ (X = H, D) において、大きな重水素効果により高温で伝導性および磁性が切り替わる。
Fig.2. Switching behavior of electrical resistivity and magnetism due to large deuteron isotope effect in proton-electron correlated purely organic conductors κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂ (X = H, D).

研究テーマ Research Subjects

1. 分子の自由度を生かした新規有機（超）導体およびプロトン伝導体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for novel organic (super)conductors and proton conductors based upon molecular degree of freedom
2. 固体中で電子がプロトン運動と協奏した有機伝導体、誘電体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for electron-proton coupled molecular functional materials
3. 磁性と伝導性が競合する金属錯体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for novel metal complexes whose magnetism and conductivity are competitive
4. 分子性物質の外場（光、磁場、電場、温度、圧力）応答の研究
Studies of responses by external stimuli (light, magnetic and electric fields, temperature, pressure) for molecular materials

新物質科学研究部門

Division of New Materials Science

http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/nakatsuji_group.html

中辻研究室

Nakatsuji Group



中辻 知
NAKATSUJI, Satoshi
准教授
Associate Professor



松本 洋介
MATSUMOTO, Yousuke
助教
Research Associate

物理学のフロンティアは、新しい物理現象の発見にあります。なかでも、現代の電子・情報社会を支える材料である無機物質から、物質中の 10^{23} 個もの電子が相互作用して創りだすマクロな量子現象が続々と発見されており、物理と化学を駆使した新物質の開発こそが新しい量子現象を目指す物性物理の醍醐味であると言えます。私達の研究室では、特に遷移金属化合物や、重い電子系と呼ばれる金属間化合物の新物質開発に取り組み、量子現象として、スピン・軌道の秩序と隣接した新しいタイプの超伝導・金属状態、さらに、幾何学的フラストレーションの効果として期待される、磁性半導体での新しいスピン液体状態、量子輸送現象などに注目して研究を進めています。

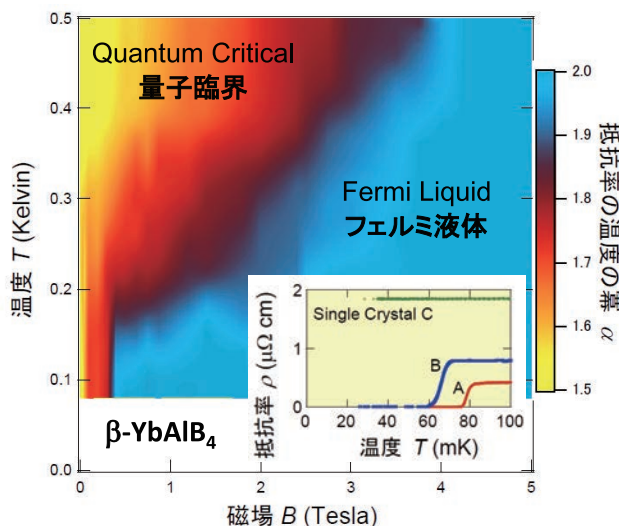
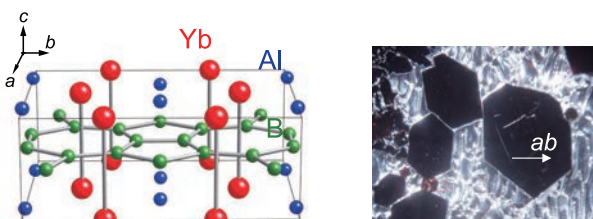
私たちの研究室は、物質の化学合成のみならず、こうした新しい物理現象の発見を目指した物理測定にも力を入れています。多様な合成法を用いて新しい化合物の単結晶育成に自ら取り組むとともに、顕著な量子効果が現れる極低温から室温まで様々な物性測定を行っています。現在の主なテーマは、(1) 量子相転移近傍でのエキゾチック超伝導と異常金属状態、(2) 磁性体での巨視的トポロジカル量子効果、(3) フラストレートした磁性体での量子スピン液体状態などがあります。

私達が発見した量子臨界超伝導体 β -YbAlB₄。

(左上) 結晶構造。主に Yb の 4f 電子が磁性と超伝導を担う。(右上) フラックス法で育成した純良単結晶。(下) 電気抵抗の振る舞いの変化から決定した状態図。金属では初めてチューニングなしに、ゼロ磁場で量子臨界状態が実現する。(挿入図) 超高純度の単結晶でのみ、この量子臨界状態から超伝導が現れる。

Quantum Critical Superconductor β -YbAlB₄ found in our group
(Top left) Crystal structure. 4f-electrons mainly contribute to magnetism and superconductivity. (Top right) High quality single crystal grown by Al-flux method (Bottom) Phase diagram constructed by the contour plot of the exponent α of the power law behavior of the resistivity. Quantum critical region appears under zero field without tuning for the first time in a metal. (Inset) Superconductivity emerges from the quantum critical state only in the case of ultrapure single crystals.

The discovery of new phenomena is at the forefront of research in condensed matter physics. This is particularly true for the inorganic materials, which provide an important basis in current electronic and information technology research, which keep providing numbers of macroscopic quantum phenomena due to correlations among the Avogadro numbers of electrons. Thus, the search for new materials that exhibit new characteristics is one of the most exciting and important projects in the materials research. We have synthesized new materials in so-called strongly correlated electron systems including transition metal compounds and heavy fermion intermetallic compounds. Our interest lies in quantum phenomena such as exotic superconductivity and anomalous metallic states close to a quantum phase transition, novel topological phases in magnetic metals, and quantum spin liquids in frustrated magnets.



研究テーマ Research Subjects

1. 量子相転移近傍での新しい超伝導と異常金属状態
Exotic superconductivity and anomalous metallic states near quantum phase transitions
2. 磁性体における巨視的トポロジカル量子効果
Macroscopic topological effects in magnetic metals
3. フラストレートした磁性体での新奇磁性、量子スピン液体状態
Novel magnetism and quantum spin liquids in frustrated magnets

松平研究室

Matsuhira Group



松平 和之
MATSUHIRA, Kazuyuki
客員准教授
Visiting Associate Professor

三角形をベースとした結晶構造を持つ磁性体では、幾何学的フラストレーション効果により磁気秩序が抑制される。そのため、系は不安定な状態になりやすく、大きな揺らぎの効果の発現や新しいタイプの磁気状態、巨視的に縮退した基底状態などが実現することが知られている。また、近年では、電気伝導現象に関連した新しい物性も見出されている。松平研究室では三角形をベースとした結晶構造を持つ強相関電子系物質に創出する「フラストレーション」や「新しい電気伝導現象」の基礎的研究を進め、新たな機能性電子材料の開発を目標としている。

特に強い幾何学的フラストレーション効果を示すパイロクロア格子を有する導電性パイロクロア型イリジウム酸化物を対象として、この物質が示す金属絶縁体転移の近傍に創出する量子臨界現象についての実験的研究を行っている。

We have studied the geometrically frustrated magnet that is basically composed of triangular lattice. It is well known that the geometrically frustration effect in magnet can lead to novel phenomena such as a macroscopic degenerated ground state with no long range magnetic ordering. Recently, the geometrically frustration effect in the metallic strongly correlated electrons system has attracted much interest because novel phenomena emerge in the transport properties. In particular, $4d$ and $5d$ transition metal pyrochlore oxides, whose structures are composed of a network of corner-shared tetrahedra, have been attracting much interest because of their novel transport properties such as unconventional anomalous Hall effect, superconducting transition, metal-insulator transition.

We have investigated the metallic pyrochlore rare-earth iridates $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ (R : rare-earth), indicating unconventional anomalous Hall effect, metal-insulator transition and giant magnetoresistance effect. The pyrochlore rare-earth iridates are unique frustrated Kondo lattice systems composed of localized $4f$ moments and Ir $5d$ conduction electrons. In this collaboration, we have been exploring the quantum critical phenomena near a disappearance of metal-insulator transition involving antiferromagnetic ordering that is theoretically predicted.

ネヴィドムスキー研究室

Nevidomskyy Group



ネヴィドムスキー アンドリ
NEVIDOMSKYY, Adry
外国人客員教授
Visiting Professor

我々の研究室は強相関電子系の理論的研究を行っている。2015年度の物性研究所客員所員として、受入れ研究室である中辻研究室の研究テーマに関連した、以下の幾つかのテーマを取り扱った。

1. 重い電子系 $\alpha\text{-YbAlB}_4$ が磁場下で示す特異な電子状態
2. 低温で異常金属状態を示す $\beta\text{-YbAlB}_4$ に対して行われた、物性研・辛グループによる角度分解光電子分光 (ARPES) の実験結果の理論的解析
3. 中辻研で合成された金属間化合物 $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{V}, \text{Ti}$) は磁気的な多極子秩序を示す可能性もある。これに対して予備的な研究を開始している。
4. 中辻研究室において精力的に研究されているパイロクロアイリジウム酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ および $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ におけるフラストレーション磁性は、非常に興味深い研究テーマである。より深い理論的研究が現在必要とされており、我々はこの問題に対して可能な数値的手法の開発を開始した。

I am a theoretical physics working in the field of strongly correlated electron systems. As a visiting professor at ISSP in 2015, my research program comprises several projects related to the scientific activities of my host Professor Satoru Nakatsuji:

1. The unusual electronic properties of a heavy fermion metal $\alpha\text{-YbAlB}_4$ under the applied magnetic field.
2. Theoretical analysis of the angular-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) performed by Prof. Shin's group on $\beta\text{-YbAlB}_4$, which exhibits a strange-metal behavior at low temperature.
3. I have started preliminary analysis of $\text{PrTr}_2\text{Al}_{20}$ ($\text{Tr} = \text{V}, \text{Ti}$), a compound synthesized in Prof. Nakatsuji's group, which is a candidate for the multipolar magnetic order.
4. The magnetic properties of the frustrated pyrochlore iridate compounds $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ and $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ are very intriguing and are a subject of active research by Prof. Nakatsuji's group. More in-depth theoretical studies are needed and I have started developing a possible numerical approach to address this problem.