

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	武田 晃 TAKEDA, Hikaru
教授 Professor	榊原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	助教 Research Associate	吉田 誠 YOSHIDA, Makoto	特任研究員 Project Researcher	清水 悠晴 SHIMIZU, Yusei
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	平田 靖透 HIRATA, Yasuyuki
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	ワン ボゼン WANG, Bosen
教授(客員) Visiting Professor	神取 秀樹 KANDORI, Hideki	助教 Research Associate	上田 顕 UEDA, Akira	特任研究員 Project Researcher	志村 恭通 SHIMURA, Yasuyuki
教授(外国人客員) Visiting Professor	ペーニア カムラン BEHNIA, Kamran	教務職員 Technical Associate	村山 千壽子 MURAYAMA, Chizuko	特任研究員 Project Researcher	富田 崇弘 TOMITA, Takahiro
				特任研究員 Project Researcher	ティアン ザオミン TIAN, Zhaoming

瀧川研究室

Takigawa Group

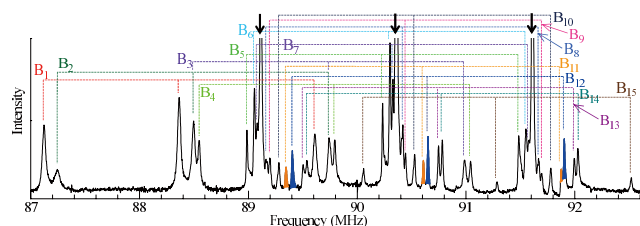


瀧川 仁
TAKIGAWA, Masashi
教授
Professor



吉田 誠
YOSHIDA, Makoto
助教
Research Associate

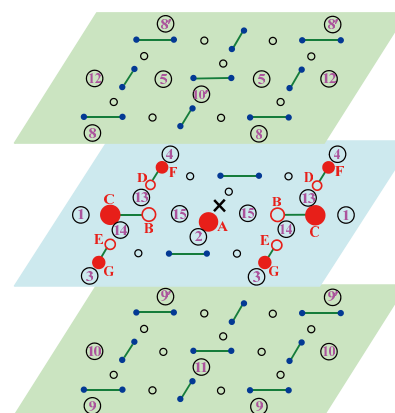
核磁気共鳴法 (NMR) を主な実験手段として、固体内の強い電子間相互作用に起因する現象を研究している。強相関電子系では、超伝導、強 (反強) 磁性、電荷秩序、軌道秩序といった多彩な秩序状態が拮抗しており、磁場・圧力などの外的条件を変えることでこれらの間の量子相転移が起こり得る。原子核は固有の磁気モーメントや電気四重極モーメントを持っており、これらは周囲の電子が作る磁場や電場勾配を感じている。このためNMRは、固体内電子のスピンの、電荷、軌道などの自由度が絡み合って現れる特異な秩序状態や揺らぎの性質を、ミクロに探る有力な実験手段となる。我々は色々な特色を持つパルスNMR測定装置を整備し、低温・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



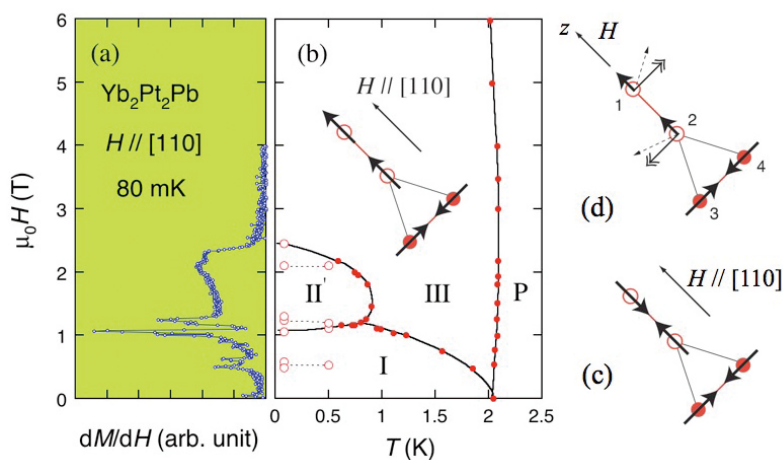
橘高 俊一郎
KITAKA, Shunichiro
助教
Research Associate



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 extend over a wide temperature range. In some systems like heavy fermions, interesting magnetic behavior is quite often observed at low temperatures much below 1 K, where ordinary magnetic measurements are difficult and not much work has been done yet. Our research interest lies in those magnetic materials having low characteristic temperatures, such as f electron compounds, heavy fermions, quantum spin systems and geometrically frustrated spin systems. In order to study these systems, we have developed high sensitivity magnetometers which can be operated at very low temperatures down to ~30 mK. We also perform angle-resolved specific heat measurements in a rotating magnetic field, which is a powerful 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を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。

(a) Differential susceptibility at 80 mK and (b) the phase diagram of the Ising antiferromagnet $\text{Yb}_2\text{Pt}_2\text{Pb}$ having an orthogonal dimer structure. The magnetic field direction is [110]. (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 cannot be explained by an Ising spin model, and strongly suggests the occurrence of a "pseudospin flop" due to a hidden high-rank multipole moment. (d) Schematic diagram of the magnetic moment (thick arrows) and the 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 - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ や電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ (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 - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ and charge-ordered-type one β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ 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).

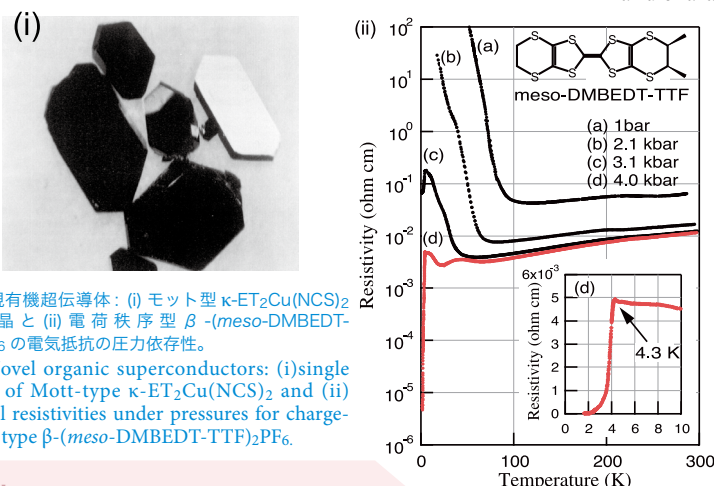


図1. 新規有機超伝導体: (i) モット型 κ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ の単結晶と (ii) 電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ の電気抵抗の圧力依存性。
Fig.1. Novel organic superconductors: (i) single crystals of Mott-type κ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ and (ii) electrical resistivities under pressures for charge-ordered-type β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$.

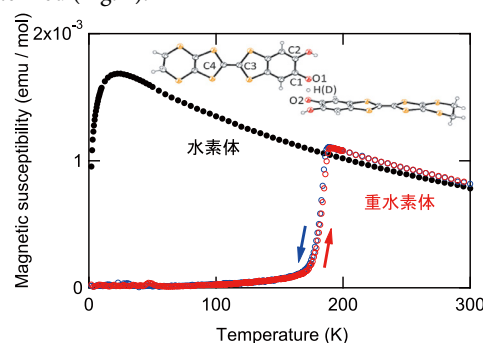


図2. 伝導電子と水素結合プロトンが相関する純有機伝導体 κ - $\text{X}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ (X = H, D) において、大きな重水素効果により高温で伝導性および磁性が切り替わる。
Fig.2. Switching behavior of electrical resistivity and magnetism due to large deuteron isotope effect in proton-electron correlated purely organic conductors κ - $\text{X}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ (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

中辻研究室

Nakatsuji Group



中辻 知
NAKATSUJI, Satoru
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。

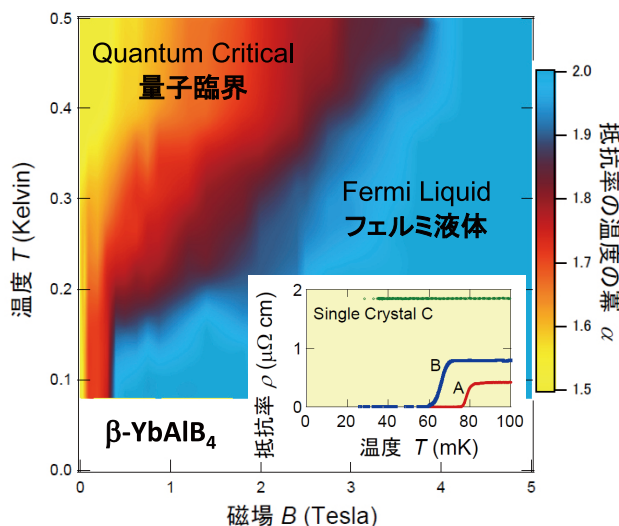
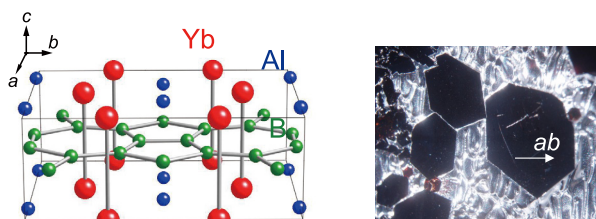
私達が発見した量子臨界超伝導体 β -YbAlB₄。

(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

神取研究室

Kandori Group



神取 秀樹
KANDORI, Hideki
客員教授
Visiting Professor

人間は光なしでは生きてゆくことができない。植物の光合成、動物の視覚に代表されるように、光は「いのちの源」である。ロドプシン、フラビタンパク質などの光受容タンパク質は、生物が光を能動的に利用する際に受容体となるタンパク質である。神取研究室では「光といのち」をテーマとして、光を吸収するレチナールやフラビン分子がタンパク質場という環境下でどのような光化学反応を起こし、時間・空間的な階層構造を活かしながら多様な機能に繋げていくのかを明らかにしている。特に、赤外分光法から新しい構造情報を引き出し、タンパク質の構造変化を原子のレベルで捉えるべく研究を行っている。

具体的な研究を以下に示す。

【1】光受容タンパク質における光エネルギー変換および光情報変換のメカニズム研究

【2】光受容タンパク質を用いた新機能の開発

【3】光受容タンパク質研究を通しての赤外分光法の開拓
物性研の森研究室とは、光受容タンパク質の機能を、新しい分子性機能物質や光触媒の開拓につなげる研究を展開する。

We have studied the mechanism of conversion of light into chemical energy or signal (information) in photoreceptive proteins (rhodopsins and flavoproteins). Upon light absorption of retinal and flavin in rhodopsins and flavoproteins, respectively, ultrafast photoisomerization initiates protein structural changes, leading to each functional expression. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of these proteins provides various important vibrational bands related to structural changes for function. The detailed researches are followings;

[1] Mechanism of conversion of light into chemical energy and signal in photoreceptive proteins

[2] Creation of novel functions in photoreceptive proteins

[3] Development of infrared spectroscopy based upon study of photoreceptive proteins

By the collaboration with Mori laboratory, developments of novel functional materials and photo-catalyst are aimed with utilizing functionalities of photo-active proteins.

ベーニア研究室

Behnia Group



ベーニア カムラン
BEHNIA, Kamran
外国人客員教授
Visiting Professor

私はこれまで超伝導体から半導体にいたる様々な固体中の電子の集団的な振舞いを研究してきた。私の物性研究所客員教授としての研究計画は幾つかの要素から成る。私は、受入れ所員の中辻准教授と共に、幾つかの強相関電子物質の熱電応答を研究する予定である。特に、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ を対象に、この物質が示す自発的ホール効果に対応する熱電応答を調べたい。まず最初の段階として微小単結晶試料のゼーベック、ネルンスト係数を可能にする実験セットアップの立ち上げに協力したい。この主要な計画に加えて、物性研究所の他の所員とも共同研究を進めたい。すでに高田教授との間で正孔ドーピングした SrTiO_3 の超伝導に関する研究が進んでいる。また、徳永准教授と強磁場下における半金属の特性に関する共同研究を進めたい。

I have been exploring the collective behavior of electrons in a variety of solids ranging from superconductors to semi-metals. My research program as a visiting professor to ISSP has several components. Together, with my host, Prof. Nakatsuji, we wish to study the thermoelectric response of several correlated-electron systems in his laboratory. In particular we wish to find the thermoelectric counterpart of the spontaneous Hall Effect in $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$. A first step would be to help setting up experiments capable of probing the Seebeck and Nernst coefficients of small crystals. In addition to this main project, I intend to interact with other ISSP professors. There is an ongoing collaboration with Prof. Takada on superconductivity in n-doped SrTiO_3 and also the opportunity to collaborate with Prof. Tokunaga on properties of semi-metals in presence of strong magnetic fields.