

量子物質研究グループ

Quantum Materials Group

物性物理はこれまで新しい物質、新しい現象、新しい概念の発見によって、大きく発展してきた。物性研究所で活発に研究されてきた強相関電子系は、その顕著な例である。一方、研究のブレークスルーは多くの場合、分野の融合によることが多い。本研究グループは、そのような視点のもとに、量子物質研究のさらなる飛躍を目指して、理論と実験の緊密な連携を核とし、従来の研究部門の垣根を超えた共同研究を推進するために新設された。

当グループは3つのコアグループと9つの連携グループからなり、互いに強く連携しながら、強相関電子系の新しい量子相や新しい機能性材料の発見を目指した研究を進めている。実験的には、バルクや薄膜の試料を作成し、その精密物性測定、スピントロニクス機能の開拓を行っている。これらは、理論手法の開発を通じて新しいトポロジカルな量子相の開拓を行う理論チームと強く協力をして進めている。

Discovery of new materials, new phenomena, and new concepts has progressed condensed matter physics. A good example can be found in the history of research in strongly correlated electron systems, one of the major fields studied in ISSP. On the other hand, breakthroughs have been often made at an intersection of various different research fields. To facilitate another leap forward in our activity, the quantum materials group has been created to promote interdisciplinary studies based on the collaboration between the experimental and theoretical groups beyond the conventional research disciplines.

The quantum materials group currently consists of three core groups and nine joint groups. All these groups vigorously conduct collaborative research to discover novel quantum phases and functional materials in correlated electron/spin systems. The activities include new material synthesis in bulk and thin film forms and their characterization through state-of-art measurement systems. Device fabrication is also made for spintronics applications. These experiments are being conducted through lively discussion and tight collaboration with theory groups, which search for novel topological phases by using new theoretical approach and numerical methods.

教授 Professor	押川 正毅 OSHIKAWA, Masaki	教授(外国人客員) Visiting Professor	ドリチコ ナタリア ブラディミロブナ DRICHKO, Natalia Vladimirovna		
教授 Professor	中辻 知 NAKATSUJI, Satoru	教授(外国人客員) Visiting Professor	ヒックス クリフォード ウィリアム HICKS, Clifford William		
教授*1 Professor	瀧川 仁 TAKIGAWA, Masashi				
教授*1 Professor	榊原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	助教 Research Associate	多田 靖啓 TADA, Yasuhiro	特任研究員 Project Researcher	富田 崇弘 TOMITA, Takahiro
教授*2 Professor	辛 埴 SHIN, Shik	助教 Research Associate	酒井 明人 SAKAI, Akito	特任研究員 Project Researcher	マン フィユアン MAN, Huiyuan
教授*3 Professor	廣井 善二 HIROI, Zenji	助教*1 Research Associate	下澤 雅明 SHIMOZAWA, Masaaki	特任研究員*4 Project Researcher	杉本 聡志 SUGIMOTO, Satoshi
教授*4 Professor	大谷 義近 OTANI, Yoshichika	助教*4 Research Associate	一色 弘成 ISSHIKI, Hironari	特任研究員*4 Project Researcher	肥後 友也 HIGO, Tomoya
准教授 Associate Professor	三輪 真嗣 MIWA, Shinji	特任研究員 Project Researcher	大槻 匠 OTSUKI, Takumi	特任研究員*4 Project Researcher	ムドゥリ プラサンタ クマール MUDULI, Prasanta Kumar
准教授*1 Associate Professor	山下 穰 YAMASHITA, Minoru	特任研究員 Project Researcher	鈴木 慎太郎 SUZUKI, Shintaro	学振特別研究員 JSPS Research Fellow	ク ダンル Qu, Danru
准教授*2 Associate Professor	和達 大樹 WADATI, Hiroki	特任研究員 Project Researcher	チェン タイシ CHEN, Taishi	学振特別研究員 JSPS Research Fellow	レイクマー マユク RAY Kumar, Mayukh
准教授*2 Associate Professor	近藤 猛 KONDO, Takeshi				
准教授*2 Associate Professor	松永 隆佑 MATSUNAGA, Ryusuke				

*1 所内兼務。本務は凝縮系物性研究部門 /concurrent with Division of Condensed Matter Science

*2 所内兼務。本務は極限コヒーレント光科学研究センター /concurrent with Laser and Synchrotron Research Center

*3 所内兼務。本務は物質設計評価施設 /concurrent with Materials Design and Characterization Laboratory

*4 所内兼務。本務はナノスケール物性研究部門 /concurrent with Division of Nanoscale Science

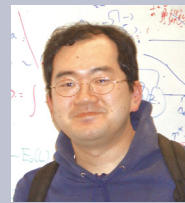
量子物質研究グループ

Quantum Materials Group

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

押川研究室

Oshikawa Group



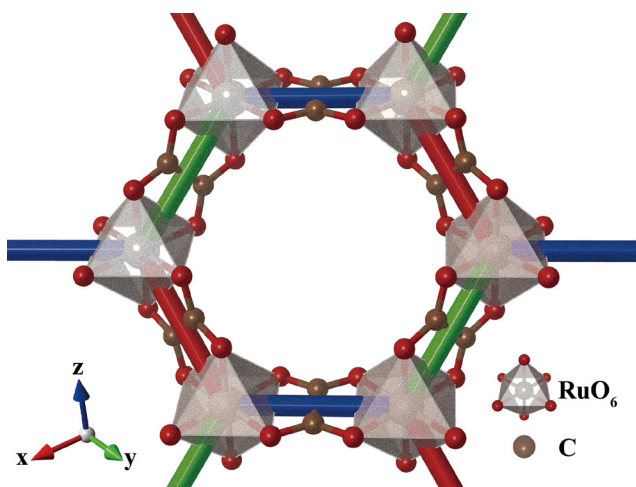
押川 正毅
OSHIKAWA, Masaki
教授
Professor



多田 靖啓
TADA, Yasuhiro
助教
Research Associate

量子多体系の理論を中心として研究を行っている。量子多体系と古典統計力学および場の理論の密接な関係を踏まえ、広範な系について成立する普遍的な概念を探求するとともに、実験結果の統一的理解や新たな実験に対する予言も目標とする。最近の成果の一つとして、カイラル超流動体の全軌道角運動量についての40年来のパラドックスに一定の理論的解決を与えた。また、場の理論における量子異常を応用して、離散的な対称性の存在下ではギャップレスな臨界相の間に新たな分類が生じることを示した。これは、量子相の分類に新たな展開をもたらすものである。このような理論研究における発展を実験研究と結びつけるべく、Kitaevスピン液体相などの新奇なトポジカル相を実現する物質設計についても研究を進めている。これらの研究の多くは、国際共同研究として推進している。

Our main focus is quantum many-body theory. Based on the close correspondence among quantum many-body systems, classical statistical systems, and field theory, we pursue universal concepts in physics. At the same time, we aim to give a unified picture on experimental data and to make testable predictions. As an example of our recent achievements, we have given a certain theoretical result for the total orbital angular momentum of chiral superfluids, which has remained paradoxical for 40 years. We also demonstrated, based on anomaly in quantum field theory, a new classification of gapless quantum critical phases in the presence of a discrete symmetry. This opens up a new direction in classification of quantum phases. In order to connect these theoretical developments with experiments, we also study material design to realize exotic topological phases such as Kitaev spin liquids. Much of our research is carried out in international collaborations.



金属有機構造体 (Metal-Organic Framework, MOF) を用いたKitaevスピン液体の設計。Kitaevモデルは、基底状態としてスピン液体を実現する、非常に興味深い厳密に解ける量子スピンモデルである。イリジウム酸化物等の無機化合物でのKitaevモデルの実現が議論されているが、これらの物質では直接交換に起因するハイゼンベルグ型相互作用の寄与が大きく、基底状態はスピン液体ではない。我々は、MOFを用いて直接交換相互作用を抑制し、より理想的なKitaevモデルの実現の可能性を提案した。

Designing Kitaev spin liquid using Metal-Organic Framework (MOF). Kitaev model is an intriguing exactly solvable spin model, with a spin-liquid ground state. Although realizations of the Kitaev model in iridates and other inorganic materials has been discussed, the dominance of Heisenberg type interactions owing to direct exchanges prevents the ground state from becoming the spin liquid. We proposed a possibility of more ideal realizations of the Kitaev model, using MOFs in which direct exchange interactions are suppressed.

研究テーマ Research Subjects

1. 量子スピン系および itinerant 電子系における電子スピン共鳴
Electron Spin Resonance in quantum spin systems and itinerant electron systems
2. 量子細線の接合における伝導と共形場理論
Conduction at a junction of quantum wires and conformal field theory
3. トポジカル相と量子エンタングルメント
Topological phases and quantum entanglement
4. カイラル超流体の軌道角運動量
Orbital angular momentum of chiral superfluids
5. トポジカル相・トポジカル現象の物質系での実現
Realization of topological phases and topological phenomena in materials

中辻研究室

Nakatsuji Group



中辻 知
NAKATSUJI, Satoru
教授
Professor



酒井 明人
SAKAI, Akito
助教
Research Associate

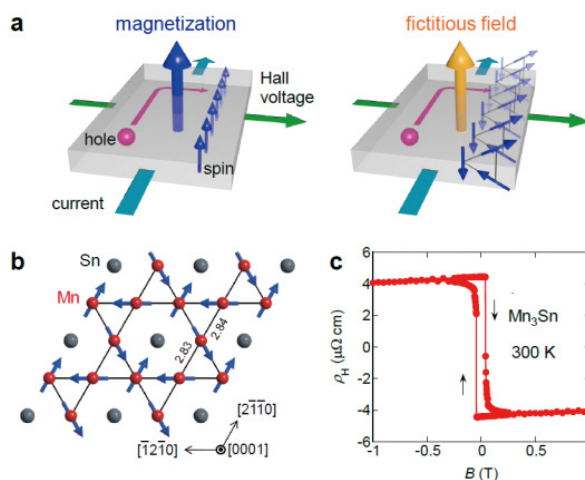
物質科学のフロンティアは、新しい現象の発見にある。なかでも、無機物質は我々の生活を支える材料として最もよく利用されてきた。その無機物質から物質中の 10^{23} 個もの電子が相互作用して創り出すマクロな量子現象が続々と発見されており、物理と化学を駆使した新物質の開発こそが新しい量子現象を目指す物質科学の醍醐味である。さらに、これらの量子現象の発見は現代の情報社会や IoT 社会の基盤となる革新的技術を生みだしている。私達の研究室では、このような新しい機能の開発を目指した新物質開発に取り組み、スピントロニクス機能やエネルギーハーベスティングなどの応用に資する新たな量子機能を探求する研究を進めている。

そのため、私達の研究室では、物質の化学合成のみならず、新しい物理現象の発見を目指した最先端物性測定、また、それを応用したデバイス作製や薄膜測定にも力を入れている。多様な手法を用いて新しい化合物の単結晶育成や薄膜作製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応用に重要な室温以上での様々な高精度物性測定を行っている。

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, quantum spin liquids in frustrated magnets, and their spintronics application.

a. 強磁性体における異常ホール効果 (左図) と反強磁性体 Mn_3Sn における異常ホール効果 (右図)。強磁性体中では、自発磁化 M によって電子の運動が曲げられることにより、ゼロ磁場下 ($B = 0$) でホール効果が自発的に現れる。一方で、反強磁性体 Mn_3Sn では、ゼロ磁場下 ($B = 0$) で、かつ、自発磁化 M のない状態において、ホール効果が自発的に現れる。この場合、電子の運動を曲げる要因となる仮想的な内部磁場 b が、スピンの秩序化によってもたらされると考えられる。b. Mn_3Sn の磁気構造。カゴメ格子の各頂点に位置する Mn は磁気モーメント (青矢印) を有し、キラル反強磁性構造を示す。c. Mn_3Sn における室温でのホール抵抗率の磁場依存性。

Magnetic behavior and crystal structure of Mn_3Sn . a, Anomalous Hall effect in ferromagnets (left) and in antiferromagnets (right) induced by bending the trajectory of conducting carriers by magnetization and fictitious field, respectively. b, Crystal and spin structure of Mn_3Sn . Each Mn has a magnetic moment (arrow). c, Magnetic field dependence on the Hall resistivity in Mn_3Sn at room temperature.



研究テーマ Research Subjects

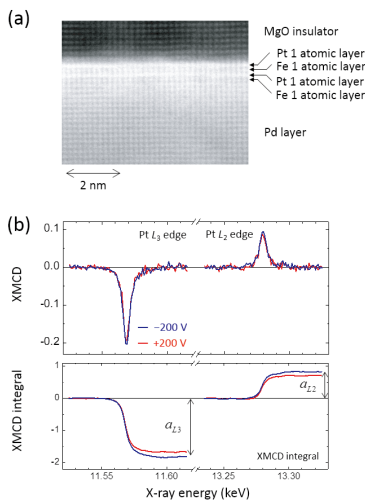
1. ワイル磁性体の量子伝導効果とそのスピントロニクス応用
Quantum transport phenomena in Weyl magnets and their applications for spintronics
2. トポロジカル磁性体の開発とエネルギーハーベスティング
Search for novel topological magnets and their application for energy harvesting
3. トポロジカル量子相や新しい超伝導体の開拓
Search for novel topological phases and superconductors



三輪 真嗣
MIWA Shinji
准教授
Associate Professor

私たちの研究グループでは高品質かつ特徴的なナノ構造を用いた物性実験研究を行っている。具体的には半導体工学の超高真空薄膜成長技術をFe・Co・Mn・V・Sn・Pt・Pd・Ir等の金属、MgO等の絶縁体、フタロシアニン等の有機分子に拡張し、異種材料界面を有する多層膜を用いる。ナノの世界では電子の自転角運動量に相当する「スピン」の性質が顕著に現れることに着目し、金属・量子物質・有機分子を組み合わせた多層膜を用いて様々な量子スピントロニクス現象を発現するデバイスを創成している。作製した新物質・材料デバイスが示す新たな物性(物の性質)を見つけ、機能化し、応用に供すること研究目的である。

最近特に磁性金属多層膜の界面磁性・電気磁気効果等のスピントロニクス現象の機構を電気測定及びX線分光により把握することに注力している。分光研究で得た知見を用いて室温巨大効果を示すデバイスの創成を目指している。



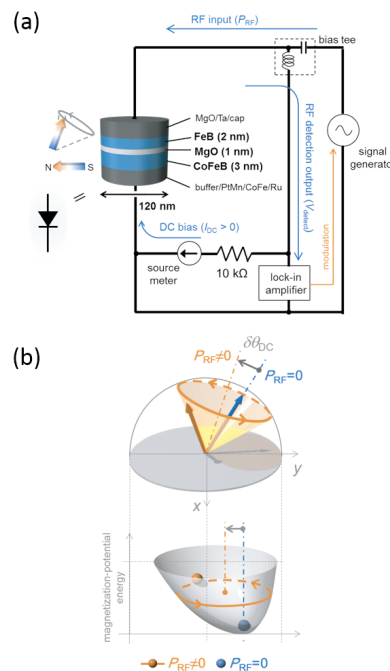
(a) 特徴的なナノ構造を有する新物質・材料薄膜の例。ありふれた材料のFe・Pt・Pd等を原子レベルで積層し、新たな物性を示す新物質・材料薄膜デバイスを創成した。(b) X線磁気円二色性分光の結果。外部からMgO誘電層に電界をかけながら分光を行い、界面Pt層の電子状態の変化を見出した。このような高品質薄膜デバイス研究とX線分光研究の融合により、次世代不揮発性メモリの駆動技術として重要な磁性金属薄膜における電気磁気効果の物理機構を解明した。

(a) An example of novel multilayer with characteristic nano-structure. By using conventional materials such as Fe, Pt, and Pd, we fabricated novel multilayer device with new physical phenomena. (b)

Results of X-ray magnetic circular dichroism spectroscopy. We conducted the spectroscopy under electric-field application to the MgO dielectric, and found a change in electronic state in interfacial Pt layer. The origin for the voltage-controlled magnetic anisotropy, which is important for future non-volatile random access memory, has been revealed.

We study experimental condensed-matter and material physics using high-quality and characteristic nano-structures. We employ ultrahigh vacuum technique, which has been used for semiconductor engineering, for the multilayer fabrication with metals (Fe, Co, Mn, V, Sn, Pt, Pd, Ir...), insulators (MgO...) and organic molecules (phthalocyanines...). We focus on spin and orbital properties, which can be pronounced in nano-structure, and fabricate quantum spintronics devices with metallic multilayer, quantum materials, and organic ultrathin film. Our research purpose is to characterize the physical properties in such devices, and use it for application.

Recently, we have characterized spintronics phenomena such as interfacial magnetism and magneto-electric effects by electric measurements and X-ray spectroscopy. Using the obtained knowledge, we design and fabricate spintronics device showing large effect at room temperature.



(a) ナノ磁性体のスピンドYNAMICSを利用した機能性デバイスの例。(b) スピンドYNAMICS及びポテンシャルの模式図。スピンドYNAMICSを精密制御すると非線形効果が顕著になる。この非線形効果の利用により、ナノ磁性体のスピントルクダイオード効果の信号雑音比を向上させられることを見出した。

(a) Functional device using spin-dynamics in nano-magnets. (b) Schematic of spin-dynamics and potential. If we precisely control the spin-potential, non-linear effect can be enhanced. We find that signal-to-noise ratio in the spin-torque diode effect in nano-magnets can be enhanced by the non-linear effect.

研究テーマ Research Subjects

- スピントロニクスデバイスのX線分光による機構解明
X-ray spectroscopy to reveal mechanism for spintronics devices
- 界面ナノ制御によるスピントロニクスデバイスの室温性能向上
Increase in performance of spintronics device at room temperature by interface engineering
- ワイル磁性体のスピントロニクスデバイス応用
Spintronics devices with Weyl magnetic materials
- スピンドYNAMICSによる脳型コンピューティング
Brain-inspired computing using spin-dynamics

ドリチコ研究室

Drichko Group



ドリチコ ナタリア ブラディミロブナ
DRICHKO, Natalia Vladimirovna
外国人客員教授
Visiting Professor

私は強相関電子系や磁性体での物理現象について研究を行っている。この強い電子間の相互作用は超伝導を引き起こし、更に強くなると磁性絶縁体を生み出す。これまでこれらの現象は主に無機材料で研究が行われてきたが、私は量子双極子液体などの異常状態を示す分子結晶の異常物性にも興味を持っている。

物質の基本的な性質を調べる一つの方法は励起スペクトルを測定することである。振動を励起することにより、分子や結晶など原子でできた系の原子質量、化学結合の強さなどを知ることができる。同様に、電子・磁気自由度を励起することで、物質中の電子・スピン間の相互作用について知ることができる。このような振動的、電子的、磁氣的励起を調べるために、私の研究では非弾性光散乱、いわゆるラマン散乱を用いている。

Natalia Drichko's research interests are states of matter which arise as a result of strong interactions between electrons and related magnetic interactions. The same interactions between electrons, which lead to unconventional superconductivity, can produce a magnetic insulator when tuned to be somewhat stronger. While more traditionally these effects are found in atomic crystals, Drichko is also interested in these exotic states of matter demonstrated by molecular crystals, which can show also exotic states such as quantum dipole liquid.

One of the ways to study fundamental properties of materials is to measure their excitation spectra. We can obtain information about masses of atoms and strength of chemical bonds in a system build of atoms, such as a molecule or a crystal, by exciting vibrations. Similarly, we can learn about interactions between electrons and spins in materials by exciting the electronic and magnetic degrees of freedom. Drichko uses inelastic light scattering, so-called Raman scattering, to study vibrational, electronic, and magnetic excitations.

ヒックス研究室

Hicks Group



ヒックス クリフォード ウィリアム
HICKS, Clifford William
外国人客員教授
Visiting Professor

私の専門は強相関電子系の低温実験、特に一軸圧力下での物性測定である。すなわち、 piezoelectric actuators を用いた自作の一軸圧力装置を使って単結晶に連続的な格子変形をかけることで、系統的な変化を研究している。一般に、一軸圧力と静水圧力が物質に与える影響は質的に異なっている。例えば、強相関電子系超伝導体 Sr_2RuO_4 に面内一軸圧力をかけると、一番大きなフェルミ面は楕円形に歪んで、Van Hove singularity に到達し、超伝導転移温度 T_c は2倍以上に上昇するが、静水圧では T_c は単調に減少する。また、銅酸化物高温超伝導体では静水圧は一般に T_c を上昇させることが知られているが、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ に面内一軸圧力をかけると T_c は減少し、長距離電荷密度波が発生することがわかった。長距離電荷密度波の発生は高温超伝導発現機構の有力な情報となるため大変興味深い。

我々の研究室では自作の piezoelectric uniaxial stress apparatus を使ったさらなる実験を計画している。具体的には、通常常圧で行われる様々な測定（電気抵抗、磁化、比熱、熱膨張、X線回折、 μSR 、中性子散乱）を一軸圧力下で行えるように拡張する。これらの測定には一軸圧力装置の大きさ・構造のため、通常市販されている装置を使用することはできない。そのため、自作の装置を開発し精密な工作を行う必要がある。

現在我々が研究を行っている試料には、超伝導体 Sr_2RuO_4 , FeSe 、と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ 、磁性体 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$, CeAuSb_2 、と PdCrO_2 、重い電子化合物 $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$ がある。

I specialise in the application of uniaxial stress to correlated electron materials: my group use piezoelectric actuators to continuously distort the lattice, so that instead of studying a single compound, we can instead study, in effect, a series of compounds related by distortion of the lattice. Uniaxial stress has a qualitatively different effect from hydrostatic pressure on many materials. For example, in-plane uniaxial stress on the correlated-electron superconductor Sr_2RuO_4 causes an elliptical distortion of its largest Fermi surface, and drives it through a Van Hove singularity in the density of states. The critical temperature of the superconductivity more than doubles. In contrast, hydrostatic pressure causes T_c to decrease. Hydrostatic pressure generally increases T_c of the high-temperature cuprate superconductors, however here it is more interesting to suppress T_c so as to allow alternative electronic ground states to emerge. These alternative ground states provide information on the interactions that may drive the superconductivity. In-plane uniaxial stress on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ suppresses its T_c and induces long-range charge density wave order.

We developed our piezoelectric uniaxial stress apparatus in-house. We are working to extend the measurements commonly performed on unstressed crystals to uniaxially stressed samples: resistivity, magnetic susceptibility, heat capacity, dilatometry, x-ray scattering, muon spin rotation, and neutron scattering. The structure of the uniaxial stress cell means that we cannot simply use commercial apparatus. Therefore we do a lot of our own instrument development and precision engineering. Materials that we have studied include superconductors such as Sr_2RuO_4 , FeSe , and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$; the magnetically ordered compounds CeAuSb_2 , $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$, and PdCrO_2 ; and the heavy-fermion Kondo system $\text{PrV}_2\text{Al}_{20}$.