

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って実現する。本研究グループは、そのような考えのもとに、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・連携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・協働しながら、強相関電子系の新しい量子相や新しい機能性物質の開発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製し、その精密物性測定を駆使して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。

Condensed matter physics has progressed, relying on discoveries of new materials, new phenomena, and new concepts. 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 often been made at an intersection of various research fields. The quantum materials group, aiming at another leap forward in our activity, 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 the 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 carried out for spintronics applications. These experiments are conducted through lively discussion and tight collaboration with theory groups, which search for new topological phases by using an advanced theoretical approach and numerical methods.

教授 Professor	押川 正毅 OSHIKAWA, Masaki	助教 Research Associate	多田 靖啓 TADA, Yasuhiro	特任研究員 Project Researcher	志賀 雅巨 SHIGA, Masanobu
教授*1 Professor	瀧川 仁 TAKIGAWA, Masashi	助教 Research Associate	坂本 祥哉 SAKAMOTO, Shoya	特任研究員 Project Researcher	ハンシェン ツアイ HANSHEN, Tsai
教授*1 Professor	神原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	特任助教 Project Research Associate	富田 崇弘 TOMITA, Takahiro	特任研究員 Project Researcher	フェン ジリ FENG, Zili
教授*2 Professor	廣井 善二 HIROI, Zenji	特任助教 Project Research Associate	肥後 友也 HIGO, Tomoya	特任研究員 Project Researcher	レイ マユク クマー RAY, Mayukh Kumar
教授*3 Professor	大谷 義近 OTANI, Yoshichika				
特任教授*4 Project Professor	中辻 知 NAKATSUJI, Satoru	*1 所内兼務。本務は凝縮系物性研究部門。 /concurrent with Division of Condensed Matter Science			
准教授 Associate Professor	三輪 真嗣 MIWA, Shinji	*2 所内兼務。本務は物質設計評価施設。 /concurrent with Materials Design and Characterization Laboratory			
准教授*1 Associate Professor	山下 穰 YAMASHITA, Minoru	*3 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			
准教授*5 Associate Professor	近藤 猛 KONDO, Takeshi	*4 理学系研究科物理学専攻と兼務。 /concurrent with Physics Department, Graduate School of Science			
准教授*5 Associate Professor	松永 隆佑 MATSUNAGA, Ryusuke	*5 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			
准教授*5 Associate Professor	岡崎 浩三 OKAZAKI, Kozo				

押川研究室

Oshikawa Group



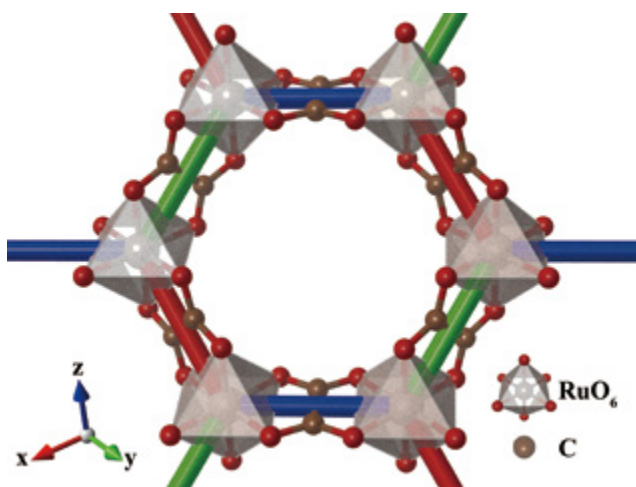
押川 正毅
OSHIKAWA, Masaki
教授
Professor



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 知
NAKATSUJI, Satoru
特任教授
Project Professor



富田 崇弘
TOMITA, Takahiro
特任助教
Project Research Associate



肥後 友也
HIGO, Tomoya
特任助教
Project Research Associate

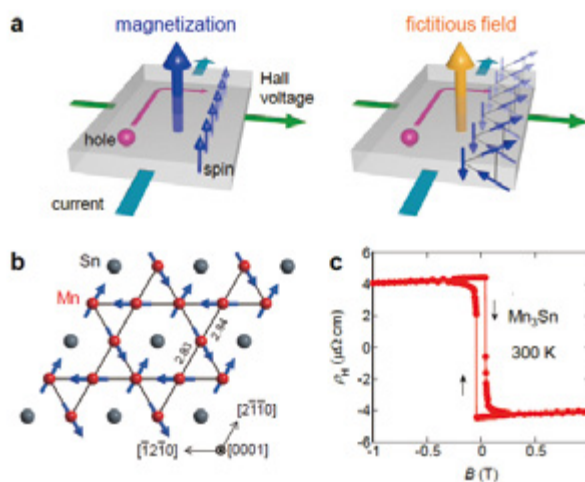
物質科学のフロンティアは、新しい現象の発見にある。なかでも、無機物質は我々の生活を支える材料として最もよく利用されてきた。その無機物質から物質中の 10^{23} 個もの電子が相互作用して創り出すマクロな量子現象が続々と発見されており、物理と化学を駆使した新物質の開発こそが新しい量子現象を目指す物質科学の醍醐味である。さらに、これらの量子現象の発見は現代の情報社会やIoT社会の基盤となる革新的技術を生みだしている。私達の研究室では、このような新しい物性と機能の開発を目指した新物質開発に取り組み、スピントロニクスやエネルギーハーベスティングなどの応用に資する新たな量子現象を探索しその機構を解明す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

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、また新物質を用い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い、その成果を世界に発信している。

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. ワイル反強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 antiferromagnetic Weyl metals 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 applications 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

三輪研究室

Miwa Group



三輪 真嗣
MIWA Shinji
准教授
Associate Professor



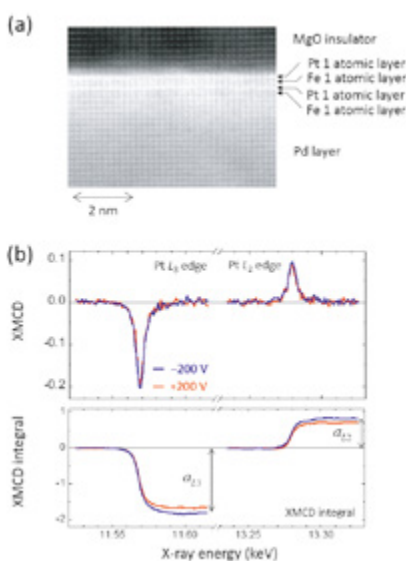
坂本 祥哉
SAKAMOTO, Shoya
助教
Research Associate

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金属・絶縁体・有機分子に適用し、異種材料界面を有する多層膜デバイスをを用いて研究を行う。ナノの世界で「スピン」の性質が顕著に現れることに着目し、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、応用に供することが研究目的である。

最近の具体的な研究テーマは、マイクロ波帯域の電流電圧応答やフェムト秒パルスレーザーを用いたスピンドYNAMIKSの研究、電流電圧を印加しながら X 線吸収分光を行う「オペランド X 線分光」を用いた様々なスピントロニクス現象の機構解明等である。分光研究で得た知見を用いて、実際に室温巨大効果を示すデバイスの創成を目指している。

We study experimental condensed-matter and material physics using high-quality and unique nanostructures. We employ ultrahigh vacuum technique, which has been used for semiconductor engineering, for the multilayer fabrication with metals, insulators, and organic molecules. We focus on spin and orbital properties, which can be pronounced in nano-structure, and fabricate quantum spintronics devices. Our research purpose is to characterize the physical properties in such devices and use them for application.

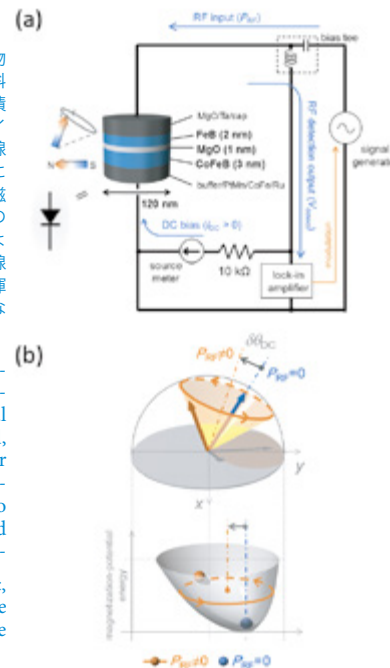
Recently, we study spin-dynamics using microwave voltage/current and femtosecond pulse laser systems. We also study the microscopic origin of the various spintronics phenomena using operando X-ray absorption spectroscopy. Using the obtained knowledge, we design and fabricate spintronics devices showing large effects at room temperature.



(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、新たな物性を示す薄膜デバイスを創成した。(b) オペランド X 線分光の例。外部から MgO 誘電層に電界をかけながらオペランド X 線分光を行い、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電気磁気効果の物理機構を解明した。

(a) An example of a novel multilayer with characteristic nanostructure. By using conventional materials such as Fe, Pt, and Pd, we fabricated novel multilayer device with new physical phenomena. (b) An example of operando X-ray spectroscopy. We conducted the operando X-ray magnetic cir-

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



(a) ナノ磁性体のスピンドYNAMIKSを利用した機能性デバイスの例。(b) スピンドYNAMIKS及びポテンシャルの模式図。スピンポテンシャルを精密制御により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) A functional device using spin-dynamics in nano-magnets. (b) Schematic of spin-dynamics and potential. If we precisely control the spin-potential, the non-linear effect can be enhanced. We find that the 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

1. 量子物質を用いたスピントロニクスデバイス
Spintronics device using quantum materials
2. フェムト秒パルスレーザーや放射光 X 線を用いたオペランド分光によるデバイス物性の機構解明
Operando spectroscopy using pulse laser and x-ray to reveal device physics
3. 界面ナノ制御によるデバイス機能向上
Interface engineering to develop device performance
4. スピンによる脳型コンピューティング
Brain-inspired computing using spintronics