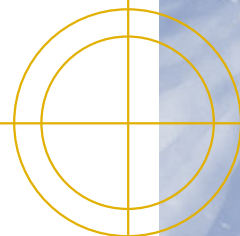


# 量子物質研究グループ

## 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2つのコアグループと6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 two core groups and six 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	准教授(客員) Visiting Associate Professor	中村 正明 NAKAMURA, Masaaki	特任研究員 Project Researcher	ティアン ザオミン TIAN, Zhaoming
教授 Professor	中辻 知 NAKATSUJI, Satoru	教授(外国人客員) Visiting Professor	ヌグロホ アグスティヌス アグン NUGROHO, Agustinus Agung	特任研究員 Project Researcher	富田 崇弘 TOMITA, Takahiro
教授* <sup>1</sup> Professor	榊原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	助教 Research Associate	多田 靖啓 TADA, Yasuhiro	特任研究員 Project Researcher	マン フィユアン MAN, Huiyuan
教授* <sup>2</sup> Professor	辛 埴 SHIN, Shik	助教 Research Associate	松本 洋介 MATSUMOTO, Yousuke	特任研究員* <sup>4</sup> Project Researcher	大槻 匠 OTSUKI, Takumi
教授* <sup>3</sup> Professor	廣井 善二 HIROI, Zenji	特任助教 Project Research Associate	酒井 明人 SAKAI, Akito	特任研究員* <sup>4</sup> Project Researcher	肥後 友也 HIGO, Tomoya
教授* <sup>4</sup> Professor	大谷 義近 OTANI, Yoshichika			学振特別研究員 JSPS Research Fellow	クワチ ジェームス QUACH, James
准教授* <sup>1</sup> Associate Professor	山下 穰 YAMASHITA, Minoru			学振特別研究員 JSPS Research Fellow	志村 恭通 SHIMURA, Yasuyuki
准教授* <sup>2</sup> Associate Professor	近藤 猛 KONDO, Takeshi			学振特別研究員 JSPS Research Fellow	杉浦 祥 SUGIURA, Sho

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

\*<sup>2</sup> 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

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

\*<sup>4</sup> 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

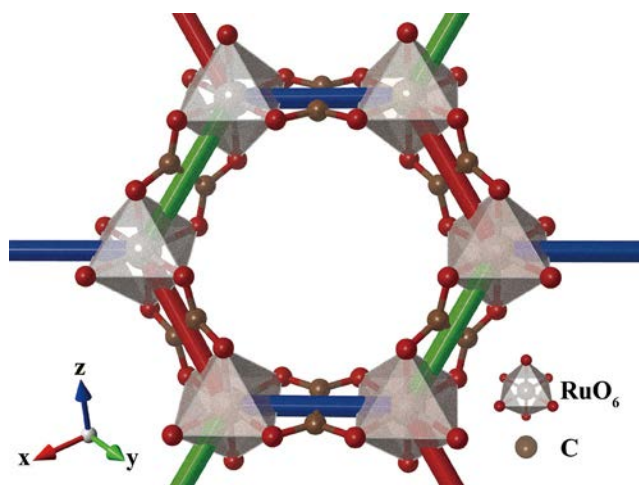
## 押川研究室

Oshikawa Group

押川 正毅  
OSHIKAWA, Masaki  
教授  
Professor多田 靖啓  
TADA, Yasuhiro  
助教  
Research Associate藤井 達也  
FUJII, Tatsuya  
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系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索するとともに、実験結果の統一的な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、キタエフスピン液体相などの新奇なトポロ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) を用いたキタエフスピン液体の設計。キタエフ模型は、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模型である。イリジウム酸化物等の無機化合物でのキタエフ模型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、より理想的なキタエフ模型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遍歴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. トポロ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. トポロジカル相・トポロ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

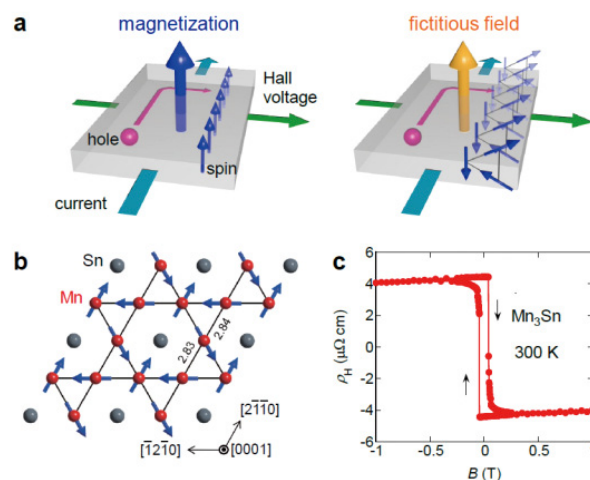
中辻 知  
NAKATSUJI, Satoshi  
教授  
Professor松本 洋介  
MATSUMOTO, Yousuke  
助教  
Research Associate酒井 明人  
SAKAI, Akito  
特任助教  
Project Research Associate

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、薄膜作成のみならず、こうした新しい物理現象の発見を目指した物性測定とスピントロニクス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。

a. 強磁性体における異常ホール効果（左図）と反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  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  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  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、スピニラリティの秩序化によってもたらされると考えられる。b.  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  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.  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  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  $\text{Mn}_3\text{Sn}$ . 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  $\text{Mn}_3\text{Sn}$ . Each Mn has a magnetic moment (arrow). c, Magnetic field dependence on the Hall resistivity in  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  at room temperature.



## 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



## 中村研究室

Nakamura Group



中村 正明  
NAKAMURA, Masaaki  
客員准教授  
Visiting Associate Professor

我々の研究の目的は、トポロジカルな物理現象の探究である。特にトポロジカル状態を検出するための新たな物理量を提案することに興味を持っている。たとえば、2次元のトポロジカル絶縁体では輸送係数の測定により、トポロジカル状態の存在が確認されていたが、バルクな性質による非接触型の実験手段があれば、より効率的な判定が可能となる。我々はそのような物理量として動的スピン磁化率を提唱している。これは局在スピン系の研究で用いられる、電子スピン共鳴 (ESR) により観測可能であり、特定の吸収ピークの有無によりトポロジカル状態か否かが特徴づけられる。その他にも、スピンホール伝導率と軌道磁化率とのに密接な関係があることが指摘されており、これらの新たな物理量の間の一般的な関係、さまざまな状況下におけるそれらの挙動、また実験への応用に関して議論を深めていきたいと考えている。また、その他のトポロジカルな物理として、1次元定式化の方法を用いた分数量子ホール効果の研究も行いたいと考えている。物性研究所では、トポロジカルな物理と ESR の理論の専門家である押川教授をはじめとする研究者と議論を重ね、この分野の研究の進展に貢献したい。

The purpose of our research is studying the topological phenomena in condensed matter physics. Especially, we are interested in new physical quantities to identify topological states. For example, in two-dimensional topological insulators, existence of a topological state has been confirmed by observing transport coefficients. However, the detection could be done more efficiently, if there are non-contact experiments which depend only on bulk properties of the systems. For such a physical quantity, we have proposed the dynamic spin susceptibility, which is related to the electron spin resonance (ESR) for localized spin systems. The topological states can be characterized by existence of specific peaks. It has also been pointed out that the spin Hall conductivity is closely related with the orbital magnetic susceptibility. So we would like to discuss the detailed relationship among these physical quantities, their behavior under several situations, and also applications to experiments. As other topological physics, we will also study fractional quantum Hall effect using one-dimensional mapping. In ISSP, we would like to contribute to progress of this research field, by discussing with Prof. Oshikawa, who is an expert on topological physics and theory of ESR, as well as other researchers.

## ヌグロホ研究室

Nugroho Group



ヌグロホ アグスティヌス アグン  
NUGROHO, Agustinus Agung  
外国人客員教授  
Visiting Professor

ノンコリニア反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  は大きな異常ホール効果を示し、近年大変注目を集めている。強磁性体で考えられるようなスピンの寄与は大変小さく、軌道成分が異常ホール効果の起源として重要である。一方、バンド計算により  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  ではベリー曲率が大いことも指摘されている。我々はホストである中辻 知教授と共同で、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  単結晶においてどのように異常ホール効果が増強されるのかを元素置換により研究している。また、室温でさらに大きな異常ホール効果を示す新規トポロジカル物質の探索にも力を入れている。研究で必要な単結晶はチョクラルスキー法により作成している。さらに近藤 猛准教授との共同研究により  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  におけるワイル点の存在の検証、大谷義近教授との共同研究で反強磁性体のネルンスト効果を使った新しい原理のスピン트로ニクスデバイスの実現に向けた研究も行っている。

A large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnetism  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  has attracted much interest in a recent year. Since the contribution of the spin component is very small in non-collinear antiferromagnetic system, therefore the contribution of the orbital component suggests to play an important role to the anomalous Hall effect. Meanwhile, the existence of the Berry curvature in  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  has been predicted theoretically. Together with my host, Prof. Satoru Nakatsuji, we explore how to enhance the anomalous Hall effect of  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  single crystal. Beside this fundamental study, we also research to obtain a material with a topological phase having a large anomalous Hall effect at room temperature. The activities are carried out on single-crystalline material which mainly grown by using czochralski technique at Nakatsuji's Lab. During my stay, I collaborate with Assoc. Prof. Takeshi Kondo to investigate the existence of Weyl anomaly in  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  and also Prof. Yoshichika Otani for spintronics device of antiferromagnetic materials.