

# 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、このような考えのもと、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2つのコアグループと12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。例えば、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に取り組んでいる。これらの実験研究は、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協力し活発に進めている。

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 on strongly correlated electron systems, one of the major traditional strengths of ISSP. On the other hand, breakthroughs have often been made at an intersection of various research fields. Aiming at another leap forward, 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 twelve 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-the-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.

---

グループ主任 押川 正毅  
Leader OSHIKAWA, Masaki

---

# 押川研究室

Oshikawa Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 場の理論の量子異常と量子相の分類  
Anomaly in quantum field theory and classification of quantum phases
- 2 非線形電気伝導の統一的理論  
Unified theory of nonlinear electrical conduction
- 3 ネットワーク上の電子状態と輸送現象  
Electronic states and transport phenomena on networks
- 4 新奇スピン液体の設計と探求  
Design and study of exotic spin liquids



教授 押川 正毅  
Professor OSHIKAWA, Masaki

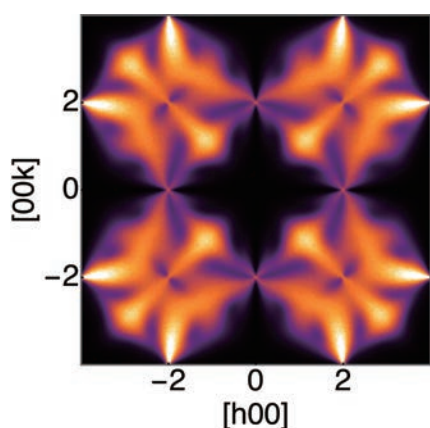
専攻 Course  
理学系物理学  
Phys., Sci.



助教 闫 寒  
Research Associate  
YAN, Han

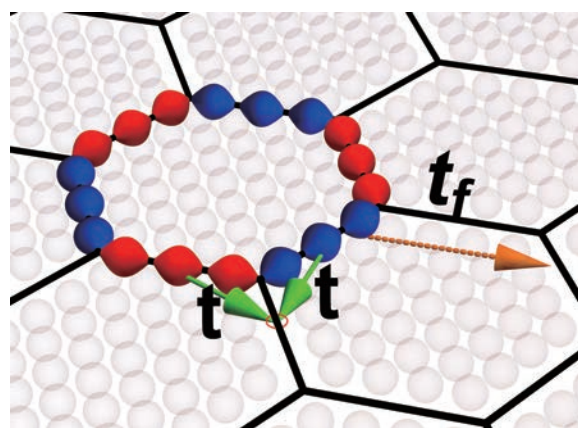
量子多体系の理論を中心として、広範な系で成立する普遍的な概念を探求している。最近の成果の例として、場の理論における量子異常を応用してギャップレスな臨界相の間に新たな分類が生じることを示し、量子相の分類に新たな展開をもたらした。また、理論的な新概念を踏まえて、実験結果の統一的な理解や、新たな実験に対する予言にも取り組んでいる。例えば、電荷密度波物質 1T-TaS<sub>2</sub> の電子状態を記述する量子細線のネットワーク模型を構築し、新たな機構によって対称性に保護される平坦バンドの出現を示した。さらに、フラストレート磁性体における高階ゲージ理論やフラクトントポロジカル相の実現と、その実験的帰結について研究を進めている。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。

We pursue universal concepts in physics, especially in quantum many-body systems. As an example, based on anomaly in quantum field theory, we introduced a new classification of gapless quantum critical phases in the presence of symmetries. This opened up a new direction in classification of quantum phases. On the other hand, taking advantage of novel theoretical concepts, we also aim to give a unified picture on experimental data and to make testable predictions for experiments. For example, recently we introduced a “network model” of quantum wires in order to describe electronic states in the charge-density-wave material 1T-TaS<sub>2</sub> and demonstrated a realization of flat bands. Unlike most of the known constructions of flat bands, in our novel mechanism, the flatness is protected by symmetries and is robust. Furthermore, we investigate possible realizations of higher-rank gauge theories and fracton topological phases in frustrated magnets and their experimental consequences. Much of our research is carried out in international collaborations.



ブリージングパイロクロア格子上の磁性体のモンテカルロシミュレーションによるスピン構造因子。この模型は高階ゲージ理論を実現する。

Spin structure factor found in Monte Carlo Simulation of a magnet on a Breathing Pyrochlore lattice, which realizes a higher-rank gauge theory.



ネットワーク上の電子状態。対称性に守られた干渉効果により、平坦バンドの安定な出現が保証される。

Electronic states on a network. An interference effect protected by symmetries guarantees the robust appearance of flat bands.



## 研究テーマ Research Subjects

- 1 トポロジカル磁性体の室温量子伝導  
Room-temperature topological transport in magnetic materials
- 2 強相関電子系における異常金属相と新しい超伝導体の開拓  
Strange metal behavior and unconventional superconductivity in strongly correlated materials
- 3 トポロジカル量子状態の制御によるスピントロニクスとエネルギーハーベスティング応用  
Manipulation of topological states for spintronics and energy harvesting applications

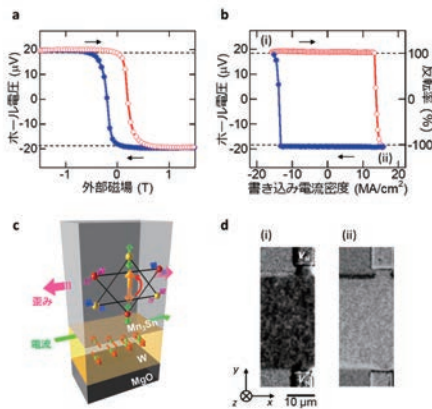


特任教授 中辻 知  
Project Professor NAKATSUJI, Satoru

専攻 Course  
理学系物理学  
Phys., Sci.

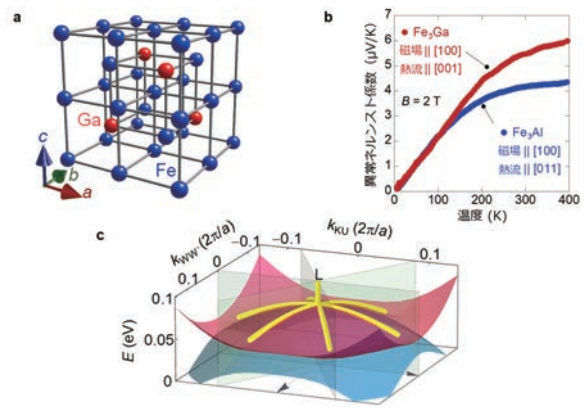
現在、磁性や超伝導、スピントロニクスといった分野が、トポロジーという概念によって再び整理・統合され、多くの新しい物理現象の発見に繋がっている。これらの物性物理の変革には、素粒子論、宇宙論、量子情報などで発展してきた概念が大きく関わっており、既存の分野の枠組みを超えた新しい視点での研究が重要になっている。私達の研究室では、そのような新しい概念を具現化する量子物質を自ら作り出し、世界最高精度の物性測定技術によってその背後にある物理法則の解明を目指して研究を行っている。それだけでなく、量子物質の驚くべき機能性をスピントロニクスやエネルギーハーベスティングに利用するための研究も行っており、産業界からも注目を集めている。

The condensed matter physics is considered one of the most versatile subfields of physics, embracing big ideas from particle physics, cosmology, and quantum information. Recently, the concept of topology has brought up a new era in condensed matter research that integrates a diverse spectrum of fields and topics, bridging basic science with technological innovations. Thus, it is critical to push beyond the traditional disciplines to establish new conceptual framework and to target at the significant problems. Our research activities focus on designing and synthesizing new materials with emergent quantum properties that have never been seen before, then exploring the physics and functionalities of such properties with our world-leading measurement facilities. Our goal is to lead the innovative quest for new quantum materials that bear a far-reaching impact not only on basic science but also on our everyday life in the future.



重金属 W/ カイラル反強磁性体  $Mn_3Sn$  素子での電気的書き込み実験。(a) 磁場による反転、(b) 電流による反転、(c) 模式図、(d) 図 (b) (i) 及び (ii) における磁気光学カー効果顕微鏡像。[Nature 607, 474 (2022)]

Electrical full switching in the chiral AF order of  $Mn_3Sn$ . (a) Field dependence of the Hall voltage  $V_H$ , (b)  $V_H$  versus write current, (c) Schematic illustrating the bidirectional switching of the perpendicular polarization of cluster magnetic octupole, (d) Magneto-optical Kerr effect (MOKE) images at (i) and (ii) in Fig. (b). [Nature 607, 474 (2022)]



$Fe_3X$  ( $X = Ga, Al$ ) における a. 結晶構造。b. 異常ネルンスト効果の温度依存性。c. ノーダルウェブ構造。[Nature 581, 53 (2020)]

a. Crystal structure of  $Fe_3X$  ( $X = Ga, Al$ ). b. Temperature dependence of the anomalous Nernst effect. c. The nodal web in momentum space. [Nature 581, 53 (2020)]

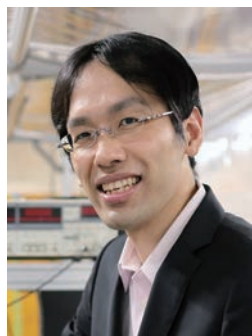


# 三輪研究室

Miwa Group

## 研究テーマ Research Subjects

- 1 キラル分子スピントロニクス  
Chiral molecular spintronics
- 2 量子物質スピントロニクス  
Quantum material spintronics
- 3 フェムト秒パルスレーザーや放射光 X 線等のオペランド分光  
Operando spectroscopy using pulse laser and synchrotron radiation
- 4 スピンによる脳型コンピューティング  
Brain-inspired computing using spintronics



准教授 三輪 真嗣  
Associate Professor MIWA, Shinji

専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.



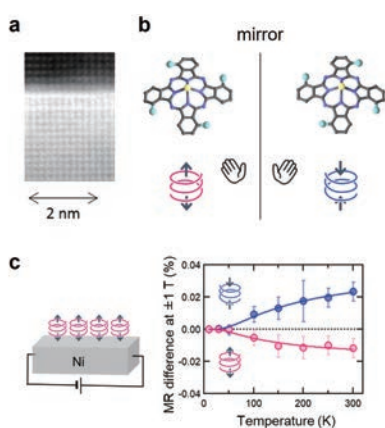
助教 坂本 祥哉  
Research Associate  
SAKAMOTO, Shoya

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、半導体工学で発展した超高真空薄膜成長技術を駆使し、異種材料界面を持つ多層膜デバイスを用いて研究を行う。ナノの世界において「スピン」の性質が顕著に現れることに着目し、新物質・材料デバイスが示す新たな物性（物の性質）を見つけて機能化し、物理を把握して室温で大きな効果を示すデバイス物性の創成を目指している。

最近では物質のキラリティを利用した研究に注力している。キラリティは物理学だけでなく、化学、生物学、天文学でも共通して扱われる珍しい性質であり、特に有機分子のキラリティを用いたスピントロニクスデバイスの研究を進めている。また、量子物質であるトポロジカル反強磁性体のデバイス物性、フェムト秒パルスレーザーや X 線分光を用いた「オペランド分光」の開発なども行っている。

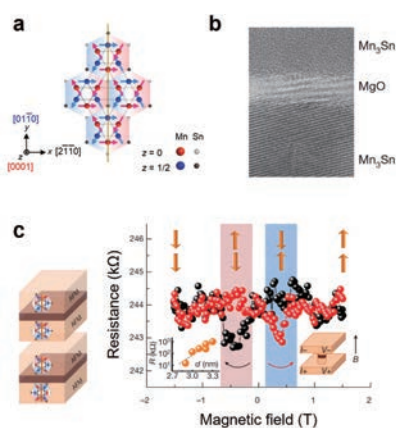
We are conducting experimental research on the physical properties of unique nanostructures. Specifically, we utilize ultrahigh vacuum thin film growth technology, a development from semiconductor engineering, to study multilayer devices composed of interfaces between different materials. Our focus is on the properties of “spin”, which become pronounced at the nanoscale. Our goal is to uncover new physical properties exhibited by novel material devices, to functionalize these properties, and to understand the underlying physics for creating device properties with significant effects at room temperature.

Recently, our research has concentrated on the chirality of materials. Chirality is a property that finds relevance not only in physics but also in chemistry, biology, and astronomy. We are especially progressing in research on spintronic devices that exploit the chirality of organic molecules. Additionally, we are investigating the device properties of topological antiferromagnetic materials—quantum materials—and developing “operando spectroscopy” techniques using femtosecond pulse lasers and X-ray spectroscopy.



キラル分子スピントロニクス: a, 特徴的なナノ構造の例。b, キラル分子と対称性。c, キラル誘起スピン選択性 (Chirality-induced spin selectivity: CISS) による熱励起スピン偏極の実証結果。

Chiral molecular spintronics: a, An example of a unique nanostructure. b, Chiral molecule and symmetry. c, Thermally driven spin polarization induced by chirality-induced spin selectivity (CISS).



量子物質スピントロニクス: a, トポロジカル反強磁性体  $Mn_3Sn$  のスピン及び結晶構造。b, 分子線エピタキシー法により作製した多層膜構造の電子顕微鏡写真。c, トポロジカル反強磁性体によるトンネル磁気抵抗効果。

Quantum materials spintronics: a, Spin and crystal structure of the topological antiferromagnet  $Mn_3Sn$ . b, Transmission electron microscope image of the multilayer structure of  $Mn_3Sn$  prepared by molecular beam epitaxy. c, Tunnel magnetoresistance of the topological antiferromagnet.



[https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/miwa\\_group.html](https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/miwa_group.html)



# ヘルブット研究室 Herbut Group

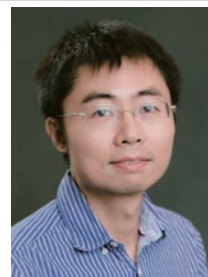


外国人客員教授 ヘルブット イゴール  
Visiting Professor HERBUT, Igor

粒子間の相互作用に起因する定性的に新しい現象を理解するのに必要な、新しい理論的な手法や概念を探求している。最近では、ディラック電子系やワイル半金属系に出現する秩序相の統一的理解を、グロス・ヌーボー・湯川場の理論の観点から追求している。このような場の理論では、テンソルボソン場が相対論的フェルミオン場と結合しており、しばしば繰り込み群フローの「暴走」と1次相転移をもたらす。一方、対応する格子系では普遍的な臨界現象が見られる。これらの一見相反する結果を説明するため、私は「固定点衝突」シナリオを提案した。これには、ローレンツ不変性のガリレイ不変性での置き換えなど、概念的に新しい理論的問題も付随する。また、関連する別の問題として、トポロジカルに非自明な相が、自明な相から電子相関の増大によって誘起されるかどうか、がある。これらに関連する問題について押川教授や物性研の理論家・実験家と議論を重ねたい。

I am fascinated with qualitatively novel phenomena due to particle interactions, and have been after new theoretical tools and paradigms needed for their understanding. My current research focuses on unification of ordered ground states in Dirac systems such as graphene and Weyl semimetals, and on the Gross-Neveu-Yukawa field theories that arise from it. These field theories involve tensor bosonic fields coupled to relativistic fermions, and often lead to runaway renormalization group flows and first-order phase transitions. Lattice realizations, on the other hand, seem to exhibit universal critical behavior. To explain this dichotomy, I have entertained the “fixed-point collision” scenario. There is however a number of conceptually new theoretical issues that need to be addressed, such as the replacement of the Lorentz with Galilean invariance. Another related question is whether a topologically non-trivial phase, be it insulating, metallic, or even superconducting, can arise out of a topologically trivial phase due to an increase of electron-electron interactions. Professor Oshikawa have a strong interest in interplay of topology and electron-electron interactions, and I hope to discuss with him and other theorists and experimentalists on these and related problems.

# ルー研究室 Lu Group



外国人客員教授 ルー ユアンミン  
Visiting Professor LU, Yuan-Ming

トポロジカル物質の分野を対象とする物性理論家として、以下のトピックに注力している。

1. 量子スピン液体のようなトポロジカル秩序相にあらわれる分数化をどのように実験的に検出するか？
2. マヨラナ・ゼロモードと分光法をどのように用いれば、超伝導体のペ어링対称性を明確に決定できるか？
3. 分数チャーン絶縁体における対称性の分数化を、数値的な手法でどのように分析できるか？
4. フロケットポロジカル相を含む非平衡トポロジカル相

たとえば、1.に関して、ギャップを持つ $Z_2$ スピン液体相におけるスピン $1/2$ 不純物の近藤効果を研究した。不純物が高対称点にあるとき、結晶対称性に保護された非クラマース縮退が生じる。これは通常の近藤効果におけるスクリーニングと大きく異なり、分数化の実験的検出として利用できる可能性がある。

これらの興味深い問題について、押川教授ら物性研の研究者と議論していきたい。

As a condensed matter theorist working in the general field of topological quantum matters, I have been focusing on the following topics:

1. How to experimentally detect fractionalization in topological orders, such as quantum spin liquids?
2. How to unambiguously detect the pairing symmetry of a superconductor using spectroscopy and Majorana zero modes?
3. How to numerically diagnose symmetry fractionalization in fractional Chern insulators?
4. Topological phases out of equilibrium, such as Floquet topological states

For example, concerning the topic 1, I have recently studied the Kondo effect of spin- $1/2$  magnetic impurities in gapped  $Z_2$  spin liquids on two-dimensional lattices. I found that if the impurity is placed at a high-symmetry location, a nontrivial spinon fractionalization class of the impurity site symmetry group will necessarily lead to a non-Kramers doublet in the Kondo screening regime, protected by associated crystalline symmetries. This is in sharp contrast to a featureless screening phase in the usual Kondo effect, and provides a possible experimental probe of fractionalization.

I am looking forward to discussing these exciting topics with Prof. Oshikawa and colleagues at ISSP.

