

物性理論研究部門

Division of Condensed Matter Theory

物性理論研究部門では、物性研究の最先端分野の理論研究に積極的に取り組んでいる。物性物理学では理論研究が重要な役割を果たしており、ミクロからマクロまでのさまざまな階層における理論研究によって、実験結果から新しい物理現象を見出したり、新しい物理現象の予言を行ったりすることが可能となる。物性研究のブレークスルーには、既存の理論を発展させ予測能力を高めるような継続的な研究に加え、新しい発想に基づく研究が必要不可欠である。本部門は4つの研究室、および、数値物性科学研究施設・データ統合型材料物性研究部門を兼務する6つの研究室から構成される。他部門・施設の理論研究室とともに、解析手法に基づく基礎理論からスーパーコンピュータを用いる大規模数値計算にいたるまで、多様な理論手法を駆使して物性物理における最先端の研究課題に取り組んでいる。また、研究所の内外の実験グループとの連携も積極的に進めている。

The Division of Condensed Matter Theory is actively engaged in theoretical research on the cutting-edge topics in condensed matter physics. Theoretical studies play a crucial role in condensed matter physics: those studies at various levels extract new discoveries from experimental results, and novel theoretical predictions also start as well as boost experimental works. For achieving a breakthrough in the condensed matter physics, the research based on novel ideas is essential and indispensable, in addition to continuous research for increasing the predictive power based on existing theories. This division now consists of four groups and six other groups of concurrent members at the Numerical Materials Research Laboratory, and the Division of Data-Integrated Materials Science. Together with other theoretical groups, the activity of this division covers various theoretical studies from basic theory based on analytical methods to large-scale state-of-art numerical computation using supercomputers, and actively develops the theory for forefront research subjects in the condensed matter physics. Discussions and collaborations are also actively pursued with experimental groups inside and outside ISSP.

部門主任 岡 隆史
Leader OKA, Takashi

岡研究室 Oka Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 量子物質のフロック・エンジニアリング
Floquet engineering of quantum materials
- 2 量子多体系の非平衡状態
Nonequilibrium states in quantum many-body systems
- 3 生体現象、情報物理への場の理論の応用
Application of field theory to biology and information physics



教授 岡 隆史
Professor OKA, Takashi

専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.



助教 沼澤 宙明
Research Associate
NUMASAWA, Tokiro



助教 ヤン ハン
Research Associate
YAN, Han



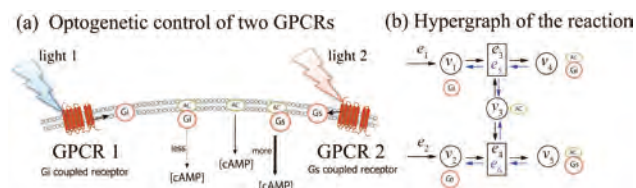
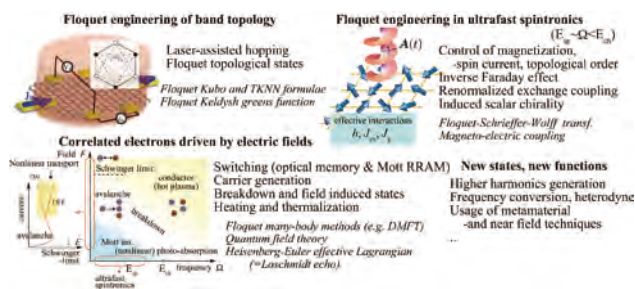
助教 藤井 達也
Research Associate
FUJII, Tatsuya



特任助教 チャウダリー スワティ
Project Research Associate
CHUDHARY, Swati

量子物質の非平衡状態に潜む未知の自然法則を発見するとともに、その理解をもとに物質相を自在に制御し機能発現させる方法を理論的に研究する。中でもフロック・エンジニアリングに代表される新しい理論体系が近年注目を集めており、非平衡現象を平衡系に近い深さで理解することが可能になりつつある。さらに乱流、ニューラルネットワークといった古典物理や、生命現象、日常的に非平衡現象が利用されてきた半導体物理などの分野で蓄積されてきた知見を参考にしつつ、場の理論や数値計算などの基礎的な手法を利用することで相関電子系、トポロジカル物質、スピン系などの重要な量子物質の非平衡現象の研究をおこなっていくとともに、化学反応ネットワークや生物系における情報理論など、伝統的な凝縮系物理学の範疇外の問題にも興味を持っている。

Our primary research focus around studying quantum materials driven far from equilibrium by external fields. Our objective is to discover new fundamental laws of physics that govern these exotic states and explore methods to control their collective dynamics. To achieve this, we employ innovative theoretical frameworks like Floquet engineering, which allows us to comprehend nonequilibrium physics at a similar depth as equilibrium systems. Additionally, we draw valuable insights from other research fields such as turbulence, neural networks, and nonlinear semiconductor optics, and apply them to investigate new exotic quantum materials. Our target materials encompass a wide range, including topological systems and strongly correlated systems. We will also investigate novel nonlinear response phenomena, such as the heterodyne Hall effect, wherein the quantum Hall effect is induced by oscillating magnetic fields. Furthermore, we have a keen interest in exploring problems beyond traditional condensed matter physics, such as chemical reaction networks in biological systems and information theory.



量子物質のフロック・エンジニアリングの広がり。バンドトポロジー、スピン秩序、相関電子系などの相制御や新原理に基づくデバイスの提案につながっている。

Floquet engineering in quantum materials. T. Oka, S. Kitamura, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 10, 387-408 (2019).

フロック・エンジニアリングの光遺伝学への応用と生体内情報伝達ネットワーク制御

Application of Floquet engineering to optogenetics and control of cell signalling.



https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/oka_group.html

加藤研究室 Kato Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 メゾスコピック系の量子輸送現象
Quantum transport phenomena in mesoscopic systems
- 2 スピントロニクス素子の基礎理論
Fundamental theory of spintronic devices
- 3 固体中の非平衡特性と輸送特性
Nonequilibrium and transport properties in solids



准教授 加藤 岳生
Associate Professor KATO, Takeo

専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.

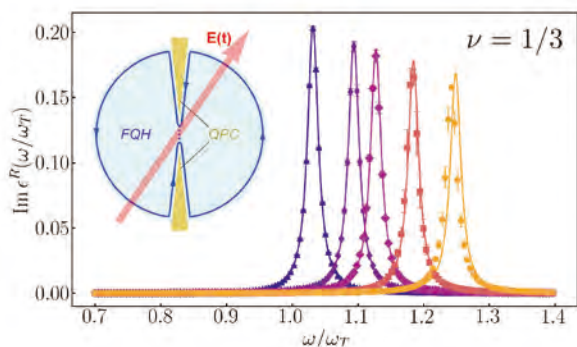


助教 佐野 涼太郎
Research Associate
SANO, Ryotaro

当研究室は、メゾスコピック分野・スピントロニクス分野を主な研究領域として、量子輸送現象における非平衡特性の解明に取り組んでいる。非平衡統計力学、場の量子論、多体電子論などを駆使し、ナノスケールにおける電子・スピン・熱の流れが生み出す新奇現象の理解と新たな物性概念の構築を目指している。

メゾスコピック分野では二次元電子ガスを舞台に非平衡多体効果・量子ノイズの解明を進め、スピントロニクスの分野ではスピンホール効果やスピンゼーベック効果に代表されるスピン輸送現象の理論的基盤を深めている。具体的には、磁性体・金属界面のスピン流・軌道流、分数量子ホール系のエニオン輸送など、物質・自由度の枠を越えた研究を展開している。所内外の実験グループとの共同研究も積極的に推進している。

量子輸送の基礎物理の深化と応用的展開の両輪を視野に、次世代の量子物性研究を切り拓くことを目標としている。



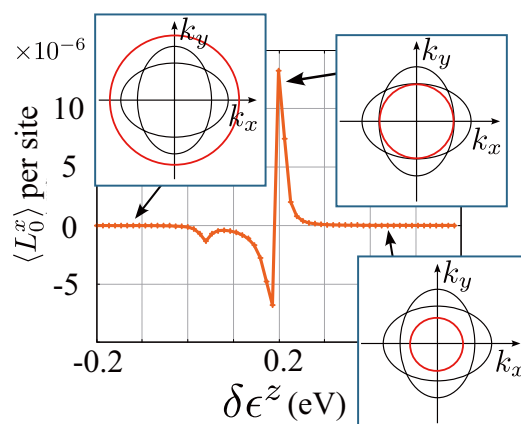
分数量子ホール液滴中のマイクロ波吸収率の振動数依存性。プロットおよび実線は量子ポイントコンタクト (QPC) での準粒子トンネル強度を変化させたときの量子モンテカルロ法および摂動論の結果をそれぞれ示す。

Frequency dependence of the microwave absorption rate in a fractional quantum Hall droplet. The plots and solid lines show the results of quantum Monte Carlo simulation and perturbation theory, respectively, for varying quasiparticle tunneling strengths at a quantum point contact (QPC).

Our group focuses on mesoscopic physics and spintronics, investigating the nonequilibrium properties of quantum transport phenomena. Combining nonequilibrium statistical mechanics, quantum field theory, and many-body electron theory, we aim to understand the novel phenomena arising from electron, spin, and heat currents at the nanoscale, and to establish new concepts in condensed matter physics.

In the mesoscopic field, we study nonequilibrium many-body effects and quantum noise in two-dimensional electron gas. In spintronics, we develop the theoretical foundations of spin transport phenomena, including the spin Hall effect and the spin Seebeck effect. Our research extends across a wide range of materials and degrees of freedom, encompassing topics such as spin and orbital current transport at magnetic/metal interfaces and quantum transport of anyons in fractional quantum Hall systems. We also actively pursue collaborative research with experimental groups both within and outside our institute.

Our goal is to pioneer next-generation quantum materials research, advancing both the fundamental physics of quantum transport and its applications in the control of spin and heat functionalities.



カイラルフォノンによって誘起される軌道蓄積現象。一つの電子軌道のエネルギーのみを変化させたときの軌道蓄積の大きさを表す。挿入図は各エネルギーでのフェルミ面を示す。

Orbital accumulation induced by chiral phonons. The figure shows the magnitude of orbital accumulation when only the energy of a single electron orbital is varied. The inset displays the Fermi surface at each energy.



研究テーマ Research Subjects

- 1 物性理論 (物性基礎論)
Condensed matter theory
- 2 非平衡系の相分類・相転移
Nonequilibrium phases of matter
- 3 非平衡統計力学
Nonequilibrium statistical mechanics
- 4 非エルミート物理
Non-Hermitian physics



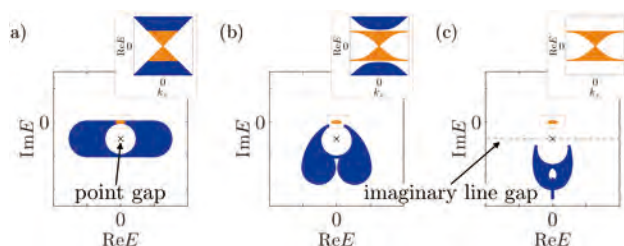
准教授 川畑 幸平
Associate Professor KAWABATA, Kohei

専攻 Course
理学系物理学

助教 小野 清志郎
Research Associate ONO, Seishiro

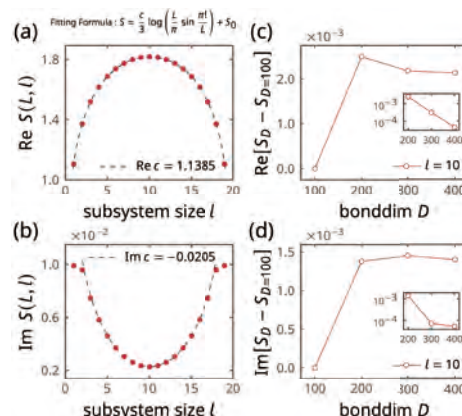
近年、孤立平衡系を中心とした従来の物性物理の枠組みを越えて、非平衡開放系で実現される物性物理に大きな関心が集まっている。そのようなめざましい進展にも拘らず、非平衡開放系で現れる物性現象は、重要な問題でさえも、依然として理解が確立していない。また、今後のさらなる発展が期待される量子技術分野において、非平衡開放系の理解はさらに重要性を増していくと考えられる。本研究室では、非平衡開放系で現れる多彩な物性現象をはじめとして、物性理論の新しい基礎を確立することを目指す。最近では、非平衡開放系のトポロジカル相の特徴づけおよび分類、また量子カオスや局在転移について研究し、とくに孤立平衡系に対応物をもたない非平衡開放系に特有の物性現象を探究してきた。対称性やトポロジーといった一般的な概念をもとにして、普遍的であるがゆえに種々の実験を記述および予言するような基礎理論を構築し、新しい物性物理を開拓する。

Recent years have seen remarkable progress in the physics of open quantum systems. In view of the recent rapid development of quantum information science and technology, it seems urgent to develop a general theory of open quantum systems. In our group, we are broadly interested in theoretical condensed matter physics, with a particular focus on nonequilibrium physics, to establish new foundations and principles in contemporary physics. Our recent research highlights topological phases of open quantum systems, as well as dissipative quantum chaos and lack thereof. On the basis of fundamental concepts such as symmetry and topology, we aim to uncover new physics intrinsic to far from equilibrium.



トポロジカル絶縁体におけるバルクから分離可能な表面状態の非エルミートな起源 [Phys. Rev. Lett. **135**, 096601 (2025)]

Non-Hermitian origin of detachable boundary states in topological insulators [Phys. Rev. Lett. **135**, 096601 (2025)]



複素共形場理論に対する複素エンタングルメントエントロピー [Phys. Rev. B **112**, 085112 (2025)]

Complex entanglement entropy for complex conformal field theory [Phys. Rev. B **112**, 085112 (2025)]



越野研究室

Koshino Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 2次元物質・モアレ物質の量子物性理論
Quantum theory of two-dimensional and moiré materials
- 2 トポロジカル物性・幾何学的位相効果に基づく新奇物性
Novel physical phenomena from topological properties and geometric phases
- 3 準周期物質、新しい幾何学的構造物質の理論構築
Theoretical frameworks for quasiperiodic systems and materials with novel geometric structures



教授 越野 幹人
Professor KOSHINO, Mikito

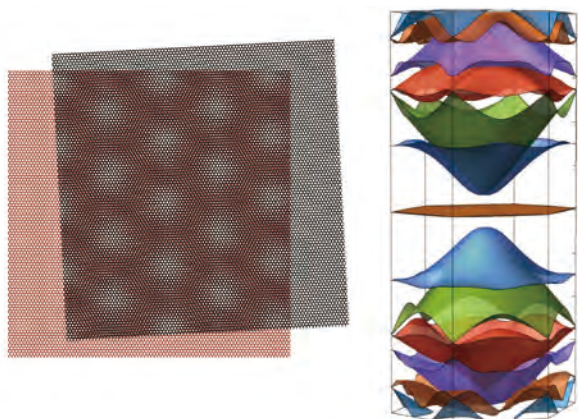
専攻 Course

理学系物理学

Phys., Sci.

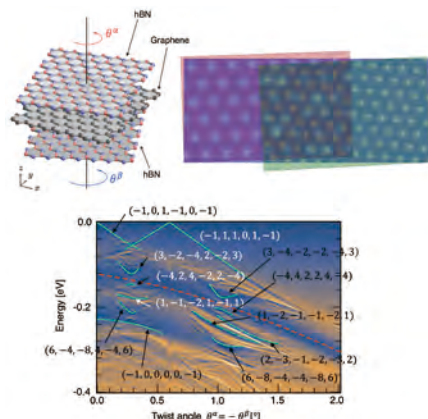
二次元物質やモアレ物質など、特異な形状や構造を持つ多様な物質を対象として、その量子の性質を理論的に研究している。これらの物質の研究は21世紀以降急速に拡大し、従来の物質には見られなかった新しい物性が次々と発見され、現在では物質科学の重要なフロンティアの一つとなっている。我々のグループでは、ミクロなハミルトニアンから系統的に導出される有効模型や連続体模型を用いることで、現象の本質を捉える基礎理論の構築を進めるとともに、新たな物性や機能の理論的提案を目指している。特に、電子状態のトポロジーや量子幾何に由来する位相効果に注目し、トポロジカル物性や新奇な量子状態の解明に取り組んでいる。さらに、厳密な空間周期を持たない準周期物質や新しい幾何学的構造を有する物質系に対して、従来のブロッホ理論の枠組みを超えた記述法の開発にも挑戦している。実験グループとも密接に連携し、理論と実験の協働による新現象の予測と理解を推進している。

Our group conducts theoretical research on the quantum properties of materials with unconventional shapes and structures, such as two-dimensional materials and moiré systems. Research on these materials has rapidly expanded since the beginning of the 21st century, leading to the discovery of a wide variety of novel physical phenomena absent in conventional materials, and has now become one of the frontiers of condensed matter physics. In our group, we aim to establish fundamental theoretical frameworks and propose new physical properties and functionalities by employing effective continuum models based on the microscopic Hamiltonian. In particular, we focus on physical effects originating from the topology and quantum geometry of electronic states, and investigate topological properties and emergent quantum states. We also develop theoretical descriptions beyond the conventional Bloch framework for quasiperiodic materials and systems with new geometric structures. Through close collaboration with experimental groups, we seek to predict and understand new physical phenomena.



代表的なモアレ物質であるツイスト二層グラフェンの構造(左)とバンド構造(右) フラットバンドに起因して非自明な量子状態が生じる。

(top) Phase diagram of two-component quadrupoles in a triangular lattice. $J = \bar{J} \cos \alpha$ and $J = \bar{J} \sin \alpha$ are isotropic and anisotropic couplings of neighboring quadrupoles. (bottom) Quadrupole configurations in the ordered phases. θ_r is the direction of local quadrupole moment, while $\hat{\theta}_r = -\theta_r/2$ is the corresponding director direction.



hBNとグラフェンからなる3層モアレ系の構造(上)とエネルギースペクトルの角度依存性(下)。数字はギャップを特徴づける第二 Chern 数であり、4次元の量子ホール効果と形式的に関係する。

Structure (top) and angle-dependent energy spectrum (bottom) of a trilayer moiré system composed of hBN and graphene. The numbers indicate the second Chern numbers characterizing the energy gaps, which are formally related to the four-dimensional quantum Hall effect.



ランズマン研究室 Landsman Team



客員教授 ランズマン アレクサンドラ
Visiting Professor LANDSMAN, Alexandra

我々の研究グループは、超高速光の生成と、それによる物質中の超高速電子ダイナミクスを、数値的・解析的手法を用いて研究している。主な研究対象は、量子物質における高次高調波発生 (HHG) であり、超短レーザーパルスと凝縮系物質の相互作用を通じて、強電場現象を新たな視点から理解することを目指している。

HHG を用いて、強相関電子ダイナミクスの探求、Berry 曲率やトポロジカル相転移の解明、高次非線形感受率の抽出に取り組むとともに、超短パルス中赤外光源を用いた実験研究とも連携している。これらを通じて、強非線形電子応答の理解と、UV・XUV 領域の新規光源開発を進めている。

さらに近年は、量子物質や分子における HHG を利用したエンタングルした XUV 光源の生成にも研究を拡張し、量子コンピューティングに向けたフォトニック集積回路への応用を目指している。

Our group studies the creation of ultrafast flashes of light (the source side) and the interaction of this ultrafast light with matter (the detector side) using a variety of numerical and analytic methods. One topic of interest involves high harmonic generation in quantum matter. The interaction of ultrashort laser pulses with condensed matter systems provides a unique perspective of strong field phenomena, such as tunnel ionization or high harmonic generation (HHG), which historically have only been investigated in atomic gas. We are interested in how HHG can be used to probe correlated electron dynamics (such as doublon production in Mott insulators), reconstruct Berry curvature, investigate topological phase transitions, or extract high-order nonlinear susceptibility of materials. Whenever possible, we collaborate with experimental groups, which use ultrashort mid-IR light sources to drive non-perturbative electronic dynamics in crystals. The aim is to both understand strongly nonlinear electronic response and create new light sources in the UV and XUV.

Recently, we turned our attention to creation of entangled XUV light sources using HHG from quantum materials and molecules interacting with nonclassical light, with applications to photonic integrated circuits for quantum computing.

ロネッティ研究室 Ronetti Team



客員准教授 ロネッティ フラビオ
Visiting Associate Professor RONETTI, Flavio

本研究室では、低次元強相関電子系における量子輸送およびトポロジカル物性の理論研究に取り組んでいる。とりわけ、分数量子ホール系に出現するエニオン準粒子の性質解明を中心的課題として掲げている。エニオンは分数統計を持つ特異な準粒子であり、そのブレイディングに基づくトポロジカル量子計算への応用という観点から、近年国際的に大きな注目を集めている。量子ポイントコンタクトを含む分数量子ホール系の輸送現象を厳密に解析し、従来の摂動論的手法では捉えきれなかったエニオンの高次ダイナミクスを明らかにすることで、エニオン統計の実験的検証に向けた理論的枠組みの構築を目指す。さらに、新たな実験配置の提案を通じてエニオンのブレイディング効果の直接観測を実現し、量子輸送特性への理解を一層深化させることを目的とする。

In our group, we conduct theoretical research on quantum transport and topological properties in low-dimensional strongly correlated electron systems. In particular, we focus on elucidating the properties of anyonic quasiparticles emerging in fractional quantum Hall systems as a central research theme. Anyons are exotic quasiparticles characterized by fractional statistics, and have recently attracted significant international attention due to their potential applications in topological quantum computation based on braiding. We aim to establish a theoretical framework for the experimental verification of anyonic statistics by performing exact analyses of transport phenomena in fractional quantum Hall systems with quantum point contacts. This approach enables us to uncover higher-order anyon dynamics that cannot be captured by conventional perturbative methods. Furthermore, by proposing novel experimental configurations, we seek to realize the direct observation of anyon braiding effects and to deepen the understanding of quantum transport properties.