

凝縮系物性研究部門

Division of Condensed Matter Science

高温超伝導体、有機超伝導体、グラフェン、トポロジカル絶縁体など、「新物質」の発見が物質科学の新しい局面を切り拓いた例は枚挙に暇がない。また超伝導や量子ホール効果などの予期せぬ現象は、極低温、高圧、強磁場といった「極限環境」において見だされてきた。凝縮系物性研究部門では、新しい物質系の探索と極限環境を用いた精密測定を組み合わせることにより、新しい物質観につながる物性現象を発見し解明することを目標としている。

当部門を構成する研究室は、自由な発想のもとに、新物質や高品質試料の作製や、極限環境での精密な電氣的・磁氣的・熱的測定を行っている。有機伝導体、原子層（二次元）物質、トポロジカル物質などの多様な物質を対象に、電子相関、フラストレーション、対称性、トポロジー、分子自由度などが協奏して現れる多彩な現象の解明に取り組んでいる。

Discoveries of new materials, for example, high temperature superconductors, organic superconductors, graphene, and topological insulators, have often opened new horizons in materials science. Application of extreme conditions of low temperature, high pressure, and high magnetic field have also revealed various unexpected properties of matters, such as superconductivity and quantum Hall effect. The goal of the Division of Condensed Matter Science is to uncover novel phenomena that lead to new concepts of matter, through combining the search for new material and the precise measurements under extreme conditions.

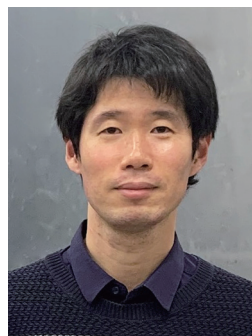
Each group in this division pursues its own research on synthesis of new materials and high quality samples, or on precise measurements of electric, magnetic, and thermal properties, based on their own free ideas. Their main subject is to elucidate various phenomena which emerge as a concerted result of electron correlation, frustration, symmetry, topology, and molecular degrees of freedom, in various materials such as organic conductors, atomic layer (two-dimensional) materials, and topological materials.

部門主任 山下 穰
Leader YAMASHITA, Minoru

井手上研究室 Ideue Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 2次元原子層物質の対称性制御を基軸とした新奇物性探索
Exploration of novel physical properties based on symmetry control of two-dimensional materials
- 2 原子層物質における量子状態測定
Measurement of quantum states in atomic layer materials
- 3 整流現象：非相反伝導現象、超伝導ダイオード効果、バルク光起電力効果
Rectification effect: Nonreciprocal transport, superconducting diode effect and bulk photovoltaic effect
- 4 原子層物質の相制御：磁性や超伝導、トポロジカル状態の制御等
Phase control of atomic layer materials: Control of magnetism, superconductivity, topological states, etc.



准教授 井手上 敏也
Associate Professor IDEUE, Toshiya

専攻 Course

工学系物理工学

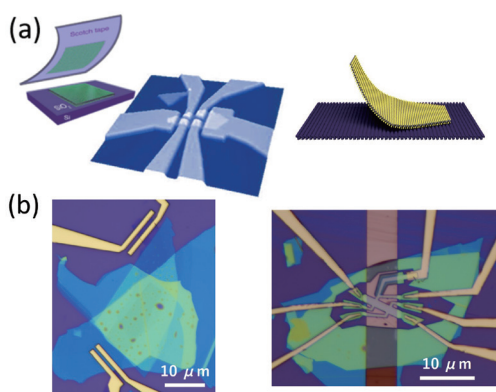
App. Phys., Eng.



助教 田中 未羽子
Research Associate
TANAKA, Miuko

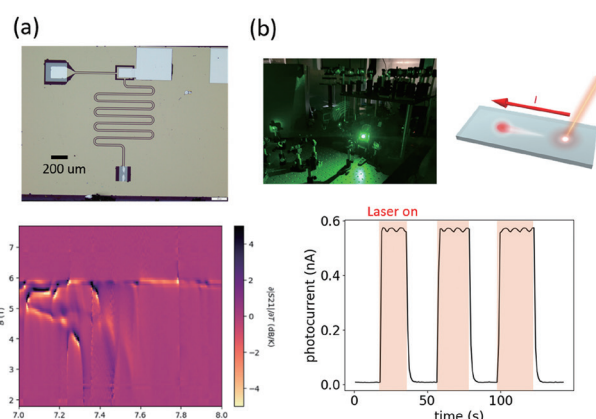
原子層数層からなる2次元物質は物質科学の新しい舞台として近年大きな注目を集めている。これらは3次元結晶にはないユニークな物性を示すことに加え、デバイス化や電場・磁場・圧力などの外場印加、電気化学的手法、曲率構造やヘテロ界面/捻り積層界面の作製等によって物質の構造や電子状態、対称性を自在に制御可能であり、それを反映した特徴的機能性を創出することができる。本研究室では、そのような2次元原子層物質特有の電気伝導特性や超伝導物性、光学特性の発見と理解によって、物質科学のフロンティアを開拓することを目指している。電荷やスピン、励起子といった様々な量子自由度の整流効果や量子相制御、高周波を用いた量子測定に取り組んでいる。

Atomically thin two-dimensional materials have recently attracted significant attention as a new materials platform. In addition to the unique physical properties, which are absent in bulk three-dimensional materials, we can freely control the structures, electronic states and symmetries of two-dimensional materials and realize the emergent functionalities by device fabrication, application of the external pressure or electric/magnetic field, electro-chemical gating method, and making van der Waals hetero/twisted interfaces or curved nanostructures. We are exploring novel transport phenomena, superconducting properties, and optical properties in these two-dimensional materials and pioneering the frontier of material science. We are aiming at controlling the various quantum degree of freedoms or elementary excitations in two-dimensional materials (charge, spin, lattice, exciton, superconducting vortex etc.), realizing exotic quantum functionalities such as quantum rectification effect (nonreciprocal transport, superconducting diode effect, and bulk photovoltaic effect) and quantum phase control (electric-field-induced superconductivity, topological phase transition, magnetic order control), and also developing new quantum measurement techniques using microwave.



2次元原子層物質の制御とデバイス作製。(a) 劈開法による薄膜化と転写法による積層構造の作製。(b) 面直接合デバイスと電界効果デバイスの顕微鏡写真。

Controllability of two-dimensional materials and device fabrications. (a) Thin film device and van der Waals interface made by exfoliation, transfer and stacking techniques. (b) Pictures of vertical junction device and field-effect device.



(a) マイクロ波共振器と原子層物質の結合デバイスと共鳴モード (b) 顕微光学応答測定系と原子層物質ナノにおける光電流。

(a) Microwave resonator coupled with two-dimensional material and observed resonance mode. (b) Optical measurement system and photocurrent response in two-dimensional materials.

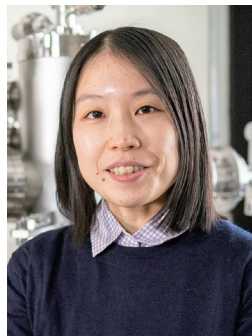


https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/ideue_group.html

高木研究室 Takagi Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 多軌道強相関電子系における新物性探索
Search for new properties in multi-orbital strongly correlated electron systems
- 2 トポロジカル構造にまつわる機能性の開拓
Functionality related to topological magnetic structures
- 3 分子軌道を起点とした電子相の設計・解明
Design and elucidation of novel electronic phases based on molecular orbitals



准教授 高木 里奈
Associate Professor TAKAGI, Rina

専攻 Course

新領域物質系

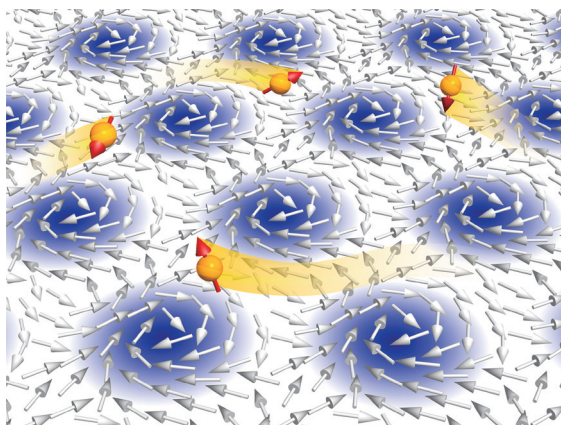
Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 浦井 瑞紀
Research Associate
URAI, Mizuki

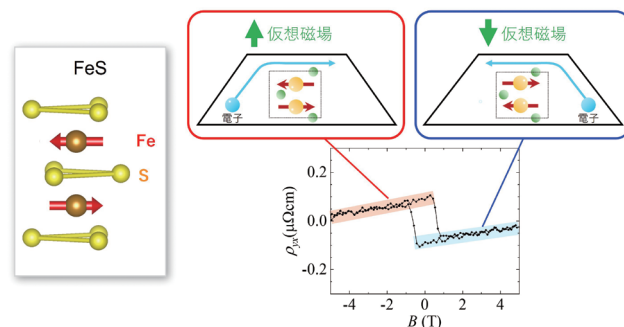
物質中に存在する多数の電子が強く相互作用する系では、化学的性質（元素の種類や結晶構造）や物理的環境（温度・磁場・圧力）を僅かに変化させることで様々な電子相が発現する。本研究室では、物質合成、磁化や電気伝導などマクロな物性測定、そして散乱実験や核磁気共鳴など微視的な実験手法を駆使し、電子が持つ電荷・スピン・軌道自由度が織りなす相転移現象やトポロジカル構造の研究を行っている。特に結晶中の分子軌道に着目することにより、現象の背後にある物理の解明と新しい電子物性の設計を目指す。研究対象は、遷移金属化合物や希土類合金などの無機結晶に加え、有機分子からなる分子性導体など幅広い物質を扱っている。具体的には、トポロジカル磁気構造にまつわる新物性・機能性の開拓、分子性導体における圧力下新奇電子相の探索などを進めている。

In strongly correlated electron systems, various electronic phases can be generated by slightly changing chemical properties (element type and crystal structure) or the physical environment (temperature, magnetic field, and pressure) of the matter. Our group is interested in electronic phase transitions and topological structures, in which charge, spin, and orbital degrees of freedom interact with each other. By combining material synthesis, macroscopic measurements of physical properties such as magnetization and electrical conduction, and microscopic techniques such as scattering experiments and nuclear magnetic resonance, we aim to elucidate the physics behind the phenomena and to design new electronic properties, especially by focusing on molecular orbitals in crystals. Our research targets cover a wide range of materials, including inorganic crystals such as transition metal compounds and rare earth alloys, as well as molecular conductors. Specifically, we are exploring new properties and functions related to topological magnetic structures, and novel electronic phases in molecular conductors under pressure.



多軌道強相関電子系において伝導電子が媒介する磁気相互作用によって生じるトポロジカル磁気構造の概念図。

Schematic of topological magnetic structure generated by magnetic interactions mediated by conduction electrons in a multi-orbital strongly correlated electron system.



磁性半導体のFeSでは、反平行スピン配列が誘起する仮想磁場によって室温で異常ホール効果が生じることを見出した。

In the magnetic semiconductor FeS, a fictitious magnetic field induced by the antiparallel spin arrangement gives rise to anomalous Hall effect at room temperature.



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

森研究室 Mori Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 分子の自由度を生かした新規有機(超)伝導体およびプロトン伝導体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for novel organic (super)conductors and proton conductors based upon molecular degree of freedom
- 2 固体中で電子がプロトン運動と協奏した有機伝導体、金属錯体、誘電体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for electron-proton coupled molecular functional materials
- 3 分子性物質の外場(磁場、電場、温度、圧力)応答の研究
Studies of responses by external stimuli (magnetic and electric fields, temperature, pressure) for molecular materials
- 4 有機電界効果トランジスタの研究
Study of organic field effect transistor



教授 森 初果
Professor MORI, Hatsumi

専攻 Courses

理学系化学 新領域物質系

Chem., Sci. Adv. Mat., Frontier Sci.

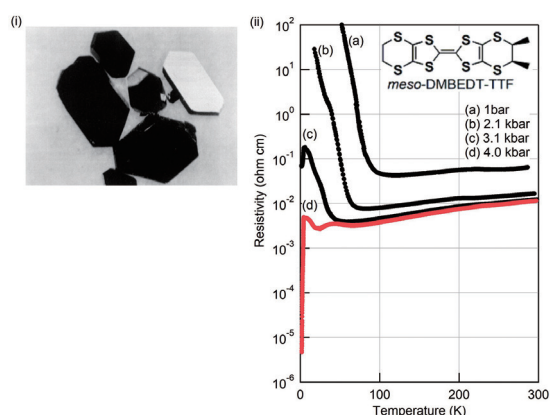


助教 藤野 智子
Research Associate
FUJINO, Tomoko

本研究室では、内部自由度をもつ分子が凝縮した分子性物質を対象とし、特異な機能性として電子・プロトン伝導性、磁性、誘電性、その圧力・電場による外場応答性、電界効果トランジスタ特性等の開拓を行っている。これら新分子性機能物質の開発は、塗布型有機伝導体や燃料電池の電解質など、有機エレクトロニクスを支える材料、デバイスの基盤研究となっている。

分子性物質の魅力は、1) 設計・制御可能であること、2) 電子間クーロン相互作用が大きく、電子の波動性と粒子性が競合すること、3) 柔らかいため、特異な外場応答性を発現することなどが挙げられる。

森研究室では、新しいモット型 κ -ET₂Cu(NCS)₂ および電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆ 有機超伝導体(左図)を発見し、物性研究を行った。さらに最近では、水素結合プロトンと伝導電子が動的に連動して、伝導性と磁性の切り替え現象を示す純有機伝導体(右図)を開発した。



新規有機超伝導体: (i) モット型 κ -ET₂Cu(NCS)₂ の単結晶と (ii) 電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆ の電気抵抗の圧力依存性。

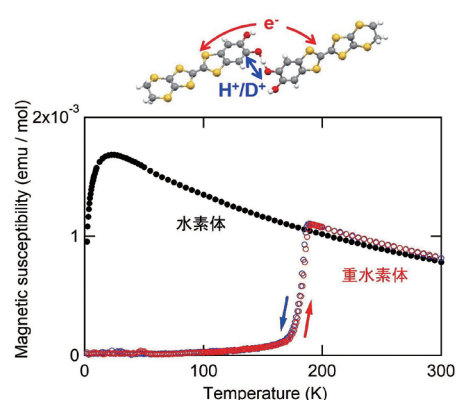
Novel organic superconductors: (i) single crystals of Mott-type κ -ET₂Cu(NCS)₂ and (ii) electrical resistivities under pressures for charge-ordered-type β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆.

Materials science has made great progress with the discovery of new materials that give us new concepts.

In this laboratory, we are focusing on molecular materials, which are condensed molecules with internal degrees of freedom, and exploring their unique functionalities such as electron and proton conductivities, magnetism, dielectricity, external field response due to their pressure and electric fields, and field-effect transistor properties. The development of novel functional molecular materials has become the basic research for materials and devices that support organic electronics, such as coated organic conductors and electrolytes for fuel cells.

Molecular materials are attractive because 1) they can be designed and controlled, 2) the Coulomb interaction between electrons is large, and the wave and particle properties of electrons compete with each other, and 3) they are soft, so they exhibit unique external field responses.

In Mori's group, we discovered and studied the properties of the new Mott-type κ -ET₂Cu(NCS)₂ and charge-ordered β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆ organic superconductors (left figure). More recently, we have developed a pure organic conductor (right figure) in which hydrogen-bonded protons and conduction electrons are dynamically concerted, exhibiting a switching phenomenon between conductivity and magnetism.



伝導電子と水素結合プロトンが相関する純有機伝導体 κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂ (X = H, D) において、大きな重水素効果により高温で伝導性および磁性が切り替わる。

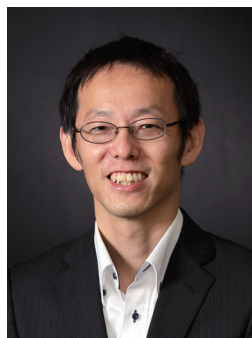
Switching behavior of electrical resistivity and magnetism due to large deuterium isotope effect in proton-electron correlated purely organic conductors κ -X₃(Cat-EDT-TTF)₂ (X = H, D).



山下研究室 Yamashita Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 超低温における強相関電子系の研究
Study of strongly correlated-electron systems at ultralow temperatures
- 2 絶縁体における非荷電励起の熱ホール効果
Study of thermal Hall effects of charge-neutral excitations in insulators
- 3 NMR を用いた多極子秩序の研究
Multipole orders studied by NMR measurements



准教授 山下 稔
Associate Professor YAMASHITA, Minoru

専攻 Course

新領域物質系

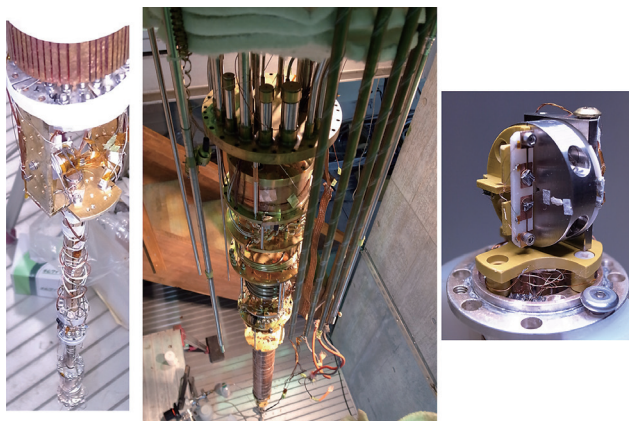
Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 武田 晃
Research Associate
TAKEDA, Hikaru

温度の下限である絶対零度では全ての物質は凍りついてしまっており、何も面白い現象は無いように思われる。ところが、1 ケルビンという低温領域で金属の電気抵抗が突然 0 になるという超伝導現象が発見されたのを契機に、液体ヘリウムの超流動転移、希薄アルカリ気体のボース凝縮など様々な量子凝縮相が極低温で発見された。室温では熱揺らぎに隠れてしまっていて見えない、多彩で不思議な物理現象が低温領域に隠れていたわけである。

当研究室ではこのような量子凝縮現象に興味を持ち、低温までの精密測定によってその物性を明らかにする研究を行っている。特に、電子系研究が全く行われてこなかった 20 mK 以下の超低温領域における量子臨界現象、超伝導現象の解明に力を入れている。さらに、絶縁体中のフォノンやスピンなどの非荷電励起の示す熱ホール効果や NMR 測定を用いた多極子秩序の研究に力を入れて研究を進めている。

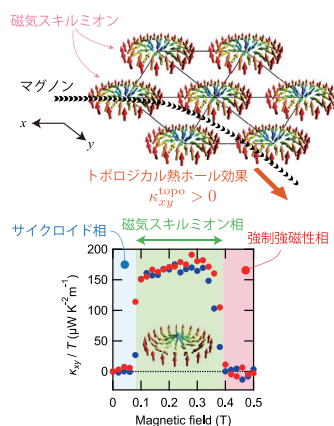


物性研の核断熱消磁冷凍機。超低温 (1 mK)・高磁場 (10 T) の実験が可能。左下挿図が実験空間拡大写真。右下挿図が超低温トルク測定用カンチレバー。

The ultralow temperature cryostat at ISSP. Nuclear demagnetization cooling enables experiments down to 1 mK under a magnetic field up to 10 T. The lower left picture is an enlarged view of the experimental space. The lower right picture shows a cantilever cell for torque measurements.

What happens when materials are cooled down close to absolute zero temperature? It sounds a boring question because everything freezes at $T = 0$. It is NOT true, however, because quantum fluctuations persist even at absolute zero temperature. The richness of low-temperature physics was first demonstrated by Heike Kamerlingh Onnes at 1911, who was the first to liquify Helium and reached ~ 1 K. He discovered that the resistance of mercury suddenly vanished at low temperature. Followed by this discovery of the superconducting transition, many amazing quantum phenomena – superfluid transition of Helium, Bose-Einstein condensations of Alkali Bose gases – were found at low temperatures.

We are interested in these quantum condensed states at low temperatures where the thermal fluctuations are negligible. Especially, we are now challenging measurements of correlated electron systems at ultralow temperatures (below 20 mK) where many interesting phenomena have remained unexplored due to technical difficulties. Further, we are studying thermal Hall effects of charge-neutral excitations (phonons and spins) in an insulator, as well as detecting multipole orders by NMR measurements.



(上) 磁気スカイミオン格子によるマグノンに対するトポロジカルホール効果の模式図。(下) 熱ホール伝導率の磁場依存性。磁気スカイミオン相でのみ、有限の熱ホール伝導率が観測された。

(Top) a schematic illustration of the topological thermal Hall effect of magnons in the lattice of magnetic skyrmions. (Bottom) the magnetic field dependence of the thermal Hall conductivity that sharply appears in the magnetic skyrmion phase (green), but disappears in the cycloidal (blue) and the forced-ferromagnetic (pink) phases.



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

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、マクロからミ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、新しい発想に基づく研究が、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て必要不可欠である。本部門は3つの研究室、および、量子物質研究グループ・機能物性研究グループ・附属物質設計評価施設を兼務する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 three groups and six other groups of concurrent members. 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 加藤 岳生
Leader KATO, Takeo

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



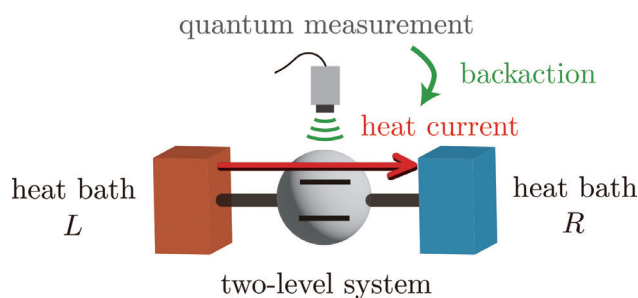
助教 藤井 達也
Research Associate
FUJII, Tatsuya

当研究室では、メゾスコピック分野およびスピントロニクス分野において、輸送特性に関する理論研究を幅広く展開している。メゾスコピック系の研究では、電子の量子力学的な性質に注目し、古くから研究が行われてきた。現在も、非平衡多体現象、非平衡ノイズ、強外場駆動現象など、新たな現象を積極的に追求している。スピントロニクス分野では、電流や熱とスピンの変換現象を中心に、多様なスピン輸送現象が研究されている。

当研究室では、これらの進展に対応するために、非平衡統計力学、場の量子論、多体電子論など、幅広い理論手法を活用している。具体的な研究事例としては、磁性体・金属界面でのスピン輸送と非平衡緩和現象、分数量子ホール効果におけるエニオン輸送特性、そして光による固体内のスピン流生成などがある。また、物性研究所内の実験グループとも緊密な共同研究を進めている。

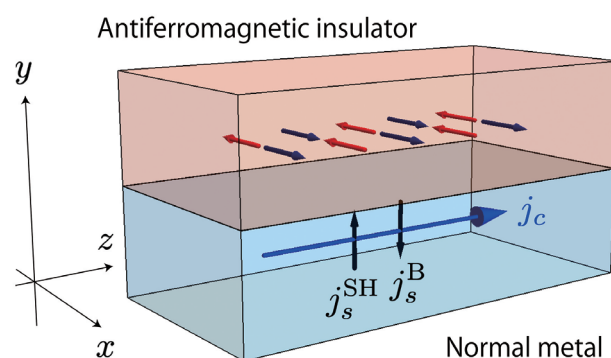
Our laboratory is engaged in extensive theoretical research on transport properties in the fields of mesoscopic and spintronics. Research on mesoscopic systems has long focused on the quantum mechanical properties of electrons. We are still pursuing new phenomena such as non-equilibrium multi-embodiment phenomena, non-equilibrium noise, and strong external field-driven phenomena. In the field of spintronics, various spin transport phenomena are being studied, mainly in current and heat/spin conversion phenomena.

In order to respond to these developments, our laboratory utilizes a wide range of theoretical approaches, including non-equilibrium statistical mechanics, quantum field theory, and many-body quantum theory. Specific research examples include spin transport at magnetic-metal interfaces, nonequilibrium spin relaxation, the transport properties of anyons in the fractional quantum Hall effect, and the generation of spin current in solids by light. We are also working closely with experimental groups in ISSP.



二つの熱浴と量子連続測定装置に結合した二準位系。二準位系に量子測定を行うと、左のリードから右のリードへの熱流に影響を与える（バックアクション）。

A two-level system coupled to two heat baths and an apparatus for continuous quantum measurement. The quantum measurement of the two-level system affects the heat current from the left to the right lead, which is called backaction.



スピンホール磁気抵抗の模式図。界面でのスピン吸収は反強磁性絶縁体のネールベクトルの向きによって変化し、磁気抵抗の大きさは変化する。

Illustration of spin Hall magnetoresistance. Spin absorption at the interface changes according to the orientation of the Néel vector of the antiferromagnetic insulator, and the magnitude of the magnetoresistance changes.



川畑研究室

Kawabata Group

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

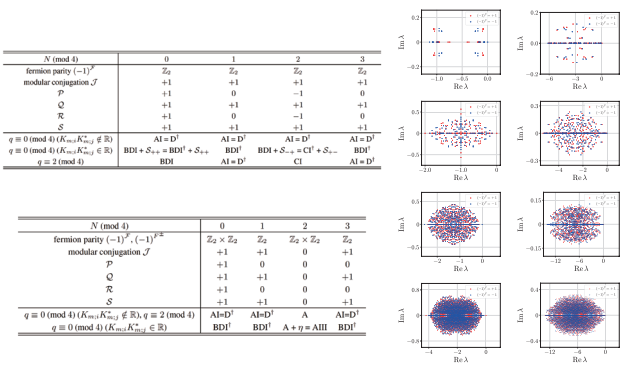


准教授 川畑 幸平
Associate Professor KAWABATA, Kohei

専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.

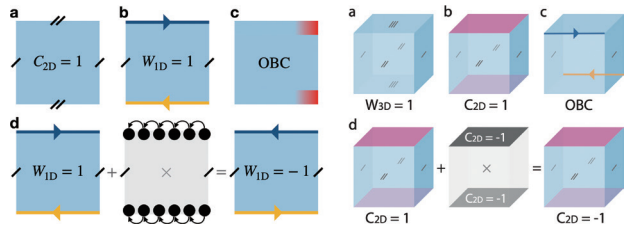
近年、孤立平衡系を中心とした従来の物性物理の枠組みを越えて、非平衡開放系で実現される物性物理に大きな関心が集まっている。そのようなめざましい進展にも拘らず、非平衡開放系で現れる物性現象は、重要な問題でさえも、依然として理解が確立していない。また、今後のさらなる発展が期待される量子技術分野において、非平衡開放系の理解はさらに重要性を増していくと考えられる。本研究室では、非平衡開放系で現れる多彩な物性現象をはじめとして、物性理論の新しい基礎を確立することを目指す。最近では、非平衡開放系のトポロジカル相の特徴づけおよび分類、また量子カオスや局在転移について研究し、とくに孤立平衡系に対応物をもたない非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.



量子開放系の対称性とカオス。散逸下の Sachdev-Ye-Kitaev 模型の対称性にもとづく周期表と複素スペクトル。[PRX Quantum 4, 030328 (2023)]

Symmetry of open quantum systems: Classification of dissipative quantum chaos. Periodic tables of Sachdev-Ye-Kitaev Lindbladians. [PRX Quantum 4, 030328 (2023)]



エルミートなバルクと非エルミートな境界のトポロジカルな対応。トポロジカル絶縁体・超伝導体の表面状態に散逸を加えると、種々の高次トポロジカル現象が生まれる。[PRX Quantum 4, 030315 (2023)]

Hermitian bulk – non-Hermitian boundary correspondence. The interplay of Hermitian topology and dissipation leads to new types of higher-order non-Hermitian topological phenomena. [PRX Quantum 4, 030315 (2023)]



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

常次研究室

Tsunetsugu Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 d 電子、 f 電子化合物など強相関電子系の電子状態と異方的超伝導
Electronic states and unconventional superconductivity in strongly correlated systems with d - or f -electrons
- 2 フラストレーション系の統計力学
Statistical physics of frustrated systems
- 3 量子磁性体の新奇量子相の理論
Theory of novel phases in quantum magnets
- 4 量子系の非平衡ダイナミクス
Nonequilibrium dynamics of quantum systems



教授 常次 宏一
Professor TSUNETUGU, Hirokazu

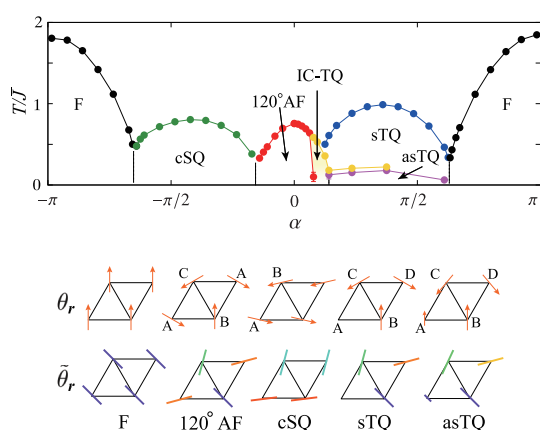
専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.

遷移金属化合物、希土類・アクチノイド化合物などの電子間クーロン相互作用が強い強相関電子系の物性の理論を研究している。これら強相関電子系においては、低温で新奇な磁性状態や異方的超伝導、密度波などの多種多様な物性が出現する。これらの複雑な物性の統一的理解を目標とするとともに新しい現象の発見を目指している。

主なテーマは、フラストレーション系や強磁性超伝導体などのスピン・電荷・軌道の複合自由度を持つ系における新しいタイプの量子秩序や量子ゆらぎである。秩序と臨界現象の特徴、電子状態や輸送現象をはじめとするダイナミクスがどのような影響を受けるのかを調べている。また、最近はいくつかの結晶構造のもとで新規なフォノンおよび電子物性の研究にも取り組んでいる。

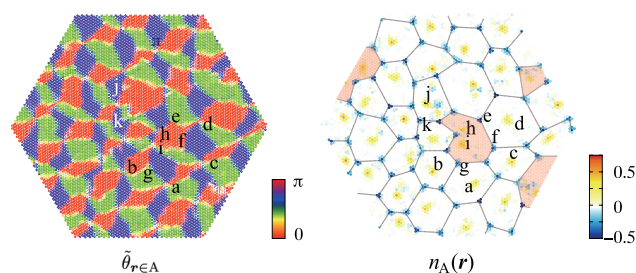
Strongly correlated electron systems, particularly transition metal compounds and rare-earth or actinide compounds are the main subjects of our theoretical research. In these systems, strong electron-electron interactions lead to a variety of interesting phenomena emerging at low temperatures, such as various types of exotic magnetic orders, unconventional superconductivity and density waves. We aim to establish a unified theory for those complex properties and also predict novel phenomena in those systems.

Targets of our recent study include novel types of quantum order and quantum fluctuations in frustrated spin and strongly correlated electronic systems with multiple degrees of freedom such as charge, spin, and orbital. In these systems, many soft modes of fluctuations are coupled to each other, and this affects the nature of quantum phase transitions, as well as electronic states and dynamical properties including transport phenomena. We also study systems with chiral structure and explore novel behaviors of their phonon and electronic properties related to their chirality.



(上) 三角格子 2 成分四極子模型の相図。 $J = \bar{J} \cos \alpha$ と $K = \bar{J} \sin \alpha$ は隣接四極子間の等方的 / 異方的相互作用。(下) 秩序相の四極子構造。 θ_r は四極子の向き、 $\bar{\theta}_r = -\theta_r/2$ はディレクターの向き。

(top) Phase diagram of two-component quadrupoles in a triangular lattice. $J = \bar{J} \cos \alpha$ and $K = \bar{J} \sin \alpha$ 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 $\bar{\theta}_r = -\theta_r/2$ is the corresponding director direction.



(左) IC-TQ 相の A 副格子ディレクターの瞬間配置は 3 種のドメインに分裂。(右) ディレクター渦度 $n_A(r)$ は渦格子を形成し、朱色の部分に存在する転位がコステリッツ・サウレス転移の出現を示唆。

(left) Snapshot of director directions on A-sublattice sites in the IC-TQ phase. The system is divided to three types of domains. (right) Local vorticity $n_A(r)$ of A-sublattice directors shows a distorted vortex lattice pattern. Dislocations exist at the vermilion polygons indicating an appearance of Kosterlitz-Thouless transition.



ナノスケール物性研究部門

Division of Nanoscale Science

ナノスケール物性研究部門では、様々な低次元ナノスケールデバイスや材料を対象として研究を行っている。電子ビームリソグラフィーや集束イオンビーム加工を用いたり、薄膜成長中に自発的に形成させたり、原子レベルで秩序だった表面へナノスケールレベルの層を堆積させる手法などを利用してナノスケールの材料や電子デバイスを作製している。これらの材料は、走査型プローブ顕微鏡を用いた表面の空間分解物性研究や、低温輸送・磁気輸送技術により特性評価を行っている。最近では、ナノスケールの材料やデバイスの開発と量子計測法を組み合わせることで、新しい微細加工ができる施設を物性研究所内に設置した。この施設では、当研究所の微細加工・分析ツールを活用し、低温や高磁場などでの様々な量子計測に適したデバイスの作製を支援している。最近の研究テーマとしては、ヘテロ構造におけるスピン変換の探索、それをもとにしたスピントロニクスデバイスの開発や、単結晶表面に形成されたナノ構造における超伝導やトポロジ状態の走査プローブによる解明、自己組織化ナノ構造体の創成や量子コンピュータのための新規な構成体の開発などがある。

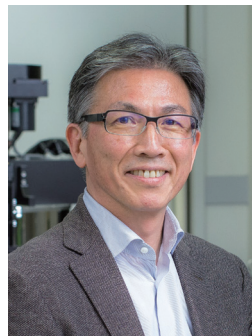
The Division of Nanoscale Science brings together laboratories working on a variety of low-dimensional nanoscale devices and materials. The nanoscale systems that we study are built either by fabricating nanoscale electronic devices, typically by electron beam lithography or focused ion beam milling, or formed spontaneously during thin film growth or by deposition of nanoscale layers on atomically well-ordered surfaces. We use scanning probe microscopes for spatially-resolved physical property studies on surfaces and a variety of low-temperature transport and magnetotransport techniques for materials characterization and property analysis. We have recently started a new microfabrication facility for combining nanoscale materials and device studies with quantum measurement methods available at ISSP. The facility helps researchers to utilize the microfabrication and analytical tools in our laboratories to prepare suitable device structures for a variety of quantum measurements at low temperatures, high magnetic fields, etc. The recent research topics include studies on the exploration of spin-to-charge current conversion phenomena at interfaces and heterostructures, development of spintronic devices, scanning-probe studies of superconductivity and topological states in nanostructures formed on single crystal surfaces, fabricating self-organized nanostructured materials, and the development of new building blocks for quantum computers.

部門主任 リップマー ミック
Leader LIPPMAA, Mikk

大谷研究室 Otani Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 磁気弾性強結合による高効率スピン流の生成
Efficient pure spin current generation by magnon-phonon coupling
- 2 重元素を含まない界面での軌道流の生成
Orbital current generation at the interface of light elements
- 3 非共線反強磁性体における電流駆動高速磁壁移動
Current-driven fast magnetic domain wall motion in noncollinear antiferromagnets
- 4 原子間力顕微鏡を用いた局所的熱流注入による異常ネルンスト効果マッピング
Anomalous Nernst effect mapping by local heat flow injection using an atomic force microscope



教授 大谷 義近
Professor OTANI, Yoshichika

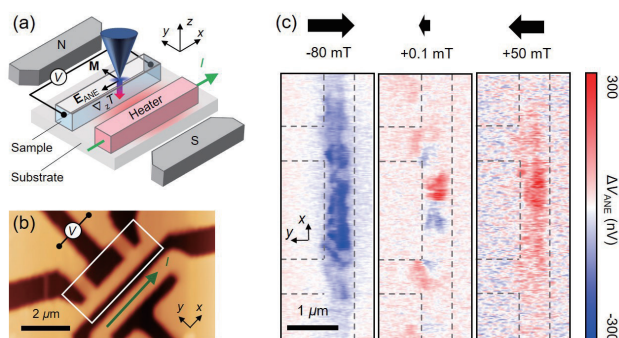
専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.

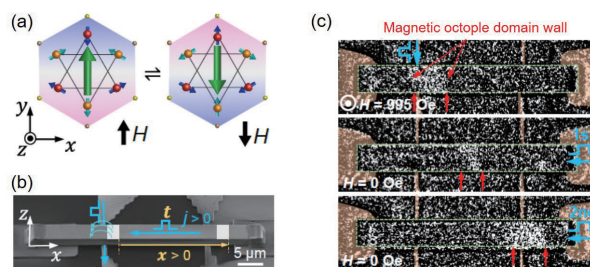
20 世紀の終わりに誕生したスピントロニクスは、電流に加え、スピン角運動量の流れであるスピン流を用いることで、これまでにない機能を持った素子を創出する学問領域である。スピントロニクスは、電荷・スピン・フォノン・フォトン・マグノン等の準粒子が、固体中のスピンを媒介として相互に変換される「スピン変換科学」として発展した。ごく最近では、スピン変換科学は、準粒子が強固に結合しマグノンポーラロンなどの新奇準粒子状態を生成する、「強結合スピントロニクス」として展開している。さらに最近では、電子スピンだけではなく電子軌道により角運動量を運ぶ軌道流が登場した。これらのスピンや軌道を媒介とする変換・結合現象は、比較的単純な接合界面近傍のナノスケール領域で生じることが多く、優れた汎用性と応用性を持っている。我々の研究室では、微細加工で作製したナノデバイスを使った実験により、スピンや軌道を媒介して生じる新奇な準粒子間の変換・結合現象の開拓を行っている。また、基礎量子物性の観点から、発見した新現象の機構解明にも取り組んでいる。

Spintronics, which emerged at the end of the 20th century, is a science that creates new functional devices by using spin currents, the flow of spin angular momenta, and charge currents. It has developed as spin conversion science in which quasiparticles such as electrons, phonons, photons, and magnons are interconverted through spins in solids. Recently, this has evolved into strong coupling spintronics, producing new coupled quasiparticles such as magnon polarons. More recently, orbital currents have emerged that carry angular momenta not only by electron spin but also by electron orbitals. Since these spin/orbital-mediated conversion/coupling phenomena often occur in the nanoscale region near the relatively simple junction interface, they have excellent versatility and applicability. Our laboratory develops novel conversion/coupling among quasiparticles mediated by spins/orbitals through experiments using nanoscale devices fabricated by microfabrication technology. Furthermore, we elucidate the mechanisms of novel phenomena from the viewpoint of fundamental solid-state physics.



原子間力顕微鏡の探針誘起局所温度勾配を用いた異常ネルンスト効果のマッピング。(a) 手法の概略図。(b) 素子のトポグラフィ像。(c) 外部磁場印加中の異常ネルンスト電圧のマッピング像。

Magnetic imaging by the locally induced anomalous Nernst effect using atomic force microscopy. (a) conceptual drawing of this method. (b) The topography of the sample. (c) The Spatially resolved anomalous Nernst effect voltage under external magnetic fields.



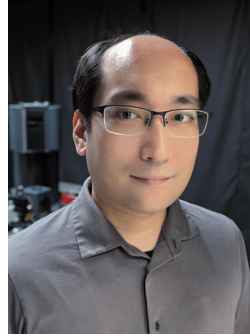
非共線反強磁性体 Mn_3Ge の高速磁壁移動の実証。(a) Mn_3Ge の磁気八極子。(b) 試料の SEM 像。(c) 磁気カー効果により観察されたパルス電流による磁壁の高速移動。

Demonstration of a fast magnetic domain wall motion in a noncollinear antiferromagnet Mn_3Ge . (a) The magnetic octapoles of Mn_3Ge . (b) SEM image of the sample. (c) The fast domain wall motion induced by pulse currents observed by MOKE.



研究テーマ Research Subjects

- 1 半導体モアレ超格子中の電子の精密電気制御による物性探索
Exploration of physical properties via precise electrical control of electrons in semiconductor moiré superlattices
- 2 励起子をプローブとした電子物性の探索手法の開拓
Development of methods for exploring electronic properties using excitons as a probe
- 3 2次元物質による量子デバイス
Quantum devices based on two-dimensional materials



准教授 島崎 佑也
Associate Professor SHIMAZAKI, Yuya

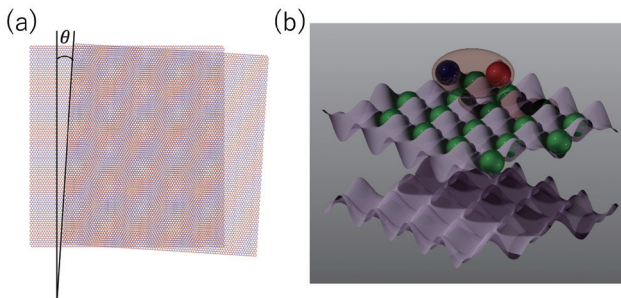
専攻 Course
工学系物理学
App. Phys., Eng.

半導体中に電子を規則的に配列した人工量子系において物性を再現するということは、メゾスコピック物理の長年の夢であった。近年このような系が2次元物質の結晶格子のモアレ干渉を利用したナノスケール周期の超格子において実際に実現されており、強相関電子状態、超伝導、磁性、トポロジカル物性など多数の量子物性の出現が確認されている。このような新しい人工量子系の振る舞いを微視的に理解し、制御するための学理を構築することで、ナノスケールの階層におけるメタ物質科学の展開が期待できる。

当研究室では半導体2次元物質を中心として、そのモアレ超格子の電子物性をマクロな量子物性とミクロな量子デバイス物理の両方の観点から研究を行う。特に半導体モアレ超格子の精密電気制御と光励起によるプローブ・制御を通じてその量子物性・量子デバイス物理を明らかにする。励起子をプローブとした電子物性の新しい探索手法についても開拓を行う。

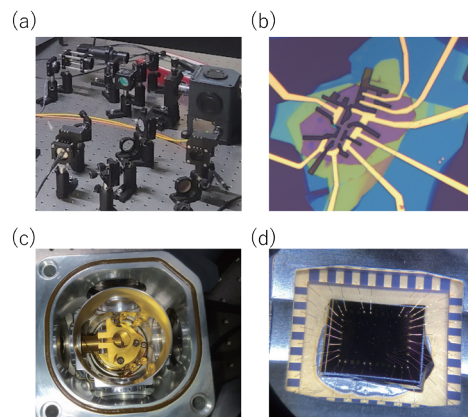
Realizing artificial quantum systems with regularly arranged electrons in semiconductors to simulate physical properties has long been a dream in mesoscopic physics. Recently, such systems have been realized using nanoscale-period moiré superlattices formed by interference patterns in two-dimensional materials. These systems exhibit a wide range of quantum phenomena, including strongly correlated electron states, superconductivity, magnetism, and topological properties. Understanding and controlling the behavior of these novel quantum systems at a microscopic level can lead to the development of metamaterial science at the nanoscale.

Our laboratory focuses on the study of moiré superlattices in semiconductor two-dimensional materials, investigating their electronic properties from both macroscopic quantum phenomena and microscopic quantum device physics. In particular, we aim to reveal quantum properties and device physics through precise electrical control and optical excitation. Additionally, we are developing new methods to explore electronic properties using excitons as probes.



(a) 2次元物質によるモアレ超格子 (b) 半導体モアレ超格子中の強相関電子状態の励起子によるプローブ

(a) Moiré superlattice formed by two-dimensional materials (b) Strongly correlated electron states in a semiconductor moiré superlattice probed by excitons



(a) 光学実験系 (b) 2次元物質デバイス (c) 光学クライオスタット (d) チップキャリア上のデバイス写真

(a) Optical experimental setup (b) Two-dimensional material device (c) Optical cryostat (d) Device image on chip carrier



橋坂研究室

Hashisaka Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 分数量子ホール準粒子のエニオン統計
Fractional quantum Hall quasiparticles and their statistics
- 2 トポロジカルエッジ状態のダイナミクス
Dynamics of topological edge states
- 3 メゾスコピック系の量子輸送
Quantum transport in mesoscopic systems



准教授 橋坂 昌幸
Associate Professor HASHISAKA, Masayuki

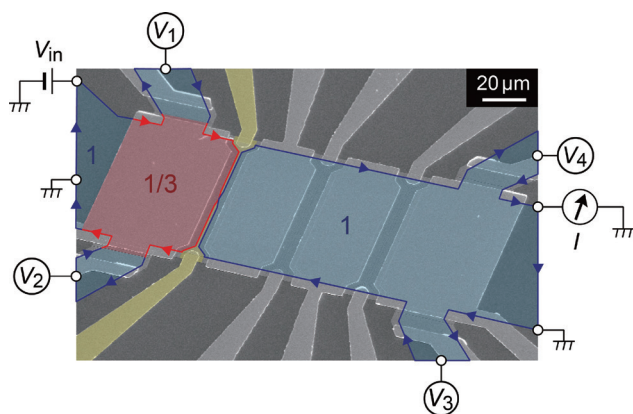
専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.



助教 佐藤 洋介
Research Associate
SATO, Yosuke

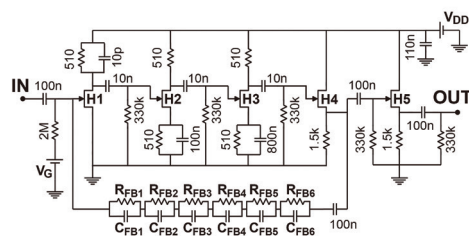
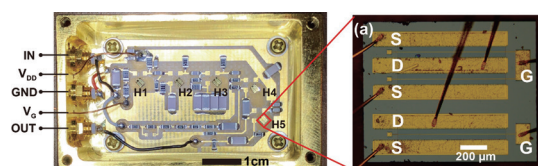
電子の量子的性質と電子間相互作用を起源として、著しく非自明な物性が発現することがある。超伝導、分数量子ホール効果、近藤効果などがその代表例である。これら「量子多体系」の特異性は、その素励起の性質としてひととき鮮やかに観測される場合がある。例えば分数量子ホール系における素励起（準粒子）は、素粒子であるはずの電子1個の電荷（素電荷）よりも小さな分数電荷を持つことが確かめられている。またこの準粒子は、ボーズ統計・フェルミ統計と異なる量子統計（エニオン統計）を持つことが知られており、トポロジカル量子計算への応用が期待されている。本研究室では、量子多体系の素励起を観測・制御することにより、電子や光子などの自然な粒子では実現できない、新奇な量子技術の確立を目指して研究を行っている。

The interplay of quantum nature and the electron correlation causes exotic phenomena in condensed matter, such as superconductivity, the fractional quantum Hall effect, and the Kondo effect. Our research aims to investigate these quantum many-body phenomena in mesoscopic systems using nanofabrication and our original measurement techniques. The quantum many-body systems sometimes show their peculiarity as the beautiful characteristics of the elementary excitations. The paradigmatic is the quasiparticles in the fractional quantum Hall states. The quasiparticles have fractional charges smaller than the elementary charge. More interestingly, they have anyonic statistics, the quantum statistics that differ from the Bose and Fermi statistics. The quasiparticles with highly nontrivial non-abelian statistics may open a route for synthesizing the fault-tolerant topological quantum computer, thus attracting growing attention in condensed matter physics and quantum computational science. Our goal is to establish such novel quantum technologies originating from the intriguing nature of quasiparticles in quantum many-body systems.



分数・整数量子ホール接合デバイス。占有率 1/3 領域（準粒子、電荷 $e/3$ ）と、占有率 1 領域（電子、電荷 e ）の電荷キャリアのミスマッチにより、超電導接合に類似したアンドレーエフ型反射が生じる。

False-color electron micrograph of the fractional-integer quantum Hall junction device. Mismatch between the charge carriers causes Andreev-like reflection at the junction.



自作 FET を用いて作製した低温電流増幅器
Homemade-FET-based cryogenic transimpedance amplifier



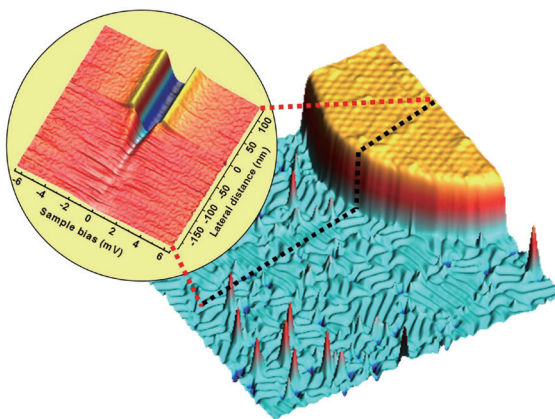
https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/hashisaka_group.html

研究テーマ Research Subjects

- 1 低温 STM による特異な超伝導 / トポロジカル物性の探索
Exploration of peculiar superconducting / topological states using low-temperature STM
- 2 マイクロ波導入スピン偏極 STM によるナノスケール磁気共鳴とスピンダイナミクス
Nanoscale detection of magnetic resonances and spin dynamics by microwave-assisted spin-polarized STM
- 3 スピン偏極走査ポテンシオメトリによるスピン流の実空間計測
Real-space distribution of spin currents by spin-polarized scanning tunneling potentiometry
- 4 データ科学支援による高効率局所電子状態計測
Effective collection of local density of states with an assist of data science

走査トンネル顕微鏡 (STM) は、その像を通じて表面の原子構造を明らかにするのみならず、トンネル分光測定によりサブナノ領域での電子状態に関する知見を与え、さらにはスピン偏極 (SP-) STM による局所磁気特性や表面スピン構造を引き出すことができる。

長谷川研究室では、極低温強磁場で動作する STM 装置を用いて、表面超伝導など反転対称性の破れた二次元系での超伝導特性、磁性体との近接効果により誘起される特異な超伝導・トポロジカル状態の観測を試みている。また、SP-STM による磁性薄膜でのスピンスパイラルなど特異な局所磁気構造観察、スピン偏極局所ポテンシオメトリによるスピン流計測、さらにはマイクロ波導入による磁気共鳴検出を通じた局所スピンダイナミクスの研究等も推進しており、プローブ顕微鏡の新たな計測手法を開発することにも取り組んでいる。



超伝導金属界面での近接効果。単原子層 Pb (水色、金属相) と Pb 薄膜 (黄色、超伝導相) の界面でのトンネル分光から、超伝導特性が界面から約 40nm にわたって染み出している様子が観察される。

Proximity effect at superconductor/metal interface. Tunneling spectra taken around an interface between 1ML-Pb layer on Si (blue, normal metal) and a Pb thin film (yellow, superconductor) indicate the penetration of superconductivity into the metal layer with a decay length of 40 nm.



教授 長谷川 幸雄
Professor HASEGAWA, Yukio

専攻 Course

工学系物理工学

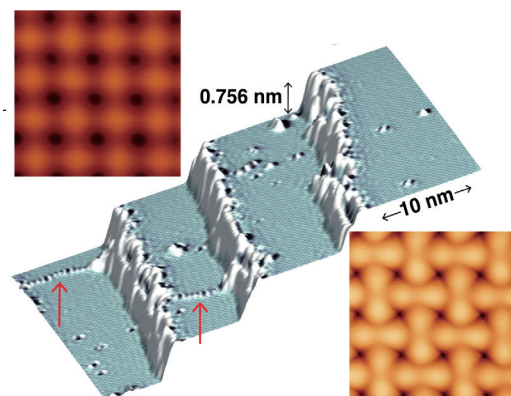
App. Phys., Eng.



助教 土師 将裕
Research Associate
HAZE, Masahiro

Scanning tunneling microscopy (STM) reveals not only atomic structure of surfaces but also electronic states of sub-nanometer areas by tunneling spectroscopy. With a function of spin-polarized (SP-) STM, the microscope also provides local magnetic properties and surface spin structures, and with inelastic tunneling spectroscopy (IETS), various excitation energies can be extracted.

In Hasegawa-lab., by using STMs operated in ultralow temperature and high magnetic field, peculiar local superconducting and topological states that are found e.g. at surfaces, where inversion symmetry is broken, and in the proximity with ferromagnetic and topological materials, have been explored. We have also studied local magnetic properties of nano magnets, peculiar spin-spiral structures, and energy dispersion of surface magnons using SP-STM and SP-IETS. We have also explored unique functionality of the probe microscopy; recent examples include the investigation of local spin dynamics through the detection of magnetic resonances using microwave-assisted SP-STM, spin current detection using SP-scanning tunneling potentiometry, and efficient collection of local density of states based on data-driven science.



重い電子系物質 CeCoIn₅ で観測された表面軌道秩序。Co 原子が正方配列した面 (中央、左上図) で、探針を近づけて STM 像 (右下図) を撮ると、ダンベル状の d 軌道の秩序配列状態が観察される。

Surface-induced orbital ordered states observed on a heavy-fermion material CeCoIn₅. In STM images taken on a Co-terminated surface in standard conditions, round-shaped Co atoms are observed (center and upper-left images). In STM images taken in closer distances (lower-right) we observed an ordered phase of dumbbell-shaped d-orbitals.



吉信研究室

Yoshinobu Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 よく規定されたモデル触媒による分子の活性化と表面反応の研究
Activation and surface reaction of molecules on well-defined model catalysts
- 2 水素と関わる材料の物性と反応
Properties and reactions of materials with hydrogen
- 3 2次元物質エッジ面の電子状態と反応性の研究
Electronic states and reactivity of edge surfaces of two-dimensional materials
- 4 THz パルスによる表面における振動分光と分子ダイナミクスの研究
Vibrational spectroscopy and dynamical processes of molecules on surfaces using THz pulses



教授 吉信 淳
Professor YOSHINOBU, Jun

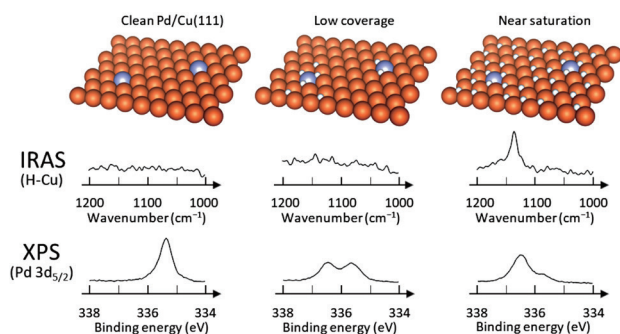
専攻 Courses

理学系化学 新領域物質系

Chem., Sci. Adv. Mat., Frontier Sci.

外部から原子・分子を自在に供給し、新しい物質を構築する「反応場」であることが、固体表面の最も重要な特徴である。表面・界面は物質移動の場だけではなく、エネルギー変換の場としても重要である。原子スケールで物質移動を制御し、機能をもつ材料やデバイスを創製するためには、表面・界面における素過程を理解することが不可欠である。表面における原子・分子のダイナミクス研究は、触媒やデバイスだけでなく、さらに地球環境や宇宙における化学反応についても手がかりを与えてくれる。当研究室では、表面・界面における原子・分子のダイナミクス、モデル触媒および低次元材料の構造・物性・反応を、振動分光、光電子分光、走査型トンネル顕微鏡や独立駆動4探針電気伝導測定法を駆使して研究している。また、シンクロトロン放射光を用いたオペランド光電子分光を推進している。最近、THz パルスによる表面プロセス駆動のプロジェクトにも取り組んでいる。

Solid surfaces play an important role as “low dimensional reaction field”, on which we can provide atoms and molecules and manipulate them deliberately. In addition, surface and interface are vital in the energy conversion processes. In order to fabricate atomically-controlled functional materials, we have to understand the dynamical behavior of atoms and molecules on surfaces. The research of these subjects is closely related to the basics of catalysis, semiconductor processes and molecular electronics. In addition, we can simulate chemical reactions on cosmic dust and clouds in atmosphere with laboratory experiments in ultrahigh vacuum at low temperature. We have utilized surface vibrational spectroscopy, photoelectron spectroscopy and local probe methods in order to investigate structures, reactions and electronic properties of atoms/molecules and thin films on surfaces. Synchrotron radiation is also used to study the electronic states of surface and interface, including *operando* X-ray photoelectron spectroscopy. Recently, we have engaged in the study of THz-pulse driven surface processes.



単原子合金モデル触媒 Pd/Cu(111) における水素の解離とスピルオーバープロセス
Dissociation and spillover processes of hydrogen on the single atom alloy Pd/Cu(111) model catalyst surface



THz パルス駆動表面反応装置（松永研究室との共同研究）

The apparatus for THz-pulse induced surface reactions (collaborated with Matsunaga Lab.)



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

研究テーマ Research Subjects

- 1 パルスレーザー堆積法による酸化物薄膜およびヘテロ構造の作製
Growth of thin oxide films and heterostructures by pulsed laser deposition
- 2 酸化物ナノ構造およびナノコンポジット薄膜の合成
Synthesis of nanostructures and nanocomposite thin films
- 3 光触媒におけるキャリアダイナミクス
Carrier dynamics in photocatalysts
- 4 薄膜のオートノマス合成
Autonomous synthesis of thin films



教授 リップマー ミック
Professor LIPPMAA, Mikk

専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.

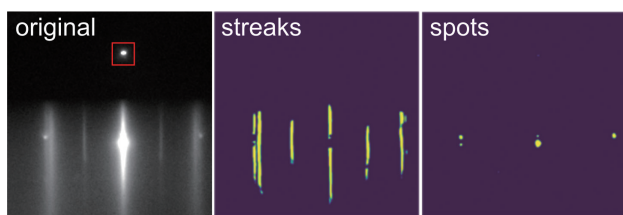


助教 田中 友晃
Research Associate
TANAKA, Tomoaki

新材料の薄膜合成には多くの合成制御パラメータの最適化が必要である。パルスレーザー堆積法の場合、パラメータ空間は 6 次元以上である。このパラメータ空間で最適点を見つけるプロセスを加速するために、薄膜の表面形状や構造変化を検出できる RHEED を用いて結晶成長を観察する。いくつかの機械学習を利用し、特定の格子パラメータを持つ結晶相や最良の表面平坦性といった、目的の回折的特徴に最適な結晶成長条件を自律的に選択する。回折画像のセマンティックセグメンテーションを使用して類似した回折パターンを抽出し(左図)、続いて周期性分析とパラメータクラスタリングを行うことで、膜の相組成と表面構造の品質係数が得られる。相情報は、相安定性マップを構築するために使用できる(右図)。ベイズ最適化を用いることで、多次元パラメータ空間において最適な成長条件を選択し目的の結晶相を迅速に得るための自律的な合成制御を行う。

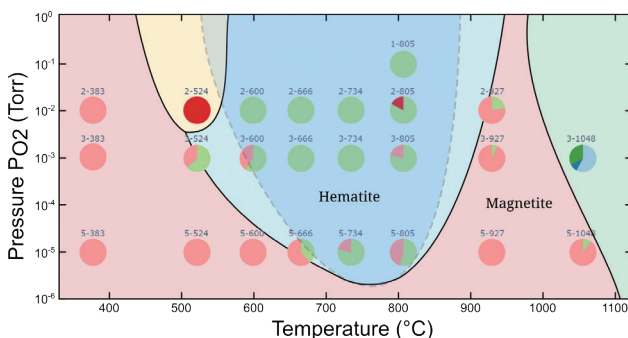
Thin film synthesis of new materials requires the optimization of many synthesis control parameters, such as pressure, temperature, growth rate, etc. For Pulsed Laser Deposition, the parameter space has 6 or more dimensions. To accelerate the process of finding the optimal point in this parameter space, we monitor the crystal growth by RHEED, which detects thin film surface morphology and structure changes. Several forms of machine learning are used to autonomously choose crystal growth conditions that optimize for the desired diffraction features, such as a crystal phase with a specific lattice parameter or the best surface flatness.

Semantic segmentation of the diffraction images is used to extract similar diffraction features (left figure), followed by periodicity analysis and parameter clustering, which gives the phase composition of the film and a quality factor for the surface structure. The phase information can be used to build a phase stability map (right figure). Bayesian optimization is used to obtain autonomous synthesis control to select the best growth conditions and to rapidly obtain the desired crystal phase in a multidimensional parameter space. This autonomous feedback operation is more than an order of magnitude faster than traditional manual parameter optimization.



回折パターンでトレーニングされた UNet ニューラル ネットワークを使用した RHEED パターンからの回折ストリークとスポットの抽出。直接ビーム(元の画像の赤枠)は回折スポットと混同されない。

Diffraction streak and spot extraction from a RHEED pattern with a UNet neural network trained on diffraction images. The direct beam (red box in the original image) is not confused with diffraction spots.



温度と酸素圧力の関数としての、 Al_2O_3 上のヘマタイト (Fe_2O_3) とマグネタイト (Fe_3O_4) の自動薄膜成長相マッピング。

Automated thin film growth phase mapping of hematite (Fe_2O_3) and magnetite (Fe_3O_4) on Al_2O_3 as a function of temperature and oxygen pressure.



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

数間研究室 Kazuma Group



客員准教授 数間 恵弥子
Visiting Associate Professor KAZUMA, Emiko

固体触媒において高い反応性を高度に実現するには、触媒表面での反応機構を分子レベルで理解し反応を制御することが重要である。特に、表面と分子間の相互作用は、反応を支配する主要な因子であり、その制御は重要な触媒戦略の一つである。当研究室では、走査トンネル顕微鏡を用いて電子、光、近接場光、熱といった多様な励起源による表面反応の単一分子レベル研究を展開し、反応素過程、機構の解明を行ってきた。現在はよりリアルな触媒表面における反応の理解と新奇反応の開拓を目指し、表面の構造、電子状態を制御した触媒モデル表面の開発に加え、単分子レベル分析とマクロな表面分析の融合に取り組んでいる。ナノスケール物性研究部門・吉信研究室と協力し、単分子レベル分析と昇温脱離法、赤外反射吸収分光法、低速電子回折法等による表面分析を融合することで表面反応をより包括的に理解し、高効率かつ高選択的な反応を可能にする触媒表面の戦略・指針を獲得する。

Controlling chemical reactions on solid catalyst surfaces based on understanding reaction mechanisms at a single molecule level is crucial to achieving the high reactivity of solid catalysts in a sophisticated manner. In particular, the interaction between the surface and molecule is a principal factor governing the reaction, and controlling the interaction is one of the important catalytic strategies. We have performed single-molecule studies on surface reactions induced with various excitation sources, including electrons, light, near-field light, and heat, using a scanning tunneling microscope, and elucidated the elementary processes and mechanisms of the reactions. To understand reactions on more realistic catalyst surfaces and explore novel reactions, we take on the challenge of not only developing catalyst model surfaces with highly controlled morphological structures and electronic structures but also combining the single-molecule-level analysis with macroscopic surface analysis. In collaboration with Prof. Yoshinobu group, we will combine single-molecule-level analysis with temperature-programmed desorption, infrared reflection absorption spectroscopy, and low-energy electron diffraction to understand surface reactions more comprehensively and obtain strategies for developing catalyst surfaces with high efficiency and selectivity.

社会連携研究部門

Social Cooperation Research Department

本学の制度である社会連携研究部門は、公益性の高い共通の課題について、東京大学と共同研究を実施しようとする民間機関等から受け入れる経費等を活用して設置される。本研究部門では、教育研究内容における物性研究所の自主性の確保に十分配慮しながら、教育研究の進展や人材育成の活性化により、学術の推進及び社会の発展に寄与することを目的としている。

物性研究所では、2019 年 4 月に最初の社会連携研究部門「データ統合型材料物性研究部門」が開設された。

Social Cooperation Research Department (SCRD) is a joint research framework between the University of Tokyo and its corporate or other external partners in order to collaborate in research projects that contribute to the public interest. Although SCRD is funded by external partners, its research and education activities aiming for academic advancement and social development are conducted in such a way that secures the University's autonomy and independence. ISSP established its first SCRD unit, the Division of Data-Integrated Materials Science, in April 2019.

データ統合型材料物性研究部門

Division of Data-Integrated Materials Science

昨今、機械学習が社会的にも大きな注目を集めている。機械学習の物質科学研究への応用の可能性も盛んに研究されており、多くの有望な結果が報告されている。背景には、この考え方が、基礎科学の産業応用を加速させるうえでのカギとなるという期待感がある。当部門では、実験と数値計算をデータ科学的手法によって統合し、電子相関の理解に基づいて、革新的な機能を持つ材料の物性予測・探索手法を開発することを目的としている。実験結果と数値計算結果の単純な比較や実験の理論計算による解釈にとどまらず、両者を同時に用いることによって、実験・数値計算それぞれ単独ではなしえない成果を挙げることを目指している。これによって、スピントロニクス材料、超伝導材料などの探索を進めている。

Recently, machine learning has attracted a lot of social attention. The possibility of applying machine learning techniques to material science research is also actively studied, and many promising and interesting results have been reported. The expectation is that this idea, which is called materials informatics, will be the key to accelerating the industrial application of basic science. The division aims at developing new methods for prediction of physical properties of innovative materials, based on the understanding of electron correlation, by integrating experiments and numerical calculations through data-scientific approaches. While conventionally we have been comparing experimental results with numerical ones, interpreting the former by the latter, the new goal is to achieve something that cannot be done by experiment or numerical calculation alone, by using both of them simultaneously. In this way, we are efficiently searching for a wide variety of new functional materials, such as spintronic materials and superconductors.

乾研究室 Inui Group

研究テーマ Research Subjects

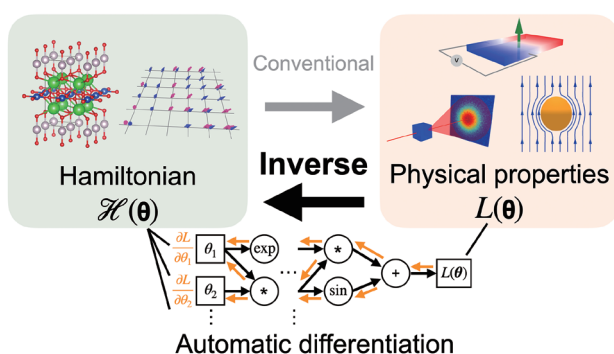
- 1 目的の性質を持つ物質や条件の逆設計手法の開発
Developing inverse design methods to create materials and conditions with specific desired properties
- 2 大量のパラメタを用いた高速なデータ同化
Fast data assimilation with large number of parameters
- 3 物性物理における数値計算研究
Numerical Studies in Condensed Matter Physics



特任准教授 乾 幸地
Project Associate Professor INUI, Koji

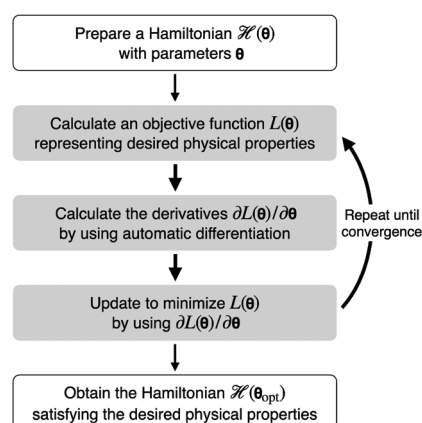
我々は逆解析・逆設計手法の開発に取り組んでいる。一般的な計算科学による物質研究では、特定の物質や条件に対して少数のパラメタを変えながらシミュレーションを実行し、こういったパラメタにおいてほしい状態が実現するのかを探索する。しかしながら、こういった方法では、事前に人が条件を絞り込む必要があるため、新規な物質や状態を見つけることは難しい。本研究室では、逆解析・逆設計を用いたアプローチによって、先にほしい性質を決め、それが実現する系を求める手法の開発を行っている。特に、機械学習でよく使われている自動微分による大量のパラメタの制御を用いた研究に力を入れている。こういった逆解析・逆設計を用いることによって、これまで人間が想定出来なかったような新しい物質やメカニズムの発見を目指して研究を進めている。

In our laboratory, we are pioneering the development of inverse analysis and design methods for computational materials research. Traditional approaches typically involve simulations with a limited set of parameters for specific substances or conditions, focusing on identifying parameter regions that achieve desired states. However, this method often falls short in discovering novel substances and states due to its reliance on predefined conditions. To overcome these limitations, we employ inverse design techniques. These begin by defining the desired properties and then identifying systems that can realize these properties. A key aspect of our research is the use of automatic differentiation, a powerful tool frequently utilized in machine learning, which allows for the control of a large number of parameters. By integrating inverse analysis and design, we aim to uncover new substances and mechanisms previously unexplored. This innovative approach holds the potential to revolutionize the field by enabling the discovery of groundbreaking materials and processes.



目的とする物性からそれを実現するモデルを構築する逆問題における手法の概念図。目的の物性を表す関数 L を最適化するように、モデル中の変数 θ を自動微分を用いて最適化します。

Schematic illustration of the method to solve the inverse problem of constructing a model that achieves the desired physical properties. The parameters θ in the model are optimized using automatic differentiation so as to optimize the function L that represents the desired physical property.



自動微分を用いた逆設計アルゴリズムのフローチャート。

Flowchart of the inverse design algorithm by using automatic differentiation.



機能物性研究グループ

Functional Materials Group

機能物性研究グループは、生体現象や、化学反応、駆動された量子物質とナノデバイス等において実現する多彩な非平衡多体現象について俯瞰的な立場から研究を進めることで、その隠れた学理と未知の機能を解き明かし、応用に資することを目的とする。近年、光遺伝学や細胞内物性計測、励起状態や非平衡状態の時間分解測定、ナノスケールの分析・分光測定などの実験法が飛躍的に進歩し、同時に、計算・データ科学による理論解析や、揺らぎの定理やフロッケ・エンジニアリングなど非平衡統計力学の構築が進展している。これら重点的な研究課題に関連した物性研究所の研究者数名がコアメンバーとなり、さらに数名の所員が従来の部門に属しつつ併任として参加する。

The Functional Materials Group (FMG) is a trans-divisional and interdisciplinary research group aimed at unraveling the underlying principles and unknown functionalities of diverse non-equilibrium many-body phenomena. These phenomena manifest in biological processes, chemical reactions, driven quantum materials, and nanodevices. The group conducts comprehensive research to contribute to the understanding and practical application of these phenomena. In recent years, there have been significant advancements in experimental techniques such as optogenetics, intracellular measurements, time-resolved measurements of non-equilibrium excited states, and spectroscopic measurements at the nanoscale. At the same time, there have been notable developments in computational and data science, as well as in non-equilibrium statistical mechanics. Several ISSP researchers join the FMG as core members, while other members participate as concurrent members. Moreover, as a joint-use/research center, the FMG actively invites external researchers to collaborate on new subjects, serving as an open platform for such collaborations.

グループ主任 井上 圭一
Leader INOUE, Keiichi

秋山研究室 Akiyama Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 利得スイッチ短パルス半導体レーザーと超高速非平衡非線形の光物性
Gain-switched short-pulse semiconductor lasers and ultrafast non-equilibrium non-linear optical physics
- 2 半導体レーザーデバイス・モジュール・システムの開発と応用
Development and applications of semiconductor-laser devices, modules, and systems
- 3 宇宙用の先端太陽電池の高効率エネルギー変換と詳細平衡限界物理
High-efficiency energy conversion and detailed-balance-limit physics in advanced space solar cells
- 4 発光計測標準、ホタル生物発光、ロドプシン・ラマン分光
Luminescence measurement standards, firefly bioluminescence, rhodopsin Raman spectroscopy



教授 秋山 英文
Professor AKIYAMA, Hidefumi

専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.



助教 小林 真隆
Research Associate
KOBAYASHI, Masataka

半導体量子ナノ構造の光物性、半導体レーザーや太陽電池のデバイス物理、ホタル生物発光などを、レーザー分光・顕微分光・光学計測技術や半導体結晶成長・微細加工を用いて研究している。

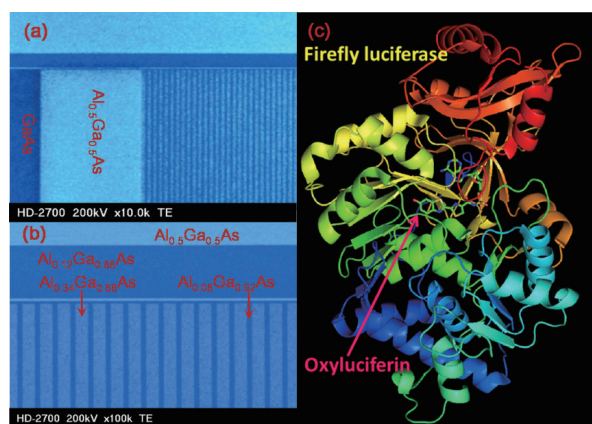
半導体レーザーに対して、極端に強い励起を短時間だけ加え、極端非平衡状態を生み出し、フェムト秒短パルス発生限界を迫る研究、宇宙用の先端太陽電池の損失機構を調べ変換効率限界を物理的に理解する研究、高品質な半導体量子構造の量子力学的な光学物性、低次元性、電子正孔系多体問題、半導体レーザー物理、結晶成長、物質科学の研究などを広い興味から行っている。

光学実験技術として、微弱発光を高感度検出する技術、絶対量を定量計測する技術、ナノ構造の透過吸収を計測する技術、顕微分光や画像計測の技術を開発している。それらの技術に応用し、ホタル生物発光や生物学課題を、生物学・化学・理論の専門家や民間会社と共同で研究している。

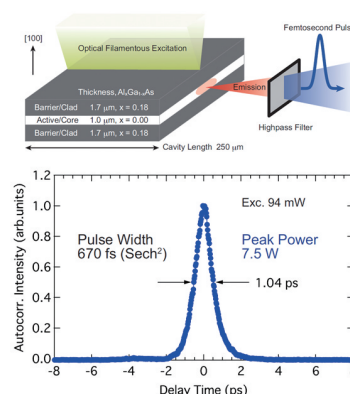
Advanced laser spectroscopy on the basis of lasers and microscopy is developed and applied to semiconductor quantum wires and other nano-structures, in order to understand and control their optical properties quantum mechanically.

Pico- and femto-second pulse generation directly from gain-switched semiconductor lasers is studied intensively to understand the pulse dynamics and the shortest-pulse limit. High-quality III-V-semiconductor space solar cells and their internal loss rates and mechanisms are also studied. We make the world thinnest and cleanest quantum-wire semiconductor lasers that have superior laser performances such as low threshold currents. Experimental findings and problems provide us fruitful physics subjects related to 1D physics, many-body physics, lasers, solar cells, crystal growth, material science, and semiconductor device physics and engineering.

We are developing experimental techniques such as sensitive luminescence detection, absolute luminescence-yield measurements, transmission/absorption measurements of single nano-structures, micro-spectroscopy, imaging, and solid-immersion microscopy. Some of these techniques have been applied to study of bioluminescence of fireflies, jelly fish, and sea fireflies as well as luminol chemiluminescence.



100 周期 T 型量子細線半導体レーザー (a,b) とホタルルシフェラーゼ (c) の構造
Nano-structures of 100 T-shaped quantum-wire semiconductor laser (a,b) and firefly luciferase protein (c).



利得スイッチ半導体レーザーからのフェムト秒パルス発生
Direct fs pulse generation from a gain-switched semiconductor laser.



研究テーマ Research Subjects

- 1 光受容型膜タンパク質ロドプシンの分子機能メカニズムの機能解析および分光研究
Functional and spectroscopic studies on the mechanism of molecular function of photoreceptive membrane proteins, rhodopsins
- 2 先端的分光計測法の生体分子研究への応用
Application of advanced spectroscopy for biomolecular study
- 3 ゲノムビッグデータをもとにした新奇光受容型タンパク質探索
Exploration of novel photoreceptive proteins using genome big data
- 4 機械学習法と実験自動化を用いた生体分子の機能決定因子の解明とそれにもとづく新規機能性分子開発
Elucidation of functional determinant factors of biomolecules and the development of novel functional molecules using machine learning methods and experimental automation



准教授 井上 圭一
Associate Professor INOUE, Keiichi

専攻 Courses

理学系化学 新領域物質系
Chem., Sci. Adv. Mat., Frontier Sci.



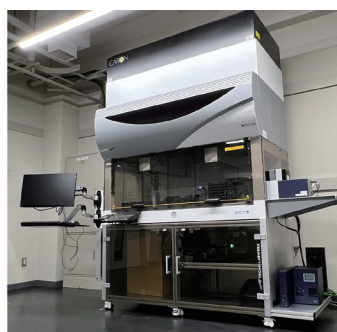
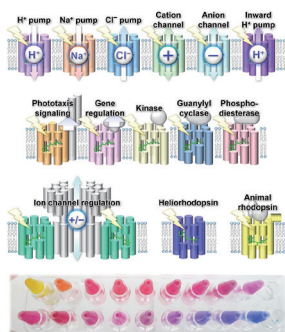
助教 永田 崇
Research Associate
NAGATA, Takashi



特任助教 加藤 善隆
Project Research Associate
KATO, Yoshitaka

多くの生物は太陽光を、自身の生理活動のためのエネルギー源や、外界の環境変化を知覚するための情報源として利用する。そしてこのときに中心的な役割を果たすのが、多様な光受容タンパク質である。

本研究室では、それら多様な光受容タンパク質の機能発現メカニズムを統一的に明らかにすることを目的とし、レーザー時間分解分光実験や振動分光実験などを通じて、高次複雑系である光受容タンパク質分子の化学反応素過程を調べる研究を行っている。さらに電気生理学実験や、生化学的手法と組み合わせることで、原子・分子レベルから細胞・個体レベルにおよぶ多階層的な理解を目指している。そして、これらの知見をもとに、光遺伝学などの応用を目標とした機能性生体分子の開発にも取り組む一方で、近年の急速なゲノム解析技術の発展がもたらすゲノムビッグデータをもとに、新奇な光生物学的現象とそれに関わる分子群の探索研究や機械学習法ならびに実験自動化法の開発を行っている。

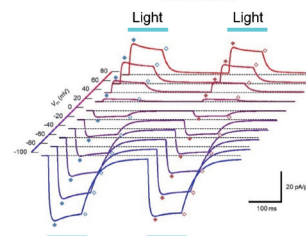
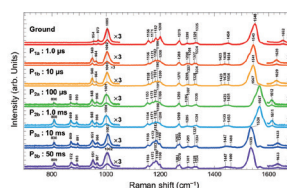
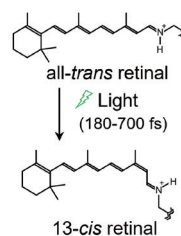
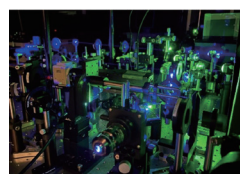


多様な機能を持つ微生物ロドプシン（左上）とその精製タンパク質試料（左下）。タンパク質機能解析用自動化実験ワークステーション（右）。

Microbial rhodopsins with a variety of functions (top left) and the purified protein samples (bottom left). Automated experimental workstation for protein functional analysis (right).

Most living organisms use sun light as energy source for their biological activity and information source to recognize environmental change. In this photobiological events, a wide variety of photoreceptive proteins play the central role.

Our research aims unified understanding of the mechanism of biomolecular functions of various photoreceptive membrane proteins called “rhodopsins”. The chemical elementary process of these supra complex photoreceptive proteins is studied by time-resolved laser spectroscopy and vibrational spectroscopy, and we are promoting further research by combining biochemical and electrophysiological techniques to achieve multi-layer understanding from atomic and molecular to cellular and individual levels. Furthermore, whereas we are developing novel artificial biomolecules for the application to optogenetics and so on, based on the fundamental insights, exploration studies of new photobiological phenomena and related molecular groups, and developments of machine learning technology and experiment automation methods are being conducted with genome big data accompanying the development of genome analysis technology in recent years.



独自光学系によるロドプシンの時間分解共鳴ラマン分光（上）およびロドプシン分子内におけるレチナールの光異性化過程（左下）。ホ乳類細胞に発現させたチャネルロドプシンの光電流（右下）。

Time-resolved resonance Raman spectroscopy of rhodopsin using the original optical system (top) and photo-isomerization process of retinal in rhodopsin (bottom left). Photo currents of ChR2 expressed in mammalian cells (bottom right).



岡研究室 Oka Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 量子物質のフロッケ・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.



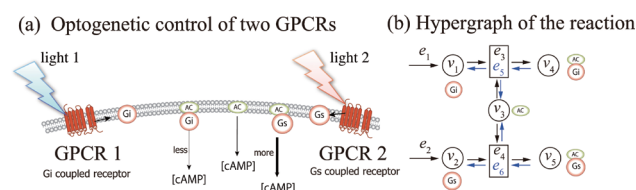
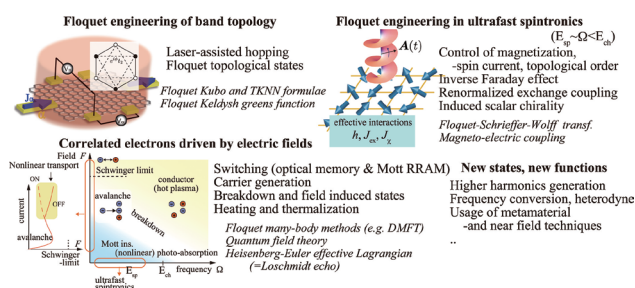
助教 沼澤 宙朗
Research Associate
NUMASAWA, Tokiro



特任助教
チャウドリー 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。中でもフロッケ・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.



量子物質のフロッケ・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).

フロッケ・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

研究テーマ Research Subjects

- 1 非平衡統計力学的アプローチによる物質中の電子移動反応の理解
Understanding electron transfer reactions in materials using a non-equilibrium statistical mechanics approach
- 2 物質中の水素・ミュオンの量子状態
Quantum states of hydrogen and muon in a material
- 3 電子格子相互作用の第一原理計算
Electron-phonon couplings from first principles
- 4 超伝導体の第一原理計算
First-principles simulation of superconductors



教授 杉野 修
Professor SUGINO, Osamu

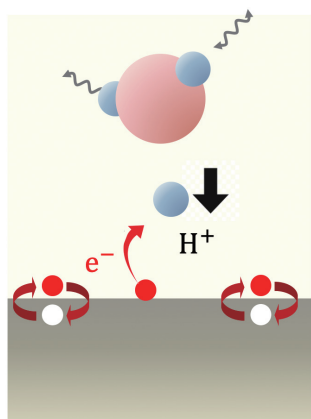
専攻 Course

理学系物理学

Phys., Sci.

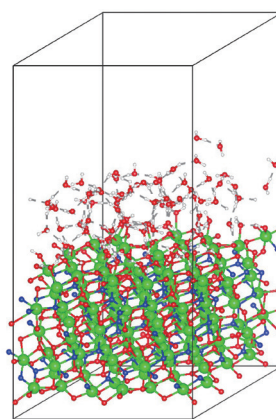
電子とイオンが運動して起こる化学反応によるエネルギー変換過程を、非平衡運動論の枠組みで捉えるための研究を行っている。今回は、プロトンが電極水溶液界面において電子およびフォノンを励起しながら運動エネルギーを失って表面に吸着する Volmer 過程を、非平衡グリーン関数法の枠組みで探った。本計算は、先行研究を拡張してプロトンの運動をあらわに考慮したものになっている。従来格子摩擦が支配的だと考えられてきたが、電極での電子正孔対を励起することで起こる電子摩擦が同様に重要であることが分かった。燃料電池等で起こるエネルギー変換を捉え直す必要性を示唆する結果である。目下、第一原理計算に基づいて現実系により忠実に反映したモデルを用いた研究を行っている。

This study explores energy conversion processes driven by chemical reactions involving electrons and ions within the framework of non-equilibrium kinetics. Specifically, the Volmer process, where protons lose kinetic energy and adsorb onto the surface while exciting electrons and phonons at the electrode-solution interface, was examined using the non-equilibrium Green's function method. This calculation extends previous research by explicitly considering proton motion. Traditionally, lattice friction has been considered dominant, but our findings reveal that electron friction, caused by the excitation of electron-hole pairs at the electrode, is equally significant. These results suggest the need to reconsider energy conversion processes occurring in fuel cells. Currently, research is being conducted using models that more faithfully reflect real systems based on first-principles calculations. This approach aims to provide a more accurate understanding of the mechanisms involved in energy conversion processes, potentially leading to more efficient fuel cell designs and other applications in the field of energy technology.



電極水溶液界面での電子移動反応の非平衡ダイナミクス。格子振動励起と同様に電子励起（電子摩擦効果）が重要であることを示唆している。

Non-equilibrium dynamics of electron transfer reactions at the electrode-aqueous solution interface. It suggests that electron excitation (electron friction effect) is as important as vibrational excitations.



ドーパされたジルコニア上の水のシミュレーション。第一原理計算と機械学習の組み合わせにより長時間シミュレーションが可能になった。

Simulation of liquid water interfaced with a doped zirconia surface. The first-principles calculation was extended to long-term simulation owing to the machine learning technique.



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