

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.

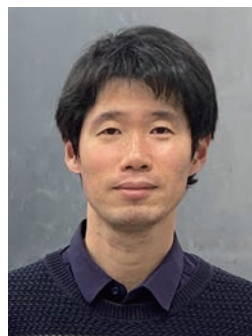
Each group in this division pursues its own research on synthesis of new materials and high quality samples, or on precise measurements of electric, magnetic, and thermal properties, based on their own free ideas. Their main subject is to elucidate various phenomena which emerge as a concerted result 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 量子整流現象：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
Quantum rectification effect: Nonreciprocal transport, superconducting diode effect and bulk photovoltaic effect
- 3 量子相転移：電界誘起超伝導、トポロジカル相転移、磁性制御等
Quantum phase transition: Electric-field-induced superconductivity, topological phase transition, magnetic order control etc.
- 4 原子層薄膜の量子測定
Quantum measurements of two-dimensional materials



准教授 井手上 敏也
Associate Professor IDEUE, Toshiya

専攻 Course

工学系物理学

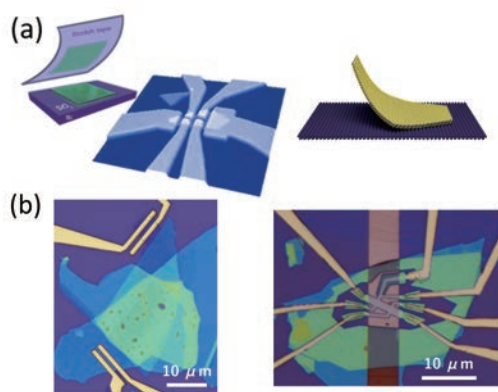
App. Phys., Eng.



助教 田中 未羽子
Research Associate
TANAKA, Miuko

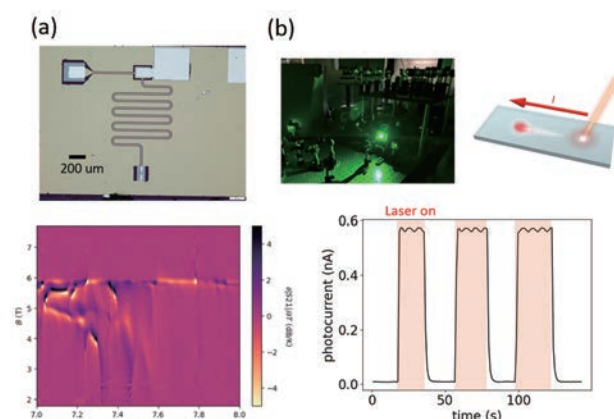
原子層数層からなる2次元物質は物質科学の新しい舞台として近年大きな注目を集めている。これらは3次元結晶にはないユニークな物性を示すことに加え、デバイス化や電場・磁場・圧力などの外場印加、電気化学的手法、曲率構造やヘテロ界面/捻り積層界面の作製等によって物質の構造や電子状態、対称性を自在に制御可能であり、それを反映した特徴的機能性を創出することができる。本研究室では、そのような2次元原子層物質特有の電気伝導特性や超伝導物性、光学特性の発見と理解によって、物質科学のフロンティアを開拓することを目指している。電荷やスピン、励起子といった様々な量子自由度の整流効果や量子相制御、高周波を用いた量子測定に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

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

長田研究室 Osada Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 有機ディラック電子系のトポロジカル物性
Topological properties of organic Dirac fermion systems
- 2 次元物質の電子構造と量子輸送現象
Electronic structure and quantum transport in two-dimensional materials
- 3 層状物質の強磁場電子物性に対する超薄膜化による量子サイズ効果
Quantum size effects through ultra-thinning on electronic properties of layered conductors under strong magnetic fields
- 4 層状物質の角度依存磁気伝導と層間コヒーレンス
Angle-dependent magnetotransport and interlayer coherence in layered conductors



教授 長田 俊人
Professor OSADA, Toshihito

専攻 Course

工学系物理工学

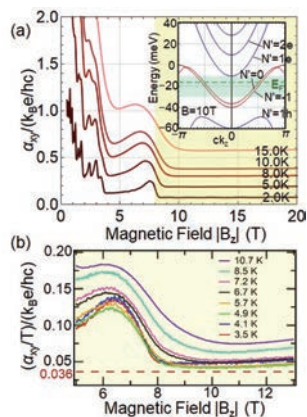
App. Phys., Eng.



助教 田縁 俊光
Research Associate
TAEN, Toshihiro

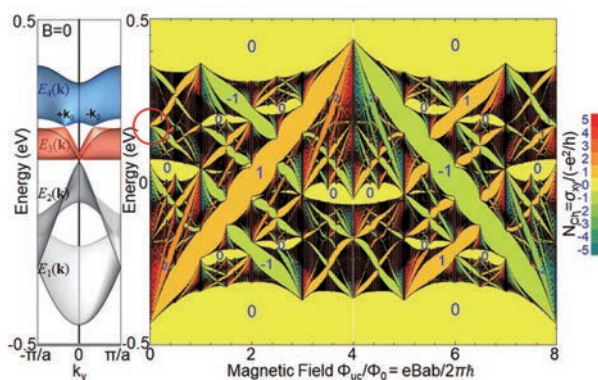
二次元（原子層）物質、トポロジカル物質、人工ナノ構造を対象として、強磁場・低温・高圧環境下の電気伝導や熱電効果の実験的研究を行うことにより、新しい電子状態やトポロジカル現象、量子輸送現象の探索・解明・制御を目指している。主な手段は電子線リソグラフィー等の微細加工技術を用いた原子層積層構造やナノ構造の素子形成、磁場中2軸試料回転、40 T級小型パルス磁石による強磁場実験であり、簡単な理論的考察も並行して行う。近年は有機ディラック電子系や τ 型有機導体におけるトポロジカル電子状態（対称性の破れた量子ホール状態、トポロジカル絶縁相）やトポロジカル輸送現象（量子化熱電ホール効果、非線形異常ホール効果）、振れ積層グラフェンや黒リン超薄膜の量子伝導（モアレ弱局在）、グラファイトの超薄膜化による量子サイズ効果（磁場誘起相転移、量子ゾンドハイマー効果）に関する研究を行っている。

Osada group aims to search, elucidate, and manipulate novel electronic states, topological phenomena, and quantum transport, in two-dimensional materials (atomic layers), topological materials, and artificial nanostructures. This is achieved through electric and thermoelectric transport measurements conducted under strong magnetic fields, low temperatures, and high-pressure environments. The main experimental techniques employed include device fabrication of two-dimensional materials and nanostructures using microfabrication techniques (such as electron-beam lithography), precision double-axial sample rotation in magnetic fields, and high magnetic field measurements using miniature pulse magnets with a field strength of up to 40 T. Simple theoretical studies are also conducted concurrently. Recently, our research has focused on topological electronic states (including symmetry-broken quantum Hall states and topological insulator states) and topological transport phenomena (such as quantized thermoelectric Hall effect and nonlinear anomalous Hall effect) in organic Dirac fermion systems and τ -type organic conductors. We have also investigated quantum transport in twisted bilayer graphene and ultrathin films of black phosphorus (such as moire weak localization), as well as the quantum size effect through ultra-thinning on electronic properties of graphite (including magnetic-field-induced electronic phase transitions and quantum Sondheimer effect).



(a) グラファイトの量子極限におけるランダウ準位とトポロジカル半金属的な量子化熱電ホール効果のモデル計算。(b) グラファイトの熱電ホール伝導度の実験結果。熱電ホールプラトーが観測された。

(a) Model calculations of Landau levels and topological-semimetal-like quantized thermoelectric Hall effect at the quantum limit in graphite. (b) Experimental results of thermoelectric Hall conductivity in graphite. The thermoelectric Hall plateau was observed.



擬2次元有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ のエネルギー準位の磁場依存性（Hofstadter バタフライ）。エネルギーギャップはChern数によって彩色されている。

(a) Magnetic field dependence of the energy levels (Hofstadter butterfly) for the quasi-two-dimensional organic conductor α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$. The energy gaps are colored by the Chern numbers.

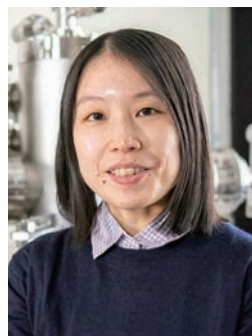


https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/osada_group.html

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

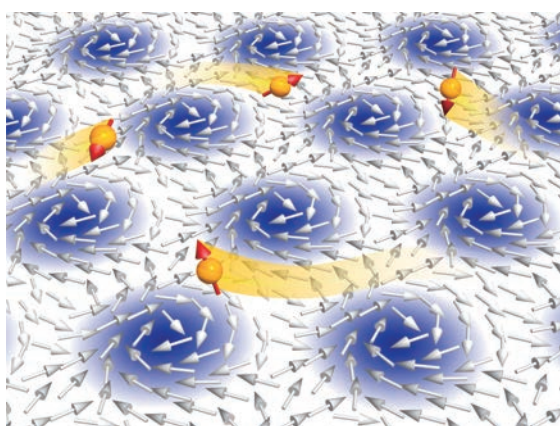
Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 浦井 瑞紀
Research Associate
URAI, Mizuki

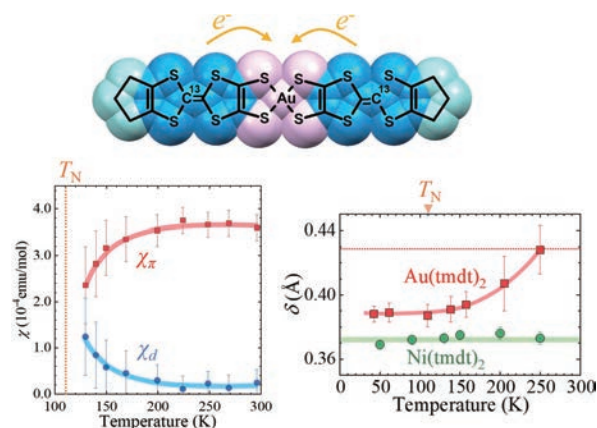
物質中に存在する多数の電子が強く相互作用する系では、化学的性質（元素の種類や結晶構造）や物理的環境（温度・磁場・圧力）を僅かに変化させることで様々な電子相が発現する。本研究室では、物質合成、磁化や電気伝導などマクロな物性測定、そして散乱実験や核磁気共鳴など微視的な実験手法を駆使し、電子が持つ電荷・スピン・軌道自由度が織りなす相転移現象やトポロジカル構造の研究を行っている。特に結晶中の分子軌道に着目することにより、現象の背後にある物理の解明と新しい電子物性の設計を目指す。研究対象は、遷移金属化合物や希土類合金などの無機結晶に加え、有機分子からなる分子性導体など幅広い物質を扱っている。具体的には、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



反強磁性金属 Au(tmdt)_2 (上) において核磁気共鳴測定 (左下) と放射線 X 線単結晶構造解析 (右下) の結果から、分子内電荷移動に伴って磁気相転移が生じることを見出した。

Nuclear magnetic resonance measurements (bottom left) and synchrotron X-ray single-crystal structure analysis (bottom right) in the antiferromagnetic metal Au(tmdt)_2 (top) reveal a magnetic phase transition induced by intramolecular charge transfer.



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

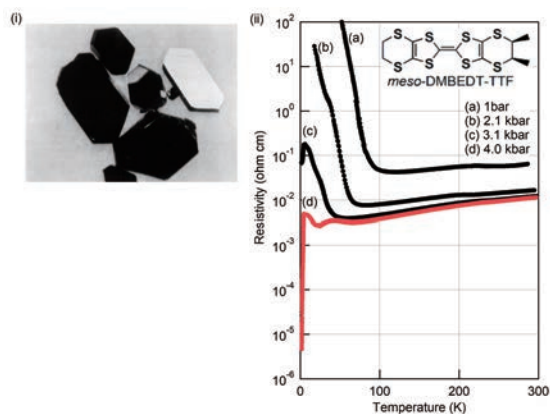
Chem., Sci. Adv. Mat., Frontier Sci.

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。

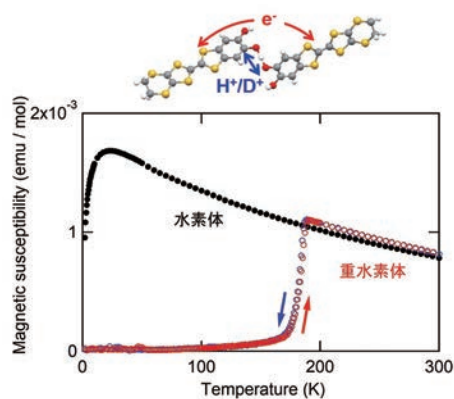
Novel organic superconductors: (i) single crystals of Mott-type κ -ET₂Cu(NCS)₂ and (ii) electrical resistivities under pressures for charge-ordered-type β -(*meso*-DMBEDT-TTF)₂PF₆.

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).

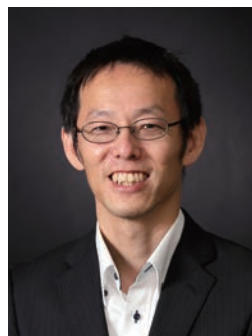


https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/mori_group.html

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

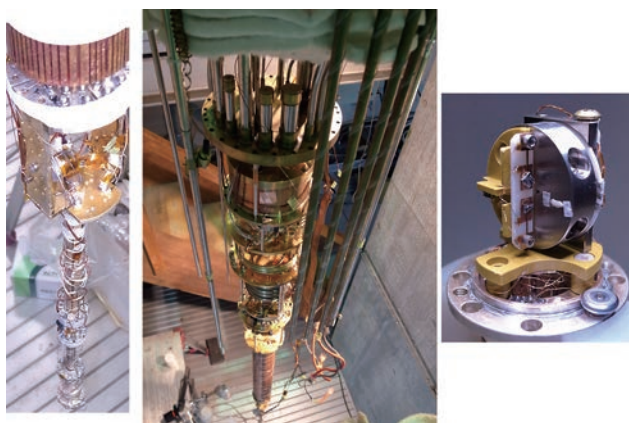
Adv. Mat., Frontier Sci.



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。

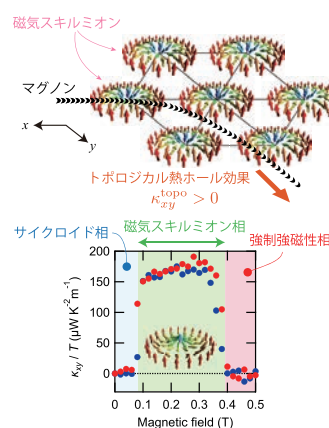


物性研の核断熱消磁冷凍機。超低温 (1 mK)・高磁場 (10 T) の実験が可能。左下挿入図が実験空間拡大写真。右下挿入図が超低温トルク測定用カンチレバー。

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) 磁気スカーマイオン格子によるマグノンに対するトポ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。磁気スカーマイオン相でのみ、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 cyclodial (blue) and the forced-ferromagnetic (pink) phases.



ドリチコ研究室 Drichko Group



外国人客員教授 ドリチコ ナタリア
Visiting Professor DRICHKO, Natalia

私の研究テーマは、電子間の強い相互作用と磁氣的相互作用の結果として生じる物質の状態である。非従来型の超伝導にもつながる電子間の相互作用が、大きさによって磁性絶縁体を生み出すこともある。こうした効果は無機結晶で研究されてきたが、分子結晶が示す量子双極子液体のような物質のエキゾチックな状態にも興味を持って研究を進めている。

物質の基本的な性質を研究する方法の一つは、励起スペクトルを測定することである。分子や結晶のような原子からなる系では、振動を励起することによって、原子の質量や化学結合の強さに関する情報を得ることができる。同様に、電子と磁気の自由度を励起することで、物質中の電子とスピンの相互作用を知ることができる。非弾性光散乱、いわゆるラマン散乱を用いて、振動、電子、磁気励起を研究している。

My research interests are states of matter which arise as a result of strong interactions between electrons and related magnetic interactions. The same interactions between electrons, which lead to unconventional superconductivity, can produce a magnetic insulator when tuned to be somewhat stronger. While more traditionally these effects are found in atomic crystals, I am also interested in these exotic states of matter demonstrated by molecular crystals, which can show also exotic states such as quantum dipole liquid.

One of the ways to study fundamental properties of materials is to measure their excitation spectra. We can obtain information about masses of atoms and strength of chemical bonds in a system build of atoms, such as a molecule or a crystal, by exciting vibrations. Similarly, we can learn about interactions between electrons and spins in materials by exciting the electronic and magnetic degrees of freedom. Drichko uses inelastic light scattering, so-called Raman scattering, to study vibrational, electronic, and magnetic excitations.

