

凝縮系物性研究部門

Division of Condensed Matter Science

高温超伝導体、有機伝導体、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種々の予期せぬ現象が、物質系を極低温、高圧、強磁場といった「極限環境」に置くことにより見出されてきた。凝縮系物性研究部門では、無機・有機結晶や原子層物質などの新しい物質系を合成し、その物性を極限環境での高度な実験技術を用いて測定することにより、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、極限環境での輸送現象、熱測定、精密磁化、核磁気共鳴などの精密物性測定を行っている。遷移金属酸化物、重い電子系、有機伝導体、原子層物質、トポロジカル物質などの多様な物質を対象に、電子相関、トポロジー、多極子、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 conductors, 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 has 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 search, synthesis and characterization of new materials.

Each group in this division pursues its own research on synthesis of new materials and high quality samples, and precise measurements of transport, thermal, magnetic properties including nuclear magnetic resonance. Their main subject is to elucidate varied phenomena which emerge as a concerted result of strong electron correlation, topology, multipole, and molecular degrees of freedom, in transition metal oxides, heavy electron systems, organic conductors, atomic layer materials, and topological materials.

教授 Professor	瀧川 仁 TAKIGAWA, Masashi	助教 Research Associate	田縁 俊光 TAEN, Toshihiro	特任研究員 Project Researcher	キスワンディ アンディカ オキサリオン KISWANDHI, Andhika Oxalion
教授 Professor	榊原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	助教 Research Associate	藤野 智子 FUJINO, Tomoko	特任研究員 Project Researcher	佐藤 光幸 SATO, Mitsuyuki
教授 Professor	森 初果 MORI, Hatsumi	助教 Research Associate	武田 晃 TAKEDA, Hikaru	特任研究員*2 Project Researcher	ハンシェン ツアイ HANSHEN, Tsai
特任教授*1 Project Professor	中辻 知 NAKATSUJI, Satoru	特任助教 Project Research Associate	出倉 駿 DEKURA, Shun	特任研究員*2 Project Researcher	フェン ジリ FENG, Zili
准教授 Associate Professor	長田 俊人 OSADA, Toshihito	特任助教*2 Project Research Associate	富田 崇弘 TOMITA, Takahiro	特任研究員*2 Project Researcher	レイ マユク クマー RAY, Mayukh Kumar
准教授 Associate Professor	山下 穰 YAMASHITA, Minoru	特任助教*2 Project Research Associate	肥後 友也 HIGO, Tomoya		
		助手 Research Assistant	村山 千壽子 MURAYAMA, Chizuko		
		技術専門員 Technical Associate	内田 和人 UCHIDA, Kazuhito		

*1 理学系研究科物理学専攻および所内量子物質研究グループと兼務。
/ concurrent with Physics Department, Graduate School of Science and Quantum Materials Group

*2 所内兼務。本務は量子物質研究グループ。 / concurrent with Quantum Materials Group

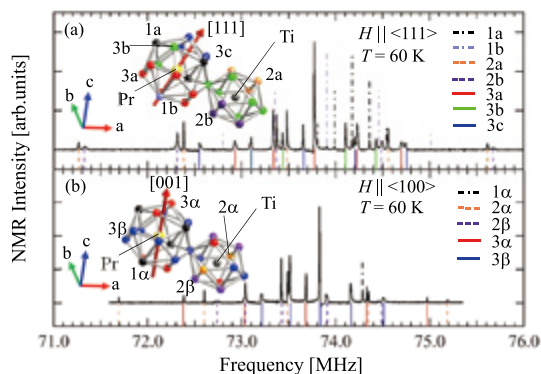
瀧川研究室

Takigawa Group



瀧川 仁
TAKIGAWA, Masashi
教授
Professor

核磁気共鳴法 (NMR) を主な実験手段として、固体内の強い電子間相互作用に起因する現象を研究している。強相関電子系では、超伝導、強 (反強) 磁性、電荷秩序、軌道秩序といった多彩な秩序状態が拮抗しており、磁場・圧力などの外的条件を変えることでこれらの間の量子相転移が起こり得る。原子核は固有の磁気モーメントや電気四重極モーメントを持っており、これらは周囲の電子が作る磁場や電場勾配を感じている。このためNMRは、固体内電子のスピンの、電荷、軌道などの自由度が絡み合って現れる特異な秩序状態や揺らぎの性質を、ミクロに探る有力な実験手段となる。我々は色々な特色を持つパルスNMR測定装置を整備し、低温・強磁場・高圧などの外的環境条件と組み合わせ、遷移金属化合物、希土類化合物や有機固体を対象とした研究を行っている。



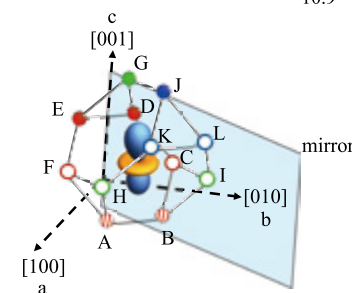
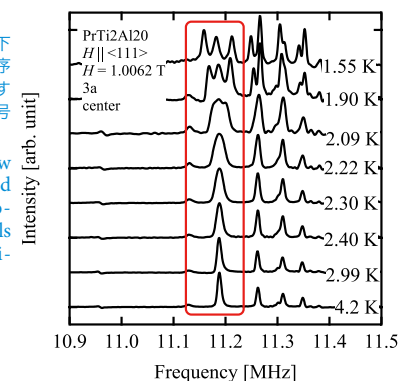
温度 60K、磁場 6.6 テスラにおける希土類化合物 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ 中のアルミニウム (Al) 原子核の NMR スペクトル。プラセオジウム (Pr) イオンは非磁性 2 重項の結晶場基底状態を持ち、低温で強四極子秩序を示す。Pr イオンをカゴ状に取り囲むアルミニウムには結晶学的に異なる 3 つのサイトが存在し、それぞれが $\langle 111 \rangle$ あるいは $\langle 100 \rangle$ 方向の磁場によって非等価なサイトに分かれ、さらにその各々が四重極分裂によって 5 本の NMR 共鳴線を示すため、非常に複雑な NMR スペクトルが現れる。

NMR spectra of Al nuclei in $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}\text{H}$ at the temperature of 60K and the magnetic field of 6.6 tesla. The Pr ions with a non-magnetic doublet ground state in the crystal electric field undergo ferro-quadrupole order at low temperatures. There are three Al sites forming a cage surrounding Pr ions, each of which splits into inequivalent sites under magnetic fields along $\langle 111 \rangle$ or $\langle 100 \rangle$. Each Al site generates five quadrupole split NMR lines, resulting in a complicated NMR spectrum.

We use nuclear magnetic resonance (NMR) as the major experimental tool to investigate exotic phenomena caused by strong electronic correlation in solids. A remarkable feature of strongly correlated electron systems is the competition among various kinds of ordering such as superconductivity, ferro- or antiferromagnetism, charge and orbital order. Quantum phase transitions between these ground states can be caused by changing the external parameters such as magnetic field or pressure. Nuclei have their own magnetic dipole and electric quadrupole moments, which couple to the magnetic field or electric field gradient produced by surrounding electrons. This makes NMR a powerful local probe for microscopic investigation of the exotic order and fluctuations of multiple degrees of freedom of electrons, i.e., spin, charge and orbital. We use various NMR spectrometers in different environment (low temperature, high magnetic field and high pressures) to investigate transition metal compounds, rare earth compounds, and organic solids.

$\langle 111 \rangle$ 方向の磁場下、2 K 以下の低温において、強四極子秩序のために NMR 共鳴線が分裂する。特に 3a サイトからの信号を赤線で囲ってある。

The NMR lines split below 2K under the magnetic field along $\langle 111 \rangle$ due to ferro-quadrupole order. The signals from the 3a sites are indicated by the red box.



NMR 共鳴線の分裂から電荷密度分布の対称性がユニークに決まり、四極子の秩序パラメータが決定された。

The splitting of NMR lines uniquely determines the symmetry of the charge density distribution and the order parameter.

研究テーマ Research Subjects

1. 低次元、フラストレート・スピン系のダイナミクスと量子相転移
Dynamics and quantum phase transitions in low dimensional or frustrated spin systems
2. 特異な超伝導体
Exotic superconductors
3. 強相関電子系における電荷・軌道・多極子の秩序と揺らぎ
Ordering and fluctuations of charge, orbital, and multipoles in strongly correlated electron systems
4. スピン軌道結合電子系における新奇的な秩序
Novel orders in spin-orbit coupled electron systems

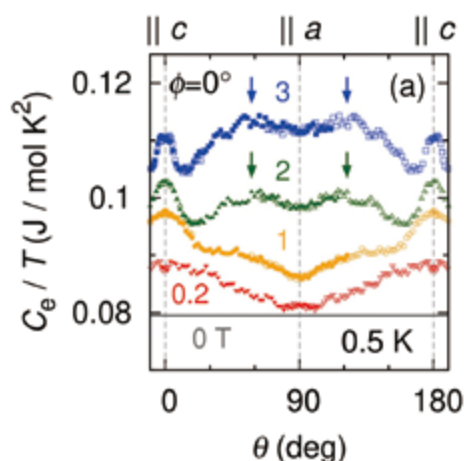
榑原研究室

Sakakibara Group



榑原 俊郎
SAKAKIBARA, Toshiro
教授
Professor

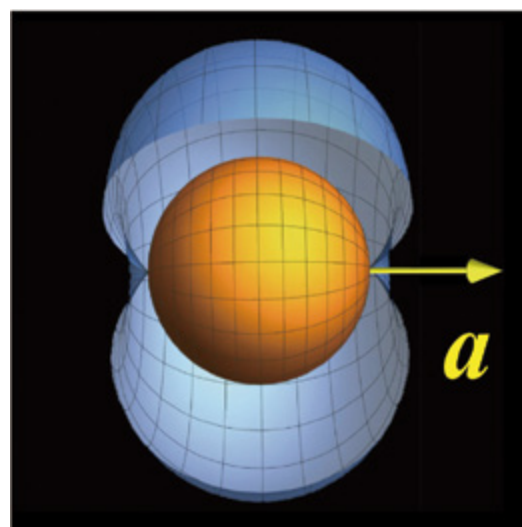
物質の示す磁気現象は広い温度範囲にわたっている。その中で重い電子系などある種の物質系では1ケルビンよりも遙かに低い温度領域で興味深い性質を示す場合がある。このような温度領域では通常の磁気測定手段を適用することが困難なため未開拓の課題も多く、新しい物性現象が期待される。当研究室ではこのような低い特性温度を持つ様々な物質系の磁気物性の研究を行っている。具体的にはf電子化合物や重い電子系、量子スピン系およびフラストレートスピン系などが研究対象で、磁化や比熱測定を主な実験手段として研究している。この目的のために、我々は30ミリケルビンの極低温まで磁化測定が可能な高感度の磁力計や、異方的超伝導体のギャップ構造の特定に有効な角度分解の磁場中比熱測定装置など、独自の装置開発も行っている。



スピン三重項超伝導体 UTe_2 の超伝導状態における比熱の ac 面内での磁場角度依存性。比熱の $\theta=90^\circ$ における極小構造および 120° 付近の肩構造（矢印）は、 a 軸方向のポイントノードを仮定すると説明できる。この結果はノンユニタリーな三重項超伝導が UTe_2 で実現していることを示唆する。

Field-angular dependences of the specific heat of a spin triplet superconductor UTe_2 in magnetic fields rotated in the ac plane. The local minimum of the specific heat at $\theta=90^\circ$ as well as the shoulder structure at intermediate field angle (arrows) can be explained by assuming a point node along the a axis. These results provide evidence for a non-unitary triplet pairing in UTe_2 .

Magnetic phenomena in condensed matter can be observed at a wide range of temperatures. In heavy fermions and certain other systems, interesting magnetic behavior often occurs at low temperatures much below 1 K. Because of difficulty in making magnetic measurements at such low temperatures, little work has been done to date. Our interest is to research those magnetic materials having low characteristic temperatures, such as f-electron compounds, heavy fermions, quantum spin systems, and geometrically frustrated spin systems. To study these systems, we also develop necessary equipment. Equipment we have successfully developed includes: high sensitivity magnetometers which are operable even at extremely low temperatures down to the lowest of 30 mK, and equipment to perform angle-resolved specific heat measurements in a rotating magnetic field. The latter is an effective tool for investigating the nodal structures of anisotropic superconductors.

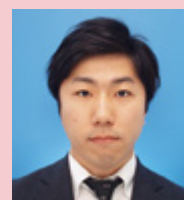


UTe_2 の超伝導ギャップの概略図。 a 軸方向にポイントノードを持つ。

Schematic view of the gap structure of UTe_2 with a point node along the a axis.

研究テーマ Research Subjects

1. 重い電子化合物の磁性と超伝導
Magnetism and superconductivity in heavy electron systems
2. f電子化合物の多極子自由度に由来する秩序と揺らぎ
Multipole orderings and fluctuations in f electron systems
3. フラストレート磁性体の磁化過程
Magnetization of geometrically frustrated magnets
4. 量子スピン系の基底状態
Ground state properties of quantum spin systems

森 初果
MORI, Hatsumi
教授
Professor藤野 智子
FUJINO, Tomoko
助教
Research Associate出倉 駿
DEKURA, Shun
特任助教
Project Research Associate

物質科学は、新しい概念を与える新物質の発見を契機に大きな発展を遂げている。

本研究室では、内部自由度をもつ分子を基盤とし、それら分子が凝縮した分子性物質・システムにおいて、分子自身の個性と、分子間の相互作用による自由度が相関した、特異な機能性（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）の開拓を行っている。

分子性物質の魅力は、1) 多彩な分子内および分子間の自由度が設計・制御可能であること、2) 電子間クーロン相互作用（電子相関）が大きく、電子の波動性（伝導性）と粒子性（磁性）が競合すること、3) 分子が非常に柔らかいため環境および外場応答性が大きく、電場、電界による励起状態を経て特異な機能を発現することなどが挙げられる。

森グループでは、新しい有機超伝導体としてモット型 κ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ や電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ (図1) 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 (図2) を開発した。

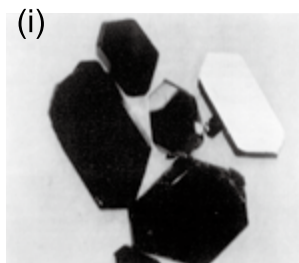


図1. 新規有機超伝導体: (i) モット型 κ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ の単結晶と (ii) 電荷秩序型 β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$ の電気抵抗の圧力依存性。

Fig.1. Novel organic superconductors: (i) single crystals of Mott-type κ - $\text{ET}_2\text{Cu}(\text{NCS})_2$ and (ii) electrical resistivities under pressures for charge-ordered-type β -(*meso*-DMBEDT-TTF) $_2\text{PF}_6$.

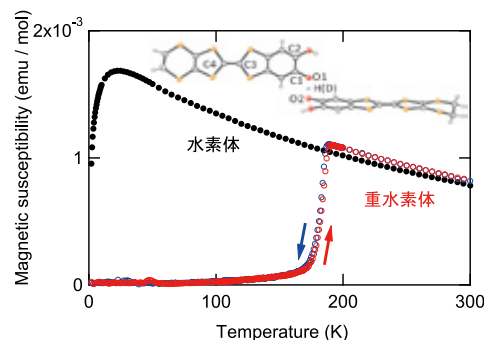
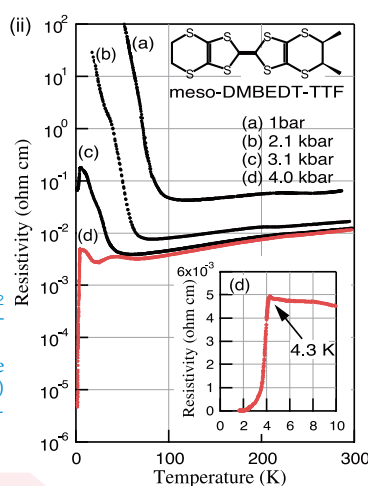


図2. 伝導電子と水素結合プロトンが相関する純有機伝導体 κ - $\text{X}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ ($\text{X} = \text{H}, \text{D}$) において、大きな重水素効果により高温で伝導性および磁性が切り替わる。

Fig.2. Switching behavior of electrical resistivity and magnetism due to large deuterium isotope effect in proton-electron correlated purely organic conductors κ - $\text{X}_3(\text{Cat-EDT-TTF})_2$ ($\text{X} = \text{H}, \text{D}$).

研究テーマ Research Subjects

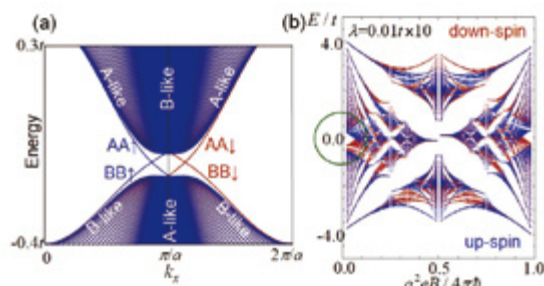
- 分子の自由度を生かした新規有機（超）導体およびプロトン伝導体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for novel organic (super)conductors and proton conductors based upon molecular degree of freedom
- 固体中で電子がプロトン運動と協奏した有機伝導体、金属錯体、誘電体の開発と機能性研究
Development and studies of structural and physical properties for electron-proton coupled molecular functional materials
- 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
- 有機電界効果トランジスタの研究
Study of organic field effect transistor

長田研究室

Osada Group

長田 俊人
OSADA, Toshihito
准教授
Associate Professor田縁 俊光
TAEN, Toshihiro
助教
Research Associate

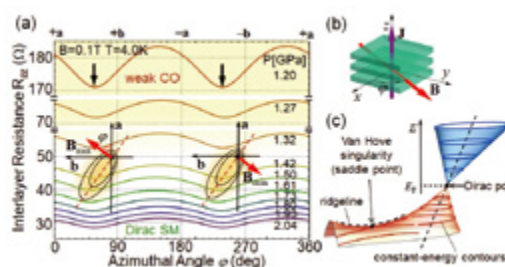
本研究室では、低次元・原子層物質、トポロジカル物質、人工ナノ構造を対象として、強磁場・低温・高圧環境下の量子輸送現象の実験的研究を行うことにより、新しい電子状態や量子伝導現象、トポロジカル現象を探索・解明・制御することを目指している。先端的微細加工・評価装置群を用いた原子層積層構造やナノ構造の素子形成、2軸全磁場方位依存性の精密計測、40T級小型パルス磁石による強磁場計測などを主な実験手段とする。最近では振れ積層グラフェンや黒リン超薄膜の量子伝導、 α -(BEDT-TTF)₂I₃等の有機導体におけるトポロジカル電子状態や輸送現象、超薄膜グラファイトの磁場誘起電子相転移に関する研究を重点的に行っている。



(a) スピン軌道相互作用によりギャップが生じた有限幅で端のある τ -型有機導体のバンド構造。端に沿ってスピン偏極したヘリカルエッジ状態がギャップ内に現れ、系はトポロジカル絶縁体となる。(b) スピン軌道相互作用のある τ -型有機導体の磁場中エネルギー準位(ホフスタッター・バタフライ)。ゼーマン効果を除いた図であるが、軌道効果によるスピン分裂が見られる。ゼロ磁場のギャップはスピン毎に ± 1 のチャーン数を持つギャップであることがわかる。

(a) Band dispersion of the τ -type organic conductor with a finite width and a gap due to the spin-orbit coupling. There appear the spin-polarized helical edge states along edges, so that the system is a topological insulator. (b) Energy levels of the τ -type organic conductor with a finite spin-orbit coupling under magnetic fields (Hofstadter butterfly). Although no Zeeman effect is considered, we can see additional spin splitting with the orbital origin. The energy gap at zero field corresponds to the gap of each spin sub-band with the Chern number of ± 1 .

Osada group aims to search, elucidate, and control novel electronic states, quantum transport phenomena, and topological phenomena in low-dimensional/atomic layer materials, topological materials, and artificial nanostructures, by experiments on quantum transport phenomena under high magnetic field, low temperature, and high pressure environments. Main experimental tools include device fabrication of atomic layers, their complex stacks, and artificial nanostructures using advanced microfabrication/evaluation equipment, precision measurement of double-axial magnetic field angle dependence, high magnetic field measurement with 40T-class miniature pulse magnet. Recently, we have focused on quantum transport in twisted bilayer graphene and black phosphorus ultrathin films, topological electronic states and transport phenomena in organic conductors such as α -(BEDT-TTF)₂I₃, and magnetic field-induced electronic phase transition in ultrathin graphite.



層間磁気抵抗によるバンド構造の異方性の研究手法の適用例。(a) 層状有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃の層間磁気抵抗の面内磁場方位依存性。弱い電荷秩序状態から2次元ディラック半金属状態まで、圧力を変えて測定したものの、傾斜ディラック・コーンの主軸に直交する磁場方位で抵抗の極小が起こる。(b) 実験の配置。(c)

傾斜ディラック・コーンと鞍点状のファン・ホーブ特異点を持つ α -(BEDT-TTF)₂I₃のバンド構造の模式図。低温ではフェルミ準位のあるディラック・コーンの異方性が、高温では熱励起キャリアにより状態密度の大きいファン・ホーブ特異点の異方性が測定できる。

Application example of the method for studying the anisotropy of the band structure by the interlayer magnetoresistance. (a) In-plane magnetic field orientation dependence of interlayer magnetoresistance of a layered organic conductor α -(BEDT-TTF)₂I₃. Measured from weak charge-ordered state to two-dimensional Dirac semimetal state under different pressure. A local minimum of resistance occurs in the magnetic field orientation perpendicular to the principal axis of the tilted Dirac cone. (b) Arrangement of experiments. (c) Schematic diagram of the band structure of α -(BEDT-TTF)₂I₃ with a tilted Dirac cone and a van Hove singularity (saddle point). The anisotropy of Dirac cone where the Fermi level is located can be measured at low temperatures, and the anisotropy of the van Hove singularity with high density of states at high temperatures due to thermally excited carriers.

研究テーマ Research Subjects

1. 有機ディラック半金属のトポロジカル物性
Topological properties of an organic Dirac semimetal
2. 原子層物質およびファンデルワールス積層系の電子構造と量子伝導
Electronic structure and quantum transport in atomic layers and their van der Waals stacks
3. 層状トポロジカル物質の量子伝導現象
Quantum transport phenomena in layered topological materials
4. 層状物質の角度依存磁気伝導と層間コヒーレンス
Interlayer coherence and angle-dependent magnetotransport in layered conductors
5. 薄膜グラファイトの磁場誘起電子相転移
Magnetic-field-induced electronic phase transitions in thin-film graphite

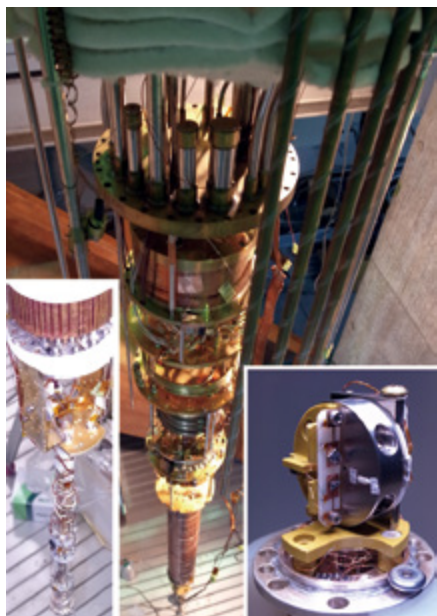
山下研究室

Yamashita Group

山下 穰
YAMASHITA, Minoru
准教授
Associate Professor武田 晃
TAKEDA, Hikaru
助教
Research Associate

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いて、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。

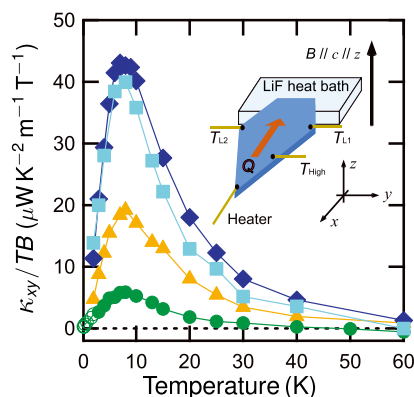


物性研の核断熱消磁冷凍機。超低温 (1 mK)・高磁場 (10 T) の実験が可能。左下挿入図が実験空間拡大写真。右下挿入図が超低温トルク測定用カンチレバー。

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 using NMR measurements.



Cdカペラスサイト石で観測された熱ホール伝導率 κ_{xy} の温度依存性。温度依存性はよく似ているが、試料ごとの縦熱伝導率の大きさに対応して κ_{xy} の大きさも変わることが分かった。挿入図は実験セットアップの模式図。

The temperature dependence of the thermal Hall conductivity κ_{xy} of Cd kapellasite samples. Although the temperature dependence of all samples are similar, the magnitude of κ_{xy} is found to depend on the magnitude of the longitudinal thermal conductivity. The inset shows the setup of the measurements.

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