

国際超強磁場科学研究施設

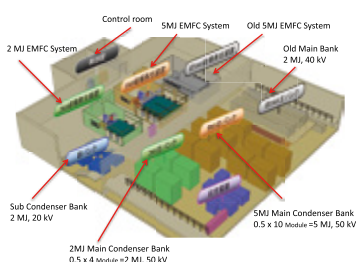
International MegaGauss Science Laboratory

当施設では、パルスマグネットによって強力な磁場を発生し、様々な物質（半導体、磁性体、金属、絶縁体など）の性質を変化させてその電子状態を調べている。また、極限的な強磁場を用いた新物質相の探索も行っている。非破壊的に発生する磁場は80テスラ程度まで、破壊的な手法（一卷コイル法および電磁濃縮法）では1000テスラ程度までが発生可能である。非破壊パルスマグネットは、精密な物性計測（電気伝導、光学、磁化測定など）、他の極限物理環境（高圧、低温）と組み合わせた実験、また国内外の強い磁場を必要とする物性科学の研究に幅広く利用されている。世界最大の直流発電機（210メガジュール）を用いた超ロングパルス（1～10秒程度）や非破壊100テスラ磁場発生の開発も強力に推進している。他方、破壊型装置では、1000テスラの超強磁場という量子極限状態での新しい物性を探索する研究を行っている。

The aim of this laboratory is to study the physical properties of matter (such as semiconductors, magnetic materials, metals, insulators) under ultra-high magnetic field conditions. Such a high magnetic field is also used for realizing the new material phase and functions. Our pulse magnets can generate up to 80 Tesla by non-destructive way, and up to 1000 Tesla by destructive (the single turn coil and the electro-magnetic flux compression) methods. The former serves for the physical precision measurements (the electro-conductance, the optics, and the magnetization). The multiple extreme physical conditions combining the strong magnetic field with ultra-low temperature and ultra-high pressure are also available, and are open for domestic as well as for international scientists. The magnet technologies are intensively devoted to developments for the quasi-steady long pulse magnet (an order of 1-10 sec) energized by the world largest DC generator (210 MJ), and also to a 100 Tesla class nondestructive magnet. Whereas, the explosive pulse magnets capable of generating 1000 Tesla are oriented for new horizons in material science under such extreme quantum limit conditions.

教授(施設長)	金道 浩一	助教	三田村 裕幸	技術専門員	川口 孝志
Professor (Director)	KINDO, Koichi	Research Associate	MITAMURA, Hiroyuki	Technical Associate	KAWAGUCHI, Koushi
准教授	徳永 将史	助教	中村 大輔	技術専門職員	澤部 博信
Associate Professor	TOKUNAGA, Masashi	Research Associate	NAKAMURA, Daisuke	Technical Associate	SAWABE, Hironobu
准教授	松田 康弘	助教	三宅 厚志	技術専門職員	松尾 晶
Associate Professor	MATSUDA, Yasuhiro	Research Associate	MIYAKE, Atsushi	Technical Associate	MATSUO, Akira
准教授	小濱 芳允	助教	池田 暁彦	学術支援職員	大園 一実
Associate Professor	KOHAMA, Yoshimitsu	Research Associate	IKEDA, Akihiko	Technical Associate	OHATA, Katsumi
准教授*	長田 俊人	助教	石川 孟	特任研究員	栗原 綾佑
Associate Professor	OSADA, Toshihito	Research Associate	ISHIKAWA, Hajime	Project Researcher	KURIHARA, Ryosuke
教授(客員)	今中 康貴	助教	野村 肇宏	特任研究員	坂井 義和
Visiting Professor	IMANAKA, Yasutaka	Research Associate	NOMURA, Toshihiro	Project Researcher	SAKAI, Yoshikazu
准教授(客員)	井原 慶彦	特任助教	今城 周作	特任研究員	ヤン ツォウ
Visiting Associate Professor	IHARA, Yoshihiko	Project Research Associate	IMAJO, Shusaku	Project Researcher	YANG, Zhuo
		特任助教	木下 雄斗	学振特別研究員	石井 裕人
		Project Research Associate	KINOSHITA, Yuto	JSPS Research Fellow	ISHII, Yuto
				学振特別研究員	松井 一樹
				JSPS Research Fellow	MATSUI, Kazuki

* 所内兼務。本務は凝縮系物性研究部門。 / concurrent with Division of Condensed Matter Science



電磁濃縮超強磁場発生装置が新規導入された。実験室中央に位置するのは50 kV、5MJの主コンデンサバンクで、1000 Tの超強磁場発生が可能な設計となっている。横に配置されたのは同じく50 kV、2MJのコンデンサバンクであり、簡易型の電磁濃縮装置に電流を供給する。600 T程度の超強磁場発生が可能な設計となっている。電磁濃縮の初期磁場発生コイル用として、20kV、2MJ副コンデンサバンクが新規設置、より強い初期磁場が得られる。

Newly installed electro-magnetic flux compression (EMFC) system. The new EMFC generator energized by the 10 modules of 50 kV condensers, all together 5 MJ, is designed to generate 1000 T ultra-high magnetic fields. Another 2 MJ main condenser modules are used to inject an energy to the relatively light EMFC system for frequent use, but capable of generating around 600 T. The seed field coils, generating the initial magnetic field, which is compressed by the EMFC, are connected to the sub condenser bank modules of 20 kV, 2 MJ.

金道研究室

Kindo Group



金道 浩一
KINDO, Koichi
教授
Professor

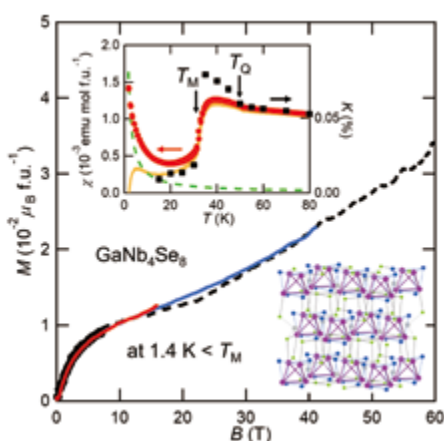


石川 孟
ISHIKAWA, Hajime
助教
Research Associate



今城 周作
IMAJO, Shusaku
特任助教
Project Research Associate

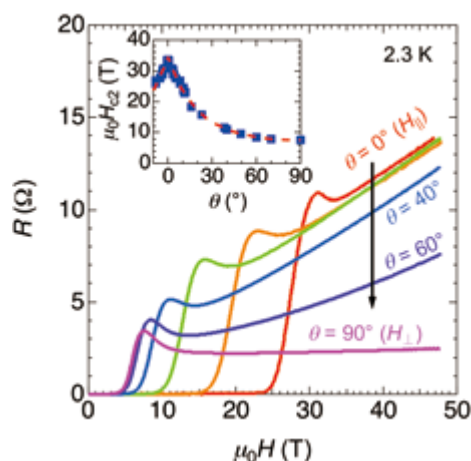
物性測定用途に合わせた様々な到達磁場やパルス長を持つパルスマグネットの開発と、それが作り出すパルス強磁場下での精密物性測定を基盤とした物性研究を行っている。例えば最大 75 テスラ (T)、4 ミリ秒の磁場下での磁化測定、最大 65T、30 ミリ秒の磁場下での電気抵抗測定、最大 43T、1 秒の磁場下での比熱測定を行っている。非破壊的な 100T の発生や、より長時間のパルス強磁場の発生を目指してマグネットの開発を行っている。スピン軌道相互作用の強い Mott 絶縁体や二次元有機超伝導体といった強磁場下での物性が未知の強相関電子系を主な研究対象とし、量子磁気相や伝導相を探索している。共同研究者から試料提供を受けるだけでなく、自ら興味ある物質を合成して研究を展開している。



スピン軌道相互作用の強い 4d 電子 Mott 絶縁体 GaNb_4Se_8 の磁化曲線。小さな磁化と単調な磁化曲線は、磁気転移温度 $T_M = 30 \text{ K}$ から期待されるよりも大きなギャップを持つ強固な非磁性基底状態が実現していることを示している。

Magnetization curve of a 4d transition metal Mott insulator GaNb_4Se_8 . The featureless magnetization curve with small magnetization indicates that the nonmagnetic ground state with an excitation gap larger than the energy scale of the magnetic transition temperature $T_M = 30 \text{ K}$ is realized.

We perform materials physics research based on the precise physical property measurements under strong pulsed magnetic fields, which are generated by the tailored pulse magnets with various strength and duration of magnetic fields. We perform e.g. magnetization measurements up to 75 tesla (T) in 4 msec, resistance measurements up to 65 T in 30 msec, and heat capacity measurements up to 43 T in 1 sec. We aim to develop the pulse magnets that can generate 100 T non-destructively or ultra-long pulsed magnetic field. We explore quantum magnetic or conducting phases at high fields in strongly correlated electron systems including spin-orbital coupled Mott insulators and quasi-two-dimensional organic superconductors. We synthesize the materials of interest as well as investigate the novel materials developed by the collaborators.



二次元有機超伝導体 $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ の低温強磁場中電気抵抗。磁場によって超伝導が抑制され、超伝導臨界磁場 H_{c2} 以上で常伝導状態となる。 H_{c2} や磁気抵抗は二次元的な異方性を反映して伝導面に対する磁場角度 θ に依存する。

Low-temperature electrical resistance of the two-dimensional organic superconductor $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ in high fields. The superconductivity is suppressed by magnetic field and shows the transition to the normal state at upper critical field H_{c2} . H_{c2} and magnetoresistance depend on the field angle θ to the conducting plane according to the anisotropy of the two-dimensionality.

研究テーマ Research Subjects

1. 非破壊パルスマグネットの開発
Development of Non-destructive Pulse Magnets
2. 強磁場を用いたスピン軌道相互作用の強い Mott 絶縁体の研究
Study of Spin-orbital Coupled Mott Insulators at High Fields
3. 有機伝導体の強磁場中電子物性の研究
Study on High-field Electronic Properties of Organic Conductors
4. パルス磁場中での物性測定手法の開発
Development of Physical Property Measurement Techniques in Pulsed Magnetic Field

徳永研究室

Tokunaga Group



徳永 将史
TOKUNAGA, Masashi
准教授
Associate Professor



三宅 厚志
MIYAKE, Atsushi
助教
Research Associate



三田村 裕幸
MITAMURA, Hiroyuki
助教
Research Associate



木下 雄斗
KINOSHITA, Yuto
特任助教
Project Research Associate

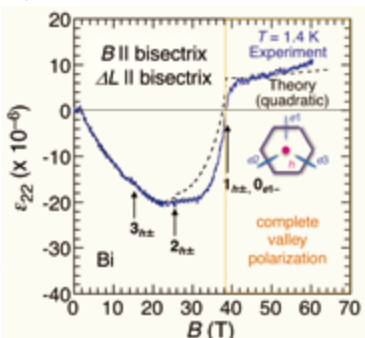
磁場は電子のスピン、軌道および位相に直接作用する外場であり、物性物理学の幅広い研究分野で不可欠な外場である。我々は瞬時的にのみ発生可能な強磁場環境下において、磁化、磁気抵抗、電気分極、偏光顕微鏡観察など多岐にわたる精密測定手段を開発・改良し、それらを駆使して強磁場下で起こる様々な相転移等の研究を行っている。

具体的な研究対象の一つとして、量子極限状態における電子物性に注目している。量子極限状態は磁場による閉じ込め効果のため超強相関電子系とみなすことができる。正負のキャリアが共存する半金属を中心に量子極限状態の物性測定を行い、グラファイトにおける磁場誘起量子相、ビスマスにおける完全バレー分極や多重極限環境下における半金属黒燐の異常量子伝導などを研究している。

磁気秩序を持つ強誘電体であるマルチフェロイック物質に対して、磁場挿引速度の大きいパルス磁場下で実現できる高感度測定を生かした研究を行っている。代表的マルチフェロイック物質として知られるBiFeO₃においては、双極性抵抗変化メモリー効果や磁場制御可能な強弾性歪みの存在、磁場誘起新奇マルチフェロイック相などを発見している。

また年間40件程度の国内および国際共同研究を行い、様々な遍歴・局在スピン系物質、トポロジカル物質などの強磁場物性研究を展開している。

パルス強磁場下においてキャパシタンス法で測定した単結晶ビスマスの縦磁歪(青線)。破線で示した理論予測と定量的に良い一致を示しており、理論で予測された完全バレー分極状態で期待される磁歪の符号反転も観測されている。この結果は挿入図で示したように、3重縮退した電子フェルミ面のうち一つのバレーが消失した完全バレー分極状態の実現に対して熱力学的な証拠を与えている。



Longitudinal magnetostriction of bismuth measured by the capacitance method in a pulsed high magnetic field (blue line). Quantitative coincidence with theoretical calculation (broken line) suggests the emergence of field-induced valley polarization predicted in this model. This result provides us with thermodynamic evidence for the complete valley polarization, namely one of the three Fermi pockets dries up, at around 40 T, as illustrated in the inset.

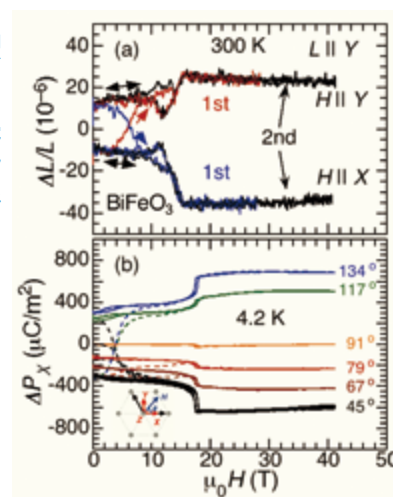
Magnetic fields have been extensively used in the research of solid state physics as they can directly tune the spins, orbitals, and phases of electrons in materials. We study various phenomena in pulsed high magnetic fields generated by non-destructive magnets using various state-of-the-art experimental techniques.

As one of our recent projects, we focus on the electronic states in the ultra-quantum limit state. Since charge carriers are confined in the smallest cyclotron orbit, Coulomb interaction dominates over the kinetic energy. Therefore, we can realize tunable strongly correlated electron systems in the quantum limit states. In particular, we have been focusing on the semimetals having an equal number of electrons and holes; and found a novel field-induced phase in graphite, complete valley polarization in bismuth, and anomalous quantum transport properties in black phosphorus under multiple extreme conditions.

We are also studying multiferroic materials through high precision experiments in pulsed-fields. In BiFeO₃, which is perhaps the most extensively studied multiferroic material, we found bipolar resistive memory effect, magnetic control of ferroelastic strain, and a novel multiferroic phase at around room temperature.

In addition to these in-house studies, we accept about 40 joint research projects per year and study various localized/itinerant magnets and topological materials in high magnetic fields.

(a) 2方向の磁場中で観測したBiFeO₃の線磁歪。初期磁化過程(1st)の10T以下で観測される履歴は歪みの強弾性的応答を示している。(b) 回転磁場中で観測した電気磁気効果。18T付近に見られるサイクロイド相から傾角反強磁性相への相転移で電気分極が倍増している様子を捉えている。



(a) Linear magnetostriction of a single crystal of BiFeO₃. Hysteretic behavior in the virgin curve (1st) below 10 T represents the strain's ferroelastic response in this material. (b) Magnetoelectric effects observed in rotational magnetic fields. The data

show the doubling of electric polarization at the transition from the cycloidal to canted-antiferromagnetic state at around 18 T.

研究テーマ Research Subjects

1. マルチフェロイック物質の磁場誘起相転移
Field-induced transitions in multiferroic materials
2. 量子極限状態における電子相転移
Electronic phase transitions in the quantum limit state
3. パルス強磁場下における高速偏光顕微鏡観察
High-speed polarizing microscope imaging in pulsed-high magnetic fields
4. トポロジカル物質の強磁場物性研究
High-field study of topological materials

松田康弘研究室

Y. Matsuda Group



松田 康弘
MATSUDA, Yasuhiro
准教授
Associate Professor

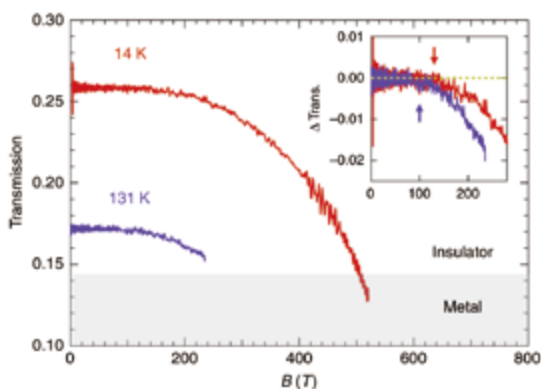


池田 暁彦
IKEDA, Akihiko
助教
Research Associate



中村 大輔
NAKAMURA, Daisuke
助教
Research Associate

1000 T までの超強磁場下で現れる物質の性質について研究を行っている。磁場は電子のスピンの軌道運動に直接作用し、強力な磁場により物質の基底状態は大きく変化する。低次元スピン系における非自明な磁気構造、遷移金属酸化物での新奇な局在-遍歴転移、分子性固体における強いスピン-格子結合などを通じ、強磁場中では様々な新規相が期待される。熱励起を抑制した極低温において生じる磁場誘起相転移は量子相転移であり、低磁場での励起状態が、強磁場中で新たな基底状態となる。そのため物質の有する潜在的性質が磁場中で顕在化し、新現象が現れることが期待できる。100 T を大きく超える磁場の発生には破壊型のマグネットを用いる必要があり、その技術的障壁を越えた先には未開拓の研究領域が広がっている。100 ~ 1000 T 領域における新奇相や新現象の発見のために様々な新しい計測技術の開発にも積極的に取り組んでいる。



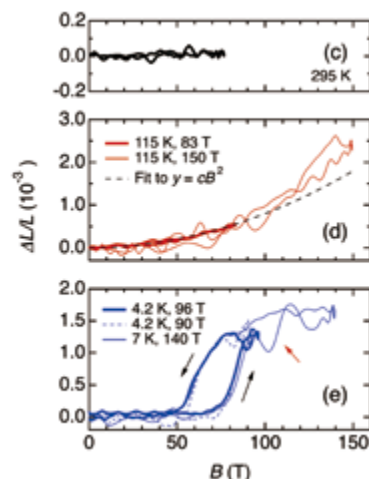
W を 6% ドープした VO₂ 薄膜結晶の 1.977 μm での磁気透過測定結果。およそ 500 T で金属化による透過光強度の減少が観測されている。

Magneto-transmission at 1.977 μm in a W-doped (6%) VO₂ thin film. The magnetic field induced metallization is indicated by a significant decrease of the transmission at around 500 T.

We have studied properties of matters that emerge under ultrahigh magnetic fields of up to 1000 T. Ground state of matter can dramatically be changed by applying such strong magnetic field, since spin and kinetic motion of electrons are directly affected by magnetic field. Various kinds of novel phases are expected to emerge in the strong magnetic fields through the phenomena such as the formation of nontrivial magnetic structure in low dimensional spin systems, exotic local-itinerant transition in strongly-correlated magnetic compounds, and strong spin-lattice coupling in molecular solids. The field-induced phase transition without thermal excitation at a low temperature is a quantum phase transition where the excited state in weak fields transforms to the new ground state in strong fields. Thus, hidden potential characters of matter appear in strong magnetic fields and novel phenomena can occur. Only short-duration destructive pulsed magnets can produce strong fields far exceeding 100 T; beyond overcoming the technical difficulties regarding the destructive magnetic field, unexplored research fields open. We have also been enthusiastically developing new measurement techniques to discover the exotic novel phases in the field range of 100 ~ 1000 T.

Fiber Bragg Grating (FBG) により測定された LaCoO₃ の磁歪。(a)、(b)、(c) はそれぞれ異なる温度における結果をしめしている。

Magnetostriction of LaCoO₃ measured with the Fiber Bragg Grating (FBG). The results at different temperatures are shown in (a), (b), and (c), respectively.



研究テーマ Research Subjects

1. 磁場誘起絶縁体-金属転移
Magnetic-field-induced insulator-metal transition
2. 量子スピン系の超強磁場磁化過程
Ultrahigh-magnetic-field magnetization process of quantum spin systems
3. 重い電子及び価数揺動電子系の超強磁場下での電子状態
Electronic state of heavy fermion and valence fluctuating systems at ultrahigh magnetic fields
4. 固体酸素の磁場誘起構造相転移
Magnetic-field-induced structural phase transition in solid oxygen
5. スピン-格子強結合系の磁場中の物性
Properties of matters with strong spin-lattice coupling in high magnetic fields

小濱研究室

Kohama Group

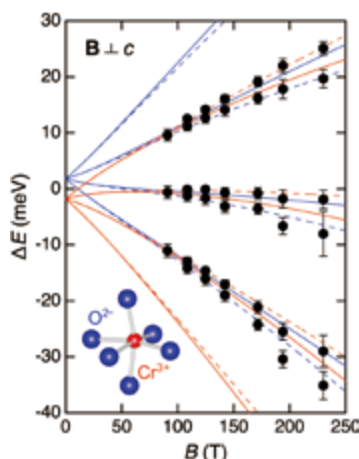


小濱 芳允
KOHAMA, Yoshimitsu
准教授
Associate Professor



野村 肇宏
NOMURA, Toshihiro
助教
Research Associate

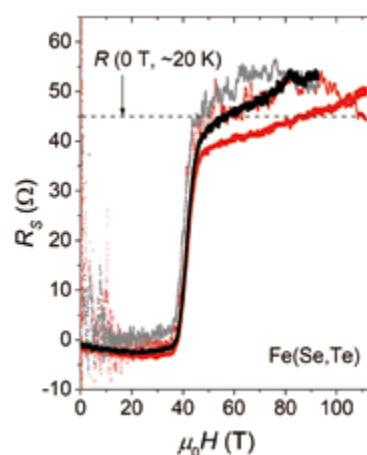
100 テスラを超える超強磁場は、ごく最近までその発生すら困難であった極限環境であり、人類未踏の研究領域といえる。このような極限環境下では多彩な物理現象が予想されており、当研究室ではこれら新奇物理現象の発見そして解明を目指している。主な実験手法としては、『1. レーザーを用いた磁気光学測定』、『2. 微細加工デバイスによる超高速電気抵抗測定』、そして『3. FPGA デバイスによるパルス強磁場 NMR 測定』を採用しており、これにより様々な強相関電子系における諸現象を探索している。現在の主なテーマは、トポロジカル絶縁体や超伝導物質における強磁場伝導状態の研究や、量子スピン系化合物の磁場誘起相の探索である。また、最終的な目標には 1000 テスラ領域での精密な物性研究を掲げており、この達成のために超強磁場発生技術および新規測定技術の開発にも力を注いでいる。



ルビーの R 線におけるゼーマン分裂。100 テスラ以上の超強磁場下において、非線型なゼーマン分裂が観測された。挿入図は、ルビーの蛍光の原因となる Al_2O_3 中における Cr^{3+} イオンを示す。

Zeeman splitting pattern of the R lines of Ruby. The non-linear Zeeman splitting was observed in ultra-high magnetic field region above 100 T. The inset shows the octahedrally coordinated Cr^{3+} ions in Al_2O_3 which is the cause of the photoluminescence of ruby.

Ultra-high magnetic field (higher than 100 T) is an extreme condition that remains unexplored until recently. Many of unprecedented phenomena are expected to appear in ultra-high magnetic field region, and our group focuses on the observation/understanding of those exotic phenomena. To achieve this goal, we employ the following experimental techniques, “1. Magneto-optical measurement technique”, “2. Ultra-fast magnetoresistance measurement with micro-fabricated devices” and “3. High-field NMR experiment with a FPGA module”. With these techniques, we currently investigate the magnetotransport in topological insulators/superconductors and the novel magnetic phases in quantum spin systems. Our final goal is the condensed matter research at ultra-high magnetic field region up to ~ 1000 T, and thus our future work will also be devoted to technical developments for ultra-high magnetic field generations as well as the improvements of measurement techniques.



$\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ 系超伝導体における磁気抵抗測定。このサンプルにおいては 40 T 付近に電気抵抗のジャンプを伴う H_{c2} が観測される。これらの手法により、磁気抵抗は 200 T 程度まで測定可能。

Magnetoresistance of the upper critical field on $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ superconductor. The upper critical field accompanied by the resistivity jump was observed around 40 T. The accessible field range for the magnetoresistance measurement is ~ 200 T.

研究テーマ Research Subjects

1. レーザーを用いた磁気光学効果の研究とその超強磁場科学への応用
Magneto-optical measurements with laser optics and its application to ultra-high magnetic field science
2. パルス強磁場下における NMR 測定と磁性体への応用
NMR measurement under pulsed fields and its application to magnetic materials
3. 微細加工技術を用いた新規測定手法の開発
Development of new measurement techniques with nanofabrication technology
4. 超強磁場を用いた量子振動の観測とトポロジカル絶縁体のフェルミオロジー
Observation of quantum oscillation in ultra-high magnetic fields and fermiology of topological insulators

今中研究室

Imanaka Group



今中 康貴
IMANAKA, Yasutaka
客員教授
Visiting Professor

強磁場極低温下でのサイクロトロン共鳴による半導体・半金属の研究を行っている。超強磁場下において化合物半導体や半金属での各種物性研究は過去に盛んに行われてきたが、近年、一部のナローギャップ半導体や半金属の関連物質でディラック電子系が実現されることが明らかとなり、新たな切り口での半導体・半金属の物性研究が各方面で急速にかつ精力的に展開されている。

そこで100Tを超える超強磁場（メガガウス磁場）下でテラヘルツ光やミリ波などの電磁波を使っての「サイクロトロン共鳴」という非接触で光学的な手法により、様々な半導体や半金属系材料の界面、表面に形成される電子系の特異な物性の解明に取り組む。

この目的の達成のために、超強磁場発生装置と組み合わせることが可能なテラヘルツ領域のレーザーや検出器の開発も並行して行い、幅広い周波数帯での超強磁場サイクロトロン共鳴の実現を目指す。

We have been studying the cyclotron resonance on various semiconductors and semimetals under high magnetic fields and low temperatures.

The research on these related materials was performed using ultra high magnetic fields so far. Recent progress of crystal growth techniques enables us to study the Dirac fermion physics even in narrow gap semiconductors or semi-metallic materials.

“Cyclotron resonance”, which is a magneto-optical phenomenon in the high magnetic field, is quite useful for investigating the effective mass and other transport properties (mobility, carrier density) without ohmic electrodes like standard magneto-transport measurements.

We aim to investigate anomalous electronic properties realized on the surface or the interface in semiconductors and semimetals by the cyclotron resonance with the destructive high magnetic field beyond 100 T. We will also develop terahertz lasers and detector systems for realizing ultra-high field cyclotron resonance measurements in a wide range of the frequency.

井原研究室

Ihara Group



井原 慶彦
IHARA, Yoshihiko
客員准教授
Visiting Associate Professor

近年開発が進んできたパルス強磁場 NMR 測定を駆使して、強磁場環境において発現する新奇物性をミクロな視点から観測する。

パルスマグネットにより実現する強磁場環境では、磁場誘起の超伝導状態やスピン液体状態、またスピン液晶状態や電荷液晶状態など多彩な量子凝縮状態が現れる。しかし、磁場発生時間が短く、また磁場変動の大きいパルス磁場中では新奇物性のミクロな起源に迫る NMR 測定を行うことは困難であった。そこで、小濱准教授、金道教授との共同研究により、フラットトップ磁場を用いることで準定常的な磁場環境における NMR 測定を実現し、これまでにフラストレート磁性体に対し定常磁場の限界を大きく超える 53 テスラまでの測定に成功した。客員准教授としての滞在中には、測定対象物質を希土類系化合物やマルチフェロイック物質に広げ、これらの物質群において実現する強磁場物性の起源解明を目指す。

I will explore exotic physical phenomena realized in high magnetic fields by the recently developed Pulse-Field NMR measurement.

High magnetic fields generated by pulse magnets introduce fascinating physical properties, such as field-induced superconductivity and spin liquid state, and spin/electronic nematic states. The experimental probes that can access to their microscopic origin are still limited because of the limitation on field-pulse duration and drastic time evolution of magnetic field strength. By using the flat-top field in collaboration with the groups of Professor Kohama, and Kindo, we succeeded in performing NMR measurement in magnetic fields up to 53 T for a frustrated magnet. As a visiting associate professor, I will expand the target materials to rare-earth metals and multiferroic materials and reveal the magnetic properties in high fields from a microscopic viewpoint.