

国際超強磁場科学研究所

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730テスラ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、100テスラ以上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おり、電磁濃縮法による1000テスラの発生に向けた開発も進行中である。

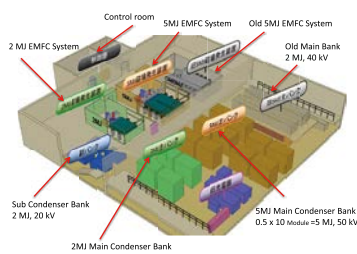
The aim of this laboratory is to study the physical properties of matter (such as semiconductors, magnetic materials, metals, insulators) under ultra-high magnetic field conditions. Such a high magnetic field is also used for realizing the new material phase and functions. Our pulse magnets can generate up to 80 Tesla by non-destructive way, and up to 730 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 over 100 T are oriented for new horizons in material science under such extreme quantum limit conditions. Development for 1000 T-generation by means of the electro-magnetic flux compression method is also our mission.

教授 Professor	嶽山 正二郎 TAKEYAMA, Shojiro
教授(施設長) Professor (Director)	金道 浩一 KINDO, Koichi
准教授 Associate Professor	徳永 将史 TOKUNAGA, Masashi
准教授 Associate Professor	松田 康弘 MATSUDA, Yasuhiro
准教授* Associate Professor	長田 俊人 OSADA, Toshihito
准教授(客員) Visiting Associate Professor	酒井 英明 SAKAI, Hideaki
教授(外国人客員) Visiting Professor	キム ヨンミン KIM, Yongmin

助教 Research Associate	近藤 晃弘 KONDO, Akihiro
助教 Research Associate	中村 大輔 NAKAMURA, Daisuke
助教 Research Associate	三宅 厚志 MIYAKE, Atsushi
助教 Research Associate	池田 暁彦 IKEDA, Akihiko
特任助教 Project Research Associate	小濱 芳允 KOHAMA, Yoshimitsu
技術専門員 Technical Associate	川口 孝志 KAWAGUCHI, Koushi
技術専門員 Technical Associate	澤部 博信 SAWABE, Hironobu

技術専門職員 Technical Associate	松尾 晶 MATSUO, Akira
学術支援職員 Technical Associate	大園 一実 OHATA, Katsumi
特任研究員 Project Researcher	足立 伸太郎 ADACHI, Shintaro
特任研究員 Project Researcher	坂井 義和 SAKAI, Yoshikazu
特任研究員 Project Researcher	佐藤 由昌 SATO, Yoshiaki
学振特別研究員 JSPS Research Fellow	野村 肇宏 NOMURA, Toshihiro

* 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.

嶽山研究室

Takeyama Group



嶽山 正二郎
TAKEYAMA, Shojiro

教授
Professor



中村 大輔
NAKAMURA, Daisuke

助教
Research Associate

100テスラ以上の超強磁場発生技術開発とそのような極限環境下で発現する物性の探索的研究を行っている。超強磁場の発生手段として、電磁エネルギーを利用して磁束濃縮を行う「電磁濃縮法」と一巻き銅コイルに高速大電流を投入して超強磁場を発生する「一巻きコイル法」を用いている。「電磁濃縮法」では、すでに室内世界最高磁場発生 730 テスラを実現しているが、更に高い磁場発生とより精度と信頼度を高めた物性計測を目指した研究開発を進めている。2010 年より「電磁濃縮 1000 T 計画」の下に装置建設を推進している。「一巻きコイル法」では、発生磁場の方向により、横および縦型をそれぞれ有し、横型は主にレーザーを用いた磁気光学測定に、縦型では極低温容器と組み合わせた低温磁化測定、光ファイバーを利用した磁気光学測定に用いている。「一巻きコイル法」では再現性と高い測定精度が得られ、およそ 200 テスラまで物性実験を行っている。当研究室では、このような超強磁場量子極限環境下で、カーボンナノチューブ、グラフェンや半導体ナノ構造での超強磁場磁気光学による電子状態の解明、超伝導体の臨界磁場、フラストレート量子スピン磁性体などの超強磁場磁化過程を通しての磁気物性の解明などを進めている。



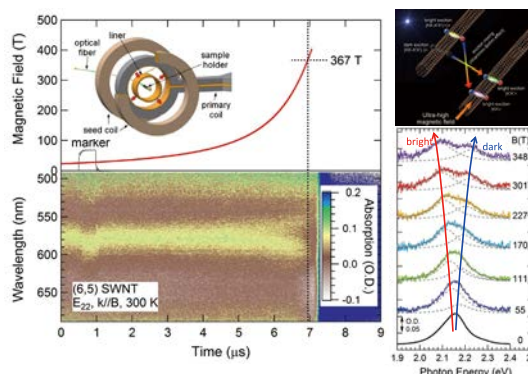
新しく開発された電磁濃縮法の超強磁場発生装置。5MJ の高速コンデンサバンクから送り出される大電流 (max 8 MA) が集電板を経由して主コイルに流れる。最大充電電圧や残留インピーダンスなどの装置の性能が向上したことで、1000 T の室内実験世界最高磁場発生用途物性計測の確立を目指して建設を進めている。

Newly-developed ultra-high magnetic field generator of the electro-magnetic flux compression method. The 5MJ fast condenser bank is capable of supplying maximum electrical current of amount to 8 mega-ampere, which is injected to a primary coil through the collector plate. By upgrading the performance such as the maximum charging voltage and the residual impedance, ultra-high magnetic fields up to 1000 T are planned to generate.

研究テーマ Research Subjects

1. 100 T 以上の超強磁場発生と物性計測技術開発
Technical developments for ultra-high magnetic field magnets above 100 T and for solid-state physics measurements
2. 超強磁場磁気光学効果
Magneto-optics in ultra-high magnetic fields
3. 超強磁場磁化過程、超伝導体の臨界磁場
Magnetization processes of magnetic materials and the critical magnetic field in superconducting materials in ultra-high magnetic fields

We are engaged in development for generating ultra-high magnetic fields above 100 T, and pursue the solid-state science realized under such an extreme condition. We employ two methods for the ultra-high magnetic field generation, one is the electro-magnetic flux compression (EMFC) and the other is the single-turn coil (STC) method. We have established a new type of coil for the EMFC, and currently the maximum magnetic field is 730 T. This value is the highest achieved thus far in an indoor setting in the world. Further development is underway for achieving much higher fields, more precise and reliable measurements for the solid-state physics. We are now involved in construction of ultra-high magnetic field generator system under the 1000 T project. The horizontal and vertical (H- and V-) STCs are used for more precise measurements up to 300 T, respectively, in accordance with their magnetic field axes. The H-STC is mainly used for magneto-optical measurements by use of laser optics, whilst the V-STC is more suitable for the study of low-temperature magnetization in a cryogenic bath. We are conducting the studies on magneto-optics of carbon nano-materials or of semiconductor nano-structures as well as on the critical magnetic fields in superconducting materials and on the high-field magnetization processes of the magnetic materials with highly frustrated quantum spin systems.



電磁濃縮法で発生した超強磁場で半導体カーボンナノチューブの 300 T 強までのアハロノフ・ボーム (AB) 励起子分裂を観測した。カーボンナノチューブの AB 分裂の明確な観測としては世界最高磁場である。バンド端の暗励起子と明励起子の混成が 100 T 程度で終わり、その後、観測に成功した 367 T まで、ブリルアンゾーンの K 点と K' 点での 2 つの独立した明励起子としての分裂の様相を示すことが分かった。この明確なエネルギー分裂からカーボンナノチューブでの AB 分裂について正確な定量的評価が可能となった。

The exciton Aharonov-Bohm (A-B) splitting in semiconducting carbon nanotubes (CNT) was observed by streak spectroscopic measurements in ultra-high magnetic fields above 300 T. Upon applying a very intense magnetic field along an axis of a semiconducting single-walled CNT, the band-edge exciton absorption spectrum shows up as a splitting as a result of A-B magnetic flux. A magnetic field of 367 T, generated by the electromagnetic flux compression destructing pulsed magnet-coil technique, was applied to single-chirality semiconducting CNTs. Using streak spectroscopy, we demonstrated separation of the independent band-edge bright exciton states at the K and K' points of the Brillouin zone after the mixing of the dark and bright states above 100 T. These results enable a quantitative discussion of the whole picture of the A-B effect in single-walled CNTs.

金道研究室

Kindo Group



金道 浩一
KINDO, Koichi
教授
Professor



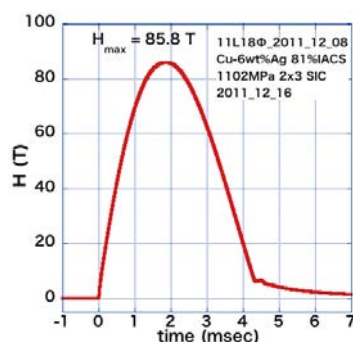
近藤 晃弘
KONDO, Akihiro
助教
Research Associate



小濱 芳允
KOHAMA, Yoshimitsu
特任助教
Project Research Associate

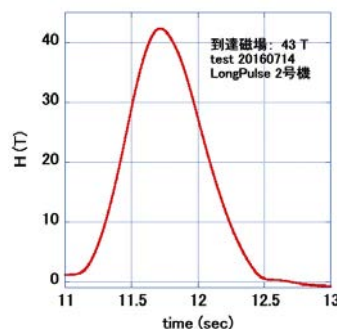
当施設に設置されたコンデンサー電源およびフライホイール付き直流発電機を用いて、非破壊で強磁場を発生し、その磁場下で精密な物性測定を行う。様々な用途に応じて、特殊なマグネットの開発を行っており、現在、ユーザーが利用可能な磁場条件は以下の三種類である。

①ショートパルスマグネット：パルス幅 5 ミリ秒、最大磁場 75 テスラ
②ミッドパルスマグネット：パルス幅 30 ミリ秒、最大磁場 65 テスラ
③ロングパルスマグネット：パルス幅約 1 秒、最大磁場 43 テスラ
ショートパルスマグネットは主に絶縁体の磁化測定などに用いられ、ミッドパルスマグネットは金属的な試料の測定に用いられている。当研究室で製作されたマグネットは非破壊パルス強磁場（単パルス）の世界記録を更新しており、現在も 100 テスラの発生を目指した開発を行っている。平成 20 年 5 月より世界最大のフライホイール付き直流発電機の運転が始まり、これを電源として用いることでパルス幅が 1 秒の磁場発生が可能となった。これを用いて磁場中比熱測定を行っている。またフラットトップ磁場を発生することにより強磁場下の ρ -T 測定も可能になった。もっと強磁場を発生出来るロングパルスマグネットの開発も進行中である。



ショートパルスマグネットの磁場波形。非破壊単パルスでの 85T は世界最高記録。このマグネットを 75T の測定用としてユーザーに提供している。

Profile of magnetic field for Short pulse magnet. The maximum field of 85T is the highest record for mono-coil field. This magnet is used for the 75T-measurements as a user's coil.



ロングパルスマグネットの磁場波形。現在の最大磁場は 43T。このマグネットを磁場中比熱測定用としてユーザーに提供している。

Profiles of magnetic field for Long pulse magnet. The maximum field of 43 T is used for the heat capacity-measurements under high field.

研究テーマ Research Subjects

1. 量子スピン系物質の磁性研究
Study on magnetism of quantum spin systems
2. 強相関伝導物質の磁性と伝導の研究
Study on magnetism and conductivity of strongly correlated electron systems
3. 非破壊 100 テスラマグネットの開発
Development of non-destructive 100 T-magnet
4. 超ロングパルスマグネットの開発
Development of ultra-long pulse magnet

徳永研究室

Tokunaga Group



徳永 将史
TOKUNAGA, Masashi
准教授
Associate Professor



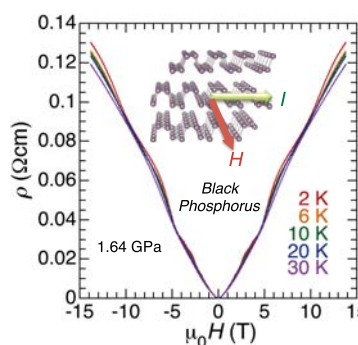
三宅 厚志
MIYAKE, Atsushi
助教
Research Associate

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。我々は瞬間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。量子極限状態にある電子系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。我々は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。

また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。カイラルな結晶構造を持つ三角格子反強磁性体である CsCuCl_3 における新奇マルチフェロイック状態や、室温マルチフェロイック物質 BiFeO_3 における双極性抵抗変化メモリー効果などを発見している。

このようなインハウスの研究に加えて年間40件程度の共同利用研究を行い、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。



多重極限環境下で測定した単結晶黒燐の磁気抵抗効果。挿入図は黒燐の結晶構造を模式的に示している。図中に示したように、磁場を a 軸方向に印加して c 軸方向の抵抗を測定した。14T までの磁場範囲で1000倍を超える巨大な正の磁気抵抗効果と、それに重畳した量子振動現象が観測されている。

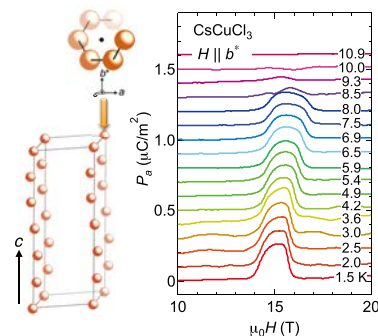
Magnetoresistance of a single crystal of black phosphorus under multiple extreme conditions. Inset shows schematic illustration of the crystal structure. Resistance along the c axis was measured in magnetic fields applied along the a axis. We observed huge positive magnetoresistance larger than 1,000 times of the value at zero field together with superposed Shubnikov-de Haas oscillations.

Magnetic fields have been extensively used in broad research fields of solid state physics because they can directly tune the spins, orbitals and phases of electrons in materials. We study various kinds of phase transitions in high magnetic fields with using non-destructive pulse magnets and developing/up-grading various experimental techniques; e.g. magnetization, magnetoresistance, electric polarization, polarizing optical microscopy, and so on.

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

We are also studying multiferroic materials using high precision experiments realized in pulsed-fields. We found a field-induced novel multiferroic phase in a triangular lattice chiral antiferromagnet CsCuCl_3 and bipolar resistive memory effects in a room temperature multiferroic material BiFeO_3 .

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.



(左) カイラルな結晶構造を持つ CsCuCl_3 における Cu 配置の模式図。(右) パルス磁場下で測定した CsCuCl_3 の電気分極の磁場変化。磁場を b^* 方向に印加した状態で a 方向の電気分極を測定している。

(left) Schematic illustration of the arrangement of Cu ions in a chiral antiferromagnet CsCuCl_3 . (right) Field-induced changes of electric polarization along the a axis in applied magnetic fields along the b^* axis.

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



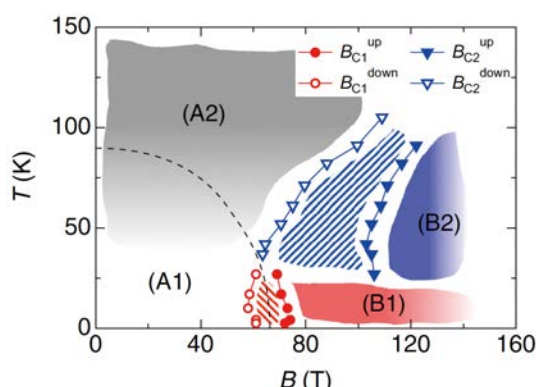
松田 康弘
MATSUDA, Yasuhiro
准教授
Associate Professor



池田 暁彦
IKEDA, Akihiko
助教
Research Associate

100 T を超える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や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、遷移金属化合物での新奇な局在-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。最近、約 120 T で発見された固体酸素の θ 相は、低温での反強磁性 α 相から磁場誘起構造相転移により現れ、磁場誘起新規相の典型例の一つである。

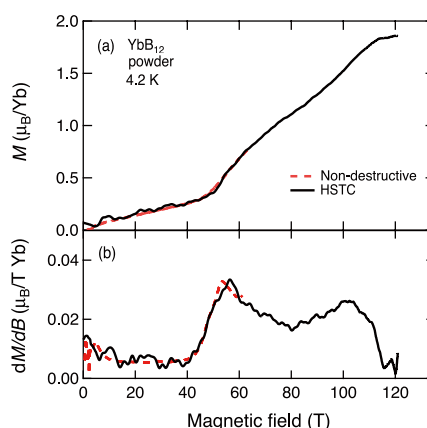
1000 T 領域においては、相互作用の強い物質について未知の強磁場基底状態を探索することが可能であり、そのような研究を推進するための超強磁場発生技術および超強磁場中の様々な測定手法の開発も行っている。



磁化測定から決定された LaCoO_3 の温度-磁場相図。低スピン相 (A1) または高温磁性相 (A2) から、磁場誘起磁性相 (B1、B2) へと強磁場により相転移が起こる。強磁場相においてスピン状態秩序の実現が示唆されている。

Temperature-magnetic field phase diagram of LaCoO_3 that is constructed based on the magnetization process. The field-induced magnetic phases (B1, B2) are obtained by applying magnetic field to the low spin phase (A1) or the high-temperature magnetic phase (A2). Spin state ordering state is expected to realize in the high-field phases.

Properties of matters that emerge under ultrahigh magnetic fields are being studied. Ground state of matter can dramatically change by applying strong magnetic fields, 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 formation of nontrivial magnetic structure in low dimensional spin systems, exotic local-itinerant transition in transition metal compounds, and strong spin-lattice coupling in molecular solids. Recent discovery of the novel θ phase of solid oxygen at over around 120 T is a specific example of the field-induced novel phases; it realizes due to the field-induced structural phase transition from the low temperature antiferromagnetic α phase. At higher fields in the range of 1000 T, exploring unknown high-field ground states in materials with strong interaction is possible, and hence, we have also been developing the techniques for generation of the ultrahigh magnetic fields as well as for various kinds of measurements at such ultrahigh fields.



(a) 近藤半導体 YbB_{12} の磁化過程と (b) 磁化の磁場微分 (dM/dB) の磁場依存性。55 T と 102 T に磁化の急な増加が観測されており、低い方の転移磁場で半導体-金属転移が起こり、2つの転移磁場の間では重い電子状態が実現していると予想されている。

(a) Magnetization process and (b) Magnetic field derivative of the magnetization (dM/dB) plotted as a function of magnetic field. Two field-induced transitions are observed at 55 and 102 T, respectively. The semiconductor-metal transition occurs at the lower transition field, and a heavy fermion state is expected to appear.

研究テーマ Research Subjects

1. 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
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. 磁気複屈折効果を用いた超強磁場における磁場誘起相転移の研究
Study of magnetic field-induced phase transition at ultrahigh magnetic fields using magnetic birefringence
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. 分子性導体の磁場誘起絶縁体-金属転移
Magnetic field-induced insulator-metal transition in molecular conductors

酒井研究室

Sakai Group



酒井 英明
SAKAI, Hideaki
客員准教授
Visiting Associate Professor

固体中の電子が、局在磁気モーメントや格子振動、また他の電子自身と強く相互作用する強相関物質では、現代のエレクトロニクスが立脚するバンド理論では予想が困難な、高温超伝導、巨大な磁気抵抗効果や熱電効果等の新奇な物性や機能がしばしば発現する。当研究室では、このような強相関現象を新物質開発と先端測定の両面から新規開拓し、その物理を解明することを目指している。

特に最近では、相対論的ディラック電子が伝導する磁性体の新規合成に成功し、その超高移動度の電気・熱輸送特性をスピン（磁気秩序）により制御する研究を進めている。徳永研究室の協力のもと、パルス強磁場により物質の磁気状態を自在に変化させ、従来にない磁性と量子伝導の協奏現象を探索している。さらに、極限コヒーレント光科学研究センターの辛研究室と連携し、このような強相関ディラック電子の微視的状态の解明も目指している。

In the strongly-correlated electron systems, unusual physical properties often manifest itself, such as high-temperature superconductivity, colossal magnetoresistance effects, and giant thermoelectric effects. These phenomena originate from the strong electron-electron interaction as well as the coupling with local magnetic moments and phonons in solids, which the conventional band theory can hardly predict. Our group experimentally explores such correlated phenomena by synthesizing novel materials with extreme conditions, such as high pressure and high vacuum. We also aim to reveal the underlying physics by measuring their transport properties down to cryogenic temperatures in high magnetic fields.

One of our recent research projects is to develop new magnets hosting relativistic Dirac fermions as conducting carriers. We have successfully synthesized single crystals of a new Dirac antiferromagnet, where the high-mobility transport of Dirac fermions is strongly coupled with a magnetic order. In collaboration with Tokunaga group, with the pulsed magnetic field up to ~55 T, we are studying the unconventional quantum transport controllable by the magnetic states in solids. Furthermore, we are interested in revealing the microscopic electronic structures for such strongly-correlated Dirac fermions by high-resolution photoemission spectroscopy developed in Shin group.

キム研究室

Kim Group



キム ヨンミン
KIM, Yongmin
外国人客員教授
Visiting Professor

ファンデアワールスヘテロ構造とIII-V族化合物半導体ベースのナノ構造を対象とした磁気光学・磁気輸送特性測定をパルス強磁場下で行う。

グラフェンやMoS₂などの層状2次元物質から成るファンデアワールスヘテロ構造は、その特異な物理現象や電子技術への応用の可能性から物性研究において非常に多大な興味を集めている。我々は異なる二次元層状物質をサンドイッチ状に組み合わせ、二次元層間に生じる量子トンネル効果やクロンドラッグ効果についてパルス磁場を用いて調べる。

III-V族化合物半導体の量子構造はレーザーや太陽電池への応用の可能性がある。我々は既にGaP-InPラテラルナノワイヤーが強磁場下で強い負の反磁性シフトを示す事を報告している。また、強磁場下での孤立した量子ドットにおける励起子の振る舞いを理解する事は量子情報デバイスへの応用の可能性があり非常に重要である。そのため、我々はボール状に成形された光学ファイバプローブを用いる事により孤立した量子ドットからの磁気フォトルミネッセンス遷移を調べてみる。様々なIII-V族化合物半導体の量子構造で誘起される量子極限におけるアハラノフ-ボーム効果や量子ホール物理もまた我々の興味の対象である。

Magneto-optical and magneto-transport measurements on van der Waals heterostructures and III-V compound semiconductor based nano-structures will be conducted in pulsed high magnetic fields.

Van der Waals heterostructures, consisted of different two-dimensional (2D) layered materials such as graphene, MoS₂, and etc, have attracted a great deal of interests in condensed matter physics due to their novel physical properties and possible electronic applications. We investigate quantum tunneling and Coulomb drag effects between 2D layered materials separated by a different 2D layer in pulsed magnetic fields.

III-V compound semiconductor quantum structures have potential applications to the lasers and solar cells. We already reported a strong negative diamagnetic shift in GaP-InP lateral nanowire system under pulsed magnetic fields. Understanding the exciton behavior in an isolated quantum dot under magnetic fields is of important for possible applications to the quantum information devices. For this reason, we try to investigate magneto-photoluminescence transitions from an isolated single dot under pulsed magnetic fields by using a ball-shaped optical fiber probe. We are also interested in the Aharonov-Bohm effect and the quantum Hall physics at the extreme quantum limit induced in various III-V quantum structures.