

極限環境物性研究部門

Division of Physics in Extreme Conditions

物質を超低温、超高压、強磁場、などの極限環境におくと、通常の状態とはまったく異なる性質を示すようになる。超低温における超流動や超伝導現象、超高压における構造相転移や絶縁体・金属転移、強磁場における磁気相転移などが良く知られた例である。これらの著しい現象は、しばしば従来の理論の枠組みの変更を促し、物性研究の新しい局面を切り開くものである。当部門では、これまで多年にわたり各種の技術開発を行い、15万気圧を越える超高压、数10マイクロケルビンにおよぶ超低温核冷凍システムなど世界最高水準の極限環境の実現に成功し、それらの下で多くの新しい現象を見出してきた。現在、これまで蓄積された技術をさらに発展させ、極限的な領域での物性を開拓するとともに、これらの極限環境と超伝導磁石による定常強磁場を組み合わせた多重極限環境での新しい物性研究を行っている。主な研究対象としては、

- 1) 超低温・強磁場下の低次元量子系
- 2) 有機伝導体やグラフェンの低次元・ディラック電子系
- 3) 多重極限下における磁性・超伝導体

This division is organized to pursue the study of physical properties of condensed matters under extreme conditions such as ultra-low temperatures, ultra-high pressures combined with steady high magnetic fields up to 20 T. In addition to these individual extreme conditions, physics under multiple extreme conditions is also emphasized. Under these conditions, novel phenomena, which cannot be understood in terms of existing theories and thus stimulate the creation of new concepts, are expected. Discoveries of such phenomena have often opened up new horizons in material science. Many outstanding instruments developed in this division, for example, are those which produce low temperatures down to a few tens of μK and high pressures up to 15 GPa. These machines are frequently used in collaboration with many scientists from all over Japan and abroad. Some of the main subjects are as follows,

- 1) Low dimensional quantum systems and liquid under ultra-low temperatures and high magnetic fields.
- 2) Low dimensional systems and/or Dirac electron systems such as organic conductors and graphene.
- 3) Strongly correlated heavy electron systems such as magnetic compounds or superconductors under multiple extreme conditions.

教授 Professor	上床 美也 UWATOKO, Yoshiya	助教 Research Associate	松林 和幸 MATSUBAYASHI, Kazuyuki	特任研究員 Project Researcher	佐藤 光幸 SATO, Mitsuyuki
教授*	榊原 俊郎 SAKAKIBARA, Toshiro	助教 Research Associate	下澤 雅明 SHIMOZAWA, Masaaki	特任研究員 Project Researcher	チャン ジングァン CHENG, Jinguang
准教授 Associate Professor	長田 俊人 OSADA, Toshihito	助教 Research Associate	田縁 俊光 TAEN, Toshihiro	特任研究員 Project Researcher	酒井 謙一 SAKAI, Kenichi
准教授 Associate Professor	山下 穰 YAMASHITA, Minoru	技術専門職員 Technical Associate	内田 和人 UCHIDA, Kazuhito	特任研究員 Project Researcher	福岡 修平 FUKUOKA, Syuhei
准教授(客員) Visiting Associate Professor	中野 智仁 NAKANO, Tmohito	技術補佐員 Technical Staff	長崎 尚子 NAGASAKI, Syoko		

* 新物質科学研究部門と併任 /concurrent with Division of New Materials Science

上床研究室

Uwatoko Group



上床 美也
UWATOKO, Yoshiya
教授
Professor



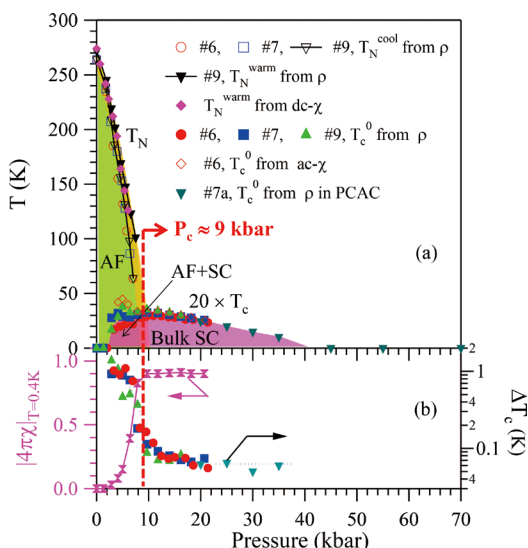
松林 和幸
MATSUBAYASHI, Kazuyuki
助教
Research Associate



岡田 卓
OKADA, Taku
助教
Research Associate

高圧力は、これまで見いだされている物性現象の起源解明や新奇物性現象の発見に欠かせない物理パラメータの1つである。特に、常圧と同程度の静水圧環境下における再現性の良い測定結果は、強相関電子系物質をはじめと多くの研究成果をもたらす。また、極低温および強磁場を組み合わせた多重環境は、物性研究をする上での多くの情報が得られる最良の研究環境である。当研究室では、超高圧力技術を駆使した様々な基礎物性測定に適応した高圧装置の開発を行い、高精度の超高圧力を物理パラメータとした多重環境下での物性研究を進めている。結晶固体には格子の振動の自由度と、電子の電荷、スピン、軌道という基本的な自由度があり、強相関電子系物質では、これらが複雑に絡み合いながら種々の相互作用が競合し、結果として種々の興味深い物性が実現している。超高圧力下において、物質はどのような新しい物性を示すのだろうか？また、その出現機構はどうなっているのだろうか？電気抵抗、磁化、比熱、x線回折、中性子回折などの諸物性測定の圧力効果を主な研究手段とし、下記の研究テーマを進めている。また、物性研究所の役割の一つである共同利用も活発に行っている。

The high-pressure group has been studying various materials under high-pressure conditions in combination with low temperature and/or strong magnetic field. Nowadays, the techniques combining these multi-extreme conditions have become popular and indispensable for researches in solid state physics. However, the developments of these techniques that can realize in-situ measurements under multiple extreme conditions are often challenging and require sophisticated considerations. This group has devoted numerous efforts in developing such advanced high-pressure techniques and in studying the strongly correlated electronic systems, which is one of the most important themes in modern solid state physics. Considering the fact that many mysterious phenomena in strongly correlated electronic systems result from the electron-phonon and electron-electron interactions, we foresee the discovery of many unknown phenomena under multi-extreme conditions because high pressure offers an effective knob in tuning the inter-atomic distances and the density of electronic state that controls the degree of complex interactions.



MnP型結晶構造を示すCrAs化合物は、 $T_N = 270$ K以下で一次転移を伴って反強磁性秩序を示す。この時、b-軸で4%の伸びが観測され、そのときのモーメントは1.7 μ Bである。この反強磁性転移温度は高圧下で急激に減少し臨界圧力 $P_c = 9$ kbarでほぼゼロとなる。と同時にバルクな超伝導が出現する。CrAs化合物における超伝導は、Cr化合物で初めての発見である。(a)：圧力誘起超伝導物質CrAsの温度・圧力相図。超伝導の転移温度は20倍に拡大してある。(b)： $T = 0.4$ Kにおける反磁性効果の圧力依存性。図中のシンボル、丸(赤)、四角(青)、および三角(緑)は、残留抵抗比(RRR)の異なる試料 RRR = 240、327、および250の測定に、それぞれ対応する。

CrAs adopts the orthorhombic MnP-type structure with a first-order anti-ferromagnetic transition at $T_N = 270 \pm 10$ K, which is accompanied with discontinuous changes of lattice constant b by $\sim 4\%$ below T_N . Neutron diffraction measurements established a double-helical magnetic structure propagating along the orthorhombic c axis with the Cr moment of 1.7 μ B lying essentially within the ab plane. The first-order T_N can be suppressed quickly by the external pressure and vanishes completely at a critical pressure $P_c \approx 9$ kbar. And then, bulk superconductivity with $T_c \approx 2$ K emerges at the critical pressure. Our discovery of superconductivity in CrAs makes it the first superconductor among the Cr-based compounds. (a) Temperature-pressure phase diagram of Pressure-Induced Superconductivity in the Antiferromagnetic System CrAs. The superconducting transition temperature T_c has been scaled by a factor of 20 for clarity. (b) The superconducting shielding fraction at 0.4 K, $|4\pi\chi|_{T=0.4K}$, and the superconducting transition temperature width, ΔT_c , as a function of pressure. The symbols of circle (red), square (blue), and triangle (green) in (a, b) represent three independent samples with residue resistivity ratio RRR = 240, 327, and 250, respectively.

研究テーマ Research Subjects

1. 多重環境下における新奇物性現象の探索
Search for new physical phenomena under multi extreme conditions
2. 強相関系物質における圧力誘起相転移現象の研究
Study of the pressure induced phase transitions in strongly correlated electron systems
3. 多重環境下における高圧装置開発と精密物性測定方法の確立
Development of high pressure apparatus and confirmation of physical property measurement techniques under the multi extreme conditions

長田研究室

Osada Group

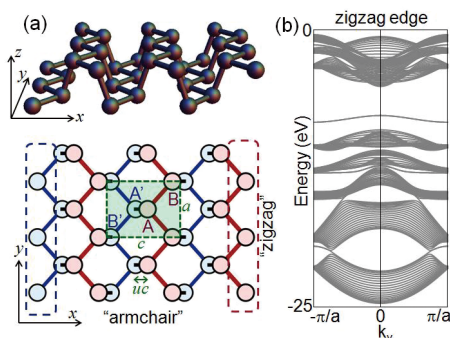


長田 俊人
OSADA, Toshihito
准教授
Associate Professor



田縁 俊光
TAEN, Toshihiro
助教
Research Associate

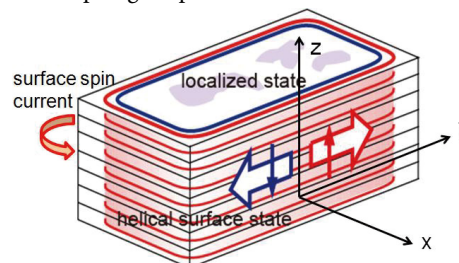
低次元電子系の量子伝導。相対論的 Dirac 電子系や、強磁場やナノ空間構造で閉じ込めた電子系が示す新しい電子状態や伝導現象の探索・解明・制御に関する研究を行う。バンド構造のベリー曲率、トポロジカル電子相、擬スピン自由度、電子軌道・磁束配置・系の空間構造の整合性などに関連した量子効果・幾何効果・多体効果に興味がある。研究対象はグラフェンなどの原子層物質、有機導体などの低次元物質、半導体・超伝導体の人工ナノ構造である。ナノ構造形成、全磁場方位依存性の精密計測、小型パルス磁石による強磁場計測など、微小試料の形成と低温高圧強磁場下の微小試料の電気的・磁氣的・熱的測定を主な実験手段とする。最近ではグラフェン、フォスフォレンなどの原子層物質や、トポロジカル相表面に形成されたヘリカル/カイラル表面電子系の量子伝導に関する研究を集中的に行っている。



フォスフォレン（原子層黒リン）の結晶構造と、ジグザグ端を持つフォスフォレンナノリボンのバンド構造。有限系ではバルクのギャップ内に金属的エッジ状態が生ずることを見出した。フォスフォレンは高移動度 p 型 2 次元半導体として期待される新原子層物質であるが、このギャップ内エッジ状態はその伝導特性に大きな影響を与え得るものである。

Crystal structure of phosphorene (atomic layer of black phosphorus), and band structure of phosphorene nanoribbon with the zigzag edge. We have found that the metallic edge state appears in the middle of the bulk energy gap in the finite system. Although phosphorene is a novel atomic layer material expected as a high-mobility p-type 2D semiconductor, this metallic edge state might play an important role in its transport properties.

Transport study of low-dimensional electron system. To search for new phenomena in relativistic Dirac electrons systems and electron systems with small spatial structures or strong magnetic fields, to clarify their mechanisms, and to control them for application. We have a great interest in quantum effects, topological effects, and many-body effects, which relate to Berry curvature of band structure, pseudo-spin degrees of freedom, and commensurability among electron orbital motions, vortex (magnetic flux) configuration, and spatial structures. Our targets are atomic layer materials such as graphene, low-dimensional materials such as organic conductors, and artificial semiconductor/superconductor nano-structures. We flexibly explore new transport phenomena and electronic states in small samples by electric, magnetic, and thermal measurements using nano-fabrication techniques like EB, precise field rotation, miniature pulse magnet, etc. under strong magnetic fields, high pressures, and low temperatures. Recently, we have concentrated our studies on quantum transport in atomic layer materials (graphene, phosphorene, etc.) and helical/chiral electron systems formed at the surface of topological phases.



多層ディラック電子系の量子ホール強磁性状態。結晶側面にはスピンの異なる各層の $n=0$ ランダウ準位のエッジ状態が逆方向に周回するヘリカル表面状態が形成され、永久スピン流を運ぶ。層状有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ においてヘリカル表面状態の存在を実験的に確認した。

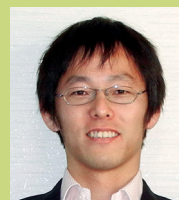
Quantum Hall ferromagnetic state in the multilayer Dirac fermion system. There exists the helical surface state, which consists of the edge states with opposite spin and chirality of the $n=0$ Landau level on each layer, on the side surface, and it carries persistent spin current. We have experimentally confirmed the existence of the helical surface state in the organic Dirac fermion system α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$.

研究テーマ Research Subjects

1. 原子層物質（グラフェン、フォスフォレン等）の電子状態と量子伝導
Electronic structure and quantum transport in atomic layers (graphene, phosphorene, etc.)
2. 有機ディラック電子系の量子ホール強磁性相におけるヘリカル表面状態
Helical surface state in quantum Hall ferromagnetic phase in an organic Dirac fermion system
3. 多層量子ホール系におけるカイラル表面状態の量子伝導
Quantum transport of chiral surface state in multilayer quantum Hall systems
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. 電場磁場中ブロッホ電子系におけるカオスと電気伝導
Chaos and electron transport in Bloch electron systems under magnetic and electronic fields

山下研究室

Yamashita Group



山下 穰
YAMASHITA, Minoru
准教授
Associate Professor

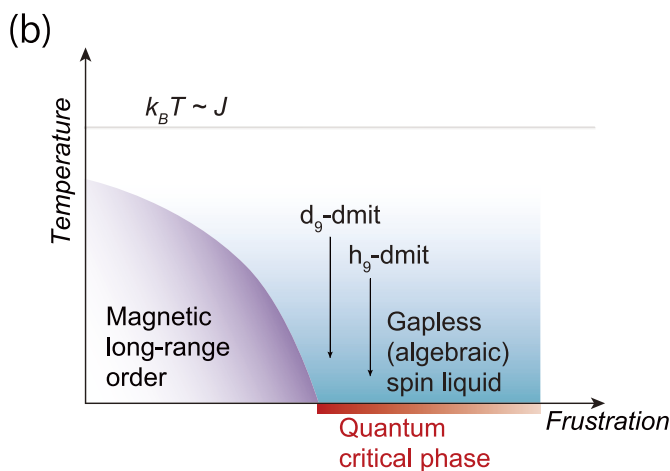
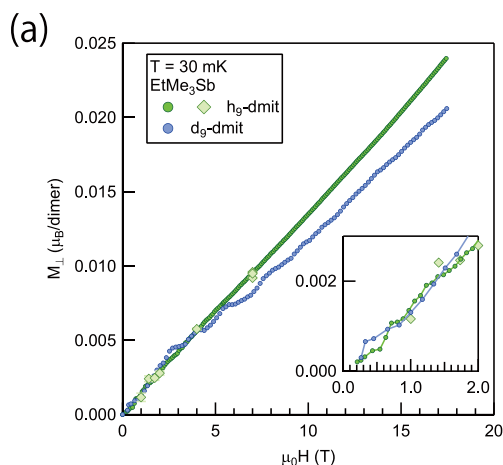


下澤 雅明
SHIMOZAWA, Masaaki
助教
Research Associate

絶対零度近くまで冷却すると何が起こるか？絶対零度ではあらゆるものは凍りつくわけだから、普通に考えると何も面白いことは起こらないように思う。ところが、1911年、オランダのカマリンオンネスは、ヘリウムの液化に成功することで1ケルビンという低温領域に人類で初めて到達し、そこで金属の電気抵抗が突然0になるという超伝導現象を発見した。その後、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、技術的に可能な限り低温まで精密測定する事でその物性を明らかにする研究を行っている。特に、二次元三角格子やカゴメ格子といった幾何学的フラストレーションをもつ磁性体において近年新しく発見された量子スピン液体状態は新しい量子凝縮相となっている可能性があり、その極低温における素励起の解明に力を入れて研究を進めている。

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, however, in some materials because quantum fluctuations persist even at absolute zero temperature. It was first discovered by Heike Kamerlingh Onnes at 1911, who was the first to liquify Helium and reach ~ 1 K, that the resistance of mercury suddenly vanished at low temperature. Followed by the 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 fluctuation is negligible. Especially, we are now focusing on studies to characterize the elementary excitations of a new quantum condensed state of spins which may emerge in frustrated magnetic materials, such as antiferromagnets at two-dimensional triangular or kagome lattices, by precise thermo-dynamic measurements at ultra-low temperatures.



(a) 量子スピン液体の候補物質である有機モット絶縁体 $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ において観測された磁化の磁場依存性。ゼロ磁場からの直線的な磁化の増加はギャップレスの磁気励起がこの量子スピン液体に存在する事を示している。(b) 提案されている相図。磁気秩序相に隣接して量子臨界相の存在が示唆されている。

(a) The field dependence of magnetization of an organic Mott insulator $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$, which is a candidate material of a quantum spin liquid (QSL). The linear increase from almost the zero field shows the presence of a gapless magnetic excitation in this QSL. (b) Proposed phase diagram of the QSL where a quantum critical phase emerges next to the magnetic ordered phase.

研究テーマ Research Subjects

1. 幾何学的フラストレーションをもつ磁性体における量子スピン液体
Quantum spin liquid state in geometrically-frustrated magnets
2. 極低温における新奇超伝導状態
Unconventional superconducting states at ultra-low temperatures
3. 超低温冷凍機と超低温における精密測定技術の開発
Developments of ultra-low temperature cryostats and the precision measurement systems

中野研究室

Nakano Group



中野 智仁
NAKANO, Tomohito
客員准教授
Visiting Associate Professor

Ce や Yb などの希土類を含んだ重い電子系と呼ばれる物質群の中には、磁気 - 非磁気相など 2 つの状態が拮抗しているものがあり、それらは圧力や磁場、元素置換等によってコントロールできることが知られている。量子臨界点と呼ばれる二つの状態の境界近傍では非フェルミ液体状態や非 BCS 超伝導などが観測されることがあり、本研究室ではこれらの新奇状態の探索およびその起源を解明する為に、純良試料を作製し、圧力、温度、磁場を制御し物性測定を行っている。例えば重い電子系化合物 CePtSi_2 は 1.4 ~ 2.4 GPa の圧力範囲で $T_c \sim 0.15$ K 程度の超伝導相が出現するが、同じ圧力領域で Ce の価数クロスオーバーが示唆されており、価数揺らぎを媒介とした超伝導であることが予測されている。純良単結晶を用いた極限環境下における詳細な物性測定から、価数揺らぎを媒介とした超伝導の普遍性を明らかにしたい。

In Ce- or Yb-based heavy fermion compounds, quantum critical point (QCP) appears owing to the competition of different states controlled by pressure, magnetic field, chemical substitution, and so on. Around a QCP, interesting phenomena, such as non-Fermi liquid behavior and non-BCS superconductivity, are often observed. We have been studying quantum critical phenomena by synthesizing high-quality samples and measuring their physical properties under extreme conditions of pressure, magnetic field, and very low temperature. For example, the ternary heavy fermion compound CePtSi_2 exhibits a pressure-induced superconductivity between 1.4 and 2.4 GPa with superconductivity transition temperature $T_c \sim 0.15$ K. Furthermore, a sign of a valence transition/crossover is observed at the pressures, indicating that the pressure-induced superconductivity is mediated by valence fluctuation similar to the case in $\text{CeCu}_2(\text{Si, Ge})_2$. We will clarify the universality of the valence fluctuation-mediated superconductivity using high-quality single-crystal samples and the extreme conditions.