

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、10万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 10 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 Yoshiya UWATOKO	助教 Research Associate	岡田 卓 Taku OKADA	特任研究員 Project Researcher	佐藤 光幸 Mitsuyuki SATO
教授*	榑原 俊郎 Toshiro SAKAKIBARA	助教 Research Associate	鴻池 貴子 Takako KONOIKE	特任研究員 Project Researcher	チャン ジングァン Jinguang CHENG
准教授 Associate Professor	長田 俊人 Toshihito OSADA	助教 Research Associate	松林 和幸 Kazuyuki MATSUBAYASHI	特任研究員 Project Researcher	土屋 聡 Satoshi TSUCHIYA
准教授 Associate Professor	山下 穰 Minoru YAMASHITA	技術専門職員 Technical Associate	内田 和人 Kazuhiro UCHIDA		
教授(外国人客員) Visiting Professor	カン ウォン Woun KANG	技術補佐員 Technical Staff	長崎 尚子 Syoko NAGASAKI		

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

極限環境物性研究部門

Division of Physics in Extreme Conditions

http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/uwatoko_group.html

上床研究室

Uwatoko Group



上床 美也
Yoshiya UWATOKO
教授
Professor



松林 和幸
Kazuyuki MATSUBAYASHI
助教
Research Associate



岡田 卓
Taku OKADA
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数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高圧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。

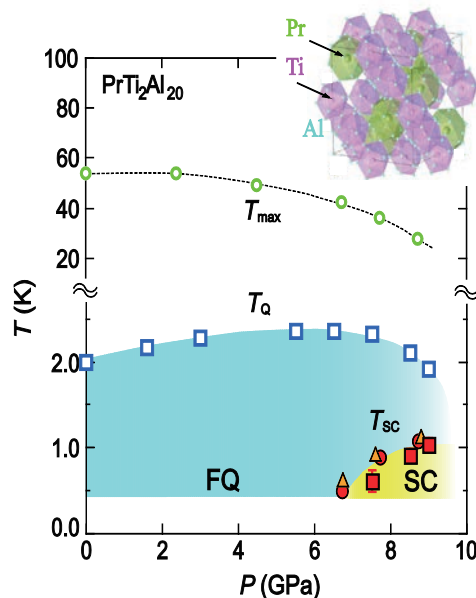
圧力誘起重い電子超伝導物質 $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ の温度・圧力相図：

$\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ は、常圧において、2 K 以下で四極子秩序を、200 mK 以下で超伝導状態を示す非磁性の物質である。また、この物質は 50 K 付近に近藤効果の存在を示す、電気抵抗に大きな異常が観測される。高圧下では、超伝導点温度は、8.7 GPa の圧力下で 1.1 K まで上昇し、と同時に四極子秩序温度は急激に減少する。この圧力での電子の有効質量は、通常金属の 100 倍以上であり、Pr 化合物における初めての重い電子状態での超伝導が出現している事が明らかとなった。

Phase diagram of Pressure-Induced Heavy Fermion Superconductivity in the Nonmagnetic Quadrupolar System $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$

The cubic compound $\text{PrTi}_2\text{Al}_{20}$ has demonstrated the interplay of a ferroquadrupole order at $T_Q = 2$ K, Kondo effect through the strong hybridization between the Γ_3 ground doublet and conduction electrons, and superconductivity (SC) at $T_{SC} = 0.2$ K. In particular, we found that the transition temperature and the effective mass associated with the superconductivity are dramatically enhanced up to 1.1 K and over $100m_0$ at 8.7 GPa as the system approaches the putative quantum critical point of the orbital order. The results suggest a generic phase diagram hosting unconventional superconductivity on the border of orbital order, paving a new path for further research on novel quantum criticality and superconductivity due to orbital fluctuations.

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.



研究テーマ Research Subjects

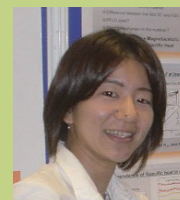
1. 多重環境下における新規物性現象の探索
Search for new physical phenomena under multi extreme conditions
2. 強相関系物質における圧力誘起相転移現象の研究
Study of the pressure induced phase transitions in strongly correlated electron systems
3. 多重環境下における高圧装置開発と精密物性測定方法の確立
Development of high pressure apparatus and confirmation of physical property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

長田研究室

Osada Group

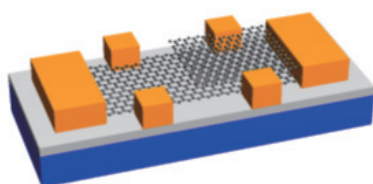


長田 俊人
Toshihito OSADA
准教授
Associate Professor

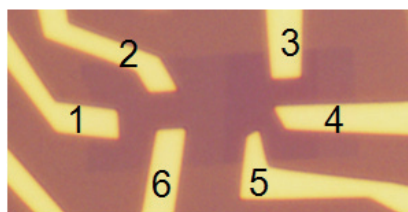


鴻池 貴子
Takako KONOIKE
助教
Research Associate

低次元電子系やディラック電子系の量子伝導。磁場中やナノ空間構造中の電子系、あるいは内部自由度を持つ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。バンド構造の特異性、擬スピン内部自由度、電子軌道・磁束(電子渦)配置・系の空間構造(トポロジー)の間の整合性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(単原子層グラファイト)や有機導体などの低次元結晶、MBE法やEBリソグラフィー法を用いて作製した半導体・超伝導体の人工ナノ構造である。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、MEMS素子による微細計測など、低温強磁場下の電氣的・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や有機導体中に見られる相対論的ディラック電子の量子伝導に関する研究を集中的に行っている。

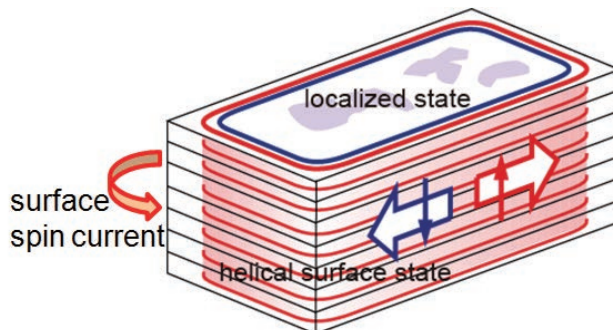


単層グラフェン / 2層グラフェン接合素子。単層グラフェン側と2層グラフェン側が共に異なるトポロジカル数を持つ量子ホール状態になると、接合境界には両者のエッジ状態が混成した界面伝導チャネルが「バルク・エッジ対応」を満たすように形成される。



Monolayer/bilayer graphene junction device. When both of the monolayer graphene side and the bilayer graphene side show quantum Hall effect with different topological numbers, there appear boundary channels, which result from hybridization of edge states of both sides, at the junction boundary so as to satisfy the "bulk-edge correspondence".

Transport study of low-dimensional electron system and/or Dirac fermion systems in solids. To search for new phenomena in electron systems with small spatial structures or internal degrees of freedom, 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 singularity of band structure, pseudo-spin internal degrees of freedom, and commensurability among electron orbital motions, vortex (magnetic flux) configuration, and spatial structures (topology). Our targets are low-dimensional conducting crystals such as graphene (monolayer graphite) and organic conductors, and artificial semiconductor/superconductor micro-structures fabricated by advanced processing techniques like MBE or EB. We flexibly explore new transport phenomena and electronic states by electric, magnetic, and thermal measurements using precise field rotation, miniature pulse magnet, MEMS probes, etc. under magnetic fields and low temperatures. Recently, we have concentrated our studies on quantum transport of relativistic Dirac electrons in graphene and organic conductors.



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)₂I₃ 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)₂I₃.

研究テーマ Research Subjects

1. グラフェンおよびゼロギャップ有機導体におけるディラック電子系の量子伝導
Quantum transport of Dirac electron system in graphene and zero-gap organic conductors
2. 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
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. 低次元有機導体の磁場中電荷およびスピン密度波状態
Charge and spin density waves under magnetic fields in low-dimensional organic 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



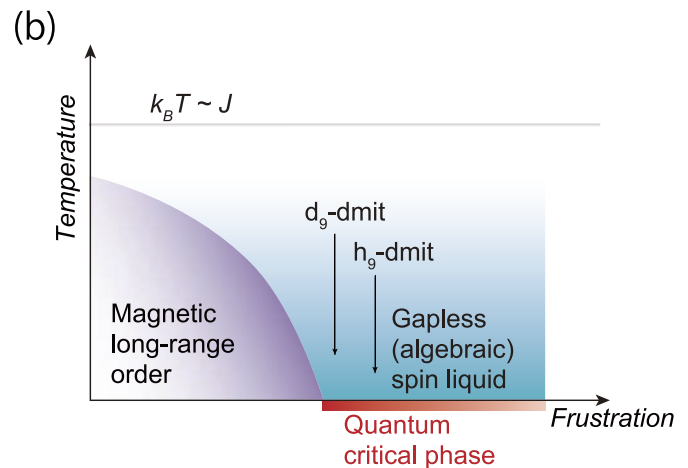
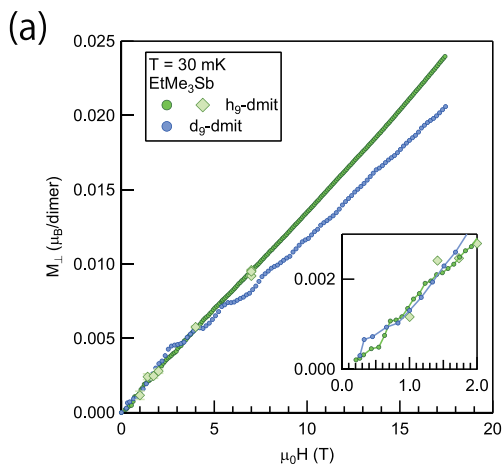
山下 穰
Minoru YAMASHITA
准教授
Associate Professor

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、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 condensation 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. 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