

物性理論研究部門

Division of Condensed Matter Theory

当部門では、実験系研究室とも協力しつつ、現代の凝縮系物理学、統計物理学、物質科学の最先端の問題について、微視的な見地から活発に理論研究を行っている。その目標は、実験結果の理論的解明、またそれを通じた相互作用する多体系の運動を捉える新概念の開拓、そして、物質の本質を捉えた有用なモデルの提案、さらには興味ある新現象の予言である。研究対象としては、量子スピン系や強相関電子系における量子相転移や量子臨界現象、重い電子系、様々な物質における超伝導、フラストレーション系、表面での動的過程や触媒作用、そして、メソスコピック系における量子輸送や相互作用の問題など多様である。これらの対象にアプローチする手法も多彩であり、トポロジーなどの数学概念に基づく現代的手法、場の量子論に基づく多体摂動理論、密度汎関数理論に基礎を置く最先端の第一原理計算や量子モンテカルロ法などの大規模数値計算手法等、各研究者がそれぞれ得意とするものを中心として研究を進めている。このように、部門全体としては、現代の最先端の問題と手法をいずれも幅広くカバーしている。

In this Division, we are conducting vigorous theoretical research from a microscopic point of view on topics at the forefront of contemporary condensed matter physics, statistical physics, and materials science, also in collaboration of experimental groups. Our goals include theoretical elucidations of experimental results, developments of new concepts to describe collective behavior of interacting systems, useful theoretical modeling of materials, and predictions of novel interesting phenomena. The topics in recent research span diverse areas as quantum phase transitions and critical phenomena in quantum spin systems and strongly correlated electron systems, heavy-fermion physics, superconductivity in various materials, frustrated systems, dynamic processes and catalytic properties at surfaces, and quantum transport and interactions in mesoscopic conductors. A wide variety of methodologies, including modern approaches based on mathematical concepts such as topology, many-body perturbation theory based on quantum field theory, and large-scale, state-of-the-art computational approaches such as quantum Monte Carlo simulations and ab-initio calculation of electronic structures based on the density functional theory, are utilized to approach these problems. Each member of this Division employs calculation techniques in accordance with his/her expertise and taste. As a whole, this Division and related Theory Groups cover a wide range of problems and methodologies in the cutting-edge condensed matter theory.

教授 Professor	常次 宏一 TSUNETSUGU, Hirokazu	助教 Research Associate	藤井 達也 FUJII, Tatsuya	特任研究員*2 Project Researcher	山本 良幸 YAMAMOTO, Yoshiyuki
教授*1 Professor	押川 正毅 OSHIKAWA, Masaki	助教 Research Associate	阪野 壘 SAKANO, Rui	特任研究員*2 Project Researcher	严 蕾 YAN, Lei
准教授 Associate Professor	加藤 岳生 KATO, Takeo	助教 Research Associate	池田 達彦 IKEDA, Tatsuhiko	学振特別研究員*1 JSPS Research Fellow	杉浦 祥 SUGIURA, Sho
准教授*2 Associate Professor	杉野 修 SUGINO, Osamu	助教*2 Research Associate	野口 良史 NOGUCHI, Yoshifumi		
教授(客員) Visiting Professor	瀧本 哲也 TAKIMOTO, Tetsuya	助教*1 Research Associate	多田 靖啓 TADA, Yasuhiro		
教授(外国人客員)*1 Visiting Professor	ダムル ケダー DAMLE, Kedar				
教授(外国人客員)*1 Visiting Professor	ラン イン RAN, Ying				

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

*2 所内兼務。本務は機能物性研究グループ。 / concurrent with Functional Materials Group

常次研究室

Tsunetsugu Group



常次 宏一
TSUNETSUGU, Hirokazu
教授
Professor



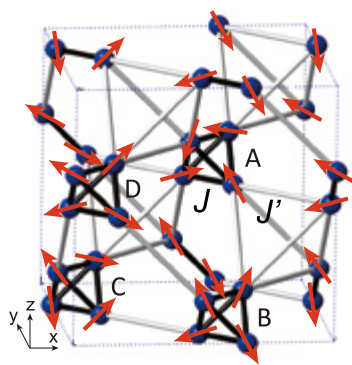
池田 達彦
IKEDA, Tatsuhiko
助教
Research Associate



藤井 達也
FUJII, Tatsuya
助教
Research Associate

遷移金属化合物、希土類・アクチノイド化合物などの電子間クーロン相互作用が強い強相関電子系の物性の理論を研究している。クーロン相互作用が強い系においては、低温において興味深い磁性状態や異方的超伝導、密度波などの多種多様な物性出現する。これらの複雑な物性の統一的理解を目標とするとともに新しい現象の発見を目指している。

主に研究しているテーマは、強磁性超伝導体やフラストレーション系などのスピン・電荷・軌道の複合自由度を持つ系における新しいタイプの量子秩序や量子ゆらぎである。これらの系に特有の、多くのモードのソフトな揺らぎが結合している場合における秩序と臨界現象の特徴、電子状態や輸送現象をはじめとするダイナミクスがどのような影響を受けるのかを調べている。最近の成果として、交換相互作用が空間的に変調しているフラストレートした量子スピン系の基底状態を調べ、現れる多量体秩序がスピン量子数によって異なり、Cr系物質に対応する $S=3/2$ の場合には四量体が安定化されることを発見した。

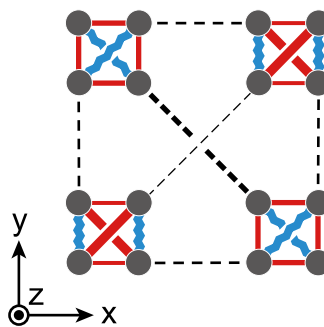


Breathing パイロクロア格子上の量子スピン。長短2種類のボンドに対応して交換相互作用も2つの値 $J' \ll J$ 。

Quantum spins on the breathing pyrochlore lattice. Long and short bonds have exchange couplings $J' \ll J$.

Strongly correlated electron systems, particularly compounds including d- or f-orbital electrons, are the main subjects of our research. In these systems where electron-electron interactions are very strong, a variety of interesting phenomena emerge at low temperatures, and various magnetic orders, unconventional superconductivity and density waves are typical cases.

Targets of our recent study include novel types of quantum order and quantum fluctuations in frustrated spin and strongly correlated electronic systems with multiple degrees of freedom. In these systems, many soft modes of fluctuations are coupled, and this affects the nature of quantum phase transitions, as well as electronic states and dynamical properties including transport phenomena. One of our recent achievements is about a frustrated quantum spin system with spatially modulated exchange couplings. We have found that emergent multimer orders depend on the spin quantum number, and a tetramer order is stabilized in the $S=3/2$ case corresponding to some Cr compounds.



$S = 3/2$ の場合の四面体ユニット内の隣接スピン間の相関。四量体相関が支配的であることがわかる。赤色と青色のボンドはスピン相関が反強磁性的と強磁性的であることを表し、線の太さは強度 $|S_i \cdot S_j|$ に模式的に対応。点線はユニット間の弱い反強磁性的相関。

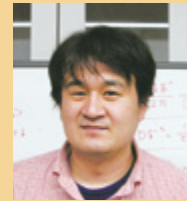
Nearest-neighbor spin correlations inside units for the case of $S = 3/2$. Tetramer correlations are dominant. Antiferromagnetic and ferromagnetic correlations are shown by red and blue bonds, respectively and bond thickness schematically represents $|S_i \cdot S_j|$. Dashed lines show weak anti-ferromagnetic correlations between neighboring units.

研究テーマ Research Subjects

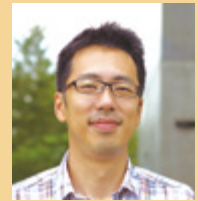
1. d 電子、f 電子化合物など強相関電子系の電子状態
Electronic states of strongly correlated systems with d- or f-electrons
2. フラストレーション系の統計力学
Statistical physics of frustrated systems
3. 量子磁性体の新奇量子相の理論
Theory of novel phases in quantum magnets
4. 強相関電子系における異方的超伝導
Unconventional superconductivity in strongly correlated electron systems

加藤研究室

Kato Group



加藤 岳生
KATO, Takeo
准教授
Associate Professor



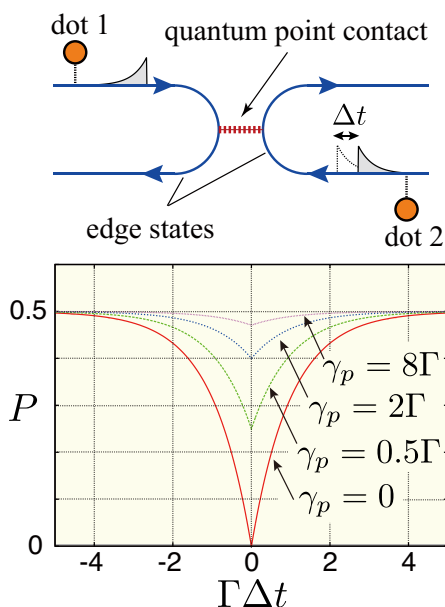
阪野 壘
SAKANO, Rui
助教
Research Associate

ナノスケール素子の量子輸送特性について、さまざまな手法を使った理論研究を行っている。この研究分野は古くからメゾスコピック系と呼ばれ、電子の量子力学的な性質に着目した研究が活発に行われてきた。最近では、非平衡多体現象・ショットノイズ・高速駆動現象・スピントロニクスなどの新しい視点で研究が進展しており、本研究室ではこれらの進展に対応して、非平衡統計力学や量子力学基礎論、多体電子論などを援用した理論研究を行っている。最近の研究例としては、時間依存外場下のナノスケール素子の伝導特性、フォノン系の熱輸送現象における多体効果、量子ドット系における近藤効果の非平衡輸送特性、などがある。

本研究室では上記の理論研究のほか、多体効果や非平衡現象に関する幅広い研究テーマも取り扱っている。最近の研究例としては、分子性導体におけるガラス的挙動や固体酸素の構造相転移などがある。物性研究所内の実験グループとの共同研究も進めている。

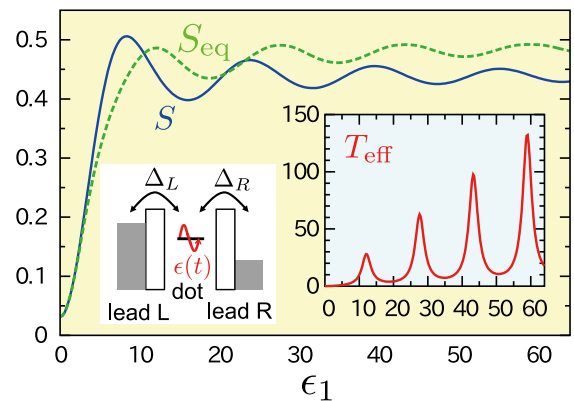
The main research subject of our group is theory on quantum transport in nano-scale devices using various approaches. This research field is also called 'mesoscopic physics', which has been studied for long time by focusing on quantum mechanical nature of electrons. Recently, mesoscopic physics based on new viewpoints is studied from such as nonequilibrium many-body phenomena, shot noise, high-speed drive phenomena, spintronics, and so on. We are constructing theories to explain these phenomena, by exploiting nonequilibrium statistical mechanics, fundamental theory of quantum mechanics, and many-body physics. Nonequilibrium transport properties of the Kondo quantum dots, electron and heat transport under time-dependent external fields, and many-body effect in thermal transport of phonons, can be cited as our recent research.

We are also treating various research subjects related to many-body effects and nonequilibrium phenomena. Glass-like behavior in organic conductors and structural phase transition in solid oxygen can be cited as these activities. We are also collaborating with experimental groups in ISSP.



上図：Hong-Ou-Mandel型二電子衝突実験の模式図。2つの量子ドットからそれぞれ注入された電子は、エッジ状態を経由して、中央の量子ポイントコンタクトで衝突する。下図：衝突後、2つの電子が同じエッジ状態に散乱する確率 P を波束の到着時間差 Δt の関数として計算した結果。

Upper panel: A schematic figure of the Hong-Ou-Mandel-type two-electron collision experiment. Two electrons injected from two quantum dots propagate along edge states, and collide at a central quantum point contact. Lower panel: The probability P , that two electrons scatter into the same edge states, is plotted as a function of a wavepacket delay time Δt .



上図：交流外場下でのゼロバイアス電流ノイズ（実線）および有効温度 T_{eff} で評価された平衡電流ノイズ（破線）の外場強度依存性。量子干渉効果による振動が見られる。挿入図（左）：モデルの模式図。挿入図（右）：有効温度 T_{eff} の外場強度依存性。

The photon-assisted zero-bias noise (the solid line) and the equilibrium thermal noise (the dashed line) evaluated at the corresponding T_{eff} (the right inset) are displayed as a function of the strength of the external field. The left inset: a schematic picture of the present model.

研究テーマ Research Subjects

1. メゾスコピック系における輸送特性
Transport properties in mesoscopic systems
2. 電子間相互作用の強い系の量子輸送理論
Theory of quantum transport in interacting electron systems
3. 非平衡統計力学・量子観測理論の基礎理論
Fundamental theory of non-equilibrium statistical mechanics and quantum measurement

瀧本研究室

Takimoto Group



瀧本 哲也
TAKIMOTO, Tetsuya
客員教授
Visiting Professor

トポロジカル絶縁体の研究分野において展開された概念は強相関電子系の分野にも適用され、新奇な量子相の探索に役立っている。こういった量子相を確認するためには実験測定と直接関わるトポロジカル不変量を見つけることが重要となる。

最近、私は軌道自由度を持つ強相関電子系におけるトポロジカルな状態に興味を持っている。この系は軌道自由度のために通常のスピン軌道相互作用とは異なる有効スピン軌道相互作用を内包する秩序相も存在するため興味深い。このプロジェクトの目的は軌道自由度を持つ d-電子あるいは f-電子系においてトポロジカル相を見つけること及び新奇な量子相を提案することである。トポロジカル状態を特徴付けるギャップレス表面状態はバルクにおけるトポロジカル相の対称性を反映しているはずであり、状態の秩序パラメータに関連している。さらに、これらは表面における輸送現象に影響を及ぼすためその解明も必要である。主に常次教授との共同研究を通してこの研究分野の発展に貢献したい。

The concept that has been developed in the research field of topological insulator is applied to the research field of strongly correlated electron systems to search novel quantum states. In order to confirm such quantum states, it is important to show a topological invariant relating with experimental measurements.

Recently, I am interested in the topological states in correlated electron systems with the orbital degree of freedom, which will contribute to form effective spin-orbit interactions different from the usual one. The purpose of the project is to find topological phases in d-electron or f-electron systems and to propose a novel phase. The gapless surface states characteristic of topological states should reflect the symmetry of topological phase in bulk, relating with the order parameter of the state. Since they will affect the transport property at surface, it is necessary to study their contribution in detail. Through the collaboration with Prof. Tsunetsugu mainly, I would like to contribute a progress in this research field.