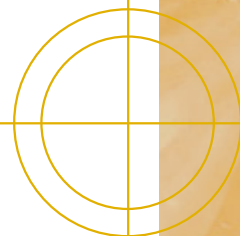


物性理論研究部門

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な理論研究が行われている。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 Project Researcher | 横山 知大 YOKOYAMA, Tomohiro |
| 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 | 山本 良幸 YAMAMOTO, Yoshiyuki |
| 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 | | |
| 准教授（客員） Visiting Associate Professor | 野村 健太郎 NOMURA, Kentaro | 助教 ^{*1} Research Associate | 多田 靖啓 TADA, Yasuhiro | | |
| 准教授（客員） Visiting Associate Professor | 松尾 衛 MATSUO, Mamoru | | | | |
| 教授（外国人客員） Visiting Professor | ゾトス クセノフォン ZOTOS, Xenophon | | | | |

^{*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

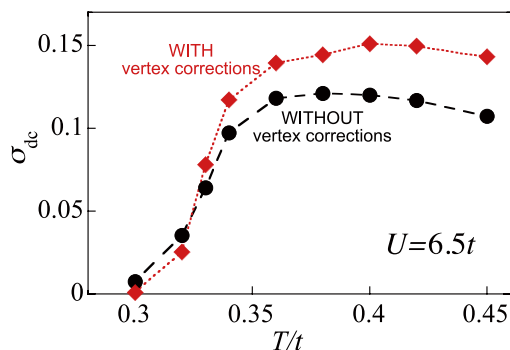
IKEDA, Tatsuhiko

助教

Research Associate

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揺らぎである。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、磁気フラストレーションが無い場合の反強磁性転移における光学伝導度を研究して磁気秩序および揺らぎに伴う頂点補正効果が非常に大きいことを明らかにし、フラストレーションの強いモット転移における振舞いとの違いを示した。



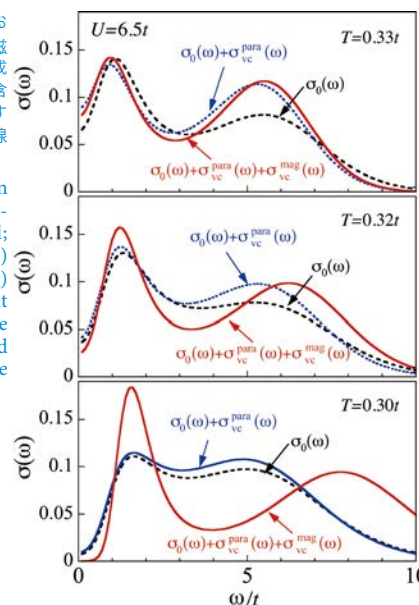
電子密度 1 の正方格子ハバード模型のクラスター動的平均場法による直流電気伝導度の温度依存性の計算結果。反強磁性転移温度は $T_N/t = 0.34$ 。絶対零度に近づく時、頂点補正を含まないデータ (●) に比べて、頂点補正を含んだ伝導度の結果 (◆) はより高温から減少傾向を示す。エネルギーの単位は電子の飛び移り積分 t 。 Numerical results of the temperature dependence of the dc conductivity in the half-filled Hubbard model on a square lattice calculated by the cluster dynamical mean field theory. The antiferromagnetic transition temperature is $T_N/t = 0.34$. In approaching zero temperature, compared with the data without vertex corrections (●), the full data (◆) including vertex corrections start to show a decrease of conductivity at a higher temperature. Energy unit is the electron transfer integral t .

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 optical conductivity near an antiferromagnetic phase transition. We have shown that vertex corrections due to magnetic order and fluctuations provide a substantial contribution to optical conductivity, which is in sharp contrast to the behavior near the Mott transition in frustrated electron systems.

同じ模型の光学伝導度における頂点補正 (σ_{vc}) の常磁性成分 (para) と磁気成分 (mag)。頂点補正を含まない部分は黒点線、すべてを含む結果は赤色実線で表示。

Vertex corrections in the optical conductivity in the same model; paramagnetic (para) part and magnetic (mag) part. The data without vertex corrections are shown by black dotted lines, while red lines are the full data.



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

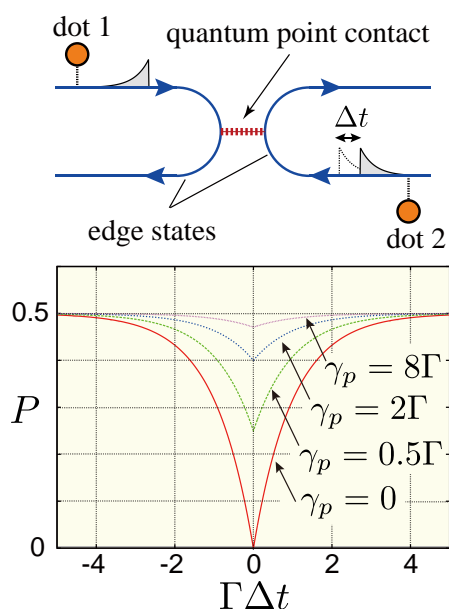
Kato Group

加藤 岳生
KATO, Takeo准教授
Associate Professor阪野 塁
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。

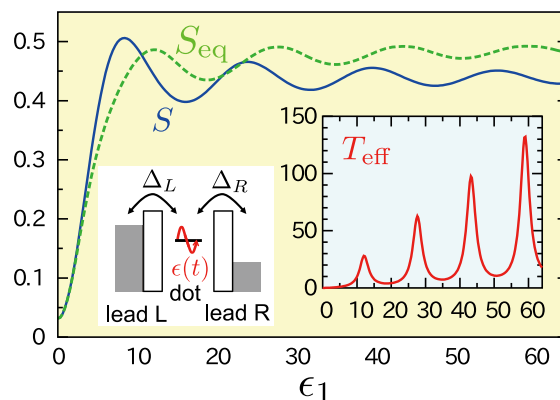
本研究室では上記の理論研究のほか、多体効果や非平衡現象に関する幅広い研究テーマも取り扱っている。最近の研究例としては、分子性導体におけるガラス的挙動や進化ゲーム理論における遷移現象などがある。物性研究所内の実験グループとの共同研究も進めている。

The main research subject of our laboratory is theoretical study of quantum transport in nano-scale devices based on various methods. This research subject, which is also called 'mesoscopic physics', has been studied for long time by focusing on quantum mechanical nature of electrons. Recently, mesoscopic systems are studied from novel viewpoints such as nonequilibrium many-body phenomena, shot noise, high-speed drive phenomena, spintronics, and so on. In order to explain these phenomena, we are constructing theories by utilizing nonequilibrium statistical mechanics, fundamental theory of quantum mechanics, and many-body physics. Examples of our recent activities are 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.



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 collides 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

野村研究室

Nomura Group



野村 健太郎
NOMURA, Kentaro
客員准教授
Visiting Associate Professor

近年、強いスピン軌道相互作用によって発現する、トポロジカル絶縁体やワイル半金属といった、物質の新しい量子状態の研究が進められている。本プロジェクトではスピン軌道相互作用と磁性の協奏として、磁性ワイル半金属におけるスピン電荷相関や磁気輸送現象の研究、およびスピントロニクスへの応用を目指す。ワイル半金属は新しいギャップレスのトポロジカル状態であり、空間反転対称性の破れ、あるいは時間反転対称性の破れによって特徴づけられる。時間反転対称性を破るワイル半金属は特異な磁氣的性質を有し、スピントロニクスへの応用も期待できる。これまで、この系の電磁応答を記述する有効理論を導き、局在磁気モーメントに作用する、新しいタイプのスピントルクの存在を明らかにした。このスピントルクは異常ホール伝導率に比例し、Joule 発熱を伴わない、微小の散逸によって磁化反転をもたらすことが可能である。現在、ワイル半金属における局在磁気モーメントのダイナミクスを Landau-Lifshitz-Gilbert に基づき解析を行っている。また磁壁のような磁気テクスチャーの近傍には電荷密度や平衡電流が発生することを明らかにし、磁壁運動の電氣的制御に関する研究も進めている。

Recent researches showed the existence of entirely new quantum states such as topological insulators and Weyl semimetals. In this project we work on the interplay between spin-orbit coupling and magnetism, such as spin-electricity correlation, magnetotransport phenomena, and application to spintronics devices.

A Weyl semimetal is a new type of topologically protected gapless quantum state, with either time-reversal or spatial inversion symmetries broken in three dimensions. Weyl semimetals with broken time-reversal symmetry are more interesting and rewarding for spintronics applications. We derive an effective free energy functional of magnetization which describes electromagnetic responses of a Weyl semimetal with ferromagnetic order. We also demonstrate that Weyl electrons in a magnetic Weyl semimetal exert a spin torque on the local magnetization, without a flowing current, when the chemical potential is modulated in a magnetic field. The spin torque is proportional to the anomalous Hall conductivity, and its effective field strength can be comparable to the Zeeman field. Using this effect, the direction of the local magnetization is switched by gate control in a thin film. Dynamics of local magnetization is analyzed by solving the Landau-Lifshitz-Gilbert equation. We also discuss magnetic textures such as domain walls in magnetic Weyl semimetals and show the charge density and the current density are generated near the domain walls, which might be used to manipulate the motion of domain walls electrically.

松尾研究室

Matsuo Group



松尾 衛
MATSUO, Mamoru
客員准教授
Visiting Associate Professor

物質中の電子のスピン角運動量の流れ「スピン流」の生成制御に関する理論的研究を行っている。

電子は電氣的自由度である電荷と同時に磁氣的自由度であるスピンを持ち、電荷の流れである電流に対して、スピンの流れであるスピン流を考えることができる。従来のエレクトロニクスが利用してきた電流は保存流であるのに対して、スピン流は一般に物質中の様々な要因によって散乱され減衰する非保存流である。よって、スピン流のスピン偏極方向を保持しながらの伝導制御には高度なナノテクノロジーが必要であり、近年になってようやくスピン流を媒介とする物理現象にアプローチできるようになった。

これまでにスピン流を生成するには、磁性体の交換相互作用、電磁相互作用、スピン軌道相互作用といったものが利用されてきたが、我々はあらたに、物体の巨視的回転運動とスピンとの相互作用である「スピン・回転結合」を用いたスピン生成理論を構築した。その理論予言は、液体金属流における渦運動を用いた実験によって実証された。現在、様々な巨視的力学運動を用いたスピン流の高効率生成法を明らかにすると共に、この逆過程である、スピン流注入による物体駆動の理論構築を推進している。

Spin current, a flow of electron spin angular momentum, is a key concept in spintronics. Spin current generation has been achieved by using exchange interaction in magnets, electromagnetic interaction, and spin-orbit interaction. Recently, we have proposed an alternative scheme wherein the spin-rotation coupling is exploited for spin-current generation. The spin-rotation coupling is the fundamental coupling between spin and mechanical rotational motion, and emerges in both ferromagnetic and paramagnetic materials, and allows the interconversion of spin and mechanical angular momentum. Spin-current generation by the spin-rotation coupling has been experimentally demonstrated using the mechanical rotation of liquid metals. Now we are extending our theory of mechanical generation of spin current and also developing the inverse effect, where mechanical rotational motion is induced by spin-injection.

ゾトス研究室

Zotos Group



ゾトス クセノフォン
ZOTOS, Xenophon
外国人客員教授
Visiting Professor

低次元量子磁性体における非従来型のスピンおよび熱輸送の物理とその応用が大きな理論的および実験的な注目を集めている。特に、有限温度における可積分量子多体系の輸送特性が非可積分系のものと大きく異なることは、新規擬1次元磁性体の熱伝導度の実験研究の大きな推進力となっている。

現在、低次元量子磁性体におけるトポロジカル励起の半現象論的輸送理論を研究している。低エネルギー、低密度ガスの記述を超えて、準粒子ベータ仮説法をスピノフォン散乱行列要素と組み合わせるアプローチを採っている。また、高橋と鈴木によるベータ仮説法による1次元容易面ハイゼンベルグモデルの熱力学量とそれに引き続くスピンドルード重みの計算が、量子転送行列法による熱ドルード重みと熱磁気輸送係数の結果を再現することを示した。新しい拡張としてはベータ仮説法を平衡から大きく離れた輸送現象へ適用し、異なる温度に設定した2つのスピン鎖の接合点で生成されるエネルギー流を研究することにより、最近の密度行列繰り込み群の数値計算と比較することに成功した。

The physics and applications of unconventional spin and heat transport in low dimensional quantum magnets has attracted significant theoretical and experimental interest. The proposal that integrable quantum many-body systems show fundamentally different finite temperature transport properties than the non-integrable ones promoted the experimental investigation of the thermal conductivity in quasi-one dimensional novel magnetic materials.

Currently I am working in the development of a semi-phenomenological transport theory for topological excitations in low dimensional quantum magnets. I pursue the idea of going beyond a low-energy, dilute gas approach by combining a quasi-particle Bethe ansatz description to exact spin-phonon scattering matrix elements. Furthermore, I have shown that the Bethe ansatz formulation of the easy-plane 1D Heisenberg model thermodynamics (TBA) by Takahashi and Suzuki and the subsequent analysis of the spin Drude weight, also reproduces the thermal Drude weight and magneto-thermal coefficient obtained by the Quantum Transfer Matrix method (QTM). In a novel extension of the Bethe ansatz method to far-out of equilibrium transport I studied the energy current generated at the interface between two semi-infinite chains held at different temperatures and successfully compared it to recent DMRG numerical simulations.