

# 物性理論研究部門

## Division of Condensed Matter Theory

当部門では、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を微視的な見地から活発に理論研究しているが、その目指すところは、実験を参照しつつ、相互作用する多体系の運動を捉える新概念の開拓、興味ある新現象の予言、そして、物質の本質を捉えた有用なモデルの提案である。

最近の研究対象は、遷移金属酸化物や有機伝導体におけるスピン電荷フォノン（軌道）複合物性、低次元量子スピン系や近藤格子等の電子系（いわゆる強相関系）における量子相転移や量子臨界現象、金属絶縁体転移、重い電子系、現象論や微視的な立場から見た様々な物質中での超伝導、金属や半導体での動的物性への交換相関効果、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。

これらの理論研究は各人得意の方法を用いて遂行されているが、部門全体として見ると、高等物理数学の解析手法、場の量子論的多体摂動理論、そして、量子モンテカルロ法や密度汎関数理論に基礎を置く最先端の第一原理計算などの大規模数値計算手法等、殆ど全ての現代的理論手法がカバーされている。

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, in pursuit of the development of new concepts to describe collective behavior of interacting systems, prediction of novel interesting phenomena, and useful theoretical modeling of materials, in close contact with experimental groups.

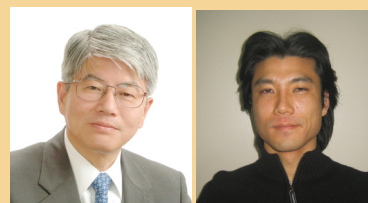
The topics in recent research span such diverse areas as spin-charge-phonon(-orbital) complex properties in transition-metal oxides and organic conductors, quantum phase transitions and critical phenomena in the strongly-correlated systems such as low-dimensional quantum magnets and electron systems including the Kondo lattice, metal-insulator transitions, heavy-fermion physics, both phenomenological and microscopic theories of superconductivity in various materials, exchange and correlation effects on dynamic properties in metals and semiconductors, dynamic processes and catalytic properties at surfaces, and quantum transport and interactions in mesoscopic conductors.

In performing those pieces of research, individual members employ calculation techniques in accordance with their expertise and taste, but as a whole, the theory group covers virtually all modern theoretical methods, ranging from sophisticated analytical techniques in mathematical physics and formal many-body theory to large computational approaches, such as quantum Monte Carlo simulations and state-of-the-art ab-initio calculation of electronic structures based on the density functional theory.

|   |                                  |                          |                             |                             |                              |
|---|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 教授<br>Professor                         | 上田 和夫<br>UEDA, Kazuo             | 助教<br>Research Associate | 藤井 達也<br>FUJII, Tatsuya     | 特任研究員<br>Project Researcher | 前橋 英明<br>MAEBASHI, Hideaki   |
| 教授<br>Professor                         | 高田 康民<br>TAKADA, Yasutami        | 助教<br>Research Associate | 服部 一匡<br>HATTORI, Kazumasa  | 特任研究員<br>Project Researcher | 櫻井 誠大<br>SAKURAI, Masahiro   |
| 教授<br>Professor                         | 押川 正毅<br>OSHIKAWA, Masaki        | 助教<br>Research Associate | 野口 良史<br>NOGUCHI, Yoshifumi | 特任研究員<br>Project Researcher | 滝本 佳成<br>TAKIMOTO, Yoshinari |
| 教授<br>Professor                         | 常次 宏一<br>TSUNETSUGU, Hirokazu    | 助教<br>Research Associate | 多田 靖啓<br>TADA, Yasuhiro     | 特任研究員<br>Project Researcher | ライコ ミクロシュ<br>LAJKO, Miklos   |
| 准教授<br>Associate Professor              | 甲元 真人<br>KOHMOTO, Mahito         | 助教<br>Research Associate | 阪野 壘<br>SAKANO, Rui         | 特任研究員<br>Project Researcher | クワチ ジェームス<br>QUACH, James    |
| 准教授<br>Associate Professor              | 杉野 修<br>SUGINO, Osamu            |                          |                             |                             |                              |
| 准教授<br>Associate Professor              | 加藤 岳生<br>KATO, Takeo             |                          |                             |                             |                              |
| 教授(客員)<br>Visiting Professor            | 中村 真<br>NAKAMURA, Shin           |                          |                             |                             |                              |
| 准教授(客員)<br>Visiting Associate Professor | 古賀 昌久<br>KOGA, Akihisa           |                          |                             |                             |                              |
| 教授(外国人客員)<br>Visiting Professor         | ヨンケーレ チボー<br>JONCKHEERE, Thibaut |                          |                             |                             |                              |

# 上田研究室

Ueda Group



上田 和夫  
UEDA, Kazuo  
教授  
Professor

藤井 達也  
FUJII, Tatsuya  
助教  
Research Associate

磁性、超伝導など各種の相転移と金属絶縁体転移の関係は今日の物性物理学における最重要課題の一つである。特に磁気相転移を伴わない金属絶縁体転移は、金属絶縁体転移の本質を明らかにするためにも重要である。

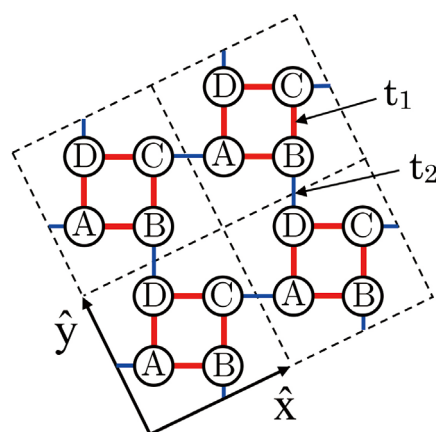
周期的に1/5欠損した正方格子上のハイゼンベルグモデルは、幾何学的に非等価な2種類の結合定数を変えたとき、反強磁性相からダイマー相あるいはプラケット相へと量子相転移することが知られている。われわれはこの格子上のハバードモデルを考え、その量子相転移の様相を1/4フィリングと1/2フィリングで調べた。

1/5欠損した正方格子上のタイトバインディングモデルは、全ての最近接跳び移り積分が等しいときには、 $\Gamma$ 点とM点でディラックコーンがあり、その光円錐の頂点を分散のほとんどないバンドが横切るという特異な構造を持っている。1/4フィリングではこのSU(3)空間に埋め込まれたディラック電子が対称点まわりでの量子相転移を司っていることを明らかにした。

1/2フィリングでは金属絶縁体転移をクラスターDMFTを用いて研究した。これまでのところ、反強磁性長距離秩序を考えないパラ相を仮定している。プラケット内の跳び移り積分がダイマー内の跳び移り積分よりも大きなところでは、金属絶縁体転移は一次転移であるが、逆の場合には連続的な転移であることが明らかになった。後者は多体効果によって誘起されるリフシツト転移と考えることが出来、興味深い事例となっている。

1/5 周期的に欠損した正方格子。プラケット内跳び移り積分 ( $t_1$ ) とダイマー内跳び移り積分 ( $t_2$ )。

1/5-regularly-depleted square lattice with the intraplaquette hopping ( $t_1$ ) and the intradimer hopping ( $t_2$ ).



Phase transitions to magnetic or superconducting states sometimes take place close vicinity of metal-insulator (MI) transitions. Understanding of the interplay between the MI transitions and various long range ordered phases is one of the central issues of the condensed matter physics.

It has been established that a Heisenberg model on the 1/5-depleted square lattice shows quantum phase transitions from the antiferromagnetic state to a dimer phase or a plaquette phase. Recently we have been interested in quantum phase transitions of the Hubbard model on the 1/5-depleted square lattice (Figure) both at the quarter filling and the half filling.

One body Hamiltonian on the 1/5-depleted lattice contains Dirac cones at  $\Gamma$  and M points when the two hopping parameters are symmetric ( $t_1=t_2$ ). Each of these Dirac cones intersects with a nearly flat band at its apex. At the quarter filling quantum phase transitions around the symmetric point are controlled by the Dirac electrons embedded in the SU(3) space.

At half-filling we have investigated MI transitions by using the cluster DMFT under the assumption of paramagnetic phase: no antiferromagnetic long range order. We observe that the nature of the MI transition is very different depending on the parameters. On the plaquette side ( $t_1>t_2$ ), it is a discontinuous first order transition, while it is continuous on the dimer side ( $t_2>t_1$ ). The latter continuous MI transition can be understood as a Lifshitz transition brought by the on-site Coulomb interaction.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 局在スピン系および itinerant 電子系における量子相転移  
Quantum phase transitions in localized spin systems and itinerant electron systems
2. 振動する磁性イオンにおける近藤効果  
Kondo effects of a vibrating magnetic ion
3. 量子ドットにおける近藤輸送現象  
Kondo transport phenomena through quantum dots

# 高田研究室

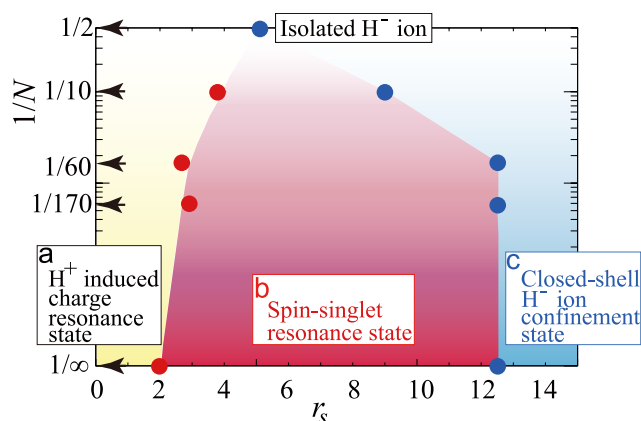
Takada Group



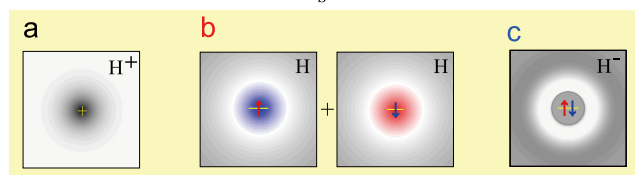
高田 康民  
TAKADA, Yasutami  
教授  
Professor

自然の階層構造の中で物性理論の主たる対象は電磁相互作用をする多数の原子核電子複合系である。この系は容易に厳密解を許さないという意味で複雑ともいえる。しかし、この系の上部階層（生物学の範疇）では当然のことながら、予想外にもこの系を生み出している下部階層（素粒子物理の範疇）でもずっと複雑な系を対象にしていることに比べれば際立って簡単な系である。それゆえ、この系を究めることは全ての物理理論にとって基本的課題である。この認識の下に、密度汎関数理論やグリーン関数法を主たる手段として、この原子核電子複合系の量子物性を第一原理から忠実に解明する研究を行っている。特に、超伝導転移温度の第一原理計算手法の確立とそれを駆使しての高温超伝導機構の提唱を目標としている。

In the hierarchic structure of nature, condensed matter theory is mainly concerned with the complex system of many nuclei and electrons, interacting to each other through electromagnetic fields. This system is so complex that no rigorous solution is allowed. It is, however, regarded as an astonishingly simple one if we compare it with the systems in the upper hierarchy (the domain of biology) as well as those in the lower one (the domain of high-energy physics). Thus we consider it as one of the most fundamental problems in the whole theory of physics to make its thorough investigation. With this recognition, we study this system faithfully from first principles with mainly using the density functional theory and the Green's-function method. More specifically, we are constructing a framework for calculating the superconducting transition temperature from first principles with the aim of proposing a high- $T_c$  mechanism.



陽子挿入電子ガス系における電荷共鳴、スピン一重項共鳴、閉殻水素負イオン閉じ込め状態間の鋭い連続転移。ここで、 $N$ は全電子数、 $r_s$ は一様密度電子ガス系を指定する密度径数である。



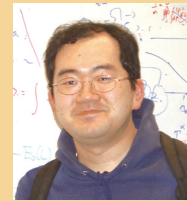
Sharp sequential transitions among charge resonance, singlet-spin resonance, and closed-shell  $H^-$  ion confinement states in the proton-embedded electron gas. Here  $N$  is the total number of electrons and  $r_s$  is the density parameter to describe the homogeneous electron gas.

## 研究テーマ Research Subjects

1. GW $\Gamma$ 法：ワード恒等式を常に満たす電子自己エネルギーの計算手法の開発と低密度電子ガスの物性解明  
GW $\Gamma$  method: Development of the calculation method for the electron self-energy always satisfying the Ward identity and investigation of the properties in the low-density electron gas
2. 超伝導転移温度の第一原理計算：密度汎関数超伝導理論での対相互作用汎関数の開発と引力斥力拮抗系での高温超伝導機構探求  
First-principles calculation of the superconducting transition temperature: Proposal of a good functional form for the pairing interaction in the density functional theory for superconductors and investigation of high-temperature superconductivity in an attraction-repulsion competitive system
3. 原子・分子挿入電子ガス系：第一原理からの近藤問題と交換相関エネルギー汎関数形の開発  
Atom/molecule embedded electron gas: Kondo problem from first principles and developments of the exchange and correlation energy functional

# 押川研究室

Oshikawa Group



押川 正毅  
OSHIKAWA, Masaki  
教授  
Professor



多田 靖啓  
TADA, Yasuhiro  
助教  
Research Associate

量子多体系の理論を中心として研究を行っている。量子多体系と古典統計力学および場の理論の密接な関係を踏まえ、広範な系について成立する普遍的な概念を探求するとともに、実験結果の統一的理解や新たな実験に対する予言も目標とする。実験に密接に関連する研究として、たとえば電子スピン共鳴 (ESR) の理論に取り組んでおり、最近の成果として  $S=1$  スピン鎖における ESR シフトを広い温度磁場範囲で定量的に求めることに成功した。

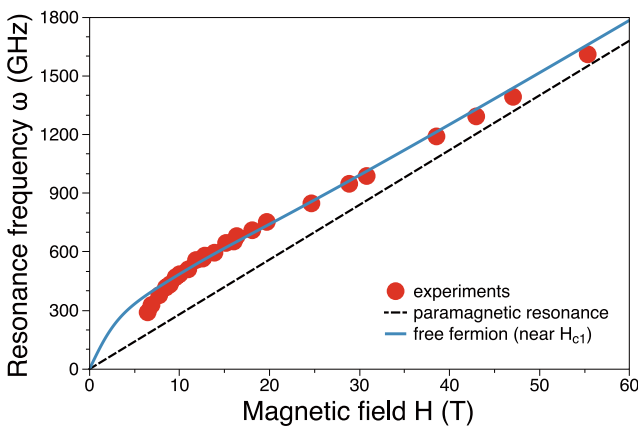
一方、量子多体系に関する近年の研究の進展は量子相の分類という基本的な問題についての概念的な再検討を促している。この方向での最近の成果として、ある種の点群対称性を持つ1次元量子スピン系においては、局所スピン状態の積に断熱的につながる「自明な」相が複数あり、その間に必然的に量子相転移が存在することを明らかにした。量子相の分類は量子エンタングルメントとも密接に関連しており、これを手がかりに量子情報理論や量子計算との境界領域の開拓も企図している。

これらの研究の多くは、国際共同研究として推進している。

Our main focus is quantum many-body theory. Based on the close correspondence among quantum many-body systems, classical statistical systems, and field theory, we pursue universal concepts in physics. At the same time, we aim to give a unified picture on experimental data and to make testable predictions. An example of our studies closely related to experiments is theory of Electron Spin Resonance (ESR). Recent achievements include quantitative theory of ESR shift in  $S=1$  antiferromagnetic chains in a wide range of temperature and magnetic field.

On the other hand, recent developments in quantum many-body problems motivate us to reexamine the fundamental issue of classification of quantum phases, at the conceptual level. For example, recently we elucidated that there are more than one distinct “trivial” phases, each of which is adiabatically connected to a product of local spin states, in one-dimensional quantum spin systems with a certain point-group symmetry. These phases are inevitably separated by a quantum phase transition. Classification of quantum phases is also closely related to quantum entanglement. Exploiting this connection, we also aim to develop an interdisciplinary field with quantum information theory and quantum computation.

Much of our research is carried out in international collaborations.



単一イオン異方性を持つ  $S=1$  反強磁性スピン鎖における ESR シフト。モデル物質 NDMAP における実験結果 (赤丸) と我々の理論 (青実線) がよく一致している。

ESR shift in an  $S=1$  antiferromagnetic chain with a uniaxial anisotropy. Experimental data on the model compound NDMAP (red dots) agree well with our theory (blue curve).

## 研究テーマ Research Subjects

1. 低次元スピン系における電子スピン共鳴の場の理論による定式化  
Field-theory formulation of Electron Spin Resonance in low-dimensional quantum spin systems
2. 共形場理論とその物性物理への応用  
Conformal Field Theory and its applications to condensed matter physics
3. トポロジカル相と量子エンタングルメント  
Topological phases and quantum entanglement
4. カイラル超流体の軌道角運動量  
Orbital angular momentum of chiral superfluids
5. 重い電子系における相転移と超伝導  
Phase transitions and superconductivity in heavy fermion systems

# 常次研究室

Tsunetsugu Group



常次 宏一  
TSUNETSUGU, Hirokazu  
教授  
Professor



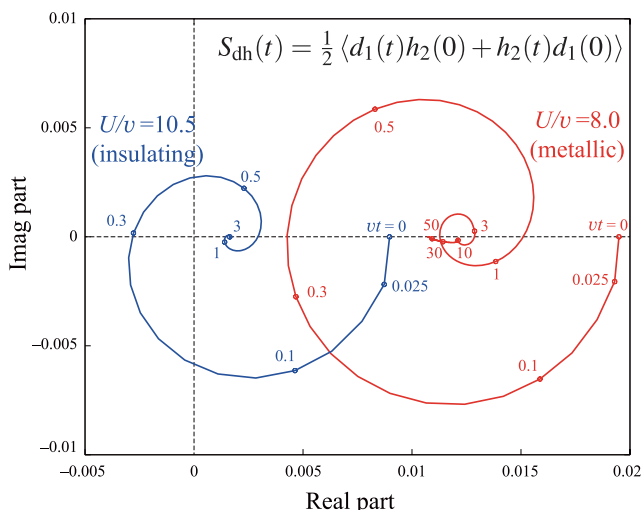
服部 一匡  
HATTORI, Kazumasa  
助教  
Research Associate

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が出現する。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、Pr 化合物の軌道秩序に伴う臨界性の新しい特徴を発見し、また三角格子上的モット転移における動的電荷揺らぎ、特に二重占有を表す doublon と空き状態を表す holon の相関ダイナミクスの変化を明らかにした。

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 transport properties. We have recently studied electric transport singularity at Mott transition on a triangular lattice. For orbital physics in Pr-based compounds, we have discovered a new type of criticality in quadrupole response associated with an orbital order. We have also studied Mott transition on a triangular lattice, and clarified the change in dynamics of doublon (doubly occupied site) and holon (vacant site) correlations.



クラスター動的平均場法によって計算された 1/2 フィリングの三角格子ハバード模型における最近接サイト間の動的 doublon-holon 相関。複素平面内に時間発展の軌跡をプロット。エネルギー単位は飛び移り積分  $v$  であり、温度は  $T/v = 0.08$ 。時間も  $vt$  と無次元化してある。電子間斥力  $U/v = 10.5$  の絶縁体相においては  $vt > 2$  で既に揺らぎがほとんど消えて長時間漸近値  $\langle d_1 \rangle \langle h_2 \rangle$  に収束するが、 $U/v = 8.0$  の金属相においては  $vt \sim 50$  の長時間まで揺らぎが残っている。

Dynamical doublon-holon correlation in the triangular-lattice half-filled Hubbard model between nearest neighbor sites calculated by cluster dynamical mean-field method. Plotted in the complex plane is the trajectory of its time evolution. Energy units are the transfer integral  $v$ , and the temperature is  $T/v = 0.08$ . Time is also shown by dimensionless value  $vt$  in the figure. For the electron repulsion  $U/v = 10.5$  in the insulating phase, doublon-holon correlation almost loses its fluctuations for the time  $vt > 2$  and nearly saturates to its long-time asymptotic value  $\langle d_1 \rangle \langle h_2 \rangle$ . At  $U/v = 8.0$  in the metallic phase, fluctuations persist up to very long time  $vt \sim 50$ .

## 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

# 甲元研究室

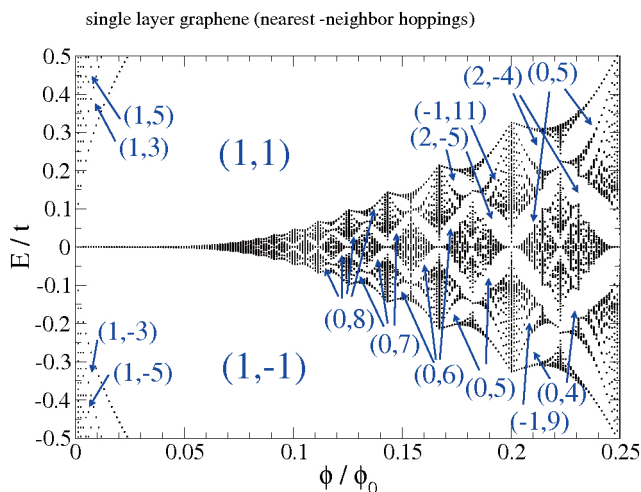
Kohmoto Group



甲元 真人  
KOHMOTO, Mahito  
准教授  
Associate Professor

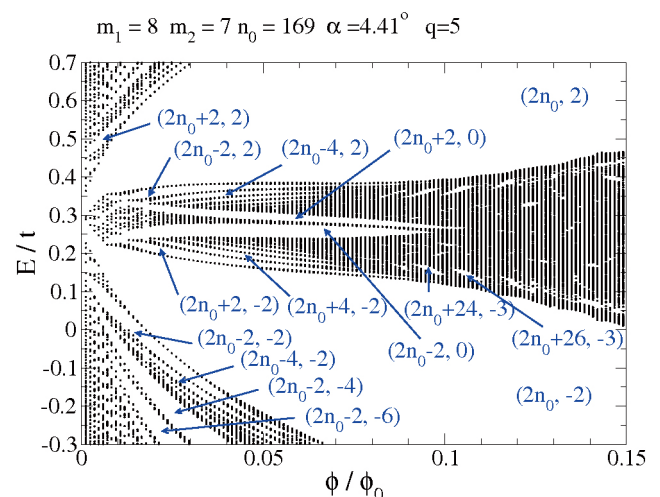
多体系では相互作用により多くの興味深い現象が起こる。最近の例ではグラフェンの量子ホール効果である。またトポロジカルな強い長距離相互作用によりトポロジカル絶縁体ではギャップの無い表面状態が現れ、これを始めに数々の新奇な現象を示す。このような現象は摂動法を主とする従来の物性理論では理解することがむずかしい。例えば量子ホール効果で成功したトポロジー理論のような非摂動的な場の理論がある。このような新奇な現象を非摂動的なトポロジー理論などの方法を開発して研究することが目的である。

In many body systems, there appear many interesting properties due to interaction. A recent example is the quantum Hall effects on graphene. Also topological long-range correlations give rise to novel properties like gapless surface states in topological insulators. Traditional theoretical approaches based on the perturbation theory often fail to analyze these recently found phenomena. For example, the non-perturbative field theoretical approach succeeded in the study of the quantum Hall effects. Our purpose is to develop the non-perturbative method including field theories and the solution of the basic problems in physics mentioned above.



磁場中のグラフェンのエネルギースペクトラムと量子ホール効果

Energy spectrum and quantum Hall effect of graphene in a magnetic field



磁場中の2重層グラフェンのエネルギースペクトラムと量子ホール効果

Energy spectrum and quantum Hall effect of double layer graphene in a magnetic field

## 研究テーマ Research Subjects

1. グラフェンの量子ホール効果  
Quantum Hall effect of graphene
2. 冷却原子の光学格子上的準結晶  
Quasicrystal of cold atom optical lattice
3. フリーデル総和則のスペクトル変位  
Spectrum shift of the Friedel sum rule

# 杉野研究室

Sugino Group



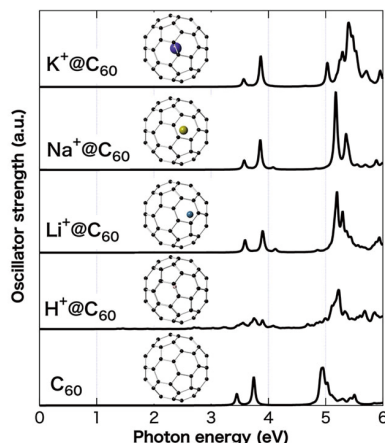
杉野 修  
SUGINO, Osamu  
准教授  
Associate Professor



野口 良史  
NOGUCHI, Yoshifumi  
助教  
Research Associate

スーパーコンピュータの高速化により、シュレディンガー方程式がかつてない規模で高精度に扱えるようになってきている。その結果、研究対象が均質な結晶から表面・界面を含む不均質な物質系へと広がり、物質全体の機能を視野に入れながら物性を広く理解することが現実のものとなってきた。そのような研究を支える重要な手法が第一原理計算であり、個々の電子やイオンの状態を正確に取り扱いながら、それが多数集まってできる物質の性質を演繹的に（第一原理から）求めることを可能にしている。本研究室では、そのような第一原理計算を用いた物性研究とそのための手法開発を行っている。

電極・溶液界面は機能性界面として応用さきわめて重要であるが、原子スケールで平坦な平衡界面系として基礎研究の格好の対象となっている。この系の計算を、京コンピュータなどを用いて行っている。また、第一原理計算の精度を向上させるための新しいアルゴリズムの開発や、計算対象を励起状態とそのダイナミクスに拡張させるための手法開発を並行して行っている。多彩な現象を総合的に研究できるように計算スキームの構築を狙った研究を展開している。

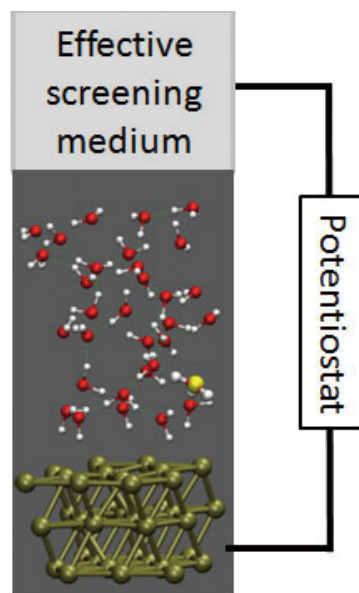


C<sub>60</sub> 及びアルカリイオン内包 C<sub>60</sub> の吸収スペクトルの第一原理計算。100 原子規模の第一原理励起状態計算が初めて可能になった。

Absorption spectra of C<sub>60</sub> and alkali-ion encapsulated C<sub>60</sub>. This demonstrates that the first-principles excited-state calculation is facilitated.

Advance in the supercomputer has facilitated access to a large-scale Schrödinger equation, thereby extending the target of study from the property of the homogeneous bulk to the functionality of inhomogeneous materials having surfaces and interfaces. Such study was accelerated by the advance in the first-principles calculation that bridges states of individual electron/ion to the properties of their agglomeration. This group utilizes the first-principles calculation for the study of complex material.

The main target is the electrode/solution interface. This system is well-known as the most important functional interface, such as catalysis, but it is worth emphasizing that this interface is atomically flat and is almost in equilibrium, providing thus an ideal system for the academic interface study. This group has advanced methods for the interface study and applied them using the K-computer. This group has also been developing novel algorithms for the accurate ground-state wave function and programs for the excited-state Green's function, aiming at developing a general-purpose first-principles package for the study of materials.



電極界面の動力学計算。拡張ラグランジェ法を用いた手法 (potentiostat MD) を開発することにより電位一定の下での第一原理計算が可能になった。

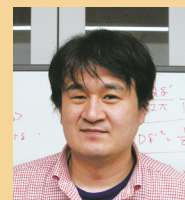
Electrode dynamics at constant potential. With the extended Lagrange method, called potentiostat MD, the electrode potential can be kept constant throughout.

## 研究テーマ Research Subjects

1. 電極・水溶液界面の第一原理分子動力学計算  
First-principles molecular dynamic simulation of the electrode/solution interface
2. グリーン関数法を用いた励起状態の第一原理計算  
First-principles Green's function calculation of excited-states
3. テンソル解析法を用いた基底状態の高精度計算  
First-principles tensor-decomposition approach to accurate ground-state wavefunctions
4. 非断熱カップリングの第一原理計算と励起状態のダイナミクス  
First-principles calculation of the nonadiabatic coupling and the excite-state dynamics

# 加藤研究室

Kato Group



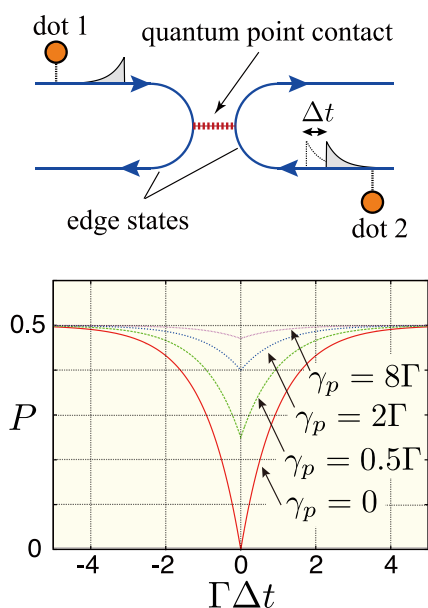
加藤 岳生  
KATO, Takeo  
准教授  
Associate Professor



阪野 塁  
SAKANO, Rui  
助教  
Research Associate

微細加工技術によって作成されるナノスケール素子の量子輸送特性について、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・スピントロニクス・高速駆動現象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、量子ドット系における近藤効果の非平衡輸送特性、二電子衝突実験における位相緩和効果、フォノン系における近藤効果に類似した熱輸送現象、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、巨大誘電リラクサーや進化ゲーム理論における遷移現象などがある。



The main research subject of our laboratory is theoretical study of quantum transport in nano-scale devices fabricated by fine processing technology. 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, spintronics, high-speed drive phenomena, 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 Kondo dots, dephasing effect in two-electron collider experiments, and Kondo-like effect in thermal transport of phonons.

We are also treating various research subjects related to many-body effects and nonequilibrium phenomena. Examples of our recent activities are transition phenomenon in evolutionary game theory and giant dielectric response in relaxors.

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、量子ホール効果の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  $\Delta t$  の関数として計算した結果。位相緩和が無視できる場合は、同時に到着した2つの電子は必ず異なるエッジ状態に1個ずつ散乱される ( $P=0$ ) が、位相緩和が存在すると  $P$  は徐々に有限の値になり古典値 ( $P=1/2$ ) に近づく。

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 in quantum Hall effect, 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  $\Delta t$ . Two electrons always scatter into difference edge states ( $P=0$ ) when  $\Delta t=0$  and dephasing is neglected. On the other hand, as dephasing effect increases, the probability  $P$  increases, and approaches the classical value  $1/2$ .

## 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
4. 多体電子系の数値計算手法開発  
Development of numerical algorithms for many-electron systems



物性理論研究部門  
Division of Condensed Matter Theory

## 中村研究室

Nakamura Group



中村 真  
NAKAMURA, Shin  
客員教授  
Visiting Professor

ゲージ・重力対応とは、強く相互作用する量子ゲージ理論を、計算が容易な一般相対性理論（重力理論）の古典力学に変換する解析手法である。この手法をゲージ粒子の多体系の解析に応用した場合、線形応答を超えた計算が可能となる場合があり、従来の手法にはない利点がある。本研究では、この手法を強相関系の非平衡物性の研究に応用し、新たな研究手法を創生することを目指している。

現時点では、非平衡定常系の基礎論、特に有効温度に関連する基本法則の探求に力を入れている。筆者らの研究を含む最近の研究で、強結合ゲージ理論で構成した非平衡定常状態の有効温度が重力理論側でのアナログブラックホールのホーキング温度で表されることが見出されたが、現在は、さらに有効温度の振る舞いを系統的に調べている。またゲージ・重力対応の枠組みで見出された、微分抵抗が転移する非平衡相転移についてより系統的に調べ、臨界指数などを詳細に調べていくことも予定している。

Gauge/gravity correspondence (AdS/CFT correspondence) is a map between a strongly interacting quantum gauge theory and a general relativity on a curved spacetime. The gravity picture has advantages such as we may analyze the statistical systems of gauge particles beyond the linear response regime.

Currently, I am studying on effective temperature of non-equilibrium steady states consisting of the gauge particles. In the gravity-dual picture, the effective temperature can be given as a Hawking temperature of an analog black hole that appears when the system is driven to out of equilibrium. I am surveying the dependence of the effective temperature on various parameters of the system. I am also planning to study on non-equilibrium phase transitions discovered in the framework of gauge/gravity correspondence where non-linear conductivity of the system jumps at a critical value of the parameter of the system. A detailed analysis of the critical phenomena in the phase transition will be a possible project.

物性理論研究部門  
Division of Condensed Matter Theory

## 古賀研究室

Koga Group



古賀 昌久  
KOGA, Akihisa  
客員准教授  
Visiting Associate Professor

粒子間相互作用の強い系である強相関系を対象として、様々な複合自由度による新奇な量子相・量子現象に対する理論研究を行っている。興味深い現象として、極低温における量子臨界的振る舞いが挙げられる。この振る舞いは、磁場や圧力などの外部パラメータを変化させ、秩序相が消失するときにしばしば出現する。最近、準結晶  $\text{Au}_{51}\text{Al}_{34}\text{Yb}_{15}$  において量子臨界的振る舞いが観測され、準周期系における電子相関効果にも注目している。

本研究室では、強相関量子系における新奇量子相ならびにダイナミクスの理論を軸に、理論研究を進めている。具体的なテーマとして準周期性を持つ二次元系に注目し、シンプルな平均場近似に加え、動的平均場理論に代表される非摂動論的手法を用いて解析を行っている。特に、低温における新奇量子物性、とりわけ準周期性によって出現する新奇量子相の可能性に注目し、理論研究を推進している。

The main research subject is theoretical study on novel quantum phases and phenomena in the strongly correlated electron systems with multiple degrees of freedom. One of the interesting examples is a quantum critical phenomenon, which is sometimes induced close to the ordered phases by varying magnetic field and pressure. Recently in the rare-earth quasicrystal  $\text{Au}_{51}\text{Al}_{34}\text{Yb}_{15}$ , quantum critical behavior has been observed, which stimulates further theoretical and experimental investigations on electron correlations in the quasi-periodic system.

In our group, we focus on novel quantum phenomena and their dynamics in the strongly correlated electron systems. One of our recent projects is to study electron correlations in two-dimensional quasi-periodic systems by means of the non-perturbative approach, e.g. the real-space dynamical mean-field theory, as well as a simple mean-field theory. Our aim is to predict new quantum phenomena and phases characteristic of the quasi-periodic systems and to provide qualitative and quantitative explanation of the quantum states.

# ヨンケーレ研究室

Jonckheere Group



ヨンケーレ チボー  
JONCKHEERE, Thibaut  
外国人客員教授  
Visiting Professor

量子コヒーレンスが重要な役割を果たすメソスケール素子・ナノスケール素子の輸送特性を理論的に研究している。特に量子ホール効果のエッジ状態を用いた Hong-Ou-Mandel 型二粒子干渉実験に関連して、時間に依存する単一電子輸送特性の研究を行っている。またクーパー対のコヒーレンスや絡み合い状態を利用した種々の超伝導デバイス(クーパー対スプリッターなど)の輸送特性にも興味をもっている。加藤研究室との共同研究では、単一電子を用いた干渉実験における電子間相互作用の効果について、新しい数値計算手法である行列積状態変分法および時間依存密度行列繰り込み群の手法の利用を試みる。また最近注目を集めているカイラル  $p$  波超伝導体  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の輸送特性についても研究を行っている。

My research subject is the theory of electronic transport in mesoscopic and nanoscopic systems, where quantum coherence plays an essential role. I have studied in particular the time-dependent transport of single electrons in edge states of the quantum Hall effect, which can be used to perform fundamental interference experiments, like the Hong-Ou-Mandel experiment. I have also studied transport in superconductors, in systems where the properties of the Cooper pairs (coherence, entanglement, ...) play an essential role, as in Cooper pair splitters. In collaboration with Prof. Kato, we try to use advanced numerical techniques -- matrix product states and time-dependent density matrix renormalization group -- to study the effect of electronic interactions on the inference experiments with single electrons in edge states of the QHE. We also study the transport in unconventional superconductors, which have an order parameter with a chiral  $p$ -wave symmetry, inspired by recent experiments on  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ .