

## 古崎物性理論研究室

### Condensed Matter Theory Laboratory

主任研究員 古崎 昭 (博士 (理学))

FURUSAKI, Akira (Ph.D)



#### キーセンテンス：

1. 物質の普遍的な性質を理解する
2. 物質の多様性を理解する
3. 新しい物質相を見つける
4. 相転移現象を理解する

#### キーワード：

強相関電子系、磁性、超伝導、新奇量子秩序、量子相転移、メゾスコピック系、アンダーソン局在

#### 研究概要

当研究室では、マクロな大きさをもった物質の示すいろいろな性質を、ミクロな世界を司る物理法則（量子力学や統計力学）にもとづいて理論的に解明することを目指して研究している。無限大の自由度を持った多電子系では、自発的に対称性の破れた秩序相が低温で現れ、温度・磁場・圧力などの変化とともに相転移が起きる。遷移金属・希土類酸化物や分子性半導体などの強相関電子系における超伝導や磁性はその典型例であり、これらの量子現象の普遍性と物質に即した多様性を研究する。

三角格子、籠目格子、パイロクロア格子上の反強磁性体などのフラストレーションの強い量子スピン系では、磁気秩序の形成が抑えられて非自明な秩序状態が生じる。その一例であるスピン液体、スピン・ネマティック相やカイラル秩序相の性質について研究している。また、局所的秩序変数をもたないトポロジカル秩序相や、量子（スピン）ホール系などのトポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に関する研究も行っている。

ランダムなポテンシャル中の電子波動関数が示す局在・非局在転移（アンダーソン転移）は、乱れによって生じる量子相転移現象の一種である。この量子相転移の普遍的な性質についても研究している。

#### 1. Pr パイロクロア磁性体の有効量子スピン模型の平均場理論および数値的解析（小野田、田中）

以前に Pr イオンのような希土類イオンの非クラマース磁気二重項に対して導出した、有効量子擬スピン-1/2 模型を、平均場近似および数値的解析によって結合定数の広範な領域にわたり系統的に研究した。最近接スピンアイス模型に異方的な量子力学的交換相互作用を導入することによって、強的・反強的四重極秩序相や U(1)スピン液体相を含むいくつかの相が出現することが明らかになった。

#### 2. Yb パイロクロア磁性体に対する有効量子スピン模型（小野田）

量子スピンドYNAMICSが実験的に最近になって観測されたもう一つのパイロクロア格子系磁性体群として、 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Yb}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$  が知られている。磁性を担う Yb イオンの 4f 磁気モーメントは、XY 的な単イオン磁気異方性を示し、低温で 1 次相転移を示すことが知られている。しかし、複数の実験グループが報告している磁気的性質は、磁気秩序の有無に関しても矛盾を含み、合理的に理解されていない。我々は、これらのパイロクロア格子上的 Yb イオンの磁気モーメントに対する有効量子模型を微視的に

導出した。特に、強いクーロン相互作用・LS 結合・結晶場の下での超交換相互作用を強結合展開から計算した。その結果、交換相互作用は容易面内で強磁性的であること、また、結合定数における磁氣的 U(1)対称性の破れが極めて大きいことが明らかになった。この異方的相互作用は、実験で観測されているカゴメ格子面内の強い相関をもたらす。

### 3. Ir パイロクロア酸化物の有効ハバード模型における磁性、 $Z_2$ および U(1)トポロジ (小野田)

イリジウム化合物は、Ir 5d 軌道に働く大きなスピン軌道相互作用のために、トポロジカルバンド絶縁体やトポロジカルモット絶縁体などの舞台を提供するという興味深い可能性を秘めている。我々は、パイロクロアイリジウム酸化物に対する第一原理計算を行い、最大局在ワニエ関数を求め、有効単一軌道ハバード模型を導出した。さらに、動的平均場近似とハートリー・フォック近似による計算によって模型を解析し、この系は先行研究で期待されていた非自明な  $Z_2$  トポロジは示さない一方、非自明な U(1)トポロジを示していることを見出した。

### 4. 多体交換相互作用が創る 2次元固体ヘリウム3の磁性 (桃井、Sindzingre、久保)

固体  $^3\text{He}$  薄膜において観測された量子スピン液体的振る舞いを理論的に理解するために、三角格子上のリング交換模型 (多体スピン交換模型) における量子スピン状態を研究した。スピン相互作用を6体のリング交換まで考慮して調べ、磁場中の磁気相図を得た。強磁性的2体相互作用と多体相互作用が競合する領域では、マグノンが束縛対を作ることにより、スピン・ネマティック秩序が形成され易いことを示した。また、ヘリウム3において実現する相互作用領域では、磁化曲線に狭い  $1/2$  プラトーが現れることを理論的に再現した。この結果は実験結果とよく合っているため、今後、実験で観測された量子スピン液体的状態とスピン・ネマティック状態の関係の解明が待たれる。

### 5. スピン・ネマティック相での動的スピン相関 (進藤、桃井)

スピン・ネマティック状態は、スピンの「液晶状態」とも呼べるような量子スピン状態で、スピン液体的な性質と「スピン固体」(従来型の磁気秩序状態)的な性質の両方を兼ね備えた量子状態である。我々は、特にその中でもボンド型スピン・ネマティック状態に注目して、研究を進めた。これまで、我々は、このスピン・ネマティック状態を記述する平均場理論を構成した。今回は、これに立脚して更に、ボンド型スピン・ネマティック状態の磁氣的な性質 (特に動的スピン相関関数) を、平均場からの揺らぎの効果を 1-loop の範囲 (乱雑位相近似) まで取り込み計算した。それに基づき、NMR の核磁気緩和率及び比熱の低温での温度依存性を議論した。

### 6. 変分モンテカルロ法による正方格子上量子フラストレート強磁性体の研究 (進藤、桃井)

変分モンテカルロ法を用いて、スピノンのトリプレット・ペアリング状態として構成されるいくつかのボンド型スピン・ネマティック状態のエネルギーを数値的に計算した。それらのエネルギーを比較することで、スピン  $1/2$  の正方格子量子フラストレート強磁性体の相図を得た。また、最低エネルギーを与えるスピノンのトリプレット・ペアリング状態 (これを  $Z_2$  planar 状態と呼ぶ) について、そのエネルギーの有限サイズスケリングと静的なスピンの相関関数を計算し、ボンド型スピン・ネマティック状態の静的振る舞いを調べた。

### 7. スピン $1/2$ フラストレート鎖の磁気多極子液体相の核磁気共鳴緩和率による特徴づけ (佐藤、引原、

桃井)

近年、最近接交換相互作用  $J_1$  と次近接相互作用  $J_2$  をもつ 1 次元スピン 1/2 模型 ( $J_1$ - $J_2$  スピン鎖) で記述できると考えられる擬 1 次元銅酸化物磁性体 ( $\text{LiCuVO}_4$ ,  $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$  など) がマルチフェロイクスまたはフラストレート磁性体として注目を集め、精力的に実験研究が成されている。一方、 $J_1$ - $J_2$  スピン鎖に磁場を加えると、磁気多極子が準長距離秩序を示す新しい液体相が現れることが理論的に示された。これまで我々は、多極子液体相の特徴を捉えるには、低エネルギー励起構造と核磁気共鳴緩和率  $1/T_1$  の温度依存性の測定が有効であることを明らかにしてきたが、今年度はさらに、 $1/T_1$  の温度・磁場依存性を、場の理論による解析的結果に密度行列繰り込み群法から求めた数値データを取り込むことで正確に評価した。その結果、 $1/T_1$  の磁場依存性にも多極子相の特徴的振る舞いが現れることが明らかになった。

#### 8. スピン 1/2 XXZ 鎖における局所演算子のボソン化公式係数を定量的に評価する方法 (佐藤)

スピン 1/2 XXZ 鎖の性質は、ベータ仮設や数値計算、場の理論(ボソン化)の方法により精密に調べられている。特に近年、XXZ 鎖のスピン演算子のボソン化公式の係数を DMRG などの強力な数値計算法を利用して精度よく決定する方法(古崎、引原)が確立し、これにより XXZ 鎖の様々な動的・静的相関関数や摂動効果が定量的に評価可能となっている。今回我々は XXZ 鎖のもう一つの基本的物理量であるダイマー演算子に焦点を当て、そのボソン化公式係数を定量評価する新しい方法を提案した。まず XXZ 鎖にわざわざボンド交替項を加えてダイマー化させる。このダイマー化スピン鎖の低エネルギー有効理論は可積分の sine-Gordon(SG) 模型となる。この系のスピンギャップは SG 模型のギャップ公式からダイマー演算子のボソン化係数を含んだ関数として与えられる。一方、同じギャップは数値対角化法で精度良く評価することができる。この 2 つを比較することでダイマー演算子のボソン化係数を決定することができる。我々がここで提案した方法は、一般に 1 次元量子臨界系において、ある演算子を含む摂動を加えたとき、その低エネルギー有効理論が SG 模型のように性質がよく知られている場の理論に等しい場合に利用可能である。また、1 次元系の長距離の性質を調べる必要がないため、一般には既存の DMRG による方法より計算量が少なく済むと期待できる。

#### 9. 電荷秩序状態に関する理論的研究 (大塚、妹尾)

近年、電荷秩序を示す分子性導体に対する外場応答、特に外部磁場効果が実験的に調べられている。我々は、その典型的なモデルとしてスピン自由度に対するゼーマン項を含んだ 1 次元拡張ハバードモデルを提案し、これに量子モンテカルロ法を適用し数値的に調べた。外部磁場を印加することによって連続的に電荷秩序相関が発達し、強磁場極限での完全分極状態での電荷秩序とつながる結果を得た。また、鎖間相互作用を平均場近似の範囲で扱い、電荷秩序転移温度が磁場により上昇する現象も見出した。

#### 10. 単一成分分子性導体の有効モデル化と磁気状態 (妹尾、大塚)

この 10 年ほどで新規に開発された単一成分分子性導体の有効モデルを、第一原理計算によるバンド計算をもとに構築した。その結果、これらの物質のフェルミ面近傍のバンド構造が、分子内の複数の自由度 フラグメント を基底とした強束縛モデルで記述されることを示した。また、これにオンサイトクーロン相互作用を加えた多軌道ハバードモデルを平均場近似で扱い、物質によって異なる磁気状態が現れることを示した。

### 11. トポロジカル絶縁体超伝導表面の磁壁に沿ったマヨラナフェルミオン鎖 (Neupert, 小野田、古崎)

超伝導性を示す  $Z_2$  トポロジカル絶縁体と磁性体との界面において、マヨラナフェルミオン (反粒子が自分自身であるフェルミオン) が磁性体の磁壁に沿って一次元格子状に形成されることを見出した。特に、この人工的強束縛マヨラナフェルミオンのトランスファー積分は、 $Z_2$  トポロジカル絶縁体表面のディラックフェルミオンに対する化学ポテンシャルを調節することによって制御できる。

### 12. トポロジ起源のスカーミオンホール効果 (小野田)

静電場中における、磁気渦系ないしスカーミオンとして知られるトポロジカル欠陥を、場の理論的手法および非平衡グリーン関数法によって研究した。スピントランスファートルクとしても知られている、電流/スピン流と電子のベリー位相の結合の効果によって、ピン止めポテンシャルが弱い場合にスカーミオンは結晶中を動くことが分かった。特に、有限サイズの系や、相対論的スピン軌道相互作用を持った系では、トポロジ起源のスカーミオンホール輸送が生じる。

### 13. トポロジカル超伝導体の物性 (進藤、古崎)

トポロジカル超伝導体とは、Bloch-Bogoliubov 波動関数の持つ位相の波数空間での大域的な性質のみ特徴づけられるトポロジカル秩序状態であり、そのバルクの電子状態は、Bogoliubov 粒子の個別励起にギャップが開いているという意味で、「featureless な真空」とも言える。従って、そのような系の特徴的な物性は、「クリーンな」バルクの物性それ自身に求めるよりはむしろ、界面でのギャップレスな個別励起や、乱れなどの摂動で引き起こされるトポロジカル量子臨界点に求めるのが自然である。我々は、スピントリプレットのトポロジカル超伝導体の界面に束縛された、マヨラナ粒子的なギャップレスの個別励起に注目し、その特徴が、電子スピン共鳴実験を通じて捉えられることを論じてきた。具体的には、この界面束縛状態が、そのマヨラナ粒子性の為に、本質的にイジングスピンの自由度しか持っていないこと、そして、そのイジングスピンの向きがバルクの d-vector によって決まっていることを論じた。さらに、この界面マヨラナイジングスピンのプローブとして、磁性不純物を界面に導入することを考え、その不純物スピンの電子スピン共鳴に現れる特徴的な量子散逸を通じて、この Ising スピンの向きが決定できることを理論的に論じた。

### 14. 磁性不純物を含んだ量子スピンホール系のエッジ状態における伝導特性 (田中、古崎、Matveev)

2次元量子スピンホール系において、互いに逆向きのスピンを持った電子が反対方向に伝導するヘリカルエッジ状態が実現する。この系は時間反転対称性を有するため、エッジ状態において非磁性不純物による後方散乱は受けないが、磁性不純物による後方散乱は起こりうる。我々は、磁性不純物による後方散乱によって、ヘリカルエッジ状態の伝導特性がどのように変化するかを調べた。その結果、エッジ状態の電気伝導は、定常電圧下では磁性不純物による補正を受けないことが分かった。一方、熱伝導の方は磁性不純物による後方散乱によって変化し、熱コンダクタンスは近藤温度付近で極小値をとるような振る舞いを示すことが分かった。

### 15. 3端子に接続された量子ドット系における交差アンドレーエフ反射 (田中)

2つの常伝導リードと1つの超伝導リードに接続された量子ドット系の輸送特性を調べた。この系における2つの常伝導リードの間では、通常の電子の同時トンネリングに加え、交差アンドレーエフ反射と呼ばれる非局所的なアンドレーエフ反射によるトンネリングが生じる。この二つのトンネリングのう

ち、どちらのトンネリングが支配的かによってコンダクタンスの正負が異なる。本研究では、摂動論および数値繰り込み群を用いて、この系のコンダクタンスを求めた。その結果、量子ドット内のエネルギー準位やクーロン相互作用の大きさを変えることで、コンダクタンスの正負が入れ替わることを明らかにした。

#### 16. 冷却原子系におけるボゾン・フェルミオン混合効果と相関効果 (Akhanjee, 古崎)

相互作用が制御可能な3次元ボーズ・フェルミ混合系の励起スペクトルを解析した。フェルミ原子とボーズ原子が結合したフェルミ分子がフェルミ液体としてふるまうことを示した。また、1次元ボーズ・フェルミ混合系に対して、原子間の相互作用をボゾン化法と摂動的繰り込み群で扱い、この結合原子によるフェルミ液体相が出現することを確かめた。

#### 17. スピングラス (Akhanjee)

長距離相互作用するスピングラス球形モデルに対する厳密解を構成した。ハミルトニアンをある種のポテンシャルに閉じ込められた対数的相互作用する古典クーロン気体の問題にマップした。このクーロンガス相の振る舞いから、相転移の存在を確かめた。

-----  
**Key Sentence:**

1. Understand universal properties of materials
2. Understand diversities of materials
3. Find a new state of matter
4. Understand phase transitions

**Key Words:**

strongly-correlated electron systems, magnetism, superconductivity, novel quantum orders, quantum phase transitions, mesoscopic systems, Anderson localization

**Outline**

Main aims of our research are to discover theoretically novel properties of materials of macroscopic scale and understand them from the physical laws that govern microscopic world. Many-electron systems go into ordered phases with spontaneous symmetry breaking at low temperatures. Typical examples are superconductivity and magnetism found in strongly-correlated electron systems like transition-metal or rare-earth oxides and molecular conductors, which are our major research subjects.

In strongly-frustrated quantum spin systems such as triangular, kagome, and pyrochlore antiferromagnets, exotic quantum states, instead of a magnetic ordered state, are expected to emerge. For example, we have recently considered spin liquids, spin nematic states, and chiral ordered states. Furthermore, we study states with some kind of topological order: topological insulators and superconductors.

We also study universal properties at localization-delocalization transition of electrons moving in random potential, which is a disorder-induced quantum phase transition.

### 1. **Mean-field and numerical studies on the effective quantum spin model for Pr pyrochlore-lattice magnets** (Onoda, Tanaka)

The effective quantum pseudospin-1/2 model for magnetic pyrochlore oxides, which we previously derived for non-Kramers magnetic doublets of rare-earth ions, such as Pr ions, has been studied systematically by mean-field and numerical analyses in a wide range of coupling constants. It has been found that introducing anisotropic quantum-mechanical exchange couplings to the nearest-neighbor spin-ice model produces several phases including ferroquadrupolar and antiferroquadrupolar phases and a U(1) spin liquid phase.

### 2. **Effective quantum spin model for Yb pyrochlore-lattice magnets** (Onoda)

Recently, quantum spin dynamics has been experimentally observed in another class of magnetic pyrochlore oxides such as  $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  and  $\text{Yb}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ . Yb 4f magnetic moments, which are responsible for the magnetism of these materials, show easy-plane single-ion magnetic anisotropy, and undergo a first-order phase transition at a low temperature. However, magnetic properties, including the presence or absence of magnetic order, reported by several experimental groups are not compatible and are not understood reasonably well. We have provided a microscopic derivation of the effective quantum model for Yb 4f magnetic moments. In particular, the superexchange interaction is calculated under large local Coulomb repulsion, LS coupling, and crystal field by means of the strong-coupling perturbation expansion. It reveals a ferromagnetic exchange coupling between the planar components as well as an appreciably large violation of the U(1) symmetry. This anisotropic interaction supports the experimentally observed strong correlation within kagome planes.

### 3. **Magnetism and $Z_2$ and U(1) topology of the effective Hubbard model for Ir pyrochlore oxides** (Onoda)

There has been an intriguing possibility that the iridate materials may provide platforms of topological band and Mott insulators, because of the large spin-orbit coupling for the Ir 5d orbitals. We have performed first-principles calculations on pyrochlore iridates and calculated maximally localized Wannier function to obtain the effective single-orbital Hubbard model. Further calculations of the model by the dynamical mean-field and Hartree-Fock approximations show that the system cannot exhibit a nontrivial topological structure of the  $Z_2$  character but U(1).

### 4. **Magnetism of 2D solid $^3\text{He}$ induced by multiple-spin exchange interactions** (Momoi, Sindzingre, Kubo)

Aiming at microscopic understanding of anomalous magnetism observed in the 2nd layer of solid  $^3\text{He}$  films on graphite, we extensively studied the multiple-spin exchange model with two-, four-, five-, and six-spin ring exchange on the triangular lattice. We used exact diagonalization analysis of finite-size systems, complemented with magnon instability arguments at the fully polarized state. We found that a half-magnetization plateau appears in a wide parameter region, extending near to

an FM phase boundary. Near the experimentally estimated parameter point, this magnetization plateau ends up with an edge and hence can be very narrow, as observed in a recent magnetization measurement. In the parameter regime close to the edge of the magnetization plateau, magnons form d+id-wave two-magnon bound states, giving rise to a non-chiral nematic order.

#### **5. Dynamical quantities in spin nematic states (Shindou, Momoi)**

Spin nematic state is a “magnetic analogue” of liquid crystals, which has both quantum spin liquid character and “spin-solid” (i.e. conventional magnetic ordered state) character. Previously, we have succeeded in constructing a proper mean-field description of the bond-type spin nematic state in the spatial dimension greater than two. To give unique physical characterization to this novel quantum ordered state, we have calculated the dynamical spin structure factors, where the fluctuations around the mean-field solution are taken into account within the random phase approximation (RPA). Based on this result, we have discussed the low-temperature behavior of the longitudinal relaxation time of the nuclear magnetic resonance and that of the specific heat.

#### **6. Variational Monte Carlo studies on square-lattice quantum frustrated ferromagnet (Shindou, Momoi)**

We have introduced several kinds of projected spin-triplet pairing states of spinons as the bond-type spin nematic state and calculated their energies using the variational Monte-Carlo method. Based on these energetics, we speculated the phase diagram of the square-lattice quantum frustrated ferromagnet with the spin-1/2. Furthermore, we have calculated the finite size scaling of the energy and static spin correlation functions of the lowest trial wavefunction (which we dubbed as  $Z_2$  planar state). The latter information gives the information on physical properties of bond-type spin nematic state, which is complementary to those obtained in the RPA calculations.

#### **7. NMR relaxation rate in field-induced magnetic multipolar liquid phases of spin-1/2 frustrated chains (Sato, Hikihara, Momoi)**

Recently, several quasi-one-dimensional cuprates such as  $\text{LiCuVO}_4$  and  $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ , all of which are believed to be approximately described by the  $J_1$ - $J_2$  spin chain, have been intensively studied as multiferroics or frustrated spin systems. Recent theoretical studies revealed that, when magnetic field  $H$  is applied to the  $J_1$ - $J_2$  spin chain, magnetic quadrupolar, octupolar or hexadecapolar liquid phases emerge in a wide parameter space. Motivated by these theoretical and experimental studies, we previously predicted that the multipolar liquid phases can be distinguished from usual Tomonaga-Luttinger liquid phase by measuring temperature dependence of nuclear magnetic resonance (NMR) relaxation rate  $1/T_1$ . In this year, extending this study, we accurately evaluate temperature and magnetic-field dependence of  $1/T_1$  in the quadrupolar and octupolar liquid phases, combining numerical data from DMRG with the field-theoretical formula. It was found that, in addition to the temperature dependence of  $1/T_1$ , the field dependence also exhibits a characteristic feature in the multipolar liquid phases. This result is expected to be relevant for searching field-induced multipolar phases in above-mentioned cuprate compounds.

#### **8. New method of determining coefficients of bosonized operator in spin-1/2 XXZ chain (Sato)**

The spin-1/2 XXZ chain is integrable and its various properties can be quantitatively analyzed by using Bethe ansatz, numerical methods, and field theories (bosonization). We propose a new method for calculating coefficients of bosonized operators, focusing on the dimer operator in XXZ chain, which is an important degree of freedom in spin-1/2 chains. (i) First, we deform the XXZ chain by introducing an external dimerization term. The resultant low-energy effective theory becomes an integrable sine-Gordon (SG) model. (ii) The spin gap of the dimerized chain is given as a function of coefficients of the bosonized dimer operator through the gap formula of SG model. On the other hand, we can directly evaluate the same spin gap by using numerical diagonalization method for finite-size dimerized chains. (iii) Comparing two kinds of evaluated spin gaps, we can obtain coefficients of the bosonized dimer operator with reasonable accuracy. This method could be applicable to one-dimensional critical systems if the effective theory for their deformed systems is well established like SG model. In addition, it is expected that our method is easier than the established method by Furusaki and Hikihara in principle since the former only requires calculating excitation gaps, while the evaluation of long-distance behavior of two-point functions is necessary in the latter.

#### **9. Theoretical study of charge ordering (Otsuka, Seo)**

Recently, responses of molecular conductors showing charge order in external field, e.g. magnetic field, have been investigated experimentally. We studied the one-dimensional extended Hubbard model under magnetic field, i.e. with Zeeman term, using quantum Monte Carlo method. The results show that the charge order correlation continuously enhances with applying the magnetic field, which is connected to the limit of fully spin polarized charge ordered state at strong magnetic field. We also showed that by introducing interchain coupling the transition temperature increases with magnetic field.

#### **10. Effective model and magnetic states of single-component molecular conductors (Seo, Otsuka)**

Single-component molecular conductors are newly synthesized material systems, which have been developed during the last decade. We investigated their electronic structure within first-principles band calculation and constructed effective models for low energy. A tight binding model with multiple degree of freedom within each molecule (fragments) successfully describes the band structure near the Fermi level. Then we considered multiband Hubbard model for these compounds and showed by mean-field calculations that various magnetic states can appear in different materials.

#### **11. Chain of Majorana fermions along a magnetic domain wall on the surface of superconducting topological insulators (Neupert, Onoda, Furusaki)**

It has been found that Majorana fermions, fermions that are their own antiparticles, can be created in the form of a one-dimensional lattice along a magnetic domain wall at the interface of a



superconducting strong  $Z_2$  topological insulator and an insulating ferromagnet. In particular, the transfer integral of the artificial tight-binding Majorana fermions can be controlled by tuning the chemical potential of the Dirac fermions.

#### **12. Skyrmion Hall effect of topological origin (Onoda)**

Topological defects known as magnetic vortices or skyrmions under static electric field have been studied by means of a field-theoretical and non-equilibrium Green function methods. Because of the coupling between the electric/spin current and the Berry phase of the electrons, which is sometimes called the spin-transfer torque, skyrmions can move over the crystal when the pinning potential is weak. In particular, there appears an intrinsic topological Hall transport of skyrmions in a finite-size system or with a relativistic spin-orbit coupling.

#### **13. Quantum impurity spin in Majorana edge modes (Shindou, Furusaki)**

Massless Majorana fermions are realized in several condensed matter systems, such as boundaries of superfluid phases of liquid  $^3\text{He}$ , those of chiral  $p$ -wave superconductors and also interface regions between topological insulators and conventional superconductors/ferromagnets. Being identical to its anti-particle, Majorana fermion is electrically neutral. Thus, focusing on its spin degree of freedom, we discussed how to probe this novel emergent particle in terms of the electron spin resonance (ESR) experiment. We first argue that the Majorana edge modes of two-dimensional spin-triplet topological superconductors have Ising-like spin density whose direction is determined by the  $d$ -vector characterizing the spin-triplet pairing symmetry in the bulk. Exchange coupling between a probe spin and this Majorana fermion spin is therefore Ising-type. When the field is applied transverse to this Majorana Ising spin, the system can be described by the Ohmic dissipative two-state system. Based on this observation, we have clarified what kind of anisotropic “Kondo-like” features would be theoretically expected in the ESR absorption spectrum.

#### **14. Transport on edge states of a quantum spin Hall system with a magnetic impurity (Tanaka, Furusaki, Matveev)**

In a two-dimensional quantum spin Hall system, helical edge states that carry spin-up and spin-down electrons in opposite directions are formed at the boundary. In these edge states, a nonmagnetic impurity cannot backscatter an electron in the presence of time-reversal symmetry. On the other hand, backscattering by a magnetic impurity is allowed. We studied the effect of backscattering from a magnetic impurity on the conductance of a quantum spin Hall system. We found that the correction to the electrical conductance caused by such an impurity vanishes in the dc limit. On the other hand, the thermal conductance does acquire a finite correction due to the spin-flip scattering by the impurity, and its temperature dependence shows a non-monotonic behavior with a minimum occurring at the Kondo temperature.

#### **15. Crossed Andreev reflection in a three-terminal quantum dot (Tanaka)**

We studied transport through a single quantum dot connected to three terminals, consisting of two

normal leads and one additional superconducting lead. In this system there are two processes to carry electrons between two normal leads; one is the conventional electron cotunneling and the other is the nonlocal Andreev reflection. The latter is called a crossed Andreev reflection. The sign of the conductance depends on whether the electron cotunneling or the crossed Andreev reflection is dominant. We calculated the conductance in this system, using the perturbation approximation and the numerical renormalization group. We found that the sign of the conductance can be changed by altering the energy level or the Coulomb interaction at the dot.

#### **16. Bose-Fermi mixtures and correlated phenomena in cold atomic gases (Akhanjee, Furusaki)**

The excitation spectrum was analyzed for a three-dimensional (3D) mixture of fermionic and bosonic atoms which can convert to fermionic molecules through the Feshbach resonance. It was shown that the system behaves as a Fermi-liquid of mixed atom-molecule pairs. We have extended our analysis of this model in one-dimension and utilized the renormalization group method within a bosonization scheme. By studying the spatial decay of various correlation function, we identified certain paired phases between the fermionic atoms and molecules.

#### **17. Spin glasses (Akhanjee)**

An exact solution has been developed of a spherical model of a spin glass, which is a long-ranged, frustrated spin system with quenched disorder. A new approach to disorder-induced criticality has been introduced where a disorder averaged system is mapped onto a classical gas of charges and a phase transition is confirmed from thermodynamic signatures in the dual Coloumb gas phase.

***Principal Investigator***

古崎 昭 Akira Furusaki

常次 宏一 Hirokazu Tsunetsugu

Nicholas Shannon

Jaime Merino

***Research Staff***

桃井 勉 Tsutomu Momoi

古川 俊輔 Shunsuke Furukawa

小野田 繁樹 Shigeki Onoda

笠 真生 Shinsei Ryu

妹尾 仁嗣 Hitoshi Seo

進藤 龍一 Ryuichi Shindou

田中 洋一 Yoichi Tanaka

佐藤 正寛 Masahiro Sato

Shimul Akhanjee

大塚 雄一 Yuichi Otsuka

***Students***

仲井 良太 Ryota Nakai

Titus Neupert

***Assistant and Part-timer***

網代 雅代 Masayo Ajiro

***Visiting Members***

前川 禎通 Sadamichi Maekawa

求 幸年 Yukitoshi Motome

有田 亮太郎 Ryotaro Arita

引原 俊哉 Toshiya Hikihara

是常 隆 Takashi Koretsune

Konstantin Matveev

Christopher Mudry

Karlo Penc

Philippe Sindzingre

小布施 秀明 Hideaki Obuse

内海 裕洋 Yasuhiro Utsumi

大橋 琢磨 Takuma Ohashi

伊豆山 健夫 Takeo Izuyama

坂井 徹 Toru Sakai

久保 健 Kenn Kubo