

古崎物性理論研究室 Condensed Matter Theory Laboratory

主任研究員 古崎 昭
Furusaki, Akira

電子間斥力のため互いに避けあいながら固体中を運動している電子の集団（強相関電子系）が示す、多様な量子的秩序の理解が主要な研究課題である。その具体例として、遷移金属酸化物や有機導体を舞台とする強相関電子系における磁性、超伝導、新奇秩序状態、量子相転移などについて研究を行っている。さらに、メゾスコピック系において電子の粒子・波動二重性によって生じる新しい量子効果の探求や、固体中の不純物や欠陥などによるランダムなポテンシャルによって散乱された電子の局在・非局在転移についても研究をすすめている。

1. 強相関電子系の理論的研究

(1) Na_xCoO_2 と LiRh_2O_4 の大きな熱起電力（有田）

Na_xCoO_2 における大きな熱起電力と高い電気伝導度の共存の起源を、ボルツマン方程式を解析することによって調べた。その結果、状態密度や有効質量あるいはバンド幅ではなく、この系の a_{1g} bandの特徴的なバンド分散が重要な役割を果たしている可能性があることがわかった。

高木磁性研究室で最近合成された LiRh_2O_4 の230K以上の金属相で観測される、(金属としては)大きな熱起電力の起源について、LDA+DMFTの方法によってゼーベック係数を計算することで調べた。その結果、LDA+DMFTは実験結果を非常によく再現することがわかった。また、この系の場合、ボルツマン方程式もLDA+DMFTの結果とよく一致する結果を与えることもわかった。そこでボルツマン方程式を仔細に検討し、この系の大きな熱起電力の起源として、 Na_xCoO_2 と似た機構が働いている可能性を指摘した。さらに、同物質において、dopingによってpower factorをより大きくする可能性について検討した。

(2) フラストレーションのある量子次元スピン模型の磁場中での相図（引原^{*1}, Kecke^{*2}, 桃井, 古崎）

強磁性的な最近接交換相互作用 J_1 と反強磁性的な次近接交換相互作用 J_2 をもった、 $S=1/2$ の次元ハイゼンベルグ模型の磁場中での基底状態を研究した。昨年度行った飽和磁化近傍の研究から、 J_1/J_2 がおよそ-2.7から0の間のパラメータ領域では2つのマグノンの束縛状態がボーズ凝縮したスピン・ネマティック相が基底状態となり、 $J_1/J_2=-3$ の付近では3マグノンの束縛状態の凝縮相(トライアティック相)になることが明らかになっている。今年度は強磁性転移点($J_1/J_2=-4$)近傍にまで解析をすすめ、さらに4マグノン、5マグノン等の束縛状態が凝縮した多極子秩序状態が存在することを明らかにした。また、ネマティック相の低磁場側に、2つのスピンの外積の磁場方向成分(ベクトル・カイラリティ)が長距離の秩序をもった相が出現することを、密度行列繰り込み群法による数値計算によって発見した。さらに、ネマティック相やトライアティック相における相関関数を密度行列繰り込み群法による数値計算し、その結果が有効理論(ボゾン化法)の解析と一致することを確かめた。

(3) フラストレートした強磁性体の平均場近似（桃井, 大橋^{*1}）

強磁性相互作用と反強磁性相互作用が競合する2次元正方形格子上の J_1 - J_2 模型に現れるネマティック相および周辺の相図を記述する有効理論の構築を目指し、Schwinger ボソンを用いた平均場近似による記述を行った。強磁性相およびcollinear反強磁性相の定性的振る舞いを記述した。

(4) マルチフェロイックスにおけるスピンと分極の結合（小野田）

モット絶縁体の電子配置をとる遷移金属-リガンド-遷移金属のクラスター模型に対して、クーロン相互作用が大きい強結合極限からの摂動論を用いて、局所的に誘起される電気双極子モーメントを計算した。その際に、スピン軌道相互作用も考慮に入れた。その結果、双極子モーメントには、電荷の自由度による自明な寄与の他に、局在スピンの自由度によって誘起される次の3つの機構が生じることを示した。(i)2局在スピンの結合中心での空間反転対称性がない場合、交換相互作用の磁気歪による寄与が生じ、4倍周期のコリニア磁気秩序によって巨視的電気分極をもたらす。(ii)二つの局在スピンのベクトル・カイラリティが、通常、螺旋磁性体において巨視的電気分極を発生させる。(iii)局在スピンの1イオン異方性からの寄与が存在し、デラフォサイト格子系における磁性強誘電性の起源となっている。特に、(ii)と(iii)はスピン軌道相互作用の結合定数に比例する。このような電気磁気結合はモット絶縁体の電子構造によらず存在し、特に、スピン1/2の系においても有限に残ることがわかった。TbMnO₃に対して半定量的な解析を行い、実験で観測されている電気分極を説明した。

(5) 量子異常ホール効果におけるクロスオーバー（小野田）

希薄不純物を含む金属強磁性体における異常ホール効果に対して、電気伝導度の関数として2つのクロスオーバーが生じることを、Keldyshグリーン関数法に基づいた量子輸送理論から解明した。緩和率がフェルミ面近傍のスピン軌道相互作用のエネルギーより小さいスーパークリーンな場合には、スキュー散乱による外因機構が支配的となり、 χ_{xy} と χ_{xx} が成立する。緩和率がこれより大きくなると、プロッホ波導関数のベリー位相による内因機構が支配的になり、 χ_{xy} は一定となる。緩和率がフェルミ・エネルギーより大きくなって伝導性が悪くなる場合には、 χ_{xy} と χ_{xx} ^{1,6}という新しい振る舞いを発見した。遷移金属、酸化物、半導体など広範な強磁性物質群における異常ホール効果の実験結果をまとめ、我々の理論に合致することを示した。

(6) 擬次元マルチフェロイックス系におけるカイラリティと量子効果（古川^{*3}, 佐藤^{*4}, 小野田）

擬次元マルチフェロイックス系 LiCuVO_4 , LiCu_2O_2 などにおける、カイラル秩序形成と量子揺らぎの競合を理解するためのミニマルな模型として、スピン1/2フラストレート鎖を厳密対角化および有効場の理論により解析した。実際の物質に存在すると考えられる、容易面異方性を模型に取り入れ、それがカイラル秩序発現に重要な役割を持つことを示した。ただし、強い量子揺らぎのために、カイラル秩序変数は古典値に比べ非常に小さい値に抑制されている。その結果、弱い螺旋相関と強いコリニア相関が共存した、量子系特有のカイラル秩序状態が現れることを示した。また、面内のカイラリティのダイナミクスに、量子揺らぎによるギャップ

プレス・ソリトンが現れることを明らかにした。これは、電気磁気効果を通して誘電関数に寄与すると考えられる。

(7) 磁場中のスピン梯子系において微小な4スピン相互作用が誘起するカイラル秩序(佐藤⁴)

最近のモット絶縁体磁性体における4スピン交換相互作用の効果の理論的研究により、4スピン結合が新しいダイマー秩序、スカラー・カイラル秩序、ネマティック秩序などを誘導しうることが明らかになってきた。しかし、これら新しい秩序の出現には、多くの場合、2スピン交換相互作用と同等かそれ以上の結合定数を持つ4スピン項が必要であり、³He固体薄膜などの一部の系を除いて、そのような大きな結合定数を期待することはできない。本研究では「弱い4スピン交換相互作用によって誘起される新しい秩序や現象はないか」ということを理論的に考察した。その結果、適当な磁場下にある2本鎖反強磁性スピン梯子系では、鎖内の2スピン反強磁性結合に比べて微小な鎖間4スピン相互作用がベクトル・カイラル秩序を引き起こすことを理論的に示した。スピン1/2梯子系においては飽和磁化近傍領域に、スピン1以上の梯子系では下部臨界磁場近傍から飽和磁化近傍までの広範囲で、カイラル秩序が出現可能である。梯子格子型の化合物が多数合成されていることや、磁場が制御可能な外部パラメータであることから、このようなカイラル秩序が実際の磁性体で実現する(している)ことが期待される。このカイラル秩序の発現機構は、低次元マルチフェロイクス磁性体においても有効かもしれない。

(8) 1次元冷却原子ガス系における自発回転現象(佐藤⁴)

近年活発に研究されている冷却原子系を念頭に、1次元的にトラップされたボーズ・ガス系を考察した。1次元的にトラップされた原子ガス系はすでに実現されており、量子1次元系の典型的な液体状態である朝永ラッティンジャー液体の兆候が観測されている。理論的には、トラップ・ポテンシャルによってトラップ軸と垂直方向の運動のエネルギー固有値が離散化され、全ての原子がその最低準位を占有することで1次元系が実現していると考えられる。しかしながら、全冷却原子数、トラップ・ポテンシャルの強さ、などを調節すれば、最低準位のみならず上位準位もガスが占めている状態を実現することが可能だと考えられる。そこで、2次元調和振動子型トラップ・ポテンシャル中の斥力相互作用を持つボーズ・ガスにおいて上位準位の効果を理論的に調べた。調和振動子型ポテンシャルでは角運動量Lが良い量子数となり、最低準位はL=0、第2準位はL=+1, -1で2重縮退、という励起構造になっている。第2縮退バンドまで原子が占有するとき、原子間斥力がトラップ・ポテンシャルに比べて十分弱ければ、L=+1と-1バンド間の斥力相互作用と量子揺らぎの効果でこの2バンドの原子数が非等価になり、自発的に回転する基底状態が生じうることを予言した。このとき、系のZ₂反転対称性が自発的に破れている。

2. メソスコピック系における量子効果およびランダム系の統計物理学

(1) 2次元不規則電子系の金属-絶縁体転移における共形不変性(小布施³, 古崎)

2次元空間を運動する電子は、通常、ランダムなポテンシャルによる散乱によって空間的に局在してしまうが、強磁場下の整数量子ホール系や、スピン軌道相互作用が強くスピン回転対称性が破れた系(シンプレクティック系)では、金属-絶縁体転移(アンダーソン転移)あるいは臨界点が存在することが知られている。本研究では、昨年度に引き続き、2次元系のアンダーソン転移における共形不変性に関する研究を行った。昨年度、シンプレクティック系におけるアンダーソン転移について、菱形形状の試料の45°・90°・135°で開いた角付近での臨界波動関数のマルチフラクタル指数が、共形不変性より要請される関係式を満たしていることを示した。本年度は、角度が270°の場合についても共形不変性の関係式が満たされていることを確認した。また、ストライプ形状の準一次元系の局在長と2次元系の表面マルチフラクタル性を結びつける、共形変換より要請される関係式が、シンプレクティック系のアンダーソン転移点と整数量子ホール系のプラトー転移点で満たされていることを数値的に示した。このことは、2次元不規則電子系の臨界点における共形不変性の存在が普遍的な性質であることを示している。

(2) 量子スピン・ホール系の金属-絶縁体転移の臨界的性質(小布施³, 古崎, Mudry¹)

バンド絶縁体の端にスピン・カレントを運ぶクラマース縮退したギャップレス・エッジ状態が存在している状態、すなわち量子スピン・ホール相における金属-絶縁体転移について研究した。量子スピン・ホール効果の研究はスピントロニクスへの応用のみならず、トポロジカル絶縁体という新しい物質相に関する基礎的な問題として重要である。昨年度、不純物を含む量子スピン・ホール系のアンダーソン転移における局在長の発散を特徴付ける臨界指数が、通常のスピン回転対称性の破れた2次元不規則電子系と同じユニバーサリティ・クラス、すなわちシンプレクティック・クラスに属することを示した。今年度は、量子スピン・ホール系のアンダーソン転移における臨界波動関数の自己相似性(マルチフラクタル性)に関して、詳細な研究を行った。周期境界条件を課した有限系の臨界波動関数は、シンプレクティック・クラスのバルク・マルチフラクタル指数を示すことを明らかにした。一方、固定境界条件を課した系では、金属相から(エッジ状態のない)通常の絶縁相への相転移及び、エッジ状態のある量子スピン・ホール相への相転移という2種類の臨界点を区別する必要があり、前者の転移点での系の境界近傍の臨界波動関数は通常のシンプレクティック・クラスの表面マルチフラクタル指数を示すのに対し、後者の臨界波動関数はシンプレクティック・クラスの表面マルチフラクタル性とは異なるマルチフラクタル指数を持つことを明らかにした。

(3) シンプレクティック・クラスの非線形シグマ模型のZ₂トポロジカル項(Mudry¹, 小布施³, 古崎)

グラファイト単層膜(グラフェン)のディラック電子に対する不純物ポテンシャルが空間的にゆるやかに変動しているとき、2つのフェルミ点(K, K')間の散乱が無視できる。このとき、ディラック電子のアンダーソン局在の問題は、2成分のディラック方程式にランダムなスカラー・ポテンシャルが加わったものを解けばよい。また、同じハミルトニアンは3次元のZ₂トポロジカル絶縁体の表面ディラック電子の運動を記述する。この2次元ディラック電子の伝導はシンプレクティック・クラスに分類されるが、その長距離の物理を記述する有効理論を導出したところ、これまでに知られていたシンプレクティック・クラスの非線形シグマ模型に、新しいZ₂トポロジカル項が加わることを見出した。トポロジカル項の存在により、ディラック電子は局在できなくなる。

(4) 3次元のトポロジカル絶縁体の分類(古崎)

(整数)量子ホール絶縁体や量子スピン・ホール絶縁体のように系の端にギャップレス・エッジ状態が存在する絶縁体をトポロジカル絶縁体とよぶ。3次元では、スピン軌道相互作用の強い系でZ₂トポロジカル絶縁体とよばれる、2次元表面に質量0のディラック・フェルミオン励起をもつ絶縁体があることが理論的に最近指摘されている。副格子対称性をもったカイラル・クラスや粒子正孔対称なBdGクラスを加えた10種のランダム行列集団に対して、3次元トポロジカル絶縁体が存在しうるか否かを考察した結果、さらに4種のトポロジカル絶縁体が存在することがわかった。

Condensed matter theory laboratory is aiming at understanding theoretically various properties of materials, such as magnetism and superconductivity, at the level of quantum and statistical physics. In particular, we are interested in (low-dimensional) strongly-correlated electron systems and mesoscopic systems.

1. Strongly-correlated electron systems

(1) Large thermopower in Na_xCoO_2 and LiRh_2O_4

Using the Blotzmann equation approach, we studied the origin of the coexistence of the large thermopower and the large conductivity in Na_xCoO_2 . We found that it is not just the density of states, the effective mass, nor the band width, but the peculiar shape of the a_{1g} band, that is playing an important role in this phenomenon.

Motivated by the newly synthesized mixed-valent spinel LiRh_2O_4 for which a large thermopower is observed in the metallic cubic phase above 230K, we calculated the Seebeck coefficient by the combination of local density approximation and dynamical mean field theory (LDA+DMFT). We found that the experimental values were well reproduced not only by LDA+DMFT but also by the Boltzmann equation approach. A careful analysis of the latter shows that the origin of the large thermopower shares a common root with Na_xCoO_2 . We also discussed how to increase the powerfactor of LiRh_2O_4 .

(2) Multi-magnon bound states in a frustrated spin chain

We studied the ground-state phase diagram of the spin-1/2 Heisenberg model with ferromagnetic nearest-neighbor coupling J_1 and antiferromagnetic next-nearest-neighbor interaction J_2 in a magnetic field. We extended the analysis we did last year and found that, just below the saturation field, there appear a sequence of phases with multipolar orders due to Bose condensation of multi-magnon bound states, as we approach the ferromagnetic phase at $J_1/J_2 = -4$. We also found that there exist a phase in which a vector chiral order parameter (outer product of two spins) has long-range order. We calculated various correlation functions in the nematic phase, the triatic phase, and the vector chiral-order phase using the density matrix renormalization group method. The results agree with field-theory predictions.

(3) Mean-field approximation for frustrated ferromagnets

A Schwinger boson mean-field theory is developed for a frustrated square lattice ferromagnet, which has a nematic phase and other ordered phases in its phase diagram. The theory gives qualitative description of a ferromagnetic phase and a collinear antiferromagnetic phase.

(4) Spin-polarization coupling in multiferroics

We calculated the electric dipole moment induced on a Mott-insulating cluster consisting of transition-metal ions sandwiching the ligand ion, by means of a strong-coupling perturbation from the limit of the strong Coulomb interaction. The spin-orbit interaction was also taken into account. Then, we showed that in addition to the trivial contribution purely from charge degrees of freedom, there exist the following three mechanisms of the electric dipole moment generation, driven by the magnetic degrees of freedom of the localized spins: (i) When the inversion symmetry is broken at the bond center of the two spins, a contribution from the magnetostriction appears. It generates a macroscopic electric polarization in a four-period collinear magnetic order. (ii) The vector spin chirality of the two spins also contributes to the electric dipole moment. It usually induces a macroscopic polarization in the case of helical magnets. (iii) There occurs a contribution from the single-ion spin anisotropy, which is a source of the magnetically induced ferroelectricity in delafossite systems. In particular, the magnetoelectric couplings for the mechanisms (ii) and (iii) are proportional to the spin-orbit coupling. All these magnetoelectric couplings are ubiquitous in Mott insulators, irrespective of their electronic configurations. It remains finite even in spin-1/2 systems. We performed a semi-quantitative analysis for TbMnO_3 , to explain the experimentally observed electric polarization.

(5) Crossovers in the anomalous Hall effect

Two crossovers in the anomalous Hall effect are revealed for itinerant ferromagnets with dilute impurities as a function of the longitudinal electric conductivity, by means of the quantum transport theory based on the Keldysh Green's function method. In superclean cases where the relaxation rate is smaller than the spin-orbit interaction energy around the Fermi level, extrinsic skew-scattering mechanism is dominant over other mechanisms, leading to the relation $\rho_{xy} \propto \rho_{xx}$. As the relaxation rate becomes larger, the intrinsic mechanism described in terms of the Berry phase in the Bloch wavefunction, which gives a constant behavior of ρ_{xy} . We revealed a novel behavior of $\rho_{xy} \propto \rho_{xx}^{1.6}$ for poorly conducting systems with the relaxation rate larger than the Fermi energy. We also showed that experimental results on the anomalous Hall effect in a wide class of ferromagnets including transition-metals, oxides, and semiconductors agree with our theoretical findings.

(6) Chirality and quantum effects in quasi-one-dimensional multiferroics

We have studied the interplay of chiral spin ordering and quantum fluctuations in a spin-1/2 frustrated chain with easy-plane anisotropies, which is the simplest model for one-dimensional multiferroic cuprates like LiCuVO_4 and LiCu_2O_2 . We have shown that quantum fluctuations appreciably reduce the chiral order amplitude, leading to the concurrence of weak helical and strong collinear spin correlations. Quantum fluctuations also bring about a gapless soliton in the in-plane chirality dynamics, which contributes to the dielectric function through the electromagnetic coupling.

(7) Chiral order driven by weak four-spin couplings in spin ladders under a magnetic field

Recent theoretical studies on effects of four-spin-exchange interactions in magnets have indicated that four-spin couplings can induce new dimer order, scalar-chiral order, spin-nematic order, etc. However, it is commonly expected that those new orders

can appear only if coupling constants of four-spin terms are larger than or at least of the same order as those of two-spin exchange interactions. In this work we showed that for certain types of four-spin interactions small coupling constants are sufficient to generate a vector spin chiral order in antiferromagnetic two-leg spin ladders under a sufficiently strong magnetic field. For the spin-1/2 case, the chiral order is predicted to appear near the saturation field, while for spin-1 and larger spin cases, it would exist in a wide magnetic-field regime. The predicted chiral ordered state is expected to be realized in some ladder compounds in a magnetic field.

(8) Spontaneous rotation in one-dimensional cold atoms

We considered one-dimensional (1D) Bose gases in a trap potential. One-dimensional atomic systems have been realized by applying a 2D trap potential to 3D cold atoms. In the trap potential, energies of the atomic motion perpendicular to one direction are quantized, and almost all the atoms occupy the lowest band. In this work, we considered effects of higher bands. If we assume that the trap potential is a 2D harmonic type, the angular momentum "L" defined in the 2D plane becomes a good quantum number, and the energy band has the following structure: the lowest band has $L=0$, the second lowest ones have $L=+1$ and -1 (doubly degenerate). Assuming that cold atoms occupy only the lowest three bands ($L=0, +1, -1$), we showed that, when the inter-atom interactions are sufficiently weaker than the trap potential, interactions and quantum fluctuations make the occupation numbers of $L=+1$ and -1 bands imbalanced. This leads to a spontaneously rotating ground state with the spontaneous breaking of the Z_2 reflection symmetry.

2. Mesoscopic systems and disordered systems

(1) Conformal invariance at critical points of the Anderson transition metal-insulator transition

The Anderson metal-insulator transition in a quantum phase transition driven by disorder. We have investigated conformal invariance at Anderson transitions in two dimensions. We confirmed, as expected from the conformal symmetry, that corner multifractal exponents (even for a corner with a reflex angle) are directly related to surface multifractal exponents at a critical point of a model system without the spin-rotational symmetry. We also confirmed, for both the lattice model without the spin-rotational symmetry and the network model for the integer quantum Hall effect, that the localization length in the quasi-one dimensional strip geometry is related to surface multifractality through the relation dictated by conformal invariance.

(2) Critical properties of metal-insulator transitions for the quantum spin-Hall system

The quantum spin-Hall phase is an insulator having a bulk band gap and a Kramers pair of gapless edge states carrying finite spin currents. We investigated critical properties of metal-insulator transitions in the network model we constructed last year as an effective model for the quantum spin-Hall system with disorder. We confirmed that bulk critical properties (including the critical exponents characterizing the divergence of the localization length and multifractality) belong to the conventional symplectic universality class. We also studied the critical properties under open boundary conditions. In this case, we need to distinguish two kinds of critical points; one is a critical point between the metallic and the conventional insulating phase and the other is a critical point between the metallic and the quantum spin-Hall phase with the edge-states. We found that surface multifractality at the former critical point is identical to the surface multifractality of the standard symplectic class, whereas surface multifractality at the latter critical point is different.

(3) Z_2 topological term in the nonlinear sigma model for the symplectic class

When inter-valley scattering due to impurities can be ignored, transport of Dirac electrons in graphene is understood by solving the two-component Dirac equation with a random scalar potential, which is in the symmetry class of the symplectic class. The same equation is relevant for Dirac electrons on a two-dimensional surface of a three-dimensional Z_2 topological insulator. The effective theory for this problem was found to be the nonlinear sigma model with a new Z_2 topological term, which eventually prevents Dirac electrons from localizing.

(4) Classification of topological insulators in three dimensions

Insulators having gapless boundary states are called topological insulators. Well-known examples are two-dimensional (integer) quantum Hall insulators and quantum spin-Hall insulators. As for three dimensions a Z_2 topological insulator was predicted to exist in systems with spin-orbit interactions. We classified all possible three-dimensional topological insulators for the 10 random-matrix ensembles including chiral classes with sublattice symmetry and BdG classes with particle-hole symmetry. We found there are four additional types of topological insulators.

Staff

Head

Dr. Akira FURUSAKI

Members

Dr. Ryotaro ARITA

Dr. Tsutomu MOMOI

Dr. Shigeki ONODA

Dr. Shunsuke FURUKAWA *1

Dr. Hideaki OBUSE *1

Dr. Yasuhiro UTSUMI *¹

Dr. Masahiro SATO *²

*¹ Special Postdoctoral Researcher

*² Contract Researcher

Visiting Members

Prof. Alexander ABANOV (Stony Brook Univ., USA)

Prof. Toshiya HIKIHARA (Fac. Sci., Hokkaido Univ.)

Dr. Takeo IZUYAMA (Kaiyo Gakuen)

Dr. Takashi KORETSUNE (Fac. Sci., Tokyo Inst. Technology)

Prof. Ken KUBO (Sch. Sci. & Eng., Aoyama Gakuin Univ.)

Dr. Lars KECKE (JSPS postdoctoral fellow)

Prof. Sadamichi MAEKAWA (Inst. Materials Research, Tohoku Univ.)

Prof. Thierry MARTIN (Centre de Physique Theorique et Universite de la Mediterranee, France)

Dr. Konstantin MATVEEV (Argonne National Lab., USA)

Prof. Seiji MIYASHITA (Fac. Sci., Univ. Tokyo)

Dr. Masahito MOCHIZUKI (JST ERATO Multiferroics)

Prof. Yukitoshi MOTOME (Fac. Eng., Univ. Tokyo)

Dr. Christopher MUDRY (Paul Scherrer Inst., Switzerland)

Mr. Yuki NAGAI (Fac. Sci., Univ. Tokyo)

Dr. Takuma OHASHI (Sch. Sci., Osaka Univ.)

Dr. Karlo PENC (Research Inst. Theor. Solid State Phys. and Optics, Hungary)

Dr. Zlata PCHELKINA (Inst. Metal Physics, Russia)

Dr. Nicholas SHANNON (Univ. Bristol, UK)

Dr. Ryuichi SHINDOU (Sch. Eng. Sci., Osaka Univ.)

Prof. Philippe SINDZINGRE (Univ. Pierre & Marie Curie, France)

Prof. Hirokazu TSUNETSUGU (Inst. for Solid State Physics, Univ. Tokyo)

Prof. Yao Zhong ZHANG (Univ. Queensland, Australia)