

高木磁性研究室 Magnetic Materials Laboratory

主任研究員 高木 英典
TAKAGI, Hidenori

強相関遷移金属化合物を中心に、固体中の絡み合う電子の示す多彩な物性の開拓と背景の基礎学理の研究を推進した。特に幾何学的フラストレーションとスピン・電荷のコヒーレンス、フラストレーション系が生み出す負熱膨張などの機能、強相関電子系の局所物理、高温超伝導体における電子の自己組織化と超伝導ギャップなどに焦点が当てられた。

1. 新奇な強相関電子系の物質機能開拓

(1) 幾何学的フラストレーション系物質の開拓 (香取, 山本^{*1}, 星^{*2}, 高木)

フラストレーションが内在する系では、スピン・電荷・格子・軌道の自由度の複雑な絡み合いによって、フラストレーションによる縮重が解ける。我々はこの多自由度結合により発現する新奇な物性・機能の開拓を目指している。3次元フラストレーション系の典型物質であるパイロクロア型構造物質、特に、ルテニウムとしては異常原子価である5価を有する $A_2Ru_2O_7$ ($A = \text{Hg, Cd, Ca}$)を4 GPaという超高压下で合成することにより、一連の高品質試料を得ることに成功した。 $Hg_2Ru_2O_7$ が107 Kで構造相転移を伴った金属絶縁体転移を示す一方、 $Cd_2Ru_2O_7$ と $Ca_2Ru_2O_7$ では明瞭な金属絶縁体転移を示さなかった。 Cd や Ca は合成条件により数パーセント程度以下の不定比性を有し、不定比量に対応して抵抗率や磁化率が系統的に変化することが明らかとなった。 $A_2Ru_2O_7$ ($A = \text{Hg, Cd}$)の静水圧下での電気抵抗率の温度依存性を測定したところ、いずれも圧力をかけることにより、より金属な挙動を示す傾向が見られた。 $Hg_2Ru_2O_7$ では金属絶縁体転移温度が低下し、6 GPaで絶縁相が消失、8 GPa以上ではインコヒーレントな金属からフェルミ流体金属へのクロスオーバー的転移が観察された。 $Cd_2Ru_2O_7$ では、常圧付近での非常にブロードな抵抗率変化が金属絶縁体転移へと連続的に変化することが10 GPa以上で確認された。スピントラストレーションを有するスピネル化合物 $GeCo_2O_4$ では、強いスピン-格子結合により、反強磁性転移と同時に立方晶から正方晶への構造相転移が起こる。この構造相転移により磁気秩序相では結晶ドメインが存在するが、磁気秩序形成の詳細を明らかにするためには結晶ドメインを制御する必要がある。我々は一軸圧力によって結晶ドメインを制御する簡便な方法を見出し、それを用いることにより基底状態での磁気秩序の予想に成功した。

(2) 単一物質ゼロ膨張セラミックスの開発 (竹中^{*3}, 松野, 高木)

当研究室の開発した負熱膨張性マンガン窒化物を用いて、マンガン窒化物単独で構成されるゼロ膨張セラミックスを開発した。構成元素の種類や比率の調整に加えて作製時の温度や雰囲気も再検討し、焼成温度を従来の800 °Cより高温にすることや焼成時の窒素分圧を下げるなど、「脱窒化」の熱処理により、室温を含む70 °C以上にわたる温度域で測定限界以下である $\pm 0.5 \mu\text{m/m}$ 以内の線膨張係数を達成した。単一物質でできたこのゼロ膨張材料は、マイナスの熱膨張を持つ物質とプラスの熱膨張を持つ物質とで作られる従来のゼロ膨張複合材料に比べ、1)歪みや欠陥が入りにくく機能が安定する、2)作製プロセスが簡素で製造コストが低く抑えられる、という点で理想的である。とりわけ、単一物質であるがゆえに窒化物特有の硬さが最大限に発揮され、従来の材料では対応できなかった大きな力のかかる精密プロセス分野でも利用できる点で画期的である。半導体デバイス製造や液晶製造、超精密・微細加工、精密光学機器など様々な分野で熱膨張抑制に対する強い要請があり、各種産業機器の構造部材・部品として、今後の幅広い利用が期待される。

(3) [超伝導体 / 非磁性常伝導体 / 強磁性体]接合における新規な近接効果 (山崎, 高木)

$Nb/Au/Fe$ 、 $Nb/Au/Co$ 、 $Nb/Au/Ni$ 、 $Nb/Ag/Fe$ 及び $Nb/Pt/Fe$ の一連の三層膜をMBE装置によって作製し構造・物性の評価を行ってきた。これらの試料のうち界面状態と各層の結晶構造の極めて良好な $Nb/Au/Fe$ と $Nb/Au/Co$ だけが超伝導転移温度 (T_c)の非磁性常伝導体層厚 (t_N)依存性において明確な振動を示した。この新奇な量子干渉効果の発現には高品質な試料が必要であると考えられる。この T_c 振動の機構は未だ解明されておらず、単一の長さスケール ξ_N しか含まない従来のウサデル形式の理論ではこの振動の解釈は不可能である。しかしながら $Nb/Au/Fe$ と $Nb/Au/Co$ の結果を比較することにより、 $S/N/F$ 系に関する重要な示唆が得られた。第一に、2.1 nmの長周期振動は t_{Au} の大きい領域 ($t_{Au} > 2 \text{ nm}$)において、0.76 nmの短周期振動は t_{Au} の小さい領域 ($0 < t_{Au} < 4 \text{ nm}$)において観測されている。第二に、長周期振動は強磁性体の種類によらずに出現している。そして第三に、強磁性体を Co から Fe に替えた時に振動の位相が反転する結果が得られた。この位相反転で興味深いのは膜厚 t_{Au} が2.1 nmの整数倍を取る場合は Co と Fe の両者に対して T_c は完全に一致していることである。 $Nb/Au/Fe$ において短周期振動が消失している点も理論的解釈が将来的に必要である。

(4) 重い電子系酸化物 LiV_2O_4 の圧力誘起金属絶縁体転移 (新高^{*4,1}, 高木)

正スピネル型構造をとる LiV_2O_4 は d 電子に基づくユニークな重い電子系である。その起源として、近藤格子系と等価なモデルやフラストレーションの重要性等が提案されているが、未だ明らかにされていない。圧力を印加すると8.5 GPa, 150 Kにおいて金属絶縁体転移を示すことが知られているが、この挙動はKondo機構によって出現する典型的な重い電子系と対照的である。ここに LiV_2O_4 の示すユニークな重い電子状態の起源を解く鍵が隠されていると考え、純良な単結晶試料を用いて17 GPaまでの圧力下電気抵抗測定を行い、 LiV_2O_4 の圧力-温度相図を詳細に調べた。9 GPa以上において明確な金属絶縁体転移が観測され、金属絶縁体転移温度は加圧につれて増加を示す。圧力誘起絶縁体状態の電気抵抗が単調に増加し異常を示さないことから、金属絶縁体転移と同時に電荷秩序が形成されていると思われる。また圧力を印加することで絶縁体状態が安定化されることから絶縁体相におけるVのクラスター形成が示唆される。これは最近我々が行ったEXAFSの結果と合致する。作成された温度-圧力相図より LiV_2O_4 の重い電子状態は圧力下で生じる電荷秩序の融解によって出現していることが明らかになった。そこでは幾何学的フラストレーションが重要な役割を果たしていることが示唆された。

2. 強相関電子系のナノ電子状態

(1) $Sr_3Ru_2O_7$ における不純物効果の研究 (佐藤^{*5}, 坪井^{*4}, 花栗, 高木)

$Sr_3Ru_2O_7$ は、強磁性に非常に近い常磁性金属であり、 $H_c // 8 \text{ T}$ で磁化が突然大きくなる(メタ転移)。しかし、このメタ転

移も数パーセントのTi、Mn等の不純物の存在により消失してしまう。また、Mnドープ試料ではドープ量が約2.5%を超えると常磁性金属から反強磁性絶縁体へと系の性質が変化する。本年度は、不純物が電子相変化を引き起こすメカニズムを理解するために、MnまたはTiをドープした試料の局所的な電子状態の観察を試みた。状態密度スペクトルより、不純物の上ではメタ転移に関わるフェルミエネルギー付近の電子状態が変化していることが判った。また、不純物上の状態密度スペクトルは、Mn、Tiで異なる形状を示すものの、その影響はともに不純物の周囲約4格子に限られていた。これは、不純物の電子状態の広がりが不純物の種類に寄らないことを示唆する。

(2) 強磁場中STM/STSによる超伝導コヒーレンス因子の観測 (花栗, 幸坂^{*4}, 小野^{*4}, 高木)

高温超伝導体における超伝導ギャップ構造の解明から超伝導発現機構のヒントを得るべく、 $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ に対してSTM/STSによる電子状態マッピングを行っている。昨年度、超伝導状態における準粒子干渉パターンの観測に成功し、データのフーリエ解析から波数空間における d 波超伝導ギャップ分散を決定した。しかし、超伝導状態における準粒子散乱に特徴的なコヒーレンス因子の効果が観測されず、観測された干渉パターンと超伝導の関連は完全には明らかでなかった。コヒーレンス因子は時間反転対称性と密接な関係があるため、時間反転対称を破る摂動である強磁場を印加することによってコヒーレンス因子の抽出を試みた。磁場中での準粒子干渉パターンをフーリエ解析した結果、散乱ベクトルが波数空間において超伝導秩序因子の符号が同じ領域を結んでいる場合は、準粒子干渉パターンが磁場によって強調されるのに対し、符号が異なる領域を繋いでいる場合、干渉パターンは抑制されることがわかった。この特徴的な磁場効果は、磁束による準粒子散乱に関連した d 波超伝導のコヒーレンス因子から期待される振る舞いと一致する。したがって、観測された準粒子干渉パターンは d 波超伝導と関連していることが確実になった。また、本研究で用いた磁場中での準粒子干渉パターンのフーリエ解析は、波数空間における磁場中での電子状態を研究する現在のところ唯一の手法であり、今後様々な量子凝縮相の研究に応用できると考えている。

(3) 高温超伝導体における短距離秩序の可視化 (幸坂^{*4}, 花栗, 高木)

高温超伝導の発現機構を解明する上で、アンダードープ領域での電子状態の理解は非常に重要であると考えられている。そのため、超伝導転移温度異常でギャップが生じる擬ギャップ現象や、電荷とスピンの一次元的な配列であるストライプ秩序が大きな注目を集めてきた。こうした対象には分光学的手法が有効であるが、とりわけアンダードープ領域では、キャリアドープのために不可避免的に導入された乱れが顕著に現れるため、精密実空間分光が強く望まれてきた。そこで我々はアンダードープ領域にある $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ を試料としてSTM/STS測定を行い、電子励起スペクトルの空間分布に一軸性の電子的ドメイン構造が存在することを発見した。この「ナノストライプ」状のドメイン構造は、幅が $4a_0$ (a_0 は最近接銅-銅距離)であり、軸方向の長さは数nm程度、 CuO_2 面内の酸素位置に軸中心を持つ。さらに、全体としては長距離秩序を構成せず、結晶軸に沿ってランダムに分布していることを見いだした。また、全く同様の構造を $\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca},\text{Dy})\text{Cu}_2\text{O}_7$ においても発見した。これらの結果は、「ナノストライプ」状のドメイン構造が物質によらず存在し、かつ、超伝導を担う CuO_2 面に本質的なものであることを原子分解能で明快に示したものである。

(4) 単一スピン検出のためのSTM開発 (小野^{*4}, 坪井^{*4}, 花栗, 高木)

固体への異種元素の添加はフェルミ準位近傍の電子状態に変化をもたらし、物性を変化させる。強相関電子系に於ける不純物効果は超伝導性や磁性を変化させることが知られている。そのような不純物の持つ電子スピンによる影響を直接観察することは困難であるが、微視的な立場から物性を理解するために局所スピン検出手法を開発すると共に、微視的な立場から物性を理解することを試みている。スピン検出手法として、磁場中でラーモア歳差運動するスピンとトンネル電流の相互作用を利用するスピン回転(ESR)STMの開発を行った。本年度は装置立ち上げ、評価および最適化を行った。実験室の音響ノイズが測定に大きな影響を与えることがわかり、より静かな環境への装置の移設を行った。また、効率よく測定を行うため、複数の試料と探針を同時に装置内に搬入するための導入室をシステムに付加した。その結果安定した5時間以上のトンネル分光測定が行えるようになった。また、ESR-STMとは相補的なスピン検出手法として、既設の極低温強磁場STMを利用し、非弾性トンネル分光法によって電子スピンのゼーマン分裂を非弾性トンネル電流から検出することも検討している。

3. 量子磁性の研究

(1) 希釈双極子イジング磁性体における特異な基底状態の研究 (東中^{*4}, 高木)

各磁性サイトにランダムな磁場が存在し、その総和がゼロとなる、ランダム磁場モデルが通常の磁性体とは異なる新奇な磁性を示すことが理論的に予想され注目を集めているが、そのモデルを実現する候補物質である希釈双極子イジング磁性体は今まで $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$ (LHYF)の一つだけしか知られておらず、またこの物質は大きな超微細相互作用により低エネルギー励起が重要になる領域でモデルからずれるため、より理想的な物質による研究が待ち望まれていた。本研究では新たな希釈双極子イジング磁性体である $\text{R}_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ ($\text{R}=\text{Dy}, \text{Ho}$)の単結晶育成を行い、低温磁化、比熱測定および、横磁場中低温磁化率測定により、その新奇な磁気基底状態の検証を行った。試料育成に関しては、 Dy, Ho の両物質に対して、磁性イオン濃度をより細かく振り、またより希薄な濃度の単結晶も含めた試料育成($x=0.025-1$)に成功した。それらの物質の低温物性測定から、横磁場を印加することにより基底状態の強磁性状態が、常磁性に量子相転移することを観測した。量子相転移自体はLHYFにおいても観測されていたが、超交換相互作用が小さい Dy の系において、低エネルギー励起が重要になる領域においても、より顕著に観測され、本物質がより理想的なモデルであることを明らかにした。また、LHYFと同様に、磁性イオン濃度が減少するに従って、強磁性転移温度が低温に移行し、基底状態が強磁性からスピングラスに変化することを観測したが、スピングラス相の下にさらに低温に磁気相が存在することを発見した。LHYFにおいて観測される新奇なグラス相であるアンチグラス状態との関連性は今後の研究課題である。

^{*1} 協力研究員, ^{*2} 研修生, ^{*3} 客員研究員, ^{*4} 基礎科学特別研究員, ^{*5} ジュニア・リサーチ・アソシエイト,

Novel phenomena produced by strong electron correlations in transition metal oxides and physics behind it have been explored. The topics include geometrical frustration on spin and charge, self-organization of electrons and superconductivity in high- T_c cuprate superconductors, local physics of strongly correlated electrons and negative thermal expansion compound.

1. Strongly correlated electron systems — novel materials and functions

(1) Study on geometrical-frustration compounds

The ruthenium pyrochlores with a novel valence of Ru^{5+} , $A_2Ru_2O_7$ ($A = Hg, Cd, \text{ and } Ca$), were synthesized under a high pressure of 4 GPa. Their structure includes three-dimensional geometrical frustrated lattice. $Hg_2Ru_2O_7$ showed a first order MIT (metal-to-insulator transition) with a structural phase transition at 107 K, while $Cd_2Ru_2O_7$ and $Ca_2Ru_2O_7$ showed no clear transition in resistivity. There exists non-stoichiometry in the Cd and Ca sites less than a few percent which depends on the synthetic condition. The non-stoichiometry led to systematic change in resistivity and susceptibility. The effect of high pressure on the resistivity in $A_2Ru_2O_7$ ($A = Hg \text{ and } Cd$) was studied. In $Hg_2Ru_2O_7$, MIT temperature decreased by applying a pressure and the transition disappeared at 6 GPa. A crossover from incoherent metal to coherent metal was observed for the pressures more than 8 GPa. Metal-insulator transition in $Cd_2Ru_2O_7$ appeared and became sharper with increasing pressure. Spinel oxide $GeCo_2O_4$ showed the antiferromagnetic transition accompanied with a structural phase transition from cubic to tetragonal symmetry. We found a simple and easy way to control its crystallographical domains by using a weak uniaxial pressure. From the result of the magnetization process measured for a domain-controlled single crystal, we succeeded in obtaining the magnetic structure of the ground state.

(2) Fabrication of zero thermal expansion ceramics

We have successfully fabricated zero thermal expansion ceramics consisting only of a pure form antiperovskite manganese nitride. We found that thermal treatment at a temperature more than 800°C or at lower atmosphere of nitrogen less than 1 atm dramatically reduces thermal expansion of the antiperovskite manganese nitrides: such a denitrogenating procedure can reduce the coefficient of linear thermal expansion α within $\pm 0.5 \mu\text{/}^\circ\text{C}$ over a wide temperature range (over 70°C) around room temperature. Contrary to zero thermal expansion composites now commercially available, the present zero thermal expansion material in a pure form has great advantages, reliable performance because of stable grain boundaries, low cost due to a simple process of fabrication, and hardness inherent in nitrides. We expect a wide range of applications, in particular, ultra-precision machining and process technology such as high-density integrated semiconductor devices.

(3) Novel proximity effects in S/N/F junctions

A series of Nb/Au/Fe, Nb/Au/Co, Nb/Au/Ni, Nb/Ag/Fe, and Nb/Pt/Fe trilayers have been prepared using an MBE machine. A marked oscillation in the superconducting transition temperature (T_c) as a function of the N-layer thickness (t_N) was observed only for the Nb/Au/Fe and Nb/Au/Co trilayers, which are of fairly high quality in interface profile and layer crystallinity compared with the others. For the moment, we cannot rule out a possibility that the new form of quantum interference we have observed requires the trilayer systems of high quality. The mechanism of the T_c oscillation as a function of t_N has not been understood yet. It seems difficult to explain this oscillation within the theoretical framework based on the Usadel formalism, since there is only one length scale of ξ_N in the theory. By making a comparison between the Nb/Au/Co and the Nb/Au/Fe trilayers, however, a deeper understanding of the S/N/F systems was acquired. The future theory should explain the results: (1) the long-period (2.1 nm) oscillation in T_c is dominant at large thicknesses of t_{Au} ($t_{Au} > 2$ nm), while the short-period (0.76 nm) one is dominant at small thicknesses ($0 < t_{Au} < 4$ nm), (2) the long-period oscillation is robust against the substitution of a different F, and (3) the substitution of Co for Fe causes a phase inversion of the oscillation, but with the fixed points of T_c at $t_{Au} = n \times 2.1$ nm (n : integers). The absence of the short-period oscillation from the Nb/Au/Fe trilayers also needs to be accounted for.

(4) Pressure-induced metal-insulator transition in the heavy fermion oxide LiV_2O_4

LiV_2O_4 spinel oxide is a unique heavy fermion system made of $3d$ electrons. The origin of the quasiparticles still remains open to question. It has been known that this oxide shows a metal-insulator transition at 150 K under 8.5 GPa. This is strikingly contrast with conventional heavy fermion systems due to Kondo mechanism, which could be an important key to clarify the origin. We therefore performed resistivity measurements on LiV_2O_4 under pressure up to 17 GPa using single crystal with high quality in order to investigate T-P phase diagram of LiV_2O_4 in detail. We observed well-defined metal-insulator transition above 9 GPa and increasing transition temperature with increasing applied pressure. No anomaly in the resistivity of the insulating state indicated that a charge ordering occurred together with the metal-insulator transition. Stabilization of the insulating state by pressure suggests a clusterization of V in the insulating phase, which agrees with EXAFS study under high pressure done by our group. T-P phase diagram of LiV_2O_4 indicates that the heavy fermion state of LiV_2O_4 is realized in the presence of an instability against the charge ordering due to geometrical frustration.

2. Nano-scale characterization of strongly-correlated electron systems

(1) Impurity effects in strongly-correlated metal $Sr_3Ru_2O_7$

$Sr_3Ru_2O_7$ is a paramagnetic metal with strong ferromagnetic fluctuations and a metamagnetic transition at $H_c // 8$ T. Furthermore, the metamagnetic transition is smeared out by a few percent of Ti or Mn impurities and 2.5 % of Mn doping induces a metal-insulator transition. In order to understand the mechanism of the impurity effects in $Sr_3Ru_2O_7$, we performed STM/STS measurement on Mn or Ti doped $Sr_3Ru_2O_7$. The local-density-of-states spectra on impurities show that there are changes in characteristics of electronic states near the Fermi energy, which relate to the metamagnetic transition. Although these spectra have different characteristics between Ti and Mn, the electronic states of both impurities extend over four lattice constants. This indicating that the effective area of impurity does not depend on a variety of impurities.

(2) Observation of superconducting coherence factor by STM/STS under high-magnetic field

We have been investigating the superconducting gap of $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ using STM/STS in order to search for new clues to understand the mechanism of high- T_c superconductivity. We succeeded in observing the quasi-particle interference pattern in this material and determined the dispersion relation of the d -wave superconducting gap in momentum space by using Fourier analysis. However, effects of superconducting coherence factors, which are unique to the quasi-particle scattering processes in the d -wave superconducting state, have not yet been detected; the exact relation between the observed interference pattern and d -wave superconductivity has remained to be clarified. Since superconducting coherence factors are associated with time-reversal symmetry, we examined the effect of high magnetic field, which breaks the time-reversal symmetry, on the quasi-particle interference. By taking Fourier transformations from spectroscopic maps under magnetic fields, we have found that quasi-particle interference patterns are enhanced if scattering vectors connect the momentum-space locations with the same sign of the superconducting order parameter. On the contrary, quasi-particle interference patterns are suppressed by the field if the sign is reversed between initial and final states. This characteristic magnetic-field effect is naturally explained by the model in which d -wave superconducting coherence factors and vortices are taken into account. Thus, relation between d -wave superconductivity and observed interference pattern is now established. Our technique, Fourier-transform STM/STS under magnetic field is the only method to explore the magnetic-field effects on the momentum-space electronic state and can be applied to studies of various quantum condensates.

(3) Visualization of the short-range ordering in high- T_c cuprates

Understanding various electronic states in the underdoped region is believed to be of great importance to elucidate mechanism of high-temperature superconductivity in cuprates. For example, the pseudogap, which is an energy gap opening above the transition temperature, and the stripe order, which is one-dimensional array of spin and charge, have attracted considerable attentions. Spectroscopic probes are powerful to tackle these issues. In particular, precise real-space spectroscopy is highly desirable because randomness concomitantly introduced with carrier doping achieved by chemical substitution becomes pronounced in the underdoped region. Therefore, we have carried out STM/STS measurements on underdoped $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ crystals. We discovered unidirectional electronic domains ('nano-stripes') in spatial arrangements of excitation spectra. These 'nano-stripes' are characteristic in their dimensions and arrangements. Width and length are $4a_0$ and a few nanometers, respectively (a_0 : nearest-neighbor Cu-Cu distance). The center axis of the 'nano-stripes' is located on in-plane oxygen atoms. Moreover, these 'nano-stripes' are turned out to be arranged along the Cu-O bonds while they disperse randomly without long-range order. Most significantly, we found the 'nano-stripes' in indistinguishable form in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca},\text{Dy})\text{Cu}_2\text{O}_y$ as well. These results evidently show with atomic resolution that the 'nano-stripes' exist ubiquitously in cuprates and inherent to the CuO_2 planes responsible for superconductivity.

(4) ESR-STM development for local spin detection

Impurities in materials affect electronic states near the Fermi level. The effect of impurities in strongly-correlated electron systems shows change of interesting physical properties like a superconductivity and magnetism. To investigate single spin on/around an impurity, we have been developing spin-sensitive scanning tunneling microscopy (STM). The electron-spin-rotation (ESR) STM in which spin precession in a magnetic field is detected through AC component (at a Larmor frequency) of the tunneling current in the vicinity of individual spins. We constructed, tested and optimized the ESR-STM system. We have found that acoustic and vibration noises in the experimental room affect the system. Therefore, we have relocated the system to the quieter room. In addition, we have added a load-lock chamber to improve the throughput of the measurement. As a result of such optimizations, we can achieve spectroscopic measurements with poise now for 5 hours or more. Concurrently, we are developing the inelastic-tunneling spectroscopy under a magnetic field. In this method, we detect excess (inelastic) tunneling current which flows at above the bias voltage corresponding to the Zeeman energy of the localized spin.

3. Quantum magnetism

(1) Anomalous ground state of diluted dipolar Ising magnet

Random field Ising model is determined by the random fields existing at each magnetic moment site, which in turn sum up to give net zero internal field. Theory predicts anomalous magnetic ground states for this model, motivating the study of its experimental realization. So far, however, $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$ (LHYF) has been the only known example of the awaited material. Besides, LHYF has its weakness in the low energy region, where its large hyperfine interaction disturbs the system from being in the ideal random field Ising state. In this study, we have grown single crystals of a new candidate of the model, $R_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ ($R=\text{Dy}, \text{Ho}$), and investigated the peculiar magnetic ground state by measuring low temperature physical properties (magnetization, specific heat and ac susceptibility in transverse field). We succeeded in growing single crystals of $R_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ (for both $R=\text{Dy}$ and Ho) with fine increments of x down to a very diluted magnetic concentration ($x=0.025$). When a magnetic field was applied perpendicular to the Ising axis in the low T regime, $T\rightarrow 0$, the ground state of these materials showed features of FM \rightarrow PM quantum transition. Although this transition was also previously reported in LHYF, a clearer transition was shown for $\text{Dy}_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ in the low energy region due to the small hyperfine interaction in Dy. It is thus evident that $R_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ overwhelms LHYF in terms of suitability to approximate the theory. With decreasing magnetic concentration, x , FM transition temperature shifts to a lower T end and the ground state of $R_x\text{Y}_{1-x}(\text{OH})_3$ changes from FM to a spin glass state, similarly to LHYF. In addition, we discovered another magnetic phase below the spin glass phase. We will proceed to more detailed measurements and investigate the relevance between this new phase and the anomalous glass state, the 'anti-glass state' observed in LHYF.

Head

Prof. Dr. Hidenori TAKAGI

Members

Dr. Hiroko KATORI
Dr. Hiroki YAMAZAKI
Dr. Tetsuo HANAGURI
Dr. Jobu MATSUNO
Dr. Seiji NIITAKA *¹
Dr. Noriko TSUBOI *¹
Dr. Ryuji HIGASHINAKA *¹
Dr. Masanori ONO *¹
Dr. Yuhki KOHSAKA *¹
Dr. Kenya OHGUSHI *¹
Dr. Ayako YAMAMOTO *²
Dr. Peter SHARMA *²
Dr. Ana LIMA-SHARMA *²

*¹ Special Postdoctoral Researcher *² Contract Researcher

Visiting Members

Dr. Koshi TAKENAKA (Nagoya Univ.)
Dr. Masayuki HAGIWARA (Osaka Univ.)
Dr. Tomohiro TAKAYAMA (Univ. Tokyo)
Dr. Yoshihiko OKAMOTO (Univ. Tokyo)
Dr. Masaaki MATSUDA (JAERI)
Dr. Hirokazu TSUNETSUGU (Yukawa Institute, Kyoto Univ.)
Dr. Hazuki KAWANO-FURUKAWA (Ochanomizu Univ.)
Dr. Noboru MIURA

Trainees

Mr. Seitch SATOW (Dept. Adv. Mat. Sci., Univ. Tokyo)
Mr. Hiromichi KURIYAMA (Dept. Adv. Mat. Sci., Univ. Tokyo)
Mr. Takemichi HOSHI (Grad. Sch. Sci. Eng. , Saitama Univ.)