

機関番号：12608
研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2008～2010
課題番号：20244056
研究課題名（和文）量子スピン系の多重極限環境下における新奇な基底状態と素励起
研究課題名（英文）Study of New Ground and Excited States in Quantum Spin Systems under Extreme Conditions
研究代表者
田中 秀数 (TANAKA HIDEKAZU)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：80188325

研究成果の概要（和文）：

スピンダイマー系の混晶 $Tl_{1-x}K_xCuCl_3$ において、磁場中比熱測定と電子スピン共鳴（ESR）によって、3重項励起トリプルの局在による新しいボースグラス相の存在とボースグラス-ボース凝縮転移に特徴的な臨界現象を観測した。外部磁場を加えると量子 sine-Gordon 模型で記述される1次元反強磁性体 $KCuGaF_6$ の素励起を ESR で観測し、それが量子 sine-Gordon 場理論で定量的に理解できる事を示した。スピンの大きさが $1/2$ の籠目格子反強磁性体 $Rb_2Cu_3SnF_{12}$ と $Cs_2Cu_3SnF_{12}$ を開拓した。また、基底状態が非磁性の $Rb_2Cu_3SnF_{12}$ について中性子非弾性散乱を行いシングレットが風車のように配置した構造を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

From the analysis of the phase transition data obtained from specific heat measurement and the lineshape of the ESR spectrum for $Tl_{1-x}K_xCuCl_3$, we found that the field-induced quantum phase transition is the Bose glass (BG) to BEC transition of triplons and that the critical behavior for the temperature dependence of the transition field is described by the small-exponent characteristic of the BG-BEC transition. Using high-frequency high field ESR, we investigated elementary excitations of a quantum sine-Gordon (SG) spin system $KCuGaF_6$. We observed many resonance modes including a soliton resonance and breathers up to the third order, which are main elementary excitations characteristic of the quantum SG model. We found that their resonance conditions are beautifully described by the quantum SG field theory. We developed spin $1/2$ kagome antiferromagnets $Rb_2Cu_3SnF_{12}$ and $Cs_2Cu_3SnF_{12}$. We found that the ground state of $Rb_2Cu_3SnF_{12}$ is a spin singlet with an excitation gap. Using inelastic neutron scattering experiments, we observed that a pinwheel valence-bond-solid state is realized in the ground state.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	17,500,000	5,250,000	22,750,000
2009年度	14,400,000	4,320,000	18,720,000
2010年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
年度			
総計	37,700,000	11,310,000	49,010,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：磁性，量子スピン系，強磁場，ボース凝縮，量子相転移，フラストレーション

1. 研究開始当初の背景

量子スピン系とは、量子揺らぎが顕著に現

れ、スピンを古典スピン（ベクトル）のように扱えば、磁気現象を定性的にさえも説明できない磁性体をいう。本研究では主として以下の3つのテーマについて研究を行ったので、その研究背景を述べる。

(1) スピンドダイマー系物質 $Tl_{1-x}K_xCuCl_3$ におけるマグノンの BEC と局在

本研究で扱うスピンドダイマー系は2つのスピン ($S=1/2$) が反強磁性的な交換相互作用で結合し、それらがまたダイマー間の交換相互作用で結合した系である。スピンドダイマー系の基底状態は小さな磁場を殿方向に加えても磁化がでない非磁性のシングレット状態である。スピンドダイマー系では基底シングレット状態と励起トリプレット状態の間にエネルギーギャップが存在する。

このスピンドダイマー系に外部磁場を加えると、ギャップに相当する臨界磁場 H_c でエネルギーギャップが閉じ、系は反強磁性秩序を起こす。この H_c での相転移は磁場によって誘起された量子相転移である。秩序相での基底状態はシングレットとトリプレットのコヒーレントな重ね合わせになっており、スピンドダイマー系での磁場誘起量子相転移はトリプレットのボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) として理解出来る。

一方、ランダムなポテンシャル中でのボース粒子系では、超流動相とモット絶縁体相の間に新たにボースガラス (BG) 相が現れる事が理論的に予言されている。BG 相ではランダムネスの効果によりボース粒子が局在しているが、励起にギャップはない。BG-超流動転移の量子臨界点近傍では、ランダムネスのない系とは異なる臨界現象が予言されている。これらを実験的に検証する事は重要な課題である。

(2) 量子 sine-Gordon スピン系の素励起

1次元反強磁性体の研究は半世紀以上の歴史をもつが、次々と新しい問題が出現し、現在も盛んに研究がなされている。その中で最近、注目されている問題に、 $S=1/2$ の1次元反強磁性体に様な外部磁場の他に外部磁場によって誘起される staggered 磁場が働く場合の基底状態と磁気励起の問題がある。この交替磁場の起源は、1次元鎖方向に沿った g -tensor の主軸傾きの交替とスピンの外積で表される Dzyaloshinsky-Moriya (DM) 相互作用の D -ベクトルの交替が考えられる。このような1次元反強磁性体は量子 sine-Gordon (SG) 模型に変換でき、これから磁場の $2/3$ 乗に比例する磁場誘起ギャップが導かれる。この結果は古典的なスピン波理論から求められる磁場の $1/2$ 乗に比例するギャップとは異なる。

本研究の対象物質である $KCuGaF_6$ はスピン

$1/2$ をもつ Cu^{2+} イオンが交換相互作用で1次元的に結合した1次元反強磁性体である。1次元反強磁性鎖内の交換相互作用の大きさは磁化率測定から 103 K と求められている。八面体 CuF_6 の主軸が鎖方向に沿って交互に傾いていることにより、 g テンソルの主軸が交替している。また交替する D ベクトルを伴う DM 相互作用が隣接する Cu^{2+} イオン間に働く。従って、 $KCuGaF_6$ では磁場を印加すると磁場方向に垂直に交替磁場が生じ、量子 SG 模型記述される事が期待できる。

量子 SG 模型の励起には soliton と反 soliton、及びそれらの束縛状態である breather がある。これらは従来型の磁性体には見られない新奇な素励起である。Breather は階層構造をもち、励起エネルギーの大きな高次のものが存在する。Breather は波数 $q=0$ なので、ESR で励起できる。本研究の磁場領域では3次の breather まで観測可能である。

(3) スピン $1/2$ 籠目格子反強磁性体の基底状態と励起状態

籠目格子反強磁性体では幾何学的フラストレーションと量子効果が顕著に現れることが多くの理論的研究で示されている。特にスピンの大きさが $1/2$ の場合には、基底状態が非磁性の1重項状態になること、そして、磁化をもった3重項状態との間に有限のエネルギーギャップがあり、その中に無数の1重項励起状態があることが理論的に予言されている。最近の高精度数値計算によれば、このギャップは徐々に小さくなりつつある。また、基底状態がどのようなスピン状態であるかについて、理論上の統一見解はまだない。 $S=1/2$ の籠目格子反強磁性体もつ、この極めて面白い性質は実験的に検証されていない。そのためモデル物質の探索が精力的に行われている。スピンの小さい籠目格子反強磁性体は磁性研究のフロンティアである。

2. 研究の目的

混晶系 $Tl_{1-x}K_xCuCl_3$ では、両物質でのダイマー内交換相互作用の大きさの違いから系にランダムポテンシャルが加えられると考えられ、トリプレットの局在が予想される。従って、本混晶系はボース粒子の局在効果を研究するよい対象である。本研究の目的は $Tl_{1-x}K_xCuCl_3$ の純良単結晶を育成し、この系におけるトリプレットの局在とそれがもたらす新しい臨界現象を解明する事である。

量子 SG 系の磁場誘起ギャップや素励起を総合的に理解するには、上記の物質とはことなる相互作用定数をもつ物質を研究する必要がある。最近発見されたスピン $1/2$ をもつ1次元反強磁性体 $KCuGaF_6$ は、その結晶構造から、外部磁場を加えると、それに垂直な交替磁場が発生する事が予想される。従って、ハ

ミルトニアンは式(1)で書き表される事が期待できる。本研究の目的は、 KCuGaF_6 の純良単結晶を育成し、波数 $q=0$ の磁場中素励起の詳細を電子スピン共鳴 (ESR) で調べ、量子 SG 場理論を検証することである。

$S=1/2$ の籠目格子反強磁性体の基底状態と励起状態は他の磁性体には見られない新奇なものであるが、実験的研究は良いモデル物質がないために進んでいない。本研究の目的は新規 $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体を開拓し、基底状態と励起状態の解明を行う事である。

3. 研究の方法

$\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$ の純良単結晶を育成し、この系におけるトリプロンの局在とボースグラス相の出現、及びそれに伴う新しい臨界現象を磁化測定、比熱測定、電子スピン共鳴 (ESR) により詳しく調べた。

1 次元反強磁性体 KCuGaF_6 の純良単結晶を育成し、高周波高磁場 ESR により、波数 $q=0$ の磁場中素励起の詳細を調べた。

新規籠目格子反強磁性体を開拓するとともに、我々が開拓した $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体の大型単結晶を育成し、磁気励起を中性子非弾性散乱で詳細に調べた。

4. 研究成果

(1) スピンドイマー系物質 $\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$ におけるマグノンの BEC と局在

磁化は、 $x=0$ では低磁場側で非磁性のシングレットの基底状態を反映し、ほぼゼロである。磁場を増加すると臨界磁場 H_c でエネルギーギャップが閉じ、トリプレットが誘起され磁化は磁場に対して一次関数的に増加して行く。一方で $x \neq 0$ では KH_c で磁化は有限なスロープを持つ。帯磁率はボース粒子系の圧縮率に対応する。帯磁率は、温度の減少とともに $x=0$ ではシングレットの基底状態を反映し指数関数的に 0 に向かって行くのに対し、 $x \neq 0$ ではべき乗則で有限な値に向かう。これらの結果は、 $x \neq 0$ では基底状態が有限な磁気モーメントをもち、連続的な励起状態をもつ事を示している。これらの結果はボースグラスの特性と一致する。

磁場中での比熱測定からは相転移を示す λ 型のピークが観測された。また、比熱の磁場変化にも相転移磁場においてピークが明瞭に観測された。この事は $x \neq 0$ でも $x=0$ の場合と同様に明瞭な相転移が起きている事を示す。比熱測定より $\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$ の低温磁気相図を得た。相転移温度と外部磁場の関係は冪乗則で表される。 $x=0$ では相境界は下に凸であり、 $T=0$ K で磁場軸と垂直になる。臨界指数 ϕ は 2 K 以下で見積もると $\phi=1.53$ となった。この値はトリプロンの BEC 理論での臨界指数 $\phi_{\text{BEC}}=3/2$ とほぼ一致する。

一方、濃度 x を上げて行くと ϕ は減少し、

BEC 相は狭められて行く。また $x \neq 0$ では、高温側では $x=0$ の場合と同様に相境界が下に凸なのに対し、低温側では上に凸になっていて、 $x=0$ と $x \neq 0$ では、明らかに臨界現象が異なる事が分かった。臨界指数 ϕ の系統的な変化を調べるために、 $T_{\text{min}}=0.36$ K と固定し、 $T_{\text{min}} < T < T_{\text{max}}$ の温度範囲で、 T_{max} を変化させながら、 ϕ の変化を調べた。フィッティング範囲を低温側に狭めて行くにつれて臨界指数 ϕ は減少し、 $T_{\text{max}}=0.82$ K で $\phi=0.58$ となった。この上に凸の相境界は、 $\phi > 1$ の $x=0$ の場合とは大きく異なる振る舞いであり、ボースグラス理論の予言と定性的に一致する。

ランダムネスによるトリプロンの局在を捉える為に低温で ESR を行った。測定は $x=0.22$ と 0.36 に対し、磁場を (1, 0, -2) 面に垂直に磁場を印加し、周波数 111 と 118.6 GHz で行った。これらの周波数での共鳴磁場は臨界磁場に近いが、測定温度範囲では相は常磁性相にある。吸収線形は干渉効果で少し歪んでいるので、対称化を行い、それを解析した。線形は高温でローレンツ型であるが、低温ではローレンツ型とガウス型の間になる。この低温での吸収線形の変化は、低温でトリプロンが局在し始め、交換相互作用による尖鋭化が妨げられた為に起こると考えられる。従って、このローレンツ型とガウス型の間線形はトリプロンの局在を強く示唆する実験結果である。

以上で述べたように、磁化測定と ESR 測定から、 $\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$ の低磁場基底状態は 3 重項励起トリプロンのボースグラス (BG) 相である推断される。また、磁場中比熱測定から、相境界の臨界現象を調べ、BG-BEC 転移の臨界現象に特徴的な小さな臨界指数 ϕ を観測した。以上のように、本研究はスピンドイマー系が粒子数が増える系のボース粒子の基本的性質を研究するうえで、重要な研究対象である事を示したと言える。

(2) 量子 sine-Gordon スピン系の素励起

KCuGaF_6 の単結晶を育成し、ESR により波数 $q=0$ の励起状態の磁場方向依存性を調べた。磁場は a, b, c 軸方向と (1, 1, 0) 面に垂直に加えた。実験は主に 0.5 K において行った。ソリトン共鳴とブリーザー励起の他にも多くの共鳴モード (約 10 のモード) が観測された。スピン波理論では 2 つの励起モードしか存在しないので、これら多数の励起はスピン波理論では説明することが出来ない。我々は、この結果を量子 SG 場理論で解析した。外部磁場と交替磁場の比 c_s のみを唯一の調整パラメータとして、実験と理論が大変良く一致する事が分かった。実験では、量子 SG 場理論で予言されているすべてのモードが観測できた。これは KCuGaF_6 の素励起が量子 SG 場理論で記述できることを示している。

交替磁場の大きさを表すパラメータ c_s に注目すると、 $H//c$ の場合は c_s は最も大きく $c_s=0.178$ となる。 $H//a$, $H//b$ と $H \perp (1, 1, 0)$ の場合には、それぞれ $c_s=0.031, 0.056, 0.160$ が得られた。すなわち、交替磁場は磁場方向に強く依存し、外部磁場方向により外部磁場の約3%から18%の大きさを取ることがわかった。これまでに報告がある量子 SG スピン系の物質の Cu-benzoate と $\text{PM} \cdot \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$ での最大値 $c_s=0.08$ と比較すると、 KCuGaF_6 では大きい交替磁場が発生することが分かる。

現在はこれらの素励起が KCuGaF_6 の熱力学特性に及ぼす効果を磁場中比熱測定で調べている。また、zone center 付近の磁気励起の構造は、全ての物質で確かめられていないので、磁場中中性子非弾性散乱でこれを調べる事は今後の重要な研究課題である。

(3) スピン 1/2 籠目格子反強磁性体の基底状態と励起状態

我々は 1/2 の籠目格子反強磁性体 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ と $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ を発見した。 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ は既に報告のある $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{ZrF}_{12}$ と同じの結晶構造をもつ。八面体 CuF_6 は Jahn-Teller 効果によって c 軸に沿って伸びており、 $S=1/2$ をもつ Cu^{2+} イオンの正孔軌道は籠目面内にある。超交換相互作用の経路 $\text{Cu}^{2+}\text{-F}-\text{Cu}^{2+}$ の結合角は平均 140° と大きく、後に見るように、隣接する Cu^{2+} イオン間の交換相互作用は反強磁性的で大きい。隣接する籠目格子面間には Cs^+ と Sn^{4+} の層があるので、面間の交換相互作用は小さくなると予想される。一方 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ では Cu^{2+} イオンが c 面内で歪んだ籠目格子を作っている。籠目格子面内の単位胞は $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ における一様な籠目格子の単位胞に比べて $2a \times 2a$ 倍大きくなっている。従って、籠目格子内の最近接交換相互作用は4種類になる。しかし、その磁性は一様な籠目格子のものと本質的には同じであると考えられる。

本研究では $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ と $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の単結晶について、帯磁率測定を行い、基底状態と交換相互作用を調べた。また、 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ について中性子非弾性散乱実験を行い、磁気励起の分散関係を調べた。

まず、 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ であるが、帯磁率は温度を下げると Curie-Weiss 則に従って増加し、 $T_N=185$ K で構造相転移による小さな折れ曲がりを示す。更に温度を下げると、35 K 付近に山をもち、 $T_N=20$ K で磁気相転移による鋭い変化を示す。この帯磁率を Misguich と Sindzingre による一様な $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体に対する 24-site の厳密対角化により得られた帯磁率を用いて解析した。得られた交換相互作用の値は $J/k_B=240$ K である。 T_N 以上の広い温度範囲で実験と理論のよい一

致が見られた。 $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体の磁化率の特徴は約 $(1/6)J/k_B$ の温度に鋭く丸いピークが現れることであるが、実験で得られた帯磁率にもそれが観測される。磁気相転移が観測されたので、 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の基底状態は秩序状態である。この磁気秩序の原因として有限の面間相互作用と Γ 点のギャップを下げる効果をもつ DM 相互作用が考えられる。

次に $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ であるが、帯磁率は約 75 K で広い山を持ち、低温で指数関数的に急速に小さくなる。この結果から、 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の基底状態はスピンギャップをもつ 1 重項状態であることが結論される。この基底状態は $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体特有の強いフラストレーションと顕著な量子効果によるものであると考えられる。スピンギャップをもつ基底状態は $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体では初めて観測されたことである。

$\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の帯磁率と一様な籠目格子反強磁性体の帯磁率比べると、高温領域では一致するが、200 K 以下の低温領域で一致しない。この不一致の原因は $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ では交換相互作用が 4 種類になることにありと考えられる。我々は周期的境界条件を取り入れた 12-site の厳密対角化により帯磁率の計算を行い、実験で得られた帯磁率を再現できるよう 4 種類の交換相互作用の値を決定した。得られた交換相互作用の値は $J_1/k_B=234$ K, $J_2/k_B=211$ K, $J_3/k_B=187$ K, 及び $J_4/k_B=108$ K である。 KT_{max} の低温領域で計算結果と実験結果に不一致が見られたが、その原因は有限サイズ効果と計算では考慮されていない DM 相互作用であると考えられる。

次に、 $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の磁気励起を研究する為に、東大物性研グループと共同で中性子非弾性散乱実験を行った。実験は約 1 g の単結晶を用いて行った。分光器は東海村の日本原子力研究開発機構の 3 軸分光器 GPTAS と HER を用いた。8 meV 以下の低エネルギー領域で明瞭な 2 つの磁気励起が観測され、磁気励起の分散関係が得られた。最低エネルギーの励起は Γ 点にあり、ギャップ 2.35 meV を与える。本実験は $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体における単結晶を用いた中性子非弾性散乱の初めての実験例である。

$\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の基底状態のスピン状態は、最も大きな交換相互作用 J_1 で結ばれたスピンの singlet を作る状態で、風車 (pinwheel valence-bond-solid; VBS) 配置をとることが予想される。我々は、この pinwheel VBS に基づく磁気励起を 8 次までの摂動展開により計算した。その結果、実験で得られた磁気励起の分散関係とかなりよい一致が得られた。この解析から交換相互作用と DM 相互作用の値が求められた。交換相互作用の値は、帯磁率の解析から得られた値にほぼ一致している。特徴的なことは DM 相互作用が大き

く、最も大きな交換相互作用 J_1 の 14% であることである。交換相互作用だけでは、最低励起は Γ 点ではなく K 点で起こる。 Γ 点で励起エネルギーが最低になるのは、この大きな DM 相互作用の為である。

現在、より大きな単結晶を用いて、8 meV 以上の高エネルギー側の磁気励起を中心に調べている。また、 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ の非弾性中性子散乱も行う予定である。 $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ と $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$ は良質な単結晶が得られる新しい $S=1/2$ 籠目格子反強磁性体として、今後の展開が面白い物質である

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 29 件)

1. F. Yamada, H. Tanaka, T. Ono and H. Nojiri: Transition from Bose glass to a condensate of triplons in $\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$; Phys. Rev. B **83** (2011) 020409(R) (1-4). 査読有
2. I. Umegaki, T. Ono, H. Tanaka, M. Oshikawa and H. Nojiri: Elementary excitations and specific heat in quantum sine-Gordon spin chain KCuGaF_6 ; Physica E **43** (2011) 741-747. 査読有
3. K. Matan, T. Ono, Y. Fukumoto, T. J. Sato, J. Yamaura, M. Yano, K. Morita and H. Tanaka: Pinwheel VBS state and triplet excitations in the two-dimensional deformed kagome lattice; Nature Phys. **16** (2010) 865-869. 査読有
4. T. Suzuki, F. Yamada, M. Yamada, T. Kawamata, Y. Ishii, I. Watanabe, T. Goto, H. Tanaka and K. Kubo: Low-energy spin dynamics in randomness-introduced spin-gap systems $\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$ ($0.40 \leq x \leq 0.65$) probed by zero- and longitudinal-field muon spin relaxation; Phys. Rev. B **82** (2010) 094447 (1-7). 査読有
5. T. Suzuki, F. Yamada, T. Kawamata, I. Watanabe, T. Goto and H. Tanaka: Quantum critical behavior in highly random systems $\text{Tl}_{1-x}\text{K}_x\text{CuCl}_3$ probed by zero- and longitudinal-field muon-spin-relaxation (mSR) measurements; Phys. Rev. B **79** (2009) 104409 (1-5). 査読有
6. H. Inoue, S. Tani, S. Hosoya, K. Inokuchi, T. Fujiwara, T. Saito, T. Suzuki, A. Oosawa, T. Goto, M. Fujisawa, H. Tanaka, T. Sasaki, S. Awaji, K. Watanabe and N. Kobayashi: $^{63/65}\text{Cu}$ - and $^{35/37}\text{Cl}$ -NMR studies of triplet localization in the quantum spin system NH_4CuCl_3 ; Phys. Rev. B **79** (2009) 174418 (1-7). 査読有
7. I. Umegaki, H. Tanaka, T. Ono, H. Uekusa and H. Nojiri: Elementary excitations of $S=1/2$ one-dimensional antiferromagnet KCuGaF_6 in magnetic field and quantum sine-Gordon model; Phys. Rev. B **79** (2009) 184401 (1-8). 査読有
8. T. Ono, K. Morita, M. Yano, H. Tanaka, K. Fujii, H. Uekusa, Y. Narumi, and K. Kindo: Magnetic susceptibilities in a family of $S=1/2$ Kagomé antiferromagnet; Phys. Rev. B **79** (2009) 174407 (1-11). 査読有
9. T. Suzuki, F. Yamada, I. Watanabe, T. Matsuzaki, T. Goto, A. Oosawa, H. Tanaka: Spin Fluctuations in the Ground State of Doped Quantum Spin System $\text{TlCu}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Cl}_3$ with $x=0.0047$ Probed by Muon-Spin-Relaxation (mSR) Technique; J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 074705 (1-5). 査読有
10. N. A. Fortune, S. T. Hannahs, Y. Yoshida, T. E. Sherline, T. Ono, H. Tanaka, and Y. Takano: Cascade of Magnetic-Field-Induced Quantum Phase Transitions in a Spin-1/2 Triangular-Lattice Antiferromagnet; Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 257201 (1-4). 査読有
11. M. Fujisawa, K. Shiraki, S. Okubo, H. Ohta, M. Yoshida, H. Tanaka and T. Sakai: Dzyaloshinsky-Moriya interaction in the $S=1/2$ quasi one-dimensional antiferromagnet $\text{Cu}_2\text{Cl}_4 \cdot \text{H}_8\text{C}_4\text{SO}_2$ as determined via high frequency ESR; Phys. Rev. B **80** (2009) 012408 (1-4). 査読有
12. T. Suzuki, I. Watanabe, F. Yamada, Y. Ishii, K. Ohishi, Risdiana, T. Goto, and H. Tanaka: Evidence for continuous change of spin states between impurity-induced order and pressure-induced order in $\text{TlCu}_{0.985}\text{Mg}_{0.015}\text{Cl}_3$ probed via muon spin rotation; Phys. Rev. B **80** (2009) 064407 (1-5). 査読有
13. T. Amemiya, M. Yano, K. Morita, I. Umegaki, T. Ono, H. Tanaka, K. Fujii and H. Uekusa: Partial ferromagnetic ordering and indirect exchange interaction in spatially anisotropic

kagome antiferromagnet $\text{Cs}_2\text{Cu}_3\text{CeF}_{12}$; Phys. Rev. B **80** (2009) 100406R (1-4). 査読有

14. F. Yamada, T. Ono, H. Tanaka, G. Misguich, M. Oshikawa and T. Sakakibara: Magnetic-Field Induced Bose-Einstein Condensation of Magnons and Critical Behavior in Interacting Spin Dimer System TlCuCl_3 ; J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 013701 (1-4). 査読有
15. K. Morita, M. Yano, T. Ono, H. Tanaka, K. Fujii, H. Uekusa, Y. Narumi and K. Kindo: Singlet Ground State and Spin Gap in $S=1/2$ Kagomé Antiferromagnet $\text{Rb}_2\text{Cu}_3\text{SnF}_{12}$; J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 043707 (1-4). 査読有
16. H. Kuroe, K. Kusakabe, A. Oosawa, T. Sekine, F. Yamada, H. Tanaka and M. Matsumoto: Magnetic Field-Induced One-Magnon Raman Scattering in the Magnon Bose-Einstein Condensation Phase of TlCuCl_3 ; Phys. Rev. B **77** (2008) 134420 (1-5). 査読有
17. F. Yamada, Y. Ishii, T. Suzuki, T. Matsuzaki and H. Tanaka: Pressure-Induced Reentrant Oblique Antiferromagnetic Phase in Spin Dimer System TlCuCl_3 ; Phys. Rev. B **78** (2008) 224405 (1-6). 査読有

[学会発表] (計 71 件)

1. H. Tanaka: Magnetic-Field Induced Quantum Phase Transitions in Triangular-Lattice Antiferromagnets; Int. Symp. Nanoscience and Quantum Physics 2011 (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
2. T. Ono, H. Tanaka, K. Matan, Y. Nambu, and T. J. Sato: Ground State and Magnetic Excitations of $S=1/2$ Kagome Antiferromagnets; Int. Symp. Nanoscience and Quantum Physics 2011 (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
3. I. Umegaki, T. Ono, H. Tanaka, S. Wakimoto, K. Kaneko, H. Yamauchi, N. Metoki, and K. Kakurai: Magnetic Excitations Observed by Neutron Scattering of Quantum Sine-Gordon Spin System KCuGaF_6 ; Int. Symp. Nanoscience and Quantum Physics 2011 (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
4. 梅垣いづみ、小野俊雄、田中秀数、押川正毅、堺和光: 一次元量子スピン系 KCuGaF_6 の比熱と sine-Gordon 理論; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
5. 小野俊雄、宮田敦彦、嶽山正二郎、ソニ

アシャーミン、田中秀数: ファラデー回転による $S=1/2$ カゴメ格子反強磁性体の一巻きコイル超強磁場磁化測定; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)

6. 小野俊雄、高野安正、S. T. Hannahs、N. A. Fortune、J.-H. Park、吉田靖雄、田中秀数: 三角格子反強磁性体 Cs_2CuBr_4 の強磁場相図の等方性; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
7. 白田雄高、小野俊雄、田中秀数: 三角格子反強磁性体 $\text{Ba}_3\text{NiSb}_2\text{O}_9$ における逐次磁気相転移; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
8. 臼居泰志、AaronChen、梅垣いづみ、小野俊雄、田中秀数: $S=2$ 籠目格子反強磁性体 $\text{Cs}_2\text{Mn}_3\text{LiF}_{12}$ の磁気比熱; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
9. H. Tanaka: Ground State and Excitations in Kagome-Lattice Antiferromagnets; 2nd Int. Conf. on Advanced Materials and Practical Nanotechnology, November 11-12, 2009, Jakarta, Indonesia.

[図書] (計 1 件)

1. 久保 健、田中秀数: 朝倉物性物理シリーズ 7 磁性 I; 朝倉書店 (2008) 総ページ数 235 ページ.

[その他]

ホームページ等

<http://lee.phys.titech.ac.jp/%7Etanakalb/tanakalb.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秀数 (TANAKA HIDEKAZU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 80188325

(2) 研究分担者

小野 俊雄 (ONO TOSHIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 40332639

(3) 連携研究者

加倉井 和久 (KAKURAI KAZUHISA)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・副部門長
研究者番号: 00204339