

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247058

研究課題名(和文)量子スピン系のボース・アインシュタイン凝縮とスーパーカレント

研究課題名(英文) Bose-Einstein condensation in quantum spin system and supercurrent

研究代表者

田中 秀数 (Hidekazu, Tanaka)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：80188325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々はスピンダイマー磁性体Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>を合成し、その結晶構造を決定した。また、強磁場磁化測定によりマグノンの結晶化現象を観測した。これはマグノンのボース凝縮(BEC)と対極をなす現象で、貴重な実験例である。また、類似の結晶構造を持つBa<sub>2</sub>CuSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>を合成し、その2次元量子磁性を明らかにした。更に擬2次元強磁性体K<sub>2</sub>CuF<sub>4</sub>における磁場中相転移を調べ、擬2次元マグノンBECの普遍性を検証した。続いて磁場中での磁気トルクを抑制する工夫を行い、基底一重項磁性体CsFeBr<sub>3</sub>の磁場誘起磁気秩序を極低温まで測定することによって、3次元マグノンBECの普遍性を検証した。

研究成果の概要(英文)：We synthesized new dimerized magnet Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> and determined its crystal structure. From high-magnetic field magnetization measurements, we observed quantum crystallization of magnons. The magnon crystallization is the opposite macroscopic quantum phenomenon to Bose-Einstein condensation (BEC) of magnons, and thus Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> is a valuable experimental example. We also synthesized dimerized magnet Ba<sub>2</sub>CuSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> that has a similar crystal structure as Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> and elucidated its two-dimensional (2D) quantum magnetic properties. We investigated phase transition of quasi-2D ferromagnet K<sub>2</sub>CuF<sub>4</sub> in the magnetic field, and verified the universality of quasi-2D BEC. We developed a new method to suppress magnetic torque in magnetic field using Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> with large and anisotropic Van Vleck paramagnetism. Using this method, we succeeded in precise measurement of specific heat of CsFeBr<sub>3</sub> in magnetic fields down to 100 mK, and verified the universality of 3D magnon BEC.

研究分野：磁性物理学

キーワード：量子スピン系 マグノン ボース・アインシュタイン凝縮 スーパーカレント マグノンの結晶化 強磁場 新物質

1. 研究開始当初の背景

絶縁性の磁性体ではスピンの局在し、互いに交換相互作用を及ぼし合っている。このようなスピンの集団はスピン系と呼ばれ、長い研究の歴史をもっている。スピンは本来量子力学的物理量であるが、従来の多くの磁性体では、スピンを古典的なベクトル(古典スピン模型)のように考えても、その磁性の殆どを理解することが出来た。これに対して、量子効果が顕著で、古典スピン模型では磁性を定性的にさえも理解できないスピン系が量子スピン系である。量子スピン系が示す現象の中には、スピンをベクトル的に考えるより、量子力学的粒子のように考える方が本質を理解し易い場合がある。励起ギャップをもつスピン系における磁場誘起磁気秩序は  $S=1$  の励起マグノンのボース・アインシュタイン凝縮(BEC)によって起こる典型的な量子現象である。このマグノンのBECの概念は我々が開拓したスピンドイマー系(反強磁性的に結合したスピン対が互いに弱く結合した磁性体)  $\text{TiCuCl}_3$  において行った研究が端緒になったものである。マグノンのBECが起こるとこれに付随してマグノンのスーパーカレントが期待できる。このスーパーカレントはまだ観測されていない巨視的量子現象であり、その観測は世界的に注目されている。また、マグノンの移動が強く抑制されると磁場中で互いの斥力によってマグノンが周期的に配列する結晶化が起こることが理論的に知られている。この現象を実験的に捉えることも重要な課題である。

2. 研究の目的

上記の背景のもとに、基底一重項磁性体、スピンドイマー磁性体、擬2次元強磁性体におけるマグノンBECを詳細に調べ、BECに付随するマグノンのスーパーカレントを観測することが本研究の目的である。以下が具体的な課題と目的である。

- (1) 磁場誘起磁気秩序相でも六方晶の高い対称性を有する  $\text{CsFeBr}_3$  でマグノンBECの普遍性を検証する。
- (2) ダイマー間交換相互作用のフラストレーションが完全に近い物質を開拓し、磁場中でマグノンの結晶化を観測する。
- (3)  $\text{K}_2\text{CuF}_4$  等の容易面型異方性を有する2次元強磁性体の磁場中相転移の相図を完成し、擬2次元マグノンBECの普遍性を検証する。
- (3) マグノンのスーパーカレントを観測するための実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 新規スピンドイマー磁性体  $\text{Ba}_2\text{MSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  ( $M=\text{Co}, \text{Cu}, \text{Ni}$ ) を合成し、その結晶構造をX線構造解析で決定した。また、単結晶を用いた磁化率、強磁場磁化、比熱測定で磁氣的基

底状態とダイマー間交換相互作用のフラストレーションの強さを推定した。さらに中性子非弾性散乱実験を行い、磁気励起を調べた。

(2)  $S=1$  の基底一重項磁性体  $\text{CsFeBr}_3$  は磁場を  $c$  軸に加えるとマグノンのBECによる磁場誘起磁気秩序を起こすが、磁化率と  $g$  値が非常に異方的であるために、磁場中で  $c$  軸が磁場に垂直になるような大きな磁気トルクが発生する。そのために試料ホルダーの固定が緩い緩和法による磁場中比熱測定では困難が生ずる。本研究では、試料ホルダーに異方性が大きく、かつ絶対値も大きい Van Vleck 常磁性を持つ  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  を2個貼り付け、これに生ずる大きい磁気トルクによって、試料ホルダーが磁場中で回転しないように工夫を行った。

(3) 擬2次元強磁性体  $\text{K}_2\text{CuF}_4$  の磁場中相転移を磁化測定で詳細に調べ、磁気相図を完成する。この時、試料の形状による反磁場の補正を正確に行う。

(4) マグノンのスーパーカレントを観測するための実験原理と方法を検討し、試料の性質に合わせた最良の方法を見出す。その方針のもとで、装置の設計を行い、スーパーカレントを検出実験を行う。

4. 研究成果

(1)  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  におけるマグノンの局在

本研究で我々はスピンドイマー磁性体  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  を初めて合成した。結晶構造は単斜晶系( $P2_1/c$ )である。構造の特徴は、磁性イオン  $\text{Co}^{2+}$  が底面の中心に位置する  $\text{CoO}_4\text{Cl}$  ピラミッドが底面を向かい合わせて配置し、 $\text{SiO}_4$  四面体を介して連結していることである。底面を向かい合わせて配置する2つのピラミッドの  $\text{Co}^{2+}$  イオンが磁気的にもダイマーをなしていると容易に想像できる。 $ab$  面に平行なダイマー層内の結晶構造は擬2次元スピンドイマーとして知られている  $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$  の構造と類似している。 $\text{BaCuSi}_2\text{O}_6$  では、ダイマー間の相互作用は  $ab$  面内が支配的で  $ab$  面間の相互作用は無視できる程小さい。したがって、 $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  でも事情は同じと考えられるので、本系における交換相互作用のネットワークは図1のように表されると考えられる。

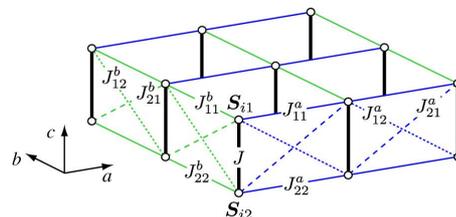


図1:  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  の交換相互作用の模型。

図2は1.3 Kで測定した  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  の磁化過程で、Van Vleck 常磁性の差し引いたもの

である。測定は東京大学国際強磁場科学研究施設で行った。測定は 70 T までのパルス磁場を用いて行った。この磁場範囲で全磁化過程が観測される。磁化の飽和は  $H//ab$  の場合には、 $H_s=43$  T で、 $H//c$  の場合には  $H_s=58$  T で起こる。飽和磁化の値は  $H//ab$  のとき  $M_s=1.93 \mu_B$ 、 $H//c$  のときには殆ど  $2.0 \mu_B$  である。図を見て分かるように、両磁場方向で飽和磁化の半分の位置にプラトーが明瞭に観測される。また、 $M=0$  と  $1/2$  磁化プラトーの間、および  $1/2$  磁化プラトーと飽和磁化の間の磁化のスロー領域が極めて小さく、磁化は階段状に変化する。

このような磁化過程は、ダイマー間交換相互作用のフラストレーションが殆ど完全に近い場合 ( $J_{11}+J_{22}=J_{12}+J_{21}$ ) に起こる。この条件が成り立つ場合には、ダイマー上に生成されたマグノンは隣接するダイマー上に移ることはできなくなり、一箇所に完全に局在する。ダイマー間交換相互作用の磁場に平行な成分はマグノン間に斥力として作用する。したがって、磁場中の基底状態は、化学ポテンシャルである磁場とマグノン間の斥力のバランスで決まる。 $1/2$  磁化プラトーの臨界磁場までの基底状態は、全てのダイマー上に singlet が配置した状態の直積で表される。臨界磁場で半数のダイマー上にマグノンが互いに隣接しないように生成される。これはマグノンの結晶化である。磁化は粒子数に対応するので、このとき  $1/2$  磁化プラトーが生ずる。更に磁場を増加すると、次の臨界磁場である飽和磁場で、全てのダイマー上をマグノンが生ずる。このような機構で、磁化過程は階段状になると考えられる。このようなマグノンの結晶化は BEC と対極をなす現象で重要な実験例である。

本研究では  $Ba_2CoSi_2O_6Cl_2$  の他に類似の結晶構造を持つ  $S=1$  のダイマー系  $Ba_2NiSi_2O_6Cl_2$  を合成し、その結晶構造を決定した。そして磁化測定で  $Ba_2CoSi_2O_6Cl_2$  で見られたような階段状の磁化曲線を観測した。これから  $Ba_2NiSi_2O_6Cl_2$  においてもフラストレーションが殆ど完全に近い状態が実現していることが分かった。

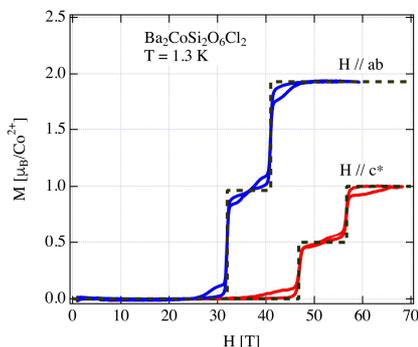


図 2 : Van Vleck 常磁性の補正後の磁化曲線。破線はダイマー間交換相互作用のフラストレーションが完全な場合の理論磁化曲線。

## (2) $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$ におけるマグノンの BEC

我々は上記の  $Ba_2CoSi_2O_6Cl_2$  と類似の結晶構造を持つ  $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$  を初めて合成し、その結晶構造を決定した。この物質の磁気モデルは図 1 と同じであると考えられる。磁化率の測定から、基底状態がギャップを持つ singlet 状態であることが確認できる。図 3(a) は 1.4 K で測定した  $H//c$  と  $H\perp c$  の磁化曲線を  $g$  値で規格化したものである。両者の一致が非常に良いことから、 $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$  では磁気異方性が極めて小さいことが分かる。図から  $(g/2)H_c=16$  T でギャップが潰れて磁気秩序が生じ  $(g/2)H_s=32$  T で飽和することが分かる。階段状の  $Ba_2CoSi_2O_6Cl_2$  の磁化曲線とは対照的に、 $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$  の磁化曲線にはスロー領域が現れる。これはダイマー間相互作用のフラストレーションが弱く、 $H_c$  と  $H_s$  の間でマグノンの BEC が起こると解釈できる。磁化曲線のスロー領域は直線ではなく、低次元性を反映して逆 S 字の形をしている。実験で得られた磁化曲線を図 1 のモデルに基づき、厳密体格化で計算した結果が図 3(b) の黒い実線である。得られた交換相互作用は  $J/k_B=28.1$  K、 $J_{12}/k_B=J_{21}/k_B=3.9$  K、 $J_{11}/k_B=J_{22}/k_B=3.9$  K である。理論と実験結果の一致は大変良い。これから、 $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$  は 2 次元性の良い結合スピンダイマー系であることが分かる。臨界磁場  $H_c$  以上の磁場で 2 次元系特有の Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移が期待できる。

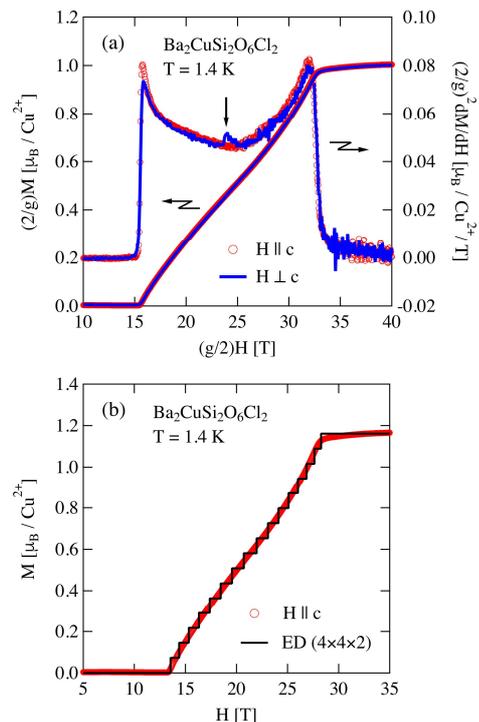


図 3 : 1.4 K で測定した  $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$  の磁化過程。(a)は  $H//c$  と  $H\perp c$  の磁化曲線を  $g$  値で規格化したもの。(b)は  $H//c$  の磁化曲線と厳密体格化で計算した磁化曲線との比較。

## (3) $CsFeBr_3$ の磁場誘起磁気秩序と臨界現象 励起ギャップを持つ singlet 状態が基底状態

になる磁性体は磁場中で秩序状態に相転移を起こす。この相転移は、系の相互作用が磁場の周りに回転対称性を持つ場合にはマグノンの BEC で記述できる。この場合、低温での常磁性相と秩序相との相境界は磁場・温度相図上で  $H(T)-H_c \propto T^\phi$  という冪乗則で表され、臨界指数は  $\phi=3/2$  になることが示されている。これまでに  $\text{TiCuCl}_3$  をはじめとして、様々なスピングャップ系でこの臨界指数が調べられ、おおよそ理論との一致が得られている。しかし、これまでに調べられた物質では磁場の周りの回転対称性  $O(2)$  を破る磁気異方性が存在する為、その影響が無視できない。今回実験を行った  $\text{CsFeBr}_3$  は六方晶の結晶構造を持つ物質で、低温では有効スピン 1 で表されるスピングャップ系である。このギャップの起源は単イオン異方性である。磁場を  $c$  軸に加えると磁場誘起磁気相転移を起こす。臨界磁場以上での秩序相の磁気構造も六方晶の対称性を持つので、磁場の周りの  $O(2)$  対称性の破れは殆んどないと考えられる。したがって、マグノン BEC の普遍性を確かめるには適した系である。

本研究では磁場中磁化測定と比熱測定で  $\text{CsFeBr}_3$  の磁気相図を求め、臨界現象の検証を行った。磁場中比熱測定は緩和法で行ったが、この時に問題になるのが、大きな磁気トルクによる試料ホルダーの回転である。本研究では、大きくかつ異方的な Van Vleck 常磁性を持つ 2 個の板状の  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  結晶を図 4 の挿入図のように試料ホルダーにつけ、これに働く大きな磁気トルクによって、安定的に  $\text{CsFeBr}_3$  の  $c$  軸が磁場に平行になるようにした。

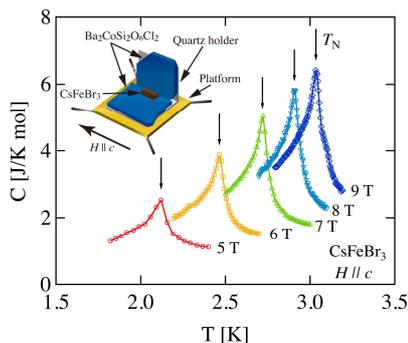


図 4 :  $\text{CsFeBr}_3$  の磁場中比熱。矢印は相転移温度を示す。挿入図は試料ホルダーにつけられた 2 個の板状の  $\text{Ba}_2\text{CoSi}_2\text{O}_6\text{Cl}_2$  結晶と  $\text{CsFeBr}_3$  の配置を表す。

以前の報告 [Y. Tanaka *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 3068.] では磁気トルクによって試料が回転し、 $c$  軸が磁場と平行ではなくなったために逐次相転移が起き、比熱に 2 つのピークが現れた。しかし上述の工夫によって試料の回転が抑制され、図 4 に示されたように、磁場中で単一の相転移を示す単一のピークが明瞭に観測された。実験では希釈冷凍機を用いて、様々な磁場中で比熱の温度変化

を 0.1 K まで測定すると共に、温度を固定して比熱の磁場依存性も測定し、磁場と相転移温度の関係を調べた。また、 $^3\text{He}$  冷凍機を用いて 0.5 K までの磁化測定を行い、磁場と相転移温度の関係を調べた。得られた磁気相図が図 5(a) である。磁化測定と比熱測定で得られた相転移点は一致していて矛盾はない。図 5(b) は相転移点に関する磁場と温度の両対数プロットである。ここで  $T=0$  の臨界磁場は  $H_c=2.60$  T である。1 K 以下の領域の直線フィットから臨界指数が  $\phi=1.50$  と求められた。得られた臨界指数は理論が予言する  $\phi=3/2$  に完全に一致する。以上のように、我々はマグノン BEC の普遍性を検証した。

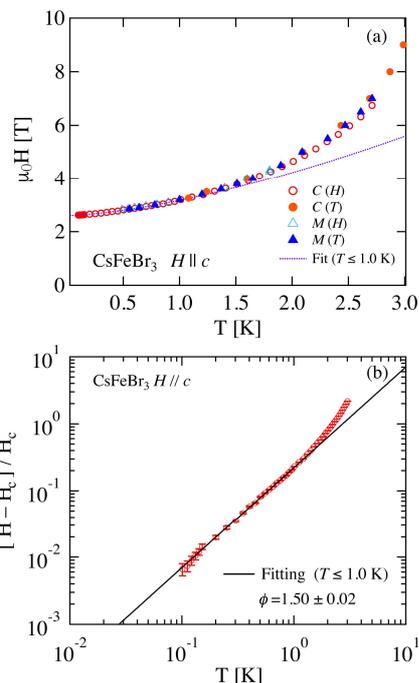


図 5 : (a)  $\text{CsFeBr}_3$  における  $H//c$  の磁気相図。(b) 相転移点に関する磁場と温度の両対数プロット。直線は  $\phi=1.50$ ,  $H_c=2.60$  T によるフィットを表す。

#### (4) 擬 2 次元強磁性体のマグノン BEC

擬 2 次元マグノン BEC の磁場と相転移温度の関係は上述のように冪乗則で表されるが、指数  $\phi$  の値は広い温度範囲で  $\phi \approx 1$  であり、面間相互作用が効いてくる極低温で 3 次元 BEC の  $\phi=3/2$  になることが理論的に予言されている。 $\text{K}_2\text{CuF}_4$  は弱い容易面型異方性をもつ擬 2 次元強磁性体である。磁場を  $c$  軸に加えた状況は Matsubara-Matsuda が格子ボソンの BEC を理論的に導いたスピン模型と同じである。従って、擬 2 次元マグノン BEC の普遍性を検証する格好の物質である。本研究では磁化測定と比熱測定で磁場と相転移温度の関係を詳細に調べ、磁気相図を求めた。 $\text{K}_2\text{CuF}_4$  は強磁性体であるため、相転移は 3000 Oe の比較的弱い磁場範囲で起こるので、試料の形状による反磁場と同程度になる。そのため、反磁場の補正を正確に行い、内部磁場に対する相転移温度を正確に求めた。

図 6(a)に実験で決定した  $H//c$  における磁気相図を示す。磁化の温度変化と磁場変化によって求めた相転移点はよく一致している。この図から、広い温度範囲で相転移温度が内部磁場に対して直線的に変化することがわかる。図 6(b)の両対数プロットから、指数の値は  $\phi=1.01$  と求まる。以上のように擬 2 次マグノン BEC の普遍性を実験的に検証した。

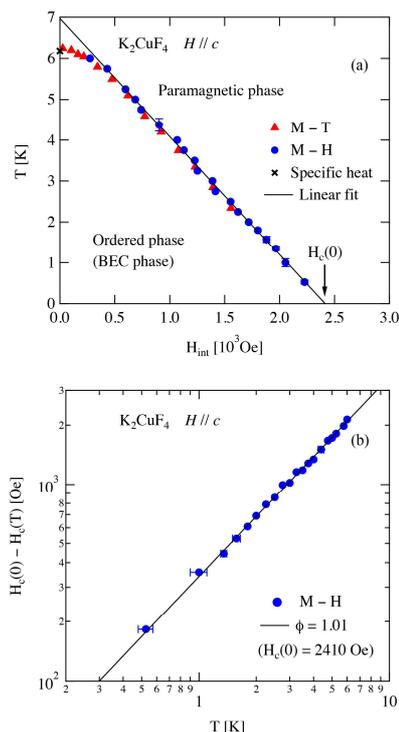


図 6: (a)  $K_2CuF_4$  の  $H//c$  における磁気相図。(b) 温度と相転移磁場に関する両対数プロット。

## 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 17 件)

1. P. Babkevich, V. M. Katukuri, B. Fåk, S. Rols, T. Fennell, D. Pajić, H. Tanaka, T. Pardini, R. R. P. Singh, A. Mitrushchenkov, O. V. Yazyev and H. M. Rønnow: Magnetic excitations and electronic interactions in  $Sr_2CuTeO_6$ : a spin-1/2 square lattice Heisenberg antiferromagnet; Phys. Rev. Lett. **117** (2016) 237203 (1-6). 査読有  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.117.237203>
2. S. Kimura, K. Kakihara, Y. Sawada, K. Watanabe, M. Matsumoto, M. Hagiwara and H. Tanaka: Ferroelectricity by Bose-Einstein condensation in a quantum magnet; Nat. Commun. **7** (2016) 12822 (1-5). 査読有  
<https://www.nature.com/articles/ncomms12822>
3. M. Okada, H. Tanaka, N. Kurita, K. Johmoto, H. Uekusa, A. Miyake, M. Tokunaga, S. Nishimoto, M. Nakamura, M. Jaime, G.

Radtke and A. Saúl: Quasi-Two-Dimensional Bose-Einstein Condensation of Spin Triplets in Dimerized Quantum Magnet  $Ba_2CuSi_2O_6Cl_2$ ; Phys. Rev. B **94** (2016) 094421 (1-8). 査読有

<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.94.094421>

4. N. Kurita and H. Tanaka: Magnetic- field- and pressure-induced quantum phase transition in  $CsFeCl_3$  proved via magnetization measurements; Phys. Rev. B **94** (2016) 104409 (1-7). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.94.104409>
5. T. Koga, N. Kurita, M. Avdeev, S. Danilkin, T. J. Sato and H. Tanaka: Magnetic structure of the  $S=1/2$  quasi- two-dimensional square-lattice Heisenberg antiferromagnet  $Sr_2CuTeO_6$ ; Phys. Rev. B **93** (2016) 054426 (1-6). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.93.054426>
6. P. Chanler, N. Kurita, H. Tanaka, D. Goto, A. Matsuo and K. Kindo: Field- driven successive phase transitions in the quasi-two- dimensional frustrated antiferromagnet  $Ba_2CoTeO_6$  and highly degenerate classical ground states; Phys. Rev. B **93** (2016) 094420 (1-7). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.93.094420>
7. N. Kurita and H. Tanaka: Effects of magnetic field and hydrostatic pressure on the distorted triangular lattice antiferromagnet  $RbFeBr_3$ ; J. Phys: Conf. Ser. **828** (2017) 012002 (1-6). 査読有  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/828/1/012002>
8. K. Matsui, M. Fujisawa, H. Tanaka, R. Scheuermann and T. Goto: High-field 1H-NMR study around a 1/4 plateau of quantum spin dimer system  $NH_4CuCl_3$ ; J. Phys: Conf. Ser. **828** (2017) 012011 (1-6). 査読有  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/828/1/012011>
9. I. Umegaki, H. Tanaka, N. Kurita, T. Ono, M. Laver, Ch. Niedermayer, Ch. Rüegg, S. Ohira-Kawamura, K. Nakajima and K. Kakurai: Spinon, soliton and breather in the spin-1/2 antiferro- magnetic chain compound  $KCuGaF_6$ ; Phys. Rev. B **92** (2015) 174412 (1-8). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.92.174412>
10. A. Miyake, J. Shibuya, M. Akaki, H. Tanaka and M. Tokunaga: Magnetic field induced polar phase in the chiral magnet  $CsCuCl_3$ ; Phys. Rev. B **92** (2015) 100406 (1-5). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/>

- PhysRevB.92.100406
11. T. Sakurai, K. Fujimoto, R. Matsui, K. Kawasaki, S. Okubo, H. Ohta, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko and H. Tanaka: Development of multi-frequency ESR system for high-pressure measurements up to 2.5 GPa; J. Magn. Reson. **259** (2015) 108-113. 査読有  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1090780715001706>
  12. K. Katayama, N. Kurita and H. Tanaka: Quantum phase transition between disordered and ordered states in the spin-1/2 kagome lattice antiferromagnet (Rb<sub>1-x</sub>Cs<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>SnF<sub>12</sub>; Phys. Rev. B **91** (2015) 214429 (1-7). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.91.214429>
  13. Y. Kubota, H. Tanaka, T. Ono, Y. Narumi and K. Kindo: Successive Magnetic Phase Transitions in  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>: XY-like Frustrated Magnet on the Honeycomb Lattice; Phys. Rev. B **91** (2015) 094422 (1-9). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.91.094422>
  14. H. Tanaka, N. Kurita, M. Okada, E. Kunihiro, Y. Shirata, K. Fujii, H. Uekusa, A. Matsuo, K. Kindo and H. Nojiri: Almost Perfect Frustration in the Dimer Magnet Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>; J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 103701 (1-5). 査読有  
<http://journals.jps.jp/doi/abs/10.7566/JPSJ.83.103701>
  15. K. Yokota, N. Kurita and H. Tanaka: Magnetic Phase Diagram of the S=1/2 Triangular-Lattice Heisenberg Antiferromagnet Ba<sub>3</sub>CoNb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>; Phys. Rev. B **90** (2014) 014403 (1-6). 査読有  
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.90.014403>

〔学会発表〕(計 50 件)

1. 栗田伸之, 河村聖子, 中島健次, 田中秀数: フラストレーションの強い S=1/2 スピンドイマー系 Ba<sub>2</sub>CoSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> における局在励起; 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学角間キャンパス, 2016 年 9 月 13-16 日) .
2. 白澤一樹, 栗田伸之, 田中秀数: 基底一重項磁性体 CsFeBr<sub>3</sub> の極低温磁気相図と量子臨界現象; 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学角間キャンパス, 2016 年 9 月 13-16 日) .
3. 小池暢人, 栗田伸之, 田中秀数, 上本紘平, 植草秀裕, Mingyue Ruan, 野尻浩之, 松尾晶, 金道浩一: フラストレーションの強い S=1 スピンドイマー系 Ba<sub>2</sub>NiSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> の量子磁化過程; 日本物理学会 2016 年秋季大会(金沢大学角間キャンパス, 2016 年 9 月 13-16 日) .

4. H. Tanaka: XY-like frustrated magnetic phase transitions in  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub>; American Physical Society March Meeting, March 14-18, 2016, Baltimore, Maryland, USA. 招待講演
5. H. Tanaka: Field-Induced Successive Phase Transitions in Quasi-Two-Dimensional Frustrated Antiferromagnet Ba<sub>2</sub>CoTeO<sub>6</sub> and Highly Degenerated Classical Ground States; Int. Conf. Physical Phenomena in High Magnetic Fields (PPHMF-8), January 6-9, 2016, Tallahassee, Florida, USA. 招待講演
6. H. Tanaka, N. Kurita, M. Okada, M. Koike, K. Fujii, K. Johmoto, H. Uekusa, A. Matsuo, K. Kindo and H. Nojiri: Quantum Crystallization of Magnons in Almost Perfectly Frustrated Dimer Magnets Ba<sub>2</sub>MSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub> (M=Co and Ni); Int. Conf. Research in High Magnetic Fields, July 1-4, 2015, Grenoble, France.
7. M. Koike, M. Okada, N. Kurita, H. Tanaka, H. Uekusa, K. Johmoto, A. Matsuo and K. Kindo :Quantum crystallization of magnetic quasiparticles in a dimer magnet Ba<sub>2</sub>NiSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>; Int. Conf. Magnetism, July 5-10, 2015, Barcelona, Spain.
8. M. Okada, N. Kurita, H. Tanaka, K. Johmoto, K. Fujii, H. Uekusa, A. Matsuo, K. Kindo, M. Tokunaga, H. Nojiri, M. Nakamura and S. Nishimoto: Bose-Einstein condensation vs. crystallization of magnons in dimer magnets Ba<sub>2</sub>MSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>Cl<sub>2</sub>(M=Co, Cu); Int. Conf. Magnetism, July 5-10, 2015, Barcelona, Spain.
9. N. Kurita and H. Tanaka: High pressure phase diagram of the singlet-ground-state magnet CsFeCl<sub>3</sub>; Int. Conf. Magnetism, July 5-10, 2015, Barcelona, Spain.
10. 田中秀数: フラストレーションと強磁場が生む量子現象; 早稲田大学高等研究所 Top Runners' Lecture Collection of Science 「磁性体研究の最前線」(早稲田大学西早稲田キャンパス, 2015 年 4 月 30 日). 招待講演

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.lee.phys.titech.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秀数 (TANAKA, Hidekazu)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号: 80188325

(2) 研究分担者

栗田 伸之 (KURITA, Nobuyuki)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号: 80566737