

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05198

研究課題名（和文）量子情報理論とテンソル積変分法を用いたフラストレート・ランダム量子多体系の研究

研究課題名（英文）Study of quantum many-body systems with frustration and randomness using tensor-network algorithm and quantum information

研究代表者

引原 俊哉 (Hikihara, Toshiya)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：00373358

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：フラストレーションとランダムネスをもつ低次元量子多体系の研究を行った。二次元格子や梯子格子上のフラストレート量子スピン系を解析し、これらの系で、スピนนematic状態やカイラル秩序状態などの、様々な新奇量子状態が実現されることを明らかにした。また、二次元格子を含んだ様々な格子上のフラストレート・ランダム量子スピン系に適用可能な数値計算手法として、ツリー型テンソルネットワークを用いた実空間繰り込み群法の改良を行い、それらの系に対する解析の精度向上を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピนนematic (SN) 状態やカイラル秩序状態は、多スピン秩序変数で記述される新しいタイプの量子秩序状態として注目されている。本研究の結果は、それらの新奇量子秩序状態の理解を促進するものである。特に、通常の量子磁性体をもつ相互作用のみを含む系でSN状態が実現されるという結果は、実在の物質におけるSN状態の実現可能性を拓げるものとしての意義をもつ。また、二次元フラストレート・ランダム量子多体系は、主に手法上の困難からその特性解明が妨げられていた。本研究で成されたテンソルネットワーク実空間繰り込み群法の改良は、その困難の克服における大きな進歩であり、今後の研究を進展させるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Low-dimensional quantum many-body systems with frustration and randomness were studied. We investigated frustrated quantum spin systems in various two-dimensional lattices and two-leg ladder lattice, and showed that several novel quantum states including the spin-nematic and vector-chirality states emerged in those systems. We also proposed an improvement of the tensor-network strong-disorder renormalization group (tSDRG) method. Applying the improved tSDRG algorithm to quantum spin systems with quenched randomness in one- and two-dimensional lattices, we showed that the algorithm was able to achieve an accurate calculation of various quantities in the ground state of those systems.

研究分野：物理学

キーワード：フラストレート量子スピン系 ランダム量子スピン系 実空間繰り込み群法 テンソルネットワーク
密度行列繰り込み群法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子多体系における新奇な量子状態の探求は、物性物理学における長年の重要研究課題である。特に、低次元格子上に定義された、相互作用に競合(フラストレーション)や乱れ(ランダムネス)を含むような量子スピン系、いわゆる低次元フラストレート・ランダム量子スピン系では、伝統的な磁気秩序状態や常磁性(無秩序)状態とは本質的に異なる性質をもった、新奇量子多体状態の出現が多数発見・示唆されており、その特性が精力的に研究されている。

この新奇量子多体状態の研究分野において、本課題研究の開始当初においては、秩序パラメータが複数のスピン演算子の積の和で表されるような多スピン秩序状態、具体的には、2つのスピン演算子の対称テンソル、反対称テンソルがそれぞれ秩序化したスピンネマティック秩序状態、カイラル秩序状態が、新しいタイプの量子多体状態として注目されていた。従来の量子磁性体研究領域で主に研究されていた磁気秩序は、1スピン演算子の和で表される磁気秩序パラメータで記述され、その性質に関して非常に多くの知見が蓄積されているが、それに比べると、多スピン秩序状態の性質には未知の部分が多分に残されており、その解明が強く求められていた。

また特に、二次元格子上のフラストレート・ランダム量子スピン系については、上記の多スピン秩序状態の出現など、様々な興味深い問題が認知されているにも関わらず、その研究が満足に進展していないという状況があった。これは主として、この系を精度よく調べるための解析的理論・数値計算手法がほとんどないという、手法上の困難に起因するものである。このため、二次元フラストレート・ランダム量子スピン系を効率的に解析可能な手法の開発が、本研究を遂行する上で急務の課題であった。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえ、本課題研究の目的を、(1)低次元フラストレート・ランダム量子スピン系における新奇量子多体状態の探求・特性解明、(2)低次元フラストレート・ランダム量子スピン系解析のための数値計算手法の開発・改良、の2点に設定した。それぞれの内容は以下の通りである。

(1) 一次元および二次元格子上のフラストレート・ランダム量子スピン系における、スピンネマティック状態などの新奇多スピン秩序状態、および、新奇量子非磁性状態の出現可能性を探求し、その特性を解明する。具体的には、以下のような模型について調べる。

強磁性相互作用を含むフラストレート量子スピン系におけるスピンネマティック状態およびカイラル秩序状態の探求・特性解明：

強磁性相互作用と反強磁性相互作用が競合した低次元フラストレート量子スピン系では、強い強磁性揺らぎによるマグノン束縛対形成に起因したスピンネマティック状態の出現、および、フラストレーションと磁場もしくは相互作用の異方性からくるカイラル自由度の出現に起因したカイラル秩序状態の出現が期待される。本課題研究では、二次元格子および一次元梯子格子上に定義された様々なフラストレート強磁性量子スピン模型の低エネルギー状態について解析を行い、基底状態相図におけるスピンネマティック相・カイラル秩序相の出現条件を特定する。また、それら新奇量子秩序相におけるエネルギーギャップや相関関数など各種物理量の振る舞いを調べ、その特性を明らかにする。

ランダムネスを含んだ低次元量子スピン系の低エネルギー特性の解明：

交換相互作用の大きさがランダムな値をとる低次元ランダム量子スピン系については、近年、特に相互作用がフラストレーションをもつ場合に、既知の状態とは性質の異なる新奇量子非磁性状態が出現することが示唆されており、その性質が注目されている。本課題研究では、二次元フラストレート格子上のランダム量子スピン模型に着目し、その低エネルギー状態の特性解明、および、その性質を記述する有効理論の確立を目指した研究を行う。

(2) 低次元フラストレート・ランダム量子スピン系解析のための数値計算手法の開発・改良：

低次元フラストレート・ランダム量子スピン系に対する高精度・高効率数値計算を実現可能な手法の開発を行う。手法の候補としては、テンソルネットワークを用いた数値変分法を考える。テンソルネットワークとは、テンソルの積の形で表される波動関数の総称で、量子多体状態を効率よく記述する波動関数形式として、近年、注目を集めているものである。本課題研究では、テンソルネットワークを基礎に置く数値計算手法に注目し、テンソルのネットワーク構造の最適化などを通じて、計算精度・効率を向上させるための改良を行うことで、特に二次元格子上のランダム量子スピン系にも適用可能な手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

研究は以下のような方法により行われた。

(1) 低次元フラストレート強磁性量子スピン系における新奇秩序相の研究：

強磁性相互作用を含むフラストレート量子スピン系における、多スピン秩序状態の探求を行った。具体的には、(i)二次元正方・三角格子上に定義された、強磁性・反強磁性交換相互作用

と4スピン相互作用を含んだ量子スピン系、(ii)二本鎖梯子格子上に定義された異方的交換相互作用を含んだ量子スピン系、に着目し、これらの系の基底状態におけるスピネマティック相、カイラル秩序相を含んだ新奇量子相の出現条件およびその特性について調べた。研究方法としては、平均場近似、ボゾン化法、厳密解析などの解析的手法と、密度行列繰り込み群法、厳密対角化法、多変数変分モンテカルロ法などの数値的手法を併用し、それらを有機的に組み合わせることで、系の低エネルギー状態を記述する有効理論の解明を行った。

(2) 低次元ランダム量子スピン系の研究、および、その数値計算手法の開発：

フラストレーションを持つ格子を含む一般の格子上に定義されたランダム量子スピン系に適用可能な数値計算手法の開発を行った。具体的には、ツリー型テンソルネットワークで表される波動関数を用いた数値的実空間繰り込み群法 (tSDRG 法) に着目し、その手法中で用いられているツリー型テンソルネットワークの構造決定アルゴリズムを改良することで、手法の効率改善を行った。また、改良した手法を一次元格子、および、二次元正方・三角格子上に定義されたランダム量子スピン系に適用し、これらの系で実現される低エネルギー状態の特性を解析した。

4. 研究成果

(1) 二次元強磁性フラストレート量子スピン系におけるスピネマティック状態を含んだ新奇量子状態の発見・特性解明：

強磁性相互作用した2つの $S=1/2$ スピン (強磁性ダイマー) をユニットとしたフラストレート量子スピン系の低エネルギー状態について調べた。二次元正方格子・三角格子上に配置された強磁性ダイマーの間に2スピン交換相互作用と4スピン相互作用がはたらくフラストレート量子スピン模型に対して、摂動計算、平均場近似、 $SU(4)$ 対称点周りの厳密解析、多変数変分モンテカルロ法を用いた数値計算などの解析を行い、この模型の広範なパラメータ空間に対する基底状態相図を作成した。その結果、この模型において、 $SU(4)$ 対称点近傍や4スピン相互作用のない領域を含んだ広いパラメータ領域で、スピネマティック自由度が長距離秩序したスピネマティック相が実現されることを明らかにした。この結果は、実在する磁性体では通常微小な大きさしかもたない4スピン相互作用がなくてもスピネマティック相が実現しうることを示すものとして、実際の物質におけるスピネマティック相の実現可能性を拓げる結果と言える。また、スピネマティック相を実現する機構に、 $SU(4)$ 対称点まわりの物理が大きな役割を果たしていることを示す結果として、理論的にも意義をもつものである。さらに、 $SU(4)$ 対称点近傍におけるカイラル秩序相の出現や、スピネマティック相と磁気秩序相間の相転移の性質など、新奇多スピン秩序状態に関する興味深い知見を得ることに成功した。

本研究結果は、スピネマティック状態を実現する量子磁性体について、強磁性ダイマーをユニットとした量子スピン系というカテゴリを提案するものであり、多スピン秩序状態の研究を理論・実験両面において促進するものとして、大きな意味をもつものと言える。

(2) 二本鎖梯子格子上の異方的フラストレート量子スピン系におけるスピネマティック状態を含んだ新奇量子状態の発見・特性解明：

二本鎖梯子格子上に配置された $S=1/2$ スピン間に異方的交換相互作用がはたらく量子スピン系の低エネルギー状態を、特に、強磁性 rung 相互作用と反強磁性 rung 相互作用が交替する場合、及び、強磁性 leg と反強磁性 leg が強磁性 rung 相互作用でつながれた場合について調べた。これらの場合の系は、二次元 Fully-Frustrated 模型の一次元対応系に当たり、新奇量子状態の出現が期待される系である。これらの系に対して、摂動論、厳密解析、ボゾン化法などによる理論的解析と、厳密対角化法、密度行列繰り込み群法を用いた数値計算を併用した解析を行い、広範なパラメータ空間における基底状態相図を作成した。その結果、これらの系において、マグノン束縛対形成を伴うネマティック相関が支配的な朝永 = Luttinger 流体相を含む、様々な量子秩序・無秩序相が実現されることを明らかにした。これらの結果は、上記(1)で述べた二次元模型の結果と併せて、スピンドダイマーを基礎としたフラストレート量子スピン系における多スピン秩序状態の物理を解明する結果として、意義を持つものである。

(3) ランダム量子スピン系に対する高精度数値計算手法の開発・改良：

フラストレートした格子を含む一般の格子上に定義されたランダム量子スピン系に適用可能な数値計算手法の開発を行った。ツリー型テンソルネットワークを用いた変分法として定式化される手法である、テンソルネットワーク実空間繰り込み群法 (tSDRG 法) に着目し、ツリー型テンソルネットワークの構造決定ルーチンの改良に取り組んだ。このルーチンでは、繰り込みを行うスピブロックペアを決定する指標に複数の候補が存在し、その選択により、異なるアルゴリズムを構成できる。本研究では、それら複数の可能なアルゴリズムに基づくプログラムを作成し、それらを一次元鎖格子、二次元正方格子、二次元三角格子上のランダム相互作用ハイゼンベルグ模型に適用することで、これらの系における計算精度の比較評価を行った。その結果、特に相互作用のランダムネスが大きい場合においては、最適なテンソルネットワーク構造決定ルーチンを用いることで、従来のアルゴリズムに比べて、計算精度を飛躍的に向上させられることを明らかにした。また、改良されたアルゴリズムは、二次元格子系に対しても安定的に動作し、十分良い精度の計算結果を実現できることも実証された。この結果は、これまで数値的解析が難し

かった二次元フラストレート・ランダム量子スピン系の研究の可能性を拓くものとして、大きな意義をもつと言える。また、二次元フラストレート・ランダム量子スピン系に関しては、近年、これまでに知られている状態とは性質の異なる、新しいタイプの量子非磁性状態の実現可能性が注目されているが、本研究で得られた計算結果は、その新奇量子非磁性状態で期待される性質と整合しており、今後の研究の発展が大いに期待されるものである。

(4) その他の新奇量子状態・相転移の解析：

その他、上記(1)、(2)と関連する量子スピン模型に対する研究を行った。具体的には、XXZ型異方的相互作用をもつ $S=1/2$ 量子スピン鎖におけるダイマー相関関数について調べた。この結果は、一次元量子スピン系の基礎物性を明らかにするものであることに加え、一方向に強い相互作用を持つような空間異方的二次元・三次元量子スピン系におけるダイマー不安定性の解析の出発点となる理論を構築するものとして、二次元・三次元量子スピン系研究の進展に寄与するものと言える。また、XYZ型異方的相互作用をもつジグザグ梯子 $S=1/2$ 量子スピン系における、非 Landau-Ginzburg 型量子臨界相転移の研究も行った。この非 Landau-Ginzburg 型量子臨界相転移は、二次元フラストレート量子磁性体における実現可能性が注目されている非閉じ込め型量子臨界相転移に対応するものであり、本研究の結果は、この新奇量子相転移の特性解明に資するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Mudry Christopher, Furusaki Akira, Morimoto Takahiro, Hikihara Toshiya	4. 巻 99
2. 論文標題 Quantum phase transitions beyond Landau-Ginzburg theory in one-dimensional space revisited	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.205153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hikihara Toshiya, Misawa Takahiro, Momoi Tsutomu	4. 巻 100
2. 論文標題 Spin nematics in frustrated spin-dimer systems with bilayer structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.214414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tonegawa Takashi, Hikihara Toshiya, Okamoto Kiyomi, Furuya Shunsuke C., Sakai Toru	4. 巻 87
2. 論文標題 Ground-State Phase Diagram of an Anisotropic $S = 1/2$ Ladder with Different Leg Interactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104002 ~ 104002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.104002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Toshiya Hikihara, Akira Furusaki, and Sergei Lukyanov	4. 巻 96
2. 論文標題 Dimer correlation amplitudes and dimer excitation gap in spin-1/2 XXZ and Heisenberg chains	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134429-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.134429	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Toshiya Hikihara, Takashi Tonegawa, Kiyomi Okamoto, and Toru Sakai	4. 巻 86
2. 論文標題 Exact Ground States of Frustrated Quantum Spin Systems Consisting of Spin-Dimer Units	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054709-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.054709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Tonegawa, Kiyomi Okamoto, Toshiya Hikihara, and Toru Sakai	4. 巻 828
2. 論文標題 Frustrated $S=1/2$ Two-Leg Ladder with Different Leg Interactions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012003-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1742-6596/828/1/012003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Tonegawa, Kiyomi Okamoto, Toshiya Hikihara and Toru Sakai	4. 巻 683
2. 論文標題 Ground-state phase diagram of an anisotropic $S=1/2$ ladder with alternating rung interactions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012039:1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/683/1/012039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 様々なエネルギースケール変換による一次元量子系の特性変化
3. 学会等名 研究会「サイン2乗変形 (SSD) とその周辺2019」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 引原俊哉, Christopher Mudry, 古崎昭, 森本高裕
2. 発表標題 spin-1/2 J1-J2 XYZ鎖における非GL的量子臨界相転移
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関孝一, 引原俊哉, 奥西巧一
2. 発表標題 実空間繰り込み群法の改良と二次元ランダム量子スピン系への適用
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三澤貴宏, 引原俊哉, 桃井勉
2. 発表標題 フラストレート・スピンドイマー系におけるスピンネマティック秩序状態の多変数変分モンテカルロ法による解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hikihara, T. Tonegawa, K. Okamoto, S. Furuya and T. Sakai
2. 発表標題 Ground States in an Anisotropic S=1/2 Ladder with Different Leg Interactions
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 引原 俊哉
2. 発表標題 二次元ランダム量子スピン系解析のための実空間繰り込み群法の改良
3. 学会等名 基研研究会 スピン系物理の最前線
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 引原俊哉, 桃井勉
2. 発表標題 2次元フラストレート・スピンドイマー系におけるスピンネマティック秩序状態の変分法による解析
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関孝一, 引原俊哉, 奥西巧一
2. 発表標題 量子モンテカルロ法を用いたランダム量子スピン系の実空間繰り込み群法の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関孝一, 引原俊哉, 奥西巧一
2. 発表標題 二次元ランダム量子スピン系に対する実空間繰り込み群法の改良と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiya Hikiyara
2. 発表標題 SSD and other energy deformations
3. 学会等名 Workshop on Sine square deformation and related topics
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 引原俊哉, 古崎昭, Sergei Lukyanov
2. 発表標題 S=1/2反強磁性ハイゼンベルグ鎖におけるダイマー相関振幅とボンド交替による励起ギャップ
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 引原俊哉, 桃井勉
2. 発表標題 強磁性ダイマーからなる2次元フラストレート量子スピン系におけるスピンネマティック秩序状態
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 利根川孝, 古谷峻介, 岡本清美, 引原俊哉, 坂井徹
2. 発表標題 脚相互作用が異なった異方的 S=1/2 2本脚ラダーの基底状態: 数値計算
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古谷峻介, 利根川孝, 岡本清美, 引原俊哉, 坂井徹
2. 発表標題 脚相互作用が異なった異方的 $S=1/2$ 2本脚ラダーの基底状態: ボソン化
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiya Hikihara, Tsutomu Momoi
2. 発表標題 Spin-nematic ordering in two- and three-dimensional frustrated quantum magnets composed of spin dimers
3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 利根川孝, 岡本清美, 古谷峻介, 引原俊哉, 坂井徹
2. 発表標題 脚相互作用が異なった異方的 $S=1/2$ 2本脚ラダーの基底状態相図 IV
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (2018年)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本清美, 利根川孝, 古谷峻介, 引原俊哉, 坂井徹
2. 発表標題 脚相互作用が異なった異方的 $S=1/2$ 2本脚ラダーの基底状態相図 V
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会 (2018年)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tonegawa, S. C. Furuya, K. Okamoto, T. Hikihara, and T. Sakai
2. 発表標題 Ground State of Anisotropic $S=1/2$ Two-Leg Ladder with Different Leg Interactions
3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 利根川孝, 引原俊哉, 岡本清美, 坂井徹
2. 発表標題 脚相互作用が異なった異方的 $S=1/2$ 2本脚ラダーの基底状態相図 II
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 Bell-Bond-Solid状態
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 ランダム量子スピン系解析のための実空間繰り込み群法の改良
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 一次元フラストレート量子スピン系におけるカイラリティ・スピン多極子秩序
3. 学会等名 量子スピン系研究会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 ランダム量子スピン系解析のための実空間繰り込み群法の改良 II
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 利根川孝, 引原俊哉, 岡本清美, 坂井徹
2. 発表標題 脚相相互作用が異なった異方的 $S=1/2$ 2本脚ラダーの基底状態相図 III
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 引原俊哉、森前智行、藤井啓祐
2. 発表標題 制御性の高い量子多体系における二次元Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki 状態の生成
3. 学会等名 基礎物理学研究所研究会「量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代」
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 T. Hikihara
2. 発表標題 Generation of 2D AKLT and related entangled states
3. 学会等名 The 75th Okazaki Conference, Tensor Network States: Algorithms and Applications 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 フラストレート量子スピン系における厳密基底状態
3. 学会等名 量子スピン系研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 引原俊哉、利根川孝、岡本清美、坂井徹、桃井勉
2. 発表標題 2つの $S=1/2$ スピンをユニットとしたフラストレート量子スピン系の厳密基底状態
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人WebPage https://www.sci.st.gunma-u.ac.jp/%7Ehikihara/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----