

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05519

研究課題名(和文) フラストレート磁性体でのスピン液体状態の探索および関連した諸問題の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study on spin-liquid states in frustrated magnets and related problems

研究代表者

福元 好志 (Yoshiyuki, Fukumoto)

東京理科大学・理工学部物理学科・准教授

研究者番号：00318213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：球体カゴメ系{W72V30}の実験データに基づき、ハイゼンベルグ模型に付加すべき摂動を調べ、ジャロシンスキー-守谷相互作用、および、交換相互作用が平均値のまわりに分布を持つことが重要であり、それらの大きさは交換相互作用の10%程度であることを明らかにした。量子ダイマー模型を有効模型とするハイゼンベルグ反強磁性体を見出した。交換相互作用の関数として有効模型のモデルパラメータを計算し、スピン液体基底状態を実現しうることを見出した。Chakravartyらは高温超伝導の擬ギャップの起源をd波型電荷密度波と示唆していたが、拡張ハバード模型がその微視的模型であることを指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

球体カゴメ系{W72V30}の比熱測定で、Resonating Valence Bond(RVB)状態の特徴である、スピンギャップ以下での多数のシングレット状態の存在が示されている。本研究での摂動項の特定を足がかりに、今後、分数励起(スピノン)の観測が期待される。

等方的交換相互作用のみを持つ模型から量子ダイマー模型(ロクサー・キペルソン点含む)を作るレシピが明らかとなり、今後の量子シミュレータでの実現が期待される。

拡張ハバード模型がDDW秩序を持つ可能性が指摘され、今後、数値実験的研究での検証と、DDW秩序のさらなる理解、実験との対比が進むと期待される。

研究成果の概要(英文)：We have used the experimental magnetization process and specific heat of the spherical Kagome system {W72V30} to clarify what perturbations are important in this material, and have found that the model Hamiltonian is needed to contain the Dzyaloshinsky-Moriya interaction and a broad distribution of nearest-neighbor exchange interactions, whose magnitudes are about 10% of the average exchange interaction.

We have found a Heisenberg antiferromagnet whose effective low-energy model is the quantum dimer model. We calculated the model parameters in the quantum dimer model as a function of exchange interaction and found that the spin-liquid ground state can be realized.

Chakravarty et al. suggested that the origin of the pseudogap in the high-temperature superconductivity is the d-wave charge density wave. We have found the extended Hubbard model being a microscopic model for Chakravarty's scenario.

研究分野：物性理論

キーワード：ハイゼンベルグ模型 スピン液体 球体カゴメ 量子ダイマー模型 RVB状態 光格子 ハバード模型 擬ギャップ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物性物理学において、スピン液体の探求は一大テーマである。1973年、P. W. Anderson によってスピン液体に対する Resonating Valence Bond (RVB) 状態が提案され、1986年に発見された高温超伝導に対し、同氏により RVB 状態へのキャリアドーピングが高温超伝導をもたらしているとの提案がなされた。以降、基底状態として RVB 状態 (スピン液体) を持つ系の探索の努力が続いている。

RVB 状態の探索について、フラストレーションの強いカゴメ格子上的スピン 1/2 ハイゼンベルグ反強磁性体を中心に探索が進められ、ハーバードスミス石で実現されている可能性があるとされている。一方、スピン液体基底状態を持つ理論模型として量子ダイマー模型やキタエフ模型が知られている。量子ダイマー模型は、高温超伝導発見の直後に D. S. Rokhsar と S. A. Kivelson によって提案された RVB 状態空間の現象論的模型である。キタエフ模型は 2006年に A. Kitaev によって提案された模型で、量子情報の分野から派生したものであり、そのスピン液体基底状態を量子ビットに応用しようとする議論もある。キタエフ模型は相互作用に異方性を含んでいるため、物質合成は困難と思われたが、合成の努力が続けられ、近年、成果が得られ始めている。

高温超伝導の問題に立ち返ると、スピン系で記述されるハーフフィールドの場合だけでなく、キャリアドーピングを行なった時に何が起こるかという問題も未だ残っている。その最たるものが、高温超伝導体で観測されている擬ギャップである。近年、擬ギャップ状態が電荷密度波と関連するとの実験的報告がなされ、微視的理論の進展が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、(1) 現存するカゴメ関連物質の研究、(2) 量子ダイマー模型を有効模型に持つハイゼンベルグ模型の研究、(3) 拡張ハバード模型へのキャリアドーピングと d 波型電荷密度波 (DDW)・d 波超伝導 (DSC) の安定性、の 3 つの問題を取り上げる。

(1) では、カゴメ格子と類似の構造をもつスピン 1/2 クラスタ磁性体 $\{W_{72}V_{30}\}$ 、 $\{Mo_{72}V_{30}\}$ に着目する。これらは三角形の頂点共有構造を持ち、球体カゴメ系と呼ばれる。球体カゴメ上のハイゼンベルグ反強磁性体は、カゴメ格子系同様、その挙動は摂動項に敏感であると期待される。そこで、まずは種々の実験データからどのような摂動項を考慮すべきか明確にする。そして、最終的には RVB 状態特有の励起状態であるスピノンの存在が、実験データにどのように反映されるかをつきとめる。

(2) では、ダイヤモンド装飾正方格子上的ハイゼンベルグ反強磁性体の低エネルギー有効模型が量子ダイマー模型となることに着目する。有効模型におけるモデルパラメータ (ダイマーのペアホッピングとダイマー間相互作用) を計算し、RVB 状態が基底状態となりうるか調べる。近年、光格子による量子シミュレータの開発が進んでおり、任意の格子上的ハイゼンベルグ系の作成が可能になりつつあるが、本研究はこのことを念頭に置いたものである。

(3) では、最隣接サイト間の斥力を取り入れた拡張ハバード模型を考える。2001年に S. Chakravarty らによって、擬ギャップの存在を反映した種々の実験データが DDW 秩序で理解できるという現象論が出されている。(3)の目的は、拡張ハバード模型が Chakravarty らの現象論を実現する微視的模型であることを示すことである。

3. 研究の方法

(1) について、クラスタ磁性体 $\{W_{72}V_{30}\}$ 、 $\{Mo_{72}V_{30}\}$ は 30 個のスピン 1/2 からなり、ランチョス法

での厳密対角化計算が実行できる。しかし、従来のランチョス法のみでは計算できない熱力学量も存在するので、熱的量子純粋状態の方法も併用する。(2)について、低エネルギー有効モデルへのマッピングは通常の2次摂動論で解析的に行う。ダイマーのペアホッピングとダイマー間相互作用は、有限サイズの厳密対角化計算によって得ることができる。(3)について、拡張ハバード模型の強結合領域を考え、カノニカル変換の方法により2次の有効ハミルトニアンを求める(ただし、ある基準に従って項の切断を行う)。その有効ハミルトニアンを、DW 秩序およびDSC 秩序を考慮した平均場近似で取り扱う。

4. 研究成果

(1) クラスタ磁性体 $\{W_{72}V_{30}\}$, $\{Mo_{72}V_{30}\}$ の主たる相互作用はハイゼンベルグ相互作用である。

これまで、 $\{W_{72}V_{30}\}$ と $\{Mo_{72}V_{30}\}$ の違いは対称性の崩れ方のわずかな違いを反映し、前者は1種類の、後者は4種類の交換相互作用を持つというモデル化がなされてきた。このモデルでは低温磁化過程に、有限サイズのクラスタ磁性体であることを反映したステップ構造を生じるはずである。しかし、低温磁化過程の測定ではステップ構造は見られず、この実験結果を理解するため、我々は $\{W_{72}V_{30}\}$ に対し(i)Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用を考慮した計算を行い、交換相互作用の10パーセント程度の大きさのDM 相互作用の存在により、実験結果が定性的に理解できることを示した。一方、J. Schnack らは(ii)交換相互作用が平均値のまわりに分布を持つというモデルを提案し、その分布幅は平均交換相互作用の30パーセント程度としている。

引き続き、 $\{W_{72}V_{30}\}$ の帯磁率の温度依存性に対するDM 相互作用の影響を調べた。DM 相互作用のない場合、全スピンは保存し、帯磁率は磁化の揺らぎから比較的容易に求めることができる。一方、DM 相互作用は全スピンの保存を破り、計算は一般に困難となる。これまでの研究例として、ハーバードスミス石(カゴメ格子系)の実験帯磁率の解析を目的とした、15 サイトまでの計算がある。そこでは磁場を印加し、厳密対角化法で得た全固有値を使って自由エネルギーを求め、磁場の2次項の係数から帯磁率を得ている。本研究では30 サイト系の計算を行うため、熱的量子純粋状態の方法に着目した。磁場を印加し、温度 T での熱的量子純粋状態で磁化の期待値をとることによってその温度での統計平均を求め、磁場の1次項の係数から帯磁率を得ている。熱的量子純粋状態の数値計算上の利点は、1本の状態ベクトルから任意の物理量の統計平均が得られるという点にある。本研究ではこの利点を最大限に生かし、DM 相互作用を伴う30 サイト系の帯磁率が定量的に計算可能であることを示した。

最近になって $\{W_{72}V_{30}\}$ の低温磁場中比熱が測定され、スピンギャップ内に多数のシングレット状態が存在するという、RVB 基底状態を示唆する結果が報告されている。一方、実験結果がハイゼンベルグ模型での計算結果と一致しない2つの点、(a) 約2Kのところに生じるはずのピークが見られていないこと、及び、(b) 磁場依存性が非常に小さいこと、が存在し、本研究では上述の2つの摂動(i), (ii)の比熱に対する効果を調べた。まず、(a) については、交換相互作用が分布を持つことによって低エネルギーシングレット状態の分布が影響を受けるためであることがわかった。ただし、ハイゼンベルグ模型での最低シングレット励起エネルギーは最低トリプレット励起の数分の一であり、これに応じ、交換相互作用の分布幅も平均交換相互作用の10%程度(Schnack らの推定値の数分の一)となる。(b) については、DM 相互作用がエネルギー固有値の磁場依存性を抑える効果を持ちうることを見出し、その機構を2スピン模型により例示した。

結論として、 $\{W_{72}V_{30}\}$ の摂動項としては(i)と(ii)の両者が10%程度存在することが明らかになった。今後はこの模型をもとに、スピノン励起の研究を行うことになる。

(2) 高温超伝導の発見を機に量子ダイマー模型が提案され、スピン液体状態への関心から理論的研究がなされてきたものの、現実のスピン系との対応については否定的であった。しかし最近、ダイヤモンドユニットの特性を利用すると、スピン 1/2 の磁性イオンを結合させたスピン系の低エネルギー有効模型として量子ダイマー模型を厳密に実現できることが示された。今回の構成法で用いるスピン間相互作用は、(キタエフ模型の異方的相互作用とは対照的に)最もシンプルなハイゼンベルグ型のものだけであり、現実の物質設計に1つの指針を与えると期待され、また近年、レーザーによる原子トラップ技術を用いて量子格子多体模型を実現しようとする研究が進んでおり、このような研究の格好の対象にもなりうる。現在まで、計算を行なった格子は正方格子のみだが、この場合でもロクサー・キベルソン点(RVB基底状態が得られる点)を実現しうることが示された。なお、本構成法は正方格子に限らず様々な格子に適用可能であり、今後、スピン液体状態の実験系の実現に寄与するものと期待される。

(3) ハバード模型に最隣接サイト間のクーロン斥力 V を加えた拡張ハバード模型の DDW, d 波型超伝導(DSC)状態について調べた。ハーフフィリングで反強磁性領域($U > 4V$, U : オンサイト間クーロン斥力)を出発点とし、ホール濃度 n 及び電子のホッピング振幅 t を小さいと考えた最低次の近似で、有効ハミルトニアンを導出した。さらに、擬ギャップを DDW と仮定し、導出した有効ハミルトニアンに対して、DDW, DSC オーダーパラメータ(Δ_{dw} , Δ_{ds})に関する平均場計算を実行した。セルフコンシステント方程式を数値的に解いた結果、DDW 状態, DDW と DSC の共存状態, DSC 状態がそれぞれ安定になる n の領域が存在することが分かり、得られた相図(図 1: Δ_{dw} , Δ_{ds} の n 依存性)は高温超伝導体の実際のそれと良く似たものとなった。また、DSC のドームの中には、DDW オーダーが立つか否かの量子相転移点(金属-金属転移点)が位置することが分かった(図 1 の $n = 0.152$)。この転移点の存在は、Chakravarty らも指摘しており、本研究によって彼らの提案を裏付けることができた。状態密度の解析的な表式も得ることができ、超伝導の最適ドーピングの近くにおいて、van Hove 特異点がフェルミ準位に位置することが分かった。尚、我々の平均場理論は、Chakravarty らの現象論に対する微視的理論にあたり、彼らの提案が、我々が導出した微視的有效ハミルトニアンから得られたという点が本研究の大きな特徴である。

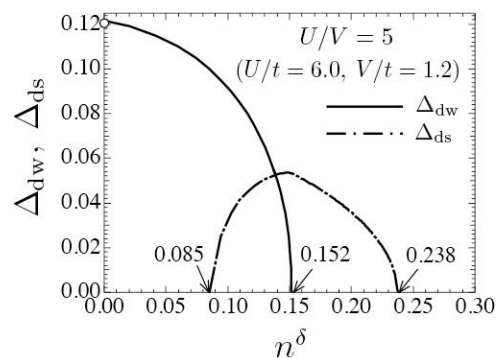


図1: DDW, DSC オーダーパラメータ (Δ_{dw} , Δ_{ds}) のホール濃度 (n^δ) 依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuhei Hirose, Akihide Oguchi, and Yoshiyuki Fukumoto	4. 巻 101
2. 論文標題 Quantum dimer model containing Rokhsar-Kivelson point expressed by spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 174440(1 - 9)
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.101.174440	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 Yuhei Hirose, Akihide Oguchi, and Yoshiyuki Fukumoto	4. 巻 88
2. 論文標題 dx2-y2-Density Wave and dx2-y2-wave Superconducting Gap on the Extended Hubbard Model on a Square Lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084706(1 -16)
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.88.084706	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 Inoue Kouki, Maeda Yuto, Nakano Hiroki, and Fukumoto Yoshiyuki	4. 巻 55
2. 論文標題 Canonical-Ensemble Calculations of the Magnetic Susceptibility for a Spin-1/2 Spherical Kagome Cluster With Dzyaloshinskii-Moriya Interactions by Using Microcanonical Thermal Pure Quantum States	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetism	6. 最初と最後の頁 2700103(1-3)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2018.2873212	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 Fukumoto Yoshiyuki, Yokoyama Yuto, and Nakano Hiroki	4. 巻 87
2. 論文標題 Impact of Dzyaloshinsky-Moriya Interactions and Tilts of g Tensors on the Magnetization of a Spherical Kagome Cluster in $\{W72V30\}$	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 124710(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.7566/JPSJ.87.124710	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 Hirose Yuhei, Miura Shoma, Yasuda Chitoshi, and Fukumoto Yoshiyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Ground-state properties of spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets with frustration on the diamond-like-decorated square and triangular lattices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 101427(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5042792	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 Hirose Yuhei, Oguchi Akihide, Tamura Masafumi, and Fukumoto Yoshiyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Novel constructive method for the quantum dimer model in spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets with frustration on a diamond-like-decorated square lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 101413(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5042717	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 Yuhei Hirose, Akihide Oguchi, and Yoshiyuki Fukumoto	4. 巻 87
2. 論文標題 Erratum: " Emergence of a Dimer-Dimer Interaction in the Low-Energy Effective Quantum-Dimer Model of a Diamond-Like-Decorated Square-Lattice Heisenberg Antiferromagnets with Further Neighbor Couplings "	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 048001(1-1)
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.87.048001	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 Yuhei Hirose, Akihide Oguchi, and Yoshiyuki Fukumoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Emergence of a Dimer-Dimer Interaction in the Low-Energy Effective Quantum-Dimer Model of a Diamond-Like-Decorated Square-Lattice Heisenberg Antiferromagnets with Further Neighbor Couplings	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 124002(1-13)
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.86.124002	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 Yuhei Hirose, Shoma Miura, Chitoshi Yasuda, Yoshiyuki Fukumoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Notes on Ground-State Properties of Mixed Spin-1 and Spin-1/2 Lieb-Lattice Heisenberg Antiferromagnets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 083705(1-3)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.7566/JPSJ.86.083705	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 広瀬悠平, 小口明秀, 福元好志
2. 発表標題 正方格子拡張ハバード模型のd波型電荷密度波/d波型超伝導状態に対する平均場理論の構築(II)
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水口龍之介, 笠井陽介, 小暮伸吾, 広瀬悠平, 福元好志
2. 発表標題 三角格子系Ba3Co3Sb209およびカゴメ格子系Cs2Cu3SnF12に対するハイゼンベルグ模型の2マグノン状態の状態密度
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻井理人, 福元好志
2. 発表標題 相互作用を拡張した古典フラクタルコードに信頼して埋め込める情報量
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水口龍之介, 広瀬悠平, 福元好志, 中野博生
2. 発表標題 フラストレーションのあるリーブ格子ハイゼンベルグ反強磁性体における基底状態特性II
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 広瀬悠平, 小口明秀, 福元好志
2. 発表標題 正方格子拡張ハバード模型のd波型電荷密度波/d波型超伝導状態に対する平均場理論の構築
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 井上晃来, 福元好志, 中野博生
2. 発表標題 球体カゴメ系{W72V30}の磁場中比熱に対するDM相互作用の影響
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 水口龍之介, 広瀬悠平, 福元好志
2. 発表標題 フラストレーションのあるリーブ格子ハイゼンベルグ反強磁性体における基底状態特性
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 大槻瞭, 広瀬悠平, 福元好志
2. 発表標題 拡張ハバードラダーにおける電荷秩序金属中の超伝導と強磁性
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 広瀬悠平, 小口明秀, 福元好志
2. 発表標題 量子ダイマー模型の新しい構成法とRVB状態の発現
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 井上晃来, 福元好志
2. 発表標題 量子開放系の時間発展を再現する純粋な初期状態の存在
3. 学会等名 量子情報技術研究会 (QIT)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上晃来, 福元好志
2. 発表標題 熱浴と初期相関を持つ系の時間発展を記述する量子マスター方程式の導出
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 Yuhei Hirose, Shoma Miura, Chitoshi Yasuda, and Yoshiyuki Fukumoto
2. 発表標題 Ground-state properties of spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets with frustration on the diamond-like-decorated square and triangular lattices
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 Kouki Inoue, Yuto Maeda, Hiroki Nakano, and Yoshiyuki Fukumoto
2. 発表標題 Canonical-Ensemble Calculations of the Magnetic Susceptibility for a Spin-1/2 Spherical Kagome Cluster With Dzyaloshinskii-Moriya Interactions by Using Microcanonical Thermal Pure Quantum States
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 Yuhei Hirose, Akihide Oguchi, Masafumi Tamura, and Yoshiyuki Fukumoto
2. 発表標題 Novel constructive method for the quantum dimer model in spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets with frustration on a diamond-like-decorated square lattice
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 前田悠登, 井上晃来, 福元好志, 中野博生
2. 発表標題 マイクロカノニカル熱的量子純粋状態を用いた球体カゴメ系のカノニカルアンサンブル計算
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 広瀬悠平, 小口明秀, 福元好志
2. 発表標題 2次元ダイヤモンド装飾格子上のハイゼンベルグ反強磁性体における量子ダイマー模型の実現(III)
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 広瀬悠平, 三浦将馬, 安田千寿, 福元好志
2. 発表標題 スピン1と1/2のリーブ格子ハイゼンベルグ反強磁性体の基底状態特性
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 福元好志, 横山祐人, 中野博生
2. 発表標題 球体カゴメ系{W72V30}の磁化過程の厳密対角化計算: ステップ構造消失の起源について
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 三浦将馬, 広瀬悠平, 安田千寿, 福元好志
2. 発表標題 三角リーブ格子及び三角格子上の混合スピン系の基底状態の性質 - 副格子磁化の縮みのスケールリング則について -
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 広瀬悠平, 小口明秀, 福元好志
2. 発表標題 2次元ダイヤモンド装飾格子上のハイゼンベルグ反強磁性体における量子ダイマー模型の実現(II)
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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