

令和 6 年 5 月 11 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03866

研究課題名（和文）カゴメ格子反強磁性体の量子スピン液体とエキゾチック励起の理論的・数値的研究

研究課題名（英文）Theoretical and Numerical Study on the Quantum Spin Liquid and Exotic Excitation of the Kagome-Lattice Antiferromagnet

研究代表者

坂井 徹 (Sakai, Toru)

兵庫県立大学・理学研究科・教授

研究者番号：60235116

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：カゴメ格子反強磁性体に代表される低次元量子スピン系の理論模型に対して、大規模数値対角化と共型場理論やレベルスペクトロスコピー法に基づく独自の有限サイズスケーリングを適用して、理論的・計算科学的に解析した。その結果、 $S=1$ 反強磁性鎖、 $S=1/2$ スピンラダー系、 $S=1/2$ ボンド交代鎖等において、容易軸異方性がある場合に、この容易軸方向に磁場をかけることにより、従来の長距離秩序と量子スピン液体の間ともいえるべき、スピンネマティック相が実現することを理論的に予測することに成功した。また、競合する2つの異方性が働く一次元量子スピン系において、並進対称性の破れた磁化プラトーが発現することも理論予測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温超伝導の起源として注目されている量子スピン液体と、従来の長距離秩序の間ともいえるべき、スピンネマティック相が注目されている。従来の理論においては、スピンネマティック相を引き起こすメカニズムは、biquadratic相互作用か、スピン・フラストレーションに限られていたが、本研究により、異方性と磁場だけでスピンネマティック相をもたらす新しいメカニズムが示された。これにより、量子スピン液体研究の新しい方向性が見いだされたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The low-dimensional quantum spin systems like the Kagome-lattice antiferromagnet were investigated using the large-scale numerical diagonalization and the finite-size scaling analyses like the conformal field theory and the level spectroscopy. As a result, it was revealed that the $S=1$ antiferromagnetic chain, the $S=1/2$ spin ladder and the $S=1/2$ bond-alternating chain etc. in the presence of the easy-axis anisotropy would exhibit the spin nematic phase in the external magnetic field. In addition, it was found that the one-dimensional quantum spin systems with the competing anisotropies would exhibit the translational symmetry broken magnetization plateau.

研究分野：物性理論

キーワード：量子スピン系 量子スピン液体 スピンネマティック 磁化プラトー スピンギャップ

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導の起源として提唱された量子スピン液体が注目されて、その候補物質として、カゴメ格子反強磁性体に代表される、従来の長距離秩序が生じない低次元量子スピン系の研究が、理論・実験両面から精力的に研究されていた。このような中、従来の長距離秩序と量子スピン液体の間ともいふべき、スピンネマティック相が理論的に予測され、候補物質に対する中性子散乱等の検証実験が盛んに実施されているが、まだスピンネマティック相が直接観測されたという事例はあまり多くないのが現状である。そこで本研究では、量子スピン液体とともに、このスピンネマティック相も視野にいられた理論的・計算科学的な研究を実施した。

2. 研究の目的

低次元量子スピン系において注目されている量子スピン液体及びスピンネマティック相に焦点をあて、具体的な候補となる理論模型について、これらの新奇相が実現するパラメータ領域があるかどうかを理論的・計算科学的に研究し、新奇相を含む基底状態相図を求めるとともに、新奇相を実験的に発見するための検証実験を提案することが目的である。

3. 研究の方法

量子スピン液体やスピンネマティック相の実現が期待される低次元量子スピン系の理論模型に対して、有限系の大規模数値的厳密対角化と、共型場理論に基づく有限サイズスケールリングやレベルスペクトロスコピー法と呼ばれる相境界の決定法などの独自の手法を適用して、理論的・計算科学的に解析し、これらの新奇相を含む基底状態相図を作成する。これによって、どのような系でどのような状況で新奇相が実現するのかを、理論的に予測し、具体的な検証実験の提案につなげる。

4. 研究成果

(1) S=1 反強磁性鎖における磁場誘起スピンネマティック液体相

S=1 反強磁性鎖に容易軸型のシングルイオン異方性を導入した理論模型に、この容易軸に平行な磁場をかけた場合の磁化過程を、大規模数値対角化及び共型場理論に基づく有限サイズスケールリングの手法を適用して解析した。その結果、低磁場領域では従来のスピン密度波液体相が実現するが、高磁場領域では新奇スピンネマティック液体相が出現することを理論予測することに成功した。

(2) S=1/2 スピンラダー系等における磁場誘起スピンネマティック液体相

S=1/2 スピンラダー系の桁方向の相互作用を強磁性にして、そこに容易軸型の結合異方性を導入した理論模型に、容易軸に平行な磁場をかけた場合の磁化過程を、大規模数値対角化と密度行列繰り込み群法、及び共型場理論に基づく有限サイズスケールリングの手法を適用して解析した。その結果、十分に異方性が大きい場合には、低磁場領域で 2 マグノンの束縛状態を伴う新しい朝永・ラッティンジャー液体相が実現し、これが従来のキャントしたネール秩序に対応する従来の朝永・ラッティンジャー液体相に相転移することがわかった。また、異方性の大きさによっては、高磁場領域で再び 2 マグノンの朝永・ラッティンジャー液体相へのリエントラント相転移が起きる場合があることも判明した。そして、この新奇 2 マグノンの朝永・ラッティンジャー液体相の中に、スピンネマティック液体相が含まれていることもわかった。

同様の理論的・計算科学的解析を適用することにより、S=1/2 ボンド交代鎖、S=1/2 スピン鎖、S=1/2 歪んだダイヤモンドスピン鎖等においても、磁場誘起スピンネマティック液体相が実現することが判明し、この新奇相を含む磁場中の基底状態相図(図1)を理論的に導いた。

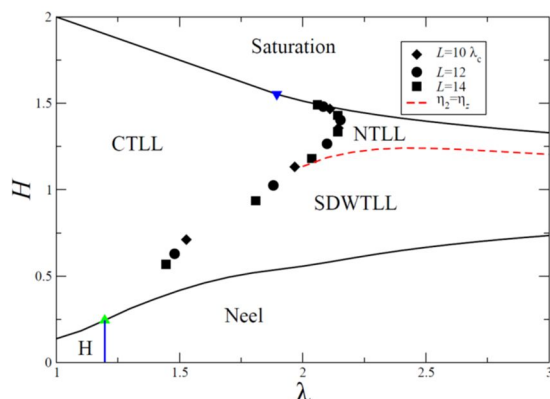


図1. 桁方向の相互作用を-1、足方向の相互作用を1として、桁方向に異方性を導入したスピンラダー系の異方性と磁場Hの相図。CTLL:従来の朝永・ラッティンジャー液体(TLL)、NTLL:ネマティックTLL、SDWTLL:スピン密度波TLL、H:ハルデン相。

(3) $S=1$ 反強磁性鎖における並進対称性の破れた磁化プラトー

$S=1$ 反強磁性鎖に、容易面型のシングルイオン異方性と容易軸型の結合異方性を導入した理論模型に外部磁場をかけた場合の磁化過程について、有限系の大規模数値対角化と密度行列繰り込み群法を用いて理論的・計算科学的に解析した。その結果、従来の $S=1$ 反強磁性鎖では現れない並進対称性の破れた 2 分の 1 磁化プラトーが出現することが判明し、その磁場中の基底状態相図と、磁化曲線を求めることに成功した。

(4) $S=1/2$ ボンド交代鎖における並進対称性の破れた磁化プラトー

$S=1/2$ 強磁性・反強磁性ボンド交代鎖の強磁性ボンドに容易面型の結合異方性、反強磁性ボンドに容易軸型の結合異方性を導入した理論模型の磁化過程を、有限系の数値対角化とレベルスペクトロスコピー法を用いて解析した。その結果、並進対称性が破れた 2 分の 1 磁化プラトーが実現する場合があることがわかり、磁場中の基底状態相図を求めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sakai Toru, Nakanishi Ryosuke, Yamada Takaharu, Furuchi Rito, Nakano Hiroki, Kaneyasu Hirono, Okamoto Kiyomi, Tonegawa Takashi	4. 巻 106
2. 論文標題 Field-induced spin nematic Tomonaga-Luttinger liquid of the $S=1/2$ spin ladder system with anisotropic ferromagnetic rung interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064433-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.064433	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 Sakai Toru, Yamada Takaharu, Nakanishi Ryosuke, Furuchi Rito, Nakano Hiroki, Kaneyasu Hirono, Okamoto Kiyomi, Tonegawa Takashi	4. 巻 91
2. 論文標題 $S=2$ Quantum Spin Chain with the Biquadratic Exchange Interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074702-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.074702	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 Nakano Hiroki, Tadano Hiroto, Todoroki Norikazu, Sakai Toru	4. 巻 91
2. 論文標題 The Haldane Gap of the $S=1$ Heisenberg Antiferromagnetic Chain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074701-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.074701	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 Sakai Toru, Okamoto Kiyomi, Nakano Hiroki, Furuchi Rito	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetization plateau of the distorted diamond spin chain with anisotropic ferromagnetic interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035030 ~ 035030
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/9.0000255	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 Furuchi Rito, Nakano Hiroki, Todoroki Norikazu, Sakai Toru	4. 巻 5
2. 論文標題 Magnetization process of the $S = 1/2$ Heisenberg antiferromagnet on the floret pentagonal lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 125008 ~ 125008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-6528/ac3f7a	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 Sakai Toru, Okamoto Kiyomi, Nakano Hiroki, Furuchi Rito	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetization plateau of the distorted diamond spin chain with anisotropic ferromagnetic interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035030 ~ 035030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000255	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 Sakai Toru, Nakano Hiroki, Furuchi Rito, Okamoto Kiyomi	4. 巻 2164
2. 論文標題 Field-Induced Quantum Spin Nematic Liquid Phase in the $S=1$ Antiferromagnetic Heisenberg Chain with Additional Interactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012030 ~ 012030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2164/1/012030	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 Toru Sakai	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantum spin nematic liquid in the $S = 1$ antiferromagnetic chain with the biquadratic interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015306 ~ 015306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000032	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13件(うち招待講演 1件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Spin nematic liquid of one-dimensional quantum spin systems in magnetic field
3. 学会等名 アメリカ物理学会マーチミーティング(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Field-Induced Spin Nematic Liquid of Low-Dimensional Quantum Pin Systems
3. 学会等名 第6回QST国際シンポジウム(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Spin Nematic Liquid of the $S=1/2$ Distorted Diamond Spin Chain in Magnetic Field
3. 学会等名 The 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Quantum Phase Transition of the Shastry-Sutherland System and ESR Forbidden Transition
3. 学会等名 International Conference on Low Temperature Physics (LT)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Quantum spin nematic liquid in the low-dimensional anisotropic magnets -S=1/2 delta spin chain with the anisotropic ferromagnetic interaction in magnetic field
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Field-Induced Quantum Spin Nematic Liquid Phase in the S=1 Antiferromagnetic Heisenberg Chain with Additional Interactions
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Magnetization plateau of the distorted diamond spin chain with anisotropic ferromagnetic interaction
3. 学会等名 Joint MMM Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Field-induced spin nematic liquid in the 1D anisotropic quantum spin systems
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Quantum Spin Nematic Phase of Low-Dimensional Magnets
3. 学会等名 The 1st Asian Conference on Molecular Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Magnetization plateau of the S=2 antiferromagnetic Heisenberg chain with anisotropies
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井徹
2. 発表標題 Biquadratic 相互作用のある反強磁性鎖の磁化過程
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toru Sakai
2. 発表標題 Quantum spin nematic liquid in the S=1 antiferromagnetic chain with the biquadratic interaction
3. 学会等名 The 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井徹
2. 発表標題 リング交換相互作用のある三本鎖スピントラップのスピネマティック液体
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://cmt.spring8.or.jp/index.shtml

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
研究分担者	利根川 孝 (Tonegawa Takashi) (80028167)	神戸大学・理学研究科・名誉教授 (14501)	
研究分担者	中野 博生 (Nakano Hiroki) (00343418)	兵庫県立大学・理学研究科・准教授 (24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------