

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：32606

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04026

研究課題名(和文) 可解模型からの摂動に基づくスピン液体相の分数励起ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Perturbative analysis from the integrable limits on the dynamics of fractional excitations in quantum spin liquids

研究代表者

宇田川 将文 (Udagawa, Masafumi)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号：80431790

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：Kitaevスピン液体において、素励起の寄与を直接反映する有限温度動的磁気相関関数の厳密解を導出することに成功した。厳密解を元に、中性子回折実験の基礎となる動的磁気構造因子の導出や、局所的な非可換エニオンの検出に役立つホール相関関数の解析を行なった。また、Kitaevスピン液体と相補的に量子スピン液体を代表するシステムである量子スピンの磁気モノポール励起のダイナミクスを正確に記述する方法論を開発し、磁気モノポールの状態密度が示す有効次元変換という現象を見出した。また、量子スピン液体の前駆的な系である古典スピン液体の新しいクラスが同種のcharge間に働く引力機構から生じることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Kitaevスピン液体において、ダイナミクスを正確に記述する動的相関関数の厳密解の導出に成功した成果は、この系がトポロジカル量子計算のプラットフォームとして有望視されていることから非常に意義深い。特に、厳密解に基づくホール相関関数の振る舞いは量子計算の素子である非可換エニオンの局所検出に用いることができ、実際本研究ではSTMを利用した素励起の検出法の提案も行なっている。また、量子スピンの磁気モノポール励起のダイナミクスの記述に成功したことは、量子スピン液体一般に現れる分数励起という新しいクラスの素励起の性質を理解する新しい道筋を開拓したという意味で基礎科学の面から大きな意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：Recently, Kitaev's spin liquid is attracting considerable attention as a platform to perform topological quantum computation. We succeeded in the derivation of exact dynamical magnetic correlation function of this system, which reflect the nature of elementary excitations of this system. On the basis of this exact solution, we derived the dynamical magnetic structure factor, which is essential to interpreting the neutron scattering experiments. We also addressed the hole Green's function, which is applicable to the local detection of non-Abelian anyon, a promising candidate of qubit for quantum computation. We further considered the quantum spin ice system, and developed a general methodology to describe its fractional excitations. We apply this method to address the dynamics of magnetic monopole excitation, and found a phenomenon, which we term as dimensional transmutation. We also found a new class of classical spin liquid emerges out of the attraction between like charges.

研究分野：量子スピン液体

キーワード：量子スピン液体 分数化 厳密解 動的相関関数 幾何学的フラストレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

絶対零度近傍まで磁気秩序を示さない量子スピン液体相の実現は物性物理学の最重要にして最も困難な課題の一つである。安定なスピン液体相を見つける事は理論模型においてすら難しい。そのような困難がある中、研究計画開始当時、Kitaev 模型や、量子スピンアイス模型など、スピン液体相を基底状態として持つことが厳密に示される理論模型が見出され、大きな注目を集めていた。

実験面でも、スピン液体の候補となる物質自体もすでに多数見出されていた。例えば、 Li_2IrO_3 を初めとする Kitaev 模型の候補物質、 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ などの量子スピンアイス系では、磁気秩序が観測出来る最低温度まで存在しないか、あるいは極めて低温まで抑えられており、スピン液体相(近傍)に対応しているとの期待がなされていた。しかしながら、実験的観測量からスピン液体相を積極的に特徴付ける方法論が不在であるため、「磁気秩序の欠如」という否定的な事実をもって、スピン液体実現の間接的な証拠とする、という限定的な結論に留まらざるを得ないのが現状であり、量子スピン液体を特徴付ける観測量の振る舞い、特にダイナミクスの性質を理解することが喫緊の課題であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は可解理論模型を出発点とし、量子スピン液体相に特徴的な素励起である分数励起のダイナミクスを理解することである。特に素励起のダイナミクスをもたらす摂動項の効果に注目する。分数励起のもたらす熱力学特性、輸送現象、励起スペクトルを網羅的に調べ、その実験的帰結を明らかにすることにより、スピン液体の実験的検出を可能とし、また分数励起自体の興味深い物性の開拓を目指すことが目標である。

3. 研究の方法

本研究では特に量子スピンアイス模型、摂動項を加えた Kitaev 模型を取り上げて、その動的相関関数の解析を行なった。解析方法は厳密解および state graph mapping などの解析手法が主たるものであり、研究を進める上でこれらの方法論自身の開拓も行なった。また大規模なシステムサイズの厳密対角化、古典自由度と結合した fermion 系の Monte Carlo simulation などを補助的に併用した。また、分数励起間に働く相互作用効果を調べることが従来知られていなかった新しいスピン液体相を形成しうることを思い立ち、カゴメ、チェッカーボード、パイロクローア格子等の幾何学的フラストレーションを持つ格子上の古典スピンアイス模型においてその効果を考察した。

4. 研究成果

(1) Kitaev スピン液体の厳密な動的磁気相関関数の解析

本研究計画では量子ダイナミクスをもつ擬可解模型の代表例として、Kitaev 模型を取り上げて、その動的磁気相関の解析を行なった。Kitaev 模型は安定な量子スピン液体相を示す可解な模型として有名であるが、その可解性は静的な物理量にとどまり、量子スピン液体の実験的な特徴づけに本質的な役割を果たす有限温度の動的な性質については、精度の面で信頼性に乏しい数値手法のみが知られていた。この状況を踏まえ、本計画ではまず、Kitaev 模型の可解極限における有限温度動的磁気相関関数の厳密な表式の導出を行った。この厳密解の形式では、有限温度動的磁気相関関数を実時間表示で求めることができ、例えば解析接続を行うことによる精度の著しい低下の困難が生じない。従って、Kitaev 模型特有の局在ゼロモード((2)参照)や鋭い共鳴状態の解析に十分な精度をもって適用することができる [1]。

本研究計画ではこの厳密な動的相関関数を応用し、カイラルスピン液体相における磁気応答関数を求めることに成功した。この量は非弾性中性子散乱により測定することが可能である。得られたスペクトルには Majorana zero mode を伴う Vison 対励起に対応するピークその他、Vison の束縛状態の存在を反映するピークが含まれることを見出した。特に、Vison 対の存在は Raman 散乱の実験 [2]を通して、その存在が推測されており、これからの実験研究との詳細な比較が待たれる。また、厳密な動的相関関数の導出の詳細を招待レビューとしてまとめた [3]。

(2) Kitaev スピン液体における局所共鳴現象とマヨラナゼロモードの検出

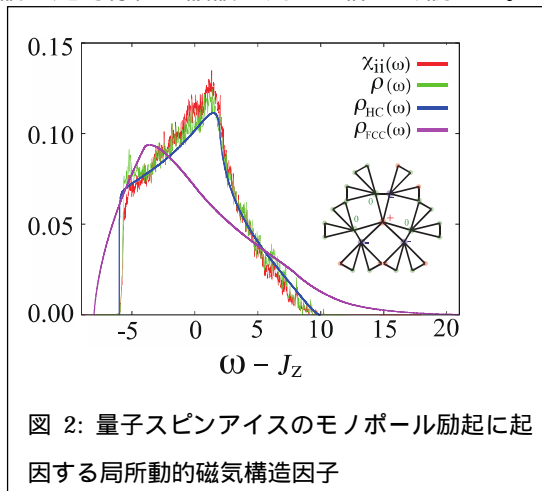
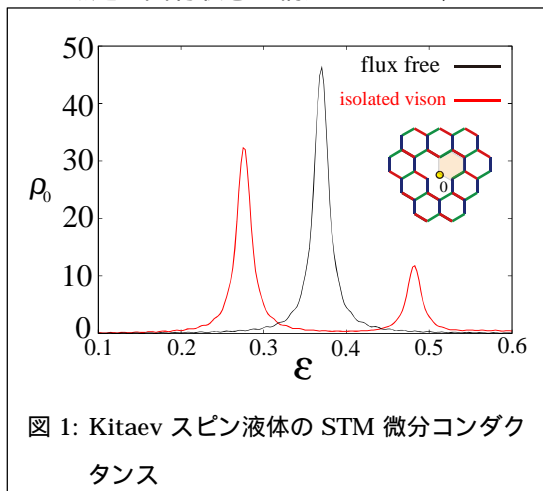
(1)で述べた厳密な有限温度動的相関関数を、サイト欠陥のある Kitaev スピン液体に適用することにより、vison 励起とマヨラナ励起の複合体からなるゼロエネルギー状態形成が欠陥周りに生じることを見出した [1]。Kitaev スピン液体においてはスピン自由度が伝導的な Majorana 粒子と vison に分裂して振る舞う、「分数化」と呼ばれる現象の存在が知られているが、伝導的なマヨラナ粒子の存在を示唆する実験結果とその理論的解釈が複数存在することに比べ、vison の存在を示す徴候はこれまで知られていなかった。本研究はゼロエネルギー共鳴を通じて vison の存在を実証する手段を提起する初めての理論的提案であり、意義深い結果と言える。このゼロエネルギー共鳴は例えば NMR によるスピン格子緩和率の特徴的な温度依存性を通じて観測可能で

ある。本研究成果により、vison の存在を示す具体的な実験的手段を初めて与えた事になる。また、Kitaev 模型の厳密な動的相関関数を電荷自由度に適用し、走査型トンネル顕微鏡 (STM) によりマヨラナゼロモードを同定する実験の可能性について議論した。単一のマヨラナゼロモードの検出は興味深い課題であるが、マヨラナに線形に結合する局所的な観測量が存在しないために、直接にマヨラナの存在を検出する観測することは非常に困難と通常考えられている。この「常識」に対して我々は、Kitaev スピン液体について外部の自由度である電荷自由度を考慮することにより局所検出を可能とする方法論を見出した。電荷 (粒子) を Kitaev スピン液体から取り除くことは Kitaev スピン液体に「不対マヨラナ」を注入することに等しい。不対マヨラナが孤立 vison に付随するマヨラナゼロモードと結合して作る結合軌道を介した伝導チャンネルを測定することにより、STM により、単一のマヨラナゼロモードを検出する可能性が生じる [図 1]。我々はカイラルスピン液体相におけるホール応答関数の磁場依存性を詳細に調べ、このような STM による「マヨラナ分光」の可能性を明らかにした [4]。

(3) 量子スピンの素励起ダイナミクスの高精度解析

量子スピン液体の分数励起スペクトルを精度よく記述する一般的な方法論として、state graph mapping という方法論を構築した。またこの方法を量子スピンアイス系に適用することによって、量子モノポールの局所スペクトルと、それに起因する磁気構造因子を高い精度で求めることに成功した [5]。量子モノポールの状態密度は Van Hove 特異点に起因する特異性を示し、その振る舞いは非弾性中性散乱を通じて、磁気構造因子の低エネルギー端の不連続性として観測することが可能である [図 2]。実際、量子スピンの候補物質は Pr 系、Yb 系などのパイロクロア酸化物で多数見つかり、詳細な実験との比較が可能である。得られたスペクトルの振る舞いについて驚くべきことは、Van Hove 特異点の特異性が通常、一次元系で得られる $-1/2$ 乗の強い特異性だと言うことである。この振る舞いは従来の平均場理論による取り扱いでは得られなかったものであり、state graph mapping の方法論の優越性を端的に示している。しばしば平均場理論に基づいて、熱力学量の温度依存性のべきの値から素励起の分散関係の特徴を抽出する推論がなされるが、この結果はそのような理論的推測に一石を投じる重要な結果である。この「次元変換」の特徴は磁気構造因子のみならず、熱力学量や輸送現象などにも影響を及ぼすことが期待され、今後の豊富な研究展開が期待される。

また、state graph mapping の方法を磁場中の量子スピンアイス系に適用し、量子カゴメアイス状態におけるスピノン励起の状態密度を求めることに成功した。ゲージ場との結合により、3次元量子スピンのモノポール励起の状態密度は 1 次元的な、 $-1/2$ 乗の強い特異性を獲得するが、量子カゴメアイス状態においてはさらに強い特異性が得られることを見出した。また、スピノン励起の固有状態の構造について、グラフ理論や超対称性の議論を用いて詳しく調べた。



(4) 分数励起間の相互作用

当初の計画では予期していなかった進展として、スピン液体における分数励起の再結合という一般性の高い物理概念を見出す事ができた。また、複数の理論模型の解析を通じ、分数励起の再結合によるダイナミクスや相形成への影響を明らかにすることができた。とりわけ、パイロクロア格子上的 $J_1J_2J_3$ スピンアイス模型においては、同符号の分数電荷が引き合うことによって生じる集団励起の存在 [6]を見出す事ができ、古典模型の範囲でそのダイナミクスへの影響を明らかにする事が出来た。この集団励起は電荷保存則に起因するトポロジカルな安定性を有し、非常に長い寿命を持つ。その結果、磁場クエンチ後のダイナミクスにおいて、系の緩和のボトルネックとして機能し、系の動的性質に大きな影響を与えることを示した。

また、カゴメ格子上的 $J_1J_2J_3$ スピンアイス模型においては、やはり同符号の分数電荷間に働く相互作用により、hexamer spin liquid と我々が名付けた新しい古典スピン液体状態が安定化することが分かった [7]。この古典スピン液体状態の残留エントロピーは従来知られていない新奇な値を示し、この状態が質的に新しい状態であることを強く示唆する。その空間構造は磁気構造因子に現れる半月構造を通じて観測可能である。量子揺らぎを考慮することにより、これまで知

られていない新しい量子スピン液体を産み出す母体となる可能性がある。
また、連続スピン自由度をもち、クーロン相を示す典型例である反強磁性 Heisenberg 模型に対して、クーロン相近傍で典型的に期待されるスピン相関のタイプを分類し、対応するイジング系の諸相との対応関係を与えることに成功した[8]。また現存するスピネル化合物等の実験解釈を与えたことは著しい成果である。連続スピン系における磁気相関の発達の様子とクーロン相との関係も明らかにした。
励起の分数化とは、スピンや電荷などの、系を構成する自由度の量子数が、より小さい基本単位に分裂して振る舞う現象を指す。今回見出したこの現象の特筆すべき点は、分化した励起が元のパートナーとは別の相手と再結合を行なう点にある。これにより、元々のスピンやフェルミオンの自由度からは想像しがたい、あるいは解釈する事が難しい新しい相や集団励起を形成する可能性が生じる[7-10]。

(5) カイラル超伝導体におけるマヨラナ粒子の多体的性質

p 波カイラル超伝導体の渦糸準粒子状態を Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づいて調べ、渦糸芯のマヨラナゼロモードが作るマヨラナバンドの Chern 数が磁場やフェルミエネルギーに対して敏感に変化してトポロジカル相転移を起こすことを見出した。そのアナロジーとして、三次元系ではワイル超伝導状態が生じることを見出した[11]。

(6) 第二種 Weyl 半金属における動的応答

Weyl 点の縮退を保ったまま、Weyl 分散が倒れることによって金属化した系は第二種 Weyl 半金属と呼ばれ、 WTe_2 をはじめとするいくつかの系で、その実現が期待されている。第二種 Weyl 半金属では Fermi 面の存在のために、比熱等の熱力学量は金属的に振る舞い、Weyl 点の存在を反映しない。Fermi 面近傍の大量の低励起の存在下で Weyl 点の存在がどのような物理量に反映するか、また関連して、Fermi 面の存在下でどのように Weyl 点の存在を検出するかという問題は重要な課題である。

本研究では、磁場中でのカイラルモード形成に注目し、Weyl 半金属を形成する単純な格子モデルを仮定して詳細な解析を行なった。その結果、(i) カイラルモードの出現が磁場方向に強く依存する事、(ii) Weyl 分散の傾きに応じて、カイラルモードの速度の反転が起こる事[図(a)-(c)]を見出した。また、(ii) に関して、光学伝導度に生じるサイクロトロン共鳴が、Fermi 面に埋もれた Weyl 点の存在の検出に大きく役立つ事を見出した[12]。また、第二種 Weyl 半金属における電荷密度波形成の不安定についても議論した[13]。

<引用文献>

- [1] M. Udagawa, Phys. Rev. B 98, 220404 (2018).
- [2] D. Wulferding, Y. Choi, S.-H. Do, C. H. Lee, P. Lemmens, C. Faugeras, Y. Gallais, and K.-Y. Choi, Nature Communications 11, 1603 (2020).
- [3] M. Udagawa, J. Phys.: Condens. Matter 33 254001 (2021).
- [4] M. Udagawa, S. Takayoshi and T. Oka, Phys. Rev. Lett. 126, 127201 (2021).
- [5] M. Udagawa and R. Moessner, Phys. Rev. Lett. 122, 117201 (2019).
- [6] M. Udagawa, L. D. C. Jaubert, C. Castelnovo, and R. Moessner, Phys. Rev. B 94, 104416 (2016).
- [7] T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, and M. Udagawa, Phys. Rev. Lett. 119, 077207 (2017).
- [8] T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, R. Moessner, and M. Udagawa, Phys. Rev. B 98, 144446 (2018).
- [9] K. Tokushuku, T. Mizoguchi, M. Udagawa, Phys. Rev. B, 100, 134415 (2019).
- [10] K. Tokushuku, T. Mizoguchi, M. Udagawa, J. Phys. Soc. Jpn., 89, 053708 (2020).
- [11] T. Yoshida and M. Udagawa, Phys. Rev. B 94, 060507 (2016).
- [12] M. Udagawa and E. J. Bergholtz, Phys. Rev. Lett. 117, 086401 (2016).
- [13] M. Trescher, E. J. Bergholtz, Masafumi Udagawa, J. Knolle, Phys. Rev. B 96, 201101 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masafumi Udagawa	4. 巻 33
2. 論文標題 Theoretical scheme for finite-temperature dynamics of Kitaev's spin liquids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 254001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-648X/abf6e4	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 Masafumi Udagawa, Shintaro Takayoshi, and Takashi Oka	4. 巻 126
2. 論文標題 Scanning Tunneling Microscopy as a Single Majorana Detector of Kitaev's Chiral Spin Liquid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 127201 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.127201	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 Tokushuku Kunio, Mizoguchi Tomonari, Udagawa Masafumi	4. 巻 100
2. 論文標題 Trimer classical spin liquid from interacting fractional charges	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134415 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.134415	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 Tokushuku Kunio, Mizoguchi Tomonari, Udagawa Masafumi	4. 巻 89
2. 論文標題 Field-Selective Classical Spin Liquid and Magnetization Plateaus on Kagome Lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053708 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.053708	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 Tomonari Mizoguchi, Masafumi Udagawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Flat-band engineering in tight-binding models: Beyond the nearest-neighbor hopping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.235118	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 Masafumi Udagawa, Roderich Moessner	4. 巻 122
2. 論文標題 Spectrum of Itinerant Fractional Excitations in Quantum Spin Ice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 117201-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.117201	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 Masafumi Udagawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Vison-Majorana complex zero-energy resonance in the Kitaev spin liquid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220404(R)-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.220404	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 Tomonari Mizoguchi, Ludovic D. C. Jaubert, Roderich Moessner, Masafumi Udagawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Magnetic clustering, half-moons, and shadow pinch points as signals of a proximate Coulomb phase in frustrated Heisenberg magnets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144446-1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.144446	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 M. Trescher, E. J. Bergholtz, M. Udagawa and J. Knolle	4. 巻 96
2. 論文標題 Charge density wave instabilities of type-II Weyl semimetals in a strong magnetic field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 201101 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.201101	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 T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert and M. Udagawa	4. 巻 119
2. 論文標題 Clustering of Topological Charges in Kagome Classical Spin Liquid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 077207 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.077207	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 K. Essafi, L. D. C. Jaubert and M. Udagawa	4. 巻 29
2. 論文標題 Flat bands and Dirac cones in breathing lattices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 315802 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aa782f	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 Tomohiro Yoshida, Masafumi Udagawa	4. 巻 94
2. 論文標題 Generic Weyl phase in the vortex state of quasi-two-dimensional chiral superconductors	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 060507R-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.060507	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 M. Udagawa, L. D. C. Jaubert, C. Castelnovo, R. Moessner	4. 巻 94
2. 論文標題 Out-of-equilibrium dynamics and extended textures of topological defects in spin ice	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104416-1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.104416	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 M. Udagawa, J. Bergholtz	4. 巻 117
2. 論文標題 Field-Selective Anomaly and Chiral Mode Reversal in Type-II Weyl Materials	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 086401-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.086401	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

〔学会発表〕 計42件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 加藤将貴, 宇田川将文, 徳宿邦夫, 松浦弘泰, 小形正男
2. 発表標題 Control of Magnetism by Oxygen Adsorption in Magnetic Sponge Materials
3. 学会等名 APS March meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤将貴, 宇田川将文, 徳宿邦夫, 松浦弘泰, 小形正男
2. 発表標題 金属有機構造体の酸素吸着による磁気制御
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 宇田川将文
2. 発表標題 Kitaev スピン液体の可解極限からの摂動展開
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 高吉 慎太郎, 宇田川 将文, 岡 隆史
2. 発表標題 Kitaevスピン液体におけるSTMを用いたマヨラナ粒子操作
3. 学会等名 日本物理学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇田川将文
2. 発表標題 量子スピン液体の素励起ダイナミクス
3. 学会等名 第5回CRESTチームミーティング(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Detection of Majorana in the dynamical response of Kitaev's spin liquid
3. 学会等名 waiting for the conference on Highly Frustrated Magnetism (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Spectral singularity of spinons in quantum spin ice
3. 学会等名 OIST Virtual Seminars and Lectures series (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤将貴, 宇田川将文, 徳宿邦夫, 松浦弘泰, 小形正男
2. 発表標題 金属有機錯体表面における酸素吸着に誘起された磁気競合効果と2次元古典スピン液体形成
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇田川 将文, 高吉 慎太郎, 岡 隆史
2. 発表標題 Kitaev スピン液体におけるマヨラナ探索プローブとしてのSTM
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa, Roderich Moessner
2. 発表標題 量子スピンアイスのスピノンスペクトル
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa, Roderich Moessner
2. 発表標題 量子カゴメアイスにおけるマクロに縮退した励起状態とquantum scar
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Dynamics of fractional excitations in quantum spin liquids
3. 学会等名 UK-Japan workshop on strongly correlated electron systems and 18th Theoretical and Experimental Magnetism Meeting (TEMM) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇田川 将文
2. 発表標題 Spinon dynamics in Quantum spin ice
3. 学会等名 統計力学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Dimensional diversication in quantum spin ice
3. 学会等名 SFB workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳宿邦夫、宇田川将文
2. 発表標題 パイロクロア格子上のValence Bond Crystal相に ドープされたホールのダイナミクス
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 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Magnetic and Charge response of Kitaev's spin liquid
3. 学会等名 IBSPCS-KIAS workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Dynamical response of Kitaev 's spin liquid
3. 学会等名 The 3rd Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masafumi Udagawa
2. 発表標題 Exploration of Majorana in Kitaev dynamics
3. 学会等名 TopoMat2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Udagawa and R. Moessner
2. 発表標題 Dimensional transmutation of quantum monopole dynamics
3. 学会等名 APS March Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Udagawa, R. Moessner
2. 発表標題 Spectrum of itinerant fractional excitations in quantum spin ice
3. 学会等名 International Workshop on Constrained Many-body Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Dynamics of fractional excitations in Kitaev's spin liquid
3. 学会等名 The 2nd Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Vison resonance in Kitaev's spin liquid
3. 学会等名 The 9th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Local magnetic resonance in Kitaev's spin liquid
3. 学会等名 KIAS-KAIST Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇田川 将文
2. 発表標題 Zero-energy Majorana in Kitaev spin liquid
3. 学会等名 トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア 第4回領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇田川 将文
2. 発表標題 量子スピン液体の素励起
3. 学会等名 第12回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇田川 将文
2. 発表標題 Kitaev スピン液体の動的相関
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇田川 将文
2. 発表標題 Kitaev スピン液体におけるVison の検出
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, and M. Udagawa
2. 発表標題 Clustering of topological charges and novel classical spin liquid in kagome Ising model
3. 学会等名 Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases (BEC2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 溝口知成、Ludovic D. C. Jaubert、宇田川将文
2. 発表標題 パイロクロア格子ハイゼンベルグ模型におけるスピンのクラスタ化とそのダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 溝口知成、宇田川将文
2. 発表標題 遷移金属スピネルにおけるスピン分子励起のトポロジカル描像
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 溝口知成、Ludovic D. C. Jaubert、宇田川将文
2. 発表標題 ガウスの法則を用いたスピンアイス型模型の基底状態相図の導出
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Recombination of Fractional Excitations in Frustrated Magnets
3. 学会等名 Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Fractional excitations of quantum spin ice in pre-coherency temperature range
3. 学会等名 International conferences on Frustrated Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Local and global magnetic response of Kitaev spin liquids
3. 学会等名 TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop: Topological magnets and topological superconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Fractional Excitations in Spin Ice
3. 学会等名 Theory of Correlated Topological Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Recombination of fractional excitations in frustrated magnets
3. 学会等名 EPIQS-TMS Trans-Pacific Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Recombination of fractional excitations
3. 学会等名 第2回TMS領域研究会 (TMS2016)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Udagawa
2. 発表標題 Dynamical properties of fractional excitations in Kitaev spin liquids
3. 学会等名 APS March meeting (2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Mizoguchi, L. D. C. Jaubert, M. Udagawa
2. 発表標題 Effect of interaction between fractional excitations on J1-J2-J3 Ising model on a kagome lattice
3. 学会等名 APS March meeting (2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Trescher, J. Knolle, E. J. Bergholtz, M. Udagawa
2. 発表標題 Cascade of charge density waves in type-II Weyl materials and magnetotransport
3. 学会等名 APS March meeting (2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宇田川将文
2. 発表標題 第二種Weyl 半金属における量子異常
3. 学会等名 日本物理学会秋期大会(2016)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 溝口知成、L. D. C. Jaubert, 宇田川 将文
2. 発表標題 古典スピン液体における分数励起間相互作用の効果
3. 学会等名 日本物理学会秋期大会(2016)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 パリティ編集委員会、大槻 義彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 166
3. 書名 物理科学, この1年 2020	

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇田川研究室のホームページ https://www-cc.gakushuin.ac.jp/~20150035/Welcome.html
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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			
ドイツ	Max Planck Institute (MPI PKS)			
フランス	Bordeaux University	CNRS		
ドイツ	Freie Universitat Berlin			
スウェーデン	Stockholm University			
イギリス	Cambridge University			