

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03742

研究課題名（和文）量子スピン液体の準粒子励起を反映した非平衡磁気ダイナミクス

研究課題名（英文）Non-equilibrium magnetic dynamics reflecting quasiparticle excitations in quantum spin liquids

研究代表者

那須 譲治（Nasu, Joji）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40610639

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：当該研究課題では、磁性絶縁体で現れる量子スピン液体がもつ分数準粒子に由来する特異な性質が非平衡ダイナミクスにどのように現れるかを明らかにすることを目的としている。Kitaev量子スピン液体では、マヨラナ粒子とバイソンと呼ばれる複数の分数準粒子が現れる。本研究ではこのモデルを主に実時間平均場近似法を用いて解析した。その結果、スピン励起が分数準粒子であるマヨラナ粒子によってスピンの変調なしに伝搬することや、スピンを伝搬するマヨラナ粒子は、不純物よりバイソン励起に対して強く散乱されることを明らかにした。さらに、局所磁場を実時間で印加することで、バイソンを空間的に移動できることを見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、磁性絶縁体で現れる量子スピン液体がもつ分数準粒子に由来する特異な性質が非平衡ダイナミクスにどのように現れるかを明らかにすることを目的としている。本研究では、スピンの分数化によって生じたマヨラナ粒子が磁気励起を伝搬するという結果が得られており、これは、分数準粒子が元の物理的実体であるスピンの輸送体となり得るということを示した点で学術的意義があるだけでなく、伝搬過程で磁化変調を必要としないため、それを活用したスピントロニクスへの応用も期待される。また、分数準粒子の磁場制御も、これを情報担体とする量子計算への応用基盤を構築するという点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to elucidate how the unique properties of fractional quasiparticles, which emerge in quantum spin liquids of magnetic insulators, manifest in nonequilibrium dynamics. In the Kitaev quantum spin liquid, fractional quasiparticles known as Majorana particles and visons appear. This study primarily analyzed this model using the real-time mean-field approximation method. Our results reveal that spin excitations propagate via Majorana particles without changing spins. Moreover, we find that Majorana particles carrying spin excitations are strongly scattered by vison excitations rather than impurities. We also reveal that applying a real-time local magnetic field can spatially move the visons.

研究分野：物性理論

キーワード：量子スピン液体 非平衡ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

それ以上分解できない素粒子のひとつである電子は、電荷やスピンといった自由度を持ち、固体の示す性質の大部分を決定することが知られている。特に、高温超伝導や巨大磁気抵抗効果、マルチフェロイクスなどの顕著な機能性は、電子間のクーロン相互作用に由来した協力現象によって現れるものである。さらに、量子多体効果は、電子とは全く異なる性質を有する準粒子励起を創発させる可能性を秘めており、励起ダイナミクスも強相関電子系の魅力的な現象が現れる舞台となる。例えば、磁気秩序においては、ボーズ的な性質を持つマグノンが準粒子として創発する一方で、強い量子効果と多体効果によって極低温まで磁気秩序が抑制された量子スピン液体においては、素励起として、磁性の最小単位である電子スピンの独立した準粒子に分裂(分数化)したように振る舞うことが指摘されている。

強相関効果によって発現するこのような基礎的自由度への分数化現象は、相互作用のない単体の電子からは創出できない特異な性質を生み出すと期待されている。例えば、ある種の量子スピン液体においては、量子スピンのマヨラナ準粒子へと分数化する。マヨラナ粒子とは、粒子と反粒子が等価なフェルミ粒子である。量子スピン液体は、自発磁化といった巨視的な観測量で特徴付けることができないため、マヨラナ準粒子の特徴を実験的に捉えることができれば、量子スピン液体実現の有力な証拠となる。また、マヨラナ準粒子が示す特殊な統計性を用いることで、トポロジカル量子計算とよばれる外部からの擾乱に強い量子計算が可能とされていることから近年注目を集めている。これらを実現させるためには、マヨラナ準粒子を単体で観測・制御することが必須となる。しかしながら、マヨラナ準粒子は電氣的に中性であり、直接的な観測は非常に困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、準粒子の存在を決定的なものとする新しい視点として、もとの自由度から創発準粒子を形成する過程を時間発展として追跡する。量子スピン液体における準粒子形成に係る過渡的なダイナミクスを調べることで、その形成メカニズムを解明する。さらに準粒子の存在を確実なものとする実験方法を提案し、その検証への道筋を作る。準粒子形成プロセスという非平衡過程の新たな側面に着目することで、創発準粒子の存在実証だけでなく、準粒子形成に伴う強相関非平衡系の新たな分野を開拓する。

3. 研究の方法

本研究では、継続課題として前研究課題「可解模型を起点とした強いスピン軌道相互作用がもたらす特異な量子状態の探求」で注目した量子スピン模型であるキタエフ模型を起点にして研究を行う。スピン軌道相互作用の強い強相関電子系で実現すると考えられているこの模型は、基底状態が量子スピン液体であることを厳密に示すことができる可解模型であり、素励起として量子スピンの分数化して生じた2種類のマヨラナ粒子で記述できる。応募者はこれまで、この模型に対して、電子スピンの格子点に局在した模型を、フェルミオン模型に書き直すことで数値計算を可能とする手法を開発し、比熱やエントロピーなどの熱力学量やラマンスペクトル、動的スピン相関などのダイナミクスの計算を行ってきた。本研究でも、フェルミオン模型への書き換えを利用することで、実時間ハートリーフォック法や時間依存動的平均場近似法など、成熟したフェルミオン系の手法を用いることで、量子スピン模型であるキタエフ模型の時間発展を解析する。この模型で実現する量子スピン液体における準粒子形成の過渡的な振る舞いを調べるために、まずその準粒子を外場によって破壊した後、それが緩和してもとの準粒子描像へ戻る様子を時間発展として追跡する。この緩和過程において、種類の異なる準粒子を寿命の違いに基づいて分離して観測できると期待される。本研究では、外場として実験的に制御可能な磁場や、円偏光などスピンと結合しうる光源の照射を念頭に置いて計算を進めていく。特に、これまで強相関電子系では、強強度の光照射後の時間発展を、反射スペクトルや光電子分光によって測定するいわゆるポンプ・プローブ分光実験が行われている。量子スピン液体においても、パルス磁場などによる緩和現象を、磁気カー効果やファラデー効果を用いて実験的に観測可能であるため、これを再現するような模型を構築し計算を行う。また、定常外場を急に切るもしくは入れるというクエンチ現象も実験的に検証可能である。励起光や磁場の時間依存性には、様々なバリエーションがあり、それによって準粒子描像の崩壊や形成ダイナミクスの速度が変化する可能性がある。光照射や磁場変化によって生じる準粒子励起の時間発展を明らかにすることで、量子スピン液体に内在する分数準粒子を別個に観測する手段を提案する。

また、不純物や転位などによって並進対称性がない場合には、準粒子形成に特異的な振る舞いが

期待される。準粒子が形成するバンド構造にトポロジカルな特徴がある場合には、それが崩壊・形成する過程で電気磁気効果といった交差相関現象が現れることも考えられる。本研究は研究代表者一人で行うものであるが、これら興味深い現象に関する議論を展開していく上では、それをどのように観測するかも含めて、国内外の実験研究グループとも協力しながら本研究を推進していく。

4. 研究成果

本研究課題では、磁性絶縁体で現れる量子スピン液体がもつ分数準粒子に由来する特異な性質が非平衡ダイナミクスにどのように現れるかを明らかにすることを目的としている。量子スピン液体とは強い量子ゆらぎと相互作用によって極低温まで磁気秩序が抑制された量子状態である。それが持つ強い量子多体効果により、基底状態からの磁気励起は、あたかも物理的な自由度であるスピンの複数の準粒子へと分裂したかのように振る舞う。これは、分数準粒子と呼ばれる。Kitaev量子スピン液体では、マヨラナ粒子とバイゾンと呼ばれる複数の分数準粒子が現れる。本研究ではこの模型を主に厳密対角化と実時間平均場近似法を用いて解析した。具体的には、まず、有限の磁場を急にゼロにする磁場クエンチに磁場の影響をマヨラナ描像に基づく平均場近似と厳密対角化法によって計算した。その結果、2種類の準粒子で時間依存性が異なり、分数化の性質が色濃く表れることが明らかになった。

さらに、Kitaev量子スピン液体の端にパルス磁場を印加することで、磁気励起を行いその後の時間発展を計算した。その結果、系全体に磁場を印加している場合には、端に導入した磁気励起によって、磁化変調が波となってもう片方の端に伝播する。一方で、系に磁場を印加していない場合には、内部で磁化変調が生じないことが明らかになった。内部で磁化が変調していないにもかかわらずもう片方の端にはある時間経過後に磁化変調が発生することわかった。詳しい解析の結果、磁気パルスによる励起は、量子スピン液体内部ではマヨラナフェルミオンによって伝播されていることがわかった。もう片方に現れる磁化変調の遅延時間はマヨラナフェルミオンの速度によって決定され、また、マヨラナフェルミオンは量子スピン液体においてギャップレスのため、長距離で磁気パルスによる励起が輸送されることがわかった。

次に、Kitaev量子スピン液体において、ボンドの乱れや不純物を導入することによって、その磁気ダイナミクスがどのような影響を受けるかを調べた。その結果、局所的な励起に対応する低エネルギーのスペクトルが、遍歴的なマヨラナフェルミオンに対応する励起スペクトルと比較して、乱れに対して敏感であることがわかった。

次に、Kitaevスピン液体で見られたスピンの分数化が他の系でも現れるかを検証するために、長距離の磁気相互作用を持つ系やスピンの長さを大きくした模型を対象に研究を行った。その結果、例えばKitaev模型に対してスピンの長さを長くしていくと、量子ゆらぎが抑制されて量子スピン液体が不安定になり、量子スピン液体相の領域が小さくなることがわかった。これまで、スピンの $1/2$ より大きな場合についてもスピンの分数化の兆候が、比熱のダブルピーク構造として観測されていたが、今後、そのような分数準粒子が非平衡ダイナミクスとしてどのように現れるかを検証していく必要がある。

最後に、バイゾン励起を局所磁場で制御する方法についても検討しており、局所磁場を実時間で印加することで、バイゾンを空間的に移動できることを見いだしている。さらに印加磁場強度や印加領域の依存性も調査し、バイゾンを実時間で制御するための条件を系統的に調べた。その結果、バイゾンを移動させる磁場強度には閾値があり、それはマヨラナ粒子のトポロジカルな性質に依存することを見いだした。また、磁場印加領域を大きくしても、バイゾンを実時間で移動させることが可能であることを見いだした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Misawa Takahiro, Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 108
2. 論文標題 Interedge spin resonance in the Kitaev quantum spin liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.115117	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 Harada Chihiro, Ono Atsushi, Nasu Joji	4. 巻 108
2. 論文標題 Field-driven spatiotemporal manipulation of Majorana zero modes in a Kitaev spin liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L241118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.L241118	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 Koyama Shinnosuke, Nasu Joji	4. 巻 108
2. 論文標題 Flavor-wave theory with quasiparticle damping at finite temperatures: Application to chiral edge modes in the Kitaev model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.108.235162	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 Imamura Kumpei, Suetsugu Shota, Mizukami Yuta, Yoshida Yusei, Hashimoto Kenichiro, Ohtsuka Kenichi, Kasahara Yuichi, Kurita Nobuyuki, Tanaka Hidekazu, Noh Pureum, Nasu Joji, Moon Eun-Gook, Matsuda Yuji, Shibauchi Takasada	4. 巻 10
2. 論文標題 Majorana-fermion origin of the planar thermal Hall effect in the Kitaev magnet -RuCl_3	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 adk3539
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.adk3539	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 該当する

1. 著者名 Yamamoto Junya, Nagai Yuya, Jinno Takaaki, Shimizu Yasuhiro, Matsushita Taku, Kobayashi Yoshiaki, Itoh Masayuki, Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 38
2. 論文標題 NMR Evidence for Majorana Gap in the Kitaev Quantum Spin Liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.38.011130	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 Taguchi Hirokazu, Koga Akihisa, Murakami Yuta, Nasu Joji, Tsuchiura Hiroki	4. 巻 38
2. 論文標題 Field-direction Dependence of Majorana-mediated Spin Transport	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.38.011152	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 Koyama Shinnosuke, Nasu Joji	4. 巻 73
2. 論文標題 Nonlinear Spin-wave Theory for Dynamical Spin Correlations in the Kitaev Model at Finite Temperatures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 New Physics: Sae Mulli	6. 最初と最後の頁 1123 ~ 1126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3938/NPSM.73.1123	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 Nasu Joji	4. 巻 1
2. 論文標題 Majorana fermions in Kitaev spin liquids	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Encyclopedia of Condensed Matter Physics (Second Edition)	6. 最初と最後の頁 139 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-323-90800-9.00178-5	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 Fukui Kiyu, Kato Yasuyuki, Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 106
2. 論文標題 Ground-state phase diagram of spin-S Kitaev-Heisenberg models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.174416	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 Suetsugu Shota, Ukai Yuzuki, Shimomura Masaki, Kamimura Masashi, Asaba Tomoya, Kasahara Yuichi, Kurita Nobuyuki, Tanaka Hidekazu, Shibauchi Takasada, Nasu Joji, Motome Yukitoshi, Matsuda Yuji	4. 巻 91
2. 論文標題 Evidence for a Phase Transition in the Quantum Spin Liquid State of a Kitaev Candidate -RuCl ₃	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 124703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.124703	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 Fukui Kiyu, Kato Yasuyuki, Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 106
2. 論文標題 Feasibility of Kitaev quantum spin liquids in ultracold polar molecules	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 14419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.014419	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 Nasu Joji, Murakami Yuta, Koga Akihisa	4. 巻 106
2. 論文標題 Scattering phenomena for spin transport in a Kitaev spin liquid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 24411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.024411	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 Nasu Joji, Hayami Satoru	4. 巻 105
2. 論文標題 Antisymmetric thermopolarization by electric toroidicity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.245125	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 Manjo Taishun, Kitou Shunsuke, Katayama Naoyuki, Nakamura Shin, Katsufuji Takuro, Nii Yoichi, Arima Taka-hisa, Nasu Joji, Hasegawa Takumi, Sugimoto Kunihisa, Ishikawa Daisuke, Baron Alfred Q. R., Sawa Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Do electron distributions with orbital degree of freedom exhibit anisotropy?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Advances	6. 最初と最後の頁 3192 ~ 3198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1MA01113H	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 Taguchi Hirokazu, Murakami Yuta, Koga Akihisa, Nasu Joji	4. 巻 104
2. 論文標題 Role of Majorana fermions in spin transport of anisotropic Kitaev model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.125139	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 Koyama Shinnosuke, Nasu Joji	4. 巻 104
2. 論文標題 Field-angle dependence of thermal Hall conductivity in a magnetically ordered Kitaev-Heisenberg system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.075121	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 Yokoi T., Ma S., Kasahara Y., Kasahara S., Shibauchi T., Kurita N., Tanaka H., Nasu J., Motome Y., Hickey C., Trebst S., Matsuda Y.	4. 巻 373
2. 論文標題 Half-integer quantized anomalous thermal Hall effect in the Kitaev material candidate -RuCl ₃	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 568-572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aay5551	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 Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Spin dynamics in the Kitaev model with disorder: Quantum Monte Carlo study of dynamical spin structure factor, magnetic susceptibility, and NMR relaxation rate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.035116	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 Koga Akihisa, Murakami Yuta, Nasu Joji	4. 巻 103
2. 論文標題 Majorana correlations in the Kitaev model with ordered-flux structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.214421	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 Minakawa Tetsuya, Murakami Yuta, Koga Akihisa, Nasu Joji	4. 巻 125
2. 論文標題 Majorana-Mediated Spin Transport in Kitaev Quantum Spin Liquids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 47204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.047204	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 Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Thermodynamic and transport properties in disordered Kitaev models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 54437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.054437	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 Yoshitake Junki, Nasu Joji, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Majorana-magnon crossover by a magnetic field in the Kitaev model: Continuous-time quantum Monte Carlo study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 100408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.100408	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 Wang Yiping, Osterhoudt Gavin B., Tian Yao, Lampen-Kelley Paige, Banerjee Arnab, Goldstein Thomas, Yan Jun, Knolle Johannes, Ji Huiwen, Cava Robert J., Nasu Joji, Motome Yukitoshi, Nagler Stephen E., Mandrus David, Burch Kenneth S.	4. 巻 5
2. 論文標題 The range of non-Kitaev terms and fractional particles in -RuCl_3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-020-0216-6	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 該当する

1. 著者名 Koga Akihisa, Minakawa Tetsuya, Murakami Yuta, Nasu Joji	4. 巻 89
2. 論文標題 Spin Transport in the Quantum Spin Liquid State in the $S = 1$ Kitaev Model: Role of the Fractionalized Quasiparticles	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 033701 ~ 033701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.033701	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 Nagai Yuya, Jinno Takaaki, Yoshitake Junki, Nasu Joji, Motome Yukitoshi, Itoh Masayuki, Shimizu Yasuhiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Two-step gap opening across the quantum critical point in the Kitaev honeycomb magnet ?RuCl3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 20414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.020414	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 Motome Yukitoshi, Nasu Joji	4. 巻 89
2. 論文標題 Hunting Majorana Fermions in Kitaev Magnets	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 012002 ~ 012002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.012002	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 Nasu Joji, Motome Yukitoshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Nonequilibrium Majorana dynamics by quenching a magnetic field in Kitaev spin liquids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.033007	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 Koga Akihisa, Nasu Joji	4. 巻 100
2. 論文標題 Residual entropy and spin fractionalizations in the mixed-spin Kitaev model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 100404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.100404	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 Kamogawa Yusuke, Nasu Joji, Koga Akihisa	4. 巻 99
2. 論文標題 Ferromagnetic instability for the single-band Hubbard model in the strong-coupling regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.235107	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 Tomishige Hiroyuki, Nasu Joji, Koga Akihisa	4. 巻 99
2. 論文標題 Low-temperature properties in the bilayer Kitaev model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.174424	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28件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 那須謙治
2. 発表標題 量子スピン液体における分数準粒子の時空間制御
3. 学会等名 日本物理学会, 2024年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小山慎之介, 那須謙治
2. 発表標題 モット絶縁体におけるマグノン間散乱を考慮した熱ホール伝導率の定式化
3. 学会等名 日本物理学会, 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原田千宏, 小野淳, 那須謙治
2. 発表標題 キタエフスピン液体におけるエネルギー緩和がもたらすバイゾン制御の安定化
3. 学会等名 日本物理学会, 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 那須謙治
2. 発表標題 量子多体系で現れる準粒子励起の緩和現象
3. 学会等名 若手理論交流研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小山慎之介, 那須謙治
2. 発表標題 トポロジカルマグノンの減衰を取り入れた熱ホール効果の評価
3. 学会等名 日本物理学会, 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 那須謙治
2. 発表標題 キタエフ系からみた量子スピン液体
3. 学会等名 日本物理学会, 第78回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田千宏, 小野淳, 那須謙治
2. 発表標題 Kitaev量子スピン液体におけるマヨラナゼロモードの時空間制御
3. 学会等名 日本物理学会, 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤康之, 那須謙治, 大久保毅, 三澤貴宏, 佐藤正寛, 求幸年
2. 発表標題 Kitaevスピン液体におけるスピンゼーベック効果
3. 学会等名 日本物理学会, 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Nasu
2. 発表標題 Propagation and manipulation of fractional quasiparticles in Kitaev spin liquids"
3. 学会等名 Workshop "Trends in Topological Materials Science and beyond" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Nasu
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics and spin transport caused by fractional quasiparticles in Kitaev spin liquids
3. 学会等名 11th International Conference on Highly Frustrated Magnetism 2022 (HFM22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Nasu and A. Koga
2. 発表標題 Low-energy and thermodynamic properties of spin-S Kitaev models
3. 学会等名 2022 American Physical Society, March Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Nasu
2. 発表標題 Finite-Temperature Spin Dynamics and Transport Phenomena in Kitaev Quantum Spin Liquids
3. 学会等名 2021 Winter Conference of the Korean Magnetics Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Koyama and J. Nasu
2. 発表標題 Field-angle dependence of thermal Hall conductivity in a magnetically ordered Kitaev-Heisenberg System
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2020 (SCES2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 那須謙治, 村上雄太, 古賀昌久
2. 発表標題 Kitaev量子スピン液体におけるスピン輸送のフラックス散乱
3. 学会等名 日本物理学会, 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 那須謙治
2. 発表標題 Kitaev量子スピン液体に対する乱れの効果
3. 学会等名 研究会「Kitaev量子スピン液体研究の新展開~マヨラナ励起の創出と制御によるトポロジカル量子計算の実現に向けて~」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 那須謙治
2. 発表標題 Majorana-mediated spin transport without spin polarization in quantum spin liquid
3. 学会等名 KPS fall meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福井毅勇, 加藤康之, 那須謙治, 求幸年
2. 発表標題 冷却極性分子系でのKitaev量子スピン液体の実現について: 汎関数繰り込み群による研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀昌久, 村上雄太, 那須謙治
2. 発表標題 Kitaev模型におけるマヨラナ相関
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大久保毅, 那須謙治, 三澤貴宏, 求幸年
2. 発表標題 キタエフ量子スピン液体の熱ホール伝導度に対する非対角相互作用の効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 皆川哲哉, 村上雄太, 古賀昌久, 那須謙治
2. 発表標題 キタエフ模型におけるスピン伝導
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 那須謙治, 求幸年
2. 発表標題 キタエフ量子スピン液体のダイナミクスに対する乱れの効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 皆川哲哉, 村上雄太, 古賀昌久, 那須謙治
2. 発表標題 非一様磁場中キタエフ模型の磁化の空間依存性2
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 那須謙治, 求幸年
2. 発表標題 Kitaev量子スピン液体に対する乱れの効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Nasu and Y. Motome
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics of Kitaev spin liquids with fractional Majorana excitations
3. 学会等名 International Conference on Topological Material Science 2019 (TopoMat2019), Kyoto University (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Nasu
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics in Kitaev spin liquids with fractional Majorana quasiparticles
3. 学会等名 The 3rd Asia-Pacific workshop on Quantum Magnetism, Tsung-Dao Lee Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Nasu
2. 発表標題 Magnetic-field effect and transport properties in Kitaev spin liquids
3. 学会等名 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (TPQM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Nasu and Y. Motome
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics induced by magnetic-field quench in Kitaev spin liquids with fractional Majorana excitations
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Nasu and Y. Motome
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics induced by magnetic-field quench in Kitaev spin liquids with fractional Majorana excitations
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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