

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01014

研究課題名（和文）強相関冷却原子気体を用いた開放量子多体系の実験的研究

研究課題名（英文）Experimental study on open quantum many-body systems using strongly correlated cold atoms

研究代表者

高須 洋介（Takasu, Yosuke）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50456844

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ボソン光格子系において、特異的な初期状態から光格子深さを急に浅くすること（クエンチ）で原子の光格子間のホッピングを引き起こし、そこからの原子の状態を観測した。この系では、共同研究者により、Hilbert space fragmentationにより、熱平衡化しないことが理論的に確認されている。さらに、多成分フェルミ原子気体に2体ロスを導入してスピン1重項状態の原子を選択的に系から取り除くことで、スピン3重項状態のみが残るディッケ状態の実験的生成とその観測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、光格子中のボース凝縮・またはフェルミ縮退領域まで冷却されたイッテルビウム(Yb)原子を用いて、制御された非平衡開放量子多体系の量子ダイナミクスを実験的に研究することで、これまでそれほど探究されなかった「制御された開放量子多体系」というフロンティアを開拓した。孤立量子系で行ってきた、研究代表者が遂行する実験的研究と研究分担者が遂行する理論的研究の一致を開放量子系でも目指し、新たな領域を開拓した。

研究成果の概要（英文）：We have observed the non-equilibrium dynamics of Bosonic atoms in an optical lattice system, in which hopping is induced by a sudden quench of the optical lattice depth from a isolated Mott state. In this system, it was theoretically confirmed by the collaborators that the system does not reach to a thermal equilibrium state due to Hilbert space fragmentation. Furthermore, by introducing a two-body loss into the multi-component Fermionic atoms and selectively removing atoms in the spin singlet state from the system, we have experimentally generated and observed Dicke states in which only the spin triplet state remains.

研究分野：原子物理学

キーワード：量子多体系 冷却原子 量子シミュレーション エンタングルメント 非平衡状態

## 1. 研究開始当初の背景

量子多体系では、厳密な計算が不可能であることから、量子多体系を解析するためにさまざまな近似的計算手法が開発されてきた。これまで、それらの近似法が正しいかどうかの検証は、主に原子が少数の場合に厳密計算と比較することによってなされてきた。しかし、もし十分制御性の高い量子多体系が存在すれば、その実験結果と近似法による結果を比較することで、より精度の高い検証が可能である。この手法は量子シミュレーションと呼ばれるものである。そのアイデア自体は Feynman により 40 年以上前に提唱されたが、その時点ではそのような制御性のよい量子系はなかった。近年になって、冷却原子気体、トラップされたイオン集団、超伝導回路などの制御性の高い量子系を、利用することができるようになった。現在はそれらを用いて活発に量子シミュレーションの研究が活発に行われている。

量子多体系を用いた実験結果と近似法による計算結果を比較する、量子シミュレーションとよばれる研究手法は、冷却原子などの孤立量子系を主な対象として定量的な実験と理論の一致を見た。この手法を開放量子系に拡大し定量的に比較することは可能だろうか？一般に、制御された開放量子多体系は、孤立量子多体系以上に厳密な理論的計算は実質的に困難である。まず、開放量子系は環境との相互作用を含むため、自由度が大きくなり、大規模な計算資源が要求される。また、開放量子系は多くの場合、粒子・エネルギーなどの流れがあり、定常状態ではない。非定常状態、つまり量子系の時間発展が本質的に伴う。一般的に、量子多体系の時間発展を長時間にわたって数値的に追跡することはエンタングルメントの増大のため困難だとされている。これは、万能な量子計算機には古典的計算機では能力的に計算できない領域があるだろうと推測されていることと同義である。

## 2. 研究の目的

本研究では光格子中の冷却原子系に制御された散逸を導入し、強相関冷却原子気体を用いた開放量子多体系での理論を実験的に検証することを目的とする。また、量子多体系の熱平衡化についての研究もその目的とする。すでに研究代表者(高須)と研究分担者(段下)は光格子の Yb 原子に対し、新たに開発した実験手法を用いて、孤立量子多体系の非局所相関の時間的・空間的な広がりを観測し、実験と理論の一致を見た。このような実験と理論の共同作業を制御された量子多体系に適用し、実験と理論の定量的比較を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、量子シミュレーションの手法を最大限に活用する。まず、理論的に計算が容易な実験系(例えば、少数系、厳密な理論計算が可能な 1 次元系など)を用意する。そこでの実験結果を理論計算による結果と比較し、実験装置が期待通りに動作していることを確認する。その後、理論的に計算が困難な実験系(量子多体系など)で実験を行う。実験系が、前述の計算が容易な実験系の自然な拡張(たとえば、1 次元を 2 次元にする、など)であれば、理論と実験結果を比較することが可能であり、理論計算のよいベンチマークとなる。

## 4 . 研究成果

### 1 . ディッケ状態の実験的生成とその観測

6成分フェルミ原子気体に2体ロスを導入してスピン1重項状態の原子を選択的に系から取り除くことで、スピン3重項状態のみが残るディッケ状態の実験的生成とその観測を行った。まず、2重井戸ポテンシャルに2つのフェルミ原子を捕獲する。この原子ペアは、スピン1重項とスピン3重項の2つの可能性がある。そこで、スピン1重項のみを選択的に系から除去する光会合を行ったのち、我々が独自に開発した隣接スピン相関を測定することで、スピン3重項のみが残ることを確認した。

さらに、2次元方向に強く閉じ込められ、残る1次元方向に比較的弱い光格子を導入した、1次元系を用意し、そこに1サイトに1粒子のフェルミ原子を捕獲する。そこにスピン1重項のみを選択的に系から除去する光会合を導入したところ、スピン3重項のみが残っていたことを確認した。こうして、ディッケ状態と呼ばれる系を実験的に生成することに成功した。これは、スピン状態が負の温度を持つ、非常に非平衡な状態であり、大変興味深い結果である。

### 2 . 特異的な初期状態からの量子ダイナミクス

光格子中において、あるサイトに2個、その隣は0個、その隣は2個というように、つまり( $\dots 0, 2, 0, 2, 0, \dots$ )という特異な初期状態(以下 $|2, 0\rangle$ 状態)を用意し、そこから光格子深さを急激に上げてサイト間ホッピングを可能にし(クエンチ)、系の時間発展を観測する非平衡ダイナミクスの実験的測定とその理論計算との比較を集中的に行った。共同研究者の段下らによる理論提案では、ヒルベルト空間の断片化(Hilbert Space Fragmentation)により、 $|2, 0\rangle$ 状態は熱平衡に達しないことが示されており、非常に興味深い非平衡ダイナミクスが期待される。実験結果を共同研究者の段下らによる数値シミュレーションと比較した。その結果は、実験と理論的計算がほぼ一致するという結果を得た。一方、トラップポテンシャルや原子密度の不均一性などが熱平衡化に大きな影響を与えるという新しい知見も得ることができた。また、 $|2, 0\rangle$ 状態からのクエンチと比較する目的で、光格子中において、あるサイトに1個、その隣は0個、その隣は1個というように、つまり( $\dots 0, 1, 0, 1, 0, \dots$ )という初期状態(以下 $|1, 0\rangle$ 状態)も用意して、そこからの非平衡ダイナミクスも測定した。この状態は熱平衡に達することが期待されるので、対照実験として最適である。これも実験と理論のよい一致を得ることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Ono Koki, Saito Yugo, Ishiyama Taiki, Higomoto Toshiya, Takano Tetsushi, Takasu Yosuke, Yamamoto Yasuhiro, Tanaka Minoru, Takahashi Yoshiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation of Nonlinearity of Generalized King Plot in the Search for New Boson	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 021033-1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.12.021033	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 Okuno Daichi, Nakamura Yuma, Kusano Toshi, Takasu Yosuke, Takei Nobuyuki, Konishi Hideki, Takahashi Yoshiro	4. 巻 91
2. 論文標題 High-resolution Spectroscopy and Single-photon Rydberg Excitation of Reconfigurable Ytterbium Atom Tweezer Arrays Utilizing a Metastable State	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 084301-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.084301	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 Taie Shintaro, Ibarra-Garcia-Padilla Eduardo, Nishizawa Naoki, Takasu Yosuke, Kuno Yoshihito, Wei Hao-Tian, Scalettar Richard T., Hazzard Kaden R. A., Takahashi Yoshiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Observation of antiferromagnetic correlations in an ultracold SU(N) Hubbard model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1356 ~ 1361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01725-6	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 Honda Kantaro, Taie Shintaro, Takasu Yosuke, Nishizawa Naoki, Nakagawa Masaya, Takahashi Yoshiro	4. 巻 130
2. 論文標題 Observation of the Sign Reversal of the Magnetic Correlation in a Driven-Dissipative Fermi Gas in Double Wells	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 063001-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.063001	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 Mikkelsen Mathias, Danshita Ippei	4. 巻 107
2. 論文標題 Relation between the noise correlations and the spin structure factor for Mott-insulating states in SU(N) Hubbard models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043313-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.043313	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 Kagamihara Daichi, Kaneko Ryui, Yamashika Shion, Sugiyama Kota, Yoshii Ryosuke, Tsuchiya Shunji, Danshita Ippei	4. 巻 107
2. 論文標題 Renyi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 033305-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.033305	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 Goto Shimpei, Kaneko Ryui, Danshita Ippei	4. 巻 107
2. 論文標題 Evaluating thermal expectation values by almost ideal sampling with Trotter gates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024307-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.024307	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 Mikkelsen Mathias, Kaneko Ryui, Kagamihara Daichi, Danshita Ippei	4. 巻 106
2. 論文標題 Resonant superfluidity in the Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 '043316-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.043316	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 Enomoto Katsunari, Takabatake Ryota, Suzuki Takehiro, Takasu Yosuke, Takahashi Yoshiro, Baba Masaaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Free-bound excitation and predissociation of ytterbium dimers near the 1S0-1P1 atomic transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 0313118-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.013118	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 Nagao Kazuma, Takasu Yosuke, Takahashi Yoshiro, Danshita Ippei	4. 巻 3
2. 論文標題 SU(3) truncated Wigner approximation for strongly interacting Bose gases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043091-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043091	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 Kaneko Ryui, Danshita Ippei	4. 巻 5
2. 論文標題 Tensor-network study of correlation-spreading dynamics in the two-dimensional Bose-Hubbard model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 65-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-022-00848-9	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 Machida Yoshihiro, Danshita Ippei, Yamamoto Daisuke, Kasamatsu Kenichi	4. 巻 105
2. 論文標題 Quantum droplet of a two-component Bose gas in an optical lattice near the Mott insulator transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 L031301-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.L031301	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 Asai Shiono, Goto Shimpei, Danshita Ippei	4. 巻 2022
2. 論文標題 Transition between vacuum and finite-density states in the infinite-dimensional Bose-Hubbard model with spatially inhomogeneous dissipation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033101-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac011	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 Kunimi Masaya, Danshita Ippei	4. 巻 104
2. 論文標題 Nonergodic dynamics of the one-dimensional Bose-Hubbard model with a trapping potential	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043322-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.043322	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 Goto Shimpei, Kaneko Ryui, Danshita Ippei	4. 巻 104
2. 論文標題 Matrix product state approach for a quantum system at finite temperatures using random phases and Trotter gates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045133-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045133	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 Kaneko Ryui, Douda Yoshihide, Goto Shimpei, Danshita Ippei	4. 巻 90
2. 論文標題 Reentrance of the Disordered Phase in the Antiferromagnetic Ising Model on a Square Lattice with Longitudinal and Transverse Magnetic Fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073001 ~ 073001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.073001	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37件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 本多寛太郎, 田家慎太郎, 高須洋介, 高橋義朗
2. 発表標題 SU(N) plaquette Fermi-Hubbard modelにおけるスピン相関の系統的測定
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名裕貴, 本多寛太郎, 高須洋介, 高橋義朗
2. 発表標題 光格子中3粒子エネルギー準位の散乱長依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 草野透志, 中村勇真, Christian Gnandt, 尾崎凌明, 奥野大地, 高須洋介, 小西秀樹, 高橋義朗
2. 発表標題 空間光変調器を用いた単一Yb原子の光ピンセットアレイトラップ
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高須洋介
2. 発表標題 冷却原子を用いた非平衡・非エルミート系の量子シミュレーション
3. 学会等名 第4回アトムの会（招待講演）
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 金子隆威、後藤慎平、段下一平
2. 発表標題 強い三体ロス項を持つBose-Hubbard模型における量子多体傷跡状態
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾一馬, 段下一平, 柚木清司
2. 発表標題 開放ボースハバード系における連続量子ゼノン効果の準古典的記述
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鏡原大地, 金子隆威, 山鹿汐音, 杉山康太, 吉井涼輔, 土屋俊二, 段下一平
2. 発表標題 自由Bose粒子系におけるRenyi エンタングルメントエントロピーの時間発展
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryui Kaneko and Ippei Danshita
2. 発表標題 Simulating correlation-spreading dynamics in the two-dimensional Bose-Hubbard model by the tensor-network method
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ryui Kaneko and Ippei Danshita
2. 発表標題 Efficient Sampling Scheme with Trotter Gates for Evaluating Thermal Expectation Values on Quantum Computers
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryui Kaneko and Ippei Danshita
2. 発表標題 Tensor-network simulations of correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum
3. 学会等名 The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daichi Kagamihara, Ryui Kaneko, Shion Yamashika, Kota Sugiyama, Ryosuke Yoshii, Shunji Tsuchiya, and Ippei Danshita
2. 発表標題 Time evolution of Renyi entanglement entropy of free bosons in an optical lattice
3. 学会等名 The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daich Kagamihara, Ryui Kaneko, Shion Yamashika, Kota Sugiyama, Ryosuke Yoshii, Shunji Tsuchiya, and Ippei Danshita
2. 発表標題 Renyi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryui Kaneko and Ippei Danshita
2. 発表標題 Simulating correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum many-body systems by the tensor-network method
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子隆威、後藤慎平、段下一平
2. 発表標題 テンソルネットワーク法によるブラケット格子上的SU(4) Heisenberg模型の基底状態探索
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mathias Mikkelsen and Ippei Danshita
2. 発表標題 Comparison between noise correlations and the spin-structure factor in SU(N) Hubbard models
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國見昌哉、段下一平
2. 発表標題 運動量空間のHilbert space fragmentationに由来する永久流状態
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Nakamura, Ryui Kaneko, and Ippei Danshita
2. 発表標題 Creating the Ising model with sign-inverted next-nearest-neighbor interaction by using Rydberg atoms
3. 学会等名 International Conference on Low Temperature Physics 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryui Kaneko, Ippei Danshita
2. 発表標題 Tensor-network study of correlation-spreading dynamics in twodimensional quantum many-body systems
3. 学会等名 International Conference on Low Temperature Physics 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mathias Mikkelsen, R. Kaneko, D. Kagamihara and I. Danshita
2. 発表標題 Resonant superfluidity in Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard model
3. 学会等名 Atomtronics@Benasque 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mathias Mikkelsen, Ryui Kaneko, Daichi Kagamihara, and Ippei Danshita
2. 発表標題 Resonant superfluidity in the Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard model
3. 学会等名 Ultracold Atoms Japan 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高須洋介
2. 発表標題 Quantum simulation using ultracold two electron atoms in an optical lattice: nonequilibrium dynamics and fermionic Hubbard model with SU(N) symmetry
3. 学会等名 Online School and Discussion Meeting on Trapped Atoms, Molecules and Ions (International Centre for Theoretical Science, Tata Institute of Fundamental Research) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高須洋介
2. 発表標題 Remote experimental control on web using ultracold Yb atoms
3. 学会等名 IEEE Quantum Week 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎本勝成, 高島涼汰, 鈴木雄大, 高須洋介, 高橋義朗, 馬場正昭
2. 発表標題 高温Yb蒸気の光会合による前期解離プロセスの解明
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 本多寛太郎, 田家慎太郎, 高須洋介, 春名裕貴, 西澤直樹, 高橋義朗
2. 発表標題 散逸下のフェルミハバードモデルにおけるスピン相関ダイナミクスの測定
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 小野滉貴, 肥後本隼也, 齋藤優冴, 石山泰樹, 高野哲至, 高須洋介, 山本康裕, 田中実, 高橋義朗
2. 発表標題 一般化King plotによる新粒子探索に向けたイッテルビウム原子の $1S_0$ - $3P_0$ 遷移同位体シフト測定
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 中村勇真, 奥野大地, 草野透志, 武井宣幸, 高須洋介, 高橋義朗
2. 発表標題 イッテルビウム原子のリドベルグ状態を用いた量子計算に向けた実験系の構築
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 奥野大地, 中村勇真, 草野透志, 武井宣幸, 高須洋介, 高橋義朗
2. 発表標題 イッテルビウム原子の準安定状態からのリドベルグ共鳴スペクトルの観測
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 田中実, 山本康裕, 小野滉貴, 肥後本隼也, 齋藤優冴, 石山泰樹, 高須洋介, 高野哲至, 高橋義朗
2. 発表標題 同位体シフトによる新物理探索における新展開
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 山下和也, 會澤直樹, 西澤晟, 武井宣幸, 高須洋介, 久野義人, 小澤知己, 高橋義朗
2. 発表標題 人工次元を用いたトポロジカル原子波レーザー
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村勇真, 奥野大地, 草野透志, 山本晃大, 小西秀樹, 高須洋介, 高橋義朗
2. 発表標題 リドベルグ量子計算に向けた単一イッテルピウム原子の内部状態制御
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 段下 一平
2. 発表標題 Comparison between optical-lattice quantum simulations and numerical simulations in quench dynamics of the Bose-Hubbard model
3. 学会等名 Workshop on Quantum Information Science with Cold Atoms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 隆威, 堂田 佳秀, 後藤 慎平, 段下 一平
2. 発表標題 正方格子縦横磁場反強磁性Ising模型の基底状態相図に現れるリエントラント
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 金子 隆威, 段下 一平
2. 発表標題 テンソルネットワーク法による2次元縦横磁場反強磁性Ising模型のクエンチダイナミクスの計算
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 鏡原大地, Mikkelsen Mathias, 金子隆威, 段下一平
2. 発表標題 Rabi結合とスピン依存ホッピングを持つ3次元引力Fermi-Hubbard模型における超流動相転移
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Mikkelsen, R. Kaneko, D. Kagamihara and I. Danshita
2. 発表標題 Resonant superfluidity in a Rabi-coupled spin-dependent
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子隆威, 段下一平
2. 発表標題 低次元縦横磁場反強磁性Ising模型における相関伝搬の群速度
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 後藤慎平, 金子 隆威, 段下 一平
2. 発表標題 ランダムサンプリングを用いたトレース評価の効率の改善とそのシステムサイズ依存性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yoshiro Hirayama (eds), Koji Ishibashi (eds), Kae Nemoto (eds)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 347
3. 書名 Hybrid Quantum Systems	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学大学院理学研究科物理学第一教室量子光学研究室  <a href="http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp">http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp</a>          近畿大学大学院総合理工学研究科理学専攻量子多体物理学研究室  <a href="https://danshita.com/">https://danshita.com/</a></p>
--

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	段下 一平  (Danshita Ippei)  (90586950)	近畿大学・理工学部・准教授   (34419)	

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