

令和 6 年 4 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13855

研究課題名（和文）2次元テンソルネットワーク手法を用いた量子多体系の実時間ダイナミクスの研究

研究課題名（英文）Two-dimensional tensor-network study of real-time dynamics in quantum many-body systems

研究代表者

金子 隆威 (Kaneko, Ryui)

早稲田大学・理工学術院・主任研究員

研究者番号：10881211

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来の数値計算手法では困難だった空間2次元の量子系の実時間ダイナミクスをprojected entangled pair state・テンソル積状態に基づくテンソルネットワーク法を用いて計算した。光格子中の冷却原子気体の実験でも実現可能な量子多体系のクエンチダイナミクスに着目し、様々な系で相関関数の時間・距離依存性を計算することで今後の実験に有用な参照データを与えた。また、厳密な量子情報の伝播速度の上限（Lieb-Robinson限界）が知られていない系でそれらの上限がどうふるまうのかを調べる目的で、相関伝播の群速度の相互作用依存性を詳細に調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、今後の光格子中の冷却原子気体や光ピンセット配列中のRydberg原子集団におけるダイナミクスの実験結果を理解する上で有用である。また、今回数値的に得られた相関伝播の群速度は、今後、厳密なLieb-Robinson限界を得る際の重要な足掛かりとなる。量子多体系の非平衡ダイナミクスを理解する上で、学術的意義が大きい。さらに、アナログ量子シミュレーションと相補的な、古典計算機上の数値シミュレーションの技術を高めることは、社会的に注目を集めている量子計算技術の進展にも役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we computed the real-time dynamics of two-dimensional quantum systems, which are challenging for conventional numerical methods, using the tensor network method based on the projected entangled pair state (PEPS). Focusing on the quench dynamics of quantum many-body systems achievable in experiments with ultracold atoms in optical lattices, we calculated the time and distance dependence of correlation functions in various systems, providing valuable reference data for future experiments. We also extensively investigated the interaction dependence of the group velocity of correlation propagation to examine the upper bounds of quantum information propagation speed, Lieb-Robinson bounds, whose exact values are unknown in quantum many-body systems for more than one spatial dimension in general.

研究分野：数理物理、物性基礎／磁性、超伝導、強相関系／半導体、光物性、原子物理

キーワード：テンソルネットワーク 量子多体系 非平衡系 冷却原子系 量子シミュレータ Rydberg原子 量子スピン系 時間発展

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

複数の自由度が互いに相互作用する量子多体問題を解くことは、物理学において不可欠な課題である。空間 1 次元系では、量子多体系の基底状態は数値的に厳密に求められる。その際、matrix product state (MPS)・行列積状態と呼ばれる変分試行関数が頻繁に使用される。この波動関数は平衡系だけでなく、非平衡系でも有力である。近年、冷却原子系で空間 1 次元の量子多体系の実時間ダイナミクスも実験できるようになったが、MPS の数値シミュレーションはその実験結果をよく再現する。

一方で、空間 2 次元以上の系の量子多体問題を解くことは難しい。空間次元が上がると計算コストも高くなる。空間 2 次元系では、何とか基底状態がうまく求まるときもある。その際、MPS を素直に高次元に拡張した projected entangled pair state・テンソル積状態がしばしば使用されるが、非平衡系への適用例はあまりなかった。

実験では、空間 2 次元以上の系の実時間ダイナミクスも測定できる。例えば、孤立系については冷却原子系を用いて、2 次元縦横磁場 Ising 模型や 2 次元と 3 次元の Bose-Hubbard 模型がシミュレーションできる。このような空間 2 次元以上の量子多体系の実時間ダイナミクスをどこまで予言できるかが重要な問題であるが、当時は、実験によるシミュレーションの妥当性を検証するための高精度な数値計算手法すらなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、主に空間 2 次元における量子多体系の孤立系の実時間ダイナミクスに焦点を当てる。この系の実時間発展を PEPS による 2 次元テンソルネットワーク法で計算した際、どれくらい長い時間まで精度よくシミュレーションできるのかを事例研究を通して確認する。これまで検証されてこなかった複雑な系に対してシミュレーションすることで非平衡系に特有な現象を探索および特徴付けし、(比較的短時間の実時間ダイナミクスについて) 実験への提案までを行うことが目的である。

### 3. 研究の方法

実時間発展とともにエンタングルメントが増大するため、テンソルネットワーク法を用いた非常に長時間のダイナミクスの計算は一般には不可能である。しかし、孤立系では、短時間のダイナミクスであればエンタングルメントはそこまで大きくないので、ボンド次元(状態に取り込むエンタングルメントを制御するパラメータ)を増やして波動関数の精度を上げていくことで徐々に計算できる時間領域を増やすことができる。比較的短時間の実時間発展を計算し、粒子の飛び移り(ホッピング)や相互作用のエネルギースケールの逆数の何倍程度の時間まで精度が担保されるかを検証する。具体的には、ボンド次元を大きくしたときの物理量の収束具合を見て、どの時刻まで計算できるかを判断する。急なクエンチをする場合は、エネルギーの保存具合も判断基準となる。

実時間発展のアルゴリズムは最も単純な time-evolving block decimation (TEBD) 型の simple update を用いる。平衡系で広く用いられているような状態の虚時間発展  $\exp(-H)$  を実時間発展  $\exp(-itH)$  に書き換えるだけで実行できる。どちらの時間発展も 2 サイトに作用する同じ形をした量子ゲートで書ける。

非平衡系では各ステップで更新された PEPS をそのまま用いて期待値計算できる。平衡系の基底状態探索(虚時間発展が数千から数万ステップ必要)に比べると最適化コストが低い。そこで、あらかじめ各時刻の PEPS を逐次計算で求めて保存しておき、その後、各時刻の期待値を独立に並列計算することで計算の効率化をはかる。計算コストはボンド次元  $D$  に対し、最適化が  $O(D^5)$ 、期待値計算が  $O(D^{10})$  である。実践的には、ボンド次元  $D=8$  のときシングルコアで最適化 1 ステップに数秒、期待値計算に数日かかる。この計算を、時刻数百ステップに対して行う。

## 4 . 研究成果

以下では、本研究の成果のうち、代表的なものを選択して網羅的に紹介する。

### (1) 2次元 Bose-Hubbard 模型のクエンチダイナミクスにおける相関伝播

冷却  $^{174}\text{Yb}$  原子を用いた 2次元 Bose-Hubbard 模型のアナログ量子シミュレータの実験に動機づけられて、Mott 絶縁体からのクエンチダイナミクスを計算した。ホッピングのエネルギースケールの逆数程度の時間までで得られた一粒子相関関数は実験結果と良く一致し、2次元テンソルネットワーク法の有用性が確認できた。まだ実験が行われておらず、既存の理論手法では太刀打ちできないパラメータ領域についても一粒子相関関数と密度相関関数を計算した。相関関数のピーク時間を距離の関数として求め、その外挿により得られた傾きから相関伝搬速度を見積もった。その結果、中間の強さの相互作用の領域における相関伝搬速度の振る舞いを明らかにした。今回得られた数値シミュレーション結果は、今後の実験の良いベンチマークとなる。この成果は論文として Communications Physics 誌に掲載された。

### (2) 1次元・2次元横磁場 Ising 模型のクエンチダイナミクスにおける相関伝播

Rydberg 原子集団のアナログ量子シミュレータの実験に動機づけられて、1次元および2次元横磁場 Ising 模型における無秩序相からのクエンチダイナミクスを計算した。まずは、1次元系において線形スピン波近似で縦および横スピン相関関数を計算し、この近似が厳密な群速度を再現するものの定量的な相関関数の記述には失敗することを確認した。次に、線形スピン波近の精度が上がる2次元系で同様に群速度を見積もった。2次元テンソルネットワーク法でもこれと整合する群速度が得られることを確認し、スピン波近似よりも正確な縦および横スピン相関関数の計算に成功した。この結果は今後の実験の良いベンチマークとなると期待され、論文として Physical Review A 誌に掲載された。

### (3) 自由ボゾン系で絶縁体からクエンチした際の Renyi エンタングルメントの厳密な時間発展

Bose-Hubbard 模型におけるクエンチダイナミクスのテンソルネットワーク法による計算結果と、この模型でクエンチ後の Renyi エンタングルメントが実験観測できることに動機づけられて、積状態を初期状態にして相互作用がない任意空間次元の模型で時間発展した場合の各時刻でのエンタングルメントの解析的な表式を求めた。先行研究の2倍程度の大きな系でもエンタングルメントを計算できることを数値的に示した。また、エンタングルメントが体積則を満たす条件を解析的に求めた。さらに、通常であれば計算にシステムサイズの指数時間かかるエンタングルメントを多項式時間で近似的に求める式も提唱した。この成果は Physical Review A 誌に掲載された。

### (4) Bose-Hubbard 模型のダイナミクスに現れる特異な量子現象（量子多体傷跡状態）の実験観測の提案

光格子中の冷却原子気体のダイナミクスの実験で特異な量子現象を観測する方法を提案した。Rydberg 原子集団のダイナミクスの実験で最初に観測された、非可積分系であるにもかかわらず熱平衡化が極めて遅い量子状態(量子多体傷跡状態)を三体ロスに強い Bose-Hubbard 系で実現できることを示し、それを断熱操作で実験的に用意する方法を提唱した。この成果は Physical Review A 誌に掲載された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogino Takuhiro, Kaneko Ryui, Morita Satoshi, Furukawa Shunsuke	4. 巻 106
2. 論文標題 Ground-state phase diagram of a spin-1/2 frustrated XXZ ladder	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.155106	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 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 43316
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 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 24307
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 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 33305
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 73001
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 -

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 45133
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 Ogino Takuhiro, Furukawa Shunsuke, Kaneko Ryui, Morita Satoshi, Kawashima Naoki	4. 巻 104
2. 論文標題 Symmetry-protected topological phases and competing orders in a spin-12 XXZ ladder with a four-spin interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.075135	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 Kohshiro Hidehiko, Kaneko Ryui, Morita Satoshi, Katsura Hoshio, Kawashima Naoki	4. 巻 104
2. 論文標題 Multiple magnetization plateaus induced by farther neighbor interactions in an S=1 two-leg Heisenberg spin ladder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.214409	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, 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
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 Kaneko Ryui, Danshita Ippei	4. 巻 108
2. 論文標題 Dynamics of correlation spreading in low-dimensional transverse-field Ising models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.108.023301	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, Kunimi Masaya, Danshita Ippei	4. 巻 109
2. 論文標題 Quantum many-body scars in the Bose-Hubbard model with a three-body constraint	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 L011301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.109.L011301	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39件(うち招待講演 0件/うち国際学会 14件)

1. 発表者名 荻野 卓啓、金子 隆威、森田 悟史、古川 俊輔
2. 発表標題 スピン1/2フラストレートXXZ梯子の基底状態相図II
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 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の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 R. Kaneko and I. Danshita
2. 発表標題 Tensor-network simulations of correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum many-body systems
3. 学会等名 The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration 第1回領域若手研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Goto, R. Kaneko, and I. Danshita
2. 発表標題 Improving Sampling Efficiency of Quantum Computation of Many-body Systems at Finite Temperatures by Ergodic Dynamics
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nakamura, R. Kaneko, and I. 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 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会)
4. 発表年 2022年

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

1. 発表者名 R. Kaneko and I. 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 (NQS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Goto, R. Kaneko, and I. 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 R. Kaneko and I. 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 金子 隆威、國見 昌哉、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 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 金子 隆威
2. 発表標題 テンソルネットワーク法による2次元冷却原子系の実時間ダイナミクス計算
3. 学会等名 理論研究会：量子多体系の相形成とダイナミクス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 隆威
2. 発表標題 テンソルネットワーク法による2次元冷却原子系の相関伝搬ダイナミクスの数値計算
3. 学会等名 第3回冷却原子研究会「アトムの会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 萩野 卓啓、金子 隆威、森田 悟史、古川 俊輔
2. 発表標題 スピン1/2フラストレートXXZ梯子の基底状態相図
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 幸城 秀彦、金子 隆威、森田 悟史、桂 法称、川島 直輝
2. 発表標題 多重磁化プラトーを実現するフラストレートスピンラダー系の厳密解
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、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無秩序相のリエントラント
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 Ryui Kaneko
2. 発表標題 Tensor-network study of correlation-spreading dynamics in two-dimensional systems
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 (国際学会)
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 2022年春季大会
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 2022年春季大会
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 a Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard chain
3. 学会等名 日本物理学会 2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鏡原 大地、Mathias Mikkelsen、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 2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 優希、金子 隆威、段下 一平
2. 発表標題 符号反転した次近接相互作用を持つIsing模型で記述されるRydberg原子集団
3. 学会等名 日本物理学会 2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 I. Danshita, R. Kaneko
2. 発表標題 Dynamics of correlation spreading after a quantum quench in low-dimensional transverse-field Ising models
3. 学会等名 DAMOP Annual Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kaneko
2. 発表標題 Simulating the time evolution of isolated quantum many-body systems using infinite projected entangled pair states
3. 学会等名 Advanced Study Group: Tensor Network Approaches to Many-Body Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子隆威
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の実験観測の提案
3. 学会等名 第5回冷却原子研究会「アトムの会」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Kagamihara, R. Kaneko, S. Yamashika, K. Sugiyama, R. Yoshii, S. Tsuchiya, I. Danshita
2. 発表標題 Quench dynamics of Renyi entanglement entropy of free bosons starting from insulating states
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kaneko, I. Danshita
2. 発表標題 Tensor-network analysis of correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum many-body systems
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (Statphys28) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鏡原 大地, 金子 隆威, 望月 健, 段下 一平
2. 発表標題 非エルミート開放系のボソンサンプリングダイナミクスの古典シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会 2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子 隆威, 國見 昌哉, 段下 一平
2. 発表標題 Bose-Hubbard系における量子多体傷跡状態の実験観測の提案
3. 学会等名 日本物理学会 2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 I. Danshita, R. Kaneko, M. Kunimi
2. 発表標題 Quantum many-body scars of the Bose-Hubbard model with strong three-body losses
3. 学会等名 Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity 2023 (QIMG2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子 隆威, 樺島 祥介, 今田 正俊, 大槻 東巳
2. 発表標題 機械学習手法による量子多体系の長時間の時間発展予測
3. 学会等名 第17回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kaneko, M. Kunimi, I. Danshita
2. 発表標題 Proposal for realizing quantum many-body scars in a Bose-Hubbard system
3. 学会等名 The 2nd young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration 第2回領域若手研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kaneko, M. Kunimi, I. Danshita
2. 発表標題 Quantum many-body scars in the Bose-Hubbard model with strong three-body losses
3. 学会等名 APS March Meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 金子 隆威, 樺島 祥介, 大槻 東巳, 今田 正俊
2. 発表標題 動的モード分解法を用いた量子多体系の実時間発展の長時間予測
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 鏡原 大地, 金子 隆威, 段下 一平
2. 発表標題 自由Bose粒子系におけるvon Neumann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 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Gekko Budiutama, 大門 俊介, 西 紘史, 金子 隆威, 大槻 東巳, 松下 雄一郎
2. 発表標題 量子畳み込みニューラルネットワークのチャンネル注意機構の提案
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 Gekko Budiutama, 大門 俊介, 西 紘史, 金子 隆威, 大槻 東巳, 松下 雄一郎
2. 発表標題 量子相認識に向けた量子畳み込みニューラルネットワークのチャンネル注意機構の提案
3. 学会等名 応用物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 G. Budiutama, H. Nishi, R. Kaneko, S. Daimon, T. Ohtsuki, Y-i. Matsushita
2. 発表標題 Proposal of Channel Attention for Quantum Convolutional Neural Networks
3. 学会等名 SQAI-NCTS Workshop on Tensor Network and Quantum Embedding (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Ryui KANEKO's website <a href="https://sites.google.com/site/ryuikanekoswebsite/home">https://sites.google.com/site/ryuikanekoswebsite/home</a> researchmap <a href="https://researchmap.jp/ryuikaneko">https://researchmap.jp/ryuikaneko</a>
--

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