

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03492

研究課題名（和文）ホログラフィー原理と光格子中の冷却気体の協奏による量子重力実現の提案

研究課題名（英文）Proposal for realizing quantum gravity by means of the holographic principle and an optical lattice loaded with ultracold gases

研究代表者

段下 一平（Danshita, Ippei）

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：90586950

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ある量子多体系が量子重力理論とホログラフィー的な意味での双対を持つことを判定する方法の一つとして、量子ダイナミクスにおけるカオスの性質を特徴付ける量子的リヤプノフ指数の温度依存性を調べることが有効であると予想されている。本研究では、量子多体系の有限温度ダイナミクスを厳密に数値計算するための行列積状態を用いた手法の計算効率を大幅に改善することに成功した。また、量子重力理論と双対になる平坦バンド中のフェルミ気体の生成に利用できる、幾何学的フラストレーションと負の絶対温度を持つ量子縮退気体の生成方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した数値計算手法や幾何学的フラストレーションと負の絶対温度を持つ気体の生成方法は量子多体系の様々な問題に応用可能であるという意味で、学術的に意義深い。特に、空間次元に限られるとはいえ、有限温度の量子多体系の厳密な数値計算は、冷却気体や量子磁性体などの伝統的な物性系に加えて、イオントラップや超電導回路などの量子コンピュータへの応用が期待されている系などの広い適用先が考えられる。

研究成果の概要（英文）：It is conjectured that investigating the temperature dependence of the quantum Lyapunov exponent, which characterizes the chaotic nature of quantum dynamics, is useful for judging whether or not a quantum many-body system is a holographically dual to a quantum gravity system. In this study, we have improved the numerical efficiency of methods based on the use of matrix product states for computing quantum many-body systems at finite temperatures. Moreover, we have proposed a way for creating quantum-degenerate gases at negative absolute temperatures with a geometric frustration, which may be used for realizing a Fermi gas on a flat band that is conjectured to be dual to a quantum gravity system.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：冷却気体 光格子 量子多体系

1. 研究開始当初の背景

1974年に Hawking はブラックホールの事象の地平面近傍の量子効果を考え、ブラックホールがある温度の黒体輻射をしていることを予言した。この Hawking 輻射に伴う情報喪失パラドックスは長年未解決の問題であり、その解決を目的の一つとして、重力の量子論に関する膨大な量の理論研究がこれまでに進められてきている。このように理論面から重要な問題であるため、実験・観測研究に対する高い需要が存在する。ホーキング輻射の観測対象の候補の一つとして、宇宙創生初期にできた原始ブラックホールが指摘されているが、現在までその存在は確認されていない。また、大きな余剰次元を持つ量子重力モデルではプランク質量が TeV スケールであることを想定しており、このモデルを前提とすれば CERN LHC で微小な量子ブラックホールが生成できる可能性があるが、現在まで観測されていない。

2. 研究の目的

ホログラフィー原理によれば、ブラックホールとそれを記述する量子重力理論が空間次元の一つ低いある種の量子ゲージ理論(重力を含まない)と等価である。ホログラフィー原理の具体的な枠組みとして、「AdS 時空上の量子重力理論が、その境界上の CFT と等価である」という AdS/CFT 対応がよく知られている。例えば、このように量子重力理論と等価である量子多体系として、Sachdev-Ye-Kitaev 模型が研究開始当初の時期に注目を集めていた。このような量子重力モデルと等価な量子多体系モデルを実現すれば量子重力理論を実験で調べられるようになる。このことを念頭に、研究開始当初までの研究で、研究代表者らは光格子中の冷却気体を用いて Sachdev-Ye-Kitaev 模型の実現方法を考えたが、原理的に可能な方法の提案までは漕ぎ着けたものの、現実的な実験系での実現は困難であると結論づけた。本研究の目的は、光格子中に閉じ込めた極低温の量子気体を用いて、量子重力理論とホログラフィー的な意味で双対である量子多体系を実験で実現するより現実的な方法を提案することである。

3. 研究の方法

ある量子多体系がそのような双対を持つことを判定する方法の一つとして、量子ダイナミクスにおけるカオスの性質を特徴付ける量子的リアプノフ指数の温度依存性を調べることが有効であると予想されている。しかしながら、大きいサイズの量子多体系のダイナミクスを有限温度で正確に記述できる数値計算手法は非常に限られている。そこで、行列積状態を用いて空間一次元の量子多体系の有限温度ダイナミクスを厳密に計算する手法を発展させることを目指した。また、行列積状態が適用できない空間高次元系の場合を解析する手法として切断 Wigner 近似に注目し、量子的リアプノフ指数の計算のためのセットアップであるクエンチダイナミクスの計算にこの手法の適用を試みた。最近の研究で、この平坦バンド中のフェルミ気体にランダムポテンシャルを加えた系が量子重力理論と双対になるという提案があった。カゴメ型の光格子において、3つのバンドのうちの一つが平坦バンドとなることが知られている。しかしながら、通常のフェルミ気体ではカゴメ格子の平坦バンドは励起バンドであるため、平坦バンドのみに粒子を閉じ込めておくことはできない。そこで、負の絶対温度を持つ気体を用いて励起バンドに安定に粒子を閉じ込める方法を提案することを目指した。

4. 研究成果

数値計算手法開発に関しては、行列積状態を用いて空間一次元の量子多体系の有限温度ダイナミクスを厳密に計算する手法である minimally entangled typical thermal states (METTS) アルゴリズムの計算効率を大幅に改善することに成功した。具体的には、マルコフ連鎖型モンテカルロサンプリングにおけるサンプル間の強い相関がこの手法の計算効率を著しく下げる要因であったところ、アルゴリズムの途中に複数の Trotter ゲートを挿入することでこの相関を劇的に軽減することに成功した。

切断 Wigner 近似法のクエンチダイナミクスへの応用に関しては、切断 Wigner 近似法が強相関領域で量子ダイナミクスを定量的に記述しうるかを明らかにするために、光格子中のボース気体のクエンチダイナミクスに関して、実験との詳細な比較を行なった。まず、強相関領域のモット絶縁体を初期状態として弱相関領域へクエンチした場合、ホッピング時間の数倍程度の範囲で Gross-Pitaevskii (GP) 型の切断ウィグナー近似法が定量的に量子ダイナミクスを記述できることを明らかにした。一方、同じ初期状態から強相関領域へクエンチした場合は、同じ手法が定量的性を失うことも明らかになった。

そこで、強相関領域のクエンチダイナミクスを扱うために $SU(2)$ もしくは $SU(3)$ 切断 Wigner 近似の性能検証を行い、それぞれの手法が定量的になるパラメータ領域を明らかにした。

$SU(3)$ 切断 Wigner 近似法に関しては、Bose-Hubbard 模型のクエンチダイナミクス (Mott 絶縁体を初期状態として量子相転移の起こるパラメータ領域近傍にクエンチする) の計算を実行し、上記の実験および小さい系の厳密対角化による結果との詳細な比較からその定量性を検証した。その結果、GP 型の切断 Wigner 近似に比べて定量的に計算できる時間スケールが倍程度に伸びることがわかった。しかしながら、その時間スケールがリャプノフ指数などの意義深い物理量を相関関数から抽出するには不十分であることもわかった。そのためにはクラスター化などのさらなる手法の改良が必要である。

$SU(2)$ 切断 Wigner 近似法に関しては、Bogoliubov-Born-Green-Kirkwood-Yvon 階層方程式を用いて量子揺らぎの高次補正を取り込む拡張を行い、 $SU(2)$ 切断 Wigner 近似法とその拡張版を比較することで前者の定量性を検証した。具体的には階段関数型の長距離相互作用を持つ量子 Ising 模型、XY 模型、Heisenberg 模型の 3 つについてクエンチダイナミクスを調べた。結果として、全ての模型で長距離相互作用の範囲が増大するに従って $SU(2)$ 切断 Wigner 近似法が定量的である時間スケールが冪的に増大することが明らかになった。

励起バンドに安定に粒子を閉じ込める方法に関しては、まず三角光格子の系を例として負の絶対温度を持つ気体を用いる方法がうまくいくことを示した。具体的には、ほぼ 100% Bose 凝縮した超流動状態を初期状態にとり、位相焼き付け法で超流動秩序変数の位相を 120 度構造に調整する。その直後に Feshbach 共鳴で相互作用を引力にし、その大きさを最適化する。それから光格子を断熱的に深くすることで強相関領域に到達させる。この手順を踏んだ際の Bose 気体のダイナミクスを Gutzwiller 近似法で計算し、超流動から Mott 絶縁体への量子相転移が起こるところまで負の絶対温度を持つ気体が安定であることを示した。今後の実験研究に対するベンチマークとして、サイトスケーリングと組み合わせたクラスター平均場近似法を用いて、フラストレートしたホッピング項を持つ Bose-Hubbard 模型の超流動体から Mott 絶縁体への量子相転移点を精密に与えた。続いて、平坦バンドを持つカゴメ型の光格子の系でも同様の方法で励起バンドに安定に粒子を閉じ込めておけることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Daisuke Yamamoto, Takeshi Fukuhara, Ippei Danshita	4. 巻 3
2. 論文標題 Frustrated Quantum Magnetism with Bose Gases in Triangular Optical Lattices at Negative Absolute Temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 56(1-10)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-020-0323-5	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 Masaya Kunimi, Ippei Danshita	4. 巻 100
2. 論文標題 Nonequilibrium steady states of Bose-Einstein condensates with a local particle loss in double potential barriers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063617(1-13)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.100.063617	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, Danshita Ippei	4. 巻 123
2. 論文標題 Quasiexact Kondo Dynamics of Fermionic Alkaline-Earth-Like Atoms at Finite Temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 143002(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.123.143002	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 Yamamoto Daisuke, Marmorini Giacomo, Tabata Masahiro, Sakakura Kazuki, Danshita Ippei	4. 巻 100
2. 論文標題 Magnetism driven by the interplay of fluctuations and frustration in the easy-axis triangular XXZ model with transverse fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140410(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.140410	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 99
2. 論文標題 Decay mechanisms of superflow of Bose-Einstein condensates in ring traps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043613(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.043613	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 Nagao Kazuma, Takahashi Yoshiro, Danshita Ippei	4. 巻 97
2. 論文標題 Response of the Higgs amplitude mode of superfluid Bose gases in a three-dimensional optical lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.97.043628	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 Yoshida Tsuneya, Danshita Ippei, Peters Robert, Kawakami Norio	4. 巻 121
2. 論文標題 Reduction of Topological Z Classification in Cold-Atom Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 25301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.025301	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 Nagao Kazuma, Kunimi Masaya, Takasu Yosuke, Takahashi Yoshiro, Danshita Ippei	4. 巻 99
2. 論文標題 Semiclassical quench dynamics of Bose gases in optical lattices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.99.023622	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, Danshita Ippei	4. 巻 99
2. 論文標題 Performance of the time-dependent variational principle for matrix product states in the long-time evolution of a pure state	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 54307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.054307	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 段下一平、花田政範、手塚真樹	4. 巻 73
2. 論文標題 Sachdev-Ye-Kitaev模型, ブラックホール, 冷却気体系	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 569-574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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, Nagao Kazuma, Goto Shimpei, Danshita Ippei	4. 巻 3
2. 論文標題 Performance evaluation of the discrete truncated Wigner approximation for quench dynamics of quantum spin systems with long-range interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013060	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 Goto Shimpei, Danshita Ippei	4. 巻 2
2. 論文標題 Minimally entangled typical thermal states algorithm with Trotter gates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043236	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 Takasu Yosuke, Yagami Tomoya, Asaka Hiroto, Fukushima Yoshiaki, Nagao Kazuma, Goto Shimpei, Danshita Ippei, Takahashi Yoshiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Energy redistribution and spatiotemporal evolution of correlations after a sudden quench of the Bose-Hubbard model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaba9255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aba9255	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 Goto Shimpei, Danshita Ippei	4. 巻 102
2. 論文標題 Measurement-induced transitions of the entanglement scaling law in ultracold gases with controllable dissipation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 33316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.033316	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 Ozaki Yusuke, Nagao Kazuma, Danshita Ippei, Kasamatsu Kenichi	4. 巻 2
2. 論文標題 Semiclassical dynamics of a dark soliton in a one-dimensional bosonic superfluid in an optical lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033272	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

〔学会発表〕 計44件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Yusuke Ozaki, Kazuma Nagao, Ippei Danshita, Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Instability of a dark soliton by quantum fluctuations in a one-dimensional Bose gas in an optical lattice
3. 学会等名 EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Koki Ono, Shunya Higomoto, Ippei Danshita, Yoshiro Takahashi
2. 発表標題 Towards quantum simulation of Kondo effects with ultracold alkali-earth-like Fermi gases
3. 学会等名 EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ozaki, Kazuma Nagao, Ippei Danshita, Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Instability of a dark soliton by quantum fluctuations in a one-dimensional lattice Bose gas
3. 学会等名 The 4th Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ippei Danshita
2. 発表標題 Kondo dynamics in ultracold alkali-earth-like atoms at finite temperatures
3. 学会等名 The 4th Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ippei Danshita
2. 発表標題 Kondo Transport of Two-Orbital Fermi gases
3. 学会等名 The 28th Annual International Laser Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ozaki, Kazuma Nagao, Ippei Danshita, Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Semi-classical dynamics of a dark soliton in a one-dimensional lattice Bose gas
3. 学会等名 The 28th Annual International Laser Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ippei Danshita
2. 発表標題 Kondo transport dynamics of alkaline-earth-like atoms at finite temperatures
3. 学会等名 The 5th Conference on Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ippei Danshita
2. 発表標題 Accurate real-time dynamics of the Kondo impurity model at finite temperatures
3. 学会等名 Emergent phenomena in ultracold atoms: merging topology, interaction, and dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ippei Danshita
2. 発表標題 Finite Temperature Dynamics of the Kondo Model in Ultracold Alkaline-Earth Atoms
3. 学会等名 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ippei Danshita
2. 発表標題 Diagnosing Kondo Effects of Fermionic Alkaline-earth Atoms through a Dipole Oscillation
3. 学会等名 Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaya Kunimi, Ippei Danshita
2. 発表標題 Bistability of Bose-Einstein Condensates with a Local Loss Term and Pinning Potentials
3. 学会等名 Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ozaki, Kazuma Nagao, Ippei Danshita, Kenichi Kasamatsu
2. 発表標題 Semi-classical Dynamics of a Dark Soliton in One-dimensional Bose Gases in an Optical Lattice
3. 学会等名 Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤慎平, 段下一平
2. 発表標題 冷却気体系における体積則状態と面積則状態の間の観測誘起型転移
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤慎平, 段下一平, 小野滉貴, 天野良樹, 肥後本隼也, 高橋義朗
2. 発表標題 光格子中における遍歴1S0原子・局在3P0原子間スピン交換ダイナミクスのモデル化と数値シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ippei Danshita
2. 発表標題 Far-from-equilibrium dynamics of the Bose-Hubbard model: Quantum and classical simulations
3. 学会等名 2018 International Workshop on Quantum Information, Quantum Computing and Quantum Control (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ippei Danshita
2. 発表標題 Quench Dynamics of the Bose-Hubbard Model: Digital Classical Simulation versus Analog Quantum Simulation
3. 学会等名 The 3rd Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 段下一平
2. 発表標題 光格子中のフェルミ気体における強相関効果: SYK模型と近藤効果
3. 学会等名 量子多体系の素核・物性クロスオーバー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國見昌哉、段下一平
2. 発表標題 冷却原子系における超流動流に対する粒子ロスの効果
3. 学会等名 超流動 ^3He およびスピノールBECにおけるトポロジカル相・励起（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 國見昌哉、段下一平
2. 発表標題 局所粒子数ロスを有するBose-Einstein凝縮体のピン留めポテンシャル誘起の双安定性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 國見昌哉、段下一平
2. 発表標題 局所粒子数ロスが誘起する超流動流の安定性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 國見昌哉、段下一平
2. 発表標題 冷却原子系における有限温度超流動体の超流動流の減衰
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 國見昌哉、段下一平
2. 発表標題 局所粒子数ロスを有するボース凝縮体の双安定性
3. 学会等名 非平衡系の物理学－階層性と普遍性－
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Kunimi, Ippei Danshita
2. 発表標題 Can the truncated-Wigner approximation correctly describe thermal and quantum phase slips in one-dimensional Bose gases?
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾一馬、高須洋介、高橋義朗、段下一平
2. 発表標題 強相関ボース気体における空間相関の伝搬に対するSU(3)Truncated-Wigner近似
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾一馬、國見昌哉、高須洋介、高橋義朗、段下一平
2. 発表標題 ボース・ハバード系における量子相転移をまたぐ急峻なクエンチ後の空間相関の準古典的伝搬
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾一馬、高須洋介、高橋義朗、段下一平
2. 発表標題 SU(3)-discrete truncated-Wigner近似の開発と冷却原子系への応用
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤慎平、段下一平
2. 発表標題 冷却原子系の近藤効果：行列積状態による有限温度ダイナミクスのシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤慎平、段下一平
2. 発表標題 時間依存変分原理を行列積状態の時間発展とその長時間ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ippei Danshita
2. 発表標題 Kondo Dynamics in Fermionic Alkaline-Earth Atoms at Finite Temperatures
3. 学会等名 Quantum Phases of Fermions in Optical Lattices: The Low-Temperature Frontier (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimpei Goto, Ippei Danshita
2. 発表標題 Cooling schemes for two-component fermions in bilayer optical lattices
3. 学会等名 C3QS: Coherent Control of Complex Quantum Systems 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤慎平、段下一平
2. 発表標題 冷却アルカリ土類原子系の有限温度近藤ダイナミクス
3. 学会等名 スピン系物理の最前線
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Ozaki, Daisuke Yamamoto, and Ippei Danshita
2. 発表標題 Semiclassical analysis of frustrated Bose gases in optical kagome lattices
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤慎平, 金子隆威, 段下一平
2. 発表標題 ランダム行列積状態を用いた有限温度量子多体系の数値解析手法: エンタングルメントによるサンプリング効率の改善
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 段下一平
2. 発表標題 光格子中のアルカリ土類型原子気体における近藤効果の実時間ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井詩緒乃, 後藤慎平, 段下一平
2. 発表標題 光格子中のBose気体の超流動状態に対する局所的な散逸の効果
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 國見昌哉, 段下一平
2. 発表標題 1次元Bose-Hubbard模型の非エルゴード的ダイナミクスに対する閉じ込めポテンシャルの効果
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 金子隆威, 段下一平
2. 発表標題 二次元冷却原子系の相関伝搬ダイナミクス：テンソルネットワーク法による解析
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 段下一平, 後藤慎平, 横井真理
2. 発表標題 光格子中の二軌道Bose気体における遍歴粒子の超流動流の臨界運動量
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 尾崎裕介, 山本大輔, 段下一平
2. 発表標題 カゴメ光格子中のフラストレートBose原子気体の準古典解析II
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 町田佳央, 段下一平, 山本大輔, 笠松健一
2. 発表標題 Mott絶縁体転移近傍の光格子中の2成分Bose粒子系における超流動液滴状態
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 後藤慎平, 段下一平
2. 発表標題 最小エンタングルメント典型熱状態アルゴリズムにおける自己相関問題のTrotterゲートを用いた解消法
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤慎平, 段下一平
2. 発表標題 散逸Bose-Hubbard模型における観測誘起臨界状態の同定方法
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎裕介, 山本大輔, 段下一平
2. 発表標題 カゴメ光格子中のフラストレートBose原子気体の準古典解析
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 段下一平
2. 発表標題 Bose-Hubbard模型の量子クエンチ後の非平衡ダイナミクスに関する量子シミュレーションと数値計算の比較
3. 学会等名 物性研究所短期研究会「量子多体計算と第一原理計算の新展開」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>冷却原子を用いた量子多体ダイナミクスの量子シミュレーション 非局所相関の伝搬の観測とエネルギー保存則の検証に成功 https://newscast.jp/news/3222759 フラストレートした量子磁性体の量子シミュレーション方法を提唱 https://newscast.jp/news/492879 「近藤効果」の厳密な計算機シミュレーションに成功 https://newscast.jp/news/863714</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
--	---------------------------	-----------------------	----

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	Universitat Hamburg			