

量子多体物理学研究室

段下 一平 (准教授)
金子 隆威 (PD)、鏡原 大地 (PD)
Mikkelsen, Mathias (PD)
修士 2 名 学部生 5 名

研究の概要

● 量子多体系の数値計算手法の開発

量子多体系を厳密対角化法で解析すると、数値計算のコストが系のサイズに対して指数関数的に増大する。そのため、多くの場合現実的な実験と対応する結果を得るためには、より効率的な計算手法が必要である。二分割エンタングルメントエントロピー (EE) は量子的な純粋状態の二つの部分がどれくらいエンタングルしているかを定量化する尺度である。EE の具体的な形式としてフォンノイマン型のそれが理論的に様々な良い性質を持っているためよく用いられるが、観測が難しいというデメリットもある。一方、Rényi EE はフォンノイマン EE の下限値を与える量で、二次の Rényi EE は冷却 Bose 気体系の実験で観測されている。本研究では、光格子中の自由 Bose 気体において、二次の Rényi EE を比較的効率よく計算する方法を新たに開発した。具体的には、冷却気体実験でこの量を測定する手順をまねすることで、大きいサイズの系の数値計算に適した解析的表式を二次の Rényi EE に対して与えることができた。今回の手法のデモンストレーションとして、二次の Rényi EE の長時間ダイナミクスを計算し、熱平衡化の検証をした。

昨年度の研究で、random-phase matrix product states with trotter gates (RPMPS+T) という行列積状態を用いて有限温度の量子状態を効率よく記述する数値計算手法を開発した。今年度の研究で、RPMPS+T をさらに発展させることで、量子コンピュータを用いて有限温度の量子状態をシミュレーションする新たな手法を提案した。

● 光格子中の冷却気体の物性

光格子中の冷却気体系からなるアナログ量子シミュレータは非常に制御性と清浄性が高いため、新奇な量子多体现象の発見に有用である。光格子中の 2 成分 Fermi 気体において、成分間にラビ結合があり、ホッピングが成分に依存する場合を考える。そのような状況は状態依存する光格子中の Yb 原子気体系で実現され、注目を集めている。密度行列繰り込み群法と有効模型に対する解析的考察を用いて、ラビ結合とスピン依存ホッピングを持つ Fermi-Hubbard 模型を解析し、空間一次元におけるこの系の基底状態相図を描いた。特に一方の成

分のホッピングがゼロで超流動性が一般的には抑制されている場合に焦点を当て、ラビ結合の強さを変化させたときに超流動性が共鳴的に増進されるパラメータ領域を発見した。

学術論文（査読付）

1. “Rényi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system”
D. Kagamihara, R. Kaneko, Shion Yamashika, Kota Sugiyama, Ryosuke Yoshii, Shunji Tsuchiya, and I. Danshita
Physical Review A, 107, 033305-1-14
DOI:10.1103/PhysRevA.107.033305
2. “Evaluating thermal expectation values by almost ideal sampling with Trotter gates”
Shimpei Goto, R. Kaneko, and I. Danshita
Physical Review B, 107, 024307-1-7
DOI:10.1103/PhysRevB.107.024307
3. “Resonant superfluidity in the Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard model”
M. Mikkelsen, R. Kaneko, D. Kagamihara, and I. Danshita
Physical Review A, 106, 043316-1-10
DOI:10.1103/PhysRevA.106.043316

学士論文

- 「ガウス型ポテンシャル障壁に対する Bogoliubov 励起の異常トンネル効果の数値解析に向けて」
- 「拡張 Bose-Hubbard 模型における古典カオスの数値解析」
- 「2成分 Bose-Hubbard 模型における相対論的量子液滴」
- 「厳密対角化を用いた Efimov 効果の数値的研究に向けて」
- 「ラビ結合とスピン依存ホッピングを持つ Fermi-Hubbard 模型における超流動状態の臨界速度の理論解析に向けて」

国際学会・研究会講演

1. R. Kaneko (presenter) and Ippei Danshita
“Simulating correlation-spreading dynamics in the two-dimensional Bose-Hubbard model by the tensor-network method”
APS March Meeting 2023 [10 March 2023]
2. Shimpei Goto (presenter), R. Kaneko , and Ippei Danshita
“Efficient Sampling Scheme with Trotter Gates for Evaluating Thermal Expectation Values on Quantum Computers”
APS March Meeting 2023 [9 March 2023]
3. R. Kaneko (poster) and Ippei Danshita
“Tensor-network simulations of correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum many-body systems”
The 1st young researchers’ workshop of the Extreme Universe Collaboration [16 February 2023]
4. D. Kagamihara (poster), R. Kaneko, Shion Yamashika, Kota Sugiyama, Ryosuke Yoshii, Shunji Tsuchiya, and Ippei Danshita
“Time evolution of Rényi entanglement entropy of free bosons in an optical lattice”
The 1st young researchers’ workshop of the Extreme Universe Collaboration [15 February 2023]
5. D. Kagamihara (poster), R. Kaneko, Shion Yamashika, Kota Sugiyama, Ryosuke Yoshii, Shunji Tsuchiya, and Ippei Danshita
“Rényi entanglement entropy after a quantum quench starting from insulating states in a free boson system”
Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 [24 November 2022]
6. R. Kaneko (presenter) and Ippei Danshita
“Simulating correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum many-body systems by the tensor-network method”
Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 [23 November 2022]
7. Yuki Nakamura (poster) , R. Kaneko , and Ippei Danshita
“Creating the Ising model with sign-inverted next-nearest-neighbor interaction by using Rydberg atoms”
International Conference on Low Temperature Physics 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) [19 August 2022]

8. R. Kaneko (poster) and Ippei Danshita
 “Tensor-network study of correlation-spreading dynamics in two-dimensional quantum many-body systems”
 International Conference on Low Temperature Physics 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) [19 August 2022]
9. M. Mikkelsen (presenter), R. Kaneko, D. Kagamihara, and Ippei Danshita
 “Resonant superfluidity in Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard model”
 Atomtronic@Benasque 2022 [9 May 2022]
10. M. Mikkelsen (presenter), R. Kaneko, D. Kagamihara, and Ippei Danshita
 “Resonant superfluidity in Rabi-coupled spin-dependent Fermi-Hubbard model”
 Ultracold Atoms Japan 2022 [14 April 2022]

国内学会・研究会講演

1. 金子 隆威 (presenter), 國見 昌哉, 段下 一平
 「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」
 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン [2023 年 3 月 25 日]
2. 長尾 一馬 (presenter), 段下 一平, 柚木 清司
 「開放ボースハバード系における連続量. ゼノン効果の準古典的記述」
 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン [2023 年 3 月 25 日]
3. 鏡原 大地 (presenter), 金子 隆威, 山鹿 汐音, 杉山 康太, 吉井 涼輔, 土屋 俊二, 段下 一平
 「自由 Bose 粒子系における Rényi エンタングルメントエントロピーの時間発展」
 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン [2023 年 3 月 23 日]
4. M. Mikkelsen (presenter), 段下 一平
 「Comparison between noise correlations and the spin-structure factor in $SU(N)$ 」
 日本物理学会 2022 年秋季大会 [2022 年 9 月 14 日]
5. 金子 隆威 (presenter), 後藤 慎平, 段下 一平
 「テンソルネットワーク法によるプラケット格子上の $SU(4)$ Heisenberg 模型の基底状態探索」
 日本物理学会 2022 年秋季大会 [2022 年 9 月 13 日]
6. 國見 昌哉 (presenter), 段下 一平
 「運動量空間の Hilbert space fragmentation に由来する永久流状態」
 日本物理学会 2022 年秋季大会 [2022 年 9 月 13 日]

競争的外部資金

- 2021-2023 年度 JST 創発的研究支援事業「テンソルネットワーク法と量子シミュレータで切り拓く新奇量子多体现象」
研究代表者: 段下 一平 直接経費 7,237,000 円 (2022 年度)
- 2021-2023 年度 科学研究費 (若手) 「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」
研究代表者: 金子 隆威 直接経費 800,000 円 (2022 年度)
- 2022-2023 年度 科学研究費 (若手) 「Effective thermodynamics of reduced density matrices」
研究代表者: Mikkelsen Mathias 直接経費 1,600,000 円 (2022 年度)
- 2021-2022 年度 科学研究費 (基盤 B) 「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」
研究代表者: 高須洋介 (京都大学大学院), 研究分担者: 段下 一平 直接経費 500,000 円 (2022 年度)
- 2018-2022 年度 科学研究費 (基盤 S) 「光格子中超低温原子気体の軌道及びスピ自由度を駆使した新量子物性の開拓」
研究代表者: 高橋 義朗 (京都大学大学院), 研究分担者: 段下 一平 直接経費 4,400,000 円 (2022 年度)
- 2018-2027 年度 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 基礎基盤研究「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」
研究代表者: 大森 賢治 (分子科学研究所), 共同研究者: 段下 一平 直接経費 5,183,690 円 (2022 年度)

学内委員

- 入試委員 (前、後期)
- 4 年生担任 (前、後期)
- ロシアワーキンググループ委員 (前、後期)

学外委員

- 学術論文誌 Journal of the Physical Society of Japan の編集委員