

# 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)

後藤 慎平 (PD)、Mikkelsen, Mathias (PD)

学部生 6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。行列積状態とは一次元量子多体系の波動関数を効率的に記述する方法であるが、有限温度の量子状態への応用にはいくつかの障害があった。今年度の研究で、random-phase matrix product states with trotter gates (RPMPST) 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。この RPMPST 法を用いて zig-zag ladder 格子上的 Heisenberg 模型の熱力学的性質を解析し、purification という従来の手法で取り扱いが困難であるパラメータ領域でも RPMPST 手法では解析が可能であることを明らかにした。

切断 Wigner 近似 (TWA) 法は量子ダイナミクスにおける量子ゆらぎの効果を近似的に含める準古典的な手法で、具体的には、そのために初期のウィグナー関数を確率分布として古典ダイナミクスの初期状態をサンプリングする。今年度の研究で、SU(3)TWA 法という Bose-Hubbard 模型の強相関領域に適した TWA 法の性能のさらなる向上を目指して SU(2)TWA 法である程度の成功を収めている離散的な TWA(DTWA) 法を SU(3)TWA 法に拡張した。

- 光格子中の Bose 気体の量子非平衡ダイナミクス

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、新奇な量子多体現象の発見に有用である。昨年度の研究では、光格子中の Bose 気体における量子クエンチ後の量子非平衡ダイナミクスを調べた。Mott 絶縁体状態を初期状態とし、超流動状態への量子相転移が起こる転移点近傍に光格子の深さをクエンチした後の一粒子相関の伝搬の様子を調べた。空間 1次元系では行列積状態を用いた厳密計算が実験結果とよく一致し、このことから量子シミュレーションの精度の高さが実証された。一方、空間 2次元系では弱相関領域で妥当性が確認されている Gross-Pitaevskii 平均場理論に基づく TWA 法を試したが、実験結果と定量的な一致は得られず、今後の数値計算手法開発の課題として残された。今年度の研究で、上記の SU(3)DTWA 法を

用いて2次元系の実験結果の再現を目指した。結果として、SU(3)DTWA法が短時間のダイナミクスを定量的に記述できることがわかったが、相関の伝搬速度を抽出できるほど長い時間のダイナミクスを定量的に記述できないこともわかった。そこで、全く別の数値計算手法である projected entangled pair states (PEPS) 法という2次元空間に適したテンソルネットワーク法を用いて実験の数値シミュレーションをしたところ、相関の伝搬速度を抽出できるほどの長時間ダイナミクスを定量的に記述できることがわかった。そのようにPEPS法の当該問題への妥当性が実証できたので、これまで未開拓であったパラメータ領域においてもPEPS法を用いて相関伝搬速度を計算した。

## メディア掲載

- マイナビニュース「近大など、二次元での量子シミュレーションの性能を検証する新手法を確立」  
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220323-2301346/>  
2022年3月23日
- マイナビニュース「約-270℃まで冷却した原子は気体と液体の特徴を持つことが判明、近大が確認」  
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220304-2285228/>  
2022年3月4日

## 学術論文（査読付）

1. “Tensor-network study of correlation-spreading dynamics in the two-dimensional Bose-Hubbard model”  
R. Kaneko and I. Danshita  
Communications Physics, **5**, 65 (2022).  
DOI:10.1038/s42005-022-00848-9
2. “Transition between vacuum and finite-density states in the infinite-dimensional Bose-Hubbard model with spatially inhomogeneous dissipation”  
S. Asai, S. Goto, and I. Danshita  
Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2022**, 033I01 (2022).  
DOI:10.1093/ptep/ptac011
3. “Quantum droplet of a two-component Bose gas in an optical lattice near the Mott insulator transition”  
Y. Machida, I. Danshita, D. Yamamoto, and K. Kasamatsu  
Physical Review A, **105**, L031301 (2022).  
DOI:10.1103/PhysRevA.105.L031301

4. “SU(3) truncated Wigner approximation for strongly interacting Bose gases”  
K. Nagao, Y. Takasu, Y. Takahashi, and I. Danshita  
Physical Review Research, **3**, 043091 (2021).  
DOI:10.1103/PhysRevResearch.3.043091
5. “Nonergodic dynamics of the one-dimensional Bose-Hubbard model with a trapping potential”  
M. Kunimi and I. Danshita  
Physical Review A, **104**, 043322 (2021).  
DOI:10.1103/PhysRevA.104.043322
6. “Matrix product state approach for a quantum system at finite temperatures using random phases and Trotter gates”  
S. Goto, R. Kaneko, and I. Danshita  
Physical Review B, **104**, 045133 (2021).  
DOI:10.1103/PhysRevB.104.045133
7. “Reentrance of the Disordered Phase in the Antiferromagnetic Ising Model on a Square Lattice with Longitudinal and Transverse Magnetic Fields”  
R. Kaneko, Y. Douda, S. Goto, and I. Danshita  
Journal of the Physical Society of Japan, **90**, 073001 (2021).  
DOI:10.1103/PhysRevB.104.045133

## 学士論文

- 「イオントラップ系における局在フォノンの超流動現象の発現機構」
- 「冷却原子 Bose 凝縮系の遠隔実験装置 Albert を用いた Bogoliubov 励起の異常トンネル効果の観測に向けて」
- 「量子シミュレータの遠隔利用による Bose-Hubbard 模型の非平衡ダイナミクスの観測に向けて」
- 「光格子を用いて Maple leaf 格子中の Bose 粒子系を実現する方法の提案」
- 「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 原子集団における表面臨界現象」
- 「2次元量子 Ising 模型における相関伝搬速度の近似手法を用いた解析に向けて」

## 国際学会・研究会講演

1. Ippei Danshita (presenter, invited)  
“Comparison between optical-lattice quantum simulations and numerical simulations in quench dynamics of the Bose-Hubbard model”  
Workshop on Quantum Information Science with Cold Atoms オンライン [24 June 2021]

## 国内学会・研究会講演

1. 鏡原 大地 (presenter), M. Mikkelsen, 金子 隆威, 段下 一平  
「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」  
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
2. M. Mikkelsen (presenter), R. Kaneko, D. Kagamihara, I. Danshita  
「Resonant superfluidity in a Rabi-coupled spin-dependent」  
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
3. 金子 隆威 (presenter), 段下 一平  
「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」  
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
4. 中村 優希 (presenter), 金子 隆威, 段下 一平  
「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」  
日本物理学会年次大会, オンライン [2022 年 3 月 15 日]
5. 金子 隆威 (presenter), 段下 一平  
「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」  
日本物理学会秋季大会, オンライン [2021 年 9 月 21 日]
6. 金子 隆威 (presenter), 堂田 佳秀, 後藤 慎平, 段下 一平  
「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」  
日本物理学会年次大会, オンライン [2021 年 3 月 13 日]
7. 後藤 慎平 (presenter, invited)  
「Lindblad 形式で探る観測誘起転移」  
理論研究会：量子多体系の相形成とダイナミクス, オンライン [2021 年 4 月 20 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 4,080,000 円 (2021 年度)
- 2020-2022 年度 科学研究費(若手)「強くエンタングルした状態の数値シミュレーション:行列積表現によるサンプリング」  
研究代表者:後藤 慎平 直接経費 800,000 円 (2021 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 1,900,000 円 (2021 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ン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 (2021 年度)
- 2016-2021 年度 JST CREST 研究「冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発」  
研究代表者:高橋 義朗(京都大学大学院), 主たる共同研究者:段下 一平 直接経費 5,200,000 円 (2021 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 7,341,000 円 (2021 年度)

## 学内委員

- 入試委員(前、後期)
- 3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