

Title	エンタングルメントを保持する非平衡定常状態の解析と量子計算への応用
Sub Title	Analysis of nonequilibrium steady states with entanglement and their applications to quantum computation
Author	上西, 慧理子(Kaminishi, Eriko)
Publisher	
Publication year	2025
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2024.)
JaLC DOI	
Abstract	測定に起因する確率的ゆらぎが鞍点からの脱出を加速することを、数値および理論の両面から明らかにしました。脱出時間は学習率と測定数の比に対してべき乗則に従い、連続時間近似によって正確に記述可能であることを示しました。また、揺動散逸定理の適用により、量子最適化の非平衡的性質に関する理解が進み、ノイズの設計や活用に関する基礎的知見が得られました。 We theoretically analyzed the impact of stochastic fluctuations arising from quantum measurement on the dynamical properties of quantum algorithms. In particular, we demonstrated that noise can accelerate escape from saddle points, and analyzed the optimization process by incorporating the fluctuation-dissipation theorem. This work contributes to improving the efficiency of quantum computation.
Notes	研究種目：若手研究 研究期間：2020～2024 課題番号：20K14388 研究分野：量子計算
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_20K14388seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 7 年 5 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2024

課題番号：20K14388

研究課題名（和文）エンタングルメントを保持する非平衡定常状態の解析と量子計算への応用

研究課題名（英文）Analysis of Nonequilibrium Steady States with Entanglement and Their Applications to Quantum Computation

研究代表者

上西 慧理子（Kaminishi, Eriko）

慶應義塾大学・理工学研究科（矢上）・特任講師

研究者番号：80726274

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）：測定に起因する確率的ゆらぎが鞍点からの脱出を加速することを、数値および理論の両面から明らかにしました。脱出時間は学習率と測定数の比に対してべき乗則に従い、連続時間近似によって正確に記述可能であることを示しました。また、揺動散逸定理の適用により、量子最適化の非平衡的性質に関する理解が進み、ノイズの設計や活用に関する基礎的知見が得られました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、量子アルゴリズムにおける測定ノイズが最適化性能に与える影響を非平衡統計力学の視点から明らかにした点で学術的意義があります。特に、揺動散逸定理に基づく解析は、確率的最適化の理解を深化させました。また、測定コストの削減や効率的な量子回路設計にもつながる知見は、将来の量子技術の実用化に貢献します。

研究成果の概要（英文）：We theoretically analyzed the impact of stochastic fluctuations arising from quantum measurement on the dynamical properties of quantum algorithms. In particular, we demonstrated that noise can accelerate escape from saddle points, and analyzed the optimization process by incorporating the fluctuation-dissipation theorem. This work contributes to improving the efficiency of quantum computation.

研究分野：量子計算

キーワード：量子計算 量子アルゴリズム 量子コンピュータ

※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。

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータでは、最適化アルゴリズム中に現れる鞍点や局所的な停滞など、いわゆるプラトー問題が課題として知られています。本研究では、エンタングルメントによって生じる非平衡定常状態（エンタングルメント前期熱平衡化）に注目し、その性質や緩和機構を量子計算に応用することで、最適化におけるプラトー問題を緩和する手法として機能する可能性に着目しました。

2. 研究の目的

本研究の目的は、エンタングルメントを保持する非平衡定常状態の性質とその緩和ダイナミクスを理論的に解明し、測定ノイズや非平衡過程を活用した量子最適化手法の理解と応用可能性を探ることです。

3. 研究の方法

量子回路シミュレーションを用いて VQE の最適化過程を数値的に追跡し、測定ショット数と学習率を変化させた際の鞍点からの脱出時間を評価しました。同時に、確率的勾配法に対して連続時間近似（確率微分方程式）を導入し、脱出時間のスケーリング則や揺動散逸定理との整合性を理論的に解析しました。

4. 研究成果

量子計算に関する研究として、測定に起因する確率的ゆらぎが、変分量子アルゴリズムにおける鞍点からの脱出を加速することを、数値的および理論的に明らかにしました。変分量子アルゴリズムは、パラメータを少しずつ変化させてエネルギーなど損失関数が最小となる状態を探索することで、量子多体問題の基底状態を近似的に求める方法であり、現在のノイズの多い量子デバイスでも実行可能な有力な手法です。今研究では、特に、脱出時間が学習率と測定数の比に対してべき乗則に従うことを発見し、この脱出ダイナミクスが確率微分方程式による連続時間近似を用いて正確に記述可能であることを示しました。また、揺動散逸定理の適用により、量子最適化の非平衡的性質に関する理解が進み、ノイズの設計や活用に関する基礎的知見が得られました。

量子ダイナミクスに関する研究として、量子ダークソリトンの構成法およびその時間発展の計算を行いました。特に、本研究では、二つの窪みを持つ構造を持つ量子 2 ダークソリトンの構成法について解析を行い、その性質を詳細に検討しました。古典力学系においては、複数のソリトンが衝突しても振幅や位相速度が保存されるという特徴や、衝

突の際に位相や位置にずれ（位相シフト）が生じることが知られています。これに対して本研究では、量子ダークソリトン同士が追い越し衝突を起こす場合に、どのような物理的性質や量子的効果が現れるのかを理論的に調べました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kaito Wada, Rudy Raymond, Yu-ya Ohnishi, Eriko Kaminishi, Michihiko Sugawara, Naoki Yamamoto, and Hiroshi C. Watanabe	4. 巻 105
2. 論文標題 Simulating time evolution with fully optimized single-qubit gates on parametrized quantum circuits	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 062421-1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.105.062421	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 Kinjo Kayo, Kaminishi Eriko, Mori Takashi, Sato Jun, Kanamoto Rina, Deguchi Tetsuo	4. 巻 8
2. 論文標題 Quantum Dark Solitons in the 1D Bose Gas: From Single to Double Dark-Solitons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 2～2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe8010002	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 Kaminishi Eriko, Mori Takashi, Miyashita Seiji	4. 巻 53
2. 論文標題 Construction of quantum dark soliton in one-dimensional Bose gas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 095302～095302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6455/ab787f	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16件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 上西慧理子, 森貴司, 菅原道彦, 山本直樹	
2. 発表標題 変分量子アルゴリズムにおける鞍点脱出に対する測定ノイズの影響	
3. 学会等名 日本物理学会第79回年次大会	
4. 発表年 2024年	

1. 発表者名 上西慧理子, 森貴司, 菅原道彦, 山本直樹
2. 発表標題 確率的勾配法による変分量子回路最適化過程の揺動散逸定理を用いた解析
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 上西慧理子, 森貴司, 菅原道彦, 山本直樹
2. 発表標題 確率的勾配法による変分量子回路最適化過程の局所解問題
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 上西慧理子, 菅原道彦, 山本直樹
2. 発表標題 測定回数削減による変分量子回路最適化の効率化
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 渡邊宙志, Rudy Rayond, 大西 裕也, 上西慧理子, 菅原道彦
2. 発表標題 単量子ビット回転軸選択法による量子回路最適化
3. 学会等名 第3回量子ソフトウェア研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊宙志, Rudy Raymond, 大西裕也, 上西慧理子, 菅原道彦
2. 発表標題 回転軸選択法による量子回路最適化
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金城佳世, 上西慧理子, 森貴司, 佐藤純, 出口哲生
2. 発表標題 非線形シュレーディンガー方程式におけるギャップソリトン解とソリトン解のつながり
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 渡邊宙志, Rudy Raymond, 大西裕也, 上西慧理子, 菅原道彦
2. 発表標題 回転軸選択法による量子回路最適化
3. 学会等名 日本コンピュータ化学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上西 慧理子
2. 発表標題 量子コンピュータを用いた変分量子アルゴリズムの解析
3. 学会等名 量子基礎論・量子情報セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaito Wada, Rudy Raymond, Yu-ya Ohnishi, Eriko Kaminishi, Michihiko Sugawara, Naoki Yamamoto, Hiroshi C. Watanabe
2. 発表標題 Simulating Time Evolution with Fully Optimized Single-Qubit Gates
3. 学会等名 第45回量子情報技術研究会 (QIT45)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上西慧理子、森貴司、菅原道彦、山本直樹
2. 発表標題 変分量子アルゴリズムにおけるパラメータ空間の確率力学系
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaito Wada, Rudy Raymond, Yu-ya Ohnishi, Eriko Kaminishi, Michihiko Sugawara, Naoki Yamamoto, Hiroshi C. Watanabe
2. 発表標題 Simulating Time Evolution with Fully Optimized Single-Qubit Gates on Parameterized Quantum Circuit
3. 学会等名 第5回量子ソフトウェア研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Watanabe Hiroshi C., Raymond Rudy, Ohnishi Yu-Ya, Kaminishi Eriko, Sugawara Michihiko
2. 発表標題 Optimizing Parameterized Quantum Circuits with Free-Axis Selection
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金城佳世, 上西慧理子, 森貴司, 佐藤純, 出口哲生
2. 発表標題 非線形シュレーディンガー方程式の準周期解の応用とリーブ・リニガー模型
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会(Online)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金城佳世, 上西慧理子, 森貴司, 佐藤純, 出口哲生
2. 発表標題 非線形シュレーディンガー方程式におけるギャップソリトン解とソリトン解のつながり
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(Online)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上西慧理子, 菅原道彦, 山本直樹
2. 発表標題 変分量子アルゴリズムにおけるノイズの影響の解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(Online)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

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