

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14724

研究課題名（和文）情報のスクランプリングに基づく熱化・量子カオスの機構の解明に向けた研究

研究課題名（英文）Study on the mechanism behind thermalization and quantum chaos based on the information scrambling

研究代表者

野崎 雅弘（NOZAKI, MASAHIRO）

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・基礎科学特別研究員

研究者番号：20804777

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ミクロな世界を記述する量子力学を用いて、ミクロな世界からマクロな世界の特徴的な現象である熱化が起こるメカニズムを解明することを目標に研究を行った。この結果、この非平衡過程において、スクランプリング効果と呼ばれる初期状態の持つ特徴を局所的に隠してしまう効果が重要であることを発見した。また、さらにダイナミクスに非均一性を加えることで、場所に依りて、この初期状態の特徴を残す事ができることも見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究テーマである熱化現象とは、状態の量子性、つまりミクロな世界に特有の量子状態の性質が失われていく過程のことである。本研究結果の学術的意義と社会的意義のそれぞれは、状態の量子性が非平衡過程で失われていくメカニズムがより明らかになったことと、これにより、状態の量子性が重要な役割をなす量子コンピュータなどを実装する際にどのような操作を行うべきかがより明らかになった点である。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research is to elucidate how thermalization, a characteristic phenomenon of the macroscopic world, occurs from the microscopic world in terms of quantum mechanics, which describes the microscopic world. We found that an effect called the scrambling effect, which locally hides the features of the initial state, is important in this nonequilibrium process. Furthermore, we found that by adding inhomogeneity to the dynamics, it is possible to preserve the characteristics of this initial state, depending on the location.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：量子もつれ 非平衡現象 information scrambling ホログラフィー 熱化 量子カオス エンタングルメント・エントロピー

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

ここでは、本研究の背景に関して説明する。熱化・量子カオスといった非平衡現象は現在の理論物理学における最先端の研究テーマである。ここで、熱化とは初期状態の量子性が局所的に失われ、初期状態の持つエネルギースケールにのみ依存して温度をもつ、熱的な状態に時間発展する非平衡現象のことである。また、量子カオスとは局所的な情報が非平衡過程の下で非局在化されていく現象のことである。この両者の非平衡現象においてスクランブリング効果と呼ばれるダイナミクスの特徴が重要な役割をなす。この効果とは、状態の持つ量子的な特徴を時間と共に局所的に隠してしまう、または非局在化させてしまう効果のことである。報告者はこの点に着目し、ダイナミクスがどのようなメカニズムで強いスクランブリング効果を持ちうるのかを明らかにすることが熱化・量子カオスといった非平衡現象が生じるメカニズムの解明につながると考え、研究をおこなった。また、重力を含まない理論が重力を含む理論と等価であるというホログラフィーという等価関係が成り立つ際、重力を含まない理論は強いスクランブリング効果を持つ事が知られているため、本研究はホログラフィーが成り立つメカニズムを解明することにつながることも期待される。

2. 研究の目的

- (1) 本研究の研究目的の一つ目は上述の様に、どのようなメカニズムでダイナミクスが強いスクランブリング効果をもつかを明らかにすることである。言い換えれば、このような強いスクランブリング効果をもつダイナミクスを記述する有効的なモデルを構築することにある。
- (2) 本研究の研究目標の二つ目はスクランブリング効果を調節することのできるダイナミクスを発見、または構築することである。熱化・量子カオスといった状態の量子性が局所的に完全に失われてしまうダイナミクスとは反対に、十分に時間が経った後でも量子性が残る非平衡過程の研究も重要である。なぜなら状態の量子性が重要になる量子コンピュータなどを実装する際に、このような理論研究が応用可能であると期待されるからである。

3. 研究の方法

(1) 演算子の量子もつれという演算子の性質に注目し研究をおこなった。この演算子の量子もつれとは、演算子に対して双対となる状態を定義し、その状態の量子もつれとして定義される。この双対状態の量子もつれの構造に元々考えていた演算子の性質が埋め込まれているので、演算子がどのような状態に作用しているかは考える必要がない。このため、時間発展演算子に対して、この演算子の量子もつれを定義することにより、初期状態にはよらずダイナミクスのみに基づいた性質を調べる事ができる。この時間発展演算子の量子もつれの構造をスクランブリング効果が全くないと考えられる二次元の自由場の理論と強いスクランブリング効果をもつと信じられているホログラフィックな共形場理論において調べた。さらに、この結果から、これらのダイナミクスの特徴を反映した有効理論を構築した。

(2) スクランブリング効果とは上述のように初期状態の量子的な構造を局所的には隠す、または非局在化させる効果のことである。このようなスクランブリング効果を調節する方法としては、強いスクランブリング効果をもつダイナミクスに、初期状態の量子的な構造に関する情報を局在化する様な効果を加えることで、このスクランブリング効果を調節するという事が考えられる。情報を局在化させるということは言い方を変えれば、状態の量子的な構造を非均一にするということである。このため、このような性質をダイナミクスに付与することは、非均一性をダイナミクスに加えることで実装できる事が期待される。このため、本研究では二次元の場の理論において、ダイナミクスに非一様性を加え、状態の量子的な構造が非平衡過程の下でどのような様に変化するかを調べた。

4. 研究成果

- (1) 本研究の主要な結果の一つ目は演算子の量子もつれを用いたスクランブリング効果の研究に関するものである。[1-5]において、強いスクランブリング効果をもつと信じられている、重力双対を持つ二次元の共形場理論と全くスクランブリング効果を持たないと期待される二次元の自由場の理論において、時間発展演算子の演算子の量子もつれを定義し、この時間発展演算子によるダイナミクスの特徴を調べた。この際、この量子もつれの構造を相互情報量と呼ばれる量子状態の非局所的な相関を測る物理量を用いて調べた。

(1-1) [1]においては、スクランブルされた情報を定量的に扱うために三者間の相互情報量と呼ばれる量を用いて研究をおこなった。この三者間の相互情報量とは、例えば部分系 A, B, そして C を考えた際に、この三つの部分系が共有する非局所的な相関を測る物理量のことである。この結果、自由場の理論では、量子もつれの構造の時間変化は準粒子描像と呼ばれる、互いに量子的に纏れた準粒子のペアの集団がある時刻に生成され、これが光速で伝播するという描像で説明できるということを明らかにした。この際、ある瞬間に生成された準粒子のペアは、生成後、消滅も生成もされないため、粒子の数は保存する。この結果、三者間の相互情報量は時間によらず、ゼロになり、スクランブルされて非局在化されてしまう情報は全くないということを見出した。一方で、重力双対を持つような共形場理論においては、時間発展の非常に初期では準粒子描像が成り立ちうるが、十分に時間が経過した後では、準粒子描像が成り立たなくなることを見出した。さらに三者間の相互情報量の値は初期時刻ではゼロだが、その後時間と共に減少し、十分に時間が経過した後では、非常に大きな負の値を持つことを見出した。これは A, B, そして C の間で元々局所的に存在していた相関が、強いスクランプリングによって完全に、この三つの部分系の中で非局在化されてしまっていることを意味する。

(1-2) [3, 5]では、(1-1)でおこなった研究を時間発展演算子から時間依存性を持った局所演算子の場合に拡張して研究をおこなった。この結果、強いスクランプリング効果をもつダイナミクスでは演算子と因果的に関係する領域のエンタングルメントの構造が時間と共に変化し、その結果、十分に時間が経った後では局所演算子の情報は完全に失われ、三者間の相互情報量の値は強いスクランプリング効果をもつ時間発展演算子の場合と同様に、非常に大きな負の値を持ち、三者が初期時刻で持っていた局所的な相関が完全に非局所的な相関になることを見出した。

(1-3) [2]では、強いスクランプリング効果をもつ時間発展演算子の量子もつれを記述する有効モデル、二次元の場の理論における線素モデルを提案した。このモデルでは、一次元の物体の面積の時間変化によって、相互情報量の時間発展が記述される。また、強いスクランプリング効果をもつ二次元の場の理論における相互情報量の特徴的な振る舞いはランダムユニタリーサーキットと呼ばれる時間発展演算子の相互情報量の特徴的な振る舞いと同様であり、どちらもこの線素モデルを用いて説明できることを見出した。これは強いスクランプリング効果をもつ共形場理論とランダムユニタリーサーキットとの間に何らかの等価性があることを示唆している。ランダムユニタリーサーキットとは局所的な時間発展演算子からなる時間発展演算子のことを行い、各局所的な時間発展演算子はランダムに選ばれている。

(1-4) [5]では有限の大きさの系が強いスクランプリング効果をもつダイナミクスによって支配される場合を考えた。この時も、相互情報量の時間発展は線素モデルで説明できることを見出した。有限の大きさの系ではさらに大域的な構造に関しても研究を行う事ができ、その結果、この線素モデルに現れる時間発展演算子は重力双対におけるワーム・ホールとトポロジカルに等価であることを見出した。

これらの結果により、弱いスクランプリング効果をもつ、または全くスクランプリング効果を持たないダイナミクスは粒子の様な 0 次元の物体の時間発展で有効的に記述でき、一方で強いスクランプリング効果をもつダイナミクスは大きさを持った物体の時間発展で説明できることを見出した。

(2) 本研究の主要な結果の二つ目は、非一様性を持たせたダイナミクスの研究に関するものである。[6]においては熱的な状態を非一様な時間発展演算子で励起させた際に、状態の量子構造がどう変化するかを調べた。この時には二次元の共形場理論を考え、自由場の理論と重力双対を持つ共形場理論に関してメビウス変形という非一様な変形を加えた。この変形の下、相互情報量や量子的なエントロピーであるエンタングルメント・エントロピーの時間発展は解析的に求まる。その結果、このメビウス変形のある極限では特定の点に自由度が集中し、その点を含む部分系のエンタングルメント・エントロピーは十分に時間が経過すると、系全体のエントロピーである熱的なエントロピーで与えられ、この点を含まない部分系に対するエンタングルメント・エントロピーは真空状態のものになることを見出した。この結果、相互情報量は真空状態の相互情報量を持つようになる。この結果は、この非一様な変形によって、量子相関が回復できることを示唆している。今後は、この非一様な変形をおこなったダイナミクスにおいて、三者間の相互情報量などを用いて、スクランプリング効果が抑制されるかを調べていく予定である。

<引用文献>

[1] L. Nie, M. Nozaki, S. Ryu, and M. T. Tan, “Signature of quantum chaos in operator entanglement in 2d CFRs,” *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*,

vol. 2019, p. 093107, Sep 2019.

[2] J. Kudler-Flam, M. Nozaki, S. Ryu, and M. T. Tan, “Quantum vs. classical information: operator negativity as a probe of scrambling,” *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020, Jan 2020.

[3] J. Kudler-Flam, M. Nozaki, S. Ryu, and M. T. Tan, “Entanglement of local operators and the butterfly effect,” *Phys. Rev. Research*, vol. 3, p. 033182, Aug 2021.

[4] E. Mascot, M. Nozaki, and M. Tezuka, “Local operator entanglement in spin chains,” arXiv:2012.14609

[5] Kanato Goto , Ali Mollabashi , Masahiro Nozaki , Kotaro Tamaoka and Mao Tian Tan, “Information Scrambling Versus Quantum Revival Through the Lens of Operator Entanglement,” arXiv:2112.00802

[6] K. Goto, M. Nozaki, K. Tamaoka, M. T. Tan, and S. Ryu, “Non-Equilibrating a Black Hole with Inhomogeneous Quantum Quench,” arXiv:2112.14388

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kudler-Flam Jonah, Nozaki Masahiro, Ryu Shinsei, Tan Mao Tian	4. 巻 2020
2. 論文標題 Quantum vs. classical information: operator negativity as a probe of scrambling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)031	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 Nie Laimei, Nozaki Masahiro, Ryu Shinsei, Tan Mao Tian	4. 巻 2019
2. 論文標題 Signature of quantum chaos in operator entanglement in 2d CFTs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 093107 ~ 093107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ab3a29	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 該当する
1. 著者名 MacCormack Ian, Liu Aike, Nozaki Masahiro, Ryu Shinsei	4. 巻 52
2. 論文標題 Holographic duals of inhomogeneous systems: the rainbow chain and the sine-square deformation model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 505401 ~ 505401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab3944	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 該当する
1. 著者名 Kim Keun-Young, Nishida Mitsuhiro, Nozaki Masahiro, Seo Minsik, Sugimoto Yuji, Tomiya Akio	4. 巻 2019
2. 論文標題 Entanglement after quantum quenches in Lifshitz scalar theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 093104 ~ 093104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/ab417f	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 該当する

1. 著者名 Kudler-Flam Jonah, Nozaki Masahiro, Ryu Shinsei, Tan Mao Tian	4. 巻 2020
2. 論文標題 Quantum vs. classical information: operator negativity as a probe of scrambling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)031	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 Kanato, Nozaki Masahiro, Tamaoka Kotaro	4. 巻 104
2. 論文標題 Subregion spectrum form factor via pseudoentropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.L121902	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 Kudler-Flam Jonah, Nozaki Masahiro, Ryu Shinsei, Tan Mao Tian	4. 巻 3
2. 論文標題 Entanglement of local operators and the butterfly effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033182	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3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 野崎 雅弘
2. 発表標題 Operator entanglement and quantum scrambling
3. 学会等名 Strings and Fields 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎 雅弘
2. 発表標題 Signature of quantum chaos in operator entanglement in 2d CFTs” Holography, Quantum Information and String Theory
3. 学会等名 Holography, Quantum Information and String Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野崎 雅弘
2. 発表標題 Black-hole like excitation in conformal field theories.
3. 学会等名 Strings and Fields 2021 (国際学会)
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			
米国	プリンストン大学	シカゴ大学	イリノイ大学	
韓国	GIST			