

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13466

研究課題名（和文）非平衡定常状態の典型的な状態を用いた解析手法の構築

研究課題名（英文）Typical state analysis of non-equilibrium steady states

研究代表者

白井 達彦（Shirai, Tatsuhiko）

早稲田大学・理工学術院・講師（任期付）

研究者番号：20816730

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：散逸環境と接した開放量子系のマクロな性質について調査した。一つには開放量子系が十分長く時間が経った後に到達する非平衡定常状態の性質を、これまで孤立量子系の解析に用いられてきた固有状態熱化仮説を用いることによって明らかにした。また、開放量子系における緩和ダイナミクスについて、緩和時間を決定する理論や過渡過程を記述するための理論を構築し、その一般的な性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子シミュレーション技術の進展に伴い、散逸を制御することで新奇な現象を実現することが可能となっている。また、量子コンピュータで効率よく計算するためには、計算過程で生じるエラーを抑制するための技術が必要不可欠である。本研究成果は、散逸を受けた量子多体系の一般的な性質を明らかにしたものであり、そうした技術を構築する上で基礎的な知見として重要である。

研究成果の概要（英文）：I investigated the macroscopic properties of open quantum systems in contact with dissipative environment. First, I revealed the general properties of the non-equilibrium steady states using eigenstate thermalization hypothesis previously employed in the analysis of isolated quantum systems. Next, I studied the relaxation dynamics. I developed theories to determine the relaxation time and describe the transient process.

研究分野：非平衡統計力学

キーワード：量子開放系 非平衡定常状態 緩和ダイナミクス 量子相転移

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 駆動量子多体開放系

本研究で扱った駆動量子多体開放系は「駆動外場」・「相互作用」・「散逸」の3つの要素からなる。外場から供給されるエネルギーと熱浴へと捨てられるエネルギーとが釣り合っており、流れのある非平衡定常状態が実現する。レーザー照射によって超伝導現象が発現するなど新奇な物性が現れる魅力的な系である。

(2) 典型的な状態

冷却原子系などの量子シミュレーション技術の進展により、孤立量子多体系での統計力学を基礎づける研究が盛んに行われている。ある平衡状態に対応する量子状態のほとんど全てが、マクロな物理量の測定値で比較する限りほとんど区別できないという性質をもって「典型的な状態」と呼ばれている。この典型性を軸にして、平衡状態が少数のパラメタで記述できるといった平衡状態のもつ普遍性や非平衡状態から平衡状態へ緩和するといった実験的事実が説明される。重要な点は、典型的な状態がカノニカル集団といった密度行列ではなく波動関数であるということ、とくにエネルギー固有状態が平衡状態の性質を反映している点である。

2. 研究の目的

孤立系での量子多体系において非常に有用な概念として成功を収めている典型的な状態の概念を駆動量子開放系に拡張することを目的とする。その結果、流れのある非平衡定常状態やそこに至る緩和過程を、密度行列ではなく波動関数のレベルで捉えることが可能になると期待される。具体的には、量子開放系の枠組みで現れる有効ハミルトニアンに着目し、その固有状態を用いて非平衡定常状態の特徴づけを試みる。

3. 研究の方法

(1) 数値計算による調査

量子シミュレーション系で実験が行われている系を対象に非平衡定常状態と有効ハミルトニアンの固有状態とを比較し、駆動量子開放系に対して典型的な状態の議論が成立するかを数値計算手法によって調査した。系のサイズ(たとえばスピン数)が15個までといった比較的小さな場合には、対角化法や共役勾配法の厳密手法を用いた。また、系が並進対称性をもつ場合には、テンソルネットワーク手法を用いて、熱力学的極限における性質を調査した。

(2) 統計力学の知見を用いた解析

平衡統計力学を孤立量子多体系において基礎づけるため、固有状態熱化仮説と呼ばれる量子力学の仮説が知られており、非可積分な系で広く成り立つと考えられている。固有状態熱化仮説は、エネルギー固有状態に対する局所的な物理量の行列要素の性質である。この仮説を応用することで駆動量子開放系の普遍的な性質を調査した。

4. 研究成果

(1) 駆動量子開放系への固有状態熱化仮説の応用

散逸環境と弱く接した駆動量子開放系の非平衡定常状態を記述する上で、固有状態熱化仮説が重要な役割を担うことを明らかにした。具体的には、あるクラスの駆動量子開放系の定常状態において、詳細釣り合いの関係が破れているにもかかわらず、ある有効温度とハミルトニアンのギブス状態がその良い記述を与えることを数値的に示した。ギブス状態は(i)注目系と環境との間の相互作用の強さに関する摂動展開の正当性と(ii)注目系が固有状態熱化仮説を満たすことの二つの条件を満たすときに実現する。固有状態熱化仮説に基づいたギブス状態の実現可能性において、非自明な点は(i)の摂動展開の正当性にある。先行研究[H.C. Lamos, et al., Phys. Rev. E 95 042137 (2017)]では、一般の量子開放系において、摂動展開の収束半径はシステムサイズの増加に伴い、指数関数的に0に向かって小さくなることが知られている。本研究では、固有状態熱化仮説を用いることで摂動展開が熱力学的極限で成り立つための条件を解析的に求めた。その条件を駆動量子開放系に適用し、定常状態に保存流がない場合には、低次で摂動展開を打ち切った摂動解が非平衡定常状態の良い記述を与えること、一方で定常状態に保存流がある場合には摂動展開が破綻することを、次元量子スピン系およびボース・ハバード模型の数値計算によって示した。本研究の成果を論文としてまとめ、Physical Review Eに報告した。

(2) 駆動量子開放系の緩和過程の解析

(2-A) テンソルネットワーク法を用いた緩和過程の解析

テンソルネットワーク法を用いて、熱力学的極限における駆動量子開放系の緩和過程の性質を調査した。まず、有限サイズの数値計算によって求めた(1)で得た非平衡定常状態の性質が熱力学的極限において成り立つことを確認した。次に、初期状態がある温度のギブス状態である

とき、初期状態から非平衡定常状態に至る緩和過程において、有効温度とハミルトニアンとのギブス状態が常にその状態の良い記述を与えることを示した。本研究の成果を論文としてまとめ、Physical Review Eに報告した。

(2-B)境界散逸系の緩和時間の解析

注目系が境界で散逸環境と接しておりバルクを保存流が流れるような境界散逸系を考える。境界散逸系での緩和は拡散現象によって与えられ、緩和時間はシステムサイズの二乗によって与えられる。一方で、量子開放系の時間発展はリウビル演算子によって記述され、そのスペクトルギャップは非平衡定常状態への漸近的な緩和率を与える。直感的には、スペクトルギャップの逆数が境界散逸系における緩和時間を与えることが期待されるが、これまでの先行研究[M. Žnidarič, Phys. Rev. E 92 042143 (2015)]では、この関係が必ずしも成り立たないことが数値的に示唆されていた。本研究では、境界散逸系の緩和時間はリウビル演算子のスペクトルギャップでは決まらず、初期状態を固有状態で展開した際の展開係数が問題サイズに対して長指数関数的に増加する固有状態によって決まることを数値的に明らかにした。本研究の成果を論文としてまとめ、Physical Review Lettersに報告した。

(2-C)緩和過程における緩和率の解析

(2-B)の成果により、リウビル演算子のスペクトルギャップは必ずしも量子開放系の緩和時間を正しく与えないことがわかった。これは、過渡過程が一般に長くなることに起因しており、過渡過程での緩和現象を理論的に明らかにすることが重要であることを示唆している。本研究では、非平衡定常状態での自己相関関数の緩和ダイナミクスを調べた。過渡過程での緩和現象を調べるため、リウビル演算子を定常状態によって誘導される内積のもとで対称化した対称化リウビル演算子を導入した。対称化リウビル演算子のスペクトルギャップを用いることで、自己相関関数を上からバウンドすることができる。また、対称化リウビル演算子のスペクトルギャップとリウビル演算子のスペクトルギャップは、詳細釣り合いを満たさない非平衡系においてのみ一般に異なることを示した。本研究の成果を論文としてまとめ、Physical Review Lettersに報告した。

(3)ランダム系の量子相転移の解析

本研究で発展させたスペクトルギャップを求める数値計算手法を応用し、相互作用係数にランダムネスの入った一次元イジング模型の量子相転移現象に非一様な量子揺らぎ(横磁場)が与える影響を調査した。数学的に取り扱いが簡単であるという理由からこの模型を採用した。相互作用係数のランダムネスと横磁場の強さとの間に相関を与えることによって、量子相転移現象のユニバーサルティクラスが変わるということを厳密に明らかにした。本研究の成果を論文としてまとめ、Annals of Physicsに報告した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 0件）

1. 著者名 Nakano Hayate, Shirai Tatsuhiko, Mori Takashi	4. 巻 103
2. 論文標題 Tensor network approach to thermalization in open quantum many-body systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.103.L040102	査読の有無 無
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 Shirai Tatsuhiko, Tanaka Shu	4. 巻 435
2. 論文標題 Exact bounds for dynamical critical exponents of transverse-field Ising chains with a correlated disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168483 ~ 168483
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aop.2021.168483	査読の有無 無
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 Mori Takashi, Shirai Tatsuhiko	4. 巻 125
2. 論文標題 Resolving a Discrepancy between Liouvillian Gap and Relaxation Time in Boundary-Dissipated Quantum Many-Body Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 230604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.230604	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 Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori	4. 巻 101
2. 論文標題 Thermalization in open many-body systems based on eigenstate thermalization hypothesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 42116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.101.042116	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 Takashi Mori, Tatsuhiko Shirai	4. 巻 -
2. 論文標題 Symmetrized Liouvillian Gap in Markovian Open Quantum Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Tatsuhiko Shirai and Shu Tanaka
2. 発表標題 Quantum annealing in transverse-field Ising chains with a correlated disorder
3. 学会等名 AQC2021 - Adiabatic Quantum Computing Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白井達彦, 田中宗
2. 発表標題 相関のあるランダムネスをもつ横磁場イジング鎖の動的臨界指数の解析
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 白井達彦
2. 発表標題 周期外場駆動量子開放系の定常状態に関する理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuhiko Shirai, Shu Tanaka
2. 発表標題 Quantum annealing in a disordered Ising chain with tuned inhomogeneous transverse field
3. 学会等名 Localisatin2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori
2. 発表標題 Thermalization in open many-body systems based on eigenstate thermalization hypothesis
3. 学会等名 FSP2019: Frontiers of Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井達彦、森貴司
2. 発表標題 非平衡環境と弱く接した量子多体系の定常状態の性質
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井達彦、森貴司
2. 発表標題 固有状態熱化仮説の非平衡定常状態への応用
3. 学会等名 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuhiko Shirai, Takashi Mori
2. 発表標題 Emergence of the Gibbs state in weakly dissipative quantum systems based on the eigenstate thermalization hypothesis
3. 学会等名 International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白井達彦、森貴司
2. 発表標題 非平衡環境と接したマクロ量子系への固有状態熱化仮説の応用
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

〔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
---------	---------