

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14622

研究課題名（和文）非平衡環境を利用した開放量子多体系の状態制御

研究課題名（英文）Control of open quantum many-body systems via nonequilibrium driving

研究代表者

森 貴司（Mori, Takashi）

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：00647761

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：量子多体系が散逸環境と結合した開放量子多体系、および時間変動する外場によって駆動された量子多体系の一般的な性質を理解するべく研究を進めた。まず、量子多体系が非平衡環境と弱く相互作用するときに実現する定常状態について研究し、孤立した量子多体系の持つ固有状態熱化と呼ばれる性質と定常状態の関係を明らかにした。さらに、開放量子多体系の緩和時間が、時間発展を生成するリウビリアンのスベクトル分解からどのように決まるかを明らかにした。さらに、周期的・準周期的・およびランダムに時間変化する外場駆動のもとでのエネルギー吸収率を、線形応答理論を超えた強い外場強度の領域で解析的に求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

散逸や外場駆動のもとでの量子多体系の非平衡ダイナミクスの一般的な性質を明らかにすることは、統計物理学、固体物理学、原子・分子・光科学、さらには高エネルギー物理、量子情報に至るまで、物理学の広い領域で重要となる基礎的な問題である。本研究は、このような量子多体系の非平衡ダイナミクスの一般的な性質のいくつかを明らかにしたもので、今後の量子物理学の発展にとって基礎的な成果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We have investigated general properties of quantum many-body systems under dissipation or external driving fields. We studied the steady state in many-body quantum system in a weak contact with a nonequilibrium environment. It is shown that the eigenstate thermalization hypothesis, which is an important property of isolated quantum systems, plays a key role in the steady state under dissipation. We also investigated how the relaxation time of open quantum many-body systems is determined from the spectral decomposition of the Liouvillian superoperator, which is a generator of the Markovian dissipative time evolution. Furthermore, we analytically calculated the energy absorption rate of quantum many-body systems subject to time-periodic, quasi-periodic, and random driving fields beyond the linear response regime.

研究分野：統計物理学

キーワード：開放量子系 非平衡統計力学 量子多体系 フロケ理論 リウビリアンギャップ

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

これまでの開放量子系の研究は、主に小さな量子系が環境と結合している状況を取り扱ってきた。しかし、近年の冷却原子系やイオントラップの実験の進展により、量子多体系と環境との結合を制御することが可能となり、制御された非平衡環境と結合した量子多体系がどのような量子状態に緩和するのかを理論的に明らかにすることが重要となってきた。

散逸を伴う量子多体系(開放量子多体系)の一般的な性質についてはよくわかっていない。例えば、次のような基本的な問題がある。

- (1) 環境と非常に弱く相互作用する量子多体系において実現する定常状態の性質を解明すること。
- (2) 散逸によって定常状態に到達するまでに要する緩和時間を見積もること。
- (3) 散逸と外場駆動の釣り合いによって実現する非平衡定常状態の性質を明らかにすること。

## 2. 研究の目的

本研究では上記の基礎的な問題を理論的に研究し、開放量子多体系の一般的な性質の解明に寄与する成果を目指す。

散逸がない孤立量子系においては、固有状態熱化仮説と呼ばれるエネルギー固有状態の性質が熱平衡状態への緩和を保証するものとして知られており、盛んに研究されている。非常に弱い散逸が加わったときに実現する定常状態について、固有状態熱化仮説から何が帰結できるかを明らかにする。

さらに、開放量子多体系の緩和時間について理解を進める。特に、開放系の時間発展を生成する線形超演算子であるリウビリアン固有値スペクトルと緩和時間の関係を明らかにする。特に、これまで開放系の緩和時間を調べる際には、リウビリアン固有値ギャップ(リウビリアンギャップ)に焦点が当てられてきたが、リウビリアン固有値ギャップに対応する時間スケールと実際の緩和時間が食い違うケースが知られており、この食い違いの理由を明らかにする。

また、外場駆動と散逸の両方が加わった量子多体系において実現する非平衡定常状態の性質を明らかにする。量子系の状態を制御するにあたって、これまで周期的に振動する外場による駆動が主に用いられてきた(フロケエンジニアリング)が、周期的でない外場、例えばランダム外場や準周期外場を量子制御に用いる可能性を考え、そういった外場駆動のもとでの非平衡ダイナミクスの性質を明らかにする。

## 3. 研究の方法

まず、弱い散逸のもとで実現する非平衡定常状態については、散逸がまったくない孤立系の性質である固有状態熱化仮説と、弱い散逸についての摂動論を組み合わせることによって研究を進める。散逸を摂動論で扱うことのできる条件を明らかにして、摂動論が破綻するときどのような定常状態が実現するかを数値的に調べる。

開放量子多体系の緩和時間については、開放系の時間発展を生成する線形超演算子であるリウビリアン固有値問題を数値的に解くことによって調べる。これまで開放系の緩和時間を調べる際には、リウビリアン固有値ギャップ(リウビリアン固有値ギャップ)に焦点が当てられてきたが、リウビリアン固有値ギャップに対応する時間スケールと実際の緩和時間が食い違うケースが知られている。そこで、リウビリアン固有値だけでなく、その固有ベクトルの性質が緩和時間に影響を与える可能性を数値的・理論的に考察する。

## 4. 研究成果

背景で述べた三つの問題のそれぞれについて基礎的な成果が得られた。

### (1) 環境と非常に弱く相互作用する量子多体系において実現する定常状態の性質を解明すること。

環境系と弱く結合した量子多体系について摂動論を適用すると、定常状態を表す密度行列はハミルトニアンを対角化する基底(エネルギー基底)で対角行列になることがわかった。この摂動論の結果に、孤立系の性質である固有状態熱化仮説を用いることで、環境と弱く相互作用する量子多体系は、仮に環境系が非平衡状態であったとしてもある有効温度における熱平衡状態に緩和する、という結果が得られた。

また、摂動論が適用できる条件を理論的に考察した。私たちの理論によれば、散逸がバルクに作用するバルク散逸系の場合には、リウビリヤンのギャップが熱力学的極限で有限である限り、摂動論は熱力学的極限でも適用できることが結論される。また、散逸が境界のみに作用する境界散逸系の場合には、リウビリヤンのギャップが系の長さの逆数のオーダーよりも速く 0 に近づく場合には摂動論が適用できないことがわかった。

この理論が正しいことをスピン系の数値計算で検証した。具体的には、真の定常状態と最低次の摂動論によって得られる定常状態の間の相対エントロピー密度を計算した。まず有限系について計算した結果を熱力学的極限に外挿し、その外挿値が散逸の強さを弱くしていくとともに 0 に近づくかどうかを調べた。その結果、理論の裏付けが得られた。

以上の結果はマクロ開放量子系の非平衡定常状態を求めるといふ基礎的な問題の理解につながるだけでなく、散逸を利用した量子テクノロジーへの応用にも有用なものである。

### (2) 散逸によって定常状態に到達するまでに要する緩和時間を見積もること。

マルコフ的な開放量子系の時間発展を生成するリウビリヤンのスペクトルギャップ(リウビリヤンギャップ)による緩和時間の見積もりと、実際の緩和時間が食い違うケースが先行研究で報告されていた[M. Znidaric, Phys. Rev. E 92, 042143 (2015)]が、その食い違いの理由を明らかにするため、リウビリヤンのスペクトル分解に基づく開放系の緩和時間の一般論を考察した。その結果、緩和時間はリウビリヤンの固有値だけでは決まらず、左固有ベクトルと右固有ベクトルの重なりが大きさが緩和時間に重要な影響を及ぼすことを理論的に予想した。この予想が正しいことを、リウビリヤンの固有値・固有ベクトルを数値的に詳しく調べることによって示した。

以上の一般論に基づき、リウビリヤンのスペクトル分解から緩和時間を正しく見積もる新しい方法を提案し、それを準安定状態の問題に適用した。これまで、準安定状態は小さなリウビリヤンギャップによって特徴づけられると考えられてきた。しかし、リウビリヤンギャップが大きくても、左右の固有ベクトルの重なりが小さくなることによっても準安定状態が生じることがわかった。小さなリウビリヤンギャップによって特徴づけられる準安定状態は、基本的には1粒子レベルで生じる準安定性のためであり、一方、左右の固有ベクトルの重なりが小さくなることによって生じる準安定状態は、粒子間の相互作用が本質的に効くような準安定性に対応することを簡単な確率過程のモデルで明らかにした。

### (3) 散逸と外場駆動の釣り合いによって実現する非平衡定常状態の性質を明らかにすること。

この問題を研究する前段階の研究として、従来の周期外場による駆動を超えて、ランダム外場および準周期外場によって駆動される量子多体系の非平衡ダイナミクスを調べた。散逸がない場合、外場駆動によって量子多体系はエネルギーを吸収するが、そのエネルギー吸収率についての厳密な結果を導出することに成功した。

また、強くかつ速く振動する周期外場のもとの量子多体系のエネルギー吸収率について、従来の線形応答理論を拡張した新しい公式を導出した。この公式は、高周波数展開と呼ばれる手法を用いて性質の良い回転座標系を構築し、その座標系で線形応答理論を適用することによって得られた。この新しい公式が、線形応答領域を超えた、強い外場のもとのエネルギー吸収率を正しく与えることを具体的なモデルで確認した。

外場駆動と散逸が組み合わさった時に実現する非平衡定常状態については現在研究中であるが、その研究を進めるための基礎的な定式化をまとめ、レビュー論文を発表した。

## 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 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takashi Mori	4. 巻 14
2. 論文標題 Floquet States in Open Quantum Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annual Review of Condensed Matter Physics	6. 最初と最後の頁 35-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1146/annurev-conmatphys-040721-015537	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 Wen Wei Ho, Takashi Mori, Dmitry Abanin, and Emanuele G. Dalla Torre	4. 巻 454
2. 論文標題 Quantum and classical Floquet prethermalization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 169297
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aop.2023.169297	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 Mori Takashi, Zhao Hongzheng, Mintert Florian, Knolle Johannes, Moessner Roderich	4. 巻 127
2. 論文標題 Rigorous Bounds on the Heating Rate in Thue-Morse Quasiperiodically and Randomly Driven Quantum Many-Body Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 50602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.050602	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 Mori Takashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Metastability associated with many-body explosion of eigenmode expansion coefficients	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.043137	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 Mori Takashi	4. 巻 128
2. 論文標題 Heating Rates under Fast Periodic Driving beyond Linear Response	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 50604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.050604	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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shirai Tatsuhiko, Mori Takashi	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Relaxation times in open quantum many-body systems
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Relaxation times in open quantum many-body systems
3. 学会等名 Quantum extreme universe from quantum information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Liouvillian analysis of the relaxation time in open quantum systems
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森貴司
2. 発表標題 開放量子多体系の物理の基礎
3. 学会等名 第4回冷却原子研究会「アトムの会」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森貴司
2. 発表標題 散逸と非平衡外場駆動の結合による量子制御の理論構築とその応用
3. 学会等名 第60回応用物理学会春季講演会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森貴司
2. 発表標題 対称化リウピリアンを用いた開放量子系の緩和時間の解析
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 森貴司
2. 発表標題 速い周期外場によって強く駆動された多体系の加熱時間の評価
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 Takashi Mori
2. 発表標題 Spectral analysis of the relaxation time in open quantum many-body systems
3. 学会等名 New Trends in Quantum Condensed Matter Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Heating rates under fast and strong periodic driving in classical and quantum many-body systems
3. 学会等名 QTD 2021 Conference on Quantum Thermodynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Microscopic derivations of various quantum Markovian master equations
3. 学会等名 Open Quantum Mechanics in Nuclear, Hadron and Condensed-Matter Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森貴司
2. 発表標題 開放量子多体系の緩和時間とLiouvillianギャップ
3. 学会等名 量子多体系の熱力学--数理の発展と展望 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Nonequilibrium steady states in weakly dissipative macroscopic quantum systems
3. 学会等名 Fundamental Aspects of Statistical Mechanics and the Emergence of Thermodynamics in Non-Equilibrium Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Mori
2. 発表標題 Steady states of open systems and eigenstate thermalization hypothesis
3. 学会等名 THERMALIZATION, MANY BODY LOCALIZATION AND HYDRODYNAMICS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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			
英国	Imperial College London			
ドイツ	The Technical University of Munich	MCQST	Max-Planck Institute	
スイス	University of Geneva			
イスラエル	Bar-Ilan University			
シンガポール	National University of Singapore			