

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K20944

研究課題名(和文)人工量子系における多体系の非平衡制御の理論

研究課題名(英文)Theory for non-equilibrium control in quantum many-body and artificial systems

研究代表者

伊與田 英輝 (Iyoda, Eiki)

東海大学・理学部・講師

研究者番号：50725851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：冷却原子系・超伝導量子ビットなどの人工量子系において、高度な技術を用いて量子多体系の非平衡状態の制御が行われている。本研究では、それに関する理論を構築するため、主に単一のエネルギー固有状態が熱的だという固有状態熱化仮説(ETH)に注目した。ETHの一種であるweak ETHを証明し、それに基づいて熱浴の初期状態がエネルギー固有状態の熱力学第二法則とゆらぎの定理を短時間領域において証明した。また、数値的厳密対格化を用いてETHの有限サイズ効果を詳しく調べ、ETHの応用や拡張について調べた。また、量子情報のダイナミクスに関して、量子情報の非局所化についての数値的研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミクロで可逆な量子力学から、熱力学で特徴づけられるマクロで不可逆な性質をどのように導くかは古くからの基礎的な問題である。本研究におけるETHによる熱力学第二法則の証明は、量子力学だけに基いて不可逆性の起源を理解するためにETHが有効であることを示しており、冷却原子系などの高度に制御された人工量子多体系の理解につながると考えられる。また、人工量子多体系を用いた量子コンピュータなどへの応用を考える際にも意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In artificial quantum systems such as cold-atomic systems and superconducting qubits, non-equilibrium states of quantum many-body systems are controlled with state-of-the-art techniques. In this research, we have studied non-equilibrium dynamics of thermalization and quantum information in isolated quantum many-body systems in order to construct a theory useful for its control. We have mainly focused on the ETH (eigenstate thermalization hypothesis). We proved the weak ETH, which is a variant of the ETH. Based on the weak ETH, we proved the second law of thermodynamics and the fluctuation theorem in the early time regime when the initial state of bath is a single energy eigenstate. In addition, we investigated finite size effects of the ETH in detail with numerical exact diagonalization method. We also investigated applications of ETH and its higher-order extension. Also, we have numerically investigated dynamics of quantum information such as delocalization of quantum information.

研究分野：統計力学、数理物理・物性基礎論

キーワード：固有状態熱化仮説 孤立量子多体系 人工量子系 数値的厳密対格化 非平衡ダイナミクス エンタングルメント

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、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

(1)研究開始当初には冷却原子系・超伝導量子ビット・半導体の微細加工系など、様々な人工量子系が作られるようになっていた。これらの人工量子系は、系を作り込んで制御することが可能であり、量子効果に加えて非平衡的な現象を調べる舞台となっていた。実験技術の進歩は、様々なセットアップを実現可能にしており、量子コンピュータへの応用も期待されていた。特に2014年にはGoogle社が量子コンピュータの開発を発表するなど、人工量子系を用いた研究が盛り上がりを見せていた。

(2) また、冷却原子系を用いた統計力学の基礎的な実験も行われており、理論・数値計算的にも統計力学の基礎的観点の研究が行われるようになっていた。可逆な量子力学に従う孤立量子多体系がなぜ熱平衡化するのかを理解するための理論的の試みの一つとして、量子状態の典型性アイデアや、固有状態熱化仮説(Eigenstate Thermalization Hypothesis; ETH)が注目されるようになっていた。ETH自体は量子カオスの文脈において1990年代に提案されていたが、コンピュータの性能の改善とともに、これらの理論の数値的な研究が行われ、関連する理論的な研究が行われるようになっていた。

2. 研究の目的

人工量子系を想定した量子多体系において、状態制御の指針になり得るような基礎的な理論の構築と、さらに多体系の量子相関や非平衡的性質の理解を深めることが目的である。

3. 研究の方法

理論的な証明・数値計算の二つの方法で行った。

理論的な証明においては、平衡統計力学や量子情報の分野で用いられてきた量子多体系における不等式(相関の減衰に関する不等式や、リーブロビンソン限界など)を用いた。

数値計算においては主に数値的厳密対格化法を用いた。比較的大きなサイズの計算ではSakurai-Sugiuta法及び物性研究所のスーパーコンピュータを用いた並列計算を行った。また、さらに大きなサイズの計算をするため、数値的厳密対格化法以外にiTEBD法も用いた。数値計算では具体的なモデルを定めて計算し、ランダム行列理論や典型性の議論を併用することにより、有限サイズ効果を議論した。

4. 研究成果

冷却原子系・超伝導量子ビット・半導体の微細加工系などを想定し、量子多体系の非平衡状態の制御を目標として研究をはじめ、主に(1-2)孤立量子多体系における熱化・熱力学第二法則や(3)量子情報の非平衡ダイナミクスに関する研究成果を得た。

(1-2)の研究において、主に単一のエネルギー固有状態が熱的だという固有状態熱化仮説(ETH)に注目した。

(1) 熱浴が純粋状態の場合の熱力学第二法則(雑誌論文④⑧⑨)

通常のETH(strong ETH)はエネルギーシェル内のすべてのエネルギー固有状態が熱的であることを表す。熱的であるとは、エネルギー固有状態による物理量の期待値が、その物理量のミクロカノニカル平均とほぼ等しいという意味である。一方、weak ETHではほとんどすべてのエネルギー固有状態が熱的であればよいという違いがある。

本研究ではまず、並進対称性や相関関数の指数減衰などの性質を持つ格子系においてweak ETHを準局所的な領域に対して証明した。さらに、weak ETHと、量子系での情報の伝搬速度に関するリーブロビンソン限界に基づいて、システムと熱浴からなる合成系において、熱浴の初期状態がエネルギー固有状態の熱力学第二法則とゆらぎの定理を短時間領域において証明した。これは、可逆な量子力学のダイナミクスから、不可逆な熱力学を象徴する熱力学第二法則が導かれることを示した点で重要である。斥力相互作用をするハードコアボゾン系において、数値計算をおこなった。また、熱力学第二法則については、長時間領域においても証明をおこなった。

また、仕事についての熱力学第二法則を調べた。熱平衡状態からはサイクリックな過程を用いて仕事を取り出せないという形の熱力学第二法則が知られている。この熱力学第二法則に対して、熱浴の初期状態がエネルギー固有状態であり、ハミルトニアンを二度クエンチさせるセットアップにおいて第二法則が成り立たない非熱的な状態の数のサイズ依存性を数値的に計算した。クエンチの前後のどちらかでハミルトニアンが非可積分である場合には仕事についての熱力学第二法則が成り立つことを示した。また、初期ハミルトニアンが、クエンチ後のハミルトニアンに従って時間発展するハイゼンベルグ表示の演算子を考え、この演算子がETHを満たす場合には熱力学第二法則が示されることがわかった。

(2) 数値的厳密対角化を用いた ETH に関する研究

[大偏差的な解析による ETH の有限サイズ効果の研究] (雑誌論文⑥)

数値的厳密対角化を用いて ETH に関する研究を行った。ETH は通常の非可積分系で成立し可積分系では成立しないと考えられている。まず、大偏差的な解析により ETH の有限サイズ効果を詳しく調べた。数値計算において、1次元量子スピン系 (XX 模型や、XXX 模型に次近接相互作用を摂動として加えたもの) を用いた。XX 模型については、直接厳密対角化をするのではなく、相関関数の計算を経由することでより大きなサイズの計算をおこなった。

数値計算結果によると、可積分系でも weak ETH は成立するが、非熱的な状態の数はサイズを大きくするとともに増加する様子が見られた。一方、非可積分系では非熱的な状態の比率がサイズに対して二重指数減衰することがわかった。これは十分大きなサイズでは非熱的な状態数がゼロになり strong ETH が成立することを意味する。また、可積分系に少し摂動項を加えた近可積分系においても二重指数減衰が確認され、近可積分系においても strong ETH が成り立つことがわかった。

[固有状態におけるジュール膨張] (雑誌論文③)

ETH の応用として固有状態におけるジュール膨張を調べた。ジュール膨張の設定として、二つの部分系の初期状態がそれぞれエネルギー固有状態にある状況を採用した。1次元のスピン $1/2$ 量子 XXZ 模型に次近接相互作用を加えた模型を用いて数値計算をおこなった。この模型はハードコアボソンを用いて書き直せるため、ハードコアボソン系に対するジュール膨張を考えていることに相当する。それぞれの部分系の初期状態はエネルギー固有状態とした。数値計算によると、全系は ETH に従って熱化するが、その際に相互作用のパラメータに応じて温度上昇・温度降下が生じることがわかった。この逆転温度の振る舞いは古典的な平均場では理解できず、量子的な相関によるものだと考えられる。

[ETH の高次拡張] (雑誌論文①)

ETH の高次拡張を提案し、数値的な検証を行った。ETH の高次拡張は、ある物理量に対する k 次の量子エルゴード性として捉えることができる。具体的には、長時間領域における時間発展演算子とランダムユニタリ演算子をエネルギーシェル内に射影し、ある物理量に対する k -fold チャネルの差が等しいという条件が k 次の ETH を与える。この研究では、非可積分系において 2 次の ETH の成立を数値的に示した。数値計算においては、1次元のスピン $1/2$ 量子 XXZ 模型を二本並べた梯子模型を用いて、 $k=2$ の場合を調べた。その結果、非可積分系の場合には 2 次の ETH が成り立つことがわかった。特に非局所スワップ演算子についての結果は、2 次の ETH がエネルギー固有状態の Renyi-2 エンタングルメントエントロピーの有限温度ページ補正を与えていることを意味している。

以上の ETH に関する知見は、非平衡の量子多体系を調べる上で今後重要であると考えられる。

(3) 量子情報のダイナミクスの研究 (雑誌論文②⑤⑦)

近年、ブラックホールの情報パラドックスの文脈で、量子多体系における量子情報の非局所化が注目されている。特に Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型はブラックホールは重要な模型としてよく調べられており、低エネルギー・強結合におけるダイアグラム計算によって、共形場理論との関係が議論されている。量子情報の非局所化の指標の一つである非時間順序相関関数には、その減衰率に上限があるという Maldacena-Shenker-Stanford bound (MSS bound) が知られているが、SYK 模型はその上限を満たす模型として知られている。本研究では、いくつかの模型において、量子情報の非局所化を非時間順序相関関数や三体相互情報量を用いて調べた。

SYK 模型は 4 点相互作用からなる模型であり、その結合定数が乱れを含んでいる。また、元々の模型ではマヨラナフェルミオンについての模型だったが、通常のフェルミオンやハードコアボソンの場合にも SYK 模型の性質が調べられている。本研究では SYK 模型における乱れの役割を調べるため、乱れない SYK 模型を特殊な場合として含む模型をフェルミオンとハードコアボソンに対して提案した。この模型はエネルギー固有値が 0 以上の模型であり、エネルギーが 0 の固有状態が示量的に多く存在することがわかった。この示量的に多くのゼロエネルギー状態は、非時間順序相関関数の長時間領域における大きな時間ゆらぎとして現れることがわかった。また、エネルギー準位統計を計算すると、粒子の統計性がフェルミオンの場合にはポアソン分布に従うことがわかった。これはこの模型が可積分である可能性を示唆するが、実際に示量的な数の保存量を構成することで、この模型が可積分であることを示した。

さらに、MSS bound の上限を満たす模型として、SYK 模型の他に large- c 極限における共形場理論の模型が知られている。これらの模型はスケール不変性を共通の特徴として持つため、

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

スケール不変性を持ち物性物理でよく調べられるモデルとして1次元XXZモデルに注目し、量子情報の非局所化を数値的に調べた。非局所化の指標としては、非時間順序相関関数を物理量に関して平均したものを用いた。この量は、複素数時間発展演算子に対して、演算子空間のエンタングルメントエントロピーを計算することで求めることができる。この量を iTEBD 法を用いて数値計算した。1次元XXZモデルの基底状態がギャップレスの場合にはスケール不変性を示すが、この場合に非時間順序相関関数の相互作用パラメタに依存しない普遍的な振る舞いを見つけた。

また、1次元XXZモデルにおいて数値的厳密対格化を用いた計算をし、ハミルトニアンの可積分性によらず三体相互情報量が負になり得ることがわかった。しかし、量子情報の非局所化の十分な理解の上には、長時間領域におけるダイナミクスのハールランダムユニタリとの差が重要な観点であると思われるため、さらなる研究が必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shunsuke Nakamura, Eiki Iyoda, Tetsuo Deguchi, Takahiro Sagawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Universal scrambling in gapless quantum spin chains	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.224305	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 Jae Dong Noh, Eiki Iyoda, Takahiro Sagawa	4. 巻 100
2. 論文標題 Heating and cooling of quantum gas by eigenstate Joule expansion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 10106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.010106	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 Kazuya Kaneko, Eiki Iyoda, Takahiro Sagawa	4. 巻 101
2. 論文標題 Characterizing complexity of many-body quantum dynamics by higher-order eigenstate thermalization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 42126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.042126	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 Kazuya Kaneko, Eiki Iyoda, and Takahiro Sagawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Work extraction from a single energy eigenstate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.032128	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 Eiki Iyoda, Hosho Katsura, and Takahiro Sagawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 86020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.086020	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 Toru Yoshizawa, Eiki Iyoda, and Takahiro Sagawa	4. 巻 120
2. 論文標題 Numerical Large Deviation Analysis of the Eigenstate Thermalization Hypothesis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 200604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.200604	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 Eiki Iyoda and Takahiro Sagawa	4. 巻 97
2. 論文標題 Scrambling of quantum information in quantum many-body systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 42330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.042330	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 Eiki Iyoda, Kazuya Kaneko, and Takahiro Sagawa	4. 巻 119
2. 論文標題 Fluctuation Theorem for Many-Body Pure Quantum States	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 100601-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.100601	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 Kazuya Kaneko, Eiki Iyoda, and Takahiro Sagawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Saturation of entropy production in quantum many-body systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062148-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.062148	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17件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 伊與田英輝, 金子和哉, 沙川貴大
2. 発表標題 高次の固有状態熱化仮説の数値的検証
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiki Iyoda, Hosho Katsura, Takahiro Sagawa
2. 発表標題 Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models
3. 学会等名 APS March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiki Iyoda
2. 発表標題 Effective dimension, level statistics, and integrability of Sachdev-Ye-Kitaev-like models
3. 学会等名 One-day workshop for QFT and string theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊與田英輝
2. 発表標題 純粹状態の熱力学第二法則と固有状態熱化仮説
3. 学会等名 QIT39(量子情報技術研究会) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊與田英輝, 金子和哉, 沙川貴大
2. 発表標題 多体ロシュミット・エコーにおけるエンタングルメントのダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊與田英輝
2. 発表標題 孤立量子多体系における熱平衡化と量子情報の非局所化
3. 学会等名 物性研究所 短期研究会 量子情報・物性の新潮流 -量子技術が生み出す多様な物性と情報処理技術- (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊與田英輝, 桂法称, 沙川貴大
2. 発表標題 乱れた量子多体系における量子情報の非局在化
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Eiki Iyoda, Takahiro Sagawa
2. 発表標題 Scrambling of quantum information in quantum many-body systems
3. 学会等名 APS March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Eiki Iyoda, Kazuya Kaneko, Takahiro Sagawa
2. 発表標題 The second law of thermodynamics and the fluctuation theorem for pure quantum states
3. 学会等名 STATPHYS26 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 伊與田英輝, 金子和哉, 沙川貴大
2. 発表標題 純粋状態における熱力学第二法則とゆらぎの定理
3. 学会等名 量子論の諸問題と今後の発展 (QMKE6)
4. 発表年 2016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
研究協力者	沙川 貴大 (Sagawa Takahiro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金子 和哉 (Kazuya Kaneko)		
研究協力者	桂 法称 (Katsura Hosho)		
研究協力者	出口 哲生 (Deguchi Tetsuo)		
研究協力者	吉沢 徹 (Yoshizawa Toru)		
研究協力者	中村 駿甫 (Nakamura Shunsuke)		
研究協力者	馬場 翔太郎 (Baba Shotaro)		