

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17718

研究課題名(和文) 時間周期的な外場によって駆動された系の非平衡定常状態の研究

研究課題名(英文) Nonequilibrium steady states in periodically driven systems

研究代表者

森 貴司 (Mori, Takashi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：00647761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：平衡系では実現が難しい興味深い物質相を、物質にレーザーを照射することによって実現しようという研究が、近年注目を集めています。しかし、周期外場によって興味深い物性を得られたとしても、物質は外場からエネルギーを吸収し、最終的に高温の無秩序な状態に緩和してしまいます。このことを「熱化」といいます。熱化が、どれくらいの速さで生じるのかを理解することは応用上重要なだけでなく、基礎物理学的にも難しい課題でした。

この問題を理論的に研究し、外場の周波数が大きい時には、熱化が周波数に対して指数関数的に遅くなることを示しました。また、熱浴との相互作用の影響を研究しました。

研究成果の概要(英文)：Periodically driven systems thermally isolated from the environment exhibit remarkable properties that are not easily realized in equilibrium systems. However, the system will ultimately heat up to a high temperature state, which is disordered and featureless. It is not only a practically important problem but a theoretical challenge to understand how fast the heating occurs. This is a typical problem of nonequilibrium statistical physics.

We have shown that the heating becomes exponentially slow in the high frequency regime. Moreover, we studied the effect of the coupling to a thermal environment.

研究分野：統計物理学

キーワード：周期駆動系 フロケ理論 非平衡 統計物理学 熱平衡化

1. 研究開始当初の背景

物質にレーザーを照射することによって、平衡系では実現が難しい物質相を制御し、非平衡状態として実現しようという試みが近年盛んに行われている。例えば、レーザーの照射によって非自明なトポジカル相が現れることが理論的に提案されている。同様の研究は冷却原子系においても注目を集めている。トラップされた冷却原子気体の、ポテンシャルを振動させることによって、動的相転移現象を誘発することが可能であることが指摘されている。

これらの研究では、フロケ理論に基づいた有効ハミルトニアンの方法が理論的に用いられてきた。理論的には、周期外場によって非自明な有効ハミルトニアンを得ることが重要な問題として研究されてきた。

しかし、この方法では、周期駆動系の重要な物理的過程である、「熱化」の影響を無視している。熱化とは、系が周期外場からエネルギーを吸収し続け、最終的に温度が非常に高温の(漸近的には温度無限大の)状態に緩和することを指す。熱化が起こってしまうと、有効ハミルトニアンの方法は破綻する。さらに、高温の状態は無秩序で、興味深い物性をまったく示さないため、熱化は、周期外場によって新奇な物質相を実現しようという研究の大きな障害となる。

一方で、熱化の過程を理解することは非平衡統計物理学の基礎的な問題である。したがって、熱化の理解は応用上重要なだけでなく、基礎物理学的にも興味深い課題である。

2. 研究の目的

周期駆動系における熱化の非平衡過程を理解することが目的である。特に、有効ハミルトニアンの方法がどういう条件のもとで正しい結果を与えるかを理解することが本研究の目的である。

具体的には、まず系が外界から孤立している場合に有効ハミルトニアンの方法が正当化される条件を理解し、続いて、外部の系との相互作用のもとで有効ハミルトニアンの妥当性を解明する。

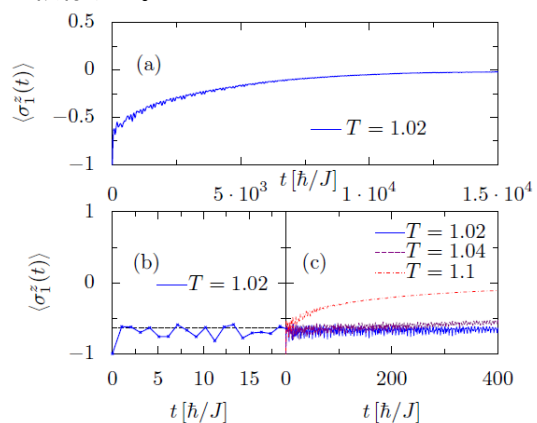
3. 研究の方法

周期駆動系のダイナミクスおよび定常状態は、フロケ理論を出発点として考えることができる。時間に依存する外場のもとでの量子ダイナミクスを、時間に依存しないフロケハミルトニアンのもとでの量子ダイナミクスの問題として表現することができる。上記の有効ハミルトニアンは、このフロケハミルトニアンを外場の周期のべき展開(フロケ・マグナス展開)によって得られる。したがって、フロケ・マグナス展開の数学的構造をよく理解することによって、有効ハミルトニアンの方法の妥当性や、熱化の時間スケールを議論できる点に着目した。

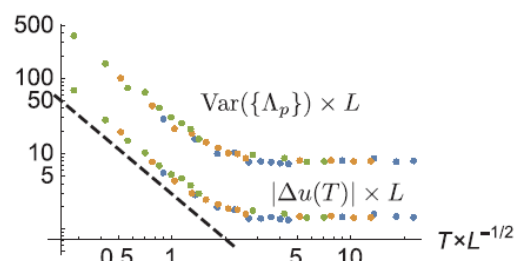
4. 研究成果

我々は、フロケ・マグナス展開を数学的に厳密に扱うことによって、熱化の時間スケールの厳密な下限を導出した。その結果によると、外場の周波数が大きい時には、熱化は周波数について指数関数的に遅いことがわかる。さらに、熱化が無視できる時間スケールでは、有効ハミルトニアンの方法が正当化されることを証明した。これらの結果により、外場の周波数が大きいときには、有効ハミルトニアンの方法は非平衡系の準定常状態の記述として正当化されることがわかった。このことは外場によって物質の性質を制御する研究において実用上有用なだけでなく、基礎理論的にも興味深い、一般性をもつ結果である。

以下の図はスピンモデルにおける熱化の様子を様々な周期 T についてプロットした図である。縦軸は平均磁化、横軸は時間である。磁化が 0 に緩和することが温度無限大への熱化に対応している。 $T=1.02$ の時は、長い時間スケールでは熱化が起こる(上図)が、短い時間スケールではゼロでない平均磁化を持つ非自明な準定常状態に達する(下図)。準定常状態の時間スケールは周期 T の値に敏感に依存する。



可積分系の場合には、一般には温度無限大への熱化は起こらず、熱化はある有限温度でストップすると考えられている。これは、可積分系には多くの局所保存量があるためである。我々は可積分系の熱化についても詳細に調べ、システムサイズと外場の周期の両方を無限大にする極限では可積分系でも温度無限大への熱化が生じることがわかった。また、システムサイズと外場の周期が有限のときには、エネルギー吸収量がスケールリング則を示すことを数値的に明らかにした。



上図は、エネルギー吸収量および有効温度

の分散がスケーリング則を示すことを表わす図である。縦軸は系全体のエネルギー吸収量、横軸は周期 T にシステムサイズ L の $-1/2$ 乗をかけたものである。データ点の色は、様々な異なる T と L のデータのプロットを意味している。これらの異なる T と L のデータ点が単一の曲線に乗っていることが、スケーリング則の成立を意味している。

さらに、周期駆動系が熱浴と相互作用している場合の非平衡定常状態を研究し、熱浴とのカップリングの影響について研究した。しばしば、孤立系の解析で得られた有効ハミルトニアンを、熱浴と相互作用している系の定常分布として仮定されるが、この仮定は一般には正当化されないことがわかった。

したがって、孤立系の解析で得られた有効ハミルトニアンを、熱浴と相互作用している系に適用する際には注意を要する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)(すべて査読あり)

[1] Takashi Ishii, Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, Naomichi Hatano, Heating in integrable time-periodic systems, accepted in Physical Review Letters (2018)

[2] Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko N Ikeda, Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in the Tomonaga-Luttinger model, Physical Review A 97, 013622 (2018)
DOI: 10.1103/PhysRevA.97.013622

[3] Takashi Mori and Naoto Shiraishi, Thermalization without eigenstate thermalization hypothesis after a quantum quench, Physical Review E 96, 022153 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevE.96.022153

[4] Naoto Shiraishi and Takashi Mori, Systematic Construction of Counterexamples to the Eigenstate Thermalization Hypothesis, Physical Review Letters 119, 030601 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.030601

[5] Takashi Mori, Classical ergodicity and quantum eigenstate thermalization: Analysis in fully connected Ising ferromagnets, Physical Review E 96, 012134 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevE.96.012134

[6] Tatsuhiko N Ikeda, Takashi Mori, Eriko Kaminishi, Masahito Ueda, Entanglement prethermalization in an interaction quench between two harmonic oscillators, Physical Review E 95, 022129 (2017)
DOI: 10.1103/PhysRevE.95.022129

[7] Takashi Mori, Extensive increase of

entropy in quantum quench, Journal of Physics A 49, 444003 (2016)

DOI: 10.1088/1751-8113/49/44/444003

[8] Takashi Mori, Macrostate equivalence of two general ensembles and specific relative entropies, Physical Review E 94, 020101 (2016)

DOI: 10.1103/PhysRevE.94.020101

[9] Tatsuhiko Shirai, Juzar Thingna, Takashi Mori, Sergey Denisov, Peter Hänggi, Seiji Miyashita, Effective Floquet-Gibbs states for dissipative quantum systems, New Journal of Physics 18, 053008 (2016)
DOI: 10.1088/1367-2630/18/5/053008

[10] Takashi Mori, Tomotaka Kuwahara, and Keiji Saito, Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, Physical Review Letters 116, 120401 (2016)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.120401

[11] Tomotaka Kuwahara, Takashi Mori, and Keiji Saito, Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven many-body quantum systems, Annals of Physics 367, 96 (2016)
DOI: 10.1016/j.aop.2016.01.012

[学会発表](計 10 件)

[1] T. Mori, Construction of counterexample to eigenstate thermalization hypothesis, The 4th East Asia Joint Seminars on Statistical Physics (2017)

[2] T. Mori, Construction of translation-invariant nonintegrable models without eigenstate thermalization, Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations (2017)

[3] T. Mori, Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven many-body quantum systems, 14th Granada Seminar (2017)

[4] T. Mori, Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems, STATPHYS 26 (2016)

[5] T. Mori, Rigorous analysis of Floquet-Magnus theory and generic transient dynamics in periodically driven quantum systems, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms (2016)

[6] 森貴司, アンサンブルの等価性の一般化と第二法則への応用, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016)

[7] 森貴司, 周期外場によって駆動された量子多体系の準定常性, 量子論の諸問題と今後の発展 (QMKEK) (2016)

[8] 森貴司, 周期外場によって駆動された量子多体系のエネルギー吸収についての厳密な結果, 日本物理学会第 71 回年次大会

(2016)

[9] T. Mori, Quasi-stationary states in periodically driven quantum systems, New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015

(2015)

[10] T. Mori, General scenario of relaxation process in periodically driven quantum systems, KIAS Workshop on Quantum Information and Thermodynamics (2015)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森貴司 (MORI, Takashi)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：00647761