

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06718

研究課題名(和文) 孤立量子系の定常状態に潜む量子情報の実体解明

研究課題名(英文) Information-theoretic aspects of steady states in isolated quantum systems

研究代表者

池田 達彦 (IKEDA, Tatsuhiko)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：60780583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：主にコヒーレントに分割され作られた2つの部分孤立量子系の時間発展について研究を行った。特に分割で生成された部分系間の量子エンタングルメントが熱平衡化を妨げ引き起こされる「エンタングルメント前期熱平衡化」の機構を詳しく調べた。相互作用する2つの調和振動子モデル、朝長・ラッティンジャーモデルの双方において、エンタングルメント前期熱平衡化した状態が、部分系にまたがる非局所的な保存量を考慮に入れた一般化ギブスアンサンブルでよく記述されることを証明した。

研究成果の概要(英文)：I have mainly studied time evolution of two isolated quantum subsystems that are created by coherently splitting a single quantum system. In particular, I have investigated the mechanism of "entanglement prethermalization", which occurs when the quantum entanglement between the subsystems prevents the total system from reaching the thermal equilibrium. I have studied two models, the interacting two harmonic oscillators and the Tomonaga-Luttinger model, and identified the statistical-mechanical ensemble which describes the quasi-stationary state after entanglement prethermalization. The ensemble has turned out to be the generalized Gibbs ensemble, where the nonlocal conserved quantities acting on both subsystems are taken into consideration.

研究分野：統計力学

キーワード：統計力学 量子情報

1. 研究開始当初の背景

超高真空下で極低温まで冷却された原子気体は、近似的に孤立量子系とみなすことが出来る。この性質を利用して、「孤立量子系は熱平衡化するか」という非常に基本的な問題に関する実験が行われ、統計力学の基礎に関する理論研究が活発に行われている。その中で、熱平衡化の有無には系の可積分性が関わるというパラダイムが形成された。すなわち、粒子間の相互作用が複雑な非可積分系ではギブス(カノニカル)アンサンブルで、相互作用が特殊な可積分系では多数の局所的な保存量を取り入れた一般化ギブスアンサンブルで、定常状態がよく記述されるという描像である。本研究の開始前、私は共同研究でこのパラダイムの範疇外にある緩和過程の存在を発見した [E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda, M. Ueda, Nature Physics 11, 1050 (2015)]。この研究では、1次元の少数ボース粒子系を互いに相互作用しない2つの系へ分割し、その後のユニタリ時間発展を解析した結果、到達する定常状態における相関関数が既存の統計力学アンサンブルではフィット出来ないことを発見した。さらに、このフィッティング誤差が分割で生成されたエンタングルメントに起因することを突き止め、エンタングルメントによる非平衡定常状態への緩和を entanglement prethermalization と名付けた。しかし、この研究で用いた Lieb-Liniger モデルの理論的取り扱いが非常に難しく、entanglement prethermalization をよく記述する統計力学アンサンブルの特定には至らなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的の中心は、entanglement prethermalization の機構を解明することである。また、このように量子力学的効果が重要になる非平衡な定常状態についての理解を進展させることである。

3. 研究の方法

まず、entanglement prethermalization を記述するために最小限なトイモデルの構築を行った。これは2個の互いに相互作用する調和振動子モデルとなった。これを解析計算によって詳しく調べた。次に、より実験に即したモデルとして、多粒子系を記述する朝永・ラッティンジャーモデルにおいて解析的・数値計算を併用して entanglement prethermalization 機構の検討を行った。

4. 研究成果

本研究で得られた成果について以下に列挙する。

- (1) 調和振動子モデルにおいて、相互作用がある状況からそれを無くする、いわゆる量子クエンチを行うと、entanglement prethermalization が起きることを示した。すなわち、時間発展を長時間平均して得られる状態は、各振動子を見る限り、ある温度のギブスアンサンブルでよく記述されるが、振動子間の相関を見ると熱平衡状態とは異なる状態になることが分かった。

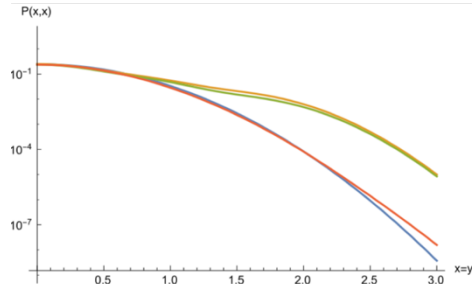


図 1: 2つの調和振動子の座標の同時分布関数 実際の時間発展の長時間平均(青)、ギブスアンサンブル(黄色)、局所保存量を考慮した一般化ギブスアンサンブル(緑)、非局所保存量を考慮した一般化ギブスアンサンブル(赤)

これは、この極めて単純なトイモデルが entanglement prethermalization を記述出来ることを示す。さらに、このモデルにおいて振動子間の相関をよく記述する統計力学アンサンブルを特定した。これは両方の振動子にまたがる「非局所的」な保存量を考慮に入れた一般化ギブスアンサンブルであった。考慮に入れる保存量の個数を増やすほど、実際の状態を記述する精度が増し、アンサンブルのと実際の状態が漸近的に一致することを証明した。

調和振動子モデルにおいて entanglement prethermalization の原因を突き詰めると2つの振動子の固有振動数が等しいことで、このために生じる全系のエネルギースペクトルの多数の縮退が重要な役割を果たしている。そこで、2つの固有振動数に小さな差がある場合を考え、この「対称性を破る効果」の影響を調べた。この効果がない場合、entanglement prethermalization が起こった後の状態は無限に長く持続する。一方、この効果が入ると entanglement prethermalization 後の状態は有限の時間しか持続せず、「熱平衡状態」へと緩和することが分かった。これは第1段階の緩和が前期熱平衡化(prethermalization)と考えられること

を示している。さらに対称性を破る効果を大きくすると entanglement prethermalization は消失し、直接「熱平衡状態」へと緩和するようになる(図2、灰色線)。

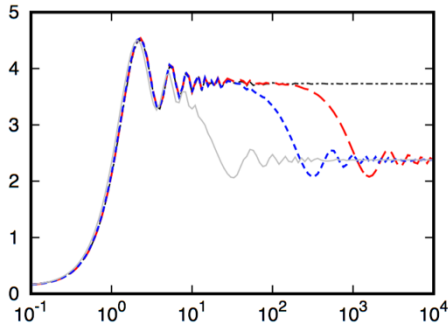


図 2: 物理量(2つの振動子の座標の差の自乗)の期待値の時間発展 黒は対称性を破る効果が無い場合、橙、青、灰色の順にこの効果が強くなった場合に対応する。

以上の成果は Physical Review E 誌に掲載された。

- (2) 多体ボソン系の朝永・ラッティンジャーモデルにおける entanglement-prethermalization を調べ、これが非局所的な保存量を考慮した一般化ギブスアンサンブルでよく記述されることを明らかにした。これは調和振動子モデルの機構が多体系でも発現することを示している。朝永・ラッティンジャーモデルは一次元量子系の低エネルギー有効理論として普遍的に現れるので、様々な一次元系の entanglement-prethermalization の機構が明らかになった。一方、朝永・ラッティンジャーモデルはガウシアン理論であるため多体のエネルギースペクトルに規則的な縮退が存在し、このために entanglement prethermalization の様子は Lieb-Liniger モデルのそれとは性質が異なることも明らかになった。Lieb-Liniger モデル等の非ガウシアンモデルについてはさらなる研究が必要だが、その出発点として朝永・ラッティンジャーモデルにおける entanglement-prethermalization の性質が詳細に理解できた意義は大きい。以上の結果は Physical Review A 誌に掲載された。
- (3) 以上一連の研究の帰結として、量子エンタングルメントがダイナミクスにおいてある種の制約を与えていると考えられる。

Prethermalization は様々な系で生じ、そこでは対称性や長距離相互作用が要因となって通常の熱平衡化を阻害する。この事実と対比し、entanglement prethermalization においては量子エンタングルメントが系のダイナミクスに制限を与え、熱平衡化を阻害していると考えることが出来る。熱平衡化・prethermalization に関する様々な研究とそれらの関係をまとめた総説論文が Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 誌に掲載された。

- (4) ダイナミクスに何らかの制約が内在して生じる非平衡定常状態について、実際の物質における実現可能性について研究をした。特に、TaS₂, TaSe₂ という遷移金属ダイカルコゲナイド物質群に注目した。これらの物質にレーザーパルス等の刺激を与えることで非平衡な定常状態が実現することが実験的に示されている。しかし、この非平衡定常状態がどのような機構で生じるのかについてはまだ完全に理解されているとは言えない。本研究では、これまで得た知見を活かせるのではないかと考えて、これらの物質の非平衡ダイナミクスについての研究を行った。これらの物質の電子状態を第一原理的に計算し、経験的タイトバインディングモデルの構築を行った。これに古典的な格子変形自由度を導入し、電子・格子からなるモデルを得た。このモデルで計算した電荷感受率のピークは実験的に知られている電荷密度波の波数とほぼ一致しており、よいモデルが構築できた。

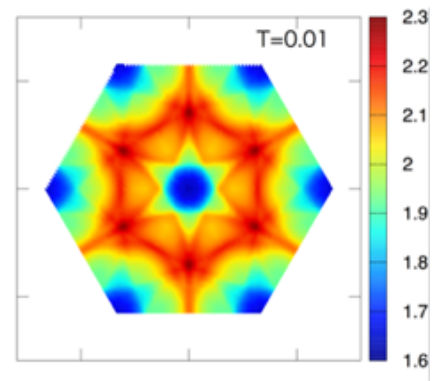


図 3: 経験的タイトバインディングモデルから計算したブリルアンゾーン上の電荷感受率 六角形の中心がΓ点、頂点がK点、辺の midpoint がM点を表す。約100Kの温度でΓM上にピークが現れ、これが incommensurate CDW を引き起こすと考えられる。

特に TaSe2 について、commensurate/incommensurate 二種類の電荷密度波状態を再現することにも成功した。さらに、低温の初期状態にレーザーパルスを照射し、系の電子密度や格子変形が時間変化する様子を捉えるシミュレーションも行った。電子相関や格子変形のモード結合、散逸などの効果はまだ取り入れられていないが、遷移金属ダイカルコゲナイドの光誘起ダイナミクスをシミュレートする土台が出来た。以上の研究成果について、国内外の研究会で報告を行った。

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 4 件)

- ① Takashi Mori, Tatsuhiko N. Ikeda, Eriko Kaminishi, Masahito Ueda, “Thermalization and prethermalization in isolated quantum systems: a theoretical overview”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 51, 112001(1)-112001(49) (2018). 査読有
- ② Marton Kanasz-Nagy, Yuto Ashida, Tao Shi, Catalin Pascu Moca, Tatsuhiko N. Ikeda, Simon Folling, J. Ignacio Cirac, Gergely Zarand, Eugene A. Demler, “Exploring the anisotropic Kondo model in and out of equilibrium with alkaline-earth atoms”, *Physical Review B* 97, 155156(1)-155156(20) (2018) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.97.155156
- ③ Eriko Kaminishi, Takashi Mori, Tatsuhiko N. Ikeda, Masahito Ueda, “Entanglement prethermalization in the Tomonaga-Luttinger model”, *Physical Review A* 97 013622(1)-013622(9) (2018) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevA.97.013622
- ④ Tatsuhiko N. Ikeda, Takashi Mori, Eriko Kaminishi, and Masahito Ueda, “Entanglement prethermalization in an interaction quench between two harmonic oscillators”, *Physical Review E* 95, 022129(1)-022129(8) (2017) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevE.95.022129

[学会発表] (計 5 件)

- ① 池田達彦, 米満賢治, 常次宏一, 「TaSe2 における電荷密度波の光誘起ダイナミクス」, 日本物理学会 秋季大会, 岩手大学 上田キャンパス, 2018 年 9 月 23 日
- ② Tatsuhiko N. Ikeda, Kenji Yonemitsu, Hirokazu Tsunetsugu, “Hartree-Fock study of the commensurate charge density wave in 1T-TaS2 and its photo-induced dynamics”, International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS-2017, Institute of Scientific Studies (Cargese, France) 2018 年 8 月 23 日
- ③ Tatsuhiko N. Ikeda, Kenji Yonemitsu, Hirokazu Tsunetsugu, “Hartree-Fock study of the commensurate charge density wave in 1T-TaS2 and its photo-induced dynamics”, PIPT6- 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, 仙台国際センター, 2018 年 6 月 5, 6 日
- ④ Tatsuhiko N. Ikeda, Takashi Mori, Eriko Kaminishi, Masahito Ueda, “Entanglement pre-thermalization in an interaction quench between two harmonic oscillators”, Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations, 京都大学基礎物理学研究所, 2017 年 9 月 28 日
- ⑤ 池田達彦, 「孤立量子系の非平衡定常状態に関する最近の話題」, 統計物理学懇談会, 慶應大学日吉キャンパス, 2017 年 3 月 6 日

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/tnikeda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 達彦 (IKEDA, Tatsuhiko)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号: 60780583