

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14628

研究課題名（和文）冷却原子気体における熱平衡化ダイナミクスの普遍性

研究課題名（英文）Universality of thermalization dynamics in cold atomic gases

研究代表者

藤本 和也 (Fujimoto, Kazuya)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：40838059

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）：冷却原子系における緩和現象を量子力学を用いて理論的に研究して、量子ダイナミクスの背後に潜む普遍的な性質を研究した。本研究課題のキーワードは動的スケーリング則である。これは非平衡ダイナミクスにおいて時間変化する物理量の相関関数などに現れるスケーリング則であり、系の普遍的な性質を理解する上で重要な役割を果たす。研究期間中に、1次元量子系の界面粗さ成長、多成分ボース・アインシュタイン凝縮体におけるドメイン成長などで動的スケーリング則を数値計算と解析計算で明らかにした。特に、界面粗さ成長の研究では界面高さ演算子を初めて導入して、その1次元量子ダイナミクスを調べた先駆的な研究成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時間とともに変化する非平衡現象は、これまで多くの研究が行われており、いまなお新しい発見がある。とりわけ、量子力学で記述される系の非平衡現象を理解することは、現代物理学における難問の一つと認識されており、その解明は基礎科学、工学的な応用の両視点から極めて重要である。本研究課題では、冷却原子系の実験を想定した理論モデルを用いて、量子ダイナミクスに現れる動的スケーリング則の普遍性の一端を理論的に発見できた点に学術的な意義がある。本研究は理論的な結果が中心であったが、本成果が量子ダイナミクスの理解を深めるための今後の実験検証の一つの足がかりになると期待される。

研究成果の概要（英文）：I have theoretically studied relaxation dynamics in ultracold atoms described by quantum mechanics, and have studied universal properties behind quantum dynamics. The keyword in this research proposal is a dynamical scaling law. When studying time-dependent correlation functions in quantum dynamics, dynamical scaling laws often emerge and have fundamental information concerning universal aspects of the dynamics. During the four-year study period, I have numerically and analytically investigated dynamical scaling laws for surface-growth dynamics in one-dimensional quantum systems, domain growth in multi-component Bose-Einstein condensates, etc. In particular, in the study of surface-growth dynamics, I introduced a surface-height operator by employing a relation between classical surface-growth model and one-dimensional fluctuating hydrodynamics. Then I obtained pioneering results for the surface-roughness growth in one-dimensional quantum systems.

研究分野：冷却原子系、統計物理

キーワード：動的スケーリング則 界面成長 ボース・アインシュタイン凝縮体

1. 研究開始当初の背景

冷却原子系はこれまで非平衡統計物理学の基礎的な側面を理解する上で重要な役割を果たしてきた。研究開始当時、孤立した量子系において初期状態からある平衡状態に至る緩和ダイナミクスに系の詳細に依存しない普遍的な動的スケールング則の存在が活発に研究されており、実験的には冷却原子系を舞台として量子ダイナミクスに現れる動的スケールング則が実験的に検証されていた。

2. 研究の目的

冷却原子系を想定した量子系を用いて、緩和ダイナミクスの性質を理論的に調べる。特に、動的スケールング則に注目して、その普遍的な性質を探索することを目的とした。

3. 研究の方法

冷却原子系で実現している量子系として、多成分 Bose-Einstein 凝縮体、1次元 Bose-Hubbard 系などがある。本研究ではこれらを記述する理論モデルを用いて、その緩和ダイナミクスを粗視化ダイナミクス、界面粗さ成長、共鳴現象の視点から理論的に調べる。

4. 研究成果

(1) 2成分 Bose-Einstein 凝縮体における粗視化ダイナミクス

名古屋大学の川口由紀准教授、お茶の水大学の工藤和恵准教授と共同で、粒子数差のある2成分 Bose-Einstein 凝縮体における粗視化ダイナミクスを2成分 Gross-Pitaevskii 方程式に基づいて、理論的に研究した。このシステムでは2成分が混合した状態から時間発展すると、相分離現象が生じて、ドメイン成長を示す。図1が数値計算で得た2つ目の成分の粒子数分布の時間変化を表しており、オレンジ色のドメイン構造が時間と共に成長していることがわかる。本研究では、このダイナミクスにおける巨視的波動関数の相関関数に動的スケールング則が現れることを数値的に発見した。さらに、相関長が冪的成長を示すことに加えて、その冪指数が時間とともに変化する機構を理論的に提案した。本研究成果は論文[Physical Review A **101**, 023608 (2020)]として発表した。

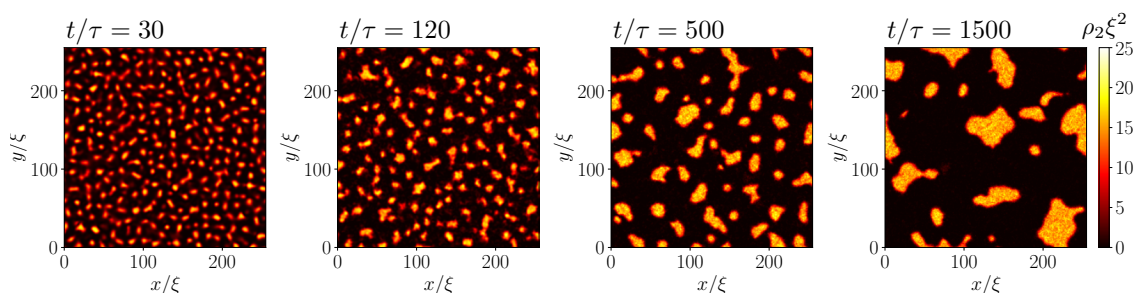


図1 2成分 Gross-Pitaevskii 方程式の数値計算結果。2つ目の成分の2次元密度分布の時間変化を表している。左図から右図に向かって時間が経過している。[Physical Review A **101**. 023608 (2020)]

(2) 反強磁性 Spinor Bose-Einstein 凝縮体における磁気ソリトン

2019年の論文[Physics Review Letters **122**, 173001 (2019)]において、反強磁性相互作用する Spinor Bose-Einstein 凝縮体の緩和ダイナミクスでは、局所的に磁化した磁気ソリトンが重要な役割をすることを我々は報告した。しかし、2019年当時の時点では、そもそも磁気ソリトンが実験的に観測されていなかった。そこで、我々は東京大学の上田正仁教授、濱崎立資氏とともに Georgia Institute of Technology の Chandra Raman 准教授が率いる実験グループと共同研究を行い、磁気ソリトンの実験観測を行った。我々は解析・数値計算から予想されるソリトンの移動速度、密度分布を実験結果と比較したところ、それらが良い一致を示すことが確認できた。これは、反強磁性相互作用する Spinor Bose-Einstein 凝縮体の緩和ダイナミクスを理解する上で重要な結果である。本研究成果は論文[Physical Review Letters **125**, 030402 (2020)]として発表した。

(3) Spinor Bose-Einstein 凝縮体における Shapiro 共鳴

名古屋大学の川口由紀准教授、今枝祐哉氏と共同研究を行い、スピン自由度を持つ Spinor Bose-Einstein 凝縮体の振動外場に対する応答を理論的に研究した。先行研究では、空間的に強く閉じ込められた空間自由度がない Spinor Bose-Einstein 凝縮体を用いて、2 次 Zeeman 項を振動させることで Shapiro 共鳴が理論・実験的に調べられていた。一方、一般的な状況では Spinor Bose-Einstein 凝縮体は空間的に強く閉じ込められておらず、その場合には空間自由度を考慮しなければならない。我々は空間自由度を含む 1 次元 Spinor Gross-Pitaevskii 方程式を用いて、Shapiro 共鳴を調べた。まず、方程式の線形近似を行い、Floquet 理論に基づいて共鳴点、共鳴幅を解析・数値的に調べた。さらに、Gross-Pitaevskii 方程式を数値計算することで、線形近似では取り扱えない領域を調べ、共鳴後の非平衡ダイナミクスを調べた。図 2 がその数値計算結果であり、初期ダイナミクスで共鳴により特徴的な縞模様のスピン構造が形成されたあと、乱れた状態へと変化する様子を表している。本研究結果は論文[Physics Review Research **3**, 043090 (2021)]として発表した。

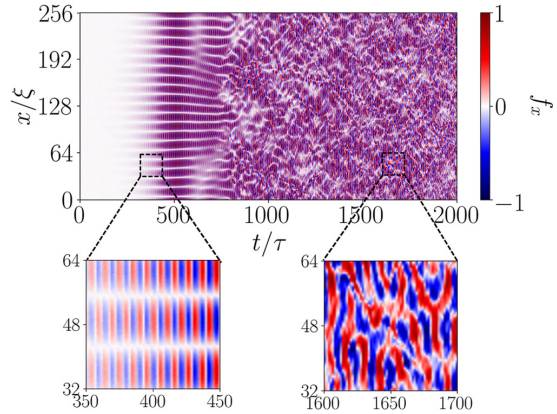


図 2 Spinor Gross-Pitaevskii 方程式の数値計算結果。スピン密度ベクトルの x 成分の 2 次元密度分布の時間変化を表している。[Physics Review Research **3**, 043090 (2021)]

(4) 孤立 1 次元量子系における界面粗さ成長

古典統計力学において、1 次元界面成長の非平衡現象には系の詳細に依存しない普遍的な性質があることが明らかにされてきた。代表的な理論モデルが Kardar-Parisi-Zhang 方程式であり、成長する界面の非平衡揺らぎに普遍的な動的スケールング則が現れる。特に、界面の 2 次キュムラントに対応する界面粗さの動的スケールング則は Family-Vicsek スケールング則と呼ばれており、古典系を舞台として精力的に研究されてきた。

このような背景のもと、名古屋大学の川口由紀准教授、理研の濱崎立資氏と共同で我々は 1 次元 Bose 粒子系と 1 次元 Fermi 粒子系を用いて、Family-Vicsek スケールング則の有無を理論的に調べた。本研究のアイデアは、1 次元界面成長モデルと揺らぐ 1 次元流体力学との対応関係を 1 次元量子系に拡張した点にある。これにより、界面高さに対応する演算子を 1 次元 Bose 粒子系と 1 次元 Fermi 粒子系に導入することができ、その 2 次キュムラントで 1 次元量子系の界面粗さを定義することが可能となった。我々は 1 次元 Bose-Hubbard 模型の数値計算を中心に行い、1 次元量子系の界面粗さが Family-Vicsek スケールング則を示すことを明らかにした。図 3 が対応する界面粗さの数値計算結果である。さらに、我々は 1 次元自由 Fermi 粒子系にランダムポテンシャルを加えた系を考え、Anderson 局在が Family-Vicsek スケールング則に与える影響を調べた。この研究を通して、量子系の界面粗さとエンタングルメント・エントロピーに関することを数値・解析的に明らかにした。本研究結果は論文[Physical Review Letters **124**, 210604 (2020), Physical Review Letters **127**, 090601 (2021)]として発表した。

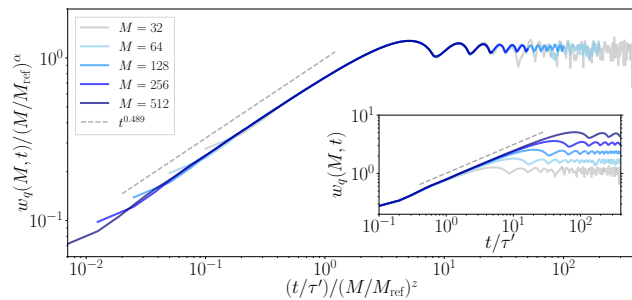


図 3 1 次元 Hard-core boson モデルにおける界面粗さの時間発展。挿入図がリスケールする前のデータであり、メインの図では縦軸・横軸をシステムサイズのべき乗でリスケールしている。リスケール後の色の異なる曲線がひとつの曲線に重なっている。これが Family-Vicsek スケールング則である。[Physical Review Letters **124**, 210604 (2020)]

(5) 開放 1 次元量子系における界面粗さ成長

上記(4)の研究は環境との相互作用がない孤立量子系を研究対象としていた。しかし、実際の実験系を考えると、環境との相互作用は必ずしも無視できるとは限らない。そこで、我々は名古屋大学の川口由紀准教授、理研の濱崎立資氏と共同で環境との相互作用により生じる散逸が Family-Vicsek スケーリング則の性質、有無にどのような影響を与えるかを理論的に研究した。用いた理論モデルは、Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式であり、そのハミルトニアンは 1 次元格子上的自由 Bose 粒子系と自由 Fermion 粒子系を採用した。散逸を記述するジャンプ演算子は、位相緩和、インコヒーレント対称ホッピングなどを用いた。数値的に Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式を解くことで、Family-Vicsek スケーリング則が開放量子系においても現れる場合があることを発見した。図 4 がその結果であり、1 次元格子上的自由 Bose 粒子系と自由 Fermi 粒子系に位相緩和を加えた Lindblad 方程式における界面粗さの数値計算結果を示しており、Family-Vicsek スケーリング則が現れていることがわかる。一方、このような散逸を加えると、スケーリング則を特徴づけるスケーリング指数が著しく変化することを数値的に発見した。我々は微分方程式に対するくりこみ群解析を行うことで、この変化を解析的に説明した。本研究結果は論文[Physical Review Letters **129**, 110403 (2022)]として発表した。

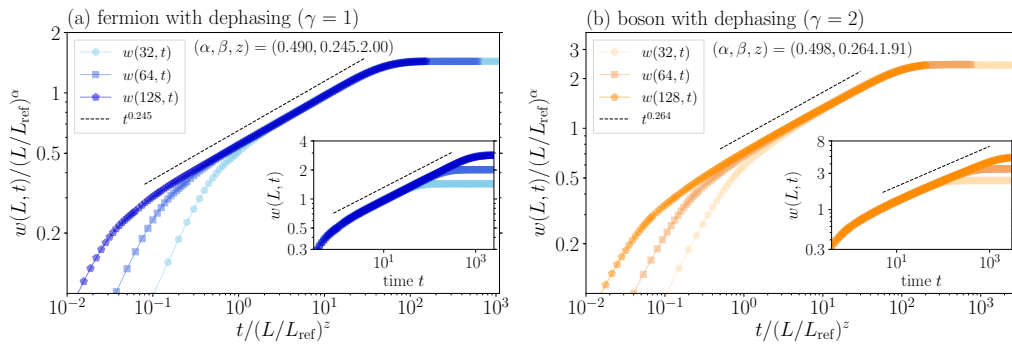


図 4 位相緩和を含む 1 次元格子上的自由 Fermi 粒子系(左図)と自由 Bose 粒子系(右図)における界面粗さの時間発展。挿入図がリスケールする前のデータであり、メインの図では縦軸・横軸をシステムサイズの冪乗でリスケールしている。[Physical Review Letters **129**, 110403 (2022)]

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 2件）

1. 著者名 Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki	4. 巻 129
2. 論文標題 Impact of Dissipation on Universal Fluctuation Dynamics in Open Quantum Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.110403	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 Imaeda Yuya, Fujimoto Kazuya, Kawaguchi Yuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Spin-wave growth via Shapiro resonances in a spinor Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043090	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 Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki	4. 巻 127
2. 論文標題 Dynamical Scaling of Surface Roughness and Entanglement Entropy in Disordered Fermion Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 90601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.090601	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 Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki	4. 巻 124
2. 論文標題 Family-Vicsek Scaling of Roughness Growth in a Strongly Interacting Bose Gas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 210604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.210604	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 Chai X., Lao D., Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Ueda Masahito, Raman C.	4. 巻 125
2. 論文標題 Magnetic Solitons in a Spin-1 Bose-Einstein Condensate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 30402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.030402	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 Chai Xiao, Lao Di, Fujimoto Kazuya, Raman Chandra	4. 巻 3
2. 論文標題 Magnetic soliton: From two to three components with $SO(3)$ symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L012003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.L012003	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 Fujimoto Kazuya, Haneda Kazunori, Kudo Kazue, Kawaguchi Yuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Scale-invariant relaxation dynamics in two-component Bose-Einstein condensates with large particle-number imbalance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 23608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.023608	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 6件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kazuya Fujimoto
2. 発表標題 Family-Vicsek Scaling of Surface-Roughness Dynamics in a One-Dimensional Bose-Hubbard Model
3. 学会等名 29th Annual International Laser Physics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本和也
2. 発表標題 冷却原子気体における非平衡揺らぎの普遍的スケーリングの研究
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 藤本和也、濱崎立資、川口由紀
2. 発表標題 開放量子系における界面粗さ成長
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 今枝祐哉、藤本和也、川口由紀
2. 発表標題 スピノール・ボース・アインシュタイン凝縮体のドメイン壁におけるシャピロ共鳴
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 Kazuya Fujimoto
2. 発表標題 Dynamical scaling of roughness growth in quantum many-body systems
3. 学会等名 Quantized Vortices and Nonlinear Waves（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本和也、濱崎立資、川口由紀
2. 発表標題 乱れたポテンシャル中のフェルミ粒子系における非平衡界面揺らぎの成長則
3. 学会等名 日本物理学会、第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今枝祐哉、藤本和也、川口由紀
2. 発表標題 スピノールボース・アインシュタイン凝縮体における非一様シャピロ共鳴
3. 学会等名 日本物理学会、2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Di Lao, Xiao Chai, Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, Masahito Ueda, Chandra Raman
2. 発表標題 Magnetic solitons in a spin-1 Bose-Einstein condensate
3. 学会等名 51st Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤本和也、濱崎立資、川口由紀
2. 発表標題 強く相互作用するBose気体におけるFamily-Vicsekスケーリング
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 佐野融人、坪田誠、藤本和也
2. 発表標題 ボース凝縮体における乱流カスケードの異方性
3. 学会等名 日本物理学会、2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Fujimoto
2. 発表標題 Surface-roughness dynamics in a one-dimensional Bose-Hubbard model
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本和也
2. 発表標題 1次元量子系における揺らぐ界面成長の動的スケーリング
3. 学会等名 熱場の量子論と応用 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本和也
2. 発表標題 1次元量子系における揺らぎの成長と伝播
3. 学会等名 統計物理学懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本和也, 笹本智弘
2. 発表標題 自由フェルミオン系の相関伝播に現れるGOE Tracy-Widom分布
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 米屋斗馬, 藤本和也, 川口由紀
2. 発表標題 スピン1マイクロBECでの量子相転移点近傍における多体効果
3. 学会等名 日本物理学会、2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野充人, 藤本和也, 川口由紀
2. 発表標題 振動外場を用いた量子多体系のカレント制御
3. 学会等名 日本物理学会、2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山湧介, 藤本和也, 中島秀太, 川口由紀
2. 発表標題 量子kicked rotorを用いたフロケ・トポロジカル相の提案
3. 学会等名 日本物理学会、2022年秋季大会
4. 発表年 2022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			
米国	Georgia Institute of Technology			