

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03468

研究課題名（和文）レーザー冷却における原子のダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Investigation on atomic dynamics of a subrecoil laser cooling

研究代表者

秋元 琢磨 (Akimoto, Takuma)

東京理科大学・理工学部物理学科・准教授

研究者番号：30454044

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、レーザー冷却過程における原子のダイナミクスの非定常性を無限測度エルゴードも基にして解明することが目的である。本研究期間では、サブリコイルレーザー冷却の1粒子のダイナミクスに注目し、その確率モデルを用いて、そのエルゴード特性を明らかにしてきた。2020年に Phys. Rev. E に出版された論文では、一般のセミマルコフ過程における無限測度エルゴード理論の構築に成功した。そして、これらの理論を基にして、2021年に Phys. Rev. Lett.、2022年に J. Chem. Phys. にサブリコイルレーザー冷却の確率モデルの無限測度エルゴード理論の構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究プロジェクトでは、サブリコイルレーザー冷却における原子のダイナミクスの非定常性の基礎付けを行うことを目的としている。プロジェクト期間内で、レーザー冷却と関係したセミマルコフ過程とレーザー冷却の確率モデルを用いて、観測量の時間平均の振る舞いを明らかにしてきた。これらの理論は、数学の無限測度エルゴード理論と密接な関係があり、これまでに無限測度エルゴード理論の拡張となっている。また、無限測度エルゴード理論をレーザー冷却過程へ応用することにより、確率モデルのパラメータにおいてエルゴード特性が転移する点において冷却の効率が最大となることがわかった。

研究成果の概要（英文）：A purpose of my research project is to investigate a non-stationary atomic dynamics in a subrecoil laser cooling on the basis of the infinite ergodic theory. In this research project, we focus on an atomic dynamics of a subrecoil laser cooling. Using stochastic models of subrecoil laser cooling, we have provided the ergodic property of the atomic dynamics. In 2020, we found the infinite ergodic theory for a semi-Markov process, which is published in Phys. Rev. E. Based on the infinite ergodic theory, we provided the infinite ergodic theory for a stochastic model of subrecoil laser cooling, whose results were published in Phys. Rev. Lett. and J. Chem. Phys. in 2021 and 2022, respectively.

研究分野：統計物理学

キーワード：非平衡現象 無限測度エルゴード理論 レーザー冷却

1. 研究開始当初の背景

原子の極低温への冷却は、工学的な技術開発だけではなく科学の飛躍的進歩において重要な役割を果たしている。特に、運動量空間上の不均一なランダムウォークを基盤としたレーザー冷却 (subrecoil laser cooling) は、それまでの冷却メカニズムでは乗り越えることができなかった温度限界を超える冷却を可能にした。この冷却モデルは様々な実験で実装されているが、冷却される原子のダイナミクスについては、実験での直接的な観測が困難なため、その詳細は明らかになっていない。原子が極低温まで冷却される過程は、原子の運動量がゼロへ向かっていく、言わば、非定常な過程である。このような非定常な過程のダイナミクスを明らかにすることは、従来の統計物理の枠組みを超えた研究であり、物理の新たな研究分野の開拓に繋がる挑戦的な研究である。本研究では、subrecoil laser cooling における原子の冷却過程を記述する確率モデルを用い、原子の運動量の不変分布を明らかにすることと冷却されている原子のダイナミクスを解明することを目的としている。また、冷却モデルを拡張することにより、新たな冷却メカニズムを提案し、実験への実装も目指している。

2. 研究の目的

1980年代後半からドップラー冷却とは全く異なるメカニズムの冷却手法が提案された。この手法では、原子の運動量をランダムに変化させるだけで (運動量空間上での対称なランダムウォークを行う)、運動量を小さくさせる向きに摩擦がない (バイアスのないランダムウォーク)。しかし、運動量空間上で不均一なジャンプ率 (単位時間あたりにランダムウォーカーがジャンプする平均数) を導入することにより冷却を可能にしている (図 1)。興味深いことに、このランダムウォークモデルはバイアス (運動量ゼロに向かう力) が無いにもかかわらず、運動量は分布としてゼロに向かっていくのである。つまり、ほとんど全ての原子の運動量は、時間の経過とともに小さくなっていく。このような分布関数や統計量が時々刻々と変化する非定常な過程では、従来の定常性を仮定した確率論によるアプローチができないため、その理論的取り扱いが困難になっている。これまで、何故、そして、どのように運動量がゼロになるか直感的には理解されているが、ミクロなダイナミクスからの冷却メカニズムの解明されていない。したがって、このような非定常現象を統一的に理解するための理論的な枠組みの構築が期待されている。本研究の目的は、レーザー冷却のモデルである運動量空間上の不均一なジャンプ率を持つランダムウォークにおける、運動量の時間発展に関するマスター方程式の導出、および、それを解くことにより、レーザー冷却のメカニズムをミクロなダイナミクスから明らかにし、非定常な冷却過程における普遍法則を探求することである。特に、形式的に解いたマスター方程式の定常解が規格化できなくなる (無限測度) ことが知られており、その無限測度がレーザー冷却においてどのような役割を果たしているかを明らかにし、新たな冷却メカニズムを提案する。

3. 研究の方法

subrecoil laser cooling の確率モデルとして、空間的に不均一なジャンプ率 (単位時間あたりにランダムウォーカーがジャンプする平均数) を持つ運動量空間上のランダムウォークを

考える。このモデルに対して、マスター方程式を導出して、運動量分布の時間発展を数値的に及び解析的に求める。そして、ランダムウォークモデルのシミュレーションを行うことによりエルゴード性の破れを検証する。また、ランダムウォークモデルのジャンプ分布を一様分布にしたモデル (exponential model) を考え、その理論、特に、プロパゲータの漸近挙動、及び、力学的エネルギーの時間平均の振る舞いを明らかにする。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、セミマルコフ過程及びレーザー冷却過程のエルゴード特性の解明の二つである。

第一の成果として、待ち時間と状態変数の値が互いに依存したセミマルコフ過程に対するエルゴード特性を解析的に導出した。特に、観測量の時間平均が分布するという分布極限定理を導出した。この結果は、無限測度エルゴード理論の拡張となっている。このモデルは、レーザー冷却過程の運動量の時間発展と似たものとなっており、レーザー冷却モデルへの応用が期待できる。この成果は、T. Akimoto, E. Barkai, and G. Radons, “Infinite invariant density in a semi-Markov process with continuous state variables,” *Phys. Rev. E* 101, 052112 (2020) に出版された。

第二の成果として、レーザー冷却の確率モデル (exponential model) のエルゴード特性を解析的に導出した。Exponential model は、レーザー冷却の運動量の時間発展を記述するモデルで待ち時間が運動量に依存するモデルである。待ち時間は、運動量に依存した指数分布に従うが運動量が小さくなると待ち時間が長くなり、段々と運動量がゼロに向かって冷却されていく。このモデルにおいて、力学的エネルギーの時間平均に対する分布極限定理を導出した。そして、分布関数に転移が起こることを発見した。この転移点では、力学的エネルギーの不変密度に関する平均が発散している。さらに、冷却の効率がこの転移点で最大となることも発見した。これらの成果は、E. Barkai, G. Radons, and T. Akimoto, “Transitions in the ergodicity of subrecoil-laser-cooled gases,” *Phys. Rev. Lett.* 127, 140605 (2021) 及び E. Barkai, G. Radons, and T. Akimoto, “Gas of sub-recoiled laser cooled atoms described by infinite ergodic theory,” *J. Chem. Phys.* 156, 044118 (2022) に出版された。

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 3件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Akimoto Takuma, Sera Toru, Yamato Kosuke, Yano Kouji	4. 巻 102
2. 論文標題 Aging arcsine law in Brownian motion and its generalization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.032103	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 Akimoto Takuma, Barkai Eli, Radons Gunter	4. 巻 101
2. 論文標題 Infinite invariant density in a semi-Markov process with continuous state variables	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.101.052112	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 Sano Kaito, Mitsui Takahito, Akimoto Takuma	4. 巻 102
2. 論文標題 Reduction of the synchronization time in random logistic maps	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 62209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.062209	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 Yamamoto Eiji, Akimoto Takuma, Mitsutake Ayori, Metzler Ralf	4. 巻 126
2. 論文標題 Universal Relation between Instantaneous Diffusivity and Radius of Gyration of Proteins in Aqueous Solution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 128101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.128101	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 Takuma Akimoto and Keiji Saito	4. 巻 99
2. 論文標題 Exact results for first-passage-time statistics in biased quenched trap models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.052127	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 Tomoshige Miyaguchi, Takashi Uneyama, and Takuma Akimoto	4. 巻 100
2. 論文標題 Brownian motion with alternately fluctuating diffusivity: Stretched-exponential and power-law relaxation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 12116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.100.012116	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 Yuto Hachiya, Takashi Uneyama, Toshihiro Kaneko, and Takuma Akimoto	4. 巻 151
2. 論文標題 Unveiling diffusive states from center-of-mass trajectories in glassy dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 34502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5100640	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 Takuma Akimoto, Andrey G. Cherstvy, and Ralf Metzler	4. 巻 98
2. 論文標題 Ergodicity, rejuvenation, enhancement, and slow relaxation of diffusion in biased continuous-time random walks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 22105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.98.022105	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 Takashi Uneyama, Tomoshige Miyaguchi, and Takuma Akimoto	4. 巻 99
2. 論文標題 Relaxation functions of the Ornstein-Uhlenbeck process with fluctuating diffusivity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 32127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.032127	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4件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 秋元琢磨, 蜂谷優人, 畝山多加志, 金子敏宏
2. 発表標題 過冷却液体における重心軌道から拡散状態の変化を検出する手法
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Akimoto
2. 発表標題 First-Passage-Time Statistics in a Biased Quenched Trap Model
3. 学会等名 Sino-German Bilateral Symposium Anomalous and Non-Ergodic Diffusion: Modeling, Theory, Application, and Simulation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Akimoto
2. 発表標題 Infinite invariant measure in a heterogeneous diffusion process
3. 学会等名 Research on the Theory of Random Dynamical Systems and Fractal Geometry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋元琢磨, Eli Barkai, Guenter Radons
2. 発表標題 速度更新過程における無限測度と分布極限定理
3. 学会等名 日本物理学会第 74 回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>How does a protein shape affect its diffusivity? https://www.youtube.com/watch?v=Ky_p1A9VS5c</p>
--

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
---------	---------