

令和 4 年 5 月 13 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：2019～2021

課題番号：19K23424

研究課題名（和文）単一原子観測/制御下の量子多体ダイナミクス解明に向けた非摂動手法構築

研究課題名（英文）Theoretical studies on nonperturbative methods of analyzing quantum many-body dynamics subject to single-atom-resolved measurement and control

研究代表者

蘆田 祐人 (Ashida, Yuto)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：00845464

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、冷却原子系や共振器に閉じ込められた量子-光物質系に代表される「人工量子系」を、非摂動的に解析するための手法を開発した。これらの手法を用いることで、特にリウドベルグ状態を用いた非平衡多体系において新奇なダイナミクスを見出し、また共振器物質系においては強誘電転移が光物質結合により生じることを理論的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築された理論手法により、これまで解析が困難であったクラスの非平衡多体問題の解明に成功した。また、共振器物質系では量子的な光に誘起された量子相の制御が可能であることを示唆する結果が得られた。これらの成果は未来の新規デバイスあるいは物性制御の可能性を開くものとともに、将来の量子情報技術にも波及効果が期待できるものである。

研究成果の概要（英文）：We have developed nonperturbative methods to analyze artificial quantum systems, including cold atomic systems and cavity quantum electrodynamical materials. On the basis of these methods, we found novel dynamics in nonequilibrium Rydberg gases as well as the possibility of realizing an equilibrium ferroelectric transition in cavity confined heterostructured materials.

研究分野：量子多体物理・量子光学

キーワード：量子多体物理 量子光学 非平衡

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

高い制御性を有する量子気体系で、多原子集団のダイナミクスを単一原子分解能で微視的に観測/制御する事が近年実現した。ミクロな運動の詳細は観測/制御できないという仮定のもとに成立してきた従来の物性/統計物理学の枠組みは、このような状況では破綻し、異なる一般原理に基づいた基礎理論が必要となる。一方で、単一原子制御は固体物理では実現し得なかった新しいクラスの量子物質の研究を可能にする。このように、人工量子系において新しいクラスの量子多体系が次々と実現されており、その基礎理論の整備が喫緊の課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究の開始当初の目的は、上述した単一原子観測/制御下の非平衡な量子多体問題を解明するための基礎理論を構築し、物性/統計物理学の新たなフロンティアを拓くことである。特に、相互作用が強く摂動的な取り扱いが困難な問題を取り扱えるような非摂動手法の構築を念頭に研究を進めることを目的としていた。

## 3. 研究の方法

冷却原子系、特にリウドベルグ原子を用いた非平衡多体系の研究では、ユニタリ変換とガウシアン変分状態を用いた理論手法を用いた。また、共振器物質系では場の理論的手法とエンタングルメントを解消するユニタリ変換の手法を併用した。

## 4. 研究成果

リウドベルグ原子気体に関する研究では、近似的な可積分性により熱化が抑制され、新規な長寿命振動ダイナミクスが生じることを、量子不純物模型と上述の変分法をもちいて明らかにした。具体的には擬スピン自由度を考慮したボソンの冷却原子系を考え、そのうち一部をリウドベルグ状態に励起することで、実行的にセントラルスピン模型と近藤模型が融合した物理系が実現することをまず示した。この問題は従来の理論手法では解析が困難であったが、今回構築した理論手法によりその非平衡ダイナミクスが初めて明らかとなった。本成果はハーバード大学、マックスプランク研究所、中国科学技術院との国際共同研究である。

共振器物質系では量子的な光により強誘電体転移が生じる可能性を理論的に示し、さらに強結合領域を解析するための非摂動的手法の構築にも成功した。具体的には、まず共振器中の真空量子電磁場揺らぎと、物質中のフォノン励起が強く結合した模型を場の理論によりまず定式化した。次に変分法を用いることで、共振器閉じ込めに誘起された強誘電転移が生じ得ることを論証した。これは量子光学の文脈では超放射転移とも解釈できる。本研究では、既存の研究とは異なり、曖昧さの残る近似や仮定に頼らず量子電磁場誘起相転移の可能性を初めて明確に示した。この成果はハーバード大学、スイス連邦工科大学、マックスプランク研究所、オックスフォード大学との国際共同研究である。さらに共振器量子電磁力学に関する研究では、より一般的な状況を考え、物質と量子電磁場の相互作用が強く、従来のクーロンゲージでは強束縛模型などの有効記述が破綻する状況を考察した。特に、この困難を解決するために、光物質相互作用が強い極限で光と物質の量子もつれを漸近的に完全に解ける新たなユニタリ変換を構築した。この成果はハーバード大学、スイス連邦工科大学との国際共同研究である。

その他にも非平衡開放系に関して当初予定していた以上の成果が得られた。特に、アクティブマターで実現する非平衡トポロジカル現象について一定の成果が得られた。具体的には、従来のバルクトポロジではなく、非エルミート系に特有な例外点として知られる構造で保護された特異なエッジモードが生じることを見出した。さらに、このエッジモードが非線形振動現象に及ぼす影響についても考察した。

これらの成果は、合計 12 編の論文として査読付き国際誌から出版され、また合計 6 件の国際会議で招待講演として発表されるなど、国際的にも高く評価された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Fuji Yohei, Ashida Yuto	4. 巻 102
2. 論文標題 Measurement-induced quantum criticality under continuous monitoring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 54302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.054302	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 Wang Zhikang T., Ashida Yuto, Ueda Masahito	4. 巻 125
2. 論文標題 Deep Reinforcement Learning Control of Quantum Cartpoles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 100401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.100401	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 Y. Takasu, T. Yagami, Y. Ashida, R. Hamazaki, Y. Kuno and Y. Takahashi	4. 巻 2020
2. 論文標題 PT-symmetric non-Hermitian quantum many-body system using ultracold atoms in an optical lattice with controlled dissipation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 12A110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa094	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 Cosmic R., Kawabata K., Ashida Y., Ikegami H., Furukawa S., Patil P., Taylor J. M., Nakamura Y.	4. 巻 102
2. 論文標題 Probing XY phase transitions in a Josephson junction array with tunable frustration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.094509	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 Yamamoto Kazuki, Ashida Yuto, Kawakami Norio	4. 巻 2
2. 論文標題 Rectification in nonequilibrium steady states of open many-body systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043343	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 Sone Kazuki, Ashida Yuto, Sagawa Takahiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Exceptional non-Hermitian topological edge mode and its application to active matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19488-0	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 Ashida Yuto, Imamoglu Atac, Faist Jerome, Jaksch Dieter, Cavalleri Andrea, Demler Eugene	4. 巻 10
2. 論文標題 Quantum Electrodynamical Control of Matter: Cavity-Enhanced Ferroelectric Phase Transition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 41027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.10.041027	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 Matsumoto Norifumi, Kawabata Kohei, Ashida Yuto, Furukawa Shunsuke, Ueda Masahito	4. 巻 125
2. 論文標題 Continuous Phase Transition without Gap Closing in Non-Hermitian Quantum Many-Body Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 260601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.260601	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 Ashida Yuto, Sagawa Takahiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Learning the best nanoscale heat engines through evolving network topology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00553-z	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 Kazuki Sone, Yuto Ashida	4. 巻 123
2. 論文標題 Anomalous Topological Active Matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 205502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.205502	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 Ashida, Tao Shi, Richard Schmidt, H. R. Sadeghpour, J. Ignacio Cirac, Eugene Demler	4. 巻 123
2. 論文標題 Quantum Rydberg Central Spin Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 183001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.183001	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 Yuto Ashida, Tao Shi, Richard Schmidt, H. R. Sadeghpour, J. Ignacio Cirac, Eugene Demler	4. 巻 100
2. 論文標題 Efficient variational approach to dynamics of a spatially extended bosonic Kondo model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.100.043618	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

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Shedding quantum light on quantum many-body systems, Theoretical studies of topological phases of matter, Kyoto-Zoom hybrid meeting
3. 学会等名 Kyoto-Zoom hybrid meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 量子的な光を用いた物質制御：真空電磁場に誘起された強誘電転移
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 Y. Ashida
2. 発表標題 差分進化を用いた最適なナノ熱電熱機関の探索
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 Y. Ashida
2. 発表標題 非平衡開放系の物理
3. 学会等名 KEK連携研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Ashida
2. 発表標題 Quantum electrodynamic control of matter (Planned)
3. 学会等名 Shedding quantum light on strongly correlated materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Ashida
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics and thermalization in open quantum many-body systems (Planned)
3. 学会等名 META2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Ashida
2. 発表標題 Quantum many-body physics in open systems
3. 学会等名 Topological phenomena in non-Hermitian and non-equilibrium systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Ashida
2. 発表標題 Quantum Rydberg central spin problem: remnant of integrability in atomic gases
3. 学会等名 Workshop on Recent Progress in Mathematical and Statistical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Yuto Ashida
2. 発表標題 Quantum criticality and nonequilibrium phases in non-Hermitian systems
3. 学会等名 META2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 蘆田祐人
2. 発表標題 リュードベルグ原子気体における近藤・セントラルスピン問題
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yuto Ashida	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 243
3. 書名 Quantum Many-Body Physics in Open Systems: Measurement and Strong Correlations	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学蘆田研究室  <a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/ashida-g/home.html">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/ashida-g/home.html</a>          Yuto Ashida Web Site  <a href="https://sites.google.com/site/yutoashida/homejp">https://sites.google.com/site/yutoashida/homejp</a></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
---------	---------