

令和 6 年 5 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13859

研究課題名（和文）非平衡開放系における量子多体物性の非摂動手法に基づく研究

研究課題名（英文）Theoretical studies of nonequilibrium open systems using nonperturbative approaches

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：従来の物性物理学や統計力学の枠組みは、熱平衡にある物理系の法則や多彩な現象を解明する上で多大な成功を収めてきた。一方で、エネルギーや物質の流入/散逸を伴う「非平衡開放系」の理解は未だ発展途上である。外界との結合が弱く外部環境の効果が摂動的に取り扱える領域の理解はここ数年で飛躍的に進んだが、結合が強い非摂動領域に関しては、そこで発現する物理現象はおろかその基礎理論も未開拓であった。本研究では、上述した外界環境と強く相互作用し非摂動的取り扱いが本質的に重要となる非平衡開放系を記述する基礎理論を構築し、それを応用することで共振器を用いて物性を制御する可能性などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非平衡開放系は従来の統計物理や量子物理ではあまり考えられてこなかった新しい現象を発現する可能性を秘めた物理系で、近年世界中で盛んに研究がなされています。本研究により開放系の研究をこれまで取り扱いが困難と考えられてきた非摂動領域に展開するための端緒が得られました。特に、共振器を用いた物性制御の可能性が理論的に本研究で明らかとなりました。将来的にはこれらの成果が量子デバイスの制御やデコヒーレンスの抑制に向けた指針を与えるものと期待します。

研究成果の概要（英文）：Conventional frameworks of condensed matter physics and statistical mechanics have had tremendous success in elucidating the laws and diverse phenomena of physical systems in thermal equilibrium. Meanwhile, the understanding of non-equilibrium open systems with inflow/dissipation of energy and matter is still in its infancy. While great progress has been made in the past few years in understanding regions where the coupling to the external environment is weak and the effects of the external environment can be treated perturbatively, the fundamental theory, let alone the physical phenomena that occur in strongly coupled nonperturbative regions, has not yet been developed. In this study, we have developed a fundamental theory describing non-equilibrium open systems that strongly interact with the external environment and for which nonperturbative treatment is essentially important, and have clarified the possibility of controlling material properties using cavity confinement.

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 共振器 繰り込み群 開放系 非エルミート系

## 1. 研究開始当初の背景

従来の物性物理学や統計力学の枠組みは、熱平衡にある物理系の法則や多彩な現象を解明する上で多大な成功を収めてきた。一方で、エネルギーや物質の流入/散逸を伴う「非平衡開放系」の理解は未だ発展途上である。外界との結合が弱く外部環境の効果が摂動的に取り扱える領域の理解はここ数年で飛躍的に進んだが、結合が強い非摂動領域に関しては、そこで発現する物理現象はおろかその基礎理論も未開拓であった。

## 2. 研究の目的

本研究の開始当初の目的は、上述した外界環境と強く相互作用し非摂動的取り扱いが本質的に重要となる非平衡開放系を記述する基礎理論を構築し、物性/統計物理学の新たなフロンティアを拓くことであった。特に、(I) 光と物質の超強結合領域における開放系を記述する非摂動的理論の構築、(II) (主に人工量子系で実現する) 非平衡開放系特有の新奇な量子相・ダイナミクス of 解明に向けた研究を行い、並行して原子・分子・光物理分野や固体材料で実現される具体的なモデルの提案・解析を行うことを目指した。

## 3. 研究の方法

光と物質が強く結合した「共振器物質系」については、量子電磁場環境を含めた全体系を非摂動開放系として捉え直すことで、開放系のアイデアを用いて理論的枠組みの構築を行った。具体的には共振器中の電磁場を環境自由度と考え、環境自由度と物質系の量子もつれを解くユニタリ変換を構成し、多体系の解析手法と組み合わせることでこれを実現した。また量子散逸・測定下の人工量子系の解析には、場の理論と非摂動繰り込み群(汎関数繰り込み群)などの手法を援用した。

## 4. 研究成果

光と物質の超強結合領域における共振器物質系に関する研究では、初年度に電磁場モードが単一でかつ長波長近似が成立する場合に、結合強度が強い極限で両者の量子もつれを漸近的に解けるユニタリ変換の構成に計画通り成功した。また第二年度にはこの理論解析を、導波管量子電磁力学系と呼ばれる、連続的かつ複数の量子電磁場モードが物質と強く結合した物理系に拡張した。これにより、非摂動領域に特有な「連続スペクトル中の束縛状態」と呼ばれる特異な固有状態が生じることや、光物質束縛状態の新奇な非平衡量子ダイナミクスが発現することを見出した。さらに、この理論手法を統計・物性物理の基礎的課題であるジョセフソン接合系の量子散逸相転移の問題に応用し、非摂動的な解析を行うことに成功した。特に、数値的繰り込み群と汎関数繰り込み群という二つの独立な非摂動繰り込み群の手法を用いることで系の基底状態の相図を明らかにした。最終年度にはこの枠組みを回路量子電磁力学系のより広いクラスで適用できる形に一般化することに成功した。また量子もつれを漸近的に解

ユニタリ変換を用いることで、量子電磁場と強く結合した物質系のバンドトポロジーを非摂動的に解析した。これにより、パイエルス代入などの超強結合領域で破綻し得る現象論的記述を用いずにチャーン数などのトポロジカル不変量やベリー位相を正確に計算することが可能となった。これらの成果の一部はハーバード大学、スイス連邦工科大学との国際共同研究である。

人工量子系で実現する開放系の物理および非エルミート物理に関する研究では、初年度に例外端状態という非エルミート系に特有な新規トポロジカル端状態に関する研究を行い、次年度にはこれを非線形領域や3次元系にも拡張することに成功した。また最終年度には浮揚ナノ粒子を規則的に複数並べること、双極子相互作用に起因した非相反な長距離結合が生じることを指摘し、非平衡開放系の物理を探求する理想的な舞台になり得ることを提案した。

さらにその他にも統計物理・機械学習の分野において当初予定していた以上の成果が得られた。特に、実験グループと協力することで、ナノダイヤモンド中の窒素空孔中心を用いた磁場測定の確度を向上することに成功した。また、深層強化学習を用いた熱平衡量子純粋状態の準備に関する研究も行った。また量子測定下で誘起される相転移・臨界現象について数値的な解析及び境界共形場理論を用いた理論研究を行った。

これらの成果は、合計16編の論文として査読付き国際誌から出版され、また合計14件の国際会議で招待講演として発表されるなど、国際的にも広く認知された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sone Kazuki, Ashida Yuto, Sagawa Takahiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Topological synchronization of coupled nonlinear oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023211	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, Yokota Takeru, Imamoglu Atac, Demler Eugene	4. 巻 4
2. 論文標題 Nonperturbative waveguide quantum electrodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.023194	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 Sone Kazuki, Ashida Yuto, Sagawa Takahiro	4. 巻 105
2. 論文標題 Exceptional mode topological surface laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.235426	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 Masuki Kanta, Sudo Hiroyuki, Oshikawa Masaki, Ashida Yuto	4. 巻 129
2. 論文標題 Absence versus Presence of Dissipative Quantum Phase Transition in Josephson Junctions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 87001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.087001	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 Tsukamoto Moeta, Ito Shuji, Ogawa Kensuke, Ashida Yuto, Kobayashi Kensuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Accurate magnetic field imaging using nanodiamond quantum sensors enhanced by machine learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13942
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Baba Shotaro Z., Yoshioka Nobuyuki, Ashida Yuto, Sagawa Takahiro	4. 巻 19
2. 論文標題 Deep Reinforcement Learning for Preparation of Thermal and Prethermal Quantum States	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.19.014068	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, Imamoglu Atac, Demler Eugene	4. 巻 126
2. 論文標題 Cavity Quantum Electrodynamics at Arbitrary Light-Matter Coupling Strengths	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 153603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.153603	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 Ashida Yuto, Gong Zongping, Ueda Masahito	4. 巻 69
2. 論文標題 Non-Hermitian physics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Physics	6. 最初と最後の頁 249 ~ 435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00018732.2021.1876991	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 Kamijima Takuya, Otsubo Shun, Ashida Yuto, Sagawa Takahiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Higher-order efficiency bound and its application to nonlinear nanothermoelectrics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 44115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.044115	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 Yokota Takeru, Masuki Kanta, Ashida Yuto	4. 巻 107
2. 論文標題 Functional-renormalization-group approach to circuit quantum electrodynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.043709	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 Masuki Kanta, Ashida Yuto	4. 巻 107
2. 論文標題 Berry phase and topology in ultrastrongly coupled quantum light-matter systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.195104	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, Imamoglu Atac, Demler Eugene	4. 巻 130
2. 論文標題 Cavity Quantum Electrodynamics with Hyperbolic van der Waals Materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 216901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.216901	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 Yokomizo Kazuki、Ashida Yuto	4. 巻 5
2. 論文標題 Non-Hermitian physics of levitated nanoparticle array	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.033217	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 Masuki Kanta、Sudo Hiroyuki、Oshikawa Masaki、Ashida Yuto	4. 巻 131
2. 論文標題 Masuki et al Reply:	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 199702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.199702	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 Sawada Taro、Sone Kazuki、Hamazaki Ryusuke、Ashida Yuto、Sagawa Takahiro	4. 巻 132
2. 論文標題 Role of Topology in Relaxation of One-Dimensional Stochastic Processes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 46602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.132.046602	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 Yokomizo Kazuki、Yoda Taiki、Ashida Yuto	4. 巻 109
2. 論文標題 Non-Bloch band theory of generalized eigenvalue problems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.109.115115	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22件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 蘆田祐人
2. 発表標題 強化学習とその物理への応用
3. 学会等名 「学習物理学」領域会議（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 蘆田祐人
2. 発表標題 共振器/回路量子電磁力学の多体物理
3. 学会等名 非平衡固体物性の最前線（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 蘆田祐人
2. 発表標題 量子測定と相転移・臨界現象
3. 学会等名 KEK連携研究会2024（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Cavity QED control of quantum materials
3. 学会等名 Periodically and quasi-periodically driven complex systems（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Hermitian and non-Hermitian topological phenomena in active matter
3. 学会等名 Frontiers in nonequilibrium physics: Active matter, topology and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 System-Environment Entanglement Phase Transitions
3. 学会等名 Correlation and Topology in Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Nonperturbative cavity/waveguide quantum electrodynamics and dissipative quantum phase transition
3. 学会等名 Ultracold Atoms Japan 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Nonperturbative cavity/waveguide quantum electrodynamics
3. 学会等名 APPC15 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Nonperturbative renormalization group approach to dissipative quantum phase transition
3. 学会等名 DDAP12 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 盧田祐人
2. 発表標題 共振器量子光-物質系の物理
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Yokomizo and Y. Ashida
2. 発表標題 Non-Hermitian physics of levitated nanoparticle array
3. 学会等名 APS March meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Masuki and Y. Ashida
2. 発表標題 Cavity Moire Materials: controlling correlated phases of matter with quantum light-matter couplings
3. 学会等名 FoPM International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Mochida and Y. Ashida
2. 発表標題 Variational approach for Kondo problem with Quantum LightMatter interaction
3. 学会等名 FoPM International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増木貴太, 蘆田祐人
2. 発表標題 超強結合領域の共振器量子物質系における量子幾何
3. 学会等名 日本物理学会2022年次秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横溝和樹, 蘆田祐人
2. 発表標題 浮揚ナノ粒子アレイの非エルミート物理
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 Y. Ashida
2. 発表標題 Nonequilibrium dynamics and thermalization in open quantum many-body systems
3. 学会等名 META 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Shedding quantum light on quantum materials
3. 学会等名 the 3rd International Symposium on Dynamics of Artificial Quantum Systems (DAQS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ashida
2. 発表標題 Hermitian and non-Hermitian topological phenomena in active matter,
3. 学会等名 APS March meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 曾根和樹, 蘆田祐人, 沙川貴大
2. 発表標題 バンドトポロジ由来の非線形トポジカル同期
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 曾根和樹, 蘆田祐人, 沙川貴大
2. 発表標題 例外表面モードに保護されたトポジカルレーザー
3. 学会等名 日本物理学会2022年年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増木貴太, 數藤広之, 押川正毅, 蘆田祐人
2. 発表標題 ジョセフソン接合における量子相転移の非摂動くりこみ群解析
3. 学会等名 日本物理学会2022年年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 蘆田祐人
2. 発表標題 差分進化を用いた最適なナノ熱機関の探索
3. 学会等名 ディープラーニングと物理学オンライン (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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>
--

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