

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01145

研究課題名（和文）非平衡開放系の冷却原子気体における対称性の破れ、エキゾチック相、測定理論の研究

研究課題名（英文）Theoretical study of symmetry breaking, exotic phases, and measurement theory in nonequilibrium open-system ultracold atomic gases

研究代表者

上田 正仁（Ueda, Masahito）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：70271070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、理想的な孤立多体量子系である冷却原子気体に、制御された散逸を導入するなどして非平衡開放系特有の様々な現象の探求を目的として研究を行った。その結果、非エルミート系のトポロジカル相の完全な分類を行い、ハバード模型における散逸による磁性の反転を発見し、系が定常状態へと緩和する時間スケールがリウビル演算子のスペクトルギャップだけではなく、固有モードの局在長に依存することを見出した。さらに、2成分ボース・アインシュタイン凝縮体の集団モードの研究を行い、人工ゲージ場特有の平行磁場と反平行磁場を2成分系に印加した場合の集団モードを記述する有効理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、基礎学理の観点からは非平衡物理現象の研究のフロンティアを拡大するという観点から意義がある。一方、本研究は、現在盛んに研究されている量子コンピュータのパフォーマンスを決定する主要因の一つであるデコヒーレンス・散逸過程や熱化の問題に対する基本的知見を与えるものと考えられ、この意味で社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：This study aims at exploring unique phenomena in nonequilibrium open systems which can be realized in ultracold atomic systems subject to controlled introduction of dissipation. We have made a complete classification of topological phases in non-Hermitian systems and found reversal of magnetism due to dissipation. We have also found that the relaxation time scale toward a stationary state depends on not only the spectral gap of the Liouvillean operator but also the localization length of the eigenmodes. Furthermore, we have formulated an effective theory which describes a binary system of Bose-Einstein condensates subject to parallel or antiparallel synthetic gauge fields and used it to investigate collective modes.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：冷却原子気体 トポロジー 非平衡 非エルミート

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の背景としては、冷却原子気体の実験技術の著しい発展があった。原子間相互作用の強さと符号を含むほとんどすべての物質パラメータを制御できる冷却原子気体を人工量子物質とみなして、それが拓くであろう物理現象の開拓を多くの研究者が行っていた。例えば、光トラップ中でスピントクスチャーが超流動位相と結合することで、様々な磁性超流動相が発現するスピノール BEC と呼ばれるユニークな系が実現された。また、幾何学的形状や次元を自由にデザインできる光格子を用いて、超流動 モット絶縁体転移やトポロジカル相を示すハルデン模型が実現された。さらに、多体相互作用と乱れによる波動関数の局在(多体局在)が観測された。特に、多数の原子を同時にかつ個別に観測できる量子気体顕微鏡を用いた研究が急展開し、エンタングルメントエントロピーや反強磁性長距離秩序が観測された。

2. 研究の目的

以上のような研究背景の下で、理想的な孤立量子多体系である冷却原子系に、空間変調された散逸を導入したり外場を変化させることで、系を意図した非平衡状態に準備することで非平衡開放系特有の物理現象の発見を目指すことを研究の目的とした。特に、パリティ・時間(PT)対称な系の非平衡相転移・超流動・多体局在、時間結晶などのエキゾチック相を探求しその性質を解明することを具体的な目標とした。また、量子気体顕微鏡で多数の原子の運動を個別に観測すると、位置測定の精度向上に伴いハイゼンベルグの不確定性原理による運動量への反跳が増大し、系全体のダイナミクスや統計的性質が変更を受ける。反跳が無視できる状況下で適用可能な統計力学が、測定精度向上の代償としてどのような本質的影響を受け、それを記述するために理論をどう拡張すべきかを明らかにし、観測下の多体ダイナミクスを記述する理論的枠組みを構築するという基礎学理の深化も研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究は冷却原子気体を舞台とした互いに密接に関連する非平衡開放系特有の非ユニタリーダイナミクスに関する課題に取り組むために、次に述べるようにそれぞれのテーマごとに具体的なモデルを立て、それを解析的および数値的手段で研究を行う。また、量子制御においては強化学習などの機械学習の手段を取り入れて研究を遂行する。

パリティ・時間(PT)対称な系については、それが非平衡相転移・臨界現象に新たな物理をもたらすことを確かめるために sine-Gordon 模型の臨界現象を解析し、PT 対称な非平衡量子開放系と環境との間の情報の流れを調べる。超流動現象に関してはこれまでの研究で得られた知見を活かし、それを散逸系へ拡張することで本提案 (PT 対称な系における非平衡相転移・超流動・多体局在) の研究を遂行する。

非平衡状態で発現するエキゾチック相の研究としては、スイス ETH の Tilman Esslinger のグループで実現された光共振器中の原子集団 (Dicke 模型) を周期駆動することで、駆動周期とは異なった周期で時間結晶が準安定化され、それが外部摂動に対して安定な複数の相が発現することを確認しているが、それを原子と光が強く結合する非平衡系に拡張する。特に、非平衡開放系においては時間の連続対称性を破った時間結晶の可能性に着目して研究を遂行する。具体的な手段としては、ハミルトニアンに基づいた非平衡開放系のダイナミクスの研究に加えてロジスティックマップなどを活用した研究も行う。

観測下の多粒子ダイナミクスについては、最もシンプルな 2 粒子系で測定の反作用が系のダイナミクスに大きな影響を与えることをすでに確認しているが、多体相互作用が存在する場合の理論的研究を行う。具体的には光格子中の原子を量子気体顕微鏡で観測した場合のダイナミクスを、ハバード模型と観測理論を組み合わせることによって探求する。

4. 研究成果

(1) H30 年度の研究成果は次の通りである。

パリティ・時間 (PT) 対称性と非平衡相転移・超流動: PT 対称な非エルミートキターエフ/マヨラナチェーンからなるトポロジカル超伝導の性質を研究し、この系が複素エネルギーと非直交なマヨラナゼロモードを持つ特異な端状態を持つことを明らかにした。この端状態は端だけに局在しバルク部分にはカレントが流れないような非局所的な輸送現象を示すことを明らかにした。非平衡状態で発現するエキゾチック相の研究に関しては、クエンチによって非平衡状態に用意されたトポロジカルな相が発現するユニークな性質を、1次元のクラス BDI およびクラス D に属する系について調べた。具体的には、異なった対称性によって保護されたトポロジカル相の間のクエンチに伴って、1粒子エンタングルメントスペクトルがどのように変化するかを調べ

た。その結果、エンタングルメントスペクトルが交差する点是对称性を保存する乱れに対して安定であり、クラス BDI と D のそれぞれの場合にトポロジカル数が Z と Z_2 を反映していることが明らかになった。観測下の多粒子系のダイナミックスの基礎理論については、測定下において多粒子系のダイナミックスがどのように熱化するかという問題を、量子測定理論をボース・ハバード模型に適用することで調べた。その結果、各々のトラジェクトリーレベルで熱緩和だけではなく、熱化が起こるといふ興味深い事実を見出した。それを理解するために、固有状態熱化仮説を測定理論と組み合わせることによってそのような状況下で系が従う統計アンサンブルを導出し、それが数値結果と一致することを確かめた。

(2) R1 年度の研究成果は次の通りである。

Mot t 絶縁体中の磁性においては、Hubbard 模型からの 2 次摂動によって導かれるスピン交換相互作用が主要な役割を果たす。冷却原子気体で実現される Hubbard 模型において、原子間の非弾性散乱に起因する散逸が存在する場合、スピン交換相互作用が本質的に変更を受け、通常の平衡状態とは全く異なる磁性が発現することを見出した。具体的には、上記の 2 次摂動中の中間状態が有限の寿命を持つことでエネルギーの高いスピン状態が安定化し、Fermi-Hubbard 模型においては強磁性が発現し、2 成分 Bose-Hubbard 模型においては反強磁性相関が発達することを見出した。非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体・半金属を記述する分類理論を構築した。従来の物理において最も基本的な 10 通りの内部対称性クラスが、非エルミート性ゆえに 38 通りに変化することを見出した。また、エネルギーが複素数になることにもなって、2 種類の複素エネルギーギャップが定義され、多彩な非エルミートトポロジカル現象が記述されることを明らかにした。エルミートな量子系ではスペクトルの実性が保証されるが、非エルミート系でも固有値が実になる場合がある。先行研究では相互作用のない一粒子スペクトルの研究が中心であり、相互作用の効果が多体スペクトルの構造にどう影響するかは不明であった。我々は、非対称ホッピングを持つ相互作用する乱れた系において乱れを強くすると、固有値の実・複素転移が多体のスペクトルのレベルで起こること、それが系の動的安定性を劇的に変えることを発見した。この転移は多体局在転移によって引き起こされる。

(3) R2 年度の研究成果は次の通りである。

散逸量子系の緩和現象を系のダイナミクスを記述するリュービル演算子のスペクトルギャップを用いて研究した。具体的にはリュービル演算子の固有モードが系の境界付近でどのように振舞うかを調べ、系が定常状態へと緩和する時間スケールがリュービル演算子のスペクトルギャップだけではなく、固有モードの局在長に依存することを見出した。また、散逸が存在する場合のフェルミ粒子系が示す超流動の集団励起と非平衡相転移の研究を行った。

(4) R3 年度の研究成果は以下の通りである。

2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体の渦格子の集団モード、量子揺らぎ、および、成分間の量子もつれの効果についての系統的な研究を行い、それを論文としてまとめた。一般に荷電粒子の場合は外部磁場によって電荷のラーモアの回転の向きは磁場の向きによって決まってしまう。しかし、冷却原子気体の場合は、レーザーによる人工ゲージ場を原子種ごとに別々に印可することが可能なため、2 成分を同じ方向に回転させることも（平行磁場）反対向きに回転させることも（反平行磁場）可能です。この自由度を活用することによって 2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体に発生する渦格子の多様な物理現象を探索することを目的として研究を遂行した。その結果、次の結果を得た。まず、平均場理論の範囲で平行磁場と反平行磁場に対する渦格子の集団モードを記述できる有効理論を構築した。有効理論の場合は、粗視化された密度を用いることになるが、それに対応して結合定数をリノマライズする必要性を指摘した。その結果、平行磁場と反平行磁場に対する低エネルギー励起スペクトルが適当なリスケーリングをすることで互いに結びつくことを見出した。次に、平均場理論を超えた効果を見るためにエンタングルメントエントロピーを計算し、成分間の相互作用が斥力（引力）の場合は 2 成分間のエンタングルメントが平行（反平行）磁場の場合により強くなることを見出した。また、エンタングルメントスペクトルに異常な平方根型の分散関係が現れることを見出した。

引用文献

Yuto Ashida, Hosho Katsura, and Masahito Ueda, Parity-time-symmetric topological superconductor, *Physical Review B* 98, 085116, 2018, 085116-1~13

Zongping Gong and Masahito Ueda, Topological entanglement-spectrum crossing in quench dynamics, *Physical Review Letters* 121, 250601, 2018, 250601-1~6

Yuto Ashida, Keiji Saito, and Masahito Ueda, Thermalization and Heating Dynamics in Open Generic Many-Body Systems, *Physical Review Letters* 121, 170402, 2018, 170402-1~7

Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Norio Kawakami, and Masahito Ueda, Dynamical Sign Reversal of Magnetic Correlations in Dissipative Hubbard Models, *Physical Review Letters* 124, 147203, 2020 147203-1~6

Kohei Kawabata, Ken Shiozaki, Masahito Ueda, and Masatoshi Sato, Symmetry and

Topology in Non-Hermitian Physics, Physical Review X 9, 041015, 2019, 041015-1~52
Ryusuke Hamazaki, Kohei Kawabata, and Masahito Ueda, Non-Hermitian Many-Body
Localization, Physical Review Letters 123, 090603, 2019, 090603-1~7
Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda, Liouvillian
Skin Effect: Slowing Down of Relaxation Processes without Gap Closing, Physical Review
Letters 127, 070402, 2021, 070402-1~7
Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Naoto Tsuji, Masahito Ueda, and Norio
Kawakami, Collective Excitations and Nonequilibrium Phase Transition in Dissipative
Fermionic Superfluids, Physical Review Letters 127, 055301, 2021, 055301-1~8
Takumi Yoshino, Shunsuke Furukawa, and Masahito Ueda, Vortex lattices in
binary Bose-Einstein condensates: Collective modes, quantum fluctuations, and
intercomponent entanglement, Journal of Physics B: Atomic Molecular Optical Physics
55, 105302, 2022, 1~22

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計45件（うち査読付論文 45件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ashida Yuto, Ueda Masahito	4. 巻 120
2. 論文標題 Full-Counting Many-Particle Dynamics: Nonlocal and Chiral Propagation of Correlations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 185301-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.185301	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 Mori Takashi, Ikeda Tatsuhiko N, Kaminishi Eriko, Ueda Masahito	4. 巻 51
2. 論文標題 Thermalization and prethermalization in isolated quantum systems: a theoretical overview	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 1-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/aabcdf	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 Gong Zongping, Ashida Yuto, Kawabata Kohei, Takasan Kazuaki, Higashikawa Sho, Ueda Masahito	4. 巻 8
2. 論文標題 Topological Phases of Non-Hermitian Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 031079-1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.8.031079	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, Saito Keiji, Ueda Masahito	4. 巻 121
2. 論文標題 Thermalization and Heating Dynamics in Open Generic Many-Body Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 170402-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.170402	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 Nakagawa Masaya, Kawakami Norio, Ueda Masahito	4. 巻 121
2. 論文標題 Non-Hermitian Kondo Effect in Ultracold Alkaline-Earth Atoms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 203001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.203001	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 Uchino Shun, Ueda Masahito, Brantut Jean-Philippe	4. 巻 98
2. 論文標題 Universal noise in continuous transport measurements of interacting fermions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063618-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.063619	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 Gong Zongping, Ueda Masahito	4. 巻 121
2. 論文標題 Topological Entanglement-Spectrum Crossing in Quench Dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 250601-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.250601	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 Kawabata Kohei, Higashikawa Sho, Gong Zongping, Ashida Yuto, Ueda Masahito	4. 巻 10
2. 論文標題 Topological unification of time-reversal and particle-hole symmetries in non-Hermitian physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-08254-y	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 Kazuya Fujimoto, Ryusuke Hamazaki, Masahito Ueda	4. 巻 122
2. 論文標題 Flemish Strings of Magnetic Solitons and a Nonthermal Fixed Point in a One-Dimensional Antiferromagnetic Spin-1 Bose Gas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.173001	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 Sho Higashikawa, Masaya Nakagawa, Masahito Ueda	4. 巻 123
2. 論文標題 Floquet Chiral Magnetic Effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.066403	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 Hamazaki Ryusuke, Kawabata Kohei, Ueda Masahito	4. 巻 123
2. 論文標題 Non-Hermitian Many-Body Localization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.090603	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 Kazuki, Nakagawa Masaya, Adachi Kyosuke, Takasan Kazuaki, Ueda Masahito, Kawakami Norio	4. 巻 123
2. 論文標題 Theory of Non-Hermitian Fermionic Superfluidity with a Complex-Valued Interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.123601	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 Kawabata Kohei, Shiozaki Ken, Ueda Masahito, Sato Masatoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 1-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.9.041015	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 Kura Naoto, Ueda Masahito	4. 巻 124
2. 論文標題 Standard Quantum Limit and Heisenberg Limit in Function Estimation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.010507	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 Yukawa Emi, Ueda Masahito	4. 巻 124
2. 論文標題 Morphological Superfluid in a Nonmagnetic Spin-2 Bose-Einstein Condensate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.105301	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 Nakagawa Masaya, Tsuji Naoto, Kawakami Norio, Ueda Masahito	4. 巻 124
2. 論文標題 Dynamical Sign Reversal of Magnetic Correlations in Dissipative Hubbard Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 147203-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.147203	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 Hamazaki Ryusuke, Kawabata Kohei, Kura Naoto, Ueda Masahito	4. 巻 2
2. 論文標題 Universality Classes of Non-Hermitian Random Matrices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023286-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023286	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 100401-1-6
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 Liu Kangqiao, Gong Zongping, Ueda Masahito	4. 巻 125
2. 論文標題 Thermodynamic Uncertainty Relation for Arbitrary Initial States	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 140602-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.140602	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 Masahito Ueda	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantum Equilibration, Thermalization and Prethermalization in Ultracold Atoms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Reviews Physics	6. 最初と最後の頁 669-681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42254-020-0237-x	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 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 260601-1-7
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, Gong Zongping, Ueda Masahito	4. 巻 69
2. 論文標題 Non-Hermitian Physics	5. 発行年 2020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 Nakagawa Masaya, Kawakami Norio, Ueda Masahito	4. 巻 126
2. 論文標題 Exact Liouvillian Spectrum of a One-Dimensional Dissipative Hubbard Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110404-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.110404	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 Sugimoto Shoki, Hamazaki Ryusuke, Ueda Masahito	4. 巻 126
2. 論文標題 Test of the Eigenstate Thermalization Hypothesis Based on Local Random Matrix Theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 120602-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.120602	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 Yoshino Takumi, Furukawa Shunsuke, Ueda Masahito	4. 巻 103
2. 論文標題 Intercomponent Entanglement Entropy and Spectrum in Binary Bose-Einstein Condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043321-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.043321	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 Kangqiao Liu, Liu Ziyin, Ueda Masahito	4. 巻 PMLR 139
2. 論文標題 Noise and Fluctuation of Finite Learning Rate Stochastic Gradient Descent	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning	6. 最初と最後の頁 7045-7056
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 Kazuki, Nakagawa Masaya, Tsuji Naoto, Ueda Masahito, Kawakami Norio	4. 巻 127
2. 論文標題 Collective Excitations and Nonequilibrium Phase Transition in Dissipative Fermionic Superfluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 055301-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.055301	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 Haga Taiki, Nakagawa Masaya, Hamazaki Ryusuke, Ueda Masahito	4. 巻 127
2. 論文標題 Liouvillian Skin Effect: Slowing Down of Relaxation Processes without Gap Closing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 070402-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.070402	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 Murashita Yuto, Kura Naoto, Ueda Masahito	4. 巻 3
2. 論文標題 Entropy Production of a Closed Hamiltonian System via the Detailed Fluctuation Relation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 033224-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033224	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. Ueda Masahito	4. 巻 ICLR2022
2. 論文標題 Convergent and Efficient Deep Q Learning Algorithm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Conference on Learning Representations 2022	6. 最初と最後の頁 1-27
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 Liu Ziyin, Kangqiao Liu, Mori Takashi, Ueda Masahito	4. 巻 ICLR2022
2. 論文標題 Strength of Minibatch Noise in SGD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Conference on Learning Representations 2022	6. 最初と最後の頁 1-33
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 Liu Ziyin, Li Botao Simon James B., Ueda Masahito	4. 巻 ICLR 2022
2. 論文標題 SGD Can Converge to Local Maxima	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Conference on Learning Representations 2022	6. 最初と最後の頁 1-25
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27件（うち招待講演 27件 / うち国際学会 24件）

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Atypicality of most few-body observables
3. 学会等名 KITP QThermo-C18 Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Non-equilibrium topo systems
3. 学会等名 Erice Workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Quantum many-body dynamics under continuous observation
3. 学会等名 US-Japan QELS-13, the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Dynamics of continuously monitored quantum many-body systems
3. 学会等名 Research Frontiers in Ultracold Quantum Gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems
3. 学会等名 APS March Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Coarsening dynamics of spinor mixtures
3. 学会等名 Workshop on Quantum Mixtures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Beyond-Hermitian Quantum Physics
3. 学会等名 Conference on Time Crystals Conference on Time Crystals (smr 3593) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Beyond-Hermitian Quantum Physics
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Nonequilibrium control of quantum many-body systems beyond the hermitian framework of quantum physics
3. 学会等名 KITP workshop on Transport and Efficient Energy Conversion in Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田正仁
2. 発表標題 Beyond Hermitian Quantum Physics
3. 学会等名 Quantum simulation of novel phenomena with ultracold atoms and molecules (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

上田研究室HP http://cat.phys.s.u-tokyo.ac.jp/index.html
--

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