

# 1 一般物理理論

## 1.1 上田研究室

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、光子を量子 1 個のレベルで精密に測定し、制御することが可能になってきた。当研究室では、このような高い制御性を有する系での量子多体問題の解明と、その基礎となるナノスケールの熱力学・統計力学の構築を目指して理論研究を行っている。特に近年の中心的テーマとなっているのは、冷却原子気体の研究、および、量子論・統計力学と情報論の融合である。レーザー冷却により絶対零度近くまで冷却された原子系においては、高い制御性のもとで、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) などの巨視的量子現象や、固体物理、宇宙物理とも類似した現象を創り出し、その普遍的性質と新しい量子多体物理の可能性を探究することができる。私たちは、環境への散逸や量子測定の影響下にある冷却原子系の非ユニタリーダイナミクス、非平衡開放系における相の分類、人工ゲージ場中での量子ホール効果や渦格子、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。同時に私たちは、情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎概念を捉え直し、物理と情報を融合させた新分野の構築を目指す研究にも取り組んでいる。特に測定やフィードバック制御を行うもとの情報の流れに着目し、熱力学の第二法則や揺らぎの定理の一般化、波束収縮のダイナミクス、測定結果からのハミルトニアン推定などの研究を行っている。さらに、私たちは機械学習や深層学習における情報処理のプロセスに注目し、物理学の視点から AI や機械学習の理解に取り組んでいる。

### 1.1.1 冷却原子気体・非平衡開放系

#### 散逸下の Hubbard 模型における磁性

Mott 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によってエネルギーの高いスピン状態が安定化し (図 1.1.1)、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 [21]。

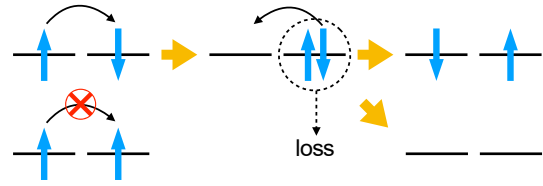


図 1.1.1: 散逸下の Fermi-Hubbard 模型におけるスピン交換相互作用の概念図。通常の平衡系では 2 次摂動によるスピン交換プロセスが反強磁性的スピン配置を安定化させるが、中間状態に散逸が存在する場合は反強磁性的スピン配置に有限の寿命が加わるため、通常とは逆にエネルギーの高い強磁性状態が安定化する [21]。

#### 非エルミートトポロジカル相の分類

近年、非平衡開放系や強相関電子系において、非エルミートな有効ハミルトニアンによって記述される豊かなトポロジカル現象に大きな関心が集まっている。しかし、その多くは個別の具体例にとどまっており、それらを包括的に記述する一般理論の構築が理論・実験の両面からの喫緊の課題であった。そこで、我々は、非エルミート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。得られた分類理論においては、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特徴のひとつとする。また、エネルギーが複素数になることにもなると、2 種類の複素エネルギーギャップが定義され、それゆえに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。とくに、非エルミート系に固有のトポロジカル不変量の存在が、従来のバルク・エッジ対応ではなく、表皮効果を導くことを示した [9, 12, 18]。

#### 非エルミート多体局在

通常の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。特に重要なクラスである Hatano と Nelson による Anderson 局在と時間反転対称性を持つ模型は、非エルミート性の強さを変化させると固有値の実・複素転移が生じる。一方、今までの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。そして、この転移が多体の局在転移によって引き起こされることを見出した [10]。

## 対称性を持つ量子非可積分系におけるランダム行列の振る舞い

近年の熱平衡化の研究において、非可積分な量子多体系のスペクトルの統計がランダム行列で記述されるという仮説が注目を集めている。この仮説は多くの異なるモデルで確かめられているものの、ランダム行列の文脈で重要な反ユニタリー対称性（時間反転対称性など）が異なるクラスに対し系統的に調べた研究は存在しなかった。我々は、反ユニタリー対称性による三種類のクラスをパラメータによって変化できる、一次元の局所相互作用のみを持つ非可積分なスピンモデルを提案した。このモデルを数値的に調べ、異なる対称性に対する固有値間隔と行列要素の分布が対称性を考慮したランダム行列の予言でよく記述できることを示した [4]。

## 周期駆動量子系におけるギャップレストポロジカル相とその分類

格子系のバンド構造には Brillouin ゾーンの周期性に起因したトポロジカルな制限が存在する。例えば、3次元格子系においては Weyl フェルミオンは必ず偶数個現れなければならないという Nielsen-Ninomiya 定理が知られている。一方、時間周期的に駆動された量子系においては離散的な時間並進対称性の帰結としてエネルギー方向にも Brillouin ゾーンに類似した周期構造が現れ、許されるバンド構造のトポロジーを大きく変える。我々は、トポロジーにおけるスマッシュ積の方法と冷却原子系において実現されているスピンポンプを応用して、周期駆動された3次元格子系において Weyl フェルミオンをただ一つのみ持つモデルを構成し、熱平衡系では実現が禁止されているカイラル磁気効果が起こることを示した。さらに、我々は10種類の内部対称性クラスについて周期駆動された自由フェルミオン系の時間発展演算子をトポロジカルに分類し、静的な格子系では実現できない様々なギャップレストポロジカル相が周期駆動系においては実現可能であることを示した [8]。

### 1.1.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

#### 関数推定の標準量子限界とハイゼンベルク限界

量子計測とは、エンタングルメントなどの量子的なりソースを用いた古典的な計測方法より高い効率の推定手法を取り扱う量子情報の分野である。従来、量子計測は少数のパラメーターからなる単純な問題のみが考えられていたが、重力波や量子イメージングにおける計測を考える場合には、計測対象を連続的なデータ、すなわち未知関数として扱わなければならない。我々は多変数の量子計測理論と関数解析学を組み合わせることで、古典的な精度限界である標準量子限界と、量子的な精度限界であるハイゼンベルク限界を導いた。さらに、推定に用いる量子状態として位置固有状態と波数固有状態が同等に精度

限界を達成し、量子計測においても Nyquist の標本定理が適用されることを示唆した [16]。

## 行列積ユニタリー演算子による非平衡トポロジカル相の分類

近年、テンソルネットワークを用いて相互作用する平衡量子多体系のトポロジカル相を分類する研究が盛んに行われてきた。その中で一番よく理解されているのは、行列積状態で記述される一次元系における対称性によって保護されたトポロジカル (SPT) 相の完全なる分類である。しかし、この最もシンプルなセットアップの非平衡版「対称性を持つ行列積ユニタリー演算子の分類」はまだ未解明であった。我々はこの未解決問題に着目し、対称性によって保護されたインデックスという新しい位相不変量を発見し、ほぼ完全な分類を行った。この結果は、従来のコホモロジー分類を超えた新しいクラスの二次元フロケットトポロジカル相の存在を示唆している [20]。

## ポートフォリオ理論を利用した深層学習の改良

近年、深層学習は正しい予測や決定を行うための多種多様なタスクに応用されている。しかし、AI が誤る可能性は常にあり、与えられたインプットに対してアウトプットがどの程度信頼できるかは直接には分からない。AI がどこまで信頼できるかは実用上極めて重要な問題であるため、この問題に対する研究や解決法の提案が数多く行われている。AI の不確かさを特徴づけるために、我々は AI のシステムを拡張する代わりに、AI が学習する損失関数を改良し、結論が不確かな場合は判断を保留させるようにした。我々は決定およびそれを保留するプロセスは賭けゲームにおいて賭け金を安全にベットできるかどうかという問題に似ていると考え、不確かな場面に直面したときに AI が長期的に見てどのようにすればよいかを学習させるためにポートフォリオ理論を用いた。我々は、このように学習させた深層学習のモデルは、これまでに知られている他の方法と比べて学習モデルの不確かさをより上手く特徴づけられていることを見出した。加えて、この学習モデルは典型的で信頼の置けるデータサンプルにより重点的に注目し、その結果全体としてのパフォーマンスもわずかに高い値を達成した [14]。

#### <受賞>

- [1] Zongping Gong: 第10回育志賞、日本学術振興会、2020.3.4.
- [2] 中川大也: 第14回若手奨励賞(領域1)、日本物理学会、2020.3.17.
- [3] 濱崎立資: 理学系研究科研究奨励賞(博士課程)、東京大学、2020.3.23.

#### <報文>

(原著論文)

- [4] R. Hamazaki and M. Ueda: Random-matrix behavior of quantum nonintegrable many-body systems with Dyson's three symmetries, *Phys. Rev. E* **99**, 042116 (2019).
- [5] K. Fujimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Flemish Strings of Magnetic Solitons and a Nonthermal Fixed Point in a One-Dimensional Antiferromagnetic Spin-1 Bose Gas, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 173001 (2019).
- [6] N. Yoshioka and R. Hamazaki: Constructing neutral stationary states for open quantum many-body systems, *Phys. Rev. B* **99**, 214306 (2019). Selected as Editors' Suggestion. See also *Viewpoint: Physics* **12**, 74.
- [7] T. Haga: Dimensional reduction in driven disordered systems, *J. Stat. Mech.* (2019) 073301.
- [8] S. Higashikawa, M. Nakagawa, and M. Ueda: Floquet Chiral Magnetic Effect, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 066403 (2019).
- [9] K. Kawabata, T. Bessho, and M. Sato: Classification of Exceptional Points and Non-Hermitian Topological Semimetals, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 066405 (2019).
- [10] R. Hamazaki, K. Kawabata, and M. Ueda: Non-Hermitian Many-Body Localization, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 090603 (2019).
- [11] K. Yamamoto, M. Nakagawa, K. Adachi, K. Takasan, M. Ueda, and N. Kawakami: Theory of Non-Hermitian Fermionic Superfluidity with a Complex-Valued Interaction, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 123601 (2019).
- [12] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, *Phys. Rev. X* **9**, 041015 (2019).
- [13] L. Xiao, K. Wang, X. Zhan, Z. Bian, K. Kawabata, M. Ueda, W. Yi, and P. Xue: Observation of Critical Phenomena in Parity-Time-Symmetric Quantum Dynamics, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 230401 (2019).
- [14] Z. Liu, Z. Wang, P. P. Liang, R. R. Salakhutdinov, L.-P. Morency and M. Ueda: Deep Gamblers: Learning to Abstain with Portfolio Theory, *Advances in Neural Information Processing Systems* **2019**, 10622 (2019).
- [15] T. Haga: Divergence of the Floquet-Magnus expansion in a periodically driven one-body system with energy localization, *Phys. Rev. E* **100**, 062138 (2019).
- [16] N. Kura and M. Ueda: Standard Quantum Limit and Heisenberg Limit in Function Estimation, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 010507 (2020).
- [17] M. Nakagawa, R.-J. Slager, S. Higashikawa, and T. Oka: Wannier representation of Floquet topological states, *Phys. Rev. B* **101**, 075108 (2020).
- [18] N. Okuma, K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Sato: Topological Origin of Non-Hermitian Skin Effects, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 086801 (2020).
- [19] E. Yukawa and M. Ueda: Morphological Superfluid in a Nonmagnetic Spin-2 Bose-Einstein Condensate, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 105301 (2020).
- [20] Z. Gong, C. Sünderhauf, N. Schuch, and J. I. Cirac: Classification of Matrix-Product Unitaries with Symmetries, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 100402 (2020).
- [21] M. Nakagawa, N. Tsuji, N. Kawakami, and M. Ueda, Dynamical Sign Reversal of Magnetic Correlations in Dissipative Hubbard Models, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 147203 (2020).
- (会議抄録)
- [22] T. Bessho, K. Kawabata, and M. Sato: Topological Classification of Non-Hermitian Gapless Phases: Exceptional Points and Bulk Fermi Arcs, *JPS Conf. Proc.* **30**, 011098 (2020).
- (国内雑誌)
- [23] 上田正仁: 量子制御技術の進展、日本物理学会誌 Vol.74, No.6, 368 (2019).
- (学位論文)
- [24] Ryusuke Hamazaki: Problems of Thermalization in Closed and Open Quantum Many-Body Systems (博士論文) .
- [25] Naoto Kura: Quantum estimation theory for continuous data (博士論文) .
- [26] Norifumi Matsumoto: Quantum phase transitions in non-Hermitian many-body systems (修士論文).
- [27] Zhikang Wang: Quantum control based on deep reinforcement learning (修士論文).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [28] M. Ueda: Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems, *Joint Quantum Seminars, Boston, USA, 2019.4.2-6*.
- [29] M. Ueda: Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems, *Conference on Quantum Measurement: Fundamentals, Twists, and Applications, Trieste, Italy, 2019.4.28-5.4*.
- [30] Z. Gong: Emergent Phenomena in Ultracold Atoms: Merging Topology, Interaction, and Dynamics, *Beijing, China, 2019.6.3-23*.
- [31] R. Hamazaki: Localization and universality in non-Hermitian many-body systems, *Engineering Nonequilibrium Dynamics of Open Quantum Systems, Dresden, Germany, 2019.6.17-21*.

- [32] Z. Gong: Topological phenomena in quench dynamics, The 28th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'19), Gyeongju, South Korea, 2019.7.8-12.
- [33] M. Ueda: Coarsening dynamics of spinor mixtures, Workshop on Quantum Mixtures, Trento, Italy, 2019.7.14-19.
- [34] K. Kawabata: Non-Hermitian topology of exceptional points, Progress in the mathematics of topological states of matter, Sendai, Japan, 2019.7.30.
- [35] Z. Gong: Topology out of equilibrium, Progress in the mathematics of topological states of matter, Sendai, Japan, 2019.7.31.
- [36] K. Kawabata: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, Workshop on non-Hermitian quantum mechanics, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan, 2019.8.8.
- [37] M. Nakagawa: Non-Hermitian quantum many-body physics in ultracold atoms subject to inelastic collisions, Workshop on non-Hermitian quantum mechanics, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan, 2019.8.9.
- [38] M. Ueda: Discrete Time-Crystalline Order in Cavity and Circuit-QED Systems, Time Crystals and Related Phenomena, Krakow, Poland, 2019.9.4-7.
- [39] M. Nakagawa: Non-Hermitian Kondo/Hubbard physics in ultracold atoms, The Forth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2019.10.1.
- [40] M. Ueda: Nonequilibrium many-body dynamics under quantum measurement, EPiQS-TMS 3rd Alliance Workshop on Topological Materials Science, Santa Barbara, USA, 2019.10.21-25.
- [41] Z. Gong: Topological phases of non-Hermitian systems, Fudan Mini-program on Non-Hermitian Topology and Dynamics, Shanghai, China, 2019.11.30-12.1.
- [42] K. Kawabata: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics, The workshop on topology and dynamics in non-Hermitian physics (The 7th International Workshop on Frontiers in Quantum Physics and Quantum Information), Beijing, China, 2019.12.14.
- [43] M. Ueda: Discrete time crystals in cavity- and circuit-QED systems, Frontiers of Quantum Matter, Tel Aviv, Israel, 2019.12.15-22.
- [44] Z. Gong: Nonequilibrium quantum dynamics: Order, topology and rigorous results, MPHQ Postdoc Symposium, Garching, Germany, 2020.1.9.
- [45] M. Ueda: Many-body physics and thermodynamics in open quantum systems, SFB/ZOQ Seminar, Hamburg, Germany, 2020.2.19.
- [46] R. Hamazaki: Operator noncommutativity and irreversibility in quantum chaos, Quantum Information and String Theory 2019, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2019.6.10-14.
- [47] N. Matsumoto: Continuous Phase Transition without Gap Closing in Non-Hermitian Quantum Many-Body Systems, The Forth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2019.9.30-10.3.
- [48] T. Yoshino, S. Furukawa and M. Ueda: Intercomponent entanglement spectra in binary Bose-Einstein condensates, The Forth Kyoto-Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2019.9.30-10.3.
- [49] R. Hamazaki: The threefold way in non-Hermitian random matrices, THERMALIZATION, MANY BODY LOCALIZATION AND HYDRODYNAMICS, ICTS, India, 2019.11.11-15.
- [50] M. Nakagawa: Floquet Gapless Topological Phases: Classification and Characterization, International Conference on Topological Materials Science 2019, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2019.12.6.
- [51] T. Yoshino, S. Furukawa and M. Ueda: Intercomponent entanglement spectra in binary Bose-Einstein condensates, International Conference on Topological Materials Science 2019, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2019.12.6.
- (国内会議)  
招待講演
- [52] 上田正仁: 物理学との対話 2-科学と AI の接点-, 2019 年人工知能学会全国大会、新潟、2019.6.4-7.
- [53] 中川大也: 冷却原子気体における平衡および非平衡系の近藤効果の理論 (若手奨励賞受賞講演)、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.17.
- 一般講演
- [54] 濱崎立資、川畑幸平、久良尚任、上田正仁: 非エルミートランダム行列の普遍性、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.10.
- [55] 松本徳文、川畑幸平、蘆田祐人、古川俊輔、上田正仁: 非エルミートな量子多体系における励起ギャップを閉じない連続相転移、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.10.
- [56] 久良尚任、上田正仁: 量子計測によるエッジ検出、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.11.
- [57] 中川大也、辻直人、川上則雄、上田正仁: 散逸下の Hubbard 模型における負温度量子磁性、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.11.
- [58] 芳賀大樹、佐々真一: 古典カオスを再現する離散量子系におけるエンタングルメント・エントロピー生成とコルモゴロフ・シナイエントロピー、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.10.

一般講演

- [59] 吉野匠、古川俊輔、上田正仁: 二成分 Bose-Einstein 凝縮体における成分間エンタングルメント・スペクトル、日本物理学会 2019 年秋季大会、岐阜大学、2019.9.11.
- [60] 久良尚任、上田正仁: 量子エッジ検出の理論限界とスケールリング、第 41 回量子情報技術研究会 (QIT41)、学習院大学、2019.11.19.
- [61] 中川大也、川上則雄、上田正仁: 原子ロスのある 1 次元 Hubbard 模型における例外点と臨界性、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.16.
- [62] 川畑幸平、佐藤昌利: 非エルミートなトポロジカル絶縁体における実スペクトル: 非エルミートな BHZ 模型、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.17.
- [63] 芳賀大樹、上田正仁: ランダムポテンシャル中を流れる超流動における非対角長距離秩序の安定性、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020.3.17.
- (セミナー)
- [64] 中川大也: State-based characterization of topological phases in periodically driven systems、第 94 回トポロジカル物質科学セミナー、京都大学基礎物理学研究所、2019.5.8.
- [65] Zongping Gong: Topological phases of non-Hermitian systems、沙川研究室、東京大学、2019.5.20.
- [66] 川畑幸平: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics、沙川研究室、東京大学、2019.5.20.
- [67] 濱崎立資: Localization and universality in non-Hermitian many-body systems、齊藤研究室 矢上統計物理学セミナー、慶應大学、2019.5.27.
- [68] 川畑幸平: Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics、京都大学基礎物理学研究所、2019.6.10.
- [69] Zongping Gong: Topological phases of non-Hermitian systems、北京大学量子材料科学センター、2019.6.10.
- [70] 吉野匠: Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates under synthetic gauge fields、西田研究室、東京工業大学、2019.11.1.

# 1 Ueda Group

**Research Subjects:** Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, topological phenomena, open quantum systems, information thermodynamics, quantum information, measurement theory, machine learning

**Member:** Masahito Ueda and Masaya Nakagawa

With recent advances in nanoscience, it has become possible to precisely measure and control atoms, molecules, and photons at the level of a single quantum. We are interested in theoretically studying emergent quantum many-body problems in such highly controllable systems and developing nanoscale thermodynamics and statistical physics that lay the foundations of such problems. Our particular focuses in recent years include many-body physics of ultracold atomic gases and unification of quantum and statistical physics and information theory. Atomic gases which are cooled down to nearly zero temperature by laser cooling techniques offer unique opportunities for studying macroscopic quantum phenomena such as a Bose-Einstein condensation (BEC) in controlled manners. Unprecedented controllability of such gases also enables us to simulate phenomena analogous to condensed matter and astronomical physics, to investigate their universal properties, and to explore unknown quantum many-body physics. In our recent works, we have studied nonunitary dynamics of atomic gases subject to dissipation and/or measurement backaction, classification of phases of matter in nonequilibrium open systems, quantum Hall effect and vortex lattices in synthetic gauge fields, and thermalization of isolated quantum systems. We are also interested in relating fundamental concepts of quantum and statistical physics with information theory and exploring interdisciplinary fields that unify physics and information. In particular, we have recently worked on generalizations of the second law of thermodynamics and fluctuation theorems and the formulations of state reduction dynamics and Hamiltonian estimation in light of information flow under measurements and feedback controls. Moreover, we have recently tackled an understanding of AI and machine learning from a viewpoint of physics. We list our main research subjects in FY2019 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
  - Quantum magnetism of the Hubbard model subject to dissipation [1]
  - Classification of topological phases in non-Hermitian systems [2, 3, 4]
  - Non-Hermitian many-body localization [5]
  - Random-matrix behavior of quantum nonintegrable systems with symmetries [6]
  - Classification of gapless topological phases in periodically driven quantum systems [7]
- Quantum information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
  - Standard quantum limit and Heisenberg limit in function estimation [8]
  - Classification of nonequilibrium many-body topological phases with matrix-product unitaries [9]
  - Improvement of deep learning using portfolio theory [10]

[1] M. Nakagawa, N. Tsuji, N. Kawakami, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **124**, 147203 (2020).

[2] K. Kawabata, T. Bessho, and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **123**, 066405 (2019).

[3] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato, Phys. Rev. X **9**, 041015 (2019).

[4] N. Okuma, K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Sato, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).

[5] R. Hamazaki, K. Kawabata, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 090603 (2019).

[6] R. Hamazaki and M. Ueda, Phys. Rev. E **99**, 042116 (2019).

[7] S. Higashikawa, M. Nakagawa, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **123**, 066403 (2019).

[8] N. Kura and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **124**, 010507 (2020).

[9] Z. Gong, C. Sünderhauf, N. Schuch, and J. I. Cirac, Phys. Rev. Lett. **124**, 100402 (2020).

[10] Z. Liu, Z. Wang, P. P. Liang, R. R. Salakhutdinov, L.-P. Morency and M. Ueda, Advances in Neural Information Processing Systems **2019**, 10622 (2019).