

# 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・非平衡開放系の研究、および、量子論・統計力学と情報論・人工知能の融合である。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反作用の影響下にある冷却原子系の非ユニタリ・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

#### Yang-Lee 量子臨界現象の開放量子系への埋め込み

分配関数の零点として定義される Yang-Lee の零点は物理量の解析的性質を完全に特徴付け、それに伴い物理量やパラメータを複素平面へ解析接続する必然性が生じる。パラメータの実軸に最も近い、零点の分布の端は物理量の分岐点となっており、Yang-Lee 端特異性と呼ばれる非ユニタリ臨界現象を示す。この臨界現象は磁場の複素平面へ解析接続された物理量において実現するが、複素数の磁場が実現する状況や複素数の物理量の観測方法は未解明だった。また、物理的な直感に反する異常なスケーリング則が生じるが、その物理的意味も未解明だった。本

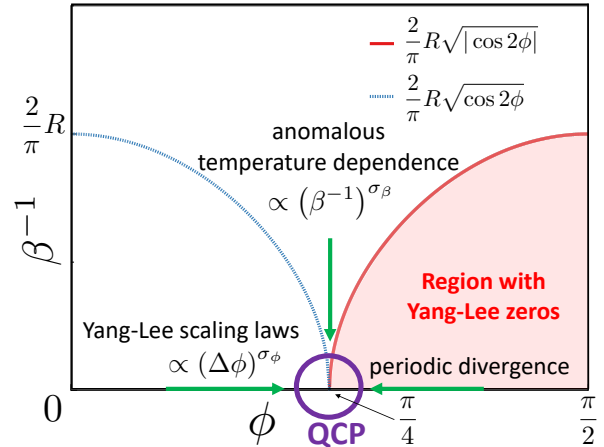


図 1.1.1: Yang-Lee 量子臨界現象の有限温度相図 [6]。量子臨界点 (QCP) に横軸 (ハミルトニアン制御パラメータ) 上の左側から近づく場合、Yang-Lee 端特異性に起因するスケーリング則が現れる。一方、縦軸 (温度) 側から近づく場合、古典系には現れない新奇なスケーリング則が現れる。

研究では、量子古典対応に基づき、虚数磁場を伴う古典系と等価な臨界現象を示す非エルミートな量子系に着目した。はじめに、複素平面へと解析接続された物理量を拡大されたエルミート系に埋め込むと共に異常なスケーリング則の物理的意味を明らかにした。次に、有限温度量子系におけるスケーリング則を議論し、Yang-Lee の臨界指数との整合性を確認すると共に、虚時間方向の新奇なスケーリング則を発見した (図 1.1.1)。最後に、解析接続された物理量の実部と虚部をそれぞれ実験的に観測する方法を考案した。本研究成果により、非ユニタリ臨界現象の量子開放系における物理的実現について洞察が与えられる [6]。

#### 散逸下の朝永-Luttinger 液体の普遍的性質

量子スピン系や電子系で見られる多くの量子臨界現象は一次元系では普遍的に朝永-Luttinger 液体理論で記述される。一方で、これはユニタリな量子場の理論であるため、散逸の存在により時間発展が非ユニタリとなったとき、量子臨界現象の普遍性クラスがどのような変更を受けるかは明らかではない。我々は、非弾性衝突による粒子ロスのある 2 成分冷却ボソン原子系で実現される非エルミート XXZ スピン鎖を用いて、散逸下の朝永-Luttinger 液体の普遍的性質を検証した。その結果、この系の量子臨界現象は朝永-Luttinger パラメータが複素数へと拡張された非ユニタリ朝永-Luttinger 液体理論で記述されることが明らかになった。まず、一次元非エルミート XXZ 模型を Bethe 仮設法を用いて厳密に解

くことにより、複素朝永-Luttinger パラメータの厳密な表式を得た。さらに、ボソン化による場の理論と非エルミート系に拡張された密度行列くりこみ群による数値計算を用いて、朝永-Luttinger 液体理論の予言を定量的に確かめた。この結果は、中心電荷  $c = 1$  の共形場理論の非ユニタリ拡張を与える [2]。

### 長距離相互作用系における固有状態熱化仮説の成否

相互作用の大きさが系を構成する要素間の距離  $r$  について  $1/r^\alpha$  のように冪的に減衰する長距離相互作用系は、負の比熱や相関の異常伝播など多数の興味深い現象を示す熱・統計力学的に重要な対象である。イオントラップ系は、長距離相互作用系の研究に適した実験系であり、冪  $\alpha$  を 0 から 3 まで連続的に変化させることができる。この特性を活かし、長距離相互作用する孤立量子多体系における緩和ダイナミクスが調べられたが、実験の時間スケール内では熱平衡状態への緩和は観測されなかった。また、この結果が有限サイズ効果によるものなのか、それとも長距離相互作用は典型的に熱平衡化を妨げるのかは未解明だった。典型的な孤立量子多体系は、固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH) によって熱平衡化すると広く信じられている。そこで本研究では、冪的 ( $\sim 1/r^\alpha$ ) に減衰する 2 体長距離相互作用を含む 1 次元スピン系からなるランダム行列集団を構成し、その集団における ETH の典型性を厳密対角化による数値実験で検証した。その結果、少なくとも  $\alpha \geq 0.6$  のとき ETH が典型的に成立することを実証した。一方、有限サイズ系においては、長距離相互作用によって物理量の平衡値が、(短距離系の場合と比べ) 熱平衡値から大きくずれることを発見した。このことは、前述の実験において熱平衡化が観測されなかったことは、実験系の有限サイズ効果によるものであることを示唆している [4]。

## 1.1.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

### 深層ネットワークを学習させる基礎理論

現代の人工ニューラルネットワークには何十億ものパラメータがあり、ニューラルネットワークの学習には対称性とその破れが自然に存在する。我々は最近の一連の研究で、ニューラルネットワークの損失ランドスケープにおける対称性が、崩壊として知られる深層学習における重要なクラスの現象をどのように引き起こすのかを明らかにした [8, 9, 12]。[8] では、ベイズ深層学習における posterior collapse の問題の理解を進めた。[12] では、自己教師あり学習の損失ランドスケープにおける回転対称性の役割を調べ、それが自己教師あり学習の設定でよく見られる dimensional collapse と関連していることを示した。

### 非平衡ダイナミクスにおける普遍的な熱力学的不確定性関係

非平衡統計力学の最近の進展は、ダイナミクスのエントロピー生成とこれらのダイナミクスにおける統計的観測量の揺らぎとの間に密接な関係があることを示している。様々な制限のある系において、ダイナミクスのエントロピー生成が、熱力学の変数の期待値をその分散で割った値の上界を与えることが見出されてきた。我々の最近の研究は、これらの上界が任意のマルコフ的な力学系に存在し、任意の種類の観測量に適用されることから、このような熱力学的不確定性関係が普遍的であることを示した [10]。この結果の普遍性により、確率熱力学と数理ファイナンスの基本法則の間に等価な関係があることを明らかにした。

### 強化学習による量子剛体の制御

ナノテクノロジーの発展に伴い、最近では、ナノ粒子をトラップすることで、十分に外界から孤立させ、重心自由度を冷却して基底状態に近づけ、量子領域に入るように制御することが可能になった。しかし、ナノ粒子の回転自由度は、重心自由度の冷却に比べ制御がはるかに難しく、未だ冷却に成功した例はない。そこで、我々はトラップされたナノ粒子の冷却の問題を、ナノ粒子を量子力学的な剛体として扱うことで考察した [15]。まず、回転自由度に着目し、捕捉・測定・制御された回転剛体の量子力学モデルを構築し解析した。そして、冷却タスク、すなわち系のエネルギーを減らすことに、深層強化学習を応用した。深層強化学習は、この多次元連続空間における量子系の制御問題をうまく処理し、強化学習が連続空間における複雑な量子力学の問題を解決できること、量子力学的回転体はその量子的性質にもかかわらず、多くの場合にうまく制御可能であることを示した。

<受賞>

<報文>

(原著論文)

- [1] Takumi Yoshino, Shunsuke Furukawa, and Masahito Ueda: Vortex lattices in binary Bose-Einstein condensates: Collective modes, quantum fluctuations, and intercomponent entanglement, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **55**, 105302 (2022).
- [2] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Masaki Tezuka, Masahito Ueda, and Norio Kawakami: Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: Case study of a non-Hermitian XXZ spin chain, *Phys. Rev. B* **105**, 205125 (2022).
- [3] Takashi Mori, Liu Ziyin, Kangqiao Liu, and Masahito Ueda: Power-law escape rate of SGD, *Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning, PMLR* **162**, 15959, (2022) (ICML 2022).

- [4] Shoki Sugimoto, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda: Eigenstate Thermalization in Long-Range Interacting Systems, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 030602 (2022).
- [5] Lennart Dabelow and Masahito Ueda: Three learning stages and accuracy-efficiency tradeoff of restricted Boltzmann machines, *Nat. Commun.* **13**, 5474 (2022).
- [6] Norifumi Matsumoto, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Embedding the Yang-Lee quantum criticality in open quantum systems, *Phys. Rev. Research* **4**, 033250 (2022).
- [7] Kohei Kawabata and Masahito Ueda: Nonlinear Landauer formula: Nonlinear response theory of disordered and topological materials, *Phys. Rev. B* **106**, 205104 (2022).
- [8] Zihao Wang\* and Liu Ziyin\*: Posterior Collapse of a Linear Latent Variable Model, *Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022)* [Oral].
- [9] Liu Ziyin, Botao Li, and Xiangming Meng: Exact Solutions of a Deep Linear Network, *Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022)*.
- [10] Liu Ziyin and Masahito Ueda: Universal thermodynamic uncertainty relation in nonequilibrium dynamics, *Phys. Rev. Research* **5**, 013039 (2023).
- [11] Kantaro Honda, Shintaro Taie, Yosuke Takasu, Naoki Nishizawa, Masaya Nakagawa, and Yoshiro Takahashi: Observation of the Sign Reversal of the Magnetic Correlation in a Driven-Dissipative Fermi Gas in Double Wells, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 063001 (2023).
- [12] Liu Ziyin, Ekdeep Singh Lubana, Masahito Ueda, and Hidenori Tanaka: What shapes the loss landscape of self-supervised learning?, To be published in *International Conference on Learning Representations 2023 (ICLR 2023)*.
- (国内雑誌)
- [13] 中川大也: 冷却原子と量子多体系 孤立系から開放系へ、*数理科学* 2022年12月号、サイエンス社 (2022).
- (学位論文)
- [14] Norifumi Matsumoto: Theoretical study on non-unitary critical phenomena in the quantum Ising model (博士論文) .
- [15] Zhikang Wang: Control of Continuous Quantum Systems with Many Degrees of Freedom based on Convergent Reinforcement Learning (博士論文) .
- [16] Koki Shiraishi: Locality of the Quantum Master Equation in Open Quantum Many-Body Systems (修士論文) .
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [17] Masahito Ueda: Universal Thermodynamic Uncertainty Relation in Non-Equilibrium Dynamics, *The 3rd Workshop on Stochastic Thermodynamics (WOST III)*, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2022.5.30.
- [18] Masaya Nakagawa: Exact Bethe-ansatz solutions for open quantum many-body systems, *Workshop on Non-Hermitian Quantum Mechanics*, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2022.7.4.
- [19] Masahito Ueda: Non-Hermitian Physics, *International Conference on Atomic Physics Summer School 2022*, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2022.7.11.
- [20] Masahito Ueda: Quantum Thermalization, *International Conference on Atomic Physics Summer School 2022*, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2022.7.12.
- [21] Masahito Ueda: Universal Thermodynamic Uncertainty Relation in Non-Equilibrium Dynamics, Entropy and the Second Law of Thermodynamics – The past, the present, and the future, *Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, Bad Honnef, Germany*, 2022.7.15.
- [22] Masahito Ueda: Spinor Bose-Einstein Condensates, *International School of Physics “Enrico Fermi” on Quantum Mixtures with Ultra-Cold Atoms*, *International School of Physics “Enrico Fermi” Villa Monastero, Varenna, Italy*, 2022.7.18-23.
- [23] Masahito Ueda: Information Thermodynamics, *Nobel Symposium NS166: Emerging quantum technologies*, High Court, Malmo, Sweden, 2022.8.25.
- [24] Masahito Ueda: Symmetry Breaking and Topological Excitations in Spinor Condensates, *2022 Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlations in Exotic Materials*, Gump Station Berkley, Moorea, Tahiti, 2022.10.24.
- [25] Masahito Ueda: Non-Hermitian Quantum Physics, *Physics Colloquium*, University of Luxembourg Campus Limpertsberg, Luxembourg, 2023.2.22.
- [26] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, *APCTP Spring Colloquium*, Asia Pacific Center for Theoretical Physics, Pohang, Korea, 2023.03.17.
- 一般講演
- [27] Masaya Nakagawa: Exact eigenstates of multicomponent Hubbard models:  $SU(N)$  magnetic  $\eta$  pairing and weak ergodicity breaking, *Novel Quantum States in Condensed Matter 2022*, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2022.11.25.
- [28] Hongchao Li, Xiehang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Yang-Lee Singularity in BCS Superconductivity, *FoPM International Symposium*, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.2.07

- [29] Koki Shiraiishi, Masaya Nakagawa, Takashi Mori, and Masahito Ueda: Fundamental equations for open quantum many-body systems, FoPM International Symposium, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.2.07
- (国内会議)
- 招待講演
- [30] 中川大也: 冷却原子系における近藤効果、冷却原子気体における少数量子系の普遍的性質、京都大学基礎物理学研究所、2022.8.23.
- [31] 中川大也: 冷却原子気体における開放量子多体系の物理、KEK 素核研・物構研連携研究会、オンライン、2023.2.17.
- 一般講演
- [32] 白石航暉、中川大也、上田正仁: Lieb-Robinson 限界と開放量子多体系の量子マスター方程式の局所性、日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022.9.12.
- [33] 中川大也、桂法称、上田正仁: 多成分 Hubbard 模型の部分可積分性：散逸によって誘起される非エルゴード的ダイナミクス、日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022.9.13.
- [34] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 量子多体系における連続スペクトル中の束縛エネルギー固有状態、日本物理学会 2022 年秋季大会、東京工業大学、2022.9.14.
- [35] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 測定量に対する物理的制限が固有状態熱化仮説の成立に及ぼす影響、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023.3.25.
- (セミナー)
- [36] Liu Ziyin: Does the Refractory Period Help Learning? A Spiking Neural Network Perspective, Harvard-LMU Young Scientists' Forum, 2022.7.
- [37] Liu Ziyin: Collapse and Phase Transition in Deep Learning, NeuroTheory Seminar, Harvard University, 2022.10.11.
- [38] Liu Ziyin: Collapse and Phase Transition in Deep Learning, Tomaso Poggio Lab, Massachusetts Institute of Technology, 2022.11.7.
- [39] Hongchao Li: Yang-Lee Singularity in BCS Superconductivity, Department of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China, 2022.12.08.
- [40] Liu Ziyin: Two Low-Rank Mechanisms in Deep Learning, Haim Sompolinsky Lab Seminar, Harvard University, 2023.1.16.
- [41] Liu Ziyin: The Probabilistic Stability and Low-Rank Bias of SGD, Math Machine Learning seminar, Max Planck Institute/UCLA, 2023.1.26.
- [42] Liu Ziyin: What shapes the loss landscape of Self-Supervised Learning?, NTT Japan, Musashino R&D Center, 2023.2.
- [43] Shoki Sugimoto: Typicality of the eigenstate thermalization hypothesis in realistic systems with local interactions, MathPhys Analysis Seminar, IST Austria, 2023.3.2.
- [44] Liu Ziyin: Collapse and Phase Transition in Deep Learning, 統計数理研究所, Japan, 2023.3.7.

# 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. Furthermore, we have recently tackled an understanding of AI and machine learning from a viewpoint of physics. We list our main research subjects in FY2022 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
  - Embedding of the Yang-Lee quantum criticality in open quantum systems [1]
  - Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids [2]
  - Eigenstate thermalization in long-range interacting systems [3]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
  - Fundamental theory for training deep neural networks [4, 5, 6]
  - Universal thermodynamic uncertainty relation in nonequilibrium dynamics [7]
  - Control of a quantum rigid body using reinforcement learning [8]

[1] Norifumi Matsumoto, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **4**, 033250 (2022).

[2] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, Masaki Tezuka, Masahito Ueda, and Norio Kawakami, Phys. Rev. B **105**, 205125 (2022).

[3] Shoki Sugimoto, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. **129**, 030602 (2022).

[4] Zihao Wang\* and Liu Ziyin\*, Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022) [Oral].

[5] Liu Ziyin, Botao Li, and Xiangming Meng, Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022).

[6] Liu Ziyin, Ekdeep Singh Lubana, Masahito Ueda, and Hidenori Tanaka, To be published in International Conference on Learning Representations 2023 (ICLR 2023).

[7] Liu Ziyin and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **5**, 013039 (2023).

[8] Zhikang Wang, Doctoral Thesis, the University of Tokyo (2022).