

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

並進対称なスピン系における固有状態熱化仮説

冷却原子系などにおける実験技術の発展により孤立量子系が実現され、ユニタリ時間発展下での量子多体系の熱平衡化が観測された。この熱平衡化機構として有力視されているのが、固有状態熱化仮説 (Eigenstate thermalization hypothesis, ETH) である。ETH は、量子多体系の全てのエネルギー固有状態は、限られたクラスの物理量に着目する限りミクロカノニカル集団と区別できないという仮説であり、様々な系といくつかの物理量について具体的なモデルに基づく数値計算によって確かめられてきた。一方で、対称性を持つ系においては対称性に付随する保存量は時間

発展せず、したがって ETH を破る。このような系では、ETH は各対称性セクター内部において個別に成立すると考えられている。しかし、いくつかの数値計算において、並進対称性を有する系においても局所的物理量であれば対称性セクターに分けずとも ETH が成り立つことが報告されている。本研究では、並進対称性を持つ 1 次元スピン系のランダム行列領域において、系の半分以上に作用する局所量であれば、ランダム行列理論から予測される最適な収束速度で ETH を満たすことを証明した [4]。ランダム行列領域におけるハミルトニアンは一般に極めて多体かつ非局所的な項を含むが、我々は局所相互作用のみをもつハミルトニアンについての数値計算を行い、その場合にもランダム行列領域における結果が成り立つことを実証した。

BCS 超伝導における Yang-Lee の零点

Yang と Lee は、相転移における特異性の起源を理解するために、Yang-Lee の零点と呼ばれる分配関数の零点による一般的なアプローチを発展させた。彼らは、常磁性相と強磁性相の間の有限温度相転移を理解するために、複素磁場の存在下での古典 Ising 模型の分配関数の零点の分布を調べ、零点がフガシティの複素平面における単位円上にのみ分布すること、すなわち Lee-Yang の円定理を証明した。我々は、超伝導量子相転移における真性特異点の起源を理解するために、Yang-Lee 理論を BCS 超伝導に一般化した [5]。我々は引力相互作用の強度を複素数に拡張することで BCS 模型の分配関数の零点を見出し、その数が Fermi 面不安定性によって真性特異点をもつ超伝導ギャップと対応することを示した。また、我々は Yang-Lee の零点が相互作用強度の複素平面上で半円上に分布することを見出した。この Yang-Lee の零点の半円分布の一般性を示すためにくりこみ群解析を適用し、中立有意な結合定数を持つ量子多体系における Yang-Lee の零点は、元の Lee-Yang 円定理とは対照的に、一般に複素相互作用平面上の半円上に分布することを示した。さらに、我々は BCS 超伝導における Yang-Lee 特異性に起因する非ユニタリ臨界現象も調べた。

Yang-Lee 端特異性の実験的観測

Yang-Lee 端特異性 (Yang-Lee edge singularity) とは、古典 Ising 模型の複素磁場平面における Yang-Lee の零点分布の端点付近で起こる特異性を指す。1978 年に Fisher によって非ユニタリ臨界現象の典型例として指摘されて以来、Yang-Lee 端特異性は相転移・臨界現象の研究において重要な位置を占めていたが、この臨界現象は虚数磁場下で起こるため、その実験的実現は難しいものとされてきた。本研究では、実験グループとの共同研究により、ロスのある単一光子を用いて虚数磁場を実験的に実現し、Yang-Lee 端特異性の初の直接観測に成功した [9]。具体的には、光子の偏光をスピン自由度とし、1 次元古典 Ising 模型と量子古典対応によって等価となる $(0+1)$ 次元量

子スピン系を実現した。この方法の目覚ましい点は、ロスのある光子の非ユニタリ時間発展により虚数磁場下の Ising 模型の実・虚時間発展を直接シミュレートできる点である。この方法を用いて、虚数磁場下の分配関数および物理量を実験的に測定し、臨界指数を決定した。さらに、物理量の温度依存性の測定から、古典 Ising 模型には現れない量子臨界現象特有の新たなスケーリングとそれに伴う臨界指数も見出した。本実験結果は、Yang-Lee 端特異性の初の直接観測という意義に留まらず、開放量子系を用いて平衡統計力学を探究する新たな可能性に繋がるものと期待される。

開放量子多体系のデコヒーレンスを記述する準粒子

量子多体系が環境と相互作用することによるデコヒーレンスを記述することは、量子力学的な大自由度と環境による散逸を共に取り入れなければならないため複雑な問題である。一方で、量子多体系における多くの現象は素励起（準粒子）を基本単位として記述することができる。我々は、開放量子系の時間発展の生成子（リウビリアン）の固有モードにおいてデコヒーレンス過程を記述する準粒子の存在を見出し、インコヒーレントンと名付けた [6]。リウビリアンをラダー上の非エルミートハミルトニアンとみなすと散逸項が非エルミートな相互作用項として表されることを用いると、この準粒子は散逸によって密度行列のケット自由度とブラ自由度の間に形成される束縛状態に対応する（図 1.1.1）。位相緩和による散逸下のボソン系の数値計算から、このような準粒子の束縛・非束縛転移がダイナミクスにおけるコヒーレントな振動からインコヒーレントな減衰への転移を引き起こすことを示し、この転移は準粒子の最小束縛エネルギーに対応するスペクトルギャップ（量子コヒーレンスギャップ）の消失によって特徴づけられることを示した。さらに、Bethe 仮説による厳密解を用いて、多体系におけるこのような準粒子の存在とその束縛・非束縛転移の存在を厳密に示した。

冷却分子における散逸によって形成される準安定強磁性クラスター

極低温に冷却された異核二原子分子気体は、大きな電気双極子モーメントをもつことから強い長距離相互作用を有する量子多体系の実現舞台として大きな注目を集めている。しかし、冷却分子系には多くの場合化学反応による分子のロスが存在し、極低温・高密度の分子気体の生成にとって大きな壁となってきた。我々は、分子ロスを量子マスター方程式を用いて記述し、1次元光格子中の双極子相互作用するフェルミ分子系のダイナミクスを解析した [3]。その結果、分子間の強い長距離相互作用と分子ロスによる散逸の協力効果により、ロスレートから予想される寿命よりも非常に長い時間のあいだ存在する準安定状態を見出した。この準安定状態は、強い長距

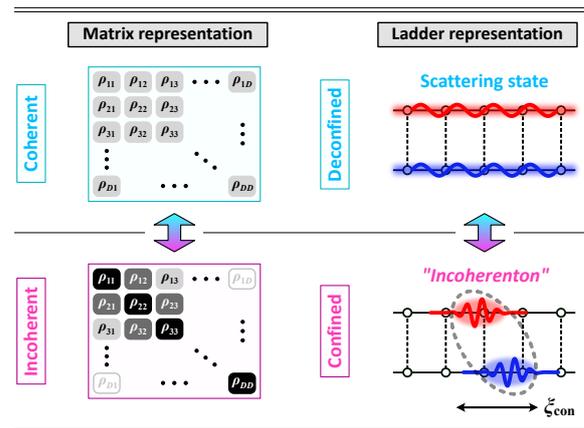


図 1.1.1: 開放量子多体系のデコヒーレンスを記述する準粒子の概念図 [6]。密度行列はベクトル表示することによりラダー上の量子状態にマップすることができる。ラダー上で上の鎖（ケット自由度）と下の鎖（ブラ自由度）の間に束縛状態（インコヒーレントン）が形成されると、密度行列の言葉では非対角要素（量子コヒーレンス）が距離と共に減衰する。

離相互作用によって運動が凍結することで形成された分子クラスターが強磁性状態となり、パウリの排他律からオンサイトのロスが禁止されることによって生じる。さらに、スピン間相互作用の対称性に応じて様々なスピン状態のクラスターが形成され、特に SU(2) 対称な場合には準安定状態はスピン S のハイゼンベルグ模型に対応したコヒーレントなダイナミクスを示すことを見出した。本研究結果は、物理学 4 年生が上田研で行った理論演習で得られた成果が元となったものである。

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

現代的なニューラルネットワークは数多くの対称性を持つ。つまり、モデルのアウトプットを変えることなく、ニューラルネットワークのパラメータを変換する方法が複数存在する。我々は最近の研究で、自己教師あり学習における学習ダイナミクスが損失関数の対称性に起因して階段状の曲線を描くことを示した [1]。また、別の研究では、我々は対称性が訓練後のパラメータのスパース性と関係することを示し、対称性を用いてスパース性を実現する学習アルゴリズムの設計を行った [2]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] James B. Simon, Maksis Knutins, Liu Ziyin, Daniel Geisz, Abraham J. Fetterman, and Joshua Albrecht: On the stepwise nature of self-supervised learning, International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023).
- [2] Liu Ziyin and Zihao Wang: Sparsity by Redundancy: Solving L1 with SGD, International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023).
- [3] Naoki Hara and Masaya Nakagawa: Metastable ferromagnetic clusters in dissipative many-body systems of polar molecules, *Phys. Rev. A* **108**, 013306 (2023).
- [4] Shoki Sugimoto, Joscha Henheik, Volodymyr Ribabov, and László Erdős: Eigenstate Thermalisation Hypothesis for Translation Invariant Spin Systems, *J. Stat. Phys.* **190**, 128 (2023).
- [5] Hongchao Li, Xie-Hang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda: Yang-Lee Zeros, Semicircle Theorem, and Nonunitary Criticality in Bardeen-Cooper-Schrieffer Superconductivity, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 216001 (2023).
- [6] Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda: Quasiparticles of decoherence processes in open quantum many-body systems: Incoherentons, *Phys. Rev. Research* **5**, 043225 (2023).
- [7] Liu Ziyin and Masahito Ueda: Zeroth, first, and second-order phase transitions in deep neural networks, *Phys. Rev. Research* **5**, 043243 (2023).
- [8] Federico Roccati, Miguel Bello, Zongping Gong, Masahito Ueda, Francesco Ciccarello, Aurélie Chenu, and Angelo Carollo: Hermitian and non-Hermitian topology from photon-mediated interactions, *Nat. Commun.* **15**, 2400 (2024).
- [9] Huixia Gao, Kunkun Wang, Lei Xiao, Masaya Nakagawa, Norifumi Matsumoto, Dengke Qu, Haiqing Lin, Masahito Ueda, and Peng Xue: Experimental observation of the Yang-Lee quantum criticality in open quantum systems, To be published in *Physical Review Letters* (arXiv:2312.01706).

(国内雑誌)

(学位論文)

- [10] Liu Ziyin: Symmetry Breaking in Deep Learning (博士論文) .
- [11] Liu Kangqiao: Theoretical Study on Information Engines for Quantum Transport (博士論文) .
- [12] Shoki Sugimoto: Theoretical Study on Thermalization in Isolated Quantum Systems (博士論文) .
- [13] Li Hongchao: Quantum Many-Body Theory of Dissipative Superfluidity (修士論文) .

- [14] Shuma Sugiura: Theoretical Study of the Dynamics of a Trapped Particle under Continuous Measurement and Feedback (修士論文) .

<学術講演>

(国際会議)

招待講演

- [15] Masahito Ueda: Beyond Hermitian Quantum Physics, Non-Hermitian Topology: from Classical Optics to Quantum Matter (NHTOP23), Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Germany, 2023.8.15.
- [16] Masahito Ueda: Eigenstate thermalization hypothesis: locality and range of interactions, Nonequilibrium physics - current trends and future perspectives, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, 2023.8.28.
- [17] Masaya Nakagawa: Exact Liouvillian spectrum of a one-dimensional dissipative Hubbard model, Workshop on exactly solvable models of open quantum systems, Steklov Mathematical Institute, online, 2023.9.14.
- [18] Masahito Ueda: Maxwell's demon, Gibbs paradox, and thermodynamic energy cost of information processing, Quantum Energy Initiative (QEI), NUSS Kent Ridge Guild House, Singapore, 2023.11.22.
- [19] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Ultracold Atomic Gases: Thirty Years of Activities and Looking Forward, The University of Hong Kong, China, 2023.12.8.
- [20] Masahito Ueda: Yang-Lee zeros, semicircle theorem and nonunitary criticality in open quantum dynamics, Quantum many-body systems out-of-equilibrium, Institut Henri Poincare, Paris, France, 2024.3.19.

一般講演

- [21] K. Shiraishi, M. Nakagawa, T. Mori and M. Ueda: Derivation of the quantum master equation based on the Lieb-Robinson bound, Statphys28, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.8.7.
- [22] S. Sugimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Rigorous Bounds on Eigenstate Thermalization, Statphys28, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.8.8.
- [23] M. Nakagawa and M. Ueda: Dissipative Fermi-Hubbard model, Statphys28, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2023.8.9.
- [24] S. Sugimoto, R. Hamazaki, and M. Ueda: Typicality of the Eigenstate Thermalization for Realistic Systems with Few-body Interactions, Physics of Open System and Beyond, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2023.8.19.

- [25] K. Shiraishi, M. Nakagawa, T. Mori and M. Ueda: Derivation of the quantum master equation based on the Lieb-Robinson bound, Physics of Open System and Beyond, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2023.8.20.
- [26] K. Shiraishi, H. Yamasaki, and M. Murao: Efficient decoding of stabilizer code by single-qubit local operations and classical communication, Quantum Innovation 2023, Tokyo Convention Hall, Tokyo, Japan, 2023.11.16.
- [27] K. Shiraishi, H. Yamasaki, and M. Murao: Efficient decoding of stabilizer code by single-qubit local operations and classical communication, QIP 2024, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, 2024.1.16.
- [28] A. Hokkyo and M. Ueda: No-Go Theorem from Eigenstate Thermalization Hypothesis about Work Extractability in Locally Interacting Systems, International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.2.14.
- [29] H. Li, X. Yu, M. Nakagawa, and M. Ueda: Yang-Lee zeros, semicircle theorem, and nonunitary criticality in Bardeen-Cooper-Schrieffer superconductivity, International Symposium on Quantum Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.2.14.
- (国内会議)
- 招待講演
- [30] 中川大也: 開放量子系の多体物理とその展開、量子凝縮相研究における新潮流、京都大学、2023.6.10.
- [31] 上田正仁: Beyond Hermitian Quantum Physics、情報物理学の新展開、理化学研究所、2024.3.22.
- 一般講演
- [32] 中川大也、上田正仁: 量子フィードバック制御のトポロジー、日本物理学会第 78 回年次大会、東北大学、2023.9.18.
- [33] 杉本昇大、Joscha Henheik, Volodymir Riabov, László Erdős: 並進対称なスピン系における物理量の局所性と固有状態熱化仮説、日本物理学会第 78 回年次大会、東北大学、2023.9.18.
- [34] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 純粋状態にある量子多体系の熱平衡化、ipi-ダイキン シンポジウム、東京大学、2023.10.24.
- [35] 石井敬直: ニューラルネットワークによる非平衡定常状態の計算、ipi-ダイキン シンポジウム、東京大学、2023.10.24.
- [36] 法橋頭広: 一般確率論から見た熱平衡化、第 3 回量子情報・量子基礎論研究会、オンライン、2023.11.04.
- [37] 中川大也、上田正仁: 対称性に保護されたトポロジカルフィードバック制御、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024.3.18.
- [38] 酒本悠暉、上田正仁: 正則グラフ上の繰り返しゲームにおけるピンクノイズダイナミクス、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024.3.19.
- [39] 杉本昇大、濱崎立資、上田正仁: 典型的な非可積分系において固有状態熱化仮説を満たす物理量のクラス、日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン、2024.3.20.
- (セミナー)
- [40] 中川大也: 開放量子多体系における磁性と超流動、セミナー、日本原子力研究開発機構、2023.6.27.
- [41] 中川大也: 1 次元散逸 Hubbard 模型の厳密解、セミナー、東京工業大学、2023.7.28.
- [42] 中川大也: 冷却原子気体で探る開放量子多体系の物理、セミナー、東京理科大学、2023.11.1.
- [43] Shoki Sugimoto: Typicality of Thermalization in Isolated Quantum Systems, Seminar, University of Gdańsk, 2023.11.10.
- [44] Masaya Nakagawa: Topology of discrete quantum feedback control、セミナー、東京大学生産技術研究所、2023.11.27.
- [45] Shoki Sugimoto: Eigenstate Thermalization for Translation Invariant Spin Systems, StatPhys Seminar, The University of Tokyo, 2023.12.01.
- (その他)
- [46] 法橋頭広: 様々な第 2 法則と熱力学との関係、第 68 回物性若手夏の学校、奥琵琶湖マキノパークホテル&セミナーハウス、2023.08.12.
- [47] 石井敬直: ニューラルネットワークによる非平衡定常状態の計算、第 68 回物性若手夏の学校、奥琵琶湖マキノパークホテル&セミナーハウス、2023.08.12.
- [48] A. Hokkyo and M. Ueda: Universal bound on Work Extractability in Quantum Many-Body Systems, SQP2024, 2024.02.21, poster presentation award.
- [49] 石井敬直: Spin 1/2 dissipative Heisenberg model における定常解、計算物理春の学校 2024、沖縄市町村自治会館、2024.03.13.

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 FY2023 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
 - Eigenstate thermalization hypothesis in translation invariant spin systems [1]
 - Yang-Lee zeros in BCS superconductivity [2]
 - Experimental observation of the Yang-Lee edge singularity [3]
 - Quasiparticles of decoherence processes in open quantum many-body systems [4]
 - Metastable ferromagnetic clusters induced by dissipation in ultracold molecules [5]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
 - Fundamental theory for training deep neural networks [6, 7, 8]

- [1] Shoki Sugimoto, Joscha Henheik, Volodymyr Riabov, and László Erdős, *J. Stat. Phys.* **190**, 128 (2023).
[2] Hongchao Li, Xie-Hang Yu, Masaya Nakagawa, and Masahito Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 216001 (2023).
[3] Huixia Gao, Kunkun Wang, Lei Xiao, Masaya Nakagawa, Norifumi Matsumoto, Dengke Qu, Haiqing Lin, Masahito Ueda, and Peng Xue, To be published in *Physical Review Letters* (arXiv:2312.01706).
[4] Taiki Haga, Masaya Nakagawa, Ryusuke Hamazaki, and Masahito Ueda, *Phys. Rev. Research* **5**, 043225 (2023).
[5] Naoki Hara and Masaya Nakagawa, *Phys. Rev. A* **108**, 013306 (2023).
[6] James B. Simon, Maksis Knutins, Liu Ziyin, Daniel Geisz, Abraham J. Fetterman, and Joshua Albrecht, *International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023)*.
[7] Liu Ziyin and Zihao Wang, *International Conference on Machine Learning 2023 (ICML2023)*.
[8] Liu Ziyin and Masahito Ueda, *Phys. Rev. Research* **5**, 043243 (2023).