

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、孤立量子系の熱平衡化などについて研究を行っている。また、非平衡開放系の新たなプラットフォームとして、量子測定とフィードバック制御が重要な役割を果たす浮揚ナノ粒子の系に注目し、研究を展開している。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

量子フィードバック制御のトポロジー

系の連続変形で不変な幾何学的性質を特徴づけるトポロジーは、対称性の自発的破れと並んで物質相の分類に大きな役割を果たしてきた。さらに、通常の熱平衡系にとどまらず、非平衡系もトポロジーによって分類することが可能である。このような非平衡系のトポロジーは、トポロジカル相を人工的に創成・制御する方法を与えるのみならず、平衡系にはない非平衡特有のトポロジカル相の舞台ともなる。本研究では、測定とフィードバック制御を受ける量子系にトポロジーによる特徴づけを導入し、量子フィー

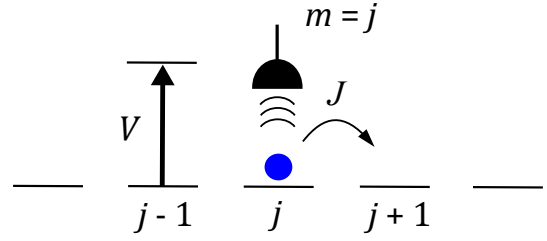


図 1.1.1: 量子フィードバック制御によってカイラルな輸送を起こすトポロジカル Maxwell デーモンモデル [14]。1 次元格子点をホッピングする粒子の位置を測定し、測定された位置 m の左側のサイトのポテンシャルをフィードバック操作で引き上げることで、一方向輸送を実現する。

ドバック制御によって作り出される非平衡トポロジカル相の新たなクラスを見出した [14]。特に、一粒子系の量子フィードバック制御を記述する量子チャンネルのトポロジーを記述する一般的な枠組みを与え、量子チャンネルの巻きつき数が量子 Hall 効果のエッジ状態とも類似したカイラルな輸送を特徴づけることを示した。さらに、量子チャンネルを対称性に基づいて系統的に分類し、射影測定による量子フィードバック制御は 10 種類の対称性クラスで分類されることを示した。具体的な例として、2010 年に行われた Maxwell デーモンの実証実験のセットアップを量子系に拡張することにより、量子フィードバック制御によってカイラル・ヘリカルな輸送を引き起こすトポロジカル Maxwell デーモンを構成した (図 1.1.1)。これらのトポロジカルフィードバック制御は、外界からの擾乱やノイズからトポロジーによって保護された安定なフィードバック制御を行う方法となることが期待される。

多成分 Hubbard 模型の厳密な固有状態とエルゴード性の弱い破れ

スピン $1/2$ を持つ通常の Hubbard 模型の一般化である多成分 Hubbard 模型は、 $SU(N)$ 群で記述されるエキゾチックな量子磁性や、量子色力学とも類似した多成分間の Cooper ペアリングの舞台として注目を集めている。多成分 Hubbard 模型は冷却原子気体を使って実現することが可能であり、実験的にも精神的に調べられている。一方で、多成分 Hubbard 模型の解析はその豊富な内部自由度のため難しく、厳密な結果も通常の Hubbard 模型と比べて限られていた。本研究では、そのような N 成分の Hubbard 模型について、任意の空間次元における厳密なエネルギー固有状態を構成した [9]。これは通常の 2 成分 (スピン $1/2$) Hubbard 模型における η ペアリング状態の一般化であるが、興味深いことに $SU(N)$ の量子磁性

と多成分間ペアリングによる超流動の非対角長距離秩序が共存する振る舞いを示す。さらに、この厳密な固有状態は、孤立量子系の熱平衡化の十分条件である固有状態熱平衡化仮説を破る量子多体傷跡状態とみなせる。この結果は、通常の2成分のHubbard模型とは異なり、3成分以上のHubbard模型においてはエルゴード性が弱く破れていることを示している。さらに、多成分Hubbard模型に適切な外場や散逸を加えることにより、このようなエルゴード性の弱い破れによる熱平衡化しないダイナミクスが実際に観測可能であることを示した。

量子相転移における Yang-Lee の零点とエンタングルメント転移

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。しかし、トポロジカルな量子相転移のように、量子相転移の中には熱力学的量の特異性では説明されない例外が存在する。我々は、エンタングルメントエントロピーの観点から一般の量子相転移に対する Yang-Lee 理論を展開し、Yang-Lee の零点分布の端がパリティー時間 (PT) 対称自由フェルミオン系におけるエンタングルメント転移点に対応することを厳密に証明した [12]。さらに、簡略化された Bethe 方程式に基づいた Bethe 仮設法を展開することにより、相互作用系である XXZ スピン鎖に対してもこの結果を一般化した。我々の結果は、エンタングルメント転移と Yang-Lee 端特異性との間に普遍的な対応関係が存在することを示している。

1.1.2 量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合

孤立量子多体系から取り出せる仕事の普遍的上限

フォン・ノイマンの先駆的な研究以来、量子力学から熱力学と統計力学を基礎づける理論的試みが数多くなされてきた。環境から孤立した量子多体系の測定・制御技術の進歩により、このような基本的な問題を実験的に検証することが可能になってきている。冷却原子気体やトラップされたイオンにおける熱化の観測に触発され、孤立量子系が熱化する条件、特に固有状態熱化仮説 (eigenstate thermalization hypothesis, ETH) に焦点が当てられている。この仮説は平衡アンサンブルだけでなく単一のエネルギー固有状態も局所的には熱平衡であることを主張しており、多くの系で数値的に検証されている。このような背景から、我々は熱力学のもう一つの中心的な問題である「系

からどれだけの仕事を取り出せるか」に取り組んだ。従来の量子系からの仕事抽出に関する議論では、任意のユニタリ操作が可能であると仮定している。しかし、これを多体系で実現するためには非局所的かつ多体相互作用を持つハミルトニアンが必要であり、現実的ではない。さらに上記の議論は、有限温度において第二法則を満たす純粋状態は存在しないことを示唆しており、エネルギー固有状態はそれ自体熱的であるとする ETH と一見矛盾している。我々は、制限された操作のもと量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界を導出することで、熱化と仕事抽出の間の「矛盾」を解決した [10]。量子多体系から抽出可能な仕事 (エルゴトロピー) の最大値は、初期状態の局所的な非平衡性と量子操作によって引き起こされる局所的なエントロピーの減少によって上から押さえられる。導出した不等式を用いて、ETH が成り立つときにエネルギー固有状態が仕事抽出の意味での熱力学第二法則、すなわちプランクの原理を満たすことを証明した。

グラフ上の進化ゲーム理論における非平衡ダイナミクス

進化ゲーム理論は、プレイヤーの戦略的な行動の変化をゲーム理論の枠組みで説明する分野である。特に、囚人のジレンマと呼ばれるゲームでは、最も基本的なスキームでは各プレイヤーにとって非協力的な戦略を選択することが自身の利得の最大化のため合理的である。しかし、相互協力の方が相互非協力よりも各プレイヤーにより多くの利得を与える。この状況を社会的ジレンマと呼ぶ。近年この社会的ジレンマを解消し、相互協力を実現させるためのメカニズムが複数提案されている。そのメカニズムの一つがグラフ構造である。すなわち、グラフのノード上に配置されたプレイヤーがエッジで接続されたノード上のプレイヤーと繰り返しゲームを行い、プレイヤーが確率的に戦略を変更するダイナミクスを導入することで、協力関係が促進されることが近年明らかになった。我々は、利得及び戦略変更に関わるランダム性を変化させた場合の、協力的なプレイヤーの出現頻度を示す相図を得た [6]。相図には、三つの領域、つまり協力的なプレイヤーが全滅する領域、非協力的なプレイヤーが全滅する領域、両者が定常的に共存する領域が現れることを明らかにした。この共存領域では、隣接する協力的なプレイヤーたちが緻密なクラスター構造を複数形成することで、社会的ジレンマがある状況下でも非協力的な戦略が優勢になることを防ぐことを実証した。さらに、進化ゲームの数値シミュレーションを行い、正方格子、及び正則グラフ上の進化ゲームでは上記の共存領域はひし形の形を持つことを見出した。また、ひし形の共存領域は、4-正則グラフの場合の方が正方格子の場合よりも大きいということより、社会的ジレンマ下において、複雑なネットワーク構造は協力関係をより促進する効果があることを明らかにした。また、ひし形の共存領域の正則グラフ度数依存性を図示することで、度数が大きくなるほどひし形の領域は小さくなることを見出した。このことより、プレイヤー間

の連結数が少ない構造が協力関係を促進するかを明らかにした。また、この結果は平均場近似により得られる定常解によって説明されることを示した。くわえて、ひし形の共存領域では、協力的なプレイヤーの時間変化の離散フーリエ変換から得られるパワースペクトルは、周波数に関して冪関数的に減衰することを示した。

<受賞>

- [1] 白石航暉: 分科会 優秀発表賞、第 69 回物性若手夏の学校、2024.08.03.
- [2] 法橋頭広: 分科会 優秀発表賞、第 69 回物性若手夏の学校、2024.08.03.
- [3] 小柳津敦: M1 優秀賞、理論物理学セミナー 2025、2025.2.22.

<報文>

(原著論文)

- [4] 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, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 176601 (2024).
- [5] Cheng Shang and Hongchao Li: Resonance-dominant optomechanical entanglement in open quantum systems, *Phys. Rev. Applied* **21**, 044048 (2024).
- [6] Yuki Sakamoto and Masahito Ueda: Pink-noise dynamics in an evolutionary game on a regular graph, *Phys. Rev. E* **110**, 034110 (2024).
- [7] Liu Ziyin, Mingze Wang, Hongchao Li, Lei Wu: Parameter Symmetry and Emergence of Noise Equilibrium in Stochastic Training, *Neural Information Processing Systems (NeurIPS2024)*.
- [8] Koki Shiraishi, Hayata Yamasaki, and Mio Murao: Efficient local operations and classical communication extraction of quantum information encoded in stabilizer codes, *Phys. Rev. A* **110**, 052617 (2024).
- [9] Masaya Nakagawa, Hosho Katsura, and Masahito Ueda: Exact eigenstates of multicomponent Hubbard models: $SU(N)$ magnetic η pairing, weak ergodicity breaking, and partial integrability, *Phys. Rev. Research* **6**, 043259 (2024).
- [10] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda: Universal Upper Bound on Ergotropy and No-Go Theorem by the Eigenstate Thermalization Hypothesis, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 010406 (2025).
- [11] Lennart Dabelow and Masahito Ueda: Symbolic equation solving via reinforcement learning, *Neurocomputing* **613**, 128732 (2025).
- [12] Hongchao Li: Yang-Lee zeros in quantum phase transitions: An entanglement perspective, *Phys. Rev. B* **111**, 045139 (2025).

- [13] Kazuki Yamamoto, Masaya Nakagawa, and Norio Kawakami: Correlation versus dissipation in a non-Hermitian Anderson impurity model, *Phys. Rev. B* **111**, 125157 (2025).
- [14] Masaya Nakagawa and Masahito Ueda: Topology of Discrete Quantum Feedback Control, *Phys. Rev. X* **15**, 021016 (2025).

(国内雑誌)

(学位論文)

- [15] Akihiro Hokkyo: Universal Upper Bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems (修士論文).
- [16] Takanao Ishii: Quantum i.i.d. Steady States 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: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Ultracold Atoms Japan 2024, Okinawa Institute of Science and Technology, Onna, Japan, 2024.4.12.
- [18] Masahito Ueda: Eigenstate thermalization hypothesis: locality and range of interactions, 49th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO), Hotel Kompas, Slovenia, 2024.4.22.
- [19] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian quantum physics I (5/20), Beyond-Hermitian quantum physics II (5/21), Croucher Summer Course on Ultracold Atom Physics, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China, 2024.5.20, 21.
- [20] Masaya Nakagawa: Topology of discrete quantum feedback control, Recent Developments and Challenges in Topological Phases, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2024.6.3.
- [21] Masahito Ueda: Non-Hermitian Quantum Physics, HQI-FQSP 1st Workshop “Perspectives of fundamental quantum science”, RIKEN, Saitama, Japan, 2024.6.19.
- [22] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian Quantum Physics, Advances in Quantum Simulation and Sensing with Ultracold Gases, Physikzentrum, Bad Honnef, Germany, 2024.6.26.
- [23] Masaya Nakagawa: Topological Maxwell’s demon, The 14th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Stanford University, Stanford, USA, 2024.9.25.
- [24] Masahito Ueda: Topology of Discrete Feedback Control, Non-Hermitian topology, geometry and symmetry across physical platforms, The Simons Center for Geometry and Physics, NY, USA, 2024.9.26.

- [25] Masahito Ueda: Roles of locality and range of interactions on quantum thermalization, Quantum Thermodynamics Down Under (QTDU), University of Queensland's City Campus, Brisbane, Australia, 2024.11.14.
 - [26] Masaya Nakagawa: Topological Maxwell's demon, From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis, Okinawa Institute of Science and Technology, Onna, Japan, 2024.11.14.
 - [27] Masahito Ueda: Beyond-Hermitian quantum physics, CREST-EPiQS International Workshop 2024, The SODOH Higashiyama Kyoto, Kyoto, Japan, 2024.12.5.
 - [28] Masahito Ueda: Topology of Discrete Feedback Control, CEMS Symposium on Quantum Information and Spintronics 2024, Sola City Conference Center, Tokyo, Japan, 2024.12.11.
 - [29] Masahito Ueda: Topology of discrete feedback control: a new platform for exploring nonequilibrium phenomena, APS March Meeting, Anaheim Hilton, LA, USA, 2025.3.19
- 一般講演
- [30] Masaya Nakagawa: Topological Maxwell's demon, Quantum Simulation of Novel Phenomena with Ultracold Atoms and Molecules, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, 2024.4.22.
 - [31] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, NH2024 workshop, Kashiwa campus, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.7.12.
 - [32] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda: Universal bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems, From Quantum Materials to Quantum Information: Symposium on Trans-Scale Quantum Science and Quantum Materials Synthesis, Okinawa Institute of Science and Technology, Onna, Japan, 2024.11.14.
 - [33] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, New Trends in Condensed Matter Theory, Kashiwa campus, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2024.12.09.
 - [34] Koki Shiraishi: Theory of open quantum many-body systems, FoPM symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.2.17.
 - [35] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda: Universal bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems, FoPM symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.2.18.
 - [36] Atsushi Oyaizu: Quantum-Classical Correspondence for Monitored Quantum Dynamics, FoPM symposium, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025.2.18.

- [37] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate, APS March Meeting, Anaheim Convention Center, LA, USA, 2025.3.18

(国内会議)

招待講演

- [38] 中川大也: 量子多体系を自在に制御できる時代の非平衡物理に向けて、非平衡融合研究会、東京大学、2025.2.7.

一般講演

- [39] 中川大也: 冷却原子における開放量子多体系の理論の基礎づけをめぐって、第6回冷却原子研究会「アトムの会」、伊豆山研修センター、2024.7.31.
 - [40] 石田駿平、白石航暉、中川大也: グラフェンにおける光誘起異常ホール効果：量子マスター方程式によるエッジ電流解析、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、2024.9.16.
 - [41] 杉浦周磨、上田正仁: 浮揚ナノ粒子のフィードバック冷却法、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、2024.9.16.
 - [42] 中川大也: 冷却原子系に対する多体の量子マスター方程式の導出について、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、2024.9.17.
 - [43] 白石航暉、中川大也、森貴司: 開放量子多体系のデコヒーレンスと熱平衡化：Davies 方程式の回転波近似に依らない導出、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、2024.9.17.
 - [44] 法橋顕広、上田正仁: 量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、2024.9.17.
 - [45] 石井敬直、上田正仁: 定常状態が量子 i.i.d. 状態となる開放量子系の非平衡統計力学、日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、2024.9.19.
 - [46] 法橋顕広: 時間反転対称性と Wigner-Araki-Yanase 定理、Quantum Foundations 2025、東京大学柏キャンパス、2025.03.10.
 - [47] 法橋顕広、山口瑞樹、千葉侑哉: $S = 1$ bilinear-biquadratic 鎖における局所保存量の不在証明、日本物理学会 2025 年春季大会、オンライン、2025.3.18.
- (セミナー)
- [48] 中川大也: 量子フィードバック制御のトポロジー、駒場物性セミナー、東京大学、2024.5.17.
 - [49] 白石航暉: Quantum master equation for many-body systems: Derivation based on the Lieb-Robinson bound、セミナー、東京大学、2024.5.29.
 - [50] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate、統計力学セミナー、東京大学、2024.6.6.
 - [51] Hongchao Li: Dissipative Superfluidity in a Molecular Bose-Einstein Condensate、セミナー、清華大学、2024.8.4.

- [52] 中川大也: Topology of discrete quantum feedback control、セミナー、理化学研究所、2024.10.23.
- [53] 法橋顕広: 量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界と熱力学第二法則、芝浦 - 量子基礎論・量子情報オンラインセミナー、オンライン、2025.01.28.
- [54] 中川大也: Topological feedback control、セミナー、東京大学、2025.3.14.

(その他)

- [55] 石井敬直: 定常状態が量子 i.i.d. 状態となる開放量子系の非平衡統計力学、第 69 回物性若手夏の学校、ホテルたつき、2024.08.03.
- [56] 白石航暉: 物性物理のための量子マスター方程式入門、第 69 回物性若手夏の学校、ホテルたつき、2024.08.03.
- [57] 法橋顕広: 量子多体系から取り出せる仕事の普遍的な上界、第 69 回物性若手夏の学校、ホテルたつき、2024.08.03.
- [58] 小柳津敦: 被測定下の量子系における量子古典対応、理論物理学セミナー 2025、2025.2.22.
- [59] 石井敬直、甲田昌也: 開放量子多体系の NISQ シミュレーション、計算物理春の学校 2025、沖縄県市町村自治会館、2025.03.12.
- [60] 法橋顕広: Universal Upper Bound on Work Extractable from Quantum Many-Body Systems、ER-ATO・学術変革 B 合同合宿会議プログラム、磐梯熱海温泉ホテル華の湯 (風の杜)、2025.03.27.

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, 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 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 FY2024 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms, nonequilibrium open systems
 - Topology of discrete quantum feedback control [1]
 - Exact eigenstates and weak ergodicity breaking in multicomponent Hubbard models [2]
 - Yang-Lee zeros in quantum phase transitions and their relation with entanglement transitions [3]
- Unification of quantum physics, statistical mechanics, information theory, and machine learning
 - Universal upper bound on work extractable from isolated quantum many-body systems [4]
 - Nonequilibrium dynamics in an evolutionary game on a regular graph [5]

[1] Masaya Nakagawa and Masahito Ueda, Phys. Rev. X **15**, 021016 (2025).

[2] Masaya Nakagawa, Hosho Katsura, and Masahito Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 043259 (2024).

[3] Hongchao Li, Phys. Rev. B **111**, 045139 (2025).

[4] Akihiro Hokkyo and Masahito Ueda, Phys. Rev. Lett. **134**, 010406 (2025).

[5] Yuki Sakamoto and Masahito Ueda, Phys. Rev. E **110**, 034110 (2024).