

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。近年の実験技術と（固体物理、統計力学も含む）理論概念の進展を背景に、私たちは、スピノル BEC におけるトポロジカル励起や相関効果、原子間相互作用の強さを制御するもとの BCS-BEC クロスオーバーや Efimov 状態、人工ゲージ場中での量子ホール状態、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などの研究を行っている。

1.1.1 冷却原子気体

反平行磁場中の二成分ボース気体

光学的に導入された人工ゲージ場のもとでの冷却原子系が示す多体トポロジカル現象に近年、大きな関心が集まっている。量子スピン・ホール物理における相互作用効果を研究できる例として、我々は、二成分ボース気体に反平行な人工磁場を印加した時間反転対称な系の基底状態の性質を解析した。その結果、(i) 二つの分数量子ホール状態の直積で近似される分数量子スピン・ホール状態が成分間斥力相互作用の非常に強い領域まで安定に現れること、(ii) 成分間相互作用が引力の場合には二成分の粒子がペアを組んだ厳密な基底状態が得られることを示した。[4]

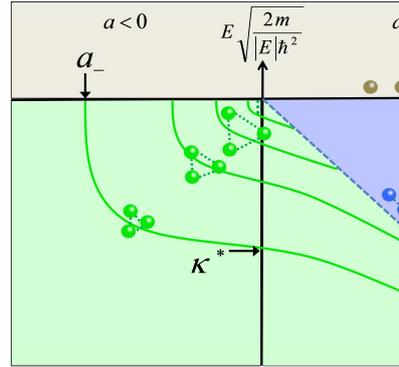


図 1.1.1: 3 粒子ボソン系の示す Efimov 状態。散乱長の逆数 $1/a$ およびエネルギーの平方根の空間において、離散スケール不変な無限個の状態が形成される。スケール因子 22.7 に加えて、三体パラメータ κ^* (あるいは a_-) の普遍性が示された。[10]

スピノル BEC における量子的質量獲得

通常は質量ゼロの粒子が量子揺らぎにより有限の質量を獲得することがある。このような粒子は quasi-Nambu-Goldstone (qNG) ボソンと呼ばれ、ヘリウム超流動やカラー超伝導などで存在すると予想されたが、これまで実験的に観測されていない。量子揺らぎの効果は通常小さく、観測には非常に高い解像度を持つプローブが必要だからである。我々は、スピノル BEC では qNG ボソンの獲得エネルギーギャップが系のゼロ点エネルギーの百倍オーダーで大きく、量子的質量獲得が始めて実験的に観測される舞台となり得ることを示した。さらに、フォノンと異なり、この qNG モードの伝播速度は量子揺らぎにより減少することを示した。[9]

Efimov 状態における三体パラメータの普遍性とリミット・サイクル

強く相互作用する同種ボソン系においては、離散スケール不変な無限個の 3 粒子束縛状態 (Efimov 状態; 図 1.1.1) が普遍的に現れる。Efimov 状態は近年、冷却原子系で観測され、マグノンやエキシトンでもその存在が予想されている。Efimov 状態は、臨界現象と異なり、くりこみ群のリミットサイクルによってその普遍性クラスが特徴づけられるという点で、極めてユニークである。最近、Efimov 状態を特徴づける 3 体パラメータが原子種に依らずに決まるという新たな普遍性が実験的に見出された。我々は、この普遍性が、リミットサイクルの開始点の普遍性として理解されることを明らかにし、さらに 4 体束縛状態の性質がリミットサイクルのトポロジーから理解できる可能性を提案した。[10]

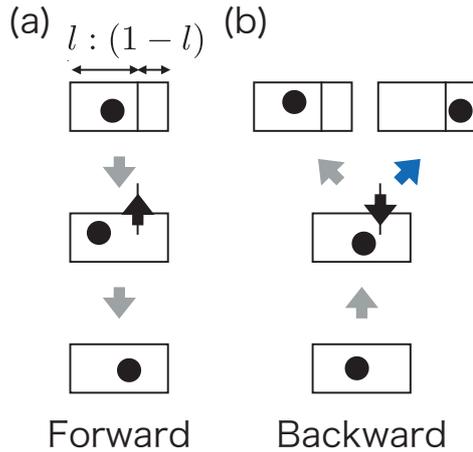


図 1.1.2: 自由膨張の絶対不可逆性。順過程 (a) の初期状態では右室にいる確率が零である一方、逆過程 (b) をたどると右室にいる確率は有限になる。その結果、確率の比の対数で定義されるエントロピー生成が発散し、通常の揺らぎの定理が適用できない。[6]

1.1.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

絶対不可逆過程における非平衡等式

ゆらぎの定理は線形応答を超える強い非平衡系においても成立する普遍的な等式であるが、定理が適用できない例として自由膨張過程 (図 1.1.2) 等が個別的に知られていた。我々は、それらの過程にエントロピー生成が発散する非常に不可逆性が強い経路が含まれていることを洞察し、絶対不可逆性という不可逆性のクラスを導入した。数学的には、絶対不可逆性は確率測度の特異部分に対応し、Lebesgue の分解定理によって通常の不可逆な部分から一意的に分離することができる。この知見に基づき、絶対不可逆な過程におけるゆらぎの定理を導いた。我々のゆらぎの定理から導かれる不等式は、非平衡過程のエントロピー生成に対して、(情報) 熱力学第二法則よりも強い制約を与える。[6]

フィードバック制御で取り出せる仕事の達成可能な上限

メゾスコピック系の制御技術の発展により、測定に基づいたフィードバック制御でミクロな自由度を操作する事が可能となっている。すなわち、いわゆるマクスウェルの悪魔の問題が実験室で検証可能となった。この発展に鑑み、我々は揺らぎの定理の枠組みを用いることで、フィードバック制御で取り出せる仕事エネルギーの達成可能な上限を導いた。結果として、今まで知られていた不等式と異なり、有限の操作パラメータでも等号達成可能なより強い不

等式が与えられた。新しい不等式は、ごく最近揺らぎの定理に導入された新しい概念である「絶対不可逆性」を、測定誤差が無限小の理想的な制御下の場合に扱うことで得られた。[8]

ユニタリー時間発展と外部操作のもとでの熱力学第二法則

外部操作も含めて完全にユニタリーな時間発展をする孤立量子系においても、実効的な熱平衡化が生じることが認識され、統計力学の基本仮定を量子力学だけから基礎付ける研究が盛んに行われている。このような系における熱平衡状態の熱力学エントロピーを記述する表式として、フォン・ノイマンエントロピーは適当ではない。なぜなら、ユニタリー不変性のために、それはあらゆる外部操作の下で不変に保たれ、熱力学第二法則と整合しないためである。我々は、近年提案された対角エントロピーの外部操作の下での単調増加性を調べた。これはエネルギー固有基底における密度行列の対角成分が表す確率分布のシャノン・エントロピーとして定義される。我々は、行う外部操作を固定し、操作を行う時刻の関数として対角エントロピー変化を解析し、それが殆ど全ての操作時刻に対して非負となることを示した。すなわち、系のミクロな状態を参照することなく外部操作を行う限り対角エントロピーは単調に増加し、熱力学第二法則と整合することを示した。[11]

量子測定における相対エントロピー保存則

量子測定においては量子系は、測定結果に依存した非ユニタリーな状態変化を伴う。こうした、量子測定における情報の定義および定量化には、測定の目的に応じて様々な可能性が存在するが、我々は量子系のある正作用素値測度であらわされるオブザーバブル X に着目した。例えば量子光学系における光子数計数測定やホモダイン測定では、測定する物理量 X としてはそれぞれ光子数および直交位相振幅を取るのが自然である。このとき、量子測定過程 Y が考えているオブザーバブル X の情報を保存する条件として、 Y の後に X の測定を行う結合測定過程が情報論的に X 一回の測定過程と同等であることとして定義し、 Y の測定出力の相対エントロピーが Y 前後の量子系の X の相対エントロピーの差のアンサンブル平均に等しいとする相対エントロピーの保存則を証明した。相対エントロピーを情報量として採用することで、測定出力が離散・連続に関わらず一貫した情報量の取り扱いが可能になり、また先行研究において得られていたシャノンエントロピーの保存則が成り立たないが相対エントロピーが保存する測定として、ホモダイン測定などの現実的な例が存在することを発見した。[12]

<受賞>

- [1] 村下湧音: 平成 26 年度理学系研究科研究奨励賞 (修士課程) (東京大学、2015 年 3 月)。

<報文>

(原著論文)

- [2] M. Hotta, J. Matsumoto and K. Funo: Black hole firewalls require huge energy of measurement, *Phys. Rev. D* **89**, 124023 (2014).
- [3] M. Frey, K. Funo and M. Hotta: Strong local passivity in finite quantum systems, *Phys. Rev. E* **90**, 012127 (2014).
- [4] S. Furukawa and M. Ueda: Global phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields, *Phys. Rev. A* **90**, 033602 (2014).
- [5] J. Jeong, M. D. Le, P. Bourges, S. Petit, S. Furukawa, S.-A. Kim, S. Lee, S.-W. Cheong, and J.-G. Park: Temperature-dependent interplay of Dzyaloshinskii-Moriya interaction and single-ion anisotropy in multiferroic BiFeO₃, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 107202 (2014).
- [6] Y. Murashita, K. Funo, and M. Ueda: Nonequilibrium equalities in absolutely irreversible processes, *Phys. Rev. E* **90**, 042110 (2014).
- [7] H. Kim, T. N. Ikeda, and D. A. Huse: Testing whether all eigenstates obey the eigenstate thermalization hypothesis, *Phys. Rev. E* **90**, 052105 (2014)
- [8] Y. Ashida, K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda: General achievable bound of extractable work under feedback control, *Phys. Rev. E* **90**, 052125 (2014).
- [9] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Quantum mass acquisition in spinor Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 230401 (2014).
- [10] Y. Horinouchi and M. Ueda: Onset of a limit cycle and universal three-body parameter in Efimov physics, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 025301 (2015). Editors' Suggestion.
- [11] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of thermodynamics under unitary evolution and external operations, *Annals of Physics* **354**, 338 (2015).
- [12] Y. Kuramochi and M. Ueda: Classicality condition on a system observable in a quantum measurement and a relative-entropy conservation law, *Phys. Rev. A* **91**, 032110 (2015).

(解説)

- [13] M. Ueda: Topological aspects in spinor Bose-Einstein condensates (Key Issues Review), *Rep. Prog. Phys.* **77**, 122401 (2014).

(会議抄録)

- [14] E. Kaminishi, J. Sato and T. Deguchi: Exact quantum dynamics of yrast states in the finite 1D Bose gas, *J. Phys.: Conf. Ser.* **497**, 011001 (2014) .

(国内雑誌)

- [15] 古川俊輔, 白石潤一: エンタングルメント・エントロピーと共形場理論 (最近の研究から), *日本物理学会誌* **69**, 541 (2014).

(学位論文)

- [16] Tatsuhiko Ikeda: Theoretical Study on the Foundation of Statistical Mechanics in Isolated Quantum Systems (博士論文).
- [17] Yui Kuramochi: Relative-entropy conservation law in quantum measurement and its applications to continuous measurements (博士論文).
- [18] Yuto Murashita: Absolute Irreversibility in Information Thermodynamics (修士論文).
- [19] Tomohiro Shitara: Inequalities between Information and Disturbance in Quantum Measurement (修士論文).

- [20] Shuhei M. Yoshida: Universal Relations in Strongly Interacting P-Wave Fermi Gases (修士論文).

(著書)

- [21] 上田正仁: 東大物理学者が教える「伝える力」の鍛え方 (知と学び)、ブックマン社、2015.1.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] E. Kaminishi, T. N. Ikeda, T. Mori and M. Ueda: Bethe ansatz approach to prethermalization in a coherently split 1D Bose gas, The 24th international conference on atomic physics, Washington D.C., USA, 2014.8.3-8
- [23] K. Funo: Quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control, YITP Workshop on Quantum Information Physics, Kyoto University, 2014.8.4-7.
- [24] K. Funo: Quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control, Physics of Quantum Information Processing, Osaka University, 2014.8.25-26.
- [25] Y. Ashida and M. Ueda: Quantum non-demolition measurement of single atoms in optical lattices, Physics of Quantum Information Processing, Osaka University, 2014.8.25-26.
- [26] Y. Ashida: Achievable upper bound of extractable work under feedback control, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2014.9.15-25.
- [27] Y. Murashita: Nonequilibrium Equalities in Absolutely Irreversible Processes, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2014.9.15-25.

- [28] Y. Horinouchi and M. Ueda: Universal Three-Body Parameter in Efimov Physics and Renormalization-Group Limit Cycle, 7th International Conference on the Exact Renormalization Group, Lefkada, Greece, 2014.9.22-26.
- [29] Y. Ashida and M. Ueda: Quantum non-demolition measurement of single atoms beyond the diffraction limit, DOQS 2014 Workshop: Many Body Dynamics and Open Quantum Systems, Glasgow, Scotland, 2014.10.20-22.
- [30] Y. Horinouchi and M. Ueda: Onset of a Limit Cycle and Universal Three-Body Parameter in Efimov Physics, International Conference on Topological Quantum Phenomena, Kyoto, Japan, 2014.12.16-24.
- [31] Y. Murashita, K. Funo and M. Ueda: Nonequilibrium equalities in absolutely irreversible processes, APS March Meeting 2015, San Antonio, USA, 2015.3.2-6.
- 招待講演
- [32] M. Ueda: Physical Origin of the Universality of the Three-Body Parameter in Efimov Physics, Conference on Non-equilibrium Phenomena in Condensed Matter and String Theory, Trieste, Italy, 2014.6.30-7.4.
- [33] M. Ueda: Absolute Irreversibility and New Nonequilibrium Equalities, Shortcuts to Adiabaticity, Optimal Quantum Control, and Thermodynamics Conference, Telluride, USA, 2014.7.13-18.
- [34] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, 23rd Annual International Laser Physics Workshop, Sofia, Bulgaria, 2014.7.14-18.
- [35] M. Ueda: Absolute Irreversibility and Nonequilibrium Equalities under Feedback Control, International Conference on Control of Self-Organizing Nonlinear Systems, Rostock-Warnemunde, Germany, 2014.8.25-28.
- [36] S. Furukawa: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, Quantum Gases 2014: Synthetic Gauge Field and Large Spin Systems, Beijing, China, 2014.8.26-28.
- [37] M. Ueda: Topological Excitations of Bose-Einstein Condensates, IAS/School of Science Joint Lecture, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2014.9.18.
- [38] M. Ueda: Introduction to Information Thermodynamics, Mesoscopic fluctuation, information, and nonequilibrium, Busan, Korea, 2014.11.21-22.
- [39] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in synthetic gauge fields, YITP Long-Term Workshop “Novel Quantum States in Condensed Matter 2014”, Kyoto, 2014.12.1.
- [40] T. N. Ikeda: Entanglement Prethermalization, Yukawa International Seminar (YKIS) 2014: Nonequilibrium Phenomena in Novel Quantum States, Kyoto, 2014.12.4
- [41] M. Ueda: Optical lattice/quantum information, ENS Workshop, Paris, 2014.12.8-10.
- [42] M. Ueda: Absolute irreversibility in nonequilibrium processes under feedback control, Workshop on Quantum Information and Thermodynamics, Sao Paulo, Brazil, 2015.2.23-27.
- (国内会議)
- 一般講演
- [43] 倉持結、上田正仁: 共鳴二準位原子を用いた直交位相振幅の量子非破壊測定の実現法について、若手のための量子情報基礎セミナー、2014.8.8-10
- [44] 蘆田祐人、布能謙、村下湧音、上田正仁: フィードバック制御で取り出せる仕事の達成可能な上限、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [45] 上西慧理子、森貴司、佐藤純、出口哲生: 一次元ボース気体の弱結合および強結合領域における再帰時間、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [46] 倉持結、上田正仁: 二準位原子を用いた直交位相振幅の量子非破壊測定モデル、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [47] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の Bose-Einstein 凝縮体における Bogoliubov 励起バンドのトポロジー、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [48] 吉田周平、上田正仁: p 波相互作用する Fermi 原子系における Tan の関係式、日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学、2014.9.7-10.
- [49] 蘆田祐人、上田正仁: 光格子系における回折限界を超えた位置測定方法、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [50] 池田達彦、上田正仁: 小さな孤立量子系におけるマイクロカノニカルアンサンブルの精度、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [51] 上西慧理子、森貴司、池田達彦、上田正仁: 前期熱平衡化のエンタングルメントによる新しい機構の提案、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [52] 倉持結、上田正仁: 相対エントロピーの観点から見た量子測定における情報の流れについて、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [53] 設楽智洋、倉持結、上田正仁: 量子測定における情報と擾乱の関係の推定理論に基づく定式化、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [54] 濱崎立資、池田達彦、上田正仁: 対称性を持つ非可積分な孤立量子系の緩和、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.

- [55] 東川翔、上田正仁: SU(N),SO(N) 対称性を持つ系の対称性の破れ方の分類と南部ゴールドストーンボソンの数え上げ、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [56] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の Bose-Einstein 凝縮体における Bogoliubov 励起バンドのトポロジー II、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- [57] 堀之内裕理、上田正仁: 強相関ボソン系における普遍的 4 体束縛状態とくりこみ群のリミットサイクル、日本物理学会第 70 回 (2015 年) 年次大会、早稲田大学、2015.3.21-24.
- 招待講演
- [58] 古川俊輔: ボソンの整数量子ホール状態、日本物理学会 2014 年秋季大会シンポジウム講演、中部大学、2014.9.7-10.
- [59] 蘆田祐人、上田正仁: 回折限界を超えた光格子量子撮像方法の提案、新学術領域「ゆらぎと構造の協奏: 非平衡系における普遍法則の確立」冷却原子研究会、学習院大学、2014.11.3
- [60] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の冷却原子系における量子ホール物理、統計物理学懇談会 (第 3 回)、慶応大学、2015.3.9-10.
- (セミナー)
- [61] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、低次元量子機能セミナー、物質・材料研究機構、2014.4.22.
- [62] 村下湧音: 完全不可逆過程の非平衡等式、羽田野研セミナー、東京大学、2014.6.18.
- [63] S. Furukawa: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids, Seminar of Department of Physics, Tsinghua University, China, 2014.9.1.
- [64] 古川俊輔: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids、東京無限可積分系セミナー、東京大学、2014.10.3.
- [65] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、量子物理学・ナノサイエンス第 109 回セミナー、東京工業大学、2014.11.5.
- [66] 池田達彦: Accuracy of the microcanonical ensemble in small isolated quantum systems、羽田野研セミナー、東京大学、2014.11.13.
- [67] 古川俊輔: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、羽田野研セミナー、東京大学、2014.11.20.
- [68] 上西慧理子: Entanglement prethermalization、羽田野研究室セミナー、東京大学、2014.11.27.
- [69] 上西慧理子: エンタングルメントによる前期熱平衡化、理科共通コロキウム、愛知教育大学、2014.12.10.
- [70] 上西慧理子: エンタングルメントによる前期熱平衡化、西成研究室セミナー、東京大学、2014.12.15.
- [71] 蘆田祐人、布能謙、村下湧音: 上田正仁: フィードバック制御で取り出せる達成可能な上限、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [72] 設楽智洋: 適応測定による測定の効率化とホモダイントモグラフィへの応用、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [73] 東川翔: 近藤効果: classic of electron correlation、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [74] 村下湧音、布能謙、上田正仁: 絶対不可逆性とゆらぎの定理、第 59 回物性若手夏の学校、浜名湖ロイヤルホテル、2014.7.29-8.2.
- [75] 池田達彦: 小さな孤立量子系におけるマイクロカノニカルアンサンブルの精度、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [76] 倉持結: 量子測定における系の POVM に関する古典条件と相対エントロピーの保存則、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [77] 設楽智洋: 量子測定における情報と擾乱の満たす不等式、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [78] 曾弘博: Gross-Pitaevskii 汎関数の厳密な導出、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [79] 濱崎立資: Relaxations in Nonintegrable Systems with Discrete Symmetries、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [80] 東川翔: 対称性の破れの分類理論と U(N) 対称性を持つ系への応用、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [81] 古川俊輔: 光格子中の BEC における Bogoliubov 励起バンドのトポロジー、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [82] 堀之内裕理: Property of a Limit Cycle and Efimov Physics、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [83] 村下湧音: 絶対不可逆性から見た Gibbs パラドックス、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.
- [84] 吉田周平: p 波フェルミ気体の相関関数と熱力学の普遍的な関係、第 7 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2015.14-16.

(その他)

1 Ueda Group

Research Subjects: Bose-Einstein condensation, fermionic superfluidity, cold molecules, measurement theory, quantum information, information thermodynamics

Member: Masahito Ueda and Shunsuke Furukawa

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 topological excitations and correlation effects in spinor BECs, BCS-BEC crossover and Efimov physics under the control of an atomic interaction strength, quantum Hall states 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 formulation of the dynamics of state reduction in light of information flow under measurements and feedback controls. We list our main research subjects in FY2014 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
 - Phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields [1]
 - Quantum mass acquisition in spinor Bose-Einstein condensates [4]
 - Onset of a limit cycle and universal three-body parameter in Efimov physics [5]
- Quantum Information, Quantum Measurement, and Foundation of Statistical Mechanics
 - Nonequilibrium equalities in absolutely irreversible processes [2]
 - General achievable bound of extractable work under feedback control [3]
 - The second law of thermodynamics under unitary evolution and external operations [6]
 - Relative-entropy conservation law in quantum measurement [7]

[1] S. Furukawa and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **90**, 033602 (2014).

[2] Y. Murashita, K. Funo, and M. Ueda, *Phys. Rev. E* **90**, 042110 (2014).

[3] Y. Ashida, K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda, *Phys. Rev. E* **90**, 052125 (2014).

[4] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 230401 (2014).

[5] Y. Horinouchi and M. Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 025301 (2015). Editors' Suggestion.

[6] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda, *Annals of Physics* **354**, 338 (2015).

[7] Y. Kuramochi and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **91**, 032110 (2015).