

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

磁場勾配パルスによる人工スピン・軌道相互作用

一般の内部スピン F を持つ原子系において、磁場勾配パルスを用いて、Rashba 型、Dresselhaus 型およびそれらの任意の線形結合のスピン・軌道相互作用を動的に誘起する方法を提案した。従来の方法ではレーザー照射のもとで原子の内部状態が空間依存したドレスト状態の部分空間に制限されることを利用していたのに対し、我々の方法では原子の磁気モーメントと外部磁場の直接的なゼーマン結合を利用し、内部状態の全空間でスピン・軌道相互作用を生成することができる。空間勾配を持った磁場パルスにより、粒子が位置、スピン状態双方に依存した摂動を受けることが、ここでのスピン・軌道結合の起源である。この方法は冷却原子の様々な実験系で実現でき、特に核スピンのゼロの原子に適している。[3]

スピンと軌道の結合した BEC 中の量子渦

対称性による量子渦の分類理論は、超流動ヘリウム 3 の研究において Salomaa と Volovik によって初めて導入された。彼らの議論では固定された境界条件の下での渦芯構造を扱っていたが、我々は任意の境界条件を持つ場合に分類理論を拡張した。拡張された分類理論を用いて、Rashba 型スピン・軌道相互作用のある BEC において、ゲージ、スピン、空間回転の結合した対称性が自発的に破れることで現れる量子渦を解析した。我々は数値計算を併用することにより、この系において先行研究では取り扱えなかった非自明な境界条件を持つ量子渦が現れること、我々の分類理論によってこの系の量子渦の完全な分類ができることを示した。これら新奇な量子渦の境界においては、非自明な量子数で特徴づけられる複雑なスピン・テクチャーが形成されていることも明らかにした。[5]

ボソンの整数量子ホール状態

中性電荷を持つ原子系において光学的に人工ゲージ場を発生させる技術が近年、急速に進展している。我々は人工磁場中の二成分ボース気体を厳密対角化法により解析し、 $U(1)$ 対称性で守られたボソン版の整数量子ホール状態が現れることの数値的証拠を提示した。フェルミオンの整数量子ホール状態は相互作用のないもとで現れるのに対し、この状態は二成分が強く相互作用することで初めて現れる。この状態のエンタングルメント・スペクトルを計算することで、電荷モード、スピンモードが逆向きに伝搬する特異な端状態の存在を示した。この結果は、二次元以上のボソン系において、対称性で守られたトポロジカル相の存在を数値的に示した数少ない例の一つである。[6]

スピノル BEC の量子相転移における揺らぎの効果

弱く相互作用する希薄原子気体の BEC の今までの研究では、様々な現象が平均場理論によって精度良く記述されていた。我々は、スピノル BEC において平均場理論では記述できない現象が現れることを発見した。スピン 2 BEC の基底状態には、スピンに依存する相互作用の大小関係によっていくつかの相が存在する。これらの相の秩序パラメータはスピン空間内で異なる対称性を持つため、相転移はすべて一次になり、相境界の回りに準安定状態が存在するのが自然である。しかし、Bogoliubov 理論によって得られる励起スペクトルには準安定状態が見られない。この矛盾を解決するために、我々はこの準安定状態は量子揺らぎの効果によって現れることを指摘し、Bogoliubov 理論を超える Beliaev 理論をスピノル BEC に拡張することで初めて準安定状態が実際に存在することを証明した。準安定状態から基底状態への巨視的なトンネリングに要する時間スケールも見積もった。更に、どの近似オーダーでも準安定状態が存在しない一次相転移のクラスを見出した。こ

ここでは相境界において系が高い対称性を持つことによって準安定状態は禁止されることがわかった。[8]

トポロジカル励起共存系にけるトポロジカルチャージ保存則

トポロジカル励起とは量子渦や点欠陥などのトポロジカルチャージによって特徴づけられる励起状態のことであり、自発的対称性が破れた系において普遍的に存在する。ここで定義されるトポロジカルチャージは一般に非可換群で記述される。そのため複数のトポロジカル励起が共存する状況下ではトポロジカルチャージ間に影響が存在する。例えば、スピン1ポラー相中の半整数量子渦と点欠陥が非可換であり、チャージ+1の点欠陥が半整数量子渦の周りを一周回るとチャージ-1の点欠陥へ連続変形する。しかし、ここで点欠陥が半整数量子渦の周りを回る前と後で点欠陥のチャージが保存していないという問題が存在する。我々はこの問題に焦点を当て、量子渦の捻じれによるトポロジカルチャージを考慮することで問題が解決されることを発見した。スピン1ポラー相の場合、点欠陥が一周回ると同時に伴い回転中心にある半整数量子渦にも捻じれが生じ、チャージ+2の半整数量子渦輪が形成される。結果として、全トポロジカルチャージは $2 + (-1) = 1$ で初期状態と一致している。我々はこの現象が非可換チャージを持つ他の秩序相においても一般的に現れることを代数的に示した。[14]

クラスター展開法によるBCS-BECクロスオーバーの研究

T. D. Lee と C. N. Yang が 1958 年に開発した量子統計力学のクラスター展開の方法を用いて、冷却フェルミ原子気体の BCS-BEC クロスオーバーを解析した。クラスター展開法で BCS-BEC クロスオーバーを解析する先行研究のほとんどが高温領域に関するものであるが、本研究では低温の超流動相転移温度まで記述する試みを行った。主な結果としては、相互作用が弱い極限 (BCS 極限) と強い極限 (BEC 極限) における超流動相転移温度が Lee-Yang の方法を用いて正しく導出できることを示した。また、Nozières と Schmitt-Rink の BCS-BEC クロスオーバー理論と、Lee-Yang の方法の関係を明らかにした。本研究は、ユニタリティ極限における BEC-BCS クロスオーバーの問題を解明するための準備研究と位置付けられる。[15]

Efimov 状態における 3 体パラメータの普遍性

散乱長が大きな 3 粒子系では、離散スケールリング則を示す 3 粒子束縛状態が普遍的に現れ、Efimov 状態とよばれる。Efimov 状態のエネルギースケールを決定する重要なパラメータとして 3 体パラメータが

あり、近年 3 体パラメータが普遍的に振る舞うことが冷却原子気体の実験で発見された。我々は冷却原子系特有の van der Waals 型相互作用以外の様々な相互作用をする 3 粒子問題を解き、この 3 体パラメータの普遍性が原子系以外の様々な系について普遍的に成立することを見出した。また、相互作用の遠方での減衰の速さに依存して、3 体パラメータの普遍クラスの分類が可能であることを発見した。Efimov 状態は冷却原子気体以外にも、 ^4He クラスター、中性子過剰原子核、マグノン等で現れる可能性が示唆されており、これら様々な系での少数系の理解に本研究が大きく貢献するものと期待される。[16]

1.1.2 量子論・統計力学と情報理論の融合

光子数計数とホモダイン検波の同時測定過程

量子連続測定とは時間的に連続的な量子測定であり、連続的量子フィードバック理論の基礎にもなっている。量子連続測定では、光子数計数測定に代表される離散的なジャンプによって測定出力と系の波束の収縮が記述されるものと、ホモダイン検波などのブラウン運動的な連続量を測定出力にもつもの二つが主として研究されてきた。本研究では、こうした二つの特徴を同時に具えた連続測定過程として光子数計数とホモダイン検波の同時測定過程を考察し、測定出力が与えられたときの条件付き波動関数と、測定出力の確率分布を解析的に導き、実際に光子が具える粒子-波動二重性が見出された。また、本研究で用いた解析的手法は、量子光学系の時間連続的フィードバックへ応用できる可能性があり、光学系のフィードバックの理論的發展へ貢献するものと期待される。[7]

測定とフィードバック制御を行うもとの量子版揺らぎの定理

揺らぎの定理や Jarzynski 等式は平衡から離れたところでも成り立つ関係式であり、非平衡統計力学の分野で多くの関心を集めてきた。近年、これらの関係式を測定やフィードバックの元でも適用できる形に拡張する試みがなされており、測定で獲得した情報量を含めた形の非平衡等式が (古典系で) 導かれている。我々は量子系においてフィードバック制御されるシステムと測定を行う装置 (メモリー) の両方を統一的に扱い、それぞれに対して成立する量子版揺らぎの定理を導出した。また、導出した等式に現れる情報量が量子測定の反作用の効果を含んでいることを見出した。これらの等式は超伝導 qubit 等の実験系で量子計算を行うときの熱力学的コストの見積りに活用できる可能性があり、量子情報処理に対する熱力学的な理解への発展が期待される。[9]

量子もつれを利用した熱機関

量子もつれは量子テレポーテーション等の情報処理を行うためのリソースとして活用できることが知られている。一方、量子もつれを利用することで、photo-carnot エンジンと呼ばれるモデルにおいてカルノー効率を超えた熱機関が作れることが提案されている。本研究では量子もつれと熱力学の関係を明らかにするために、量子もつれをリソースとしたときに測定とフィードバックを用いることでシステムから取り出せる仕事の上限を求めた。特に、測定とフィードバックを行う各ステップでシステム間の相関がどのように移り替わっていくかを特定し、系全体で取り出せる仕事は量子もつれがある部分系 A、B と測定器の三体相関に依存することを見出した。これらの結果はシステムを測定し、その測定結果を基にしてフィードバックを行う、いわゆるマクスウェルの悪魔の理論を量子もつれがある場合に拡張し、量子版マクスウェルの悪魔の理論の発展へとつながることが期待される。[10]

<受賞>

- [1] Takahiro Sagawa: Young Scientist Prize of the C3 Commission (Statistical Physics) of IUPAP, 2013.7.24.
- [2] グエン タン フク: 平成 25 年度理学系研究科研究奨励賞 (博士課程) (東京大学、2014 年 3 月).

<報文>

(原著論文)

- [3] Z.-F. Xu, L. You, and M. Ueda: Atomic spin-orbit coupling synthesized with magnetic-field-gradient pulses, *Phys. Rev. A* **87**, 063634 (2013).
- [4] D. M. Stamper-Kurn and M. Ueda: Spinor Bose gases: Symmetries, magnetism, and quantum dynamics, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1191 (2013).
- [5] Z.-F. Xu, S. Kobayashi, and M. Ueda: Gauge-spin-space rotation invariant vortices in spin-orbit coupled Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. A* **88**, 013621 (2013).
- [6] S. Furukawa and M. Ueda: Integer quantum Hall state in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 090401 (2013).
- [7] Y. Kuramochi, Y. Watanabe, and M. Ueda: Simultaneous continuous measurement of photon-counting and homodyne detection on a free photon field: dynamics of state reduction and the mutual influence of measurement backaction, *J. Phys. A: Math. Theor.* **46**, 425303 (2013).
- [8] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Fluctuation-induced and symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates, *Physical Review A* **88**, 043629 (2013).
- [9] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda: Integral quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control, *Phys. Rev. E* **88**, 052121 (2013).

- [10] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda: Thermodynamic work gain from entanglement, *Phys. Rev. A* **88**, 052319 (2013).
- [11] R. Lundgren, Y. Fuji, S. Furukawa, and M. Oshikawa: Entanglement spectra between coupled Tomonaga-Luttinger liquids: Applications to ladder systems and topological phases, *Phys. Rev. B* **88**, 245137 (2013).
- [12] S. Watabe and Y. Ohashi: Comparative studies of many-body corrections to an interacting Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. A* **88**, 053633 (2013).
- [13] S. Watabe and Y. Kato: Stability criterion for superfluidity based on the density spectral function, *Phys. Rev. A* **88**, 063612 (2013).
- [14] S. Kobayashi, N. Tarantino, and M. Ueda: Topological influence and backaction between topological excitations, *Phys. Rev. A* **89**, 033603 (2014).
- [15] N. Sakumichi, Y. Nishida, and M. Ueda: Lee-Yang cluster expansion approach to the BCS-BEC crossover: BCS and BEC limits, *Phys. Rev. A* **89**, 033622 (2014).
- [16] P. Naidon, S. Endo, and M. Ueda: Microscopic origin and universality classes of the Efimov three-body parameter, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 105301 (2014).

(学位論文)

- [17] Shimpei Endo: Theoretical Study on Efimov Physics in Ultracold Atoms (博士論文).
- [18] Nguyen Thanh Phuc: Beliaev Theory of Spinor Bose-Einstein Condensates and Its Applications (博士論文).
- [19] Yusuke Horinouchi: Functional Renormalization-Group Study of Few-Body Systems in Ultracold Atoms (修士論文).

(著書)

- [20] 上田正仁: 東大物理学者が教える「考える力」の鍛え方、ブックマン社、2013.7.
- [21] Yu Watanabe: Formulation of Uncertainty Relation Between Error and Disturbance in Quantum Measurement by Using Quantum Estimation Theory (Springer Theses), Springer, 2014.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [22] T. N. Ikeda, Y. Watanabe, and M. Ueda: Finite-size scaling of the Eigenstate Thermalization Hypothesis in the Lieb-Liniger model, The 11th US-Japan Joint Seminar, Nara, Japan, 2013.4.4-12.

- [23] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Recurrence time of dark soliton in the interacting 1D Bose gas with small number of particles, The 11th US-Japan Joint Seminar, Nara, Japan, 2013.4.4-12.
- [24] S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda: Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, International Conference on Few-body Physics in Cold Atomic Gases, Beijing, China, 2013.4.11-14.
- [25] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of pure state thermodynamics, Stellenbosch Workshop on Equilibration and Thermalization in Quantum Systems, Stellenbosch, South Africa, 2013.4.15-19.
- [26] S. Endo and M. Ueda: Screening of the interaction between fermionic polarons, Joint Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics and the CAP Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, Quebec City, Canada, 2013.6.3-7.
- [27] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, 7th ISSP International Symposium "Emergent Quantum Phases in Condensed Matter", Kashiwa, 2013.6.12-14.
- [28] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of pure state thermodynamics, Boulder Summer School 2013: Disorder and Dynamics in Quantum Systems, Boulder, US, 2013.7.8-2013.8.2.
- [29] K. Funo, Y. Watanabe and M. Ueda: Integral quantum fluctuation theorem under measurement and feedback control, Frontier of Statistical Physics and Information Processing, Kyoto, 2013.7.11-14.
- [30] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Evaluation of recurrence time for a localized many-body state dynamics in the 1D Bose gas, 22nd International Laser Physics Workshop, Prague, Czech Republic, 2013.7.15-19.
- [31] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Recurrence time of a localized many-body state dynamics in the 1D Bose gas, The 25th International Conference on Statistical Physics, Seoul, Korea, 2013.7.22-26.
- [32] S. Furukawa and M. Ueda: Quantum Hall states in two-component Bose gases in a synthetic magnetic field, YITP workshop "Mathematical Statistical Physics", Kyoto, 2013.7.29-8.3.
- [33] E. Kaminishi, J. Sato, and T. Deguchi: Recurrence time of a localized many-body state dynamics in the 1D Bose gas, YITP workshop "Mathematical Statistical Physics", Kyoto, 2013.7.29-8.3.
- [34] T. N. Ikeda, N. Sakumichi, A. Polkovnikov, and M. Ueda: The second law of pure state thermodynamics, Quantum Many Body Systems out of Equilibrium, Dresden, Germany, 2013.8.12-30.
- [35] S. Furukawa and M. Ueda: Global phase diagram of two-component Bose gases in antiparallel magnetic fields, RIKEN-APW joint workshop "Highlights in condensed matter physics", Wako, 2014.1.23-25.
- [36] S. Furukawa and M. Ueda: Global Phase Diagram of Two-Component Bose Gases in a Time-Reversal-Invariant Gauge Field, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Tokyo, 2014.1.27-30.
- [37] T. N. Ikeda and Y. Watanabe: Random matrix study of the time scale of thermalization after a quantum quench, APS March Meeting 2014, Denver, US, 2014.3.3-7.
- [38] E. Kaminishi, T. Ikeda, T. Mori, and M. Ueda: Exact analysis of prethermalization of a coherently split one-dimensional Bose gas, APS March Meeting 2014, Denver, US, 2014.3.3-7.
- 招待講演
- [39] M. Ueda: Where does the Bogoliubov theory go qualitatively wrong?, The 11th US-Japan Joint Seminar, Nara, 2013.4.4-12.
- [40] M. Ueda: First-order quantum phase transition in spinor Bose-Einstein condensates, The 7th Cross-Strait and International Conference on Quantum Manipulation, Beijing, China, 2013.6.28-30.
- [41] M. Ueda: Spinor Beliaev theory and first-order phase transition in spinor condensates, The 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic, 2013.7.15-19.
- [42] M. Ueda: Spinor Beliaev theory, The 2013 Summer Program of the Aspen Center for Physics, Aspen, US, 2013.8.4-24.
- [43] T. N. Ikeda: Thermodynamics in Unitary Time Evolution, Summer Workshop on "Physics, Mathematics, And All That Quantum Jazz" Osaka, Japan, August 2013.8.7-9.
- [44] S. Furukawa: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids, International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries, Ginnowan, 2013.10.23-26
- [45] M. Ueda: Thermodynamic Gain from Entanglement, Workshop on Information theoretic approaches to thermodynamics, Singapore, 2013.9.2.
- [46] M. Ueda: Information Thermodynamics: How the Maxwell's demon was exorcised, Workshop on Quantum Materials, Stuttgart, Germany, 2013.12.9-11.

- [47] M. Ueda: How Maxwell's demon was exorcised: the minimum energy cost for measurement and erasure of information, RIKEN-APW joint workshop "Highlights in condensed matter physics", Wako, 2014.1.23-25.
- [48] M. Ueda: Two Different Classes of Universality in the Three-Body Parameter in Efimov Physics, CIFAR Meeting on Cold Atoms, Banff, Canada, 2014.2.18-21.
- (国内会議)
- 一般講演
- [49] 遠藤晋平、Pascal Naidon、上田正仁: Physical origin of the universal three-body parameter in Efimov physics, 第10回 AMO 討論会、電気通信大学、2013.6.14-15.
- [50] 上西慧理子、池田達彦、上田正仁: 一次元ボース気体における非平衡緩和過程の厳密な解析、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.25-28.
- [51] N. T. Phuc、川口由紀、上田正仁: Emergent energy gap of Quasi-Nambu-Goldstone modes in spinor Bose-Einstein condensates, 日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [52] Pascal Naidon、遠藤晋平、上田正仁: Efimov 状態のユニバーサルな 3 体パラメータの物理的起源、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.25-28.
- [53] 布能謙、渡辺優、上田正仁: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [54] 古川俊輔、上田正仁: 人工ゲージ場中の二成分ボース気体における整数量子ホール状態、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [55] 渡部昌平、上田正仁: Spinor BEC in Kagome Lattice、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.18-21.
- [56] 古川俊輔、上田正仁: 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、第7回物性科学領域横断研究会、東京大学、2013.12.1-2.
- [57] 堀之内裕理、上田正仁: 冷却原子気体少数多体系における 3 体パラメータの普遍性のくりこみ群的理解、第7回物性科学領域横断研究会、東京大学、2013.12.1-2.
- [58] 渡部昌平、上田正仁: 人工ゲージ場を伴う非立方格子型光学格子中のスピノール BEC、第7回物性科学領域横断研究会、東京大学、2013.12.1-2.
- [59] 古川俊輔、上田正仁: 時間反転対称ゲージ場中の二成分ボース気体のグローバル相図、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第4回領域研究会、名古屋大学、2013.12.19-21.
- [60] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、量子論の諸問題と今後の発展、高エネルギー加速器研究機構、2014.3.10-11.
- [61] 池田達彦: 孤立量子系における熱力学第二法則、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [62] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [63] 古川俊輔: 結合した朝永・ラッティンジャー流体間のエンタングルメント・スペクトル: 梯子系および二次元トポロジカル相への応用、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [64] 村下湧音: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、基研研究会「量子情報の新展開」、京都大学、2014.3.23-25.
- [65] 遠藤晋平、Pascal Naidon、上田正仁: 異核原子混合系における Efimov 状態の 3 体パラメータ、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [66] 上西慧理子、池田達彦、森貴司、上田正仁: 一次元ボース気体における非平衡緩和過程の厳密な解析 II、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [67] 倉持結、上田正仁: 量子測定における相対エントロピーを用いた情報の読み出しと測定の反作用の特徴付けについて、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [68] 古川俊輔、上田正仁: 時間反転対称ゲージ場中の二成分ボース気体の基底状態相図、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [69] 堀之内裕理、上田正仁: Efimov 状態における 3 体パラメータの普遍性: 汎関数くりこみ群による理解、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [70] 村下湧音、布能謙、上田正仁: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- [71] 渡部昌平、上田正仁: 光学格子中の Raman 補助トンネリングを有するスピノール BEC、日本物理学会第 69 回 (2014 年) 年次大会、東海大学、2014.3.27-30.
- 招待講演
- [72] 池田達彦: 孤立量子系における熱力学第二法則、日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学、2013.9.25-28.
- [73] 布能謙: マクスウェルの悪魔: 量子情報と熱力学 ~ 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理 ~、基研研究会「量子情報物理学」、京都大学、2013.12.4-6.
- [74] 古川俊輔: トポロジカル秩序と量子エンタングルメント、基研研究会「量子情報物理学」、京都大学、2013.12.4-6.
- [75] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」、東京大学、2014.3.14.
- [76] 村下湧音: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、若手研究会「ゆらぎの定理: 現在と未来」、東京大学、2014.3.14.
- (セミナー等)
- [77] N. T. Phuc: Fluctuation-induced and symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates, RCAST, The University of Tokyo, Japan, 2013.6.

- [78] 設楽智洋: 量子推定理論を用いた不確定性関係の定式化、第 58 回物性若手夏の学校、白浜荘、2013.8.12-16.
- [79] 村下湧音: 熱機関の有限時間効率向上の可能性、第 58 回物性若手夏の学校、白浜荘、2013.8.12-16.
- [80] 遠藤晋平: Screening of the interaction between fermionic polarons、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [81] 上西 慧理子: Prethermalization in a coherently split one-dimensional Bose gas、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [82] 倉持結: 量子測定における相対エントロピーを用いた情報-反作用間トレードオフ関係、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [83] 設楽智洋: 適応的測定による測定の最適化、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [84] 布能謙: 量子フィードバック制御下でのゆらぎの定理、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [85] 古川俊輔: 人工磁場中の二成分ボース気体における量子ホール状態、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [86] 村下湧音: Lebesgue 分解より導かれる非平衡等式、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [87] 吉田周平: 2 成分 Fermi 気体で普遍的に成り立つ Tan の関係式とその p 波系への拡張、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [88] 渡部昌平: 人工ゲージ場を伴う非立方格子型光学格子中のスピノール BEC、第 6 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2013.12.7-9.
- [89] N. T. Phuc: Beliaev theory of spinor Bose-Einstein condensates and its applications, RIKEN, Japan, 2014.1.
- [90] 村下湧音: Lebesgue 分解に基づく非平衡等式、基礎物理学研究所、2014.3.5.
- [91] Y. Murashita: Optimizing Feedback Protocols, MERIT Colloquium 1, University of Tokyo, 2013.3.8.
- [92] Y. Murashita: Optimizing Feedback Protocols, 2nd MERIT Camp, Yuzawa Grand Hotel, 2013.3.10-12.

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 controlled 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 FY2013 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
 - Synthesis of spin-orbit coupling with magnetic-field-gradient pulses [1]
 - Quantized vortices in spin-orbit-coupled BECs [2]
 - Integer quantum Hall state of bosons [3]
 - Fluctuation effects in quantum phase transitions in spinor BECs [5]
 - Topological influence and backaction between topological excitations [8]
 - Cluster expansion study of BCS-BEC crossover [9]
 - Universality of three-body parameter in Efimov states [10]
- Quantum Information, Quantum Measurement, and Foundation of Statistical Mechanics
 - Simultaneous continuous measurement of photon-counting and homodyne detection [4]
 - Integral quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control [6]
 - Thermodynamic work gain from entanglement [7]

- [1] Z.-F. Xu, L. You, and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **87**, 063634 (2013).
- [2] Z.-F. Xu, S. Kobayashi, and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **88**, 013621 (2013).
- [3] S. Furukawa and M. Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 090401 (2013).
- [4] Y. Kuramochi, Y. Watanabe, and M. Ueda, *J. Phys. A: Math. Theor.* **46**, 425303 (2013).
- [5] N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, *Physical Review A* **88**, 043629 (2013).
- [6] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda, *Phys. Rev. E* **88**, 052121 (2013).
- [7] K. Funo, Y. Watanabe, and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **88**, 052319 (2013).
- [8] S. Kobayashi, N. Tarantino, and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **89**, 033603 (2014).
- [9] N. Sakumichi, Y. Nishida, and M. Ueda, *Phys. Rev. A* **89**, 033622 (2014).
- [10] P. Naidon, S. Endo, and M. Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 105301 (2014).