# 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で 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での情報の流れに 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

# 回折限界を超えた位置測定

物理法則で決まる原理的限界により光の波長より も小さい対象物は見えないと考えられてきた。近年 の実験技術の発展により、この位置分解能の限界ー 回折限界一が直接の制約となる状況が多く実現され ている。特に、冷却原子系で実現した量子気体顕微鏡 においては回折限界が要求する高い信号雑音比のた めに測定が破壊的になってしまうという制約があった。また、2014年のノーベル化学賞の対象にもおいる た生命科学における超解像蛍光顕微鏡においては膨大な撮像回数のために時間分解能が大きな制約となっていた。 我々は、回折限界を超えた分解能で原子の 分子の位置を測定するための理論的枠組みと計算手 法を確立する事で、これらの困難が解決できること を理論的に示した。特に、光格子系において量子測

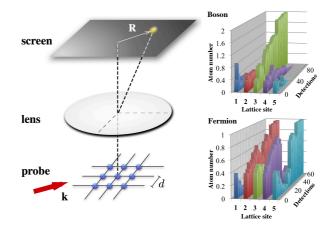


図 1.1.1: 左図: 光格子にトラップされた冷却原子の撮像。プローブ光が原子により散乱された後、レンズにより集光されスクリーンに像を結ぶ。得られた像から原子位置が推定される。右図: 量子測定理論により追跡した多原子の波束の実時間収縮過程。パウリの排他律により、ボソン(右上)よりもフェルミオン(右下)の方が波束の収縮が速く起こる。このような解析を応用する事で、原子位置の測定が回折限界を超えた分解能で行える。[11]

定理論を用いて多体波動関数の収縮を追跡することで、原子位置が高フィデリティーで決定できることを示した(図1.1.1)。これにより少数光子・非共鳴散乱光を用いた非破壊なシングルサイト測定が行える可能性を指摘した。さらに、理論を古典系にも拡張し超解像蛍光顕微鏡に応用することで、時間分解能の理論限界を達成できる解析手法を構築する事に成功した。[11,17]

### 共鳴 p 波 Fermi 気体における普遍的関係式

冷却原子気体において、Feshbach 共鳴を利用した 強相関気体が実現している。この系は、高温超伝導体 や中性子物質など強相関多体系のクリーンなモデル 系として期待される一方、理論的には量子モンテカ ルロ等を除き有効な計算手法が確立していない。近 年、BCS-BEC クロスオーバーの強相関領域におい て、系の短距離相関が特異なべキ則に従うこと、そ して、系の短距離相関と熱力学量が共にコンタクト と呼ばれる単一の物理量によって与えられることが 示された。これらの関係式は、s波相互作用する系に おいて、相互作用の詳細やトラップ形状、超流動相 か常流動相か等の情報に依らず、一般的に成り立つ 解析的な結果として注目を集めている。我々は、共 鳴的に p 波相互作用する Fermi 気体において、短距 離相関の振るまいと熱力学量の関係を調べた。共鳴 的なp波相互作用は強い紫外発散のために、s波相

1.1. 上田研究室 1. 一般物理理論

互作用の場合と異なりスケール不変なユニタリ極限を持たない。しかし、相互作用の到達距離と平均粒子間距離が大きく分離した希薄気体においては、一般的に、その中間的なスケールで相関関数がべキ的に振る舞うことを示した。またその係数、p波コンタクトが、エネルギーをp波散乱体積で微分した量と一致することを示した。[13]

#### Bose-Einstein 凝縮体の励起バンド・トポロジー

近年、冷却原子系において、レーザーを用いて人工 的にゲージ場を発生させ、様々に制御する技術が発展 している。最近の顕著な進展として、非自明なトポロ ジーを持ったバンドを示すことで知られる Haldane 模型が、周期変動する蜂の巣光格子中で実現された。 この系にフェルミ原子を注入することでトポロジカ ル絶縁体の実現が期待される一方、ボース原子を注入 した際にどのような新しい現象が起こるかは興味深 い。我々は、Haldane 模型を相互作用するボソン系へ 拡張した Haldane-Bose-Hubbard 模型を考え、BEC 相の励起構造を Bogoliubov 理論により解析した。そ の結果、相互作用がないときのバンドのトポロジカ ルな性質が、相互作用する BEC の Bogoliubov 励起 バンドに引き継がれること、相互作用ないしは粒子 数密度を大きくするとき、非自明な Chern 数を持っ た領域が徐々に広がることがわかった。この領域で は、系に端がある場合、二つの励起バンド間をつな ぐようにカイラル・エッジ・モードが現れる。凝縮 体の一部をこのようなエッジ・モードにコヒーレン トに励起することでエッジ物質波を生成でき、それ が背景の凝縮体と干渉することで端に沿って密度波 が現れる。これは巨視的量子干渉を利用したエッジ・ モードの新しい観測法として応用できる。[14]

#### エンタングルメント保存による準定常状態

冷却原子系において非平衡状態から熱平衡状態へ の緩和現象が実験で観測され、理論・実験の両方か ら緩和過程の理解が進んでいる。可積分に近い系で は、熱平衡状態への緩和より短い時間スケールで準 定常状態へ緩和する前期熱平衡化現象が知られてい る。我々は、一次元ボース気体の緩和過程について の最近の実験を、Lieb-Liniger 模型の量子クエンチ の問題として理論的に定式化した。量子クエンチ後 の時間発展をベーテ仮説法によって厳密に計算した 結果、従来の準定常状態への緩和とは異なる新しい タイプの緩和現象を発見した。さらに、この緩和現 象がエンタングルメント保存によって引き起こされ るという新たな機構を明らかにした。従来の前期熱 平衡化現象は「局所的な保存量」の存在によって引き 起こされると考えられていたが、我々が発見した前 期熱平衡化現象はエンタングルメントという非局所 性が現れるという点で新しい。その証拠として、こ の現象が部分系間のエンタングルメントを表す密度 行列の非対角要素から生じることを計算によって示 した。[15]

# 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量子非平衡等式

近年、様々な系で量子情報処理を実現するための 実験的技術が進展している。特に、エンタングルド 状態を生成したり、量子測定とフィードバック制御を 活用して、様々な量子状態を準備することが出来る ようになってきた。我々は一般的な量子測定・フィー ドバック制御を行うときの系の非平衡ダイナミクス を解析するうえで有用な、詳細ゆらぎの定理やジャ ルジンスキー等式等の一連の量子非平衡等式を導出 した。測定過程とフィードバック過程のそれぞれに 対して導かれた詳細ゆらぎの定理を用いると、それ ぞれの過程の前向き経路の確率と時間反転経路の確 率の比が、散逸を表す全エントロピー生成と関係付 けられる。これにより、量子測定やフィードバック で散逸を減らす方法について定量的に調べる手法を 導くことが出来た。従来の研究では測定器の初期状 態が純粋状態の場合や、射影測定を系に行う場合と いった、応用上重要なセットアップに対してジャル ジンスキー等式を導くことが出来なかった。我々は それらの原因である絶対不可逆過程の効果を取り入 れることで、一般の量子測定とフィードバック制御 を取り扱い、量子非平衡等式を導出できることを明 らかにした。[9]

#### 仕事揺らぎと散逸のトレードオフ関係

熱ゆらぎが無視できないような小さな系における 仕事や熱といった物理量が実験で測れるようになり、 理論の方でも微小系の(量子)熱力学の研究が活発 に進んでいる。このような系から仕事を取り出そう とすると、その量は熱ゆらぎによって確率的になっ てしまう。そこで、仕事のゆらぎが小さく、かつ熱浴 に散逸してしまう散逸仕事も小さくするようなプロ トコルが望ましいが、先行研究ではこれらの二つの 目的がそれぞれ別々のテクニックを使って研究され てきた。我々は、一般に非平衡な系では仕事ゆらぎ と散逸を同時にゼロにすることは出来ず、それらの 間にはトレードオフ関係があることを見出した。さ らに、仕事と散逸のそれぞれのゆらぎの和が非平衡 自由エネルギーのゆらぎよりも必ず大きくなること を発見した。これは、初期状態・終状態の非平衡さ の度合いによって仕事と散逸が受ける制約を表して いる。我々は、さらにトレードオフの下限を達成するプロトコルの導出を行い、それがハミルトニアン のクエンチ、熱平衡化、準静的過程の組み合わせで 構成されていることを示した。[16]

# 微小孤立量子系におけるミクロカノニカル分布の妥 当性

ユニタリ時間発展する孤立多体量子系においても 熱平衡化が起こり得ることが近年理解されてきた。系 のサイズが大きくなるにつれて、エネルギー固有状態 1. 一般物理理論 1.1. 上田研究室

それぞれが熱平衡状態に漸近するという固有状態熱 平衡化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis) のためである。しかしながら、この議論は十分大き な系でミクロカノニカル分布を正当化するが、有限 系でそれがどのような精度で適用出来るのかという 問いには答えていなかった。我々はこの問いに答え るため、1次元ハードコア・ボースハバード模型に おける相互作用クエンチ問題を数値的に解析し、ク エンチ後に到達する定常状態をミクロカノニカル分 布がどの程度良く記述しているのかを定量的に調べ た。その結果、ミクロカノニカル分布の精度が1/D (Dはヒルベルト空間の次元)に比例して向上する場 合があることを発見した。固有状態熱平衡化仮説は 高 $\alpha 1/\sqrt{D}$  に比例してしか向上しないという先行研 究を踏まえると、固有状態間の平均化という新たな 効果によってミクロカノニカル分布の精度が一層向 上することをこの結果は意味している。また、ヒル ベルト空間の次元 D は系の体積に関して指数関数的 に増大することを考慮すると、小さな系であっても ミクロカノニカル分布は非常に高い精度で適用可能 であることが明らかとなった。[10]

#### 局所的対称性を持つ非可積分系での一般化ギブス分布

近年、孤立量子系のユニタリー発展のみから統計 力学を正当化する試みが実験・理論の両面で進展して いる。特に、クエンチ後に系が達する定常状態がカノ ニカル分布で表されるかどうかは、最も盛んに研究 されている。エネルギーのみを保存する非可積分系 においては、Eigenstate Thermalization Hypothesis (ETH) と呼ばれる機構によってカノニカル分布が正 当化される。ETH とは、物理量をエネルギー固有状 態で挟んだ期待値そのものがカノニカル分布での統 計平均と等しくなるという仮説である。一方、保存 量を固有状態を決定するほど多く持つ可積分系では ETH が破れ、定常状態もカノニカル分布でなく、保 存量を考慮した一般化 Gibbs 分布 (GGE) で表され ると期待されている。我々はこの二つの中間的な場 合として、保存量を伴うような対称性を持つ非可積 分系について調べた。その結果、系が局所的な対称 性をサイズに比例して持つ場合は、非可積分系であっ てもカノニカル分布でなく GGE へと緩和すること を示した。またこの場合、通常の ETH は破れるが、 対称性セクターごとに見ると ETH が回復すること を発見し、この機構により GGE を正当化した。[18]

# 量子測定における情報と擾乱のトレードオフ関係

量子系に対し測定を行うとその反作用により被測定系は変化し、これを擾乱と呼ぶ。特に、系についての情報がより得られるような測定ほど、より大きな擾乱を引き起こす。この事は、古くはハイゼンベルグにより不確定性関係として指摘され、近年では量子情報理論の発展に伴い情報と擾乱の間のトレードオフ関係として定量的な定式化が様々な方法でなされてきた。我々は、未知状態を測定により推定する際の推定誤差に着目し、量子推定理論を用いてこのト

レードオフ関係を不等式の形で定式化した。情報は 測定値の確率分布についての古典 Fisher 情報量、擾 乱は測定前後の状態で失われた量子 Fisher 情報量を それぞれ用いて定量化した。得られた不等式に基い て、ある一定の情報を得られるような測定の内、与 える擾乱が最小であるようなものが論理的に可逆な 純粋測定であることを明らかにした。また、二状態 間の識別可能性の尺度を与えるダイバージェンスに ついて、類似のトレードオフ関係を満たすための条 件を明らかにし、特に最大量子相対エントロピーが これを満たすことを新たに見出した。[19]

#### <受賞>

- [1] 川口由紀: 文部科学大臣表彰若手科学賞(文部科学省、2015年4月12日).
- [2] 蘆田祐人: ポスター優秀賞第1位 (第60回物性若手 夏の学校、2015年7月31日).
- [3] 東川翔: 分科会優秀発表賞 (第 60 回物性若手夏の学校、2015 年 7 月 31 日).
- [4] 沙川貴大: 第 30 回西宮湯川記念賞(西宮市、2015 年 11 月 23 日).
- [5] 曽弘博: ポスタープレビュー賞 (第1回「トポロジー が紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、2015 年12月13日).
- [6] 蘆田祐人: 日本物理学会領域 1 第 4 回 (2015 年秋季 大会) 学生プレゼンテーション賞 (日本物理学会領域 1 運営委員、2016 年 3 月 20 日).
- [7] 東川翔: 日本物理学会領域 1 第 4 回 (2015 年秋季大会) 学生プレゼンテーション賞 (日本物理学会領域 1 運営委員、2016 年 3 月 20 日).
- [8] 蘆田祐人:平成27年度理学系研究科研究奨励賞(修士課程)(東京大学、2016年3月24日).

### <報文>

#### (原著論文)

- [9] K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda: Quantum nonequilibrium equalities with absolute irreversibility, New J. Phys. 17, 075005 (2015).
- [10] T. N. Ikeda and M. Ueda: How accurately can the microcanonical ensemble describe small isolated quantum systems?, Phys. Rev. E 92, 020102 (2015).
- [11] Y. Ashida and M. Ueda: Diffraction-unlimited position measurement of ultracold atoms in an optical lattice, Phys. Rev. Lett. 115, 095301 (2015). Editor's suggestion.
- [12] N. T. Phuc, G. Tatara, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Controlling and probing non-abelian emergent gauge potentials in spinor Bose-Fermi mixtures, Nat. Comm. 6, 8135 (2015).
- [13] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universal highmomentum asymptote and thermodynamic relations in a spinless Fermi gas with a resonant p-wave interaction, Phys. Rev. Lett. 115, 135303 (2015).

1.1. 上田研究室 1. 一般物理理論

- [14] S. Furukawa and M. Ueda: Excitation band topology and edge matter waves in Bose-Einstein condensates in optical lattices, New J. Phys. 17, 115014 (2015).
- [15] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda, and M. Ueda: Entanglement pre-thermalization in a one-dimensional Bose gas, Nat. Phys. 11, 1050 (2015).
- [16] K. Funo and M. Ueda: Work fluctuationdissipation trade-off in heat engines, Phys. Rev. Lett. 115, 260601 (2015).
- [17] Y. Ashida and M. Ueda: Precise multi-emitter localization method for fast super-resolution imaging, Optics Letters 41, 72 (2016).
- [18] R. Hamazaki, T. N. Ikeda, and M. Ueda: Generalized Gibbs ensemble in a nonintegrable system with an extensive number of local symmetries, Phys. Rev. E 93, 032116 (2016).
- [19] T. Shitara, Y. Kuramochi, and M. Ueda: Tradeoff relation between information and disturbance in quantum measurement, Phys. Rev. A 93, 032134 (2016).

#### (学位論文)

- [20] Yuto Ashida: Diffraction-Unlimited Position Measurement: from Quantum Gases to Biomolecules (修士論文).
- [21] 東川翔: 対称性の破れた相のリー代数による特徴づけ (修士論文).

#### <学術講演>

### (国際会議)

#### 一般講演

- [22] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universal highmomentum behaviors and thermodynamic relations in a spinless Fermi gas with a resonant pwave interaction, , 46th Annual DAMOP Meeting, Columbus, USA, 2015.6.8-12.
- [23] Y. Ashida and M. Ueda: Diffraction-unlimited position measurement of quantum particles, Gordon Research Conference: Atomic Physics, Newport, USA, 2015.6.14-19.
- [24] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with Symmetries, New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015, Kyoto University, 2015.7.27-8.7
- [25] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda and M. Ueda: Entanglement prethermalization, New Frontiers in Non-equilibrium Physics 2015, Kyoto University, 2015.8.3-7
- [26] K. Funo and M. Ueda: Work fluctuations and energy dissipation in nonequilibrium processes, New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics 2015, Kyoto University, 2015.8.17-8.19

[27] S. Higashikawa and M. Ueda: μ-symmetry breaking: algebraic approach to finding building block of quantum many-body systems, "Synthetic Quantum Magnetism", Dresden, Germany, 2015.8.31-9.4.

- [28] Y. Horinouchi and M. Ueda: Relation between a renormalization-group limit cycle and universal three-body parameter in Efimov physics, 12th US-Japan Seminar, Madison, USA, 2015.9.20-24.
- [29] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universal highmomentum asymptote and thermodynamic relations in a spinless Fermi gas with a resonant pwave interaction, 12th US-Japan Seminar, Madison, USA, 2015.9.20-24.
- [30] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs Ensemble in Nonintegrable Systems with Symmetries, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2015.9.29-10.8.
- [31] S. Higashikawa and M. Ueda:  $\mu$ -symmetry breaking: algebraic approach to finding building block of quantum many-body systems, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2015.9.29-10.8.
- [32] T. Shitara and M. Ueda: Information-Disturbance Relation in Quantum Measurement Based on Estimation Theory, Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, OIST, 2015.9.29-10.8.
- [33] K. Funo and M. Ueda: Work fluctuations and energy dissipation in nonequilibrium processes, Third Conference on Quantum Thermodynamics, Porquerolles, France, 2015.10.11-16.
- [34] Y. Murashita and M. Ueda: Resolving the Gibbs paradox in small thermodynamic systems, The 3rd East Asia Joint Seminar on Statistical Mechanics, KAIST, 2015.10.14-17
- [35] Y. Ashida and M. Ueda: Multi-Particle Quantum Dynamics under Continuous Observation, Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016), Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, 2016.1.12-14.
- [36] R. Hamazaki, T. N. Ikeda and M. Ueda: Generalized Gibbs ensemble in nonintegrable systems with an extensive number of local symmetries, Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016), Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, 2016.1.12-14.
- [37] Y. Horinouchi and M. Ueda: Topological property of a limit cycle and universal four-body bound states in Efimov physics: LMU-UT, Tokyo, Japan, 2016.2. 29-3.1.
- [38] S. M. Yoshida and M. Ueda: Universality and Anisotropy in a Resonantly Interacting p-Wave Fermi Gas, Cooperation in Physics Workshop: LMU-UT, Tokyo, Japan, 2016.2. 29-3.1.

1. 一般物理理論 1.1. 上田研究室

[39] K. H. Z. So, M. Ueda: Phase diagram of ferromagnetic spinor bosons in an optical lattice under an external magnetic field, APS March Meeting 2016, Baltimore, Maryland, USA, 2016.3.14-3.18.

#### 招待講演

- [40] M. Ueda: Few-body universality from atoms to nuclei (crossover sessions), The 21st International Conference on Few-body Problems in Physics, Chicago, USA, 2015.5.18-22.
- [41] M. Ueda: Relationship between the Onset of the Limit Cycle and the Universal Three-Body Parameter in Effimov Physics, 2015 Taiwan International Workshop on Ultra cold Atoms and Molecules, Taipei, Taiwan, 2015.7.9-11.
- [42] M. Ueda: Resolving the Gibbs Paradox in Small Thermodynamic Systems, Thermodynamics and Nonlinear Dynamics in the Information age, Telluride, USA, 2015.7.13-17.
- [43] S. Furukawa: Excitation band topology and edge matter waves in Bose-Einstein condensates in optical lattices, 24th Annual International Laser Physics Workshop, Shanghai, China, 2015.8.21-25.
- [44] U. Ebling: Spinor dynamics in ultracold Fermions, International Workshop "Synthetic Quantum Magnetism", Dresden, Germany, 2015.8.31-9.4.
- [45] S. Furukawa: Quantum Hall physics of bosons in synthetic gauge fields, International Workshop "Synthetic Quantum Magnetism", Dresden, Germany, 2015.8.31-9.4.
- [46] M. Ueda: Controlling and probing non-abelianness and quantum mass acquisition in spinor condensates, CUA(center for ultracold atoms) seminar, Boston, USA, 2015.9.13-19.
- [47] M. Ueda: Entanglement pre-thermalization in a Bose gas, The 12th US-Japan Seminar on many body quantum systems: from quantum gases to metrology and information processing, Madison, USA, 2015.9.19-25.
- [48] M. Ueda: Gibbs Paradox and Entanglement Prethermalization, Towards thermodynamics with quantum systems, Porquerolle, France, 2015.10.11-16.
- [49] M. Ueda: Controlling and Probing Non-Abelianness and Quantum Mass Acquisition in Spinor Condensates, Topological Phase in Condensed Matter and Cold Atomic Systems, Hong Kong, China, 2015.12.11-19.

# (国内会議)

#### 一般講演

[50] 設楽智洋、倉持結、上田正仁: 量子測定における情報 と擾乱のトレードオフ関係、第32回量子情報技術研 究会 (QIT32)、大阪大学、2015.5.25-26.

- [51] 蘆田祐人: 光格子系における回折限界を超えた位置測定方法、基研研究会「量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代」、京都大学、2015.7.13-16.
- [52] 設楽智洋: 量子測定における情報と擾乱のトレードオフ関係、基研研究会「量子制御技術の発展により拓かれる量子情報の新時代」、京都大学、2015.7.13-16.
- [53] 蘆田祐人、上田正仁: 情報理論による回折限界を超えた位置推定方法、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [54] 齋藤岳志、古川俊輔: 人工次元・ゲージ場中の相互作 用粒子系における悪魔の階段、日本物理学会 2015 年 秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [55] 東川翔、上田正仁: SU(N) 対称なフェルミオン系のペアリングと南部ゴールドストーンモード・トポロジカル励起、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [56] 東川翔、上田正仁: 対称性の破れた相での非可換渦の 実現可能性・エンタングルメント、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学、2015.9.16-19.
- [57] 設楽智洋、上田正仁: 線形応答理論を用いた量子 Fisher 情報量の決定、 量子統計モデリングのため の基盤構築、京都大学、2015.11.11-13.
- [58] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の Bose-Einstein 凝縮 体における励起バンド・トポロジーとエッジ物質波、第 9回物性科学領域横断研究会、東京大学、2015.11.13-15.
- [59] 古川俊輔: 結合トライマー模型によるボルボサイトの 磁気的性質の解析、物性研短期研究会「スピン系物理 の深化と最前線」、2015.11.16-18.
- [60] 上田正仁、古川俊輔: 冷却原子系におけるトポロジカル量子現象、第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [61] 曽弘博、上田正仁: 光格子中の強磁性スピナーボゾンの外部磁場下での相図、第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [62] 古川俊輔、上田正仁: 光格子中の BEC におけるバンド・トポロジーとエッジ物質波、第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [63] 堀之内裕理、上田正仁: くりこみ群のリミットサイクルと Efimov 状態の物理、第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会 京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [64] 吉田周平、上田正仁: 共鳴 p 波相互作用するスピンレス・フェルミ気体の普遍的性質、第1回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会、京都大学芝蘭会館、2015.12.11-13.
- [65] 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、第6回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフ ロンティア」集中連携研究会、東京大学、2016.2.9-10.
- [66] 吉田周平、上田正仁: 共鳴 p 波フェルミ気体の普遍性 と異方性、第6回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」集中連携研究会、東京大学、2016.2.9-10.

1.1. 上田研究室 1. 一般物理理論

- [67] 設楽智洋、上田正仁: 線形応答理論を用いた量子 Fisher 情報量の測定法、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、2016.2.17-18
- [68] 蘆田祐人、上田正仁: 実時間観測下における光格子系の量子ダイナミクス、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [69] 設楽智洋、上田正仁: 量子 Fisher 情報量の線形応答 理論を用いた決定法、日本物理学会第 71 回 (2016 年) 年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [70] 曽弘博、上田正仁: 光格子中の強磁性スピナーボゾンの外部磁場下での相図、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [71] 東川翔、上田正仁: トポロジカル励起の間にトポロジカルな influence が生じるための一般的条件、日本物理学会第71回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [72] 堀之内裕理、上田正仁: くりこみ群のリミットサイク ルと Efimov 状態、日本物理学会第 71 回 (2016 年) 年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [73] 村下湧音、上田正仁: 微小熱力学系における Gibbs のパラドックス、日本物理学会第 71 回 (2016 年) 年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [74] 吉田周平、上田正仁: p波フェルミ気体における異方的コンタクト、日本物理学会第 71 回 (2016 年) 年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [75] Zongping Gong、蘆田祐人、上田正仁: Fluctuation theorems for open quantum systems with nonequilibrium feedback control、日本物理学会第 71 回 (2016 年) 年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [76] O. Janson、古川俊輔、桃井勉、P. Sindzingre、J. Richter、K. Held: 結合トライマー模型によるボルボサイトの磁気的性質の解析、日本物理学会第70回(2016年)年次大会、東北学院大学、2016.3.19-22.
- [77] 蘆田祐人: 冷却原子気体の量子非破壊測定、ImPACT 量子情報技術ワークショップ第 2 回全体会議、JST 東 京本部別館、2016.3.28-30.

#### 招待講演

[78] 古川俊輔: エンタングルメント・エントロピーと共形 場理論 (チュートリアル講演)、第 32 回量子情報技 術研究会 (QIT32)、大阪大学、2015.5.25-26.

#### (セミナー)

- [79] Eriko Kaminishi: Entanglement prethermalization, OIST Quantum system unit (Thomas Busch group), 2015.6.8.
- [80] 設楽智洋: 量子測定における情報と擾乱のトレード オフ関係、長岡・小川研セミナー、電気通信大学、 2016.6.17.
- [81] 堀之内裕理: Efimov 状態とくりこみ群のリミットサイクル、日本大学理工学部素粒子論研究室コロキウム、日本大学、2015.7.1.
- [82] Yûto Murashita: New fluctuation theorems and the Gibbs paradox, Physics Colloquium, Universit du Luxembourg, 2015.9.24.

- [83] Eriko Kaminishi: Entanglement prethermalization in a one-dimensional Bose gas, Qulink Seminar at National Institute of Informatics, 2015.12.3.
- [84] 古川俊輔: Entanglement spectra in topological phases and coupled Tomonaga-Luttinger liquids、田仲・川口研セミナー、名古屋大学、2015.12.17.
- [85] Yusuke Horinouchi: Topological property of a limit cycle and universal four-body bound states in Efimov physics, QHP seminar, RIKEN Quantum Hadron Physics laboratory, 2016.3.7.
- [86] 村下湧音: New fluctuation theorems and the Gibbs paradox、竹内研セミナー、東京工業大学、2016.3.24.

#### (その他)

- [87] 蘆田祐人: 光格子系における回折限界を超えた位置測 定方法、第60回物性若手夏の学校、ぎふ長良川温泉 ホテルパーク、2015.7.27-31.
- [88] 東川翔: U(N) 対称なフェルミオン系の超流動状態の N の偶奇性の違い、第60回物性若手夏の学校、ぎふ 長良川温泉ホテルパーク、2015.7.27-31.
- [89] 吉田周平: 強く p 波相互作用するフェルミ気体の普 遍的な関係式、第60回物性若手夏の学校、ぎふ長良 川温泉ホテルパーク、2015.7.27-31.
- [90] 東川翔: U(N) 対称なフェルミオン系の超流動状態の N の偶奇性の違い、IMPACT 未来開拓研究会、休暇 村支笏湖、2015.10.13-18.
- [91] U. Ebling: Quantum Gases The coldest matter in the universe, the "Science Dialogue" program of JSPS, Tokyo Metropolitan Hibiya High School, 2016.1.14.
- [92] 蘆田祐人: 実時間観測下における光格子系の量子ダイナミクス、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [93] 久良尚任: 動的な量子推定問題と情報幾何、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [94] 設楽智洋: 量子 Fisher 情報量と線形応答理論、第8回 基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [95] 濱崎立資: 孤立量子系における対称性の揺らぎへの 影響、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、 2016.2.20-22.
- [96] 古川俊輔: 人工次元・ゲージ場中の相互作用粒子系に おける悪魔の階段、第8回基礎物理セミナー合宿、箱 根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [97] 村下湧音: 微小熱力学系における Gibbs のパラドックス、第8回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [98] 吉田周平: 共鳴 p 波フェルミ気体の普遍性と異方性、第 8 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.
- [99] Zongping Gong: Quantum trajectory thermodynamics with discrete feedback control、第 8 回基礎物理セミナー合宿、箱根太陽山荘、2016.2.20-22.

# 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 FY2015 below.

- Quantum many-body phenomena in ultracold atoms
  - Diffraction-unlimited position measurement for quantum gases and biomolecules [1, 2]
  - Universal relations in a Fermi gas with a resonant p-wave interaction [3]
  - Excitation band topology in Bose-Einstein condensates in optical lattices [4]
  - Entanglement pre-thermalization in a one-dimensional Bose gas [5]
- Quantum Information, quantum measurement, and foundation of statistical mechanics
  - Quantum nonequilibrium equalities with absolute irreversibility [6]
  - Work fluctuation-dissipation trade-off in heat engines [7]
  - Accuracy of the microcanonical ensemble in small isolated quantum systems [8]
  - Generalized Gibbs ensemble in a nonintegrable system with local symmetries [9]
  - Trade-off relation between information and disturbance in quantum measurement [10]
- [1] Y. Ashida and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 115, 095301 (2015). Editor's suggestion.
- [2] Y. Ashida and M. Ueda, Optics Letters 41, 72 (2016).
- [3] S. M. Yoshida and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 115, 135303 (2015).
- [4] S. Furukawa and M. Ueda, New J. Phys. 17, 115014 (2015).
- [5] E. Kaminishi, T. Mori, T. N. Ikeda, and M. Ueda, Nat. Phys. 11, 1050 (2015).
- [6] K. Funo, Y. Murashita, and M. Ueda, New J. Phys. 17, 075005 (2015).
- [7] K. Funo and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. 115, 260601 (2015).
- [8] T. N. Ikeda and M. Ueda, Phys. Rev. E 92, 020102 (2015).
- [9] R. Hamazaki, T. N. Ikeda, and M. Ueda, Phys. Rev. E 93, 032116 (2016).
- [10] T. Shitara, Y. Kuramochi, and M. Ueda, Phys. Rev. A 93, 032134 (2016).