

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400406

研究課題名(和文)量子観測で迫る統計力学の基礎と量子情報

研究課題名(英文)Quantum Measurement in Statistical Mechanics and Quantum Information

研究代表者

湯浅 一哉 (YUASA, Kazuya)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90339721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：量子力学の世界の奇妙さを際立たせる役者の一人である「量子観測」をキーワードに、それが単に「見る」ことにとどまらず、意外なところで本質的な役割を果たす様々な興味深いテーマに取り組んだ。特に、「量子計測」、「量子制御」、「統計力学の基礎」における「量子観測」の役割に焦点を当てて研究を展開し、「量子計測」や「量子制御」に関わる独自のアイデアを追究して「量子情報技術」に貢献するとともに、「統計力学の基礎」に新たな視点を提供した。

研究成果の概要(英文)：“Quantum measurement” is a keyword that distinguishes the quantum world from the classical world. We have explored nontrivial roles of quantum measurement in a variety of subjects. In particular, we have focused on “quantum metrology,” “quantum control,” and “statistical mechanics.” We have developed novel ideas and unique methodologies for quantum metrology and quantum control, contributing to the field of quantum information technology, and have shed light upon the intriguing roles of quantum measurement for the foundations of statistical mechanics.

研究分野：量子物理学・量子情報

キーワード：量子観測 量子制御 量子計測 量子情報 統計力学 熱平衡系 非平衡系

## 1. 研究開始当初の背景

「不確定性原理」や「エンタングルメント」といったキーワードに象徴されるように、量子力学が支配するミクロの世界では、私たちの日常的な感覚では理解することのできない様々な奇妙な現象が繰り広げられている。近年、実験技術のめざましい進歩に伴ってそんな量子力学の奇妙な世界を目の当たりにできるようになり、量子力学の基礎に関する理解が進むとともに、量子力学ならではの現象を最大限に活用することによって従来技術の限界を超えようとする「量子技術」、特に「量子情報技術」に関する研究が大きな盛り上がりを見せている。また、統計物理学の分野では、「統計力学の基礎」に関わる複数の話題で顕著な進展が見られ、そこでも量子力学、量子状態が重要な役割を果たしている。こうした背景のもと、量子力学ならではの現象を追及して量子力学の本質に迫りながら量子情報技術に貢献するとともに、統計力学の基礎に関わる話題に取り組んだ。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、量子力学の世界の奇妙さを際立たせる役者の一人として「量子観測」に注目した。それが、単に「見る」ことにとどまらず、意外な場面で本質的な役割を果たすことを指摘することが本研究課題の第一の目的であった。そうしたテーマを追及することによって量子力学の奥深い世界を浮かび上がらせるとともに、量子情報技術に寄与する独自の斬新なアイデアを提供・発展させ、さらには量子観測をキーワードに統計力学の基礎に迫ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

次の3つの話題を柱に研究を展開した。

(1)量子計測 —— 「観測」本来の「見る・測る」に関わる話題として、「量子計測」を追及した。量子情報技術が発展するなか、量子デバイスの特徴付けるパラメータを正確に知ることが重要になってきている。一方で、物理量が演算子で表される量子力学の枠組みにおいてそうしたパラメータはいわゆる“オブザーバブル”ではなく、測定可能量を通じてその値を推定することになる。これは「量子パラメータ推定」の問題と呼ばれる。この問題は「量子制御」と深い関わりがあり、この問題を追及することは、量子情報技術の発展に伴ってその重要性が増している「量子制御理論」を追及することにもつながる。さらに、量子力学的効果を最大限に活用することによってパラメータ計測の古典的精度限界を超え、量子情報技術の一つの可能性として注目を集める「量子計測」を追及し、究極の量子観測を探った。

(2)量子制御 —— 一般に量子系を観測すると、その系は擾乱されてしまう。観測の仕方

が悪いからではなく、「不確定性原理」のために避けられないことである。申請者は、観測がその対象に及ぼす影響も、うまく利用すれば量子制御の手段になるのではないかという着想のもと、「観測による量子制御」という独自のアイデアを追及してきた。量子情報技術の発展に伴って、「量子制御理論」の確立は重要なテーマの一つとなっている。それは、「観測」をも量子制御の手段の一つとして含むものとなる。こうした観点を念頭に置きながら、「観測による量子制御」の可能性を追及した。

(3)統計力学の基礎 —— 統計力学の基礎においても量子観測は重要な役割を果たす。例えば、物性物理学や素粒子物理学における重要な概念の一つに「対称性の自発的破れ」があるが、なぜ対称性が自発的に破れた状態が出現するのかに関して、量子観測の重要性が指摘されている。また、近年、量子多体系の典型的な純粋状態で熱平衡状態を記述できることが明らかになり、注目を集めているが、これは、量子力学における観測の射影仮説と相性の良い考え方である。統計力学における量子観測の意外な重要性を浮かび上げさせ、統計力学の基礎に関わる研究に新たな視点を提供する。

## 4. 研究成果

### (1)量子計測

多数回試行の繰り返しが想定される量子力学において、測定ごとに系をリセットすることなく測定を繰り返す試行1回で得られるデータから量子系のパラメータを推定するスキームを検討し、測定過程がある一定の条件を満たせば、得られたデータの平均値などに中心極限定理が成立し、パラメータの推定が可能になることを証明するとともに、データ間に存在する相関の情報を活用することによって推定精度を向上できることを示し、論文発表した[雑誌論文]。

その繰り返し測定に基づくパラメータ推定のスキームを温度を計測する問題に適用し、その特徴と有用性を明らかにして、論文発表した[雑誌論文]。

最も一般的な2モード線形光学回路に含まれるパラメータを量子計測する上で最適なプローブ光状態を求め、それによって達成可能な計測精度限界を明らかにして、論文発表した[雑誌論文]。

光学位相シフトを並列にプローブする量子計測において最適なガウス型プローブ光状態を明らかにし、その成果を国内学会で発表した[学会発表<sup>25</sup>]。

最も一般的な多モード線形光学回路に含まれるパラメータを推定するのに最適なガウス型プローブ状態とそれによって達成可能な最大計測精度を明らかにし、学会発表した[学会発表]。

計測対象の脇に補助壁を立て、プローブ粒子を計測対象と補助壁との間で多重散乱させて生じる量子干渉効果によって計測精度を向上できることを明らかにし、学会発表した[学会発表]。

プローブを計測対象に通さない補助系とエンタングルさせることによって計測精度を向上させる可能性を検討し、必ずしも最大エンタングル状態が最適なプローブ状態ではないことを明らかにし、学会発表した[学会発表]。

計測の過程で系に量子制御を加えることで計測精度を向上させる可能性を追究した。計測精度が最大になるように制御の加え方を最適化するアルゴリズムを構築して量子スピン鎖モデルに適用し、系の一部しか制御や測定をできない制約の下でも顕著な精度向上を見込めることを明らかにして、論文発表した[雑誌論文]。

## (2)量子系制御

もともと与えられた設定では可制御性が保証されないような状況でも、観測による「量子 Zeno 効果」によって系の時間発展を変化させることで可制御性を達成できることを明らかにした。しかも、この現象がきわめて一般的であることを明らかにした。この研究成果は Nature Communications 誌に掲載された[雑誌論文]。

外界からのノイズによって強い緩和を受けるとむしろ系の制御性が向上することを明らかにし、その機構を様々なモデルで検討して論文発表した。その論文は、論文誌の“Editors’ Suggestion”に選ばれた[雑誌論文]。

非可換な Hamiltonian の組み合わせで生成されるいかなる量子ダイナミクスも、より高次元の Hilbert 空間中において可換な Hamiltonian で生成される古典的なダイナミクスを元の Hilbert 空間へ射影したものと表すことができることを明らかにし、論文発表した[雑誌論文]。

同じことが任意の(一般にユニタリーでない) Markov 過程でも成立することを明らかにし、論文発表した[雑誌論文]。

## (3)統計力学の基礎

2つの独立なボース凝縮体を重ねて撮像すると干渉縞が観測される。これが「典型的」な現象であり、干渉させる前のボース凝縮体の状態が多少揺らいでもさしたる影響はないことを明らかにして、論文発表した[雑誌論文]。

さらに、その干渉パターンの位相がランダム化する現象が、系の時間発展に不可逆的要素がなくても説明できることを明らかにし、論文発表した[雑誌論文]。

大自由度量子系で出現する状態の典型性に関し、多数の光子を約半数ずつビームスプ

リッターの2つのポートから入射する場合の出力光子数分布が、入射光子数の配分が多少異なっても典型的に同じ分布になることを明らかにし、論文発表した[雑誌論文]。

統計力学の基礎との関わりの中で盛んに議論されている「典型性」が、従来の平衡系の議論を超えて、非平衡定常状態でも成立することを明らかにし、論文発表した[雑誌論文]。

さらに、その熱浴間に少数自由度系が存在する場合を解析し、この系の非平衡定常状態の典型性には系の時間発展の不可逆性が重要であることを示し、論文発表した[雑誌論文]。

非平衡定常状態における量子ゆらぎ定理を検討し、仕事の分布関数に関してはゆらぎ定理が成立しないものの、エントロピーに相当する物理量の分布関数に関してはゆらぎ定理が成立することを明らかにし、国際学会で発表した[学会発表]。

大自由度量子系のエネルギー固有状態一つ一つが熱平衡状態に見えるという“Eigenstate Thermalization Hypothesis (ETH)”を簡単な量子スピン鎖モデルで議論し、系の非摂動エネルギーの縮退が ETH の成立に重要であることを明らかにして、国際学会で発表した[学会発表]。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計17件)

Paolo Facchi, Saverio Pascazio, Francesco V. Pepe, and Kazuya Yuasa, “Long-Lived Entanglement of Two Multilevel Atoms in a Waveguide”, **Journal of Physics Communications** 2 (2018) 035006 (9 pages) (査読有)

DOI: 10.1088/2399-6528/aaae9f

Paolo Facchi, Marilena Ligabò, and Kazuya Yuasa, “On the Derivation of the GKLS Equation for Weakly Coupled Systems”, **Open Systems & Information Dynamics** 24 (2017) 1740017 (28 pages) (査読有)

DOI: 10.1142/S1230161217400170

Antonella De Pasquale, Kazuya Yuasa, and Vittorio Giovannetti, “Estimating Temperature via Sequential Measurements”, **Physical Review A** 96 (2017) 012316 (6 pages) (査読有)

DOI: 10.1103/PhysRevA.96.012316

Jukka Kiukas, Kazuya Yuasa, and Daniel Burgarth, “Remote Parameter Estimation in a Quantum Spin Chain Enhanced by Local Control”, **Physical Review A** 95 (2017) 052132 (6 pages) (査読有)

DOI: 10.1103/PhysRevA.95.052132

Christian Arenz, Daniel Burgarth, Vittorio Giovannetti, Hiromichi Nakazato, and

Kazuya Yuasa, “Lindbladian Purification”, **Quantum Science and Technology** **2** (2017) 024001 (9 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/2058-9565/aa6759

Daniel Burgarth, Paolo Facchi, Giancarlo Garnero, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, and Kazuya Yuasa, “Can Decay Be Ascribed to Classical Noise?”, **Open Systems & Information Dynamics** **24** (2017) 1750001 (18 pages) (査読有)  
DOI: 10.1142/S1230161217500019

Tohru Ozawa and Kazuya Yuasa, “Uncertainty Relations in the Framework of Equalities”, **Journal of Mathematical Analysis and Applications** **445** (2017) 998-1012 (査読有)  
DOI: 10.1016/j.jmaa.2016.08.023

Takaaki Monnai and Kazuya Yuasa, “Typical Pure Nonequilibrium Steady States and Irreversibility for Quantum Transport”, **Physical Review E** **94** (2016) 012146 (11 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevE.94.012146

Christian Arenz, Daniel Burgarth, Paolo Facchi, Vittorio Giovannetti, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, and Kazuya Yuasa, “Universal Control Induced by Noise”, **Physical Review A** **93** (2016) 062308 (10 pages) (査読有) [Editors’ Suggestion]  
DOI: 10.1103/PhysRevA.93.062308

Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, Magdalena Stobińska, and Kazuya Yuasa, “Photon Distribution at the Output of a Beam Splitter for Imbalanced Input States”, **Physical Review A** **93** (2016) 023845 (6 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.93.023845

Davide Orsucci, Daniel Burgarth, Paolo Facchi, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, Kazuya Yuasa, and Vittorio Giovannetti, “Hamiltonian Purification”, **Journal of Mathematical Physics** **56** (2015) 122104 (21 pages) (査読有)  
DOI: 10.1063/1.4936311

Daniel Burgarth, Vittorio Giovannetti, Airi N. Kato, and Kazuya Yuasa, “Quantum Estimation via Sequential Measurements”, **New Journal of Physics** **17** (2015) 113055 (24 pages) (査読有)  
DOI: 10.1088/1367-2630/17/11/113055

Antonella De Pasquale, Paolo Facchi, Giuseppe Florio, Vittorio Giovannetti, Koji Matsuoka, and Kazuya Yuasa, “Two-Mode Bosonic Quantum Metrology with Number Fluctuations”, **Physical Review A** **92** (2015) 042115 (11 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.042115

Paolo Facchi, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, Francesco V. Pepe, Golam Ali Sekh, and Kazuya Yuasa, “Phase Randomization and Typicality in the Interference of Two Condensates”, **International Journal of Quantum Information** **12** (2015) 1560019 (15 pages) (査読有)  
DOI: 10.1142/S0219749915600199

Daniel Burgarth, Paolo Facchi, Vittorio Giovannetti, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, and Kazuya Yuasa, “Exponential Rise of Dynamical Complexity in Quantum Computing through Projections”, **Nature Communications** **5** (2014) 5173 (6 pages) (査読有)  
DOI: 10.1038/ncomms6173

Takaaki Monnai and Kazuya Yuasa, “Typical Pure Nonequilibrium Steady States”, **Europhysics Letters** **107** (2014) 40006 (6 pages) (査読有)  
DOI: 10.1209/0295-5075/107/40006

Paolo Facchi, Hiromichi Nakazato, Saverio Pascazio, Francesco V. Pepe, and Kazuya Yuasa, “Interference in a Two-Mode Bose System as a Typical Phenomenon”, **Physical Review A** **89** (2014) 063625 (9 pages) (査読有)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.063625

[学会発表](計27件)

石川慧・門内隆明・湯浅一哉, 「エネルギー固有状態による熱平衡系の記述: 縮退の重要性」, 日本物理学会第73回年次大会(東京理科大学) 2018.3.

Shohei Morodome, Takaaki Monnai, and Kazuya Yuasa, “Quantum Fluctuation Relation for Nonequilibrium Steady State: Analysis with an Exactly Solvable Model”, YITP Workshop “Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations”, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Kyoto, Japan (September, 2017).

Satoshi Ishikawa, Takaaki Monnai, and Kazuya Yuasa, “Eigenstate Thermalization Hypothesis and Degeneracy of Hamiltonian”, YITP Workshop “Quantum Thermodynamics: Thermalization and Fluctuations”, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Kyoto, Japan (September, 2017).

石川慧・門内隆明・湯浅一哉, 「エネルギー固有状態による熱平衡系の記述: 縮退の重要性」, 第62回物性若手夏の学校(岐阜) 2017.7 [優秀ポスター賞].

牛尾慎之介・湯浅一哉, 「緩和過程による量子ダイナミクスの射影と量子系制御」, 第62回物性若手夏の学校(岐阜) 2017.7.

鈴木貴大・湯浅一哉, 「リング干渉計による量子パラメータ推定の精度の向上」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) 2017.3.

松原輝王・湯浅一哉, 「ガウス型状態による線形光学回路の量子計測」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学) 2017.3.

鈴木貴大・湯浅一哉, 「リング干渉計による量子パラメータ推定の精度の向上」, 第 35 回量子情報技術研究会 (QIT35) (高エネルギー加速器研究機構(KEK)) 2016.11.

松原輝王・湯浅一哉, 「ガウス型状態による線形光学回路の量子計測」, 第 35 回量子情報技術研究会 (QIT35) (高エネルギー加速器研究機構(KEK)) 2016.11.

湯浅一哉, “Quantum Control Induced by Measurement” (招待講演), 第 24 回量子情報関東 Student Chapter (早稲田大学) 2016.10.

Kazuya Yuasa, Daniel Burgarth, Vittorio Giovannetti, and Airi N. Kato, “Quantum Estimation via Sequential Measurements”, 9<sup>th</sup> Italian Quantum Information Science Conference (IQIS 2016), University of Rome La Sapienza, Roma, Italy (September, 2016).

鈴木貴大・湯浅一哉, 「量子多重散乱効果による量子状態推定精度の向上」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学) 2016.9.

松原輝王・湯浅一哉, 「繰り返し測定による量子ビットチャンネルのパラメータの推定」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学) 2016.9.

田中康就・湯浅一哉, 「補助系とのエンタングルメントによる量子ビットチャンネルのパラメータの推定精度の向上」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学) 2016.9.

諸留昇平・門内隆明・湯浅一哉, 「非平衡定常状態における量子ゆらぎ定理: 可解モデルによる解析」, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (金沢大学) 2016.9.

Kazuya Yuasa, “Universal Control Induced by Noise” (invited), Resonance and Non-Hermitian Quantum Mechanics 2016, Osaka University, Osaka, Japan (August, 2016).

諸留昇平・門内隆明・湯浅一哉, 「非平衡定常状態における量子ゆらぎ定理: 可解モデルによる解析」, 第 61 回物性若手夏の学校 (志賀高原) 2016.7-8.

鈴木貴大・湯浅一哉, 「量子多重散乱効果による量子状態推定精度の向上」, 第 34 回量子情報技術研究会 (QIT34) (高知工科大学) 2016.5.

松原輝王・湯浅一哉, 「繰り返し測定による量子ビットチャンネルのパラメータの推定」, 第 34 回量子情報技術研究会 (QIT34) (高知工科大学) 2016.5.

田中康就・湯浅一哉, 「補助系とのエンタングルメントによる量子ビットチャンネルのパラメータの推定精度の向上」, 第 34 回量子情報技術研究会 (QIT34) (高知工科大学) 2016.5.

21 門内隆明・湯浅一哉, 「マイクロカノニカル状態における KMS 条件と熱力学極限」, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (関西大学) 2015.9.

22 Kazuya Yuasa, Daniel Burgarth, Paolo Facchi, Vittorio Giovannetti, Hiromichi Nakazato, Davide Orsucci, and Saverio Pascazio, “Exponential Rise of Dynamical Complexity in Quantum Computing through Projections”, 8<sup>th</sup> Italian Quantum Information Science Conference (IQIS 2015), Corvino Resort, Monopoli, Italy (September, 2015).

23 Giuseppe Florio, Antonella De Pasquale, Paolo Facchi, Vittorio Giovannetti, Koji Matsuoka, and Kazuya Yuasa, “Two-Mode Bosonic Quantum Metrology with Number Fluctuations”, 8<sup>th</sup> Italian Quantum Information Science Conference (IQIS 2015), Corvino Resort, Monopoli, Italy (September, 2015).

24 門内隆明・湯浅一哉, 「孤立量子系における典型的な非平衡定常状態」, 日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学) 2015.3.

25 松岡耕司・湯浅一哉, 「光学位相シフトの量子計測に対する最適な多モードガウス型純粋状態」, 日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学) 2015.3.

26 門内隆明・Mauro Iazzi・湯浅一哉, 「典型的純粋状態と量子測定による対称性の破れ」, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (中部大学) 2014.9.9.

27 Kazuya Yuasa, “Quantum Estimation via a Single Sequence of Measurements with a Quantum Mixing Channel” (invited), VII Workshop ad Memoriam of Carlo Novero: Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with Atoms and Photons (Quantum 2014), Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (I.N.R.I.M.), Torino, Italy (May, 2014).

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.f.waseda.jp/yuasa/>

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

湯浅 一哉 (YUASA, Kazuya)  
早稲田大学・理工学術院・准教授  
研究者番号：90339721

(4)研究協力者

中里 弘道 (NAKAZATO, Hiromichi)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 00180266

BURGARTH, Daniel  
Aberystwyth University (英国)・数学物理学  
科・Reader

FACCHI, Paolo  
University of Bari (イタリア)・物理学科・  
教授

GIOVANNETTI, Vittorio  
Scuola Normale Superiore, Pisa (イタリア高  
等師範学校)・物理学科・准教授

PASCAZIO, Saverio  
University of Bari (イタリア)・物理学科・  
教授