

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840015

研究課題名(和文)量子連続測定と場の理論を融合させた理論の構築とその非平衡伝導現象への応用

研究課題名(英文)Constructing Formula of Nonequilibrium Physics by using Quantum Continuous Measurement and Quantum Field Theory

研究代表者

渡辺 優 (Yu, Watanabe)

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：80633271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：測定によって得られる情報量を精緻に議論することで、量子系における揺らぎの定理を導出することに成功し、また、量子系に固有の相関であるエンタングルメントから仕事を取り出せることを示した。孤立量子系の熱平衡化について、従来緩和しないと思われてきた可積分系に対しても緩和が起きることを示した。さらに、熱平衡化のメカニズムとして従来信じられてきた仮説とは異なる仮説を提唱し、その仮説による寄与が従来の仮説に比べて大きいことを示した。  
光子の量子連続測定理論について一般的なフォーマリズムを構築し、そこで現れる新奇の現象の実験的観測が既存の技術を用いて行えることを示した。

研究成果の概要(英文)：We derive integral quantum fluctuation theorems and quantum Jarzynski equalities for a feedback-controlled system and a memory which registers outcomes of the measurement. The generalized second law of thermodynamics under measurement and feedback control is reproduced from these equalities. We also show that entanglement can be utilized to extract the thermodynamic work beyond classical correlation via feedback control. We propose new hypothesis for thermalization of isolated quantum systems, and show the hypothesis gives larger contribution than well known hypothesis to the thermalization. We also show that the system thermalize even if it is integrable.  
We analyze a simultaneous continuous measurement of photon-counting and homodyne detection. A formula for the expectation values of the homodyne records conditioned on a photon-counting event is also derived, which quantitatively describes the measurement backaction of photon-counting on the homodyne output.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：量子エレクトロニクス 量子情報 物性基礎論 情報基礎

1. 研究開始当初の背景

- (1) メゾ系の非平衡現象について様々な実験結果が得られているが、これまでの理論では定性的な説明はできるものの、定量的には実験結果と合致していなかった。
- (2) これまでの理論では取り込まれていなかった量子測定理論を含めた定式化を行えば実験を定量的に明らかにできるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

これまでメゾ系の解析に用いられていた理論に量子連続測定理論による影響を取り込むことで、新しい解析手法を構築する。その手法を用いることでメゾ系における揺らぎや緩和現象などの解析を定量的に行う。

3. 研究の方法

量子測定によるダイナミクスを効果的に取り込むために、測定によって得られた情報量と、系が損失した情報量を、状態発展と並行して追うことが必要となる。系の情報損失は系のエントロピー生成そのものであると考えられるため、それによって、系の非平衡ダイナミクスを追うことが可能となる。

4. 研究成果

- (1) 測定によって得られる情報量と測定の反作用による系の情報損失を推定の精度の上限を与える Fisher 情報量を用いて解析した。それにより測定の誤差と反作用による擾乱が任意の測定過程に対して定量的に定式化できるようになり、さらに、それらの間に成り立つトレードオフ関係、つまり誤差と擾乱の間の不確定性関係を示すことができた。これによって、Heisenberg のガンマ線顕微鏡による思考実験に始まる量子論における不確定性関係に一つの終止符を与えることができた。本研究結果をまとめた書籍が Springer より出版された。
- (2) 光子に対する量子連続測定理論による一般的なダイナミクスを追うことに成功した。系は測定結果に応じて条件付きなダイナミクスに従うが、そのダイナミクスが散逸型とジャンプ型と呼ばれる二種類の挙動を併せ持ったダイナミクスで記述されることを明らかにした。本研究はメゾ系に対する量子測定の影響を調べるための第一歩として重要な成果である。
- (3) 測定による反作用が系のダイナミクスに及ぼす時間スケールを明らかにするために、孤立量子系の熱平衡化の問題、および孤立量子系に対するフィードバック理論を構築する必要

があり、それらの問題について取り組んだ。

- (4) 孤立量子系の熱平衡化については、従来緩和しないと思われてきた可積分系に対しても緩和が起きることを示した。本研究結果は孤立量子系に対して従来の認識を覆すという点で重要である。さらに、量子カオス系や量子可積分系の定義の根源にかかわる重要な問題を示唆しており、ほかの分野への影響も大きいと考えられる。
- (5) 熱平衡化のメカニズムとして従来信じられてきた仮説とは異なる仮説を提唱し、その仮説による寄与が従来の仮説に比べて大きいことを示した。本研究結果も、孤立量子系の緩和について従来の認識を覆すという点で重要である。
- (6) ランダム行列理論を用いて孤立量子系の緩和のタイムスケールを調べた。その結果、ほとんどの場合において孤立量子系は非現実的なまでにとつもなく早く緩和してしまうことが明らかになった。このことは、これまで孤立量子系の問題に対してよく用いられていた '典型性' を用いた議論が、実は現実の系を記述するのに不適当なのではないか、という結論をもたらす。これまでの典型性を用いた議論に再考の必要があることを示した点において、本結果は重要である。
- (7) 量子系のフィードバック理論については、測定によって取り出される情報量を精緻に分析することによって、エンタングルメントの取り扱いの困難さによりこれまで得られていなかった、量子系での Jarzynski 等式や揺らぎの定理を得ることに成功した。また、それらの結果から、エンタングルメントから仕事を取り出すエンタングルメント熱機関が原理的に存在することを明らかにした。本結果は、測定によって得られる情報量が本質的に系のダイナミクスに重要であることを示唆しており、メゾ系における連続測定下でのメゾ系のダイナミクスを追うための重要な一歩である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1. "Finite-size scaling analysis of the eigenstate thermalization hypothesis in a one-dimensional interacting Bose gas", Tatsuhiko N. Ikeda, Yu Watanabe,

and Masahito Ueda, Physical Review E 87, 012125 (2013).

2. "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", Yui Kuramochi, Yu Watanabe, and Masahito Ueda, J. Phys. A: Math. Theor. 46, 425303 (2013).
3. "Integral quantum fluctuation theorems under measurement and feedback control", Ken Funo, Yu Watanabe, and Masahito Ueda, Phys. Rev. E 88, 052121 (2013).
4. "Thermodynamic work gain from entanglement", Ken Funo, Yu Watanabe, and Masahito Ueda, Phys. Rev. A 88, 052319 (2013).

[学会発表](計 11 件)

・国際会議(招待講演)

1. "Formulation of Uncertainty Relations by using Quantum Estimation Theory", Yu Watanabe, Low-Dimensional Nanoscale Systems: Quantum Effects Particle Transport and Advanced Materials (ウズベキスタン大学), 2012-11-07.

・国際会議

2. "Eigenstate Randomization Hypothesis: a thermalization mechanism on isolated quantum systems", Yu Watanabe, Physics of Quantum Electronics (PQE2013), Cliff Lodge (Salt Lake City, USA), 2013-01-09.
3. "Random matrix study of time scale of thermalization after a quantum quench", Yu Watanabe, Interdisciplinary mini-workshop on nonequilibrium physics (Kyoto Univ.), 2013-12-07.

・国内研究会(招待講演)

4. "量子推定論 ---基礎から不確定性関係への応用まで---", 渡辺優, 第 1 回統計物理学懇談会, 学習院大学, 2013-03-05.
5. "量子推定理論を用いた不確定性関係の導出", 渡辺優, 日本物理学会 68 回年次大会, 広島大学, 2013-03-27.
6. "量子測定理論の基礎", 渡辺優, 量子情

報チュートリアルワークショップ (京都大学), 2014-03-22.

・国内研究会(一般講演)

7. "Formulation of Uncertainty Relations by using Quantum Estimation Theory", 渡辺優, RIMS 研究集会 量子論における統計的推測の理論と応用, 京都大学, 2912-11-01.
8. "Formulation of Uncertainty Relations by using Quantum Estimation Theory", 渡辺優, RIMS 研究集会 函数解析学による一般化エントロピーの新展開, 京都大学, 2912-11-14.
9. "Formulation of Uncertainty Relations by using Quantum Estimation Theory", 渡辺優, YSM-SPIP2012, 東北大学, 2012-12-15.
10. "孤立量子系における平衡化のタイムスケールの導出", 渡辺優, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (徳島大学), 2013-09-27.

・国内研究会(ポスター発表)

11. "孤立量子系の熱平衡化", 渡辺優, 第 3 回 QUATUO 研究会 (高知工科大学), 2014-01-12.

[図書](計 1 件)

1. "Formulation of Uncertainty Relation Between Error and Disturbance in Quantum Measurement by Using Quantum Estimation Theory", Yu Watanabe, Springer, 2014 (ISBN: 978-4-431-54492-0).

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://scholar.google.co.jp/citations?user=hULtEkkAAAAJ>

6．研究組織

(1) 研究代表者

渡辺優 (WATANABE, Yu)

京都大学基礎物理学研究所 助教

研究者番号：80633271