

平成 22 年 6 月 7 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2009
課題番号：19540415
研究課題名（和文） 多自由度量子系の重ね合わせ状態の特徴付け・生成・操作・検出の理論
研究課題名（英文） Theory of characterization, generation, operation, and detection of superposed states of quantum systems with many degrees of freedom
研究代表者
清水 明 (SHIMIZU AKIRA)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号：10242033

研究成果の概要（和文）：

多くの自由度を持つ量子系の重ね合わせ状態のうち、特に興味深い状態を解析する理論を発展させた。また、そのような状態を外部からの擾乱から守るための手段として、物理系の自然な（ハミルトニアンによる）時間発展を利用することを提案した。さらに、そのような状態のうち、非平衡状態に着目し、その物理的性質を解明した。特に、外場に対する応答関数の一般論を構築した。

研究成果の概要（英文）：

Developed a theory for analyzing interesting superposed states in quantum systems with a large degrees of freedom. Proposed a new method for protecting such states against external noise. The method utilizes a natural (Hamiltonian) motion of physical systems. Furthermore, analyzed physical properties, including response to external fields, of nonequilibrium states.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 19 年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 20 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 21 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：量子エレクトロニクス、多自由度量子系

1. 研究開始当初の背景

自由度の多い量子系の重ね合わせ状態の生成・操作・検出の方法が重要になってきた。いくつかの基本的なゲート操作さえできれば、いかに自由度が多くとも、生成・操作・検出が自由に出来ることが、量子計算機の理

論において証明されているが、現実の物理系で、この理論家の都合に合わせたモデルの通りのことをやろうとすると、あまりにも困難が多い。また、現実の物理系で複雑な量子状態を生成しようとする、純粋状態を作るのは難しく、どうしても混合状態になってしまう

う。このように、現実の物理系のことを考えると、興味深い状態の定義（特徴付け）さえ曖昧で、ましてやその性質なんてよく判らない、という状況であった。

2. 研究の目的

多自由度量子系の重ね合わせ状態の特徴付け（興味深い状態のきちんとした定義とその物理的性質の解明）を行い、そのような状態を現実の物理系で生成し、操作し、検出する方法を見出すことを目指す。また、それらの状態の物理的性質を解明する。

3. 研究の方法

解析的な計算と、数値計算を併用する。解析的な計算の結果を数値計算に生かし、逆に、数値計算の結果を解析的な計算にフィードバックしながら研究を進める。

4. 研究成果

(1) ハミルトニアン時間発展を外来ノイズから守る新しい方法を提案した。この方法を用いれば、作成が困難である長大で複雑な量子回路を作らなくても、量子ドットなどの二準位系をラフに配置するだけで、エンコードされた時間発展を自然に誘起することができる。そして、我々が error correction sequence と名付けた新しい量子エラー訂正プロトコルを用いることにより、外来ノイズから守ることができる。従来の方法では、パラメーターの値を正確に制御し、さらにそれを自在にスイッチングする必要があったので、実在の物理系で実現するのはきわめて困難であった。それに対して、我々の方法の著しい特徴は、パラメーターのファイン・チューニングを全く必要としないことである。9つの量子ドットを、「だいたいこんな位置関係になるように」という程度の精度で配置すれば、自然にシユアークコード系になり、論理キュービットが、もとの系の時間発展と等価な時間発展をするようになる、というものである。この成果を発表した論文は、Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology と、Virtual Journal of Quantum Information にも選ばれて掲載された。

(2) 論理 qubit の物理的な駆動法について、状態準備から訂正操作までを調べた。即ち、論理 qubit の時間発展と、それをデコヒーレンスから防ぐための量子エラー訂正操作を qubit 間の自然な相互作用で駆動する方法を理論的に解析した。訂正操作には補助 qubit が必要で、これらにノイズがある場合でも正しく訂正できるために、補助 qubit の状態を適切に準備する必要があり、それも qubit 間の自然な相互作用で駆動する。訂正に必要な補助 qubit を全て考慮したので、訂正操

作を含めた論理 qubit の時間発展の一連の流れを全て解明できた。

(3) 論理キュービットを駆動する際のジッターの解析を行った。論理 qubit を駆動し、同時に量子エラー訂正操作を行うと、特定のタイミングで 1 qubit への特定の操作を行う必要がある。1 qubit への特定の操作とは、補助 qubit を局所測定したり、検出したビットエラーを訂正するためにビットフリップを作用させる等の操作である。これらの操作のタイミングが想定した時刻からずれてしまう(ジッター)場合を考え、どの程度のジッターなら許されるかを解析した。

(4) マクロに異なる状態の重ね合わせについて、それを我々が開発した方法で可視化することにより、その物理的な特徴を捉えることに成功した。

(5) 多自由度系が非平衡になったら、そもそもどんな状態が出現するのかを調べるために、相互作用する古典多自由度系の解析を行った。多くの場合、量子状態は、古典的な状態のまわりに「量子補正」を入れることで求まるので、まず古典状態を求めることが重要だからだ。その結果、多体相互作用と不純物散乱が共存する系で、長時間相関がどのように現れるかを、初めて明らかに出来た。

(6) 強い外場で駆動される非平衡定常状態の、揺らぎや、弱い外場に対する応答関数に、物質の個性に依らない普遍的な性質が潜んでいることを発見した。たとえば、線形応答関数を周波数に関して積分すると、被測定量と外場が結合する量との交換関係で決まる値になる、等である。

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 8 件)

- ① A. Shimizu and T. Yuge, General properties of response functions of nonequilibrium steady states, J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 013002-1 - 013002-4. 査読有り
- ② T. Yuge and A. Shimizu, Indications of Universal Excess Fluctuations in Nonequilibrium Systems, J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 083001-1 - 083001-4. 査読有り
- ③ T. Yuge and A. Shimizu, Long-time tail in an electric conduction system, Prog. Theor. Phys. Supplement No. 178 (2009) 64-71. 査読有り

- ④ N. Kokubun and A. Shimizu, Protected Rabi oscillation induced by natural interactions among physical qubits, Phys. Rev. A78 (2008) 012302-1-012302-9. 査読有り
- ⑤ A. Shimizu, Generalized Phase Rules, J. Phys. Soc. Jpn., 77 (2008) 104001-1-104001-4. 査読有り
- ⑥ T. Yuge and A. Shimizu, Long-time behavior of velocity autocorrelation function for interacting particles in a two-dimensional disordered system, J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 093001-093004. 査読有り

[学会発表] (計 34 件)

- ① 清水 明, マクロ系の非平衡定常状態の応答関数の普遍的性, 量子論の諸問題と今後の発展, 2010/3/16, 高エネルギー加速器研究機構.
- ② Akira Shimizu, Quantum Measurement Theory and Micro-Macro Consistency in Nonequilibrium Statistical Mechanics, The Nagoya Winter Workshop on Quantum Information, Measurement, and Foundations, 2010/2/23, 名古屋大学. 招待講演
- ③ Akira Shimizu, Tatsuro Yuge, Universal properties of linear and nonlinear response functions of nonequilibrium steady states, 古典および量子ダイナミクス・非平衡統計力学に関するワークショップ, 2010/2/14, 東京大学. 招待講演
- ④ Akira Shimizu, Tatsuro Yuge, Response Functions of Nonequilibrium Steady States, Quantum Technologies: Information and Communication, 2009/12/10, 早稲田大学. 招待講演
- ⑤ 國分直明, 清水明, 論理キュービットを駆動する際のジッターの解析, 日本物理学会 2009 年秋季大会 講演番号: 26pZE-8, 2009/9/26, 熊本大学
- ⑥ 國分直明, 清水明, 論理 qubit の物理的な駆動法—状態準備から訂正操作まで, 日本物理学会 2009 年秋季大会 講演番号: 26pZE-7, 2009/9/26, 熊本大学
- ⑦ 清水明, 弓削達郎, 非平衡定常状態の応答関数の総和則と漸近的振る舞い, 日本物理学会 2009 年秋季大会 講演番号: 25pQL-4, 2009/9/25, 熊本大学.
- ⑧ 小林直樹, 森前智行, 清水明, 巨視的に異なる状態間の遷移にかかる時間のサイズ依存性, 日本物理学会 2009 年秋季大会 講演番号: 27pQC-9, 2009/9/27, 熊本大学.
- ⑨ 清水 明, マクロ系の量子限界は? ミクロとマクロの関係は?, 研究会「量子論における測定と実在」, 2009/3/17, 東京工業大学大岡山キャンパス.
- ⑩ 松崎雄一郎, 清水明, 多体エンタングルメントのノイズに対する安定性, 日本物理学会第 64 回年次大会 講演番号: 30aSK-2, 2009/3/30, 立教大学.
- ⑪ 清水明, 弓削達郎, 非平衡定常状態の応答関数の一般形とその対称性, 日本物理学会第 64 回年次大会 講演番号: 30aTJ-8, 2009/3/30, 立教大学.
- ⑫ Akira Shimizu, Tatsuro Yuge, Universal excess fluctuation induced by Boltzmann's chaos in nonequilibrium steady states, 日本スロベニア非線形科学シンポジウム, 2008/11/12, 東京大学. 招待講演
- ⑬ 清水明, 弓削達郎, 揺動散逸定理は非平衡定常状態でどのように破れるのか?, RIMS 共同研究「非可換解析とミクロ・マクロ双対性」, 2008/11/6, 京都大学数理解析研究所
- ⑭ 國分直明, 清水明, 量子ドットよりなる量子ビット系の有効ハミルトニアン の導出と設計, 日本物理学会 2008 年秋季大会 講演番号: 21aYF-10, 2008/9/21, 岩手大学.
- ⑮ 國分直明, 清水明, 量子誤り訂正可能なラビ振動を駆動するハミルトニアン の結合定数の任意性, 日本物理学会 2008 年秋季大会 講演番号: 20pZD-8, 2008/9/20, 岩手大学.
- ⑯ 森前智行, 松崎雄一郎, 清水明, マクロに異なる状態の重ね合わせの指数について, 日本物理学会 2008 年春の大会 講演番号: 26aRF-2, 2008/3/26, 近畿大学.
- ⑰ 清水明, 弓削達郎, 非平衡状態における電流揺らぎ, 日本物理学会 2008 年春の大会 講演番号: 24pWE-4, 2008/3/24, 近畿大学.
- ⑱ A. Shimizu and T. Miyadera, Breaking of Gauge Symmetry in Finite Systems, KEK 研究会「量子論の諸問題と今後の発展」, 2008/3/20, 高エネルギー加速器研究機構.
- ⑲ 國分直明, 清水明, 短距離相互作用ハミルトニアンで駆動される量子誤り訂正可能なラビ振動, 日本物理学会 2007 年秋の大会 講演番号: 23pRG-8, 2007/9/23, 北海道大学.
- ⑳ A. Shimizu, Physics of superposition of macroscopically distinct states, 第 16 回量子情報技術研究会, 2007/5/17, NTT 厚木研究センター. 招待講演
- 21 清水明, 現代的な測定理論の概要—FAQs への答え, 第 4 回 AMO 討論会,

2007/6/8, 電気通信大学. 招待講演

[図書] (計 1 件)

- ① 清水明 (共著), 東大教師が新入生にすすめる本 2, 文藝春秋 (2009) 120-123.

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 明 (SHMIZU AKIRA)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号 : 10242033

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :