

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03454

研究課題名（和文）マクロ量子系における状態間遷移の時間効率

研究課題名（英文）Efficiency of state transition in macroscopic quantum systems

研究代表者

弓削 達郎 (Yuge, Tatsuro)

静岡大学・理学部・助教

研究者番号：70547380

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：いくつかの断熱量子計算アルゴリズムにおいて、途中に現れる量子状態にマクロに異なる状態の量子力学的重ね合わせが現れることを示し、それが断熱量子計算が古典計算に比べて高速になることに寄与していることを示唆する結果を得た。また、様々な開放量子系における緩和現象を調べた。共振器量子電磁力学系においてファノ効果の影響による遅い緩和が起こることを示し、緩和過程における時間分解発光スペクトルの定式化を行った。さらに、電子線励起による発光の凝集性およびその減衰による緩和時間の同定の理論的裏付ける定式化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

断熱量子計算の途中に現れるマクロに異なる状態の量子力学的重ね合わせが計算の高速化に寄与するならば、そのような状態が現れるかを調べれば量子的高速化を達成するかが分かるので、新たに量子アルゴリズムを開発する際の指針となる。

また、さまざまな量子系の新たな緩和機構や緩和時間を同定する方法を見出したことにより、量子系を制御する新たな方法を開拓できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：It is shown that, in several algorithms of adiabatic quantum computation, quantum superpositions of macroscopically distinct states appears during the computation. This result suggests that this type of quantum states are important to realize quantum speedup of computation.

Relaxation dynamics in several quantum systems is investigated. In cavity quantum electrodynamics, it is shown that the Fano effect can induce slow relaxation of the system and the time-resolved spectrum of luminescence is formulated. It is also shown that the luminescence from materials excited by electron beam have huge bunching effect and that its decaying behavior provides the relaxation lifetime of the materials.

研究分野：統計力学

キーワード：開放量子系 断熱量子計算

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、断熱量子計算および量子アニーリングに関して、実機の開発の進展に伴い理論研究が活発になっていた。断熱量子計算とは、制御パラメータを含むハミルトニアンをゆっくりと変化させることで自明な初期状態(初期ハミルトニアンの基底状態)から問題の解を表す状態(終期ハミルトニアンの基底状態)へと時間発展させて計算を実行するものである。いくつかの問題において断熱量子計算は、古典計算の原理的最短計算時間よりも短い時間で計算できる(量子的高速化)ことが知られている。そのような場合、断熱量子計算は何らかの「量子性」を利用していると考えられる。しかし、その量子性は具体的にどのような量で表せるものなのかについては十分な理解は得られていなかった。

もう一つの背景は、量子系がどのように緩和するかという問題である。研究開始当初、量子系における熱平衡状態への緩和の研究が盛んであった。この問題では断熱量子計算と異なり、ハミルトニアンは時間に依存せず、初期状態は(緩い条件のもとで)任意である。長時間領域での熱平衡状態への緩和を示すこと自体については理解が進んでいたが、「緩和するにはどれだけ時間が必要か?」という緩和時間については十分な理解が得られていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、量子系の状態変化にかかる特徴的時間およびその際に現れる特異な量子状態を解明することを目的としている。特に、背景で述べた2つの状況、つまり、断熱量子計算における解状態への遷移と量子系における状態緩和において、これらのことを調べる。

3. 研究の方法

断熱量子計算に対する解析では、断熱定理が完全に成り立つ理想的な状況を考え、途中に現れる状態がハミルトニアンの固有状態であるとして、その固有状態の性質を解析計算によって調べた。

量子系の緩和の問題に対しては、量子マスター方程式を用いた解析を行った。標準的な緩和項および本研究で新たに導入した緩和項のもとでの系の挙動を解析計算と数値計算を併用して調べた。

4. 研究成果

(1) 断熱量子計算については「マクロに異なる状態の重ね合わせが計算途中に現れること」が量子的高速化の必要条件であるという予想を提案した。断熱量子計算における「マクロに異なる状態の重ね合わせ」を定量的に評価する指標を導入し、表1にまとめたように、いくつかの具体的な断熱量子計算アルゴリズムにおいてこの予想が成り立つことを厳密に示した。これによって、断熱量子計算においては、解状態への遷移の途中に非常に特異な量子状態を経由することが明らかとなった。これらの結果は論文誌に発表した(J. Phys. Soc. Jpn., 2018)。

表1: 様々な断熱量子計算アルゴリズムにおける、量子的高速化の有無と計算途中でのマクロに異なる状態の重ね合わせの出現の有無

問題 (アルゴリズム)	量子的高速化 (既知の結果)	マクロに異なる状態の重ね合わせ (本研究の結果)
GROVER	起きる	現れる
DEUTSCH-JOZSA	起きない	現れない
BERNSTEIN-VAZIRANI	起きる	現れる
SIMON	起きる	現れる
GLUED-TREES	起きる	現れる

(2) 共振器量子電磁力学系におけるゆらぎの定理の拡張を行った。通常、共振器量子電磁力学系からは外部環境系へ光子の漏れ出しが起こる。一方、外部環境系から共振器への光子の供給はほとんど起こらない。そのため理論的にこの状況をモデル化する際には、前者の影響のみを取り入れた量子マスター方程式を用いることが多い。この理論モデルにおいては通常の熱的な励起・脱励起の場合よりも強い不可逆性が生み出される。これを絶対不可逆性という。絶対不可逆性があると、通常の熱的環境の場合には満たされる局所詳細釣り合いの条件が成り立たなくなる。

このような状況において、ゆらぎの定理に2種類の補正項が現れることを理論的に見出した。ゆらぎの定理では、順方向のプロセスおよび時間を反転したプロセスでのエントロピー変化を考える。本研究で得られた2つの補正項のうち一つは時間を反転したプロセスでは存在できるが、順方向のプロセスでは存在できない軌道がどれくらいあるかを表す量に対応する。そして、もう一つの補正項は順方向のプロセスでは存在できるが、時間を反転したプロセスでは存在で

きない軌道がどれくらいあるかに関係する量となっている。特に、後者の寄与が現れることは本研究で初めて明らかになった点である。さらに、光子の漏れ出しが小さい状況ではこれらの補正項が共振器損失レートと観測時間の積に等しくなることも見出した。

実際に共振器電磁力学系を用いて構成される量子熱機関のモデルを考え、理論結果の数値的実証も行った。このモデルに対する量子マスター方程式を導いた後、数値計算による解析を行った。その結果、非平衡度の弱い領域から強い領域に至るまで確かにゆらぎの定理に補正項が現れ、その値は理論値に数値計算の精度内で一致することが確認できた。これらの結果をまとめて論文誌に発表した(Phys. Rev. E, 2020)。

(3) 共振器量子電磁力学系においてファノ効果の影響を取り入れた量子マスター方程式の定式化を行った。この系におけるファノ効果は、発光体からの直接発光と共振器モードを介した発光との干渉によって起こるものである。本研究では、量子マスター方程式にこの干渉効果に対応する緩和項を(通常自然放出と共振器損失に対応する緩和項に加えて)取り入れた。そして、この量子マスター方程式を用いて、ファノ効果がある場合の共振器量子電磁力学系における緩和レートを解析した。その結果、共振器モードと発光体の固有振動数の差(離調)の関数として緩和レートをプロットすると、ファノ効果に特有の非対称な形状が現れることが確認された。特に、破壊的干渉が起こる領域では、緩和レートがゼロに近くなる、つまり緩和時間が非常に長くなることが分かった。

さらに、発光スペクトルに対するファノ効果の影響を調べた。その結果特に、ファノ効果による緩和と通常の緩和に加えて純位相緩和も取り入れた場合に、破壊的干渉が起こる領域で共振器モードの固有振動数での発光のみが強く起き、発光体の固有振動数での発光はほぼゼロとなることを見出した。このことは、通常予想される位相緩和による干渉効果の消失は起きず、位相緩和があったとしてもファノ効果による破壊的干渉は頑健であることを意味している。この頑健性の理由は、位相緩和をもたらす位相ゆらぎが発光体からの直接発光と共振器モードを介した発光とで同じゆらぎ方をするために、これら2つの発光の干渉は位相ゆらぎの影響を実質的には受けないためであると理解できる。これらの結果をまとめて論文誌に発表した(Phys. Rev. Research, 2021)。

(4) 共振器量子電磁力学系における励起状態からの緩和過程での時間分解発光スペクトルについて理論的に解析を行った。その結果、定常状態とは異なり、緩和過程での時間分解発光スペクトルでは現在時刻よりも過去の相関関数を用いなければならないことが分かった。つまり、未来との相関を取り入れて計算してしまうと非物理的な結果が得られてしまうことが分かった。これに伴い、緩和過程での時間分解発光スペクトルには測定器の分解能が不可避的に入ることも分かった。

また、時間分解発光スペクトルを計算するには時間相関関数を求める必要があるが、定常状態の場合とは異なり、緩和過程での時間相関関数の計算には量子回帰定理を直接適用することができない。本研究では、量子回帰定理を間接的に用いて緩和過程での時間相関関数計算する方法を生み出し、この困難を部分的に解決することに成功した。

さらに、発光体が二準位系の場合の共振器量子電磁力学系での数値計算を行い、緩和過程での時間分解発光スペクトルからラビ振動とラビ分裂のどちらを明瞭に見るかというのがトレードオフ関係にあることを見出した。これらの結果をまとめて論文誌に発表した(Phys. Rev. Research, 2022)。

(5) 電子線によって励起された物質からの発光を記述する量子マスター方程式の定式化を行った。本研究では、電子線の中の1個の電子によって物質中の複数個の発光体がほぼ同時に励起されるという効果を量子マスター方程式に取り入れた。そして、この量子マスター方程式を用いて発光の2次の時間相関関数を解析した。その結果、この系からの発光が非常に大きな凝集的性質(バンチング)をもつことを示し、実験で見られている特徴を再現することに成功した。さらに、この時間相関関数の緩和時間が発光寿命に対応することを理論的に裏付けることにも成功した。これらの結果をまとめて論文誌に投稿中である(arXiv:2206.00933)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamaguchi Makoto, Lyasota Alexey, Yuge Tatsuro	4. 巻 3
2. 論文標題 Theory of Fano effect in cavity quantum electrodynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013037-1/14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.013037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Yuge Tatsuro, Yamaguchi Makoto	4. 巻 101
2. 論文標題 Fluctuation theorem in cavity quantum electrodynamics systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 022113-1/10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.101.022113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuge Tatsuro	4. 巻 87
2. 論文標題 Superposition of Macroscopically Distinct States in Adiabatic Quantum Computation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 124002 ~ 124002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.124002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Makoto, Lyasota Alexey, Yuge Tatsuro, Ota Yasutomo	4. 巻 4
2. 論文標題 Time-resolved physical spectrum in cavity quantum electrodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023052-1/8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.023052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 弓削達郎、山口真
2. 発表標題 レーザー系におけるゆらぎの定理の数値計算
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuro Yuge
2. 発表標題 Quantum thermodynamics in cavity QED system
3. 学会等名 International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スイス	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne		