

令和元年5月20日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05481

研究課題名(和文) 複素固有値問題を用いた動的カシミール効果の制御理論

研究課題名(英文) Dynamical Casimir effect in terms of complex spectral analysis of Floquet Hamiltonian

研究代表者

野場 賢一 (Noba, Kenichi)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：30316012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：原子と輻射場が結合した系における動的カシミール効果の光子生成ダイナミクスを明らかにするために、離散的エネルギーをもつ状態と連続的エネルギーをもつ状態が結合した系を周期外場で駆動した場合を考え、複素固有値問題の立場から理論解析を行った。その結果、周期外場で駆動した量子系の動力学を与えるフロケハミルトニアン固有値が、実数から複素数への変化など、多様な変化を示すことを明らかにした。これによりこの系の緩和減衰過程は、外場を調整することで、指数関数型減衰・べき減衰・非減衰の間で様々に変化することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複素固有値問題による理論的解析手法を、フロケハミルトニアンを導入することによって、周期外場駆動量子系に拡張した。その結果、周期外場で駆動された離散的エネルギーをもつ量子状態と連続的エネルギーをもつ量子状態が結合した系について、全体を一つの量子系として扱い、その固有値問題を解析することに成功した。これにより、現象論的仮定を導入することなく、微視的な立場から系のダイナミクスを理論解析することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically analyzed the dynamics of periodically driven systems in which an impurity with discrete energy levels is coupled to an energy continuum in terms of a complex eigenvalue problem in order to clarify the mechanism of photon generation in the dynamical Casimir effect. We showed that an eigenvalue of the Floquet Hamiltonian of our driven system can change between a real value and a complex value as the driving field parameters are varied. As a result, the decay process of this system can be controlled by the driving field between qualitatively different decay processes including exponential decay, power law decay and vanishing decay width cases.

研究分野：物性理論

キーワード：フロケハミルトニアン 複素固有値問題

1. 研究開始当初の背景

動的カシミール効果とは、ポテンシャルあるいは境界条件の急激な変化により、量子力学的な真空揺らぎから実粒子が生成される現象である。この現象は、あたかも無(真空)から有(光子)が生じるように見えるために注目を集め、多くの系で研究が行われてきた。実験的には2011年に超伝導回路を用いてはじめて検証が行われた。

連続スペクトルをもつ量子状態と共鳴が起こるとき、グリーン関数の共鳴極が複素平面上に現れることは古くから知られている。この共鳴極はハミルトニアン H の複素固有値に対応し、その虚部は量子共鳴状態の指数関数的減衰率を与える。複素固有値の存在はハミルトニアンがエルミート演算子であることと一見矛盾するように見えるが、共鳴状態が無遠方で発散してヒルベルト空間に属していないために、その固有値は複素数になり得るのである。そこで関数空間を拡張することによって、固有状態として共鳴状態を含み、ハミルトニアン H の固有値として複素数を許容する固有値問題を設定することが可能である。これをハミルトニアン H の複素固有値問題という。

本研究をはじめた動機は、量子力学の根本的な概念と密接に関係する動的カシミール効果を、ハミルトニアン H の複素固有値問題という視点から捉え、現象論に頼ることなく微視的なモデルに基づいて理論的な解析を行い、その動力的過程の特徴を明らかにすることである。

2. 研究の目的

原子と輻射場が相互作用する系における動的カシミール効果のダイナミクスについて、ハミルトニアン H の複素固有値問題の視点から理論的な解析を行う。連続的なスペクトルをもつ輻射場と相互作用する原子は、基底状態において輻射場の雲をまとめて安定な状態となっている。この原子が急激なポテンシャル変調を受けたとき、輻射場の雲は光子として放出される。この放出過程のダイナミクスを、複素エネルギー平面 E 上のグリーン関数の共鳴極によるマルコフ的過程と、分岐点効果による非マルコフ的過程に分離して解析を行う。具体的に次のような研究課題を設定した。

(1) 周期外場で駆動することによる制御

周期外場でポテンシャルや相互作用を変調させることにより、光子生成過程のコントロールを試みる。複素固有値問題によって、動力学過程は指数関数的な過程(マルコフ過程)とべき関数的な過程(非マルコフ過程)の2つに分離される。これらの過程に対する外場による変調は定性的に異なることが予想される。そこで、それぞれの過程を個別に制御する手法を提案する。

(2) 非断熱遷移の効果の解析

動的カシミール効果はポテンシャルなどが有限の速度で変化したときに起こるので、基本的に非断熱遷移に起因する現象ということが出来る。周期外場で駆動することで非断熱遷移が繰り返し起こる場合、異なる遷移経路の間の干渉効果が重要になる。輻射場のような連続スペクトルをもつ状態との結合がある系において、このような非断熱遷移による干渉効果がどのような影響を受けるか解析する。

(3) 生成される光子の相関の解析

動的カシミール効果において非マルコフ的放出過程で生成された光子は、初期状態の記憶を保持するために、マルコフ的過程で生じた光子とは違う性質をもつ。その違いは時間的および空間的な相関の違いとして現れると考えられる。そこで複素固有値問題によりこれらを分離して解析を行い、その違いを明らかにする。

3. 研究の方法

具体的な系として、離散的エネルギー準位を有する原子が連続的エネルギースペクトルをもつ場と相互作用する微視的モデルを考える。ポテンシャルの変調としては、周期外場で駆動された場合を考える。このとき系のハミルトニアン H は時間に依存するものとなるが、フロケの定理を用いて時間に依存しないフロケハミルトニアン H_F を導出することにより、固有値問題として取り扱うことが可能になる。このとき全系は一つの量子系であり、光子生成過程は、離散量子状態の共鳴緩和過程とみなすことができる。本研究では、フロケハミルトニアン H_F の複素固有値問題を、理論的または数値的に解析することによって、この動力的過程を明らかにする。

4. 研究成果

本研究を遂行することによって以下のような研究成果を得た。

(1) 離散的エネルギーをもつ量子状態と連続的エネルギーをもつ状態が結合した系を周期的外場で駆動したときに、その系のフロケハミルトニアン H_F の複素固有値を求めるための系統的な計算手法を開発した。また、この手法を用いて以下(2)と(3)の結果を得た。

(2) 離散的エネルギーをもつ量子状態として1つの量子状態を想定し、それが連続的エネルギーをもつ状態と結合した系において、周期外場で駆動したときのフロケハミルトニアン固有値は非常に多様な変化を示すことがわかった。そして、周期外場のパラメータを変化させたときに、固有値は実数にも複素数にもなることがわかった。複素固有値問題において複素数の固有値は共鳴状態に対応し、この状態が寄与するとき一般に指数関数型減衰が起こり、その虚部は減衰率を表す。一方で、実数の固有値は空間的に局在した束縛状態や、無限遠方で発散する反束縛状態と呼ばれる状態に対応する。束縛状態が主要な寄与をするとき減衰は起こらないが、反束縛状態だけが存在するときは分岐点効果によるべき減衰が現れる。本研究では、外場を変化させることによって、これらの指数関数型減衰、べき減衰、非減衰の間で、緩和減衰過程を変化させることが可能であることを示した。また、固有値が実数から複素数へと変化する点は例外点と呼ばれ、非エルミート系の解析において最近注目を集めているが、本研究で対象とした外場駆動量子系のフロケハミルトニアンの固有値においてもこの例外点が現れることを示した。

(3) 離散的量子状態として2準位系を考え、それが連続的エネルギーをもつ状態と結合した系において、周期外場で駆動したときのフロケハミルトニアンの固有値を求めた。その結果、周期外場によって2準位間の非断熱遷移が繰り返されることで起こる、量子干渉効果による動力学的な局在現象は、連続エネルギーをもつ状態との結合が強まってもすぐには破壊されないことがわかった。またこのとき、その動力学的局在現象が起こる条件は、連続状態との結合の強さとともに連続的に変化することを明らかにした。

(4) 周期外場との強い結合の効果を議論するために、回転波近似を用いず、仮想励起の効果までを取り入れて、双極子振動子における動的カシミール効果の理論の構築に着手した。現時点で、時間に依存する系の固有モードを解析的に求めることに成功しており、今後の議論の土台となる基礎理論を得ることができた。

(5) 離散的エネルギーをもつ量子状態が、片側に無限に伸びている1次元鎖からなる連続スペクトルをもつ量子状態と結合した系の解析を行った。この系は、動的カシミール効果に対する境界の効果を議論するためのモデルであるが、外場の効果を取り入れる前に詳細な解析を行ったところ、派生的な研究の成果として、複素固有値問題に関する次の(6)と(7)の結果を得ることができた。

(6) 離散的エネルギーをもつ量子状態に関する光吸収スペクトルについて研究を行い、この系では非常に非対称性が強い吸収ピークが現れることを示した。このような非対称ピークはFano共鳴と呼ばれ、通常は連続状態への直接的遷移と間接的遷移の間の干渉効果として説明される。しかしこの研究では、複素固有値問題の立場から、この非対称ピークを、複素固有値をもつ固有状態への単独の遷移として説明できることを明らかにした。

(7) エネルギー的には共鳴条件を満たしているが、系の対称性のために、連続的エネルギーをもつ状態との実効的な結合がゼロとなって束縛状態が出現する場合がある。このような束縛状態をbound state in continuum (BIC) という。このBICと直交した状態を初期状態として適切に選ぶことにより、指数関数的過程が完全に消滅し、すべての時間領域でべき減衰過程となる純粋な非マルコフの動力学が現れることを示した。

(8) 本研究課題から派生した研究課題として、強いレーザー場で駆動した系における高次高調波の発生のダイナミクスについて、フロケハミルトニアンの複素固有値の立場から研究を行った。この系についても、外場で駆動された離散的エネルギーをもつ状態が、連続的スペクトルをもつ状態と結合したモデル系を用いて解析を行った。その結果、フロケ状態の干渉効果の結果として、高次高調波のスペクトルに特徴的なプラトーとカットオフが再現されることを明らかにした。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

S. Garmon, K. Noba, G. Ordonez, and D. Segal, Non-Markovian dynamics revealed at a bound state in the continuum, *Physical Review A*, 99 010102(R) (1-6), 2019, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.99.010102

H. Yamane and S. Tanaka, Ultrafast Dynamics of High-Harmonic Generation in Terms of Complex Floquet Spectral Analysis, *Symmetry*, 10, 313(1-18), 2018, 査読有
DOI: 10.3390/sym10080313

T. Fukuta, S. Garmon, K. Kanki, K. Noba, and S. Tanaka, Fano absorption spectrum with the complex spectral analysis, Physical Review A, 96 052511(1-14), 2017, 査読有
DOI: 10.1103/PhysReA.96.052511

〔学会発表〕(計 15 件)

相川和磨, 野場賢一, 萱沼洋輔、量子エレベータモデルにおける干渉効果と電子の局在性、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年

田中智, 神吉一樹, 山根秀勝、外場駆動された双極子振動子からの動的カシミール光子放出、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年

神吉一樹, 田中智、双極子振動子の量子外場での仮想励起による動的カシミール効果、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年

田中智, 神吉一樹, 山根秀勝、外場駆動された双極子振動子からの動的カシミール光子放出、第 29 回光物性研究会、2018 年

山根秀勝, 田中智、高次高調波発生における入射光と放射光の相関、第 29 回光物性研究会、2018 年

Yamane Hidemasa, Noba Kenichi, Tomio Petrosky, Tanaka Satoshi, Time-frequency resolved high-harmonic generation in terms of complex spectral analysis of Floquet Hamiltonian, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), 2018 年

Yamane Hidemasa, Tanaka Satoshi, Dissipative Quantum dynamics of High-Harmonic Generation, The 1st UJN-IMS-SKKU Symposium on Chemistry and Materials, 2018 年

Tanaka Satoshi, Yamane Hidemasa, Tomio Petrosky, Ultrafast Dynamics of High-Harmonic Generation with Floquet Complex Spectral Analysis, The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, 2018 年

Tanaka Satoshi, Yamane Hidemasa, Tomio Petrosky, Ultrafast Dynamics of High-Harmonic Generation with Floquet Complex Spectral Analysis, International Conference 2018 Non-equilibrium Dynamics of Condensed Matter in the Time Domain, 2018 年

山根秀勝, 野場賢一, Tomio Petrosky, 田中智、駆動 2 準位系の高次サイドバンド発生におけるファノプロファイル形成ダイナミクス、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年

ガーモンサバンナ, 野場賢一、Measuring non-exponential decay at the bound state in continuum、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年

野場賢一、外場駆動開放量子系におけるフロケハミルトニアン of 複素固有値、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年

山根秀勝, 野場賢一, Tomio Petrosky, 田中智、高次高調波発生過程におけるフロケ共鳴状態間の干渉効果、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年

西台顕伍, Savannah Garmon, 野場賢一、周期外場による半無限 1 次元原子鎖における電子減衰過程の制御、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年

山根秀勝, 野場賢一, Tomio Petrosky, 田中智、高次高調波発生による超短パルス光の形成ダイナミクスとパルス形状制御: 拡張フロケヒルベルト空間での複素スペクトル解析、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：田中 智

ローマ字氏名：TANAKA Satoshi

所属研究機関名：大阪府立大学

部局名：理学系研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：80236588

(2)研究分担者

研究分担者氏名：ガーモン サバンナ

ローマ字氏名：Garmon Savannah

所属研究機関名：大阪府立大学

部局名：理学系研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：30733860

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。