

称号及び氏名 博士(理学) 山根 秀勝

学位授与の日付 平成 30 年 9 月 25 日

論文名 Theory of the Spontaneous Photon Emission from a Driven
Two-level-system in terms of Complex Eigenvalue Problem
(複素固有値問題による駆動 2 準位系からの自発放出光の理論)

論文審査委員 主査 田中 智
副査 溝口 幸司
副査 会沢 成彦
副査 神吉 一樹

学位論文要旨

Theory of the Spontaneous Photon Emission from a Driven Two-level-system in terms of Complex Eigenvalue Problem (複素固有値問題による駆動2準位系からの自発放出光の理論)

大阪府立大学大学院 理学系研究科 物理科学専攻

山根秀勝 (Hidemasa YAMANE)

2018年8月

時間対称性の破れは物理学において根本的な問題である。本論文では、駆動2準位系における不可逆過程を拡張ヒルベルト空間における複素固有値問題の観点から解析した。開放量子系において不可逆過程はポアンカレ共鳴によって起こるが、その共鳴特異性のため摂動論は破綻する。時間対称性の破れの代表的な例としては、励起原子からの自発放出光や放射性原子の指数崩壊が挙げられる。シュレディンガー方程式のような時間対称的な量子論の微視的力学原理の枠組みの中で不可逆現象を取り扱うのは根本的に困難である。エルミートなハミルトニアンはヒルベルト空間内で実固有値しか持つことができず、散逸場との相互作用による共鳴特異性を含む時間不可逆な崩壊過程を正しく記述できないのである。

この解決法の1つとして、エルミートなハミルトニアンが複素固有値を持つことができるように拡張した関数空間(拡張ヒルベルト空間)における「複素スペクトル解析」という手法が Tomio Petrosky、Ilya Prigogine らによって示された。時間不可逆な指数崩壊に対応する複素固有値を持つ固有状態は共鳴状態と呼ばれ、同じ複素固有値を持つ右固有状態と左固有状態とがそれぞれ定義される。右固有状態と左固有状態は拡張ヒルベルト空間において双対をなし、完全性を満たす。複素スペクトル解析による時間不可逆現象に関する研究はこの約20年間で発展してきたが、共鳴状態に対しては未だ基礎的な解釈に留まっており、更なる発展が期待される。

近年、駆動開放量子系が非常に注目を集めている。高次高調波発生もその一つであり、超高速高強度レーザー光源の開発により、サブフェムト秒タイムスケールで原子気体にコヒーレントな電子運動を誘起し、X線波長領域まで高次高調波を生成することができるようになった。また、レーザーパルス制御技術の進歩により、駆動レーザーのキャリアエンベロー

位相を正確に制御することが可能になり、原子や分子のアト秒タイムスケールでの超高速現象の解明や量子制御が可能となっていることが知られている。最近では半導体などの固体中における高次高調波発生が実験的に成功しており、高次高調波発生の統一的な解釈を与える理論的解析が待望されている。これまで、3ステップモデルに基づき、時間依存シュレディンガー方程式を解いた数値シミュレーションや、半導体ブロッホ方程式を用いた理論解析が行われてきた。しかしながら、これらは高強度レーザー場下におけるコヒーレントな電子運動と環境系である散逸輻射場とを切り分けた現象論的な解析であり、そこでは物質と環境系との量子相関は見過ごされている。駆動開放量子系において、散逸場まで含めて量子相関が議論できる理論は確立されていない。それは、次の2つの問題によって摂動論が破綻するためである。1つは、高強度レーザー場との強い相互作用によって摂動論が破綻する問題である。もう1つは環境系である散逸場との相互作用によって共鳴特異性により摂動論が破綻する問題である。散逸場まで含めた全系を量子論的に取り扱う理論を構築するのが本論文の目的である。

本論文の第I部で、駆動開放量子系の一例として、高次高調波発生における光の自発放出過程について論ずる。本研究では、位相が固定された単色入射レーザー場によって駆動された2準位系における光の自発放出過程について、散逸輻射場まで含めた全系を取り扱う。フロケの定理を適用し時間に依存したシュレディンガー方程式から時間に依存しないフロケハミルトニアンを導出した。先に述べた高強度レーザー場との強い相互作用による困難について、フロケハミルトニアンの高強度レーザー駆動に対応する項をシュタルク基底によって対角化することで解決した。散逸輻射場との相互作用による共鳴特異性のための困難は、フロケハミルトニアンに対して、射影演算子法により複素固有値問題を解くことで解決した。そして、散逸輻射場まで含めた全系に対する複素固有値、固有状態を得ることができた。

散逸場まで含む全系に対する固有状態を得たことで、全系の時間発展を記述することができ、高強度レーザー場下における高次高調波の自発放出過程をコヒーレントな量子過程として論ずることができるようになった。

本研究の解析で、高次高調波スペクトルに、実験的によく知られているプラトーやカットオフといった特徴が再現できた。これらの特徴は第1種ベッセル関数によって説明できた。さらに、高次高調波スペクトルのプラトー領域にファノ干渉が現れることも明らかにした。

また、高次高調波発生における自発放出光の時空間発展を解析した。高次高調波光は共鳴指数崩壊に対応する decay product、粒子近傍の局在する仮想光子雲、初期の短い時間（ゼノン時間）に放出されるゼノン光子に分けられる。さらに、入射レーザー場強度、振動数を調整することによって、異なる次数の高調波間干渉によってパルス状の光子放出が起こり得ることを理論的に予測した。

第 II 部では、非駆動系において、真空揺らぎとの相互作用に起因する励起原子の仮想光子雲の形成ダイナミクスを調べた。全ての粒子は真空中に存在したとしても量子真空揺らぎにより、連続場と相互作用し、仮想粒子雲を形成する。仮想粒子雲の存在は、巨視的にカシミール効果やラムシフトとして観測される。基底系に対する仮想粒子雲はよく調べられており、その特徴は連続場の分散関係によって異なることが知られている。しかしながら、励起系に対しては、先に述べた通り、共鳴特異性により通常ヒルベルト空間内で摂動解析ができない。そこで本研究では、拡張ヒルベルト空間における複素固有値問題を解くことによって、励起原子が相互作用する連続場の分散関係の違いによって、仮想光子雲の出現の違いが現れることを明らかにした。

この研究は、本論文の第 I 部で用いた方法と組み合わせることで、駆動開放量子系における量子真空揺らぎの影響の分析と量子制御にも適用可能である。例えば、超高速駆動場によって仮想光子雲が実光子へと転換し、量子真空から光子対が生成される動的カシミール効果と呼ばれる現象があり、近年、実験的観測の成功もあって非常に注目を集めている。本論文の理論を適応することで、動的カシミール効果における生成光子対のエンタングルメントの分析や制御が可能となると期待できる。

本論文で、散逸場まで含めた全系を取り扱い、駆動場下における開放量子系の量子力学を定式化し、散逸場を含む多様な量子コヒーレンス制御への基礎付けを与えている点で意義深いと考えている。

List of Publications

Journal

- [1]. Hidemasa Yamane and Satoshi Tanaka, “Ultrafast dynamics of high-harmonic generation in terms of complex Floquet spectral analysis”, *Symmetry* 10, 313 (2018).

Refereed International Conference Proceeding

- [1]. Hidemasa Yamane, Satoshi Tanaka, Michelangelo Domina, Roberto Passante and Tomio Petrosky, “Analysis of high-harmonic generation in terms of complex Floquet spectral analysis”, 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), 1437-1444 (Nanyang Technological University, Singapore, November 2017).

International Conference Presentations

- [1]. Hidemasa Yamane, Nobuhisa Yamada, Savannah Garmon, Tomio Petrosky, Satoshi Tanaka, “Zeno photon emission from the virtual cloud of a dressed atom in the dynamical Casimir process”, International symposium on Foundation of Quantum Transport in Nano Science, August 18-20, 2015, University of Yamanashi, Yamanashi, Japan, (oral).
- [2]. Hidemasa Yamane, Kenichi Noba, Tomio Petrosky, Satoshi Tanaka, “Zeno photon emission and dynamical Casimir effect in the Friedrichs model driven by periodic external field”, 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN17), March 28-31, 2016, Todaiji Temple Cultural Center, Nara, Japan, TuP41 (poster).
- [3]. Hidemasa Yamane, Kenichi Noba, Tomio Petrosky, Satoshi Tanaka, “The dynamical Casimir effect of a metastable excited atom driven by a time periodic external field”, Resonance and non-Hermitian Quantum Mechanics 2016, August 3-5, 2016, , Osaka University, Osaka, Japan, QM9-3 (oral).
- [4]. Hidemasa Yamane, Satoshi Tanaka, Michelangelo Domina, Roberto Passante, and Tomio Petrosky, “Analysis of high-harmonic generation in terms of complex Floquet spectral analysis”, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-FALL),

November 19-22, 2017, Nanyang Technological University, Singapore, Singapore, 1A0-58 (poster).

- [5]. Hidemasa Yamane, Ken-ichi Noba, Tomio Petrosky and Satoshi Tanaka, “Time-frequency resolved high-harmonic generation in terms of complex spectral analysis of Floquet Hamiltonian”, The 12th International Conference on Exciton and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), July 8-13, 2018, Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan.

学位論文審査結果の要旨

学位論文提出者氏名： 山根 秀勝

学位論文題目： Theory on the Spontaneous Photon Emission from a Driven Two-level-system in terms of Complex Eigenvalue Problem

(複素固有値問題による駆動 2 準位系からの自発放出光の理論)

近年、量子系をコヒーレントな外場で駆動し量子力学的時間発展を制御する研究が進んでいる。散逸が小さな孤立量子系に対しては、量子干渉効果を利用した系のユニタリ時間発展の制御が実現している。しかし、外界との結合が大きな開放系では、不可逆的散逸効果によって系の時間的空間的コヒーレンスがどの程度維持され、量子制御がどの程度可能かは未解明である。本研究で対象としている外場駆動された量子系からの高次高調波発生は、駆動された開放量子系の典型的な物理系であり、どのような条件のもとで高調波発生を制御することができるかを明らかにすることは重要な研究課題である。

高次高調波発生は、高強度の赤外レーザーパルス原子気体に照射し、電子とレーザー場の非線形相互作用を通して、X線領域にまで達するアト秒パルスを発生させる機構として注目を集めている。近年では、固体半導体からの高次高調波発生も実現している。この現象の興味深い点は、原子系と固体系では、電子状態が全く異なるにもかかわらず、高調波スペクトルにはプラトーとカットオフという共通のスペクトル形状を示すことである。このことは、電子運動の個性によらずに普遍的で共通の高調波光子の放射機構があることを示唆している。理論的な解析としては、これまでのところ、駆動場中で運動する電子系に対しては時間依存シュレーディンガー方程式を量子論的に解く一方で、光放出過程に対しては、電子電流を古典的な電流として見なしマクスウェル方程式に基づき古典的放射電場を計算する、量子論と古典論を組み合わせた不統一な理論解析に留まっている。しかしながら、高調波発生は、外部自由輻射場への自発放射の不可逆散逸過程であり、首尾一貫した量子論的な取り扱いが必要である。

不可逆散逸過程を量子論の枠組みの中にいかに組み込むかは重要な問題であるが、近年、拡張ヒルベルト空間においてハミルトニアン固有値問題を考え、散逸現象を記述する複素スペクトル理論が提案されている。山根秀勝君は、この複素スペクトル理論を周期外場中の量子系を記述するフロケ理論と組み合わせることで、高次高調波発生の自発放射過程を一連のコヒーレントな量子過程として扱う統一的な定式化に成功した。山根君は高調波スペクトルを全系の複素固有状態を用いたスペクトル分解を行い、量子干渉効果が本質的に重要な役割を演じていることを初めて明らかにした。

本論文の第1部では、駆動2準位系の自発放射に付随した高調波発生の解析を行った。単色駆動レーザー場と2準位系が強く結合したシュタルク基底を用いて、レーザー場と2準位電子系とドレスト基底を構成し、さらに、自由輻射場との相互作用を量子論的に取り扱い、全系の複素固有状態を得た。この基底関数による展開によって、光子数計測による高調波スペクトルの定式を得た。この複素固有状態は、2準位電子系と自由輻射場光子状態が量的にもつれた状態として記述されていることを示した。この重ね合わせの係数が駆動レーザー場と励起パルスの相対位相に依存しているため、レーザー場の位相を変えることで、量子干渉効果を制御し、高調波発生を制御することができることを初めて明らかにした。

第2部では、さらに、この理論研究を動的カシミール効果の研究へ発展させるための準備として、励起原子の仮想光子雲の解析を行った。動的カシミール効果とは、電氣的に中性な物質内の電荷ゆらぎによって、物質廻りに局在した仮想光子雲が外場によって自由光子となって放射される現象である。フロケ理論と複素固有スペクトル理論を組み合わせた解析によって、自由輻射場の状態密度の違いによって、仮想光子雲から自由光子への転換過程に違いが生じることを明らかにした。

以上のように、本研究は、散逸不可逆過程をも含めた新しい駆動量子力学の理論定式化を行い、これに基づき、高次高調波発生の普遍的放射機構を解明したものであり、意義のある研究である。

本委員会は本論文が学位論文として十分な内容を有していると判断した。

委員長 田中 智
会沢 成彦
神吉 一樹
溝口 幸司