

令和元年6月6日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14363

研究課題名（和文）原子間コヒーレンスを利用した微弱な高次QED過程の増幅

研究課題名（英文）Amplification of higher-order QED process using coherence among atomic ensemble

研究代表者

原 秀明 (Hara, Hideaki)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特別契約職員（助教）

研究者番号：70737311

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：高次QED過程のコヒーレント増幅の実現を目指し、コヒーレント増幅を記述するシミュレーションモデル（Maxwell-Bloch方程式）を構築した。水銀気体標的の場合の数値シミュレーションを行い、実現可能なパルスエネルギーの励起光源を用いた場合に発生するE1×M1二光子放出の信号光強度を見積もった。また、キセノン気体標的の高次二光子励起実験を行った。共鳴イオン化の信号を観測することで励起の確認をし、ポンプ・プローブ法とレート方程式を用いて励起原子数を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで検出のできなかつた微弱な遷移が増幅により観測できるようになると、素粒子物理の未解決問題に対する新しい研究可能性が拓かれると考えられる。本研究では、微弱な高次QED過程の増幅に向けて、シミュレーションモデルの構築を行い、さらにキセノン気体の高次二光子励起と励起原子数評価を行った。コヒーレンス生成のための励起と、励起原子数評価が可能になったことは、微弱な高次過程の放射の実現、観測に向けた重要な結果である。

研究成果の概要（英文）：Toward realization of coherent amplification of higher-order QED processes, we constructed a simulation model (Maxwell-Bloch equations), which describes coherent amplification. A numerical simulation for mercury gas target was performed, and signal intensity of E1×M1 two-photon emission when using excitation laser sources with possible pulse energies was estimated. We also performed a higher-order two-photon excitation experiment of xenon gas target. Excitation was confirmed by observation of signal of resonance ionization, and the number of the excited atoms were estimated by a pump-probe method and rate equations.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子物理 高次QED過程 素粒子物理

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理の標準理論は、多くの実験結果を説明できるが、未解決の問題が残っている。標準理論を越えた物理の構築は、素粒子物理における最重要課題であり、数々の大型実験が進められている。AMO 物理の技術は、素粒子物理の問題を解決する重要な手法となり得る。実際に、電弱統一理論のワインバーグ混合核の低エネルギー領域での決定や、電子の電気双極子モーメントの上限値の制限等、素粒子実験を凌駕する結果が報告されてきた。研究代表者は、AMO 物理の技術を駆使することで、従来の素粒子大型実験と相補的、あるいは大型実験を超える結果を出す実験の基盤技術の創出を目指している。特に、これまで検出のできなかった微弱な遷移を利用することで、新しい研究の可能性（例えば、ニュートリノ質量の精密測定や、パリティ対称性の破れの精密測定）が拓かれるのではと考えた。微弱な遷移は、Dicke の超放射で実証された原子間コヒーレンスによる放射レート増幅（コヒーレント増幅）の技術を応用することで、観測が可能になる。原子間にコヒーレンスが存在する場合、遷移レートは原子数密度の2乗に比例して増大する。研究開始当初までに、研究代表者らは、水素分子の振動準位間にコヒーレンスを生成し、E1×E1 二光子放出のレートを自然放出の 10^{18} 倍に増幅させることに成功していた。

2. 研究の目的

研究開始当初までに、研究代表者らは E1×E1 二光子放出のコヒーレント増幅に成功していた。E1×E1 二光子遷移は、最も容易な（最低次の）多光子放出過程であるが、標準理論を越えた物理の構築への応用のためには、さらに微弱な高次 QED 過程でも、コヒーレント増幅を可能にする必要がある。E1×E1 二光子遷移の次に高次となる QED 過程として、E1 三光子、E1×M1 二光子遷移等がある。本研究では、原子間コヒーレンスを用いて励起状態からの放射レートを増幅する技術を応用し、微弱な高次 QED 過程（E1 三光子、E1×M1 二光子遷移）の放射を実現・観測することを目的とする。具体的には、E1 三光子遷移許容な状態間にコヒーレンスを生成し、E1 三光子放出、E1×M1 二光子放出、反ストークス型 E1 三光子過程、反ストークス型 E1×M1 二光子過程等をコヒーレント増幅して観測する。

3. 研究の方法

本研究では、コヒーレント増幅を記述するシミュレーションモデルの構築と、キセノン原子標的を用いた励起実験を行った。

(1) コヒーレント増幅を記述するシミュレーションモデルの構築

研究開始当初までに、E1×E1 二光子遷移に関して、励起によるコヒーレンス生成と脱励起、電場の伝搬を記述する Maxwell-Bloch 方程式を用いたシミュレーションを行い、実験結果を説明することに成功していた。さらに高次の過程に関しては、E1 三光子励起によるコヒーレンス生成と、増幅される脱励起過程を個別に取り扱うことしかできていなかった。本研究では、E1×E1 二光子遷移で確立した手法を発展させ、さらに高次の過程も取り扱うことのできる Maxwell-Bloch 方程式を導出し、シミュレーションコードを開発した。その結果、励起によるコヒーレンス生成と、増幅される脱励起過程を同時に取り扱えるようになり、より詳細なシミュレーションによって、実験セットアップを検討することが可能になった。数値シミュレーションは、エネルギー準位構造が比較的複雑でない水銀原子の 1S_0 - 3P_0 間の遷移を用いて行った。

(2) Xe 原子標的の励起実験

実際の実験では、標的準備が比較的容易な Xe 原子を用い、基底状態 $5p^6$ 1S_0 ($|0\rangle$) と第一励起状態 $5p^5(^2P_{3/2})6s^2[3/2]_2$ ($|1\rangle$) 間にコヒーレンスを生成することとした。図1は実験に関連するエネルギー準位である。コヒーレンス生成の第一歩として、第一励起状態への波長 298 nm の光による二光子励起実験を行った。この状態間は、E1×E1 二光子遷移は禁制であり、より高次の E1×M1、E1×E2 二光子遷移となる。波長 298 nm の励起光源は、非線形光学結晶を用いた波長変換やチタンサファイア結晶を用いた光増幅を利用して開発した。

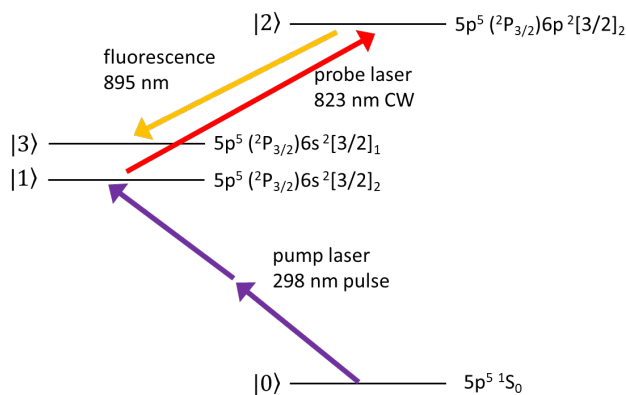


図1 Xe励起実験

第一励起状態への励起は、共鳴イオン化の信号を観測することで確認した。励起された原子数は、ポンププローブ法を用いて測定した。具体的には、第一励起状態から別の励起状態 $5p^5(^2P_{3/2})6p^2[3/2]_2 (|2\rangle)$ へ遷移させ、状態 $5p^5(^2P_{3/2})6s^2[3/2]_1 (|3\rangle)$ への脱励起時に発生する蛍光量を測定し、レート方程式と比較した。また、状態 $|1\rangle$ への励起が二光子励起であることを、励起原子数の 298 nm 光強度依存性から確認した。

4. 研究成果

(1) コヒーレント増幅を記述するシミュレーションモデルの構築

E1 三光子励起によるコヒーレンス生成と、コヒーレント増幅される E1 × M1 二光子放出、コヒーレント反ストークスラマン散乱型 E1 × M1 二光子遷移を同時に記述する Maxwell-Bloch 方程式を導出し、水銀原子の $1S_0$ - $3P_0$ 間の遷移に対して数値シミュレーションを行った。上記の3つの遷移は水銀の場合、図2の(a),(b),(c)に相当する。

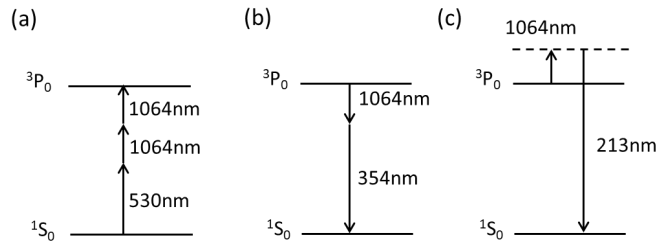


図2 水銀原子の(a)E1三光子励起(b)E1 × M1二光子放出 (c)コヒーレント反ストークスラマン散乱型E1 × M1二光子遷移

図3は、1064 nm 100mJ、530 nm 20 mJ を 185 の水銀気体 (密度 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、標的長さ 50 cm) に入射した場合のシミュレーション結果である。励起光 1064 nm が二光子遷移のトリガーとしてもはたらき、E1 × M1 二光子放出による 354 nm 光(a)と、コヒーレント反ストークスラマン散乱型 E1 × M1 二光子遷移による 213 nm 光(b)が発生する。横軸は励起光パルスに対する遅延時間、縦軸は標的入射面からの距離である。三光子励起確率は 10^{-5} 、生成するコヒーレンスは 10^{-4} であった。E1 × M1 二光子放出により発生する 345 nm 光はサブ pJ 程度である。これは 10^5 個の光子数に相当しており、光電子増倍管を用いて検出することが可能である。コヒーレント反ストークスラマン散乱型 E1 × M1 二光子遷移により発生する 213 nm 光は、354 nm 光の 1/100 程度である。530 nm の励起光も二光子遷移のトリガーとしてはたらくが、選択則のため遷移が抑制され、発生する光は非常に弱く、観測が難しい。今回のシミュレーションには取り入れていないが、実際は角運動量による抑制の効果も考慮しなければいけない。

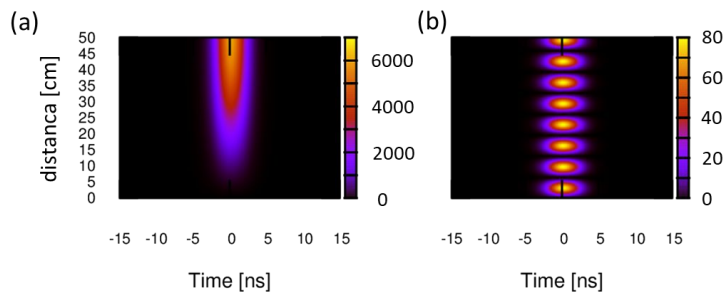


図3 シミュレーション結果

(2) Xe 原子標的の励起実験

励起光 298 nm とプローブ光 823 nm を共鳴周波数に合わせると、脱励起による 895 nm の蛍光が発生する。まず、298 nm 光による励起が確かに二光子励起であることを、励起原子数の、励起光強度依存性を測定することで確認した。図4は測定結果であるが、フィッティングによると蛍光量は励起光強度の 1.9 乗に比例している。これにより、298 nm により二光子励起されていることが確認できた。

また、励起光 2 mJ/pulse の場合に検出された信号光子数は、 $O(10)$ /pulse であった。検出効率を考慮し、レート方程式との比較を行うと、第一励起状態への励起原子数は $O(10^5)$ /pulse であることが分かった。コヒーレンス生成のための励起と、励起原子数評価が可能になったことは、高次 QED 過程の放射の実現、観測に向けた重要な結果である。

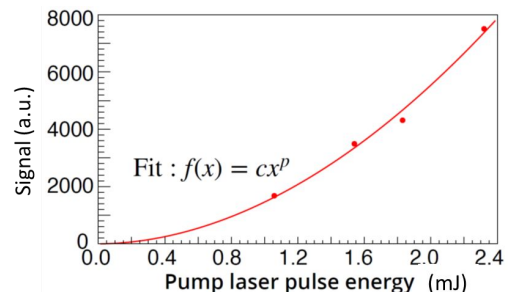


図4 励起原子数の励起光強度依存性

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Takahiro Hiraki, [Hideaki Hara](#), Yuki Miyamoto, Kei Imamura, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, Motohiko Yoshimura
“Coherent two-photon emission from hydrogen molecules excited by counter-propagating laser pulses”

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 52, 045401 (2019)

査読有, DOI: 10.1088/1361-6455/aafbd0

[Hideaki Hara](#), Yuki Miyamoto, Takahiro Hiraki, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, Motohiko Yoshimura
“Frequency dependence of coherently amplified two-photon emission from hydrogen molecules”

Physical Review A **96**, 063827 (2017)

査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.96.063827

Yuki Miyamoto, [Hideaki Hara](#), Takahiro Hiraki, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, Motohiko Yoshimura
“Vibrational excitation of hydrogen molecules by two-photon absorption and third-harmonic generation”

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics **51**, 015401 (2017)

査読有, DOI: 10.1088/1361-6455/aa9782

Yuki Miyamoto, [Hideaki Hara](#), Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, Motohiko Yoshimura

”Vibrational Two-Photon Emission from Coherently Excited Solid Parahydrogen”

The Journal of Physical Chemistry A **121**, 3943 (2017)

査読有, DOI: 10.1021/acs.jpca.7b02011

[学会発表](計 12 件)

佐藤帯子、他

“ニュートリノ質量分光に向けた Xe 原子の多光子励起”

日本物理学会第 74 回年次大会 (2019)

Kei Imamura, for the SPAN collaboration

“Rate amplification of the multi-photon process toward neutrino mass spectroscopy”

11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2019)

平木貴宏、他

“ニュートリノ質量分光のための対向レーザー励起によるコヒーレント二光子放出実験”

日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)

宮本祐樹、他

“ニュートリノ質量分光を目指した気体及び固体水素振動準位間の位相共役二光子放出実験”

日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018)

[Hideaki Hara](#), for the SPAN collaboration

“Coherent two-photon emission from hydrogen molecules towards neutrino mass spectroscopy”

The 26th International Conference on Atomic Physics (2018)

今村慧、他

“ニュートリノ質量分光に向けた Xe ガス対向励起実験の開発”

日本物理学会第 73 回年次大会 (2018)

平木貴宏、他

“ニュートリノ質量分光のためのパラ水素ガスを用いた対向レーザー励起実験”

日本物理学会第 73 回年次大会 (2018)

Takahiro Hiraki, for the SPAN collaboration
“Coherently amplified multi-photon emission toward neutrino mass spectroscopy”
10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2018)

Hideaki Hara, for the SPAN collaboration
“Coherence Generation by Counter-Propagating Photons Towards Neutrino Mass Spectroscopy”
10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (2018)

原秀明、他
“中赤外光を用いたラダー型励起による水素分子振動準位間のコヒーレンス生成”
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017)

植竹智、他
“原子を用いたニュートリノ質量分光のための対向レーザー励起実験の現状”
日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017)

Hideaki Hara, for the SPAN collaboration
“Coherent Amplification of Two-Photon Emission from Hydrogen Molecules Towards Neutrino Mass Spectroscopy”
Gordon Research Conference, Atomic Physics, From Quantum Control to Tests of Fundamental Physics (2017)

[その他]

ホームページ等
岡山大学 異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア
<https://www.xqw.okayama-u.ac.jp>

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。