

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02896

研究課題名(和文) 原子の量子増幅効果を利用したニュートリノ質量測定に向けた基礎研究

研究課題名(英文) Study of atomic coherence for neutrino mass spectroscopy

研究代表者

吉見 彰洋 (Yoshimi, Akihiro)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

研究者番号：40333314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は原子遷移に伴うニュートリノ生成の検出を目指し、原子の準安定状態への励起・コヒーレンス生成及びそこから脱励起過程の制御実験を実施するものである。標的原子として Xe を用い、第一励起状態(寿命約40秒の準安定状態)へパルスレーザーによる多光子励起実験を行った。その結果 E1-M1 および E1-E2 の2光子励起を通じた準安定状態への励起に成功した。またプローブレーザー光を導入してその励起数がパルス当たり $1e+6$ - $1e+7$ 個と算出でき、理論的な遷移強度と比較できる段階に至った。禁制遷移が絡む2光子遷移の理論と実験の比較が可能になったことは、コヒーレンス制御にとって重要な進歩である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノは現在知られている素粒子の中でも質量・粒子のタイプ等基本的性質が未解明な唯一のものである。日本では巨大加速器・検出器の実験でニュートリノの謎の解明に大きな貢献をしてきた一方、そのような巨大実験では解明が困難と思われる部分もある。そこで本研究課題のような全く異なる実験手法、特に小規模実験を考案し、手法を確立していくことが重要と考えられる。レーザー光で原子分子集団を特殊な状態に遷移させ、量子力学的効果によって弱い過程を能動的に増幅することを目指す本研究課題は価値がある。本研究期間において、光だけが絡む過程ではあるものの、標的原子遷移の弱い過程に関する知見が得られたことは意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study aims to detect the neutrinos emission associated with the atomic transition, and conducts experiments to control the excitation/coherence formation of atoms into a metastable state and the de-excitation process from them. Using Xe as the target atom, we conducted a multiphoton excitation experiment with a pulse laser to the first excited state (a metastable state with a lifetime of about 40 seconds). As a result, we succeeded in exciting to the metastable state through E1-M1 and E1-E2 two-photon excitation. In addition, the probe laser beam was introduced and the number of excitations could be calculated to be $1e+6$ to $1e+7$ per pulse, reaching a stage where it can be compared with the theoretical transition intensity. The ability to compare the theory and experiment of two-photon transitions involving such forbidden transitions is an important advance for coherence control.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：ニュートリノ コヒーレンス レーザー 準安定状態

1. 研究開始当初の背景

現代の素粒子物理学ではいわゆる標準理論と呼ばれる理論的枠組みの正しさが何度も検証され続け、極めて良く成立していることが分かっている。ただし、未だ残された謎がいくつか存在し、ニュートリノの質量絶対値は幾らか、その粒子のタイプは Dirac 型か Majorana 型か等その一つである。これらのニュートリノの未知な性質は何故この宇宙が物質だけで構成され、反物質が存在しないのか、という解けていない疑問と密接に関係していると思われる。近年特に日本の巨大検出器・加速器を用いた実験によって、ニュートリノ質量が当初思われていたようなゼロではないことが発見され、また CP 対称性の破れについても少しずつ解明の道を進んでいる。しかしながら、Dirac/Majorana 型の識別やその詳細について等は未だ検証実験の道筋が見えにくい状況である。従って、これまで実施されてきたいわゆる王道のニュートリノ実験とは全く別の手法による実験の提案・開発も待たれている状況である。

2. 研究の目的

本研究課題は、原子の準安定状態が脱励起する際に光子に加えて放出するニュートリノ対を間接的に観測し、未知の質量絶対値および粒子タイプの識別を系統的に明らかにする実験を構築することを最終目標としている。原子遷移のエネルギースケールはニュートリノの質量領域に近く、その点高エネルギー素粒子の崩壊や原子核崩壊を利用する実験に比べて感度が高い。従って原子のエネルギー準位間の遷移に伴ってニュートリノを放出あるいは吸収する際の効果を検出するのは検出感度という点においてはメリットが大きい。一方で、そのような原子遷移の低エネルギー領域ではニュートリノが絡む弱い相互作用の遷移強度は極めて弱くなり、何等かの増幅効果が必要になってくる。そこで原子状態間に量子力学的なコヒーレンスを発達させ、弱い過程を増幅(加速)させるのがこの手法のポイントである。これは、マクロな量の原子分子の集団間に揃った量子力学的位相を印可することによって、低いエネルギー準位に脱励起するレートが原子数の 2 乗 n^2 に比例して増大する原理を利用する。これは 1 光子放出の原子遷移では「超放射」または「超蛍光」として知られた現象である。1 光子放出の脱励起過程ではコヒーレンス領域は光子の波長程度内に限定され、マクロな原子数がこの増幅過程に関わることは不可能である。しかし一方、複数の光子またはニュートリノ等を放出する脱励起過程では、複数の放出粒子の運動量を制限させることでコヒーレンス領域を波長以上のマクロな領域まで拡張することが可能になる。我々の事前実験において、パラ水素分子の振動励起状態(準安定状態)と基底状態の間にコヒーレンスを生成し、準安定状態からの E1 の 2 光子放出を伴う脱励起レートを 10^{18} 倍も増幅することに成功している。これを踏まえて、Xe 準安定状態からのさらに禁止度の高い 2 光子遷移または 3 光子遷移の特性を調べて、遷移レートを加速する実験系を構築するのが本申請課題の目的である。

3. 研究の方法

上記の目的の達成のため、Xe 原子の基底状態から準安定状態へ直接励起するための高品質(高出力・狭線幅)パルスレーザーを開発し、励起実験を行った。この 2 状態間の遷移は 1 光子遷移なら M2 遷移であり、2 光子であれば E1-M1 または E1-E2 遷移が可能となる。今回は遷移波長の扱いやすさと対向型励起の有用性を踏まえて、2 光子励起による準安定状態の生成を試みた。このような禁止遷移を含む 2 光子励起は先行研究でもほとんどされていない。必要な励起波長は 298 nm であり、これは 596 nm のパルスレーザー光の 2 倍波を取ることにした。初段で得られるレーザー出力は ~1 mJ であり後段に使用するためには、出力が不十分である。必要なレーザー出力を得るために Ti:Sa 結晶を用いて赤外光の増幅を約 40 倍に増幅させる機構を 2 段目に設置した。その後、876 nm と Nd:YAG レーザーの三倍波である 355 nm を利用し差周波発生により 596 nm の光を発生させ、最終段で倍波発生を用いて 298 nm の光を得た (図 1)。この出力パルスレーザー光を Xe ガスで満たされたチャンバーに照射した。596 nm と 298 nm の 2 色の光パルスを使用した場合は、596 nm の 2 光子と 298 nm の 1 光子の計 3 光子励起も原理的にはあり得る。

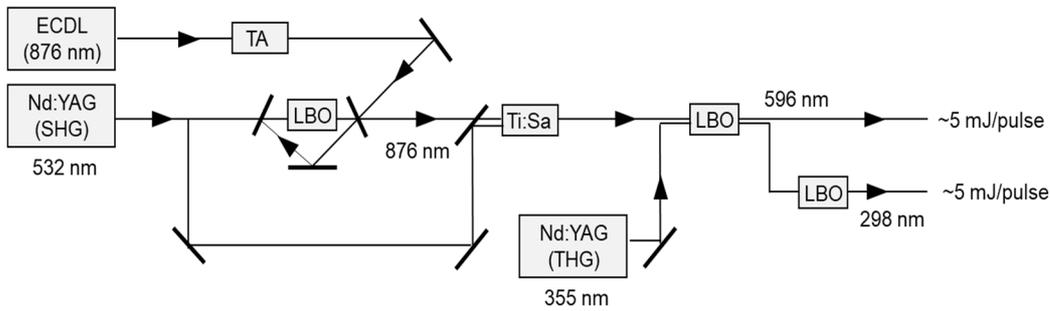


図 1: Xe 準安定状態への直接励起のためのレーザーシステム。

4 . 研究成果

上記のレーザーシステムにより、出力 ~ 5 mJ/pulse および線幅 250 MHz の 298nm および 596nm のパルス光を得ることができた。図 2(a) に赤外光 876 nm CW 光と 532nm パルス光によるインジェクションシーディング系周辺の写真を示した。これにより、狭線化された 876 nm のパルス光が得られた(図 2(b))。図 2(c) は 355 nm 光との差周波を取った後の発振スペクトルで、250 MHz 程度の狭い線幅のパルス光が得られているのが分かる。

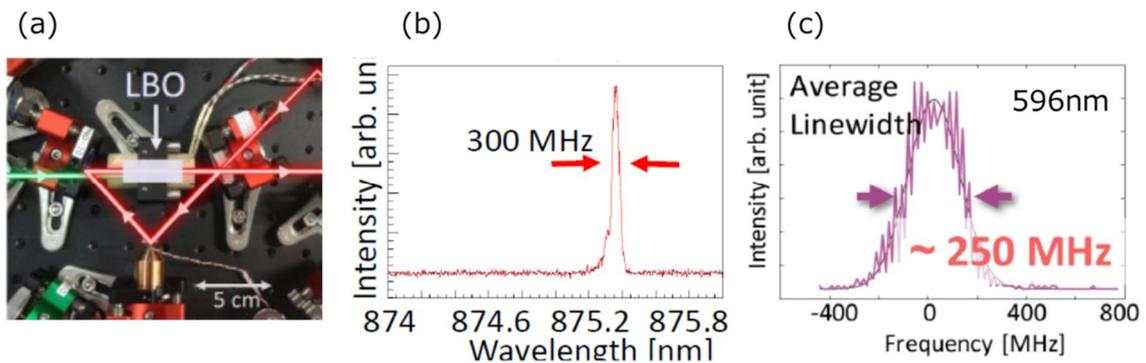


図 2: (a) 876 nm のシーディングを行う部分の写真。(b) 876 nm 発振スペクトル。(c) 596 nm の発振スペクトル。

この 298 nm 光子を 2 光子消費する励起スキームを図 3(a) の準位図に示した。共鳴励起が達成されると、準安定状態からもう 1 光子を吸収してイオン化されるので、その後に起きる再結合脱励起シグナルとして励起信号が検出される。この励起信号を検出する光電子増倍管を図 3(b) のように Xe ガスを 1 気圧封入したセルの横に設置した。このセットアップで励起レーザーの周波数をスキャンしながら、励起シグナル強度の共鳴信号が得られたスペクトルを図 3(c) に示してある。これから分かるように、実際に 298 nm の 2 光子遷移で準安定状態に励起されたことが分かる。この 2 光子は E1 光子 2 個を吸収することは選択則的に不可能なので、E1 と M1 または E1 と E2 の 2 個の光子を吸収する遷移に対応する。また、励起数を見積もるために、図 3(a),(b) にあるような 823 nm のプローブレーザーを導入して 895 nm の蛍光数を計測することで、準安定状態の原子数を決定した。イオン化過程との干渉を避けて正確な数を算出するために、プローブレーザー光は励起パルス光が照射された 50 ns 後に EOM スwitchングにより照射開始した。

結果として、1 パルス当たり $10^6 \sim 10^7$ 個の準安定状態が生成されていることが分かった。また、超前方への強い放射などは観測されず、等方的に蛍光が検出されていることも分かった。一方で実験結果は理論的な遷移強度を用いた数値計算で得られた結果に比べて 2~3 桁も励起数が少ない。この計算と実験値との差については未だ説明ができてないが、理論・実験両面からの研究を実施する価値があると思われる。特に計算においては、2 光子励起に関与する中間状態の

情報をより詳細に取り入れることや、Xe 原子の波動関数・エネルギー準位の計算精度をより向上させること等が重要と思われる。なお、E1-3 光子励起(596nm + 596nm + 298nm)の効果も探索したが、298 nm の強度を抑えながら 596 nm の強度を上げていっても、励起信号は検出されなかった。これは 298 nm 光子の 2 光子励起強度に比べて 3 光子励起強度が弱く、効果が隠されていたためだと思われる。

本研究により、E1-M1 および E1-E2 の弱い QED 過程の 2 光子励起を達成し、そのスペクトルの詳細を明らかにでき、今後の稀過程制御・増幅研究にとって重要な知見が得られた。

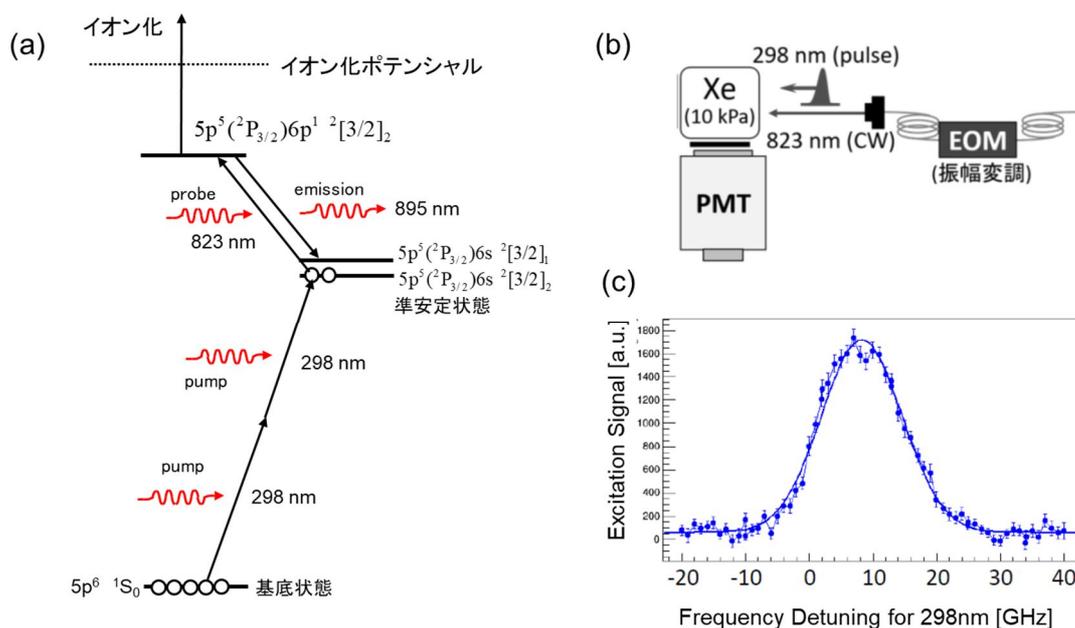


図 3: (a) Xe 準安定状態への 2 光子遷移およびプローブレーザーに関与する準位。(b) Xe ガスセルと光電子増倍管(PMT)周辺のセットアップ。(c) 観測された Xe 準安定状態への 2 光子励起スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Hiraki, H. Hara, Y. Miyamoto, K. Imamura, T. Masuda, N. Sasao, S. Uetake, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura	4. 巻 52
2. 論文標題 Coherent two-photon emission from hydrogen molecules excited by counter-propagating laser pulses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics B	6. 最初と最後の頁 45401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6455/aafb0	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 Miyamoto Yuki, Hara Hideaki, Masuda Takahiko, Sasao Noboru, Uetake Satoshi, Yoshimi Akihiro, Yoshimura Koji, Yoshimura Motohiko	4. 巻 121
2. 論文標題 Vibrational Two-Photon Emission from Coherently Excited Solid Parahydrogen	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 3943 ~ 3951
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpca.7b02011	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 Hara Hideaki, Miyamoto Yuki, Hiraki Takahiro, Masuda Takahiko, Sasao Noboru, Uetake Satoshi, Yoshimi Akihiro, Yoshimura Koji, Yoshimura Motohiko	4. 巻 96
2. 論文標題 Frequency dependence of coherently amplified two-photon emission from hydrogen molecules	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63827
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.96.063827	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 Miyamoto Yuki, Hara Hideaki, Hiraki Takahiro, Masuda Takahiko, Sasao Noboru, Uetake Satoshi, Yoshimi Akihiro, Yoshimura Koji, Yoshimura Motohiko	4. 巻 51
2. 論文標題 Vibrational excitation of hydrogen molecules by two-photon absorption and third-harmonic generation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 015401 ~ 015401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6455/aa9782	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 Masuda T., Okubo S., Hara H., Hiraki T., Kitao S., Miyamoto Y., Okai K., Ozaki R., Sasao N., Seto M., Uetake S., Yamaguchi A., Yoda Y., Yoshimi A., Yoshimura K.	4. 巻 88
2. 論文標題 Fast x-ray detector system with simultaneous measurement of timing and energy for a single photon	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063105 ~ 063105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4989405	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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 今村慧他
2. 発表標題 ニュートリノ質量分光へ向けたXe励起実験の現状
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 佐藤帯子他
2. 発表標題 ニュートリノ質量分光に向けたXe原子の多光子励起
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今村 慧、吉見彰洋 他
2. 発表標題 ニュートリノ質量分光へ向けたXeガス対向励起実験の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉見 彰洋
2. 発表標題 Neutrino spectroscopy with atoms and laser - toward detection of relic neutrino
3. 学会等名 International Conference on Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉見 彰洋
2. 発表標題 Nuclear resonant scattering experiment for observation of 229mTh radiative transition
3. 学会等名 International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岡山大学 異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア http://www.xqw.okayama-u.ac.jp/

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
---------	---------