

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14741

研究課題名（和文）ポジトロニウム長寿命状態へのレーザー励起のための装置開発

研究課題名（英文）Development of equipment for laser excitation to the long-lived state of positronium

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ポジトロニウムの励起光源開発に必要な、第二高調波発生装置と、ファイバーアンプによる基本波の増幅に関する知見を得た。第二高調波発生に関しては、設計値に近い出力パワーを実現することに成功した。また、ファイバーアンプに関しては、高い増幅度と低い増幅自然放出光ノイズを実現することに成功した。本研究課題では、必要な波長とは異なる波長での開発を行ったが、得られた知見に基づき波長を変えることで、励起実験に必要な光源を実現することが可能となる。また、対向二光子励起に関連する研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光源開発は、異なる波長でも必要な技術・ノウハウが共通している。第二高調波発生に関しては、設計値に近い出力パワーを実現することができたので、今後他の波長でも同様の設計手法に従って実現するパワーを見積もることが可能になる。また、ファイバーアンプに関しては、高品質の空間モードをもつ高出力の光源が実現可能になるため、開発技術・ノウハウを得ることにより、今後の光源開発の可能性が広がる。

研究成果の概要（英文）：We obtained the knowledge about a second harmonic generator and an amplification of the fundamental wave by a fiber amplifier, which are necessary for the development of the excitation laser source of positronium. Regarding the second harmonic generator, we succeeded in achieving an output power close to the designed value. As for the fiber amplifier, we succeeded in achieving high amplification and low amplified spontaneous emission noise. In this research, we developed at a wavelength different from the required wavelength, but by changing the wavelength, it is possible to obtain the laser source required for the excitation experiment. We also conducted studies related to two-photon excitation.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：素粒子実験 原子・分子物理 量子エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理の標準理論は、多くの現象を予測、説明することに成功してきたが、解決すべき問題を抱えている。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、数多くの大型実験が進められている。一方、原子物理の技術も、素粒子物理の問題を解決する重要な手法となり得る。最近では、電子の電気双極子モーメントの上限値の制限等で、素粒子実験を凌駕する結果が報告されている。原子物理の分光技術は、QEDの精密検証にも利用されている。QEDの検証には、理論計算の不確かさを減らすために、シンプルな構造をもつ原子が用いられる。水素原子を用いたQEDの精密検証は成功を収めてきたが、陽子が複合粒子であることに由来する不確かさが存在し、理論計算の不確かさが問題となる。一方、電子と陽電子の対がつくる束縛状態であるポジトロニウムは、レプトンのみから構成されるため、理論計算の不確かさが小さく、QEDの精密検証に適している。実際に、 $1^3S_1 \rightarrow 2^3S_1$ の二光子遷移の観測をはじめとして、多くの励起実験が報告されてきた。ただし、水素原子と異なり、ポジトロニウムは基底状態の寿命が短いため実験で扱いづらい。その寿命は主量子数 n に対して n^3 の依存性を持つ。したがって、 n の大きな準位を利用すれば、長寿命となり、QEDの検証実験をするのに都合がよいのではと考えた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ポジトロニウムの $1^3S_1 \rightarrow 3^3S_1$ 間のレーザー励起を行い、遷移周波数を測定するための装置開発をすることである。ポジトロニウム標的を用意することは難しいので、本研究課題では、レーザー励起に必要な光源開発に関する技術、知見を得ることを目的とした。具体的には、第二高調波発生と基本波の高出力化に関する開発を、市販のレーザー光源を用いて行う。市販のレーザー光源は、ポジトロニウム励起の波長とは異なるが、必要な技術に共通する点があるため、利用することにする。ポジトロニウムの寿命は n^3 に比例して長くなるので、先行研究の $1^3S_1 \rightarrow 2^3S_1$ 間の励起で生成する状態より長寿命となることが期待される。本研究では、高出力の波長 410 nm のレーザー光を用いて、ポジトロニウムに対して $1^3S_1 \rightarrow 3^3S_1$ 間の対向二光子励起を行う予定である (図1 (a))。波長 410 nm の励起光は、波長 820 nm の光の二倍波として発生させる。ポジトロニウムは質量が軽いため、非常に広いドップラー幅 (室温で約 500 GHz) を持つが、図1 (b) のように対向二光子励起により、ドップラーシフトをキャンセルすることができる。対向二光子励起に共通する手法の実験として、水素分子気体を標的とした対向二光子励起に関する研究も行った。

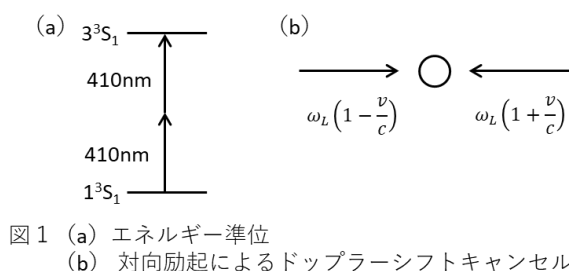


図1 (a) エネルギー準位 (b) 対向励起によるドップラーシフトキャンセル

3. 研究の方法

波長 410 nm の励起光開発を、第二高調波発生と、基本波の高出力化に分ける。まず、所属研究室が所有していた波長約 800 nm のレーザー光を用いて、高出力かつ安定な第二高調波発生装置を開発することにした。820 nm と波長が近いので、基本波のレーザーを、波長 820 nm を出力できるものに変更すれば、同様の設計の第二高調波発生装置を使用することができる。第二高調波のパワーを高くするには、基本波のパワーを強くするほうがよい。そこで光共振器内部に非線形光学結晶 (LBO) を設置し、共振器内の強い基本波電場を利用することにした。結晶内部での基本波のビーム径は、単に絞ればよいというものではなく、レーザー光がガウシアンビームであることと、結晶中でのウォークオフと考慮に入れて決定する必要がある。そこで、Boyd-Kleinman の式を用いて、第二高調波への変換効率が最大となるような基本波のビーム径を計算で求めた。その結果に基づいて装置を設計し、実際に第二高調波発生装置を作成した。

また、本研究課題で対象とするのは $1^3S_1 \rightarrow 3^3S_1$ 間の励起であるが、まずは先行研究で観測されている $1^3S_1 \rightarrow 2^3S_1$ 間の励起から始めることにする。励起に必要な波長 486 nm の光源を用意するためには、波長 972 nm の高出力光源の開発が必要となる。高出力の第二高調波を発生させるには、基本波のパワーを増幅したほうがよい。高品質の空間モードの基本波を用いれば、第二高調波発生装置への結合効率を高くすることができるので、イッテルビウム添加ファイバーを用いたファイバーアンプを用いることにする。ただし、波長 972 nm を増幅するには、それよりも短い波長のレーザー光で励起する必要があるが、短波長領域での吸収断面積は小さい。したが

って、非常に高いパワーの励起光が必要となってしまい、光ファイバーを損傷する可能性が高く開発が難しい。研究代表者にはこれまでにファイバーアンプ開発の経験が無かったので、まずは低いパワーの励起光でも増幅が可能な市販の波長約 1100 nm のレーザー光の増幅を行い、開発に関する知見を得ることにした。この波長はイッテルビウム原子の共鳴波長の基本波でもあるので、原子を使った光源性能評価等も可能である。

本実験では、 $1^3S_1 \rightarrow 3^3S_1$ 間はドップラーシフトをキャンセルするために、対向二光子励起を行う予定である。それに共通する手法として、水素分子の対向二光子励起実験も行った。具体的には、パルス光を入射させて水素分子の振動準位間に対向二光子励起を行うと、準位間にコヒーレンスが生成する。励起を確認するために、同時にもう 1 つパルス光（トリガー光）を入射し、四光波混合によって発生する信号光を検出した。

4. 研究成果

第二高調波発生に関しては、設計に基づいて装置を作成し、まずは 10 mW 以下の波長約 800 nm の基本波を共振器に入射して、調整を行った。発生した第二高調波パワーを測定した結果、計算で求めた設計値と同程度の第二高調波が発生していることが確認できた（図 2 (a)）。その後、基本波のパワーを 1.8 W にして、再度装置の調整を行った。入射基本波の 60% (1.1 W) が共振器に結合し、400 mW の第二高調波が発生した。このパワー領域でも計算と同程度の第二高調波が発生していることが分かった（図 2 (b)）。設計値に近いパワーが実現したことにより、Boyd-Kleinman の式を用いた計算が実際の設計に使用できることが分かった。本研究の手法を用いれば、異なる波長でも同様の設計、開発をすることが可能になる。さらに、基本波のパワーを増幅することでより高いパワーの第二高調波を発生させることが可能である。

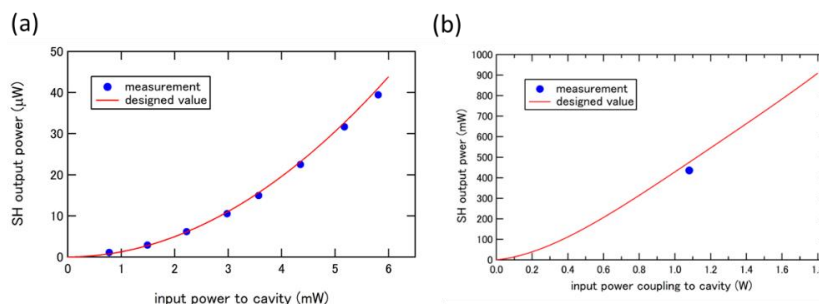


図 2 第二高調波パワー

また、ファイバーアンプに関しては、市販の波長約 1100 nm のレーザー光の増幅を試みた。この場合、最も吸収断面積の大きい波長 976 nm で励起を行うことができるため、数 10 W クラスの高いパワーの励起光が必要ではなくなる。イッテルビウム添加ファイバーでは、波長 1100 nm (信号光) の他に波長 1000~1050 nm の範囲で増幅自然放出光が発生するので、これを抑えながら、信号光を増幅する必要がある。出力パワーは、光ファイバーの長さや励起光パワーを変えてレート方程式を解くことにより見積もることができる。計算の結果、ファイバーを長くして、励起光パワーを高くする場合、強い信号光を得ることが可能であるが、同時に、強烈な増幅自然放出光が発生してしまうことが分かった。その対策として、2段階で増幅することにより、十分な増幅度と低い増幅自然放出光ノイズを同時に実現できることが分かった。具体的には、1段目で増幅自然放出光ノイズを抑制しながら、信号光を数倍に増幅し、1段目の出力信号光を2段目でさらに増幅させる。このような設計に基づいて開発を行った結果、1段目で 100 mW から 300 mW への増幅に成功し、2段目でさらに 3.5 W 以上まで増幅することに成功した。この開発で得られたノウハウを応用すれば、波長 972 nm の増幅も可能になると考えている。波長 972 nm だけでなく、高出力で空間モードも高品質のレーザー光の開発技術は、今後他の波長の光源開発にも応用することが可能である。

水素分子の対向二光子励起実験は、図 3 のような配置で行った (φ は微小)。その結果、二光子励起の証拠としての、四光波混合の信号を検出することに成功した。さらに、トリガー光の周波数を変化させた場合の信号光スペクトルは、対向する二光子励起光のわずかな角度変化 (φ) に依存してシフトすることも明らかになった。実験は以前から取り組んでいたが、依存性を説明するための考察・解析をさらに進めた。この手法は、対向光のアライメントの微小な角度のずれを見積もるために利用できる。

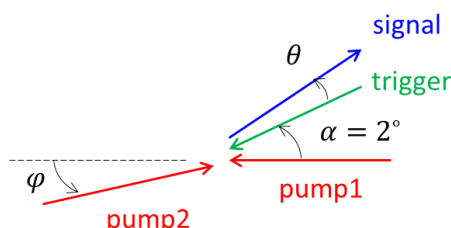


図 3 対向励起実験配置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hideaki Hara, Motohiko Yoshimura	4. 巻 79
2. 論文標題 Raman stimulated neutrino pair emission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 684-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-019-7148-y	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 -

1. 著者名 Hideaki Hara, Yuki Miyamoto, Takahiro Hiraki, Kei Imamura, Takahiko Masuda, Noboru Sasao, Satoshi Uetake, Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura, Motohiko Yoshimura	4. 巻 52
2. 論文標題 Geometry-dependent spectra and coherent transient measurement of nearly degenerate four-wave mixing using two-photon resonance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 235401-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6455/ab4a6e	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 0件）

1. 発表者名 原秀明、平木貴宏、宮本祐樹、笹尾登、吉村太彦
2. 発表標題 新しいニュートリノ質量分光実験の提案
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 原秀明
2. 発表標題 原子・分子を用いたニュートリノ質量分光
3. 学会等名 量子エレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原秀明、今井康貴、植竹智
2. 発表標題 Yb原子のレーザー冷却・量子操作のための1112nmファイバーアンプ開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022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
---------	---------