

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887046

研究課題名(和文) ポジトロニウム負イオン系における共鳴状態の探索

研究課題名(英文) Search for resonance states in the positronium negative ion

研究代表者

満汐 孝治 (Michishio, Koji)

東京理科大学・理学部・助教

研究者番号：10710840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ポジトロニウム負イオンの一光子光脱離過程における共鳴($1P$)を観測するために、ポジトロニウム負イオンのレーザー分光を行った。高強度ポジトロニウム負イオンビームと波長可変の紫外レーザー光源(225 - 230 nm)を用いることで、 $Ps(n=2)$ の形成しきい値より上に現れる形状共鳴を観測することができた。見積もられた共鳴エネルギーの値は量子三体計算の結果とよく一致することがわかった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, a laser spectroscopy of the positronium negative ion has been conducted in order to observe the resonances of $1P$ symmetry in its one-photon detachment process. By using a high-intensity ion beam and a tunable ultraviolet laser source(225 - 230 nm), we succeeded to observe a shape resonance, which is predicted above $Ps(n=2)$ formation threshold. The estimated resonance energy is in good agreement with three-body calculations.

研究分野：数物系科学

キーワード：ポジトロニウム負イオン 原子・分子物理 低速陽電子ビーム 形状共鳴

1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウム負イオンは、電子2個と陽電子1個が結合した三体束縛状態である。この束縛系は、等質量のレプトンのみから構成されるため、量子力学的三体問題の最良な検証の場を提供する。

1980年代以降、基底状態の特性や、光脱離過程やポジトロニウム - 電子散乱過程で発現する共鳴の理論研究が精力的に行われている。種々の角運動量状態における共鳴(形状共鳴と Feshbach 共鳴)とその形成機構に関する理論研究が報告されており、実験による検証が待たれていた。一方で実験は、低い負イオン強度と短い消滅寿命のため難しく、これまでに二光子消滅率の測定しか報告されていなかった。

近年、本研究代表者らはアルカリ金属吸着タンゲステン(W)表面を用いたポジトロニウム負イオンの効率的な形成法を発見した。これにより、ポジトロニウム負イオンのレーザー光脱離の観測やエネルギー可変ポジトロニウムビームの生成に成功し、更なる共鳴のレーザー分光実験も可能となった。

2. 研究の目的

本研究では、ポジトロニウム負イオンのレーザー分光を行い、 $Ps(n=2)$ の形成しきい値近傍に予言される共鳴(1P_0)を観測することを目的とする。

3. 研究の方法

実験には、KEKの低速陽電子実験施設から供給されるパルス状低速陽電子ビームを用いた。陽電子ビームを磁気的に輸送し、0.3原子層のNaを吸着させたW多結晶表面に照射した(図1)。W中で熱化して表面に到達した陽電子の一部は、最表面での二電子捕獲過程を経てポジトロニウム負イオンとなって自発的に放出される。この負イオンを電界加速(1 kV/mm)して無電場領域中に輸送した後、プローブレーザー光と交差させた。レーザー光源には、QスイッチNd:YAGレーザーの3倍波で励起した色素レーザー(450-460 nm)を用いた。BBO結晶を用いて倍波に波長変換し、225 - 230 nmのレーザー光を得た。レーザー光の波長幅は、 <15 pmであった。

光脱離によって形成されるポジトロニウムの内、スピン三重項状態のものは $125n^3$ psの平均寿命(n は主量子数)で直ちに対消滅してしまうが、長寿命($142n^3$ ns)のスピン三重項状態のものは存続して上流へと引き出される。これを光脱離領域から0.88 m離れた位置に設置された高速応答型マイクロチャンネルプレート(MCP)で検出した。MCP背面の陽極からの信号をデジタイザーで読み込み、波形をメモリに記録した。また、レーザー光のエネルギー、波長、空間プロファイル、時間プロファイルのデータをデジタイザ

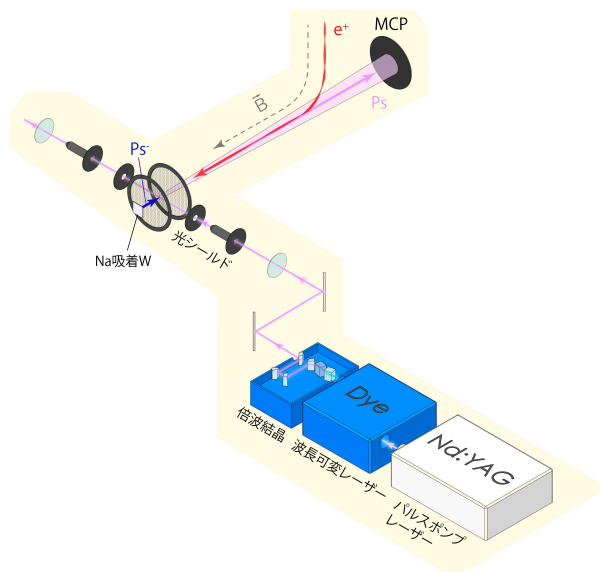


図1. 実験装置の概略図

ーと同期して取得し、記録した。信号波形解析によって得られる検出粒子の飛行時間からポジトロニウムの信号を同定した。実験では、ポジトロニウムの計数をプローブ光の波長の関数として測定した。

4. 研究成果

MCPでは、ポジトロニウムの他にW中で消滅した陽電子の消滅線や、レーザー光の導入/導出窓で発生する迷光も検出される。研究当初、後者によるバックグラウンドノイズが大きく、ポジトロニウム信号を識別することが困難であった。そこで、光路上に黒色化(炭素焼付け)処理を施した多連バツフルを配置し、迷光を減衰させるようにした。また、真空チェンバー壁面等への照射を低減させるために、光路上に3段の二象限スリットを設け、レーザー光の空間プロファイルを整形した。この結果、迷光由来のバックグラウンドは一桁近く低下し、測定が可能な状態と

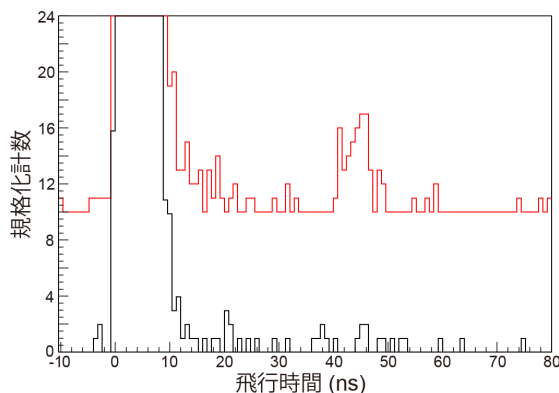


図2. 飛行時間スペクトル。レーザー波長を形状共鳴の波長に同調した場合(赤)と離調した場合(黒)。

なった。

図2に検出信号の飛行時間スペクトルを示す。レーザー光の波長を予測される共鳴波長(228.5 nm)に同調すると(赤線)、飛行時間スペクトル上で $t=44$ ns付近にピークが観測された。これは、飛行時間から光脱離によって形成されたポジトロニウムであることが分かった。一方、波長を229.7 nmに離調した場合(黒線)、ピークが消失した。このことは、共鳴的に光脱離が生じていることを示している。

波長の関数として測定したポジトロニウムの計数を相対光脱離断面積に焼き直した結果を図3に示す。横軸は、実験室系での光子エネルギーを重心系での光子エネルギーに変換したものである。図中の実線は、超球座標緊密結合計算(Igarashi *et al.*, *New. J. Phys.* 2, 17.1-17.4, 2000)の結果を示している。実験データは、ピーク付近の点で計算値と合うようにスケールされている。Ps($n=2$)形成しきい値(5.43 eV)から立ち上がるピークは、形状共鳴(1P_0)に由来するものであり、本研究で明瞭に観測された。共鳴エネルギーを見積もるために、ドップラー広がりスペクトルを畳み込んだファノ関数でデータをフィッティングした結果、共鳴エネルギーは5.437(1)eVと見積もられ、理論計算値とよい一致を示した。一方で、Ps($n=2$)しきい値の下に予言される共鳴幅の狭いFeshbach共鳴は観測できなかった。これは、負イオンのドップラー幅(~ 10 meV FWHM)により共鳴ピークが広がったためと考えられ、ドップラー幅の低減が今後の課題になっている。

本研究によって、ポジトロニウム負イオンの光脱離における共鳴を世界で初めて観測することに成功した。ドップラー幅による制限があるが、速度フィルターの導入や負イオン放出源の改良によって、Feshbach共鳴の観測も今後可能になると考えられる。また、二光子吸収法を用いた分光実験も期待できる。

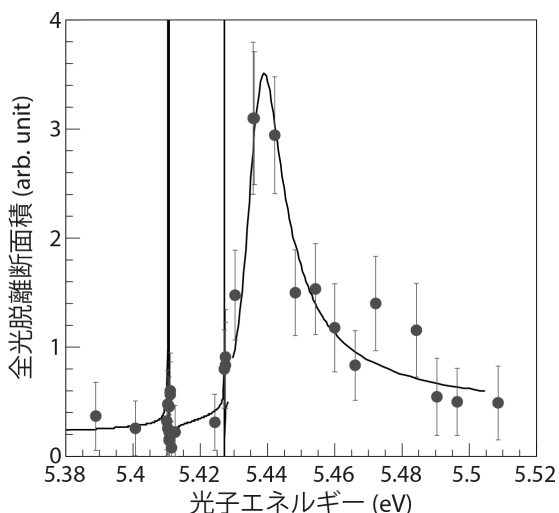


図3. 光子エネルギーに対する全光脱離断面積。測定結果(プロット)と超球座標緊密結合計算の結果(実線)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計5件)

K. Michishio, R. H. Suzuki, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, Y. Nagashima, Profiles of a positronium beam produced using the photodetachment of positronium negative ions, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 査読有, 785, 2015, 5-8

DOI: 10.1016/j.nima.2015.02.042

K. Michishio, Y. Nagashima, Development of energy-tunable positronium beams employing the photodetachment of positronium negative ions, *Japanese Journal of Applied Physics Conference Proceedings*, 査読有, 2, 2015, 1-9

DOI: 10.7567/JJAPCP.2.011303

Y. Nagashima, K. Michishio, H. Terabe, R. H. Suzuki, S. Iida, T. Yamashita, R. Kimura, T. Tachibana, I. Mochizuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo, Positronium and positronium negative ion emission from alkali-metal coated tungsten surfaces, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 505, 2014, 1-6

DOI: 10.1088/1742-6596/505/1/012037

Y. Nagashima, K. Michishio, H. Terabe, The simplest three body system: Positronium negative ions, *AIP Conference Proceedings*, 査読有, 1588, 2014, 27

DOI: 10.1063/1.4866920

満汐孝治, 長嶋泰之, ポジトロニウム負イオンの光脱離によるエネルギー可変ポジトロニウムビームの形成, *陽電子科学*, 査読無, 2, 2014, 35

DOI:

<http://positron-science.org/kaiho/2.html>

(学会発表)(計9件)

満汐孝治, Luca Chiari, 大島永康, 長嶋泰之, 陽電子蓄積型パルス化装置を用いたポジトロニウムビームの開発, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

満汐孝治, 久間晋, 東俊行, 和田健, 望月出海, 兵頭俊夫, 柳下明, 長嶋泰之, ポジトロニウム負イオンのレーザー分光, 平成26年度 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, 2014年11月28日, 京都大学原子炉実験所

(大阪府・泉南郡)

K. Michishio, S. Kuma, T. Kanai, T. Azuma, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita and Y. Nagashima, Resonant photodetachment study of the positronium negative ion, 原子衝突学会第39回年会, 2014年10月6日, 東北大学片平さくらホール(宮城県・仙台市)

満汐孝治, 金井恒人, 東俊行, 和田健, 望月出海, 兵頭俊夫, 柳下明, 長嶋泰之, ポジトロニウム負イオンの共鳴光脱離実験, 第51回アイソトープ・放射線研究発表会, 2014年7月8日, 東京大学弥生講堂(東京都・文京区)

満汐孝治, 木村理人, 長嶋泰之, 蓄積型陽電子パルス化装置を用いたポジトロニウムビーム発生装置の開発, 第51回アイソトープ・放射線研究発表会, 2014年7月8日, 東京大学弥生講堂(東京都・文京区)

満汐孝治, 木村理人, 不破崇博, 長嶋泰之, 陽電子蓄積型パルス化装置を用いたポジトロニウムビームの開発, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月30日, 東海大学(神奈川県・平塚市)

金井恒人, 東俊行, 満汐孝治, 長嶋泰之, 和田健, 望月出海, 兵頭俊夫, 柳下明, ポジトロニウム負イオン分光のためのレーザーシステムの開発, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月30日, 東海大学(神奈川県・平塚市)

K. Michishio, Development of an energy-tunable positronium beam employing the photodetachment of positronium negative ions, 2nd Japan-China Joint Workshop on Positron Science, 2013年12月21日, AIST(Ibaraki・Tsukuba) (招待講演)

満汐孝治, ポジトロニウム負イオンの光脱離とポジトロニウムビーム生成への応用, 第38回原子衝突学会年会, 2013年11月16日, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

満汐 孝治 (MICHISHIO KOJI)
東京理科大学・理学部・助教
研究者番号: 10710840