

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17705

研究課題名(和文) ポジトロニウム負イオン系における光誘起ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Study on photo-induced dynamics of the positronium negative ion

研究代表者

満汐 孝治 (Michishio, Koji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：10710840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000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(電子2個と陽電子1個の束縛状態)の光脱離ダイナミクスを明らかにすることを目的として、その光脱離断面積の測定を行った。レーザーパワーの関数として、光脱離で形成されるポジトロニウムの収量を測定することで、1064 nmの波長における断面積を決定することに成功した。また、レーザーの偏光を利用した、反跳運動量分光法を開発し、電子親和力の値を決定した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we performed a measurement of the photodetachment cross-section of the positronium negative ion, a bound state of two electrons and one positron, aimed at revealing its dynamics. The cross-section at a wavelength of 1064 nm was determined by measuring the yield of positronium atoms formed via photodetachment as a function of the laser power. Additionally the electron affinity of the ion was also determined by employing recoil momentum spectroscopy with the light polarization.

研究分野：量子ビーム

キーワード：ポジトロニウム負イオン 光脱離 レーザー分光 原子・分子物理 陽電子

1. 研究開始当初の背景

電子とその反粒子である陽電子が束縛すると、ポジトロニウム(Ps)と呼ばれる束縛状態が形成される。さらに1個の電子がPsと結合するとポジトロニウム負イオン(Ps⁻)が形成される。Ps⁻はレプトンのみから構成されるシンプルな束縛系であり、量子力学的三体問題を研究する理想的な系である。

Psに関する研究は、1940年頃のもの安定性に関する議論に端を発し、理論研究を中心に進められてきた。特に、基底状態における電子親和力(一電子の束縛エネルギー)の計算が精力的に行われており、相対論補正やQED効果を含めた高精度な計算手法が開発されている。また、電子親和力を決定する際に必要な光脱離過程(Ps+h → Ps+e⁻)の断面積の計算も報告されている。光脱離断面積は電子親和力に相当するエネルギー(0.33 eV)から急激に立ち上がり、その後光子エネルギーの増加とともに緩やかに減少する。

理論研究が進展する一方で、実験検証に関しては、Ps⁻の生成が非常に難しく、またPs⁻の消滅寿命(τ = 479 ps)が短いために困難であった。これまでに観測実験と消滅寿命測定の結果が数例あるのみで、Ps⁻の電子親和力や光脱離断面積を決定する分光学的研究は不可能と考えられてきた。

こうした背景の下、本研究の代表者らはPs⁻の高効率生成法を開発し、この手法で作成したPs⁻ビームにパルスレーザー光線を照射することで、その光脱離過程を観測することに成功した(K. Michishio *et al.*, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 153401)。さらに、光脱離によって形成されるPs⁻を単色エネルギー可変ビームとして取り出す技術を実現した(K. Michishio *et al.*, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102)。これによって、従来では測定ができなかったPs⁻の電子親和力や光脱離断面積を決定する分光学的研究が可能となった。

2. 研究の目的

本研究では、Ps⁻の高効率生成とレーザー光照射による電子脱離の技術を利用して、Ps⁻の分光学的研究を推進する。具体的には、(1) レーザー光線の波長の関数として光脱離断面積を測定し、光誘起によるポジトロニウム負イオンの解離ダイナミクスを明らかにする。(2) 分光計測によってPs⁻の電子親和力の値を決定し、量子三体計算と比較する。

3. 研究の方法

(1) 光脱離断面積の測定

代表者が開発したPs⁻ビーム発生装置に新たなレーザー光学装置を組み合わせて、断面積測定装置を開発した(図1)。Naを蒸着したW薄膜にパルス状の陽電子ビームを照射し、裏面表面でPs⁻パルスを発生させた。これを静電場で加速して引き出した後、無電場領域中でパルスレーザー光線と交差させ、光脱離

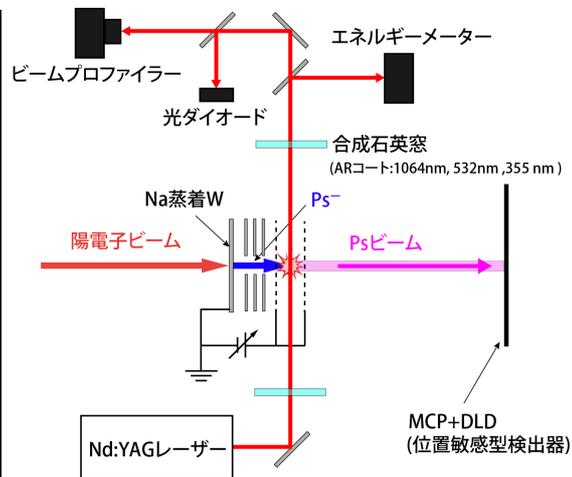


図1. Ps⁻の光脱離断面積測定装置。

によって形成されたPs⁻をマイクロチャンネルプレート(MCP)と遅延ワイヤーアノード(DLD)からなる位置敏感型検出器で検出した。パルスビームの特性を活かして、光脱離点から検出器までの飛行時間を計測することで、高いS/B比での計測を可能にした。

光源には、ナノ秒パルス発振のNd:YAGレーザー(基本波1064nm)を用いた。倍波結晶を用いることで、高調波の発生も可能である。レーザー光線の強度を上げていき、Ps⁻生成量の飽和曲線を測定した。断面積の推定に必要なPs⁻ビームとレーザー光の相互作用体積と光子数密度を見積もるために、ビームプロファイラーや光ダイオード、エネルギーセンサーを用いて、これらの値を同時に測定した。レート方程式から導出されるモデル関数で得られた飽和曲線をフィッティングすることで、光脱離断面積の絶対値を推定した。

(2) レーザー偏光を利用した電子親和力と異方性パラメータの測定

直線偏光レーザーの偏光方向によって、光脱離時に放出される電子の放出方向を制御できる。この手法を利用して、Ps⁻の電子親和力と電子放出角度分布を特徴づける異方性パラメータの測定を行った。実験では、図2に示す偏光効果の検証装置を用いた。Ps⁻の生成部までは、基本的に(1)と同様の装置であるが、Ps⁻への反跳効果を観測し易くするために、1m長の真空配管を生成部と検出器の間に配置する改造を加えた。光脱離で形成されるPs⁻の飛行時間測定から、電子の反跳運動量分布が推定でき、その偏光角依存性を調

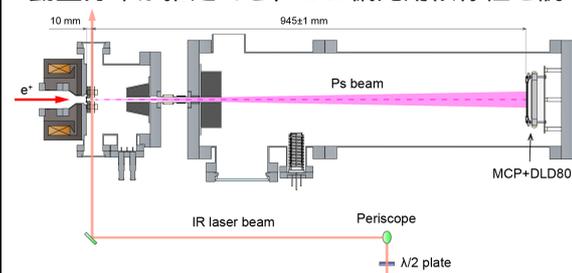


図2. Ps⁻に対する偏光効果の検証装置。

べた。偏光角は $\lambda/2$ 波長板を使って制御した。偏光角に対する反跳運動量分布の解析モデルを構築し、実験データに当てはめることで、モデル関数に含まれる電子親和力と異方性パラメータを推定した。

4. 研究成果

(1) 光脱離断面積の測定

本研究で開発した分光装置を用いて、Ps-の光脱離によって形成された Ps を明瞭に観測することに成功した。図 3 は波長 1064 nm のレーザー光を用いて得た、検出器信号の飛行時間スペクトルである。Ps-ビームとレーザー光が同時照射された条件でのみ、Ps の飛行時間に相当する 20 ns でピークが観測された。ピークの強度から S/B 比はおよそ 1000 と見積もられ、低バックグラウンドの条件下

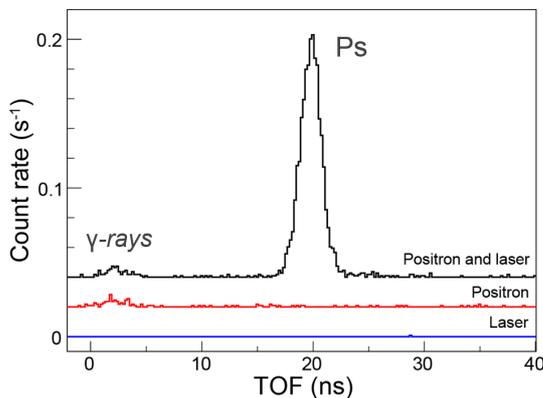


図 3. 飛行時間スペクトル。

で Ps を検出できていることが分かった。このピーク強度のレーザーパワー依存性を調べた結果、ピーク強度が飽和の様子を観測できた。同時に見積もった相互作用体積の影響を含めて、ピーク強度のパワー相関をモデル関数でフィッティングすることで、断面積を推定した。推定値は理論計算と無矛盾であった。当初の予定では、Nd:YAG の倍波での測定を計画していたが、レーザー光源の故障等で実験が大幅に遅延し、本研究期間内に測定を終えることができなかった。今後速やかに、残りの波長でのデータを取得する予定である。

(2) レーザー偏光を利用した電子親和力と異方性パラメータの測定

図 4 に、レーザーの偏光ベクトルを Ps-の進行方向と平行 ($=0^\circ$ と定義) にし、Ps-の加速電圧 W を変化させて得た飛行時間スペクトルを示す。 $W=1.5$ kV では Ps ピークは単一であるのに対して、それよりも W を低下させると、ピークが分離の様子が確認できた。これは、光電子の反跳効果に起因すると考えられ、Ps-の進行方向と平行に光電子が放出される頻度が高いことを示唆している。つまり、光電子が前方ないし後方に放出されることで、Ps は後方ないし前方にその反跳を受け、平均運動量が分離する。Ps-の加速電圧を下

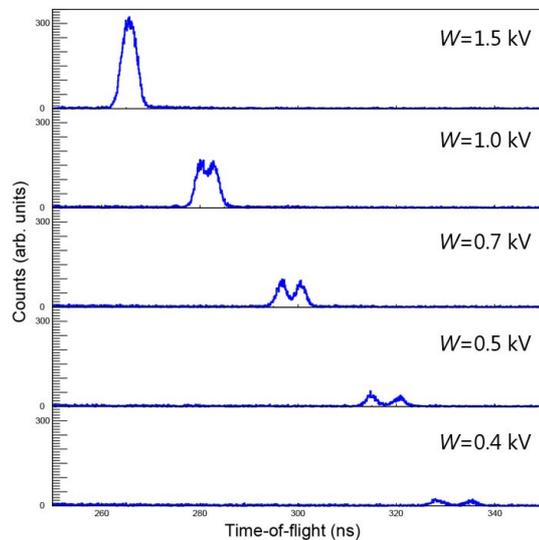


図 4. 飛行時間スペクトルの加速電圧依存。

げると、Ps の並進運動エネルギーと反跳エネルギーの比率が小さくなり、反跳効果がより明瞭になる。

次に、加速電圧を $W=0.5$ kV で固定し、偏光方向を回して得たスペクトルを図 5 に示す。 $=0^\circ$ で分離していたピークは、角度を広げるとそれぞれが近づき、 $=90^\circ$ で単一のピークを形成する。さらに角度を広げて $=180^\circ$ にすると、ピークが再び分離する様子が観測された。この結果は、光電子の平均放出方向がレーザーの偏光ベクトルと平行であることと矛盾しない。この現象を定量的に解析するために、偏光角に対する Ps の反跳運動量分布を表す解析モデルを構築し、実験データに当てはめた結果が図 5 の実線である。このモデル関数は、データをよく再現しており、フィッティングの結果から、電子親和力と異方性パラメータを推定することに成功した。電子親和力の値は、理論値と無矛盾であることを確認した。本研究によって、Ps-の分光学的なパラメータを実験的に決定することに成功し、関連する理論計算を検証することができた。

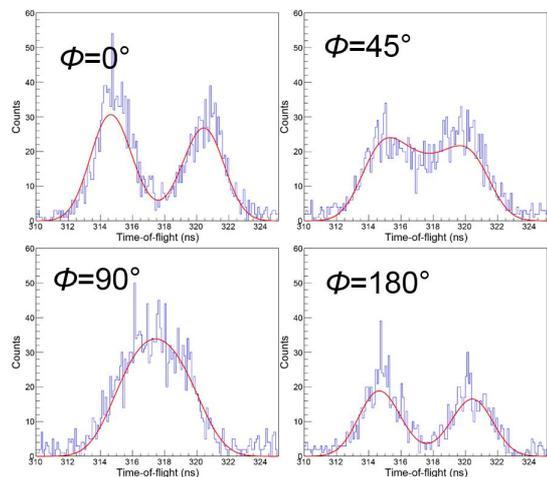


図 5. Ps 並進運動量の偏光角制御。

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 2件)

1. T. Hyodo, K. Wada, I. Mochizuki, M. Kimura, N. Toge, T. Shidara, Y. Fukaya, M. Maekawa, A. Kawasuso, S. Iida, K. Michishio and Y. Nagashima, Research progress at the Slow Positron Facility in the Institute of Materials Structure Science, KEK, Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, 791, 2017, 012003-1-8, DOI:10.1088/1742-6596/791/1/012003
2. 長嶋泰之、五十嵐明則、満汐孝治、陽電子が拓く物質の科学 第3回 ポジトロニウム負イオン、しょうとつ、査読有、13、2016、64-74、http://www.atomiccollision.jp/collision/syoutotsu/16_1303s.pdf

[学会発表](計 22件)

1. 満汐孝治、田中文、永田祐吾、Luca Chiari、大島永康、長嶋泰之、エネルギー可変ポジトロニウムビームの開発と表面回折への展開、第2回 陽電子回折研究会、2018年3月30日、KEK つくばキャンパス(茨城県つくば市)
2. 永田祐吾、満汐孝治、田中文、Luca Chiari、大島永康、長嶋泰之、透過型多層薄膜磁気格子によるポジトロニウム超微細構造の磁気共鳴測定への検討、日本物理学会 第73回年次大会、2018年3月23日、東京理科大学野田キャンパス(千葉県野田市)
3. 満汐孝治、ポジトロニウム負イオンの光脱離実験の新展開-形状共鳴の観測とエネルギー可変ポジトロニウムビーム生成への応用-、2017年度量子ビームサイエンスフェスタ、2018年3月3日、茨城県県民文化センター(茨城県水戸市)
4. 田中文、満汐孝治、Luca Chiari、永田祐吾、大島永康、長嶋泰之、ポジトロニウム負イオンの光脱離におけるレーザー偏光角依存性、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」、2017年12月8日、京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡)
5. Luca Chiari、満汐孝治、田中文、永田祐吾、大島永康、長嶋泰之、Production of a high-brightness Ps beam for surface-scattering experiments、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」、2017年12月8日、京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡)

6. 満汐孝治、ポジトロニウム負イオンの共鳴状態の観測、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」、2017年12月8日、京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡)
7. 田中文、満汐孝治、Luca Chiari、長嶋泰之、ポジトロニウム負イオンの光脱離におけるレーザー偏光の影響、日本物理学会 2017年秋季大会、2017年9月21日、岩手大学上田キャンパス(岩手県盛岡市)
8. 満汐孝治、Luca Chiari、田中文、大島永康、長嶋泰之、ポジトロニウムビームを用いた表面散乱実験、日本物理学会 2017年秋季大会、2017年9月21日、岩手大学上田キャンパス(岩手県盛岡市)
9. K. Michishio, L. Chiari, F. Tanaka, N. Oshima, Y. Nagashima, A collimated, energy-tunable positronium beam for the investigation of positronium scattering with surfaces, 12th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry, 2017年8月31日, Lublin, Poland
10. L. Chiari, K. Michishio, F. Tanaka, N. Oshima, Y. Nagashima, Surface scattering studies using a high-brightness and energy-variable positronium beam, XIX International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics XX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL2017), 2017年7月22日, Magnetic Island, Australia
11. Y. Nagashima, K. Michishio, T. Kanai, S. Kuma, T. Azuma, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, Shape resonance of the positronium negative ion, XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collision (ICPEAC2017), 2017年7月26日, Cairns, Australia
12. K. Michishio, L. Chiari, F. Tanaka, N. Oshima, Y. Nagashima, Development of a high-brightness, energy-tunable positronium beam, 3rd China-Japan Joint Workshop on Positron Science, 2017年6月11日, hefei, China
13. 満汐孝治、Luca Chiari、田中文、大島永康、長嶋泰之、エネルギー可変高品質ポジトロニウムビームの開発と表面散乱・回折研究への展開、陽電子回折研究会、2017年1月20日、KEK つくばキャンパス(茨城県つくば市)
14. Luca Chiari、満汐孝治、大島永康、長嶋泰之、A novel energy-tunable positronium beam apparatus for surface scattering experiments、原子

- 衝突学会第 41 回年会、2016 年 12 月 10 日、富山大学五福キャンパス(富山県富山市)
15. 満汐孝治、Luca Chiari、田中文、大島永康、長嶋泰之、窒素ガス冷却式陽電子トラップを用いたエネルギー可変ポジトロニウムビームの生成、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」、2016 年 12 月 9 日、京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡)
16. 兵頭俊夫、和田健、望月出海、木村正雄、一宮彪彦、峠暢一、設楽哲夫、深谷有喜、前川雅樹、河裾厚男、飯田進平、満汐孝治、長嶋泰之、KEK 物構研低速陽電子実験施設の最近の成果、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」、2016 年 12 月 8 日、京都大学原子炉実験所(大阪府泉南郡)
17. 満汐孝治、Luca Chiari、波多野博法、星大樹、大島永康、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の生成と特性評価、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 15 日、金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市)
18. Luca Chiari、満汐孝治、大島永康、長嶋泰之、Production of a positronium beam using a trap-based positron beam for surface scattering experiments、日本物理学会 2016 年秋季大会、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 14 日、金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市)
19. 満汐孝治、Luca Chiari、波多野博法、星大樹、大島永康、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の生成、第 53 回アイソトープ・放射線研究発表会、2016 年 7 月 7 日、東京大学弥生講堂(東京都文京区)
20. K. Michishio, Applications of a Technique for the Efficient Production of Positronium Negative Ions: Observation of the Resonant Photodetachment and Development of a HighBrightness Positronium Beam, 14 th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications, 2016 年 5 月 23 日、くにびきメッセ(島根県松江市)
21. T. Hyodo, K. Wada, I. Mochizuki, M. Kimura, A. Ichimiya, N. Toge, T. Shidara, Y. Fukaya, M. Maekawa, A. Kawasuso, K. Michishio, Y. Nagashima, Progress in the research at Slow Positron Facility of Institute of Materials Structure Science, KEK, 14 th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques &

- Applications, 2016 年 5 月 23 日、くにびきメッセ(島根県松江市)
22. L. Chiari, K. Michishio, D. Hoshi, H. Hatano, N. Oshima, and Y. Nagashima, Magnetic focusing of a trap-based positron beam for the production of an energytunable positronium beam, 14 th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications, 2016 年 5 月 23 日、くにびきメッセ(島根県松江市)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
 満汐 孝治 (MICHISHIO KOJI)
 国立研究開発法人産業技術総合研究所・計
 量標準総合センター・研究員
 研究者番号：10710840

(2) 研究分担者
 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者
 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者
 ()