

# ポジトロニウム負イオン光脱離実験の新展開とエネルギー可変ポジトロニウムビームの応用

New developments of the positronium negative ion photodetachment experiment and applications of an energy tunable positronium beam

## 実験組織:

東京理科大 長嶋泰之、満汐孝治、寺部宏基、飯田進平、山下貴志  
 理研 久間晋、金井恒人、東俊行  
 立教大 立花隆行  
 KEK 和田健、望月出海、柳下明、兵頭俊夫

課題有効期間: 2013年10月 - 2016年9月

実験ステーション: SPF

今までに実施したビームタイム: 2013年11月21日 - 12月5日、12月13日 - 12月20日

2014年6月16日 - 6月30日、11月20日 - 11月25日、12月14日 - 12月18日



**研究目的:**我々は2010年10月から2013年9月までの3年間、S2課題「ポジトロニウム負イオンのレーザー分光とその応用」(2010S2-003)を展開してきた [1]。これらの研究をさらに発展させるために、新たなS2課題を2013年10月にスタートした。研究のベースとなるのは、アルカリ金属を蒸着したタングステン表面に低速陽電子ビームを照射すると、電子2個と陽電子1個の束縛状態であるポジトロニウム負イオンが高い効率で生成されること [2, 3]、およびポジトロニウム負イオンにレーザー光を照射すると電子が剥ぎ取られて光脱離が起こることである。ポジトロニウム負イオンの光脱離は、SPFにおいて世界ではじめて観測に成功した現象である [4]。SPFのショートパルスモードはパルスレーザーと同期させて使うことが可能であるため、ポジトロニウム負イオンの光脱離の実現するために最適である [5]。さらにこの現象を利用して、エネルギー可変ポジトロニウムビームを生成することも成功している [6, 7]。

**研究成果:** 本年度は下記の成果が得られた。

- (1)ポジトロニウム負イオン光脱離における共鳴の観測
- (2)セシウムおよびカリウム蒸着タングステン表面から放出されるポジトロニウムの低エネルギー成分の観測
- (3)新たなエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生装置の開発

**研究目的の達成度:** 順調行われている。

## ポジトロニウム・ポジトロニウム負イオン

### ポジトロニウム (Ps)

陽電子1個と電子1個から構成される水素原子様束縛状態  
 陽電子 - 電子間の平均距離 =  $3a_0$   
 ( $a_0$ はボーア半径、 $0.53 \text{ \AA}$ )

束縛エネルギー  $E_b = 6.80 \text{ eV}$

2つの固有状態

全スピン0 (スピン1重項状態, パラポジトロニウム):

125psの寿命で2光子に自己消滅

全スピン1 (スピン3重項状態, オルソポジトロニウム):

142nsの寿命で3光子に自己消滅

### ポジトロニウム負イオン (Ps<sup>-</sup>) [8, 9]

陽電子1個と電子2個から構成される3体の束縛状態

陽電子 - 電子間の平均距離 =  $5.5 a_0$

電子のPs<sup>-</sup>への束縛エネルギー  $E_b = 0.33 \text{ eV}$

寿命 = 479ps

### ポジトロニウム負イオンの生成法

アルカリ金属を蒸着したタングステン表面に低速陽電子を照射すると、2%がPs<sup>-</sup>となって放出されるようになる [1-3]。

Ps<sup>-</sup> 生成に必要なエネルギー:

$$\phi_n = \phi + 2\phi - E_n - E_p$$

$\phi$ : 陽電子の仕事関数

$\phi$ : 電子の仕事関数

負ならPs<sup>-</sup>の自発的な放出がエネルギー的に可能

正なら不可能

タングステン表面では  $\phi_n = -1 \text{ eV} \rightarrow \text{Ps}^-$  が自発的に放出

さらに、表面にアルカリ金属を蒸着すると  $\phi_n$  は大きくなる。

$\rightarrow \text{Ps}^-$  の生成に寄与する電子数が増え、生成率が大きくなる。

(なぜ2倍も増えるのかわかっていない。)

我々は2013年9月までの課題(2010S2-003)で、ポジトロニウム負イオンを生成し電場で加速してから光脱離させることによって、エネルギー可変ポジトロニウムビームを生成することに成功している [4, 6, 7]。

## 今年度の成果2

### アルカリ金属蒸着タングステン表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間測定

金属表面からのポジトロニウムやポジトロニウム負イオンの放出に対するアルカリ金属蒸着の効果を見る研究の一環として、アルカリ金属を蒸着したタングステン表面からのポジトロニウム飛行時間測定を行っている。

- (1)多結晶タングステン表面から放出されるポジトロニウムのエネルギーは、電子と陽電子の仕事関数を反映して5eVである。
- (2)表面にNaを蒸着すると、5eV成分が増大する。これは、Naの蒸着によって表面に低電子密度領域が広がり、ポジトロニウム生成が起こりやすい条件が整ったためと考えられる。
- (3)表面にKやCsを蒸着すると、5eVよりも低いエネルギーを持つ成分が現れる。

今年度は電子衝撃によって単結晶試料を焼鈍する装置を導入し、セシウム蒸着したW(100)面からのポジトロニウムの放出について調べた。

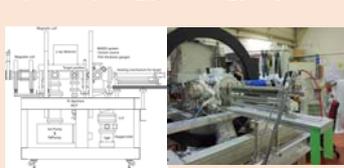


図4 新たに導入したポジトロニウム飛行時間測定装置。

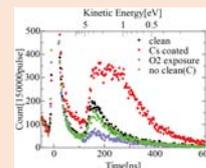


図5 得られた飛行時間スペクトル。

本研究で、W(100)表面にCsを蒸着しても、低エネルギー成分が現れることがわかった。表面プラズモンを励起しつつポジトロニウムが放出されている? (詳細はポスター095Fで発表)

## 今年度の成果1

### ポジトロニウム負イオン光脱離における共鳴状態の観測

ポジトロニウム負イオンは生成が難しく、しかも寿命が短いため、その特性に関する研究はほとんど行われていない。わずかに、消滅率測定が報告されているのみ [10, 11]。

一方で、理論計算は大変盛んである。たとえば、光脱離断面積の計算や、光脱離における共鳴の研究など、盛んに行われている [12-15]。

本研究では、ナトリウム蒸着タングステンから放出されるポジトロニウム負イオンにレーザー光を照射し、共鳴の観測に初めて成功!

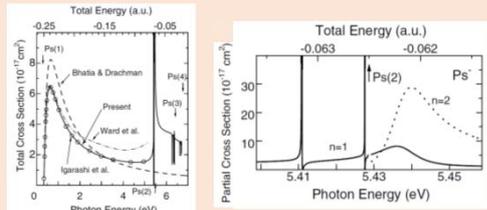


図1 ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の理論値。励起状態 (n=2) のポジトロニウムが生成される閾値エネルギーの前後に、共鳴(フェッシュバハ共鳴と形状共鳴)が存在することが予測されている。

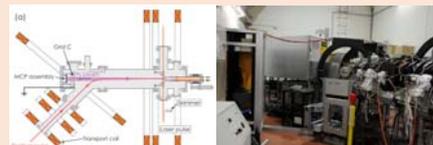


図2 測定装置。SPFに設置したエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生装置を用いた。

色素レーザーを用いて波長スキャンしながら光脱離によって生成されるポジトロニウムの数を測定した。

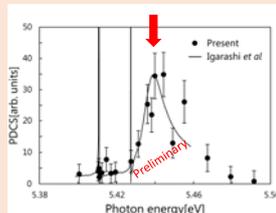


図3 光子のエネルギーと光脱離断面積の関係。

**結果:** 理論計算で予測される形状共鳴が観測された。

ポジトロニウム負イオン束縛エネルギーの測定値が初めて得られた。

現在、論文を執筆中 [16]。

## 今年度の成果3

### 新たなエネルギー可変ポジトロニウムビームの開発

SPFにおけるS2課題で培ったエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生技術を用いて、新たなポジトロニウムビーム発生装置を東京理科大学に製作中。

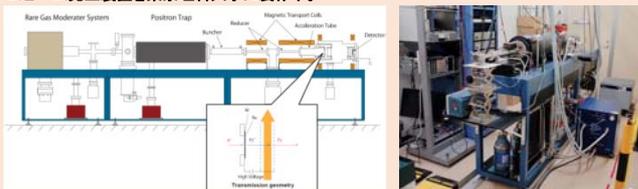


図6 東京理科大学に設置中のエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生装置。

## 次年度以降の計画

- 1 新たなエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生装置を完成させる。
- 2 結晶表面におけるポジトロニウムの回折・干渉実験を行う。
- 3 種々の金属単結晶にアルカリ金属を蒸着し、表面から放出されるポジトロニウムの飛行時間測定を行うことによって、アルカリ金属蒸着の効果を解き明かす予定。

References (本研究課題で得られた成果を発表した論文には下線を付した)  
 [1] Y. Nagashima, Phys. Rep. 545 (2014) 95.  
 [2] Y. Nagashima, T. Hakodate, A. Miyamoto and K. Michishio, New J. Phys. 10 (2008) 123029.  
 [3] H. Terabe, K. Michishio, T. Tachibana and Y. Nagashima, New J. Phys. 14 (2012) 015003.  
 [4] K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe, A. Igarashi, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 153401.  
 [5] K. Wada et al., J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012082.  
 [6] K. Michishio, T. Tachibana, R. H. Suzuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102.  
 [7] K. Michishio, R.H. Suzuki, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita and Y. Nagashima, Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. A. in press.  
 [8] J. A. Wheeler, Ann. New York Acad. Sci. 48 (1946) 219.  
 [9] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 717.  
 [10] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 671.  
 [11] H. Ceeh, et al., Phys. Rev. A 84 (2011) 062508.  
 [12] Y. K. Ho, Phys. Rev. A 19 (1979) 2347.  
 [13] A. K. Bhatia and R. J. Drachman, Phys. Rev. A 32 (1985) 3745.  
 [14] S. J. Ward, J. W. Humberger and M. R. C. McDowell, J. Phys. B: AT. Mol. Phys. 20 (1987) 127.  
 [15] A. Igarashi, I. Shimamura and N. Toshima, New J. Phys. 2 (2000) 17.  
 [16] K. Michishio, S. Kuma, T. Kanai, K. Wada, I. Mochizuki, A. Yagishita, T. Hyodo, T. Azuma, Y. Nagashima, in preparation.  
 [17] H. Terabe, S. Iida, K. Wada, A. Yagishita and Y. Nagashima, J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012075.  
 [18] H. Terabe, S. Iida, T. Yamashita, Y. Nagashima, T. Tachibana, B. Barbiellini, K. Wada, I. Mochizuki and T. Hyodo, in preparation.  
 [19] A. Schiller, S. Witek and H. Winter, Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 016103.  
 [20] P. Rousseau, H. Khenliche, A. G. Borisov and P. Roncin, Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 016104.

■謝辞 本研究を遂行するにあたり、KEK PFおよび入射器の皆様、特に設楽哲夫先生、大澤哲先生、池田光男さんには大変お世話になりました。御礼申し上げます。本研究は科学研究費補助金基盤研究(S)(課題番号24221006)の助成を受けて行われています。