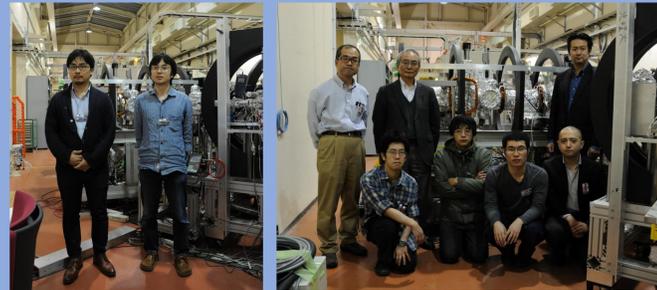


# ポジトロニウム負イオン光脱離実験の新展開とエネルギー可変ポジトロニウムビームの応用

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、Luca Chiari  
 理研 久間晋、金井恒人、東俊行  
 立教大 立花隆行  
 産総研 大島永康  
 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  
 2015年6月4日-6月13日、6月18日-6月24日、11月12日-11月16日、11月21日-11月25日、12月12日-12月16日  
 2016年2月18日-23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。これらの研究をさらに発展させるために、2013年10月に本課題をスタートした。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入射すると、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 [1, 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にも成功している [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の形状共鳴の観測(2014年度からの継続)
- (2)種々のアルカリ金属を蒸着した単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:** おおむね順調に行われている。

## ポジトロニウム・ポジトロニウム負イオン [1, 8, 9]

### 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、0.53Å)

束縛エネルギー  $E_{Ps} = 6.80\text{eV}$

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 =  $5.5a_0$   
 電子のPs<sup>-</sup>への束縛エネルギー  $E_{Ps^-} = 0.33\text{eV}$   
 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入射すると、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:

$$\phi_{Ps^-} = \phi_e + 2\phi_{Ps} - E_{Ps} - E_{Ps^-}$$

$\phi_e$ : 陽電子の仕事関数  
 $\phi_{Ps}$ : 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  $\phi_{Ps^-} = -1\text{eV} \rightarrow \text{Ps}^-$  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  $\phi_{Ps^-}$  は大きくなる。  
 $\rightarrow \text{Ps}^-$  の生成に寄与する電子数が増え、**生成率が增大する。**  
 (なぜ2桁も増えるのかはわかっていない。)

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1

### ポジトロニウム負イオンの形状共鳴の観測 [10]

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かった。わずかに、消滅率測定が報告されているのみ [11, 12]。

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共鳴状態の研究などが、盛んに行われている [13-18]。

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!**

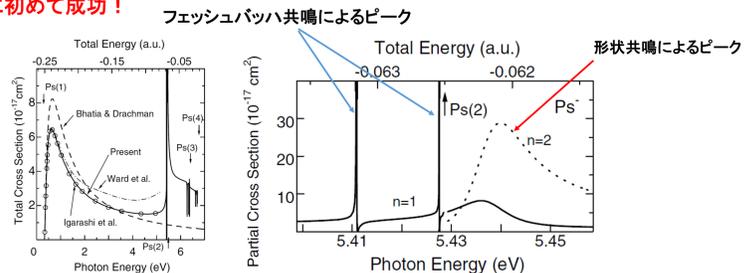
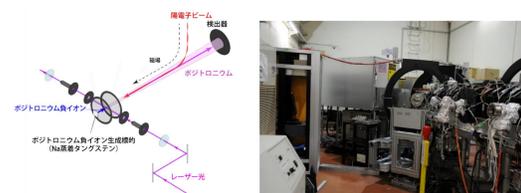


図1 ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の理論値 [18]。励起状態 (n=2) のポジトロニウムが生成される閾値エネルギーの前後に、共鳴(フェッシュバハ共鳴と形状共鳴)が存在するために、光脱離断面積が極大になることが予測されている。



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

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。

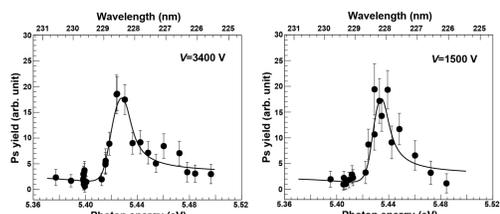


図3 共鳴付近のエネルギースペクトル [10]

	実験		理論	
共鳴エネルギー (eV)	5.437 (1)	5.44	5.438(1)	5.4375

理論との比較 [10]

**結果:** 理論計算で予測される形状共鳴が観測された。共鳴エネルギーは理論計算の値とよく一致した。

## 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知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。

- これまでに行った多結晶タングステンを試料に用いた測定から、次のようなことがわかっている [19, 20]。
- (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うためと考えられる。
- (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、セシウムおよびリチウムを蒸着したW(100)面からのポジトロニウムの放出について調べた。

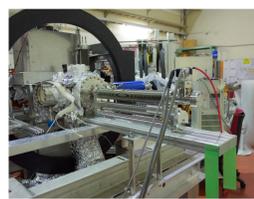


図4 新たに導入したポジトロニウム飛行時間測定装置



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をしつつポジトロニウムが放出されていると考えられる [21]。

## 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完成させた [22]。

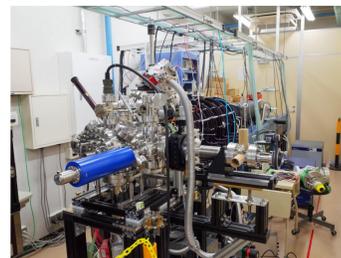


図6 東京理科大学に完成したエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生装置

#### 特長

- ✓ 陽電子溜め込み装置からパルス状陽電子ビームを引き出す
- ✓ 磁場レンズによる陽電子ビームの収束
- ✓ Ps<sup>-</sup>の生成にはNa蒸着したタングステン薄膜を使用。陽電子の入射面と反対側の面からPs<sup>-</sup>を放出させる  
→ ビーム径の小さなPsビームが得られる

## 次年度の計画

- 1 結晶表面におけるポジトロニウムの散乱・回折実験を行う
- 2 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

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, 785 (2015) 5.  
 [8] J. A. Wheeler, Ann. New York Acad. Sci. 48 (1946) 219.  
 [9] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 717.  
 [10] K. Michishio, T. Kanai, S. Kuma, T. Azuma, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, Y. Nagashima, Nat. Commun. 7 (2016) 11060.  
 [11] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 671.  
 [12] H. Ceeh, et al., Phys. Rev. A 84 (2011) 062508.  
 [13] Y. K. Ho, Phys. Rev. A 19 (1979) 2347.  
 [14] A. K. Bhatia and R. J. Drachman, Phys. Rev. A 32 (1985) 3745.  
 [15] J. Botero and C. H. Greene, Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 1366.  
 [16] S. J. Ward, J. W. Humberston and M. R. C. McDowell, J. Phys. B: AT. Mol. Phys. 20 (1987) 127.  
 [17] A. K. Bhatia and Y. K. Ho, Phys. Rev. A 42 (1990) 1119.  
 [18] A. Igarashi, I. Shimamura and N. Toshima, New J. Phys. 2 (2000) 17.  
 [19] H. Terabe, S. Iida, K. Wada, A. Yagishita and Y. Nagashima, J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012075.  
 [20] H. Terabe, S. Iida, T. Yamashita, T. Tachibana, B. Barbiellini, K. Wada, I. Mochizuki, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Surf. Sci. 641 (2015) 68.  
 [21] S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo, and Y. Nagashima, in preparation.  
 [22] K. Michishio, L. Chiari et al., in preparation.

■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、特に設案哲夫先生、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。