

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 (*量研機構)

課題有効期間: 2013年10月-2016年9月

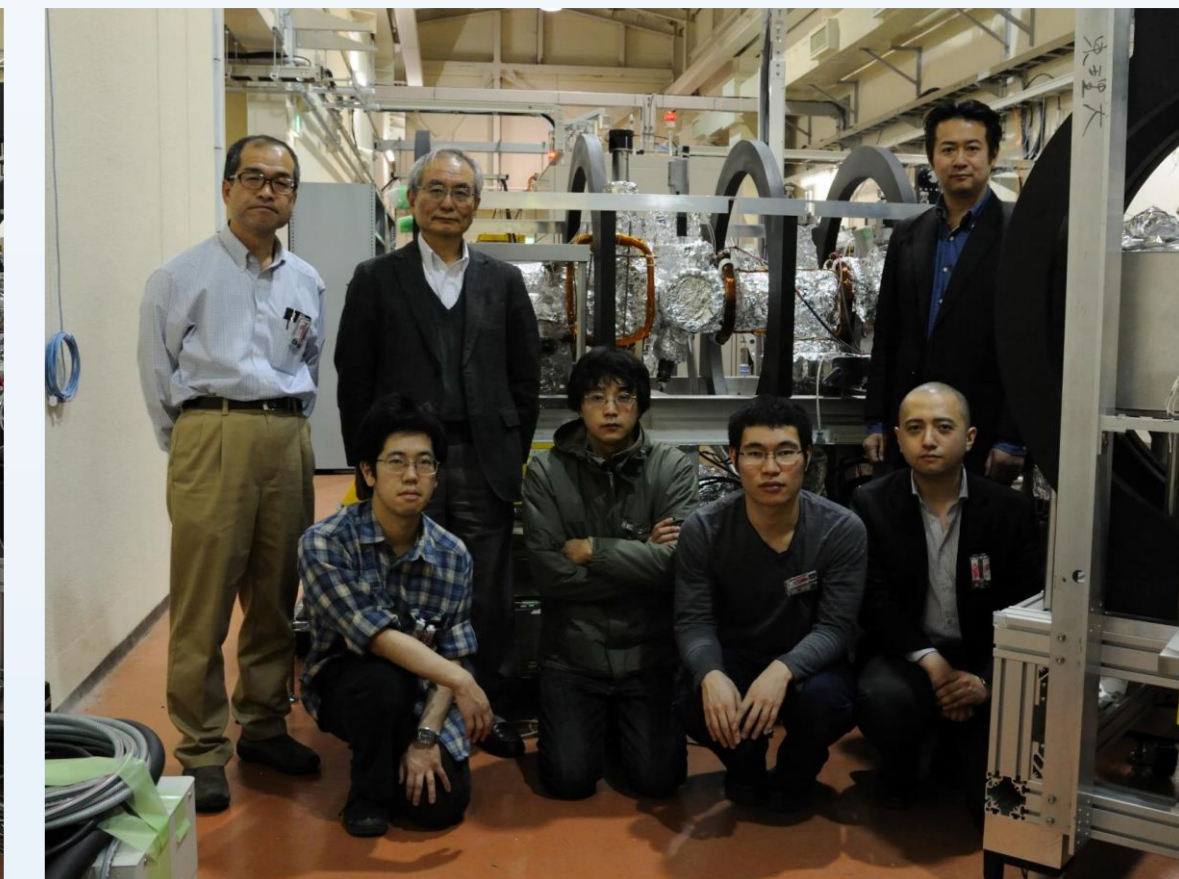
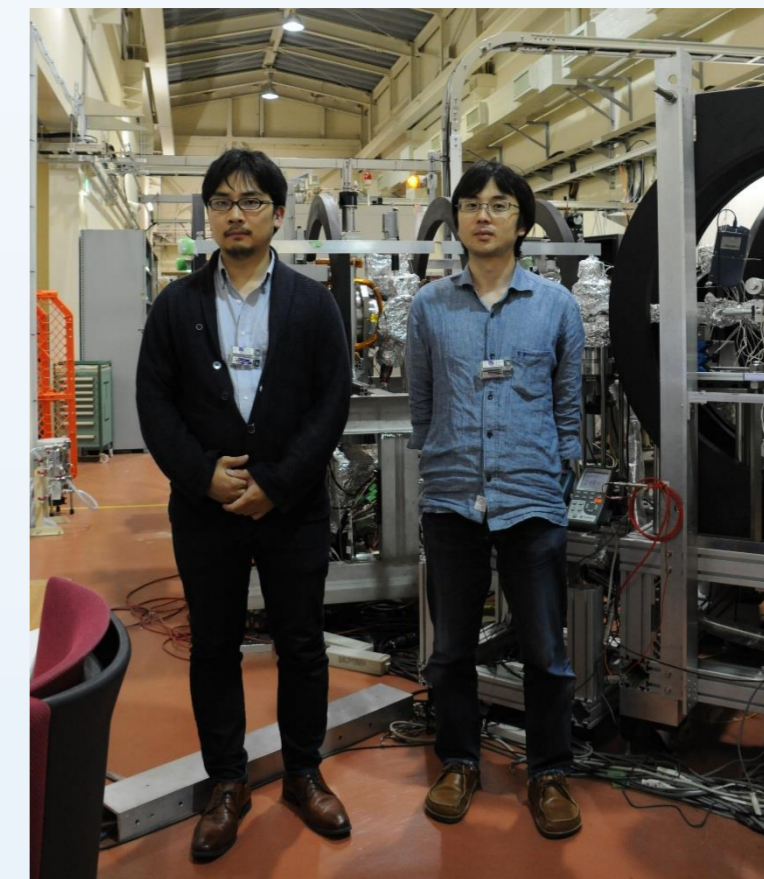
実験ステーション: SPF

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、5月12日-5月16日、6月15日-6月20日



研究目的: 2010年10月から2013年9月までの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)に引き続き、2013年10月から2016年9月まで、本研究課題を低速陽電子実験施設(SPF)で行った。具体的な内容は、ポジトロニウム負イオンの光脱離実験、ポジトロニウム負イオン光脱離を利用したエネルギー可変ポジトロニウム生成、および金属表面からのポジトロニウムおよびポジトロニウム負イオン生成に対するアルカリ金属蒸着効果を調べる実験である。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[1-5]、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[6]である。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[7]ため、ポジトロニウム負イオンの光脱離の実験には最適である。

研究成果: 課題有効期間はすでに終了した。この期間に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を用いたエネルギー可変ポジトロニウムビームの生成と高品質化 [8, 9]
- (2) ポジトロニウム負イオンの共鳴状態の観測 [10]
- (3) アルカリ金属蒸着タングステン表面から放出されたポジトロニウムの飛行時間測定 [11-14]
- (4) アルカリ金属を蒸着したタングステン表面における陽電子の研究 - 再放出陽電子、ポジトロニウム放出、表面状態への捕捉、ポジトロニウム負イオン放出の分岐比の測定 - [15]
- (5) 新たなエネルギー可変ポジトロニウムビームの開発 [16]

研究目的の達成度: 順調に行われた。

以下で、研究成果の一部を紹介する。

■ ポジトロニウム・ポジトロニウム負イオン [1, 17, 18]

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⁻) [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⁻への束縛エネルギー $E_{Ps^-} = 0.33\text{eV}$

寿命 = 479ps [19, 20]

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⁻となって放出されるようになる[1-5]。

■ 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の生成は難しく、しかも寿命が短いため、その特性を調べ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 [19, 20]。

一方で、理論計算は大変盛んである。たとえば、消滅率や光脱離断面積の計算、共鳴状態の研究などが行われている [21-26]。

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!**

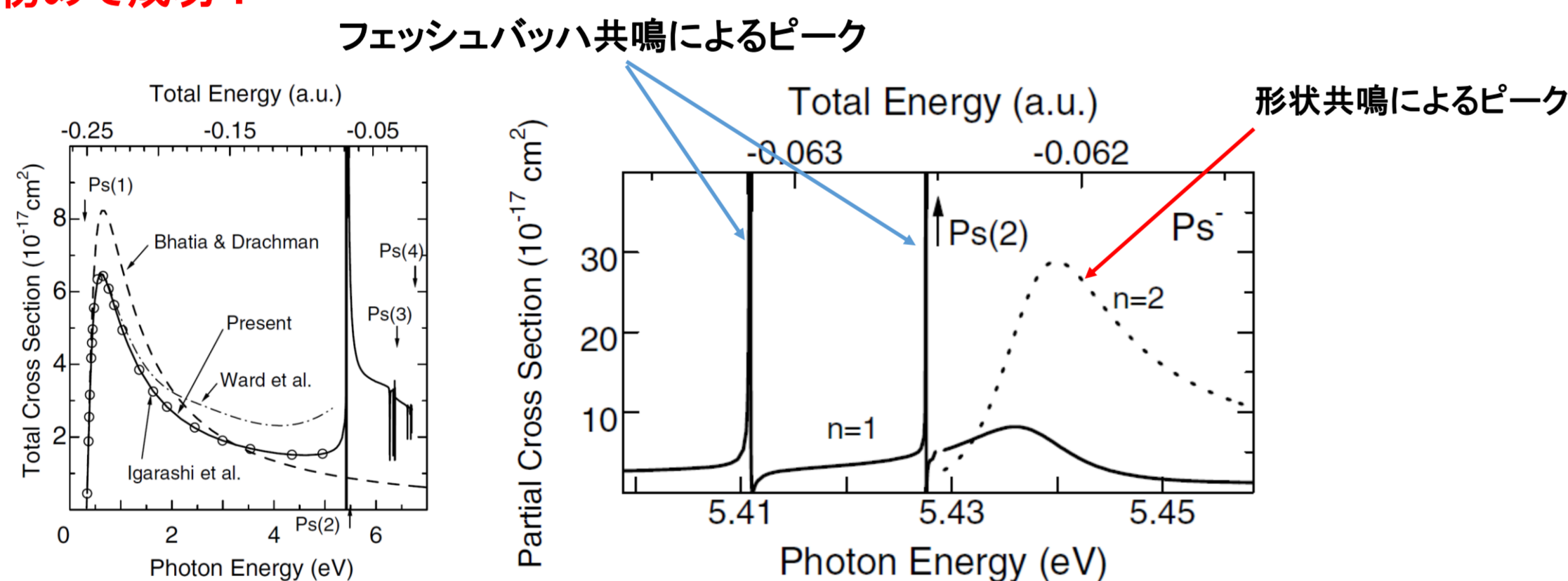
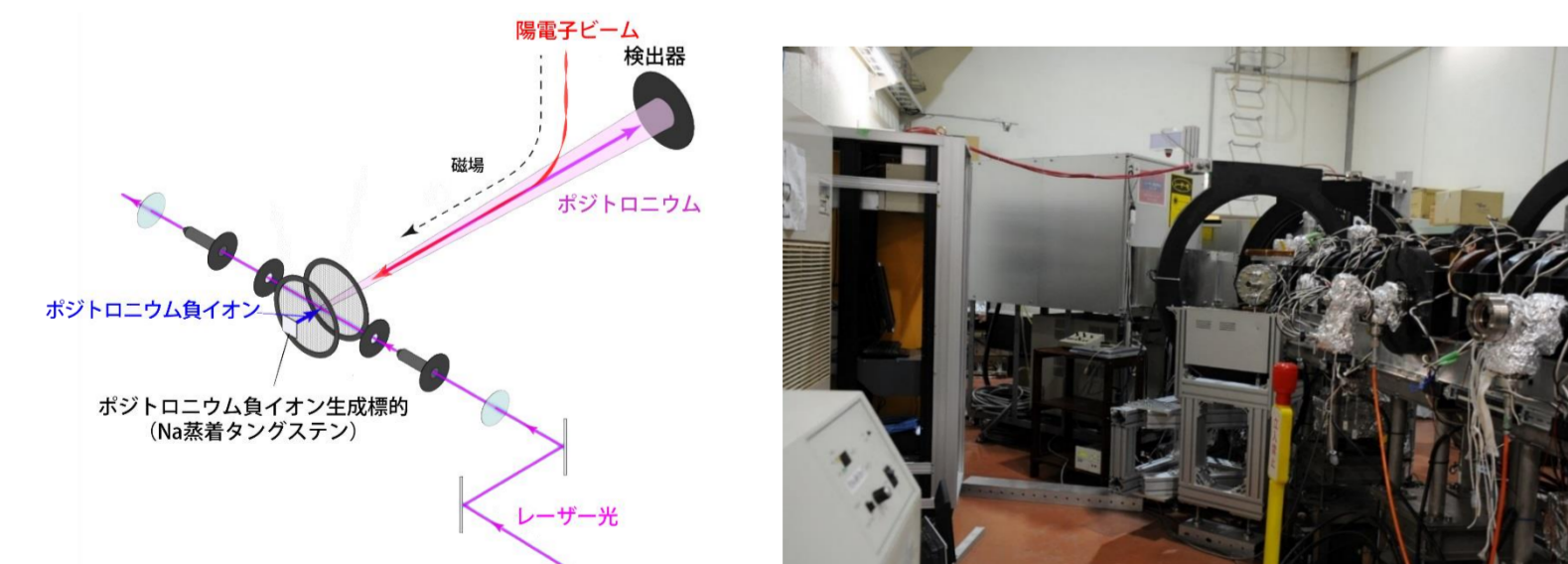


図1 ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の理論値 [26]。励起状態 ($n=2$) のポジトロニウムが生成される閾値エネルギーの前後に、共鳴(フェッシュバハ共鳴と形状共鳴)が存在するために、光脱離断面積が極大になることが予測されている。



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。

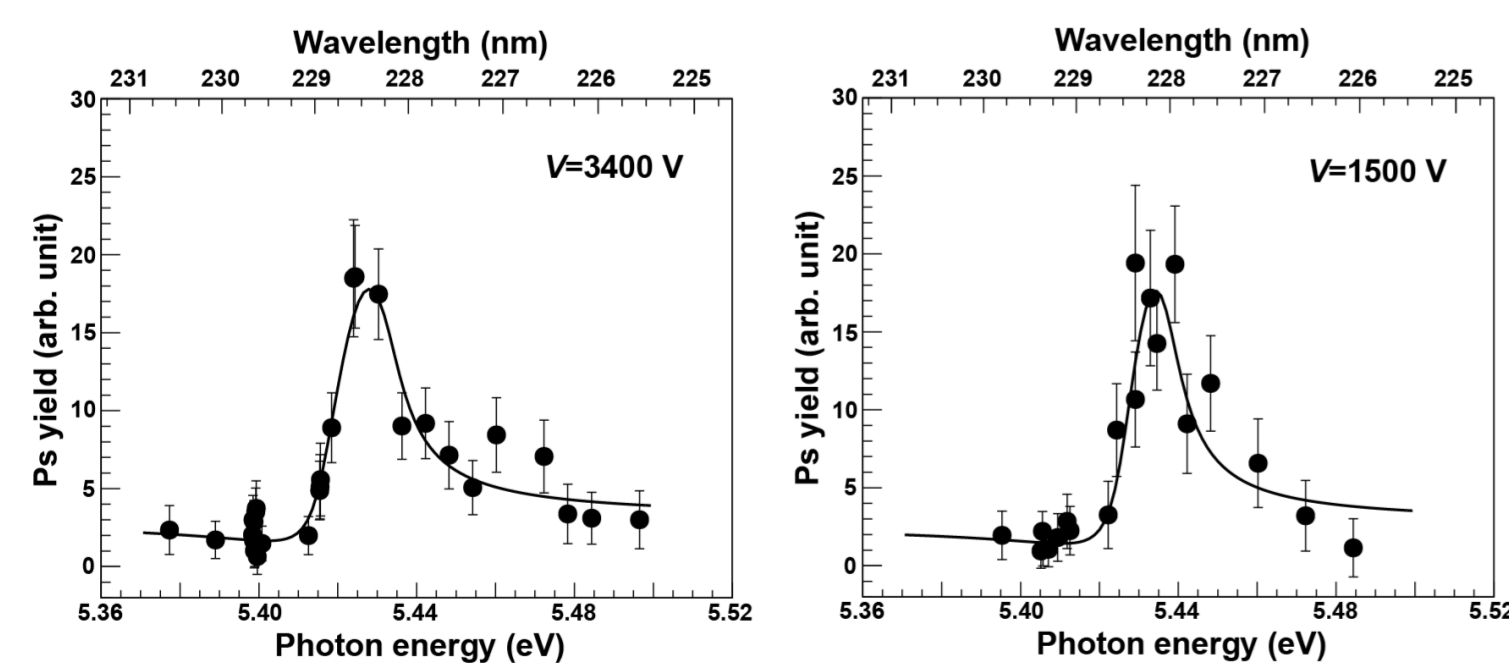


図3 共鳴付近のエネルギースペクトル [10]

ドップラー効果の補正をすると共鳴のエネルギーは5.437(1) eVとなる

理論との比較 [10]

	実験	理論		
	本研究	Botero [23]	Bhatia [25]	Igarashi [26]
共鳴エネルギー (eV)	5.437 (1)	5.44	5.438(1)	5.4375

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。

■ 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調べる研究として、アルカリ金属を蒸着した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を行った。

本研究で、次のようなことがわかった [11-14]。

- (1) 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。

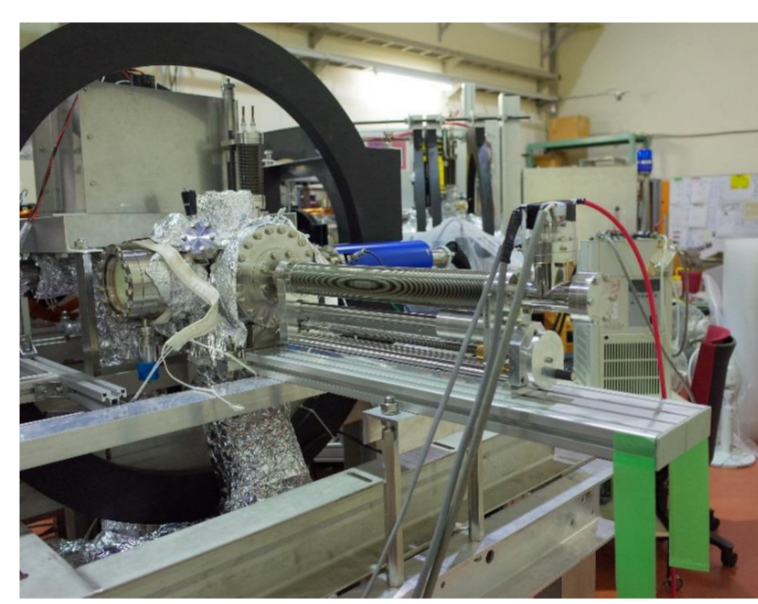


図4 ポジトロニウム飛行時間測定装置@SPF

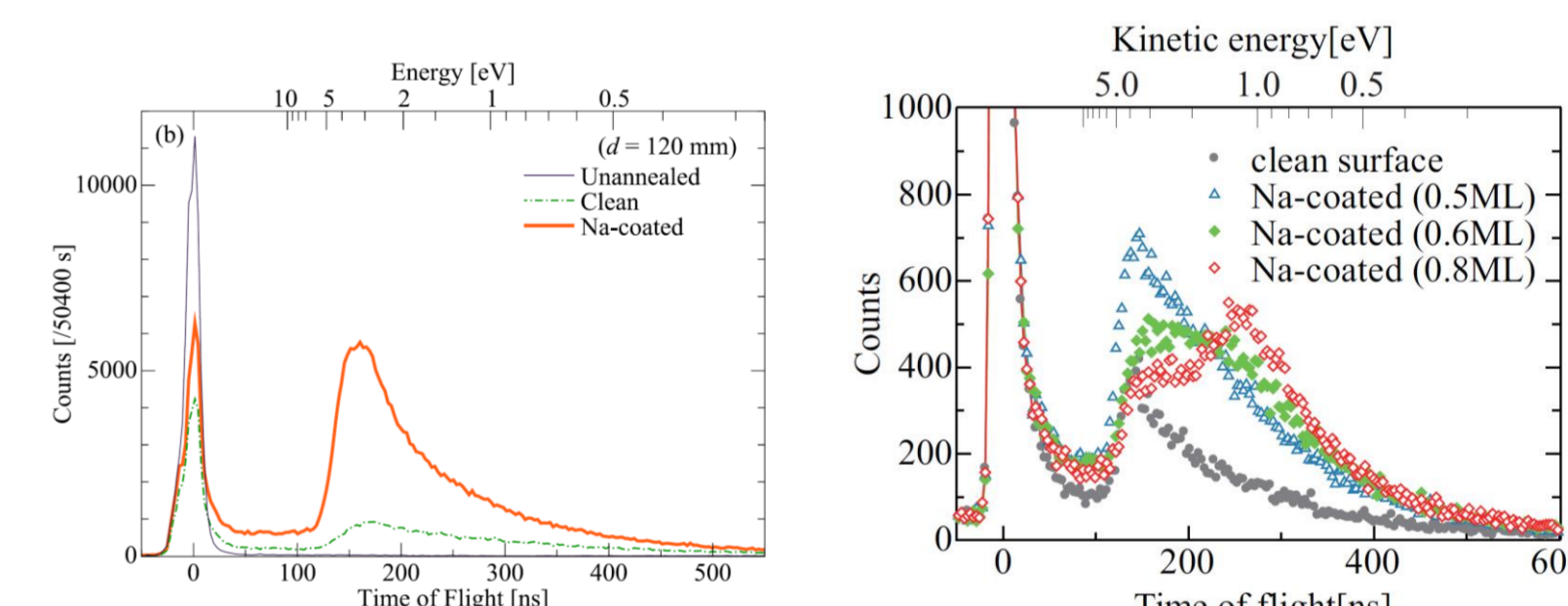


図5 得られた飛行時間スペクトルの例

■ 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における研究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 [16]。

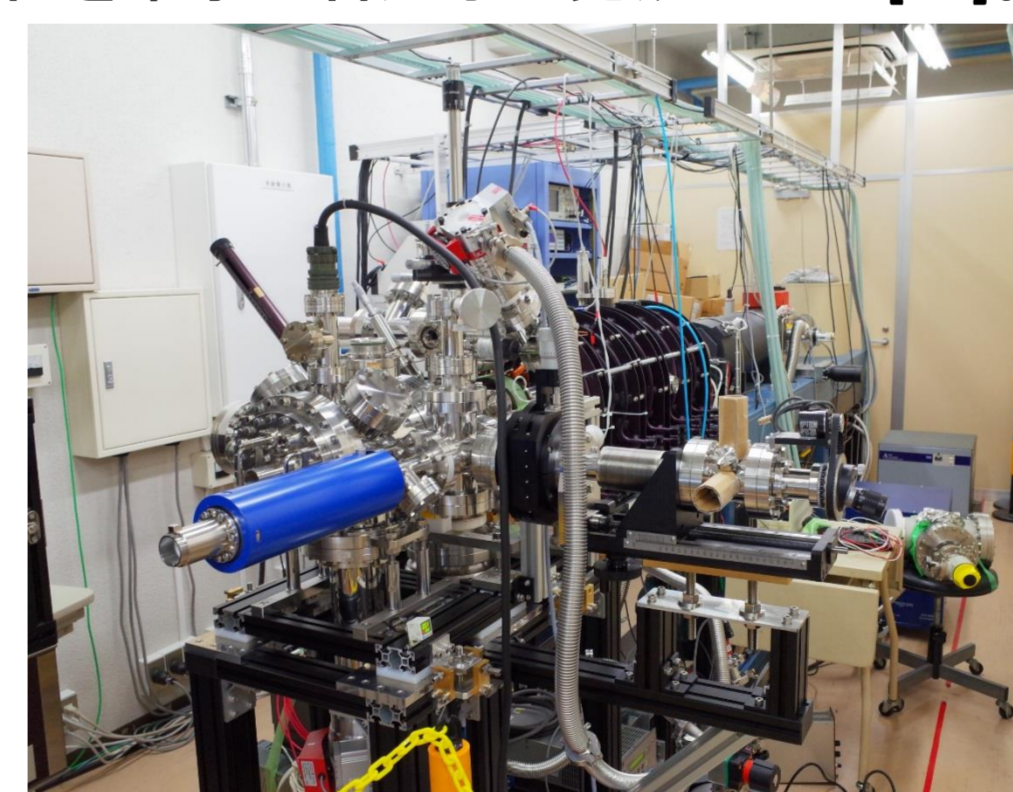


図6 東京理科大学に完成したエネルギー可変ポジトロニウムビーム発生装置

このビームを用いた新たな研究の展開が始まっている。

特長

- ✓ 陽電子バッファガストラップ (Surko trap) 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⁻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⁻を放出させる
- ビーム径の小さな高品質Psビームが得られる

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, K. Michishio and H. Terabe, AIP Conf. Proc. 1588 (2014) 27.
 - [3] Y. Nagashima, K. Michishio, H. Terabe, R. H. Suzuki, S. Iida, T. Yamashita, R. Kimura, T. Tachibana, I. Mochizuki, K. Wada, A. Yagishita and T. Hyodo, J. Phys. Conf. Ser. 505 (2014) 012037.
 - [4] Y. Nagashima, T. Hakodate, A. Miyamoto and K. Michishio, New J. Phys. 10 (2008) 123029.
 - [5] H. Terabe, K. Michishio, T. Tachibana and Y. Nagashima, New J. Phys. 14 (2012) 015003.
 - [6] K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe, A. Igarashi, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 153401.
 - [7] K. Wada, T. Hyodo, T. Kosuge, Y. Saito, M. Ikeda, S. Ohsawa, T. Shidara, K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe, R. H. Suzuki, Y. Nagashima, Y. Fukaya, M. Maekawa, I. Mochizuki and A. Kawasuso, J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012082.
 - [8] K. Michishio, T. Tachibana, R. H. Suzuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102.
 - [9] 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.
 - [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] H. Terabe, S. Iida, K. Wada, T. Hyodo, A. Yagishita and Y. Nagashima, J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012075.
 - [12] 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.
 - [13] S. Iida, H. Terabe, T. Tachibana, K. Wada, I. Mochizuki, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Materials Science Forum, in press.
 - [14] S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo, and Y. Nagashima, J. Phys.: Condens. Matter, 28 (2016) 475002.
 - [15] T. Yamashita, S. Iida, H. Terabe and Y. Nagashima, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 387 (2016) 115.
 - [16] K. Michishio, L. Chiari, N. Oshima and Y. Nagashima, in preparation.
 - [17] J. A. Wheeler, Ann. New York Acad. Sci. 48 (1946) 219.
 - [18] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 717.
 - [19] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 671.
 - [20] H. Ceoh, et al., Phys. Rev. A 84 (2011) 062508.
 - [21] Y. K. Ho, Phys. Rev. A 19 (1979) 2347.
 - [22] A. K. Bhatia and R. J. Drachman, Phys. Rev. A 32 (1985) 3745.
 - [23] J. Botero and C. H. Greene, Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 1366.
 - [24] S. J. Ward, J. W. Humberston and M. R. C. McDowell, J. Phys. B: AT. Mol. Phys. 20 (1987) 127.
 - [25] A. K. Bhatia and Y. K. Ho, Phys. Rev. A 42 (1990) 1119.
 - [26] A. Igarashi, I. Shimamura and N. Toshima, New J. Phys. 2 (2000) 17.
- 他に国際会議招待講演10件

■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ました。