

ポジトロニウム負イオンとポジトロニウムビーム Positronium Negative Ions and an Energy Tunable Positronium Beam

長嶋泰之
Yasuyuki Nagashima*

¹Department of Physics, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku, Tokyo 162-8601, Japan.

*e-mail: ynaga(at)rs.kagu.tus.ac.jp

We observed the photodetachment of positronium negative ions in the Slow Positron Facility in KEK. Efficient formation of the ions using a Na coated tungsten surface has enabled the observation. We have also succeeded in the production of an energy-tunable positronium beam using this technique.

陽電子は電子と束縛して水素原子様の束縛状態であるポジトロニウムを形成する。さらにもう1つの電子と束縛して、水素負イオン様の束縛状態であるポジトロニウム負イオンを形成することもある。近年、アルカリ金属を1原子層程度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れば、1%以上が表面からポジトロニウム負イオンとして放出されることがわかってきた [1]。アルカリ金属としてナトリウムを用いれば、その効果は数日間持続する [2]。

我々は、この手法を用いてポジトロニウム負イオンを生成して加速し、レーザー光を照射して光脱離させる実験を、KEK 低速陽電子実験施設で行った [3]。ポジトロニウム負イオンの寿命は 479ps と短いので、光脱離させるためには高強度パルスレーザーが必要である。また、このレーザーに同期させて使用可能な低速陽電子ビームを用いてポジトロニウム負イオンを生成する必要もある。低速陽電子実験施設で得られる陽電子ビームは、ショートパルスモードではパルス幅 1-10ns、繰り返し周波数は 50Hz で、パルスレーザーと同期して用いるには最適である [4]。

ナトリウムを蒸着したタングステンから放出されるポジトロニウム負イオンを加速してレーザー光を照射し、ポジトロニウム負イオンの数がレーザー光の照射によって減少する様子から、ポジトロニウム負イオンが光脱離されることを確認した。さらに、ポジトロニウム負イオンの光脱離断面積を見積もり、その下限値が理論計算の結果 [5] と矛盾しないことを見出した。

その後、ポジトロニウム負イオンの光脱離によって生成されるポジトロニウム

を、エネルギー可変ポジトロニウムビームとして取り出すことに成功した [6]。さらに、ポジトロニウム生成量のレーザー強度依存性から、ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の値を得ることに成功した。

こうして得られるエネルギー可変ポジトロニウムビームは、物性実験のための新たなプローブとして利用できると思われる。ポジトロニウムは電氣的に中性であるため、生成してから電場で加速することは不可能である。これまでに得られているエネルギー可変ポジトロニウムビームは、気体標的に低速陽電子ビームを入射し、下流から得られるポジトロニウムをビームとして利用するもののみであった。ポジトロニウム負イオンの光脱離によって得られるポジトロニウムビームは、気体を用いて生成されるポジトロニウムビームと比べると

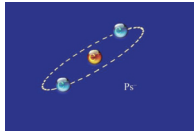
- (1) 生成効率が高い
- (2) 超高真空中で得られる
- (3) エネルギーが高い

等の特徴を有する。今後はこのビームを用いて、絶縁体表面における回折の実験を行っていきたいと考えている。ポジトロニウムは電子あるいは陽電子を中性化した粒子と見なすことができるため、荷電粒子では苦手な絶縁体表面の解析に威力を発揮するはずである。また同時に、ポジトロニウム負イオンに関する基礎研究も行っていく予定である。特に、光脱離における共鳴現象 [5] の観測を、2013 年度からスタートする。

References (参考文献)

- [1] Y. Nagashima *et al.*: *New J. Phys.* **10**, 123029 (2008).
- [2] H. Terabe *et al.*: *New J. Phys.* **14**, 015003 (2012).
- [3] K. Michishio *et al.*: *Phys.Rev. Lett.* **106**, 153401 (2011).
- [4] K. Wada *et al.*: *Eur. Phys. J. D* **66**, 37 (2012).
- [5] A. Igarashi *et al.*: *New J. Phys.* **2**, 17 (2000).
- [6] K. Michishio *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **100**, 254102 (2012).

ポジトロニウム負イオンとポジトロニウムビーム Positronium negatives ion and an energy-tunable positronium beam



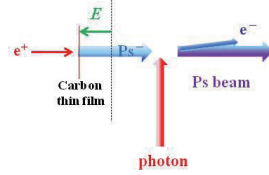
東京理科大学
長嶋泰之
Y. Nagashima
Tokyo University of Science, Japan

ポジトロニウム負イオンの光脱離

エネルギー可変 Ps^- ビームの生成が可能に！
Production of an energy-tunable Ps^- beam is feasible!

Ps^- を電場で加速することは不可能

Ps^- を生成し、加速してから光脱離させれば、
エネルギー可変 Ps^- ビームの生成が可能

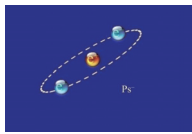


アルカリ金属を蒸着したタングステンを用いれば
 Ps^- を効率よく生成することが可能
(Nagashima et al., New. J. Phys. 10 (2008) 123029)

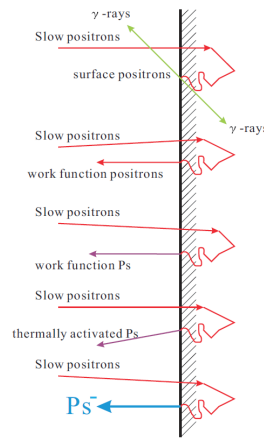
Ps^- 利用してエネルギー可変 Ps^- ビームを生成することが可能となった。

Mills, Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 717

ポジトロニウム負イオン (Ps^-)



- ✓ H⁻ 様イオン
ただし Ps^- を構成する全ての粒子は等しい質量をもつ。
- ✓ $e^- - Ps^-$ の束縛エネルギー = 0.33eV
3粒子に分解するために必要なエネルギー = 7.13eV
- ✓ $e^+ - e^-$ の平均距離 = 5.5a₀
- ✓ 寿命 = 479ps
2光子に自己消滅する。



Ps^- の放出に必要なエネルギー:
The energy required for Ps^- emission

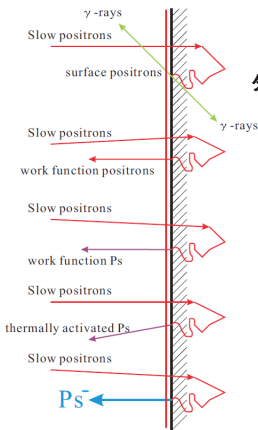
$$\phi_{Ps^-} = \phi_s + 2\phi_w - 7.13 \text{ eV}$$

e^- 仕事関数
 e^+ 仕事関数
 Ps^- を3体に分解するために必要なエネルギー
(The energy required to break up Ps^- into three isolated particles)

タングステン(W)では $\phi_{Ps^-} = -1 \text{ eV}$

Ps^- は自発的に放出される
(Ps^- is emitted from the surface spontaneously.)

放出率 < 0.01%

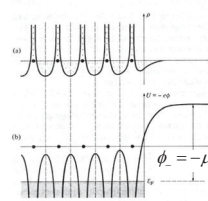


タングステン表面にアルカリ金属を蒸着すると
 Ps^- 放出率が飛躍的に増大する。

(By coating alkali metals onto the surface,
the efficiency increases dramatically.)

~ 1.5%

金属表面における e^- および e^+ のエネルギー Energy levels of e^- and e^+ near metal surface

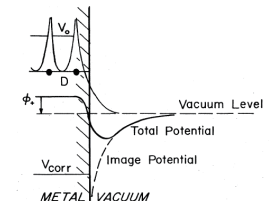


e^- のエネルギー

(Acheroff and Mermin)

$$e^- \text{ 仕事関数: } \phi_e = -\mu_e + D$$

μ_e : e^- 化学ポテンシャル
 μ_s : e^+ 化学ポテンシャル
 D : 表面電気2重層の効果



e^+ のエネルギー

(Schultz and Lynn, Rev. Mod. Phys. 60 (1988) 701)

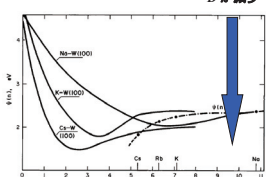
$$e^+ \text{ 仕事関数: } \phi_s = -\mu_s - D$$

Ps^- を放出させるために必要なエネルギー:

$$\phi_{Ps^-} = -\mu_s - 2\mu_e + D - 7.13 \text{ eV}$$

Ps^- 放出に対するアルカリ金属蒸着の効果 Effect of alkali metal coating for the Ps^- emission

アルカリ金属の蒸着による ϕ_e の変化
Change of ϕ_e for tungsten by alkali metal coating



Kiejna and Wojciechowski,
Prog. in Surf. Sci. 11 (1981) 293

表面電気2重層の減少によって
 D が減少する。

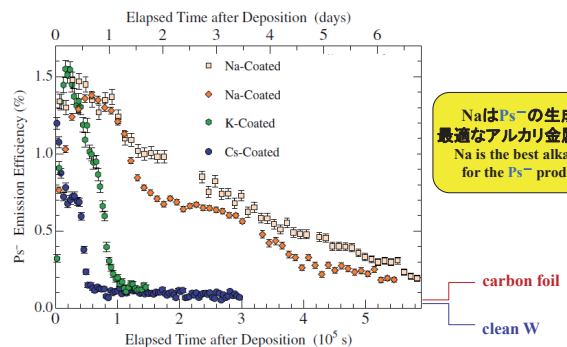
D decreases by alkali metal coating
due to the surface dipole reduction.

$$\phi_{Ps^-} = -\mu_s - 2\mu_e + D - 7.13 \text{ eV} \text{ が低下する。}$$

Ps^- の生成に寄与する電子が増える。
The fraction of conduction electrons
available for the Ps^- production increases.

Ps^- 放出率が増大する。
 Ps^- emission efficiency increases.

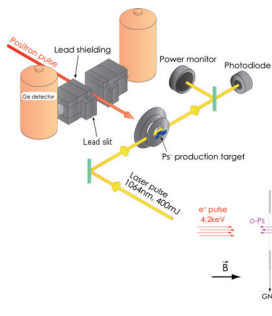
Ps^- 放出に対するアルカリ金属蒸着の効果 Effect of alkali metal coating for the Ps^- emission



Naは Ps^- の生成には
最適なアルカリ金属である。
Na is the best alkali metal
for the Ps^- production.

Terabe, Michishio, Tachibana and Nagashima, New J. Phys. 14 (2012) 015003

Ps⁻光脱離実験
Ps⁻ photodetachment experiment



e⁺ ビーム:
(KEK Linac)
パルス幅 12ns
繰り返し周波数 50pps

レーザー:
Q-switched Nd: YAG
(Spectra Physics GCR290)
波長 1064nm (1.165eV)
パルス幅 12ns
繰り返し周波数 25pps
パワー 10W

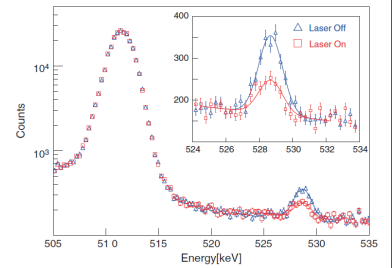
(Michishio, Tachibana, Terabe, Igarashi, Wada, Hyodo, Kuga, Yagishita, Hyodo and Nagashima
Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 153401)

Ps⁻光脱離実験

Ps⁻ photodetachment experiment

Ps⁻ → 25% p-Ps, 2光子に自己消滅
→ 75% o-Ps, 3光子に自己消滅

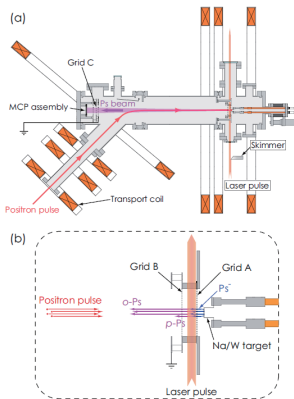
↓
Ps⁻が光脱離すれば、
ピーク強度が低下するはずである。
If Ps⁻ ions are photodetached,
the peak intensity will decrease.



Ps⁻ 光脱離が観測された。
Ps⁻ photodetachment has been observed!

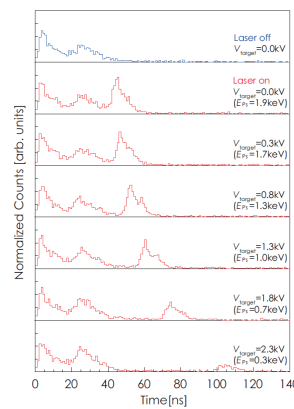
(Michishio, Tachibana, Terabe, Igarashi, Wada, Hyodo, Kuga, Yagishita, Hyodo and Nagashima
Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 153401)

Ps⁻光脱離によって生成されたPsの検出
Detection of Ps produced by the Ps⁻ photodetachment



Michishio et al.,
Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102

Ps⁻光脱離によるエネルギー可変Psビームの生成
Production of an energy tunable Ps beam using the Ps⁻ photodetachment



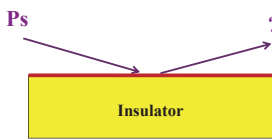
✓ Energy range : 300eV - 1.9keV
これまで実現されたことのない
エネルギー領域
気体を用いて生成されるPs beam
と相補的

✓ UHV compatible
固体表面のプロブとして利用可能

Michishio et al.,
Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102

エネルギー可変Psビームを使って何をするのか
Application of the energy tunable Ps beam

Grazing Incidence Fast Ps Diffraction (GIFPsD)
or **Reflected High Energy Ps Diffraction (RHEPsD)**



$m_{Ps} \ll M \Rightarrow$ 非破壊

最表面に敏感

Non-destructive,
and sensitive for the topmost layer
of the surface.

KEK低速陽電子実験施設に期待すること

- ✓ 高強度化
 $10^8, 10^9 e^+/s$
実用性の高いエネルギー可変Psビームが可能に
- ✓ DC化
2光子角相関法 (ACAR)
Ps⁻生成メカニズムの解明が可能に
- ✓ 安定した管理体制
スタッフ、運転経費

研究チーム

東京理科大学

満汐孝治, 立花隆行*, 寺部宏基
鈴木亮平, 飯田進平
山下貴志, 宮本あやか, 函館俊秀, 坂井隆彦
(* 立教大学)

KEK

兵頭俊夫, 和田健, 柳下明

宮崎大学
五十嵐明則

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々から援助していただきました。特に下記の
方々に感謝いたします。

千葉大学 藤浪真紀先生、神野智史さん(現、原研)
理化学研究所 島村勲先生、松尾由賀利先生、小林徹先生、
KEK 殷楽哲夫先生、大沢哲先生、池田光男さん、足立純一先生
その他KEKのスタッフの皆様

この研究は科研費 基盤研究(S) (24221006)、松尾学術振興財団、原研基礎研究所
からの援助を受けて、KEKフotonファクトリー共同利用 2009G066 および 2010S2-003
として行われました。

