

# ポジトロニウム負イオンのレーザー分光とその応用

Laser spectroscopy of positronium negative ions and its applications

## 実験組織:

東京理科大 長嶋泰之、満汐孝治、寺部宏基、鈴木亮平、飯田進平、堀理人、山下貴志  
立教大 立花隆行、KEK 柳下明、兵頭俊夫、和田健

課題有効期間: 2010年10月 - 2013年9月

実験ステーション: SPF

2012年度に実施したビームタイム: 2012年5月17日 - 6月4日, 6月11日 - 6月21日, 10月15日 - 11月5日, 2013年2月28日 - 2月29日

研究成果: Referenceseに記載(\*)の付いたもの

・研究成果の達成度: エネルギー可変ポジトロニウムビームの生成に成功、そのビームスポットの観測を行った。ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の測定、透過型配置でのポジトロニウム負イオン生成等に成功した。さらに、リチウムを蒸着したタングステンを用いれば、ポジトロニウム負イオンが長時間安定に生成されることを見出した。

・実験環境の整備のため、実験装置を地階テストホールから1階クライストロンギャラリーに移設した。

・本研究から派生したテーマ「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」は、新たにG課題としてスタートした(2012G666)。(1411「高温の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」、1521「ポジトロニウムの飛行時間測定装置を用いた絶縁体表面およびナトリウム蒸着したタングステンからのポジトロニウム放出エネルギーの測定」において発表)

次年度以降の計画: 「2013年度以降の予定」に記載



陽電子は電子と束縛してポジトロニウムを形成する。ポジトロニウムは、さらにもう一つの電子と束縛してポジトロニウム負イオンを形成することもある。ポジトロニウム負イオンは水素負イオン(H<sup>-</sup>)や水素分子イオン(H<sub>2</sub><sup>-</sup>)と同様にクーロン力によって束縛された3体系であるが、3体系すべての質量が等しいため、理論的に取り扱いはこれらのイオンとは大きく異なる。このため、ポジトロニウム負イオンの存在が1946年にJ. A. Wheeler [1]によって予言されて以来、多くの理論的研究が行われている。しかしながらその特性を探る実験は、3例の寿命測定を除き全く行われていない。これは、ポジトロニウム負イオンを効率よく生成することができなかったためである。

- 本研究課題の主な目的は以下の4つである。
- (1) ポジトロニウム負イオンの光脱離を利用してエネルギー可変ポジトロニウムビームの生成を行う。
- (2) ポジトロニウム負イオンの光脱離断面積を測定する。
- (3) 理論的に予測されているポジトロニウム負イオンの光脱離における共鳴現象の観測を行う。
- (4) ポジトロニウムビームの応用実験を開始する。



図1 ポジトロニウム負イオンを用いたレーザー分光。

## 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2体の束縛状態  
陽電子 - 電子間の平均距離 = 2a<sub>0</sub>  
(a<sub>0</sub> はボーア半径、0.53 Å)

束縛エネルギー E<sub>b</sub> = -6.80eV  
2つの固有状態がある  
全スピン(スピン)三重項状態、パラポジトロニウム)  
φ: 陽電子の仕事関数  
φ: 電子の仕事関数

全スピン1(スピン)三重項状態、オルソポジトロニウム)  
φ: 陽電子の仕事関数  
φ: 電子の仕事関数  
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>)

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<sub>0</sub>  
電子のPs<sup>-</sup>への束縛エネルギー E<sub>b</sub> = 0.33eV  
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注入すると15%がPs<sup>-</sup>となって放出される[3, 4]。

Ps<sup>-</sup> 生成に必要なエネルギー:

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

φ<sub>e</sub>: 陽電子の仕事関数  
φ: 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 μ<sub>Ps<sup>-</sup></sub> = 1eV → Ps<sup>-</sup> 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 μ<sub>Ps<sup>-</sup></sub> は大きくなる。  
→ Ps<sup>-</sup> の生成に寄与する電子数が増え、生成率が桁も高くなる。

## エネルギー可変Psビームの生成 [10,11,12]

Ps<sup>-</sup> は電氣的に中性であるため、一旦生成してからは電場で加速することはできない。Ps<sup>-</sup> を加速してから光脱離させれば、種々のエネルギーをもつPs<sup>-</sup> を生成することが可能である。

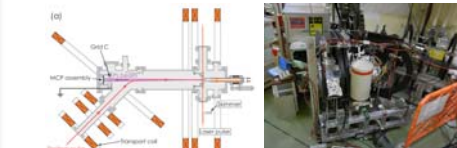


図2 エネルギー可変Psビーム発生装置。

- <Ps<sup>-</sup>生成に用いたe<sup>-</sup>ビーム(13)>
- パルス幅: 12ns (short pulse mode)
- 繰り返し: 50Hz
- 125psの寿命を測定する
- ビーム径: 6mm
- ビーム強度: 4 × 10<sup>10</sup> e<sup>-</sup>/s
- <光脱離に用いたレーザー>
- Nd:YAGパルスレーザー
- パルス幅: 12 ns
- 波長: 1064 nm
- 出力: 0.3 J/pulse
- 繰り返し: 25Hz

### エネルギー可変Ps<sup>-</sup>ビーム生成のプロセス

Naを蒸着したタングステン箔を標的とし、これに陽電子を注入してPs<sup>-</sup>を生成する。

標的の前方に設置したグリッドと標的との間に電位差を与え、標的表面で生成されたPs<sup>-</sup>を任意のエネルギーまで加速させる。

このPs<sup>-</sup>にレーザー光を照射し、光脱離を引き起こす。

この手法により、超高真空中エネルギー可変Ps<sup>-</sup>ビームを生成することが可能である。

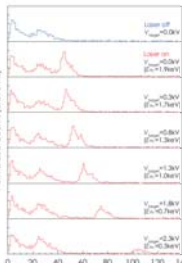


図3 o-Psの飛行時間スペクトル。

Ps<sup>-</sup>の価電数: 0.3/pulse@1.9keV  
Ps<sup>-</sup>エネルギー: 0.3 - 2.8keV  
真空度: < 1 × 10<sup>-7</sup> Pa

従来の生成法(低速陽電子と気体分子の電荷交換を利用)と比べて  
① 超高真空中で得られる  
② エネルギー領域が高い  
③ 高強度  
などの特長がある。

低速陽電子ビームを取束させてPs<sup>-</sup>生成ターゲットに注入すれば、Ps<sup>-</sup>強度はもっと大きくなるはず。

## ポジトロニウムビームスポットの観測

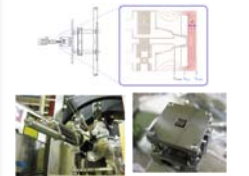


図4 Ps<sup>-</sup>生成ターゲット。ポジトロニウムビームの広がりを抑えるためターゲットのサイズを3mm × 3mmと小さくし、電場補正用の電極を設置した。

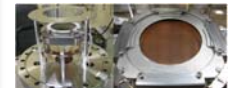


図5 測定に用いた2次元検出器。

エネルギー可変Ps<sup>-</sup>ビームの特性を調べるために、ビームスポットの観測を行った。ビームの広がりを抑えるために、ターゲットを3mm × 3mmと小さくし、電場補正用の電極を設置した。検出器には、MCPとワイヤーアノードからなる位置敏感検出器を用いた。

得られた角度広がりが:  
X方向 ±1.4°, Y方向 ±1.2°

従来の方法(低速陽電子と気体分子の電荷交換を利用)と比べてはるかに良い値が得られている。

レーザーの偏光方向によってビームの広がりがどのように変化するのか調べる実験も行っている(図7)。今のところ、ビームスポット形状の偏光方向依存性は確認できていない。

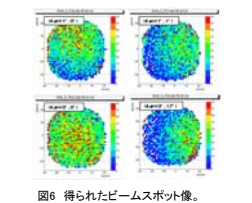


図6 得られたビームスポット像。

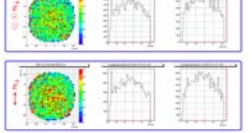


図7 ビームスポット像のレーザー光偏光依存性。

## ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の測定 [14]

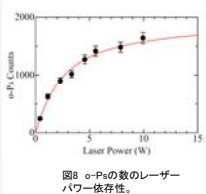


図8 o-Psの数のレーザーパワー依存性。

Ps<sup>-</sup> の光脱離によって生成されるPsの計数のレーザー強度依存性を測定することによって、Ps<sup>-</sup> 光脱離断面積を測定した。これは2011年度に行った実験の追試である。  
2011年度と同様の結果が得られた(右図)。Ps<sup>-</sup> 光脱離断面積の理論計算は米国、英国および宮崎大学のグループによって行われているが、本研究で得られた結果は宮崎大学のグループの結果とよく一致している。

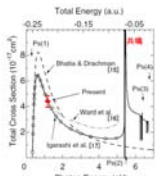


図9 図8から求めた光脱離断面積。

## リチウム蒸着したタングステン、およびナトリウム蒸着したタングステン薄膜を用いたポジトロニウム負イオンの生成

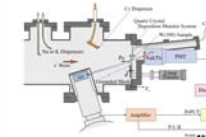


図10 種々のアルカリ金属を蒸着したタングステン表面からのPs<sup>-</sup>の放出率を測定する装置。

Ps<sup>-</sup> 生成のためのターゲットの開発を行った。

- (1) Liを蒸着したタングステン表面からのPs<sup>-</sup>の放出:  
長時間安定してPs<sup>-</sup>を生成するために、Liを蒸着したタングステンから放出されるPs<sup>-</sup>の生成率の時間変化を測定した。その結果、Cs、K、Naと比べて、蒸着直後の効率はやや低いが、時間変化は少なく、長時間安定して使用できることがわかった。

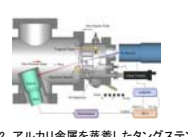


図12 アルカリ金属を蒸着したタングステン薄膜からのPs<sup>-</sup>の放出率を測定する装置。

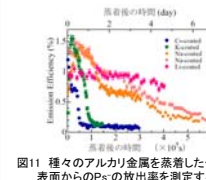


図11 種々のアルカリ金属を蒸着したタングステン表面からのPs<sup>-</sup>の放出率を測定する装置。

- (2) Naを蒸着したタングステン薄膜からのPs<sup>-</sup>の放出:  
品質の良いPs<sup>-</sup>ビームを得るためには、薄膜ターゲットを用い、透過型の配置でPs<sup>-</sup>を生成する必要がある。そこで、厚さ100nmのタングステン薄膜にNaを蒸着し、陽電子入射面と反対側の面からPs<sup>-</sup>を放出させる実験を行った。得られた放出率は低かった。タングステンを透過型として用いても、十分有用性のあるエネルギー可変Ps<sup>-</sup>ビームの生成が可能であることがわかった。

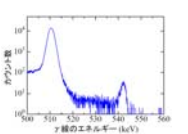


図13 厚さ100nmのタングステン(100)薄膜にNaを2.7 Å蒸着した時得られたγ線エネルギースペクトル。

## 2013年度以降の予定

Psと物質の相互作用の研究  
Ps<sup>-</sup> 光脱離におけるレーザー光偏光の効果  
Ps<sup>-</sup> 光脱離の共鳴の観測  
絶縁体表面におけるPs<sup>-</sup>回収実験  
励起状態のPsの研究

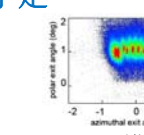


図5 中性原子線による回収実験の結果 [17,18]

本研究課題は2013年9月で終了となるが、それ以降も引き続き低速陽電子実験施設(SPF)において、Ps<sup>-</sup>の光脱離-エネルギー可変Ps<sup>-</sup>ビームに関する研究を継続していきたいと考えている。

## References

[1] J. A. Wheeler, Ann. New York Acad. Sci. 48 (1946) 219.  
 [2] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 717.  
 [3] Y. Nagashima and T. Sakai, New J. Phys. 8 (2006) 319.  
 [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] T. Tachibana, K. Michishio, H. Terabe, K. Wada, T. Hyodo, T. Kurihara, A. Yagishita and Y. Nagashima, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 621 (2010) 670.  
 [7] K. Michishio, T. Tachibana, K. Wada, T. Hyodo, T. Kuga, A. Igarashi, A. Yagishita and Y. Nagashima, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 155401.  
 [8] 長嶋泰之, 立花隆行, 満汐孝治, PF-ユーザー最近の研究成果, 30 (2012) 15.  
 [9] 長嶋泰之, 満汐孝治, 日本物理学会誌2012年5月号 (2012) 333.  
 [10] Y. Nagashima, K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe and R. H. Suzuki, J. Phys. Conf. Ser. 388(2012)012021.  
 [11] K. Michishio, T. Tachibana, R. H. Suzuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102.  
 [12] Y. Nagashima, Photon Factory Activity Report #29 (2011) 60.  
 [13] K. Wada et al., Ent. Phys. J. D 66 (2012) 37.  
 [14] K. Michishio et al., in preparation.  
 [15] A. K. Bhatia and R. J. Drachman, Phys. Rev. A 32 (1985) 3745.  
 [16] S. J. Ward, J. W. Humberston and M. R. C. McDowell, J. Phys. B 20 (1987) 127.  
 [17] A. Igarashi, J. Shimamura and N. Toshima, New J. Phys. 2 (2000) 17.  
 [18] Schiller et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 010103.  
 [19] Rousseau et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 016104.  
 [20] K. KEK-PF SPFにおける成果と関連する論文。

■プレスリリース  
世界初、ポジトロニウム負イオンの光脱離に成功  
一物質の表面分析や基礎研究のための新しい技術 エネルギー可変ポジトロニウムの生成が可能に  
(2011年4月7日、高エネルギー加速器研究機構および東京理科大学科学技術交流センター)  
本格的なポジトロニウムビームの生成に成功  
一絶縁体の表面分析や基礎研究のための新しいプローブ(探針)が利用可能に  
(2012年6月20日、高エネルギー加速器研究機構および東京理科大学科学技術交流センター)

■新聞記事  
日経産業新聞、科学新聞、日刊工業新聞、アサヒスポーツ等に掲載  
その他各紙の雑誌

■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。本研究は松尾学術研究助成、原子力研究開発機構黎明研究および科学研究費補助金基盤研究(S)の助成を受けて行われました。