

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、立花隆行、満汐孝治、寺部宏基、鈴木亮平、飯田進平
宮崎大 五十嵐明則、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

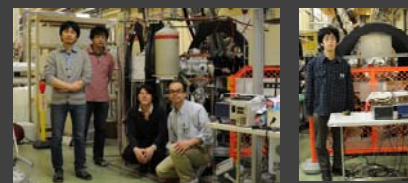
実験ステーション: SPF

実施したビームタイム: 2011年6月13日 - 6月23日, 6月24日 - 7月7日, 11月7日 - 11月21日, 11月28日 - 12月22日, 2012年1月30日 - 2月27日

研究成果: References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, ポジトロニウム負イオン光脱離断面積の測定に成功

次年度以降の計画: 2012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ことがある。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⁻)や水素分子イオン(H₂⁻)と同様にクーロン力によって束縛される3体系であるが、3体系すべての質量が等しいため、理論的な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調べる実験は、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。

東京理科大学では、ポジトロニウム負イオンを従来の方法[2]と比べて2桁近く高い効率で生成することに成功した [3-5]。2009年4月にはこの手法を用いた「ポジトロニウム負イオンのレーザー分光」をKEK-PFのG課題としてスタートし、ポジトロニウム負イオンの光脱離実験に成功した [6-10]。2010年10月からは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」として、さらに高い目標に挑んでいる。

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。

2011年度には(1)に成功した。またその技術を利用して、波長1064nmのレーザー光を用いて(2)に成功した。今後は(3)(4)に向けて、研究を進めていく予定である。



図1 ポジトロニウム負イオンおよびその光脱離。

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 = 2a₀

(a₀ はボーア半径、0.53 Å)

束縛エネルギー E_b = 6.80eV

2つの固有状態がある。

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⁻)

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 = 5.5a₀

電子のPs⁻への束縛エネルギー E_b = 0.33eV

寿命 = 479ps

寿命、束縛エネルギー、光脱離断面積等、多くの理論的研究が行われているが[11-13]、実験は、我々の研究を除いては、寿命測定が3例行われているのみ。

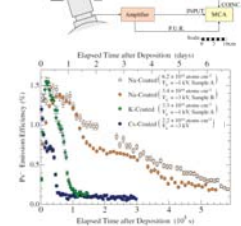
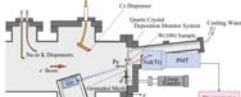


図2 種々のアルカリ金属を蒸着したタングステン表面におけるPs⁻の生成率 [5]。

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、1%程度がPs⁻となって放出される。 [3, 4]

Ps⁻の生成ポテンシャル μ_{Ps⁻}:

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

φ_e: 陽電子の仕事関数

φ: 電子の仕事関数

が正ならPs⁻の自発的な放出がエネルギー的に可能
負なら不可能

タングステン表面では μ_{Ps⁻} = 1eV → 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

$$\phi_e \Rightarrow \phi_e + D$$

$$\phi \Rightarrow \phi - D$$

$$\mu_{Ps^-} \Rightarrow \mu_{Ps^-} + D \quad (\text{Na 1原子層で } D \sim 2.5\text{eV})$$

生成ポテンシャルが大きくなる。

→Ps⁻の生成に寄与する電子数が増え、生成率が高くなる。

ポジトロニウム負イオンの光脱離断面積の測定

Ps⁻の光脱離によって生成されるPsの数のレーザー強度依存性を測定。共鳴現象の観測に向けての第一歩!

レーザー: Nd:YAGレーザーの基本波(1064nm)

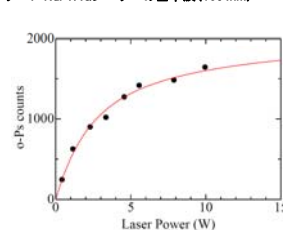


図7 Ps⁻の光脱離によって生成されるo-Psの数のレーザー強度依存性。

fittingにより (4.2 ± 0.3) × 10⁻¹⁷cm²を得た。

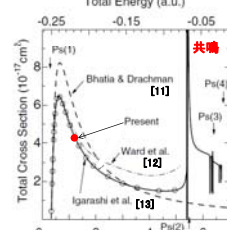


図7 理論計算との比較。

Igarashi et al. [13] による理論値と一致。今後、データの再現性の確認が必要。

Naを蒸着したタングステン表面からのPsの放出エネルギーの測定

タングステン表面へのNaの蒸着の効果について調べるために、o-Psの飛行時間測定を行った。

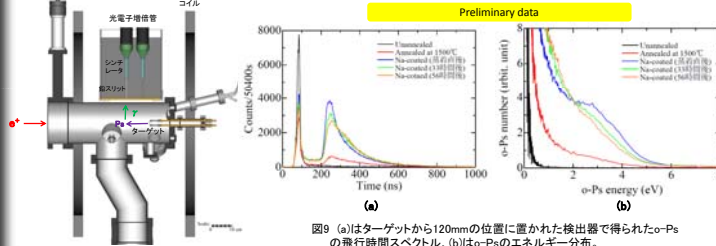


図8 Ps-TOF測定装置。

＜用いたビーム [16]＞
パルス幅: 12ns (Short pulse mode)
繰り返し: 50Hz
ビーム径: 10mm

Naの蒸着により、o-Psの生成率が増大することがわかる。2eV以下のエネルギー領域と2eV以上のエネルギー領域で、挙動が異なる。現在、詳細について解析中。5月のビームタイムでは、より詳しいデータを取得の予定。

エネルギー可変Psビームの生成 [14,15]

Ps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⁻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を生成することが可能である。

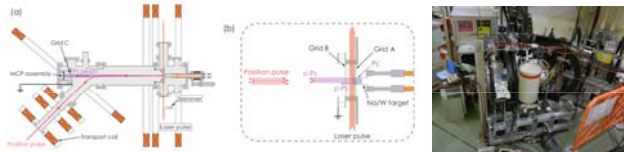


図3 エネルギー可変Psビーム発生装置。

エネルギー可変Ps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⁻を生成する。

標的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⁻を任意のエネルギーまで加速させる。

このPs⁻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ビームを生成することが可能である。

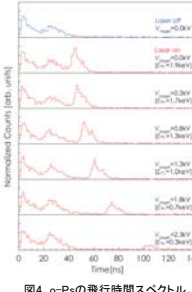


図4 o-Psの飛行時間スペクトル。

エネルギー可変Psビームの生成に成功!

Ps強度: 0.1/pulse@1.9keV
Psエネルギー: 0.3 - 2.8keV
真空度: <1 × 10⁻⁷Pa

エネルギー可変Psビームを使って何ができるか?

- ① 絶縁体表面におけるPsの反射の研究
- ② Grazing Incidence Fast Atom Diffraction (GIFAD) あるいはRIEEDをPsで! 非破壊な観測が可能!
- ③ 絶縁体表面の研究
- ④ Ps散乱の研究
- ⑤ Psのコヒーレント共鳴励起

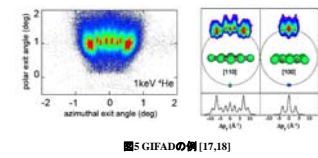


図5 GIFADの例 [17,18]

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) 153401.
 [8] 長嶋泰之、立花隆行、満汐孝治、PF-ユース「最近の研究」, 投稿予定.
 [9] 長嶋泰之、満汐孝治、日本物理学会誌2012年5月号、掲載予定.
 [10] Y. Nagashima, K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe and R. H. Suzuki, J. Phys. Conf. Ser. 投稿中.
 [11] J. A. Wheeler, J. W. Humberston and M. R. C. McDowell, J. Phys. B 20 (1987) 127.
 [12] S. J. Ward, J. W. Humberston and M. R. C. McDowell, New J. Phys. 2 (2000) 17.
 [13] A. Igarashi, I. Shimamura and N. Toshima, New J. Phys. 14 (2012) 015004.
 [14] Y. Nagashima, K. Michishio, T. Tachibana and H. Terabe, J. Phys. Conf. Ser. 262 (2011) 012041.
 [15] K. Michishio, T. Tachibana, R. H. Suzuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo and Y. Nagashima, submitted to Appl. Phys. Lett.
 [16] K. Wada et al., Eur. Phys. J. D 66 (2012) 37.
 [17] Schuller et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 016103.
 [18] Rousseau et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 016104.

*はKEK-PF SPFにおける成果と関連する論文。

プレリリース

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ー
 (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)
 ■新聞記事
 日経産業新聞、科学新聞、日刊工業新聞、アサヒドットコム等に掲載
 ■その他の発表
 高エネルギー加速器研究機構 ハイライト「光と拓くポジトロニウム負イオンの実験」

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。本研究は松尾学術財団および原子力研究開発機構(黎明研究)からの助成を受けて行われました。