

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
宮崎大 五十嵐明則、東大 久我隆弘、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

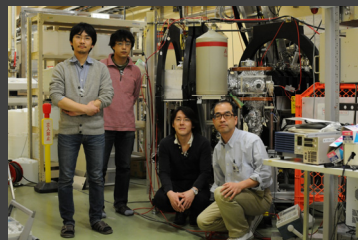
実験ステーション: SPF

実施したビームタイム: 2010年11月19日 - 12月13日, 2011年2月4日 - 3月6日

研究成果: Referencesに記載 (*の付いたもの)

研究成果の達成度: 予定よりも速いペースでポジトロニウムビームの生成に成功

次年度以降の計画: 「2011年度以降の予定」に記載



陽電子が電子と束縛してポジトロニウムを形成することはよく知られている。陽電子は、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た3体系であるが、3体すべての質量が等しいため、理論的な取り扱いはいずれ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[2]。しかしながらその特性を調べる実験は、2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[3]と比べて2桁近く高い効率で生成することに成功した。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た。開始から1年で、当初の目的であったポジトロニウム負イオンの光脱離実験に成功したため、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。

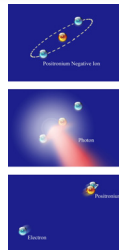


図1 ポジトロニウム負イオンおよびその光脱離。

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断面積を測定する。
- (2)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。
- (3)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。
- (4)ポジトロニウムビームの応用実験をする。

昨年12月から1月にかけて低速陽電子ビームラインが整備され、本研究を行う準備が整った。2月のメンテナンスでは整備されたラインを利用して(3)に成功した。今後は(1)(2)(4)に向けて、研究を進めていく予定である。

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つと電子1つから構成される2体の束縛状態。

陽電子 - 電子間の平均距離 = 2a₀

(a₀ はボア半径、0.53 Å)

束縛エネルギー E_{Ps} = 6.80eV

2つの固有状態がある。

スピン3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。

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つと電子2つから構成される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_{Ps⁻} = 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[2]、実験は、我々の研究を除いては、寿命測定が2例行われているのみ。

エネルギー可変Psビームの生成 [10]

(2011年2月のメンテナンスでの成果)

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を生成することができる。

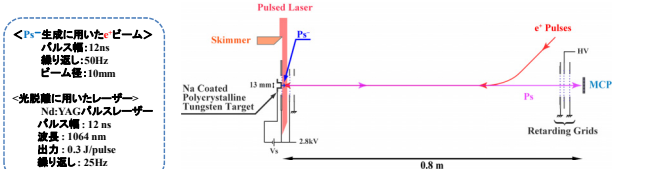


図6 エネルギー可変Psビーム発生装置の概念図。

ポジトロニウム負イオンの生成

1. ビームフォイル法 [3]

生成率が低い (0.028%)

2. アルカリ金属を蒸着したタンゲステン表面を用いる方法 [5, 6]

生成率が高い (~1%)

Ps⁻の生成ポテンシャル μ_{Ps⁻}:

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

φ: 陽電子の仕事関数

φ: 電子の仕事関数

μ_{Ps⁻} 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

タンゲステン表面では 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

$$\phi \rightarrow \phi + D$$

$$\phi \rightarrow \phi - D$$

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

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。

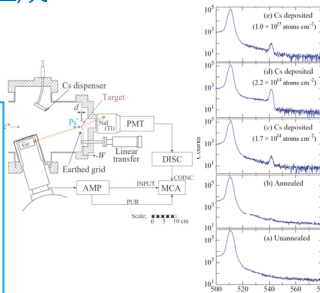


図2 タングステン表面から放出されたPs⁻の観測 [5]。

蒸着物質として最適なものはナトリウム。
Ps⁻の生成率、持続性に優れている [6]。



図7 SPFに設置されたエネルギー可変Psビーム発生装置。

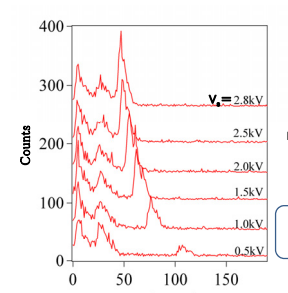


図8 Ps⁻の飛行時間スペクトル。

エネルギー可変Psビーム生成のプロセス [9]

Naを蒸着したタンゲステン箔を標的とし、これに陽電子を照射してPs⁻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、標的の表面で生成された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。

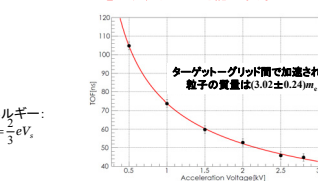
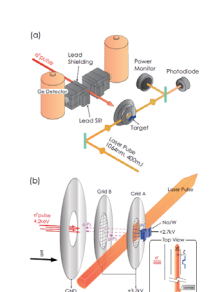


図9 加速エネルギーと飛行時間の関係。

ポジトロニウム負イオンの光脱離の観測 [8]

(2009G066の成果)



Naを蒸着したタンゲステン表面に、KEK-PFのパルス状低速陽電子ビームを照射し、Ps⁻を生成。そこにNd:YAGレーザーの基本波(1064nm)を照射。(KEK-PFの低速陽電子ビームはパルス幅12ns、繰り返し周波数50Hzで、高強度パルスレーザーと同期させた実験を行うのに最適である。)

Ps⁻の数が減る様子をγ線スペクトル上で確認した。

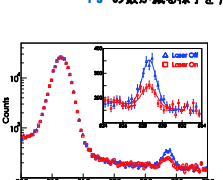


図4 γ線エネルギースペクトル。レーザーの照射によって2光子消滅するPs⁻数が減少していることがわかる。

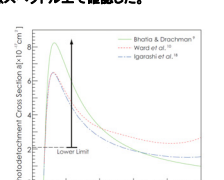


図5 測定結果から得られた光脱離断面積の上限値。

エネルギー可変Psビームの生成に成功!

エネルギー可変Psビームを使って何が出来るか?

①Psと周期場の相互作用

②Grazing incidence fast Ps diffraction

RHEPDあるいは Grazing Incidence Atom Diffraction (GIFAD)をPsで!

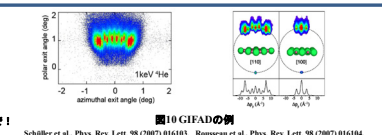


図10 GIFADの例

2011年度以降の予定

- 2011年度: ポジトロニウムビームのキャラクタリゼーション
- 2012年度: レーザーの波長を変えながら光脱離断面積を測定
- 2013年度: 透過型配置でのポジトロニウムビーム生成法の開発
- ポジトロニウムと物質の相互作用の研究
- 光脱離の共鳴の観測

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
—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)
■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。

References

[1] J. A. Wheeler, Ann. New York Acad. Sci. 48 (1946) 219.
 [2] A. Igarashi, I. Shimamura and N. Toshima, New J. Phys. 2 (2000) 17.
 [3] A. P. Mills, Jr., Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 717.
 [4] Y. Nagashima and T. Sakai, New J. Phys. 8 (2006) 319.
 [5] Y. Nagashima, T. Hakodate, A. Miyamoto and K. Michishio, New J. Phys. 10 (2008) 123029.
 [6] H. Terabe, K. Michishio, T. Tachibana and Y. Nagashima, J. Phys. Conf. Ser. 262 (2011) 012058.
 [7] 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.
 [8] K. Michishio, T. Tachibana, K. Wada, T. Hyodo, T. Kuga, A. Igarashi, A. Yagishita and Y. Nagashima, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 153401.
 [9] Y. Nagashima, K. Michishio, T. Tachibana and H. Terabe, J. Phys. Conf. Ser. 262 (2011) 012041.
 [10] K. Michishio et al., in preparation.
 *はKEK-PF SPFにおける成果と関連する論文。

ポジトロニウム負イオンの光脱離実験に成功!