

機関番号：3 2 6 6 0

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ~ 2011

課題番号：2 3 6 5 4 0 9 3

研究課題名（和文） ポジトロニウム負イオン消滅率の精密測定

研究課題名（英文） Precision measurement of the decay rate of positronium negative ions

研究代表者

長嶋泰之（YASUYUKI NAGASHIMA）

研究者番号：6 0 1 9 8 3 2 2

## 研究成果の概要（和文）：

陽電子 1 個と電子 2 個からなる 3 体の束縛状態であるポジトロニウム負イオンの消滅率を、従来よりも高い精度で測定することを目指して研究を行った。はじめに、ポジトロニウム負イオンを高効率で長時間安定に生成する手法の開発を行った。その結果、ナトリウムを 1 原子層蒸着したタンゲステンを用いれば、数日間にわたってポジトロニウム負イオンを高効率で生成することが可能であるという結果が得られた。次に、測定精度に関する詳細な検討を行い、実験装置の製作を行った。24 年内には消滅率の新しい測定結果が得られるはずである。

研究成果の概要（英文）： We have developed the method to measure the decay rate of the positronium negative ion, a bound state of a positron and two electrons, with higher precision than the previous measurements. The procedure to produce the ions efficiently and stably has been studied. We have also constructed the apparatus to measure the decay rate. We expect that we will obtain the new result of the decay rate by the end of 2012.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

## 1. 研究開始当初の背景

陽電子は電子 2 個と束縛して、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がある。ポジトロニウム負イオンは純粋に電磁相互作用によって束縛された系であるため、量子電磁力学の研究対象として貴重な束縛状態である。

ポジトロニウム負イオンの平均寿命は、およそ 479ps である。多くの場合、自己消滅によって 2 本の線が放出され、電子 1 個が残る。この線のエネルギーは、ポジトロニウム負イオンの静止系から見れば、ほぼ 511keV である。線が 1 本、あるいは 3 本以上放出される可能性もあるが、その確率は極めて小さい。理論計算によれば、ポジト

ロニウム負イオンの消滅率は

$$\Gamma = 2.087963(12)\text{ns}^{-1}$$

である (M. Puchalski, A. Czarnecki and S. G. Karshenboim, Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 203401)。

炭素薄膜に低速陽電子ビームを入射すれば、下流側からポジトロニウム負イオンを放出させることが可能である。この手法で生成されたポジトロニウム負イオンの消滅率を測定する研究が 3 例行われている。最初に行われたのは 1983 年のことである (A. P. Mills, Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 671)。Mills はカーボン薄膜の下流数 mm に加速用のメッシュを設置し、1 - 4keV に加速してから自己消滅したポジトロニウム負イオンの線

のエネルギーをゲルマニウム検出器で測定した。速度を持ったポジトロニウム負イオンが自己消滅すれば、消滅線はドップラーシフトするため、エネルギースペクトル上に511keVから離れたピークとして観測される。カーボンターゲットとメッシュの間隔や加速電位を変化させながらポジトロニウム負イオンピークの強度を測定し、消滅率を求めた。その結果は

$$\Gamma = 2.09(9)\text{ns}^{-1}$$

であった。

2006年に Fleischer ら (F. Fleischer et al., Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 063401) は、同様にカーボン薄膜を用いてポジトロニウム負イオンを生成して消滅率を求めた。Mills の実験との違いは、ポジトロニウム負イオンの検出に線を用いるのではなく、加速したポジトロニウム負イオンをもう一枚のカーボン薄膜に入射して、破碎によって放出された陽電子を用いたことである。この方法では、

線を検出する場合よりも検出効率が高くなるため、統計精度を上げることが可能である。得られた結果は

$$\Gamma = 2.089(15)\text{ns}^{-1}$$

であった。

さらに Ceeh ら (H. Ceeh et al., Phys. Rev. A 84 (2011) 062508) は、同様の測定をミュンヘン工科大学に設置された世界最高強度を有する低速陽電子ビーム発生装置を用いて行い

$$\Gamma = 2.0875(50)\text{ns}^{-1}$$

を得た。

これら3つの測定では、いずれもポジトロニウム負イオンの生成率が0.03%以下と低かった。ポジトロニウム負イオンを大量に生成すれば、消滅率をより精度よく測定することができるはずである。

我々は近年、タングステン表面に低速陽電子ビームを蒸着すれば、ポジトロニウム負イオンが放出されることを見出した (Y. Nagashima and T. Sakai, New J. Phys. 8 (2006) 319)。清浄なタングステンを用いる場合にはポジトロニウム負イオンの生成率は炭素薄膜を用いる場合よりも低いですが、表面にセシウムを蒸着すれば、生成率が2桁も増大する (Y. Nagashima et al., New J. Phys. 10 (2008) 123029)。この生成法を利用すれば、ポジトロニウム負イオンの実験的研究を大きく展開させることができるはずである。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、アルカリ金属を蒸着したタングステンに低速陽電子ビームを入射してポジトロニウム負イオンを高効率で生成し、その消滅率を従来の測定よりも高い精度で測定することを目指した。研究期間内には(1)ポジトロニウム負イオンを高効率で長時間安定に生成する手法の開発、および(2)消滅率の測定装置の開発を行った。

間安定に生成する手法の開発、および(2)消滅率の測定装置の開発を行った。

## 3. 研究成果

(1)ポジトロニウム負イオンを高効率で長時間安定に生成する手法の開発

ポジトロニウム負イオンの消滅率の測定精度向上のためには、ポジトロニウム負イオンを効率よく、しかも長時間安定して生成することが必要である。上述のように、タングステン表面にセシウムを蒸着すれば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るが、セシウムは反応性が高いため、その効果が長続きしない。そこで、タングステンに蒸着する元素として、セシウムよりも反応性の低いカリウムおよびナトリウムを用い、セシウムを蒸着した場合との比較を行った。

東京理科大学に設置された低速陽電子ビーム発生装置の測定チェンバーに、図1のような装置を設置して、ゲルマニウム検出器で線のエネルギースペクトルを測定した。タングステンターゲットは厚さ25 $\mu\text{m}$ の薄膜で、 $2 \times 10^{-8}\text{Pa}$ の真空中で1500 $^{\circ}\text{C}$ で焼鈍した後、ナトリウム、カリウム、セシウムを1原子層蒸着した。

得られた線エネルギースペクトルを図2に示す。(a)では、ターゲットに-1kVの電位が印加されており、ターゲットから放出されたポジトロニウム負イオンが1keVに加速され、その後2光子に自己消滅する。ゲルマニウム検出器で検出される消滅線は、ドップラーシフトして通常の電子-陽電子対の消滅線のエネルギー511keVよりも高いエネルギーになる。529keVにみられるピークは、ポジトロニウム負イオンの消滅によるものである。ターゲットに-3kVを印加した場合(b)は、ポジトロニウム負イオンのエネルギーが高くなるため、ドップラーシフトが大きくなり、より高い側にシフトしている。図2から、カリウムやナトリウムを蒸着しても、

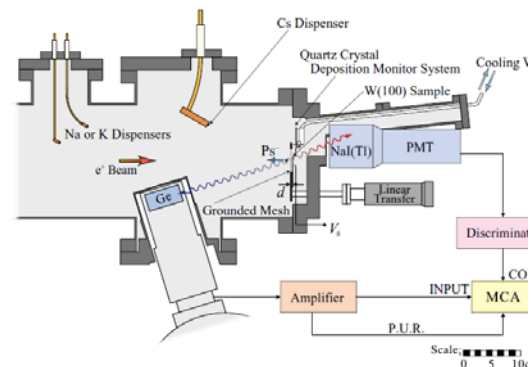


図1 ポジトロニウム負イオン検出装置 (雑誌論文)

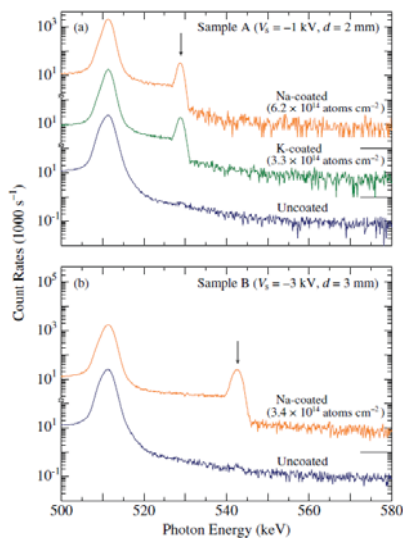


図2 線エネルギースペクトル (雑誌論文)

ポジトロニウム負イオンが大量に生成されるようになることを示している。

図3には、セシウム、カリウムおよびナトリウムを蒸着した場合のポジトロニウム負イオン放出率の時間変化の比較を示す。セシウムを蒸着した場合は半日程度でポジトロニウム負イオンの生成率が1/10になるのに対し、カリウムを蒸着した場合は、生成率が1/10になる時間が1日程度に伸びていることがわかる。ナトリウムを蒸着した場合は、6日程度に伸びている。しかも、ポジトロニウム負イオンの生成率の最大値は、1.5%程度で、セシウムを蒸着した場合の最大値よりも大きくなっている。以上のことから、ポジトロニウム負イオンの生成には、ナトリウムを

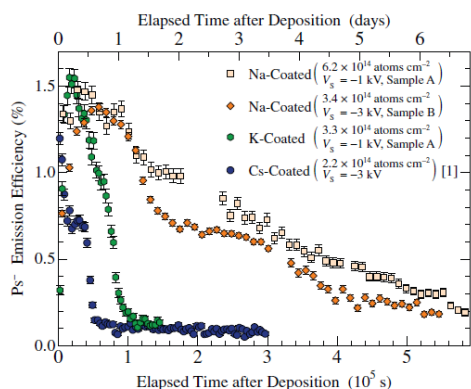


図3 アルカリ金属を蒸着したタングステン表面からのポジトロニウム負イオン放出率の時間変化 (雑誌論文)

蒸着したタングステンを用いるのが最適であることがわかる。この結果は New Journal of Physics 誌に掲載された (雑誌論文)。

## (2)ポジトロニウム負イオン消滅の測定

(1)で述べた手法を用いてポジトロニウム負イオンを高効率で生成し、その消滅率を精度よく測定することを目指した。測定精度に関する詳細な検討の後に、実験装置の製作を行った。

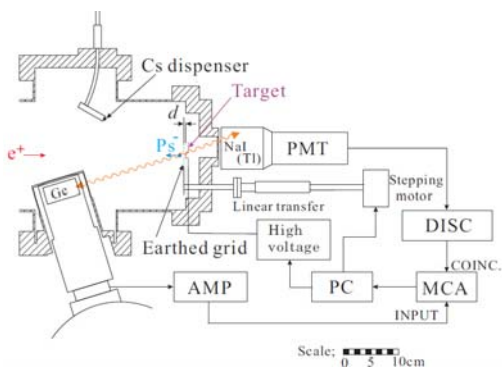


図4 ポジトロニウム負イオン消滅率測定装置。

図4に測定装置を示す。放射性同位元素<sup>22</sup>Na から放出された陽電子をタングステンメッシュ減速材で減速した後再加速して輸送し、ナトリウムを蒸着したタングステンターゲットに入射してポジトロニウム負イオンを生成する。ターゲットには電位 $V_s$ を印加し、低速陽電子ビームは接地されたタングステンメッシュを通り抜けてターゲットに入射する。メッシュとターゲットの間隔は $d$ である。ターゲットから放出されたポジトロニウム負イオンは、ターゲットとメッシュの間の電場で加速され、メッシュを通り抜ける。ポジトロニウム負イオンは数 keV に加速されても、ターゲットから1cm 以内でほとんどが消滅する。このとき放出される線をゲルマニウム検出器で検出すれば、エネルギースペクトル上にピークを形成する。そのエネルギーは

$$E = \frac{1}{1 + \lambda - \sqrt{2\lambda + \lambda^2 \cos \theta}} mc^2$$

である。ただし $\lambda = (eV_s + T_0)/3mc^2$ で、 $T_0$ はポジトロニウム負イオンのターゲットからの放出エネルギー、 $m$ は電子の質量、 $c$ は光速である。また $\theta$ は、ポジトロニウム負イオンの加速方向と線の放出方向のなす角度である。

ポジトロニウム負イオンがターゲットからメッシュに到達するまでの飛行時間 $\tau$ は、

ポジトロニウム負イオンの座標系から見れば

$$\tau = \frac{d}{2\lambda c} \left[ \ln \frac{1 + \lambda + \lambda_0 + \sqrt{(\lambda + \lambda_0)^2 + 2(\lambda + \lambda_0)}}{1 + \lambda + \lambda_0 - \sqrt{(\lambda + \lambda_0)^2 + 2(\lambda + \lambda_0)}} - \ln \frac{1 + \lambda_0 + \sqrt{\lambda_0^2 + 2\lambda_0}}{1 + \lambda_0 - \sqrt{\lambda_0^2 + 2\lambda_0}} \right]$$

と表される。ただし  $\lambda_0 = T_0/3mc^2$  である。ポジトロニウム負イオンの一部はターゲットとメッシュの間で自己消滅する。メッシュまで到達する確率は

$$\exp(-\Gamma\tau)$$

に比例する。したがって、 $d$  や  $V_S$  を変化させながらポジトロニウム負イオンのピークの強度を測定すれば、ポジトロニウム負イオンの消滅率を求めることが可能である。

$d$  を変化させるために、接地されたメッシュをリアトランスファの先端に取り付けて、ステッピングモーターで移動させる手法を採用した。ステッピングモーターとターゲットに印加する高電圧は、コンピュータで制御することが可能である。

詳細な検討の結果、ポジトロニウム負イオンの消滅率を 0.01% の精度で測定できることがわかった。

研究期間内にポジトロニウム負イオンの消滅率測定のための準備が整った。24 年内には新しい測定結果を出すことができるはずである。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

寺部宏基、満汐孝治、立花隆行、長嶋泰之、"Durable emission of positronium negative ions from Na<sup>-</sup> and K-coated W(100) surfaces", New Journal of Physics, 査読有、14 巻、2012、015003-1 - 6

長嶋泰之、満汐孝治、「最も軽い三体束縛系 - ポジトロニウム負イオンの研究 -」、日本物理学会誌、査読無、67 巻、2012 年、333 - 337 および表紙

[学会発表](計5件)

長嶋泰之、"Positronium negative ion experiments"、5th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems

(基調講演) 2011 年 6 月 22 日、物理学研究所 (セルビア)

長嶋泰之、"Spectroscopy of positronium negative ions"、27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (招待講演) 2011 年 8 月 1 日、Belfast クイーンズ大学 (英国)

長嶋泰之、"Positronium negative ions"、10th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (基調講演) Smolenice 城 (スロバキア)

鈴木卓爾、長嶋泰之、「ポジトロニウム負イオン消滅率の精密測定」、原子衝突研究会若手の会第 32 回秋の学校、2011 年 10 月 9 日、国立中央青少年交流の家 (山梨)

長嶋泰之、"Recent experiments on positronium negative ions"、International Workshop on Positrons in Astrophysics、2012 年 3 月 20 日、ミュンヘン (スイス)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長嶋 泰之 (YASUYUKI NAGASHIMA)

研究者番号：60198322

### (2) 研究分担者

立花 隆行 (TAKAYUKI TACHIBANA)

研究者番号：90449306

### (3) 連携研究者

なし。