

**ポジトロニウム負イオンの光脱離を利用した
ポジトロニウムビーム科学の展開**

The evolution of the positronium beam science using the
technique of photodetachment of the positronium negative ion

課題番号：24221006

長嶋 泰之 (NAGASHIMA YASUYUKI)

東京理科大学・理学部・教授



研究の概要

電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムのエネルギー可変ビームを生成する技術を確立する。ポジトロニウムビームは、ポジトロニウムと電子の束縛状態であるポジトロニウム負イオンを生成して電場で加速した後に、レーザー光で光脱離させることで生成する。ポジトロニウムが中性である利点を活かして、絶縁体や磁性体表面を分析する技術等を開発する。

研究分野：複合新領域

分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：電子・陽電子

1. 研究開始当初の背景

電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムは、電子を中性化した粒子とみなすことができ、そのエネルギー可変ビームが得られれば、絶縁体や磁性体最表面の研究、あるいは物理学の基礎研究の新たな展開に利用できるかと期待される。しかしながらポジトロニウムは中性であるがゆえに、電場で加速することができない。

我々は近年、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入射すると、ポジトロニウムにさらにもう一つの電子が束縛したポジトロニウム負イオンが効率よく放出されることを発見した。さらには、ポジトロニウム負イオンにレーザー光を照射して、電子を光脱離させることにも成功している。ポジトロニウム負イオンは電荷をもつため、電場で容易に加速することが可能である。それを光脱離させれば、任意のエネルギーを有するポジトロニウムを得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、このような手法を駆使して、エネルギー可変ポジトロニウムビームを生成する技術を確立する。さらに、このビームを用いて、絶縁体表面を解析する技術を開発する。

3. 研究の方法

ポジトロニウム負イオンの光脱離には、十分な強度を持つパルスレーザーが必要である。用いる陽電子ビームも、パルス状である必要がある。そこで本研究課題では、加速器を利用して得られるパルス状低速陽電子ビームと溜め込み陽電子から引き出されたパルス状陽電子ビームを用いる。

これらを用いて生成されるポジトロニウムビームを絶縁体表面にすれすれの角度で入射し、回折したポジトロニウムがつくる干渉像を観測する。

さらに、より効率よくポジトロニウム負イオンを生成する技術や、ポジトロニウム負イオンの光脱離に関する詳細なデータ、たとえば光脱離断面積の測定や光脱離で起こることが予測されている共鳴の観測を行う。

4. これまでの成果

次のような成果が得られている。

(1)高エネルギー加速器研究機構低速陽電子実験施設の線形加速器で生成されるパルス状低速陽電子ビームを利用し、エネルギー可変ポジトロニウムビームの開発に成功した。ポジトロニウムの飛行時間を測定し、ポジトロニウム負イオンの加速電場をコントロールすると任意のエネルギーのポジトロニウムビームを生成できることが示された。また、位置敏感検出器を用いてポジトロニウムビームの形状を観測した。

(2)溜め込み陽電子から得られるパルス状低

速陽電子ビームを利用したエネルギー可変ポジトロニウムビームの開発が進行中である。放射性同位元素 ^{22}Na から放出される陽電子を固体ネオンで数 eV まで減速し、さらに窒素ガスと 4 塩化炭素の混合気体を用いて熱エネルギー程度まで減速すると同時に磁場と電場で溜め込む。このような溜め込み陽電子から、電場を用いてパルス状の陽電子を引き出すことが可能である。この装置の設置がおわり、エネルギー可変ビーム生成に向けての準備が順調に進んでいる。

(3)ポジトロニウム負イオンの光脱離では、特定の波長で共鳴が起こり、断面積が急激に増大することが理論的に予測されている。この共鳴を、(1)で開発したエネルギー可変ポジトロニウムビーム装置を用いて観測することに成功した。レーザーには色素レーザーを用いて波長を変化させた。ポジトロニウムの数の波長依存性のグラフに、共鳴を示す明確なピークが現れた。ポジトロニウム負イオンの研究はその生成と消滅率測定しか行われていなかった。この共鳴の観測は、ポジトロニウム負イオンの基礎研究のひとつとして重要な意味をもつ。

(4)タングステン表面にアルカリ金属を 1 原子層以下蒸着すると、清浄なタングステン表面と比べてポジトロニウム負イオンが 2 桁も多く放出されるようになる。この原因を突き止めるために、タングステン表面に種々のアルカリ金属を蒸着して、ポジトロニウム負イオンやポジトロニウムの放出について調べる研究を行った。放出されるポジトロニウムの飛行時間測定を行い、アルカリ金属の蒸着によってポジトロニウムの生成量が増大するという結果がえられた。これは、表面近傍に伝導電子密度が低い領域が広がることで生成量増大の原因のひとつであると考えられる。ポジトロニウム負イオン生成量の増大も同様の原因によるものと考えられる。

(5)ポジトロニウム負イオンの観測による金属中陽電子拡散の研究を行った。アルカリ金属を蒸着した金属表面から放出されるポジトロニウム負イオンを電場で加速すれば、その γ 線はスペクトル上にドップラーシフトしたピークとして現れる。その強度を調べることによって、信頼性の高い陽電子拡散の研究が可能となった。

(6)低速陽電子を酸化チタン表面に入射すると、酸素正イオンが放出される現象を発見した。これは、入射した陽電子の一部が表面付近の内殻電子と対消滅してオージェ電子が放出され、電氣的に不安定になって酸素イオンが放出されたものである。同様の現象はある閾値よりも高いエネルギーをもつ電子でも起こるが、陽電子入射の場合には閾値がないという特徴をもつ。

5. 今後の計画

27 年度前半には、溜め込み陽電子を利用したエネルギー可変ポジトロニウムビーム装置を完成させる。その後、絶縁体表面の構造解析法の開発に取り組む。この方法ではポジトロニウムの量子干渉効果を見ることになるため、表面構造解析という意味のみならず量子力学の基礎としても重要である。

さらに、アルカリ金属蒸着表面における陽電子の振る舞いの研究や陽電子消滅誘起イオン脱離の研究は引き続き継続して行っていく予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

[1] “Profiles of a positronium beam produced using the photodetachment of positronium negative ions”, K. Michishio, R. H. Suzuki, K. Wada, I. Mochizuki, T. Hyodo, A. Yagishita, Y. Nagashima et al., Nucl. Intr. and Meth. In Phys. Res. A, 785 (2015) 5-8.

[2] “Experiments on positronium negative ions”, Y. Nagashima, Phys. Rep. 545 (2014) 95.

[3] “Positron-annihilation-induced ion desorption $\text{TiO}_2(110)$ ”, T. Tachibana, T. Hirayama, Y. Nagashima, Phys. Rev. B 89 (2014) 201409R.

[4] “An energy-tunable positronium beam produced using the photodetachment of the positronium negative ion”, K. Michishio, T. Tachibana, R. H. Suzuki, K. Wada, A. Yagishita, T. Hyodo, Y. Nagashima et al., Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 254102.

[5] “The simplest three body systems: positronium negative ions”, Y. Nagashima, 4th International Meeting on Frontiers of Physics, 2013 年 8 月、マレーシア、基調講演。

[6] “New development of the Ps^- studies”, Y. Nagashima, 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems, 2014 年 7 月、スロバキア、招待講演。

[7] “Photodetachment of positronium negative ions and its application to energy-tunable Ps^- beam”, K. Michishio, XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 2013 年 7 月、中国、招待講演。

その他論文、国際会議招待講演、受賞、新聞報道など多数。

ホームページ等

東京理科大学長嶋研究室のホームページ

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/ynagahp/>
本研究課題に関するホームページ

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/ynagahp/s/>