

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03416

研究課題名(和文) ポジトロニウムとヘリウムの衝突過程における散乱パラメータの精密決定

研究課題名(英文) Determination of scattering parameters in positronium-helium collisions

研究代表者

齋藤 晴雄 (SAITO, Haruo)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60235059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ポジトロニウム(Ps)は陽電子と電子からなる純レプトン系の水素様原子である。本研究の目的は、Ps-He散乱における衝突パラメータ(運動量移行断面積)を高い精度で測定することである。実験においては、Ps-Xe-Heの三元系の測定を行った。Ps-Xe散乱におけるPsのスピンの転換反応の特性を利用し、Psの運動エネルギーの時間発展を得た。長時間の測定によりデータを蓄積し、詳細に解析した。解析の結果、Ps-He衝突の運動量移行断面積として仮の値 $(12.3 \pm 1.3) \times 10^{-16} \text{cm}^2$ が得られた。用いた方法により高い精度が得られることが分かり、本研究課題の方法の有用性が実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで議論が収束していなかったPs-He散乱の理論計算のベンチマークの確立に寄与する。同時に、応用として以下2つが挙げられる。一つはPsのボーズアインシュタイン凝縮によるガンマ線レーザー開発への寄与である。この実現にはPsの冷却が本質的であるが、Ps-He衝突による冷却レートがこの研究で明らかになる。二つ目は、医療におけるPET(陽電子断層撮影法)の改良にPsの基本的パラメータが貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Positronium (Ps) is a pure leptonic hydrogen-like atom composed of positrons and electrons. The purpose of this study is to measure the collisional parameters (momentum transfer cross sections) in Ps-He scattering with high accuracy. In the experiment, we used the Ps-Xe-He ternary system, and obtained the time evolution of the kinetic energy of Ps by using the characteristics of the spin conversion reaction of Ps in Ps-Xe scattering. The data were accumulated by long time measurements and analyzed in detail. As a result of the analysis, a tentative value of  $(12.3 \pm 1.3) \times 10^{-16} \text{cm}^2$  was obtained as the momentum transfer cross section for Ps-He collisions, which is found to be highly accurate by the method used, demonstrating the usefulness of our method.

研究分野：物理学

キーワード：陽電子 ポジトロニウム 原子散乱 運動量移行断面積

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

陽電子と電子の束縛状態であるポジトロニウム原子(Ps)の相互作用は量子多体問題の一つの極限として注目されている。しかし、He ガス中におけるPsの散乱は基礎的かつ重要な研究対象にも関わらず、運動量移行断面積などの基礎的なパラメータの実験値が定まっておらず、この散乱過程を真に説明できる理論を作れずにいる。これは、時々刻々変化するPsのエネルギーを精度よく観測する決定的な方法が確立しなかったためである。これまでに発表された、Ps散乱における運動量移行断面積の値(値が大きいほど短時間で熱平衡に至る)は、理論値と実験値の間で、あるいは理論同士間でも値が2倍ほど異なっている。これは、散乱体と被散乱体の双方が内部構造を持つ場合のモデル化が未だに困難であることを示し、理論構築のベンチマークとなる基礎的かつ高精度の実験データが強く求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、Ps - Xe - He という三元系を調べる新たな測定方法で、Ps - He 散乱における運動量移行断面積の値を高精度に測定し、理論・実験にわたる長年の議論に終止符を打ち、理論構築のベンチマークとなる基礎的かつ高精度な測定データを提供することである。

### 3. 研究の方法

Ps から放出されるガンマ線はPsの状態に応じて、2本の場合と3本の場合がある。ガンマ線の総エネルギーは1.022 MeV(電子2個分の質量)に決まっているので、3本の場合は平均エネルギーが低く、信号の大きさが小さくなるので2本の場合と区別がつく。2本の場合の頻度分布を時間tの関数として $I_2(t)$ 、同様に3本の場合を $I_3(t)$ と書くと、その比が

$$\frac{I_2(t)}{I_3(t)} = \frac{\varepsilon_2 \lambda_2(t)}{\varepsilon_3 \lambda_3}$$

となる。ただし、 $\lambda_2/\lambda_3$ は2本の場合と3本の場合の検出器の感度比の違いを補正する係数(実験毎の定数)で、 $\varepsilon_3$ は真空中(周りに物質が存在しない極限)で3本のガンマ線が放出される確率(定数)、 $\varepsilon_2(t)$ は周りに物質が存在する環境で2本のガンマ線が放出される確率(時間の変数)である。この実験は左辺が測定されるので、その測定結果から、

$$\lambda_2(t) = \frac{\varepsilon_3 \lambda_3 I_2(t)}{\varepsilon_2 I_3(t)}$$

となる(K. Shibuya, ... H. Saito, *Phys. Rev. A* **88**, 042517, 2013)。また、消滅率とPsの温度(平均エネルギー)の関係は、我々の研究(K. Shibuya, ..., H. Saito, ..., *Phys. Rev. A* **88**, 012511, 2013)によって得られているので、これを用いると、Psの温度の絶対値が時間の関数として得られる。これまでに、Ps-Xeの二元系で既に結果を得ているが、これにHeを加えてPs-Xe-Heの三元系にすると、Psの運動エネルギーは下方にシフトして現れるはずであり、そのシフト量を解析することでPs-He衝突のパラメータ(運動量移行断面積、散乱長、有効到達距離)が求められる。

### 4. 研究成果

実験装置の概略図を図1に示す。陽電子源として $8.9 \times 10^4$  Bq (0.75  $\mu$ Ci)の放射性同位元素 $^{22}\text{Na}$ を用いた。 $^{22}\text{NaCl}$ をチタン箔(10 mm  $\times$  10 mm)に堆積し、陽電子 - Ps変換材料である $0.1 \text{ g cm}^{-3}$ のシリカエアロゲル(40 mm  $\times$  20 mm)2つによってサンドイッチした。このPs発生部(サンドイッチされたシリカエアロゲル)をステンレス鋼のチェンバー(44 mmの円筒形)内に配置し、ターボ分子ポンプ、圧力計、及び、ガスポンペを接続した。試料ガスとして、Xe - He混合ガス(He 10%, SPECTRA GASES)を使用した。測定は室温下で行われ、総測定時間を通して実験系の周囲温度は $(2.90 \pm 0.05) \times 10^2$  Kであり、ガスの圧力は $(2.70 \pm 0.05) \times 10^2$  kPaであった。寿命スペクトルの $t = 0$ を定義するための陽電子生成のタイミング(start信号)は、陽電子生成と同時に(放出から3 ps程度後)に放出される1275 keVの核 $\gamma$ 線によって取った。start信号の検出にはBaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器(光電子増倍管:H3378-51, Hamamatsu Photonics)を用いた。陽電子消滅(Ps消滅)のタイミング(stop信号)は、2光子消滅または3光子消滅において放出される511 keV以下の消滅 $\gamma$ 線によって取った。stop信号の検出にはLaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレーション検出器((i) LaBr<sub>3</sub>(Ce)結晶: SAINT-GOBAIN Crystals; (ii) 光電子増倍管:H3378HQE, Hamamatsu Photonics)を用いた。これら2つの $\gamma$ 線検出器は、チェンバーから放出される $\gamma$ 線を検出するために、検出面に被せられたキャップからチェンバー外面までの距離が20 mmの位置に置いた。また、start信号の検出器とstop信号の検出器は互いに直角になるように配置した。BaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器ではstart信号のタイミングを取ったのに対し、LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレーション検出器ではstop信号の2つの情報を取得した。1つはstop信号のタイミングであり、もう1つはstop信号のエネルギーの大きさである。エネルギーの大きさは信号の積分(面積)の解析によって取得した。BaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器によって測定されたstart信号の出力は分岐させて2

つの回路に転送した。1 つは 2.5 GHz サンプリングの 8-bit デジタル・オシロスコープ (WaveRunner 6050、LeCroy) であり、もう 1 つは NIM モジュールである。NIM モジュールは ディスクリミネータ (N-TM415、Technoland)、ゲート・ディレイ・ジェネレータ (KN1500、Kaizuworks) 及び、コインシデンス回路 (RPN-130、REPIC) で構成した。LaBr<sub>3</sub>(Ce) シンチレーション検出器によって測定した stop 信号の出力もまたオシロスコープと NIM モジュールに転送した。NIM モジュールでは、まずディスクリミネータにより、アナログの調節ねじで設定した閾電圧 (閾波高) 以上の信号のみロジック信号が出力されるようにした。この方法により start 信号、stop 信号それぞれについてコンプトン散乱に由来する信号などの不要な信号の多くがカットされた。start 信号については核線のコンプトン散乱だけでなく消滅線の光電吸収に由来する信号の多くもカットされるように設定をした。次にゲート・ディレイ・ジェネレータにより start 信号、stop 信号をロジック信号にそれぞれ変換する時のディレイ、及び、信号の幅が調整された。最後に、start 信号由来のロジック信号 (直接オシロスコープに入力した信号と比べてディレイ 100 ns 程度、幅 2 μs 程度の信号) と stop 信号由来のロジック信号 (ディレイ 300 ns 程度、幅 20 ns 程度の信号) の同時入力を引き起こすコインシデンス回路からの出力信号により、オシロスコープのトリガーを引き、デジタル化された start 信号と stop 信号の波形データを記憶媒体 (ポータブル HDD) に転送し、記録した。以上の実験操作によって総測定時間 280980 秒をかけて蓄積したデータを解析に使用した。解析に使用したイベントの総数は 5001084 counts であり、この中から目的とする陽電子消滅 (Ps 消滅) イベントの波形を自作の波形解析プログラムによって選別した。

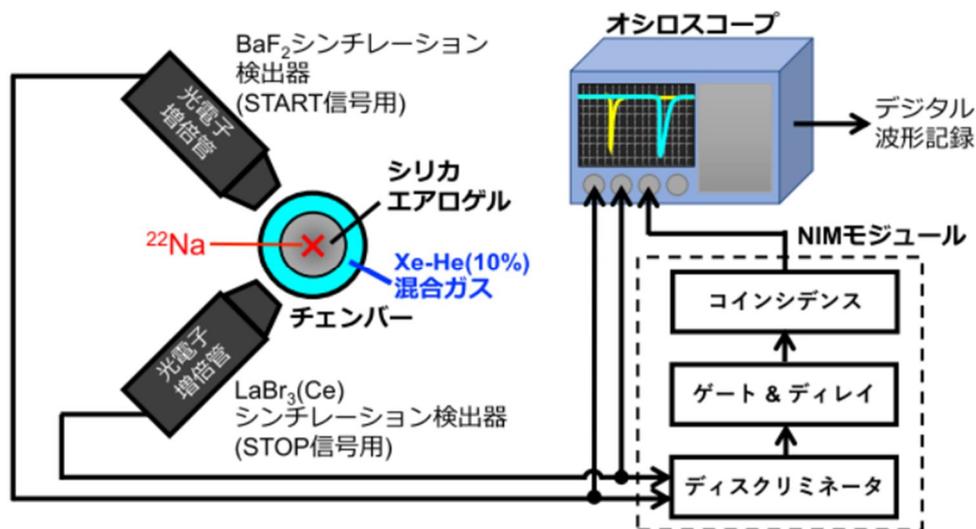


図 1 : 実験装置の概略図。

得られた Ps の熱化曲線を図 2 に示す。Sauder (1968) の古典弾性散乱モデルによれば、Ps の熱化曲線は

$$E(t) = E_{th} \coth^2\left(\frac{t}{\beta} + t\right)$$

という理論式により記述される。ここで、 $E_{th}$  は熱化後の Ps エネルギーである。

$$E(0) = E_{th} \coth^2\left(\frac{1}{\beta}\right)$$

を満たす定数、すなわち

$$\beta = \coth^{-1}[E(0)/E_{th}]^{1/2}$$

である。

$$\beta = p_{th} \left( \frac{\sigma_m^{Ps-He} n_{He}}{M_{He}} + \frac{\sigma_m^{Ps-Xe} n_{Xe}}{M_{Xe}} + \frac{1}{L_{silica} M_{silica}} \right)$$

からなる。ここで、 $p_{th}$  は熱化後における Ps の運動量の大きさである。また、 $M_{atom}$  は原子の質量、 $n_{atom}$  は原子の数密度であり、 $\sigma_m^{Ps-atom}$  は Ps - 原子衝突の運動量移行断面積である。 $L_{silica}$ 、 $M_{silica}$  は衝突におけるシリカエアロゲルの有効到達距離、有効質量であり、Shibuya et al. (2013) より室温で  $\beta_{silica} = 6.2(7) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  である。を構成する各成分のうち、 $\sigma_m^{Ps-He}$  以外は既知である。よって、フィッティングにより  $\beta$  を求め、 $\sigma_m^{Ps-He}$  について解くことで Ps - He 衝突の運動量移行断面積を求める。実験から得た  $E_{Ps}(t)$  では、 $t = 0 \text{ ns}$  の前後ではなく、 $t = 0.4 \text{ ns}$  の前後で極大となっているため、式 (4.35) のフィッティング関数の原点は

$$E_{fit}(t) = E_{th} \coth^2\left(\frac{t}{\beta} + (t - 0.4 \text{ ns})\right)$$

のようにして  $t = 0.4$  ns の位置にずらした。この式に対して 10.4 ns から 294.8 ns の範囲でフィッティングしたところ、パラメータとして

$$= 0.581 \pm 0.021$$

$$= 30.1 \pm 1.2 \mu\text{s}^{-1}$$

という結果を得た。reduced chi-square  $\chi^2 / \nu$  [  $\chi^2$  を自由度 (= フィッティングに使った点の数 - フィッティングパラメータの数) で割ったもの] は 0.91 であった。Shibuya et al. (2013) より  $\sigma_m^{\text{Ps-Xe}} = 12(2) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  であることから、 を構成する成分の既知量を用いて Ps - He 衝突の運動量移行断面積  $\sigma_m$  を求めると

$$\sigma_m^{\text{Ps-He}} = (12.3 \pm 1.3) \times 10^{-16} \text{ cm}^2 = (14.0 \pm 1.4) a_0^2$$

となった。ここで  $a_0 = 5.29177210903(80) \times 10^{-11} \text{ m}$  はボーア半径である。

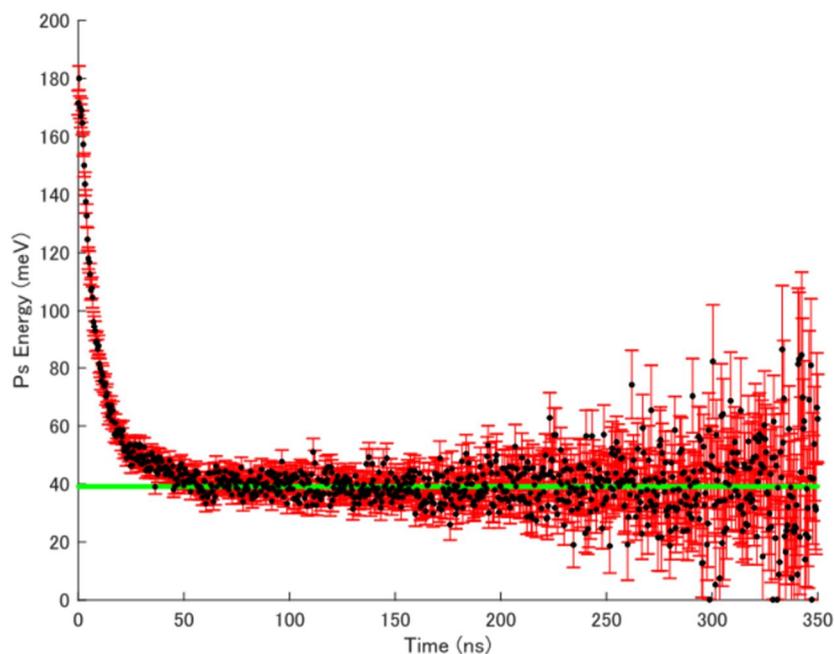


図 2 : Ps の運動エネルギーの時間発展。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shibuya Kengo, Saito Haruo, Tashima Hideaki, Yamaya Taiga	4. 巻 67
2. 論文標題 Using inverse Laplace transform in positronium lifetime imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 025009 ~ 025009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6560/ac499b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 竹内 啓志、澁谷憲悟、 齋藤晴雄
2. 発表標題 ポジトロニウム ヘリウム衝突における運動量移行断面積の測定
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会 「陽電子科学とその理工学への応用（2021年）」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澁谷憲悟、齋藤晴雄、錦戸文彦、高橋美和子、山谷泰賀
2. 発表標題 Dissolved oxygen sensing by positronium for hypoxia PET
3. 学会等名 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澁谷憲悟
2. 発表標題 Oxygen sensing ability of positronium
3. 学会等名 The 1st 1st Symposium on Theranostics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澁谷憲悟、齋藤晴雄、錦戸文彦、田島英朗、高橋美和子、山谷泰賀
2. 発表標題 p02 measurement using positronium
3. 学会等名 2021 Virtual IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (IEEE NSS/MIC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	澁谷 憲悟 (SHIBUYA Kengo)  (20415425)	東京大学・大学院総合文化研究科・助教   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------