

令和元年6月19日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17771

研究課題名(和文)低エネルギー領域におけるポジトロニウム-原子相互作用の解明とキセノン問題の解決

研究課題名(英文) Analysis of positronium-xenon interaction in the ultra-low energy region for solving 'Xe puzzle'

研究代表者

澁谷 憲悟 (Shibuya, Kengo)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：20415425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：陽電子と電子の束縛状態であるポジトロニウム原子(Ps)は多くの不活性ガス中で形成され、その形成率はガスの原子番号と共に増大する。しかし、例外的にXeガス中では形成率が僅か数%と低く、その原因が不明なため「Xe問題」と呼ばれてきた。筆者は、Xe中でPsが形成されにくいのではなく、Psのスピン転換という、これまで知られていなかった消滅経路より、多くのPsが熱平衡到達以前に失われた為に過少評価された、と仮定し実験と計算の両面から検証した。測定データを部分波展開の方法で解析した結果、見かけ上のPs形成率が2.8%、真の形成率が29%と判明し、遂にXe問題を解決。更に、その背景にある物理も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験と数値計算を駆使してPs形成率の真値を求めて上記「Xe問題」を解決するとともに、その背景にあるスピン転換反応や原子分子散乱の物理を明らかにした。波及効果として(1)陽電子の生成から消滅に至る過程[銀河中心から放出されるガンマ線、PET(陽電子放射断層撮像)等]の理解に不可欠なPsと物質の相互作用の基礎データを示した。(2)多くの理論家が取り組むPs散乱のモデル計算の適否を判定する指針として期待される、散乱長、有効ポテンシャル、運動量移行断面積等の実験値を示した。(3)電磁量子力学の検証の系統的な不確かさの要因である、測定時のPsのエネルギー状態と真の平衡状態との乖離を見積もる基準を示した。

研究成果の概要(英文)：Positronium (Ps) is a hydrogen-like atom consists of an electron and its anti-particle, i.e., a positron. The atom can be formed in many kinds of inert gases and the formation probability increases as the atomic number of the gas molecule increases. The exception is Xe gas in which the probability is only a few percent and it is called 'Xe puzzle' as the cause has been left unknown.

The author assumes that the Ps formation probability is not low in Xe, but it is underestimated because of another avenue for Ps quenching. The avenue has not been recognized for a long time, but it is open due to spin-orbit interaction converting the Ps spin states (from spin-triplet Ps to spin-singlet Ps).

The author examined this hypothesis from both sides of the experiments and simulations. The analysis was based on a partial-wave expansion method. As a result, the apparent value of Ps formation probability is found to be 2.8%, and the true one is found to be 29%. The 'Xe puzzle' is successfully solved.

研究分野：陽電子物理、原子衝突

キーワード：陽電子 ポジトロニウム スピン転換反応 スピン軌道相互作用 キセノン 原子分子散乱 ガンマ線 部分波展開

1. 研究開始当初の背景

陽電子（電子の反粒子）と電子からなる水素様原子を、ポジトロニウム (Ps) という。大気圧程度のガス中に陽電子が放出されると、陽電子は高々100 ns 程度の極めて短い時間内に運動エネルギーを失って熱平衡に達するが、その過程でガス分子から電子を奪い Ps を形成し得る。その確率はガスの原子番号とともに増大すると考えられ、実際、ほとんどの不活性ガスがその傾向を示す。しかし、Xe では例外的に僅か3% (He の 1/10) 程度しか形成されないことが発見され、その原因が不明であることから、長らく「Xe 問題」あるいは「Xe パズル」と呼ばれてきた。本研究は、この「Xe パズル」を解き、その背景にある未知の物理を明らかにする。

一方、2006 年に筆者の所属研究室で Ps の散乱に伴う新しい反応が発見された[1]。それは、Ps と比較的原子番号の大きなガス分子 (Xe 等) の散乱において、Ps のスピン状態が変化するスピン転換反応で、その反応が起きる原因はスピン-軌道相互作用である。もし、寿命の長いスピン三重項の Ps (固有寿命~100 ns) が寿命の短いスピン一重項の Ps (同~100 ps) にスピン転換するならば、熱平衡に達するまで生き延びる Ps 数が少なくなり、見かけ上、Ps 形成率は低くなる。

以上のことから、筆者は、Xe ガス中での Ps 形成率が低いのではなく、形成された Ps がスピン転換という、これまで知られていなかった消滅経路を通じて失われたことで、形成率が過少評価されていると考えた。この仮説を実験と数値シミュレーションの両面から検証し、更に、これまで知られていなかった Ps スピン転換反応の性質を明らかにする。

2. 研究の目的

本研究は、形成された Ps がスピン転換反応を経て熱平衡に達する前に消滅し、その結果、Ps の形成率が過少評価されてきたと仮定し、実験、データ解析、およびそれらの結果に基づく数値シミュレーションを駆使して Ps 形成率の真値を求め、スピン転換反応が「Xe パズル」の鍵であったことを、定性的・定量的に示す。また、その背景にある未知の物理を明らかにする。

更に、波及効果として、

- (i) 陽電子の生成から消滅に至る過程は、銀河中心から放出されるガンマ線の解析や、がん診断に用いられる PET (陽電子放射断層撮像) 等の、基礎より応用に至る多様な分野で議論される [2, 3]。これらの陽電子が関与する事象では、陽電子の全過程を理解するために、Ps と物質との相互作用に関するデータが欠かせない。何故ならば、陽電子が電子との衝突により直ちに消滅する確率よりも、準安定状態である Ps を形成してから消滅する確率の方が高いからである。本研究は、Ps と物質の相互作用の基本である、Ps の原子・分子散乱のデータを提供する。
- (ii) Ps は電子 2 個分の質量を持つ最も軽量な「原子」であることから、原子・分子相互作用の本質を理解するための一極限として、多くの理論家が計算に取り組んでいる [4-8]。しかし、結果が大きくモデルに依存するため、モデルの適否を判定する指針として用いられる信頼性の高い実験データが必要とされている。本研究は、散乱長、有効ポテンシャル、運動量移行断面積など、散乱を理解するためのパラメータの実験値を提供する。
- (iii) Ps はハドロンを含まない純レプトン系のエキゾチック原子であることから、電磁量子力学の検証に好適である。しかし、Ps が物質との相互作用により徐々にエネルギーを失う熱化過程が完了しているのか否かが、理論値と実験値を比較する際の不確かさの最大要因となっている [9]。本研究は、Ps の物質との相互作用の確率 (断面積) をエネルギーの関数として示し、測定時の Ps のエネルギー状態と真の平衡状態との乖離を見積もる基準を提供する。

等が期待される。

3. 研究の方法

(1) 実験方法

図 1 に本研究で構築した測定系を示す。中央のステンレス製チェンバの中心に ^{22}Na 線源があり、その周りを密度 0.1g/cc のシリカエアロゲルが覆っている。 ^{22}Na の β^+ 壊変で生じた陽電子は、シリカエアロゲルの微粒子中で Ps を形成し、その表面からシリカエアロゲルの空隙へと放出される。Ps はその空隙中でガス分子との相互作用を繰り返し、最終的に γ 線に崩壊する。 γ 線はチェンバ壁を透過して、周囲のシンチレーション検出器へと入射する。検出器の一つは高性能の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 結晶を搭載し、その高いエネルギー分解能によって、 γ 線の崩壊モード (2 光子消滅/3 光子消滅) を見分けることができる。シンチレーション検出器の出力信号は、同時計数回路とデジタルオシロスコープへ分配され、同時計数回路で生成したトリガー信号を受けて、デジタルオシロスコープで波形が記録される。この波形は PC で事後的に解析され、Ps の生存時間や崩壊モード等のイベント情報が抽出される。Ps の生存時間を横軸としてイベ

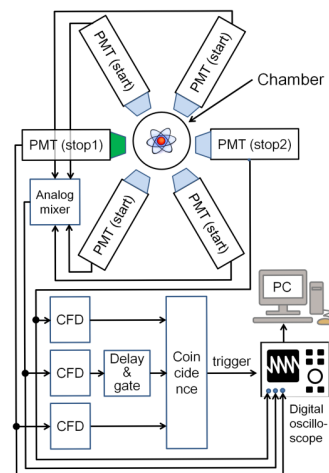


図 1: 測定系の模式図

ント数のヒストグラム(寿命スペクトル)を作成すると、そのグラフの、裾部分の勾配の大きさから Ps の消滅率が求められる。更にこの測定を異なる測定条件(ガス密度、磁場、温度等)で繰り返し行えば、消滅率の内訳やそのエネルギー依存性などの詳細が分かり、「Xe パズル」を解くための情報となる。

(2) 解析方法

Ps とガス原子の散乱を部分波展開の方法で解析する。このモデルでは Ps が標的原子より十分遠方より平面波で入射し、標的原子の球対称ポテンシャルで散乱されると考える。平面波は球面調和関数で展開すると角運動量 L の部分波の和であること、また L はポテンシャルから受ける中心力作用に対する保存量であることから、散乱の全体像を各部分波散乱の和として考えることができる。

ここで Ps のスピン転換反応は $L=0$ (s 波散乱) で禁制である[4, 10]ことを加味すると、スピン転換反応を経る Ps の消滅率を規格化した値 ${}^1Z_{\text{eff}}^{\text{sc}}$ は、Ps の運動エネルギーの関数として、

$${}^1Z_{\text{eff}}^{\text{sc}}(K) = \frac{c^3}{4\pi} f_{\text{sc}} \int \rho(K) \left\{ \sum_{L=1}^{\infty} \sigma_L(k) \right\} K dK \quad (1)$$

と書ける。ここで、 K は Ps のエネルギー(原子単位系の波数)、 f_{sc} は散乱 1 回当たりの消滅率、 ρ は熱化した Ps のエネルギー分布(マクスウェル・ボルツマン分布)、および σ_L は角運動量 L の部分波の弾性散乱断面積である。 $L=0$ を除いて $L=1$ から σ_L の総和を取るの、上記選択則による。また、各部分波の位相シフトを δ_L (ポテンシャルに引き込まれると位相が進んでプラスに、ポテンシャルに押し出されると位相が遅れてマイナスになる値)とすると、部分波展開の一般論として、

$$\sigma_L(K) = 4\pi K^{-2} (2L+1) \sin^2 \delta_L(K) \quad (2)$$

である。 δ_L の具体的な表式は、ポテンシャルの形状によるが、Ps とガス原子の相互作用を支配する遠距離力がファンデルワールス力(ポテンシャルが距離の-6 乗に比例する)の場合における、Hinckelmann ら[11]および Ganas[12]の結果を採用した。まず、これらの文献に示された $\delta_L(K)$ の表式を式(2)に代入して $\sigma_L(K)$ の形状を定め、次にその σ_L を式(1)に代入すると、スピン転換消滅率のエネルギー依存性を示すモデル曲線 ${}^1Z_{\text{eff}}^{\text{sc}}(K)$ を得る。その曲線形状を「(1) 実験方法」に基づき測定したデータに当てはめることで、散乱を特徴付けるパラメータ(散乱長、有効ポテンシャル、運動量移行断面積等)の実験値を決定する。

4. 研究成果

(1) Ps-Xe 散乱の解析結果

図 2 に、式(1)(2)を用いたデータ解析結果を示す。

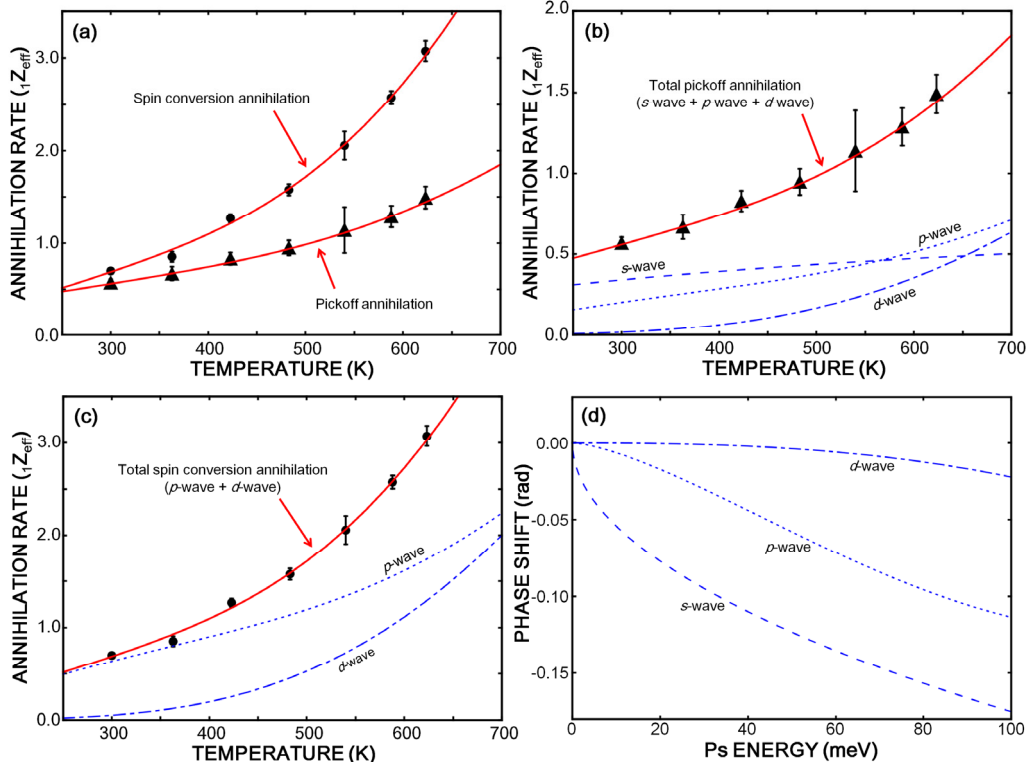


図 2: (a) スピン転換を経た Ps の消滅率 (●) とそれ以外の経路(ピックアップ)による Ps の消滅率 (▲) と温度依存性, (b) 角運動量 L による ▲ の内訳 ($L=0,1,2$), (c) 角運動量 L による ● の内訳 (同), および (d) 各部分波の位相シフト。

図 2(d) は各部分波 ($L=0,1,2$) の位相シフト $\delta_L(K)$ を示す。100 meV 以下の超低エネルギー領域でも、 $L=1$ (p 波散乱) が有為な影響を持つ。これは、スピン転換反応を経る Ps の消滅が、室温付近でも優勢であることに対応している。この曲線は、銀河中心から放出されるガンマ線の解析や、がん診断に用いられる PET (陽電子放射断層撮像) 等の陽電子の生成から消滅に至る全過程を議論する際に、その基礎データとして用いられる。

次に、 $\delta_L(K)$ を式 (2) に代入して弾性散乱断面積 $\sigma_L(K)$ を求め、これを更に式 (1) へ代入して図 2(a) ~ (c) を得た。図 2(b) と (c) に示す p 波散乱と d 波散乱のグラフの形状は等しく、縦軸の倍率のみが異なる。これは、それぞれの消滅確率が弾性散乱断面積に比例 (スピン転換消滅における $L=0$ の禁制を除く) するとして説明が可能であること意味する。また、(c) には s 波散乱が表示されないが、これは選択則による。

図 2(b) のピックアップ消滅率は、室温付近でほぼ温度に比例して増大するが、これは s 波、p 波、および d 波を重ね合わせた結果である。一方、図 2(c) に示したスピン転換反応を経る Ps の消滅は、その確率が室温付近でほぼ温度の 2 乗に比例して増大する。これは主に p 波散乱の基本的な性質を反映しているが、d 波の寄与も無視できないことが明らかとなった。

以上の解析により、Ps-Xe 散乱における散乱長はボーア半径を単位として 2.06 ± 0.10 、有効ポテンシャルを 16.2 ± 0.8 と、それぞれの実験値を定めた。これらの値は、理論モデルの適否を判定するための指標として用いられる。例えば、Mitroy ら [5] や Gribakin [6] らファンデルワールス力を加味した場合と、加味しない場合の 2 通りの計算結果を示しているが、本結果と比べると後者の方が近い値となっている。これは、Xe の球対称ポテンシャルは Ps に対して斥力として作用しており、ファンデルワールス力がその斥力を部分的に打ち消しているが、散乱長の値が負になるほどファンデルワールス力が強くはないと解釈できる。

このように散乱実験の結果を部分波分解で解析できたのは、スピン転換反応を経る Ps の消滅が s 波散乱で禁制との選択則をうまく利用したからである。言い換えれば、スピン転換反応を測定すれば全散乱のうち $L \geq 1$ の成分 (特に p 波散乱) のみを選択的に抽出できる点が、広く行われている電子散乱実験と比較して非常にユニークである。これは、s 波散乱が支配的な低エネルギー領域でも成り立つため、今後、この特徴を活かした新しい原子・分子散乱の研究手法の確立へと発展させる。

以上の成果を集約した論文が、2018 年 2 月に Physical Review A 誌に掲載された [10]。また、同 8 月に米国オーランドで開催された国際会議、[18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18)] にて口頭発表を行った。それらの結果、2019 年 7 月にセルビア・ベオグラードで開催される国際会議、[The 10th International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & The 11th International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL 2019)]、および仏国ドービルで開催される国際会議、[The 31st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2019)] にて、それぞれ招待講演に選ばれている。

(2) 陽電子寿命スペクトルと「Xe パズル」の解答

次に、実験方法 (室温、10 気圧) に基づいて測定した陽電子寿命スペクトルの片対数プロットを、図 3 に示す。なお、以降の記述には未発表の暫定値も含む。

図 3 のスピン三重項 Ps に起因する陽電子寿命スペクトルの裾部分の面積 (1.40×10^5) を $4/3$ 倍してスピン一重項 Ps の寄与を加えると、Ps を形成してから消滅した陽電子の“見かけ上の個数”は 1.87×10^5 である。また、全イベント数は 6.78×10^6 であるから、“見かけ上の Ps 形成率”は 2.8% である。これは He ガスにおける形成率 23% の $1/10$ 程度であり、既報と一致する。

一方、(1) の解析結果より、熱化が完了するまでにスピン転換により失われる Ps の割合は 9.62% であるから、この割合により“見かけ上の Ps 形成率”を割り戻すと、“真の Ps 形成率”は 29% である。これは、ガス中における Ps の形成確率がガスの原子番号とともに増大する、との一般則に従うものである。

以上のように、本研究では長年の謎であった「Xe パズル」を定性的・定量的に解決することができた。更に、その原因であるスピン軌道相互作用による Ps スピン転換反応の物理を明らかに、その選択則を利用した原子分子散乱の新しい研究手法の糸口を見出した。

これらの成果も 2019 年 7 月以降、順次発表される。

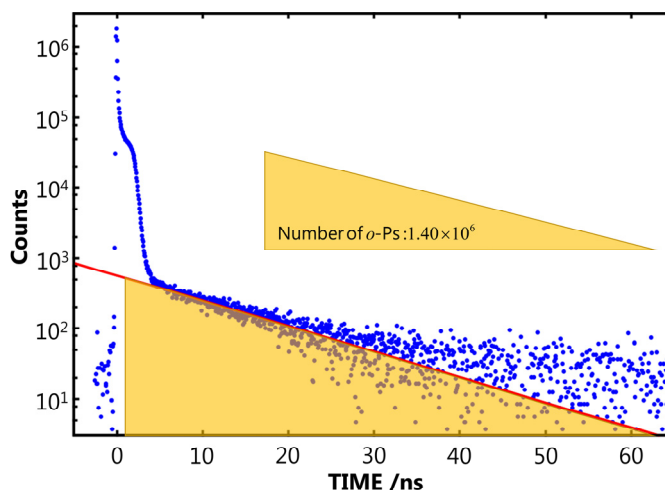


図 3: 陽電子寿命スペクトル

図 3 のスピン三重項 Ps に起因する陽電子寿命スペクトルの裾部分の面積 (1.40×10^5) を $4/3$ 倍してスピン一重項 Ps の寄与を加えると、Ps を形成してから消滅した陽電子の“見かけ上の個数”は 1.87×10^5 である。また、全イベント数は 6.78×10^6 であるから、“見かけ上の Ps 形成率”は 2.8% である。これは He ガスにおける形成率 23% の $1/10$ 程度であり、既報と一致する。

参考文献

- [1] H. Saito and T. Hyodo, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 253402 (2006).
- [2] R. E. Lingenfelter, et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 031301 (2009).
- [3] F. Blanco, et al., *J. Phys. B* **49**, 145001 (2016).
- [4] J. Mitroy and S. A. Novikov, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 183202 (2003).
- [5] J. Mitroy and M. W. J. Bromley, *Phys. Rev. A* **67**, 034502 (2003).
- [6] G. F. Gribakin, et al., *J. Phys. B* **49**, 064004 (2016).
- [7] A. R. Swann and G. F. Gribakin, *Phys. Rev. A* **97**, 012706 (2018).
- [8] R. S. Wilde and I. I. Fabrikant, *Phys. Rev. A* **98**, 042703 (2018).
- [9] A. Ishida, et al., *Hyperfine Interact.* **212**, 133 (2012).
- [10] K. Shibuya and H. Saito, *Phys. Rev. A* **97**, 052702 (2018).
- [11] O. Hinckelmann and L. Spruch, *Phys. Rev. A* **3**, 642 (1971).
- [12] P. S. Ganas, *Phys. Rev. A* **5**, 1684 (1972).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, “Partial-wave analysis for positronium-xenon collisions in the ultralow-energy region”, *Phys. Rev. A.*, vol. **97**, pp. 052702 1-10, 2018.5. (査読有り原著論文)
2. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, “Low-Energy Ps-Xe Scattering Analyzed Using a Modified Effective Range Theory”, *Mat. Sci. Forum.*, vol. **373**, pp. 23-28, 2017.3 (査読有り会議録)
3. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「スピン軌道相互作用によるポジトロニウムスピン転換反応 ～「Xe 問題」解決への道のりと新しい原子散乱研究への糸口～」, *陽電子科学*, vol. **7-1**, pp. 61-70, 2016.9. (解説記事)

[学会発表] (計 12 件) (うち予定 3 件)

1. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, “Partial-wave analysis for Ps-Xe scatterings at ultra-low energy”, The 31st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2019), Centre International de Deauville, Deauville, France, Jul. 23-30, 2019.7. (予定: 招待講演)
2. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, “Partial-Wave Analysis for Positronium-Xenon Collisions: An Optical Potential Approach”, The 10th International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics & The 11th International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL 2019), Serbian Academy of Sciences and Art, Belgrade, Serbia, Jul. 18-20, 2019.7. (予定: 招待講演)
3. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「光学ポテンシャルおよび複素位相シフトによる Ps-Xe 散乱の解析」, 第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京大学弥生キャンパス, 文京区, 2019.7. (予定)
4. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「低エネルギー Ps-Xe 散乱の部分波解析」, 京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, 京都大学原子炉実験所, 大阪府泉南郡熊取町, 2018.12.
5. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, “Total and momentum transfer cross sections for Ps-Xe elastic scatterings in ultra-low energy regions”, The 18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18), Sheraton Lake Buena Vista Resort, Orlando, USA, August 19-24, 2018.8.
6. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「部分波展開による超低エネルギーポジトロニウム-Xe 散乱の解析」, 第 54 回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京大学弥生キャンパス, 文京区, 2017.7.
7. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「超低エネルギー領域におけるポジトロニウム-Xe 散乱の部分波展開による解析」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 豊中市, 2017.3.
8. 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「He ガス中でのポジトロニウムの消滅率と温度との関係 III」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 豊中市, 2017.3.
9. 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「部分波解析結果に基づく Xe ガス中の陽電子寿命スペクトル計算」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 金沢市, 2016.9.
10. 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「He ガス中でのポジトロニウムの消滅率と温度との関係 (2)」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 金沢市, 2016.9.
11. 澁谷憲悟, 「(若手奨励賞受賞記念講演) スピン軌道相互作用によるポジトロニウムスピン転換反応の基礎研究と原子衝突への展開」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 仙台市, 2016.4.
12. 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 「He ガス中でのポジトロニウムの消滅率と温度との関係」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学泉キャンパス, 仙台市, 2016.4.

[その他]

研究室ホームページ

Saito Laboratory: Experimental Physics on Positron (e^+) and Positronium (Ps)
<http://positron.c.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：齋藤 晴雄

ローマ字氏名：(SAITO, haruo)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。