

平成30年 5月15日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03703

研究課題名(和文) スピン転換反応を利用したポジトロニウムと原子分子の散乱過程の解明

研究課題名(英文) Application of spin conversion reactions of positronium for analyzing the atomic scatterings

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) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：我々が06年に発見したポジトロニウム(Ps)のスピン転換反応は、角運動量が0のs波散乱では禁制であることを利用し、100ミリ電子ボルト以下の超低エネルギーPs-原子散乱過程を解析した。陽電子消滅放射線の同時計数装置を構築し、希ガス中のPs消滅率および運動量移行断面積を求めて部分波解析を行い、Ps-Xe散乱の散乱長をボーア半径の2.06倍と求めた。これは、散乱を支配する長距離力は引力(ファンデルワールス力)であるが、Xeのポテンシャルは全体としてPsに斥力を及ぼすことを意味する。この結果は定性的には理論と一致するが、定量的には20%程度の違いがあり、理論・実験の両面から更なる検討を要する。

研究成果の概要(英文)：We have studied atomic scatterings of positronium (Ps) in the ultra-low-energy region less than 100 meV by using Ps spin-conversion reaction which is forbidden in the s-wave scatterings ( $L=0$ ). We have analyzed the data of the Ps annihilation rates and the momentum transfer cross-section in gaseous xenon obtained by our new positron annihilation spectrometer by means of a partial-wave expansion method. We have determined the Ps-Xe scattering length to be 2.06 a.u., which indicates that the Xe potential push out the Ps wave and delays the phase while the long-range interaction is van der Waals force. This results are qualitatively consistent with some theoretical predictions; however, some quantitative discrepancies are remained to be studied in the future works.

研究分野：陽電子物理学

キーワード：陽電子 ポジトロニウム スピン軌道相互作用 スピン転換 原子衝突 散乱長 部分波解析

### 1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウム (Ps) は電子と陽電子の水素原子様束縛状態であり、電子と陽電子の対消滅により複数本の線に崩壊する。消滅線には、保存則により多くの情報が保持されている。この消滅線を解析するという反物質に固有な手法で原子・分子散乱の研究に臨み、Ps と原子・分子の散乱に関する物理を実験的に解明する。

この手法が時宜たる背景は二つある。一つは我々自身による Ps のスピン転換反応の発見[1]である。もう一つは、サブナノ秒の高速現象を取り扱う測定技術の進歩である。

まず、Ps のスピン転換反応とは、Ps には電子と陽電子のスピンが平行な三重項 Ps と反平行な一重項 Ps とがあるが、Ps が Xe のような原子番号の大きな原子と散乱する際に、スピン - 軌道相互作用によって三重項 Ps が一重項 Ps にスピン転換される現象である(図1)。一重項 Ps の寿命は三重項 Ps の寿命の約 1/1000 であり、このスピン転換反応は Ps の消滅率の増大として観測される。

最近の研究で、このスピン転換反応の速度定数が Ps のエネルギーに著しく依存することを見出し[2]、逆に、消滅率から Ps のエネルギー等が求まる事に思い至った[3]。

スピン軌道相互作用によるPsスピン転換の模式図

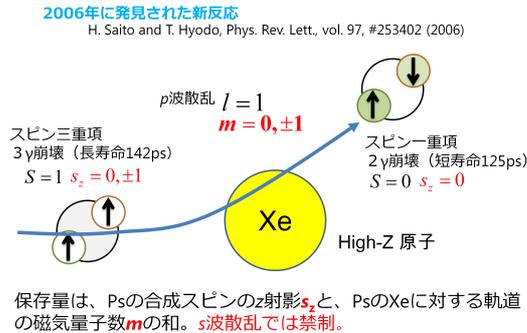


図1: Ps のスピン転換反応

次に、測定技術の進歩である。Ps の寿命は高々 100 ns 程度であり、この消滅線を高い時間分解能とエネルギー分解能とを両立して計測する事は容易ではなかった。しかし、7~8 年ほど前から両分解能を同時に満足し得る LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレータ結晶が市販されるようになり、エネルギー分解能に優れた検出器と時間分解能に優れた検出器を併用する必要がなくなった。この LaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器を、研究室で蓄積してきたデジタル波形処理技術と組み合わせることで、本研究課題である「Ps のスピン転換反応を利用した Ps - 原子・分子衝突過程の研究」の道が開ける。

本研究は、我々が新しく発見した反応と信号処理技術の蓄積、更に新しい放射線検出器が相まって実現したものであり、従来法に比べてエネルギー分解能で約 80 倍、感度で約 6 倍の利得をもって、「Ps のスピン転換反応を利用した Ps - 原子・分子散乱の研究」を

推進する。

### 2. 研究の目的

我々が発見した「スピン - 軌道相互作用による Ps のスピン転換」という Ps の新しい反応経路[1]を糸口として、この反応断面積のエネルギー依存性から、Ps - 原子・分子散乱を支配する散乱長、有効ポテンシャル、運動量移行断面積等の衝突パラメータを高精度に求める。Ps が極めて短寿命であること、Ps が中性の複合粒子であること等から、実験も計算も容易ではなく、Ps-He 散乱のように標的が比較的単純な系でも、報告値が数倍異なっているため、高精度な測定値は強く求められている。

### 3. 研究の方法

始めに Ps の新しい反応である Ps のスピン転換反応を利用して、Ps と原子・分子の散乱過程を解明するための測定装置を開発する。この装置の特徴は、時間分解能とエネルギー分解能が両立する新しい 放線検出器である LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレーション検出器を導入する点と、検出器の出力信号をデジタル波形処理により解析する点である。装置の模式図を図2に示す。

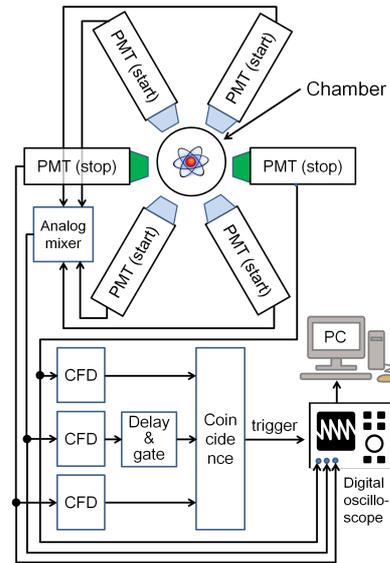


図2: 測定装置の模式図

次に実験は、まず Xe ガスを試料として圧力 (0~3 気圧) 温度 (室温~350 ) を変えながら Ps の消滅率を測定し、データ解析により、Ps-Xe 散乱の物理パラメータ(散乱長、有効到達距離、運動量移行断面積)を明らかにする。更に、Xe と試料ガス (He など) の混合気体を同様に測定し、Ps と試料ガスの散乱の物理パラメータを明らかにする。このとき、Xe ガスは Ps の温度計として機能する。

#### 4. 研究成果

図3(a)に、Xeガス中で測定されたPsの消滅率と、温度との関係を示す。プロットのうち丸印(●)はスピン転換消滅を表し、三角印(▲)はピックオフ消滅を表す。また、それぞれの測定点をつなぐ曲線は、部分波解析により得られたもので、各部分波の内訳は図3(b)および図3(c)に示す。

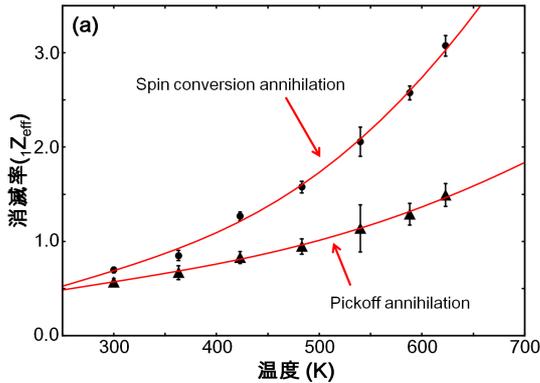


図3(a) : Xe ガス中の Ps 消滅率の温度依存性

部分波解析で考慮した消滅経路は、スピン転換消滅とピックオフ消滅のみである。ピックオフ消滅の温度依存性が、他のガス中(一般的に温度が300 Kから600 Kに上昇すると5~20%程度増大する)に比べて著しく大きいことから、2013年の段階では束縛状態のような未知の消滅経路が存在する可能性も考えられていた[2]が、そのような経路を仮定する必然性はなくなり、論点が一つ整理された。

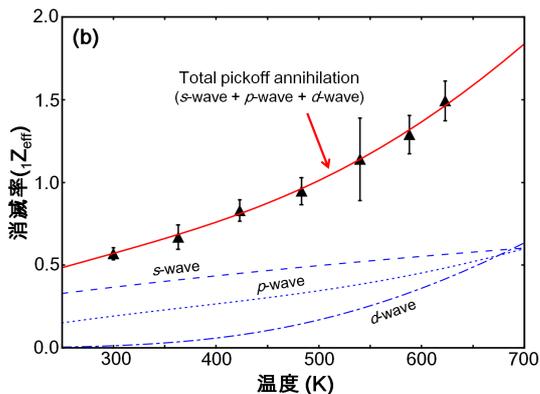


図3(b) : ピックオフ消滅率の内訳

図3(b)に、ピックオフ消滅率の内訳を示す。三角印(▲)の測定点は図3(a)と同じであり、実線が部分波解析により得られたピックオフ消滅率の温度依存性である。また、その内訳を角運動量ごとに、s波(破線)、p波(点線)およびd波(一点破線)で示した。ピックオフ消滅の強い温度依存性は、p波だけでなくd波の寄与によっても引き起こされていることが明らかとなった。

図3(c)に、スピン転換消滅率の内訳を示す。丸印(●)測定点は図3(a)と同じであり、実線が部分波解析により得られたスピン転換

消滅率の温度依存性である。また、その内訳を角運動量ごとに、p波(点線)とd波(一点破線)で示した。図3(b)と異なり、s波の

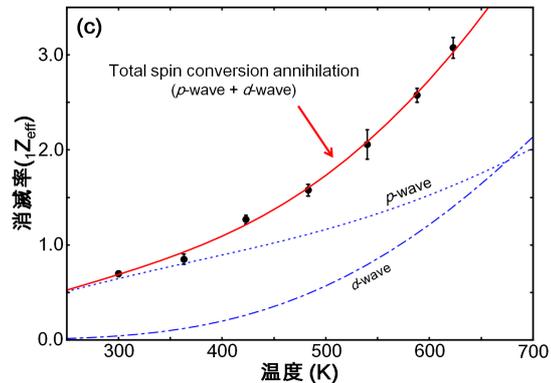


図3(c) : スピン転換消滅率の内訳

寄与が示されていないのは、スピン転換反応はs波散乱では禁制のためである。また、p波とd波の形状は図3(b)と同じで、縦軸の縮尺のみが異なる。

以上をまとめると、ピックオフ消滅率( $Z_p$ )とスピン転換消滅率( $Z_c$ )は、それぞれ、

$$Z_p = f(S+P+D)$$

$$Z_c = g(P+D)$$

の形でモデル化できることが分かった。ただし、S、P、およびDはそれぞれs波、p波、およびd波の散乱断面積、fとgは係数である。

図4に、以上のようにして得られた各波の断面積に対応する各波の位相シフトを示す。破線はs波を、点線はp波を、および一点破線はd波を示す。また、文献番号[4]を付した各線は、他のグループによる理論計算の結果である。

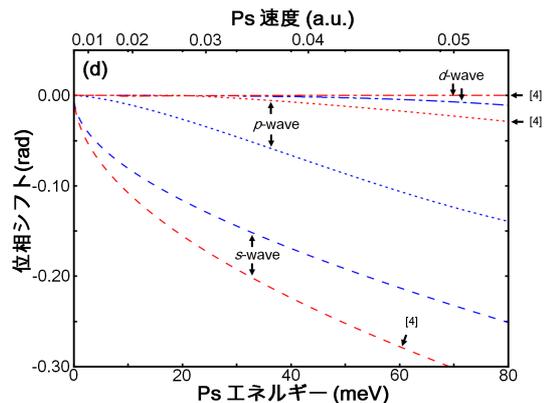


図4 : 位相シフト

重大なポイントは、我々の実験結果と理論計算を比較すると、p波の位相シフトに大きな違いが見られたことである。理論計算では、超低エネルギー領域ではp波の寄与は目立たないとされているが、実験結果ではs波の半分程度もの寄与が認められる。

しかしながら、

- 図3(c)に示すように、このエネルギー領域でもスピン転換消滅率(s波散乱では禁制)が観測されること

- **図 3(b)**に示すようにこのエネルギー領域におけるピックオフ消滅率の温度依存性が著しく大きいこと(s波散乱のエネルギー依存性は小さい)

を考え合わせると、p波やd波の寄与は超低エネルギー領域でも無視できないと考える方が妥当である。この点は、今後の研究でも強調していく必要があり、むしろPsという複合粒子の散乱の本質が隠されている可能性がある。

以上の結果から言えることは、PsとXeの相互作用を支配する遠距離力は分子間力(引力)であるが、Xe原子のポテンシャルは全体としてPsに対して斥力を及ぼしている。その結果、Psはポテンシャルに押し出されて位相に遅れ(マイナス)が生じる。このことは、定性的には理論計算の結果とも一致しているが、定量的には散乱長で20%程度、ピーク断面積では数倍程度の食い違いが見られるため、今後は実験・理論の両面から議論を詰めることで、Ps-原子・分子散乱の新しい知見が得られると期待される。

なお、本研究に携わった共同研究者の澁谷憲悟氏が第10回(2016年)日本物理学会「若手奨励賞」を、大学院生の細谷亮介氏が日本物理学会領域10の学生奨励賞(2017年3月)を、それぞれ受賞した。

#### <引用文献>

- [1] H. Saito and T. Hyodo, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 253402 (2006).  
 [2] K. Shibuya, T. Nakayama, H. Saito, and T. Hyodo, *Phys. Rev. A* **88**, 012511 (2013).  
 [3] K. Shibuya, Y. Kawamura, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **88**, 042517 (2013).  
 [4] A. R. Swann and G. F. Fribakin, *Phys. Rev. A* **97**, 012706 (2018).

#### 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5件)

“Partial-wave analysis for positronium-xenon collisions in the ultralow-energy region”, 澁谷憲悟、齋藤晴雄 *Phys. Rev. A.*, vol. 97, pp. 052702 1-10, 2018. (査読有り)

DOI: 10.1103/PhysRevA.97.052702

“Low-Energy Ps-Xe Scattering Analyzed Using a Modified Effective Range Theory”, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, *Mat. Sci. Forum*, vol. 373, pp. 23-28, 2017. (査読有り)

DOI:

10.4028/www.scientific.net/DDF.373.23

「最近の研究から 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~」, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 陽電子科学, vol. 7-1, pp. 61-70, 2016. (査読有り)

「シリーズ『陽電子が拓く物質の科学』第1回『ポジトロニウム-気体分子の相互作用』」, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, しょうとつ, vol. 12-6, pp.13-25, 2015. (査読有り)

“Positronium spin conversion during collisions with Xe and its application for measuring the kinetic energy”, 澁谷憲悟、川村純弘、齋藤晴雄, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 618, pp. 012005 1-6, 2015. (査読有り)

DOI: 10.1088/1742-6596/618/1/012005

##### 〔学会発表〕(計11件)

「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」, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 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, 2017.

「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」, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017.

「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」, 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017.

「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」, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 日本物理学会2016年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016.

「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)」, 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 日本物理学会2016年秋季大会, 金沢大学角間キャンパス, 2016.

「(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」, 澁谷憲悟, 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, 2016.

「Heガス中でのポジトロニウムの消滅率と温度との関係」, 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 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, 2016.

“Partial Wave Analysis on Ps-Xe Collisions at Ultra-Low Energy”, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, The 17th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-17), Wuhan Hengda Hotel, Wuhan, China, Sep. 20-25, 2015

「超低エネルギーPs-Xe散乱の部分波展開による解析」, 澁谷憲悟、齋藤晴雄, 日本物理学会2015年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス, 2015.

「He ガス中のポジトロニウムの消滅率と温度との関係」, 細谷亮介、澁谷憲悟、齋藤晴雄, 第 52 回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京大学弥生講堂, 2015.

### 【その他】

齋藤研究室ホームページ

<http://positron.c.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 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: 6 0 2 3 5 0 5 9

### (2) 研究分担者

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: 2 0 4 1 5 4 2 5

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

細谷亮介 (HOSOTANI, Ryosuke)