

# オルソポジトロニウムの寿命問題

浅井 祥仁 <東京大学理学部物理学科 113 東京都文京区本郷 7-3-1>  
 折戸 周治 <東京大学理学部物理学科 113 東京都文京区本郷 7-3-1>

## §1 序

ポジトロニウムは、素粒子 ( $e^-$ ) とその反粒子 ( $e^+$ ) が、電磁相互作用により束縛された非常にきれいな系である。このような系は、他に類を見ない。従って、この系のエネルギー準位や寿命を測定することは、量子電磁気学を検証する上で極めて重要であるし、この希崩壊モードを探索することは、未知の素粒子現象を探る有効な手段である。

ポジトロニウムの内、三重項状態のオルソポジトロニウム ( $o\text{-Ps}$ ) は、荷電共役変換に対して奇の状態である為に、ほとんどが3体の  $\gamma$  線に長い寿命で崩壊する。この寿命に関し、過去20年に渡り測定され続けている値<sup>1)</sup>は、どれも理論の予言する値<sup>2)</sup>より一貫して短い (図1)。最近の実験と理論の差異は、1,400 ppm (6.2 $\sigma$ ) と統計的なふらつきの範囲をはるかに逸脱しており、有為な差異と言わざるを得ない。これが、我々を悩まし、また楽しませてくれている「オルソポジトロニウムの寿命問題」である。

## §2 新しい素粒子現象の可能性

実測された寿命が理論値よりも短いと言うことは、未知

の素粒子現象に起因する崩壊モードが、1,400 ppm の寄与をしている可能性があり得ることを示す。考えられる様々なオルソポジトロニウムの未知崩壊モードは何れも、現在の「標準理論」の枠外に在る現象であり、標準理論を超える新しい物理を探る重要な手がかりになる可能性があるものばかりである。我々はこの点に留意し、加速器実験の最新テクノロジーを卓上サイズの実験に応用しつつ、これらの未知崩壊現象の探索実験を行った。その結果を簡単にまとめる。

(1)  $o\text{-Ps} \rightarrow \gamma X^0$ :  $o\text{-Ps}$  が、長寿命で相互作用の極めて弱い未知ボソン  $X^0$  と、 $\gamma$  線に2体崩壊するものである。 $X^0$  の例として、擬性南部ゴールドストーンボソン (アクシオンやディラトン等) と呼ばれるスカラー粒子が挙げられる。これらの粒子の質量や物質との結合定数は、付随する対称性の破れたエネルギースケールに反比例して小さくなる。<sup>3)</sup> 従って、軽くて相互作用の弱い未知ボソンの探索は、標準理論を超えた高いエネルギーの物理を探る指針にもなり得る。 $X^0$  と物質の相互作用が弱い為に、このモードは、 $o\text{-Ps}$  が1本の単色  $\gamma$  線に崩壊した様に観測される。この  $\gamma$  線をエネルギー分解能の良い半導体 Ge 検出器を用いて測定し、これ以外に  $\gamma$  線が放出されなかったことを、検出効率の高い

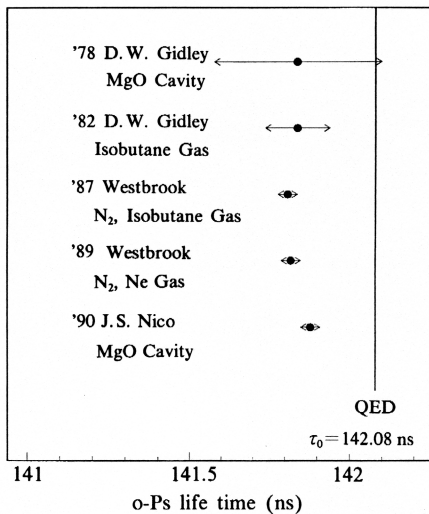


図1 オルソポジトロニウムの寿命測定史。

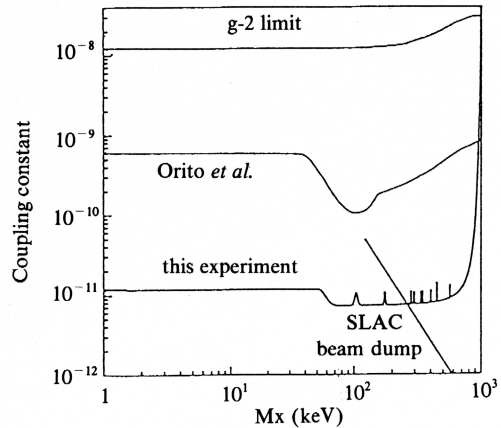


図2  $X^0$  ボソンと電子の結合定数 ( $\alpha_{Xee}$ ) に対する制限 (90% C. L.). (S. Asai et al.: Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 2440 より転載.)

CsI シンチレーターで確認する手法で探索実験を行っている。この実験により、 $\gamma X^0$  モードの寄与は 1 ppm (90% C. L.) 以下と言う著しく強い制限<sup>4,5)</sup>が得られている。これは、未知ボソンと電子の結合定数  $\alpha_{\text{Xee}}$  にして、 $10^{-11}$  以下となり、現存する最高の探索感度である (図 2)。

(2)  $o\text{-Ps} \rightarrow \gamma \Phi^0$ :  $o\text{-Ps}$  が、 $\gamma$  線と強結合するスピン 0 の未知粒子  $\Phi^0$  と  $\gamma$  線に 2 体崩壊する場合は、 $\Phi^0$  がすぐに 2 体の  $\gamma$  線に崩壊するので、(1) の様にシンチレーターを用いて他に  $\gamma$  線が放射されなかったことを確認する手法では適切ではない。そこで、 $o\text{-Ps}$  の崩壊により放射される  $\gamma$  線のエネルギー・スペクトラムを Ge 検出器を用いて精密に測定し、通常の 3 体崩壊による連続分布のバックグラウンドに埋もれているピークを探し、この希崩壊の探索を行っている。実験の結果、このモードに対する制限は、 $\Phi^0$  の質量が  $900 \text{ keV}/c^2$  以下の領域で、300 ppm (90% C. L.) 以下<sup>6,7,11)</sup>であることが得られている。しかし、これより重い領域並びに、 $\Phi^0$  が  $o\text{-Ps}$  よりも重く、仮想状態の寄与しか行わない場合 (この時は、3 本の  $\gamma$  線共に連続分布になる) に関しての制限は、現在得られていない。

(3)  $o\text{-Ps} \rightarrow \text{invisible}$ : これは、 $o\text{-Ps}$  が相互作用の極めて弱い粒子のみに崩壊するモードである。この例として、小さな電荷をもったフェルミオン等が挙げられている。ポジトロニウムが生成したにも関わらず、 $\gamma$  線が検出されなかったイベントを探索する為、ポジトロニウムを生成する真空容器を、検出効率の高い CsI, NaI シンチレーターで全立体角に渡って完全に覆い、崩壊で放射された  $\gamma$  線を漏らさず検出する様にしている。この探索実験の結果、invisible モードに関しては、3 ppm (90% C. L.) の制限<sup>9)</sup>が得られている。

(4)  $o\text{-Ps} \rightarrow \gamma\gamma^*$ : 光子と同じ量子数を持つ未知ベクトルボソン  $\gamma^*$  を含む最低次の寄与は、 $\gamma\gamma^*$  の 3 体崩壊となり、放射される  $\gamma$  線のエネルギーは連続分布になる。従って、ピーク探索に依存する (2) の実験では、このモードに対しては有効な探索がなされていないことになる。そこで、まず  $o\text{-Ps}$  を生成せずに、電子・陽電子の対消滅を用い、 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma^*$  モードの探索をピーク探索法を用いて行う。その結果得られた電子と  $\gamma^*$  の結合強度に関する情報を、 $o\text{-Ps} \rightarrow \gamma\gamma^*$  崩壊へ焼き直す、2 段階の方法を用いてこの希崩壊の探索を行っている。実験の結果、この寄与は、10 ppm (90% C. L.) 以下<sup>9)</sup>であることが得られている。

(5)  $o\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma$ : この崩壊は、電磁相互作用の荷電共役変換不変性と角運動量保存則により、一般には禁止されている。しかし、通常の 3 体崩壊に較べて 2 体崩壊である為、反応確率自体は 1,100 倍も大きい。1 ppm 程度の保存則の

破れがあれば、容易に 1,400 ppm の寄与になる可能性があり、興味深い反応過程である。このモードの探索には、深刻な pick-off と呼ばれるバックグラウンドがある。これは、 $o\text{-Ps}$  が崩壊する前に、他の物質を構成する電子と相互作用してしまい、すぐに 2 体の  $\gamma$  線に対消滅してしまうものである。幸いなことに、物質を構成する電子のフェルミ運動量が大きく、それによるドップラー効果が無視出来なくなる為、pick-off で放射される  $\gamma$  線のエネルギーの幅は、半値全幅で 2.6 keV と広いものになる。それに対して、2 $\gamma$  崩壊で放出された  $\gamma$  線のエネルギーは単色であり、Ge 検出器の分解能 (半値全幅 1.3 keV) の広がりしか持たない。このエネルギー幅の違いを用いて、両者を区別し探索を行っている。測定の結果、このモードの寄与は、350 ppm (90% C. L.) 以下<sup>10)</sup>であることが示されている。

(6)  $o\text{-Ps} \rightarrow 4\gamma$ : この崩壊は、電磁相互作用の荷電共役不変性により、一般には禁止されている。この寄与は、8 ppm (68% C. L.) 以下<sup>12)</sup>であると言う結果が、1974年に Marko らにより得られている。

(7)  $o\text{-Ps} \rightarrow 5\gamma$ :  $o\text{-Ps}$  の高次の崩壊として、理論<sup>13)</sup>で 1.0 ppm 予言されている。この高次の寄与は、6 ppm (90% C. L.) 以下<sup>14)</sup>であると言う結果が、東京都立大学のグループにより得られている。

以上の七つが、オルソポジトロニウムの寿命問題を解決する可能性を秘めた、新しい素粒子現象に起因する希崩壊モードである。しかし、これらの探索実験の結果、(2) のごく限られた一部の領域を除いて、全てのモードに関して厳しい制限が得られており、新しい物理現象による可能性は、低いものとなった。

### §3 オルソポジトロニウムの寿命の精密測定

新しい崩壊モードの可能性が低くなった以上、オルソポジトロニウムの寿命問題を解決する為には、測定値又は理論値そのものを再検証する必要がある。過去に行われた全ての測定実験は、タイムスペクトラムのみの測定と外挿を基本にしている。§2 の (5) の中で述べた様に、物質中では pick-off と呼ばれるバックグラウンドがある為、測定される寿命は、真空中の寿命よりも必ず短くなる。しかし、ポジトロニウムを生成する必要上、物質は不可欠であり、この効果を適切に補正して、真空中の寿命を得るしかない。過去に行われた測定実験は、ガスの圧力や、キャビティの大きさを変えて (この事は、pick-off 効果の大小を変えていくことに対応する)、各点でタイムスペクトラムを測定し、それぞれの点での物質の効果を含めた崩壊率を測定する。その後、ガスの圧力やキャビティの大きさの逆数を横軸に

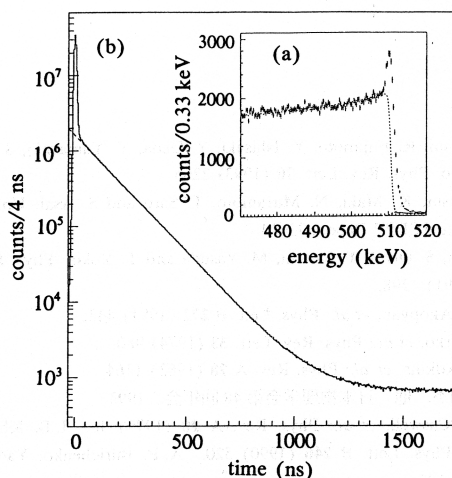


図3 (a) Ge 検出器により測定されたエネルギースペクトラム。点線は  $o$ -Ps  $\rightarrow$   $3\gamma$  の寄与を評価したものである。511 keV のピークが pick-off によるものである。(b) CsI シンチレーターにより測定されたタイムスペクトラム。エネルギーは 370  $\sim$  440 keV に絞ってある。点線はフィッティング結果を示す。

$\Gamma_{pick}$  は物質密度に比例した定数になる。これ以外の崩壊モードが効かないことは、§2 により示されている。この関係式より、期待されるオルソポジトロニウムのタイムスペクトラムは、

$$N(t) = N_0 \exp \left\{ -\Gamma \int_0^t \left( 1 + \frac{\Gamma_{pick}(t')}{\Gamma} \right) dt' \right\} + A \quad (1)$$

となる。(A は、オルソポジトロニウムに無関する現象による部分である。)

まず、エネルギー分解能の高い Ge 検出器により測定されたエネルギースペクトラムを用いて被積分関数中の  $\Gamma_{pick}(t)/\Gamma$  を決定する。連続分布の  $3\gamma$  崩壊に対して、pick-off による  $\gamma$  線は 2 体崩壊であり、511 keV に集中するので、この比を容易に求めることができる(図 3(a))。しかも、この量は  $10^{-2}$  以下と小さいので、この誤差が最終結果に与える影響も小さい。こうして決定された関数形 (1) で、CsI シンチレーターのタイムスペクトラム(図 3(b)) をフィッティングし、真空中の崩壊率  $\Gamma$  を決定することが出来る。ここで CsI シンチレーターを用いた理由は、検出効率が高く、エネルギーと同時にタイミング(時間分解能  $\pm 5$  ns) が測定出来るからである。エネルギーを測定し絞ることで、 $o$ -Ps に付随した現象を選択的に取り出すことが可能であり、結果として実験の精度が上がるからである。現在、この全く新しい方法を用いて、寿命の精密測定を行っている。

#### §4 今後の問題

新しい方法による寿命測定の結果に依っては、過去 20 年来の「オルソポジトロニウムの寿命問題」に決着をつけるかもしれない。逆に、謎を深めることになるかもしれない。何れの場合にせよ、ポジトロニウムの様な束縛された系を記述する理論の進展が、益々必要になってきている。実際、オルソポジトロニウムの寿命も一次の補正までしか計算されていない ( $a^2 \log a$  や  $a^2 \log a^{-1}$  は計算されている<sup>15)</sup>)。また、最近の技術の進歩で、ポジトロニウムの様々な準位間のエネルギー差が、 $10^{-9}$  の精度で測定<sup>16)</sup>されている。これに対して、理論の予言は遙かに悪い精度でしか得られてなく、検証のしようのないのが現状である。

終わりに、我々の種々の実験結果は、東京大学教養学部兵頭教授の助言と、日本アイソトープ協会の中村さん、並びに、文献 4~10 の多くのメンバーの協力により得られたものであることを特筆しておきたい。

#### 文 献

- 1) J. S. Nico, et al.: Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1344. C. I. Westbrook,

とり、縦軸にそれぞれの点で測定した崩壊率をプロットする。これより得られた一回帰直線を、横軸の零点にまで外挿して真空中の寿命を得ている。

この方法には、二つの系統的な問題点がある。一つは、熱化の問題である。生成された直後のポジトロニウムは、1 eV ぐらいの運動エネルギーを持っている。高速で運動するポジトロニウムは、物質と弾性散乱を繰り返し、常温にまで熱化されてゆく。まだ熱化されていない  $o$ -Ps は、高速で運動している為、単位時間あたりの物質との衝突回数が多く、従って pick-off の確率も高い。外挿を用いる方法では、十分に熱化した後の崩壊率を測定しなければならないが、物質の密度が低い程、熱化に要する時間が長くなり、崩壊率が大きめに測定される可能性がある。しかも、外挿で得られる真空中の寿命は、密度の低いところの影響を受け易く、結果として寿命が短めに評価されている可能性がある。第二の問題点としては、外挿プロットの横軸の問題である。この横軸は、測定したガスの圧力やキャビティの大きさを、pick-off 効果の大きさを表す量に簡単に焼き直しているものである。これが正しく pick-off 効果を表現しているものであるか否かは示されていない。測定された結果が、比較的きれいな一次直線に回帰出来る事に裏打ちされているに過ぎない。しかしそれでは、横軸の零点の一意性は、不確定なままである。

この様に、過去の測定には外挿に伴う重大な問題点がある。そこで我々は、タイムスペクトラムと同時に、エネルギースペクトラムも測定し、外挿を用いずに真空中の寿命を測定する手段を考案した。物質中のオルソポジトロニウムの崩壊率  $\Gamma_{obs}(t)$  は、

$$\Gamma_{obs}(t) = \Gamma + \Gamma_{pick}(t)$$

となる。ここで、 $\Gamma$ 、 $\Gamma_{pick}(t)$  は、それぞれ真空中のオルソポジトロニウムの崩壊率並びに、pick-off する崩壊率を表す。 $\Gamma_{pick}$  が、 $o$ -Ps が生成されてからの時間  $t$  の関数になるのは、上述した熱化過程によるものであり、 $t \rightarrow \infty$  の極限で



- et al.*: Phys. Rev. A **40** (1989) 5489; Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1328.  
D. W. Gidley, *et al.*: *ibid.* **49** (1982) 525; Phys. Lett. A **69** (1978) 97;  
Phys. Rev. Lett. **36** (1976) 395.
- 2) G. S. Adkins, *et al.*: Phys. Rev. A **45** (1992) 3333 & 7774; Ann. Phys. (USA) **146** (1983) 78. W. E. Caswell, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **38** (1977) 488.
  - 3) C. T. Hill, *et al.*: Nucl. Phys. B **311** (1988) 253.
  - 4) S. Asai, S. Orito, K. Yoshimura and T. Haga: Phys. Rev. Lett. **66** (1991) 2440.
  - 5) S. Orito, K. Yoshimura, T. Haga, M. Minowa and M. Tsuchiaki: Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 597.
  - 6) S. Asai, K. Shigekuni, T. Sanuki and S. Orito: Univ. Tokyo preprint; ICEPP Report 93-09; Phys. Lett. B に掲載予定.
  - 7) M. Tsuchiaki, S. Orito, T. Yoshida and M. Minowa: Phys. Lett. B **236** (1990) 81.
  - 8) T. Mitsui, R. Fujimoto, Y. Ishisaki, Y. Ueda, Y. Yamazaki, S. Asai and S. Orito: Phys. Rev. Lett. **70** (1993) 2265.
  - 9) T. Mitsui, K. Maki, N. Muramoto, T. Sato and S. Asai: Univ. Tokyo preprint; ICEPP Report 93-14.
  - 10) S. Asai, S. Orito, T. Sanuki, M. Yasuda and T. Yokoi: Phys. Rev. Lett. **66** (1991) 1298.
  - 11) M. V. Akopyan, *et al.*: Phys. Lett. B **272** (1991) 443.
  - 12) K. Marko, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 980.
  - 13) G. S. Adkins, *et al.*: Phys. Rev. A **28** (1983) 1164.
  - 14) 愈 杰, 他: 日本物理学会第 48 回年会, 1993.
  - 15) W. E. Caswell, *et al.*: Phys. Rev. A **20** (1979) 36. I. B. Khriplovich, *et al.*: Phys. Lett. B **246** (1990) 520. A. P. Burichenko: Yad. Fiz. **56** (1993) 123.
  - 16) M. S. Fee, *et al.*: Phys. Rev. A **48** (1993) 192.