



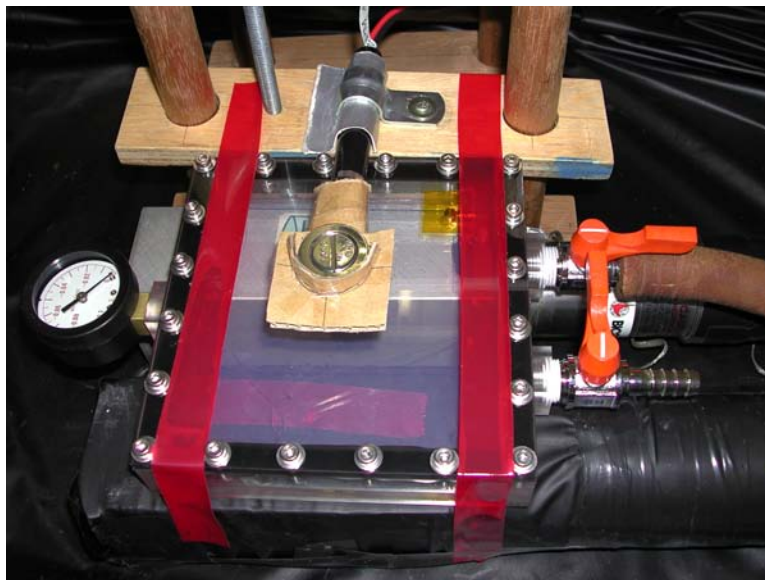
演習 11

ver 1.0

電子と陽電子の ” 原子 ”  
オルソポジトロニウムの寿命測定  
～朝永の量子電磁力学にチャレンジ！～

田中礼三郎\*、作田誠、内藤大輔 (TA)、岡本敦志 (TA)  
岡山大学大学院自然科学研究科理学系  
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

August 22, 2007  
KEK サマーチャレンジ



---

\*e-mail: tanaka@fphy.hep.okayama-u.ac.jp

# 1 イントロダクション

ポジトロニウム (Positronium, Ps と略す) は、電子  $e^-$  と陽電子  $e^+$  が電磁相互作用により束縛された準安定的な状態であり、水素原子に似ている。ポジトロニウムは質量が小さく、強い力、弱い力の影響は無視でき、純粹にレプトンの系 (束縛系 QED) で完全に記述される。一方実験的にも、ポジトロニウムは生成しやすく、また寿命が長い素粒子実験における束縛系 QED のテストや新しい物理の探索に用いられてきた。

基底状態のポジトロニウムには、電子と陽電子のスピンの反平行な一重項状態と、平行な三重項状態がある。2 粒子の合成スピン  $S$  の違いにより、

$$S = 0 \quad \text{Para - positronium (p - Ps)} \quad (1)$$

$$S = 1 \quad \text{Ortho - positronium (o - Ps)} \quad (2)$$

という 2 つの状態に区別される。

朝永振一郎らによる量子電磁力学 (Quantum Electrodynamics, QED) により、真空中でのパラ・ポジトロニウムの寿命は 125 ps、オルソ・ポジトロニウムの寿命は 142 ns と計算されている。パラ・ポジトロニウムの寿命については、D.W. Gidley らが、磁場による効果で  $S = 0$  と  $S = 1, S_Z = 0$  の状態が混合する現象を用いて、p-Ps の寿命を間接的に測定し、QED 予言値と一致することを見出している。一方、オルソ・ポジトロニウムの崩壊率 (寿命の逆数) は、ミシガン大学のグループによる測定で、QED 予言値よりも実験誤差の 7 倍も大きいことが問題となっていた。もしこの結果が本当であれば、何か新しい未知の粒子への崩壊や角運動量非保存、荷電共役変換不変性の破れなどを示唆する。東京大学 ICEPP のグループは、オルソ・ポジトロニウムの寿命の精密測定を行なった。オルソポジトロニウムの熱化過程の問題を指摘し、結果的にオルソ・ポジトロニウムの寿命も QED の高次輻射補正を取り入れた予言値と一致することを見出した。

このように、ポジトロニウムの精密な寿命測定は、今日の素粒子物理学実験の最先端の研究テーマである。またポジトロニウムは、Positron Emission Tomography (PET) という医療分野での映像診断装置としても用いられており、我々の日常生活でも身近な存在である。KEK サマーチャレンジでは、短期間ながら自分たちの実験アイデアを出しながらオルソ・ポジトロニウムの寿命測定を行い、QED 理論の予言の検証を行なう。

## 2 ポジトロニウム

図 1 に示すように、パラ・ポジトロニウムは 2 光子崩壊、オルソ・ポジトロニウムは 3 光子崩壊をする。

$$e^+e^- \rightarrow 2\gamma, 3\gamma. \quad (3)$$

電子と陽電子の束縛状態は、水素原子に似たエネルギーレベルを持つ。

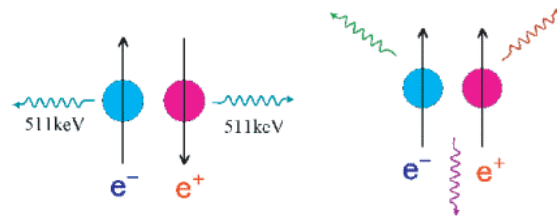


Figure 1: 電子・陽電子の束縛状態ポジトロニウム。左図はパラ・ポジトロニウム、右図はオルソ・ポジトロニウム。

## 2.1 保存則

ポジトロニウムの物理について、保存則という観点から考えてみる [1]。ポジトロニウム状態の全波動関数を、以下のようにスピン、空間そして電荷に依存する波動関数の積として表してみよう。

$$\psi(\text{total}) = \Phi(\text{space})\alpha(\text{spin})\chi(\text{charge}). \quad (4)$$

### 2.1.1 スピン

スピン (Spin)  $\frac{1}{2}$  をもつ 2 つの粒子の組み合わせによるスピン関数は、次のように書ける。粒子 1 と粒子 2 の関数をそれぞれ、 $\psi_1(s, s_z)$ ,  $\psi_2(s, s_z)$ 、およびそれらの組み合わせを  $\alpha(S, S_z)$  とする。ここで、 $s, S$  はスピンを表し、 $s_z, S_z$  はスピンの第三成分を表す。すると、4 つの組み合わせが可能であり、

$$\alpha(1, 1) = \psi_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\psi_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right), \quad (5)$$

$$\alpha(1, 0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \psi_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\psi_2\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) + \psi_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\psi_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) \right], \quad (6)$$

$$\alpha(1, -1) = \psi_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right)\psi_2\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right), \quad (7)$$

$$\alpha(0, 0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \psi_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\psi_2\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) - \psi_2\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\psi_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) \right]. \quad (8)$$

ここで最初の 3 つは、スピン三重項  $S = 1, S_z = 1, 0, -1$  を作り、最後の 1 つはスピン一重項  $S = S_z = 0$  である。スピン三重項は、粒子 1 と 2 の入れ替えに対して対称 ( $\alpha$  の符号は変わらない) であるが、スピン一重項は反対称である ( $\alpha$  の符号が変わる)。したがって、粒子の交換に対するスピン関数  $\alpha$  の対称性は、 $(-1)^{S+1}$  である。ここで、 $S$  は全スピンである。

### 2.1.2 空間 (パリティ)

空間反転に関して、 $P\psi(\mathbf{r}) \rightarrow \psi(-\mathbf{r})$  であるようなパリティ演算子を導入する。固有値は  $\pm 1$  であり、これをパリティとよぶ。空間の波動関数  $\Phi(\text{space})$  は、球面調和関数  $Y_l^m(\theta, \phi)$  を用いてあらわすことが出来るが、粒子の交換は空間反転と等しい。したがって、球面調和関数はパリティ  $(-1)^l$  をもつ。ここで、 $l$  は系の軌道角運動量である。

### 2.1.3 電荷 (荷電共役)

最後に、電荷に依存する波動関数  $\chi(\text{charge})$  を考える。粒子の交換に関して荷電共役変換  $C$  (Charge Conjugation) を導入する。荷電共役変換は、粒子を反粒子へ反転する演算である。ポジトロニウムのような電磁相互作用は、荷電共役変換のもとで不変である<sup>1</sup>。光子は、 $C = -1$  の固有値をもつ。 $n$  個の光子からなる系は、荷電共役変換の固有値  $(-1)^n$  をもつ。

以上から、スピン、空間、電荷に関する変換の積を  $K$  とすると、

$$K = C(-1)^{S+1}(-1)^l. \quad (9)$$

$C$  と  $K$  を決めるためにはさらに情報が必要である。最初に述べたように、基底状態 ( $l = 0$ ) のポジトロニウムは 2 光子または 3 光子に崩壊する。これらの崩壊モードは明らかに 2 つの

<sup>1</sup> 荷電共役 (charge conjugation) 変換と空間反転 (parity) 変換の 2 つを組み合わせた CP 変換は、電磁相互作用と強い相互作用は  $C$  と  $P$  の各々の変換について (したがって CP 変換についても) 厳密に対称性を保っている。一方、弱い相互作用ではこれらの対称性は破れている。

|                                | 崩壊<br>モード | $S = J$ | $l$ | $C$ | $K$ | 寿命<br>$\tau(\text{sec})$ |
|--------------------------------|-----------|---------|-----|-----|-----|--------------------------|
| 一重項 ( $^1S_0$ )    パラ・ポジトロニウム  | $2\gamma$ | 0       | 0   | +1  | -1  | $1.25 \times 10^{-10}$   |
| 三重項 ( $^3S_0$ )    オルソ・ポジトロニウム | $3\gamma$ | 1       | 0   | -1  | -1  | $1.42 \times 10^{-7}$    |

Table 1: ポジトロニウムの性質と寿命。

スピン状態、一重項 ( $J = 0$ ) と三重項 ( $J = 1$ ) に対応していなければならない。2 光子の系のボーズ統計もしくは光子は質量をもたないことから、 $2\gamma$  崩壊は  $J = 0$  でなければならない。したがって  $3\gamma$  崩壊は  $J = 1$  である。 $n$  個の光子からなる系の荷電共役変換の固有値は  $(-1)^n$  であるから、一重項 ( $J = 0$ ) に対しては  $C = +1$ 、三重項 ( $J = 1$ ) では  $C = -1$  である。したがって、三重項であるオルソ・ポジトロニウムの  $2\gamma$  崩壊は、荷電共役変換の不変性と角運動量保存則により禁止されている。

まとめると、Table 1 のようになる。ここで系全体のファクターはいずれの場合も、 $K = -1$  となっている。これは、荷電共役変換を考慮すると全体の波動関数は、同一フェルミ粒子の場合と同様に、反対称であることを示している。

## 2.2 ポジトロニウムの寿命

オルソポジトロニウムの 2 光子への崩壊率  $\Gamma_{2\gamma}$  は、以下のように計算出来る [1]。

$$\Gamma_{2\gamma} = \frac{\hbar}{\tau_{2\gamma}} = 4\pi r_e^2 c |\psi(0)|^2. \quad (10)$$

ここで、 $r_e = e^2/4\pi mc^2$  は電子古典半径、 $\psi(0)$  は、原点での電子－陽電子の軌道波動関数であり、水素原子の場合 Schrödinger 方程式を解いて、

$$|\psi(0)|^2 = \frac{1}{\pi a^3}, \quad (11)$$

ここで  $a$  はボーア半径である。軌道角運動量  $l$  は、軌道波動関数で  $r^l$  というファクターがかかるが、原点ではこれは消える。ポジトロニウムの換算質量によるファクター 2 の効果を考慮して、ボーア半径は、

$$a = \frac{2r_e}{\alpha^2}. \quad (12)$$

以上より、 $r_e = 2.8 \times 10^{-13} \text{cm}$ 、微細構造定数  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137}$  を用いると、パラ・ポジトロニウムの寿命、

$$\tau_{2\gamma} = \frac{2r_e}{c\alpha^6} = 1.25 \times 10^{-10} \text{sec} \quad (13)$$

を得る。

オルソ・ポジトロニウムの 3 光子への崩壊率  $\Gamma_{3\gamma}$  は、2 光子の場合に比べてファクター  $\alpha$  程度遅いと期待される。これは、崩壊の Feynman ダイアグラムにあらたに QED 結合定数

$\alpha$  が加わるからである。寿命は崩壊率の逆数に比例するので、オルソ・ポジトロニウムの寿命は長い。計算によると、

$$\tau_{3\gamma} = \frac{9\pi}{4(\pi^2 - 9)} \frac{\tau_{2\gamma}}{\alpha} = 1.4 \times 10^{-7} \text{sec}, \quad (14)$$

となる。

QED の  $\mathcal{O}(\alpha^2)$  の高次摂動計算により、より詳しい値は、 $\Gamma_{2\gamma} = 123 \text{ ps}$ ,  $\Gamma_{3\gamma} = 7.039979 \mu\text{s}^{-1}$  ( $\tau_{2\gamma} = 123 \text{ ps}$ ,  $\tau_{3\gamma} = 142.0459 \text{ ns}$ ) と求められている。オルソ・ポジトロニウムの寿命の  $\mathcal{O}(\alpha^2)$  補正は、約 2.4% であり、この効果は実験的にも観測されている。2000 年に G.S.Adkins らが  $\mathcal{O}(\alpha^2)$  の計算を行ない、補正は 240 ppm であり、現在の実験精度と同程度の大きさである。

位相空間での 2 体崩壊と 3 体崩壊の効果もあり、パラ・ポジトロニウムの崩壊率は、オルソの場合よりも約 1,100 倍も大きい (寿命は逆に短い)。従って、ポジトロニウムの崩壊時間を観測すると、図 2 に示すようになる。パラ・ポジトロニウムは非常に短い時間でのピークを示す (寿命は磁場をかけて間接的に測定)。オルソ・ポジトロニウムは縦軸を log でプロットすると直線になり、数 100 ns の非常に長い寿命となるので直接測定が可能である。

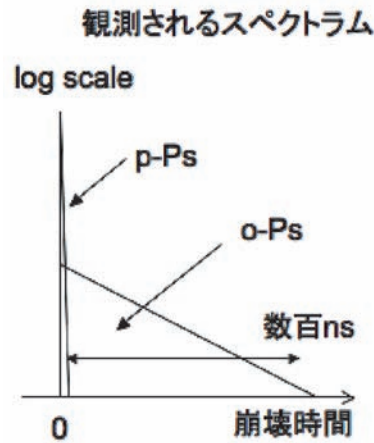


Figure 2: ポジトロニウムの崩壊時間のスペクトラム。横軸は崩壊時間、縦軸は log でプロットした崩壊数。

## 2.3 オルソ・ポジトロニウムの一生

ポジトロニウムの実際の生成と崩壊について、図 3 を用いて説明する。

1. ポジトロニウムを生成するためには、陽電子が供給されなければならない。通常  $^{22}\text{Na}$  や  $^{68}\text{Ge}$  といった  $\beta^+$  線源もしくは陽電子ビームを用いる。
2. ターゲット ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ) 中でポジトロニウムが生成され、オルソとパラの比は、 $\text{o-Ps} : \text{p-Ps} = 3 : 1$  である。パラ・ポジトロニウムは速やかに  $2\gamma$  崩壊する。
3. オルソ・ポジトロニウムは、ターゲット物質中を拡散する。一部は物質中で対消滅する ( $\text{SiO}_2$  での寿命  $\tau \sim 2 \text{ ns}$  程度である)。
4. eV のエネルギーでフリースペースへ放出され、ここで寿命を過ごす。さらに物質と衝突しながら熱化し、エネルギーが  $0.03 \text{ eV}$  程度となる。この間に、下で述べる物質との相互作用による対消滅ピックオフ反応などが起こる。

5. 最後に  $3\gamma$  に崩壊する。

ポジトロニウム崩壊は、トポロジーにより明確な違いがある。パラ・ポジトロニウムの  $2\gamma$  崩壊の場合は、反対方向に 511 keV のエネルギーをもった  $\gamma$  線が出てくる。パラ・ポジトロニウムの  $3\gamma$  崩壊の場合は、 $\gamma$  線のエネルギーは 511 keV 以下の連続分布となる。

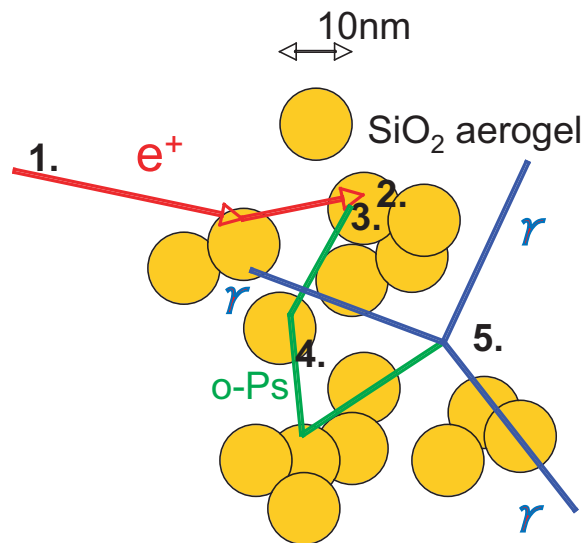


Figure 3: オルソ・ポジトロニウムの一生。番号は本文中のリストに対応する。

ポジトロニウムの寿命測定では、ポジトロニウムと物質との様々な反応を考慮しなければならない。

### 2.3.1 ピックオフ反応

オルソポジトロニウムは、図 4 に示すように空気や検出器の物質での電磁場と相互作用して、3 体の  $\gamma$  線に崩壊する前に 2 体の  $\gamma$  線に崩壊してしまう現象がある。これをピックアップ (pick-off) 消滅という。この確率はポジトロニウムと他の原子との衝突頻度が高いほど、つまり、気体中では圧力が、液体や固体中では密度が大きいほど高くなる。精密実験では、このピックアップ消滅効果をいかに精密に評価するかが問題となる。

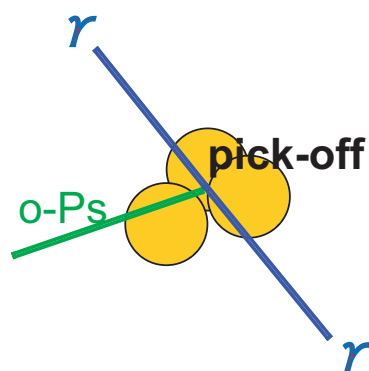


Figure 4: オルソ・ポジトロニウムのピックアップ消滅反応。反対方向に 511 keV のエネルギーをもった  $\gamma$  線が出る。

### 2.3.2 スピン交換反応（酸素の不对電子対の影響）

物質を構成する分子が不对電子を持つ場合、ポジトロニウム中の電子は、物質中に含まれる電子とスピンを入れ替えることがある。このような反応は水素原子でも知られている。これによりオルソがパラとなり、パラ・ポジトロニウムの短い寿命で消滅する。

### 2.3.3 化学反応（酸化反応、不加反応、置換反応）

ポジトロニウムは水素原子と同様に酸化反応や化合物生成などの化学反応をする。ポジトロニウムが酸化されると、電子が奪われて陽電子だけが残る。

以上の効果をまとめると、オルソポジトロニウムの寿命測定を大気中で行なった場合、寿命が見かけ上短くなる。崩壊率は、 $\Gamma_{3\gamma} = \Gamma_{\text{QED}} + \Gamma_{\text{pick-off}} + \Gamma_{\text{spin-exchange}} \dots$  となるから、酸素によるスピン交換（スピン・フリップ）の効果が圧倒的に大きく、その効果は圧力（ $pV=nRT$  により体積）に比例すると考えられる（実際にはよく調べると直線にはのらない）。実験を高真空中で行ない、酸素の不对電子がないような状況なら、pick-off 効果が非常に大きく、この補正をどのように行なうかが問題となる。また、空気の圧力を 0 kPa に近づけていった場合、熱化の現象により直線が曲がる。

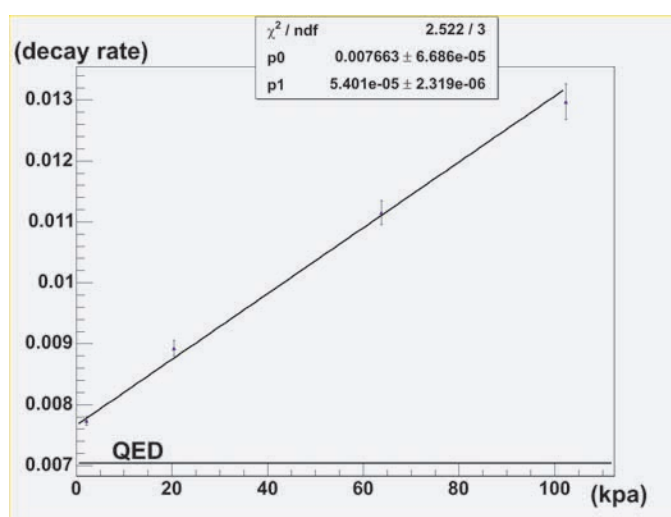


Figure 5: オルソ・ポジトロニウムの寿命測定結果。横軸は圧力（大気圧は 101kPa）、縦軸は崩壊率  $\Gamma_{3\gamma}(\text{ns}^{-1})$  をプロットしている。水平ラインは、QED 理論の予言値。

岡山大学の卒業研究で行なった実験の結果を 5 に示す。空気中の酸素の影響が大きく、大気中でオルソ・ポジトロニウムのみかけの寿命は真空の 2 倍程度となる。一番効くのは、不对電子によるスピン・フリップであり、酸素 1 気圧で崩壊率は、 $\Gamma_{\text{spin-exchange}} = 35 \mu\text{s}^{-1}$  である。従って、酸素は空気中に約 20% あるから、0.2 気圧では  $\Gamma_{\text{spin-exchange}} = 7 \mu\text{s}^{-1}$  となる。オルソポジトロニウムの崩壊率は、 $\Gamma_{\text{QED}} = 7 \mu\text{s}^{-1}$  であるから、空気 1 気圧の全崩壊率は  $\Gamma_{3\gamma} = 14 \mu\text{s}^{-1}$  となる。

以上述べたように、ピックオフ反応やスピン交換反応により観測される崩壊率は必ず大きくなる。このため、これらの効果をどれだけ押さえるのかが実験の鍵である。

### 3 実験装置

#### 3.1 放射線源 $^{22}\text{Na}$

$\beta^+$  線源として密封線源  $^{22}\text{Na}$  を用いる<sup>2</sup>。 $^{22}\text{Na}$  の半減期は、約 2.6 年である。同時に 1274 keV の  $\gamma$  線が出てくる。 $^{22}\text{Na}$  の崩壊モード [4] を図 6 に示す。KEK サマーチャレンジで放射線管理部から借りている  $^{22}\text{Na}$  線源 2 つの強さは、それぞれ 0.542 MBq と 0.360 MBq である。 $^{22}\text{Na}$  ではトリガー・カウンターのプラスチック・シンチレーター（厚さ  $200\mu\text{m}$ ）で  $\beta^+$  の 9 割が対消滅してしまうが、今回はこれで我慢する。

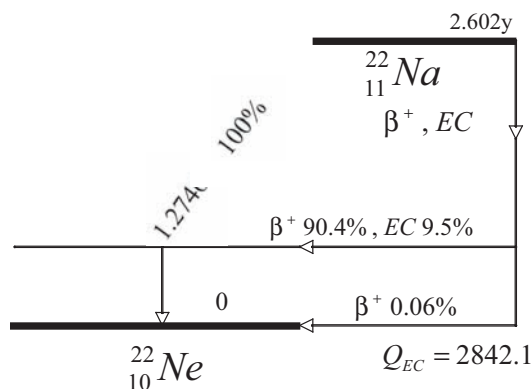


Figure 6:  $^{22}\text{Na}$  の崩壊モード。

#### 3.2 トリガー・カウンター

放射線源  $^{22}\text{Na}$  より放出される陽電子  $e^+$  を、薄いプラスチック・シンチレーター（厚さ  $200\mu\text{m}$ ）と  $\frac{1}{2}$  インチの光電子増倍管（PM）を用いて検出する。これを測定実験の TDC のスタート信号とする。プラスチック・シンチレーターの光電子増倍管への接着には、オプティカル・セメント（Bicorn BC-600）を用いる。

#### 3.3 エアロジェル

エアロジェル<sup>3</sup>とは、 $\text{SiO}_2$  からなる多孔性ガラスの一種である。 $\text{SiO}_2$  の鎖が 3 次元的にネットワークを組み、フラクタル的な不規則な構造を形成している。空孔率が 100% に近くほとんど透明な物質である。エアロジェルは疎水性を持つ物質で、非常に軽い。屈折率をコントロール出来る。KEK の Belle 実験の RICH カウンターに用いられた。

エアロジェルは、彗星からの塵を採取する探査機や国際宇宙ステーション曝露部に搭載されたりして、宇宙でも使われている。

#### 3.4 カロリメーター

オルソ・ポジトロニウムから放出される  $\gamma$  線を検出するため、 $\text{NaI}(\text{Tl})$  と  $\text{CsI}(\text{Tl})$  カロリメーターを用いる。

<sup>2</sup>KEK サマーチャレンジの参加学生は放射線講習を受講していないので、放射線源には「絶対に」触らないでください。必要な場合は、スタッフか TA をお願いして下さい。

<sup>3</sup>アレルギーにより喉が痒くなる場合があるので、取り扱いには注意すること。

### 3.5 真空装置

オルソポジトロニウムの寿命を大気圧 (101kPa) で測定すると、酸素の影響により見かけ上寿命が短くなる。この影響をなくするため、真空中で測定する必要がある。放射線源を真空中で使うには、圧力を考慮した特別な密封線源が必要である。また、通常の光電子増倍管も 1/10 気圧程度以下ではブリーダー内の放電により使用できない。また真空では熱対流がないため、光電子増倍管放熱の問題もある。

これらの理由のため、通常の密封線源  $^{22}\text{Na}$  や NaI/CsI カロリメーターは真空中に置かず、エアロジェルのみ真空を引く。そのための真空小箱 (スズノ技研製) が用意されている。真空ポンプは、油ポンプを用いる。数 kPa 程度 (大気圧は 101 kPa) までは真空が引けるはずである。

## 4 実験の概要

以下、日程に沿って実験手順について説明する。

### 8 月 23 日 (木曜日) 3 日目

#### 4.1 トリガー・カウンターの製作

上で述べたように、薄いプラスチック・シンチレーター (厚さ  $200\mu\text{m}$ ) と  $\frac{1}{2}$  インチの光電子増倍管 (PM) を用いて、トリガー・カウンターの製作を最初に行なう。プラスチック・シンチレーターの光電子増倍管への接着には、オプティカル・セメント (Bicorn BC-600) を用いる。このトリガー・カウンターの製作を最初に行なう。

#### 4.2 CsI(Tl) カロリメーターの製作

CsI(Tl) カロリメーターは、立方体の両面があらかじめ研磨してある (CI 工業)。側面は光を乱反射させて応答の一様性を得るために、わざとザラザラにしてある。CsI と光電子増倍管をオプティカル・グリース (Bicron BC-630) を用いて接着する。

#### 4.3 カロリメーターのキャリブレーション

実験では NaI を 2 本、CsI を 1 本用いる。これらのカロリメーターの入射エネルギーへの応答を調べる必要がある。NaI の光電子増倍管の高電圧 (HV) は 1kV 程度以下にして、信号が小さいので PMT アンプを用いた方がよい。CsI は NaI に比べて光量が多いので、2 インチ光電子増倍管の HV は 1.8kV 程度に設定する。これらは宇宙線をみて、信号の大きさが数 100mV 程度に設定する。

NaI および CsI カロリメーターを放射線源を用いてキャリブレーションする。信号を ADC で読み込んで、入射した  $\gamma$  線のエネルギーに対する直線性 (リニアリティ) を調べる。 $\gamma$  線のソースとして  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  および  $^{137}\text{Cs}$  を用いる。それぞれの  $\gamma$  線のエネルギー分布を Appendix-B で示している。

**演習課題 1:**  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  および  $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線のエネルギーに対応する ADC カウントを調べなさい。これから、ADC の値からエネルギー (keV) へ変換する係数を見つけなさい。

**演習課題 2:** 横軸を入射  $\gamma$  線のエネルギー、縦軸を ADC のカウント数としてプロットし、直線性を調べなさい。

### 8 月 24 日 (木曜日) 4 日目

## 4.4 データ収集システムの構築

TA に手伝ってもらいながら、データ収集システムを構築する。

実験をおこなっている間に、収集しているデータに異常がないことをチェックすることは非常に重要である。これをオンライン・モニタリングという。今回の KEK サマーチャレンジのために簡単なオンライン・モニタリングのプログラムが用意されている。ADC や TDC のスロット番号や収集イベント数、データのファイル名などを指定する。実験中に、基本的な ADC や TDC 分布をチェックすることが可能である。

8 月 26 日 (日曜日) 6 日目    —    8 月 28 日 (日曜日) 8 日目

## 4.5 実験

いよいよ、実験のセットアップを行なって、オルソ・ポジトロニウムの寿命測定実験を行なう。

### 4.5.1 さまざまなセットアップ

### 4.5.2 大気中と真空中での比較実験

### 4.5.3 o-Ps 寿命の大気圧依存性

## 4.6 データ解析

データを収集した後、解析をおこなう。これをオフライン解析という。データ収集で用いた Linux PC 上で ROOT というプログラムを用いて、実験のカットを入れてヒストグラムを作ったり、フィットを試みる。やり方については、オンラインデータ収集中に実習をおこなう予定である。

### 4.6.1 カット

- パラ・ポジトロニウムは、2つの $\gamma$ に崩壊するので、もしポジトロニウムが静止していれば、運動量・エネルギー保存則より2つの $\gamma$ は正反対方向に同じ運動量・エネルギー (511keV) をもって放出されるはずである。一方オルソ・ポジトロニウムは3つの $\gamma$ に崩壊するので、それらのエネルギーは511KeVより小さく、3つの $\gamma$ の運動量の合計がゼロでありさえすればよい。このため、NaI や CsI で測定した $\gamma$ のエネルギーが511keV以下であるようなイベントを選べば、オルソ・ポジトロニウムの現象を捉えることができる。
- エネルギーのカットを入れて残ったイベントの TDC 分布を作ってみる。横軸は時間、縦軸はイベント数である。

参考のため、エネルギー分解能が非常によい Ge 検出器で測定したエネルギー分布図を図7に示す。

### 4.6.2 寿命の測定

一般に不安定粒子が崩壊する場合、その崩壊の割合 (崩壊率)  $dN/dt$  は、不安定粒子の個数  $N$  に比例するので、

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{\tau} \cdot N$$

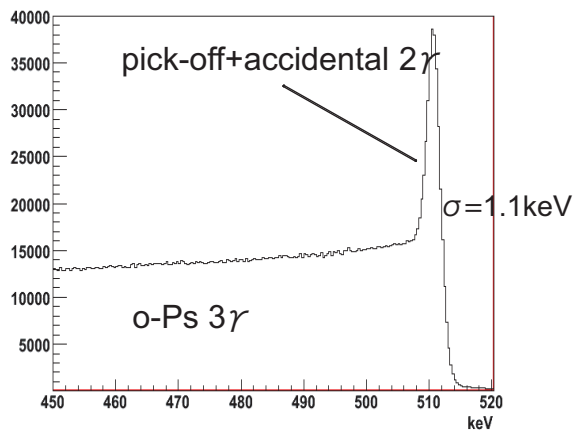


Figure 7: Ge 検出器で観測したエネルギー分布図

とすることができる。ここで、 $\tau$ を寿命とする。従って、

$$\ln N = -\frac{t}{\tau} + C$$

となる。積分すると、

$$N(t) = N(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

参考のため、エネルギー分解能が非常によい Ge 検出器で測定した TDC 分布図を図 8 に示す。

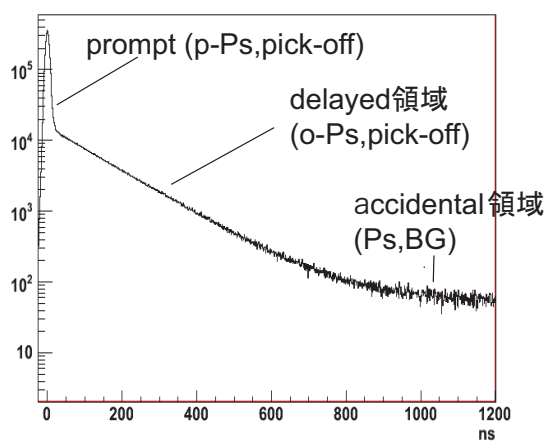


Figure 8: Ge 検出器で観測した TDC 分布図

## 謝辞

オルソポジトロニウム実験についてご教示いただいた東京大学の浅井さん、片岡さんに感謝します。また、実験材料の提供をしていただいた奈良女子大学の宮林さんと京都大学の中家さんにお礼を申し上げます。

## References

- [1] D.H. Perkins, "Introduction to High Energy Physics", 4th edition, Cambridge Univ Press, 2000.
- [2] 浅井祥仁、折戸周治、「オルソポジトロニウムの寿命問題」、日本物理学会誌、Vol.49, No.3, 1994, p.217.
- [3] 陣内修、浅井祥仁、小林富雄、「束縛系 QED における高次補正検証実験」、高エネルギーニュース（2000 年）.
- [4] R.B. Firestone, V.S. Shirley, "Table of Isotopes", 8th ed., John Wile & Sons, 1996.
- [5] KEK サマーチャレンジテキスト、正池明、「検出器」。

## Appendix-A 放射線源 $^{22}\text{Na}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$

検出器性能が非常に良い Ge 検出器で観測した  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  および  $^{137}\text{Cs}$  の崩壊スペクトラムを、図 9 に示す。

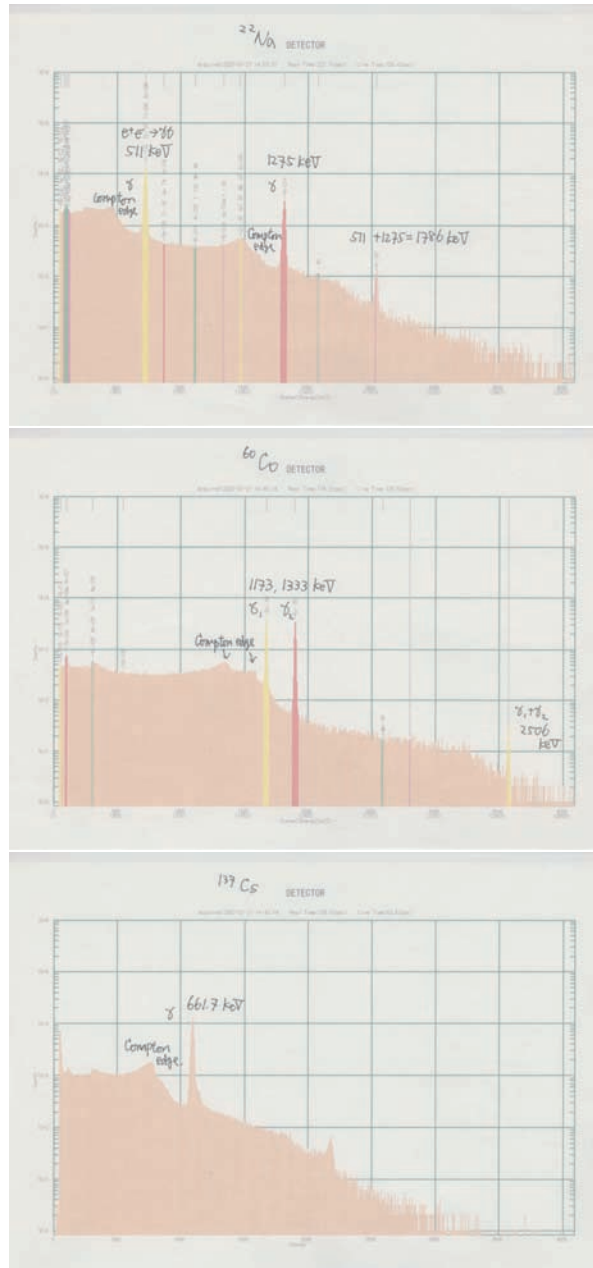


Figure 9: 検出器性能が非常に良い Ge 検出器で観測した  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  および  $^{137}\text{Cs}$  の崩壊スペクトラム。

## Appendix-B 実験参考例

2007 年 8 月に岡山大学で行なった予備実験の結果について、参考のため示す。必ずしも同じセットアップで実験する必要はない。データは、約 11 時間収集した。寿命は、 $\tau = 149 \pm 20 \text{ ns}$  と求められた。高精度の寿命測定のためには、もっと長時間測定する必要がある。

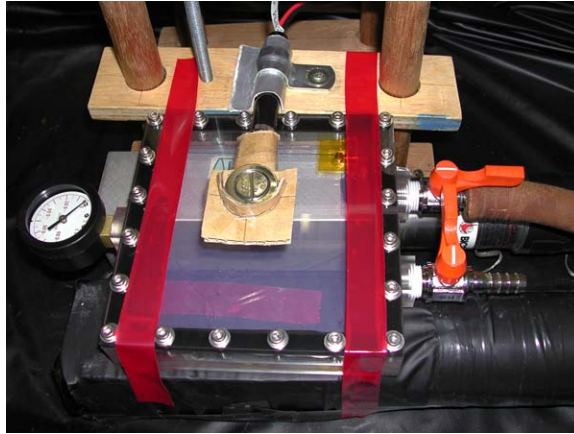


Figure 10: 実験のセットアップ。上から、放射線源  $\text{Na}^{22}$ 、トリガー・カウンタ +  $\frac{1}{2}$  インチ PM、真空ゲージおよび真空バルブの付いた真空小箱、その中に入った薄紫色のエアロジェル、最下段に NaI および CsI カロリメーターが見える。

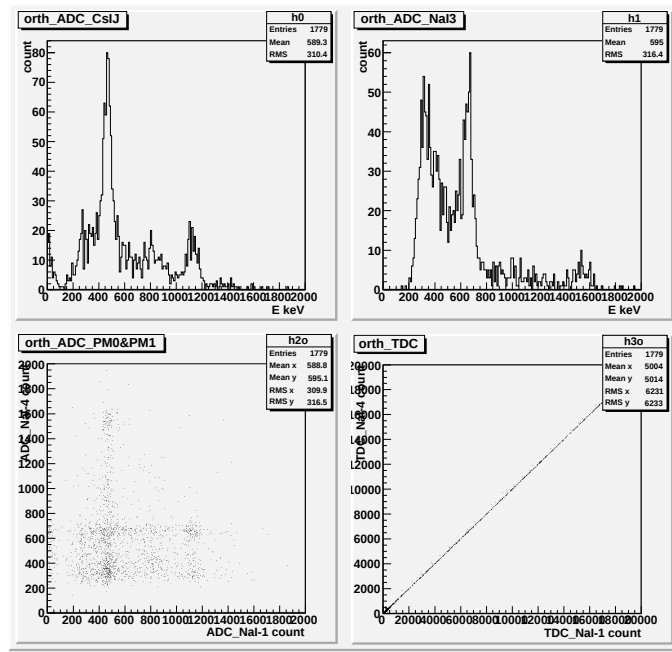


Figure 11: ADC 分布图

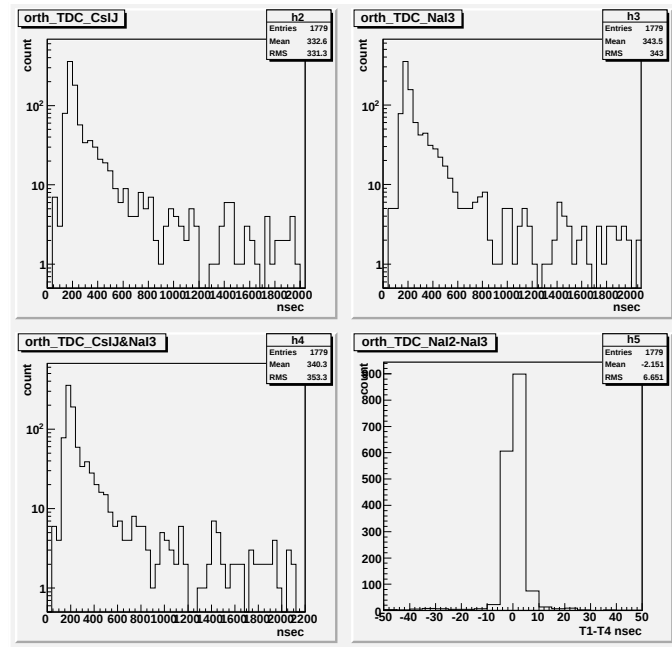


Figure 12: TDC 分布图

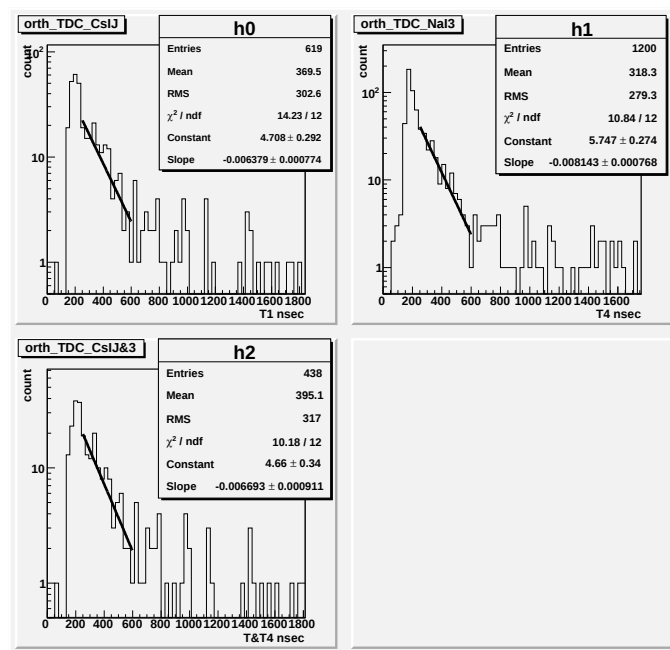


Figure 13: 寿命の測定