

ポジトロニウムの寿命測定

2025 年度後期 課題演習 A2
三輪 出水 辻本 久永 武藤 上田

2026 年 4 月 5 日

概要

ポジトロニウムとは陽電子と電子が共鳴状態になったものであり、有限時間で複数光子に崩壊する。本課題演習では、 ^{22}Na から放出される陽電子を用いてシリカ内にポジトロニウムを生成し、陽電子をプラスチックシンチレータ、光子を NaI シンチレータを用いて検出することで寿命の測定を試みた。pick-off を加味した解析を行い、1 週間にわたりデータ取得を行った結果、最終的な寿命は (131.30 ± 16.53) ns となり、量子電磁気学と整合する結果が得られた。

目次

1	理論背景	2
2	実験方法	2
3	実験装置	3
3.1	実験器具	3
3.2	回路	4
4	データ解析	4
4.1	ADC 較正	4
4.2	TDC 較正	5
4.3	TQ 補正	6
4.4	Pick-off 反応	7
4.5	寿命の計算	7
4.5.1	Acceptance A_i^j の決定	8
4.5.2	Γ_{tot} 及び BG の決定	9
4.5.3	$\tau_{3\gamma}$ の計算	10
5	結果と考察	10
5.1	誤差伝搬	10
5.1.1	ADC 較正における誤差	10
5.1.2	TQ 補正による誤差	10
5.1.3	系統誤差	11
5.1.4	寿命の誤差範囲	11
5.1.5	シリカエアロゲルとアルミの比較	12
5.1.6	Fitting 範囲についての考察	14
6	結果	14

1 理論背景

Ps は電子と陽電子からなる共鳴状態であり, C -parity に応じてパラポジトロニウム (p -Ps, $C = +1$) とオルソポジトロニウム (o -Ps, $C = -1$) に分類される. QED は C 対称性を保存し, n 光子状態の C -parity は $(-1)^n$ であるから, p -Ps は偶数個の光子 (最低次は 2γ), o -Ps は奇数個の光子 (最低次は 3γ , 1γ は運動量保存により禁止) にのみ崩壊できる.

Ps の静止系において, Ps 状態を e^+e^- の 2 粒子 Fock 空間上の状態として次のように書く¹⁾.

$$|\text{Ps}\rangle = \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3 2p^0} \psi(\mathbf{p}) \sum_{\sigma, \sigma'} s_{\sigma\sigma'} b_{\sigma, \mathbf{p}}^\dagger d_{\sigma', -\mathbf{p}}^\dagger |0\rangle \quad (1)$$

ここで $s_{\sigma\sigma'}$ はスピン波動関数, $\psi(\mathbf{p})$ は重み関数である. Ps の束縛エネルギーは静止質量に比べて十分小さく本質的に非相対論的であるから, $\psi(\mathbf{p})$ に Coulomb ポテンシャル下の Schrödinger 方程式を満たすことを要請する. 基底状態 ($1S$) に対する運動量空間の解は

$$\psi(\mathbf{p}) = \frac{8\sqrt{\pi} \gamma^{5/2}}{(\mathbf{p}^2 + \gamma^2)^2}, \quad \gamma := \frac{m_e \alpha}{2} \quad (2)$$

であり, 原点での波動関数の値は

$$\phi(\mathbf{0}) = \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3} \psi(\mathbf{p}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m_e \alpha}{2} \right)^{3/2} \quad (3)$$

で与えられる.

崩壊振幅は, この波動関数 (形状因子) と e^+e^- 対消滅の Born 振幅の積に因数分解される. S 波では $|\mathbf{p}| \sim \gamma \ll m_e$ であるから, 対消滅振幅を $\mathbf{p} = 0$ で評価でき, \mathbf{p} 積分は原点値 $\phi(\mathbf{0})$ を与える. 具体的な計算は過去のレポート [?] などに譲り, ここでは LO の結果のみ記す.

$$\Gamma_0(p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma) = \frac{m_e \alpha^5}{2}, \quad (4)$$

$$\Gamma_0(o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma) = \frac{2(\pi^2 - 9)}{9\pi} m_e \alpha^6. \quad (5)$$

$\alpha^{-1} \simeq 137.036$, $m_e \simeq 0.511$ MeV を用いると,

$$\tau_0^{(\text{para})} \simeq 1.25 \times 10^{-10} \text{ s}, \quad (6)$$

$$\tau_0^{(\text{ortho})} \simeq 1.39 \times 10^{-7} \text{ s}. \quad (7)$$

パラに比べてオルソの寿命が約 3 桁長いのは, C -parity の選択則により最低次が 3γ 崩壊となること (α が 1 つ余分に掛かる) と, 3 体位相空間因子 $2(\pi^2 - 9)/9\pi \simeq 0.175$ の抑制による.

2 実験方法

線源 ^{22}Na の β^+ 崩壊により陽電子が放出され, その陽電子がプラスチックシンチレータを通過した後, シリカエアロゲル中の電子と結びついてポジトロニウムが生成される. ポジトロニウムは寿命により γ 線を放出しながら崩壊し, その γ 線が NaI4 によって検出される. 陽電子や γ 線が空間中を進む時間はポジトロニウムの寿命と比べて十分短いので, プラスチックシンチレータと NaI4 で検出された時刻差をポジトロニウムの寿命とした.

1) より一般的には, Heisenberg 場の複合演算子 $\mathcal{O}_\Gamma(x) = \bar{\psi}(x)\Gamma\psi(x)$ を真空中に作用させて $|\text{Ps}\rangle$ を構成する定式化がある. この場合 $|\text{Ps}\rangle$ は 2 粒子セクターに限定されず, Bethe-Salpeter 方程式の非相対論的近似 (瞬間 Coulomb 核の LO 解) を経て初めて 2 粒子状態表示が導出される.

3 実験装置

3.1 実験器具

1. ^{22}Na 線源
2. プラスチックシンチレータ (P.S. またはプラシン)
3. シリカエアロゲル (2cm 角)
4. NaI シンチレータ
5. 鉛ブロック
6. 遮光ビニールシート
7. 電源装置
8. NIM モジュール

以上の実験装置を図1のように配置した。線源から放出された陽電子がプラスチックシンチレータを通り、シリカエアロゲルに到達するようこれらを一直線上に並べた。NaI には線源からの放射線が直接入らないようにするためにシリカの上に固定した。また、できるだけ宇宙線などのノイズを減らすために鉛ブロックで覆ったのち、遮光ビニールシートで全体を覆った。
(図2)

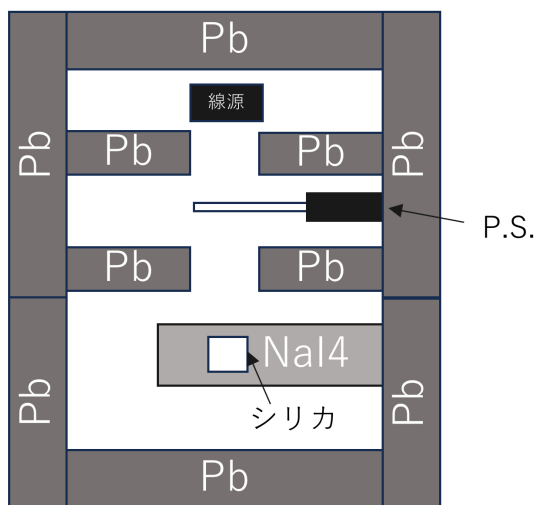


図1 実験セットアップを上から見た断面図。線源・プラシン・シリカエアロゲルは一直線上にある。

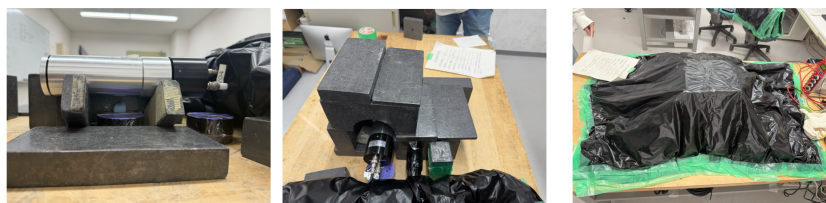


図2 セットアップの外観

3.2 回路

プラスチックシンチレータと NaI の信号を図 3 で示した回路に送った。

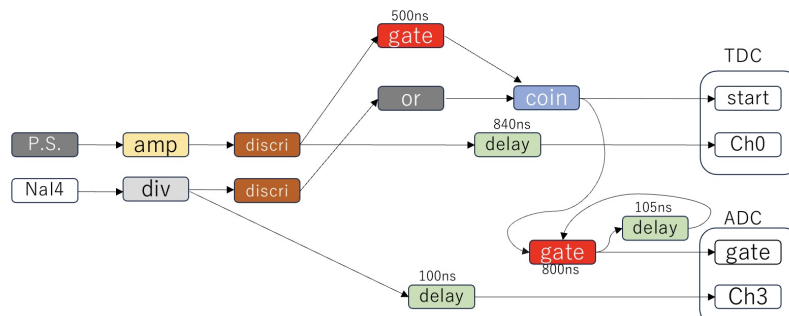


図 3 回路図

以下がモジュールの名称とその役割の対応である。

amp : amplifier 入力された信号を増幅する。

div : divider 入力された信号を2つの信号に分けて出力する。

dis : discriminator 閾値を超える値の信号が入力されたときに NIM 信号を出力する。

delay : Delay generator 入力された信号を遅らせて出力する。

gate : gate generator 信号が入力されると、任意の時間幅の NIM 信号を出力する。

coin : coincidence 入力端子全てから信号が入力されている時のみ、NIM 信号を出力する。

or : 入力端子のうち少なくとも一つに信号が入力されている時に NIM 信号を出力する。

veto : 信号の入力があった後、指定した一定時間は次の信号を検出しないようにする。

TDC : Time to Digital Converter start 端子に信号が入力されてから stop 端子に信号が入力されるまでの時間を計測する。

ADC : Analog to Digital Converter gate 端子に信号が入力されてから stop 端子に信号が入力されるまでの間、入力信号の波形を積分した値を出力する。

プラスチックシンチレータで検出された陽電子と NaI で検出された γ 線の対応を正確にするために以下のようにして寿命を計算した。

P.S. の信号から gate を生成し、gate 範囲内の NaI の信号を start の trigger とする。P.S. を任意の時間遅らせた信号を stop の trigger とすると、図 4 よりポジトロニウムの寿命は delay と計測された時間の差となる。

4 データ解析

4.1 ADC 較正

ADC は入力された信号の面積に対応する 0~4095 の整数値を出力する。そのため、実際のエネルギーと ADC の出力の関係式を求める必要がある。まず、ADC 回路に何も入力をして

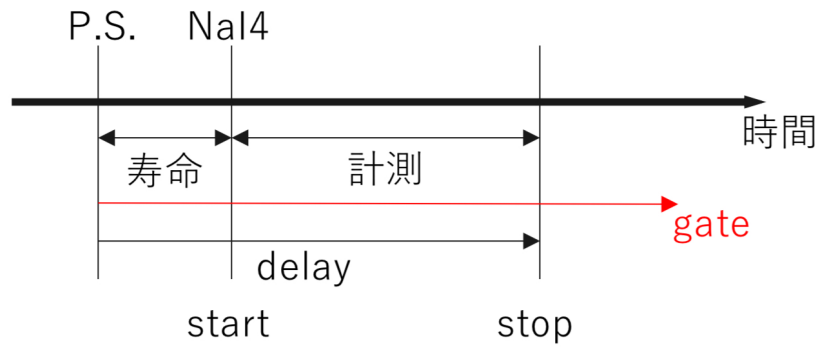


図4 計測方法

いないときの値を確認しその結果を 0keV とした。次に実際に得られたデータを確認し、陽電子由来の 511keV のピークに対応する ADC 値を Gaussian による fit で求めた。

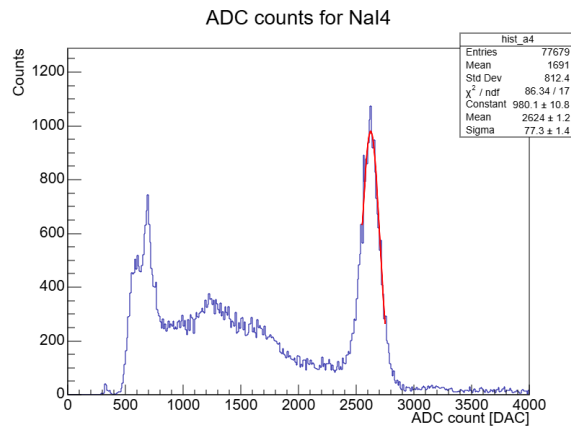


図5 実験結果の ADC 値の分布

この2つの値を直線で fit した。

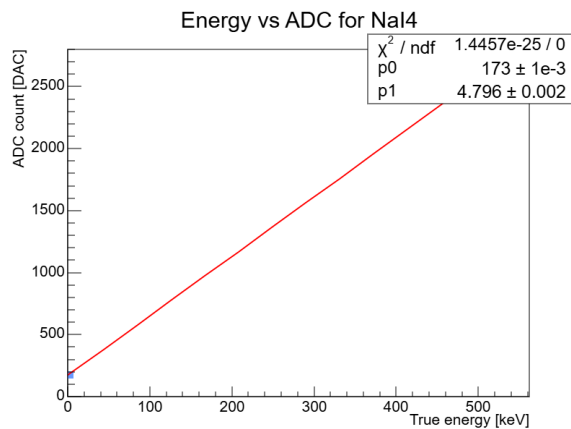


図6 ADC 値とエネルギーの関係の fit 結果

結果は、 $Energy = p_0 + p_1 \times ADCcounts$, $p_0 = 173 \pm 0.001$, $p_1 = 4.796 \pm 0.002$ となった。

4.2 TDC 較正

TDC も同様に較正をする必要がある。本実験では delay モジュールを使った。105ns のモジュールを 1、2、3 個通したときの時間差を TDC で測定し、TDC 値と実際の時間差を直線で fit した。回路の delay を差し引いた結果は $Time = 840 - (TDCcount - 51.26)/4.321$ となった。

4.3 TQ 補正

以下は上で求めたエネルギーと時間による 2 次元ヒストグラムである。 gate の設定が短かっ

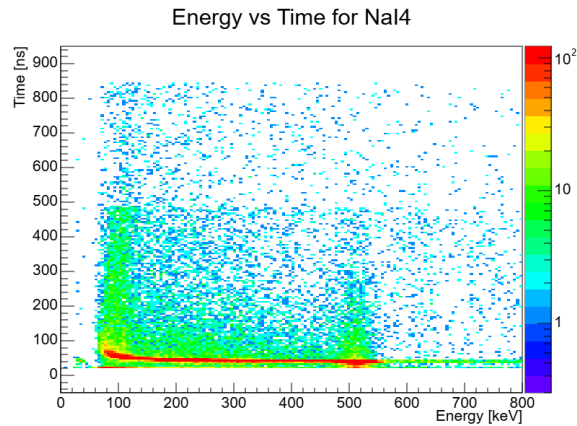


図 7 エネルギーと時間の 2 次元ヒストグラム

たため、500ms 付近を境にデータが少なくなってしまう。また、最も信号の多い時刻は P-Ps による時刻 0 の反応となるはずだが、エネルギーによってピークの時刻に差が出ている。これは、エネルギーによって波形の立ち上がり方が違うことにより閾値を超える時間に差が出るためである。これを補正するために TQ 補正を行う。まず、60keV から 600keV を等間隔に 20 個の区間に分けそれぞれでの時刻 0 の基準を決めた。これはそれぞれの区間を Gaussian で fit することで求めた。つぎに、上で求めた時刻 0 の基準を求めて関数で fit した。ここでは

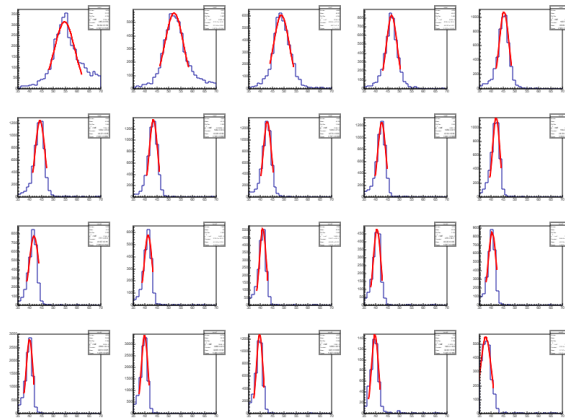


図 8 各エネルギー区間での信号の分布

$$\Delta T = \frac{p_0}{(E - p_1)^{p_2}} + p_3 \quad (8)$$

という関数で fit した。結果は $p_0 = 59.14 \pm 2.45$, $p_1 = 73.37 \pm 0.02$, $p_2 = 0.16 \pm 0.03$, $p_3 = 17.09 \pm 5.14$ となった。この結果を差し引いた 2 次元ヒストグラムは以下ようになった。どのエネルギーでも時刻 0 にピークがあると分かる。

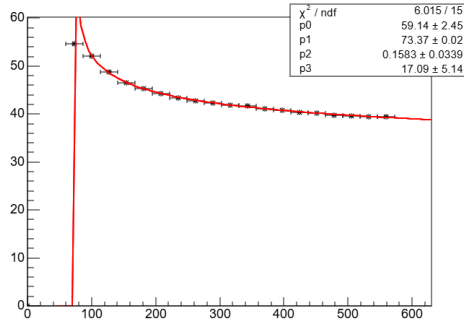


図9 エネルギーと時間のずれの関係

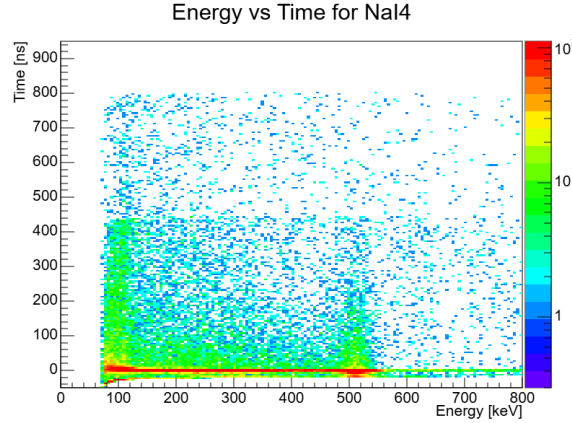


図10 TQ 補正後のエネルギーと時間の関係

4.4 Pick-off 反応

本実験で調べたいのは Ps が 3γ として崩壊する反応の崩壊率だが、実際には周りの電子と反応したり、スピンを交換したりすることによって 2γ で崩壊することがある。この 2γ に崩壊する反応を Pick-Off 反応と呼ぶ。ここでは Ps の通常の 3γ に崩壊するときの崩壊率、すなわち寿命の逆数を $\Gamma_{3\gamma}$ 、Pick-Off 反応による崩壊率を $\Gamma_{2\gamma}$ 、その和を Γ_{tot} とする。測定データは $e^{-\Gamma_{tot}t}$ に比例するため単に fit するだけでは寿命を求めることができない。そのため、測定データを2つの領域に分けて解析をする必要がある。

4.5 寿命の計算

時刻 t に生きている o-Ps の計数は、単位時間あたりの崩壊確率 Γ を用いて、

$$N(t) = N_0 e^{-(\Gamma_{2\gamma} + \Gamma_{3\gamma})t} \quad (9)$$

と表される。ここで、240 から 450keV の signal region, 480 から 530keV の control region の二つの領域の計数の時間変化は、

$$\frac{dN_{CR}}{dt} = -(A_{CR}^{2\gamma}\Gamma_{2\gamma} + A_{CR}^{3\gamma}\Gamma_{3\gamma})N(t) + BG_{CR} \quad (10)$$

$$\frac{dN_{SR}}{dt} = -(A_{SR}^{2\gamma}\Gamma_{2\gamma} + A_{SR}^{3\gamma}\Gamma_{3\gamma})N(t) + BG_{SR} \quad (11)$$

と表される。ここで、係数 A(acceptance) は $2\gamma, 3\gamma$ 崩壊が起きて、それが CR(SR) に入る確率であり、BG は時間依存しない偶然の背景事象である。シミュレーションを行うことで係数 A を決定し、実験データから BG と $\Gamma_{tot}(= \Gamma_{2\gamma} + \Gamma_{3\gamma})$ を求めることで、SR, CR における $2\gamma, 3\gamma$ の発生比率が求まり、最終的に寿命 $\tau_{3\gamma}$ を計算することができる。

4.5.1 Acceptance A_i^j の決定

係数 A_i^j は検出器シミュレーション (Geant4) を用いて求めた。²⁾ 原点において 2γ および 3γ のイベントを等方的に生成し、 2γ の場合は 2 つの 511keV の γ 線を back-to-back に、 3γ の場合はエネルギーを Ore-Powell 分布に従って、いずれも等方的に生成した。検出器は NaI とし、そのほかにも鉛ブロック・シリカエアロゲル・台座 (銅) を実際の寸法・位置に基づいて設置した。100 万イベントでシミュレーションを行い、 $2\gamma, 3\gamma$ のそれぞれの場合で NaI に落とした総エネルギーを求め、それを実際の分解能に基づいてなまらせたエネルギー分布を求めた (図 12)。そこから SR、CR のエネルギー帯に入った数を数えることで、係数 A を求めた。

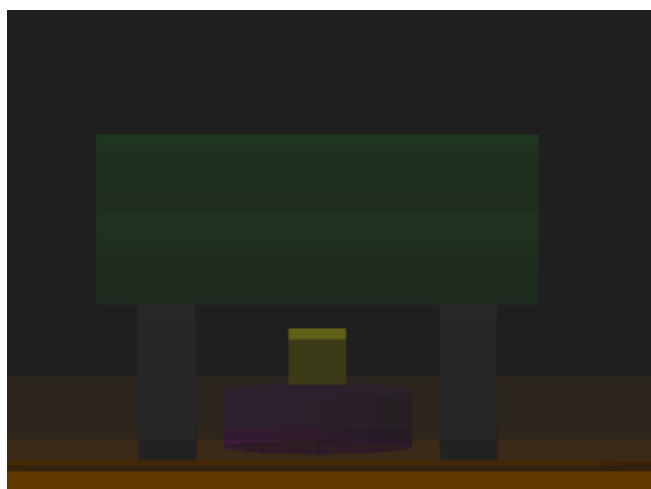


図 11 シミュレーションの配置。緑:NaI、黄色: シリカ、紫: テープの土台、茶色: 机、黒: 鉛ブロック

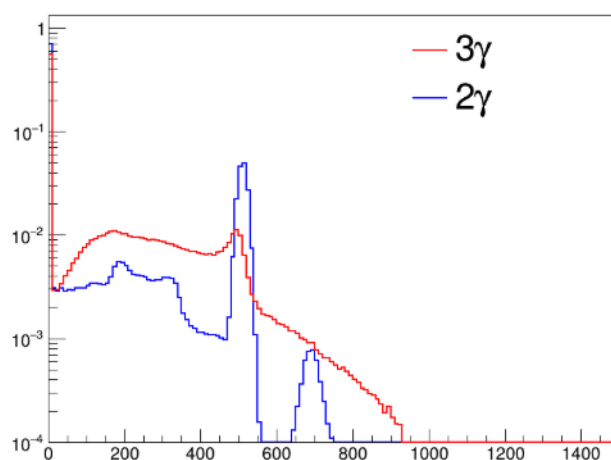


図 12 シミュレーション結果。各エネルギーにおいてどれくらい $2\gamma, 3\gamma$ が入ったかを表している。NaI に当たらなかった、もしくは NaI を透過したイベントは 0keV としている。

各係数は以下ようになった。

$$A_{SR}^{2\gamma} = 0.0713$$

$$A_{CR}^{2\gamma} = 0.1583$$

$$A_{SR}^{3\gamma} = 0.2083$$

$$A_{CR}^{3\gamma} = 0.0442$$

2) というレポジトリの A22025b_{final} という tag である。

4.5.2 Γ_{tot} 及び BG の決定

SR,CR の時間分布を $p_0 e^{-t/p_1} + p_2$ でフィットさせる。ここで、 $p_1 = 1/\Gamma_{tot}, p_2 = \text{BG}$ である。fit の時間幅は 80ns から 400ns の範囲で行った。また、時間幅や SR,CR の範囲は p_1 が概ね一致するような値を用いた。

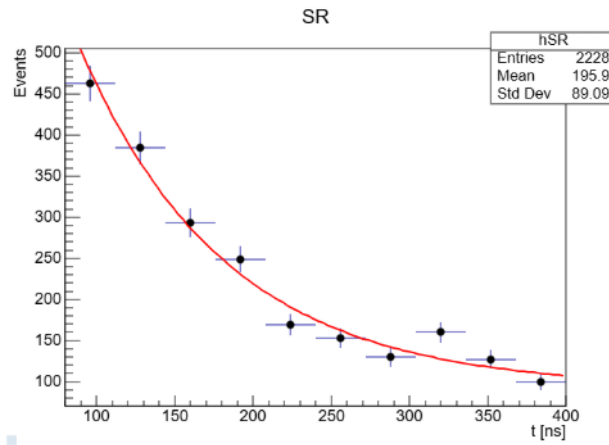


図 13 SR のフィット

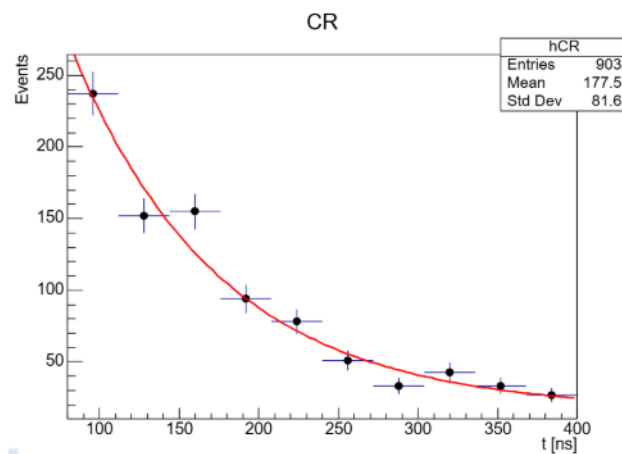


図 14 CR のフィット

SR におけるフィット結果は

$$p_0 = 1073.65 \pm 140.041$$

$$p_1 = 93.708 \pm 11.0218$$

$$p_2 = 92.3836 \pm 12.3032$$

であり、CR におけるフィット結果は

$$p_0 = 610.154 \pm 91.8021$$

$$p_1 = 93.2315 \pm 11.928$$

$$p_2 = 16.3364 \pm 6.8726$$

となった。

4.5.3 $\tau_{3\gamma}$ の計算

式 (10),(11) を時間積分して整理すると、 $T =$ (時間の幅) として

$$N_{CR} - BG_{CR} \times T = N_0 \frac{A_{CR}^{2\gamma} \Gamma_{2\gamma} + A_{CR}^{3\gamma} \Gamma_{3\gamma}}{\Gamma_{tot}} \quad (12)$$

$$N_{SR} - BG_{SR} \times T = N_0 \frac{A_{SR}^{2\gamma} \Gamma_{2\gamma} + A_{SR}^{3\gamma} \Gamma_{3\gamma}}{\Gamma_{tot}} \quad (13)$$

これらより、

$$R := \frac{N_{CR} - BG_{CR} \times T}{N_{SR} - BG_{SR} \times T} = \frac{A_{CR}^{2\gamma} \Gamma_{2\gamma} + A_{CR}^{3\gamma} \Gamma_{3\gamma}}{A_{SR}^{2\gamma} \Gamma_{2\gamma} + A_{SR}^{3\gamma} \Gamma_{3\gamma}} \quad (14)$$

これを $\Gamma_{2\gamma}/\Gamma_{3\gamma}$ について解くと、

$$\frac{\Gamma_{2\gamma}}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{R \cdot A_{SR}^{3\gamma} - A_{CR}^{3\gamma}}{A_{CR}^{2\gamma} - R \cdot A_{SR}^{2\gamma}} \quad (15)$$

一方、

$$\tau_{3\gamma} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{1}{\Gamma_{tot}} \left(1 + \frac{\Gamma_{2\gamma}}{\Gamma_{3\gamma}} \right) \quad (16)$$

であるので、これらより $\tau_{3\gamma}$ を計算すると、

$$\begin{aligned} \tau_{3\gamma} &= 131.63 \text{ ns} \quad (\text{SR での } \Gamma_{tot} \text{ を用いた場合}) \\ &= 130.96 \text{ ns} \quad (\text{CR での } \Gamma_{tot} \text{ を用いた場合}) \end{aligned}$$

となった。

5 結果と考察

5.1 誤差伝搬

求めた寿命の誤差を求め、理論値が測定結果の誤差範囲に整合するかを考察する。寿命測定に用いた ADC 較正、TQ 補正および系統誤差について考える。

5.1.1 ADC 較正における誤差

ADC 較正における寿命の誤差 δ_{ADC} を考える。ADC 較正におけるパラメータは、

$$p_0 = 173 \pm 0.001$$

$$p_1 = 4.796 \pm 0.002$$

であり、これらの誤差によって生じる寿命の誤差は十分小さいので、 $\delta_{ADC} \approx 0$ と無視できる。

5.1.2 TQ 補正による誤差

TQ 補正による寿命の誤差 δ_{TQ} を考える。TQ 補正におけるパラメータは前述の通り、

$$p_0 = 60.9 \pm 0.0$$

$$p_1 = 73.35 \pm 0.00$$

$$p_2 = 0.1194 \pm 0.0000$$

$$p_3 = 10.73 \pm 0.00$$

であり、パラメータの誤差が非常に小さいので、TQ 補正による寿命の誤差は $\delta_{TQ} \approx 0$ と無視できる。

5.1.3 系統誤差

2 式 (14),(16) において、変数は $N_{CR}, N_{SR}, BG_{CR}, BG_{SR}, \tau_{tot}(= 1/\Gamma_{tot})$ の 5 つだから系統誤差 $\delta\tau_{\text{system}}$ は、

$$\begin{aligned} \delta\tau_{\text{system}}^2 = & \left(\frac{\partial\tau_{3\gamma}}{\partial\tau_{tot}} \right)^2 \delta\tau_{tot}^2 + \left(\frac{\partial\tau_{3\gamma}}{\partial N_{CR}} \right)^2 \delta N_{CR}^2 + \left(\frac{\partial\tau_{3\gamma}}{\partial N_{SR}} \right)^2 \delta N_{SR}^2 \\ & + \left(\frac{\partial\tau_{3\gamma}}{\partial BG_{CR}} \right)^2 \delta BG_{CR}^2 + \left(\frac{\partial\tau_{3\gamma}}{\partial BG_{SR}} \right)^2 \delta BG_{SR}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

から求められる。

ただし、 $\delta\tau_{tot}$ は p_1 の寿命 fitting の誤差、 $\delta N_{CR} = \sqrt{N_{CR}}, \delta N_{SR} = \sqrt{N_{SR}}$ で、 $\delta BG_{CR}, \delta BG_{SR}$ はそれぞれ CR,SR を用いたときの p_2 の寿命 fitting の誤差である。

SR における寿命 fitting のパラメータは前述の通り、

$$\begin{aligned} p_1 &= 93.708 \pm 11.0218 \\ p_2 &= 92.3836 \pm 12.3032 \end{aligned}$$

CR における寿命 fitting のパラメータは前述の通り、

$$\begin{aligned} p_1 &= 93.2315 \pm 11.928 \\ p_2 &= 16.3364 \pm 6.8726 \end{aligned}$$

であるため、SR,CR での Γ_{tot} を用いた場合の誤差はそれぞれ、

$$\delta_{\text{system}} = \begin{cases} 16.2 \text{ (SRでの } \Gamma_{tot} \text{ を用いた場合)} \\ 17.4 \text{ (CRでの } \Gamma_{tot} \text{ を用いた場合)} \end{cases} \quad (18)$$

となる。

5.1.4 寿命の誤差範囲

誤差伝搬の公式から、寿命の誤差 $\delta\tau_{3\gamma}$ は、

$$\delta\tau_{3\gamma} = \sqrt{\delta_{ADC}^2 + \delta_{TQ}^2 + \delta_{\text{system}}^2} \quad (19)$$

により求められ、 $\delta_{ADC}, \delta_{TQ}$ が十分小さいことと、式 (18) から、

$$\tau_{3\gamma} = \begin{cases} 131.63 \pm 16.2 \text{ [ns]} & \text{(SRでの } \Gamma_{tot} \text{ を用いた場合)} \\ 130.96 \pm 17.4 \text{ [ns]} & \text{(CRでの } \Gamma_{tot} \text{ を用いた場合)} \end{cases} \quad (20)$$

となり、これらの平均を中心としてこれら 2 つの範囲が重なる区間を考えると、寿命の誤差範囲は、

$$\tau_{3\gamma} = 131.30 \pm 16.53 \text{ [ns]} \quad (21)$$

であり、これは理論値 $\tau_{3\gamma} = 142.04 \text{ [ns]}$ を誤差範囲に含む。

5.1.5 シリカエアロゲルとアルミの比較

ポジトロニウムの生成環境としてシリカエアロゲルのターゲット (2cm 立法) を、同じ寸法を持つアルミの立方体に変えて同じ実験を行った。シリカエアロゲルは多孔質構造を持ち、電子密度が比較的低い。そのためポジトロニウムは自由に存在でき、pick-off 反応も比較的抑制されるため 3γ 崩壊成分が明確に観測される。一方、アルミは金属であり電子密度が高いため、ポジトロニウムは周囲の電子と強く相互作用する。この結果 2γ 崩壊成分が増加すると考えられ、これにより本実験において pick-off 成分のエネルギー・時間分布が正しく抽出できていることが期待される。図 15-16 はそれぞれ CR、SR における時間分布のフィットの結果である。フィット関数は 4.5.2 章と同じ、左のシリカの図は比較のためにおり図 4.5.2-4.5.2 と同じである。図 17 はエネルギー分布の比較である。 $t > 80$ ns のイベントのみ抽出し、各エネルギービンにおいて時間分布をフィットし、長時間極限のオフセット (p_2) BG として表示している。 2γ 、 3γ の成分は、Geant4 から求めたエネルギー分布の形 (図 12) を用いて、4.5.3 の手順で求めた数に規格化したものを表示している。図 18-19 は同様の手続きで求めた、CR・SR における時間分布を成分別に表示したものである。

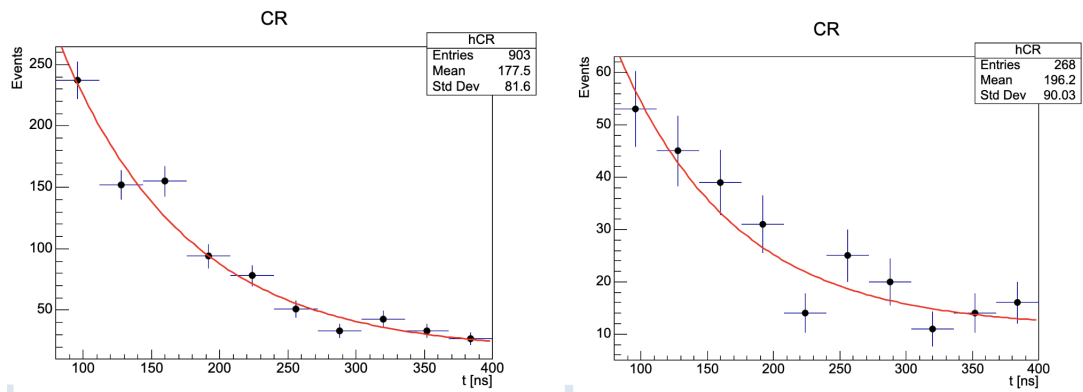


図 15 CR のフィット (左：シリカ 右：アルミ)

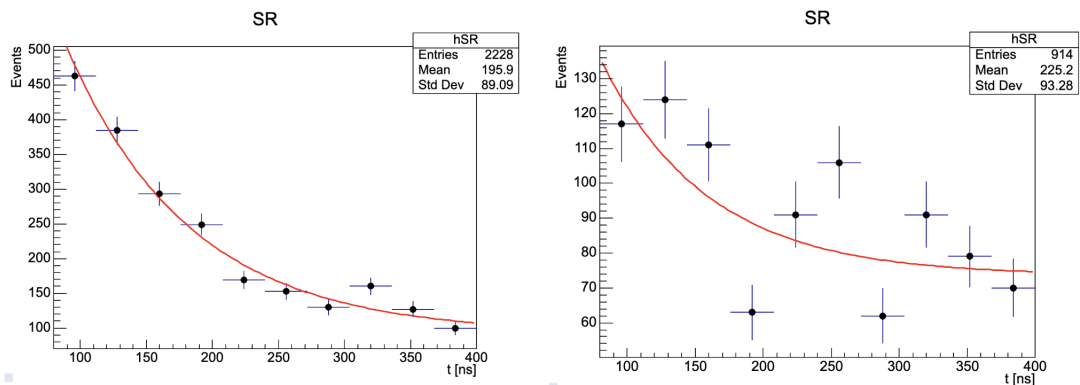


図 16 SR のフィット (左：シリカ 右：アルミ)

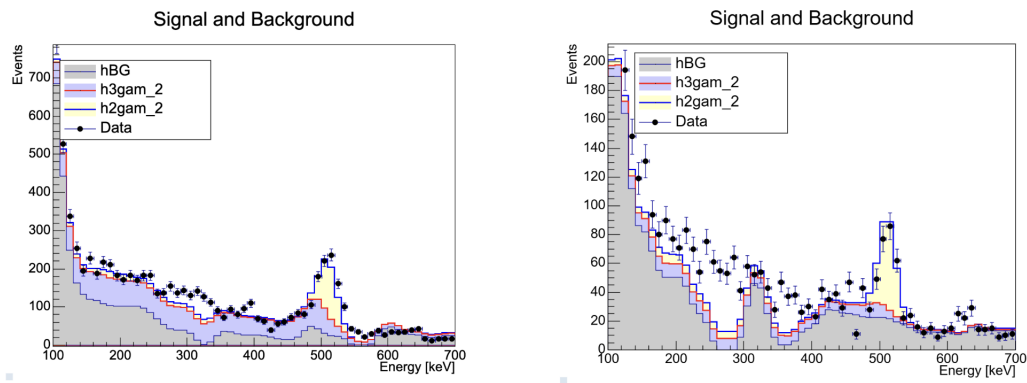


図 17 エネルギースペクトルと信号・背景成分の分解 (左：シリカ 右：アルミ)

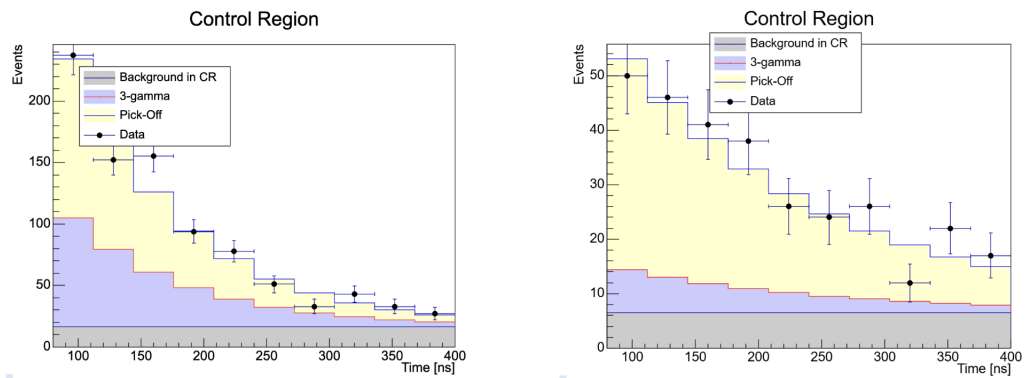


図 18 Control Region における時間分布 (左：シリカ 右：アルミ)

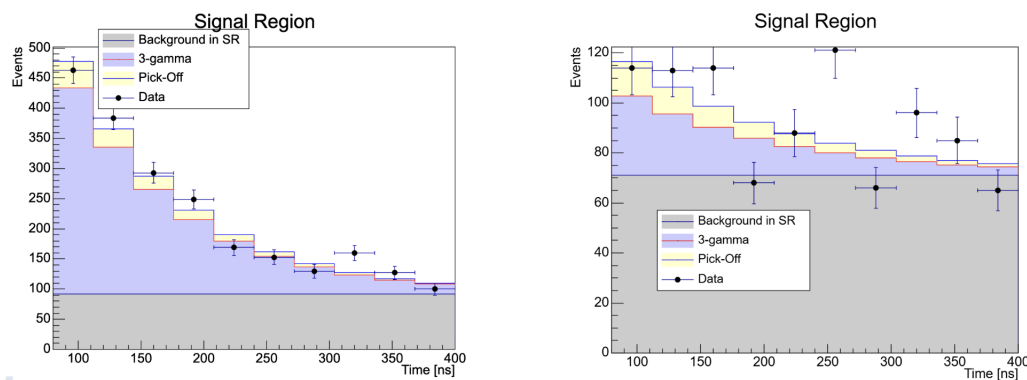


図 19 Signal Region における時間分布 (左：シリカ 右：アルミ)

シリカエアロゲルとアルミの比較図から、試料物質の違いがポジトロニウムの生成・崩壊過程に大きく影響していることが分かる。シリカゲルでは o -Ps 由来の遅延成分が比較的明瞭に観測され、SR と CR の時間分布も同程度の減衰定数で記述できることから、 o -Ps の寿命測定に適した環境であると考えられる。一方、アルミホイルでは 511 keV 付近の 2γ 成分が相対的に増大し、さらに中間エネルギー領域の背景成分も増加している。これは、金属中では電子密度が高く、ポジトロニウムが形成されにくい、あるいは形成されても周囲電子との相互作用によって 2γ の消滅が起りやすいためである。したがって、シリカゲルは o -Ps の 3γ 崩壊を観測するのに有利であり、アルミホイルはポジトロニウムが壊れやすい比較対象として理解できる。

5.1.6 Fitting 範囲についての考察

fitting 範囲を変えると以下のように結果が変わってしまった。

tmin	\mathcal{T}_{totCR}	\mathcal{T}_{totSR}
40	96.3±8.3	88.8±5.5
50	93.6±9.2	85.4±6.7
60	93.0±9.9	85.4±7.3
70	99.0±11.9	87.8±8.7
80	93.2±11.9	93.7±11.0
90	93.7±13.7	85.6±10.6
100	101.6±16.7	90.6±13.2
110	93.6±15.4	82.9±13.5
120	86.6±15.7	83.9±15.4

理論上は CR と SR で τ_{tot} は一致するので今回は最も値に近い 80 ns を時間範囲の始まりとした。

6 結果

本実験では、ポジトロニウムの寿命を測定し、

$$\tau_{3\gamma} = 131.30 \pm 16.53 \text{ ns}$$

を得た。この結果は理論値 $\tau_{3\gamma} = 142.04 \text{ ns}$ を誤差範囲内に含んでおり、予測と整合している。また、Signal Region (SR) および Control Region (CR) における時間分布を指数関数 $p_0 e^{-t/p_1} + p_2$ でフィットした結果、両者で得られた減衰定数 p_1 は

$$p_1^{\text{SR}} = 93.7 \pm 11.0 \text{ ns}, \quad p_1^{\text{CR}} = 93.2 \pm 11.9 \text{ ns}$$

と一致した。これは、SR と CR が同一のポジトロニウム集団を異なるエネルギー条件で観測していることを示しており、解析手法の妥当性を裏付けている。

さらに、シリカエアロゲルとアルミを比較すると、シリカでは 3γ 崩壊成分が明瞭に観測される一方、アルミでは 2γ 成分および背景成分が増加していることが確認された。これは、アルミ中では電子密度が高く、ポジトロニウムが周囲電子と相互作用しやすいため、 2γ 崩壊 (pick-off を含む) が増加するためである。

以上より、本実験ではポジトロニウムの寿命を精度よく測定するとともに、物質中における消滅過程の違いを実験的に確認することができた。

参考文献

- [1] Sakamoto, M. (2023). *QUANTUM FIELD THEORY II focus on Feynman graphs and renormalization 3rd*. SHOKABO.