

オルソポジトロニウムの寿命測定

小笠原優斗 重富友汰 廣部佑真 藤原俊太 水原朔

2022年12月22日

目次

1	序論	3
1.1	実験背景	3
1.2	実験概要	3
2	理論	4
2.1	ポジトロニウムとは	4
2.2	ポジトロニウムの性質	4
3	実験	5
3.1	実験原理	5
3.2	実験器具	5
3.3	セットアップ	5
3.4	回路	6
4	結果・解析	7
4.1	実験データ	7
4.2	calibration	8
4.3	TQ 補正	10
4.4	Pick-off 補正	12
5	考察	16
5.1	寿命	16
5.2	誤差	18
5.3	考察	20

1 序論

1.1 実験背景

ポジトロニウムは 1951 年に Martin Deutsch[2] によって発見されて以来、多くの理論的研究や実験的研究がなされてきた。特にオルソポジトロニウムの寿命は量子電磁力学 (QED) によって理論的に計算でき、また、実験によっても計測できるため、QED の試金石となる。本実験の目的はオルソポジトロニウムの寿命を測定することによる QED の実験的検証である。

1.2 実験概要

^{22}Na の崩壊によって放出される陽電子をシリカパウダーに当てることで、シリカパウダーの電子との束縛状態、つまりポジトロニウムを形成させ、そのポジトロニウムは電子陽電子対消滅によって光子へと崩壊する。本実験では、この光子を観測することでオルソポジトロニウムの寿命を計測した。

2 理論

2.1 ポジトロニウムとは

ポジトロニウムとは電子とその反粒子である陽電子の電磁気力による準安定な束縛状態である。[3] 電子と陽電子はどちらもスピン $1/2$ を持つため、それらの束縛状態であるポジトロニウムには合成スピン S が 0 のものと 1 のものの二種類が存在する。 $S = 0$ のものをパラポジトロニウム、 $S = 1$ のものをオルソポジトロニウムという。また、今回の実験ではポジトロニウムは基底状態、つまり軌道角運動量 L が 0 であると考えられる。それらの寿命については、NRQED と呼ばれる量子電磁力学の非相対論的な有効理論を用いる [5] など、様々な方法で摂動の高次の項まで計算されている。

2.2 ポジトロニウムの性質

パラポジトロニウムとオルソポジトロニウムはどちらも C 変換 (粒子と反粒子を入れ替える変換) の演算子 \hat{C} の固有状態であるが固有値が異なる。それぞれの状態ベクトルを $|p\text{-Ps}\rangle, |o\text{-Ps}\rangle$ と書くと、パラポジトロニウムは、電子、陽電子がフェルミオンであることによる -1 とスピン部分の反対称性による -1 によって

$$\hat{C} |p\text{-Ps}\rangle = |p\text{-Ps}\rangle$$

となり、オルソポジトロニウムは電子、陽電子がフェルミオンであることによる -1 により、

$$\hat{C} |o\text{-Ps}\rangle = - |o\text{-Ps}\rangle$$

となる。また、電磁場を A^μ と書くと、電磁場の C 変換性は

$$\hat{C} A^\mu \hat{C}^{-1} = -A^\mu$$

であるので、パラポジトロニウムは偶数個の、オルソポジトロニウムは奇数個の光子に崩壊することが分かる。ここで、エネルギー、運動量保存則を考慮するとポジトロニウムは 1 つの光子に崩壊することはないため、それぞれの崩壊は、

$$p\text{-Ps} \rightarrow 2\gamma, 4\gamma, \dots$$

$$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma, 5\gamma, \dots$$

となる。これらよりパラポジトロニウムの寿命 $\tau_{p\text{-Ps}}$ 、オルソポジトロニウムの寿命 $\tau_{o\text{-Ps}}$ を計算すると、

$$\tau_{p\text{-Ps}} \simeq 124 \text{ ps}$$

$$\tau_{o\text{-Ps}} \simeq 142 \text{ ns}$$

と求められる。

3 実験

3.1 実験原理

$^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne}^* + e^+ + \nu_e$ の反応によって陽電子が放出される。陽電子はシリカパウダー (SiO_2) が含む電子とともにポジトロニウムを形成する。ポジトロニウムは数 ns のうちに崩壊して γ 線を放出する。本実験では ^{22}Na からの陽電子をプラスチックシンチレータで検出し、ポジトロニウムが放出する γ 線を NaI シンチレータで検出する。

3.2 実験器具

- ^{22}Na : e^+ を放出する放射線源 (SiO_2) : e^+ と反応して Ps を形成するター (P.S.): e^+ を検出するシンチレータ
- NaI シンチレータ: γ 線を検出するシンチレータ
- 鉛ブロック: 外部からの放射線を遮断する
- 遮光ビニール: プラスチックシンチレータに外部からの光が入らないように全体を覆う

3.3 セットアップ

実験器具の配置は図 1 のようにした。実際の配置は図 2 のようにした。シリカパウダー内で生成されたポジトロニウムが余計な反応をしないために、シリカパウダーを加熱して水分を飛ばした。例年は容器を真空にしていたが、今年は機材の不調のためにそうすることはできなかった。

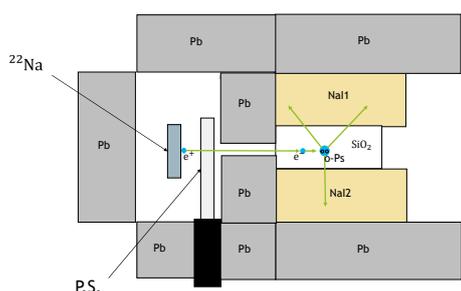


図 1 配置の模式図

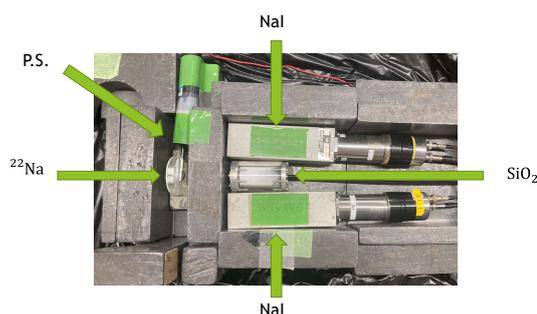


図 2 実際の配置

3.4 回路

回路は図3のようにした。信号の概念図は図4のようである。もしP.S.の信号を直接TDCstartに送ったとすると、目的の信号以外の信号も検出してしまい、実験の効率が悪くなってしまう。そこで、P.S.の信号からのgateとNaIからの信号でcoincidenceをとってからTDCstartに送ることにより、NaIシンチレータに信号が来たことを確認してから時間を測定できるようにした。以下、実験に用いた端子についての説明を行う。

- discriminator: 入力された信号が threshold を超えた時 NIM 信号を出力する。
- coincidence: すべての入力端子に同時に信号が来た場合のみ NIM 信号を出力する。
- FAN: いずれかの入力端子に信号が来た場合に NIM 信号を出力する。
- gate generator: 信号が入力されたとき一定の時間幅の NIM 信号を出力する。
- veto: gate の信号が来ている間は、次の信号が入力されないようにする。
- TDC: start に信号が入ってから stop に信号が入るまでの時間に比例した値を出力する。
- ADC: gate が開いている間に来た信号の時間積分である電荷に比例した値を出力する。

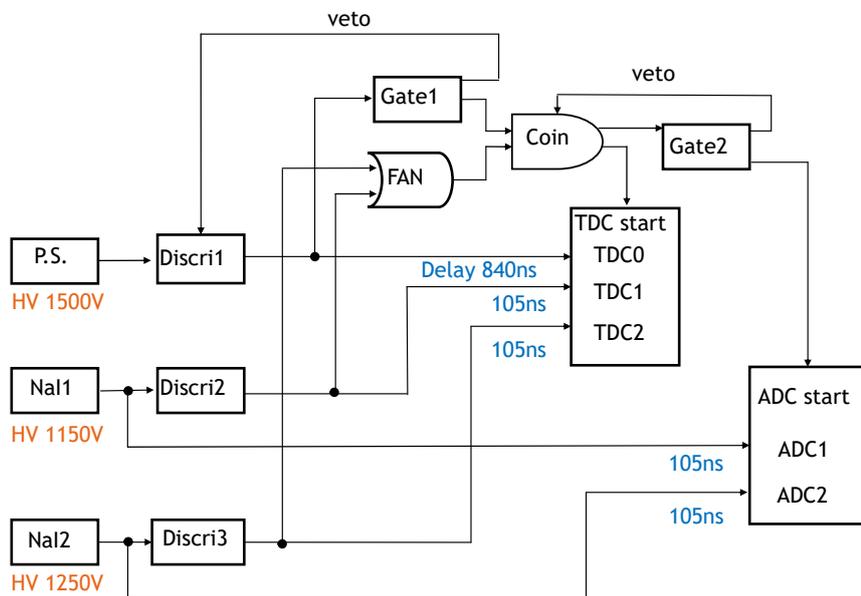


図3 回路図

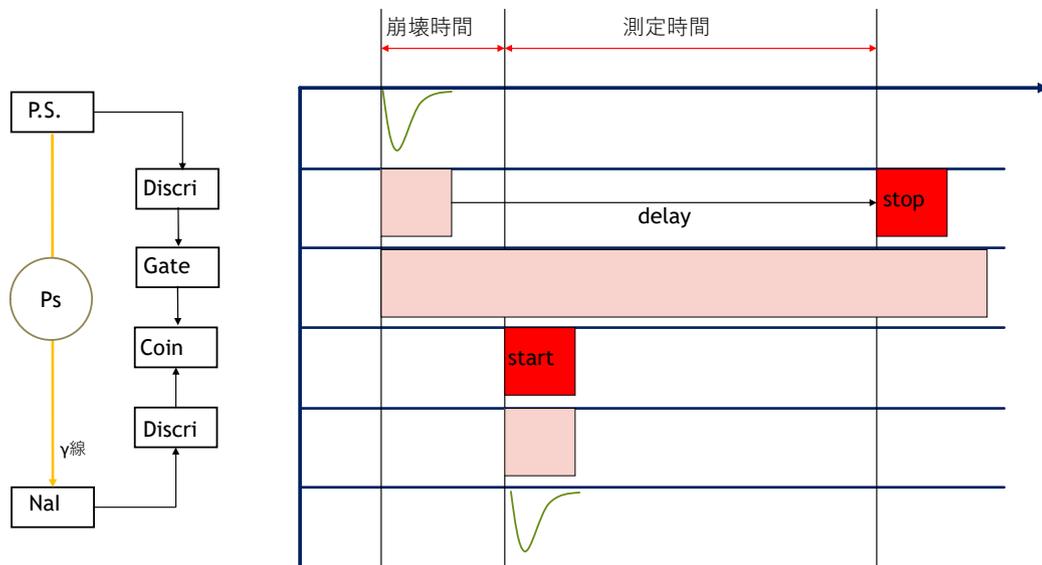


図 4 回路の概念図

4 結果・解析

4.1 実験データ

以下に各 TDC、ADC の実験データを示す。

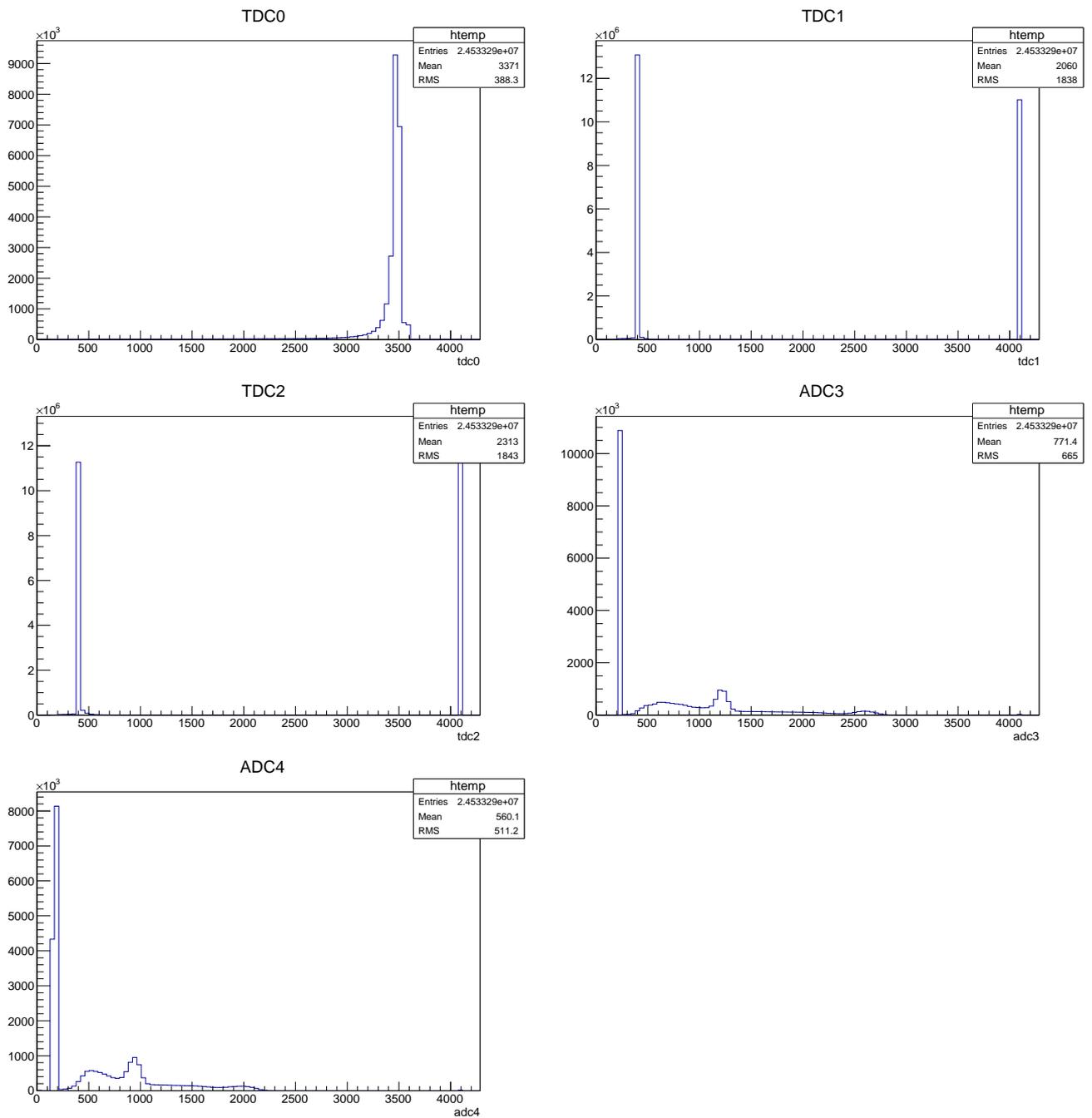


図5 実験データのヒストグラム

4.2 calibration

TDC および ADC は計測した値を 0~4095 の整数として出力する。これらの値を実際の時間スケール・エネルギースケールに変換する式を求める。

4.2.1 TDC-calibration

clock generator と divider によって作られた 2 つの NIM 信号のうち一方を TDC start に、他方に delay をかけて TDC stop に入れ、1 次関数で fitting して TDC の較正を行った。fitting の結果は以下のようになった。

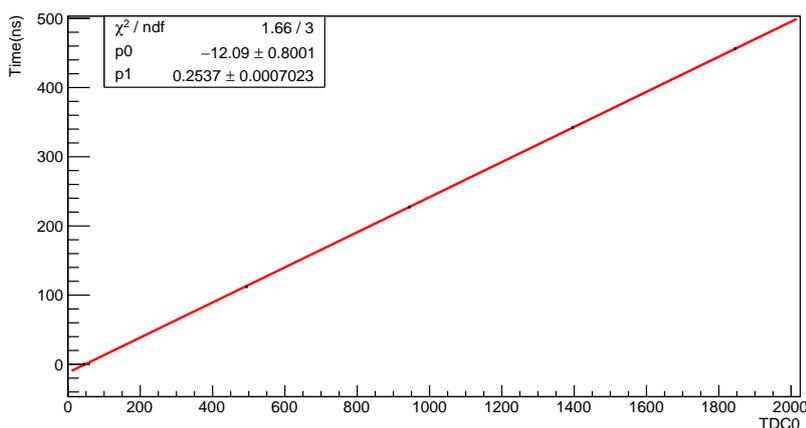


図 6 TDC0 のフィッティング結果

TDC1 および TDC2 はデータの分類のみに用いるので、較正を行ったのは TDC0 のみである。求めた較正式は

$$\text{Time}[\text{ns}] = -0.2537 \times \text{TDC0count} \quad (1)$$

である。ただし、本実験のセットアップでは TDC stop から TDC start までの時間を調べるので、係数を負に取っている。定数分のずれは次の TQ 補正で補正されるため、ここでは係数のみを用いた。

4.2.2 ADC-calibration

実験で得た各 ADC のデータには 3 つのピークが存在する。これらのピークは pedestal(0[keV])、 2γ への崩壊による γ 線 (511[keV])、Na22 からの直接 γ 線 (1275[keV]) に対応すると考えられる。この仮定の下、各ピークの位置を Gaussian fitting により求め、エネルギーの較正を行った。fitting の結果は以下のようになった。

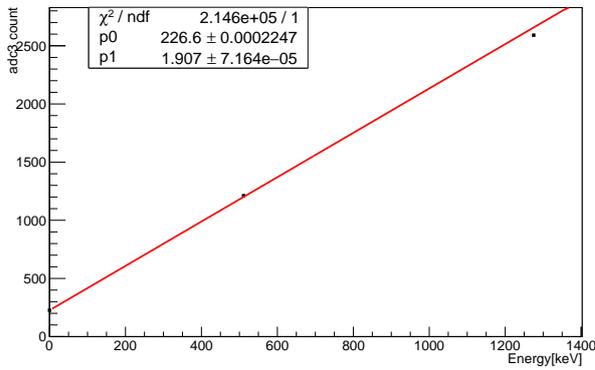


図7 ADC3のフィッティング結果

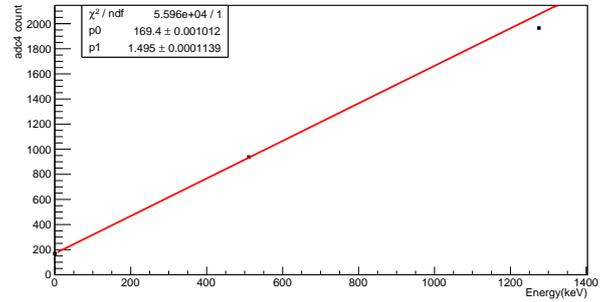


図8 ADC4のフィッティング結果

求めた較正式は

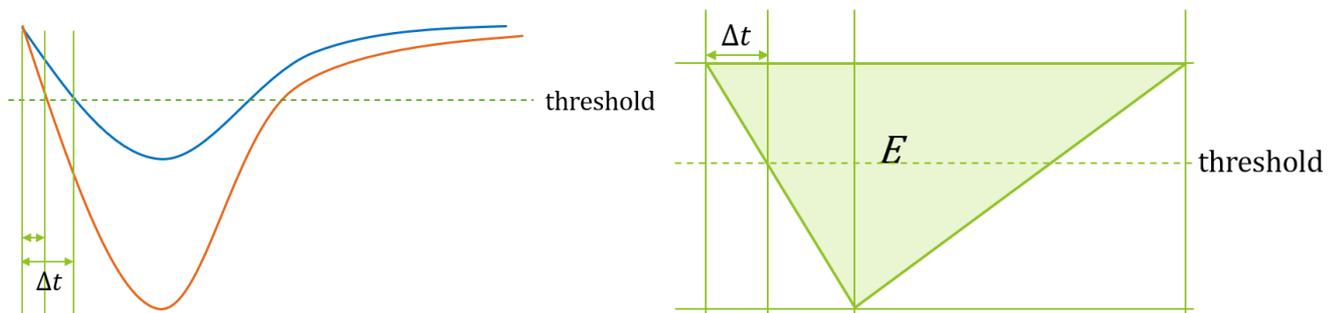
$$\text{Energy1[keV]} = \frac{\text{ADC1count} - 226.6}{1.907}$$

$$\text{Energy2[keV]} = \frac{\text{ADC2count} - 169.4}{1.495}$$

となった。

4.3 TQ 補正

discriminator は信号が指定された threshold を越えたときに NIM 信号を出力する仕組みになっている。そのため、信号の強度によって出力のタイミングにずれが出てしまう。そこで、このずれを補正することを考える。

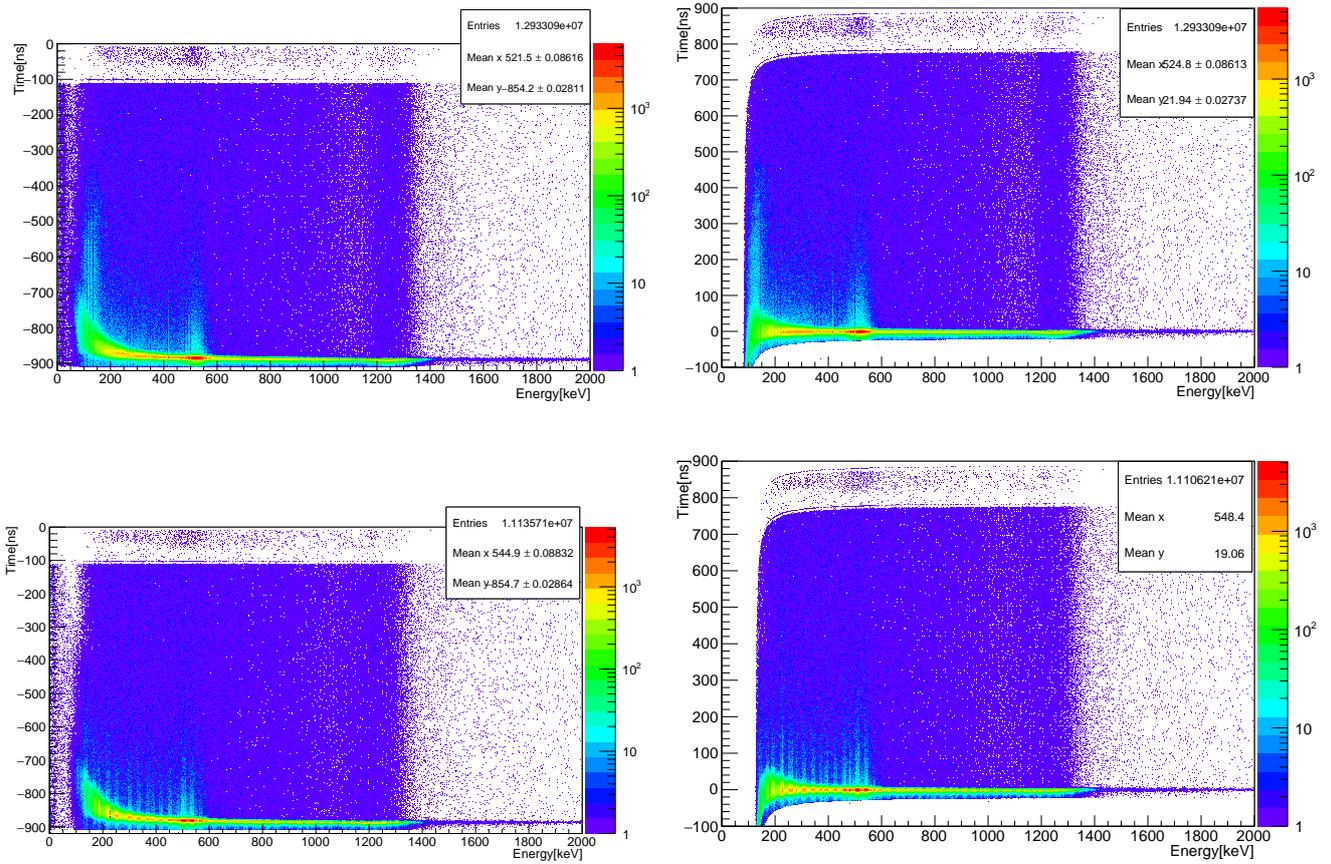


今、粗い近似として信号が三角形であることを仮定する。信号がピークに達するまでの時間及び信号が消えるまでの時間が同じだとすると、電荷量 E (三角形の面積にあたる) はピークの高さに比例する。信号が threshold に達するまでの時間 Δt はピークの高さに反比例するので、 Δt は E

に反比例する。以上のことを鑑み、TQ 補正関数として

$$\Delta t = \frac{p_0}{(E - p_1)^{p_2}} + p_3 \quad (2)$$

を用いた。ここで、 p_0, p_1, p_2, p_3 はパラメータであり、実際のデータを用いたフィッティングにより決定した。TQ 補正後の Time-Energy ヒストグラムは図のようになった。



また、TQ 補正後のイベント数から求めた寿命は表のようになった。

	寿命 [ns]
NaI1	116.4 ± 1.0
NaI2	101.9 ± 0.8

表 1 TQ 補正後の寿命

4.4 Pick-off 補正

4.4.1 Pick-off 反応

本実験では、 o -Ps が崩壊して 3γ を出す反応を観測して o -Ps の寿命を求める。しかし、以下に挙げる反応により、 2γ を出す崩壊が起こる場合もある。

- Pick-off 反応 o -Ps の陽電子が周囲の電子が持つ電子と対消滅する。
- スピン交換反応 物質を構成する分子が不対電子を持つとき、その電子と o -Ps の電子が衝突してスピンを交換して p -Ps となり、その崩壊が起こる。
- 化学反応 o -Ps が酸化されることで電子を奪われ、残った陽電子が他の電子と対消滅する。

本稿では、これらの反応をまとめて Pick-off 反応と呼ぶことにする。この反応による崩壊は、 p -Ps の 2γ への崩壊のように $t = 0$ の付近に集中している訳ではないが、 o -Ps による 3γ への崩壊よりは短い時間で起こる。したがって、この反応による影響を考慮しないと、実験から求めた寿命は本来求めたい o -Ps の寿命よりも短くなってしまう。この影響を取り除くことを Pick-off 補正と呼び、これから議論していく。

4.4.2 イベントの分類

本実験で観測されたイベントについて、エネルギーと時間の観点から分類していく。まず p -Ps について、この寿命は約 124 ps であり、TDC の時間分解能を考慮するとほとんどが $t = 0$ 付近で崩壊することとなる。そして、そのエネルギーは 2γ への崩壊であることから 511 keV 付近である。また、この γ 線の Compton 散乱があり、これは同じ $t = 0$ 付近のうち 511 keV 未満で検出されよう。一方で、 $t = 0$ 付近でない $t > 0$ の領域において、 2γ への崩壊と考えられる約 511 keV のイベントは、前節で述べた Pick-off 反応であると考えられる。また、この γ 線の Compton 散乱があり、これは同じ $t > 0$ の領域のうち 511 keV 未満で検出されよう。一方で、 o -Ps の 3γ への崩壊は、Pick-off 反応による γ 線の Compton 散乱と同じ $t > 0$ の領域のうち 511 keV 未満で検出される。以上の考察を TQ 補正後の Time-Energy ヒストグラムに記したのが図 9 である。なお、番号付けは、

- (1) p -Ps の 2γ への崩壊
- (2) (1) の Compton 散乱
- (3) Pick-off 反応
- (4) (3) の Compton 散乱と o -Ps の 3γ への崩壊

を表すものとする。

この考察から分かるように、純粋に o -Ps の 3γ への崩壊のみのイベント数を取り出すには、(4) の領域のイベント数から Pick-off 反応の γ 線の Compton 散乱によるイベントを取り除く必要がある。ここで、実験上の仮定として、 p -Ps の 2γ への崩壊とその Compton 散乱の比率が Pick-off

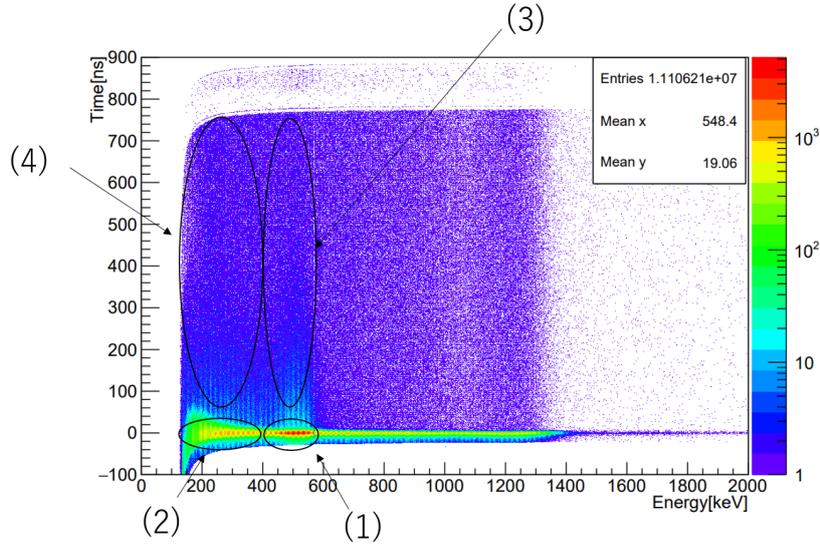


図9 TQ 補正後の Time-Energy ヒストグラムに分類を付した図

反応による 2γ への崩壊とその Compton 散乱の比率と同じであるとする。この仮定により、純粋に o -Ps の 3γ への崩壊のみのイベント数は、比の計算によって

$$(4) - \frac{(2)}{(1)} \times (3)$$

と求まる。

4.4.3 Pick-off 補正関数の導出

時間 t での粒子数を $N(t)$ 、崩壊幅を Γ とすると、粒子の崩壊について

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\Gamma N(t) \quad (3)$$

が成り立つ。なお、粒子の寿命 τ はここから $\tau = 1/\Gamma$ と定義される。いま、 o -Ps の 3γ への崩壊幅を Γ_{ortho} とし、Pick-off 反応を含む 2γ への崩壊幅を Γ_{P-o} とする。ここで、 Γ_{ortho} は定数と考えられる一方で、 Γ_{P-o} の時間依存性は分からない。このとき

$$\Gamma = \Gamma_{ortho} + \Gamma_{P-o}$$

である。また、各時間 t における o -Ps の 3γ へ崩壊した粒子数 $N_{ortho}(t)$ と Pick-off 反応等により 2γ へ崩壊した粒子数 $N_{P-o}(t)$ を

$$N_{ortho}(t) = \Gamma_{ortho} N(t)$$

$$N_{P-o}(t) = \Gamma_{P-o} N(t)$$

と定義し、新たに Pick-off 補正関数 $f(t)$ を次のように定義する。

$$f(t) = \frac{\Gamma_{P-o}}{\Gamma_{ortho}} = \frac{N_{P-o}(t)}{N_{ortho}(t)}$$

これらを用いて、式 (3) は次のように変形できる。

$$-\frac{dN(t)}{dt} = N_{ortho}(t) + N_{P-o}(t) = \Gamma_{ortho}N(t) + \Gamma_{P-o}N(t) = \Gamma_{ortho}(1 + f(t))N(t) \quad (4)$$

式 (4) を解くと、

$$N(t) = N(0) \exp\left[-\frac{1}{\tau_{ortho}}\left(t + \int_0^t f(t')dt'\right)\right] \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{ortho} = 1/\Gamma_{ortho}$ は o-Ps の 3γ への崩壊の寿命である。よって、511 keV 以下のイベント数を $N_{event}(t)$ とすると、式 (5) より、

$$N_{event}(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \frac{N(0)}{\tau_{ortho}}[1 + f(t)] \exp\left[-\frac{1}{\tau_{ortho}}\left(t + \int_0^t f(t')dt'\right)\right] \quad (6)$$

が得られる。

次に、 $f(t)$ の具体的な表式を求める。時間 t での 511 keV のピークにおけるイベント数を $N_{511}(t)$ 、時間 t での 511 keV 未満におけるイベント数を $N_{under511}(t)$ とする。このとき、4.4.2 項で求めた関係式より、

$$\begin{aligned} N_{ortho}(t) &= N_{under511}(t) - \frac{N_{under511}(0)}{N_{511}(0)} \times N_{511}(t) \\ &= N_{event}(t) - N_{511}(t) - \frac{N_{under511}(0)}{N_{511}(0)} \times N_{511}(t) \\ &= N_{event}(t) - \frac{N_{under511}(0) + N_{511}(0)}{N_{511}(0)} \times N_{511}(t) \\ &= N_{event}(t) - \frac{N_{event}(0)}{N_{511}(0)} \times N_{511}(t) \\ N_{P-o}(t) &= N_{event}(t) - N_{ortho}(t) \\ &= \frac{N_{event}(0)}{N_{511}(0)} \times N_{511}(t) \end{aligned}$$

したがって、 $f(t)$ は

$$f(t) = \frac{N_{event}(0)N_{511}(t)}{N_{event}(t)N_{511}(0) - N_{event}(0)N_{511}(t)} \quad (7)$$

と表わされる。

以上より、式 (6) と式 (7) から Pick-off 補正を行った o-Ps の寿命 τ_{ortho} を求めることができる。

4.4.4 Pick-off 補正の実行

実際の Pick-off 補正は以下の手順で行った。

1. 0s と 100 ns から 500 ns の間の 50 ns 間隔の点で ± 5 ns の範囲においてエネルギーに対するイベント数のヒストグラムを作る。ただし、0 ns の点については ± 1 ns の範囲とした。
2. 1 のヒストグラムに対して、511 keV 周辺のピークを探し、Gaussian fitting を行う。

3. 2での Gaussian fitting における頂点の値を 10(0ns については 2) で割ったものを $N_{511}(t)$ とし、1でのヒストグラムにおいて 2での Gaussian fitting のピーク以下の総数を 10(0ns については 2) で割ったものを $N_{under511}(t)$ とする。
4. 以上の $N_{511}(t)$ と $N_{under511}(t)$ を用いて、適当な関数 $f(t)$ で fitting する。
5. 4での $f(t)$ を用いて、o-Ps の寿命を fitting によって求める。

ここで、手順の 4 での fitting 関数 $f(t)$ については、

$$f(t) = p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2 \quad (8)$$

とした。解析的に積分可能であること、 t について単調減少で一定の値に漸近すること [6]、良く fitting できること、といった条件を満たすことから、例年に倣ってこの関数形を採用した。また、この fitting 関数 $f(t)$ を採用したことから、手順の 5 での o-Ps の寿命の fitting は、式 6 と式 8 より、次の式の q_0, q_1, q_2 を fitting により求めることで行う。

$$N_{event}(t) = q_1 \left[p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2 + 1 \right] \exp\left[-\frac{1}{q_0} \left(-p_0 p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + (p_2 + 1)t + p_0 p_1 \right)\right] + q_2 \quad (9)$$

このとき、 q_0 が求めなかった o-Ps の寿命に値する。なお、fitting 範囲は 100 keV から 730 keV の間で 100 KeV ずつ下限を上げていき、寿命の変化が小さくなったところでさらに 20 keV ずつずらし、最も変化しない範囲とした。

4.4.5 Pick-off 補正の結果

4.4.4 項での手順 1 での Gaussian fitting の様子は図 10、図 11 のようになった。

Pick-off 補正関数 $f(t)$ の fitting は図 12 のようになった。ここから、o-Ps の寿命の fitting は図 13 のようになった。なお、fitting 範囲は 300 keV から 730 keV としてある。

これらの fitting の結果が次の表である。この q_0 が Pick-off 補正を考慮した o-Ps の寿命である。

	NaI1	NaI2
p_0	4.98 ± 0.48	13.3 ± 2.2
p_1	72.3 ± 4.9	75.0 ± 9.0
p_2	0.411 ± 0.018	0.684 ± 0.089
q_0	187 ± 11	211 ± 49
q_1	$1.30 \times 10^4 \pm 0.32 \times 10^4$	$1.13 \times 10^5 \pm 1.85 \times 10^5$
q_2	688 ± 5	615 ± 9

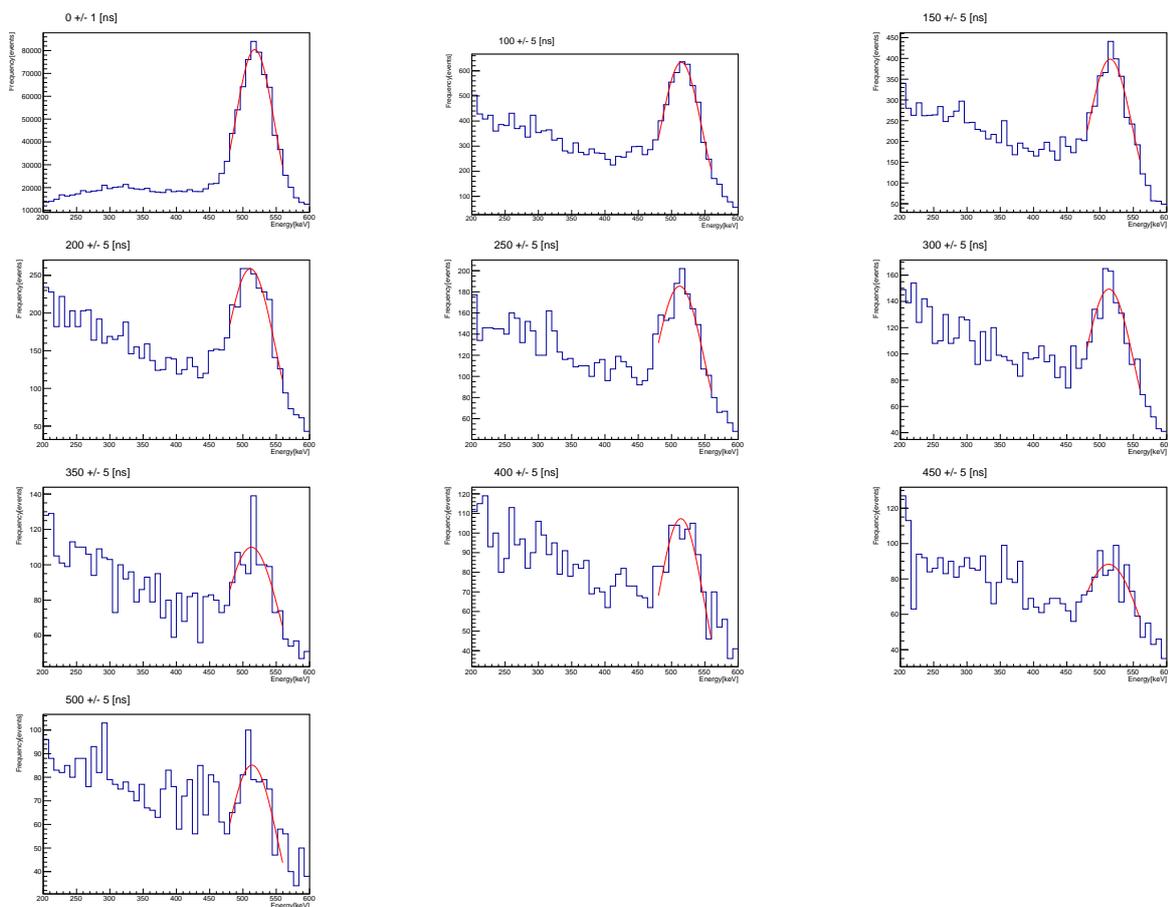


図 10 NaI1 の Gaussian fitting の様子

5 考察

5.1 寿命

以上の実験、解析より、寿命とその誤差は次の様になる。 $\tau, \tau_{fitting}$ はそれぞれ寿命とその誤差である。

	$\tau [ns]$	$\tau_{fitting} [ns]$
NaI1	132	18
NaI2	139	32

なお、寿命の fitting において、fitting 範囲を変化させると結果が変わったため、fitting 範囲の上限を 730 ns に固定し、下限を変化させ、最も変化しなくなったところの値を寿命として採用した。

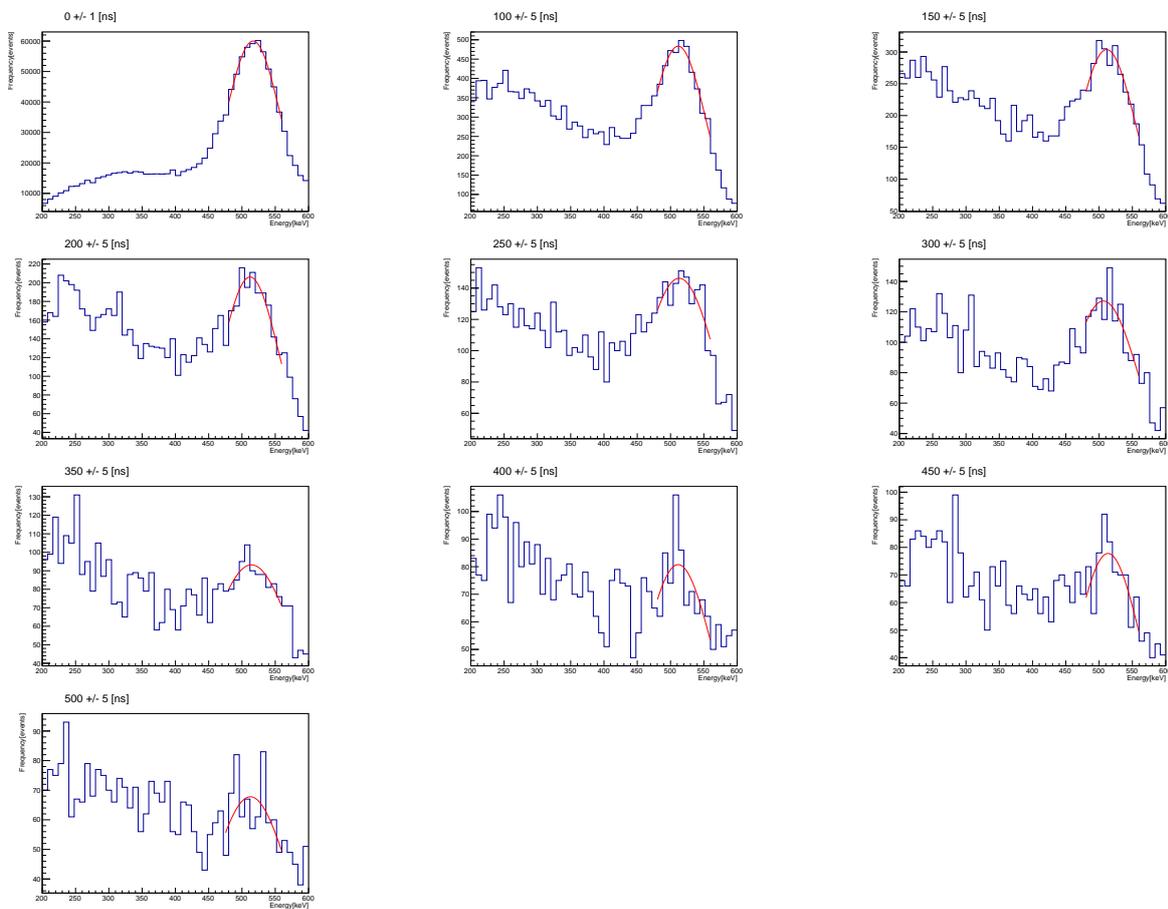


図 11 NaI2 の Gaussian fitting の様子

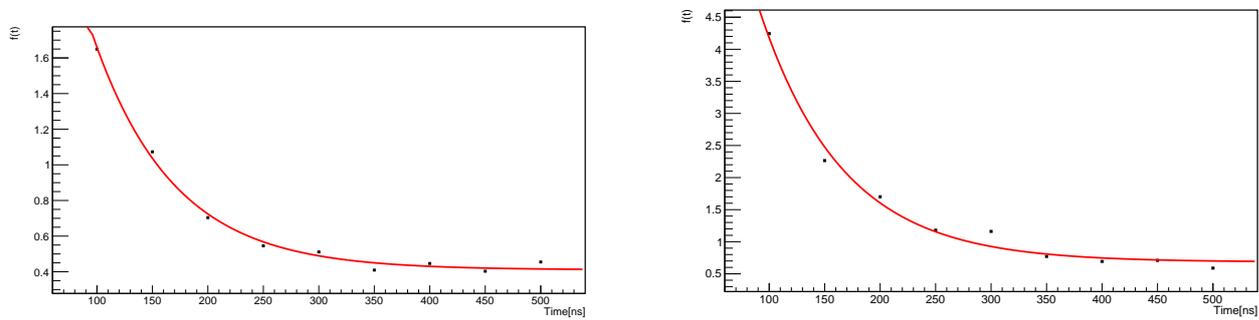


図 12 Pick-off 補正関数 $f(t)$ の fitting の様子 (左が NaI1、右が NaI2)

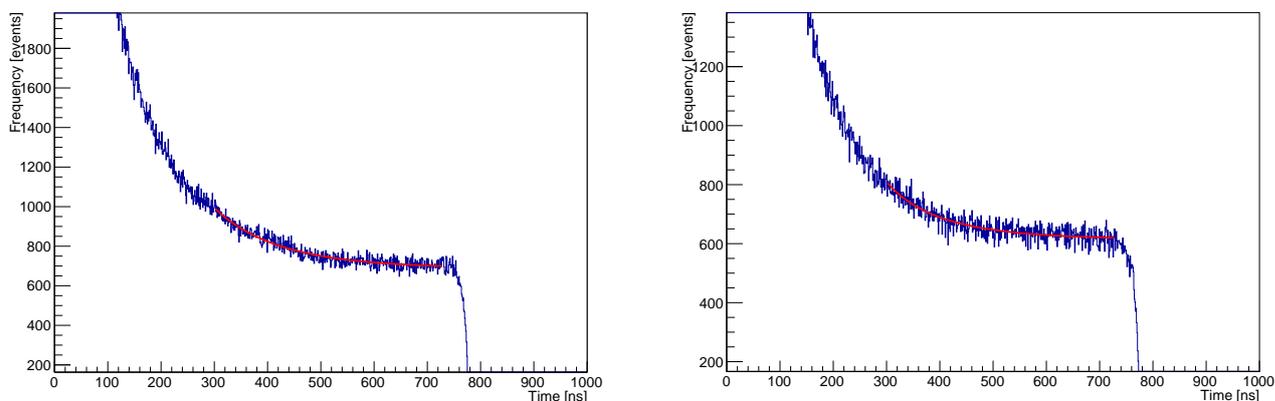


図 13 o-Ps の寿命の fitting の様子 (左が NaI1、右が NaI2)

5.2 誤差

5.2.1 誤差伝搬

fitting による寿命の誤差は、次のように計算される。fitting のパラメータを p_i , パラメータの誤差を dp_i とする。fitting 関数 f に対して、 δf を

$$\delta f = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial p_i} \sigma_{p_i} \right)^2} \quad (10)$$

のように定義した時、 $f \pm \delta f$ を用いて寿命を fitting する。

fitting 関数 f を用いて求まる寿命を $\tau(f)$ として、fitting による寿命の誤差は

$$\max[|\tau(f + \delta f) - \tau(f)|, |\tau(f - \delta f) - \tau(f)|] \quad (11)$$

で与えられる。

また、最終的な誤差 $\delta\tau_{total}$ は

$$\delta\tau_{total} = \sqrt{(\delta\tau_{fitting})^2 + (\delta\tau_{calibration})^2 + (\delta\tau_{TQ})^2 + (\delta\tau_{pickoff})^2} \quad (12)$$

で与えられる。

5.2.2 calibration による誤差

キャリブレーション関数は

$$f = p_0 x + p_1 \quad (13)$$

の形であるので、誤差 $\delta f_{calibration}$ は

$$\delta f_{calibration} = \sqrt{p_0^2 dp_0^2 + dp_1^2} \quad (14)$$

で与えられる。これに p_i, dp_i を代入し、寿命を fitting すると、次のようになる。

	$f + \delta f$ の時の寿命	$f - \delta f$ の時の寿命	$\delta \tau_{calibration}$
NaI1	117	142	22
NaI2	126	160	28

5.2.3 TQ 補正による誤差

TQ 補正関数は

$$f = \frac{p_0}{(x - p_1)^{p_2}} + p_3 \quad (15)$$

の形であるので、誤差 δf_{TQ} は

$$\delta f_{TQ} = \sqrt{\frac{1}{(x - p_1)^{p_2}} dp_0^2 + \left(\frac{p_0 p_1}{(x - p_1)^{p_2 + 1}} \right)^2 dp_1^2 + \left(\frac{p_0 \log(x - p_1)}{(x - p_1)^{p_2}} \right)^2 dp_2^2 + dp_3^2} \quad (16)$$

で与えられる。これに p_i, dp_i を代入し、寿命を fitting すると、

	$f + \delta f$ の時の寿命	$f - \delta f$ の時の寿命	$\delta \tau_{TQ}$
NaI1	117	121	18
NaI2	124	124	8

5.2.4 pick off 補正による誤差

関数は

$$f = p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2 \quad (17)$$

で表される。寿命 fitting 関数は

$$g = q_0 \{1 + f\} \exp\left[-\frac{t}{q_1} (1 + f)\right] \quad (18)$$

であるので、誤差 $\delta g_{pickoff}$ 寿命の誤差は、

$$\delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial p_0}\right)^2 dp_0^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial p_1}\right)^2 dp_1^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial p_2}\right)^2 dp_2^2} \quad (19)$$

となる。それぞれの微分は次のようになる。

$$\frac{\partial g}{\partial p_0} = q_0 \left[\exp\left(\frac{-t}{p_1}\right) + \left(1 + p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2\right) \left(-p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_1\right) \right] \\ \times \exp\left[-\frac{1}{q_1}(1 + p_2)t - p_0 p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_0 p_1\right]$$

$$\frac{\partial g}{\partial p_1} = q_0 \left[\frac{p_0 t}{p_1^2} \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + \left(1 + p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2\right) \right. \\ \left. \times \left(p_0 - p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) - \frac{p_0}{p_1} t \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right)\right) \right] \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{q_1} \left((1 + p_2)t - p_0 p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_0 p_1\right)\right\}$$

$$\frac{\partial g}{\partial p_2} = q_0 \exp\left\{1 - \frac{1}{q_1} - \frac{p_0 t}{q_1} \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) - \frac{p_2 t}{q_1}\right\} \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{q_1} (1 + p_2)t - p_0 p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_0 p_1\right\}$$

これに p_i, dp_i を代入し、寿命を fitting すると、次のようになる。

	$g + \delta g$ の時の寿命	$g - \delta g$ の時の寿命	$\delta\tau_{pickoff}$
NaI1	307	-	(168)
NaI2	168	-	(36)

ここで、関数 δg が関数 g より 10^2 のオーダーで大きくなってしまったため、 $g - \delta g$ での寿命 fitting ができなかった。

5.2.5 誤差の評価

以上より、各 fitting による誤差は、次の表のようになる。ただし、 $\delta\tau_{pickoff}$ で適切な値が得られなかったため $\delta\tau_{total}$ を求める式には含めなかった。

	$\tau [ns]$	$\delta\tau_{fitting}$	$\delta\tau_{total}$	$\delta\tau_{calibration} [ns]$	$\delta\tau_{TQ} [ns]$	$\delta\tau_{pickoff} [ns]$
NaI1	139	18	33	22	18	(168)
NaI2	132	32	43	28	8	(36)

5.3 考察

5.3.1 真空

本実験では、真空抜きがうまくいかず、0.2 気圧程度しか減圧できなかった。それによって例年より、pick off 反応が多く、それによって pick off 補正関数が例年よりも大きくなったと考えられ

る。真空抜きができていない事によって、オルソポジトロニウムの崩壊以外のイベントが多くなり、Calibration や TQ 補正の fitting による誤差や pick off 補正による誤差が大きくなった可能性がある。

謝辞

今回の実験を進めるにあたり、半年間丁寧に指導や助言をしてくださった隅田土詞先生、また、実験、解析にお付き合いくださり、様々な場面で手助けしてくださった TA の吉村宜倅さん、疋田純也さんに感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 過去の A2 のレポート、発表資料
<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/a1a2.html>
- [2] M.Deutsch, Phys. Rev. 82, 455(1951)
- [3] S.Berko and H.N.Pendleton, Annu. Rev. Nucl. 30, 543(1980).
- [4] A. Ore and J.L. Powell, Phys.Rev. 75,1696(1949)
- [5] G.S. Adkins, R.N. Fell, and J. Sapirstein, Annals Phys. 295, 136(2002)
- [6] 2018 年 P1 レポート、「オルソポジトロニウムの寿命とその量子振動の測定」
https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-18/FY18_positronium_report.pdf