2024 年度後期課題演習 A2
オルソポジトロニウムの寿命測定

伊藤優希 岸暖斗 下釜翔悟 林春向 一柳大治朗 山敷大亮

2025 年 7 月 7 日

contents

1 序論 **2**
1.1 実験の背景 2
1.2 ポジトロニウムの概要 2

2 実験方法 **3**
2.1 実験原理 3
2.2 実験器具 3
2.3 回路 4

3 結果・解析 **7**
3.1 結果 7
3.2 TDC 較正 8
3.3 ADC 較正 9
3.4 TQ 補正 11
3.5 pick off 補正 17

4 考察 **23**
4.1 誤差伝播 23
4.2 寿命のまとめ 27
4.3 誤差の要因 27
4.4 誤差を小さくするには 28

5 結論 **30**

1　序論

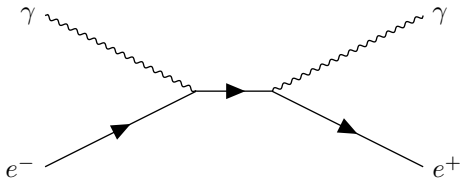
1.1　実験の背景

本実験では, o-ポジトロニウムの寿命及び崩壊率を測定することを主たる目的とする．ポジトロニウムはスピン量子数が 1 の o-ポジトロニウムとスピン量子数が 0 の p-ポジトロニウムに分類され, 各々の寿命も異なる．実験においては後述する様々なノイズを除去しながら o-ポジトロニウムの寿命を測定し, 計算回路及びプログラミング言語 ROOT を用いて解析することが目標となる．

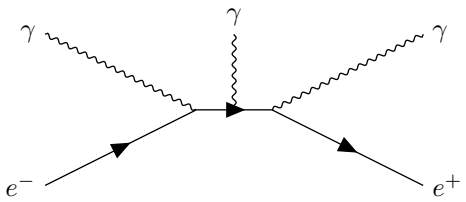
1.2　ポジトロニウムの概要

ポジトロニウムとは, 電子と陽電子の束縛状態を指す．ポジトロニウムは先述の通り o-ポジトロニウムと p-ポジトロニウムに分類される．よく知られているように, 電子と陽電子は共にスピンが $\frac{1}{2}$ のフェルミオンであり, o-ポジトロニウムと p-ポジトロニウムは各々のスピンの向きが異なる．p-ポジトロニウムはスピン量子数が 0 でスピンの向きが異なる状態に対応し, 逆に o-ポジトロニウムはスピン量子数が 1 でスピンの向きが揃っている状態に対応する．

p-ポジトロニウムは 2γ に崩壊し, Feynmann ダイアグラムは次のように描かれる．



同様に, o-ポジトロニウムは 3γ に崩壊し, Feynmann ダイアグラムは次のように描かれる．



p-ポジトロニウムは理論的な予言からその寿命は約 0.125ns であることが知られている．同様に o-ポジトロニウムは理論的に寿命が約 142ns であることが知られている．本実験では, o-ポジトロニウムの寿命を測定し, 理論的な予言である 142ns が正当であるかを確かめる．

2　実験方法

2.1　実験原理

^{22}Na は放射線源として知られており,^{22}Na の崩壊において, 約 90 %が β^+ 崩壊, 残り約 10 %が電子捕獲によるものである. これを利用して ^{22}Na から放出された陽電子が e^- の豊富なシリカパウダー内に捕縛され, その中で電子と結合してポジトロニウムが形成される. そして, ポジトロニウムの崩壊に伴い γ 線が放出される. この過程を用いてポジトロニウムの寿命を測定する.

2.2　実験器具

1. ^{22}Na 線源
2. プラスチックシンチレーター
3. シリカパウダー
4. NaI シンチレーター
5. 光電子増倍管
6. 鉛ブロック
7. 遮光ビニールシート
8. 電源装置
9. NIM モジュール

これらの実験器具を図 1 のように配置した. 実際のセットアップは図 2 のようになる. ^{22}Na 線源とプラスチックシンチレーターは接するように固定してあり, ^{22}Na 線源, プラスチックシンチレーター, 鉛ブロックの穴, シリカパウダーが一直線になるように配置してある. また, ^{22}Na の β^+ 崩壊による陽電子に由来するもの以外の電磁波を NaI シンチレーターができるだけ検知しないようにするために, NaI シンチレーターがある部屋は穴を除いて鉛ブロックで遮蔽してある. プラスチックシンチレーターがある部屋も同様にして鉛ブロックで遮蔽して外部からの影響を受けないようにしてある. NaI シンチレーターはシリカパウダーの周りの下, 左右に配置してあるが, 今回実験に用いたのは左右のシンチレーターのみである. そして, 装置全体に遮光ビニールシートをかぶせ, 外部からの光の影響を抑えた. 電源装置で, プラスチックシンチレーター,NaI シンチレーター 2,NaI シンチレーター 3 にそれぞれ 1500V,1200V,1300V の電圧をかけた.

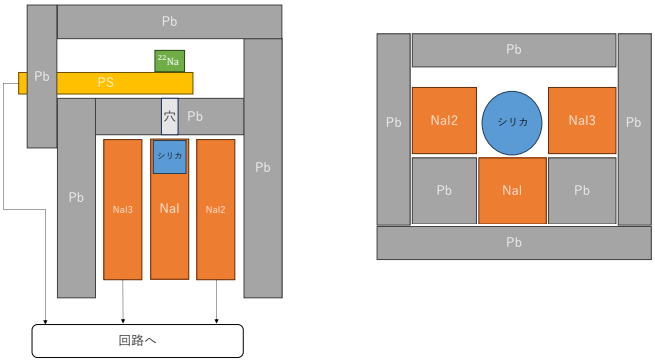


図 1　実験装置の模式図

図 2　実際のセットアップ

2.3　回路

プラスチックシンチレーターおよび NaI シンチレーターの信号を以下の図 3 に示す回路に送った.

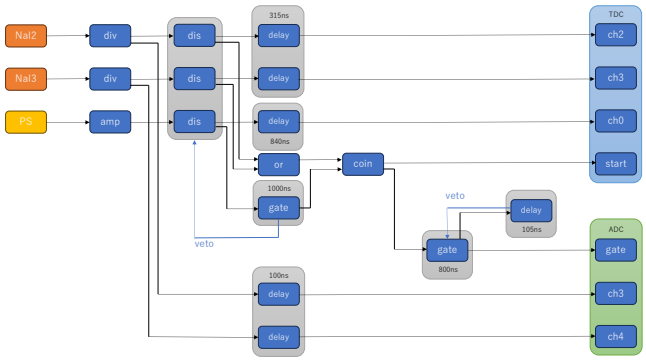


図 3　回路図

各モジュールの名称と役割を以下に示す.

- amp：amplifier. 入力された信号を任意の振幅まで増幅する. (N0813-0018)
- div：divider. 入力された信号を同形な 2 つの信号に分けて出力する. (Kaizu Works KN510)
- dis：discriminator. 閾値を超える値の信号が入力されたときに, NIM 信号 (-0.8V の矩形波) を出力する. (REPIC RPN-110)
- delay：Delay generator. 入力された信号を任意の時間だけ遅らせて出力する. (豊伸電子 N0533-001, N009)
- 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. (Kaizu Works KN1500)
- coin：coincidence. 複数の入力端子全てに信号が入力されている時のみ, NIM 信号を出力する. (Kaizu Works KN470)
- or (”Fan In-Out”)：複数の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. (豊伸電子 N007)
- veto：信号が入力されたとき, 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. (REPIC RPC-060)
- 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. (REPIC RPC-022.)

なお,ADC の ch3,4 に入る 100ns の遅延は Delay generator によるものではなく長いケーブルによるものである.

ここで, プラスチックシンチレーターに陽電子が入ってからシリカパウダーに入り, ポジトロニウムを形成するまでの時間と, ポジトロニウムが崩壊してから γ 線が NaI シンチレーターに入るまでの時間は寿命に比べて十分に短い. よって, ポジトロニウムが形成された場合, ポジトロニウムの寿命はプラスチックシンチレーターが信号を出してから NaI が信号を出すまでの間とみなすことができる. 回路からわかるように, 単純にプラスチックシンチレーターの信号が来てから NaI シンチレーターの信号が来るまでの時間を計測するのではなく, 図 4 のように TDC のカウントスタートが NaI シンチレーターの信号でそれに準じたプラスチックシンチレーターの信号を遅らせたものをストップに取ってこの間を計測している. これはプラスチックシンチレーターを通った陽電子が必ずしもシリカパウダー内に入ってポジトロニウムを形成するわけではなく, さらに, シリカパウダー内でポジトロニウムを形成して崩壊したとしてもその γ 線が NaI シンチレーターに入らない場合もあり, この場合を取り除くためである. その結果, 寿命は

$$(\text{寿命}) = (\text{delay}) - (\text{計測時間})$$

となる.

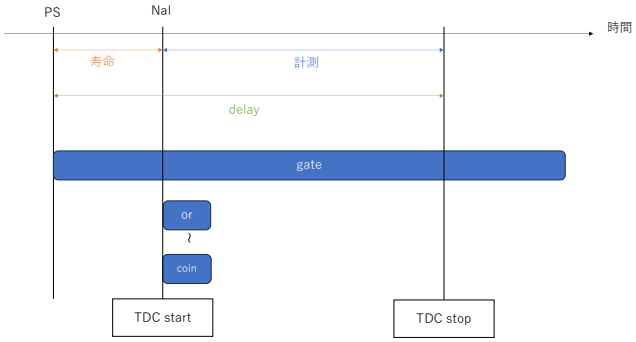


図 4　イベントのチャート

3　結果・解析

3.1　結果

得られた TDC のヒストグラムを以下に示す。総イベント数は 18890594 であった。

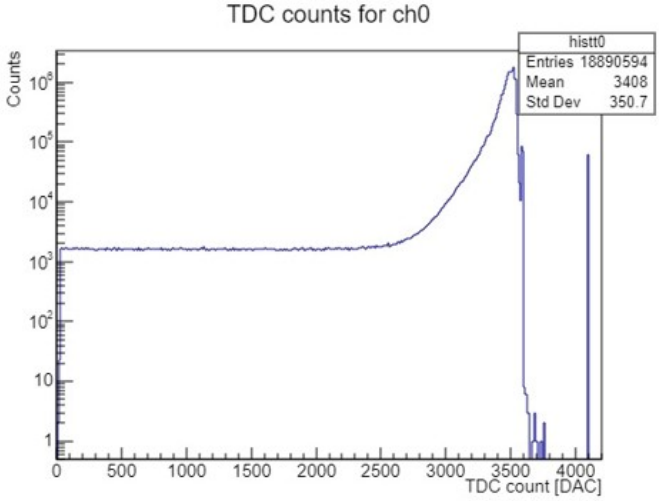


図 5　TDC count ch0

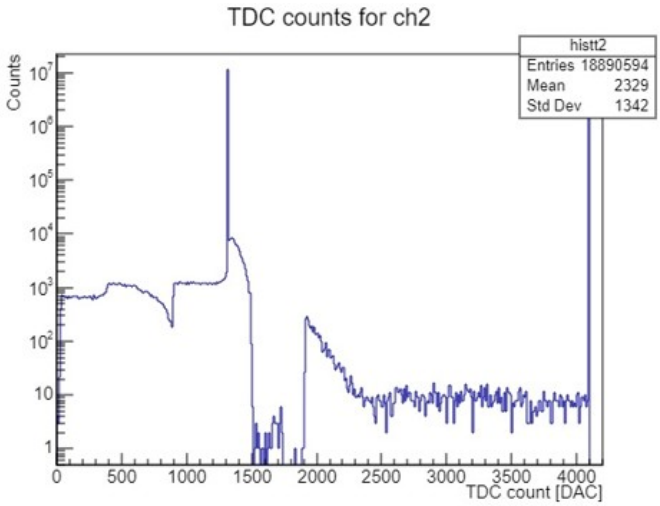


図 6　TDC count ch2

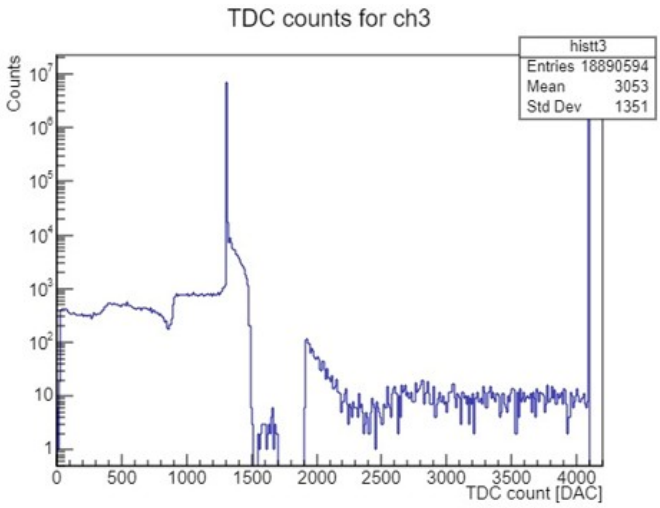


図 7　TDC count ch3

3.2　TDC 較正

TDC 値を時間に変換するための予備実験を行った。generator を用いて二つの信号を出して TDC を測定した。この TDC と、オシロスコープを目視で確認して測った時間差と比較した。実験は 0ns、33.6ns、67.0ns、109.0ns の 4 回行った。TDC と時間の関係は線形であるので、線形フィッティングを行った。結果を以下に示す。

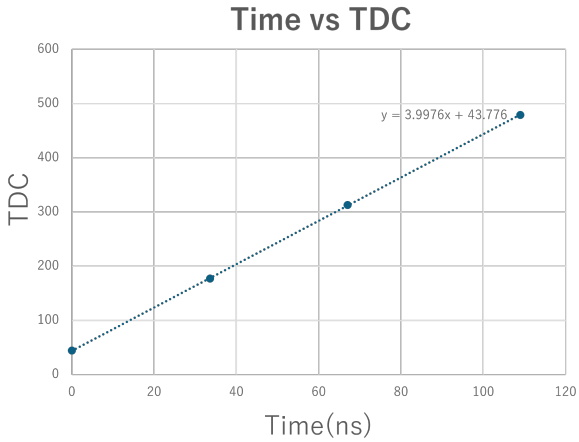


図 8　Time vs TDC

$$\mathrm{Time} = p0 + p1 \times \mathrm{TDC}$$
$$p0 = 43.776 \quad , \quad p1 = 3.9976$$

3.3　ADC 較正

TDC 値と同様に ADC 値をエネルギーに変換するための予備実験を行った。得られた ADC 値の生データから ADC とエネルギーの関係を決定した。電子陽電子の対消滅による 511keV、線源のベータ崩壊による 1275keV にピークが現れることを使い、線形フィッティングを行った。ピークの値は、目視で範囲を決定し、ガウシアンフィッティングを行い、その中心の値とした。

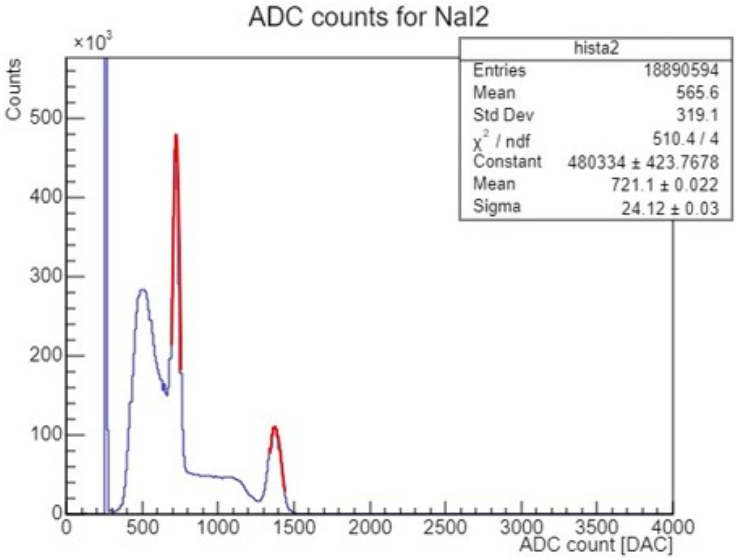


図 9　ADC counts for NaI2

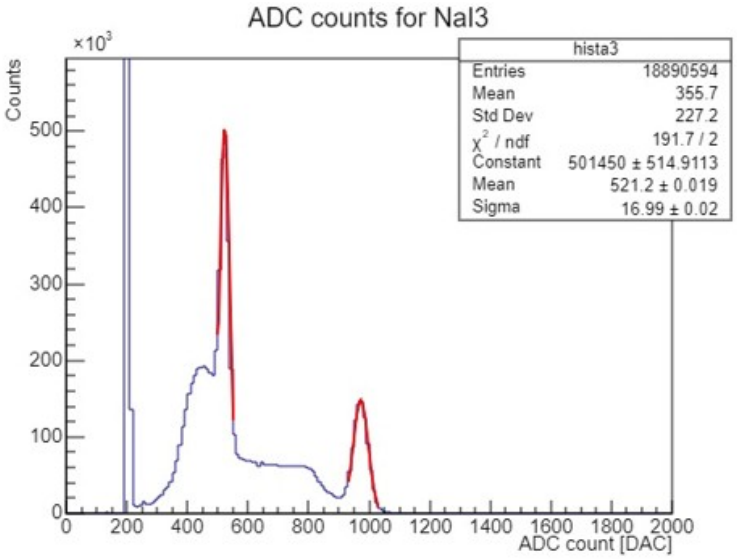


図 10　ADC counts for NaI3

線形フィッティングを行うと

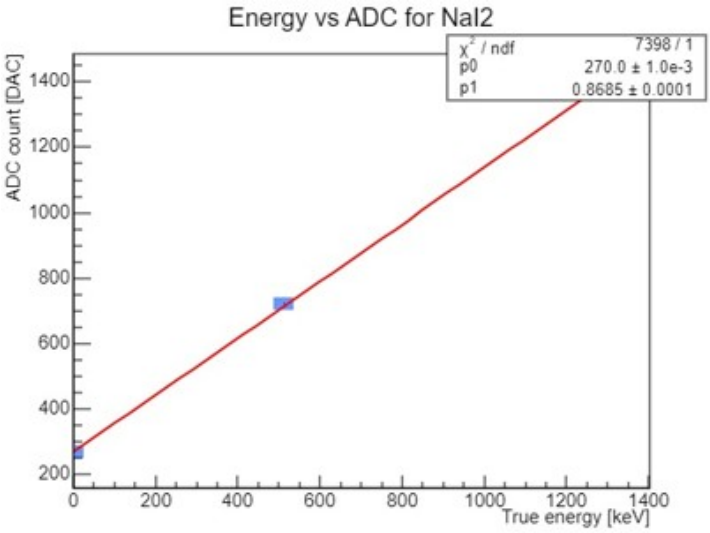


図 11　Energy vs ADC for NaI2

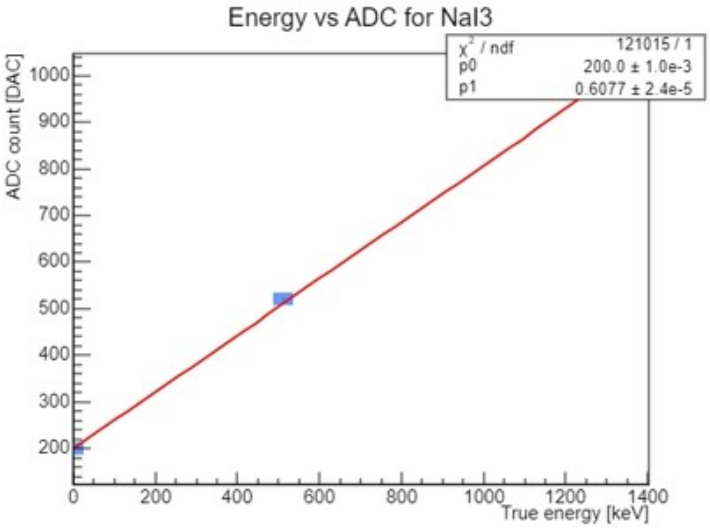


図 12　Energy vs ADC for NaI3

$$\text{Energy} = \frac{\text{ADC} - p0}{p1}$$

NaI2	$p0 = 270 \pm 0.0$	,	$p1 = 0.87 \pm 0.0$
NaI3	$p0 = 200 \pm 0.0$	,	$p1 = 0.61 \pm 0.0$

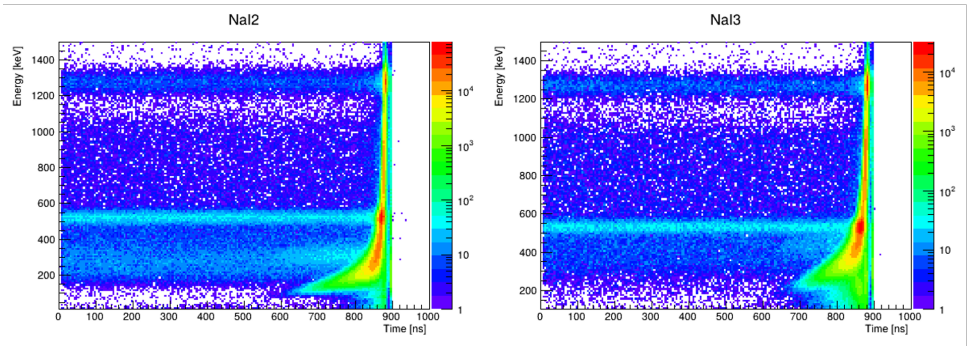


図 13　Na_2 の時間–エネルギー二次元ヒストグラム

3.4　TQ 補正

図 13 において、色の濃いところは p-ポジトロニウムに関する非常に反応時間の短い反応に対応する。しかし、図を見ると、エネルギーが小さい領域では測定時間が短く（反応時間が長く）計測されてしまっていることがわかる。これを修正することを TQ 補正という。

3.4.1　Discriminator の特性

なぜエネルギーが小さいほど測定時間が短くなるのか。それは、TDC の Discriminator の特性に起因する。Discriminator はしきい値を超えた時間から計測を開始するので、実際に反応が起こってから、それを検出するまでに時間がかかる。その時間 Δt は、図 14 に示すように、エネルギーが小さいほど大きくなる。

すると、図 15 のように、エネルギーが小さいほど、計測時間が短くなる。

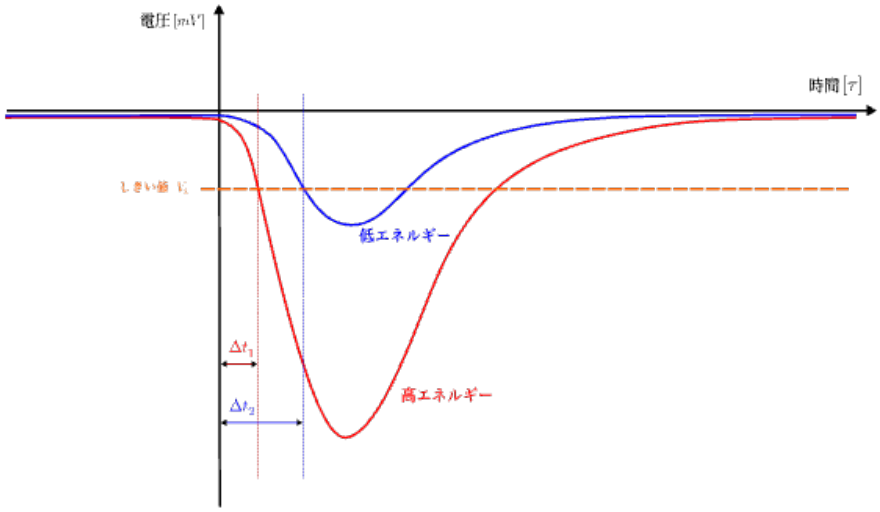


図 14　Discriminator の動作までにかかる時間

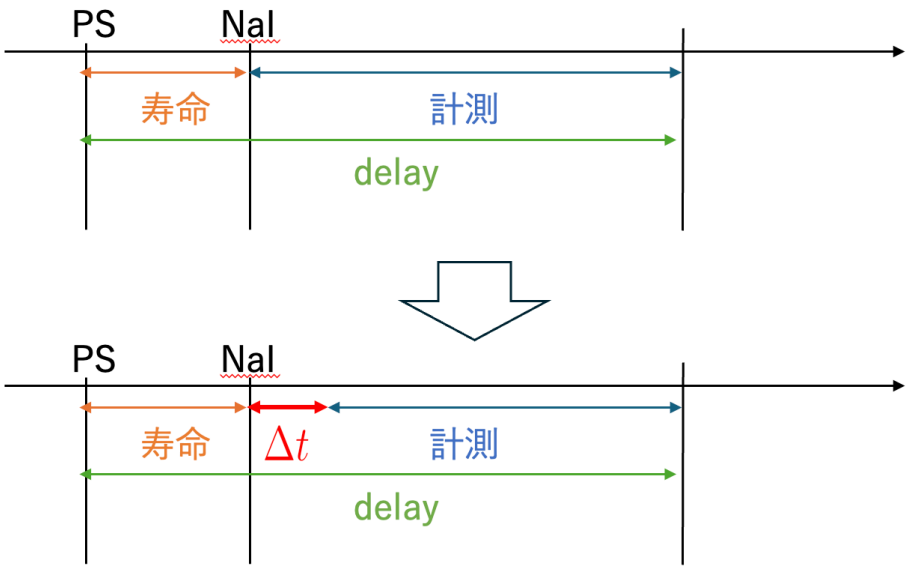


図 15　Discriminator の動作

3.4.2　TQ 補正の手順

TQ 補正は以下の流れで実施する。

1. 各時間ビンにおけるエネルギー分布のピークを，ガウス分布でフィッティングし平均エネルギー $E_{\mathrm{peak}}(t)$ を取得する．（図 16）
2. 得られた (t, E_{peak}) データ点をフィッティングする. 得られた関数を $\Delta t = f(E)$ とする．（図 17）
3. すべてのイベントについて，元の計測時間 τ を $\tau - f(E)$ に変換し，補正後の時間を得る．（図 18）

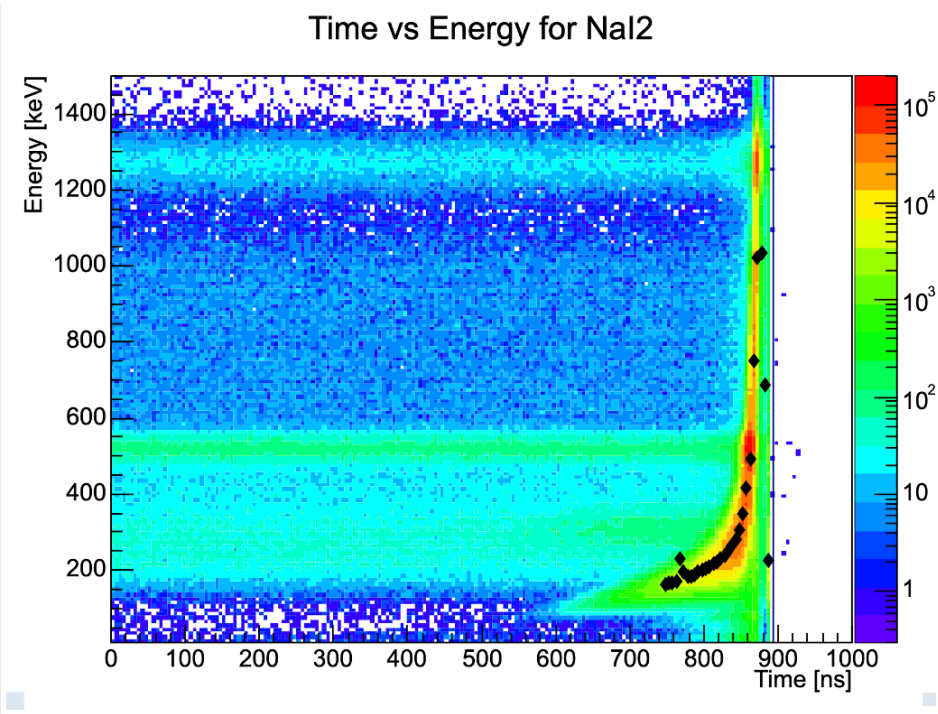


図 16　時間ビンごとのエネルギー分布のピークをガウス分布でフィッティング

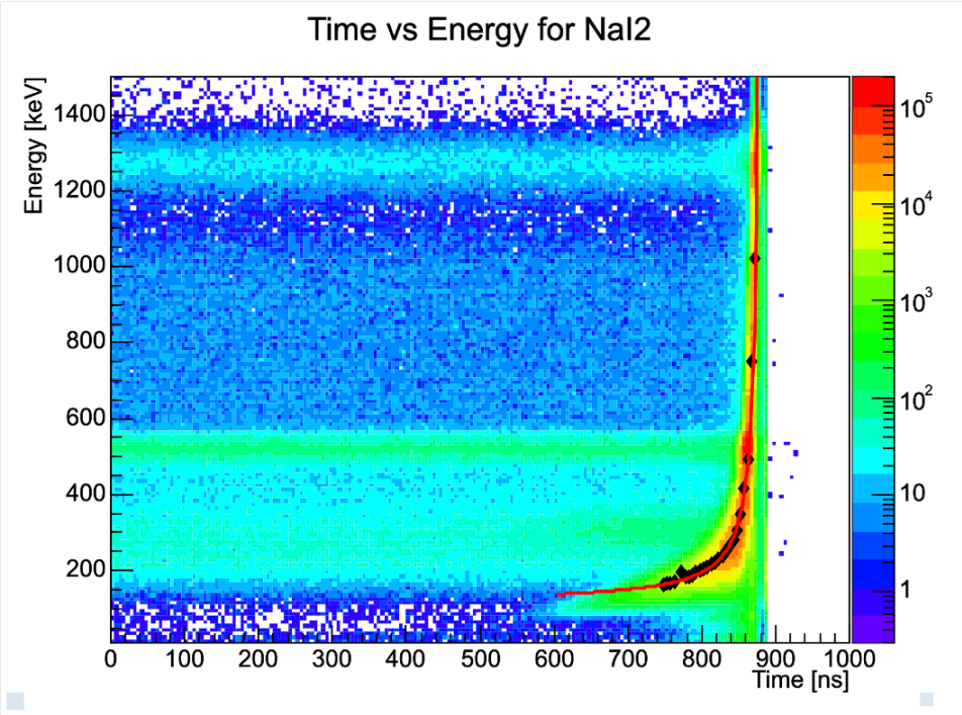


図 17　エネルギー分布のピークをフィッティング

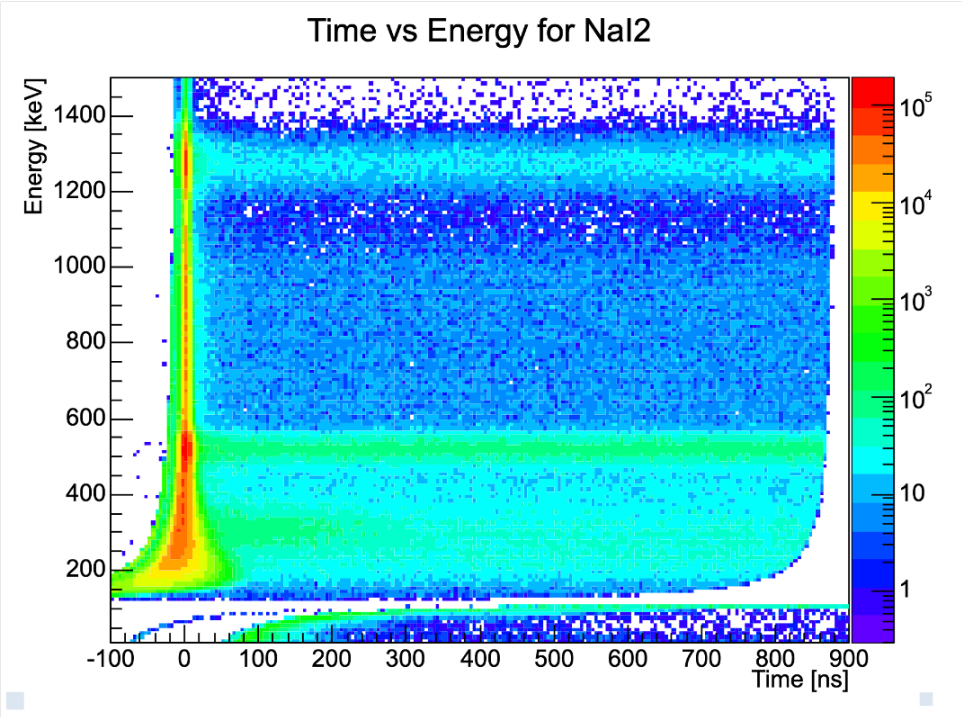


図 18　補正後の時間

3.4.3　関数形の理論的考察

フィッティングでは、大まかな関数系を予想しておく必要がある。その関数系にいくつかのパラメータを与えることで、実データにフィッティングすることができる。ここでは、用いる関数系を考察する。

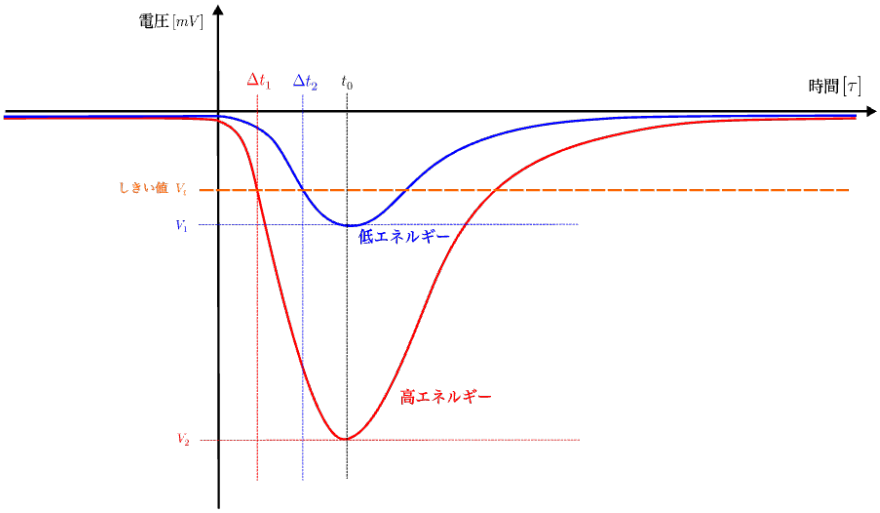


図 19　波形の理論モデル

図 19 のように、電圧が最大になる時間 t_0 はエネルギーに依らず一定であると仮定する。

図 20 のように、波形を三角形で近似すると相似比から，

$$\Delta t_1 : t_0 = V_t : V_1 \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta t_1\, V_1 = t_0\, V_t, \tag{3.1}$$

同様に，図 21 より，

$$\Delta t_2 : t_0 = V_t : V_2 \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta t_2\, V_2 = t_0\, V_t. \tag{3.2}$$

これと，電圧とエネルギーは比例することから，

$$\Delta t \propto \frac{1}{V} \propto \frac{1}{E} \tag{3.3}$$

という関係がおおよそ成り立つことがわかる．実際にフィッティングに使用する関数は，より正確にするため，以下の式を用いる（p_1, p_2, p_3 はパラメータ）：

$$\Delta t = \frac{p_0}{(E - p_1)^{p_2}} + p_3 \tag{3.4}$$

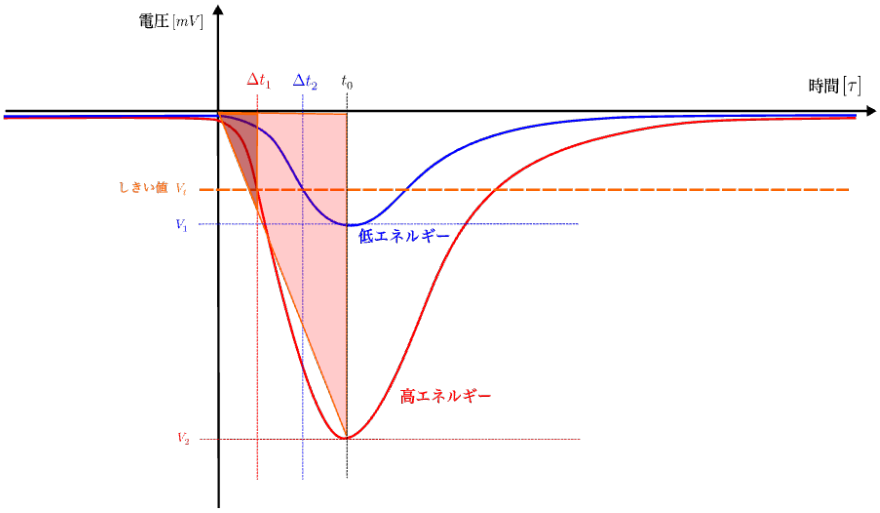


図 20　グラフの三角形近似（高エネルギー）

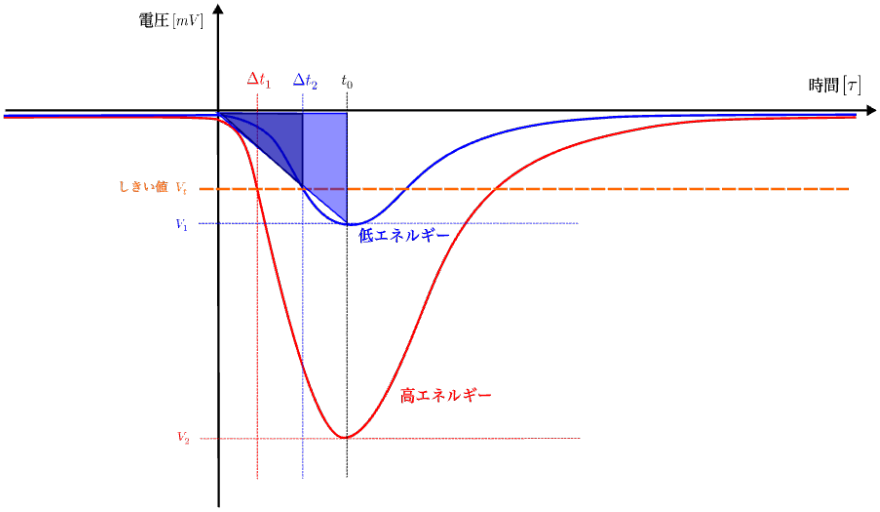


図 21　グラフの三角形近似（低エネルギー）

3.4.4　フィッティング結果と補正後分布

式 (3.4) から得られたパラメータを表 1 に示す．補正後の時間–エネルギー分布（図 22）では，赤いバンドが垂直に整列し，低エネルギー側の時間ずれが解消されている．

表 1　検出器ごとの TQ 補正フィッティングパラメータ

NaI	p_0	p_1	p_2	p_3
NaI2	-6444.44 ± 10.23	879.25 ± 0.0438	-1.0 ± 0.00	114.90 ± 0.265
NaI3	-7776.28 ± 7.48	881.51 ± 0.0102	-1.0 ± 0.00	229.05 ± 0.140

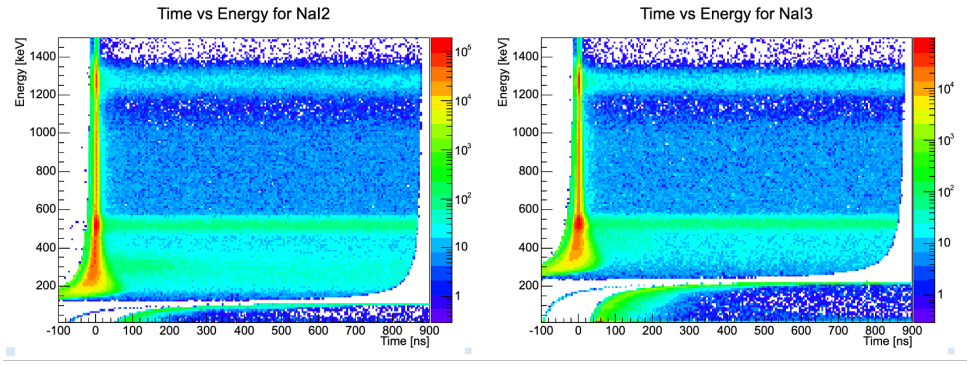


図 22　TQ 補正後の時間–エネルギー二次元ヒストグラム

3.5　pick off 補正

3.5.1　pick off 反応

以下の 3 つの反応を pick off 反応と呼ぶことにする。

- Pick off: o-Ps の e+ が外部の e-と対消滅
- スピン交換: 分子の不対電子とスピンを交換して p-Ps となり崩壊
- 酸化反応: o-Ps が酸化により e-を失い、残った e+ が周りの電子と対消滅する

いずれの反応も t ～ 0 より遅く o-Ps よりは早く反応し、511keV の γ 線を放出するので、 t ＞ 0 領域に光電効果とコンプトン散乱として現れる。実際は o-Ps の崩壊寿命も早めるが、今回は考えないものとする。

3.5.2　イベントの分類

図 4.5.1 のように Time-Energy 分布は次の 1 から 6 に分けられる。

1. o-Ps の崩壊 γ 線の吸収・散乱
2. pick off 反応の コンプトン散乱
3. pick off 反応の光電吸収

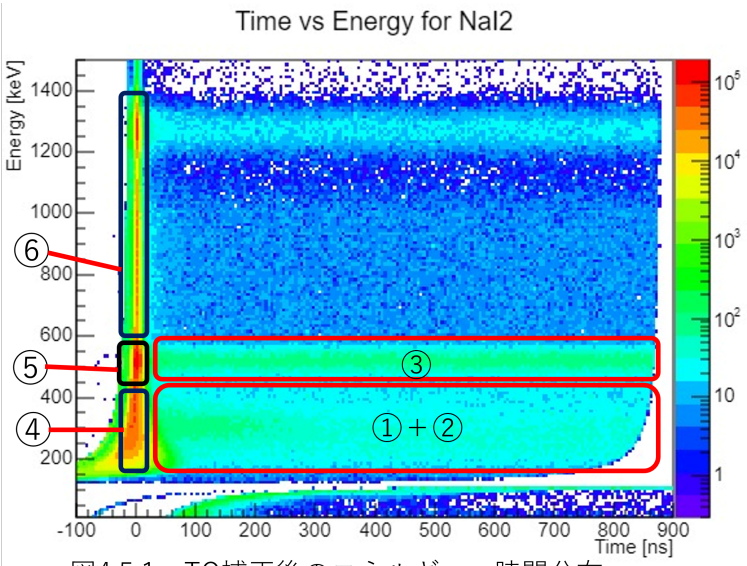


図4.5.1　TQ補正後のエネルギー・時間分布

4. Ps を作らず対消滅したものと p-Ps の崩壊のコンプトン散乱
5. Ps を作らず対消滅したものと p-Ps の崩壊の光電吸収
6. Na による 1275keV γ 線の吸収・散乱

3.5.3　pick-off 補正の方法

見たい反応は (図 4.5.1 の)1 だが 2 を除かなければならない。

- 3 の領域を Energy 方向は総和し Time 方向は 5ns ごとに分割したものを $y(t)$
- 2 の寄与を同様に総和、分割したものを $S(t)$
- 4,5 の領域のイベント数をそれぞれ $S(0), y(0)$
- $1+2$ の領域を $g(t)$

とし、光電効果とコンプトン散乱のイベント数の比は一定であることより

$$S(t) = \frac{S(0)}{y(0)} y(t)$$

を仮定し、各関数の fitting 関数を以下のようにした。

$$y(t) = p'_0 \exp(-t/p'_1) + p'_2$$

$$g(t) = p_0 \exp(-t/p_1) + \frac{S(0)}{y(0)} p'_0 \exp(-t/p'_1) + p_2$$

各領域のエネルギー範囲は 3 は $470 < E < 570$、1+2 を NaI2 で $150 < E < 470$、NaI3 で $250 < E < 470$ とした (考察の余地はあるがそこまで大きく変わらないことは確認した)。

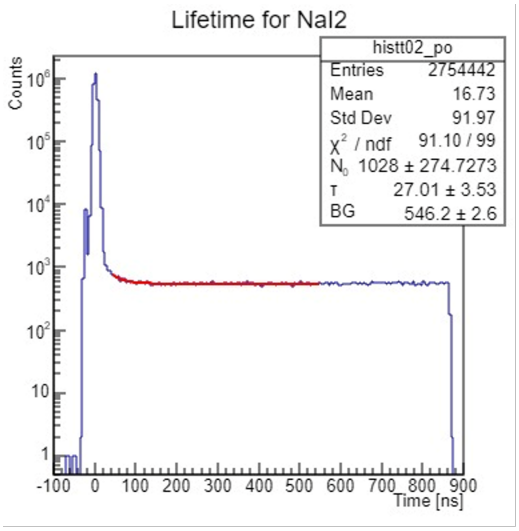


図4.5.2 y(t)フィッティング (NaI2)

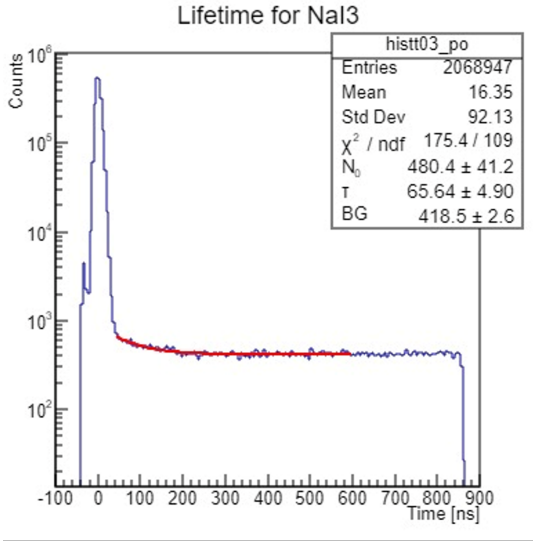


図4.5.3 y(t)フィッティング (NaI3)

図 23　$y(t)$ の fitting 結果

3.5.4　fitting 結果

表 2　$y(t)$ の fitting パラメータ

	p'_0	p'_1	p'_2
NaI2	1028 ± 274.7	27.01 ± 3.53	546.2 ± 2.6
NaI3	480.4 ± 41.2	65.64 ± 4.90	418.5 ± 2.6

表 3　$S(0), y(0)$ の値

	S(0)	y(0)	S(0)/y(0)
NaI2	2013199	2103813	1.045
NaI3	428022	1089572	0.3928

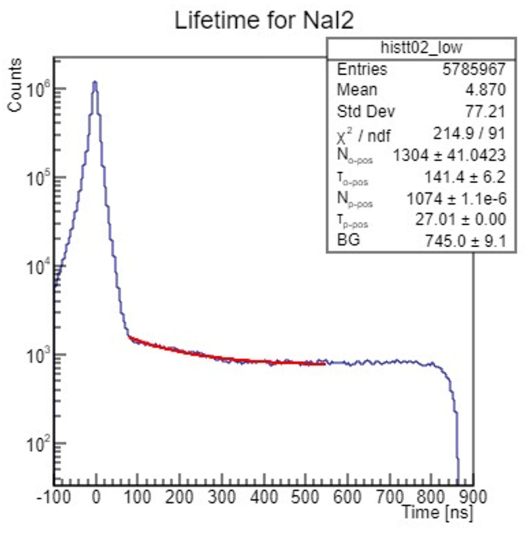


図4.5.4 ①＋②のフィッティング (NaI2)

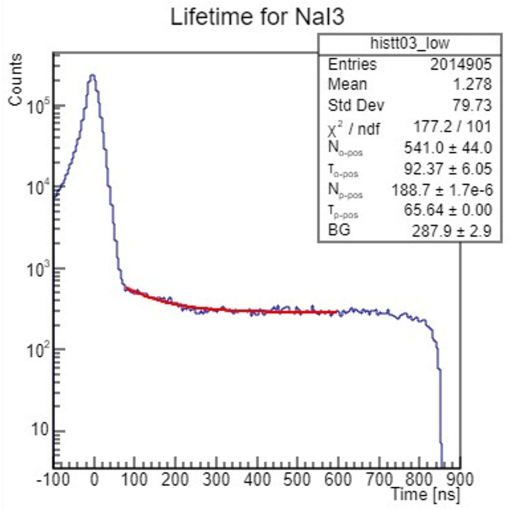


図4.5.5 ①＋②のフィッティング (NaI3)

図 24　$g(t)$ の fitting 結果

表 4　$g(t)$ の fitting パラメータ

	p_0	p_1(寿命 (ns))	p_2
NaI2	1304 ± 41.04	141.4 ± 6.2	745.0 ± 9.1
NaI3	541.0 ± 44.0	92.37 ± 6.05	287.9 ± 2.9

NaI2 については理論値 (142ns) が誤差範囲に入っているが、NaI3 は大きく外れている。

3.5.5　NaI2 の fitting 範囲の考察

理論値に近い結果を与えた範囲 80 550ns の近傍で範囲を変えて結果の変化を見た。

表 5　fitting 範囲 a 550(ns) の時の寿命

a	寿命 (ns)	fitting 誤差
70	131.9	5.4
75	141.4	6.2
80	144.0	6.5
85	147.2	7.2
90	144.6	7.2
95	139.0	6.9

表 6　fitting 範囲 80 b(ns) の時の寿命

b	寿命 (ns)	fitting 誤差
500	159.3	8.3
550	141.4	6.2
600	134.9	5.3
650	129.6	4.6
700	125.8	4.3
750	121.4	3.8

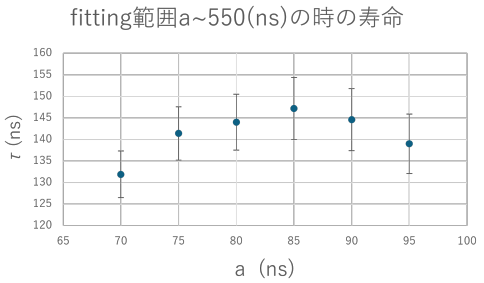


図4.5.6 fitting範囲a~550(ns)の時の寿命

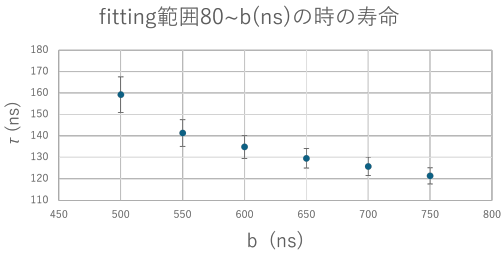


図4.5.7 fitting範囲80～b(ns)の時の寿命

図 4.5.6 は範囲の上限を 550ns に固定、下限を変えて寿命を調べた。 a が小さすぎると p-Ps や対消滅の効果が入るので図より 75ns あたりが適切と考えられる。

図 4.5.7 は範囲の下限を 80ns に固定し、上限を変えて調べた。b が大きいと約 120ns へ近づくように見える。原因としては t ＞ 600 あたりでデータの超過がある (図 4.5.8) ことが考えられる。その場合の原因の候補としては TQ 補正による見せかけのイベントや、考慮していないイベントなどがあると考えられる。そもそも 120ns を測定値とすべきとも考えられるが、その場合原因は pick off 反応による o-Ps の寿命の減少の寄与を考えていないからだと考えられる。

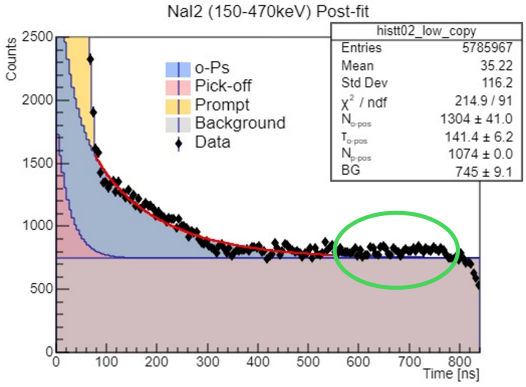


図4.5.8 ①＋②のフィッティング分類 (NaI2)

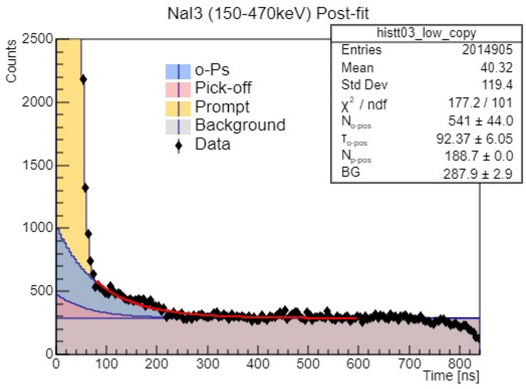


図4.5.9 ①＋②のフィッティング分類 (NaI3)

図 4.5.8、図 4.5.9 は $g(t)$ の各反応からの寄与の分類である。図 4.5.8 において緑色の部分がどの成分でも説明できていない。

4　考察

4.1　誤差伝播

これまでは最後の fitting での誤差 (以下、$\sigma_{\mathrm{fitting}}$ と呼ぶ) しか考慮していない。本節では、他の解析による誤差の影響を加味し、最終的な誤差を求める。今回は TDC 較正による誤差は考えないものとする。

4.1.1　誤差伝播の求め方

誤差伝播の求め方を二つ紹介する。

一つ目は fitting 関数そのものを変更する方法である。ある解析 α で使ったパラメーター $p_{\alpha,i}$ の誤差が $\sigma_{p_{\alpha,i}}$ であるとき、新たな fitting 関数 $f_{\alpha\pm}$ を以下のように定義する。

$$f_{\alpha\pm} \equiv f \pm \delta f_{\alpha} \tag{4.1}$$

$$\delta f_{\alpha} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial p_{\alpha,i}} \sigma_{p_{\alpha,i}} \right)^2} \tag{4.2}$$

$f_{\alpha\pm}$ を用いて fitting を行い、得た寿命を $\tau_{\alpha\pm}$ とする。解析 α による寿命の誤差 $\delta\tau_{\alpha}$ を以下のように定義する。

$$\sigma_{\alpha} \equiv \max\{|\tau - \tau_{\alpha+}|, |\tau - \tau_{\alpha-}|\} \tag{4.3}$$

最終的な誤差 σ_{total} は以下のようになる。

$$\sigma_{\mathrm{total}} = \sqrt{\sigma^2_{\mathrm{ADC}} + \sigma^2_{\mathrm{TQ}} + \sigma^2_{\mathrm{Pick-off}} + \sigma^2_{\mathrm{fitting}}} \tag{4.4}$$

二つ目は、解析 α における各パラメーター $p_{\alpha,i}$ が独立であることを仮定し、それぞれによる誤差を個別に評価する方法である。fitting 関数は変えずに、パラメーターを $p_{\alpha,i} \to p_{\alpha,i} \pm \sigma_{p_{\alpha,i}}$ と変更し、解析を進めて最終的に寿命の fitting まで行う。これで求まった寿命を $\tau_{\alpha,i\ \pm}$ とし、解析 α でパラメーター $p_{\alpha,i}$ による寿命の誤差 $\delta\tau_{\alpha,i}$ を以下のように定義する。

$$\sigma_{\alpha,i} \equiv \max\{|\tau - \tau_{\alpha,i+}|, |\tau - \tau_{\alpha,i-}|\} \tag{4.5}$$

結局解析 α による誤差は以下のように書ける。

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\sum_i (\sigma_{\alpha,i})^2} \tag{4.6}$$

最終的な誤差は式 (4.4) で表される。

4.1.2　ADC 較正の誤差

ADC 較正での誤差は考える必要がない。そう考える根拠を以下に述べる。

ADC 較正の式は以下の通りである。

$$\mathrm{count}_{\mathrm{ADC}} = p_0 + p_1 \times \mathrm{Energy} \tag{4.7}$$

表 7　ADC 較正でのパラメーターと誤差

	$p_0 \pm \sigma_{p_0}$	$p_0 \pm \sigma_{p_0}$
NaI2	$270.0 \pm 1.0 \times 10^{-3}$	$0.8685 \pm 1.0 \times 10^{-4}$
NaI3	$200.0 \pm 1.0 \times 10^{-3}$	$0.6077 \pm 2.4 \times 10^{-5}$

表 7 から見て取れる通り、誤差は各パラメーターよりおよそ 4 桁以上オーダーが小さいため、誤差伝播を求めたとしても寿命の有効数字の範囲に丸め込まれてしまうことが予想される。

4.1.3　TQ 補正の誤差

TQ 補正の誤差も同様に、考える必要はない。

TQ 補正に用いた式は以下の通りである。

$$\Delta T(E) = \frac{p_0}{(E - p_1)^{p_2}} + p_3 \tag{4.8}$$

前述の通り TQ 補正は、時間とエネルギーの二次元ヒストグラムについて

1. エネルギーごとに分割する
2. 各エネルギー帯で最もデータ数の多い時間をプロットする
3. プロットした点について、式 (4.8) で fitting を行う

という方式で行っている。

まず、3 で生じる誤差を求めることを試みたが上手くいかなかった。ROOT で解析を行った結果、パラメーターのエラーが nan と表示されてしまったのである。正確な原因は不明であるが、ROOT 自体の不具合により fitting 関数が何らかの形で特異的になってしまっている可能性が考えられる。そこで、2 でのエラーバーに着目することにした。

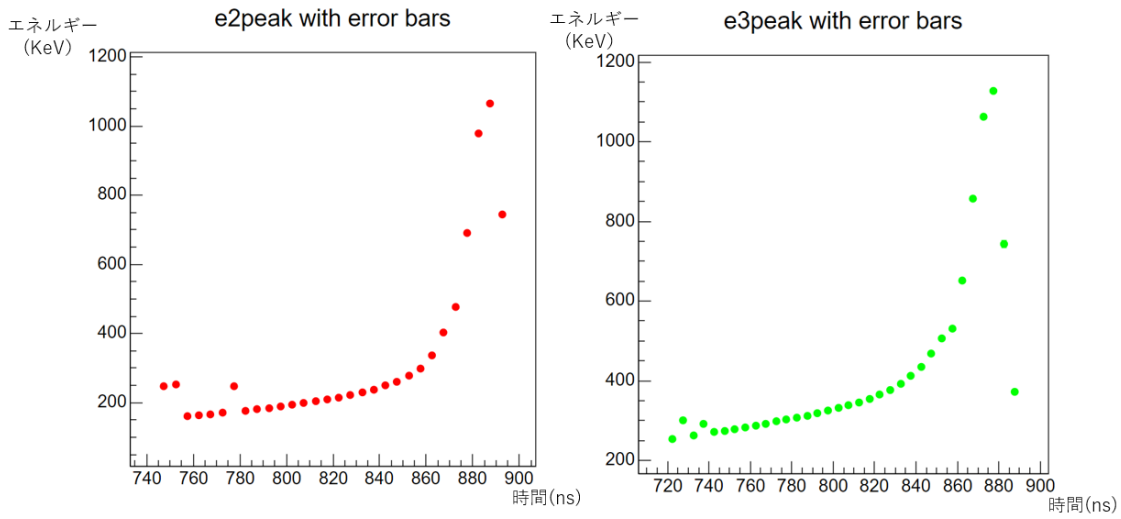


図 25　TQ 補正時の各エネルギー帯におけるピークのプロット

表 8　TQ 補正時の各エネルギー帯におけるピークの値と誤差 (左:NaI2、右:NaI3)

時間 (ns)	エネルギー (KeV)	誤差 (KeV)	時間 (ns)	エネルギー (KeV)	誤差 (KeV)
-	-	-	722.5	254.77	0.62
-	-	-	727.5	299.93	6.09
-	-	-	732.5	262.97	0.47
-	-	-	737.5	290.69	7.66
-	-	-	742.5	270.7	0.39
747.5	161.62	0.19	747.5	274.59	0.37
752.5	164.71	0.19	752.5	278.95	0.34
757.5	167.89	0.18	757.5	283.62	0.31
762.5	170.89	0.17	762.5	288.14	0.29
767.5	230.67	0.16	767.5	292.67	0.28
772.5	178.2	0.15	772.5	297.43	0.25
777.5	181.84	0.14	777.5	302.25	0.24
782.5	185.44	0.14	782.5	307.13	0.23
787.5	189.86	0.13	787.5	312.96	0.21
792.5	194.26	0.12	792.5	318.08	0.2
797.5	199.19	0.12	797.5	324.4	0.19
802.5	204.5	0.11	802.5	331.08	0.18
807.5	210.03	0.11	807.5	337.74	0.17
812.5	216.48	0.1	812.5	345.79	0.17
817.5	223.49	0.09	817.5	353.95	0.16
822.5	231.49	0.09	822.5	364.44	0.15
827.5	240.58	0.08	827.5	376.08	0.14
832.5	251.66	0.08	832.5	392.57	0.15
837.5	264.36	0.08	837.5	411.36	0.14
842.5	280.98	0.07	842.5	435.58	0.13
847.5	304.58	0.08	847.5	468.49	0.13
852.5	349.61	0.1	852.5	506.09	0.11
857.5	417.61	0.08	857.5	530.39	0.07
862.5	492.55	0.07	862.5	652.38	0.17
867.5	751.21	0.18	867.5	857.68	0.2
872.5	1021.26	0.29	872.5	1063.53	0.26
877.5	1032.46	1.83	877.5	1128.17	1.24
882.5	686.47	5.62	882.5	743.17	8.48
887.5	227.98	0.36	887.5	371.36	0.63

一部大きなエラーを持っているが、図 25 と表 8 を照らし合わせてみると、それらは外れ値を持ったデータ

であり、式 (4.8) による fitting にほとんど影響を及ぼしていない。典型的にはエラーの大きさは 0.1KeV 程度である。3 の fitting での誤差もこの範囲に収まる程度と考えると、ADC 較正のときと同様に考える必要はない。

4.1.4 Pick-off 補正の誤差

Pick-off 補正に用いた式は以下の通りである。

$$y(t) = p_o \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2 \tag{4.9}$$

表 9 Pick-off でのパラメーターと誤差

p_0	σ_{p_0}	p_1	σ_{p_1}	p_2	σ_{p_2}
1028	274.7	27.01	3.53	546.2	2.6
480.4	41.2	65.64	4.9	418.5	2.6

また、寿命の fitting に用いる式は以下の通りである。

$$y'(t) = p'_0 \exp\left(-\frac{t}{p'_1}\right) + p'_2 \exp\left(-\frac{t}{p'_3}\right) + p'_4 \tag{4.10}$$

パラメーターは以下のように固定している。

$$p'_3 = p_1 \tag{4.11}$$

$$p'_2 = p_0 \times \frac{S(0)}{y(0)} \tag{4.12}$$

これに誤差の分の変更を加えて解析を行った結果が表 10 である。ただし、$\tau_{\mathrm{Pick-off}i\pm}$ の誤差は考えないものとした。また、添え字の”Pick-off”を省略した。

表 10 Pick-off による誤差を考慮した寿命

	NaI2	NaI3
τ (ns)	141.4	90.81
τ_{0+} (ns)	143.7	91.23
τ_{0-} (ns)	139.3	90.38
σ_0 (ns)	2.1	0.43
τ_{1+} (ns)	145.1	90.15
τ_{1-} (ns)	138.4	91.21
σ_1 (ns)	3.7	0.66

結局 Pick-off 補正による誤差は、式 (4.6) に従って計算すれば以下のようになる。

$$NaI2 : \sigma_{\mathrm{Pick-off}} = \sqrt{2.1^2 + 3.7^2} \simeq 4.25 \tag{4.13}$$

$$NaI3 : \sigma_{\mathrm{Pick-off}} = \sqrt{0.43^2 + 0.66^2} \simeq 0.788 \tag{4.14}$$

4.1.5 誤差のまとめ

寿命 fitting による誤差は表 11 で既に提示してある通りであるから、式 (4.4) に従って最終的な誤差が計算できる。

表 11　誤差のまとめ

	NaI2	NaI3
$\sigma_{\mathrm{Pick-off}}(\mathrm{ns})$	4.3	0.79
$\sigma_{\mathrm{fitting}}(\mathrm{ns})$	6.2	6.1
$\sigma_{\mathrm{total}}(\mathrm{ns})$	7.5	6.1

4.2 寿命のまとめ

前節の内容を踏まえ、最終的な寿命は表 12 のようになる。

表 12　寿命のまとめ

	NaI2	NaI3	理論値
寿命 (ns)	141.4 ± 4.3	92.37 ± 0.79	142

NaI2 では理論値が誤差の範囲に収まっている。一方、NaI3 では収まっておらず、結果が理論値より大きく下にずれてしまっている。

4.3 誤差の要因

NaI3 で結果が理論値と大きくずれた原因を考察する。考え得る原因は 2 点ある。

1 点目として、TQ 補正が上手くいっていない可能性が挙げられる。図 26 を見ると、エネルギーが低いところで fitting が実際のデータより左側にずれてしまっている。時間の原点が実際より遅く設定されてしまっているため、これは寿命が短く見積もられてしまう原因になり得る。改善を試みたが、上手くいかなかった。何らかの影響で、式 4.8 で補正しきれない効果が出てしまっている可能性があるため、そもそも fitting の関数形自体を変更する必要がある。今後に生かしていきたい。

2 点目として、Pick-off 補正が上手くいっていない可能性が挙げられる。図 27 を見ると、$S(0)/y(0)$ の値が NaI2 と NaI3 で大きく異なっていることが分かる。これは p-ポジトロニウムにおける光電効果とコンプトン散乱の比であり、シンチレーターに固有の値であるが、あまりにも差が出ているため、何らかの理由で NaI3 の光電-コンプトン比が小さく見積もられている可能性がある。そうだとすれば Pick-off の寄与を完全に取り除くことができず、最終的な寿命は小さく見積もられることになる。こちらも改善方法は不明である。今回は時間の都合上できなかったが、NaI を入れ替える、TDC のチャンネルを入れ替えるなどして、どこに不具合があるのかを突き止めた後、その装置を取り換える、という方針が有用であると思われる。

結局、NaI3 で結果が大きくずれた理由は明確には分からなかった。今後の課題としたい。

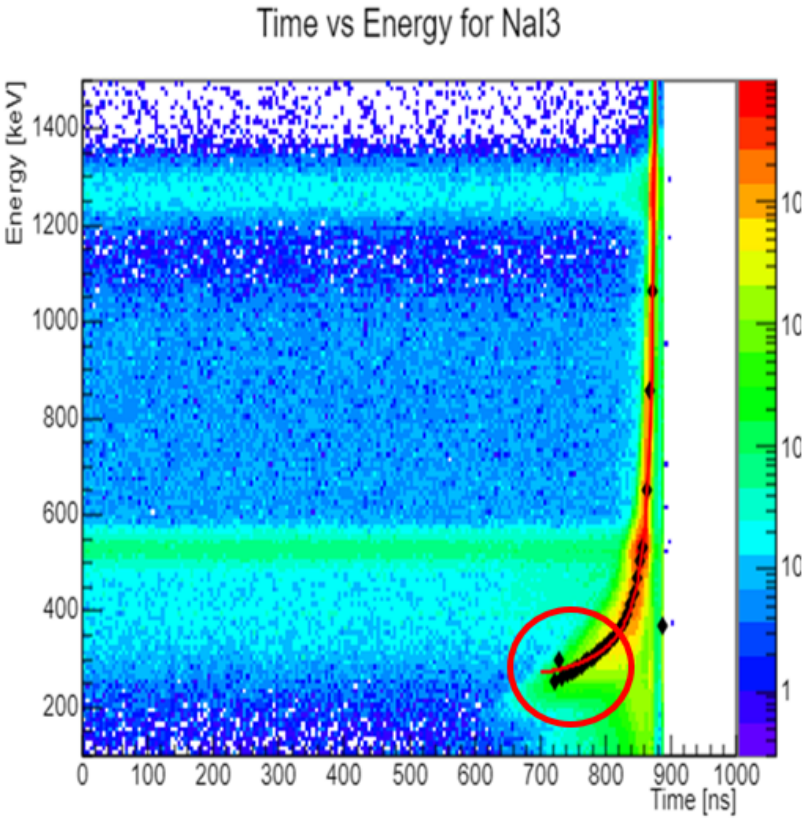


図 26　TQ 補正 NaI3(再掲)

	S(0)	y(0)	S(0)/y(0)
NaI2	2013199	2103813	1.045
NaI3	428022	1089572	0.3928

図 27　$S(0)$、$y(0)$ の値 (単位は counts)(再掲)

4.4　誤差を小さくするには

今回、NaI2 では理論値と非常に近い結果が得られた。ここからさらに精度を上げ、誤差を小さくする方法を考察していく。

2 つの NaI を用意して AND 回路を取り、2 つの NaI に同時に信号が来た時しかデータを取らないようにする、という方法が考えられる。そうすれば宇宙線などのノイズをかなり削減することができ、より精度の高い結果が得られるであろう。しかし、この方法は今回の実験でも試したが、上手くいかなかった。原因は、信号が少なすぎることである。今回の計測期間である 1 週間では解析可能な個数の o-ポジトロニウムのデータを取ることができなかった。

解決策としては、NaI を追加し、どれか 2 つが信号を受信したらデータを取るという仕組みを作ることが挙げられる。こうすれば信号の少なさを補いつつもバックグラウンドのノイズをかなり削減できる。また、単純に計測期間を長くするという手段も考えられる。

5　結論

NaI2,NaI3 の 2 つのシンチレーターを用いて、o-ポジトロニウムの寿命を測定した。NaI2 では十分理論値に近い結果が得られた一方で、NaI3 では理論値から大きく下にずれた結果が得られ、その原因は明確には分からなかった。