

2009 年度後期 課題演習 A2

# オルソポジトロニウムの寿命測定

古村 翔太郎

新谷 俊了

杉下 宗太郎

富上 皓介

## <目次>

1. 実験目的
2. 原理
  - 2.1. オルソポジトロニウムとは
  - 2.2. オルソポジトロニウムの寿命
3. 実験方法と実験装置
  - 3.1. 実験装置
  - 3.2. 実験装置と配置
  - 3.3. 回路
    - 3.3.1. 回路図
    - 3.3.2. 回路の設定
  - 3.4. TDCによる崩壊時間の測定
4. 解析
  - 4.1. キャリブレーション
    - 4.1.1. ADCのキャリブレーション
    - 4.1.2. TDCのキャリブレーション
    - 4.1.3. t-Q補正
  - 4.2. 解析
5. 結果と考察
  - 5.1. 誤差の評価
  - 5.2. 結果の解釈
  - 5.3. ADCキャリブレーションの検証
  - 5.4. 改善点
6. 参考文献

## 1. 実験目的

本実験の目的は、オルソポジトロニウム(o-Ps)の真空中の平均寿命を測定し、QED から予測される寿命と比較することである。

## 2. 原理

### 2.1 オルソポジトロニウムとは

ポジトロニウム(Ps)とは、電子と陽電子が電磁相互作用により束縛された系のことであり、水素原子と似た構造をしており最終的に  $e^+e^-$  の対消滅によって崩壊する。

基底状態の Ps には、電子と陽電子のスピンの向きが反平行で全スピンの値が 0 のパラポジトロニウム(p-Ps)と、電子と陽電子のスピンの向きが平行で全スピンの値が 1 のオルソポジトロニウムがある。

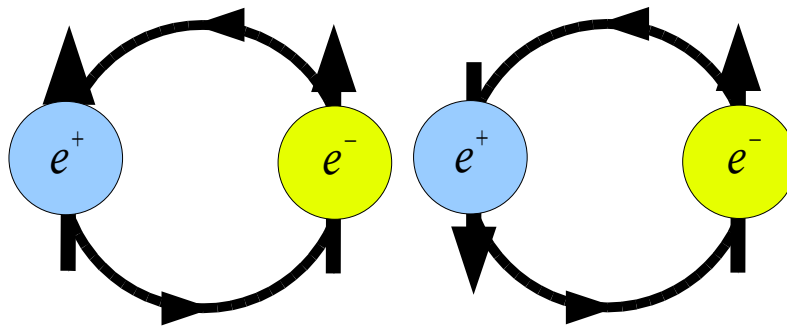


図 2.1 o-Ps と p-Ps のイメージ図

Ps は最終的に電子と陽電子が対消滅して光子になり、p-Ps は全スピンの値が 0 なので偶数個の光子に、o-Ps は全スピンの値が 1 なので奇数個の光子に崩壊するが、Ps 崩壊後の光子数が 1 増えるごとに崩壊率は微細構造定数(1/137)のオーダーで減少するため、p-Ps は主に  $2\gamma$  へ崩壊、o-Ps は主に  $3\gamma$  へ崩壊する。理論計算によると、真空中での p-Ps、o-Ps の寿命はそれぞれ 125[ps]、142[ns]である。 $2\gamma$  崩壊の場合はエネルギーと運動量保存からその  $\gamma$  線のエネルギーは 511[keV]であり、 $3\gamma$  崩壊の場合は 511[keV]以下に連続的に分布する。

### 2.2 オルソポジトロニウムの寿命

真空中におけるオルソポジトロニウムの寿命  $\tau$  は、時刻  $t$  における o-Ps の数を  $N(t)$ 、測定開始時刻  $t=0$  における o-Ps の数  $N_0$  とすると次のような関係がある。

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.1)$$

また、この式は  $\tau$  の逆数  $\Gamma$  (崩壊率) を用いると、

$$N(t) = N_0 \exp(-\Gamma t) \quad (2.2)$$

と書くことができる。

しかし、実際には完全な真空を作ることは不可能であるため、次のような反応が起こると考えられる。

- ・pick-off反応:Psが他の原子と衝突する際に、Ps外の電子とPs内の陽電子が対消滅し $\gamma$ 線を放出する反応。
- ・スピン交換反応:Ps内の電子や陽電子が外部の原子の対電子とスピンを交換する。このとき、o-Psはp-Psに変化し寿命に影響を及ぼしてしまう。
- ・化学反応:Psの構造が水素原子に似ているために、酸化反応などの反応が起こり、これも寿命に影響を及ぼす。

これらの反応を考慮すると(2.2)式の崩壊率について、純粋な o-Ps による項を  $\Gamma_{3\gamma}$ 、その他の pick off 等による項を  $\Gamma_{ex}$  とすると、

$$N(t) = N_0 \exp(-(\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{ex})t) = N_0 \exp(-\Gamma_{total}t) \quad (2.3)$$

と書け、寿命  $\tau_{total}$  は、

$$\tau_{total} = \frac{1}{\Gamma_{total}} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{ex}} \quad (2.4)$$

となり、純粋な寿命  $\tau_{3\gamma} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma}}$  よりも短くなってしまう。

(2.3)式より単位時間あたりに崩壊する粒子数  $N'(t)$  は、次の式で表される。

$$N'(t) = \frac{N_0}{\tau_{total}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{total}}\right) = N'_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{total}}\right) \quad (2.5)$$

### 3. 実験方法とセットアップ

#### 3.1 実験方法

$^{22}\text{Na}$  の  $\beta^+$  崩壊によって出てくる陽電子をシリカパウダー( $\text{SiO}_2$ )と反応させて o-Ps を生成する。Ps が発生した時刻を知るために、線源が放出する陽電子をプラスチックシンチレーターで検出し、シリカパウダー内で生成した o-Ps の崩壊によって出てくる  $\gamma$  線を NaI シンチレーターで検出する。これらの検出時間の差を o-Ps の崩壊までにかかった時間と考え、これを測定することにより o-Ps の寿命  $\tau$  を求める。本実験はシリカパウダーが封入されている容器内を真空に近い状態に保ちながら 2 時間加熱し、30 分冷ましたものを容器内の圧力を約 0.001[MPa]にして、500 万のイベントを測定した。

#### 3.2 実験装置と配置



図 3.1 遮光シートをかぶせた様子

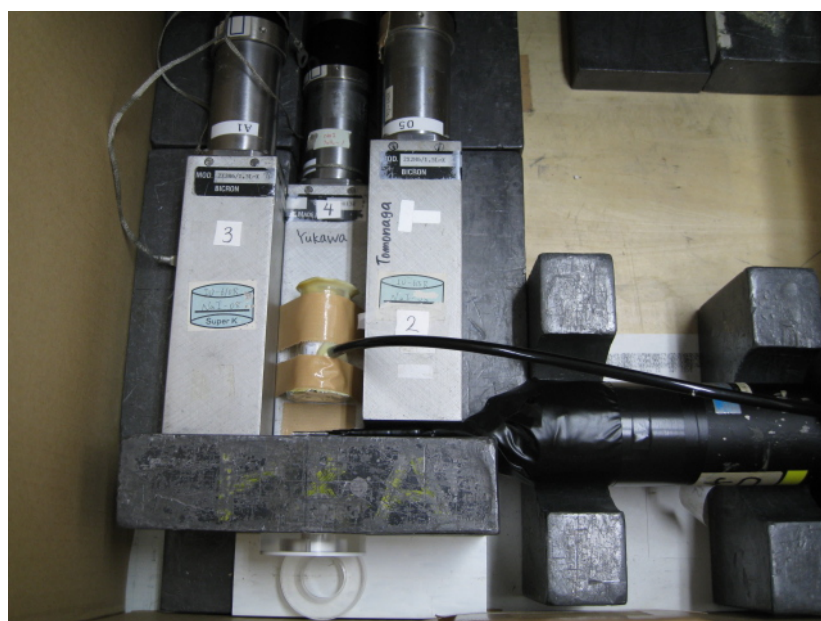


図 3.2 上から見た様子

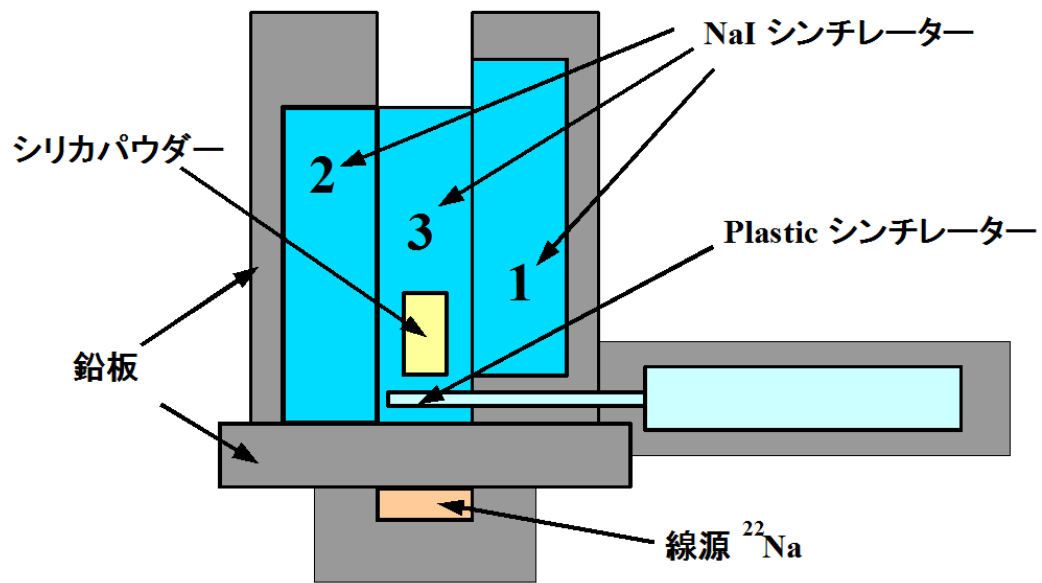


図 3.3 配置模式図

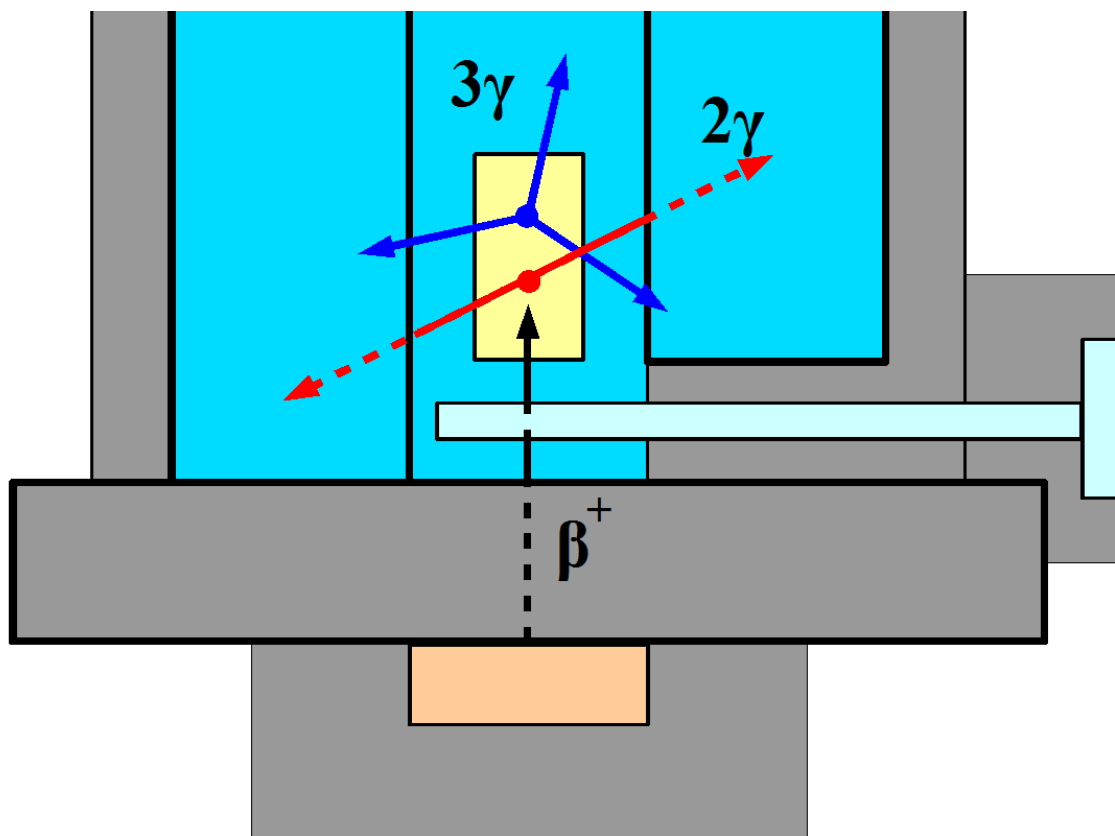


図 3.4 拡大図

今回の実験では、以下のものを用い、図 3.1~3.4 のように配置した。なお、回路に用いたものは次節で述べる。

・<sup>22</sup>Na 線源

$\beta^+$ 崩壊によって陽電子を放出する。

陽電子の供給源、ADC キャリブレーションに用いた。

・<sup>137</sup>Cs 線源

662[keV]の  $\gamma$  線を放出する。

ADC キャリブレーションの妥当性の検証に用いた。

・シリカパウダー

二酸化ケイ素を粉末状にしたもので真空ポンプにつながった容器に入れてあり、ポジトロニウムを生成する。シリカパウダーの密度は小さいため、pick-off の影響はほとんど無いとみなした。ただし、シリカパウダーは吸水性が高く、その水分により化学反応を起こしてしまう可能性があるため、測定前に加熱して水分をとばした。

・プラスチックシンチレーター

放射線が通過すると微弱な光を発生する。

反応が早いため、陽電子が通過する時刻を正確に測定することができる。

・NaI シンチレーター

放射線が通過すると微弱な光を発生する。

ポジトロニウムの崩壊によって放出された  $\gamma$  線を検出する。本実験では 3 個用いた。

以下では、図 3.3 で与えた番号によりそれぞれ NaI1、NaI2、NaI3 とよぶことにする。

・光電子増倍管

光を検出して強度を増して電気信号を出力する。各シンチレーターに取り付けられている。

・真空ポンプ

容器内の減圧に用いた。

・鉛板

遮蔽および配置補助に用いた。

・箱および遮光シート

遮光に用いた。

### 3.3 回路

#### 3.3.1 回路図

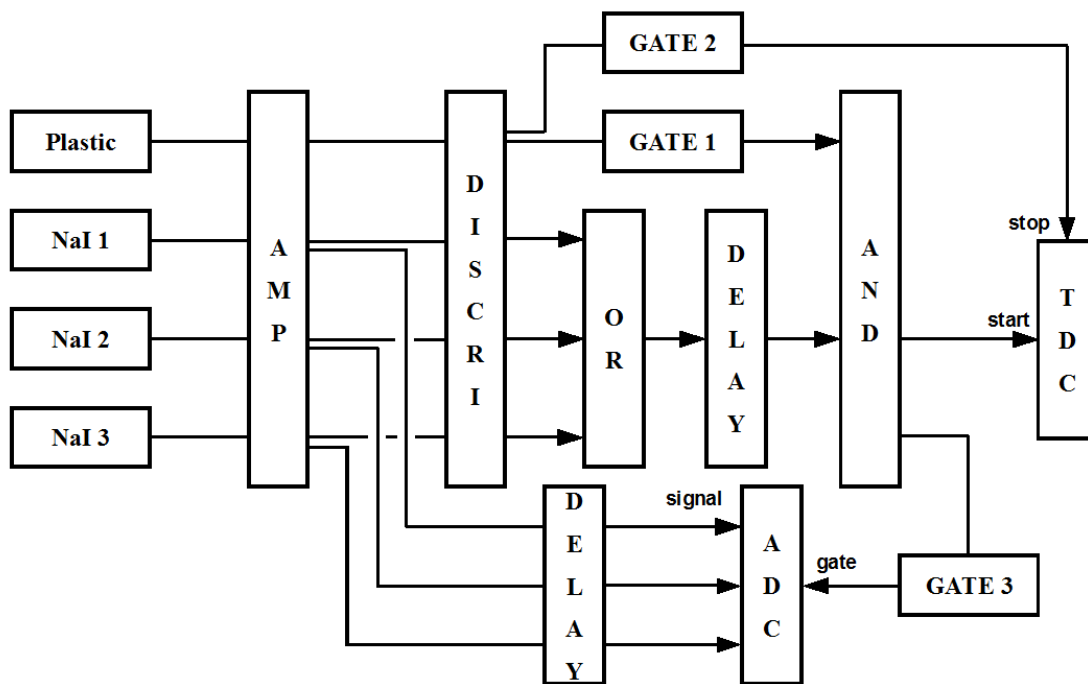


図 3.5 回路図

測定用の回路には以下の装置を用い、図のように配線した。

- Negative high voltage  
光電子増倍管に電圧をかける。
- Amplifier  
入力信号を増幅して出力する。
- Discriminator  
アナログ信号が threshold を超えたときデジタル信号を返す。
- Gate generator  
デジタル信号の入力があったときにゲートパルスを出力する。
- Coincidence(AND)  
入力端子に同時に信号が入ったときにのみ信号を出す。
- FAN IN/OUT(OR)  
入力端子のいずれかに信号が入ると信号を出す。
- Delay  
信号を遅らせる。
- ADC  
ゲートパルスが入力されている間に入力された信号の総電荷量に対応した値を返す。  
検出した  $\gamma$  線のエネルギー測定に用いた。
- TDC  
start 信号が入力されてから stop 信号が入力されるまでの時間間隔に対応した値を返す。  
オルソポジトロニウムの崩壊に要した時間の測定に用いた。



### 3.3.2 回路の設定

- ・プラスチックシンチレーターには-1801[V]の電圧をかけた。
- ・NaI 1、NaI 2、NaI 3にそれぞれ-801[V]、-770[V]、-932[V]の電圧をかけた。
- ・Discriminator の threshold は-30[mV]に設定した。
- ・Gate1 では delay をかけず、ゲート幅 900[ns]に設定した。
- ・Gate2 では delay を AND との差を 960[ns]、ゲート幅を 110[ns]に設定した。
- ・Gate3 では delay をかけず、ゲート幅 1000[ns]に設定した。

### 3.4 TDC による崩壊時間の測定

TDC は陽電子をプラスチックシンチレーターが検出した時刻とその陽電子がポジトロニウムを生成し崩壊して放出された  $\gamma$  線を NaI シンチレーターが検出した時刻との時間間隔を求めるために用いた。本実験では、NaI シンチレーターで  $\gamma$  線が検出された信号を start に、プラスチックシンチレーターで陽電子が検出された信号を stop に入れた。

回路の時間の流れは下図のようになる。

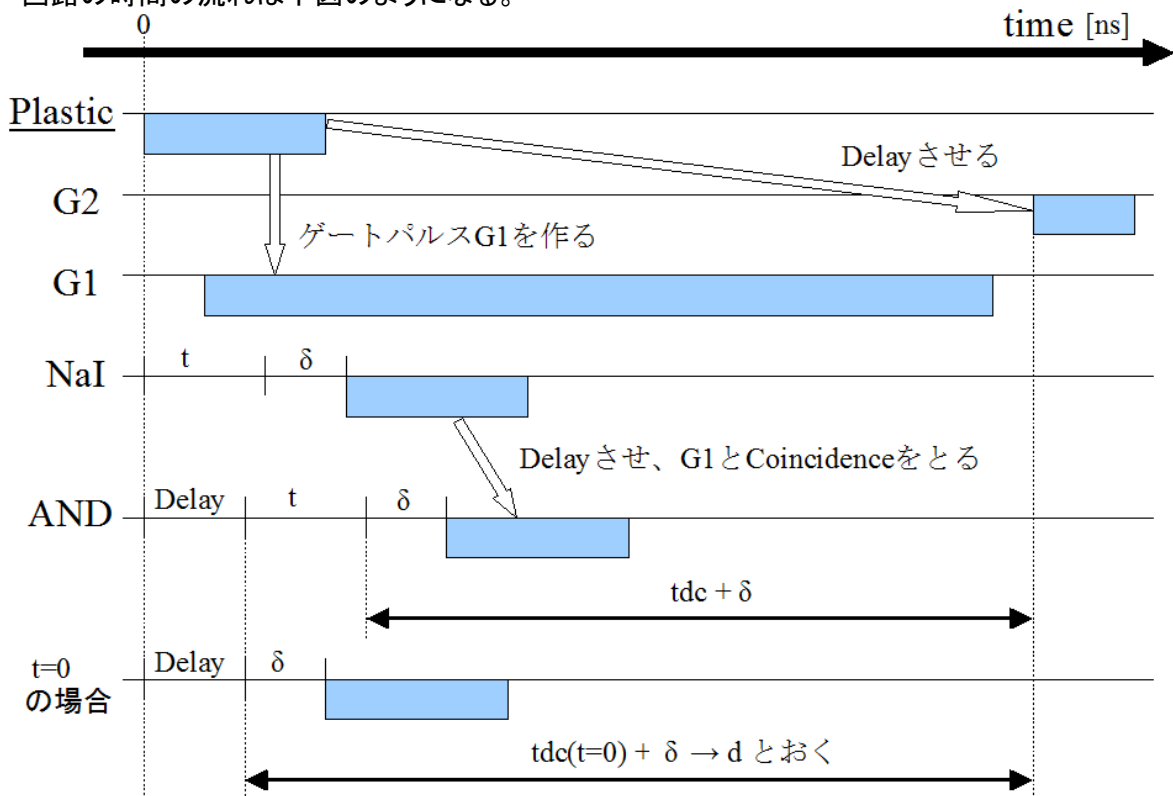


図 3.6 回路の時間の流れ

一連の同一イベントがプラスチックシンチレーターを通過したのち、G1 を形成し AND に入るまでの回路と、各 NaI シンチレーターで反応し、OR により合成され AND に入るまでの回路が異なることによる時間差を考慮し、後に起こる NaI シンチレーターでの反応信号を確実に観測するために OR から AND に入るまでに十分な Delay をかけた。この図での NaI から AND へ進む途中の Delay はこれを表している。

図より、求めたい時間間隔  $t$ [ns]は

$$t = d - tdc - \delta \quad (3.1)$$

とかける。

ただし、 $tdc$  は測定した TDC の値を時間間隔[ns]に換算したものであり、この換算については 4.1.2 TDC キャリブレーションの項で述べる。また、 $\delta$  はアナログ信号をデジタル信号に変化する際に生じる時間的遅れである。これについては、4.1.3 t-Q 補正の項で述べる。

## 4. 解析

本実験の解析は ROOT を用いて行った。ヒストグラムの bin 幅はすべて 4 にしている。

### 4.1 キャリブレーション

#### 4.1.1 ADC キャリブレーション

ADC は入力されたアナログ信号を積分した値に対応した数値を返すが、これは実際のエネルギー値とは異なる。そこで、 $\gamma$  線のエネルギー値と ADC の出力値は、

$$energy[keV] = a(ADC + b) \quad (4.1)$$

のような一次関数であるとし、本実験では  $^{22}\text{Na}$  線源が放出する 511[keV]と 1275[keV]の  $\gamma$  線を利用して、各実験、各シンチレーターに対してそれぞれ  $a$ 、 $b$  を決定した。

ここで、511[keV]と 1275[keV]は単一スペクトルであるので、ガウシアンで fitting を行った。このとき、平均値  $\mu$  と分散  $\sigma$  を用いて、511[keV]は  $\mu \pm 2\sigma$ 、1275[keV]は  $\mu \pm \sigma$  の範囲で 10 回 fitting をくり返し、最終的な平均値を各エネルギーの ADC の値とした。

#### 4.1.2 TDC キャリブレーション

得られた TDC のデータを変換するために TDC から時間間隔  $tdc[ns]$  への換算式を求める。まず、スタート信号とストップ信号の間隔を変化させ、オシロスコープで測定した。それぞれ 100 回分のイベントを測定し、時間間隔に対応する TDC はその平均値であるとした。以下はその表である。

TDC	262	516	990	1412	1918	2611	3225
時間間隔[ns]	52	116	232	336	460	640	790

表 4.1 TDC と実際の時間間隔の関係

これらの値は一次の関係であるとし変換式を求めた。

$$\begin{aligned} tdc[ns] &= A \cdot TDC + B \\ &= (0.249241 \pm 0.000963831) \cdot TDC - (14.0145 \pm 1.79222) \end{aligned} \quad (4.2)$$

以下、 $tdc$  は測定した TDC に(4.2)の変換を施した値とする。

### 4.1.3 t-Q 補正

Discriminator の threshold により、下図のように入力されたアナログ信号の電圧に対応してデジタル信号の立ち上がり時間に遅れが生じてしまう。

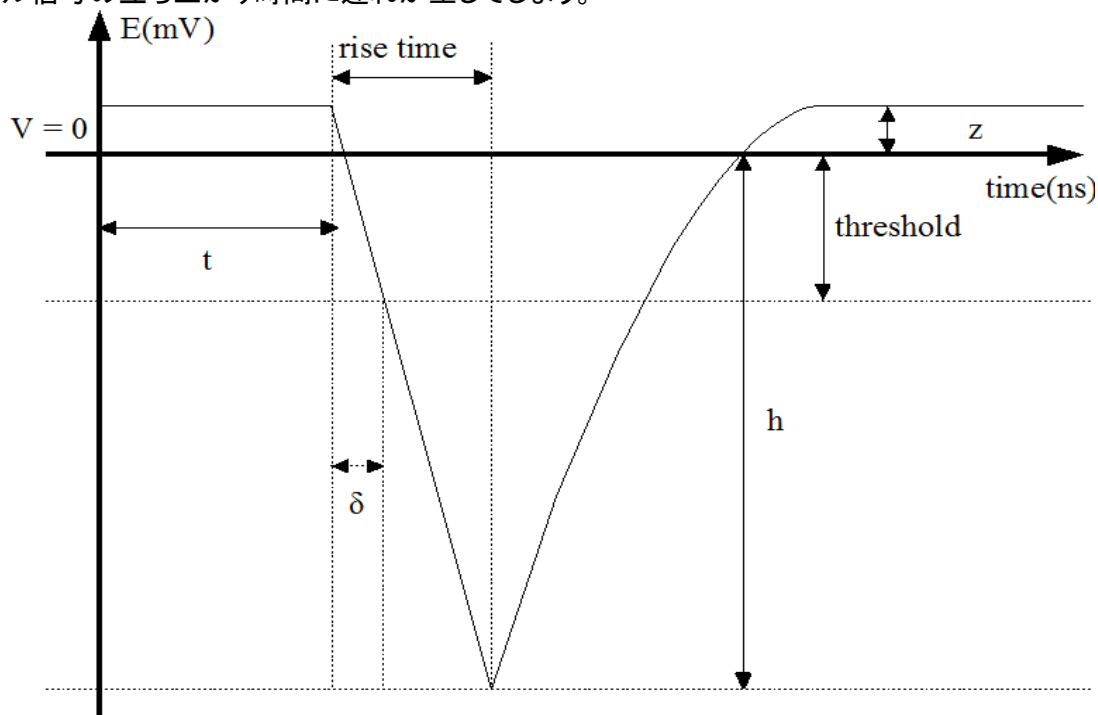


図 4.0 アナログ信号の三角形近似

この遅れ  $\delta$ [ns] は崩壊時間の測定値 TDC に影響を与えてしまうので、補正する必要がある。本来計測したい時間  $t$ [ns] と TDC との関係は(3.1)、(4.2)より、

$$t = d - tdc - \delta = d - A \cdot TDC - B - \delta \quad (4.3)$$

である。

本実験においてこの補正は、信号を底辺の長さが一定で高さが  $\gamma$  線のエネルギーに比例する三角形と近似する。すると、ADC の値は  $h + z$  は  $ADC + b$  に比例する。また図より、

$$\delta : (threshold + z) = rise\ time : (z + h)$$

であるから、まとめると時間差の補正式として、

$$\delta = \frac{c}{ADC + b} \quad (4.4)$$

を得る。

p-Ps の寿命がほぼ 0[ns] であることを既知とすると、(4.3)において  $t = 0$  とみなせる。そこで、p-P s の  $2\gamma$  崩壊の主領域である 511[keV] 近傍 ( $\pm 2\sigma$ ) において、

$$tdc = -\frac{c}{ADC + b} + d \quad (4.5)$$

を fitting して定数  $c$ 、 $d$  を求めた。

結局、プラスチックシンチレーターが反応してから NaI が反応するまでの時刻  $t$ [ns] は、

$$t = d - \frac{c}{ADC + b} - tdc \quad (4.6)$$

となる。

## 4.2 解析

まず、生のデータの ADC と TDC のヒストグラムは図 4.1~4.4 のようになった。ここで、ADC のヒストグラムはそのシンチレータのみが反応しているときのデータを用いた。なぜなら、NaI が 2 個以上同時に反応したとき、回路の設定上 TDC の start がどちらでかけられているかわからないためである。

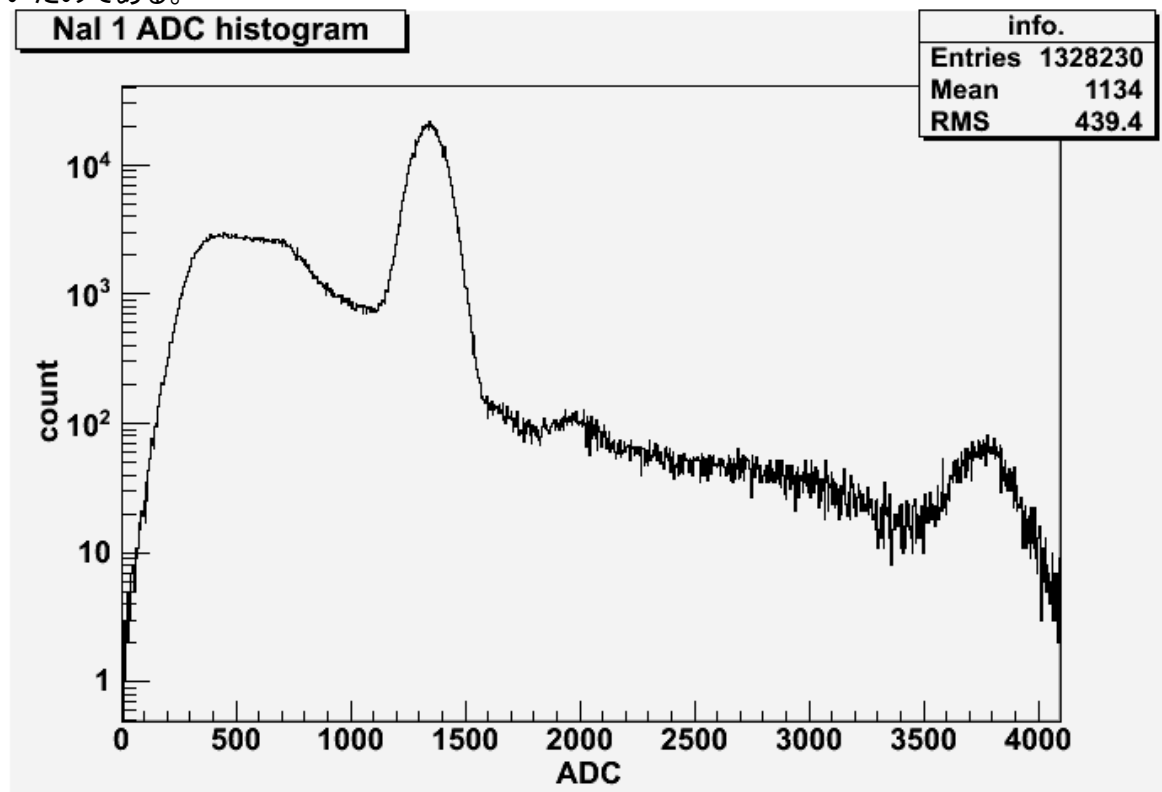


図 4.1 NaI 1 ADC histogram

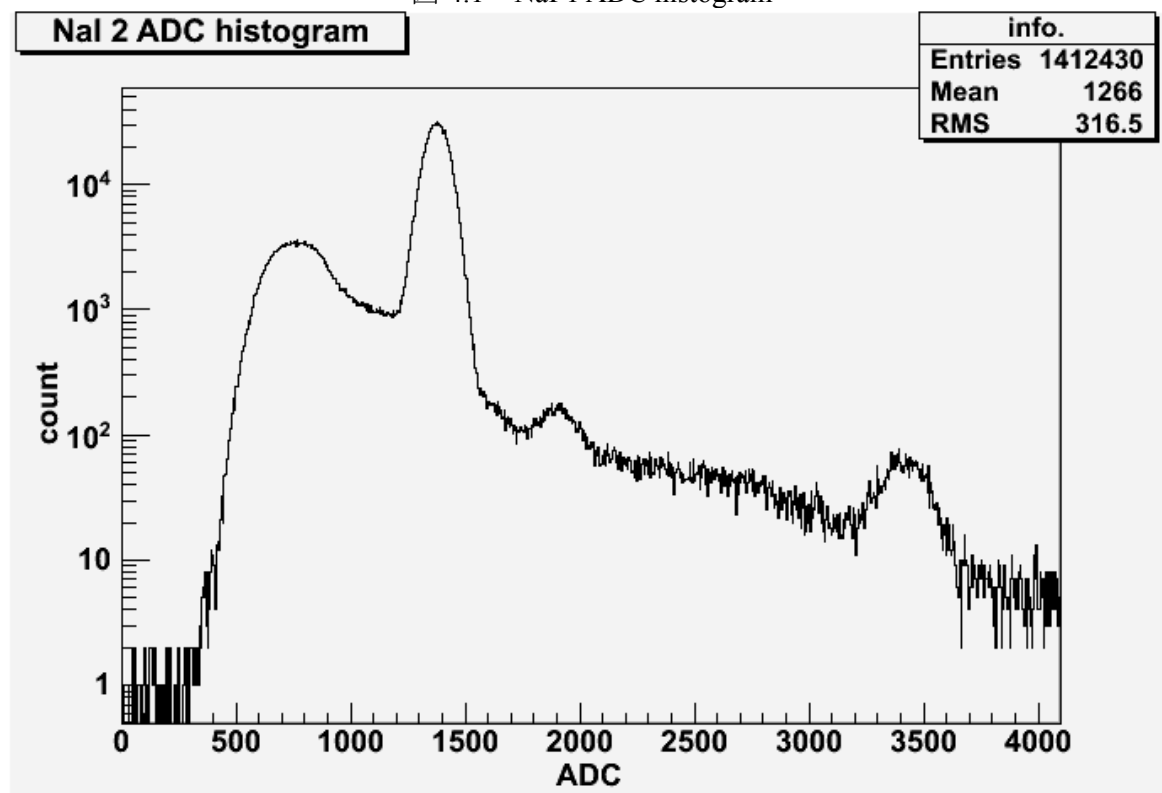


図 4.2 NaI 2 ADC histogram

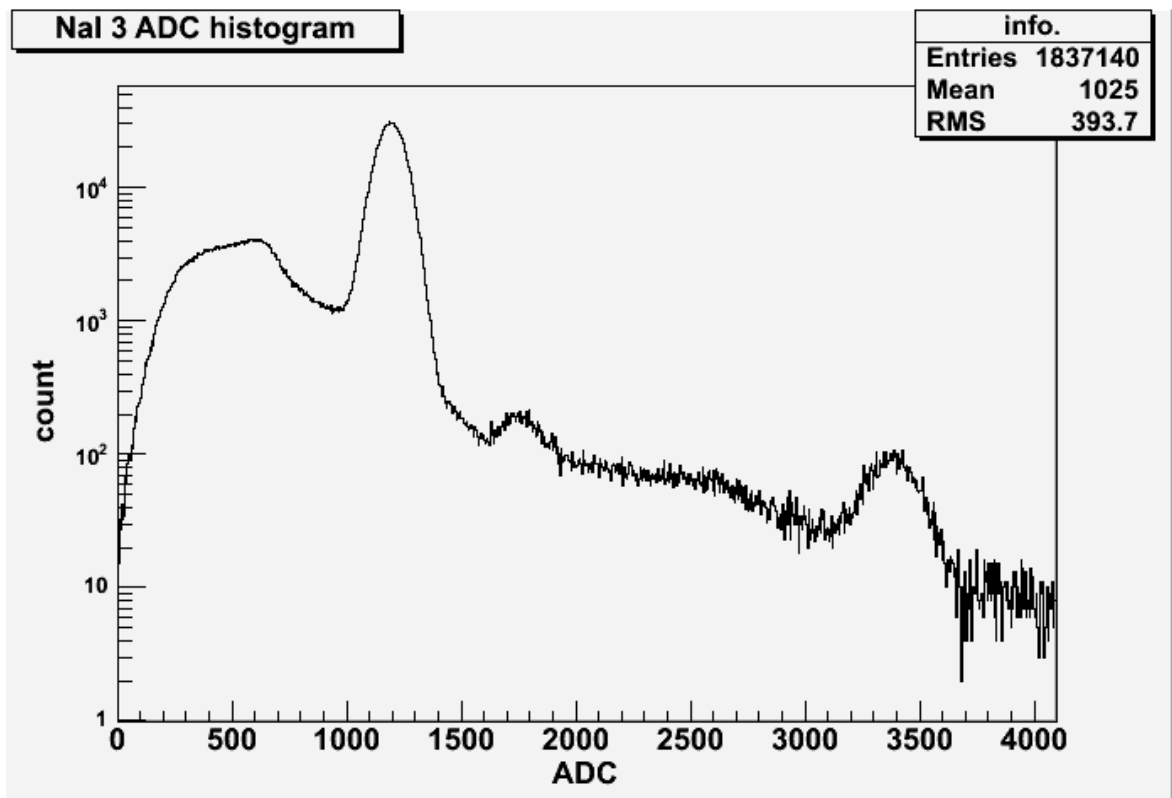


图 4.3 NaI 3 ADC histogram

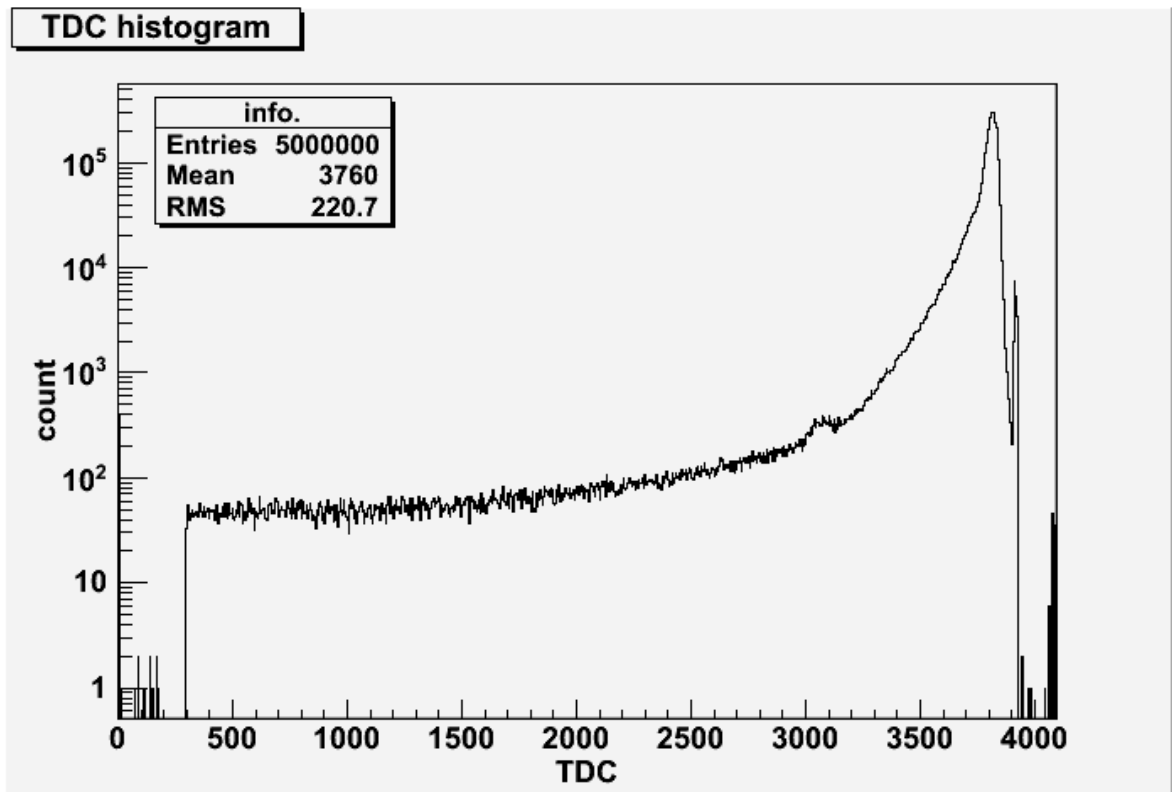


图 4.4 TDC histogram

図 4.1~4.3 のグラフにおいて、ADC が 1300,3400 付近にピークが見られるが、それぞれ 511[keV],1275[keV]に対応するピークとみなした。

これらの対応から、各シンチレーターの ADC キャリブレーションの式(4.1)における定数 a、b を上で述べた方法により求めると結果は次のようになった。

	a	b
NaI 1	0.31605	276.02
NaI 2	0.37430	-11.82
NaI 3	0.35002	266.81

表 4.2 ADC キャリブレーション

次に、TDC のヒストグラムにおいて、511[keV]の近傍( $\pm 2\sigma$ )でエネルギーカットを行ったグラフは図 4.5~4.7 のようになった。

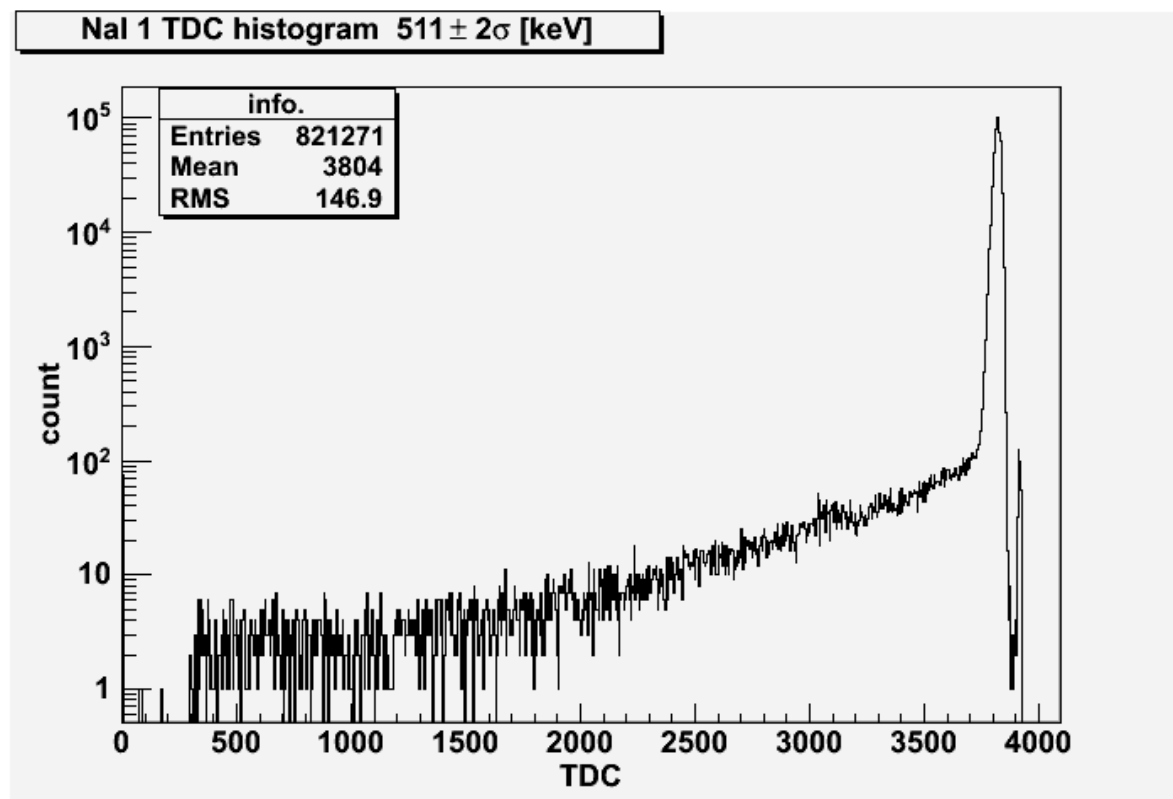


図 4.5 511[keV]近傍での NaI 1 の TDC histogram

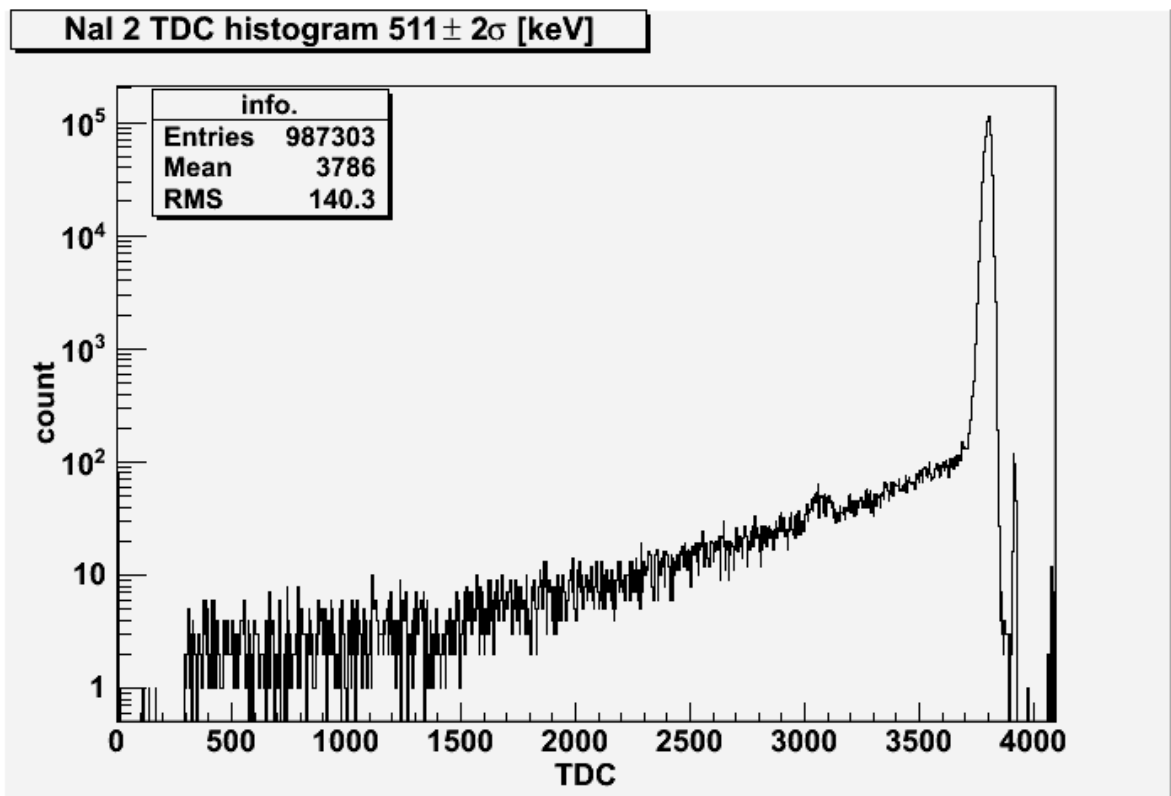


図 4.6 511[keV]近傍での NaI 2 の TDC histogram

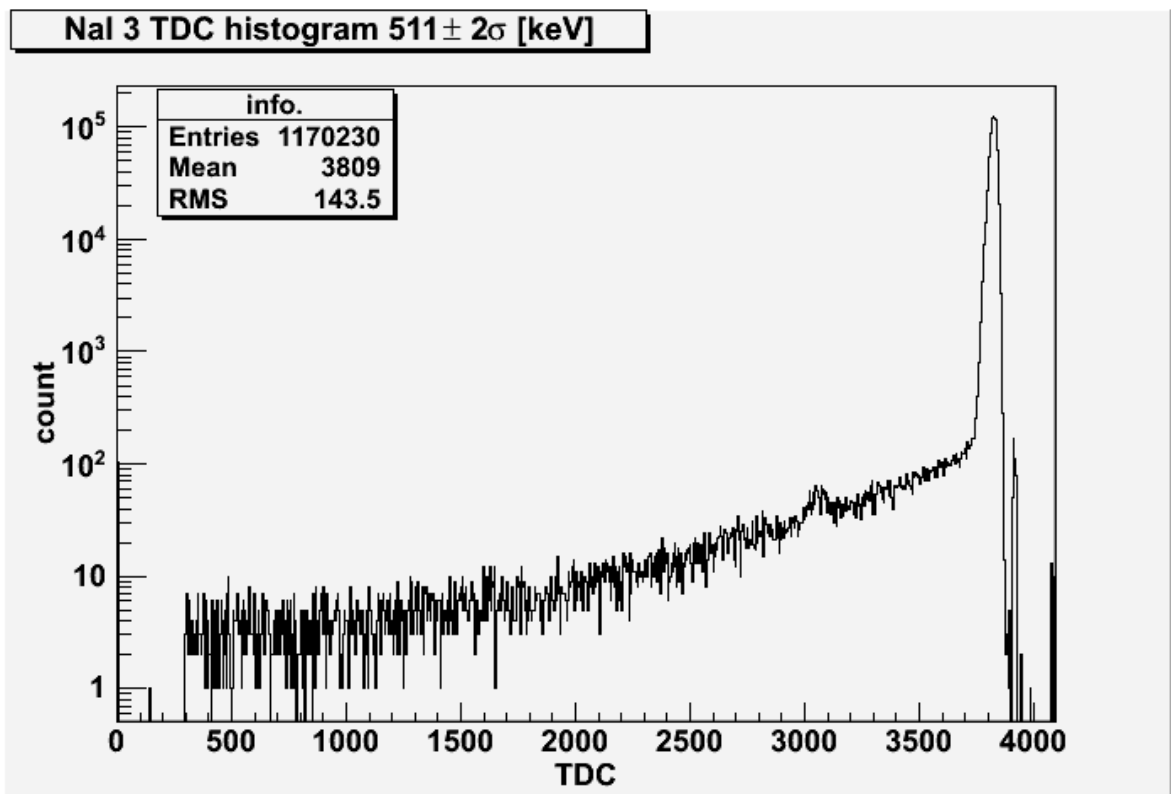


図 4.7 511[keV]近傍での NaI 3 の TDC histogram

これらのグラフの右側の山が時刻 0[ns]の崩壊イベントにより構成されていると考え、その分布をガウシアンであると仮定した。この際、ピーク( $\mu'$ )の左側は pick-off などの寿命が 0[ns]でないイベントを含んでいるので、fitting 範囲を  $\mu' - \sigma'$  から  $\mu' + 2\sigma'$  とした。こうして求めた  $\mu'$ 、 $\sigma'$  を用いて、511 [keV] 主領域のなかで、寿命が 0[ns]のイベントの領域を  $\mu' \pm 2\sigma'$  であるとし、t-Q 補正に用いる領域とした。

ADC と tdc[ns] との相関のヒストグラムは下図 4.8~4.10 のようになった。

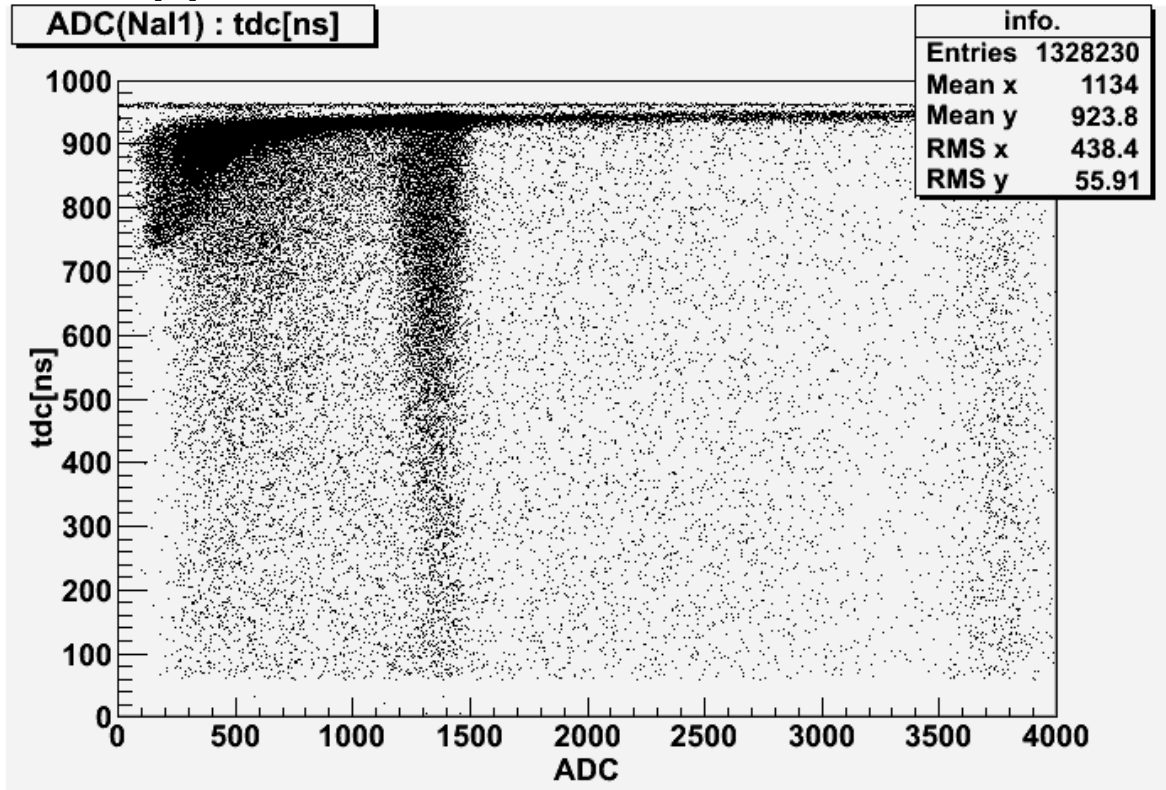


図 4.8 ADC(NaI 1) : tdc[ns]

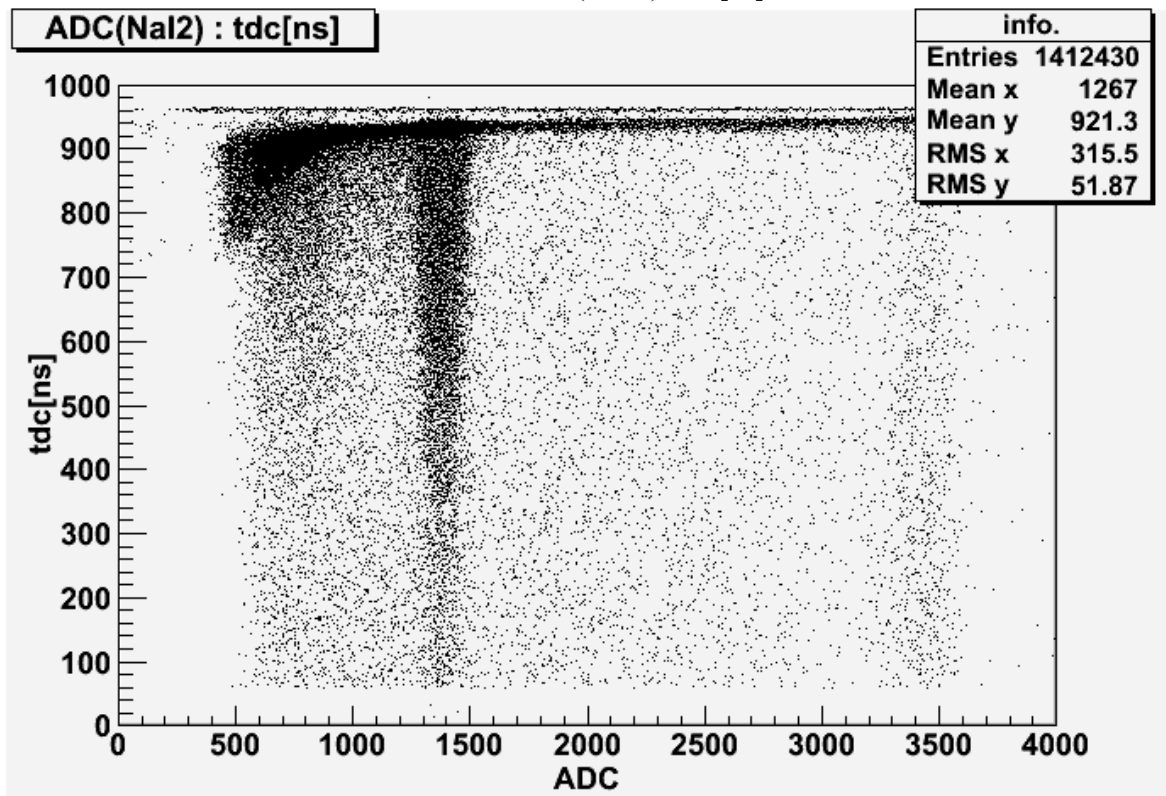


図 4.9 ADC(NaI 2) : tdc[ns]



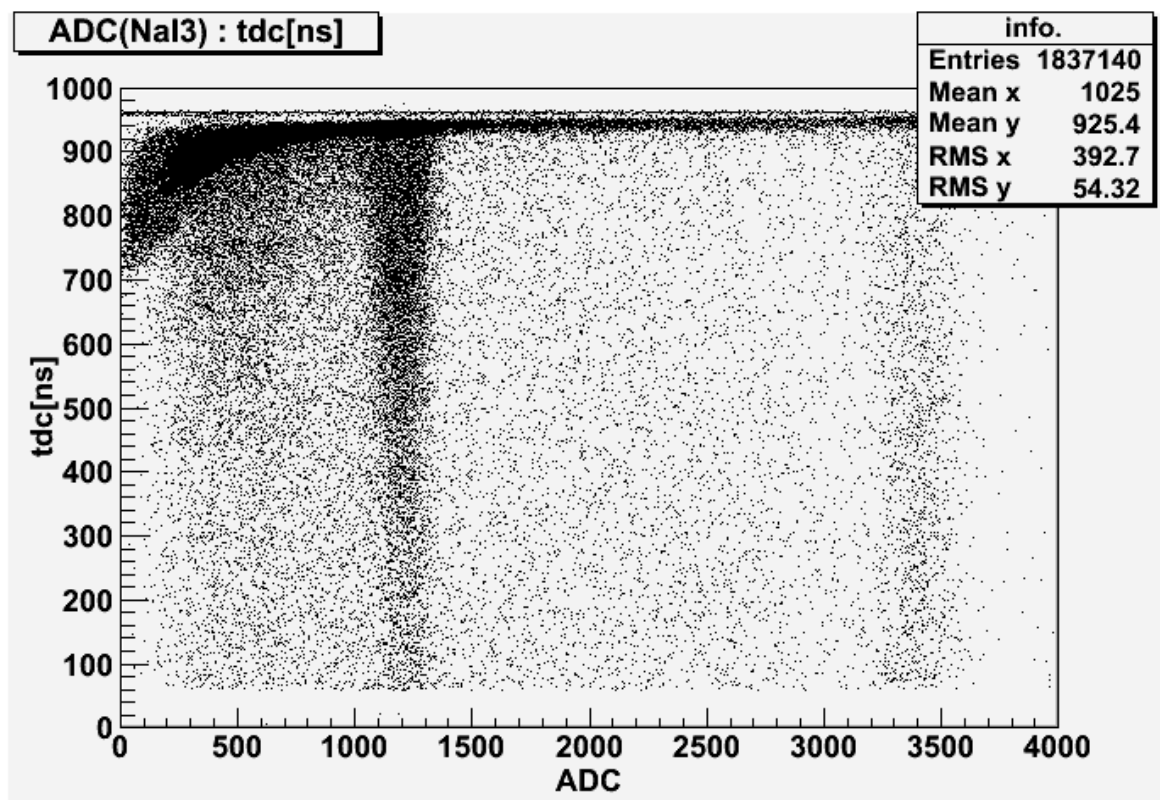


図 4.10 ADC(NaI 3) : tdc[ns]

このヒストグラムの TDC のプロファイリングを ADC ごとに行った。このグラフで t-Q 補正の式 (4.5)により上述のように fitting をすることで、定数 c,d を各 NaI について求め、結果は表 4.3 のようになった。

	c	d
NaI 1	14272.71	946.89
NaI 2	15265.57	944.74
NaI 3	12854.80	947.93

表 4.3 t-Q 補正

上の値を用いて t-Q 補正を行った後の ADC と tdc[ns]との相関のヒストグラムは図 4.11~4.13 のようになった。

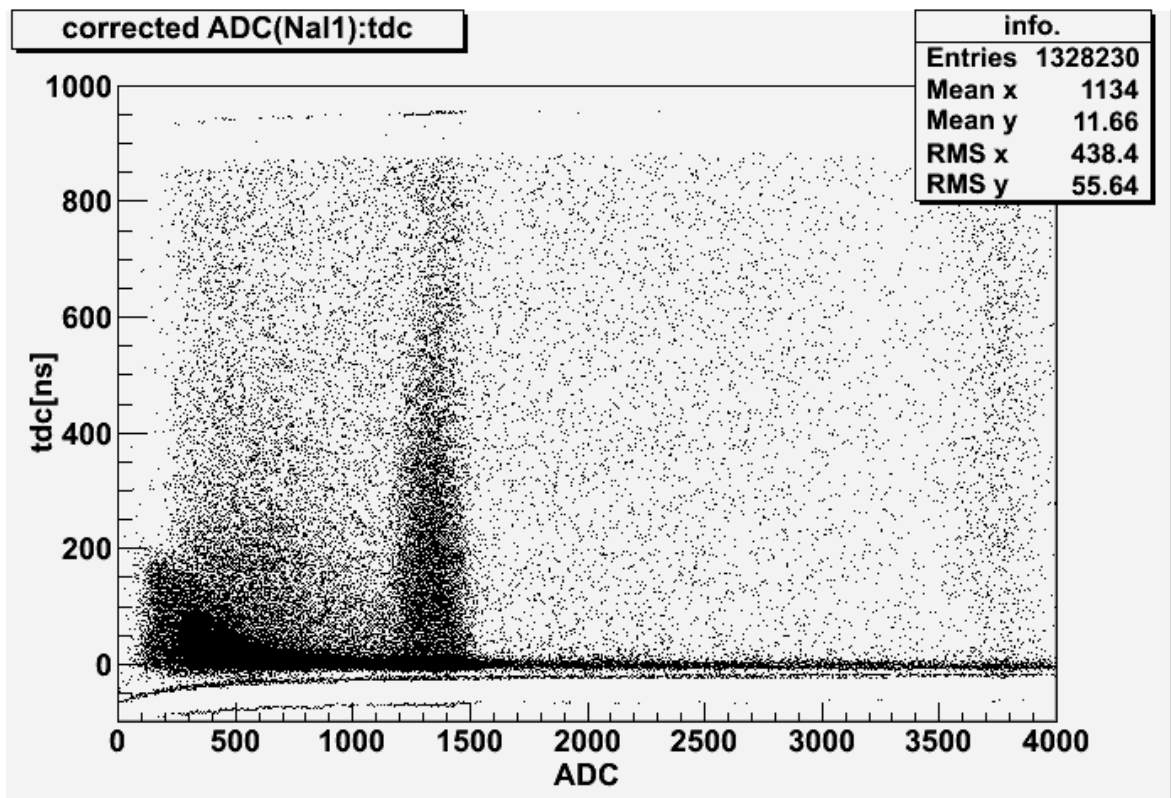


図 4.11 t-Q 補正後の ADC(NaI 1) : tdc [ns]

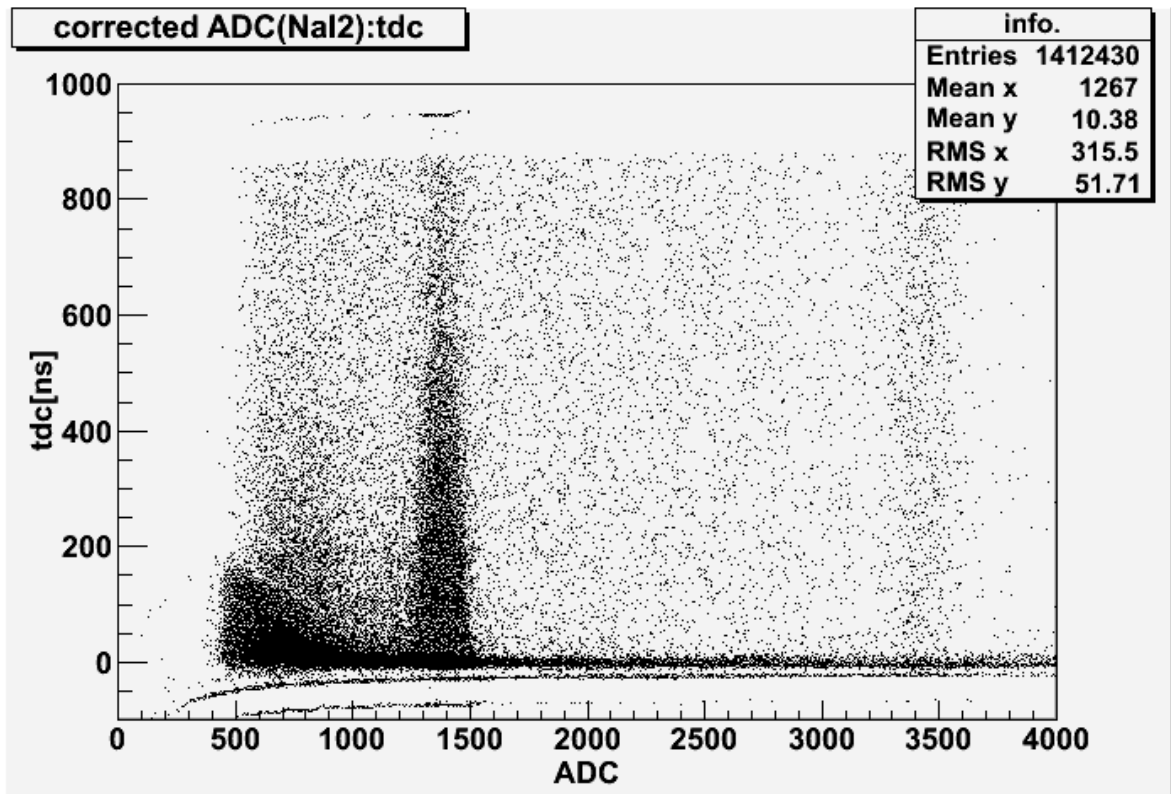


図 4.12 t-Q 補正後の ADC(NaI 2) : tdc [ns]

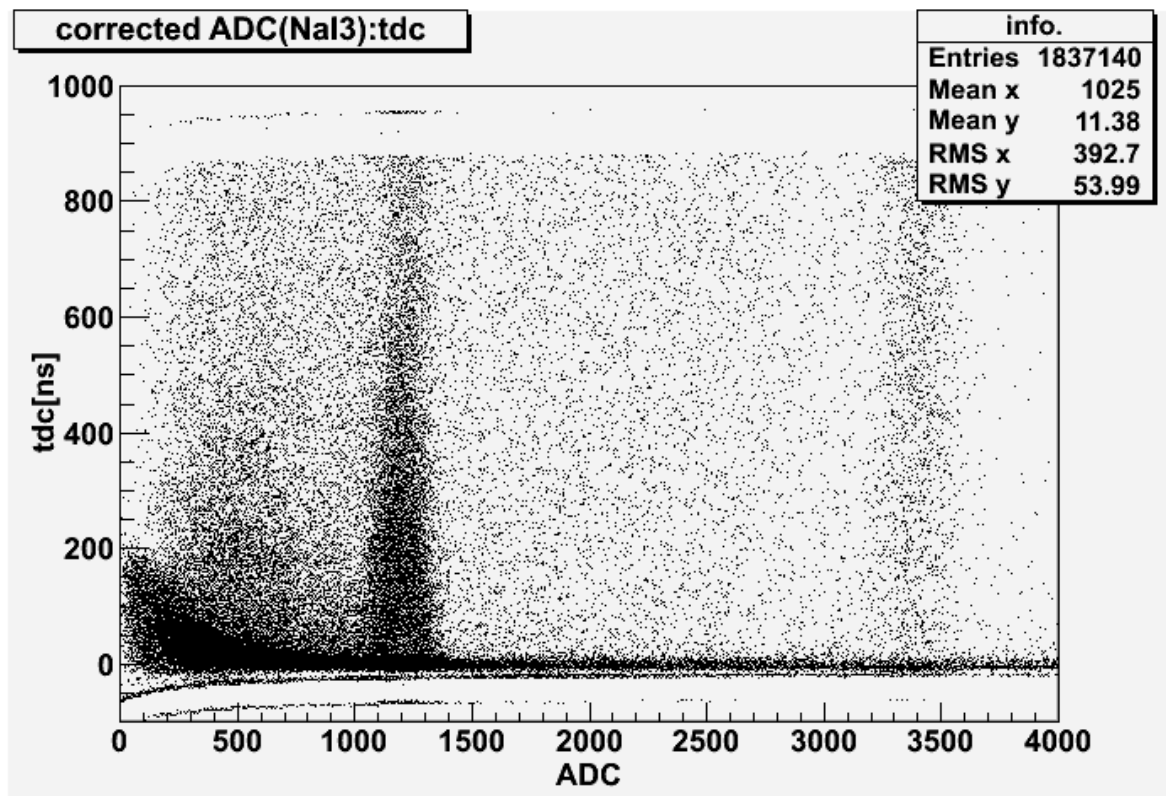


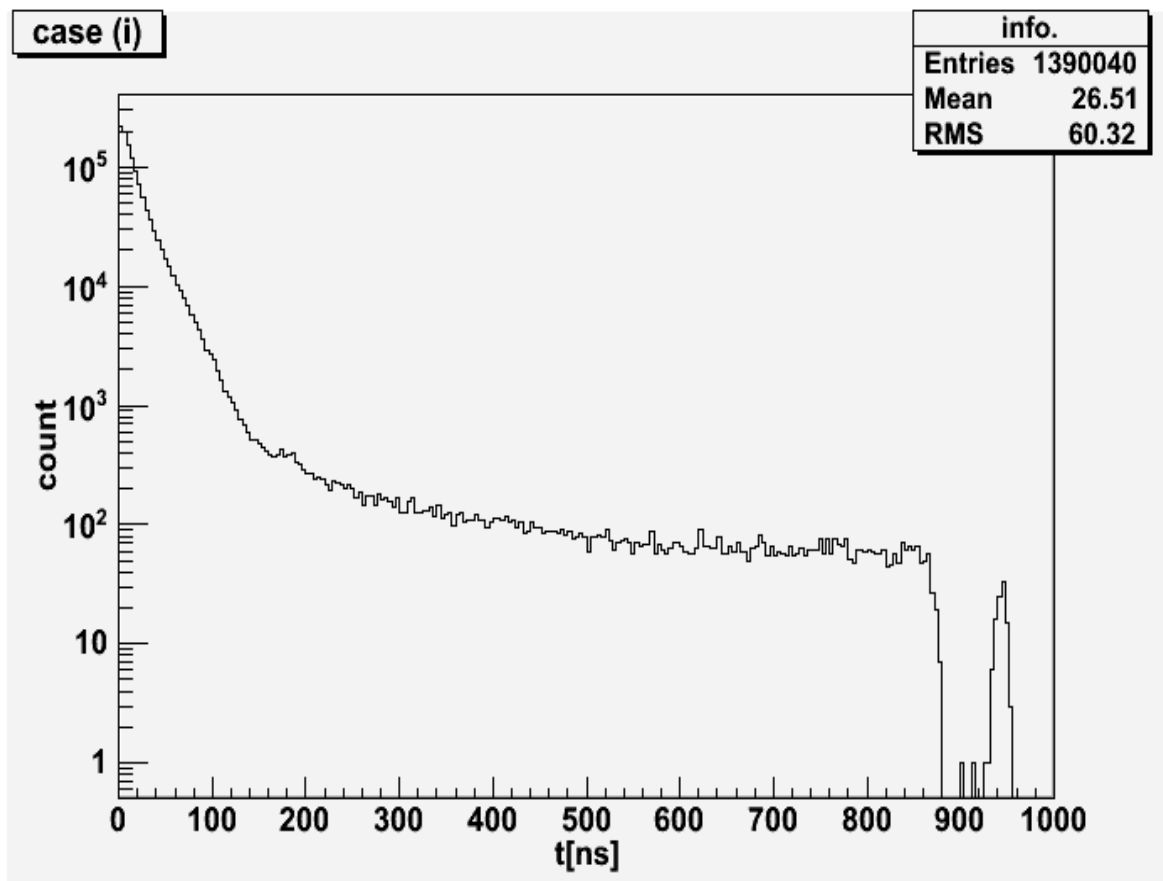
図 4.13 t-Q 補正後の ADC(NaI 3) : tdc [ns]

以上の補正を適用し寿命を求める。理論で述べたように  $3\gamma$  イベントと  $2\gamma$  イベントはそのエネルギー分布が異なる。したがって、寿命をより正確に求めるには適当なエネルギー領域を決定することが重要となる。本実験では以下の三通りのエネルギー領域に対して寿命を求めた。

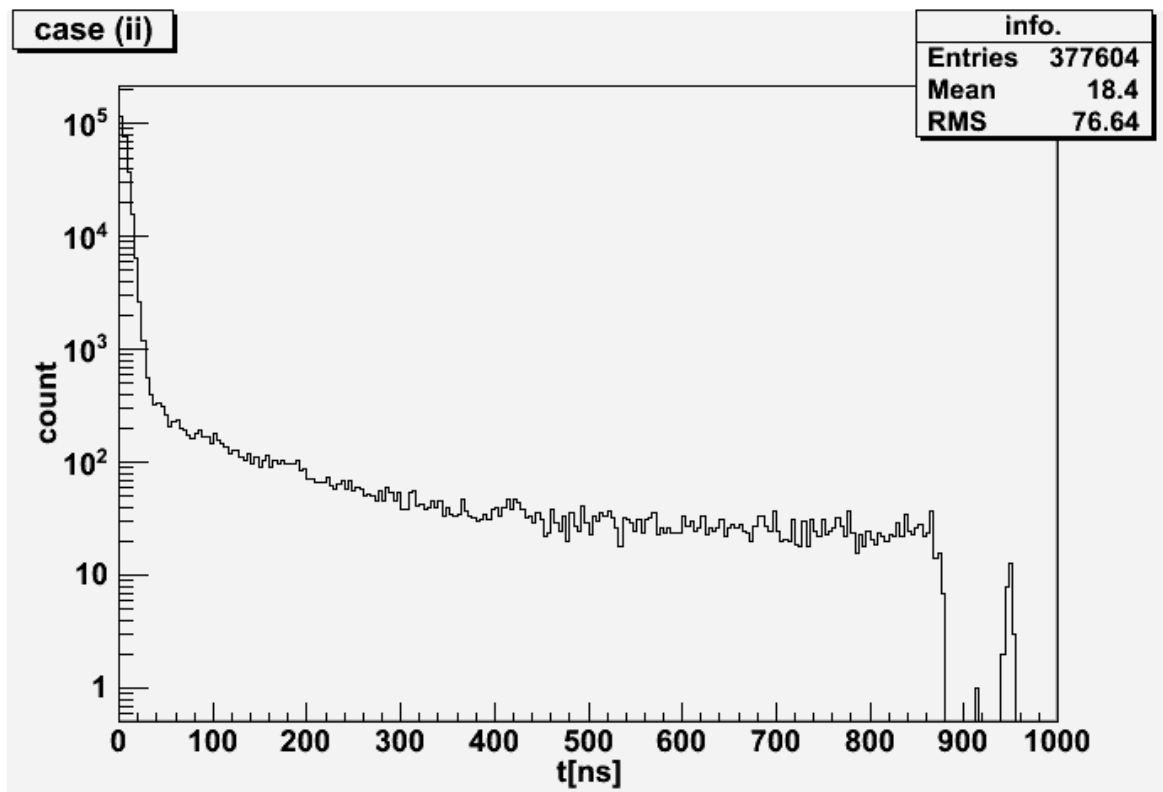
- (i) Discriminator の threshold level から 511[keV]主領域下端( $\mu-2\sigma$ )
- (ii) Compton edge (341[keV])から 511[keV]主領域下端( $\mu-2\sigma$ )
- (iii) 511[keV]主領域( $\mu\pm 2\sigma$ )

(i)では  $2\gamma$  の Compton 散乱と  $3\gamma$  のイベントが混在しているが、イベント数を確保することで  $2\gamma$  由来のイベントが統計的に無視できるようになることを期待した領域設定である。一方、(ii)は一般的な Compton 散乱のエネルギー分布から多重 Compton 散乱はほとんど存在しないことを理由に  $2\gamma$  由来のイベントを出来るだけ除去することを目的とした領域設定である。最後の(iii)には純粋な  $3\gamma$  イベントは  $2\gamma$  イベントに比べて割合が小さいと考えられるが、pick-off イベントにより  $2\gamma$  崩壊した o-Ps が含まれていることが予想され、この領域でも寿命が見えるのではないかと考えた設定になっている。

プラスチックシンチレーターが反応してから NaI が反応するまでの時刻 t[ns]のヒストグラムを各 NaI ごとに足し合わせたグラフは、(i),(ii),(iii)それぞれ図 4.14~4.16 のようになった。



⊗ 4.14 case (i)



⊗ 4.15 case (ii)

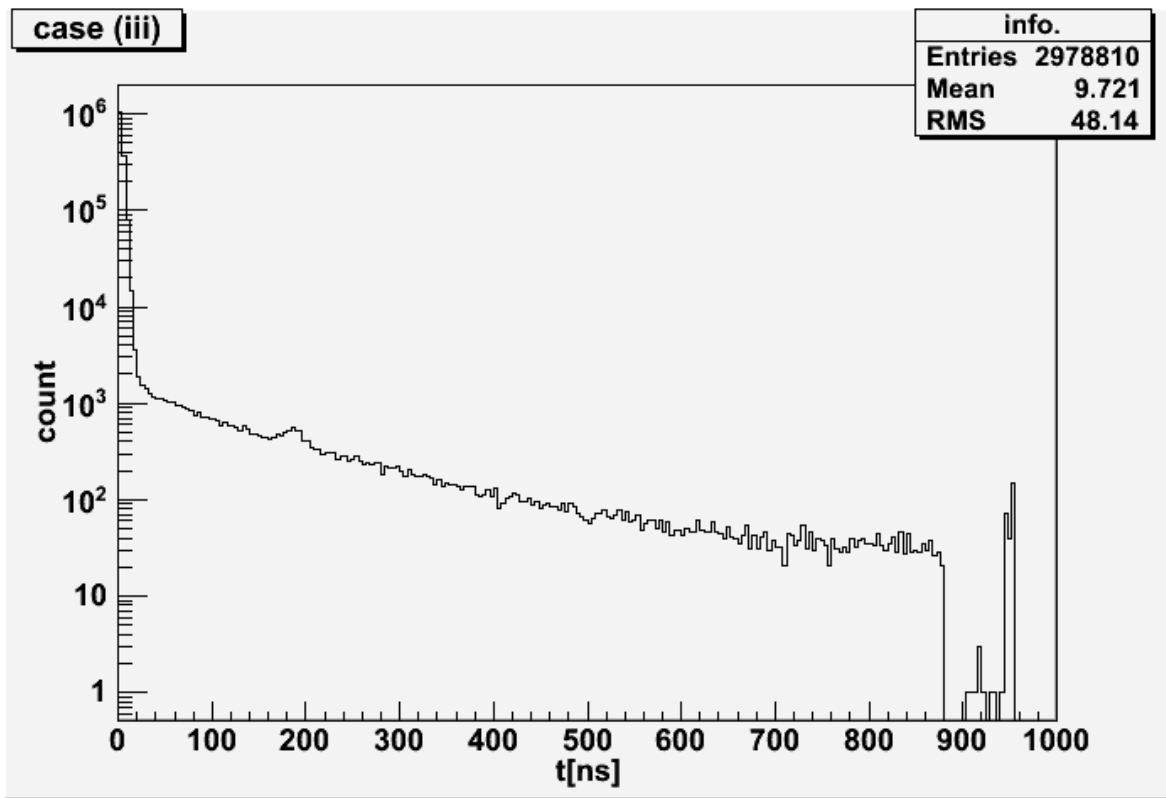


図 4.16 case(iii)

ここで fitting は、(2.5)式に background に対応する定数項を加えた次の式を用いる。

$$N'(t) = N'_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{total}}\right) + const. \quad (4.7)$$

fitting は領域を変えて複数回行った。その際、fitting 終了時刻は 860[ns]で固定し、fitting 開始時刻を 0[ns]から 396[ns]まで 4[ns]刻みで変化させた。

fitting 開始時刻に対する寿命  $\tau_{total}$  の誤差棒つきグラフは、それぞれ図 4.17~4.19 のようになった。なお、 $\tau_{3\gamma}$  の理論値である 142[ns]を赤い線で示してある。

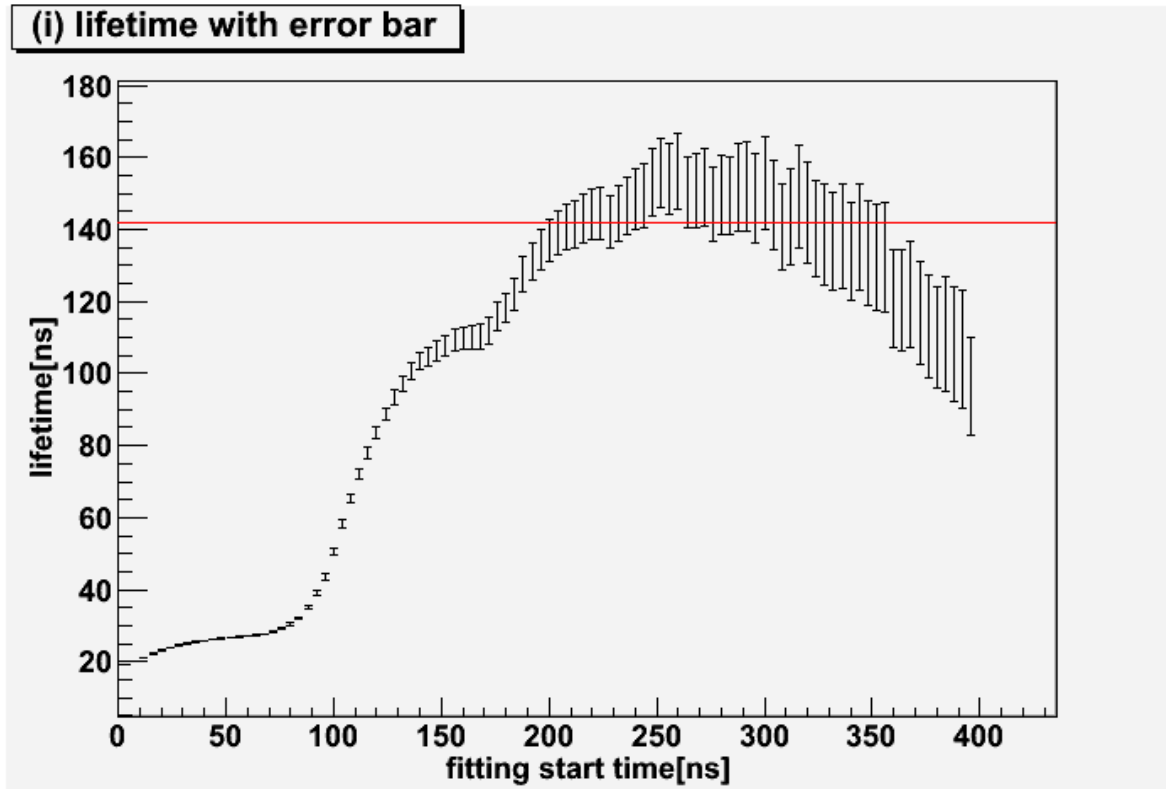


図 4.17 case(i)における開始時刻と寿命の関係

**(ii) lifetime with error bar**

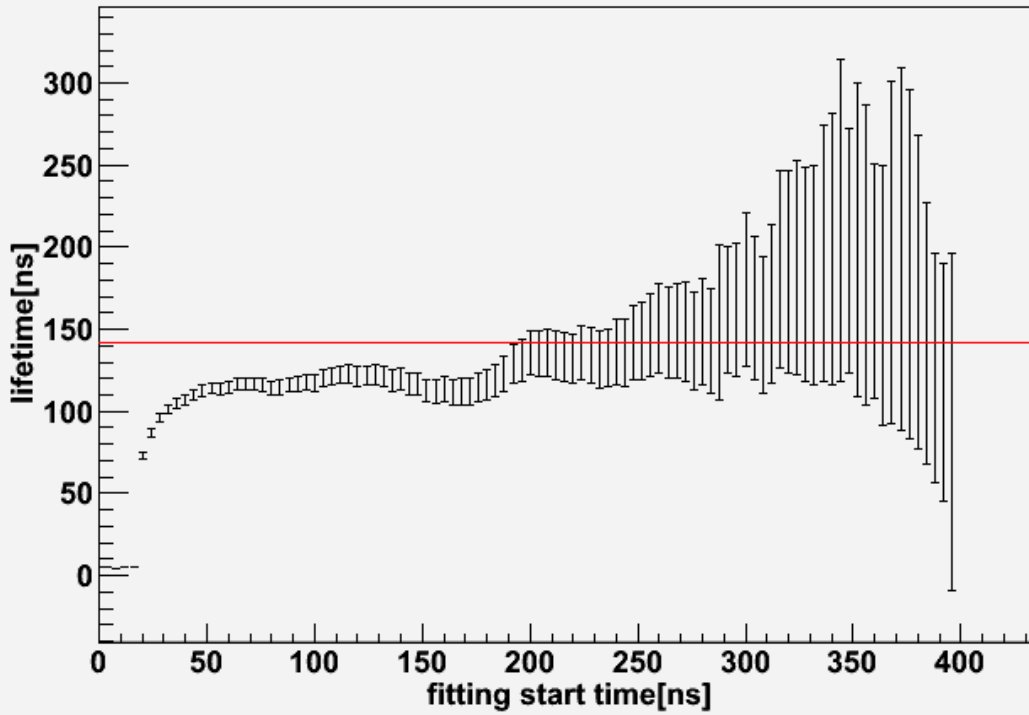


図 4.18 case(ii)における開始時刻と寿命の関係

**(iii) lifetime with error bar**

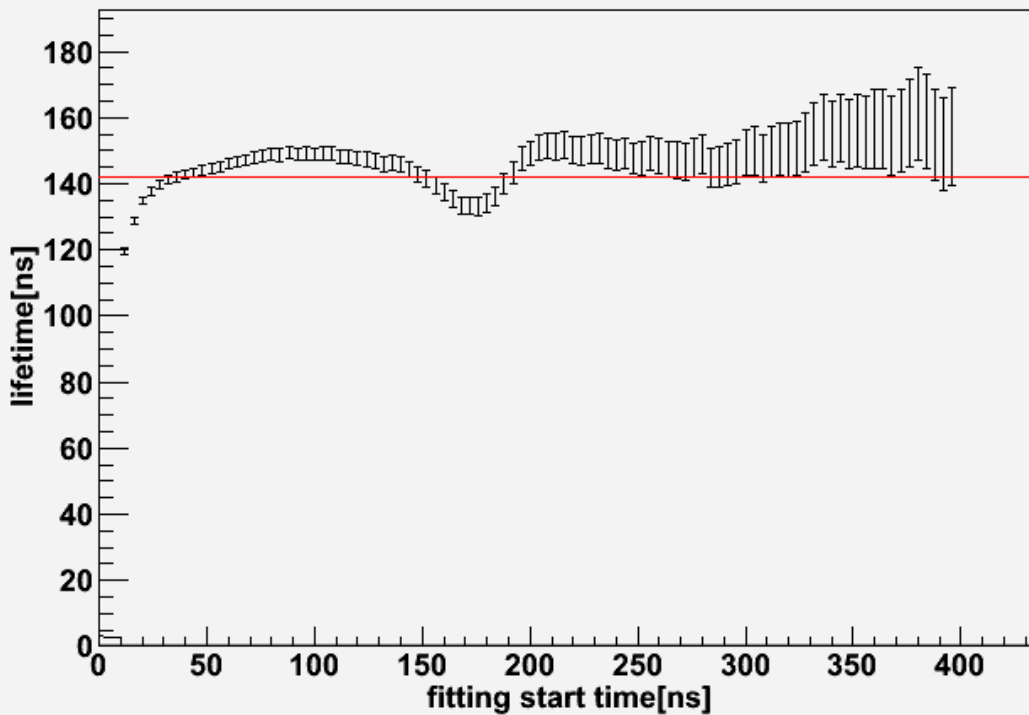


図 4.19 case(iii)における開始時刻と寿命の関係

## 5. 結果と考察

### 5.1 誤差の評価

511[keV]、1275[keV]に対する ADC の値とその fitting 誤差  $e_{511}$ 、 $e_{1275}$ 、ADC キャリブレーションの式(4.1)での  $b$  の値と誤差  $e_b$  は各 NaI で次のようになった。ただし、 $e_b$  は次のような誤差伝播式で求めた。

$$e_b = \frac{\sqrt{(511 \cdot e_{1275})^2 + (1275 \cdot e_{511})^2}}{1275 - 511} \quad (5.1)$$

	511[keV]	$e_{511}$	1275[keV]	$e_{1275}$	$b$	$e_b$
NaI1	1.3408E+03	8.5542E-02	3.7582E+03	3.7395E+00	2.7602E+02	2.5100E+00
NaI2	1.3770E+03	6.1797E-02	3.4181E+03	3.6512E+00	-1.1816E+01	2.4400E+00
NaI3	1.1931E+03	6.7336E-02	3.3759E+03	3.1613E+00	2.6681E+02	2.1200E+00

表 5.1 fitting データと誤差

TDC のキャリブレーションの式(4.2)の  $A, B$  の値とその誤差  $e_A$ 、 $e_B$  は次のようになった。

$A$	$e_A$	$B$	$e_B$
2.4924E-01	9.6383E-04	-1.4015E+01	1.7922E+00

表 5.2 キャリブレーション定数とその誤差

t-Q 補正の式(4.5)の  $c, d$  の値とその fitting による誤差  $e_c$ 、 $e_d$  は各 NaI で次のようになった。

	$c$	$e_c$	$d$	$e_d$
NaI1	1.4273E+04	1.3878E+02	9.4689E+02	8.5950E-02
NaI2	1.5266E+04	1.2110E+02	9.4474E+02	8.8796E-02
NaI3	1.2855E+04	1.1292E+02	9.4793E+02	7.7455E-02

表 5.3 t-Q 補正の定数とその誤差

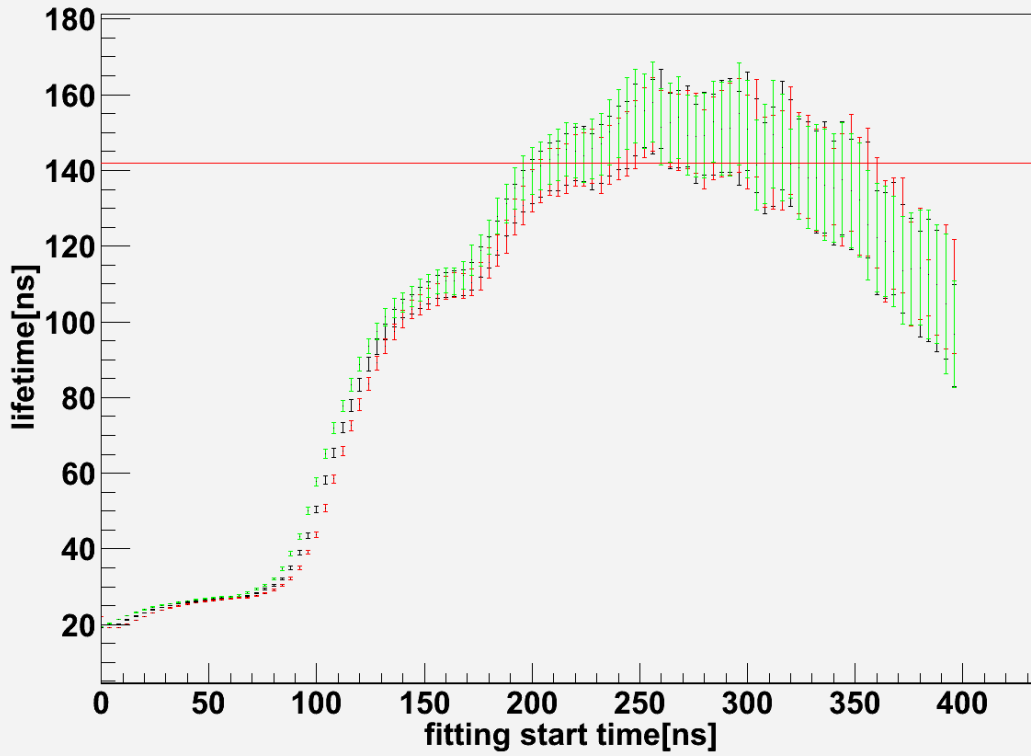
以上の誤差による時刻  $t$  への誤差  $e_t$  は、次の式で表される。

$$e_t^2 = e_d^2 + \frac{c^2 e_b^2}{(ADC + b)^4} + \frac{e_c}{(ADC + b)^2} + (TDC)^2 e_A^2 + e_B^2 \quad (5.2)$$

次に、 $t+e_t$ 、 $t-e_t$  に対し同様に寿命を求めた。

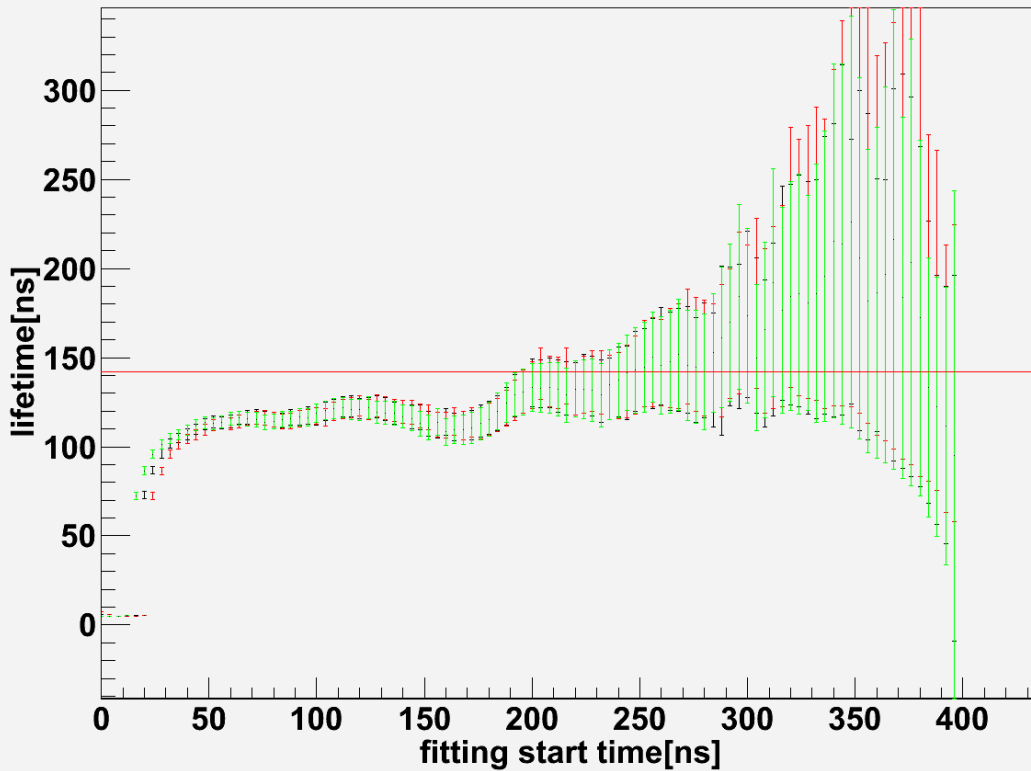
以下の3枚のグラフはその結果を重ねて表示したものである。黒がもとの結果、赤が  $e_t$  を加えた結果、緑が  $e_t$  を引いた結果である。

(i) error estimation



⊗ 5.1 case(i)

(ii) error estimation



⊗ 5.2 case(ii)



(iii) error estimation

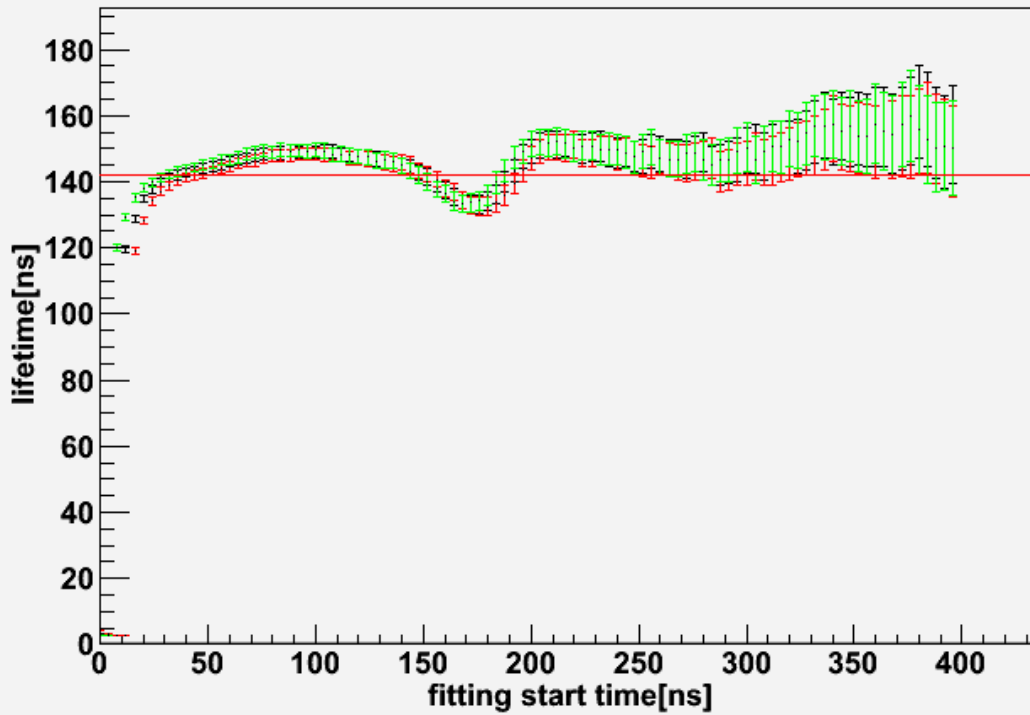


図 5.3 case(iii)

この図より誤差  $e_t$  による寿命への影響はほとんどないと思われる。したがって、求めた寿命の誤差は fitting による誤差が主であると考えられる。

## 5.2 結果の解釈

この誤差評価を踏まえて、結果の解釈を行う。

まず、(i)の場合であるが、統計数が多いため寿命に対する fitting 誤差は小さいが、Compton 散乱等の  $3\gamma$  以外のイベントが多く含まれているため、fitting 開始時刻が早いときでは寿命が小さく出ている。開始時刻が遅いときに、寿命が小さくなるのは、 $3\gamma$  イベントに対してバックグラウンドの割合が増えているため正しい結果が得られていないからであると考えられる。

次に、(ii)の場合は、Compton 散乱のイベントがほとんど含まれていないため、寿命は fitting 開始時刻に依らずほぼ一定となっているが、統計数が少ないため fitting 誤差が大きい。これらより、統計数を増やして、(ii)のエネルギーカットで fitting を行うと、よい結果が得られそうだと考える。

最後に、(iii)の場合、統計数も多く、寿命もほぼ一定であるので、このエネルギーカットでも o-Ps の寿命を得ることができそうである。

また、図 4.4 の TDC の生データにおいて TDC が 3100 あたりにコブのようなものがみられる。図 4.14~4.16 においても  $t$  が 180[ns] 付近にこのコブが見られる。このコブは、Discriminator で NaI 信号をデジタル化するとき threshold あたりでのアナログ信号の幅に対してデジタル信号の幅が短いため生じたダブルパルスによるものと考えた。Discriminator ではデジタル信号の幅をただか 10[ns]しか広げられないため、AND と TDC の start の間に新しく Gate generator を導入し信号の幅を広げてみた。オシロスコープで確認したところ、ダブルパルスはひとつの信号として見えていたので、ダブルパルスは除去できていたと考えられる。しかし、コブは存在していたため、ダブルパルスはコブの原因ではないと考えられる。次に、原因を TDC に関係するセッティングにあると考え、Gate1 の幅、Gate2 の delay と幅も変えて何回か測定を行ったが、100 万程度のイベントをとったものは、すべてコブが見えていた。結局、コブの原因はわからなかった。下図はその一例である。次の 2 図は 511[keV]主領域での TDC のヒストグラムである。ただし、図 5.4 は解析に用いたデータ(図 5.5)と異なり、測定したイベント数は約 90 万である。

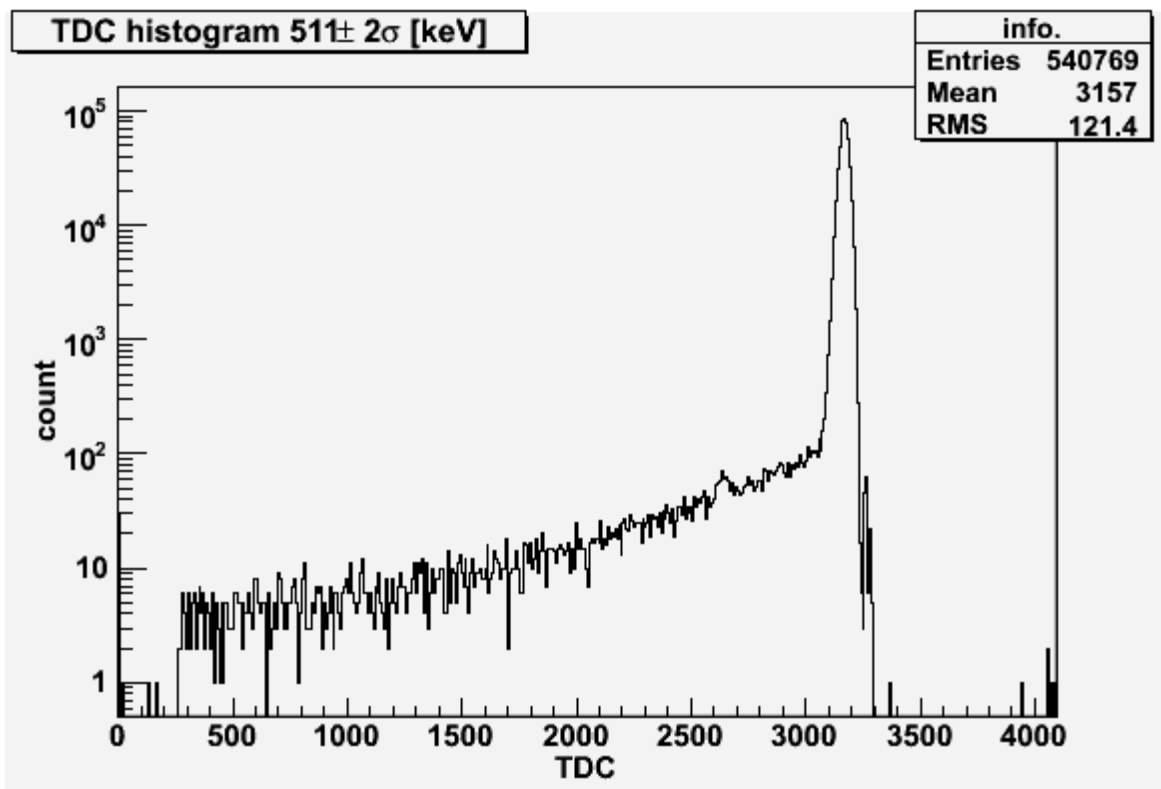


図 5.4 コブの一例(2010/3/10 測定分)

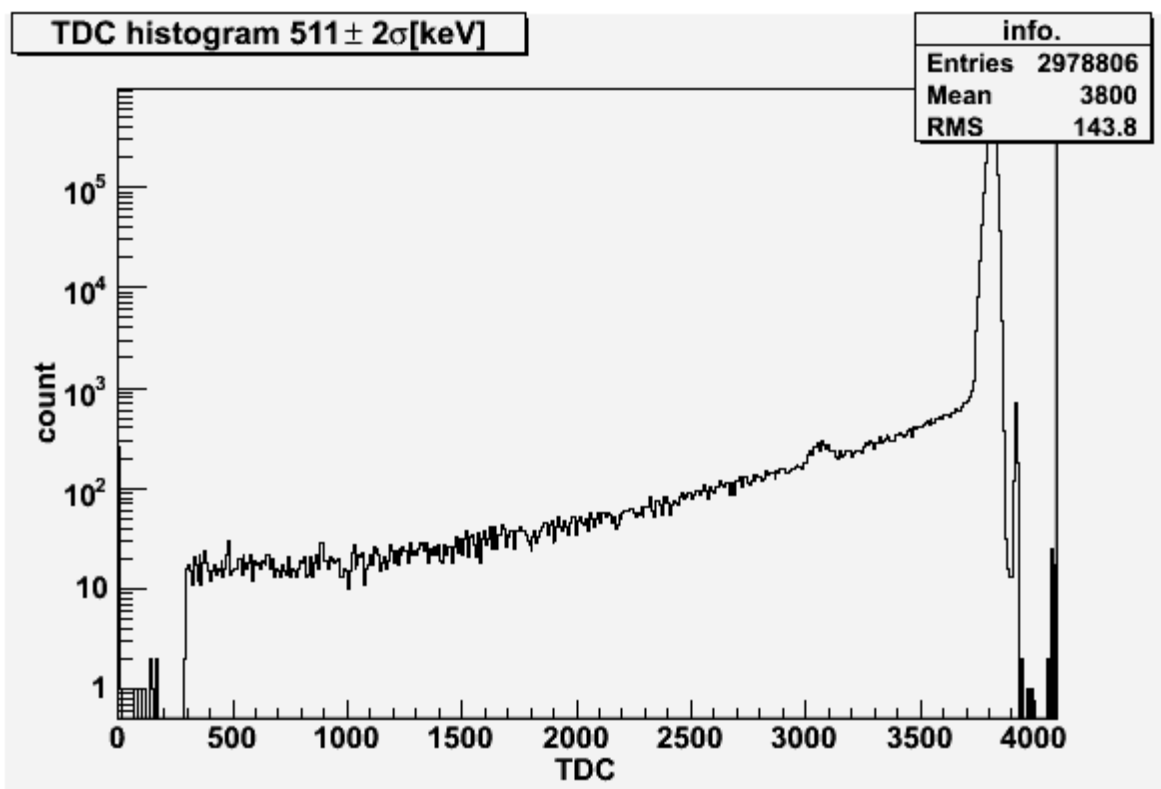


図 5.5 コブの一例(2010/3/12 測定分)

### 5.3 ADC キャリブレーションの検証

ADC キャリブレーションの妥当性を  $^{137}\text{Cs}$  の放出する 662[keV]の  $\gamma$  線を用いて検証した。このスペクトルに対する、ADC の値と ADC キャリブレーションの結果より求まる ADC の値の計算値は、各 NaI で以下の結果となったため、妥当であったと言える。

	ADC	計算値
NaI1	1800.19	1818.61
NaI2	1772.28	1780.43
NaI3	1601.72	1624.53

表 5.4  $^{137}\text{Cs}$  662[keV]線の測定結果との比較

また、ADC 較正值を用いて 1275[keV]の Compton edge(1062[keV])を計算すると、ADC count で NaI 1 は 3084[count]、NaI 2 は 2849[count]、NaI 3 は 2767[count]である。実際に図 4.1~図 4.3 を見ると、上記の値の周辺で傾きが変わっている様子が確認できる。

### 5.4 改善点

今回の実験を踏まえて、よりよい測定を行うために以下のような工夫を行うとよい。

#### ・プラスチックシンチレーターの遮光について

光電子増倍管は微弱な光でも反応してしまうため、遮光する必要がある。十分に遮光するため実験の初期ではプラスチックシンチレーターにも遮光テープを巻いていた。しかし、陽電子は飛程が短いため、遮光テープで対消滅を起こしてしまい、シリカパウダーまで到達するものが少なかったと考えられる。実験の初期での NaI 1 と NaI 2 の ADC 相関図を図 5.6 に示す。各軸の 1500 弱に密集している点が 511[keV]の  $\gamma$  線に相当する。

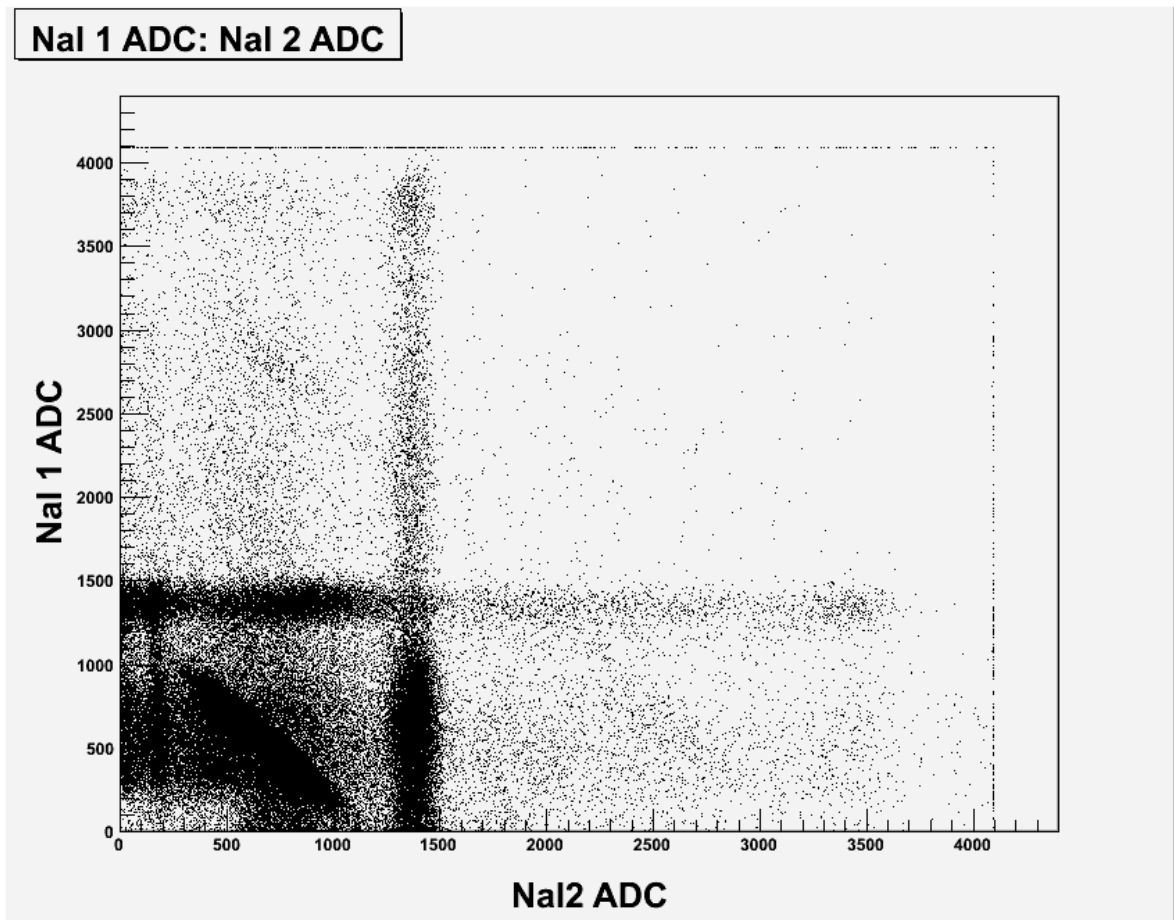


図 5.6 ADC 相関図(2010/2/26 測定分)

シリカパウダーに対する NaI 1 と NaI 2 の配置の対称性から、陽電子がシリカパウダー内で対消滅し発生した  $2\gamma$  が 2 つの NaI で反応しているイベントが見られるはずである。しかし、この図を見るとわかるように、そのようなイベントがほとんどみられない。

そこで、プラスチックシンチレーターの遮光テープをはがし、箱と遮光シートで遮光を行うことにした。解析に用いたデータでの NaI 1 と NaI 2 の ADC 相関図を図 5.7 に示す。

## NaI 1 ADC : NaI 2 ADC

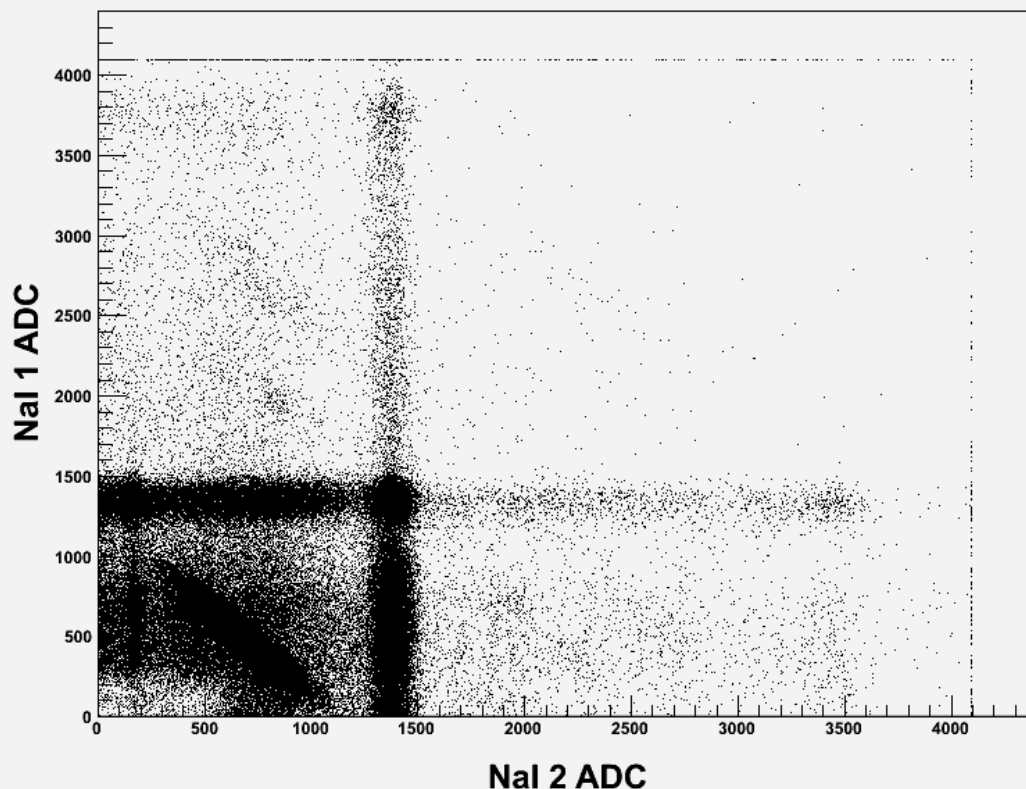


図 5.7 ADC 相関図(2010/3/12 測定分)

この図では2つの NaI が同時に 511[keV]の  $\gamma$  線を検出したイベントがみられるので、陽電子がシリカパウダーまで到達していると言える。

### ・配置について

陽電子の飛程は短いので、シリカパウダー容器内の前方でほとんど止まってしまっていると思われる。実際、NaI 1 と NaI 2 の先頭よりもシリカパウダー容器の先頭が少し前に来るように設置すると2つの NaI が同一の  $2\gamma$  イベントを検出する割合は落ちた。一方、NaI 1 はできるだけ鉛板に近づけ、シリカパウダー容器は NaI 2 の先頭より前方にならない位置に設置するとその割合は上昇した。これはシリカパウダー前方を点として考えた場合の立体角中で点対称の位置に NaI シンチレーターが存在する領域が前者は後者より減少していることに起因すると思われる。仮に全体で一様に Ps を形成しているなら、上のような変化は観測されなかったと考えられる。

### ・統計数について

500 万イベントしかとらない場合、結果の解釈でも述べたように、case(ii)のようなエネルギーカットでは統計数が少なく、fitting 誤差が大きい。そのため、総イベント数を増やしたほうが良い。

### ・気圧について

完全な真空状態を実現することはできないので、シリカパウダー容器内の気圧を変化させ、各気圧に対し寿命を求め、それを外挿することで真空での寿命を推定するのがよいと思われる。

### ・t-Q 補正について

信号を三角形近似することで t-Q 補正を行ったが、さらに細かい近似をすると精度がよくなる可能性がある。

#### ・700[keV]周辺の山を形成する現象について

ADCヒストグラム(図 4.1～図 4.3)において、511[keV]のすぐ右側にもう一つピークが立っている。 $^{22}\text{Na}$ の放射する粒子の中で、この ADC count に対応するエネルギーを持つようなものは存在しない。このエネルギー領域に含まれている現象の一つとして、ADC のゲートが開かれている間に複数のイベントが生じ、ADC count としてその合計値が返された場合が考えられるが、二つのイベントが同時に起こる確率は非常に低い。データの測定速度は約 1000[count/min]であったので、検出器一個当たり約 300[count/min]である。従って、ADC のゲート(1000[ns])が開かれている間にもう一度イベントが生じる確率は約  $5 \times 10^{-6}$  である。また、ひとつの検出器につき約 150 万イベントが記録されていたから、同時イベントは多くても全体で 10 イベント弱しか起きないはずである。しかし、実際にはピークの高さだけで 100 イベントに達するため、同時イベントが原因とするには割合が大きい。

NaI シンチレーターで 1275[keV]の  $\gamma$  線を観測する場合、Compton 散乱の割合は光電吸収の割合の約 10 倍なので、1275[keV]のイベント数から考えると Compton 散乱は全部で 100000 イベント程度となる。1062[keV]周辺の Compton edge のイベント数を読むと約 100 である。Compton 散乱はエネルギーに対し緩やかに減少するから、全エネルギー帯に 100 イベント程の Compton 散乱が含まれていると考えられる。今、bin 幅は 4 に設定してあるので、階級は全部で約 1000 であり、これらすべてに 100 イベントずつ含まれているなら、概算された Compton 散乱のイベント総数と同じオーダーになる。そこで、Compton 散乱が全体に 100 イベントずつ存在するとし、問題としている山からこれを差し引いて考えると、純粋に山型を形成しているイベント数は約 1000 と見積もることができる。

また、NaI に 1275[keV]の  $\gamma$  線が入射した時、電子対生成を起こす確率は光電吸収する場合の約 10 分の 1 であり、1275[keV]のイベント数は約 10000 であるから、この山のイベント数と電子対生成のイベント数のオーダーは等しいと考えられる。1275[keV]のシングルエスケープピークは 754[keV]であるから、電子対生成がすべてシングルエスケープピークを形成するならば、そのイベント数とエネルギー両方がデータと近い値を取ることになる。しかし、電子対生成がすべてシングルエスケープピークを形成するとは考えにくいので、上記同様イベント数が多いことが問題となる。

## 6. 参考文献

- [1] グレン・F・ノル著, 木村逸郎訳「放射線計測ハンドブック」, 日刊工業新聞社
- [2] 「束縛系 QED における高次補正検証実験」  
陣内修, 浅井祥仁, 小林富雄, 高エネルギーニュース(2000 年)
- [3] 「オルソポジトロニウムの寿命問題」  
浅井祥仁, 折戸周治, 日本物理学会誌 49 (1994 年)