

2023年度後期 課題演習A2

オルソポジトロニウムの寿命測定

小野 友暉 田中 智也 本間 峻太郎 前川 幹渡 山田 雄風 渡邊 純音

目次

- 1.概要と理論
- 2.実験方法
- 3.実験結果と解析
- 4.考察
- 5.結論

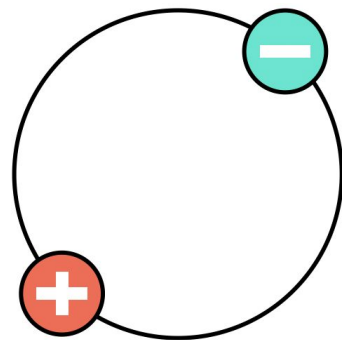
1.概要と理論

概要

ポジトロニウム: 電子と陽電子が電氣的に束縛された状態。

対消滅によってガンマ線を放出する。

オルソポジトロニウムとパラポジトロニウムの二種類



オルソポジトロニウムの寿命を測定し、QEDの結果との一致性を確かめる。

理論

・パラポジトロニウム (p-Ps)

...合成スピン0のシングレット状態。

荷電共役変換で符号反転しない

$$C |p - Ps\rangle = |p - Ps\rangle$$

・オルソポジトロニウム (o-Ps)

...合成スピン1のトリプレット状態。

荷電共役変換で符号反転する

$$C |o - Ps\rangle = -|o - Ps\rangle$$

$$C |n\gamma\rangle = (-1)^n |n\gamma\rangle \quad \text{より}$$



偶数個の光子に崩壊！

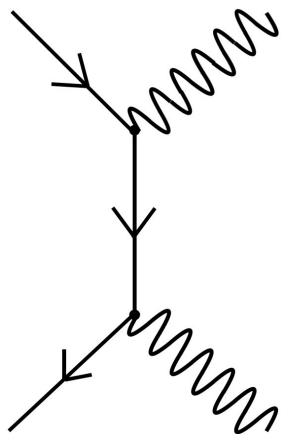


奇数個の光子に崩壊！

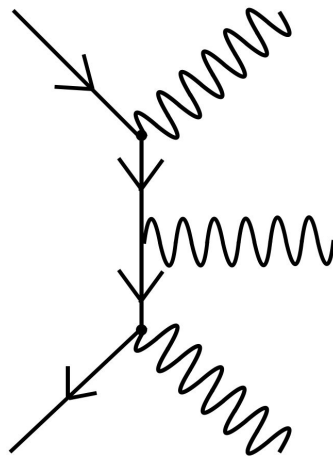
理論

エネルギー・運動量保存から、 1γ へ崩壊することはない。

高次の摂動の寄与は小さいため考慮しない。



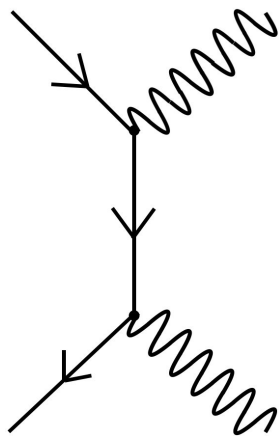
p -Psは 2γ への崩壊



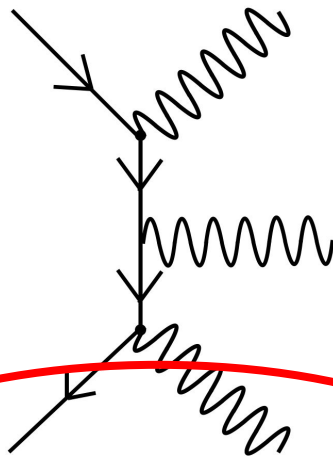
o -Psは 3γ への崩壊

理論

ファインマンダイアグラムを用いた摂動計算より



p-Psの寿命: 約 0.125 ns



o-Psの寿命: 約 142 ns

2.実験方法

実験原理

ナトリウムのベータ崩壊による陽電子の放出 $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + e^+ + \nu_e$

↓ ←プラスチックシンチレータで陽電子を検出

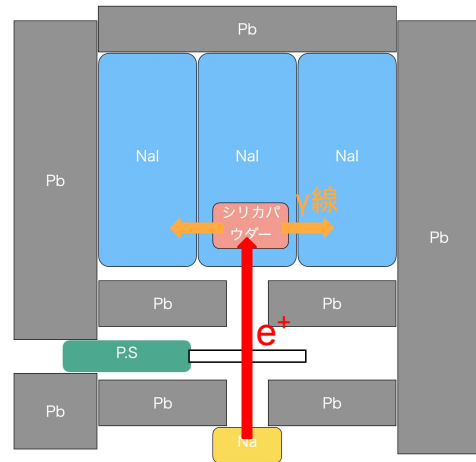
陽電子がシリカパウダー(SiO_2)中の電子と結合しポジトロニウムが生成。



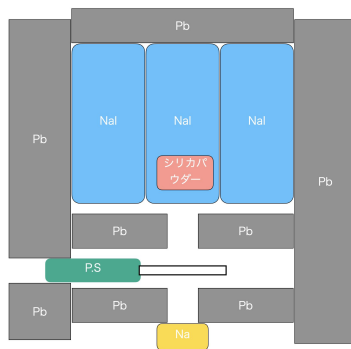
ポジトロニウムが対消滅を起こし、ガンマ線を放出する。

↓ ←NaIシンチレータでガンマ線を検出

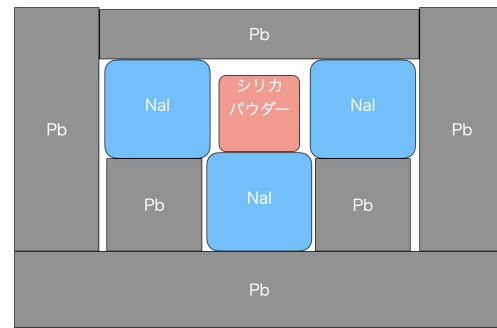
繰り返す



実験装置とセットアップ



上から見たセットアップ

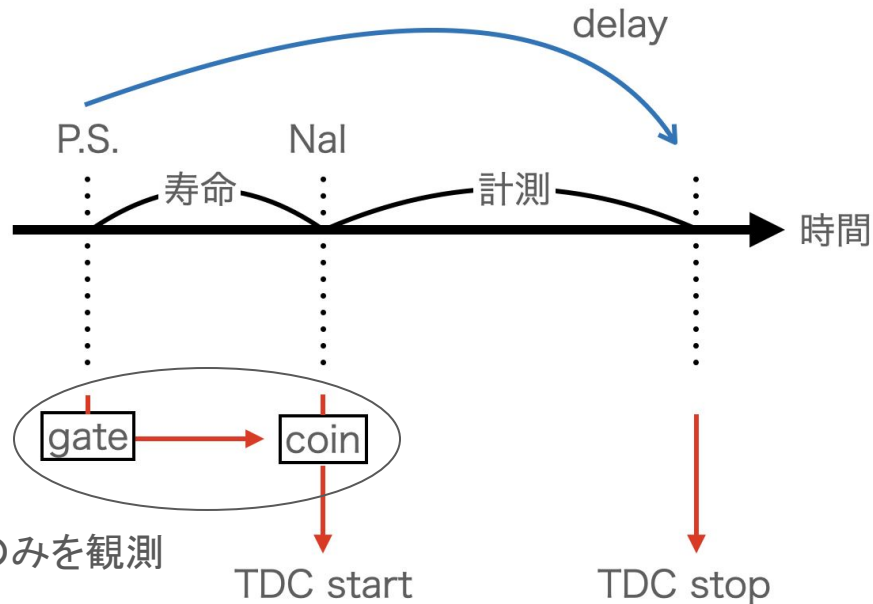


横から見たセットアップ

回路図・時間

o- P_s の寿命

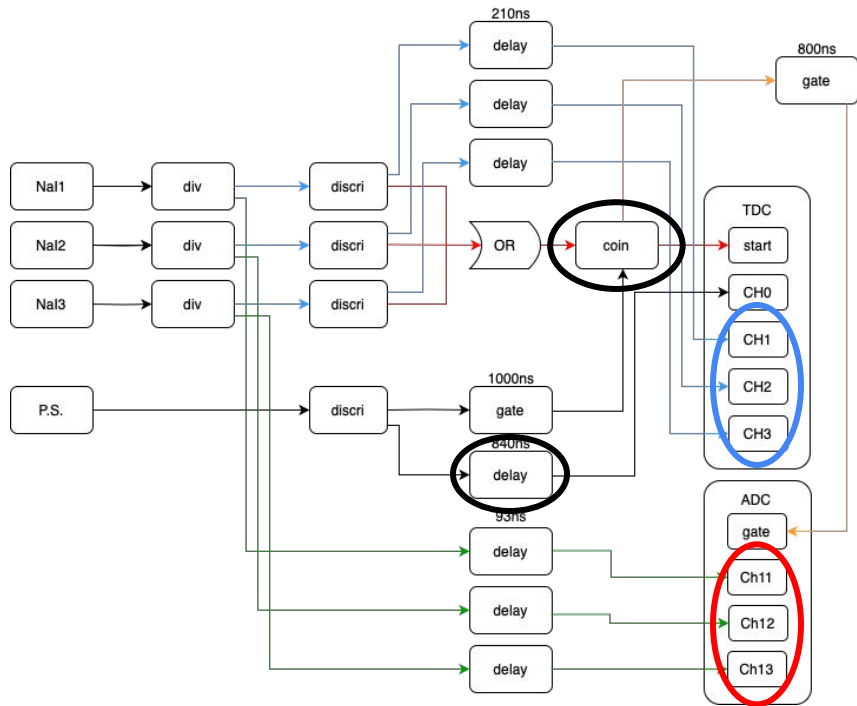
$$= \underline{(\text{delay})} - \underline{(\text{計測時間})}$$



Ps崩壊に起因するガンマ線のみを観測

時間のチャート

回路図・時間



回路図

TDC: 時間計測

ADC: gate内の信号積分値を計測

γ線エネルギー計測のため

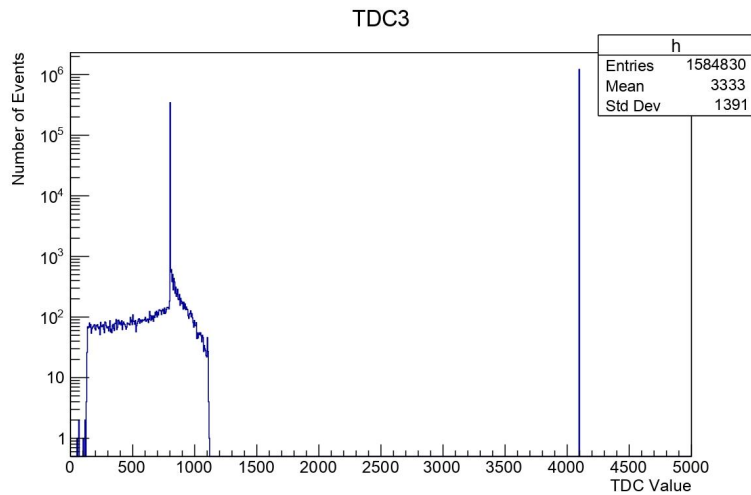
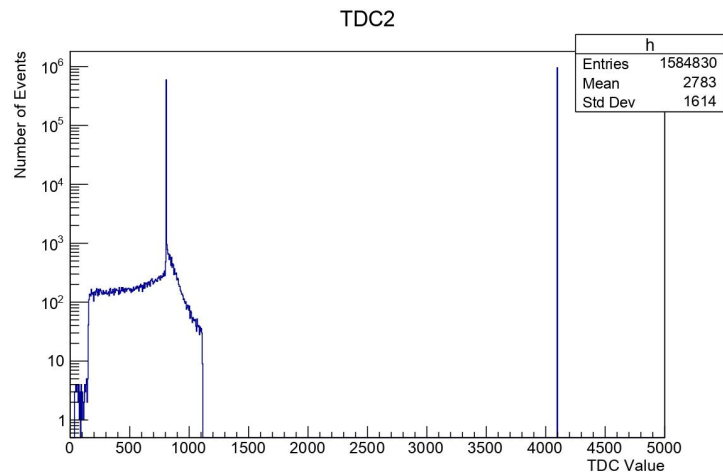
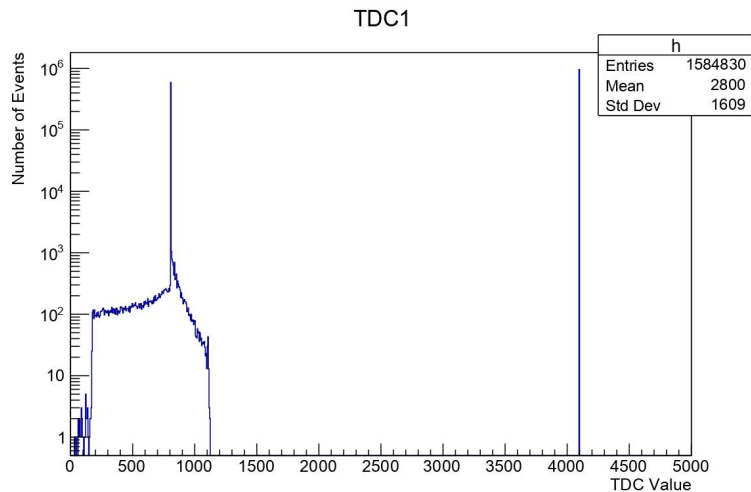
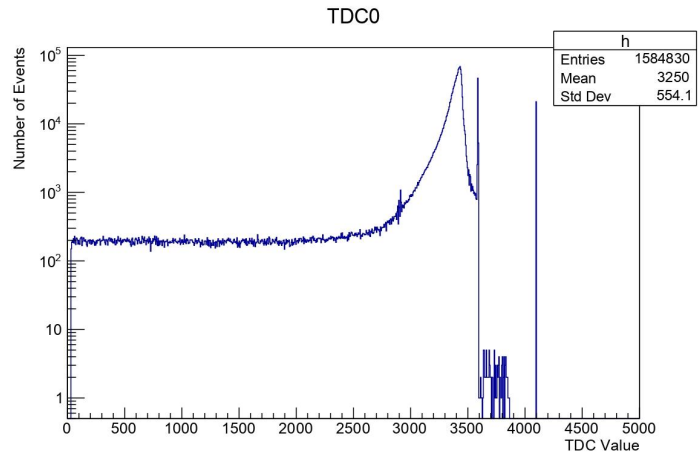
ADC1 ADC2 ADC3 TDC0 TDC1 TDC2 TDC3

609	179	186	3392	808	4095	4095
612	186	193	3354	808	4095	4095
213	1643	181	3447	4095	806	4095
212	819	358	3392	4095	807	4095
636	180	186	3386	808	4095	4095
211	1705	188	3445	4095	807	4095
211	176	892	1393	4095	4095	801
663	170	181	3586	792	4095	4095
470	180	188	3267	807	4095	4095

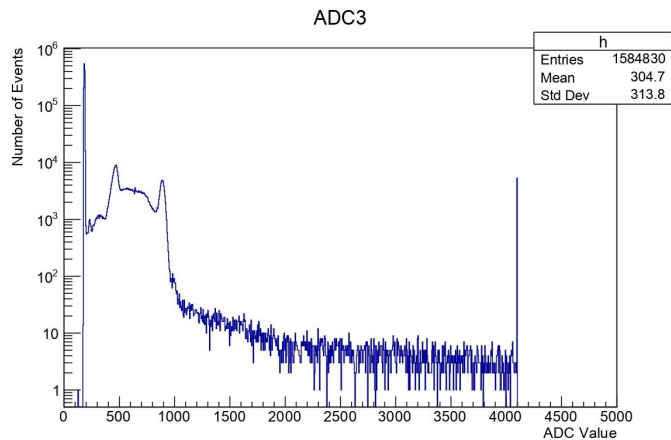
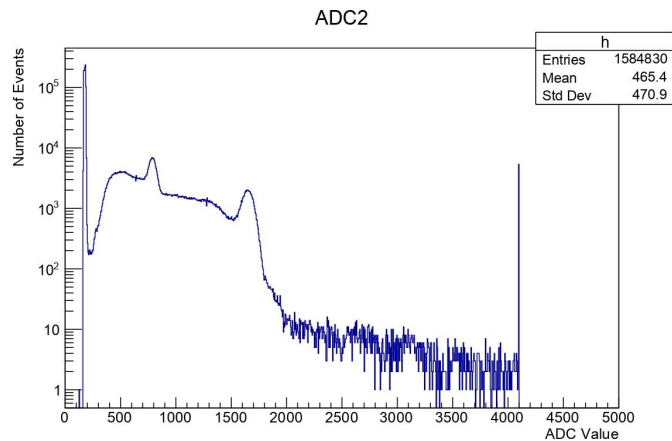
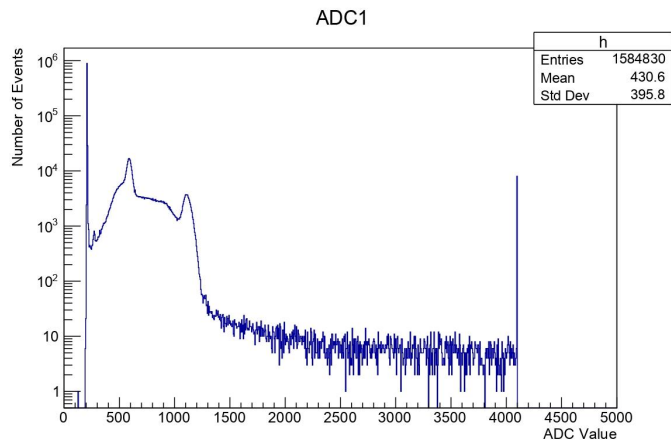
実際のデータ

3.実験結果と解析

生データ① TDC



生データ② ADC

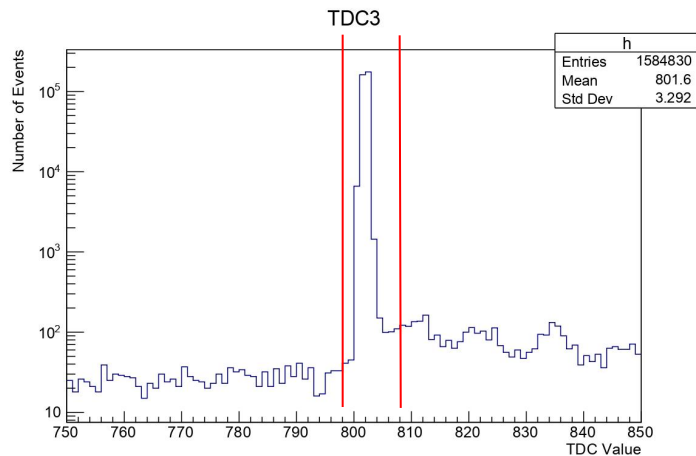
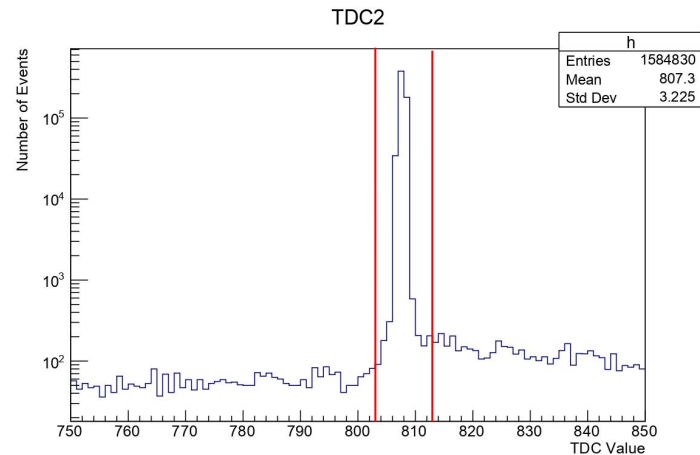
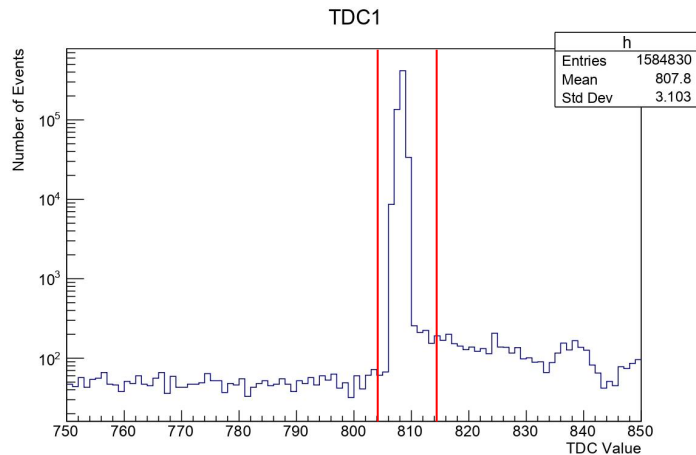


0keV—ペDESTAL

511keV—Ps崩壊時の γ 線

1275keV— ^{22}Na からの γ 線

データの抽出 (TDC cut条件)



NaI	TDC count
NaI1	804 ~ 814
NaI2	803 ~ 813
NaI3	798 ~ 808

Psの崩壊に関する
信号は、TDCに一定
の値を返す

TDC較正①

TDCが返す0~4095の整数値を実際の時間に変換した。

方法

二つ同時に発生するNIM信号の片方をTDCのstartに、もう片方をdelayをかけてTDCのstopにいれた。

今回は、37,48,68,105,126nsのdelayをかけてTDCを計測。(delayの時間はオシロスコープで計測)

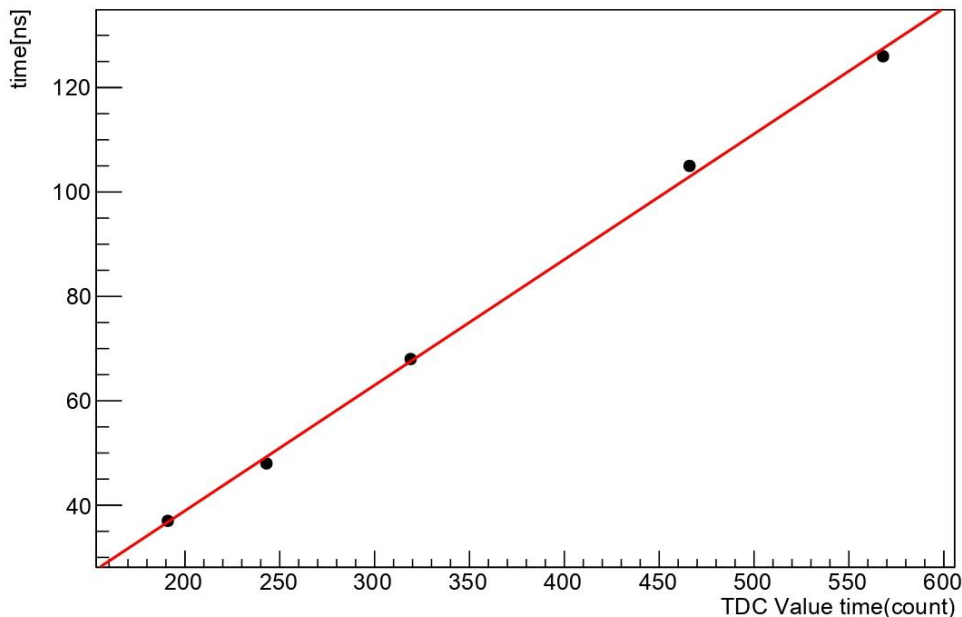
TimeをTDCの一次関数と仮定。一次関数fittingにより下式の p_0, p_1 を決定。

$$\text{Time} = p_1 \times (\text{TDC0 count}) + p_0$$

TDC較正②

TDC

$$\text{Time} = p_1 \times (\text{TDC0 count}) + p_0$$



p_0	p_1
-9.15 ± 1.97	0.241 ± 0.005

p_0 はTQ補正で補正されるため、今回は使用しない。

実験では崩壊時がstartになっているため、傾きに-1をかける。

以降

$$\text{Time} = -p_1 \times (\text{TDC0 count})$$

ADC校正①

ADCが返す0~4095の整数値を実際のエネルギーに変換した。

方法

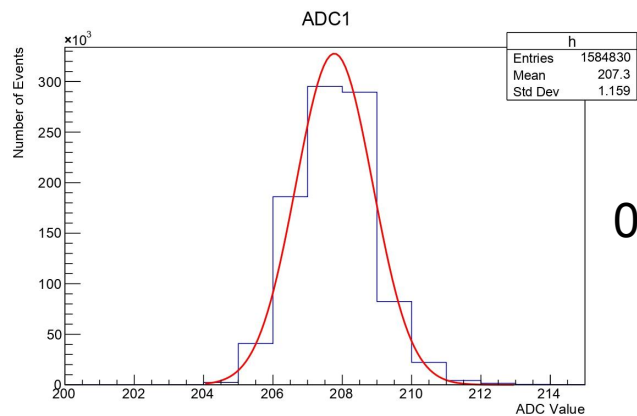
本実験のADCの生データに0, 511, 1275keVに対応するピークが存在(ペDESTAL、Ps崩壊の γ 線、 ^{22}Na の γ 線)

↑gauss fittingを行い、meanをそのエネルギーに対するADCの代表値とする。

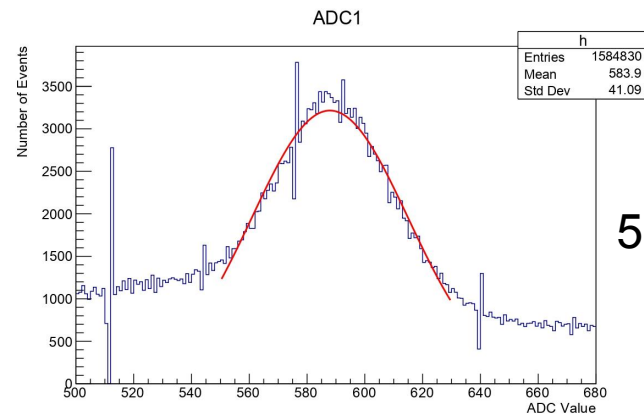
EnergyをADCの一次関数と仮定。一次関数fittingにより下式の p_0, p_1 を決定。

$$\text{Energy} = p_1 \times (\text{ADC count}) + p_0$$

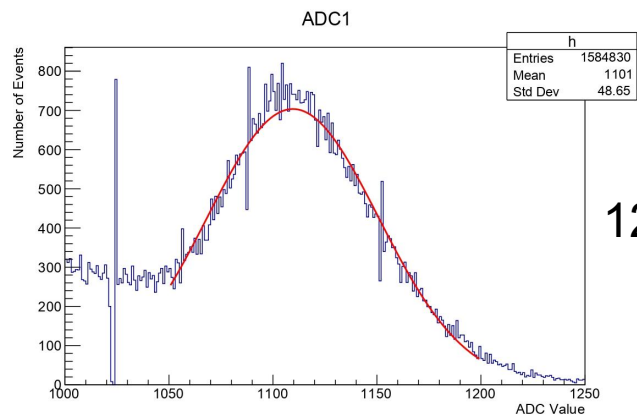
ADC校正② gaussfitting



0keV相当



511keV相当

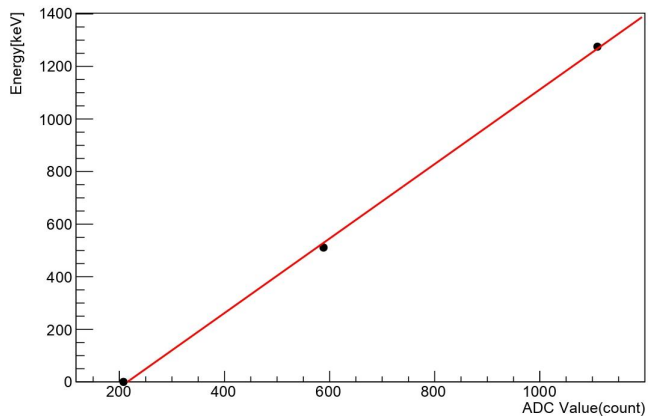


1275keV相当

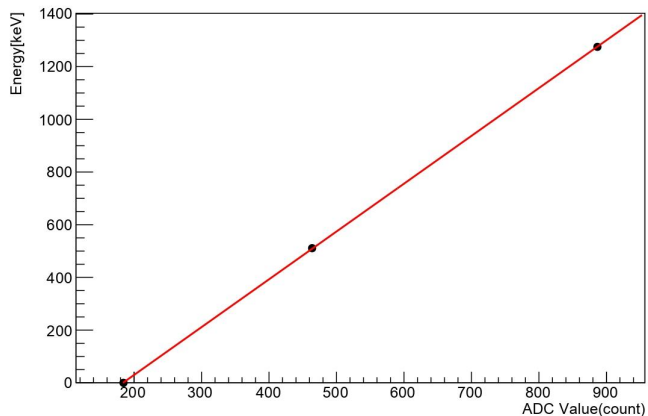
ADC2,3に対しても行った

ADC校正③

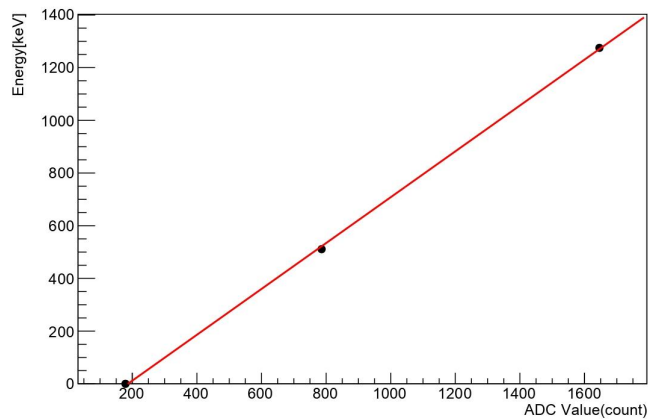
ADC1 calibration



ADC3 calibration



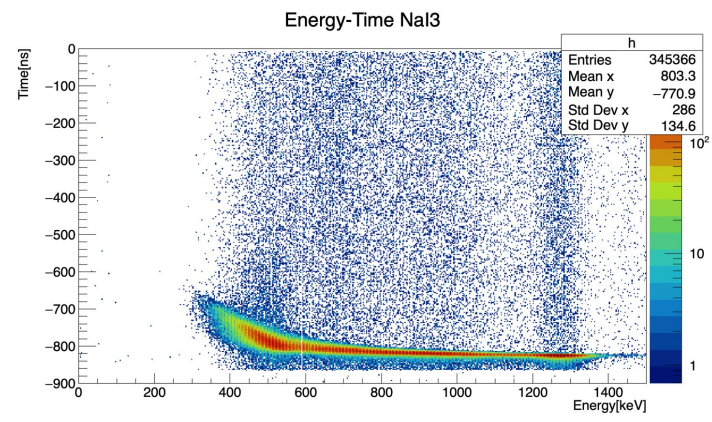
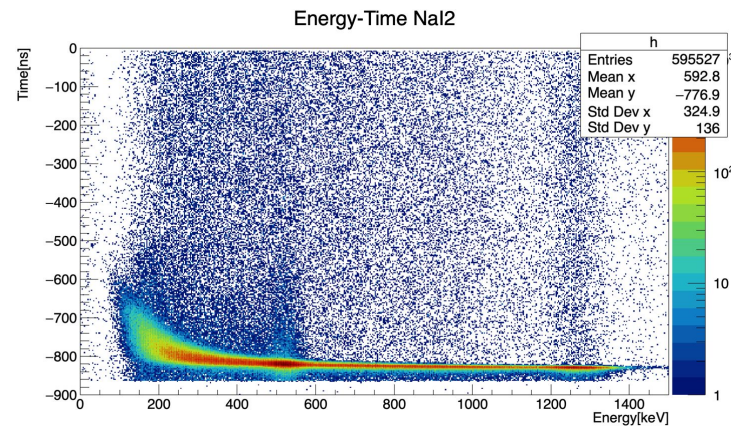
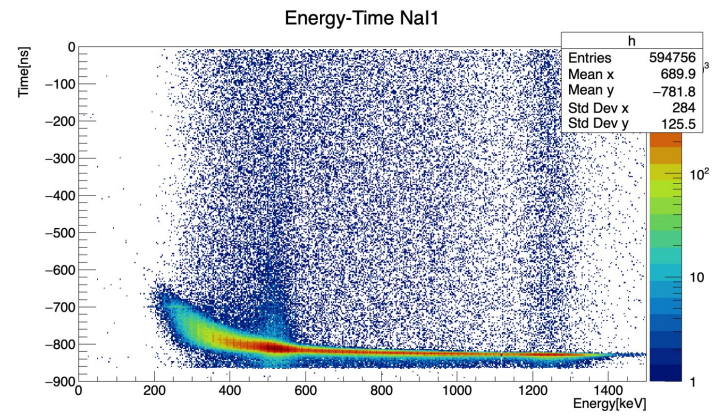
ADC2 calibration



ADC	p_0	p_1
ADC1	-298 ± 24	1.39 ± 0.03
ADC2	-162 ± 15	0.864 ± 0.014
ADC3	-333 ± 3	1.81 ± 0.05

$$\text{Energy} = p_1 \times (\text{ADC count}) + p_0$$

Time-Energy分布



p-Ps崩壊の γ 線、p-Ps崩壊の γ 線の
Compton散乱、 ^{22}Na の γ 線

同時に起こるはずだが、**低エネルギーになる
ほど遅れて観測**

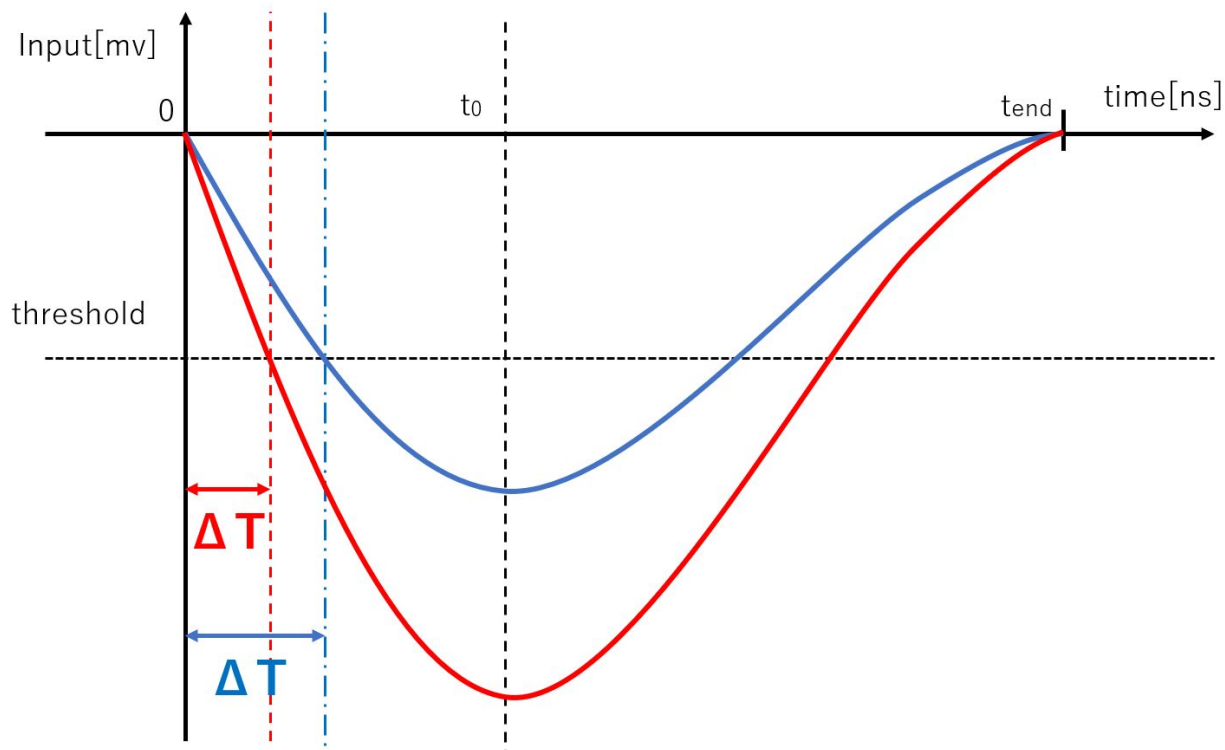
TQ補正①

discriminatorがNIM信号を出力するのは

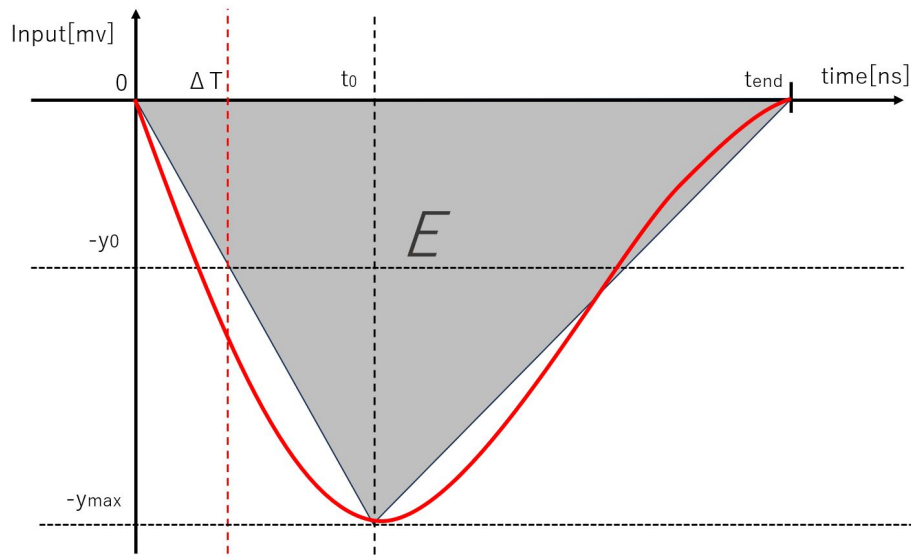
$$|\text{入力信号}| > |\text{threshold}|$$

信号入力と出力に**時間差 ΔT** が発生する。 ΔT はエネルギーごとに異なる

このずれを補正するため、 ΔT をエネルギー E の関数として求める



TQ補正②



粗く三角形で近似する

- ・三角形の面積はエネルギーEに相当
- ・エネルギーによらず t_0, t_{end} は一定

$$E \propto y_{max}$$

$$y_0 : y_{max} = \Delta T : t_0$$

$$\Delta T \propto \frac{1}{y_{max}} \propto \frac{1}{E}$$

実際のTQ補正関数

$$\Delta T [ns] = \frac{p_0}{(E [keV] - p_1)^{p_2}} + p_3$$

p_0, p_1, p_2, p_3 を
fittingにより決定

TQ補正③

方法

各シンチレータに対して

1. $290 \pm 5 \text{keV}$ の範囲のデータのTimeに関するヒストグラムを作成、Gauss fittingしてそのmeanを 290keV に対する ΔT の代表値とした。

2. 上記1の作業を 20keV ごとに $590 \pm 5 \text{keV}$ まで繰り返した。

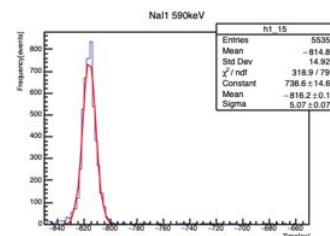
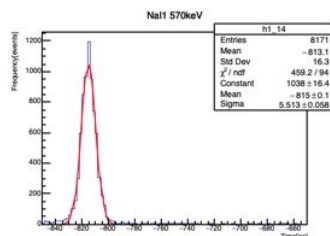
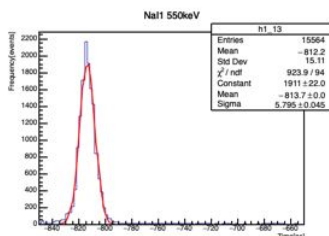
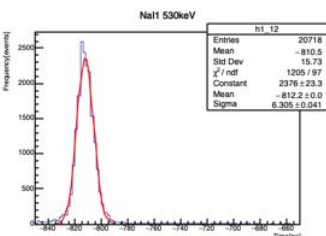
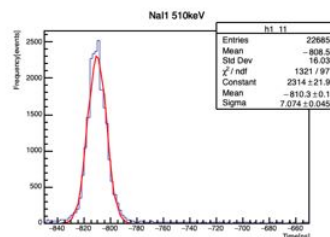
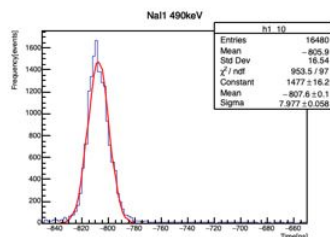
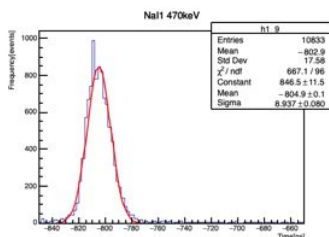
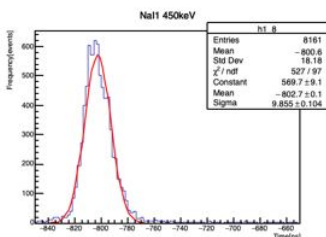
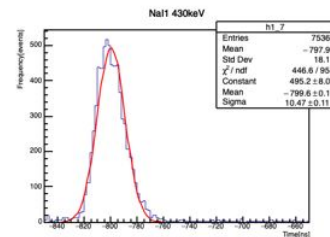
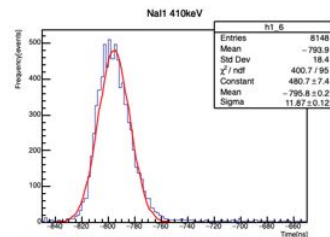
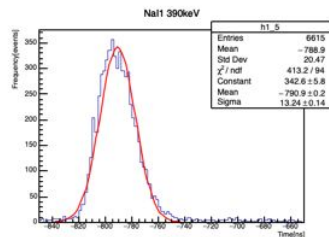
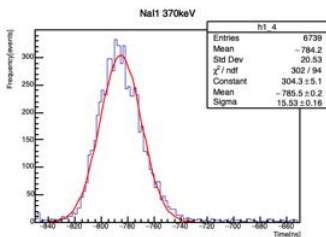
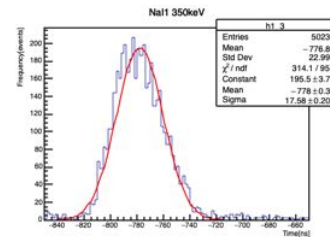
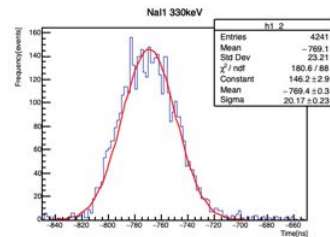
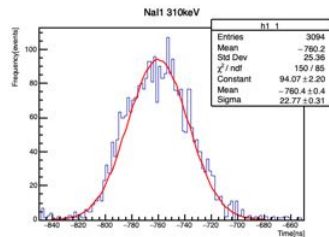
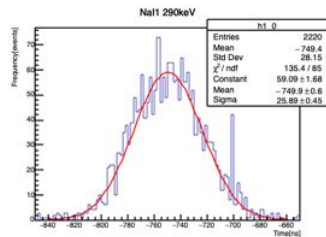
(NaI1; $290 \sim 590 \text{keV}$, NaI2; $170 \sim 490 \text{keV}$, NaI3; $390 \sim 610 \text{keV}$)

3. 得られた $\Delta T(E)$ の値をプロットし、TQ補正関数でfittingした。

4. 新しく時間を $t_{\text{new}} = \text{Time} - \Delta T(E)$ と定義し、以降ではこれを用いた。

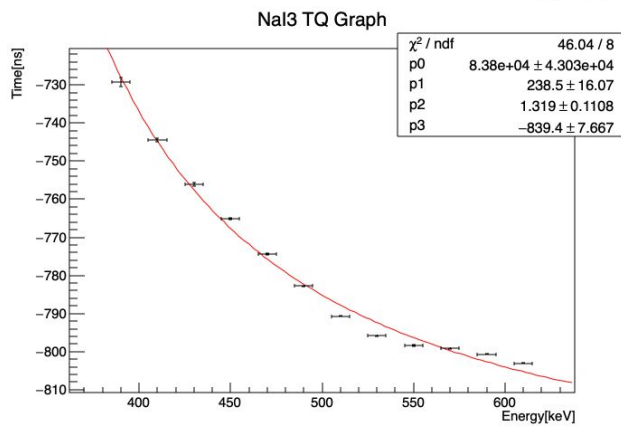
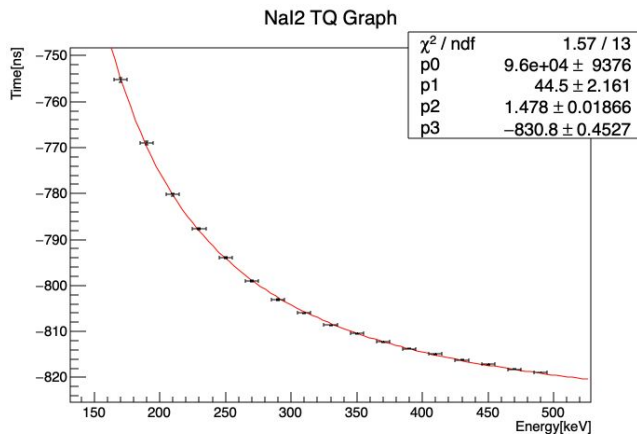
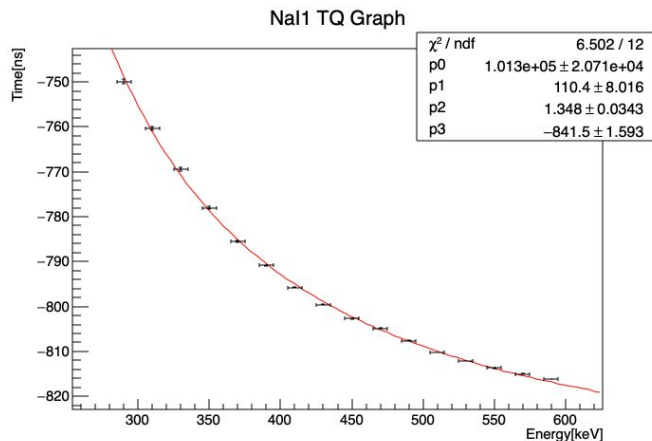
TQ補正④

gauss fittingし
てエネルギー
ごとの ΔT の代
表値を決める



TQ補正⑤

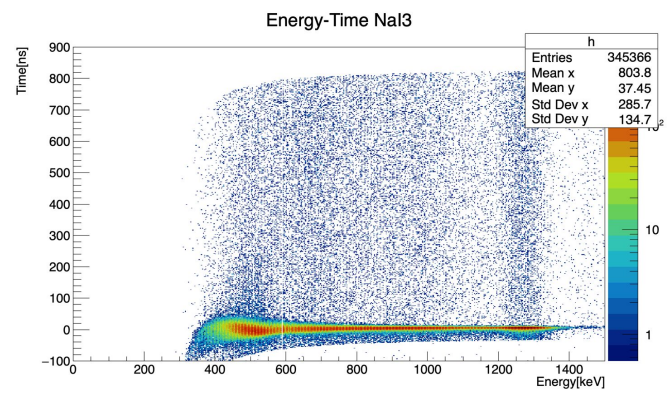
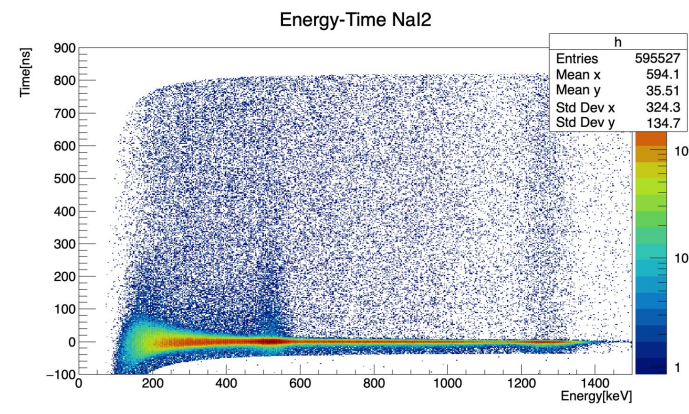
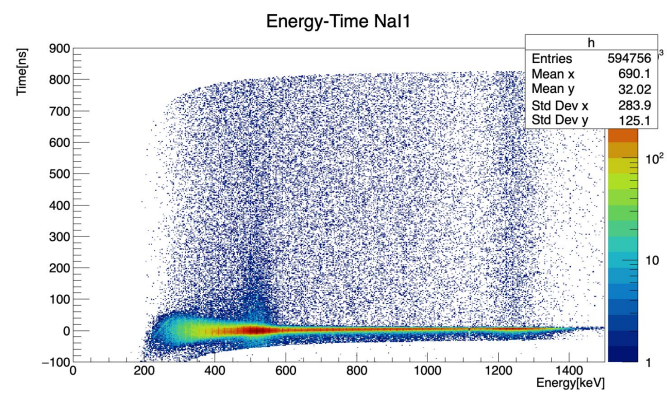
$$\Delta T[ns] = \frac{p_0}{(E[keV] - p_1)^{p_2}} + p_3$$



NaI	p_0	p_1	p_2	p_3
NaI1	$1.01 \times 10^5 \pm 2.1 \times 10^4$	110 ± 8	1.33 ± 0.03	-842 ± 2
NaI2	$9.60 \times 10^4 \pm 9.4 \times 10^3$	44.5 ± 2.2	1.48 ± 0.02	-831 ± 0.5
NaI3	$8.38 \times 10^4 \pm 4.30 \times 10^4$	239 ± 16	1.32 ± 0.11	-839 ± 8

以降 $t_{\text{new}} = \text{Time} - \Delta T(E)$

TQ補正⑥ 補正後のTime-Energy分布



エネルギーによる時間のずれがなくなった

TQ補正後の寿命①

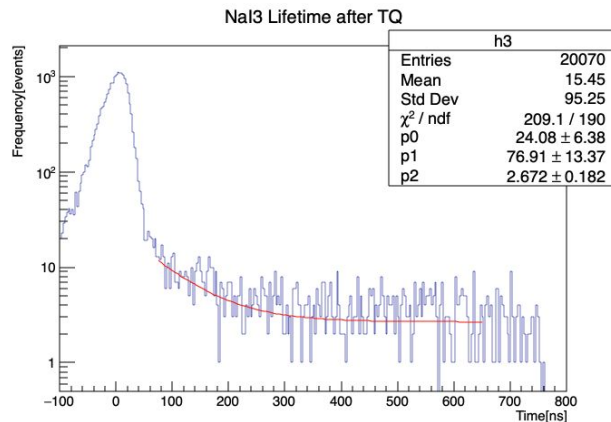
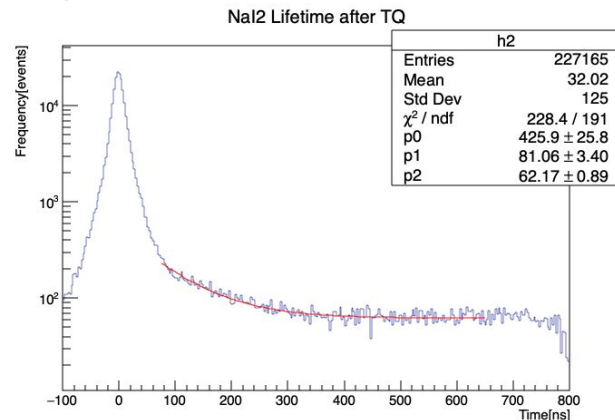
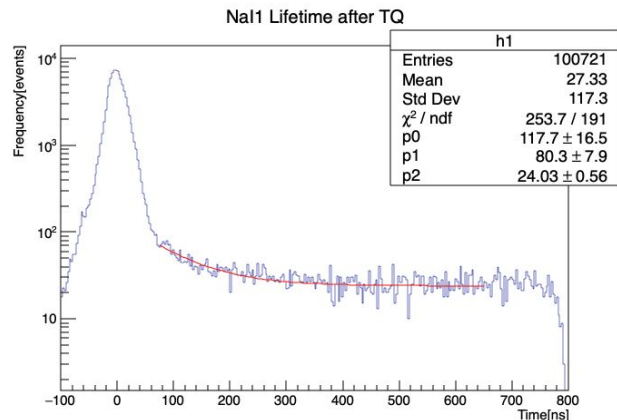
o-Psの崩壊によるガンマ線は511keV以下→450keV以下のデータを用いた

Timeに対するイベント数分布を

$$\text{count} = p_0 \exp\left(-\frac{t[\text{ns}]}{p_1}\right) + p_2$$

でfitting。countが1/e倍になる p_1 が寿命

TQ補正後の寿命② 指数関数fitting



fittingの範囲はo-Posが理論値で
40%崩壊している72.5nsから、
99%崩壊している654nsまで

TQ補正後の寿命③

NaI	寿命 [ns]
NaI1	80.3 ± 27.9
NaI2	81.1 ± 3.4
NaI3	76.9 ± 13.4

理論値142[ns]よりも短い

全てのo- P_s が 3γ へ崩壊するわけではない

Pick-off補正

o-Psがポジトロニウム外の電子と対消滅する、あるいはp-Psに変化し、 2γ に崩壊する

→(3γ に崩壊せず)o-Psの本来の寿命より早く崩壊

・三種類の反応(以下まとめてPick-off反応と呼ぶ)

①Pick-off反応: o-Psの陽電子が周囲の電子と反応

②スピン交換反応: o-Psの電子が周囲と交換され、p-Psになる

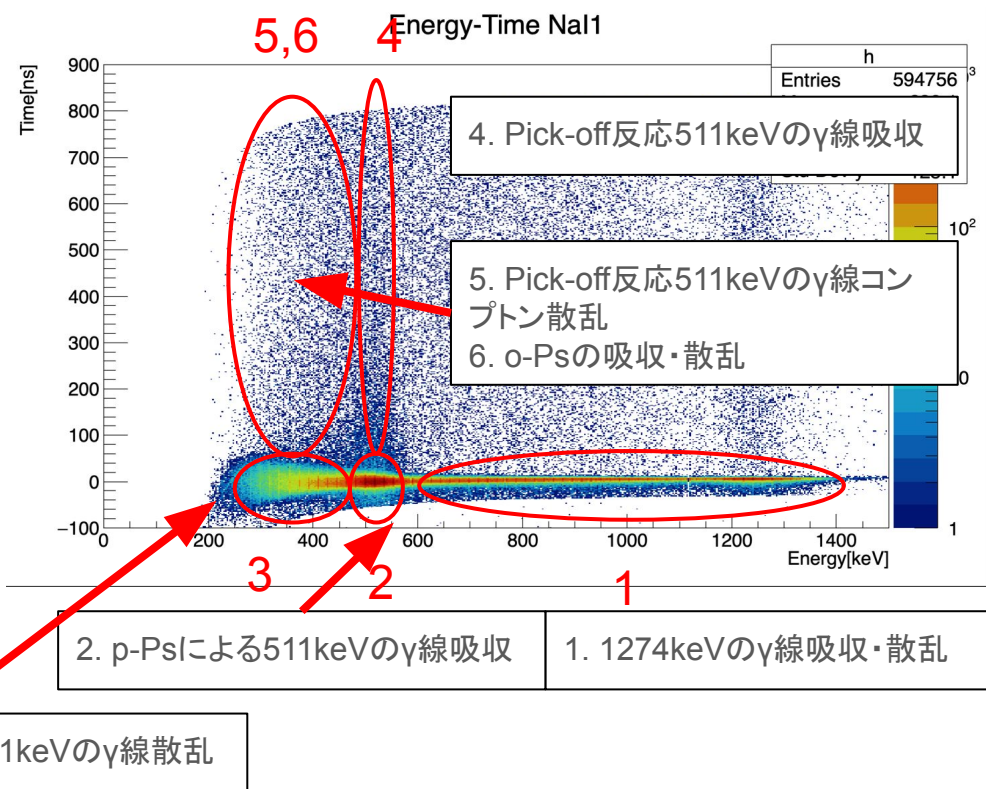
③化学反応: o-Psの電子が奪われ(酸化)、残った陽電子が他の電子と反応

Pick-off補正

イベントはo-Psによるもの、p-Psによるもの、Pick-off反応によるもの、511keV、1274keV、コンプトン散乱とコンプトン吸収、などの要素で分類される

それぞれ右のような領域にそれが起こっている。

o-Psは511keV未満のγ線しか出さないことに注意。

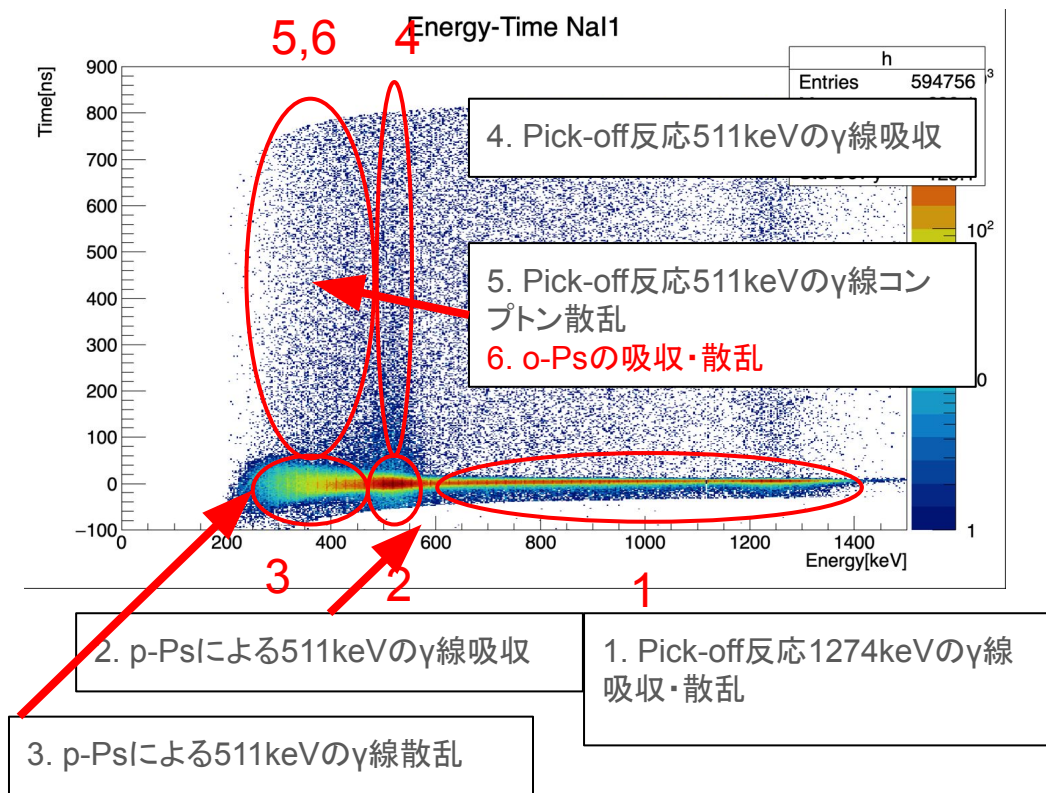


Pick-off補正

[目的]反応5,6の領域からPick-off反応のコンプトン散乱分の寄与を取り除き、o-Psの寄与のみを見たい

p-Ps崩壊のγ線がコンプトン散乱される割合とPick-off反応のγ線がコンプトン散乱される割合が等しく、時間に依らない
→p-Ps崩壊からその割合を求め、領域5,6のo-Ps崩壊とPick-offのコンプトン散乱から後者のみを取り除く。式で書くと下のようなことを行う。

$$N_6 = N_{5,6} - N_5 = N_{5,6} - \frac{N_3}{N_2} N_4$$



Pick-off補正

崩壊反応は $dN/dt = -\Gamma N$ と書ける

$N(t)$: 時刻 t で残っている o -Ps粒子の数(5,6の崩壊をしたもの)

$\Gamma(t)$: 崩壊幅(寿命の逆数)

$g(t) = -dN/dt$ が各時間の**イベント数**に対応→測定できる

$N_{ortho}(t)$: 時刻 t に 3γ へ崩壊した粒子数

$N_{Pick-off}(t)$: 時刻 t に 2γ へ崩壊し、コンプトン散乱をした粒子数
(各時間のイベント数に対応)

それぞれに対応する崩壊幅を Γ_{ortho} , $\Gamma_{Pick-off}$ (それぞれ定数)と書くと、

$N_{ortho}(t) = \Gamma_{ortho} N(t)$, $N_{Pick-off}(t) = \Gamma_{Pick-off} N(t)$

及び $\Gamma = \Gamma_{ortho} + \Gamma_{Pick-off}$ が成り立つ。

$$\text{よって} \quad -\frac{dN}{dt} = N_{Pick-off}(t) + N_{ortho}(t) \quad \text{ただし} \quad f(t) = \frac{\Gamma_{Pick-off}(t)}{\Gamma_{ortho}(t)} = \frac{N_{Pick-off}(t)}{N_{ortho}(t)}$$
$$= \Gamma_{ortho}(1 + f(t))N(t)$$

これを形式的に解いた解は

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

Pick-off補正

先の議論(コンプトン散乱の割合)により、
右の式が成り立つ。ここで、

$S(t)$:511keVのピーク以下のイベント数

$y(t)$:511 keVのピーク付近のイベント数
である。

よって $S(t)$, $y(t)$ から以下の式で $f(t)$ が求められる。

$$N_{\text{Pick-off}}(t) = \frac{S(0)}{y(0)} y(t)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{ortho}}(t) &= S(t) - N_{\text{Pick-off}}(t) \\ &= S(t) - \frac{S(0)}{y(0)} y(t) \end{aligned}$$

$$f(t) = \frac{N_{\text{Pick-off}}(t)}{N_{\text{ortho}}(t)} = \frac{\frac{S(0)}{y(0)} y(t)}{S(t) - \frac{S(0)}{y(0)} y(t)} = \frac{S(0)y(t)}{S(t)y(0) - S(0)y(t)}$$

Pick-off補正

各時刻のイベント数は、 $g(t)$ に対応する。これは $f(t)$ を用いて形式的に表示した $N(t)$ から式を求めることができる。

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

$g(t)$ は測定値であり、 $f(t)$ は先ほどの方法で求められる。
結局 $g(t)$ をFittingし、そのFittingパラメーターとして τ_{ortho} が求められる。

Pick-off補正～f(t)のFitting

[f(t)のFittingの方法]

1. 0 nsから650 nsまで50 nsごとに±25 nsの幅をとってヒストグラムを作成する。
2. 0 nsの511 keVのピーク付近でGaussian Fittingを行い、その $\text{mean}_{t=0}$ と $\sigma_{t=0}$ を求める。
3. 各時間毎に511 keVのピーク付近でGaussian Fittingを行い、 **$\text{mean}_{t \pm \sigma_{t=0}}$ 以内のイベントの総数**を求め、それを $y(t)$ とする。
4. 各時間毎に**0 keVから450 keVまでのイベントの総数**を数え、 **$S(t)$** が求まる。
5. 以上を用いて求めた **$f(t)$** をプロットし、100 nsから650 nsまでをFittingして関数形を求める。ただしfitting関数は

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

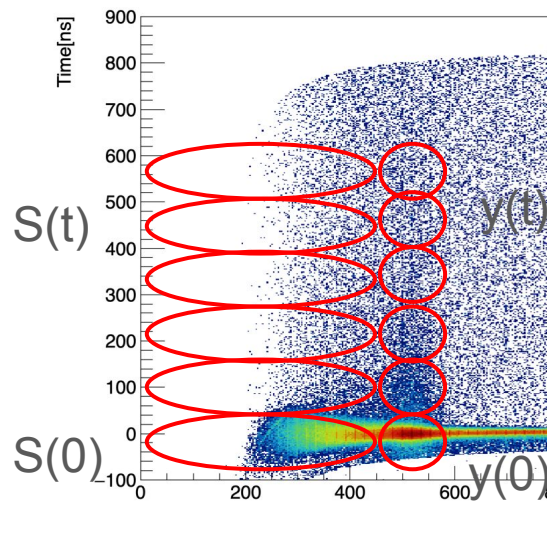
Pick-off補正～ $f(t)$ のFitting

各時刻のエネルギー領域毎のイベント数 $S(t)$ 、 $y(t)$ をデータから求める。

結果は右に示した。(代表してNaI1のみを記載しているが、解析は全てに行った)

これらをもとに、各時刻の $f(t)$ が求まる。

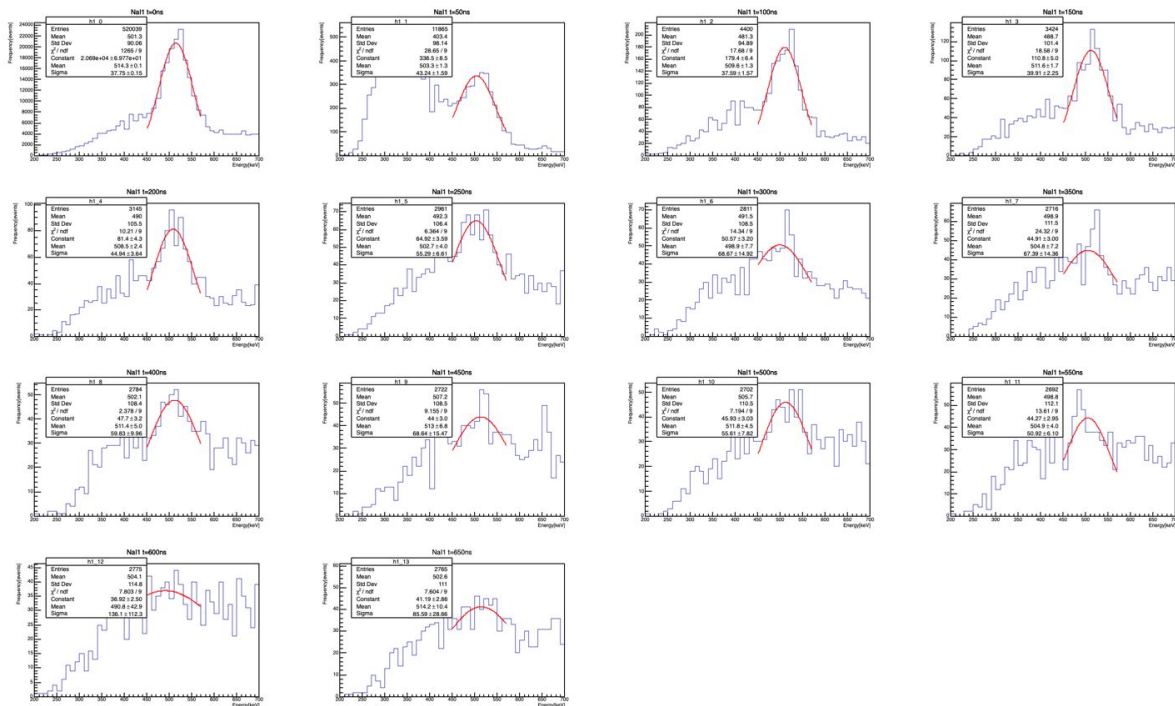
NaI1



t[ns]	$S(t)$	$y(t)$
0	7.86×10^4	1.35×10^5
50	6.98×10^3	2.22×10^4
100	1.01×10^3	1.16×10^3
150	671	750
200	595	551
250	558	459
300	482	365
350	455	342
400	429	333
450	397	325
500	405	332
550	448	315
600	430	286
650	436	302

Pick-off補正 ~ f(t)のFitting

y(t)のFittingの様子(Na1)



Pick-off補正～f(t)のFitting

・f(t)のFitting

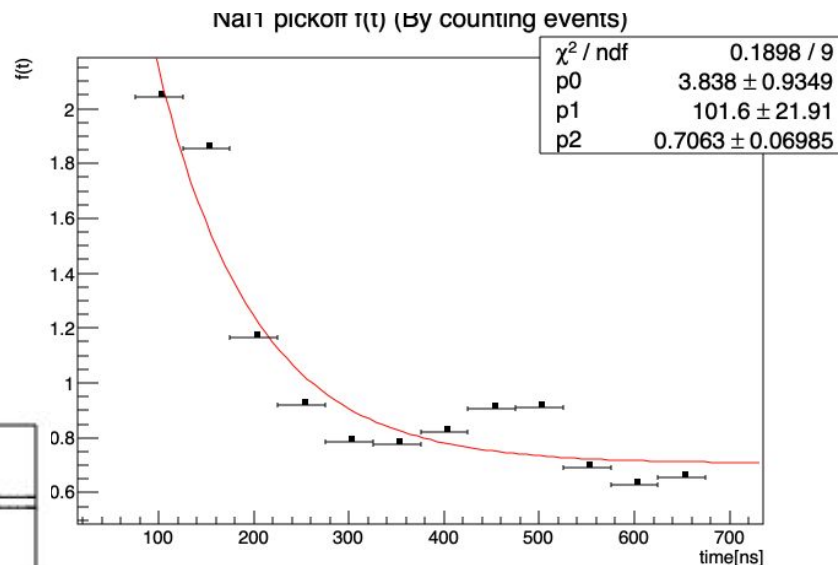
S(t),y(t)より、各時刻のf(t)の実験値が求まる。これを用いて以下のFitting関数でf(t)をFittingした

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

・結果

NaI	p_0	p_1	p_2
NaI1	3.84	102	0.706
NaI2	-0.530	39.3	1.19
NaI3	2.47×10^3	8.09×10^5	-2.46×10^3

NaI1

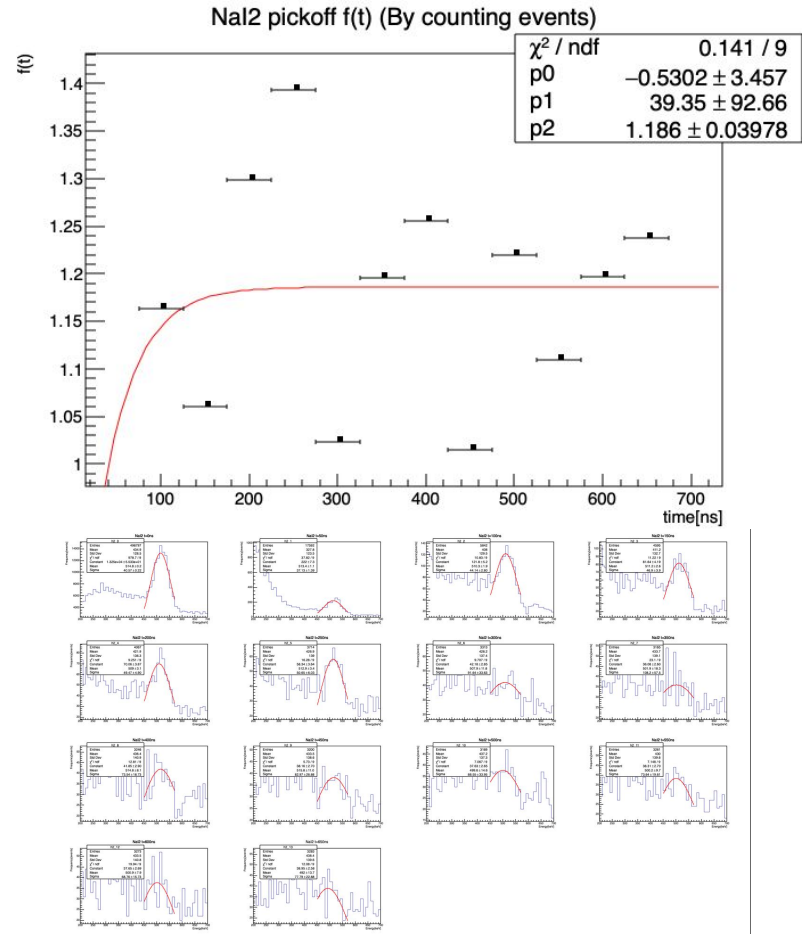


Pick-off補正 $\sim f(t)$ のFitting

NaI2については、右のようにfittingこそできたものの、 p_0 が負になるなど、正しくfittingできたかは怪しかった

予想される原因

$S(t)$ や $y(t)$ を求めるところが上手くいかなかった



NaI3

Pick-off補正 $\sim f(t)$ のFitting

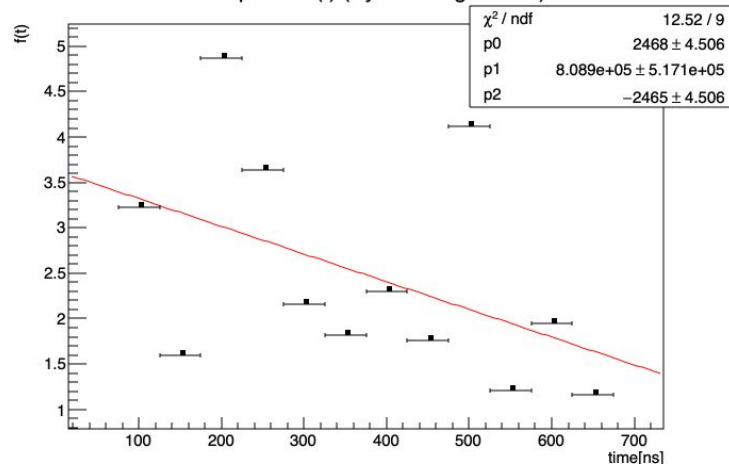
NaI3については、右のようにFitting
がまともにできなかった(続くg(t)のFitting
はそもそもできなかった)

予想される原因

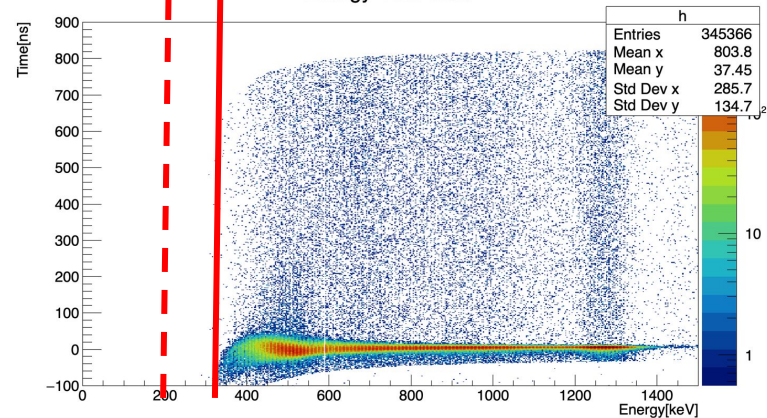
NaI3のシンチレータとしての感度が悪く、o- Ps の反応が多い低エネルギー側の反応が見えにくく(NaI1の下限が約200 keVに対し、NaI3は約400 keV)S(t)が正しく求まらなかったことに起因すると思われる

→以下NaI1,2のみを見る

NaI3 pickoff f(t) (By counting events)



Energy-Time NaI3



Pick-off補正～g(t)のFitting

[g(t)のFittingの方法]

450keV以下のイベント数にg(t)のFittingを行い、Fittingパラメーターとして寿命を求めるのが最終的な目標である。前述の通り、N(t)の形式解から、

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

とg(t)の形式解が求まっている。今f(t)は既に求めたので、f(t)についての積分等を実行し、定数についてはFittingパラメーターを用いて以下のように表示できる。

$$g(t) = -\frac{dN}{dt} = q_0 \left(p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2 + 1 \right) \exp \left[-\frac{1}{q_1} \left(-p_0 p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + (1 + p_2)t \right) \right] + q_2$$

ただし p_0, p_1, p_2 は既に求められているf(t)のFittingパラメーターであり、g(t)のFittingパラメーターは q_0, q_1, q_2 。このうち q_1 が**目的の寿命** (τ_{ortho})となる。

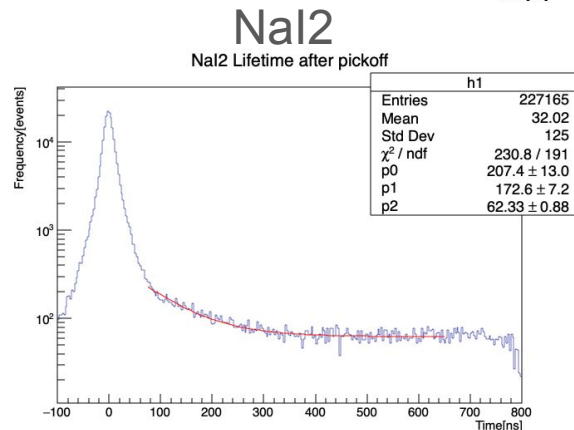
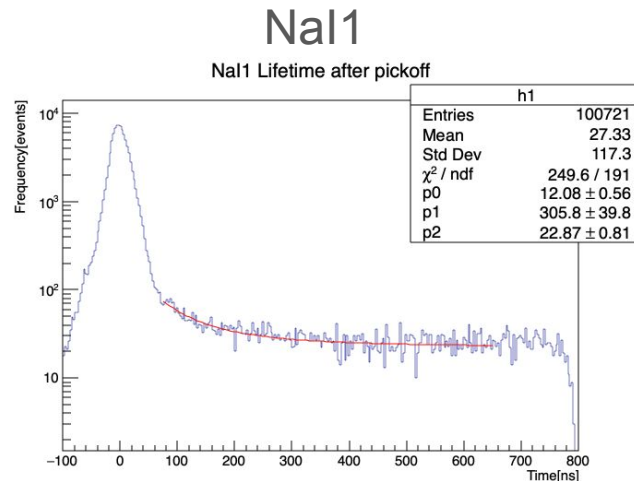
Pick-off補正 $\sim g(t)$ のFitting

・結果

Fittingの様子を右に、求まったFittingパラメーターを下の表にまとめた。(なおNaI3についても解析を行ったが、Fittingができなかった)

NaI	q_0	q_1	q_2
NaI1	12.1	306	22.9
NaI2	207	173	62.3

求めたい寿命



Pick-off補正～結果

寿命は右のようになった
(理論値と比較してある。NaI3はそもそもFittingが
できなかった)
後で求めるが、誤差を考慮しても理論値と一致して
いるとは言えない結果となった。

NaI	life(ns)
theoretical	142
NaI1	306
NaI2	173

4. 考察

考察 Pick-off補正の改善

- TQ補正において $\Delta T[\text{ns}] = \frac{p_0}{(E[\text{keV}] - p_1)^{p_2}} + p_3$

$E = p_1$ で発散

→ノイズの除去も考え 200 [k以下をカット]したものを採用

NaI	p_1
NaI1	110 ± 8
NaI2	44.5 ± 2.2

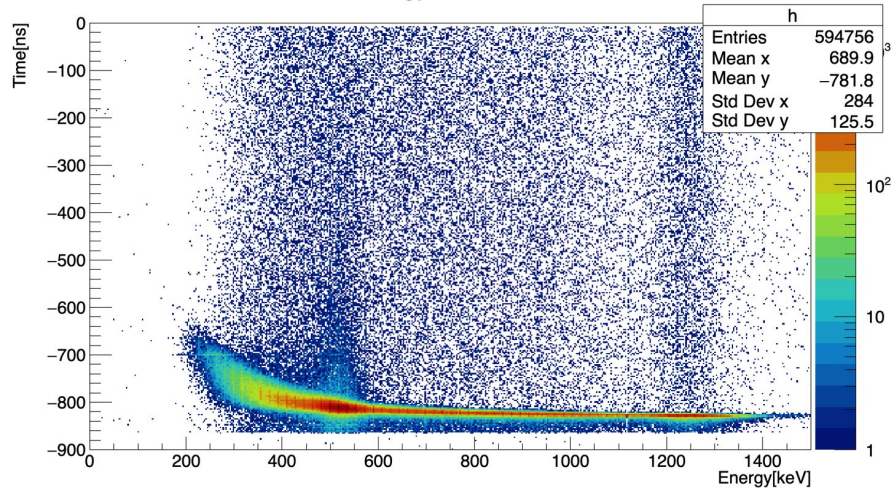
- Pick-off補正において $t = 0$ データ数が他よりも多く、より時間の精度を高くするため、時間の幅を $\pm 25 \text{ ns}$ から $\pm 5 \text{ ns}$ に変更した

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

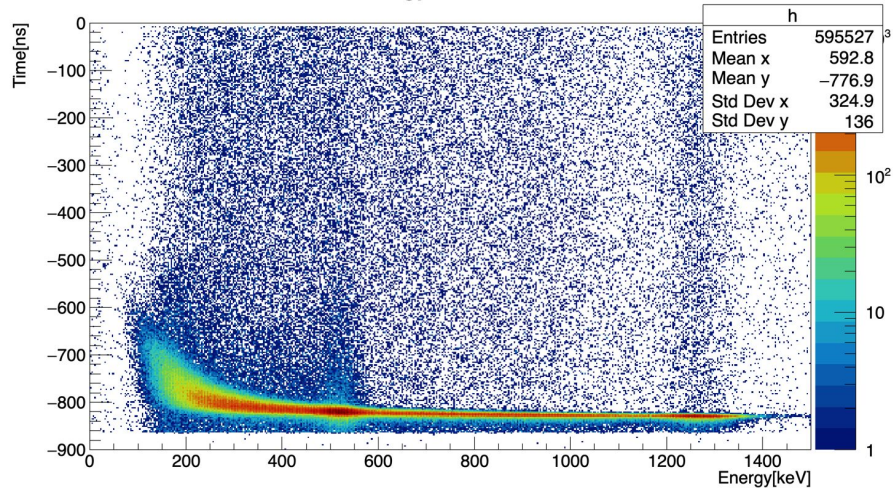
- これに伴い、 $t > 0$ で得られた $S(t), y(t)$ は 1/5 として Pick-off 補正を行った。

考察 Pick-off補正の改善

Energy-Time NaI1



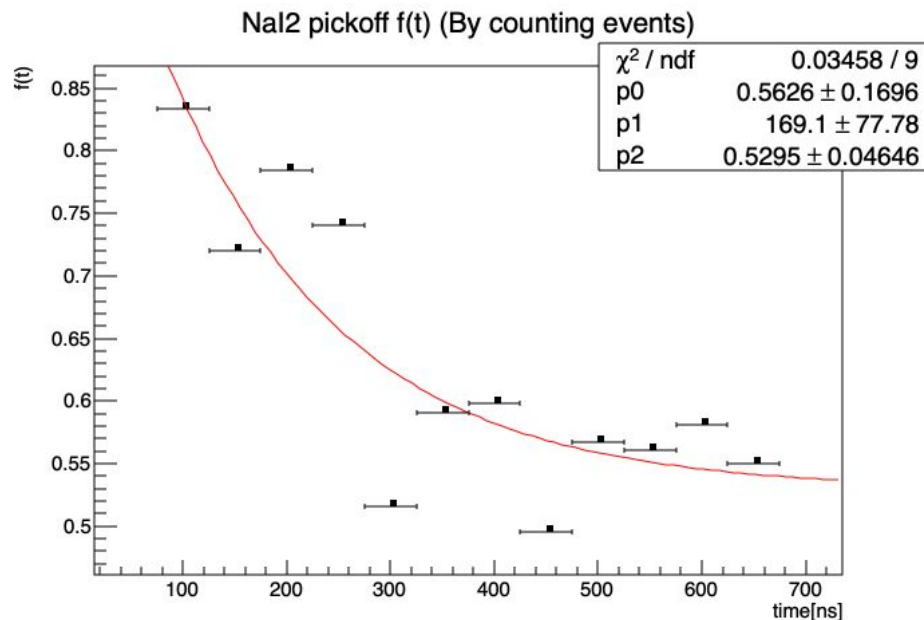
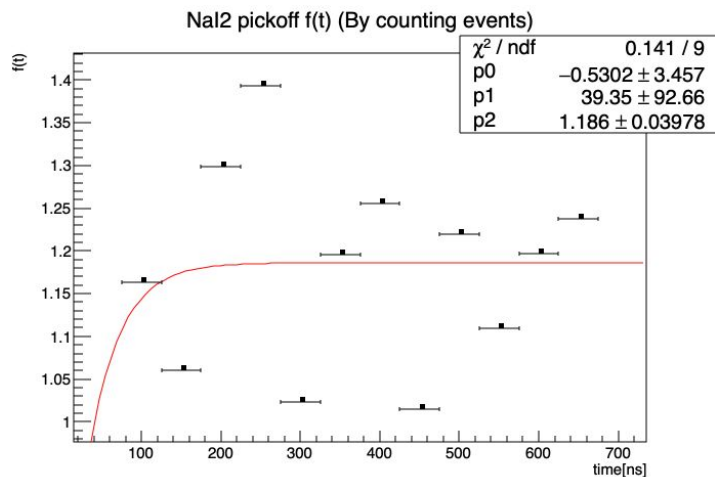
Energy-Time NaI2



考察 Pick-off補正の改善

- ・ 実際の結果に近い寿命が得られた
- ・ NaI2の $f(t)$ のfittingも変更前より妥当な結果となった

変更	寿命 [ns](NaI1)	寿命 [ns](NaI2)
なし	317 ± 44	176 ± 7
あり	134 ± 14	152 ± 7



考察 誤差伝播

誤差を評価する $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{TDC}}^2 + \sigma_{\text{TQ}}^2 + \sigma_{\text{po}}^2 + \sigma_{\text{fitting}}^2}$

それぞれの誤差の表式 $\sigma_f = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial p_i} \sigma_{p_i} \right)^2}$

$f_{\pm} = f \pm \sigma_f$ を用いて τ_{\pm} を出し、

寿命の誤差 $\sigma = \max(|\tau_+ - \tau|, |\tau_- - \tau|)$

fitting範囲を変えてそれぞれを出す

考察 誤差伝播

TDC較正: $\text{Time} = -p_1 \times (\text{TDC0 count})$

寿命fittingの時刻を $t_{\pm} = -(p_1 \pm \sigma_{p_1}) \times (\text{TDC0 count}) - \Delta T(E)$
として τ_{\pm} を求めた

TQ補正: $\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\sum_{i=0}^3 \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial p_i} \sigma_{p_i} \right)^2}$ とし、寿命fittingの時刻を

$t_{\pm} = \text{Time} - (\Delta T(E) \pm \sigma_{\Delta T})$ として τ を求めた

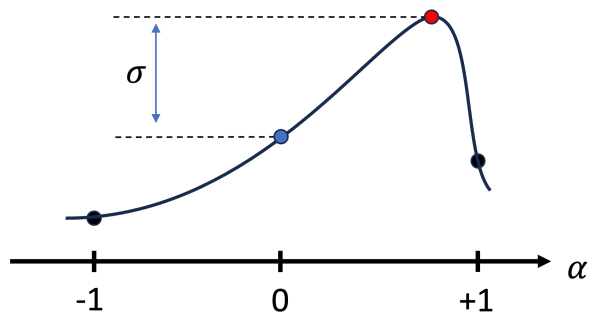
Pick-off補正: $\sigma_{\text{pickoff}} = \sqrt{\sum_{i=0}^2 \left(\frac{\partial g(t)}{\partial p_i} \sigma_{p_i} \right)^2}$ として $g(t) \pm \sigma_{\text{pickoff}}$

で寿命fittingして τ_{\pm} を求めた

考察 誤差伝播

NaI1	τ_+	τ_-	τ	σ
TDC	223	325	306	82.7
TQ	294	114	306	192
Pick-off	317	142	306	163

τ_+ と τ_- の間に寿命が含まれない場合が出てくる



$$f_{\pm} = f \pm \sigma_f$$



$$f_{\alpha} = f + \alpha \sigma_f \quad (-1 \leq \alpha \leq 1)$$

として

$$\sigma = \max_{-1 \leq \alpha \leq 1} (|\tau_{\alpha} - \tau|)$$

を求める

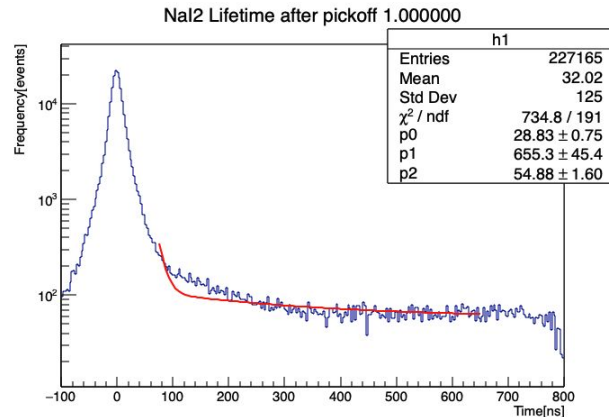
考察 誤差伝播

变更前

TDC	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	325	192
-0.71	297	187
-0.43	288	181
-0.14	291	173
0.00	306	171
0.14	284	165
0.43	274	156
0.71	246	145
1.00	223	133
σ_{TDC}	83	38

TQ	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	114	149
-0.71	178	159
-0.43	238	164
-0.14	279	166
0.00	306	171
0.14	284	170
0.43	247	176
0.71	289	182
1.00	294	183
σ_{TQ}	192	22

Pick-off	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	1	1
-0.71	1	1
-0.43	98.4	524
-0.14	305	309
0.00	306	171
0.14	307	271
0.43	311	450
0.71	314	585
1.00	317	655
$\sigma_{Pick-off}$	208	484



NaI1 : $\sigma = 297$

NaI2 : $\sigma = 486$

考察 誤差伝播 変更後

TDC	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	144	174
-0.71	133	169
-0.43	130	163
-0.14	129	155
0.00	135	155
0.14	126	148
0.43	122	139
0.71	112	129
1.00	102	119
σ_{TDC}	33	36

TQ	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	51.7	133
-0.71	82.3	142
-0.43	108	146
-0.14	124	148
0.00	135	155
0.14	126	152
0.43	113	159
0.71	130	165
1.00	131	166
σ_{TQ}	83	21

Pick-off	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	148	209
-0.71	143	193
-0.43	139	177
-0.14	136	161
0.00	135	155
0.14	134	145
0.43	132	125
0.71	130	54.5
1.00	129	49.7
$\sigma_{\text{Pick-off}}$	13	105

NaI1 : $\sigma = 93$

NaI2 : $\sigma = 114$

考察 誤差伝播

トータル誤差

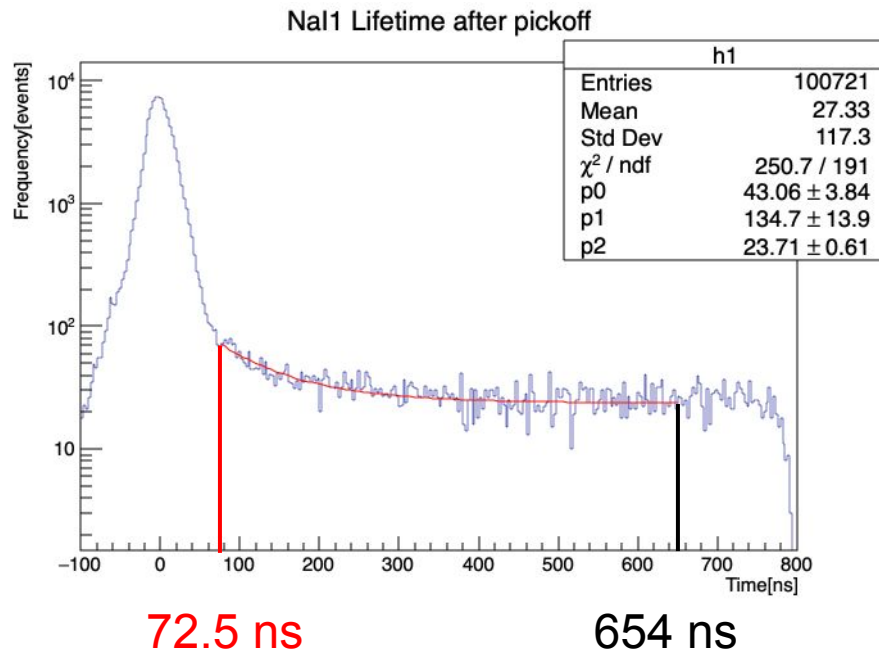
変更前	寿命 [ns]
NaI1	306 ± 297
NaI2	171 ± 486

変更後	寿命 [ns]
NaI1	135 ± 93
NaI2	155 ± 114

考察 寿命fittingの下限

これまで寿命のfittingの範囲は、理論上
o-Posが**40%崩壊する72.5 ns** から、**99%
崩壊する654 ns** としていたが、下限値を
変化させると寿命も大きく変化

下限値を30%崩壊する**50.7 ns**と、50%崩
壊する**98.4 ns**とした場合についても考える



考察 寿命fittingの下限 50.7 ns 変更前

TDC	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	321	146
-0.71	283	137
-0.43	264	126
-0.14	215	113
0.00	200	117
0.14	171	97.1
0.43	132	75.7
0.71	81.9	51.1
1.00	57.9	34.9
σ_{TDC}	142	82

TQ	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	63.6	62.6
-0.71	68.3	77.9
-0.43	90.7	90.2
-0.14	156	99.9
0.00	200	117
0.14	225	109
0.43	268	120
0.71	302	128
1.00	301	133
σ_{TQ}	136	55

Pick-off	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	99.9	61.7
-0.71	90.1	58.4
-0.43	75.8	53.7
-0.14	206	45.1
0.00	200	117
0.14	195	375
0.43	186	559
0.71	179	580
1.00	173	587
$\sigma_{\text{Pick-off}}$	124	470

NaI1 : $\sigma = 233$

NaI2 : $\sigma = 480$

考察 寿命fittingの下限 50.7 ns 変更後

TDC	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	131	149
-0.71	118	138
-0.43	112	128
-0.14	92.9	114
0.00	86.8	109
0.14	74.3	99.6
0.43	56.6	85.0
0.71	34.5	68.0
1.00	24.8	54.5
σ_{TDC}	62.0	54

TQ	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	27.8	77.5
-0.71	29.4	86.4
-0.43	38.4	95.0
-0.14	67.6	103
0.00	86.8	109
0.14	96.5	112
0.43	112	120
0.71	124	128
1.00	123	133
σ_{TQ}	59.0	31

Pick-off	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	120	186
-0.71	112	167
-0.43	103	148
-0.14	93.0	125
0.00	86.8	109
0.14	78.4	41.4
0.43	33.8	59.0
0.71	35.0	56.9
1.00	27.1	21.7
$\sigma_{\text{Pick-off}}$	59.7	87

NaI1 : $\sigma = 104.6$

NaI2 : $\sigma = 107$

考察 寿命fittingの下限 98.4 ns 変更前

TDC	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	429	186
-0.71	370	184
-0.43	389	188
-0.14	408	190
0.00	359	194
0.14	340	192
0.43	323	191
0.71	285	189
1.00	254	188
σ_{TDC}	105	9

TQ	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	248	193
-0.71	267	197
-0.43	300	201
-0.14	349	191
0.00	359	194
0.14	380	192
0.43	310	192
0.71	371	190
1.00	342	185
σ_{TQ}	111	9

Pick-off	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	158	276
-0.71	139	240
-0.43	113	200
-0.14	355	168
0.00	359	194
0.14	364	221
0.43	373	265
0.71	382	305
1.00	389	345
$\sigma_{\text{Pick-off}}$	246	151

NaI1 : $\sigma = 299$

NaI2 : $\sigma = 152$

考察 寿命fittingの下限 98.4 ns 変更後

TDC	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	185	159
-0.71	167	157
-0.43	173	160
-0.14	176	162
0.00	166	166
0.14	158	164
0.43	153	163
0.71	139	161
1.00	126	160
σ_{TDC}	40	8

TQ	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	123	164
-0.71	132	168
-0.43	145	172
-0.14	160	163
0.00	166	166
0.14	170	164
0.43	147	164
0.71	167	162
1.00	158	158
σ_{TQ}	42	8

Pick-off	寿命 [ns]	
α	NaI1	NaI2
-1.00	174	219
-0.71	170	202
-0.43	167	187
-0.14	166	173
0.00	166	166
0.14	166	159
0.43	166	145
0.71	166	131
1.00	167	118
$\sigma_{\text{Pick-off}}$	8	53

NaI1 : $\sigma = 64$

NaI2 : $\sigma = 55$

考察 寿命fittingの下限

- 下限値が小さいほど誤差が大きくなっている
→ p-Psが影響している、またはPick-off反応が多く起こっていた
- すべてのパターンで理論値142 nsが誤差の範囲内に収まっているが、誤差が大きく、特に変更前のPick-off補正の場合の方が大きくなっている

変更前	NaI	寿命 [ns]
50.7 ns	NaI1	200 ± 233
	NaI2	117 ± 480
72.5 ns	NaI1	306 ± 297
	NaI2	171 ± 486
98.4 ns	NaI1	359 ± 299
	NaI2	194 ± 152

変更後	NaI	寿命 [ns]
50.7 ns	NaI1	86.8 ± 104.6
	NaI2	109 ± 107
72.5 ns	NaI1	135 ± 93
	NaI2	155 ± 114
98.4 ns	NaI1	166 ± 64
	NaI2	166 ± 55

考察 誤差が大きくなった原因

- 1275 keVの γ 線のコンプトン散乱によるバックグラウンドノイズが影響
- シリカパウダーを加熱・乾燥しなかったため、シリカパウダー中の水分によるPick-off反応が多く起こった
- Pick-off補正における各時刻でのGaussian fittingの一部がうまくできなかった
- 装置のセットアップがうまくいっておらず、外部からのノイズが影響

5. 結論

結論

誤差の範囲に寿命の理論値が収まったが、誤差が大きくQEDを保証するような精度にはならなかった。

fittingの下限を変えると寿命も変わった

その理由は考察で挙げたものが考えられる

Back Up

fittingの初期パラメータ

TQ補正

ΔT

p_0	p_1	p_2	p_3
7287.0	190.0	0.9	-827.0

Lifetime

p_0	p_1	p_2
150.0	50.0	30.0

Pick-off補正

変更前/

変更後

p_0	p_1	p_2
100.0	100.0	1.0

p_0	p_1	p_2
5.0	100.0	1.0

Lifetime

p_0	p_1	p_2
2.0	100.0	10.0

Back Up fittingの初期パラメータ

誤差伝播を求める際の初期パラメータ

下限値 [ns]	Pick-off 補正	考慮する誤差	NaI	p_0	p_1	p_2
50.7	変更前	TDC	NaI1, 2	2	100	10
		TQ	NaI1, 2	2	100	10
		Pick-off	NaI1	2	100	10
		Pick-off	NaI2	100	300	50
	変更後	TDC	NaI1, 2	2	100	10
		TQ	NaI1, 2	5	100	10
		Pick-off	NaI1	2	100	10
		Pick-off	NaI2	100	300	50
72.5	変更前	TDC	NaI1, 2	2	100	10
		TQ	NaI1, 2	2	100	10
		Pick-off	NaI1	2	100	10
		Pick-off	NaI2	100	300	10
	変更後	TDC	NaI1	2	100	10
		TDC	NaI2	10	100	10
		TQ	NaI1, 2	10	100	10
		Pick-off	NaI1	2	100	10
Pick-off	NaI2	100	300	10		
98.4	変更前	TDC	NaI1, 2	2	100	10
		TQ	NaI1, 2	2	100	10
		Pick-off	NaI1	2	100	10
		Pick-off	NaI2	100	300	50
	変更後	TDC	NaI1, 2	2	100	10
		TQ	NaI1, 2	5	100	10
		Pick-off	NaI1	20	150	20
		Pick-off	NaI2	100	150	30

以下、使用しないスライド

考察 誤差伝播

変更前

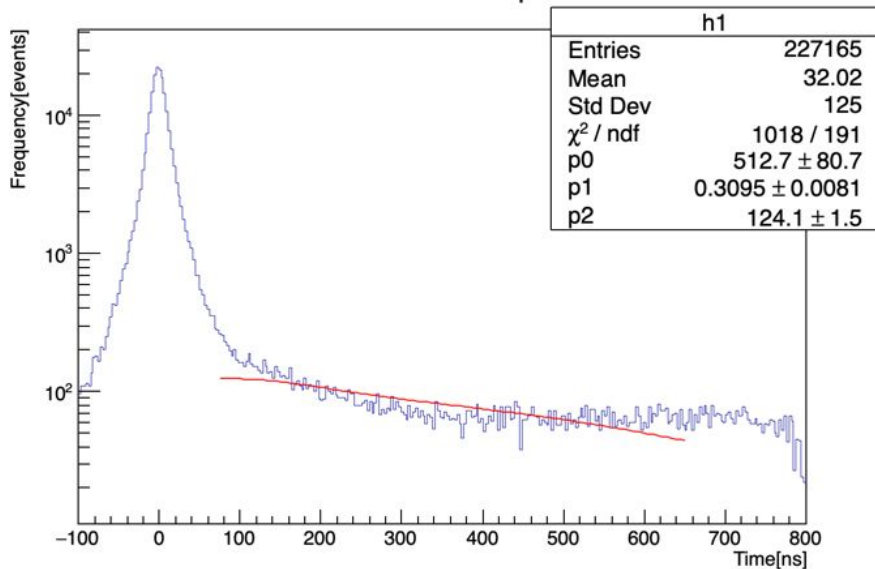
NaI1	t_+	t_-	t	σ
TDC	223	325	306	82.7
TQ	294	114	306	192
Pick-off	317	142	306	163

NaI2	t_+	t_-	t	σ
TDC	135	194	173	37.7
TQ	185	151	173	21.6
Pick-off	0.309	0.309	173	172

考察 誤差伝播

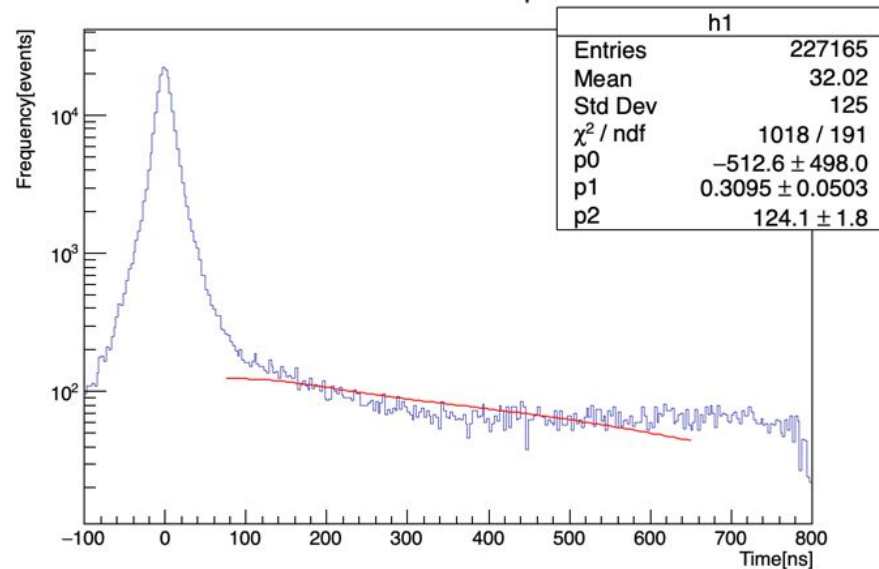
τ_+ の寿命fitting

Nal2 Lifetime after pickoff



τ_- の寿命fitting

Nal2 Lifetime after pickoff



$f(t)$ のfittingがうまくできなかったことが原因？

考察 誤差伝播

変更後

NaI1(improved)	t_+	t_-	t	σ
TDC	102	144	135	32.6
TQ	131	51.8	134	83.0
Pick-off	129	148	135	13.5

NaI2(improved)	t_+	t_-	t	σ
TDC	119	174	153	34.3
TQ	166	133	153	19.8
Pick-off	49.7	209	153	103

考察 誤差伝播

トータルの誤差

変更前	寿命 [ns]
NaI1	306 ± 265
NaI2	173 ± 177

変更前	寿命 [ns]
NaI1	135 ± 90
NaI2	153 ± 111

考察 寿命fittingの下限

50.7 nsの場合

NaI1	t_+	t_-	t	σ
TDC	57.9	321	200	142
TQ	301	63.5	200	136
Pick-off	620	79.4	200	420

NaI1(improved)	t_+	t_-	t	σ
TDC	24.8	131	86.8	62.0
TQ	123	27.8	86.8	59.0
Pick-off	27.1	120	86.8	59.7

NaI2	t_+	t_-	t	σ
TDC	56.4	162	117	60.8
TQ	145	81.2	117	36.1
Pick-off	587	61.7	117	470

NaI2(improved)	t_+	t_-	t	σ
TDC	54.5	149	117	62.8
TQ	133	77.5	117	36.1
Pick-off	21.7	186	117	95.5

考察 寿命fittingの下限

98.4 nsの場合

NaI1	t_+	t_-	t	σ
TDC	172	248	226	53.1
TQ	215	170	226	56
Pick-off	363	318	226	138

NaI2	t_+	t_-	t	σ
TDC	188	186	194	7.54
TQ	185	193	194	8.96
Pick-off	344	276	194	151

NaI1(improved)	t_+	t_-	t	σ
TDC	126	185	166	40.2
TQ	158	123	166	42.4
Pick-off	167	174	166	8.43

NaI2(improved)	t_+	t_-	t	σ
TDC	160	159	166	6.70
TQ	158	164	166	7.94
Pick-off	118	219	166	53.1