

オルソポジトロニウムの 寿命測定

2023年度前期課題演習A2

浅野 礼治 川中 竣介 佐藤 優光 田中 由弥 松本 健助 三浦 悠

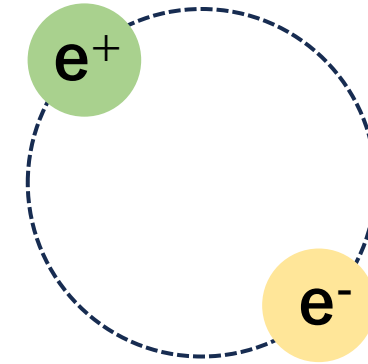
目次

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

概要

概要

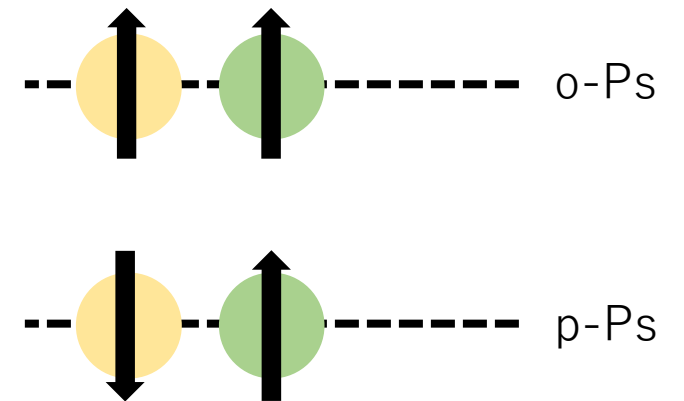
ポジトロニウム: e^+ と e^- の束縛状態



スピン状態により...

オルソポジトロニウム (以降 o-Ps) と

パラポジトロニウム (以降 p-Ps) に分類



比較的寿命の長い o-Ps の寿命を測定

QED で算出可能 → 理論値と整合しているか?

理論

p-Psとo-Psの区別

b^\dagger :電子の生成演算子 d^\dagger :陽電子の生成演算子
を用いると、Psは以下の4通りの状態が考えられる

- $b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\uparrow)|0\rangle$
 - $\frac{1}{\sqrt{2}}[b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow) + b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$
 - $b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\downarrow)|0\rangle$
 - $\frac{1}{\sqrt{2}}[b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow) - b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$
-合成スピン 0 \rightarrow p-Ps
-合成スピン 1 \rightarrow o-Ps

Psの崩壊(1)

Psは対消滅して γ 線を放出する

… p-Psとo-Psでは、放出する γ 線の数が違う

その違いは荷電共役変換の変換性によるもの

光子の生成演算子は荷電共役変換するとマイナス符号になる

n個の γ 線がある状態では $|n\gamma\rangle \rightarrow (-1)^n |n\gamma\rangle$

電磁相互作用は荷電共役対称性を持つので変換性は崩壊の前後で
不変

p-Psの荷電共役変換

荷電共役変換では粒子と反粒子が入れ替わるので $b^\dagger \leftrightarrow d^\dagger$ として

$$|p - Ps\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow) - b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$$

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [d^\dagger(\uparrow)b^\dagger(\downarrow) - d^\dagger(\downarrow)b^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$$

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [-b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow) + b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow)]|0\rangle$$

$\because b^\dagger$ と d^\dagger は反交換

$$\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow) - b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow)]|0\rangle = |p - Ps\rangle$$

o- P_s の荷電共役変換

同様に $b^\dagger \leftrightarrow d^\dagger$ として

- $b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\uparrow)|0\rangle \rightarrow d^\dagger(\uparrow)b^\dagger(\uparrow)|0\rangle = -b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\uparrow)|0\rangle$

- $b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\downarrow)|0\rangle \rightarrow d^\dagger(\downarrow)b^\dagger(\downarrow)|0\rangle = -b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\downarrow)|0\rangle$

- $\frac{1}{\sqrt{2}} [b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow) + b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$

- $\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [d^\dagger(\uparrow)b^\dagger(\downarrow) + d^\dagger(\downarrow)b^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$

- $\rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [-b^\dagger(\uparrow)d^\dagger(\downarrow) - b^\dagger(\downarrow)d^\dagger(\uparrow)]|0\rangle$

つまり、いずれの場合も
 $|o - P_s\rangle \rightarrow -|o - P_s\rangle$ となる

P_S の崩壊(2)

まとめると、 γ 線と P_S は荷電共役変換に対して

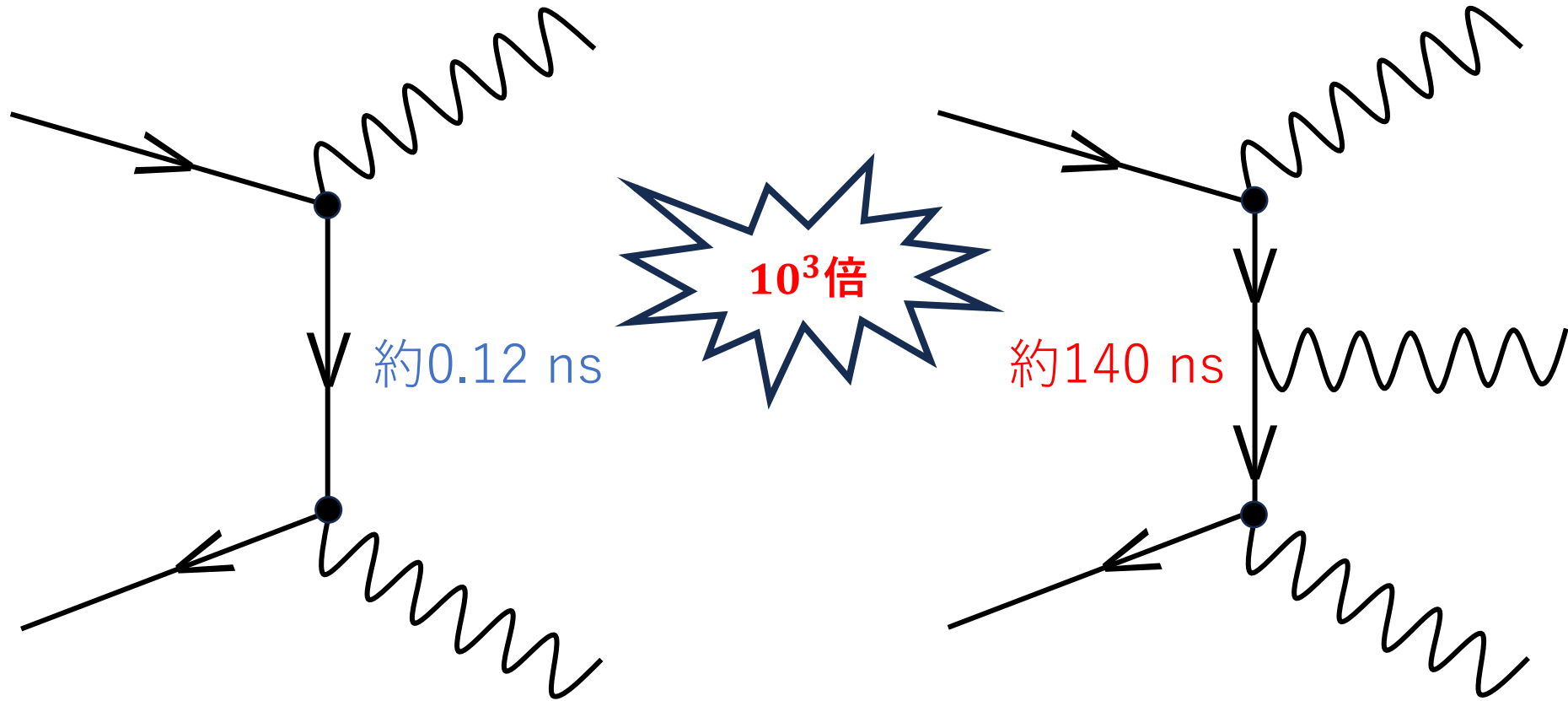
- $|n\gamma\rangle \rightarrow (-1)^n |n\gamma\rangle$
- $|p - P_S\rangle \rightarrow |p - P_S\rangle$
- $|o - P_S\rangle \rightarrow -|o - P_S\rangle$

と変換することがわかった。

よって $p-P_S$ は偶数本の、 $o-P_S$ は奇数本の γ 線に崩壊

(※運動量保存則により1本の γ 線には崩壊しない)

Psの崩壊(3)



p-Psの 2γ 崩壊

o-Psの 3γ 崩壊

実験方法

実験原理

STEP1: β 崩壊による e^+ の生成 ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu_e$



STEP2: シリカパウダー(SiO_2)内でPsの生成



STEP3: Psが崩壊し、その崩壊 γ 線をNaIで計測する



p-Psは生成後すぐに崩壊→ **STEP1**と**同時刻**とみなせる

o-Psの寿命→ (**STEP3**の時刻) - (**STEP1**の時刻)

実験装置とセットアップ・回路

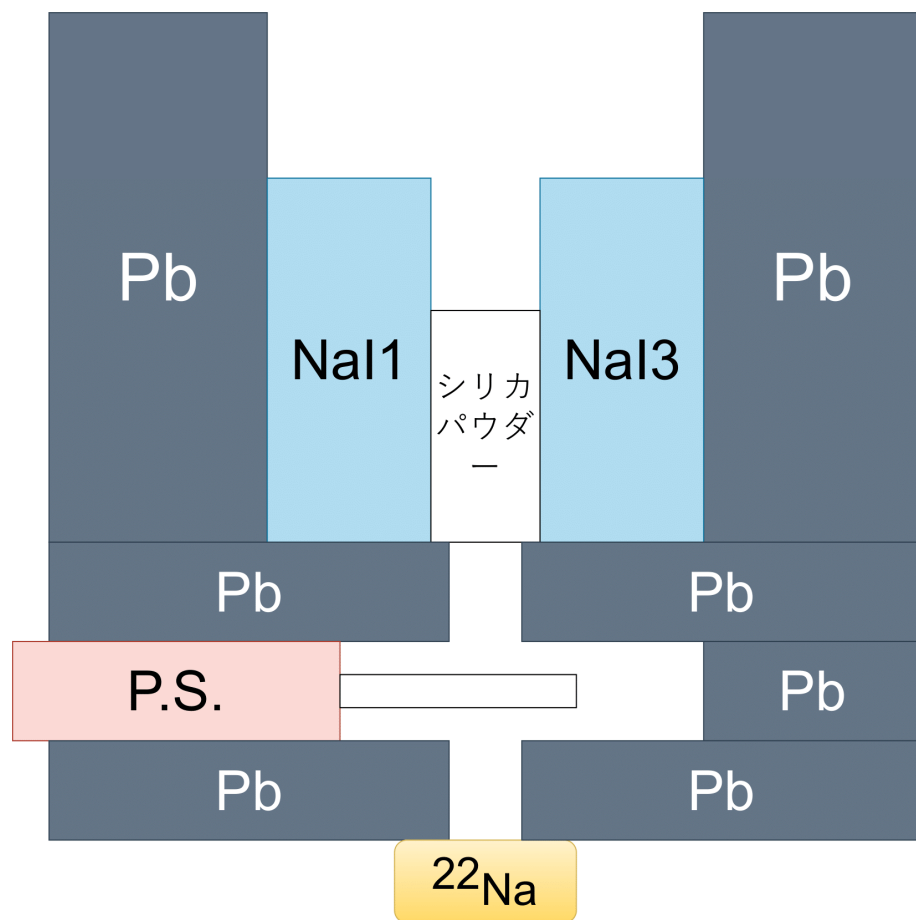


実験装置(蓋と遮光用ビニールなし)

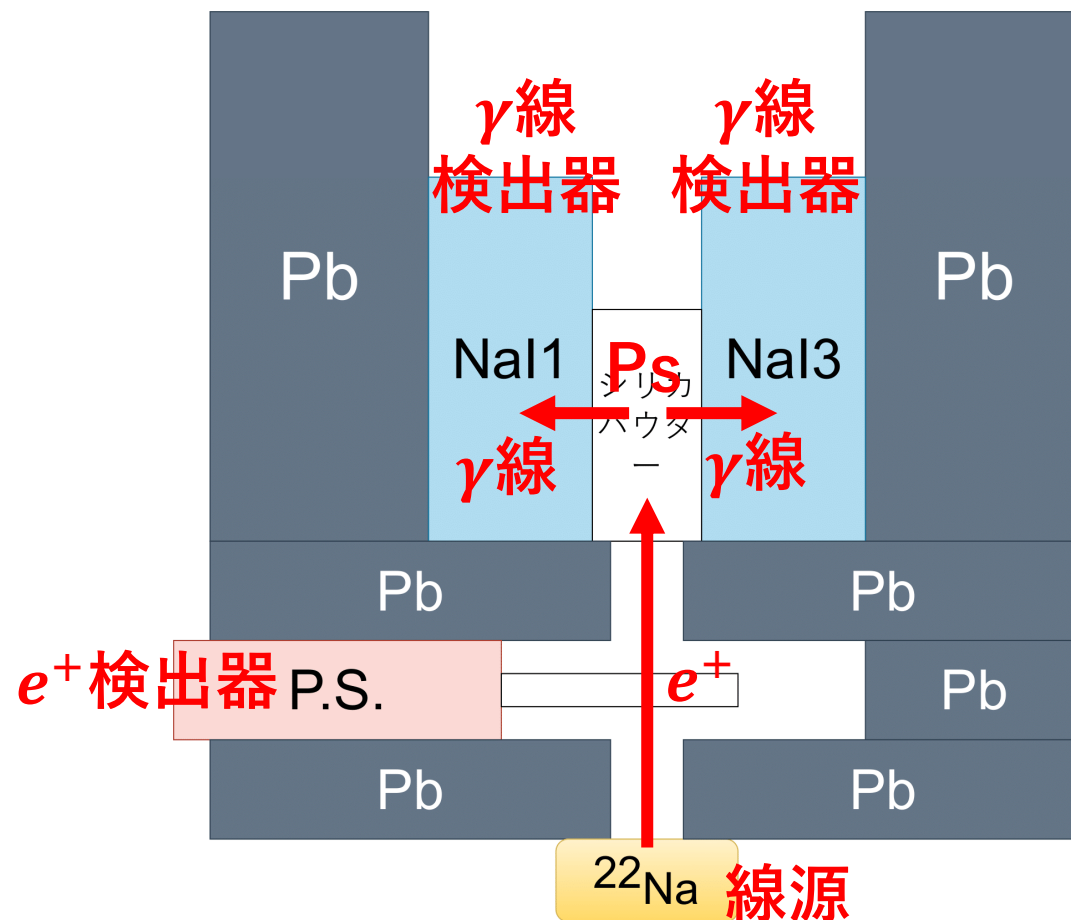


実験装置(蓋と遮光用ビニールあり)

セットアップの模式図

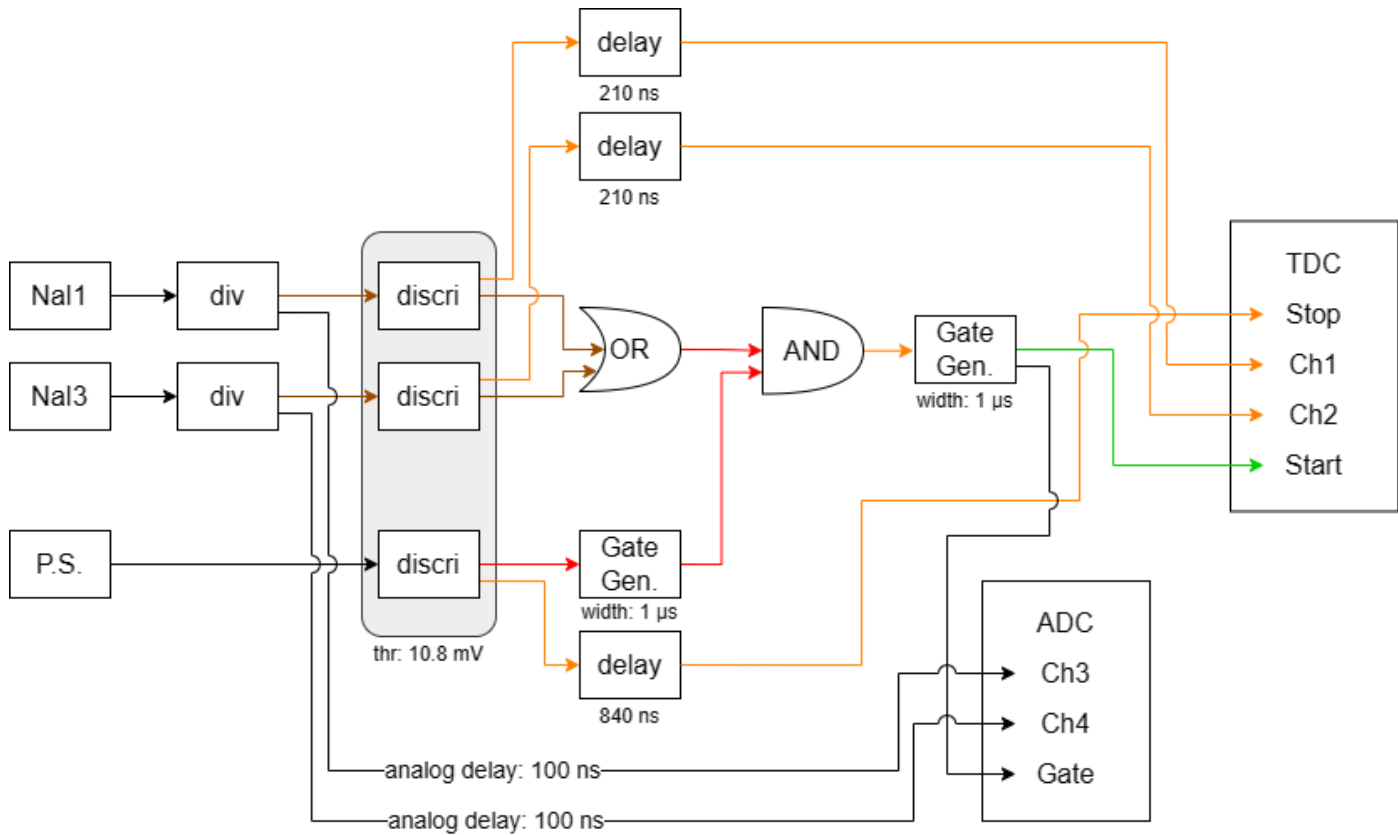


上から見たセットアップの模式図

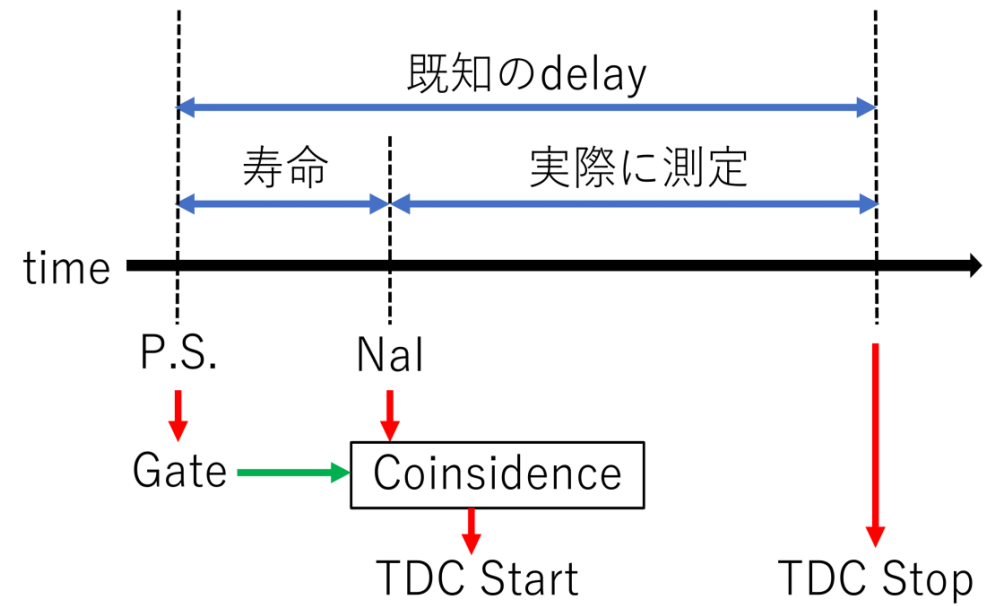


模式図と放射線の流れ

回路図・時間のチャート

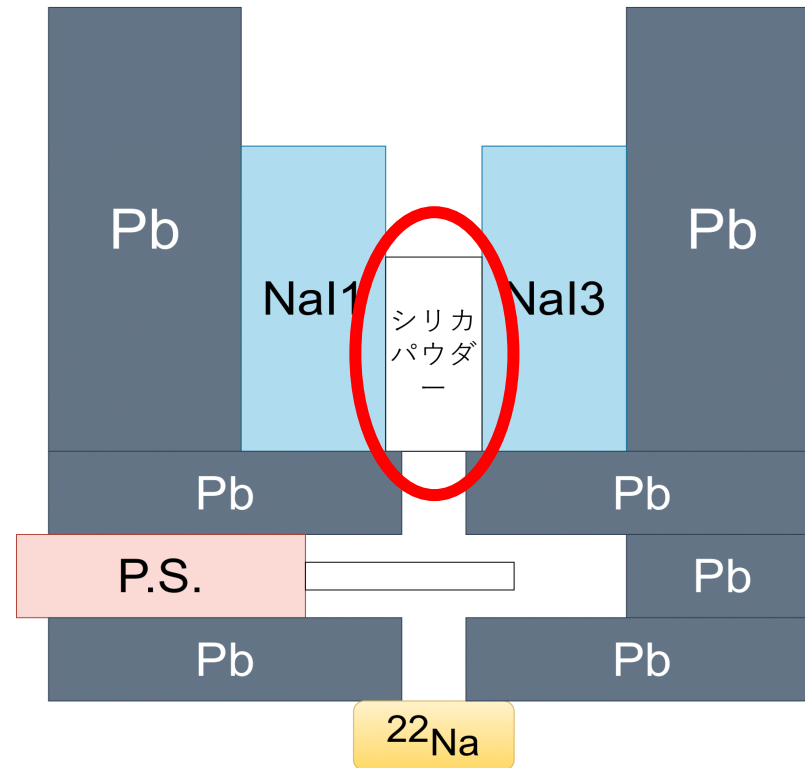


回路図



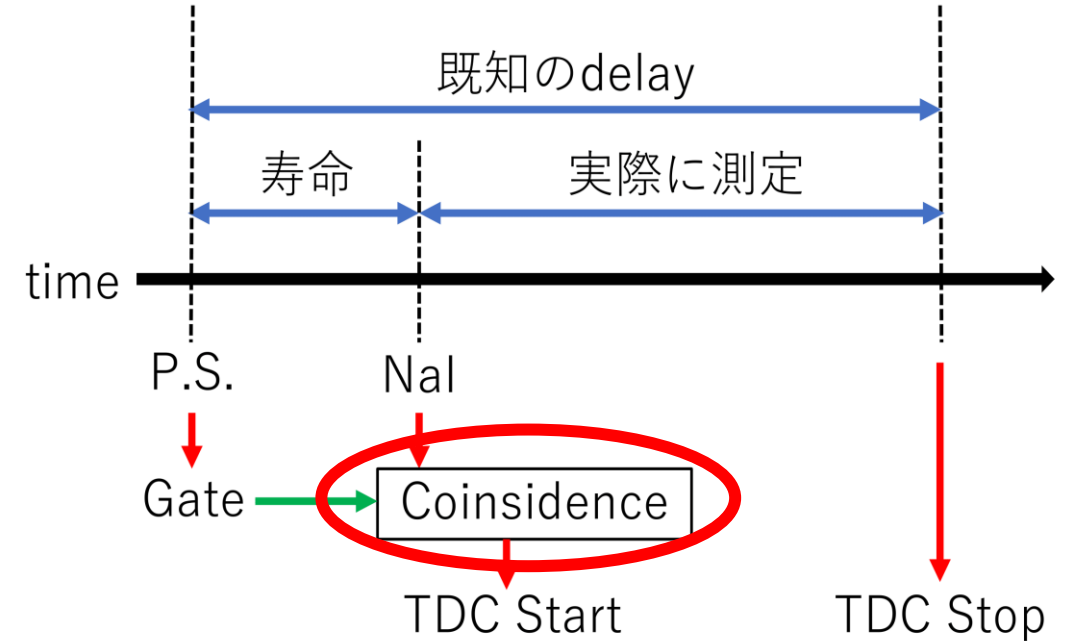
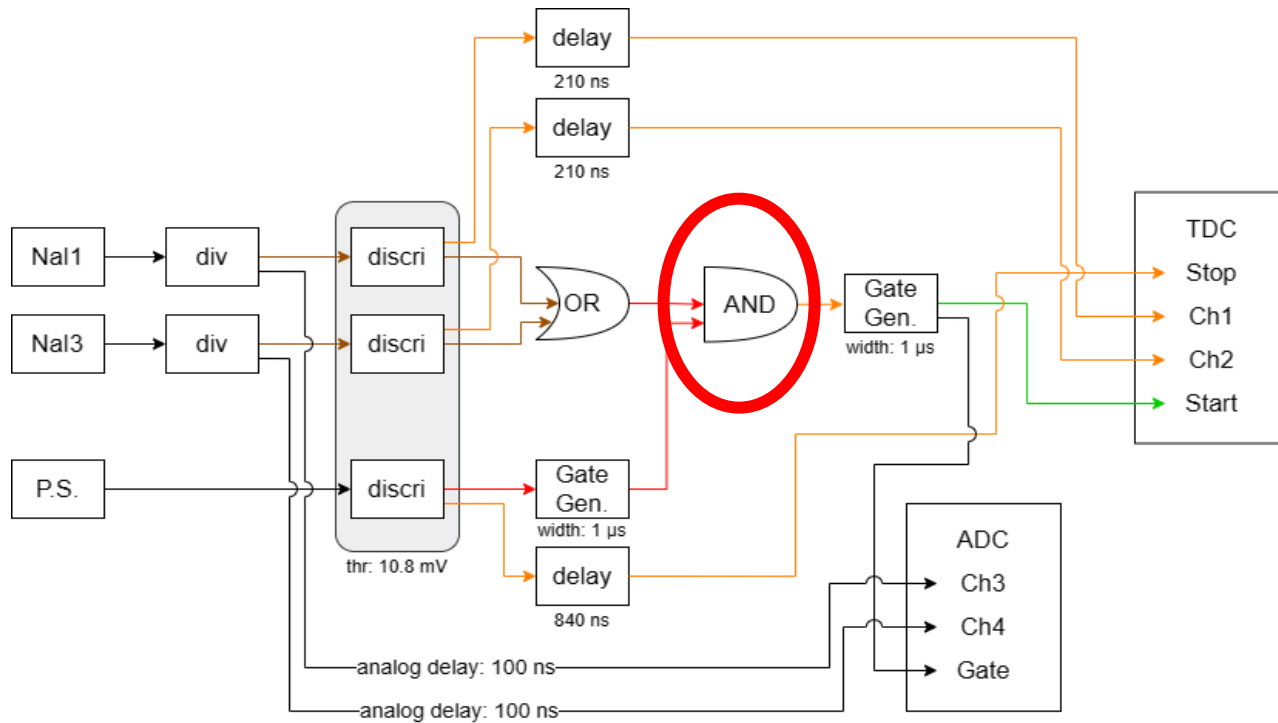
時間のチャート

実験の工夫点



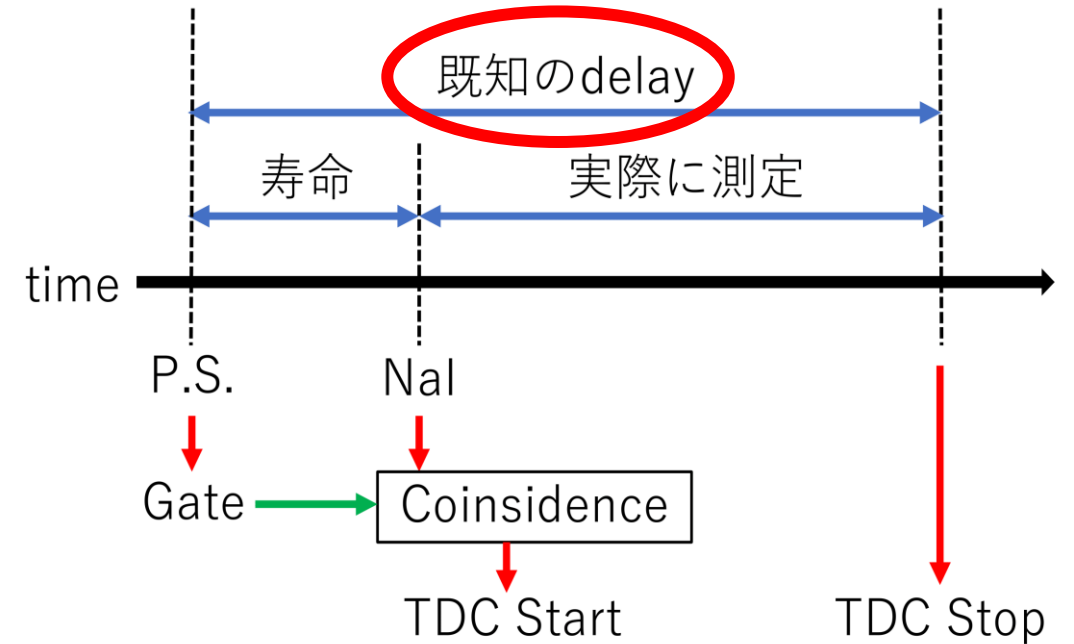
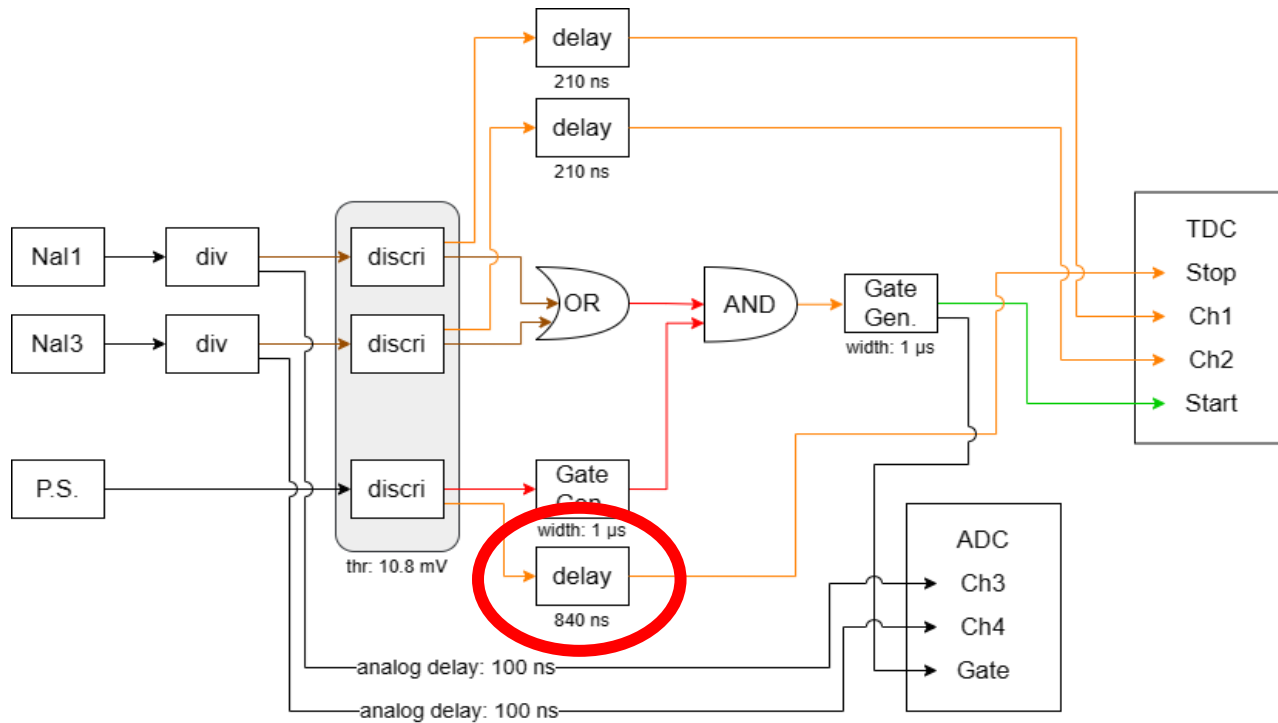
- ①真空状態での乾燥シリカパウダーの使用
→Pick-off反応(後述)を防ぎ、誤差を最小化

実験の工夫点



②P.S.のgateとNaIでcoincidenceをとる
→Ps崩壊に起因する γ 線のみを観測

実験の工夫点

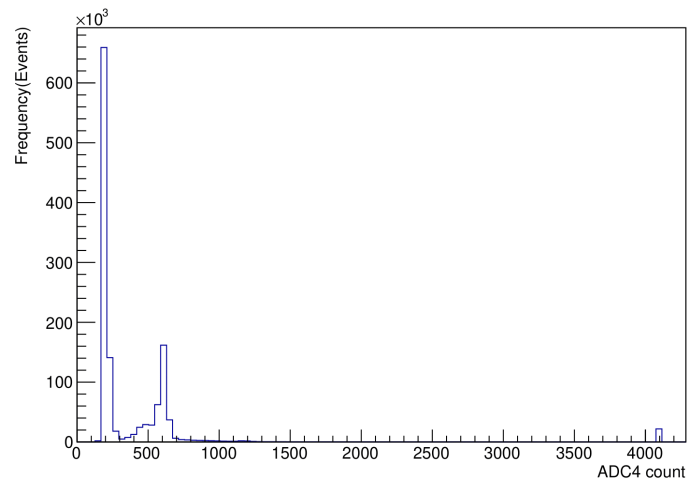
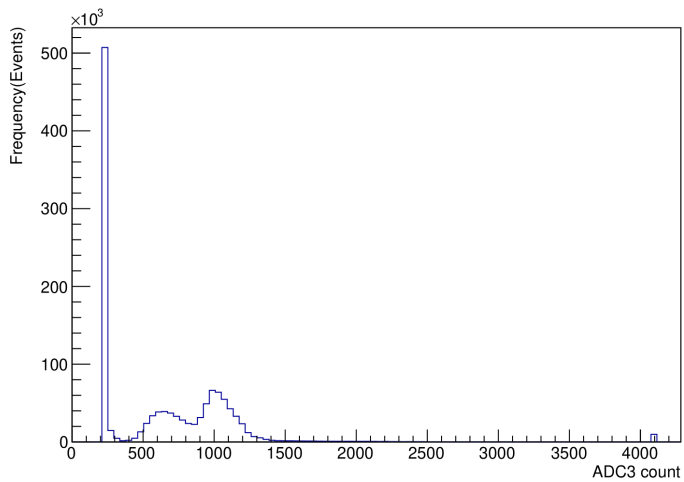
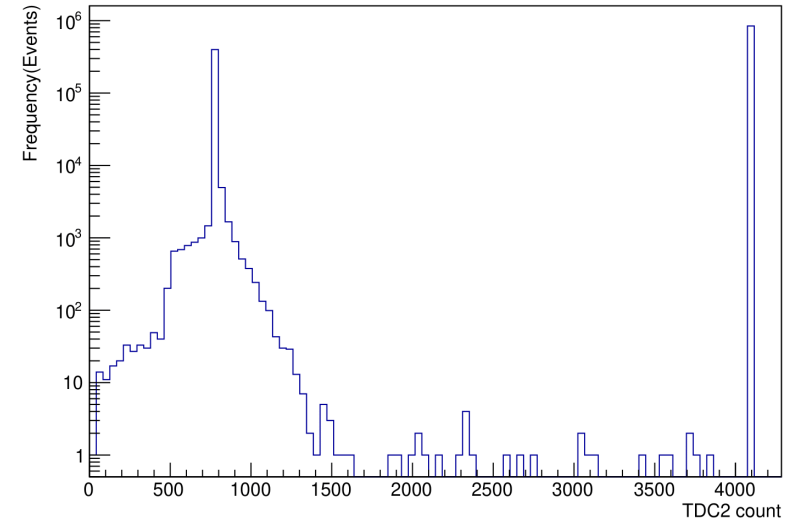
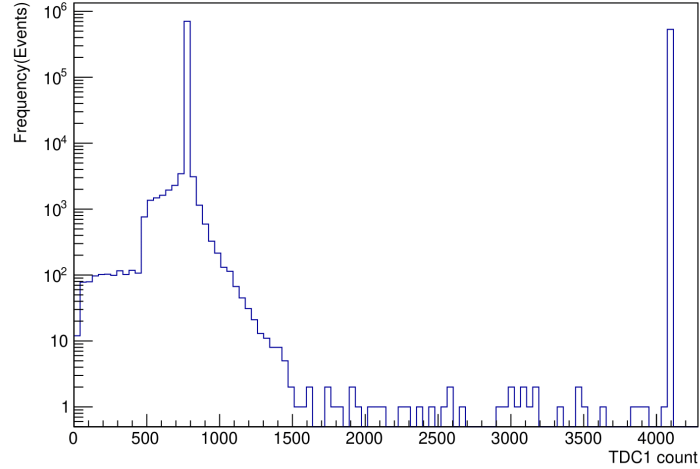
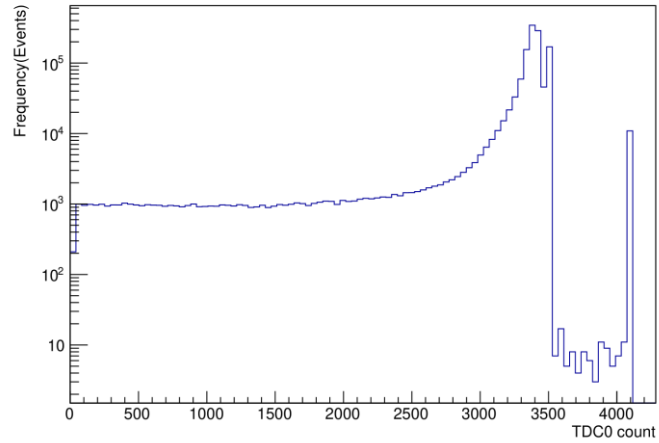


③既知のdelayを用いて寿命を間接的に測定

→関係の無い γ 線をシャットアウトし、精度向上

実験結果と解析

ADC, TDCの生データ



↑ TDC
← ADC

準備① TDC較正

TDC: START信号が入力されてからの時間を**デジタル値**で返す
→戻り値と実際の時間の対応関係を知る必要がある

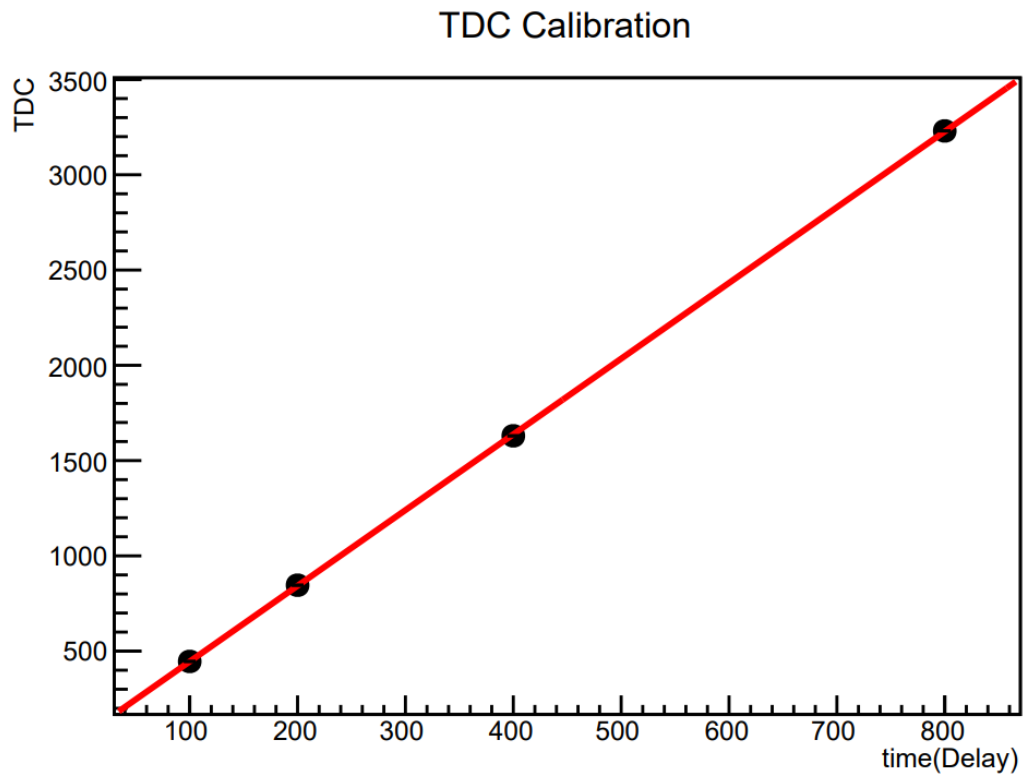
理想: $\text{TDC} = p_1 \times \text{Time} + p_0$ (p_0, p_1 は定数、これを求めたい)

<方法>

同時刻に発生させた2つのNIM信号の片方に100 ns, 200 ns, 400 ns, 800 nsのdelayをかけ、TDCでdelay分の時間を計測した。
それぞれ10000 個データを取ったのち、線形fittingをした。

準備① TDC較正

<結果>



Delay(ns)	TDC
100	$4.46e2 \pm 5.2e-3$
200	$8.46e2 \pm 5.0e-3$
400	$1.63e3 \pm 5.8e-3$
800	$3.23e3 \pm 6.2e-3$
各定数の計算値	
p_0	48.1
p_1	3.97

準備② ADC校正

ADC: 測定したエネルギーをデジタル値で返す

→戻り値と実際のエネルギーの対応関係を知る必要がある

理想: $ADC = p_1 \times Energy + p_0$ (p_0, p_1 は定数)

<方法>

ADCの3つのピークは、それぞれ0 keV, 511 keV, 1275 keV であると考えられる。3つのピーク近傍でGaussian fittingをし、得られた値を用いて線形fittingを行った。

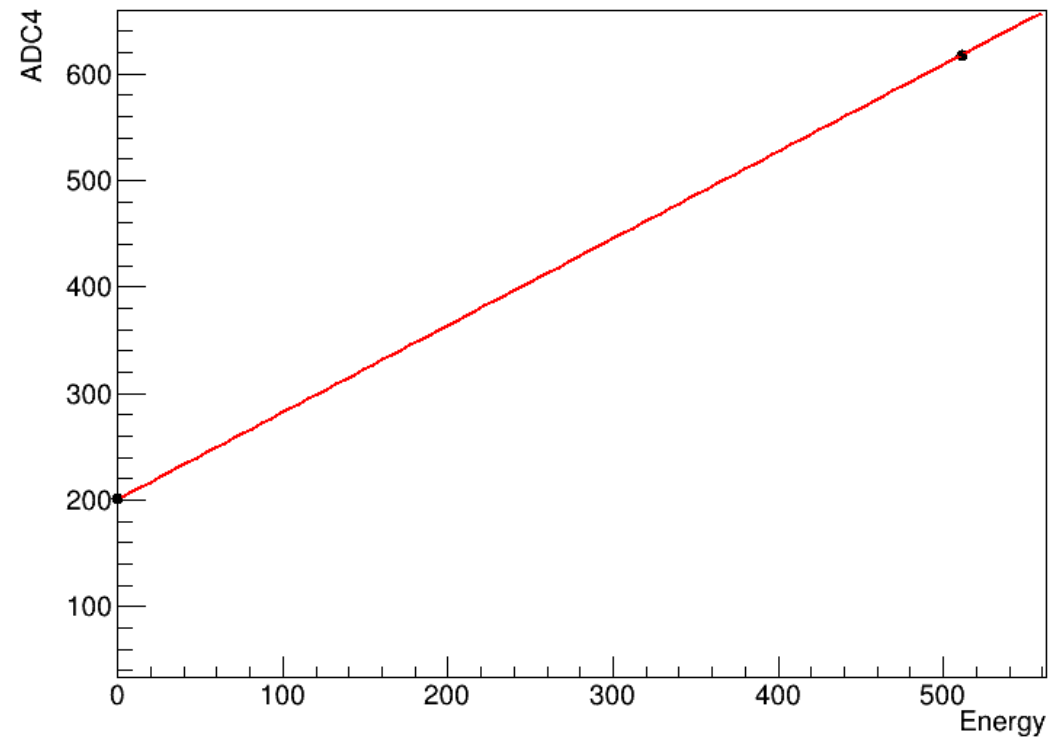
準備② ADC較正

<なぜピークのエネルギー値が推測できるか>

- 0 keV: 信号が来なくても電流は常に流れている→**最小値付近**
- 511 keV: **Psの崩壊 γ 線**のエネルギー
- 1275 keV: β 崩壊で残ったNeは励起状態
→**基底状態に戻る**時に放出するエネルギー

準備② ADC校正

<結果>



(例)ADC4の分割aの校正

準備② ADC較正

<結果>ADC countのピークの中心
ADC3

分割	0 keV	511 keV	分割	0 keV	511 keV
A	$2.46e2 \pm 5.9e-3$	$1.25e3 \pm 9.2e-1$	G	$2.46e2 \pm 4.8e-3$	$1.05e3 \pm 4.1e-1$
B	$2.46e2 \pm 5.6e-3$	$1.23e3 \pm 8.8e-1$	H	$2.46e2 \pm 4.7e-3$	$1.02e3 \pm 4.3e-1$
C	$2.47e2 \pm 1.5e-3$	$1.17e3 \pm 5.2e-1$	I	$2.45e2 \pm 5.2e-3$	$1.00e3 \pm 4.1e-1$
D	$2.45e2 \pm 4.8e-3$	$1.14e3 \pm 5.5e-1$	J	$2.45e2 \pm 4.7e-3$	$9.89e2 \pm 3.9e-1$
E	$2.48e2 \pm 1.3e-3$	$1.12e3 \pm 4.3e-1$	K	$2.45e2 \pm 4.6e-3$	$9.74e2 \pm 4.0e-1$
F	$2.48e2 \pm 1.5e-3$	$1.07e2 \pm 4.4e-1$	L	$2.45e2 \pm 4.4e-3$	$9.55e2 \pm 3.3e-1$

準備② ADC較正

<結果>ADC countのピークを中心
ADC4

分割	0 keV	511 keV
A	$2.01e2 \pm 2.0e-2$	$6.18e2 \pm 1.6e-1$
B	$2.03e2 \pm 1.8e-2$	$6.11e2 \pm 1.6e-1$
C	$1.99e2 \pm 2.5e-2$	$6.03e2 \pm 2.1e-1$
D	$1.99e2 \pm 3.6e-2$	$5.96e2 \pm 1.7e-1$
E	$1.99e2 \pm 1.2e-1$	$5.92e2 \pm 8.1e-1$

準備② ADC校正

<結果>ADC校正時のfittingパラメータ
ADC3

分割	p_0	p_1
A	$2.46e2 \pm 5.9e-3$	$1.97 \pm 1.8e-3$
B	$2.46e2 \pm 5.6e-3$	$1.91 \pm 1.7e-3$
C	$2.47e2 \pm 1.5e-3$	$1.80 \pm 1.0e-3$
D	$2.45e2 \pm 4.8e-3$	$1.75 \pm 1.1e-3$
E	$2.48e2 \pm 1.3e-3$	$1.71 \pm 8.4e-4$
F	$2.48e2 \pm 1.5e-3$	$1.61 \pm 8.5e-4$

分割	p_0	p_1
G	$2.46e2 \pm 4.8e-3$	$1.57 \pm 7.9e-4$
H	$2.46e2 \pm 4.7e-3$	$1.53 \pm 8.4e-4$
I	$2.45e2 \pm 5.2e-3$	$1.49 \pm 7.9e-4$
J	$2.45e2 \pm 4.7e-3$	$1.45 \pm 7.6e-4$
K	$2.45e2 \pm 4.6e-3$	$1.42 \pm 7.8e-4$
L	$2.45e2 \pm 4.4e-3$	$1.39 \pm 6.5e-4$

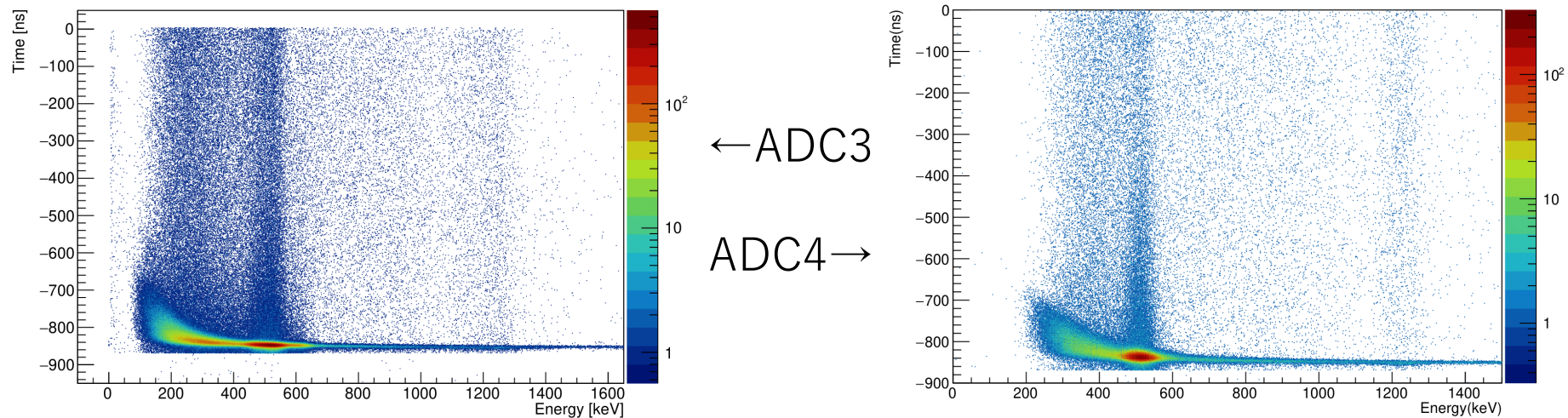
準備②

<結果>ADC較正時のfittingパラメータ
ADC4

分割	p_0	p_1
A	$2.01e2 \pm 2.0e-2$	$8.16e-1 \pm 3.1e-4$
B	$2.03e2 \pm 1.8e-2$	$7.98e-1 \pm 3.2e-4$
C	$1.99e2 \pm 2.5e-2$	$7.90e-1 \pm 3.1e-4$
D	$1.99e2 \pm 3.6e-2$	$7.77e-1 \pm 3.5e-4$
E	$1.99e2 \pm 1.2e-1$	$7.70e-1 \pm 1.6e-3$

Time-Energy分布

TDC, ADC較正の結果、時間とエネルギーの分布が分かった。



早い時間帯に多くのイベント

→ ²²Naからの直接 γ 線、p-Psの崩壊、コンプトン散乱

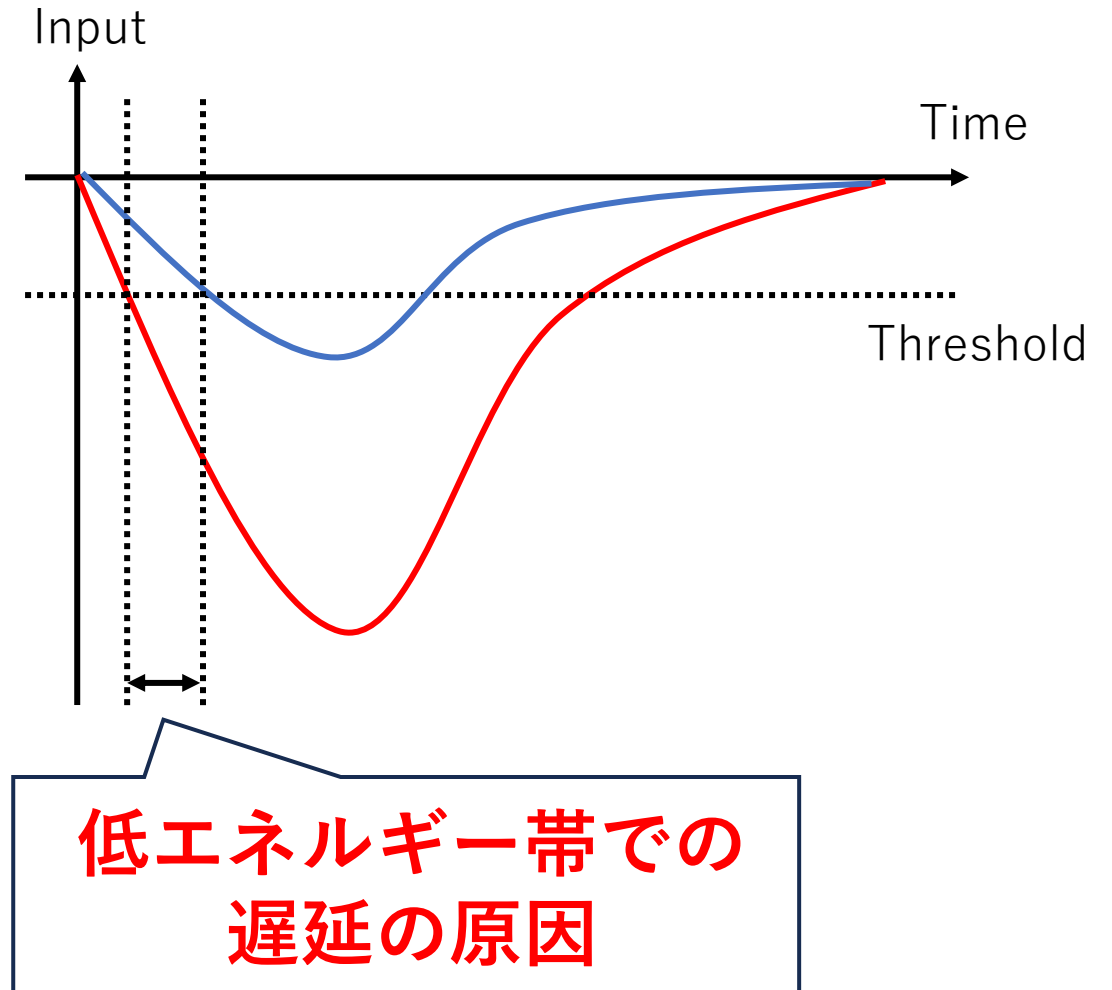
ほぼ同時刻に起こるはずだが、低エネルギー帯で遅延がある

TQ補正

エネルギーによって波高が異なる
→各エネルギーに対して
時間0からのずれ $\Delta T(E)$ を
求める必要がある

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

($p_0 \sim p_3$ は定数)



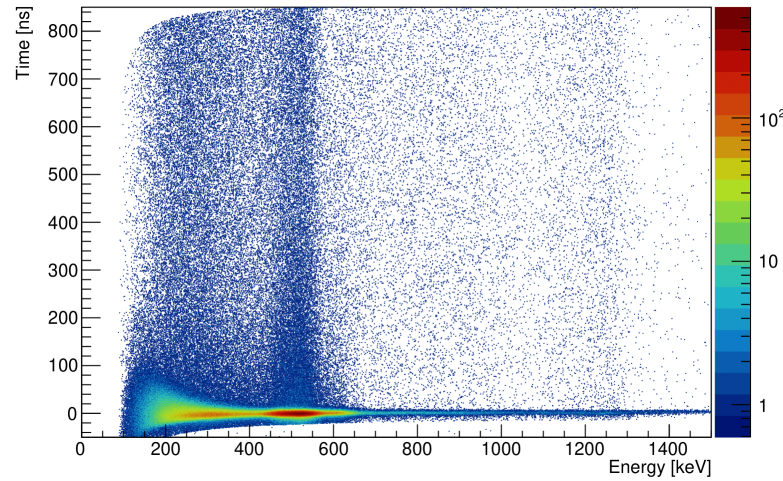
TQ補正

<方法>

1. 20 keVごとに ± 5 keVの幅をとってTimeを抽出し、Gaussian Fittingを行った。
2. それぞれのエネルギーについてmeanを代表値として採用した。
3. 得られた値の組を先述のTQ補正関数を用いてFittingを行った。
4. 各エネルギーに対して新しく時間を $t_{\text{new}} = \text{Time} - \Delta T(E)$ として定義しなおした。

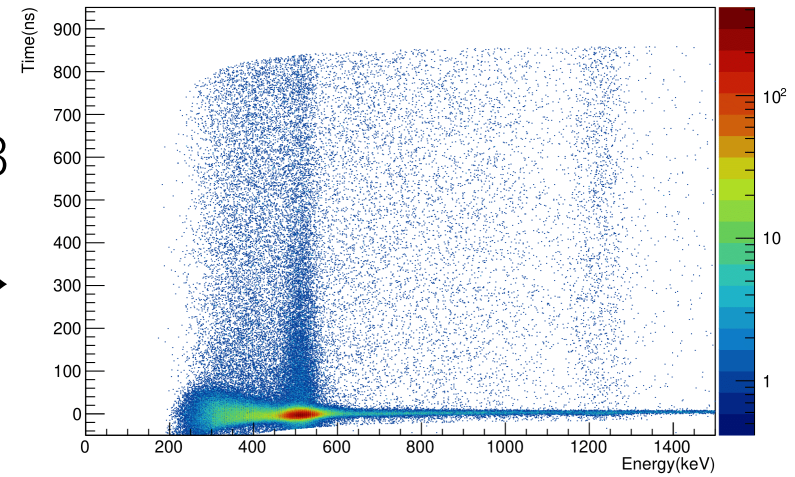
TQ補正

<結果



←ADC3

ADC4→



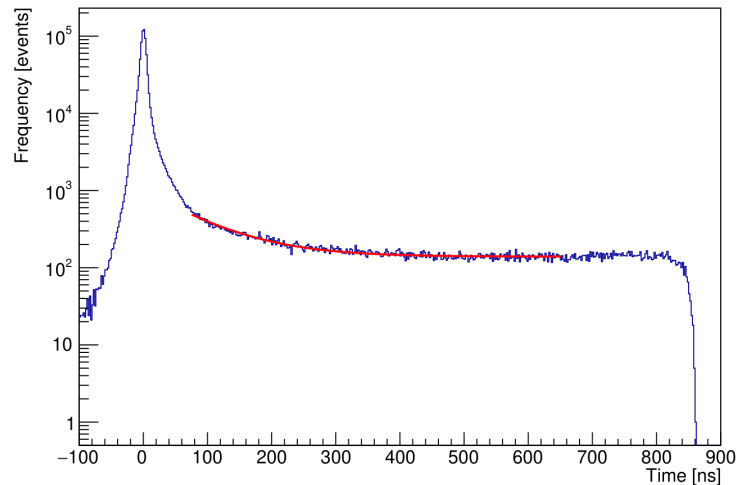
ADC	p_0	p_1	p_2	p_3
ADC3	$7.65e3 \pm 1.94e3$	$6.81e1 \pm 6.3$	$1.04 \pm 5.5e-2$	$-8.61e2 \pm 2$
ADC4	$5.14e4 \pm 6.9e3$	$1.22e2 \pm 1.3e1$	$1.28 \pm 3.3e-2$	$-8.60e2 \pm 2.6$

TQ補正後の寿命

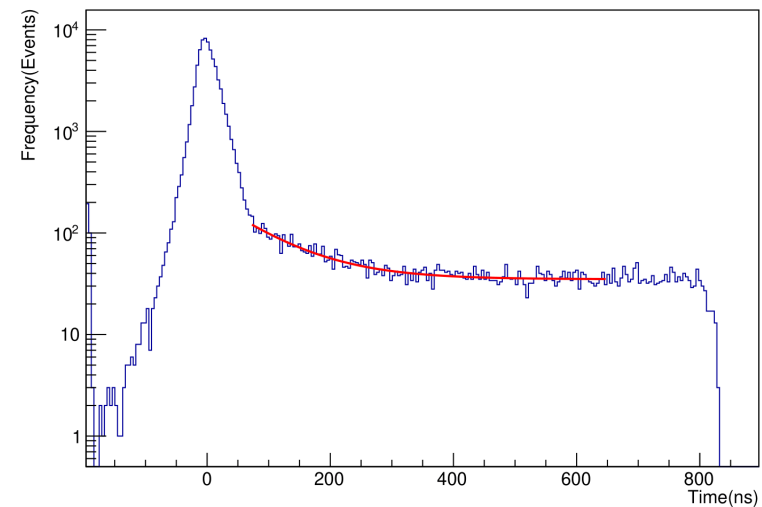
ここでイベント分布を以下の関数でFittingした;

$$p_0 \exp\left(-\frac{t[\text{ns}]}{p_1}\right) + p_2 \quad (p_0 \sim p_2 \text{は定数})$$

→寿命は p_1 [ns]として与えられる



ADC3



ADC4

TQ補正後の寿命

<結果>fittingパラメータ

ADC	p_0	p_1	p_2
ADC3	$7.40e2 \pm 2.6e1$	$8.96e1 \pm 2.4$	$1.38e2 \pm 1$
ADC4	$1.90e2 \pm 1.8e1$	$9.13e1 \pm 6.6$	$3.50e1 \pm 8.7e-1$

TQ補正からの帰結

いずれのNaIにおいても求めた寿命は理論値より小さい
→Pick-off反応による一部の 2γ 崩壊を加味していないから

[3種類の 2γ 崩壊パターン]

- ①Pick-off反応: o- P_s の陽電子が周囲の物質の電子と対消滅
- ②スピン交換反応: 周囲の物質の電子とo- P_s が衝突して、
スピン交換が起こりp- P_s に変化
- ③化学反応: o- P_s の電子が奪われ、残った陽電子が対消滅

以後まとめて
Pick-off反応と呼ぶ

Pick-off補正

<仮定>

p-Psの崩壊とそのコンプトン散乱の割合(=A)は、
o-Psの崩壊とPick-off反応のコンプトン散乱の割合と等しく一定

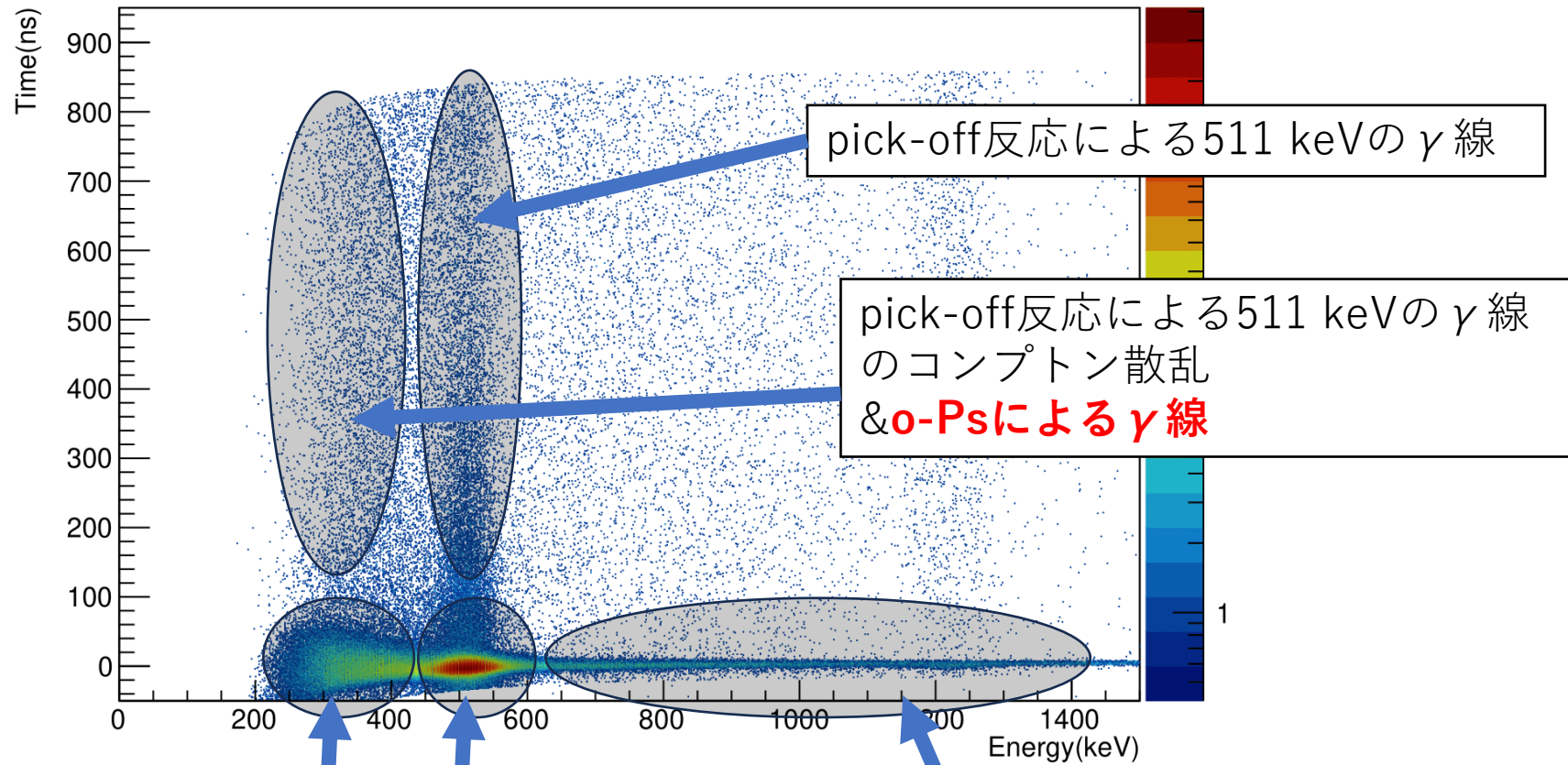


$(o\text{-Psの崩壊}) = (\text{Pick-off含めた}o\text{-Psの崩壊}) - (A) \times (\text{Pick-off})$

としてo-Psの 3γ 崩壊のみを抽出できる

※次のスライドのグラフ参照

Pick-off補正 イベントの分類



p-Psによる511 keVの γ 線、コンプトン散乱

pick-off反応による511 keVの γ 線

pick-off反応による511 keVの γ 線のコンプトン散乱
& o-Psによる γ 線

1275 keVの γ 線、コンプトン散乱

Pick-off補正

一般に、 $N(t)$: 粒子数 Γ : 崩壊幅 (寿命の逆数) を用いて

$\frac{dN(t)}{dt} = -\Gamma N(t)$ と書ける。 $g(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$ は **イベント数** として測定可。

$N_{3\gamma}(t)$: 3γ 崩壊した粒子数 $\Gamma_{3\gamma}$: o- Ps の 3γ 崩壊の崩壊幅 (定数)

$N_{2\gamma}(t)$: 2γ 崩壊した粒子数 $\Gamma_{2\gamma}$: Pick-off反応の崩壊幅

について、

$N_{3\gamma}(t) = \Gamma_{3\gamma}N(t)$, $N_{2\gamma}(t) = \Gamma_{2\gamma}N(t)$ が成立。

Pick-off補正

$S(t)$: 511 keV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 を用いて、

$$\left. \begin{aligned} \bullet N_{2\gamma}(t) &= \frac{S(0)}{y(0)} y(t) \\ \bullet N_{3\gamma}(t) &= S(t) - \frac{S(0)}{y(0)} y(t) \end{aligned} \right\} \frac{N_{2\gamma}(t)}{N_{3\gamma}(t)} = \frac{\Gamma_{2\gamma} N(t)}{\Gamma_{3\gamma} N(t)} = \frac{\Gamma_{2\gamma}}{\Gamma_{3\gamma}} = f(t) \text{ とおく。}$$

$$\rightarrow g(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = (\Gamma_{2\gamma} + \Gamma_{3\gamma})N(t) = \Gamma_{3\gamma}(1 + f(t))N(t) \quad (*)$$

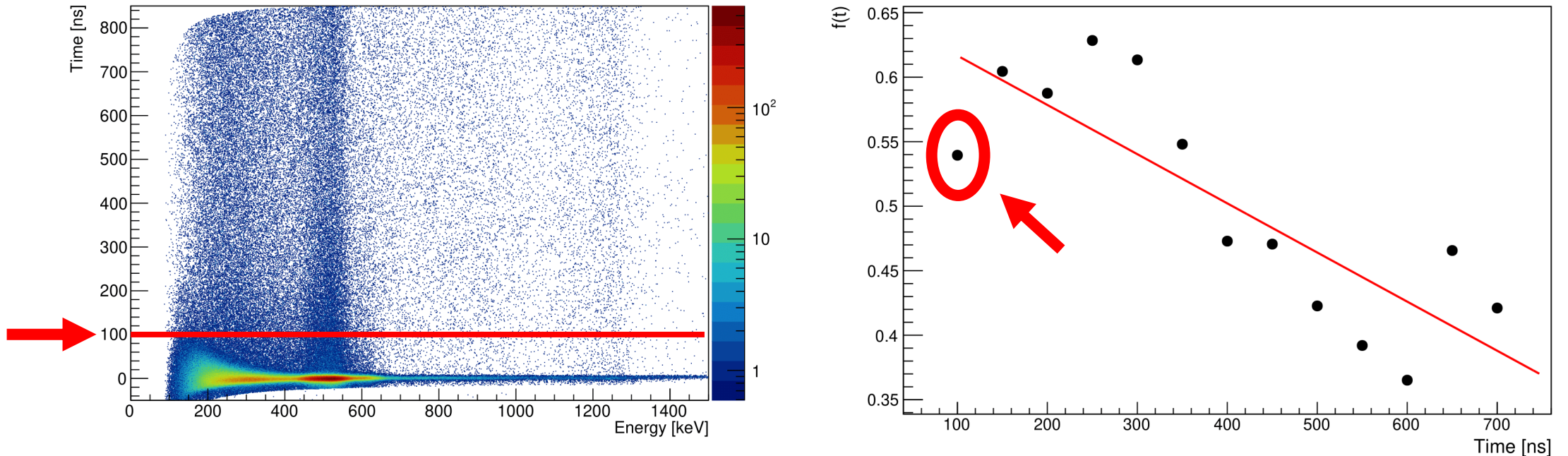
より寿命が分かる

Pick-off補正

<方法：前半>

1. 100 nsから700 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した。
2. 511 keVのピーク付近でGaussian Fittingを行い、そのmeanを $y(t)$ とした。
3. 0 keVから450 keVまでのイベント数を同様に数え、 $S(t)$ とした。
4. 0 nsについても同様に $y(0), S(0)$ を求めた。
5. 得た値の組をplotし、Fitting関数 $p_0 \exp\left(-\frac{t[\text{ns}]}{p_1}\right) + p_2$ を用いて $f(t)$ を求めた。

NaI1のpick-off補正のfitting範囲について

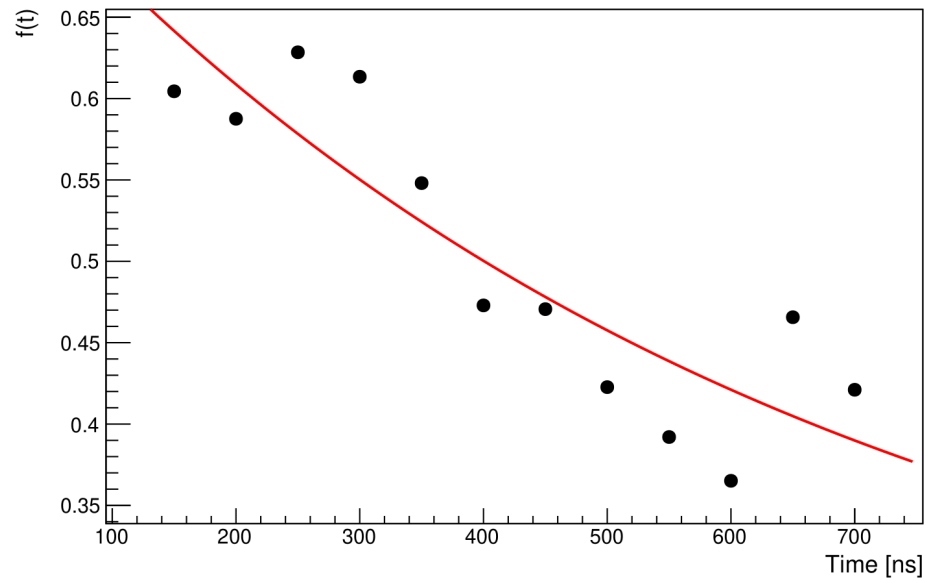


0 nsに来るはずのp- Ps の崩壊が低エネルギー領域では時間的な広がりを持っている。

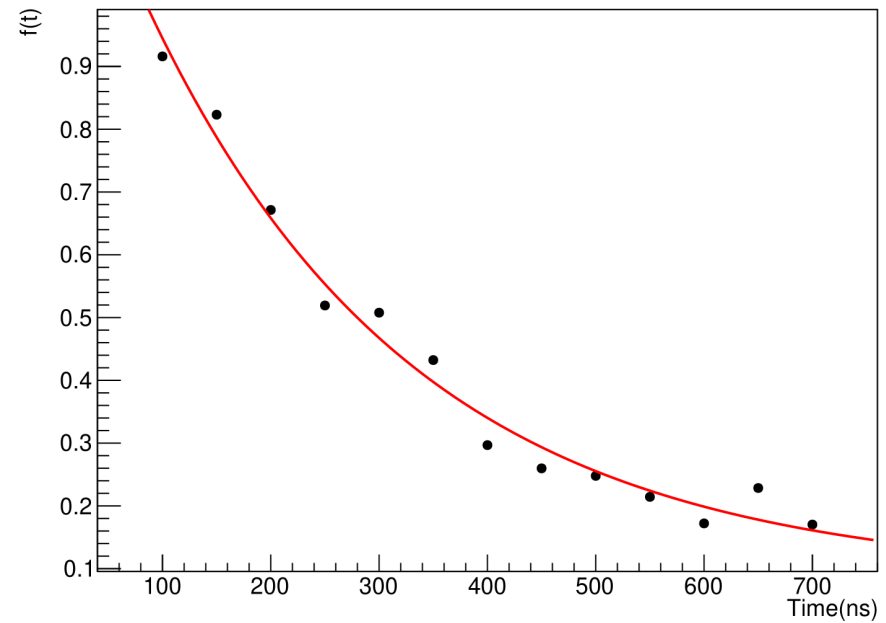
100 nsではこれがpick-off補正の際の450 keV以下のイベント数に混入しているのでこれを取り除いてfittingを行った。

Pick-off補正

<結果：前半> $f(t)$ を求めるfitting



ADC3



ADC4

Pick-off補正

- <結果：前半> $f(t)$ を求める fitting パラメータ

ADC	p_0	p_1	p_2
ADC3	$1.60 \pm 2.3e-1$	$4.11e2 \pm 2.53e2$	$4.45e-1 \pm 3.79e-1$
ADC4	$1.42 \pm 2.3e-1$	$2.02e2 \pm 3.8e1$	$1.28e-1 \pm 3.3e-2$

Pick-off補正

<方法：後半>

(*)を解いて $f(t)$ のFitting関数を代入すると、

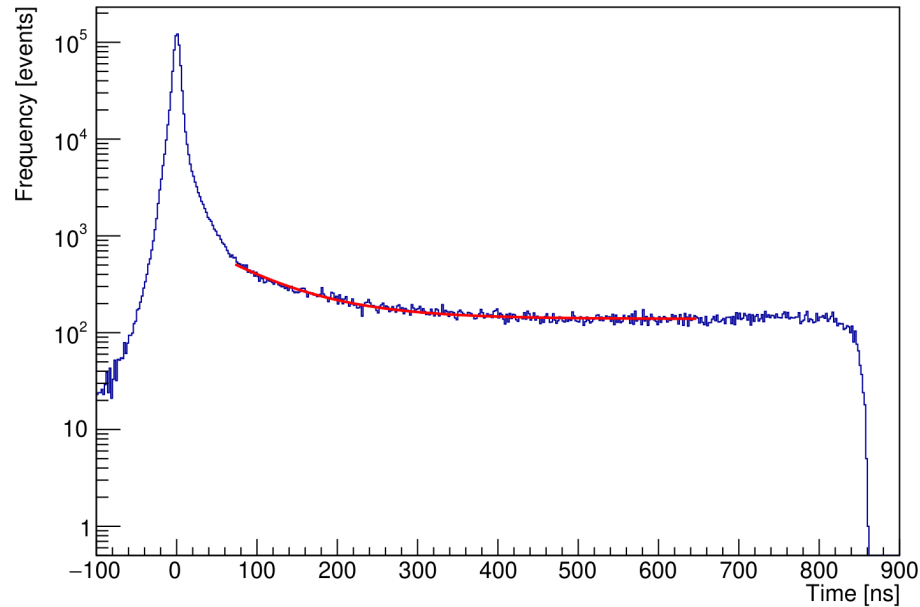
$$g(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = q_0 \left(1 + p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + p_2 \right) \\ \times \exp\left[-\frac{1}{q_1} \left(-p_0 p_1 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right) + (1 + p_2)t \right) \right] + q_2$$

となる。

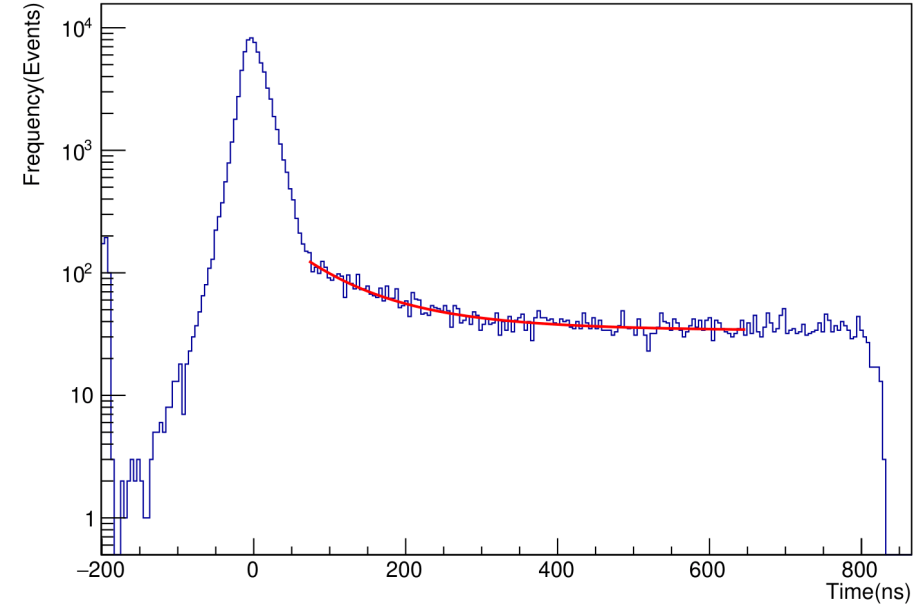
全イベント数のグラフをこの関数でFittingし、 $q_0 \sim q_2$ を求めた。
このうち、 q_1 がo-PSの寿命として得られる。

Pick-off補正

<結果：後半> $g(t)$ を求めるfitting(下限70 ns, 上限650 ns)



ADC3



ADC4

Pick-off補正

<結果：後半> $g(t)$ のfittingパラメータ(下限70 ns, 上限650 ns)

ADC	q_0	q_1	q_2
ADC3	$2.11e1 \pm 9e-1$	$2.56e2 \pm 8$	$1.36e2 \pm 1$
ADC4	$2.41e1 \pm 1.1$	$2.05e2 \pm 1.9e1$	$3.36e1 \pm 1.1$

o- P_s の寿命

考察

fitting範囲

fitting範囲の下限を変えて何度かfittingを行ったところ寿命の値に大きな違いが出た

NaI1

fittingの下限[ns]	寿命[ns]	誤差[ns]
40	161	3
50	201	4
60	232	6
70	255	8
80	270	9
90	278	10
100	282	12
110	280	13

NaI3

fittingの下限[ns]	寿命[ns]	誤差[ns]
40	121	8.0
50	121	8.0
60	170	12
70	205	19
80	206	20
90	195	20
100	201	24
110	191	24

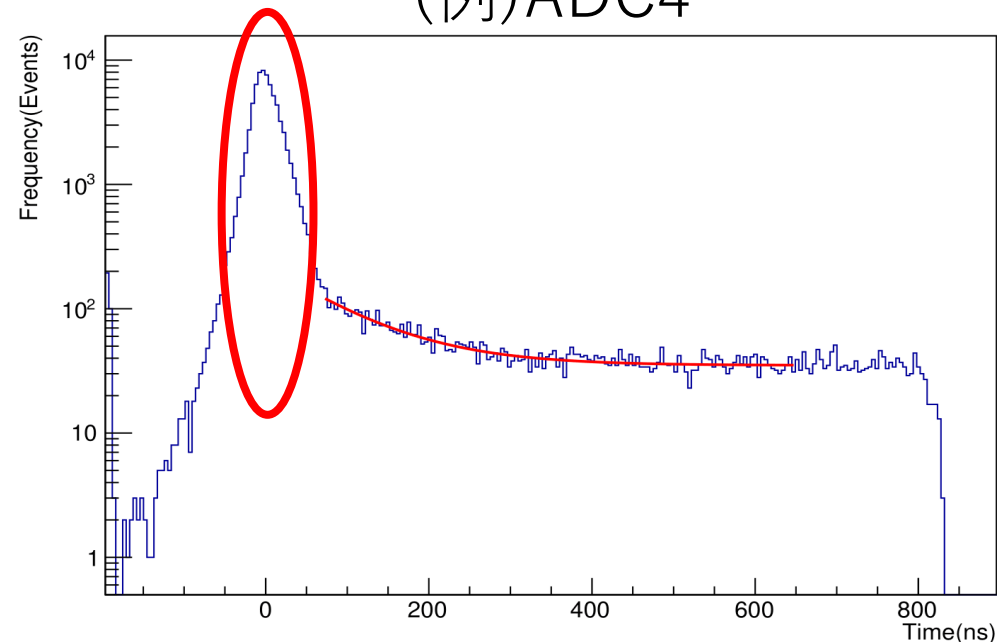
fitting範囲

本来はfitting範囲を変えても寿命は変わらないはずだが実際には大きな違いが出ている

特にfittingの下限を下げすぎると寿命が極端に短くなっている

(例)ADC4

本来はfittingに不要なp-PSの崩壊によるイベントもfittingしてしまっただけ寿命が短くなっている
⇒fitting範囲を下げすぎるとよくない



誤差の評価

上で考えていた誤差は最後のfittingの誤差 σ_{fit} のみによるもの
今回の解析では複数のfittingを行っておりそれぞれの誤差の影響
を考える必要がある

TQ補正による誤差 σ_{TQ} , pick-off補正による誤差 σ_{po} 及び最後の寿命fittingによる誤差 σ_{fit} がそれぞれ独立だとして

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{TQ}^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma_{fit}^2}$$

により誤差を求める

誤差の評価

パラメータ p_i の誤差 σ_{p_i} によるfitting関数 $f(t)$ の誤差 σ_f はそれぞれのパラメータが独立だとすると

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

となる

$f_{\pm} = f \pm \sigma_f$ を用いてfittingをし直し寿命 τ_{\pm} を求めfitting関数 f による寿命の誤差を

$\sigma = \max(|\tau_+ - \tau|, |\tau_- - \tau|)$ と定義する

TQ補正による誤差

TQ補正関数 $\Delta T(E) = \frac{p_0}{(E[\text{keV}] - p_1)^{p_2}} + p_3$ の各パラメータによる誤差

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial p_0} \sigma_{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial p_1} \sigma_{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial p_2} \sigma_{p_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial p_3} \sigma_{p_3}\right)^2}$$

を求め

$t = \text{Time} - \Delta T \pm \sigma_{\Delta T}$ として寿命 τ_{\pm} を求め

$\sigma_{TQ} = \max(|\tau_+ - \tau|, |\tau_- - \tau|)$ とする

TQ補正による誤差

NaI1

fittingの下限[ns]	τ [ns]	τ_+ [ns]	τ_- [ns]	σ_{TQ} [ns]
40	161	87	234	74
50	201	106	255	95
60	232	133	273	100
70	256	160	271	95
80	270	185	267	86
90	278	200	272	78
100	282	221	274	62
110	280	237	276	43

TQ補正による誤差

NaI3

fittingの下限[ns]	τ [ns]	τ_+ [ns]	τ_- [ns]	σ_{TQ} [ns]
40	56.7	40.9	168	111.2
50	121	40	199	81
60	170	57	216	114
70	205	156	206	50
80	206	171	199	35
90	195	171	201	24
100	201	172	193	30
110	191	180	198	11

Pick-off補正による誤差

pick-off補正関数 $f(t) = p_0 \exp\left(-\frac{t[\text{ns}]}{p_1}\right) + p_2$ のパラメータ p_i の誤差が寿命fittingに与える誤差

$$\sigma_g(t) = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial p_0} \sigma_{p_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial p_1} \sigma_{p_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial p_2} \sigma_{p_2}\right)^2}$$

$g_{\pm}(t) = g(t) \pm \sigma_g(t)$ を用いて寿命fittingを行い寿命 τ_{\pm} を求め

$\sigma_{p_0} = \max(|\tau_+ - \tau|, |\tau_- - \tau|)$ とする

Pick-off補正による誤差

NaI1

fittingの下限[ns]	τ [ns]	τ_+ [ns]	τ_- [ns]	σ_{po} [ns]
40	161	162	164	3
50	201	204	207	7
60	232	236	244	12
70	256	260	275	19
80	270	275	297	27
90	278	284	313	35
100	282	289	327	45
110	280	287	329	50

Pick-off補正による誤差

NaI3

fittingの下限[ns]	τ [ns]	τ_+ [ns]	τ_- [ns]	σ_{po} [ns]
40	56.7	58.3	92.8	36.1
50	121	127	107	14
60	170	179	150	21
70	205	216	182	23
80	206	217	182	23
90	195	205	172	23
100	201	213	178	24
110	191	202	168	23

誤差のまとめ

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{TQ}^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma_{fit}^2}$$

NaI1

fittingの下限[ns]	τ [ns]	σ_{total} [ns]
40	161	74
50	201	95
60	232	101
70	256	97
80	270	90
90	278	85
100	282	76
110	280	66

NaI3

fittingの下限[ns]	τ [ns]	σ_{total} [ns]
40	56.7	117.1
50	121	83
60	170	116
70	205	58
80	206	47
90	195	39
100	201	45
110	191	35

寿命が理論値より長くなった理由

- 1275 keVに由来するバックグラウンドノイズによって、イベント分布に変化が生じた
- Pick-off補正の $f(t)$ のGaussian fittingが、特に遅い時間帯で上手くいかなかった
- シリカパウダー内をあまり真空に近づけることができなかったため、Pick-off反応のイベント数が増え、Pick-off補正の精度が低下した

結論

結論

今回の実験では、理論値は誤差範囲内にすべては入らなかった。
その理由は考察で挙げたようなものが考えられる。

NaI1

fittingの下限[ns]	τ [ns]	σ_{total} [ns]
40	161	74
50	201	95
60	232	101
70	256	97
80	270	90
90	278	85
100	282	76
110	280	66

NaI3

fittingの下限[ns]	τ [ns]	σ_{total} [ns]
40	56.7	117.1
50	121	83
60	170	116
70	205	58
80	206	47
90	195	39
100	201	45
110	191	35

参考文献

- 過去の課題演習A2のレポート(特に2021年度後期)