



オルソポジトロニウムの寿命 測定によるQEDの実験的検証

A2課題演習 2016年度前期

奥野友則 小田川高大 徳宿光子 増井陸 天野雄輝

+

第一章

イントロダクション

+ ポジトロニウムについて

- ポジトロニウム(Ps)とは電子と陽電子が電氣的に束縛され対になったある種の原子のようなもの。
- Psは2つのフェルミ粒子の複合系。
- 三重項に対応するPsをオルソポジトロニウム(o-Ps)、一重項に対応するPsをパラポジトロニウム(p-Ps)という。

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle + |-+\rangle)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle - |-+\rangle)$$

+ 実験の目的

- QED(量子電磁力学)の基本的な反応である電子陽電子の対消滅について、特にオルソポジトロニウムの場合に、平均寿命を測定し理論値との比較・検討を行う。



+ 第二章 理論

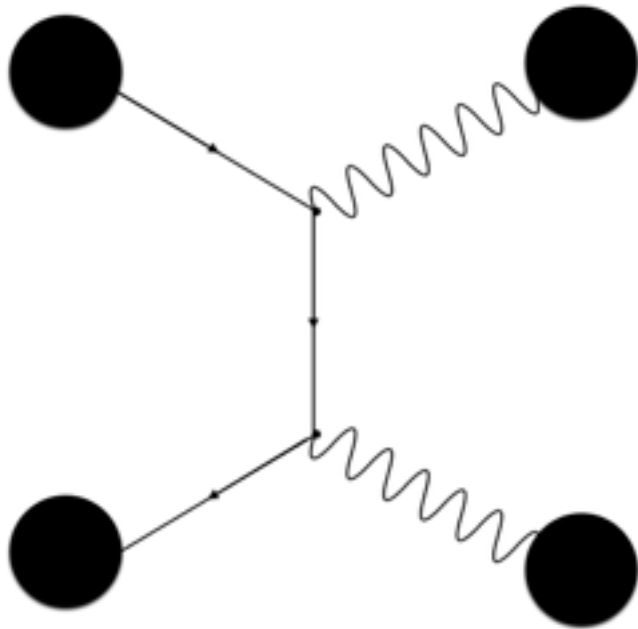


図 p-Psのファインマン図

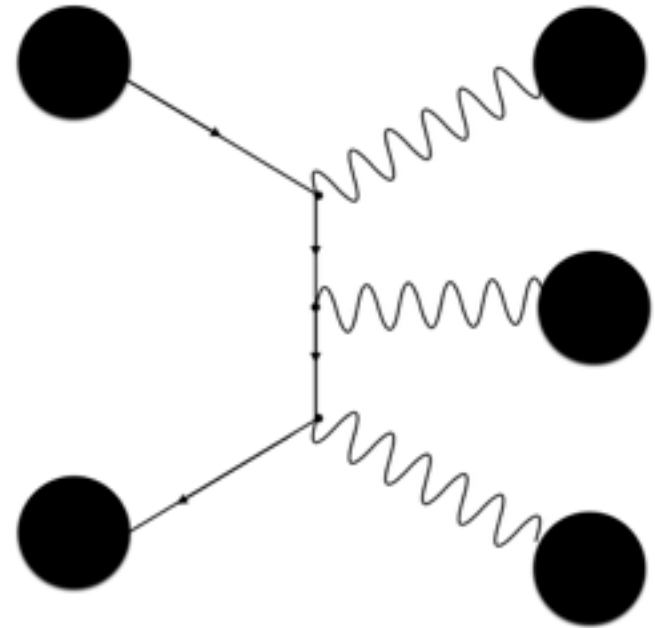


図 o-Psのファインマン図

Ps : スピン状態によって崩壊過程が異なる。

p-Ps(singlet)

偶数光子に崩壊(主に2光子に崩壊)

寿命の理論値 1.25×10^{-10} [sec]

o-Ps(triplet)

奇数光子に崩壊(主に3光子に崩壊)

寿命の理論値 1.39×10^{-7} [sec]



+ 第三章 実験

+現象

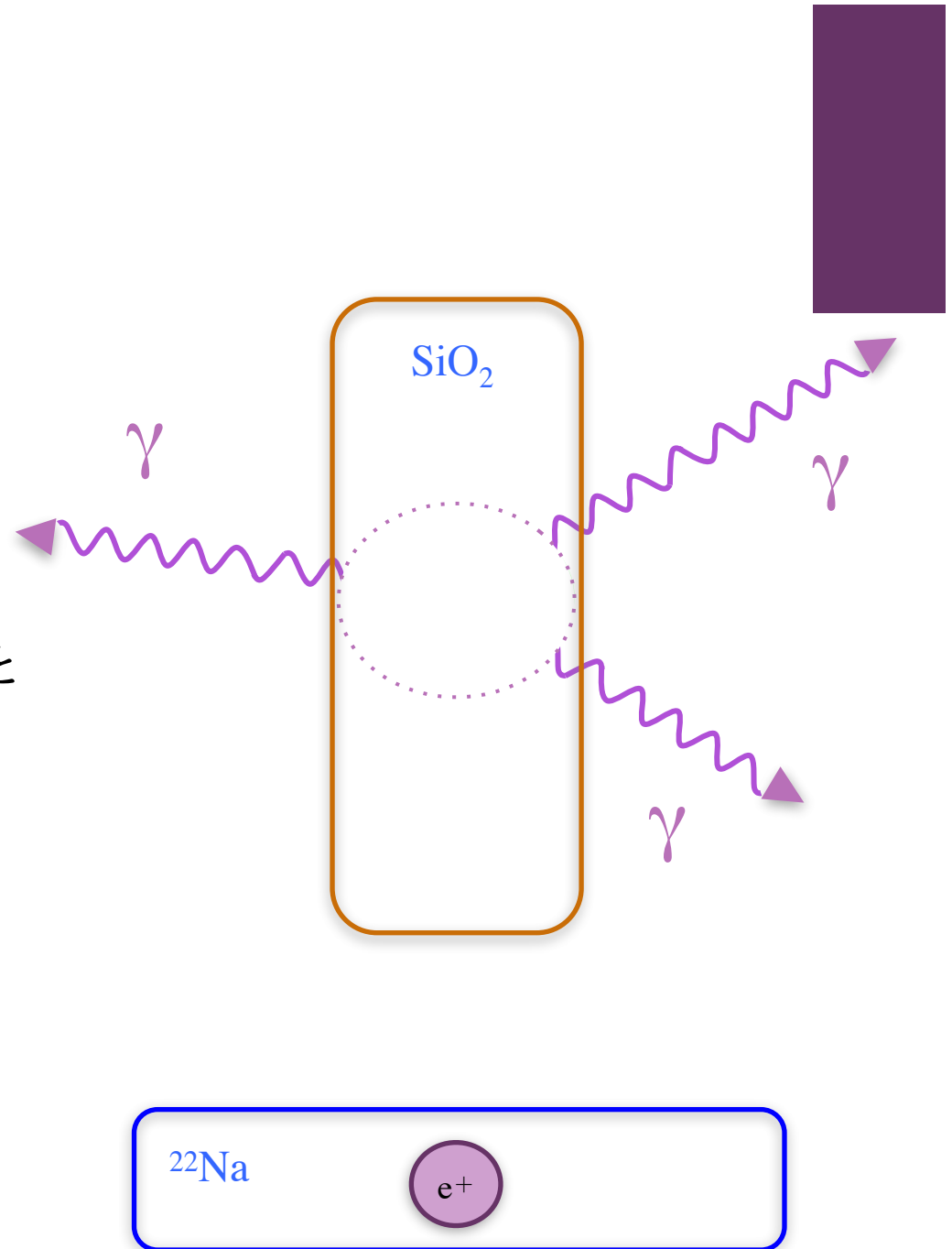
^{22}Na の β^+ 崩壊によって
陽電子 e^+ が放射される



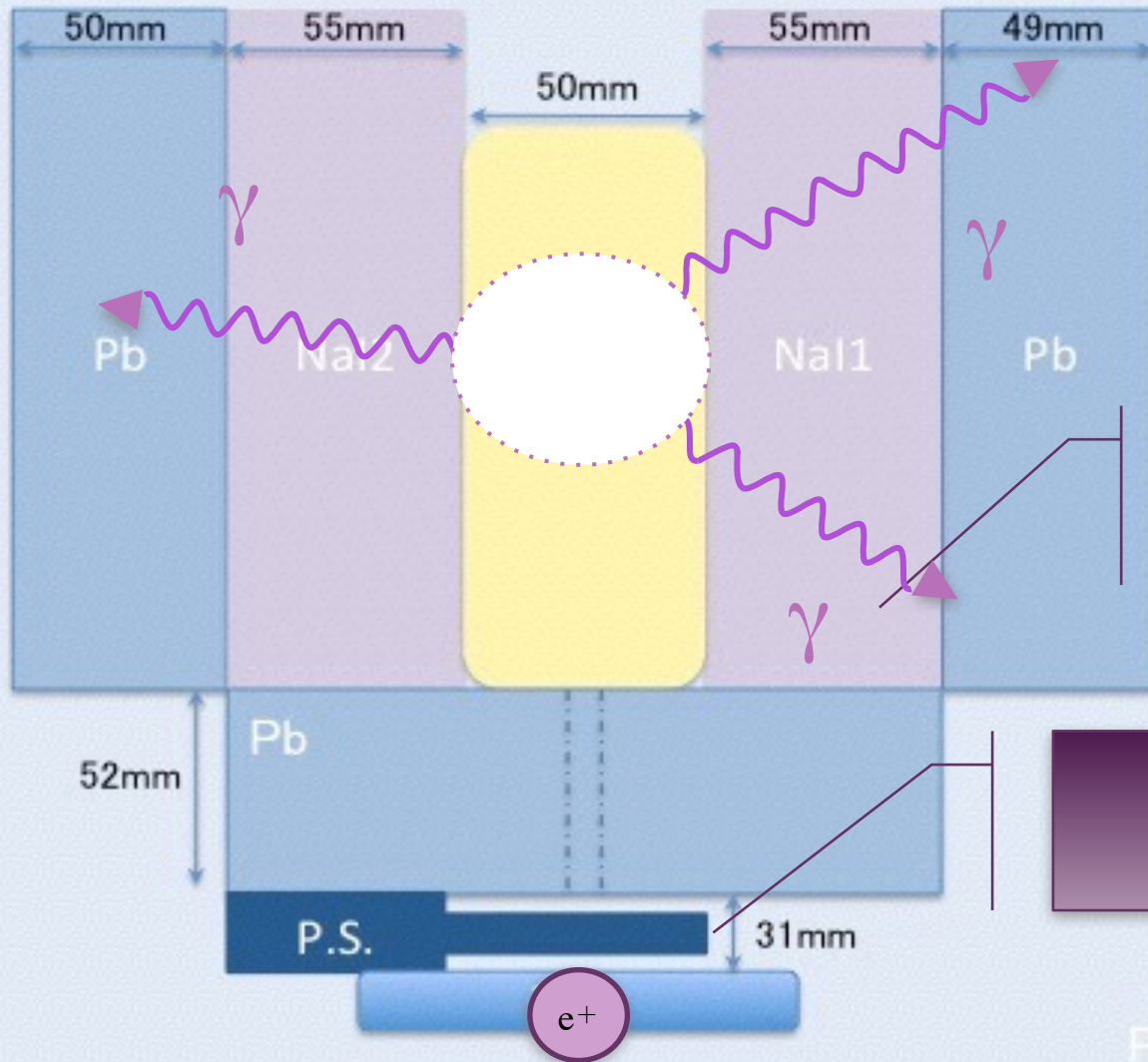
シリカパウダー(SiO_2)内の電子 e^- と
ポジトロニウムPsを形成



崩壊して γ 線が放出される



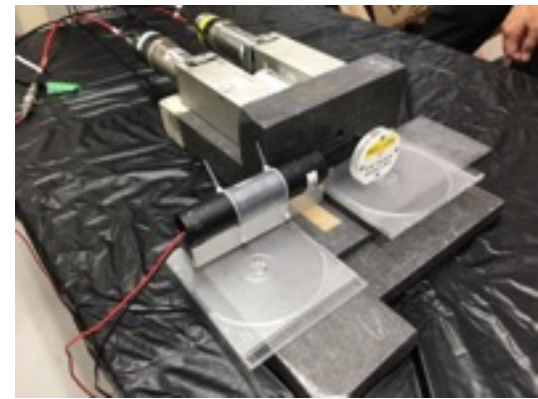
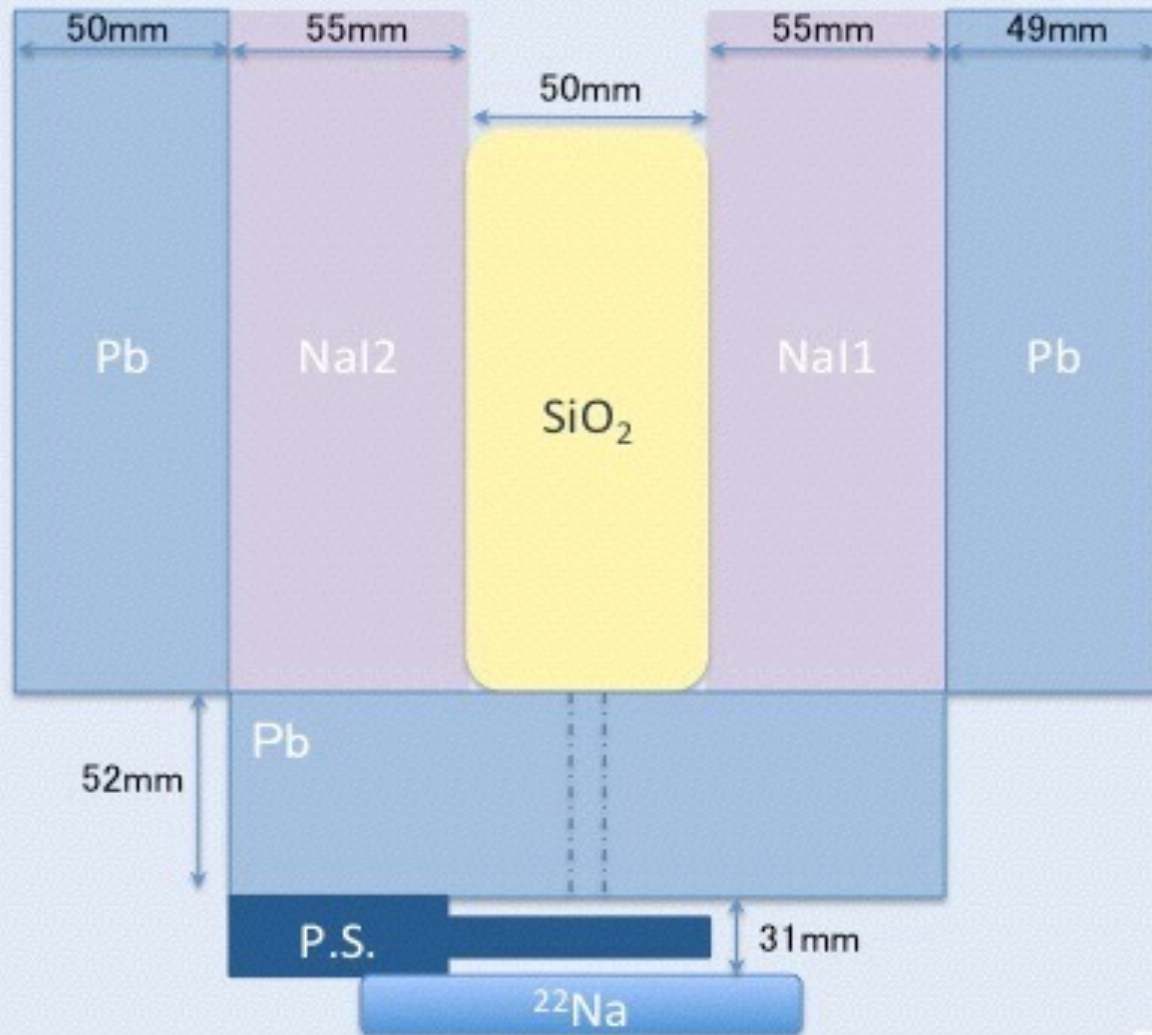
+ セットアップの模式図



崩壊時刻とする

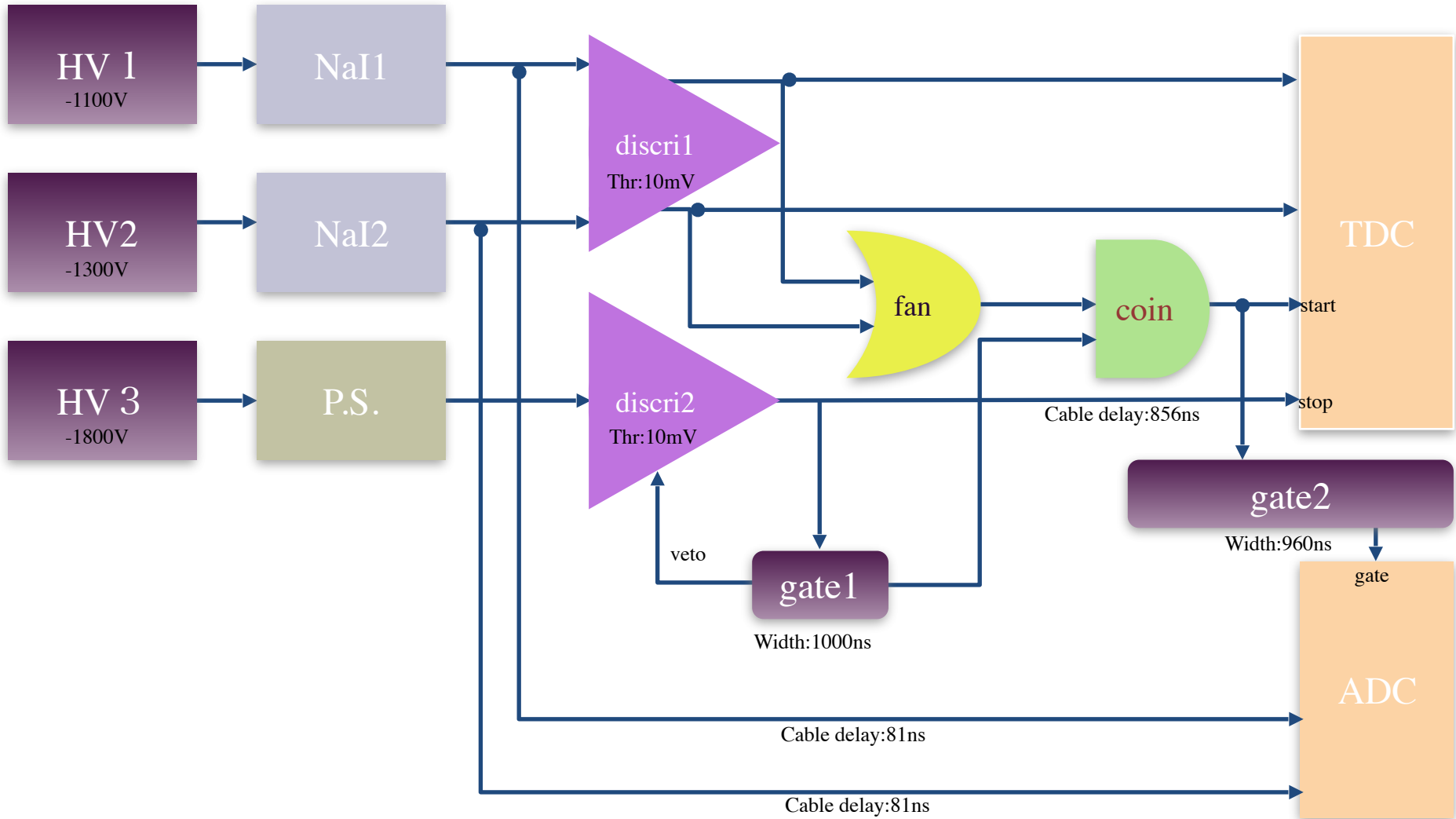
Psができた時刻とする

+ セットアップの模式図

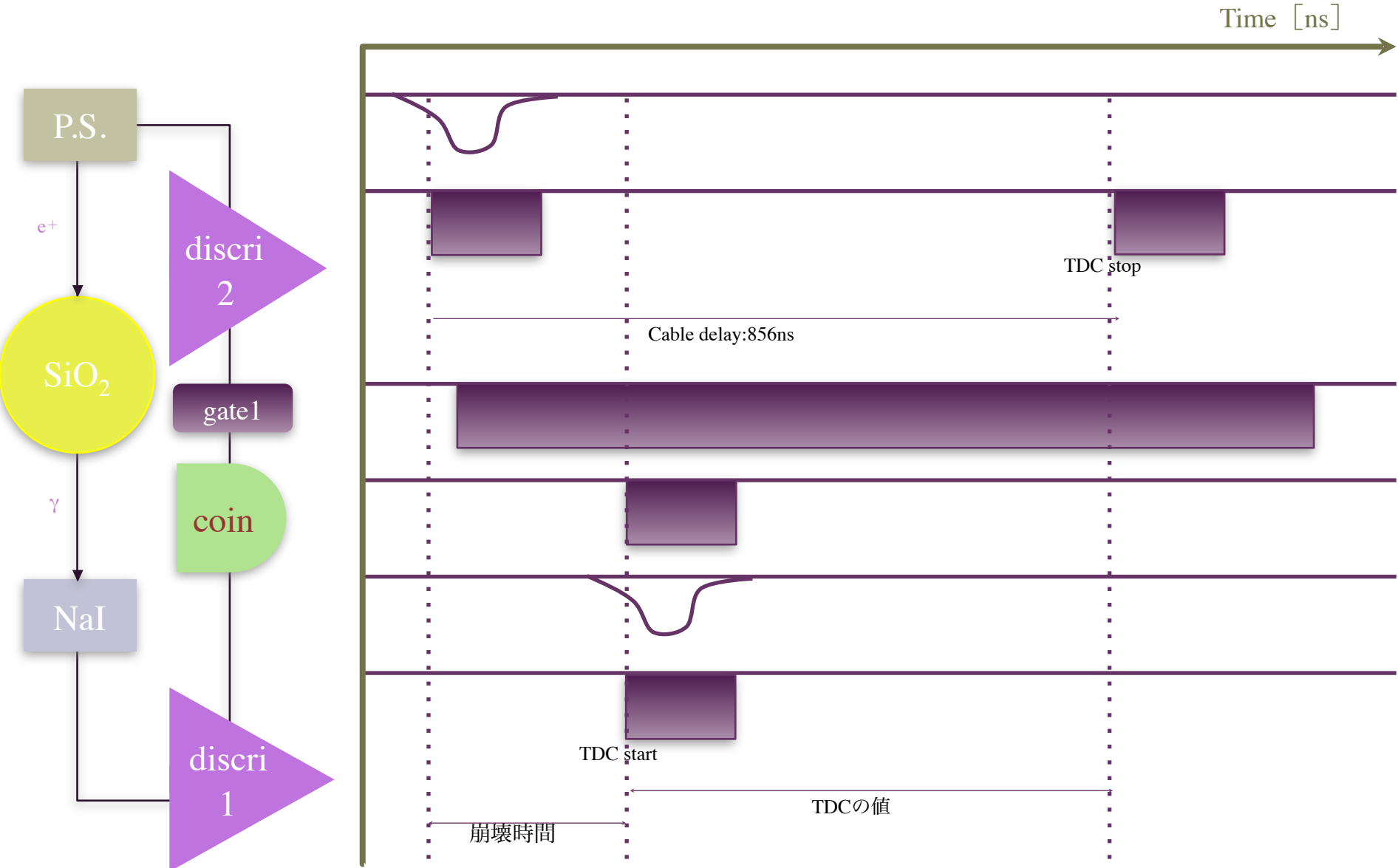


Pb

測定に用いた回路



信号の概念図



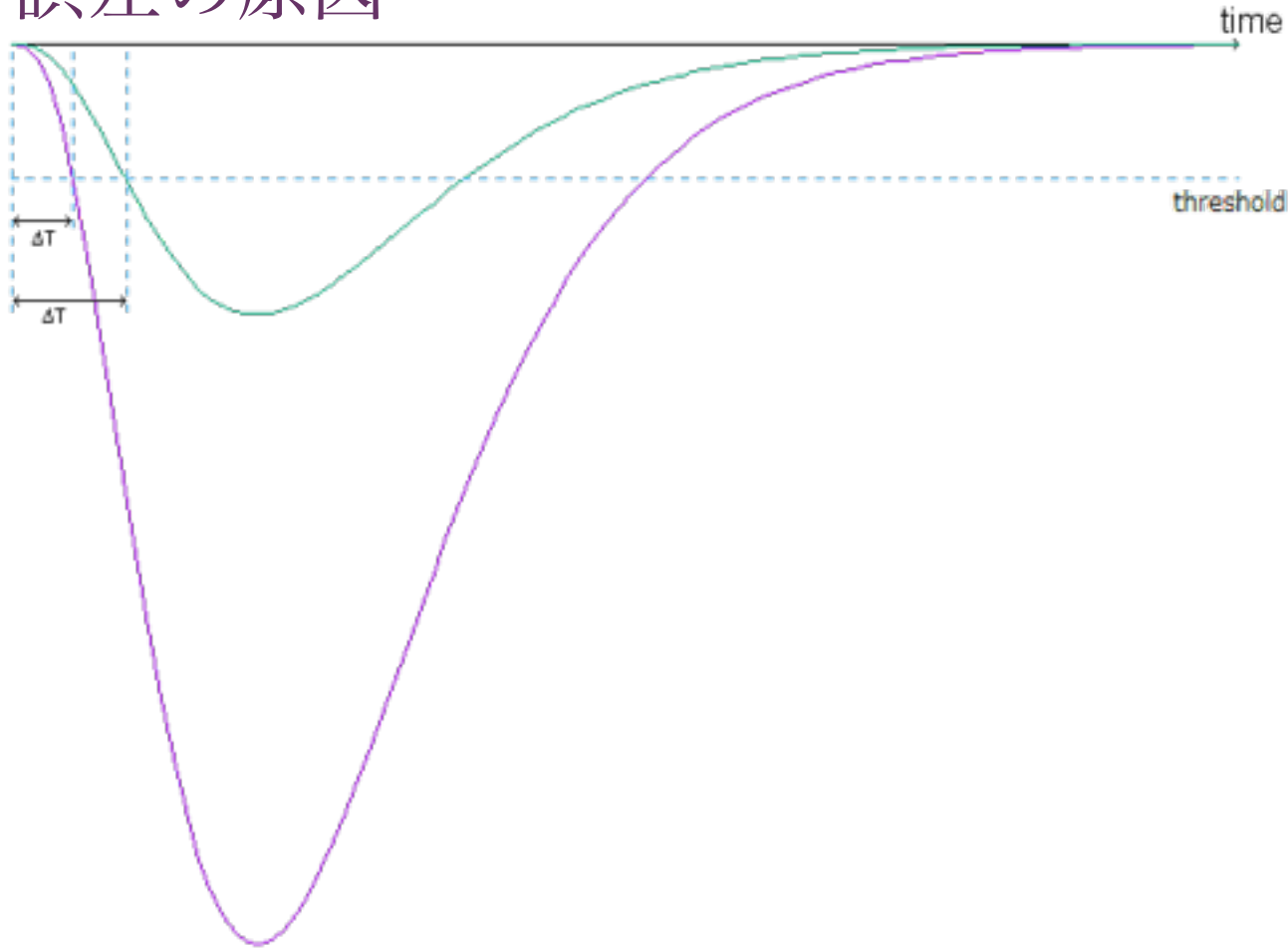


系統誤差について



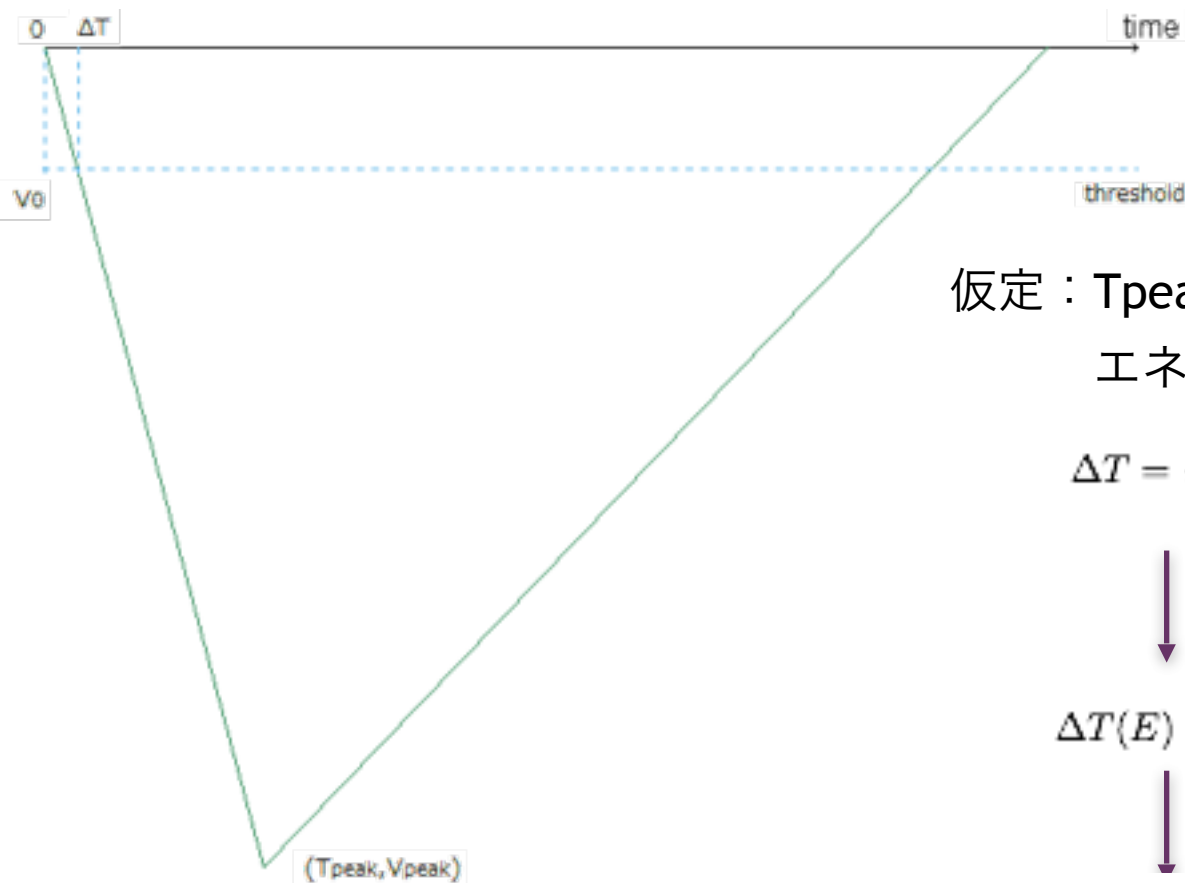
TQ補正について

誤差の原因



図a NaIシンチレータからの信号の概略図

補正関数の作成



仮定： T_{peak} とエネルギーを受け取る時間はエネルギーの値によらない。

$$\Delta T = \frac{V_0}{V_{peak}} T_{peak}$$

↓ 仮定より

$$\Delta T(E) \propto \frac{1}{E}$$

↓ 実際には

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

図b TQ補正第一近似

pick off補正について



誤差の原因

- ・ pick off反応
- ・ スピン交換反応
- ・ 化学反応（酸化反応）

これらの相互作用を受けたo-

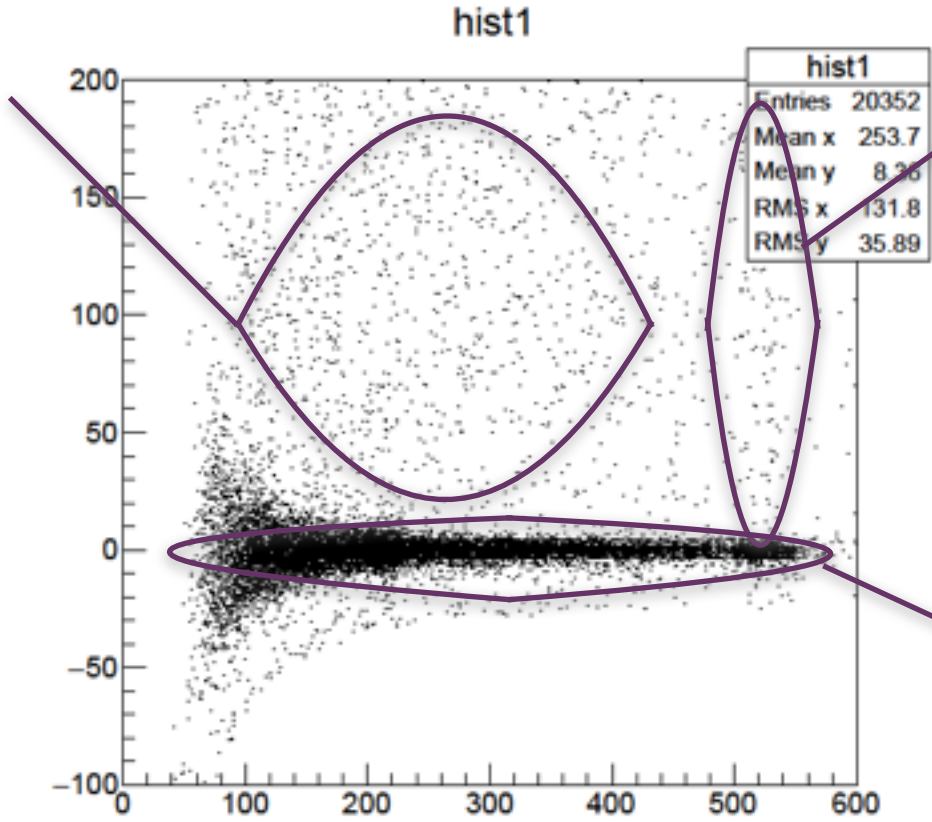
Psが短い寿命で 2γ に崩壊することがある。

- ・ γ 線の物質との相互作用（compton散乱）

+ 3γ と 2γ の分布



相互作用による 2γ
のcompton散乱と
o- Ps の崩壊による 3γ
 γ

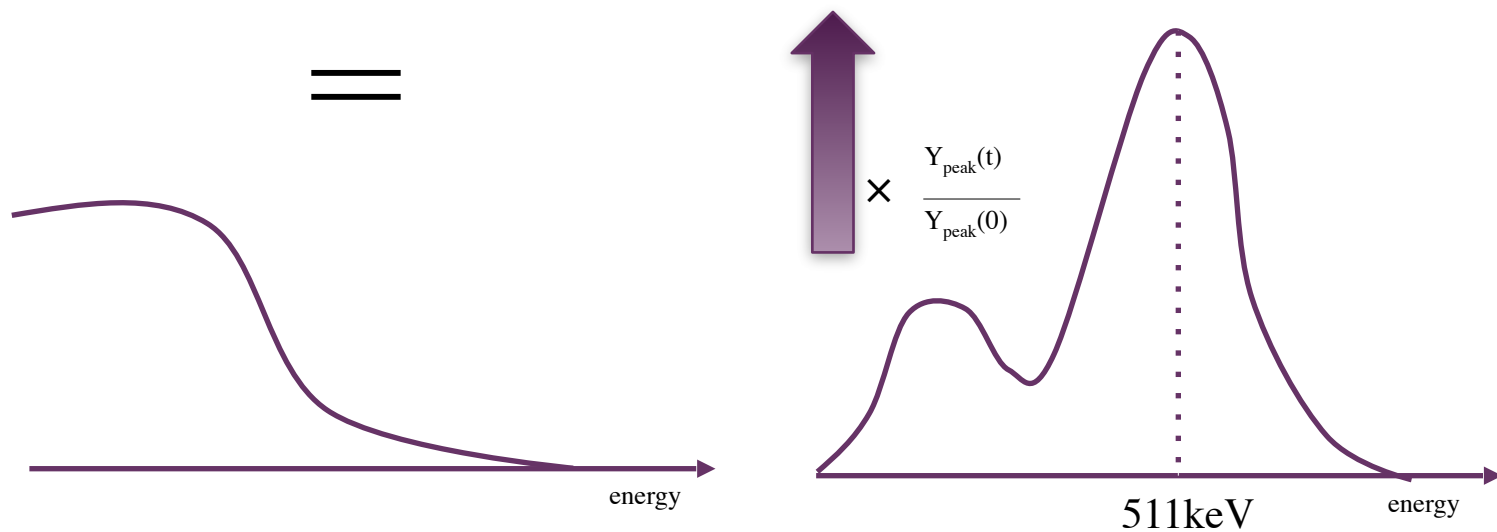
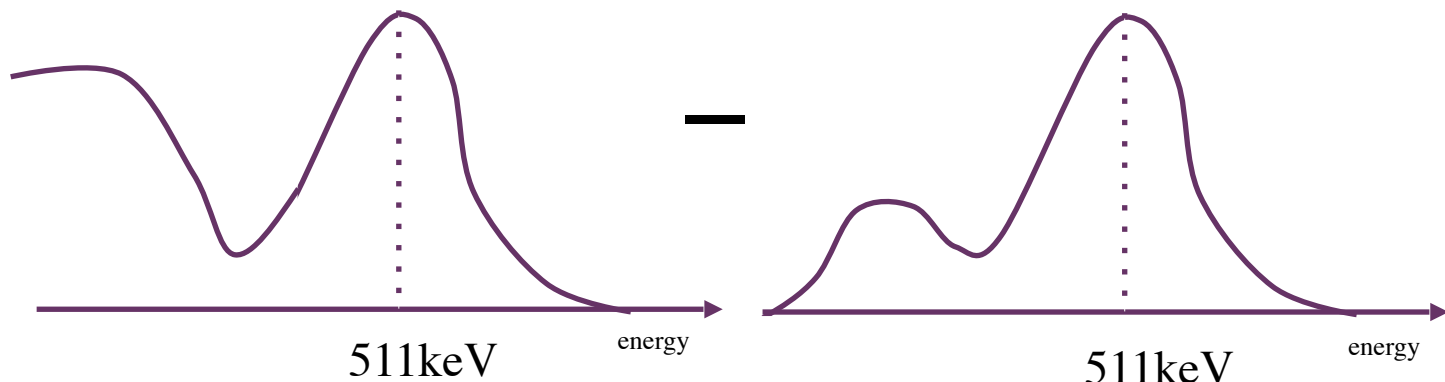


o- Ps の相互作用による 2γ

p- Ps の崩壊による 2γ

図 3γ と 2γ の分布

pick-off補正の概念図



o-Psの崩壊のみの波形(推定)

[0ns]のときの波形

pick off補正関数 $f(t)$ の作成と寿命のfitting

$\Gamma_{pick-off}$: 相互作用による崩壊幅

Γ_{ortho} : p- Ps の 3γ への崩壊幅

$$f(t) = \frac{\Gamma_{pick-off}}{\Gamma_{ortho}}$$

= (相互作用による 2γ の検出数) / (o- Ps の 3γ への崩壊の検出数)

fitting

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

関数の作成

$$\frac{dN(t)}{dt} = N(t)(\Gamma_{pick-off} + \Gamma_{ortho})$$

$$-\frac{N(t)}{dt} = q_0(1 + f(t)) \exp\left(\frac{-1}{q_1} \int^t (1 + f(t')) dt'\right) + q_2$$

+ 第四章

§ データ解析

+ ADC Calibration

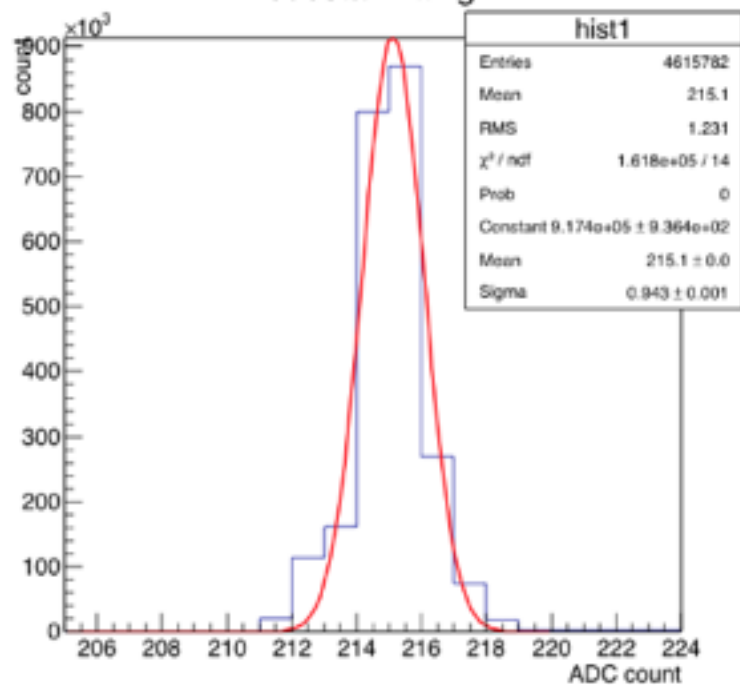
表 ADCの出力値のエネルギーの値(keV)の関係

	0keV	511keV
NaI1	215.1	826.8
NaI2	192.9	752.8

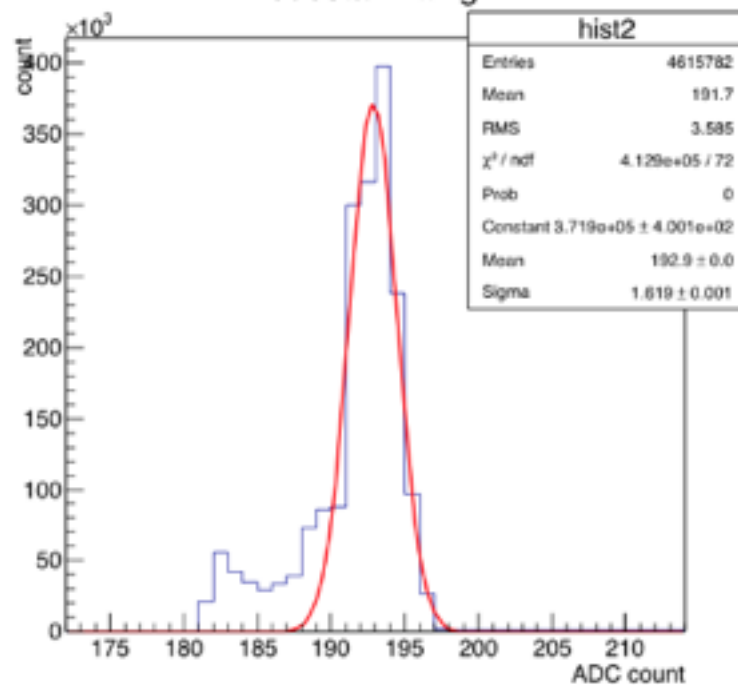
$$E_1(\text{keV}) = 1.197 \times (\text{ADC1} - 215.1)$$

$$E_2(\text{keV}) = 1.096 \times (\text{ADC2} - 192.9)$$

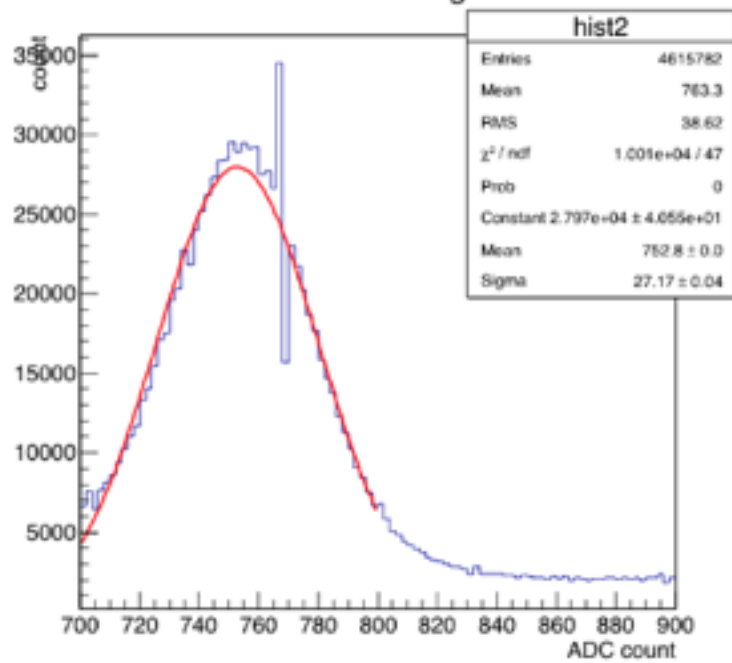
Pedestal Fitting 1



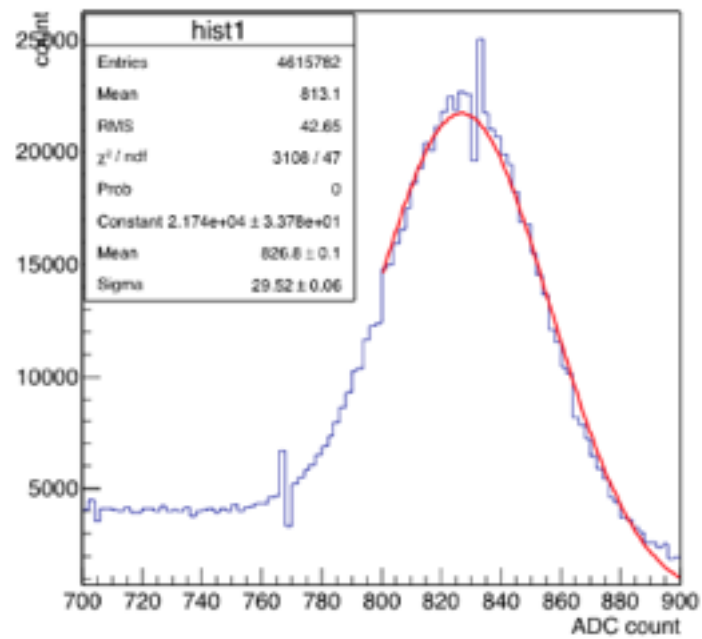
Pedestal Fitting 2



511keV Fitting 2



511keV Fitting 1



+ TDC Calibration

表 TDCの出力値と時間の関係

delay[ns]	TDC
100	447.3
200	846.905
300	1247.66
400	1648.22
800	3238

TDC Calibration fitting

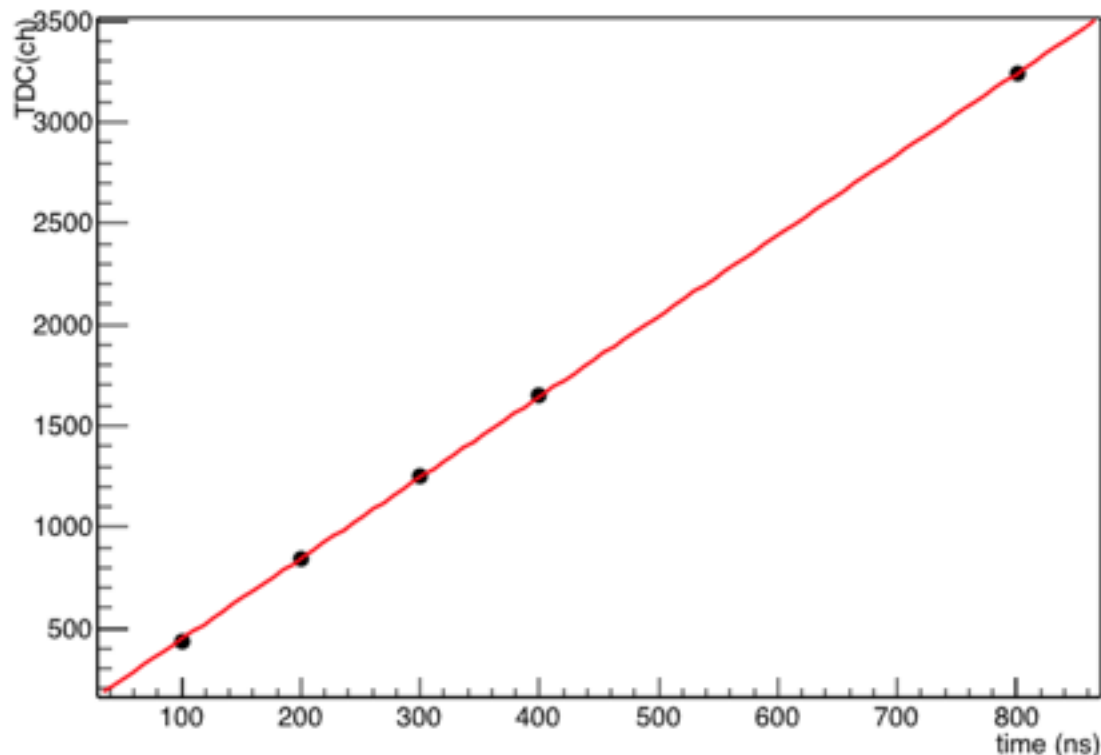


図 TDC Calibration フィッティングの様子

$$\text{TDC} = p_1 \text{time} + p_0$$

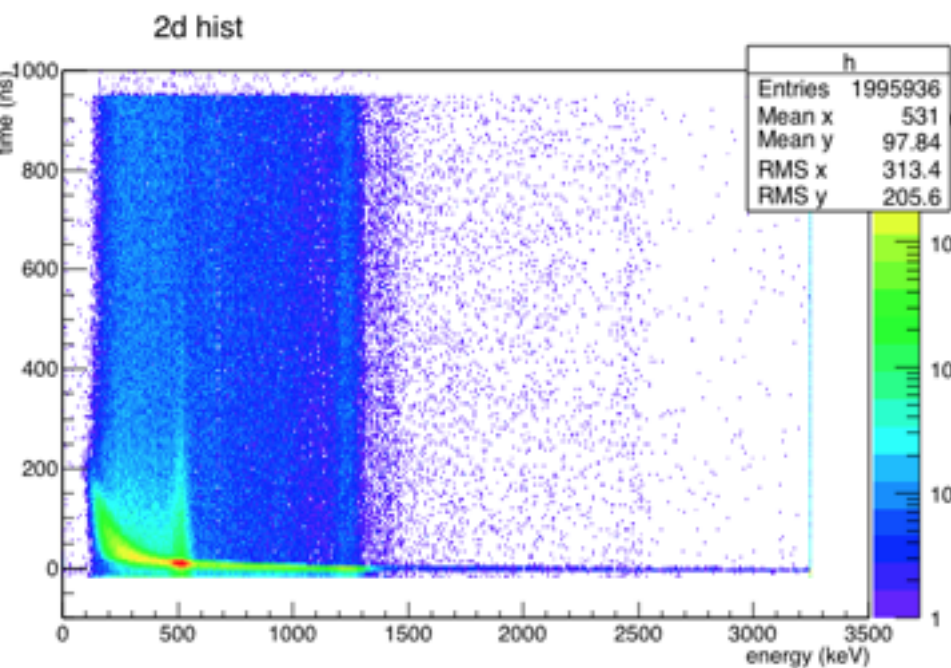
$$p_0 = 50.5653 \pm 1.98132$$

$$p_1 = 3.98625 \pm 0.00456953$$

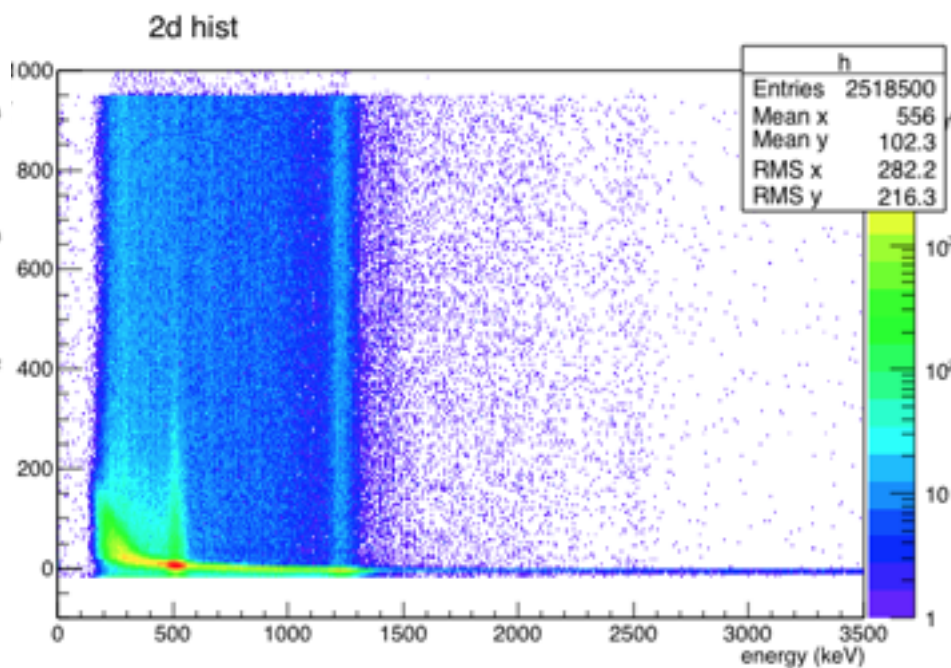
+ 第四章

§ 結果

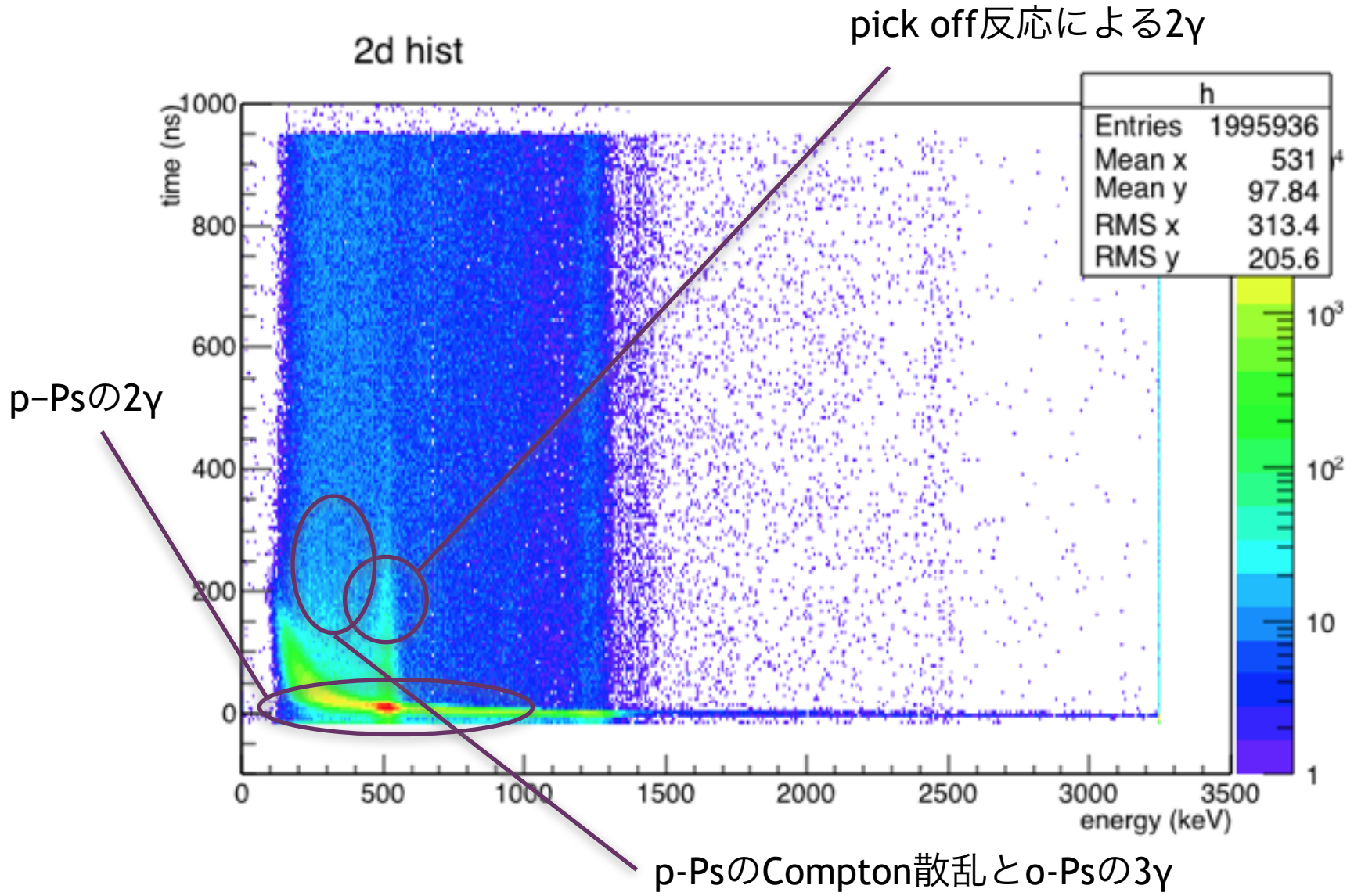
+ 生データの二次元ヒストグラム



グラフ：時間とNaI1のエネルギー二次元ヒストグラム

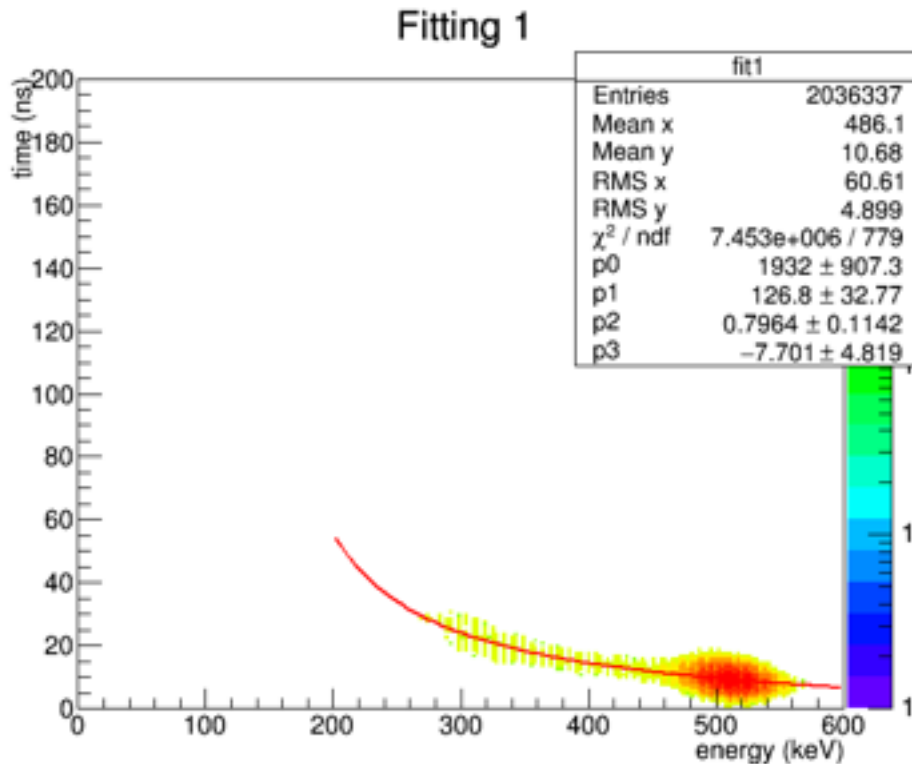
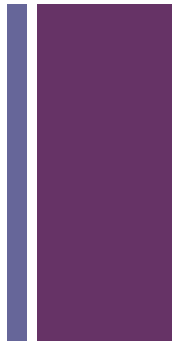


グラフ：時間とNaI2のエネルギー二次元ヒストグラム

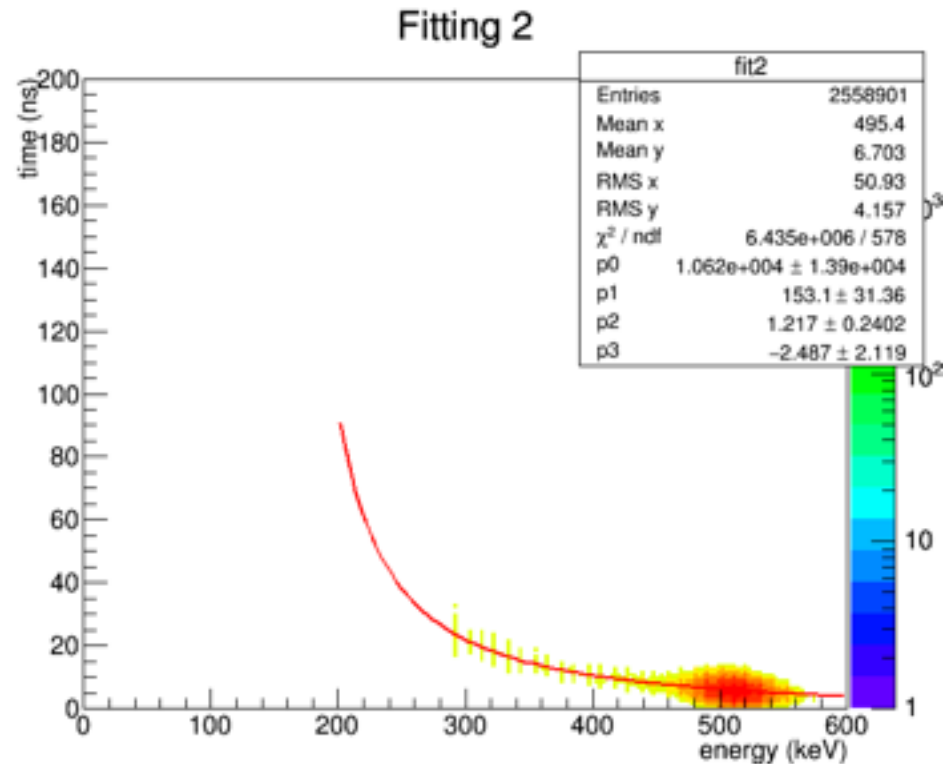


+ TQ補正のフィッティング

bin数が一番多いところの0.08倍以上のイベント数で
カットしTQ補正関数のフィッティングを行った。



グラフ：時間とNaI1のTQ補正後のフィッティング

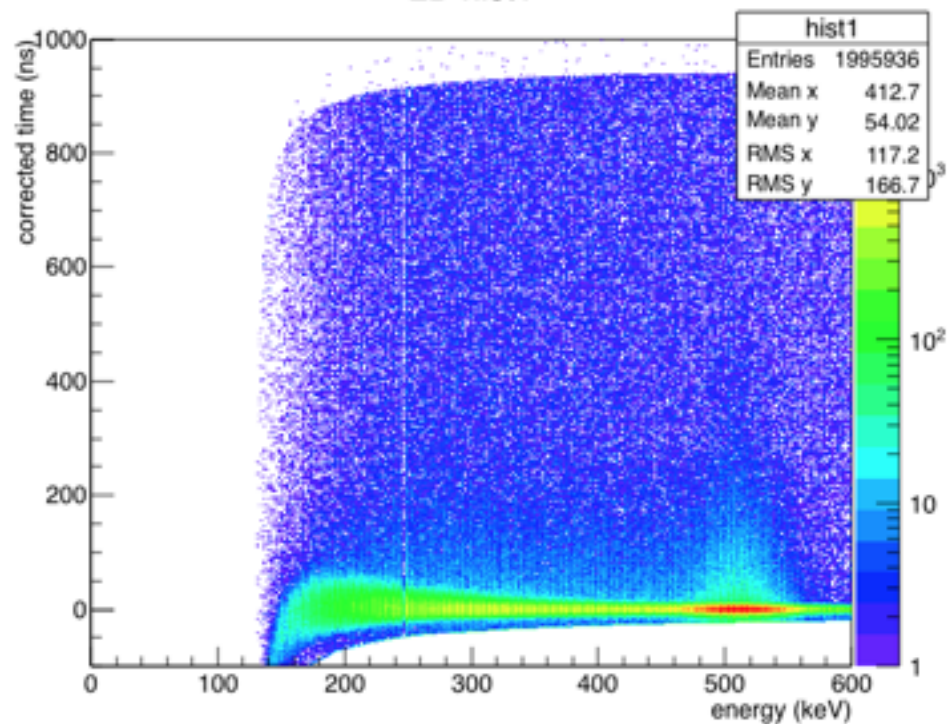


グラフ：時間とNaIIIのTQ補正後のフィッティング

+ TQ補正後の生データ

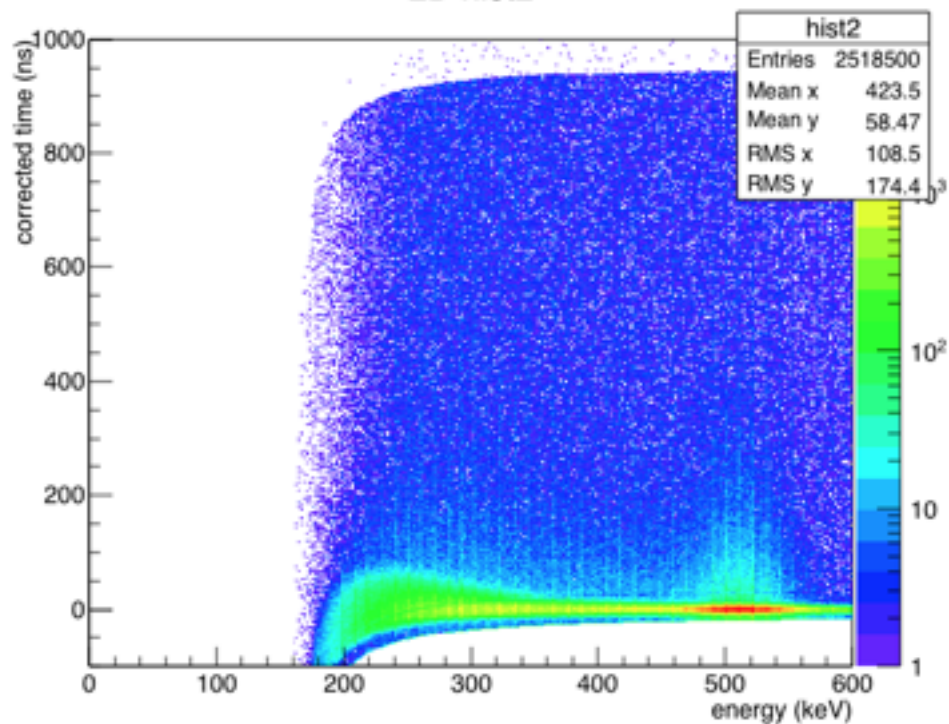


2D hist1



グラフ2-1 : 時間とNaI1のエネルギー二次元ヒストグラム
縦軸(ns)横軸(keV)*Z軸は対数にしている

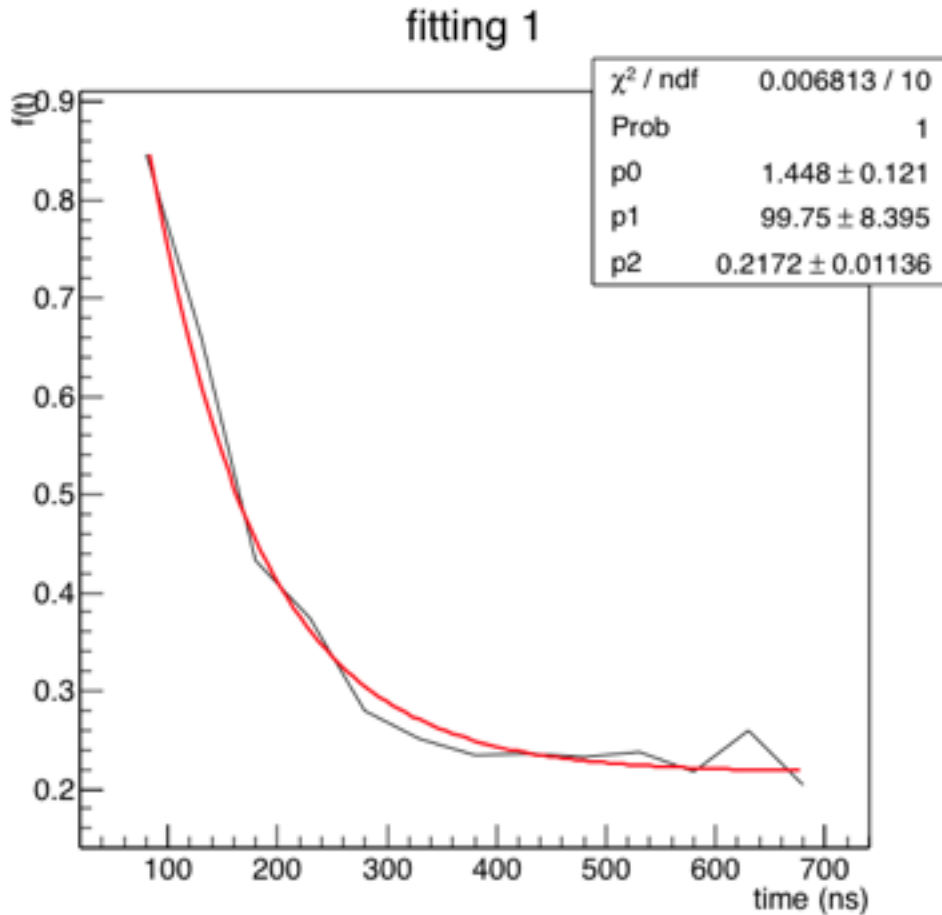
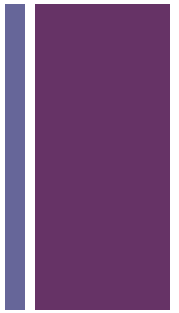
2D hist2



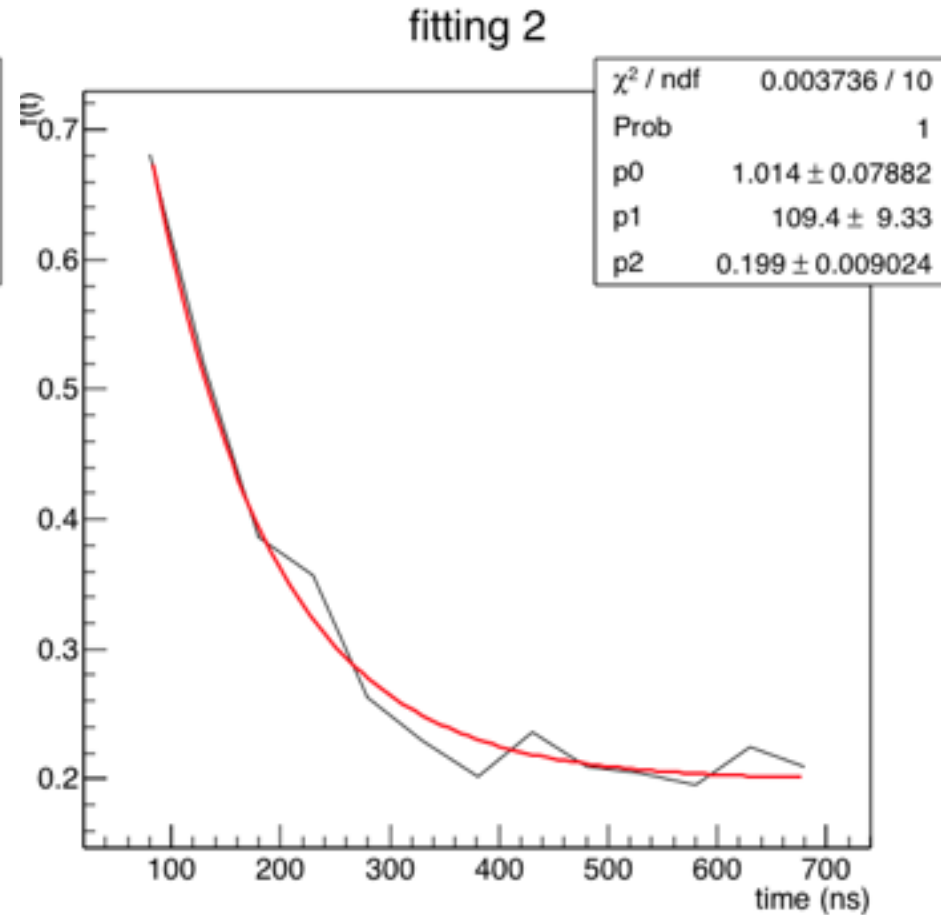
グラフ2-2 : 時間とNaI2のエネルギー二次元ヒストグラム
縦軸(ns)横軸(keV)*Z軸は対数にしている

+ pick-off補正関数

time=0のところを補正の基準として80nsから50nsきざみで pick off補正を行った。

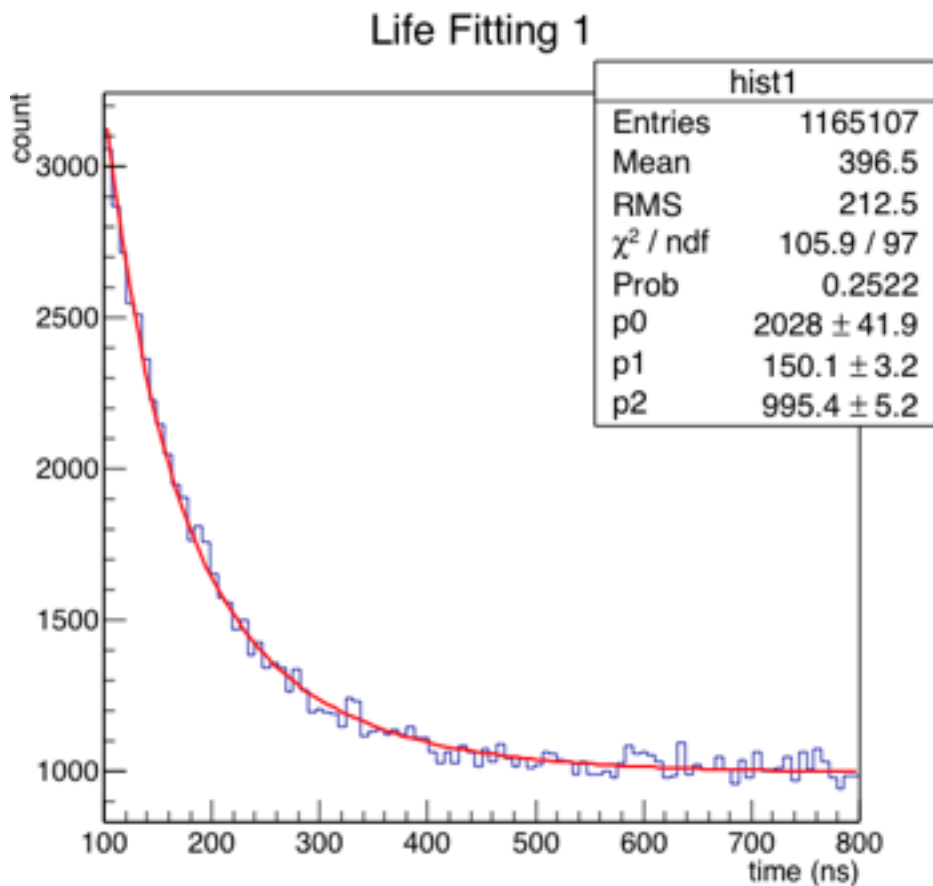
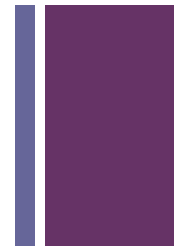


グラフ : NaIのpickoff補正関数のフィッティング

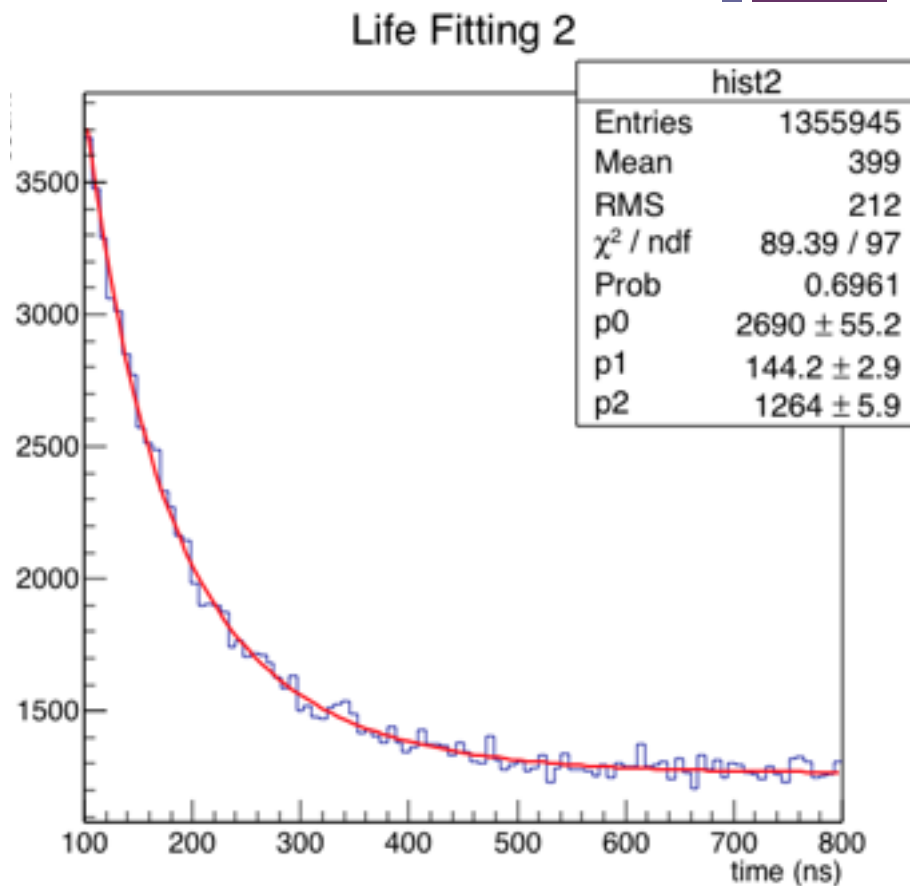


グラフ : NaIIIのpickoff補正関数のフィッティング

+ 寿命フィッティング



グラフ : NaI1の寿命フィッティング



グラフ : NaIIIの寿命フィッティング

+ 得られた結果

- NaI1 については $150.1 \pm 3.2 \text{ ns}$
- NaI2 については $144.2 \pm 2.9 \text{ ns}$

という値が得られた。

+ 第五章

§ 考察

+ 配置による誤差

- 今回のセットアップではpositron, photonの発生から検出までに数cmの移動を要する.
- 光速 $\sim 10^{10}$ cm/sで移動すると仮定すると, その移動時間で 10^{-1} nsほどの誤差が生じる. 特にpositronの速度はさらに遅いのでもう少し誤差が長い可能性がある. 今回の精度では大きな影響はないが, さらに精度を上げようと思うとこれを考慮する必要がある.
- Positronの移動に関しては, paraの崩壊時刻を時刻0nsに設定し直した(TQ補正).

+ TQ補正の誤差

■ 誤差伝搬の式

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

- $\Delta T + \frac{i}{4} \delta(\Delta T)$ ($i = -4, -3, \dots, 4$)でTQ補正を行って(pick-off補正は入れずに)寿命を評価.
- 最大の誤差をとる.

+ TQ補正の誤差



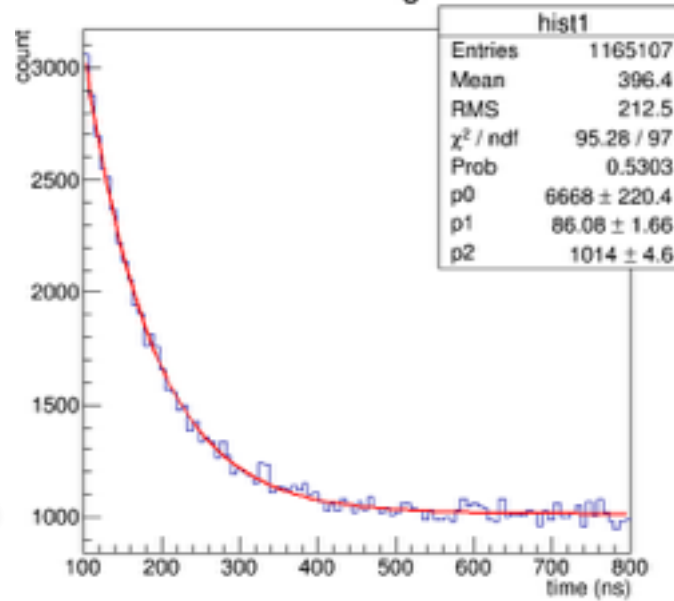
+ $\delta(\Delta T)$

-1.26ns

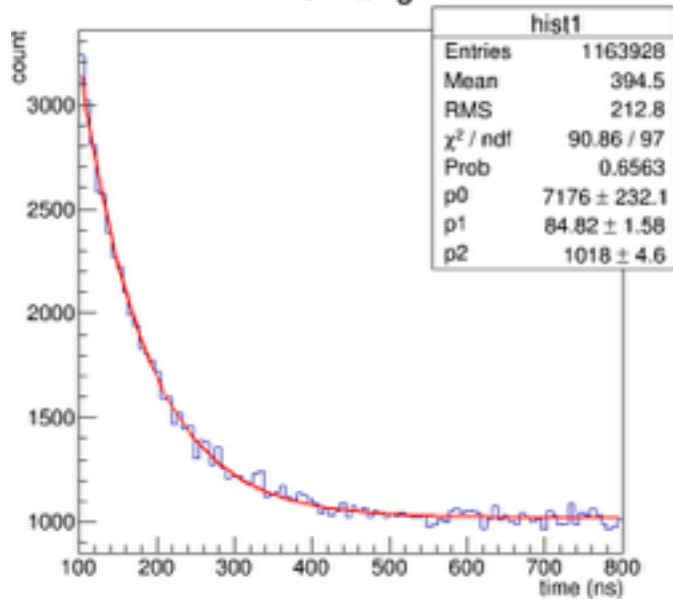
- $\delta(\Delta T)$

-28.14ns

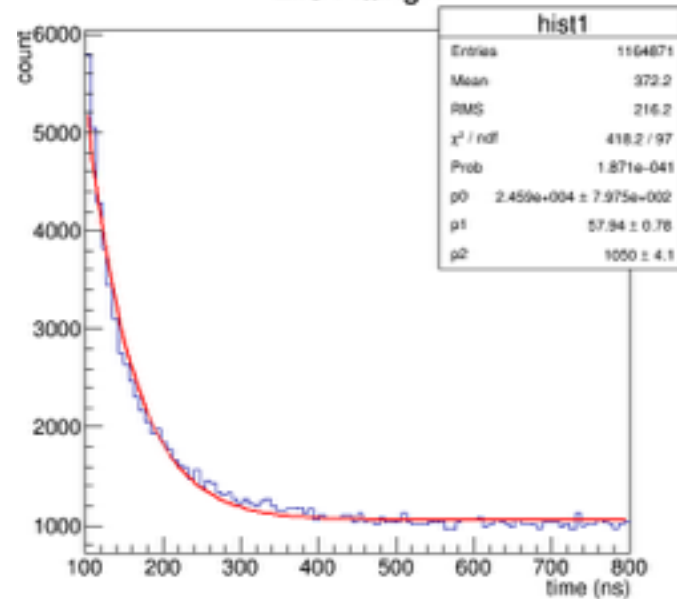
Life Fitting 1



Life Fitting 1



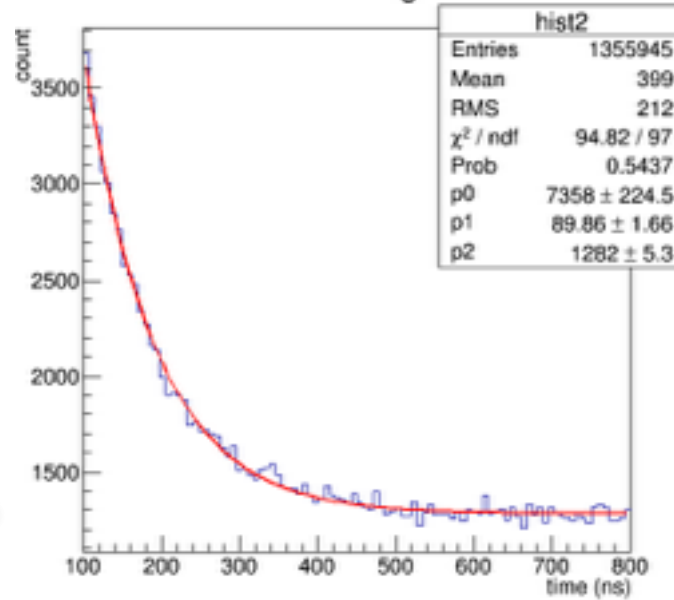
Life Fitting 1



+ TQ補正の誤差



Life Fitting 2



$+\delta(\Delta T)$



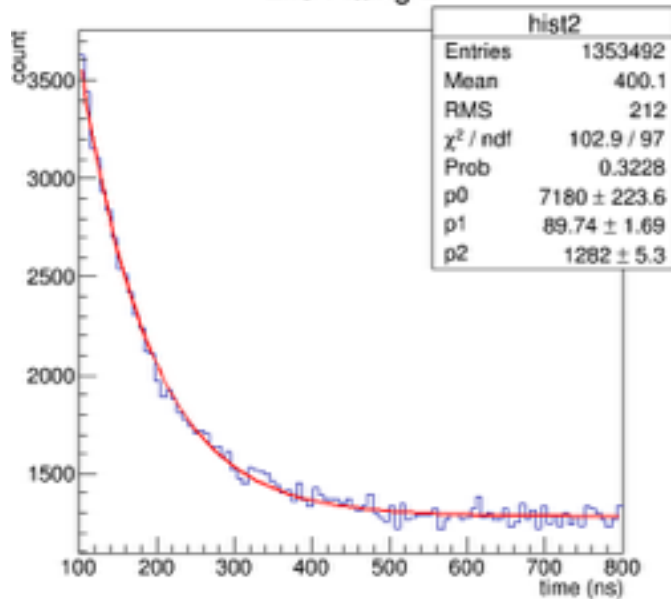
-0.08ns

$-\delta(\Delta T)$

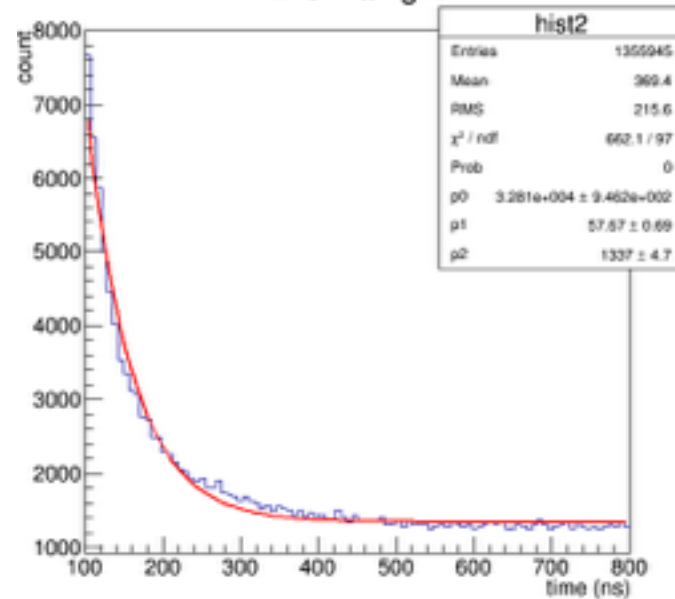


-32.19ns

Life Fitting 2



Life Fitting 2



+ TQ補正の誤差

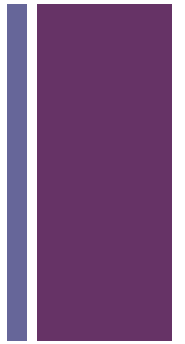
	$-\delta\Delta T$	$-\frac{3}{4}\delta\Delta T$	$-\frac{2}{4}\delta\Delta T$	$-\frac{1}{4}\delta\Delta T$	0	$+\frac{1}{4}\delta\Delta T$	$+\frac{2}{4}\delta\Delta T$	$+\frac{3}{4}\delta\Delta T$	$+\delta\Delta T$
NaI1	57.94	56.58	56.37	56.38	86.08	53.77	53.04	52.72	84.82
NaI2	57.67	62.23	62.23	54.35	89.86	61.58	58.77	55.20	89.74

NaI1: +0ns, -33.04ns

NaI2: +0ns, -35.51ns

+ Pick-off補正の誤差

- 同様に, pick-off補正を込めた寿命fittingについても誤差伝搬の式を適用し, ¼刻みで寿命を評価し, pick-off補正関数のfittingからくる誤差を評価した.



+ Pick-off補正の誤差

	$-\delta$	$-\frac{3}{4}\delta$	$-\frac{2}{4}\delta$	$-\frac{1}{4}\delta$	0	$+\frac{1}{4}\delta$	$+\frac{2}{4}\delta$	$+\frac{3}{4}\delta$	$+\delta$
NaI1	143.8	145.4	147.0	148.6	150.1	151.5	153.0	154.4	155.7
NaI2	139.7	140.9	142.0	143.1	144.2	145.3	146.3	147.3	148.3

NaI1: +5.6ns, -6.3ns

NaI2: +4.1ns, -4.5ns

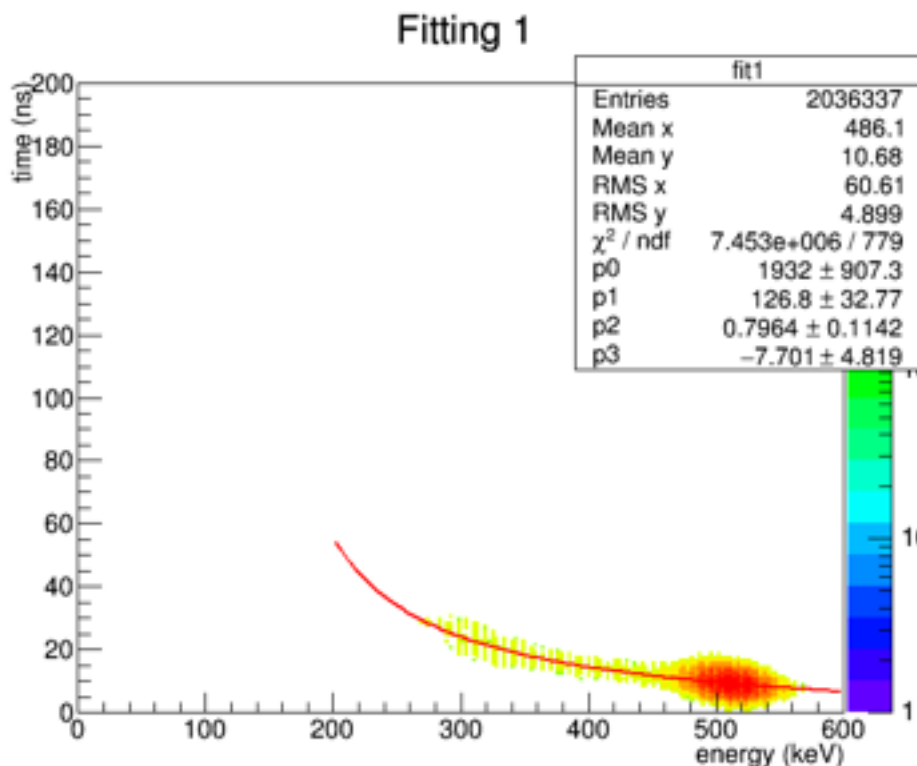
+ 統計誤差の総合



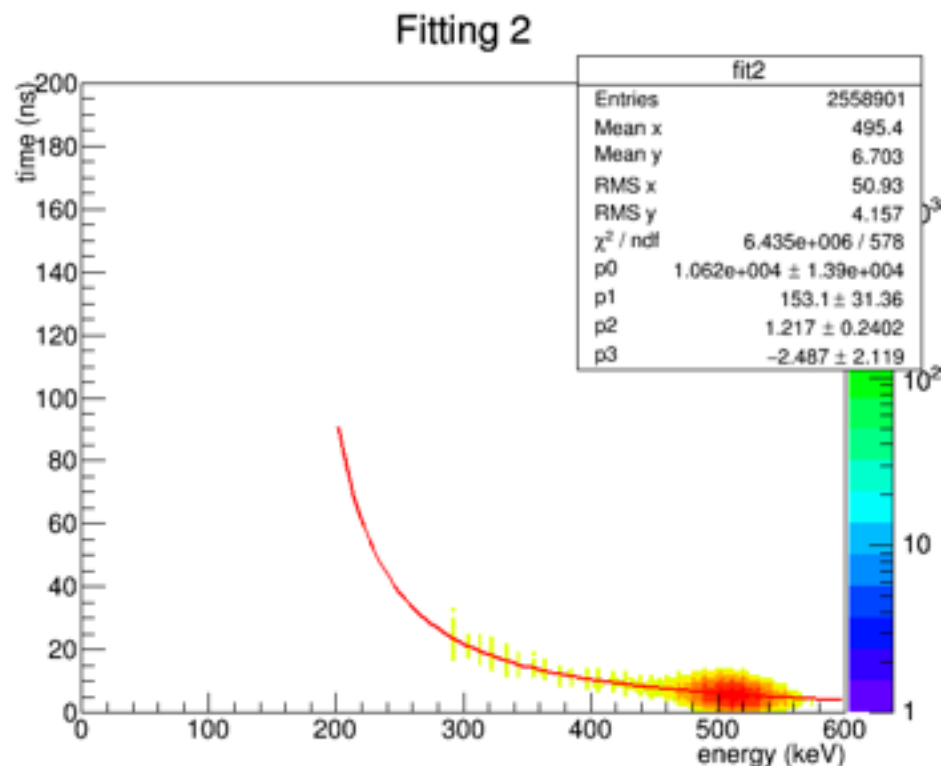
$$\begin{aligned}\text{Na1: } & +\sqrt{0^2 + 5.6^2 + 3.2^2} = +6.45(\text{ns}) \\ & -\sqrt{33.04^2 + 6.3^2 + 3.2^2} = -33.79(\text{ns})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Na2: } & +\sqrt{0^2 + 4.1^2 + 2.9^2} = +5.02(\text{ns}) \\ & -\sqrt{35.51^2 + 4.5^2 + 2.9^2} = -35.91(\text{ns})\end{aligned}$$

+ TQ補正のフィッティング (再掲)



グラフ：時間とNaI1のTQ補正後のフィッティング



グラフ：時間とNaIIIのTQ補正後のフィッティング

+ 第六章

§ まとめ

+ まとめ

Ortho-positroniumの寿命

Nal1: 150.1 (+6.45, -33.79) ns

Nal2: 144.2 (+5.02, -35.91) ns

全体: 147.2 (+4.09, -24.65) ns

理論値: 139 ~ 142ns

QEDに肯定的な結果となった.