

A2

オルソポジトロニウムの 寿命測定

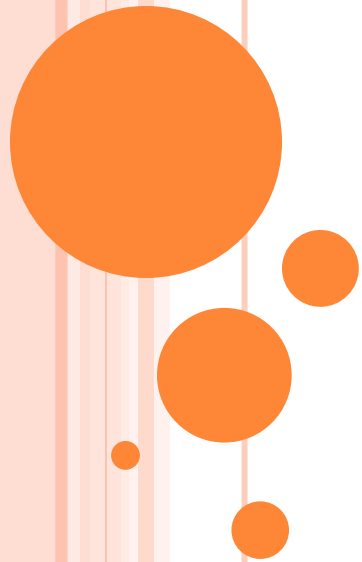
新拓人

渡曾康介

宮津怜嗣

立石圭児

筒井翔一郎



手順

1. 実験の目的と理論
2. 実験方法
3. 解析
 - a. T-Q補正
 - b. 寿命
4. 考察
5. まとめ



1. 実験の目的

- オルソポジトロニウム(o-Ps)の寿命を求め、QEDの検証を行うこと



ポジトロニウムとは

- 電子と陽電子が電磁相互作用によって電氣的に束縛され対になったエキゾチック原子
- 水素原子と似た構造をしており、水素原子の陽子を陽電子に置き換えた系として考えることができる



ポジトロニウムとは

- パラポジトロニウム($p\text{-Ps}$)とオルソポジトロニウム($o\text{-Ps}$)の2種類が存在する
- $p\text{-Ps}$ は電子と陽電子のスピンの向きが反並行の逆向きであり、スピン量子数は $s=0$
- $o\text{-Ps}$ はスピンの向きが並行に揃っており、スピン量子数は $s=1$



オルソポジトロニウムの崩壊

- p-Psもo-Psも、電子と陽電子が対消滅して光子となる
- p-Psの多くは 2γ に、o-Psの多くは 3γ に崩壊する
- 真空中でのp-Psとo-Psの寿命の理論値はそれぞれ125[ps]と142[ns]
- p-Psの崩壊の場合の γ 線エネルギーは511[keV]に、o-Psの崩壊の場合は511[keV]以下に連続的に分布する



オルソポジトロニウムの崩壊

○ p-Ps

- 2γ に崩壊する
- 寿命は125[ps]
- エネルギーは511[keV]

○ o-Ps

- 3γ に崩壊する
- 寿命は142[ns]
- エネルギーは511[keV]以下

o-Psの寿命は十分長いので直接観測できる



寿命測定

- o- Ps の寿命は

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

または

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

寿命： τ

崩壊率： $\Gamma = 1/\tau$

で求めることができる



寿命測定

- 実験室では、以下の反応も起こる
 - pick-off
 - スピン交換反応
 - 化学反応



寿命測定

- 3つの反応をまとめて $\Gamma_{\text{pick-off}}$ とすると、測定される崩壊率 Γ_{obs} は

$$\Gamma_{\text{total}} = \Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick-off}}$$

- 寿命は

$$\tau_{\text{obs}} = \frac{1}{\Gamma_{\text{obs}}} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick-off}}}$$



寿命測定

- Γ pick-offが時間依存するので

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\Gamma_{3\gamma} \int_0^t \left(1 + \frac{\Gamma_{pick-off}(t')}{\Gamma_{3\gamma}}\right) dt'\right)$$

- 時間依存は、熱化過程を取り入れるため



ガンマ線の相互作用

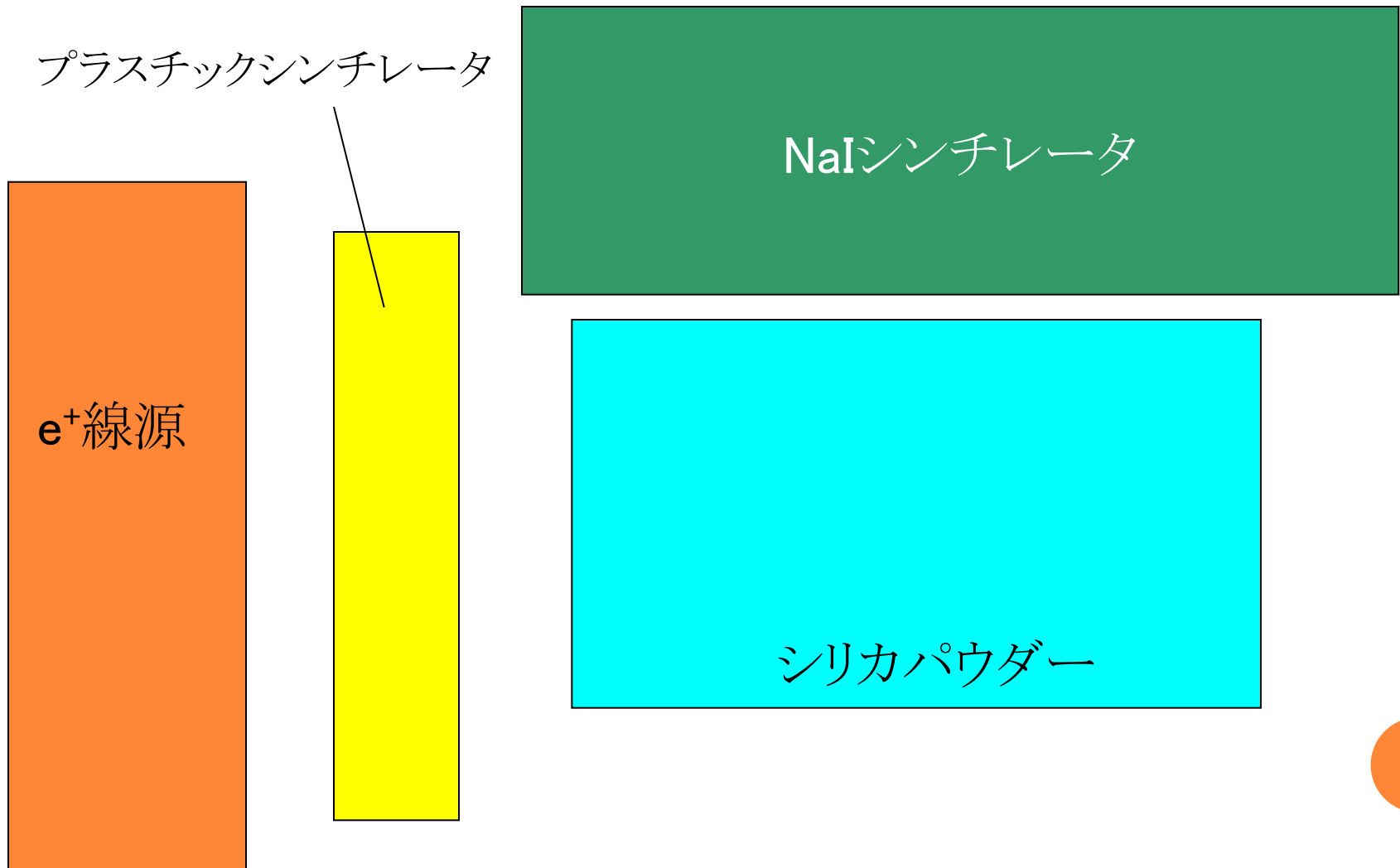
- ガンマ線の相互作用には、以下の**3**つがある
 - 光電吸収
 - コンプトン散乱
 - 電子対生成



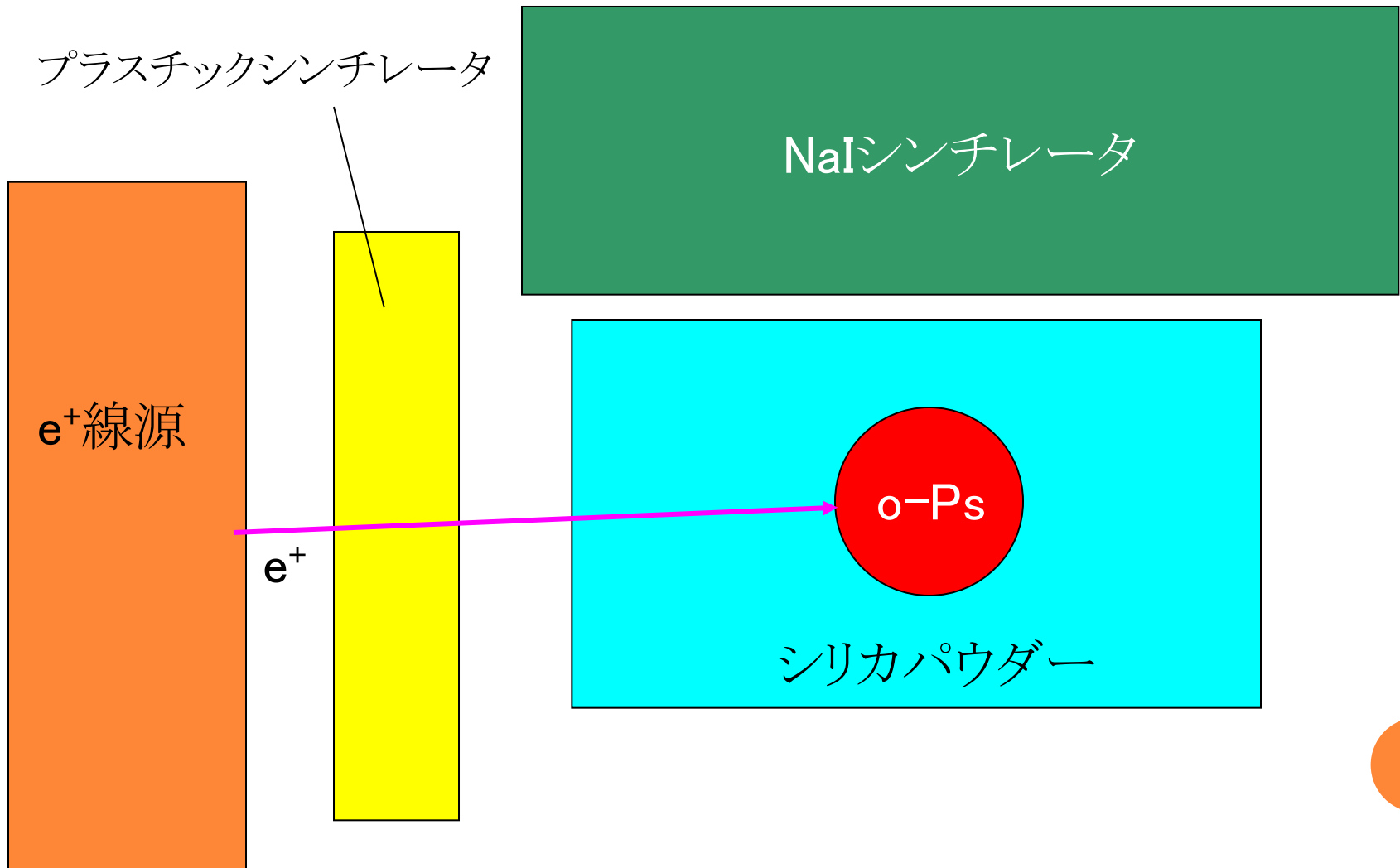
2. 実験装置と方法



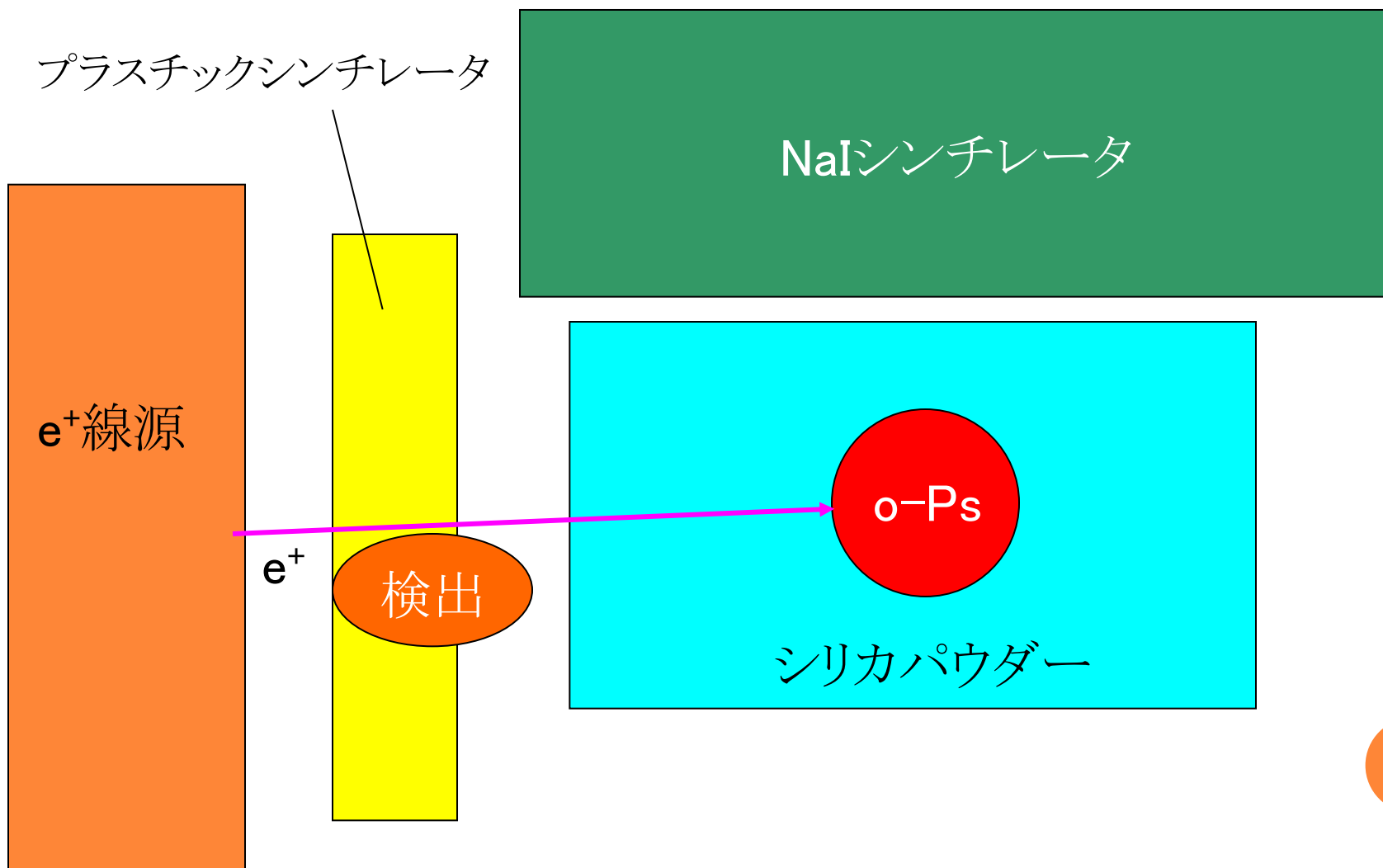
実験の原理



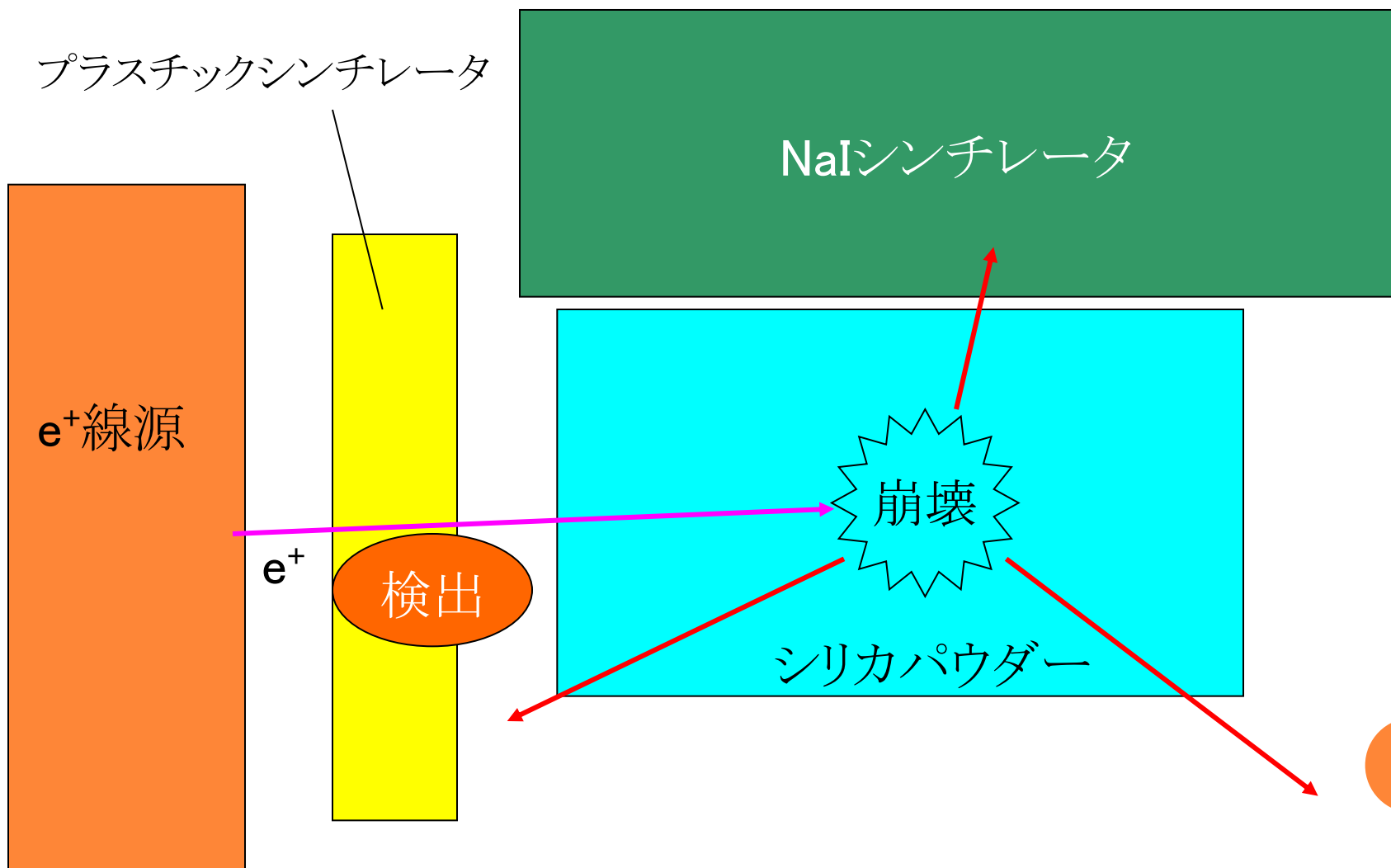
実験の原理



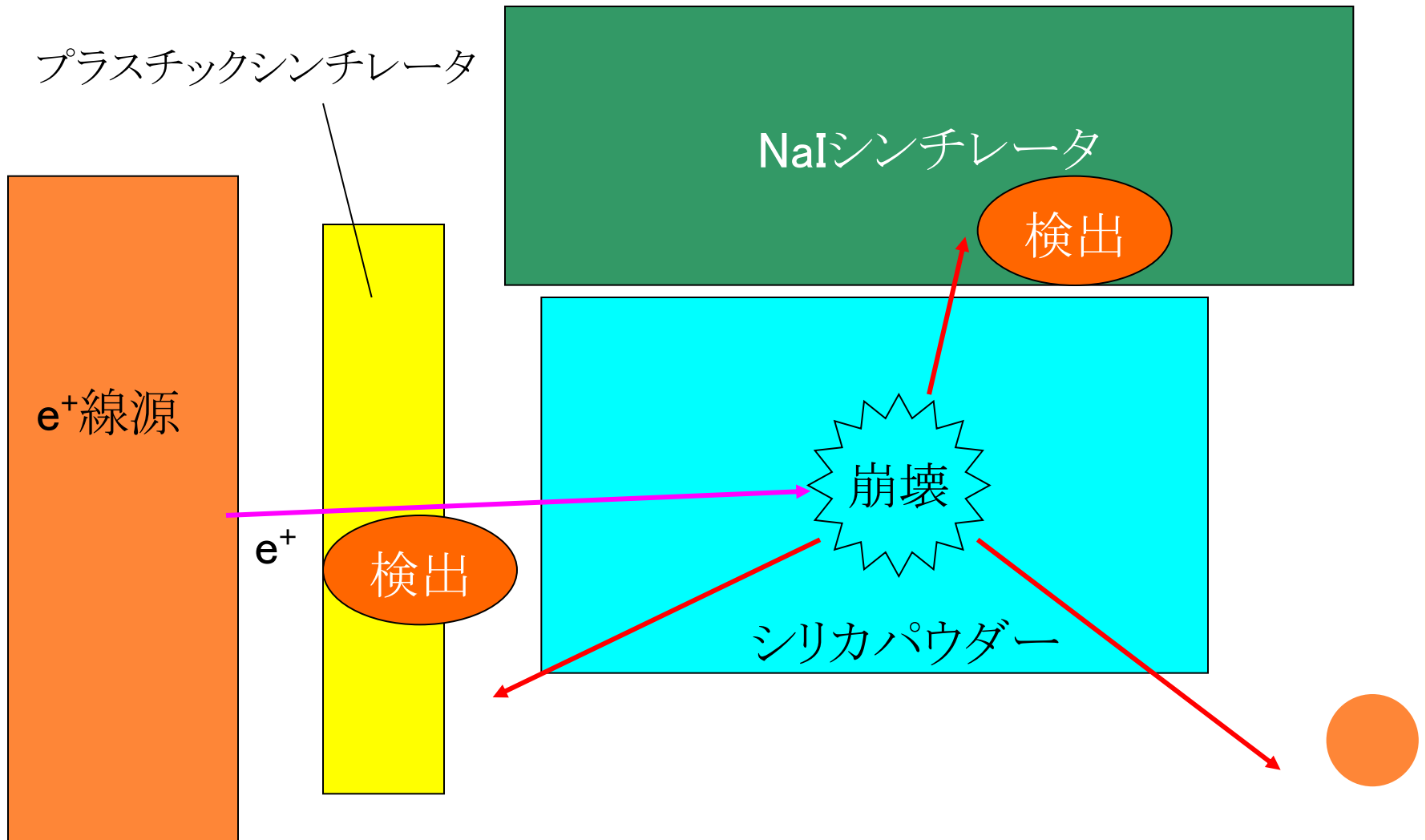
実験の原理



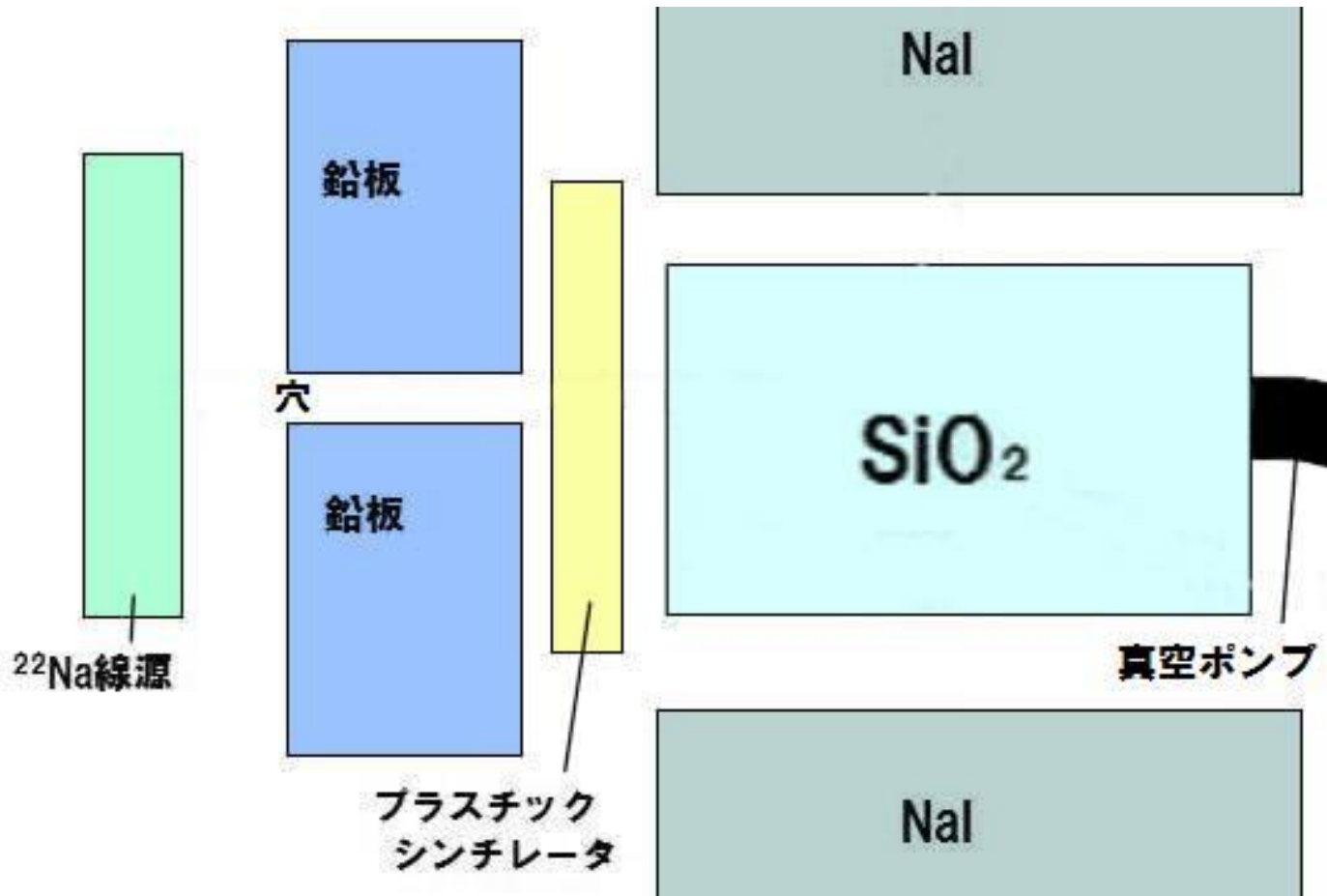
実験の原理



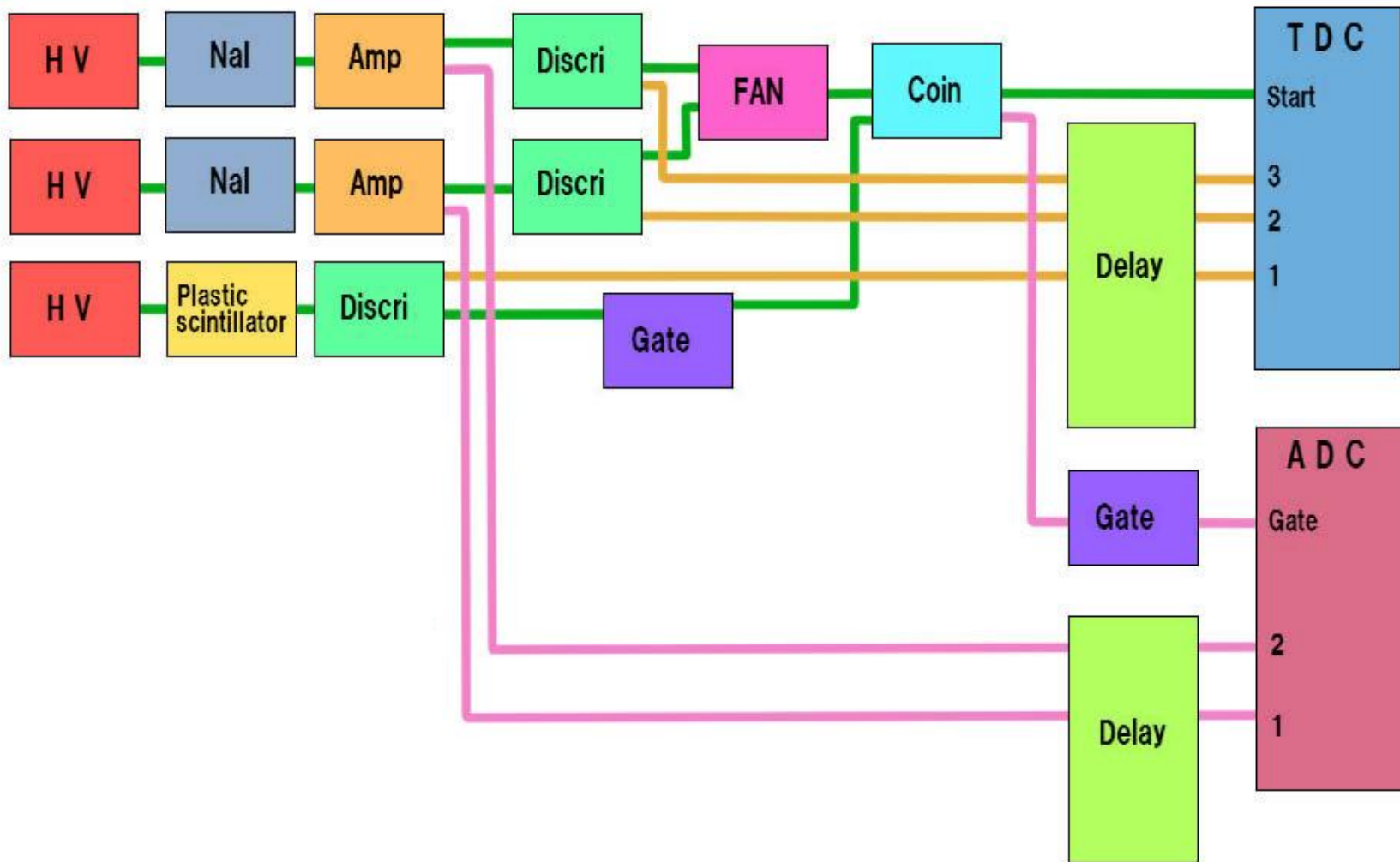
実験の原理



装置の配置



回路图



3. 解析

前半(補正)

- キャリブレーション
(ADCとTDC)
- カッティング
- T-Q補正

後半(寿命)

- pick-off補正前の寿命
- pick-offの解析

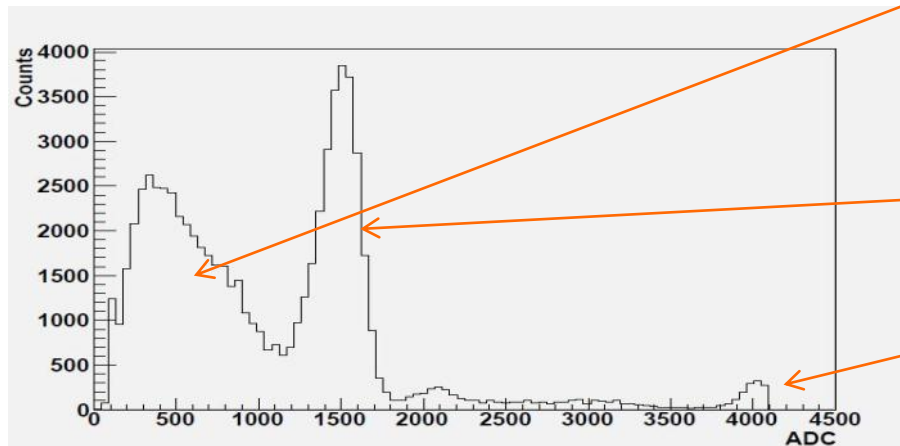


ADCキャリブレーション(1)

キャリブレーションの式

$$E [\text{keV}] = p \times \text{ADC} + q$$

^{22}Na のエネルギー分布



コンプトン散乱

511keVのピーク

1275keVのピーク



ADCキャリブレーション(2)

	エネルギー [keV]	ADC	ADCの誤差
^{22}Na のピーク	511	1519.22	1.47704
^{22}Na のピーク	1275	4060.22	10.3612
^{137}Cs のピーク	662	2093.42	2.66938

p と q の決定

$$\begin{cases} p = 0.2630 \pm 0.0003 \\ q = 111.5 \pm 0.1 \end{cases}$$



TDCキャリブレーション

キャリブレーションの式

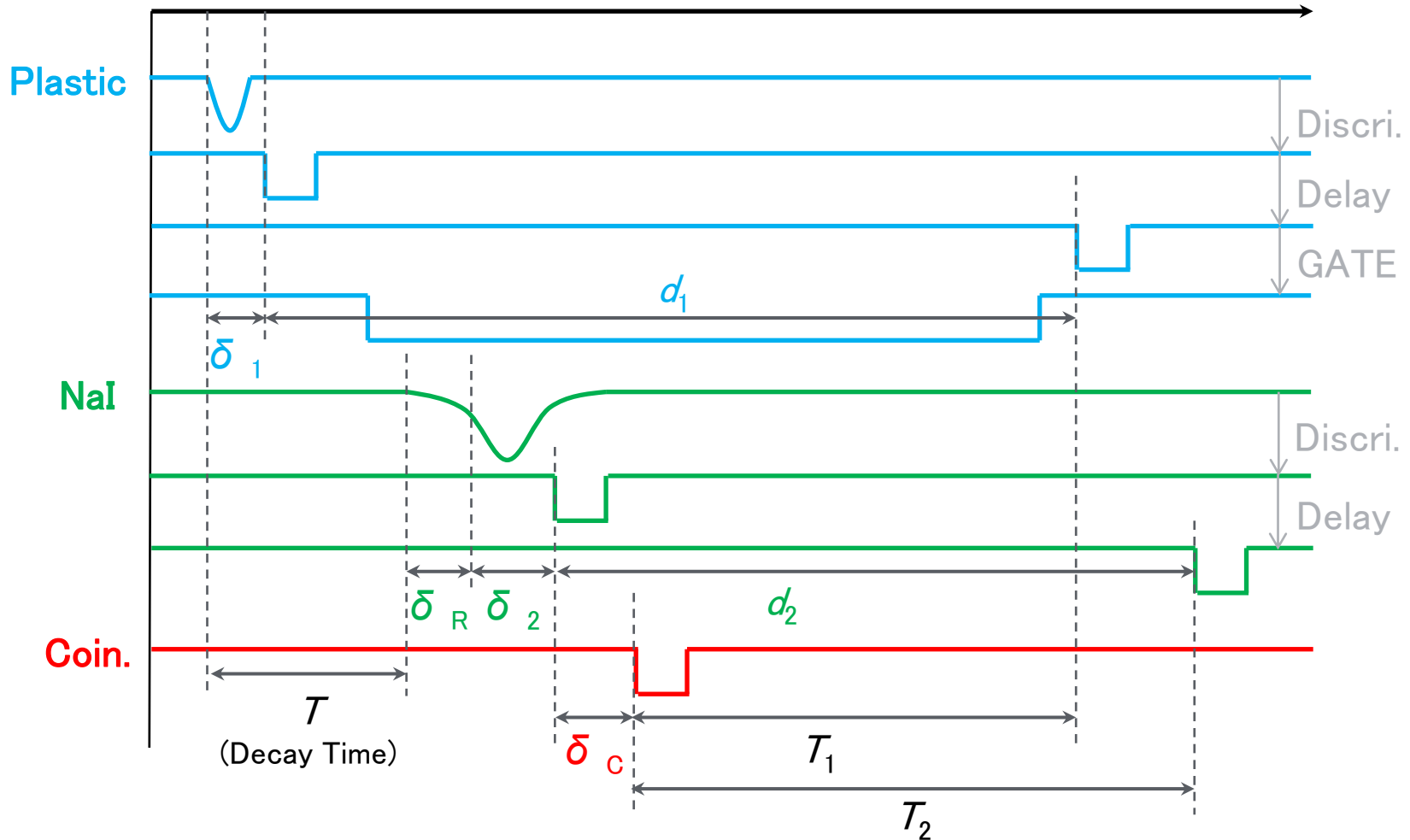
$$T_i \text{ [ns]} = a_i \times TDCi + b_i \quad (i = 1, 2)$$

a_i と b_i の決定

$$\begin{cases} a_1 = 0.22367 \pm 0.007959 \\ b_1 = -4.081 \pm 0.6513 \\ a_2 = 0.225369 \pm 0.008011 \\ b_2 = -4.689 \pm 0.7474 \end{cases}$$



信号の概略

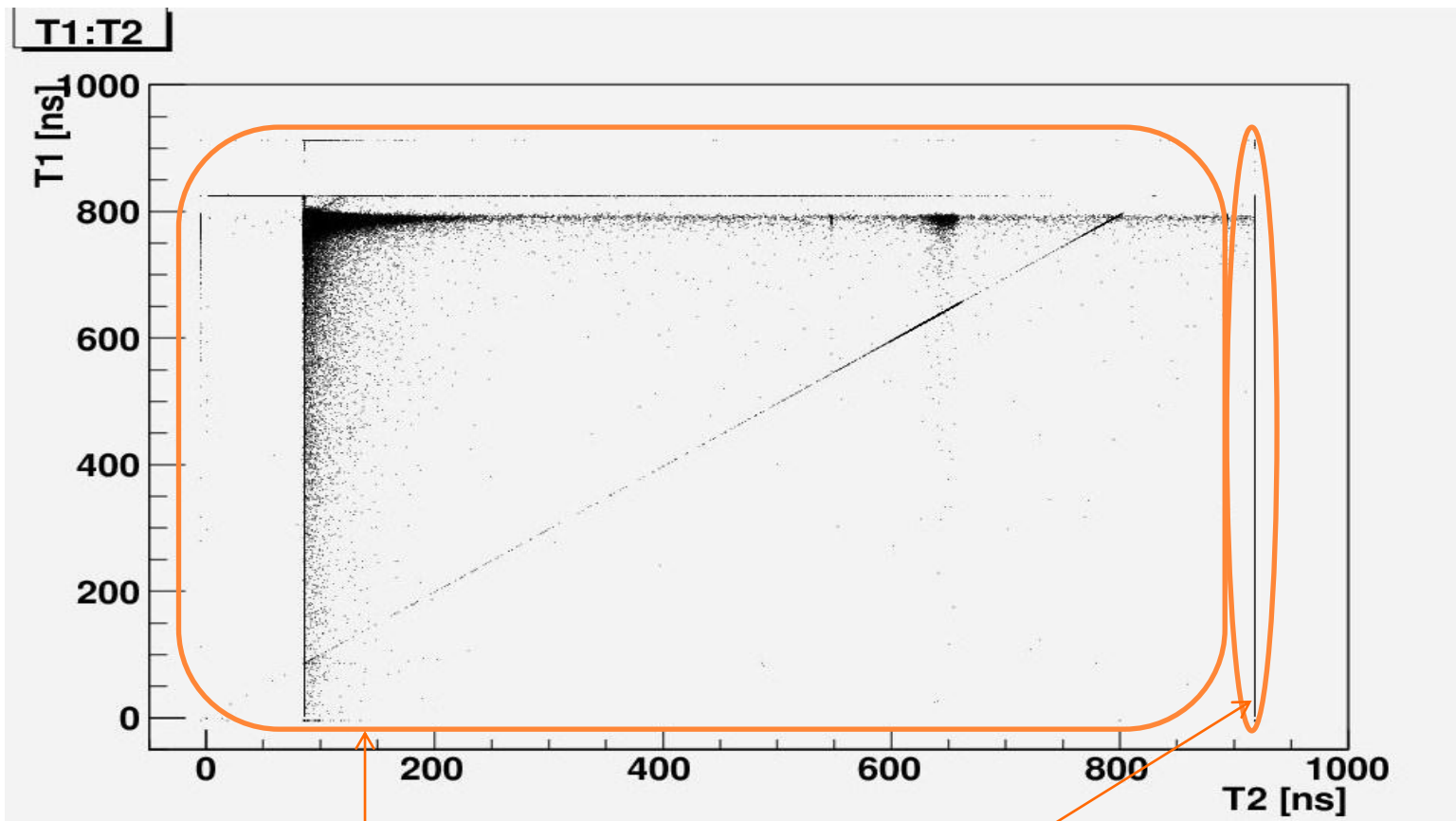


$$T_1 = (d_1 + \delta_1) - (T + \delta_R + \delta_2 + \delta_C)$$

$$T_2 = d_2 - \delta_C = \text{const.}$$



カッティング (1)



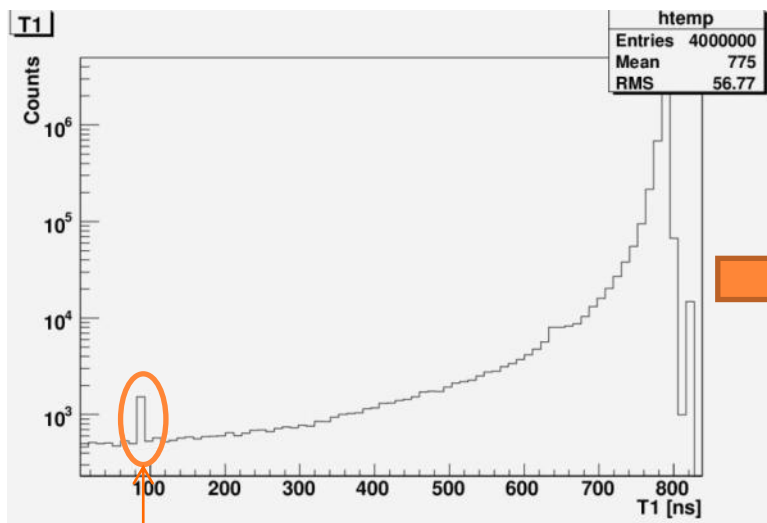
カット

採用



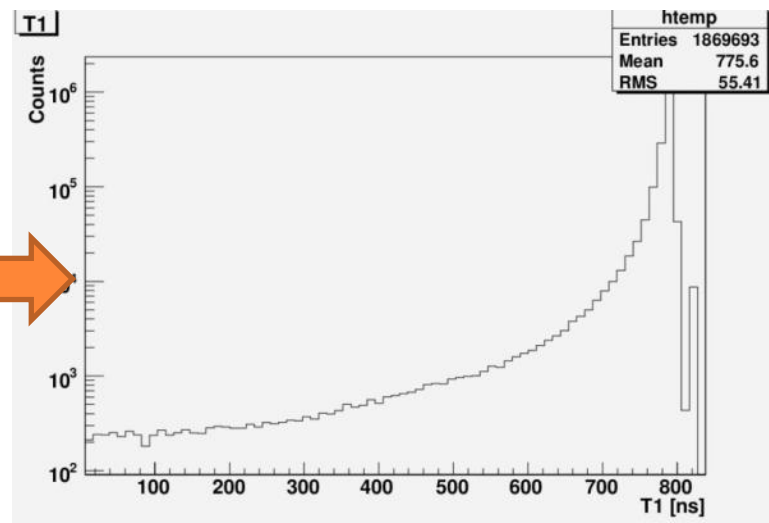
カッティング (2)

カット前



error

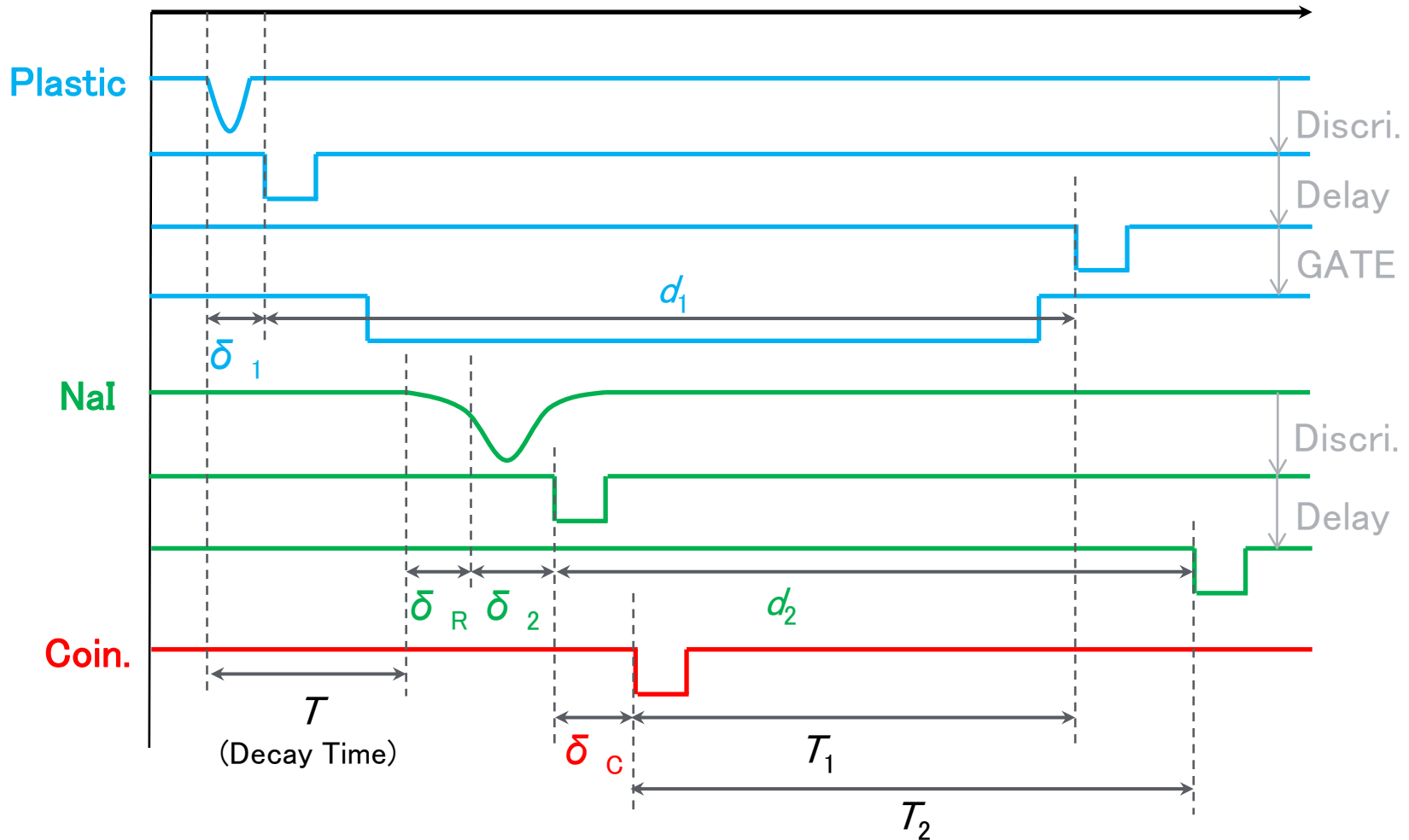
カット後



*TDC1*を400~410カット



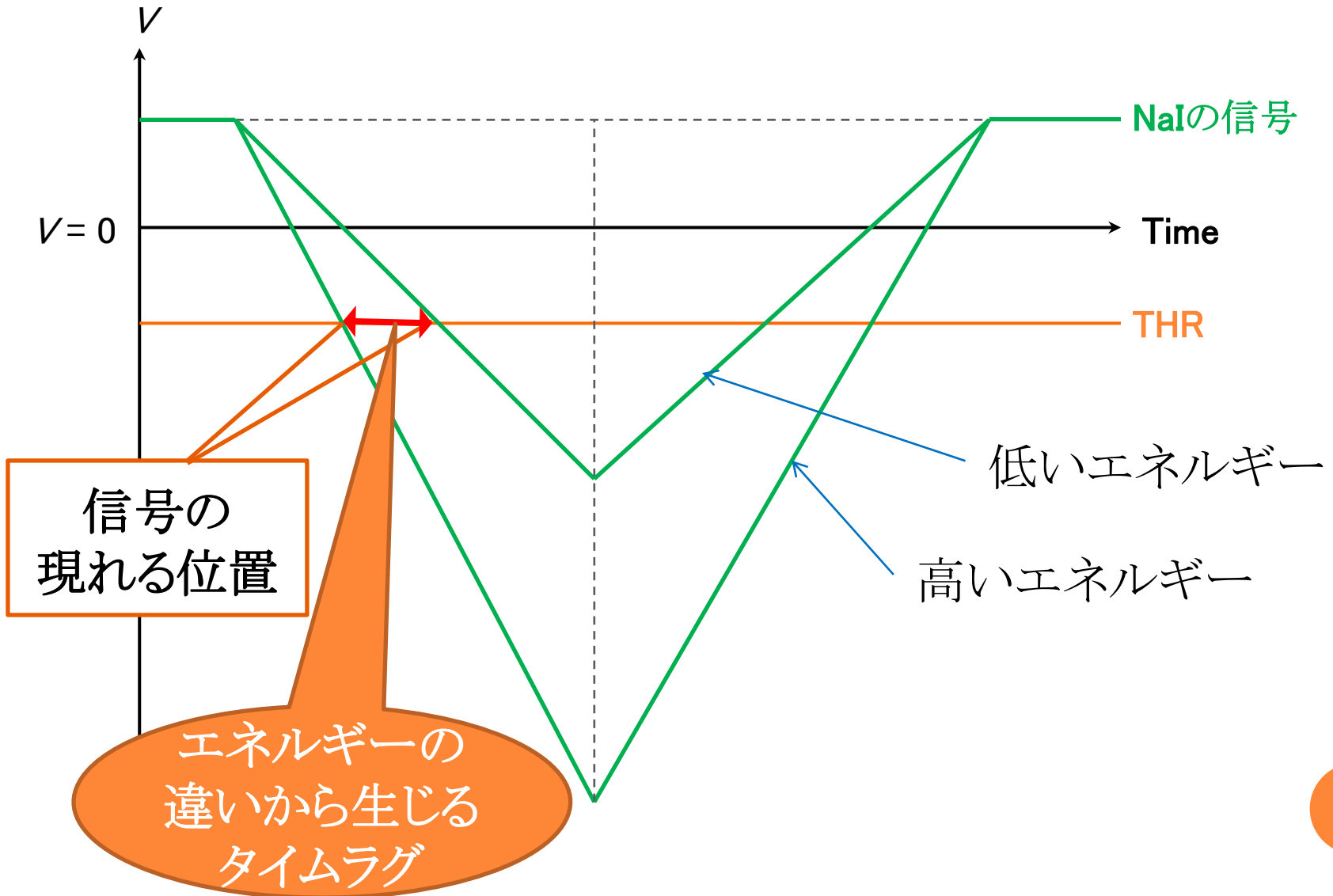
崩壊時間の決定



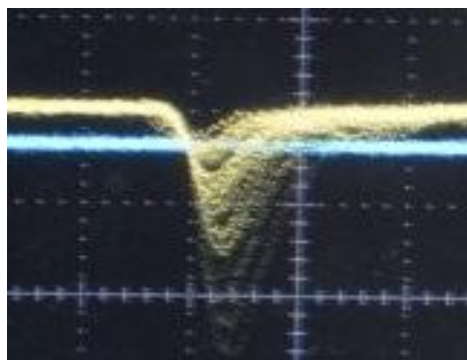
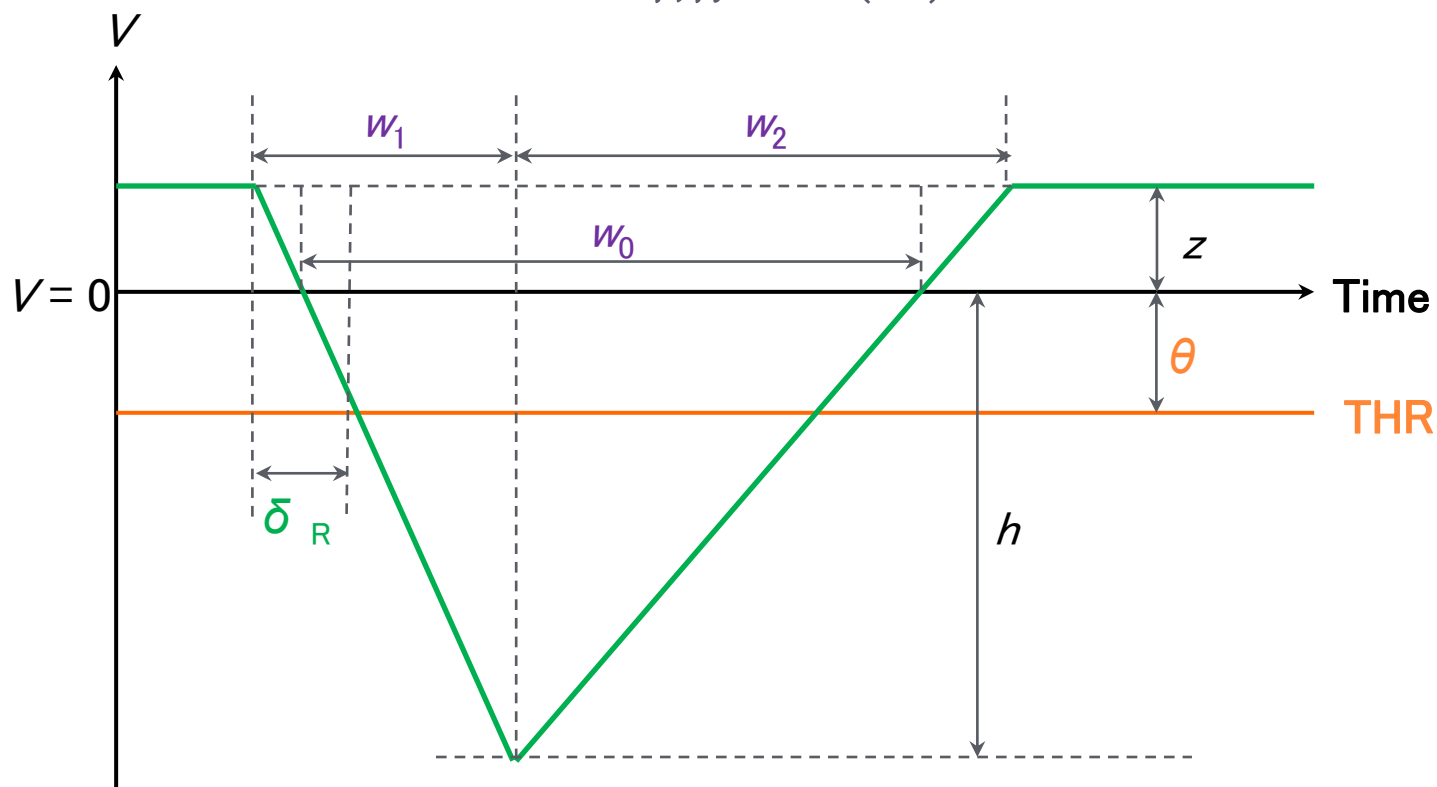
$$\begin{aligned}
 T &= -T_1 - \delta_R + (d_1 + \delta_1 - \delta_2 - \delta_C) \\
 &= -T_1 - \delta_R + \text{const.}
 \end{aligned}$$



T-Q補正(1)



T-Q補正 (2)

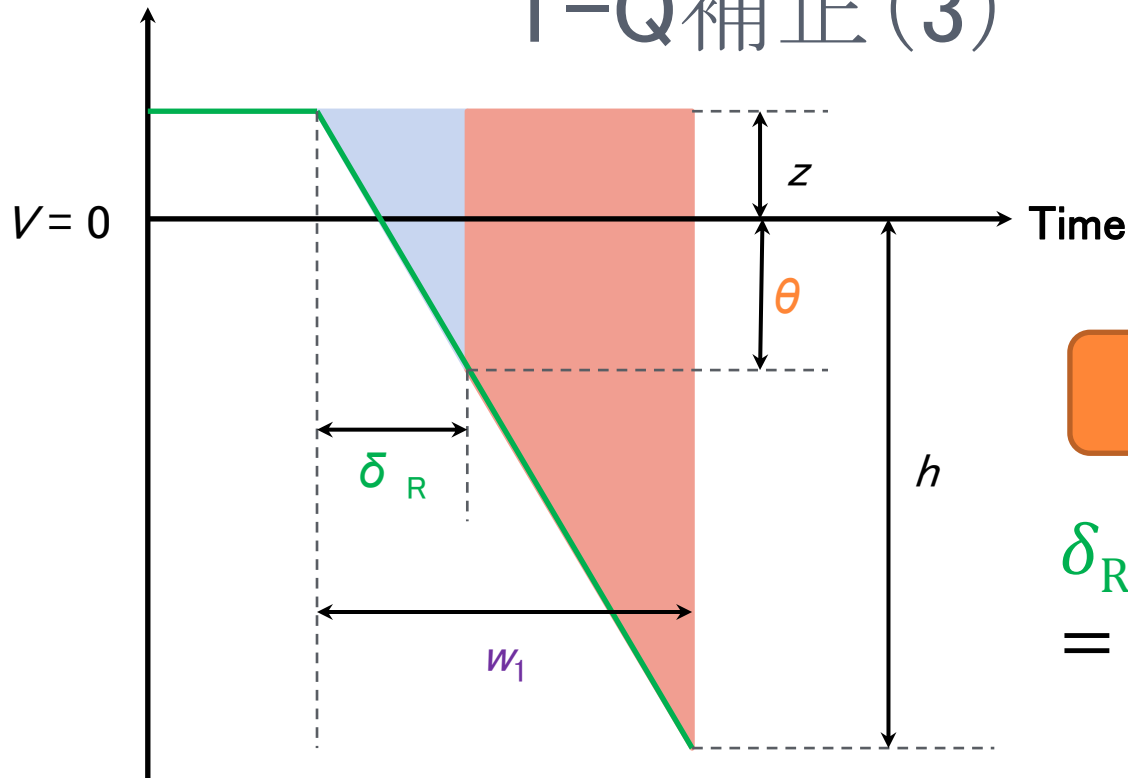


エネルギー

$$ADC \cong \frac{1}{2}hw_0 - \frac{1}{2}z(w_0 + w_1 + w_2)$$



T-Q補正 (3)



相似比

$$\delta_R : w_1 = (\theta + z) : (h + z)$$

分解能による
時間の遅れ

$$\begin{aligned} \delta_R &\cong \frac{\frac{1}{2}(\theta + z)w_0w_1}{ADC + \frac{1}{2}z(2w_0 + w_1 + w_2)} \\ &= \frac{a}{ADC + b} \end{aligned}$$



T-Q補正のフィッティング

崩壊時間

$$T = -T_1 - \frac{a}{ADC + b} + const.$$

fittingの結果

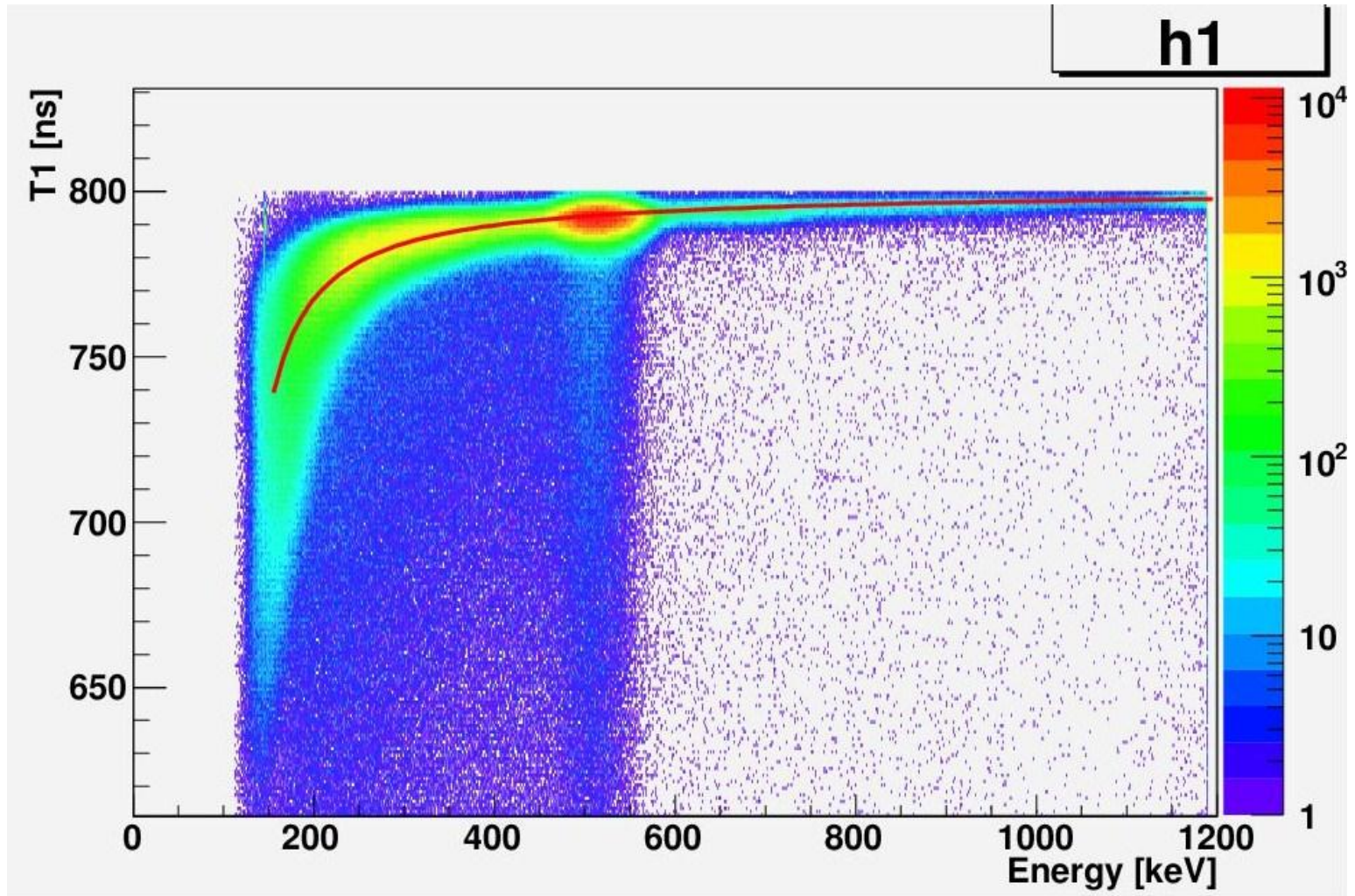
$$a = 3223.01 \pm 1.41359$$

$$b = -102.798 \pm 0.0272263$$

$$const. = 800.633 \pm 0.00411306$$

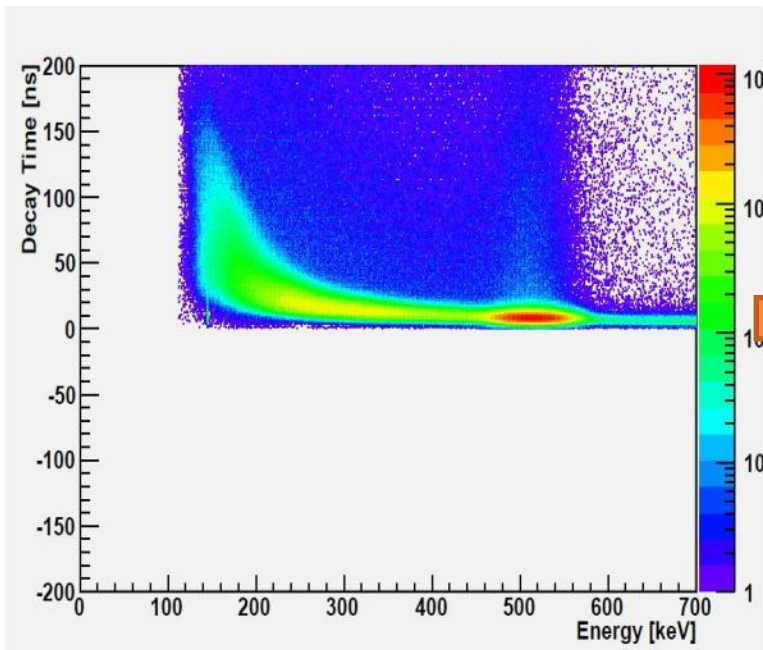


フィッティング関数

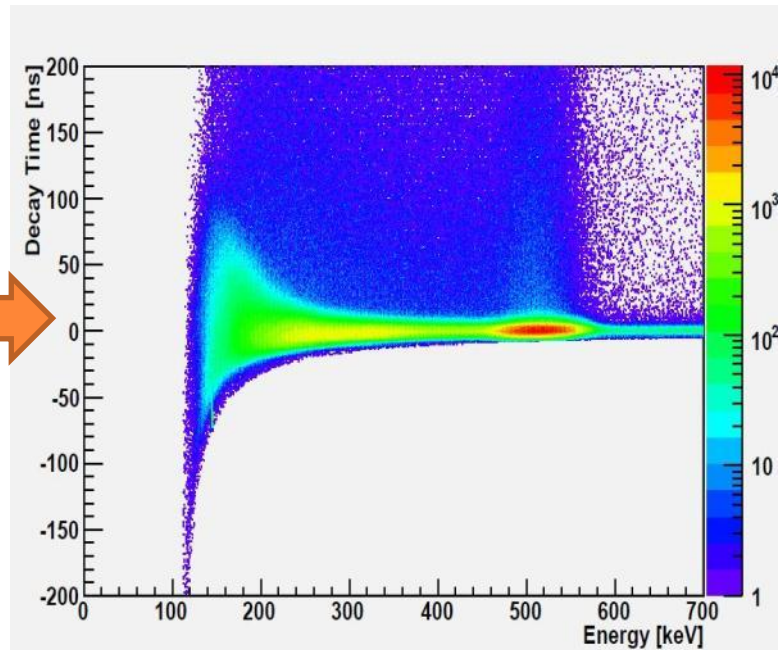


T-Q補正の結果(1)

補正前

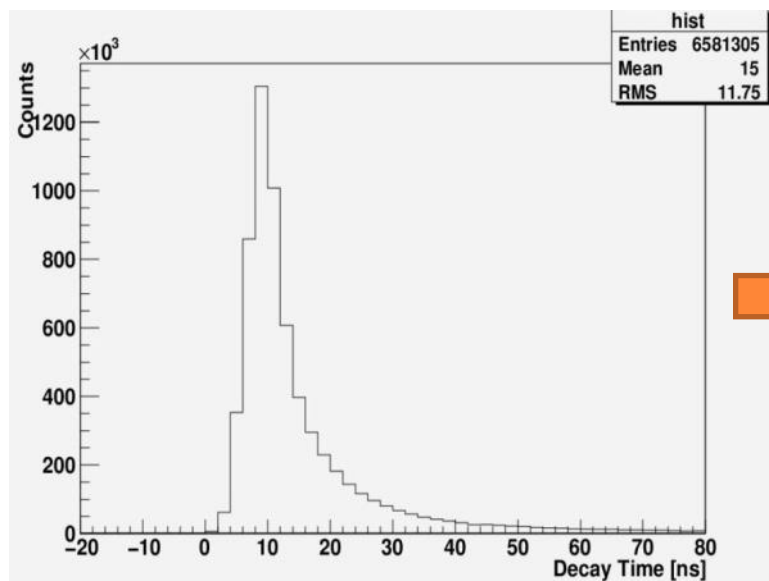


補正後

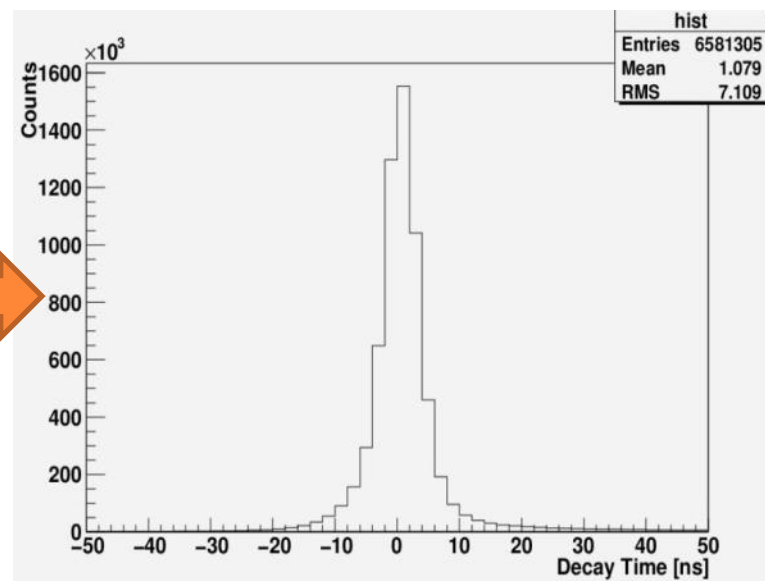


T-Q補正の結果(2)

補正前



補正後



標準偏差

$$\sigma = 3.19160 \pm 0.00200$$

$$\sigma = 2.91787 \pm 0.00146$$

pick-off補正前の寿命



THRESHOLD(THR)の特定

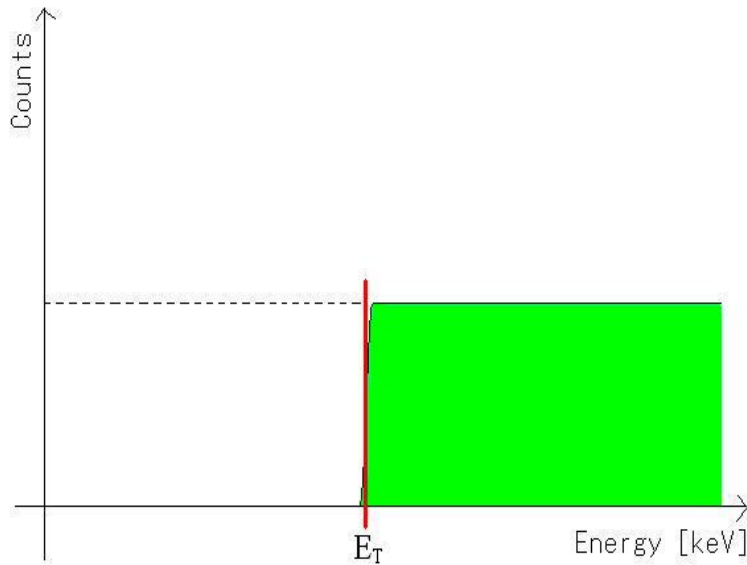
寿命を求めるためにはエネルギーカットが必要

←thresholdの影響を取り除くため

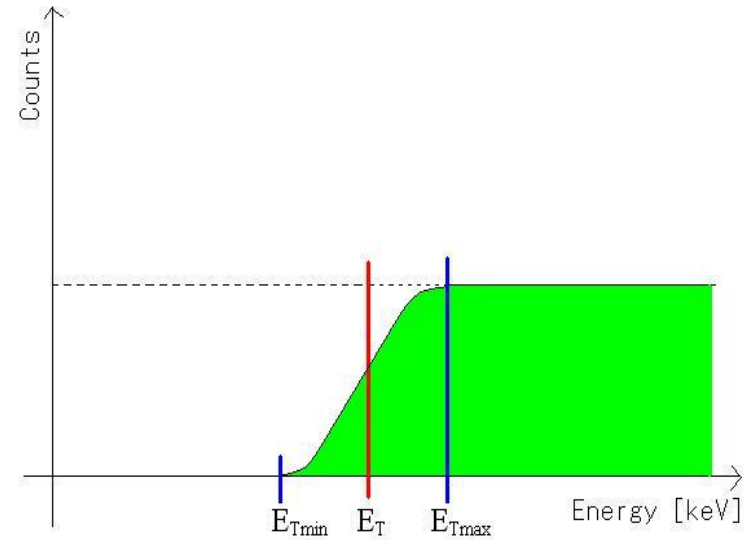
➡ thresholdの特定が必要



THRESHOLD(THR)の特定



理想的なthr近傍の挙動

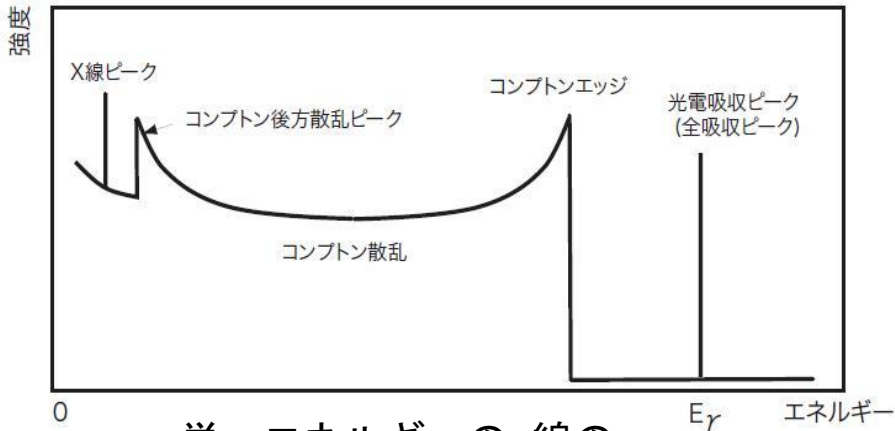


現実のthr近傍の挙動

➡ thrは E_{Tmax} とする



THRESHOLD(THR)の特定



単一エネルギーの γ 線を使用して
thrの特定を行う

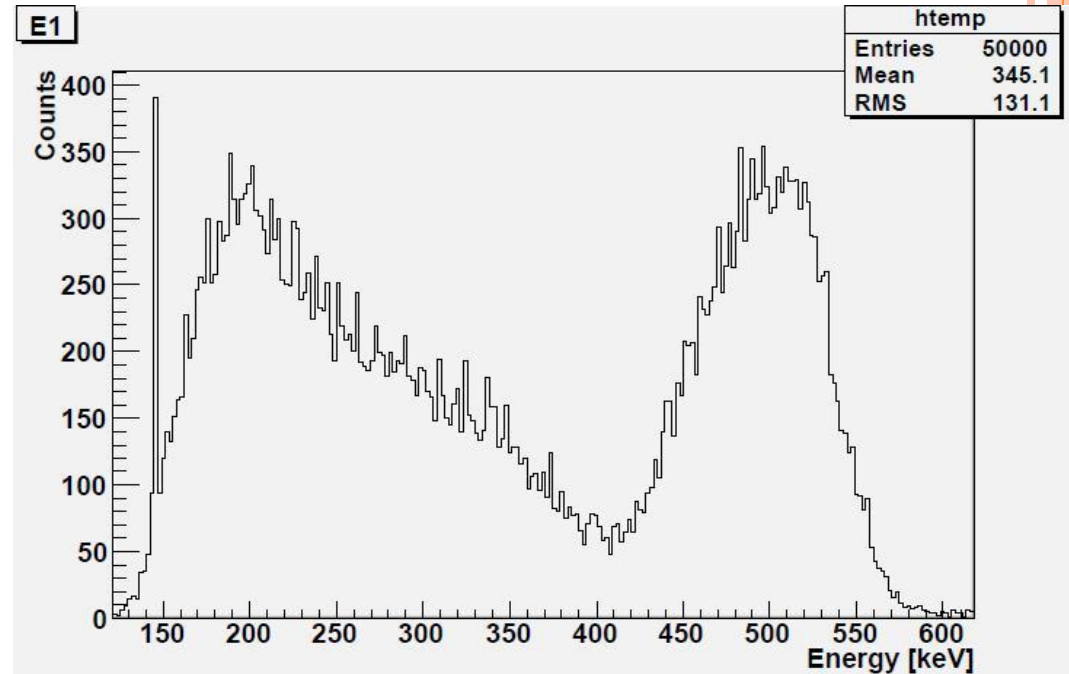
← <http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/hayano/pdf/houshasen2009.pdf>
より

単一エネルギーの γ 線の
エネルギースペクトル

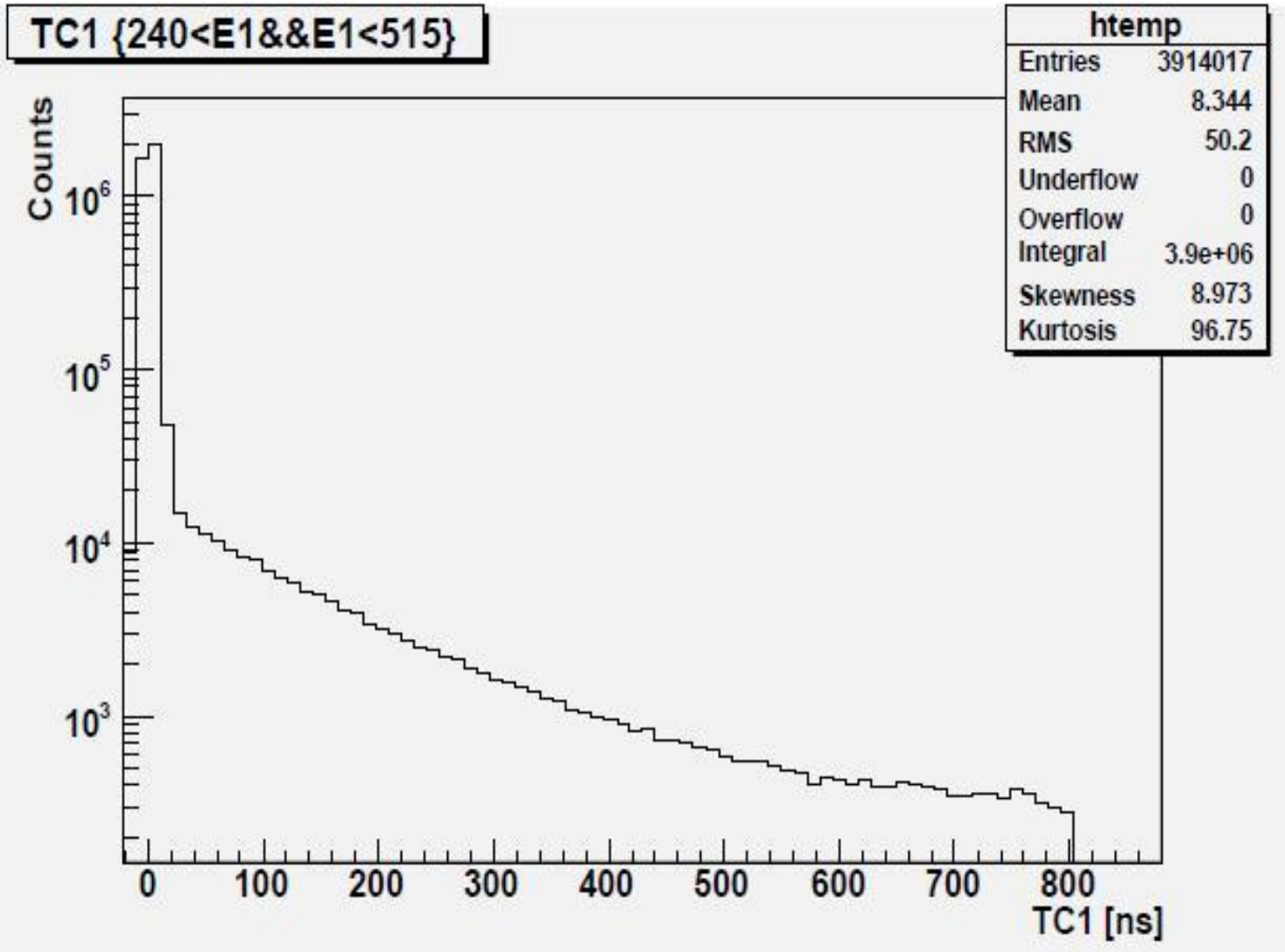
^{137}Cs を使う

← 662keVの γ 線一本のみ

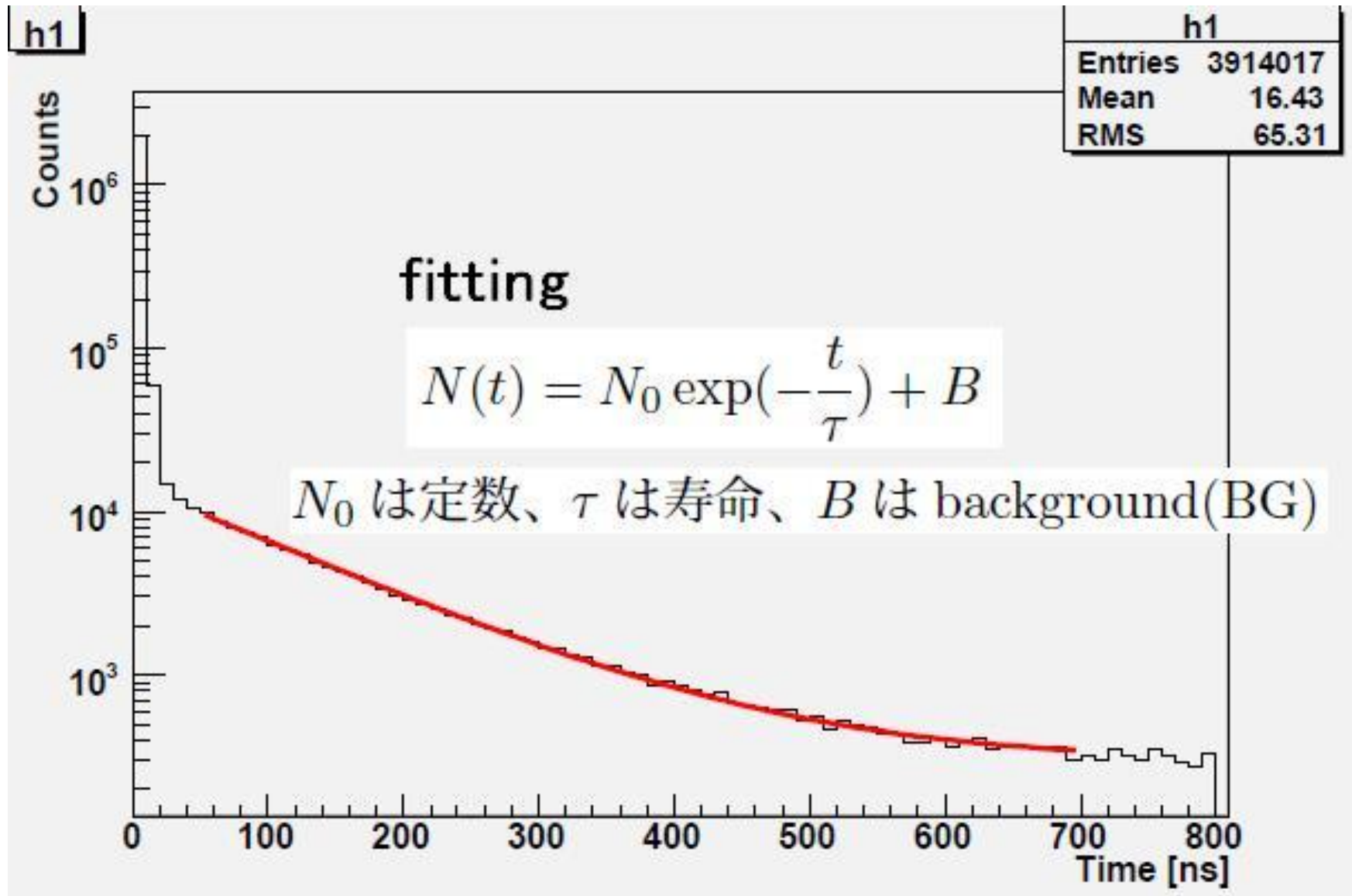
測定した ^{137}Cs の
エネルギースペクトル



FITTING (1)



FITTING (2)



FITTING (3)

Fitting範囲

Fit start time

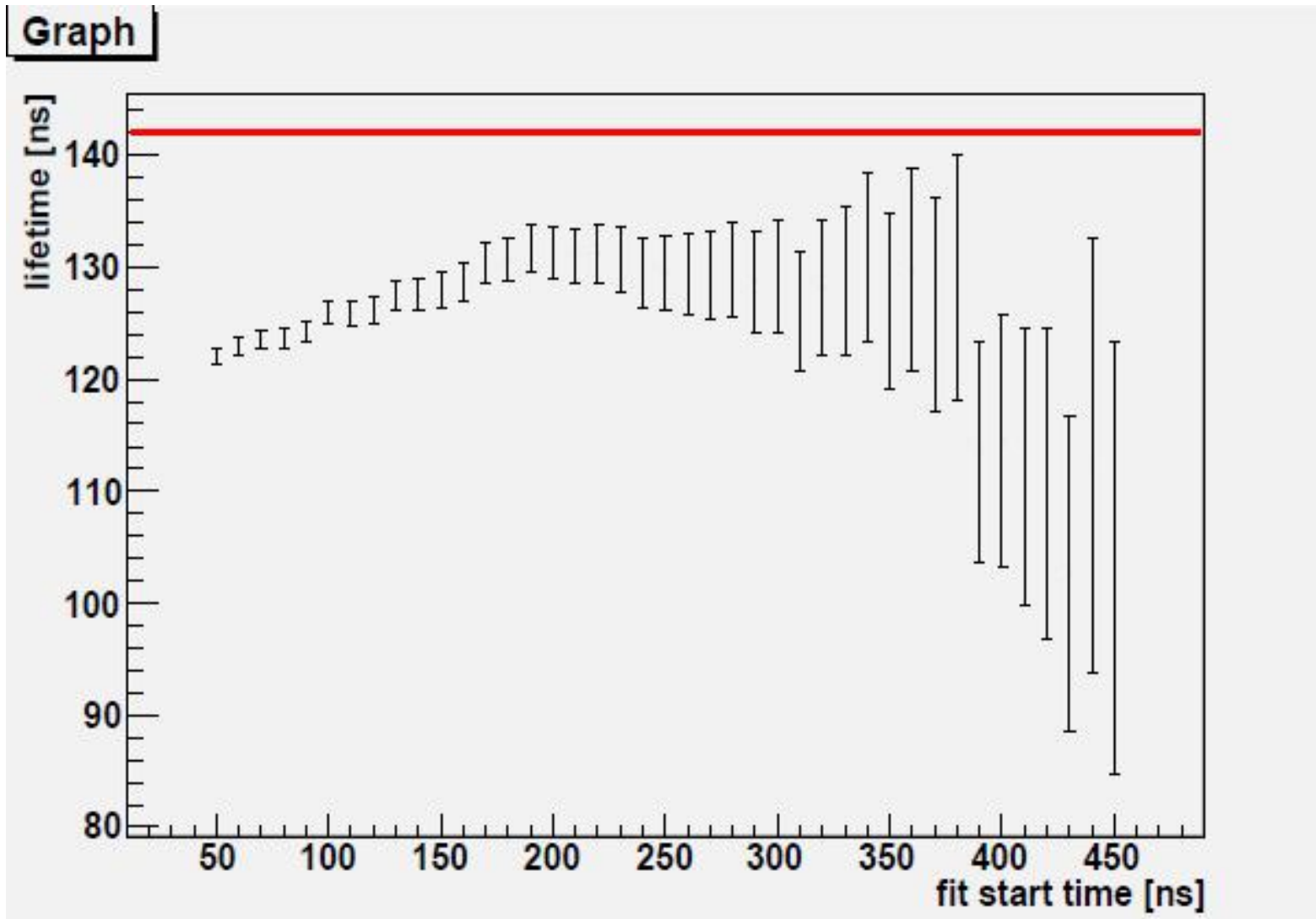
50 ns ~ 誤差が大きくなるまで (10 ns 刻み)

Fit end time

700 ns で固定



FITTING結果



赤線は理論値142.01 ns

FITTING結果

～200 nsと200 nsで傾向が違う

→結果の場合分け

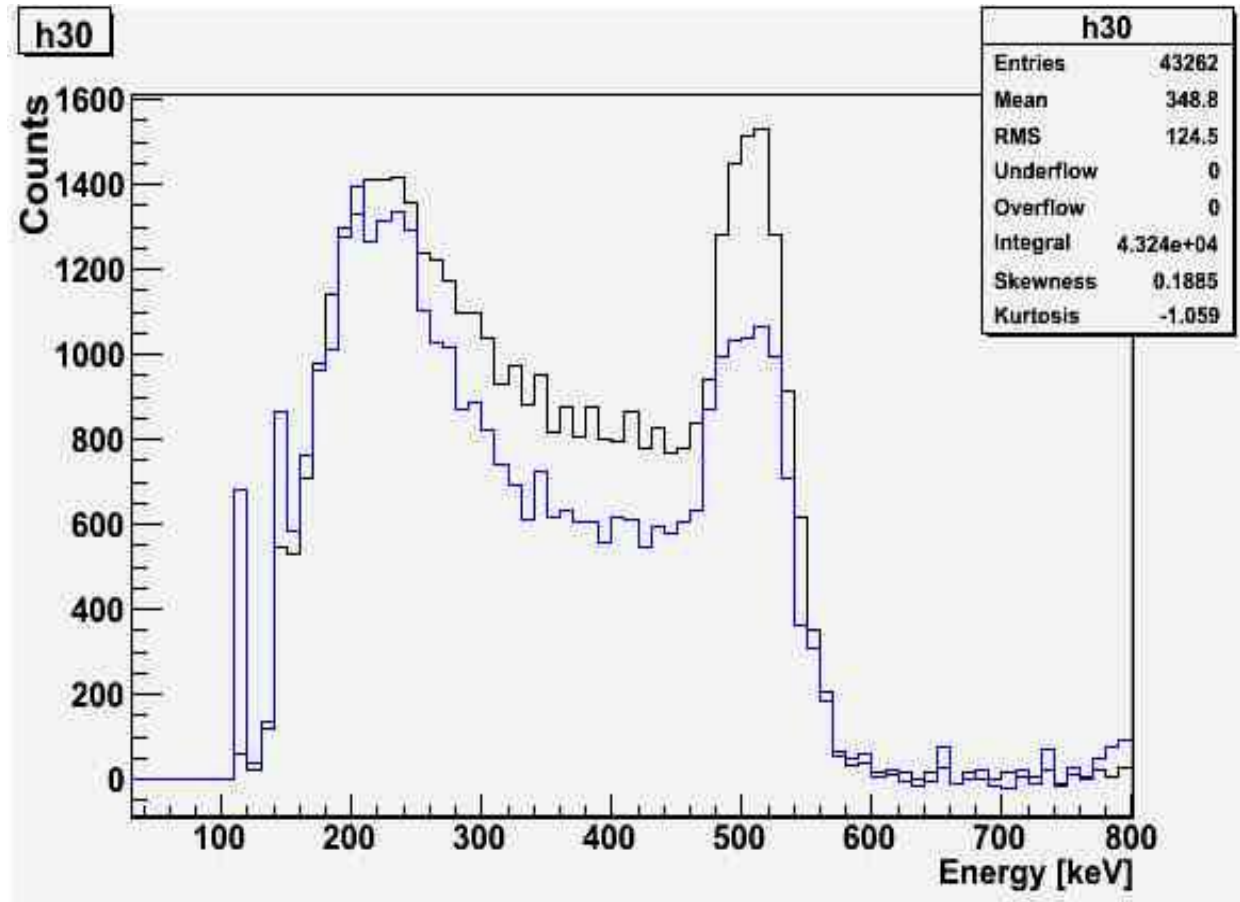
$$\begin{array}{l} \text{寿命} \\ T = \left\{ \begin{array}{l} 125.313 \pm 0.270 \text{ ns (50～450 nsのデータ)} \\ 129.455 \pm 0.875 \text{ ns (200～450 nsのデータ)} \end{array} \right. \end{array}$$

理論値よりも短い

→ pick-offのせい



PICK-OFFの時間依存性



黒は150～250 nsのデータ
青は250～800 nsのデータ



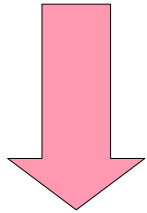
PICK-OFFの時間依存性

今までは

$$\Gamma = \Gamma_{\text{ortho}} + \Gamma_{\text{pick}}$$

fit関数

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

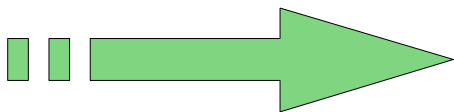


実際には
t依存性が

補正fit関数

$$\Gamma(t) = \Gamma_{\text{ortho}} + \Gamma_{\text{pick}}(t)$$

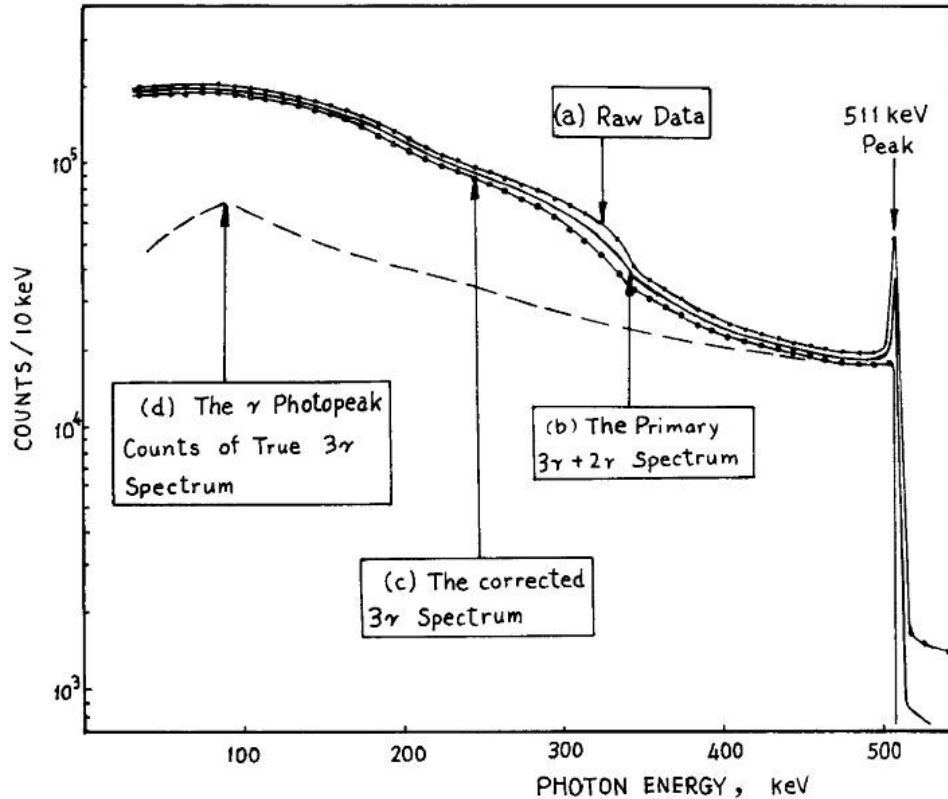
$$N(t) = N_0 \exp\left\{-\frac{1}{\tau_{\text{ortho}}} \int_0^t \left(1 + \frac{\Gamma_{\text{pick}}(t')}{\Gamma_{\text{ortho}}}\right) dt'\right\} + B$$



$\Gamma_{\text{pick}}(t)/\Gamma_{\text{ortho}}$ を求める必要がある

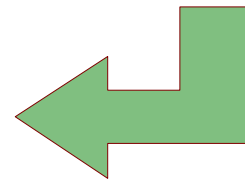


THRによるカットの仮定

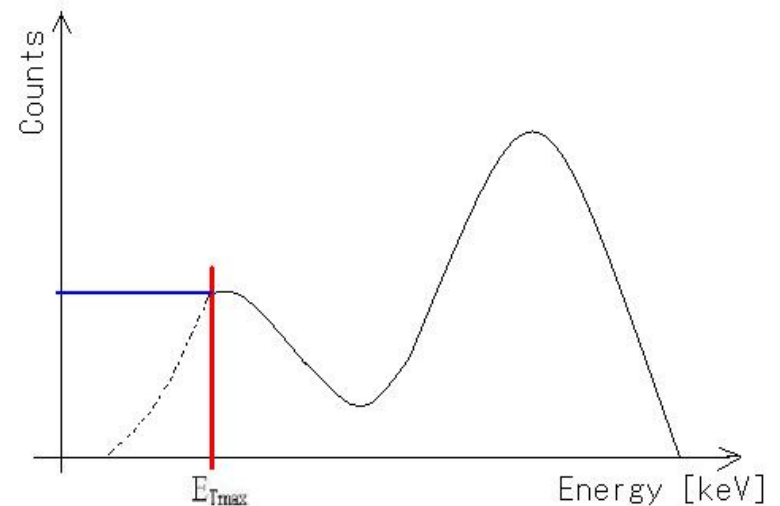
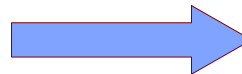


T. Chang, H. Tang and Y. Li:
Phys. Lett. B 157, Issues 5-6 (1985) 357-360

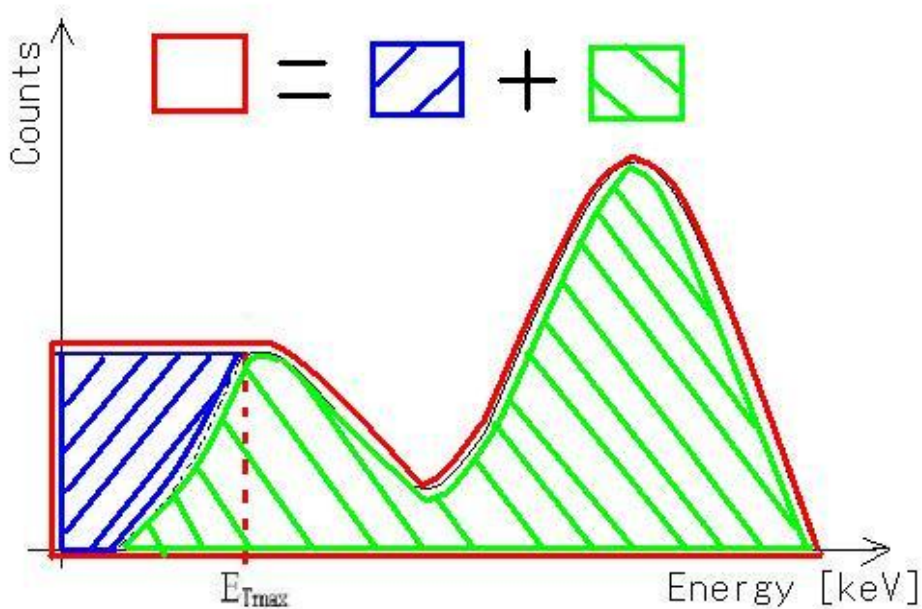
HPGe 検出器を用いた
o-Ps のエネルギースペクトル
の文献データ



フラットであると仮定



$$\Gamma_{\text{PICK}} / \Gamma_{3\gamma}$$



$$N_{3\gamma} = \square$$

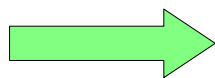
$$N_{\text{thr}} = \square$$

$$N_{3\gamma}^* = \square$$

$$\varepsilon_{3\gamma} = \square / (\square + \square)$$

$$= N_{\text{thr}} / N_{3\gamma}^*$$

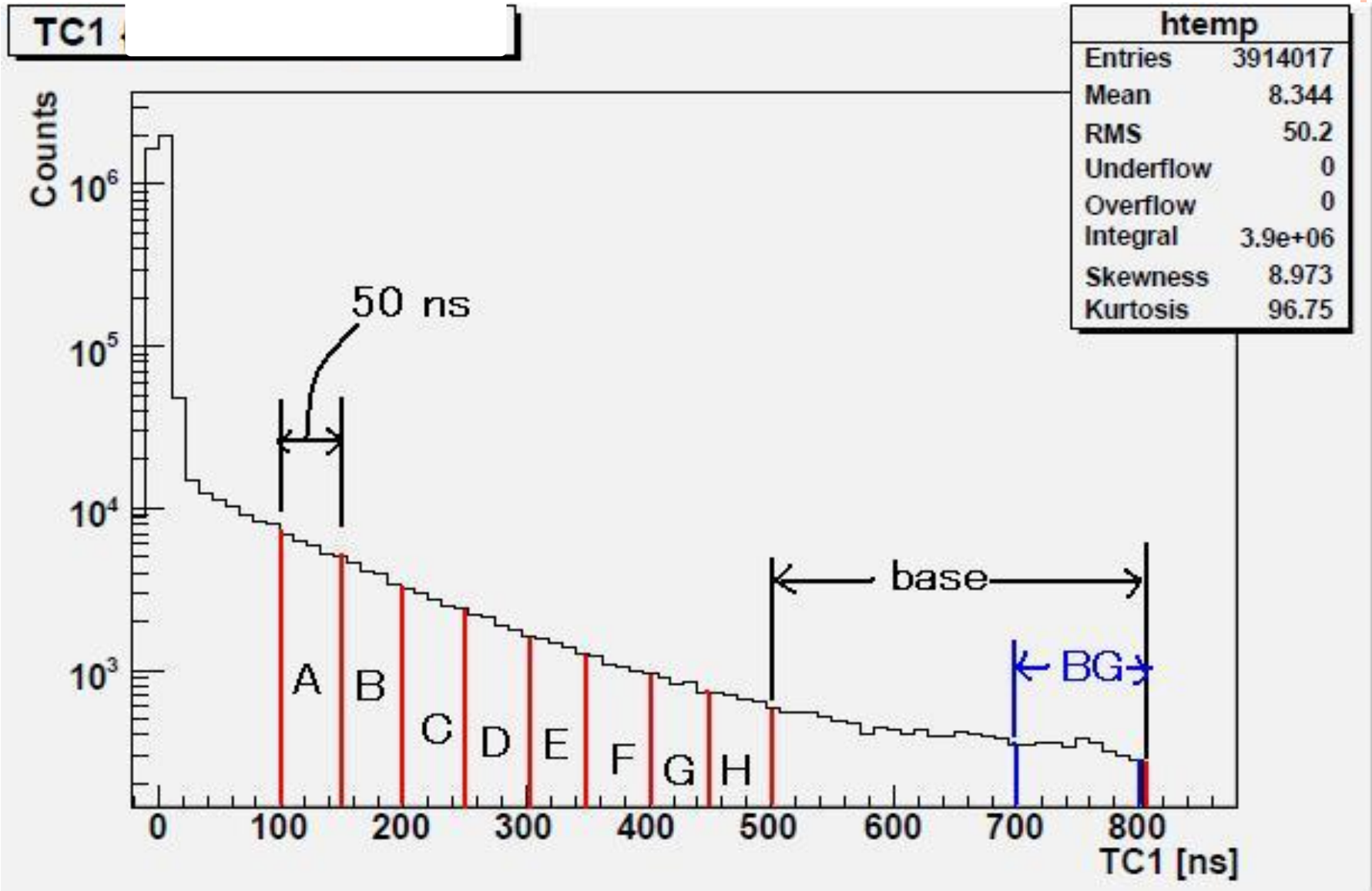
pickの方も同様



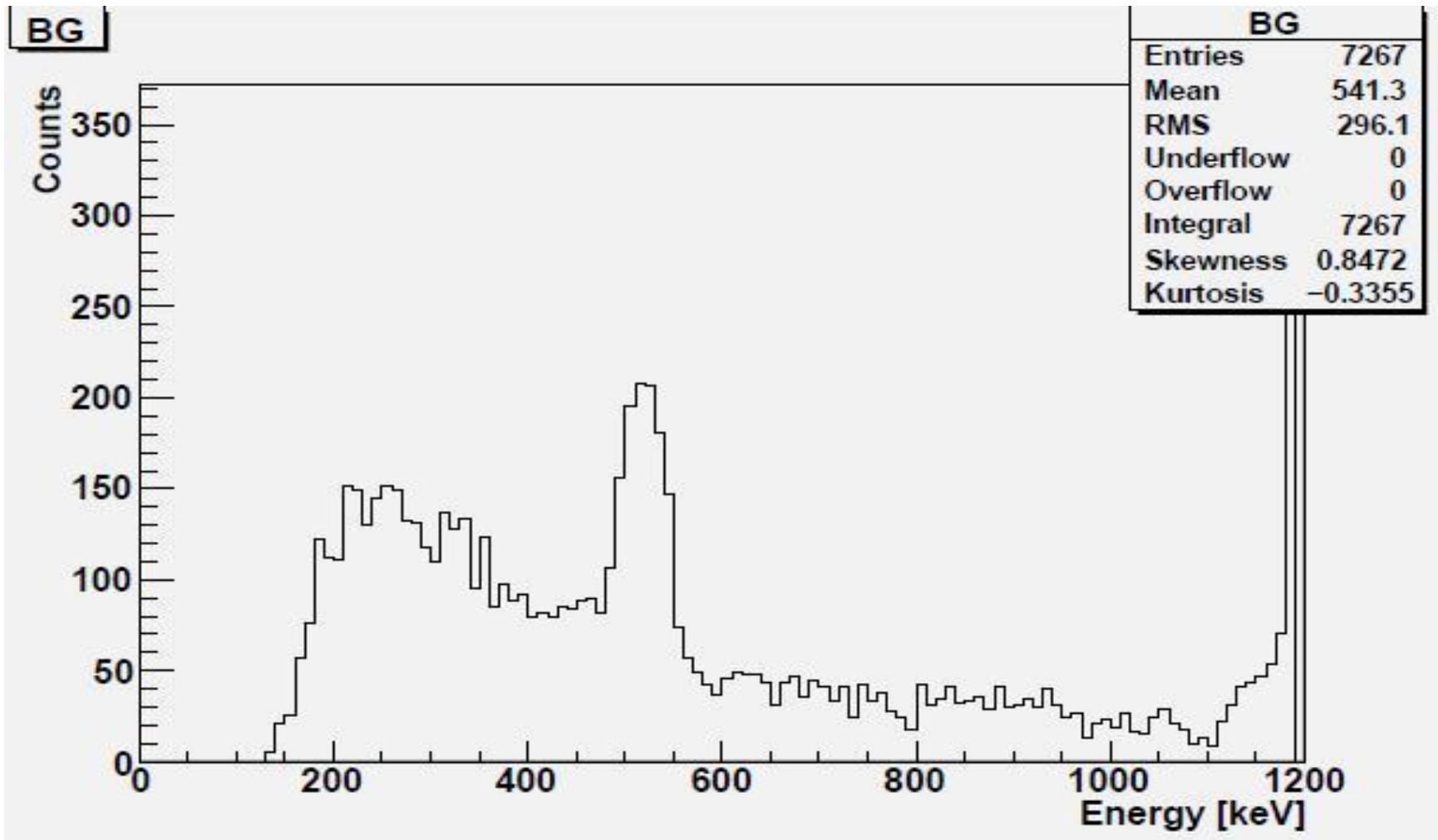
$$\frac{\Gamma_{\text{pick}}}{\Gamma_{\text{ortho}}} = \frac{3}{2} \frac{1 - \varepsilon_{3\gamma}}{1 - \varepsilon_{\text{pick}}} \frac{N_{\text{pick}}}{N_{3\gamma}}$$



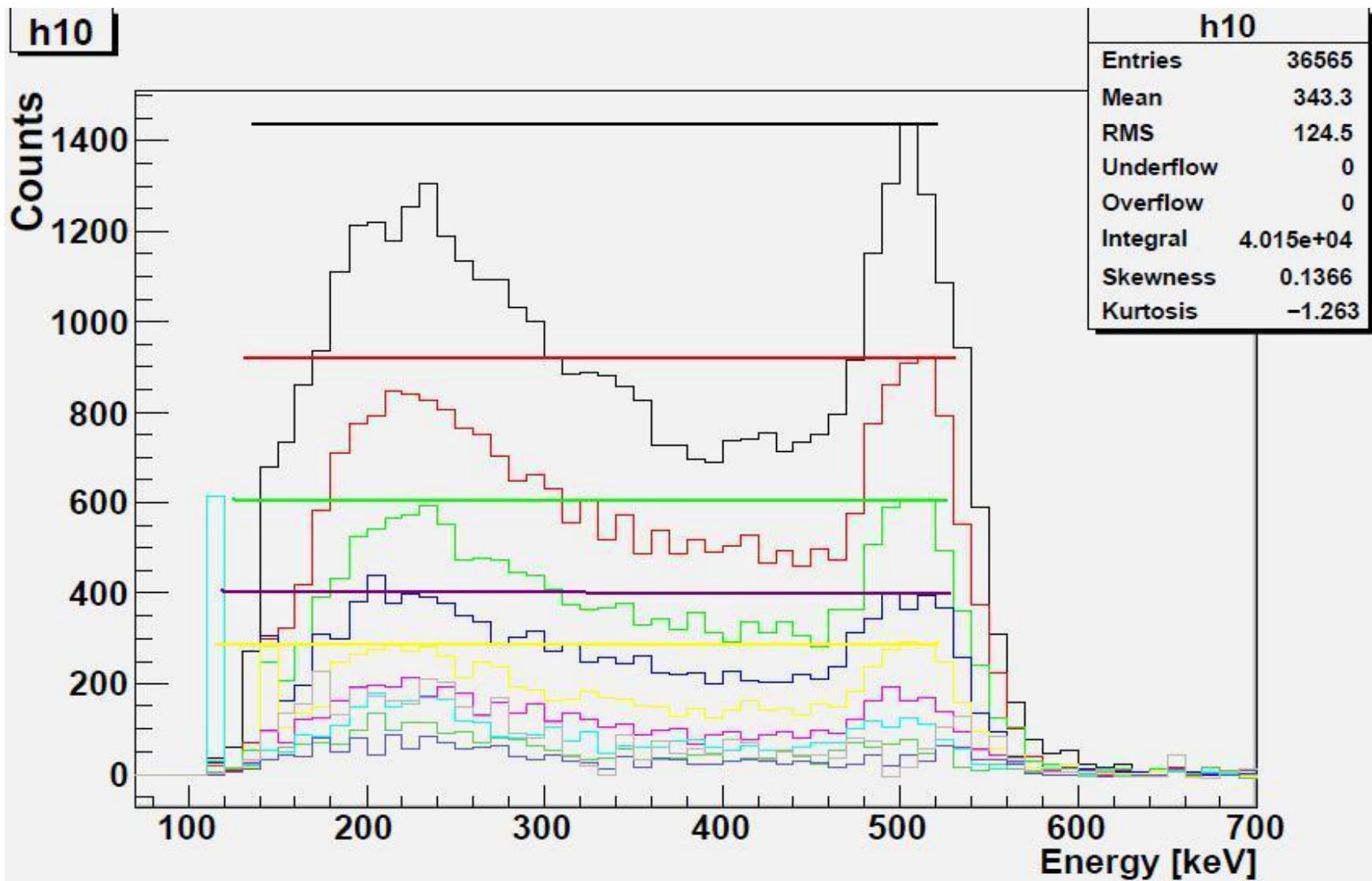
時間の分割



BACKGROUNDデータ

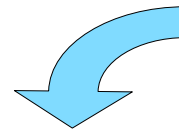
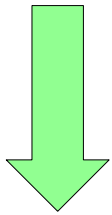


A~H比較



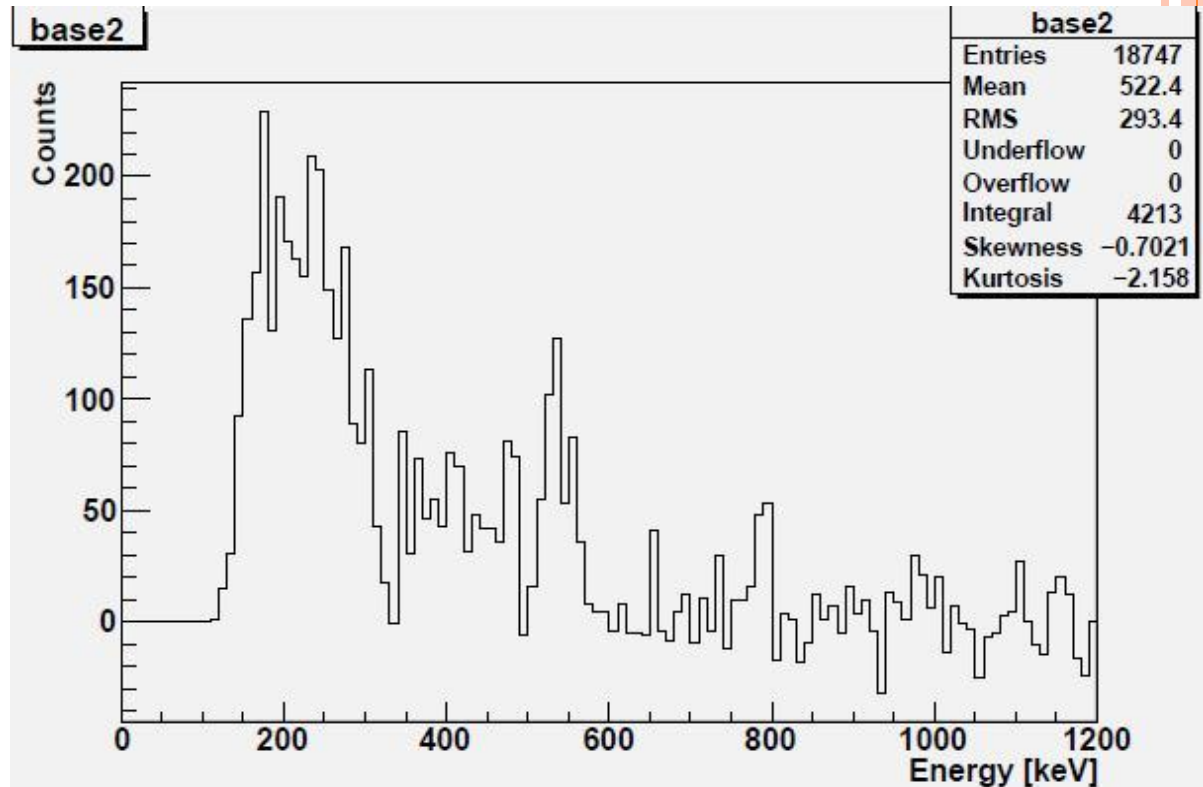
BASEデータ

500~800 nsのデータは
十分に熱化したと仮定

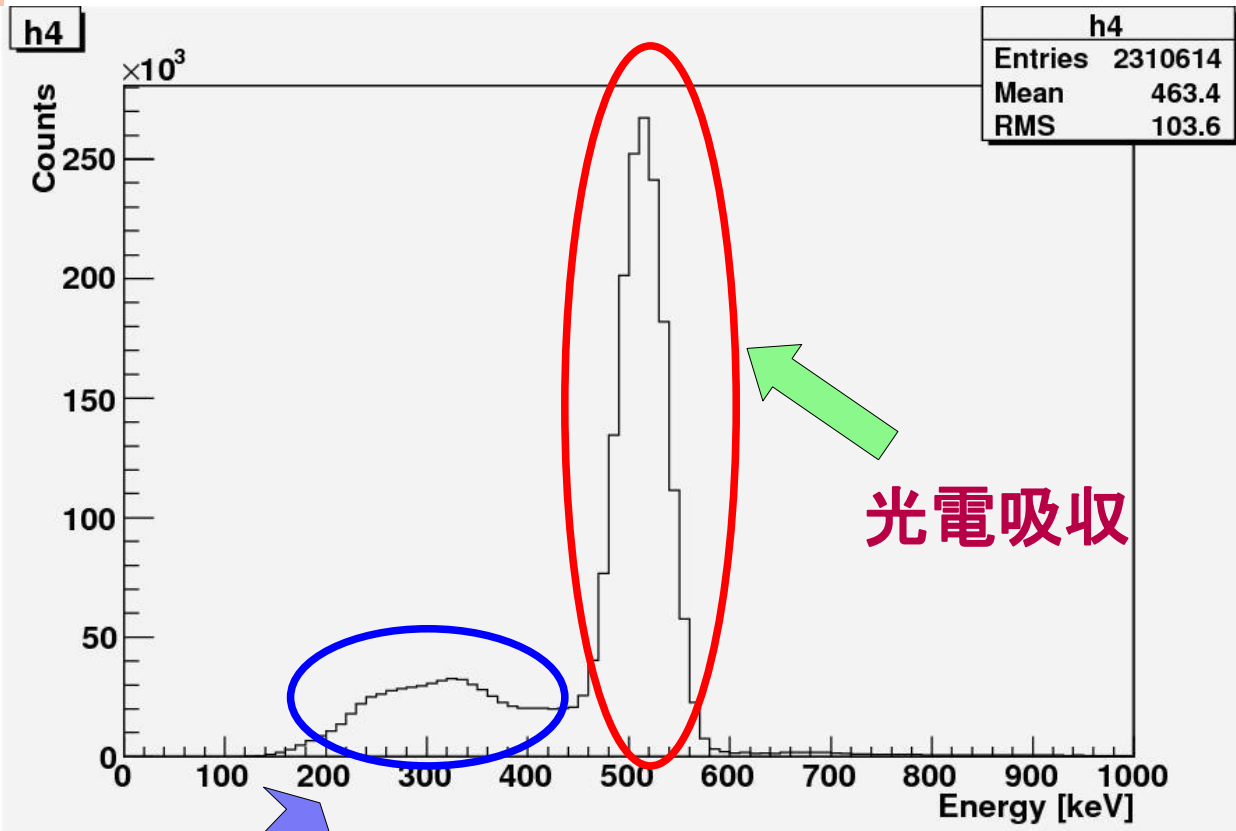


BGを引いた
500~800 nsの
baseデータ

pick-offのない
純粋なo-*Ps*の分布
とみなす
(baseデータと呼ぶ)



PICK-OFFのコンプトン散乱



p-Psの分布

コンプトン散乱

光電吸収

pick-offは
2 γ 崩壊なので
p-Psの分布と
似ているはず

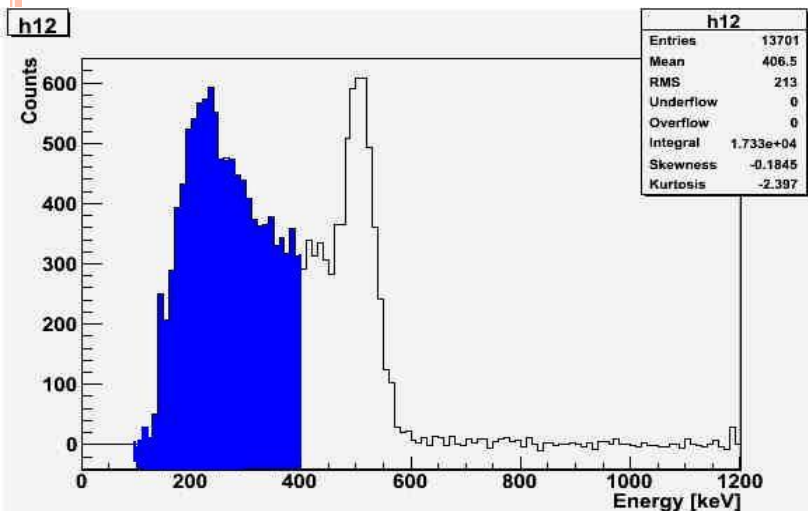
&

p-Psの分布は
光電吸収の方が
コンプトン散乱よりも
数が多い

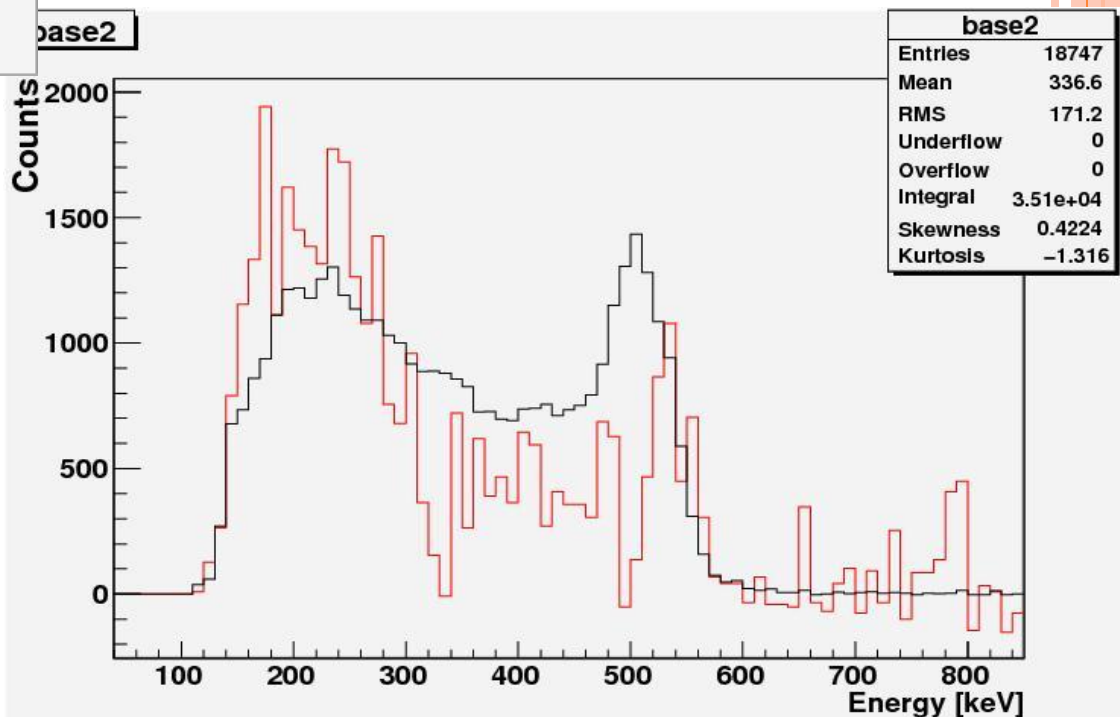
今回はpick-offのコンプトン散乱は
無視できるほど小さいと仮定

$\rightarrow \epsilon_{\text{pick}}$ は0となる

各範囲のo-Psの分布



青で囲んだ範囲は
全てo-Psによる
ものとする



例.範囲A

赤のグラフがscale倍
したbaseデータ

→範囲Aの

o-Psのデータとする

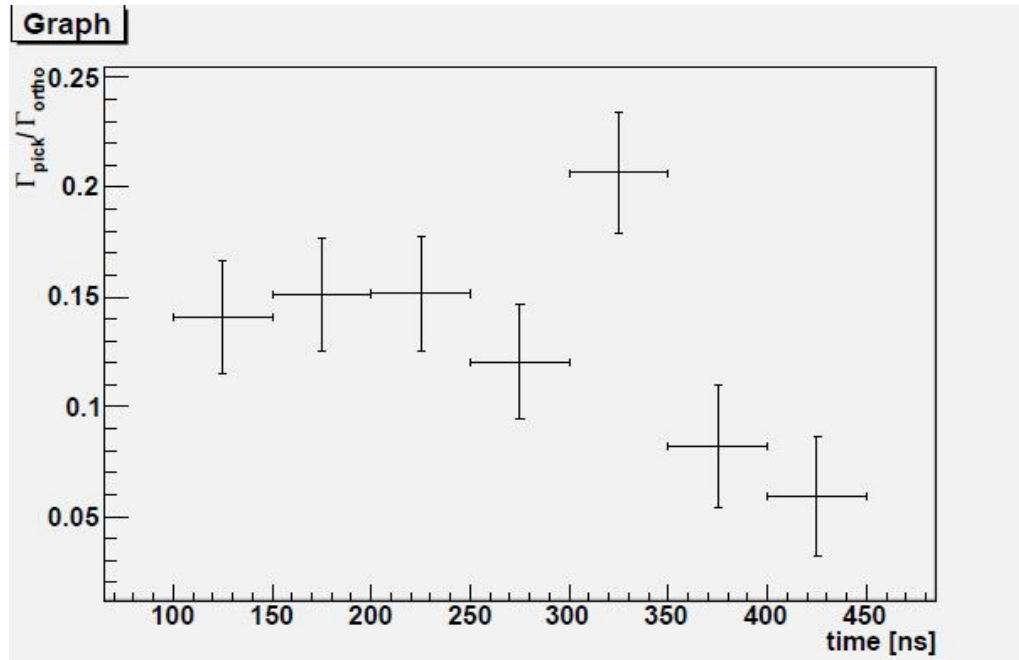
$\Gamma_{\text{PICK}}/\Gamma_{3\gamma}$ の値

	$\epsilon_{3\gamma}$	$N_{3\gamma}$	N_{pick}	$\Gamma_{\text{pick}}/\Gamma_{\text{ortho}}$
A	0.3006	35950	4451	0.1299 ± 0.0260
B	0.3246	22760	3165	0.1409 ± 0.0258
C	0.3279	15200	2130	0.1413 ± 0.0262
D	0.3500	10790	1244	0.1124 ± 0.0260
E	0.3451	6879	1347	0.1923 ± 0.0278
F	0.3623	4980	401	0.0770 ± 0.0280
G	0.4176	3581	226	0.0552 ± 0.0272

※ Hはデータ数が少なかったので用いていない



$\Gamma_{\text{PICK}}/\Gamma_{3\Gamma}$ の値

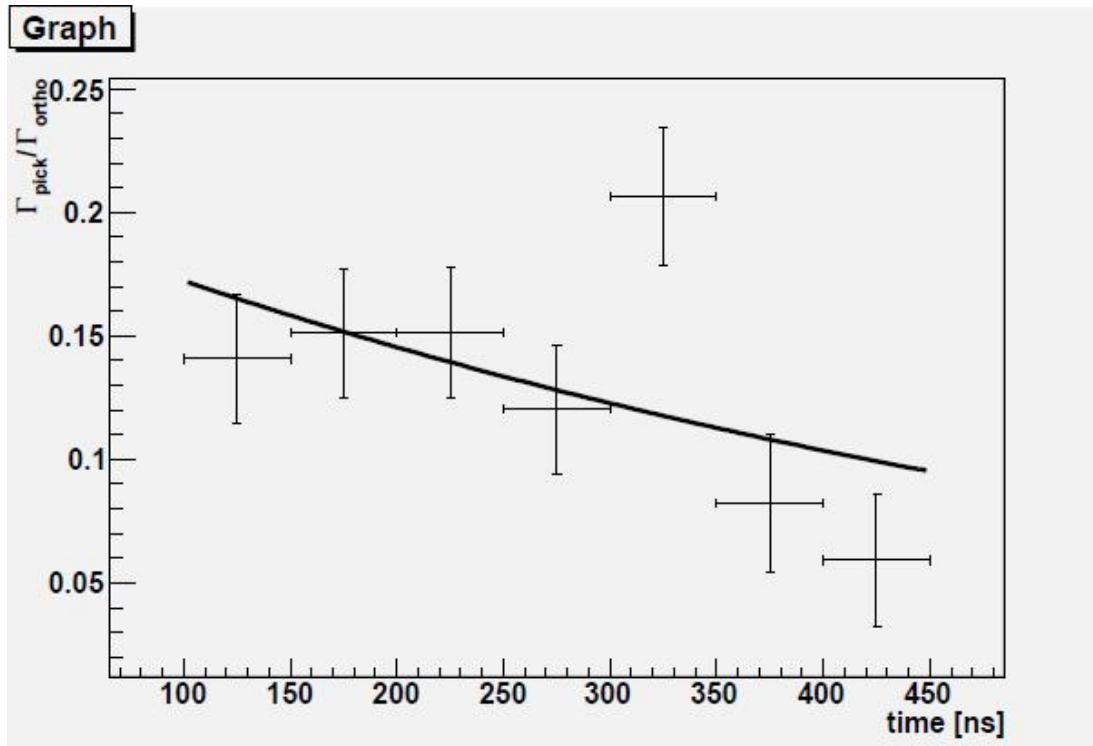


熱化により $\Gamma_{\text{pick}}/\Gamma_{3\gamma}$ は一定値に減少(今回は0)
以下の補正関数でfitting

$$\frac{\Gamma_{\text{pick}}(t)}{\Gamma_{\text{ortho}}} = p \exp\left(-\frac{t}{q}\right)$$



$\Gamma_{\text{PICK}}/\Gamma_{3\Gamma}$ の FITTING



p 、 q の値

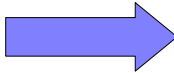
$$p = 0.2042 \pm 0.0430$$

$$q = 589.1 \pm 280.4$$



PICK-OFF補正後のFITTING

$\Gamma_{\text{pick}}/\Gamma_{3\gamma}$ の具体形が分かったので
補正fit関数に代入

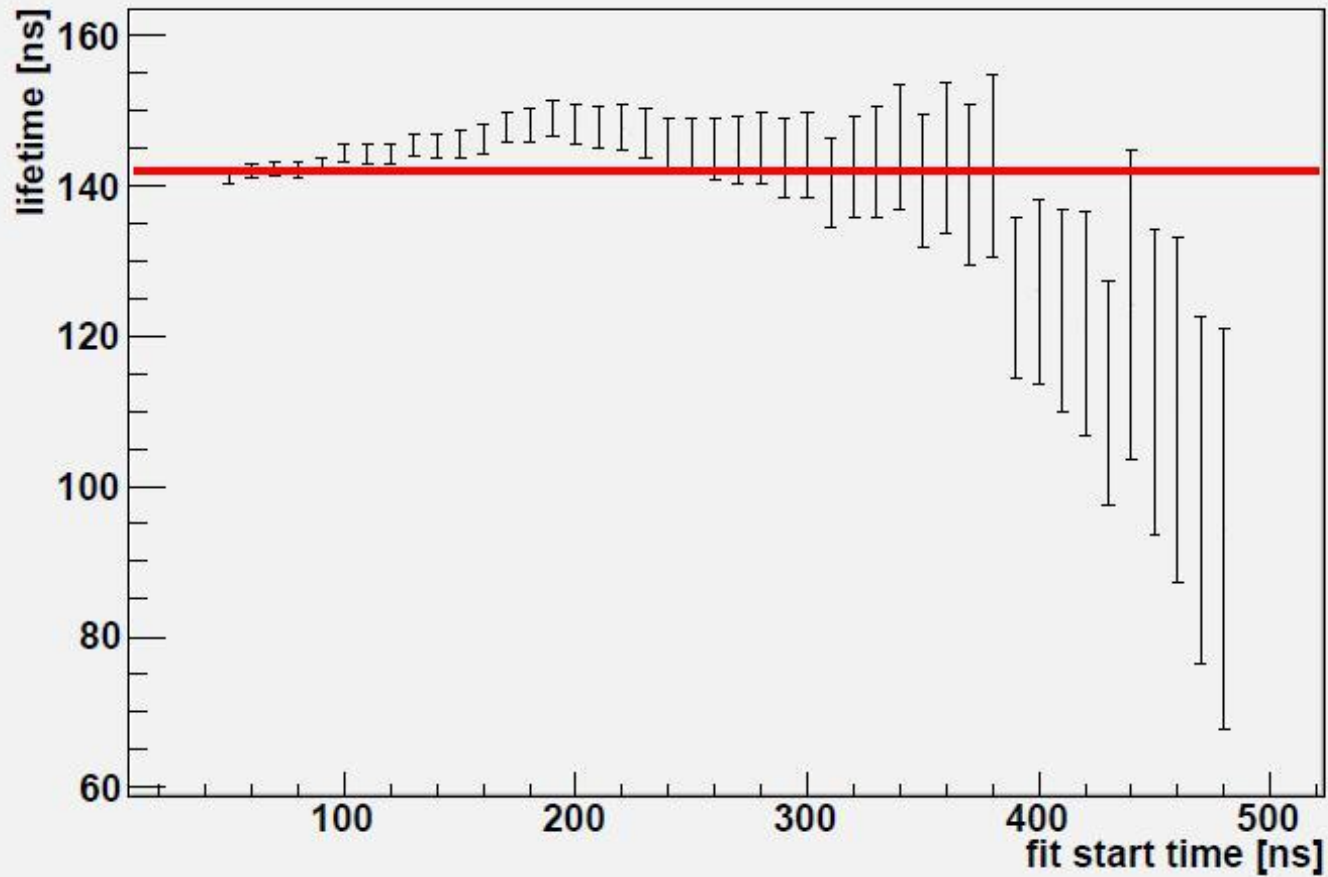

$$N(t) = N_0 \exp \left[-\frac{1}{\tau_{\text{ortho}}} \left\{ t - pq \exp \left(-\frac{t}{q} \right) \right\} \right] + B$$

これでfitting



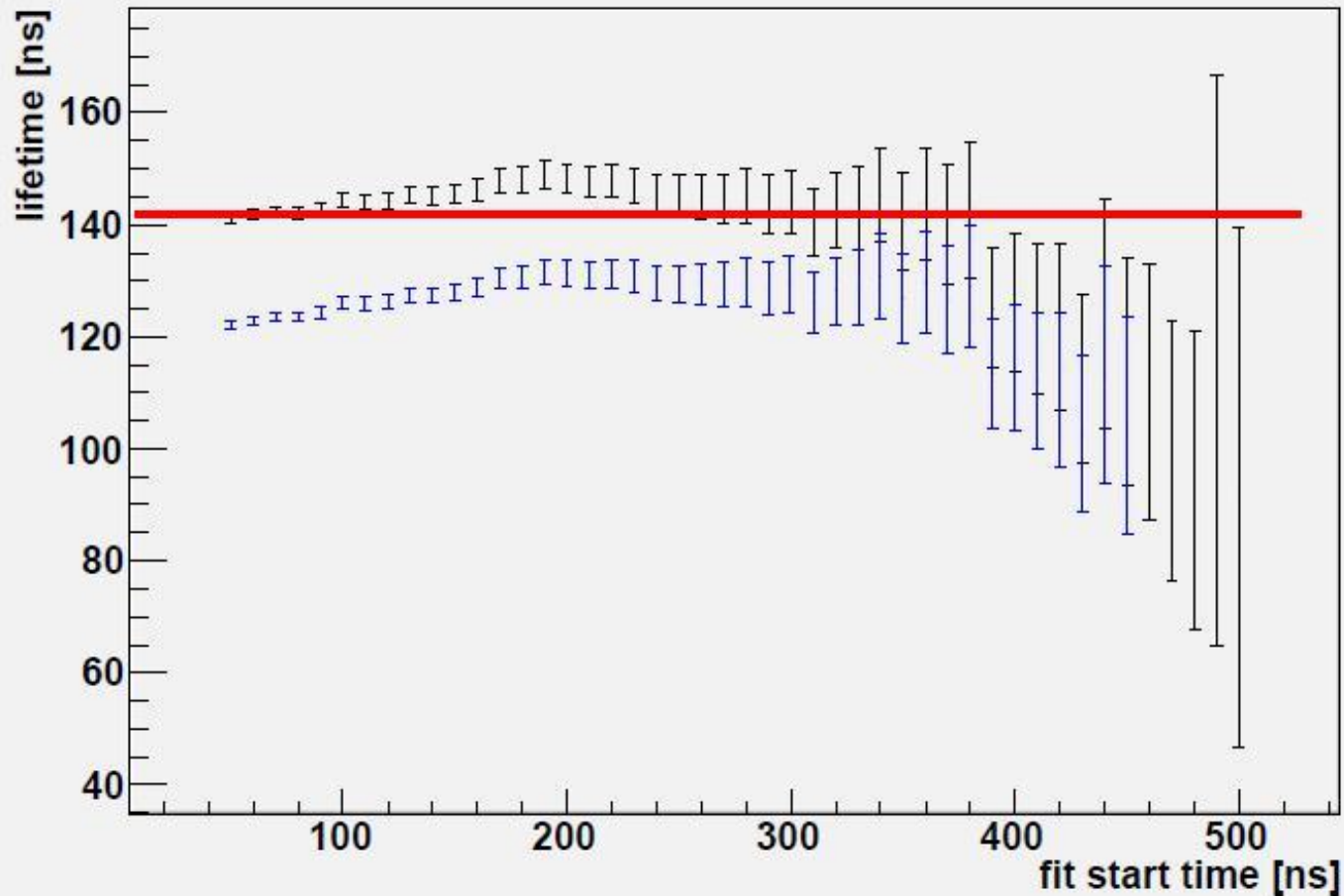
FITTING結果

Graph



FITTING比較

Graph

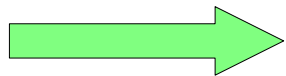


補正後の寿命

寿命 $\tau = 143.5 \pm 0.3 \text{ ns}$

補正前

$$\tau = \begin{cases} 125.313 \pm 0.270 \text{ ns (50~450 nsのデータ)} \\ 129.455 \pm 0.875 \text{ ns (200~450 nsのデータ)} \end{cases}$$



理論値に近づいた！



4. 考察

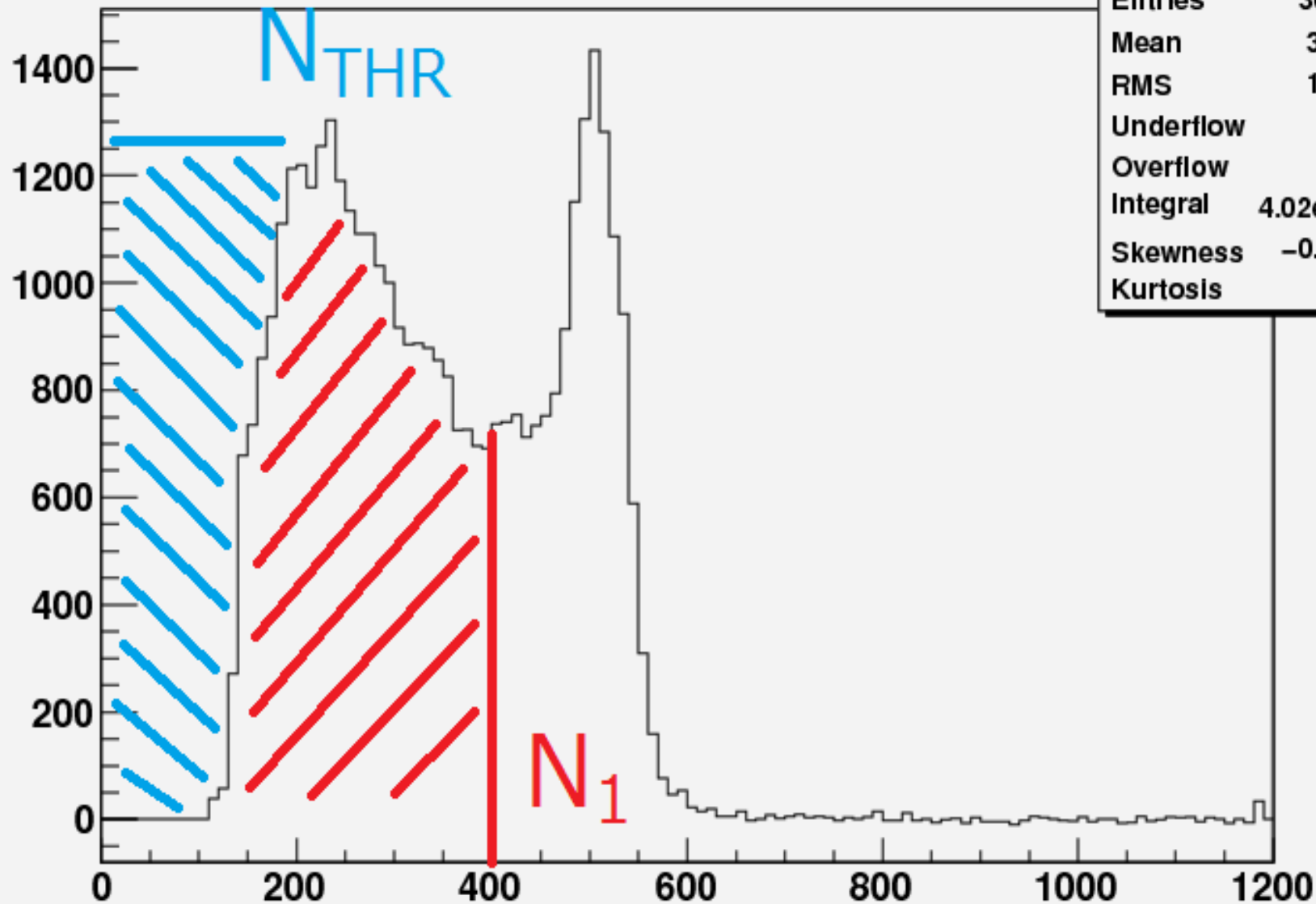
- 寿命を評価するためには…

$\Gamma_{pick} \wedge \Gamma_{3\gamma}$ の時間依存性

を求めないといけない。



h10

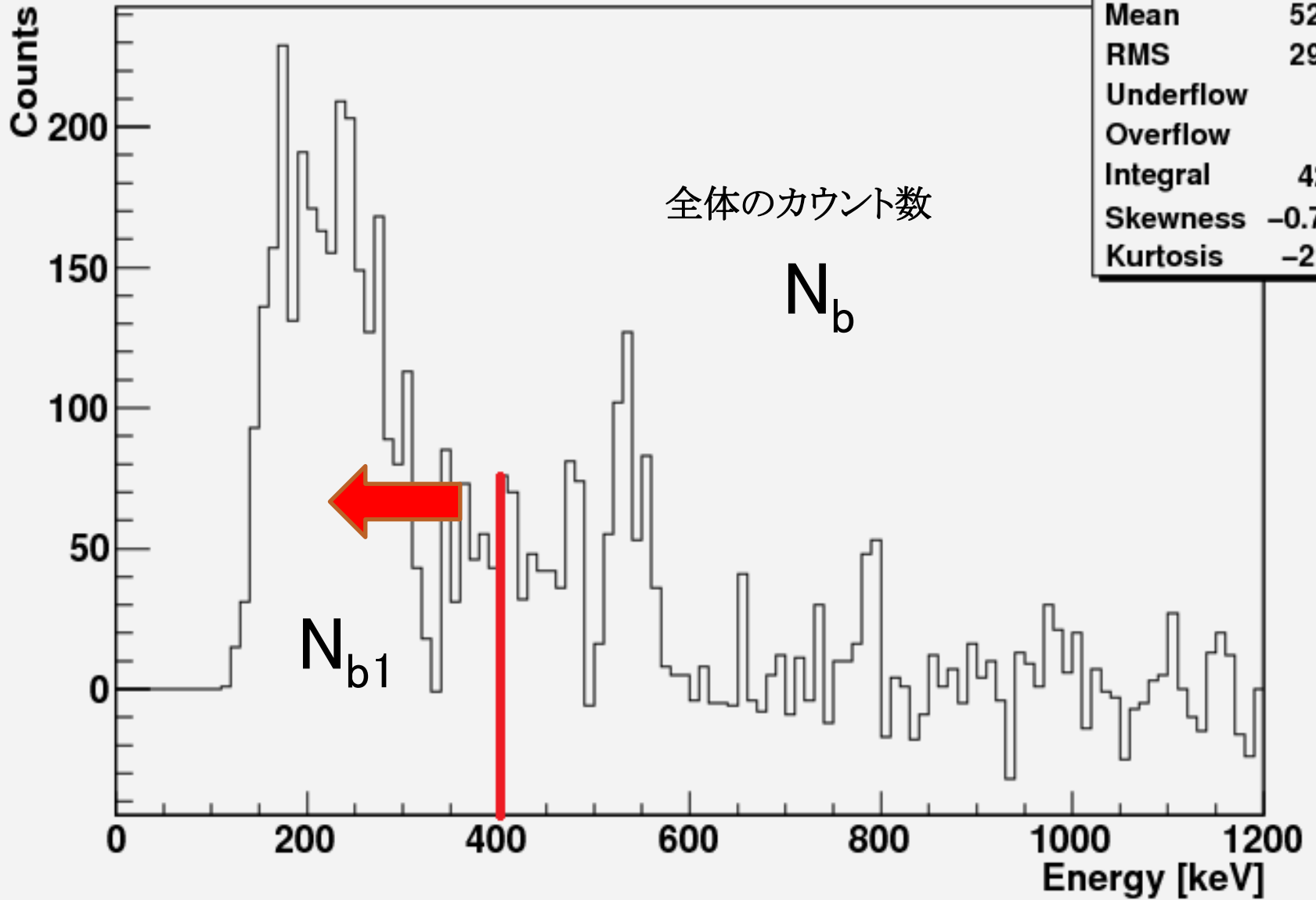


h10

Entries	36565
Mean	374.2
RMS	178.7
Underflow	0
Overflow	0
Integral	4.02e+04
Skewness	-0.1585
Kurtosis	-2.3

[keV]

base2



base2

Entries	18747
Mean	522.4
RMS	293.4
Underflow	0
Overflow	0
Integral	4213
Skewness	-0.7021
Kurtosis	-2.158

測定値との関係

$$u \equiv \frac{\Gamma_{pick}}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{3N_{pick}^*}{2N_{3\gamma}^*} = \frac{3}{2}(1 - \epsilon_{3\gamma}) \frac{N_{pick}}{N_{3\gamma}} = \frac{3wx}{2y}$$

$$w = 1 - \epsilon_{3\gamma}$$

$$x = N_{pick}$$

$$y = N_{3\gamma}$$

$$x = N - \frac{N_1}{N_{b1}} N_b$$

$$y = \frac{N_1 N_b}{N_{b1}}$$

$$\epsilon_{3\gamma} = \frac{N_{THR}}{N_{THR} + y}$$



寿命 $\tau = 143.5 \pm 0.3 \text{ ns}$

が.....


補正関数の誤差

補正関数 $\frac{\Gamma_{\text{pick}}(t)}{\Gamma_{\text{ortho}}} = p \exp\left(-\frac{t}{q}\right)$

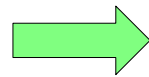
p 、 q の値

$$p = 0.2042 \pm 0.0430$$

$$q = 589.1 \pm 280.4$$

解析では

p 、 q の値の誤差は
考慮していない



誤差が最大の時の
寿命を出してみた

$$p_{\min} = p_0 - 0.0430$$

$$p_{\max} = p_0 + 0.0430$$

$$q_{\min} = q_0 - 280.4$$

$$q_{\max} = q_0 + 280.4$$

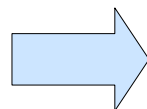
$$\left(\begin{array}{l} p_0 = 0.2042 \\ q_0 = 589.1 \end{array} \right)$$



補正関数の誤差の考慮

$$\tau_{\text{ortho}} = \begin{cases} 139.7 \pm 0.3 \text{ [ns]} & (p_{\text{min}} \text{ の時}) \\ 147.3 \pm 0.3 \text{ [ns]} & (p_{\text{max}} \text{ の時}) \\ 141.1 \pm 0.3 \text{ [ns]} & (q_{\text{min}} \text{ の時}) \\ 145.6 \pm 0.3 \text{ [ns]} & (q_{\text{max}} \text{ の時}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{実験値} \\ 143.5 \pm 0.3 \text{ ns} \end{array}$$

p の誤差を考慮した場合
 ± 4 ns程度広がる
 q の誤差を考慮した場合
 ± 2 ns程度広がる



特に p の誤差を考慮すべき



再考...

- ・ *pick-off* の *Compton* 効果は無視できるほど少ない
- ・ *threshold* でカットされたカウント数は、推定値 N'_{THR} を用いてよい
- ・ *base* ヒストグラムに混ざっている *pick-off* のカウント数は無視できるほど少ない



ちゃんと考慮するには…

pick-off の低エネルギー側での寄与
を見積もる

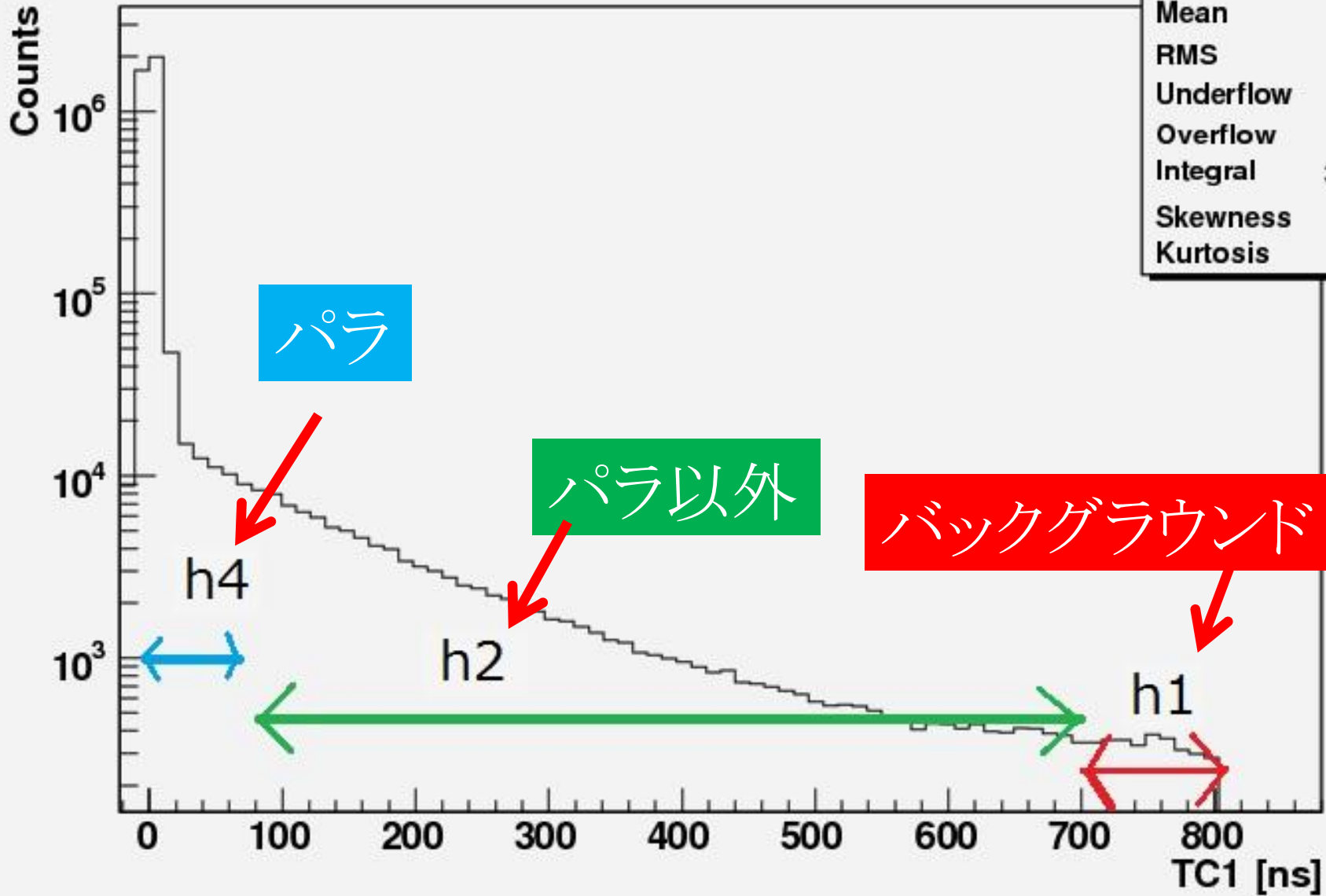


純粋な**pick-off** のエネルギースペク
トルを用意する！！



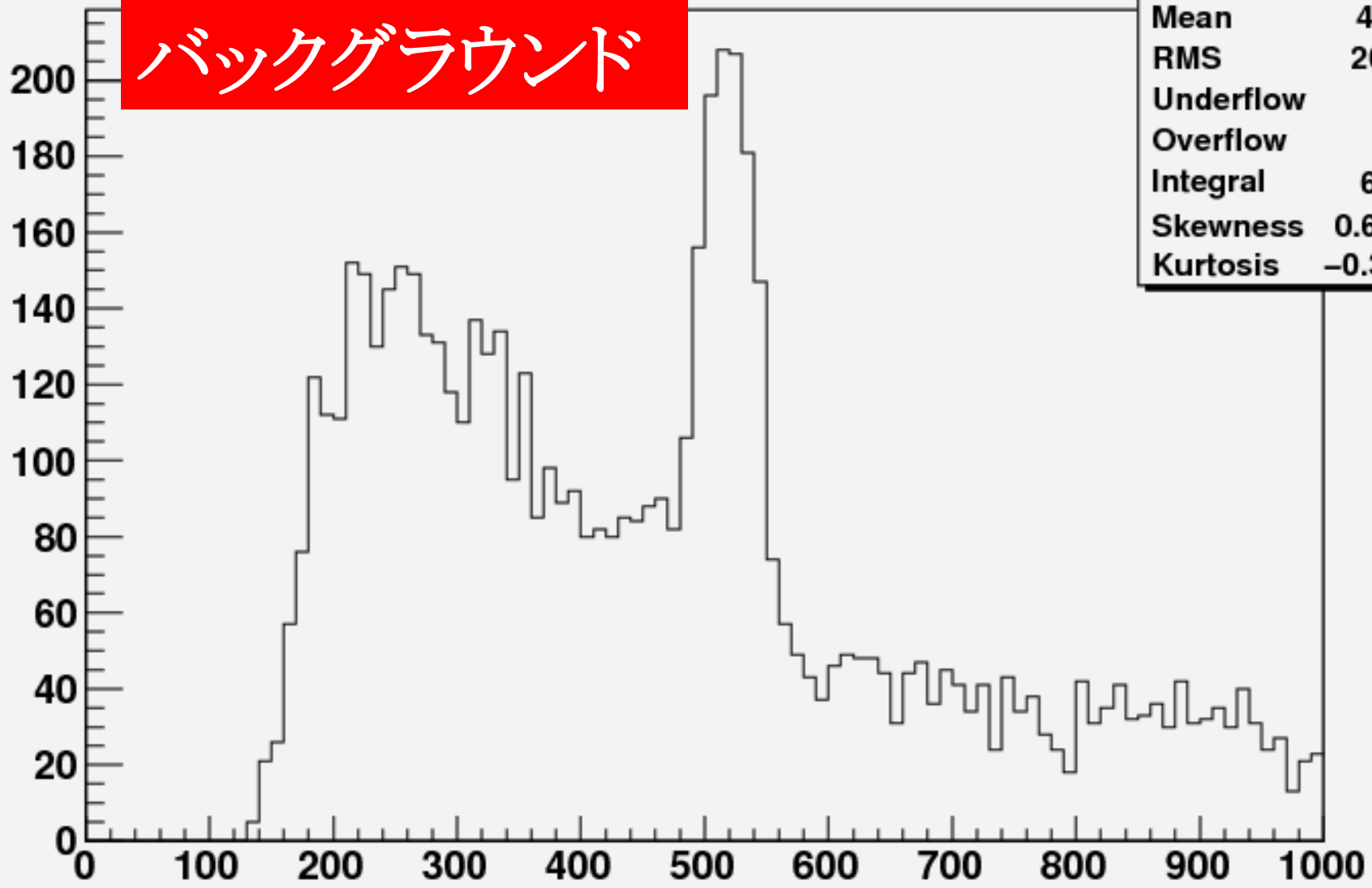
TC1 {240<E1&&E1<515}

htemp	
Entries	3914017
Mean	8.344
RMS	50.2
Underflow	0
Overflow	0
Integral	3.9e+06
Skewness	8.973
Kurtosis	96.75



h1

バックグラウンド

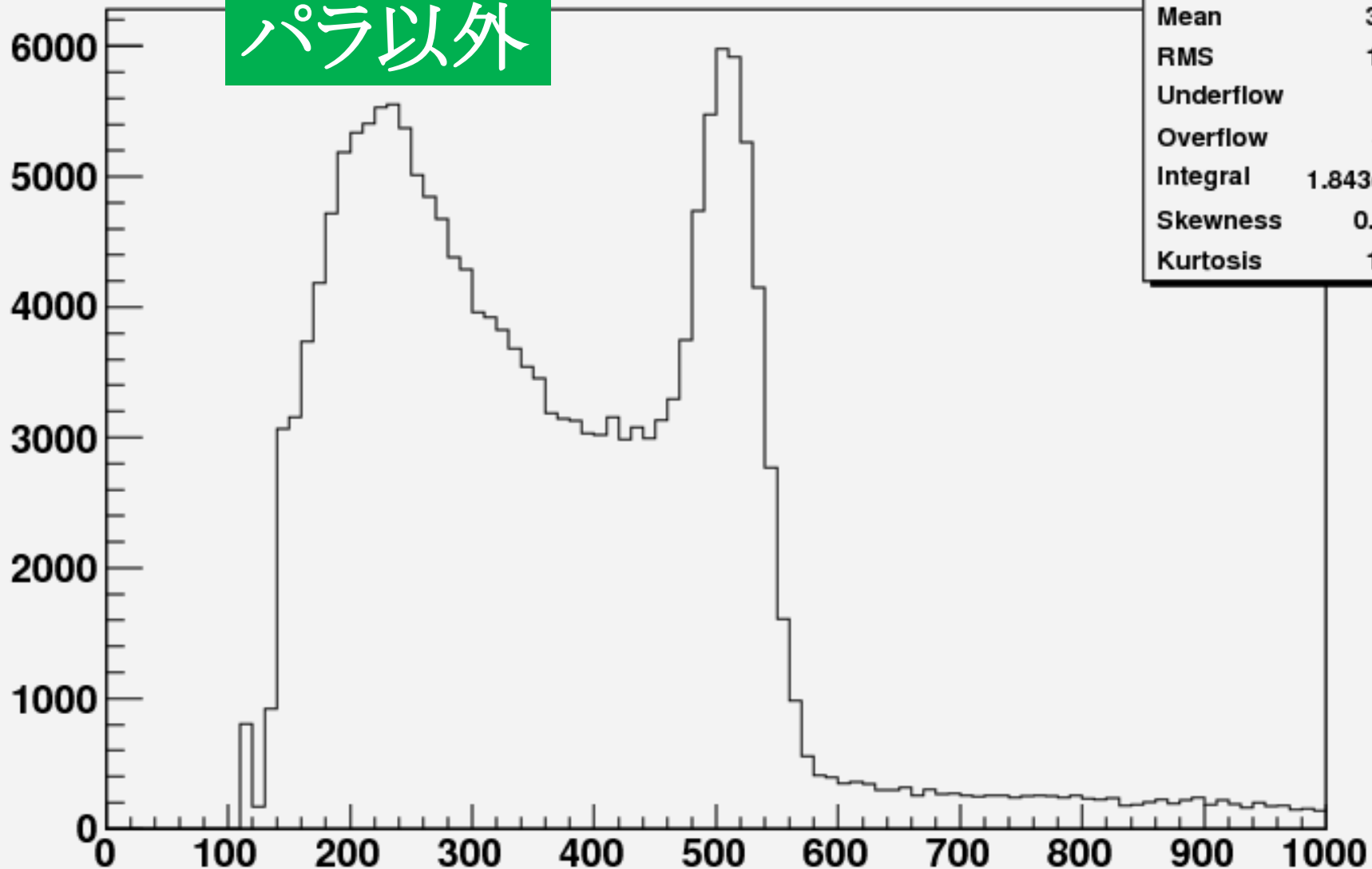


h1	
Entries	7274
Mean	460.1
RMS	208.9
Underflow	0
Overflow	871
Integral	6403
Skewness	0.6786
Kurtosis	-0.3156

[keV]

h2

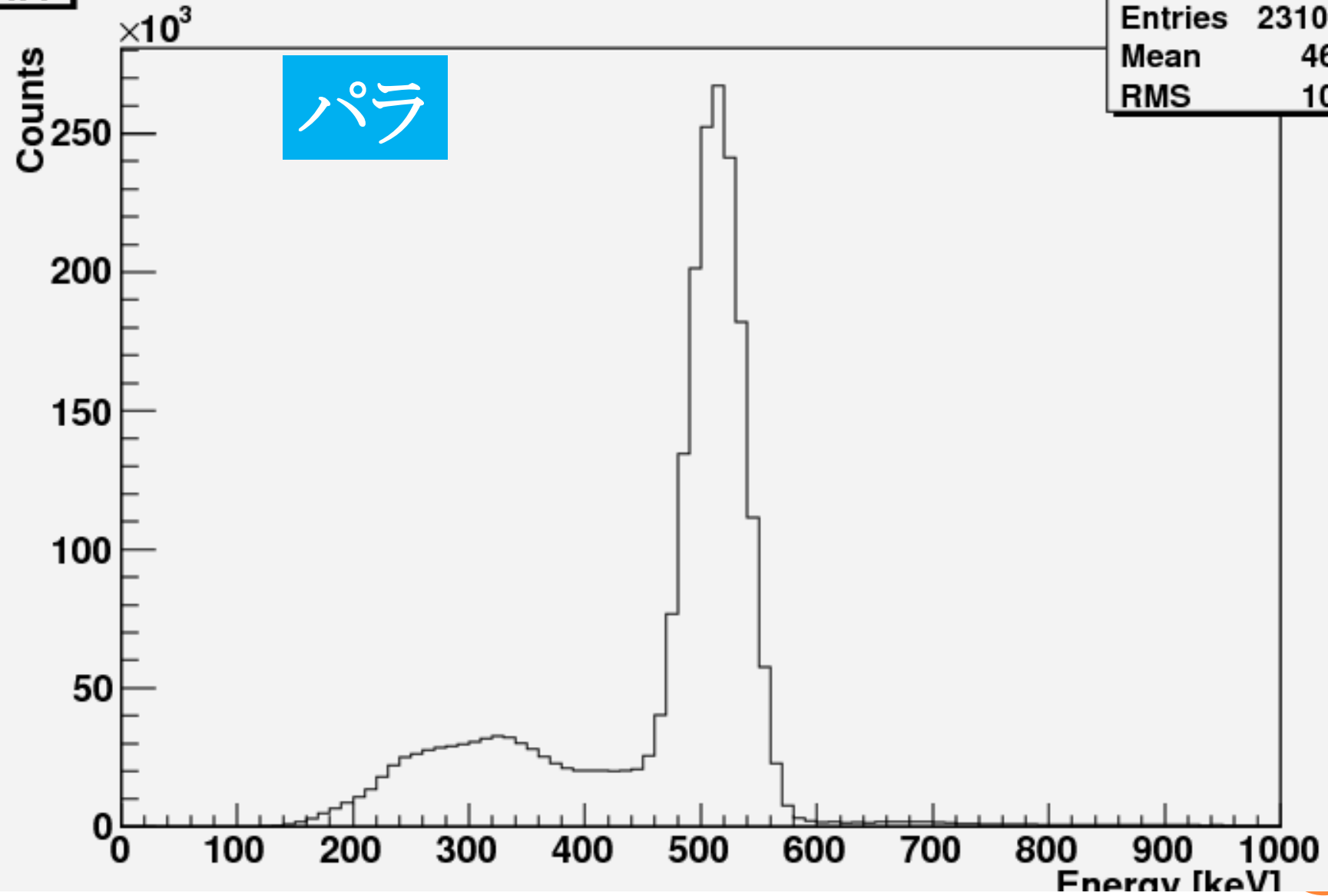
パラ以外



h2	
Entries	189738
Mean	365.4
RMS	157.5
Underflow	0
Overflow	5408
Integral	1.843e+05
Skewness	0.9313
Kurtosis	1.233

[keV]

h4



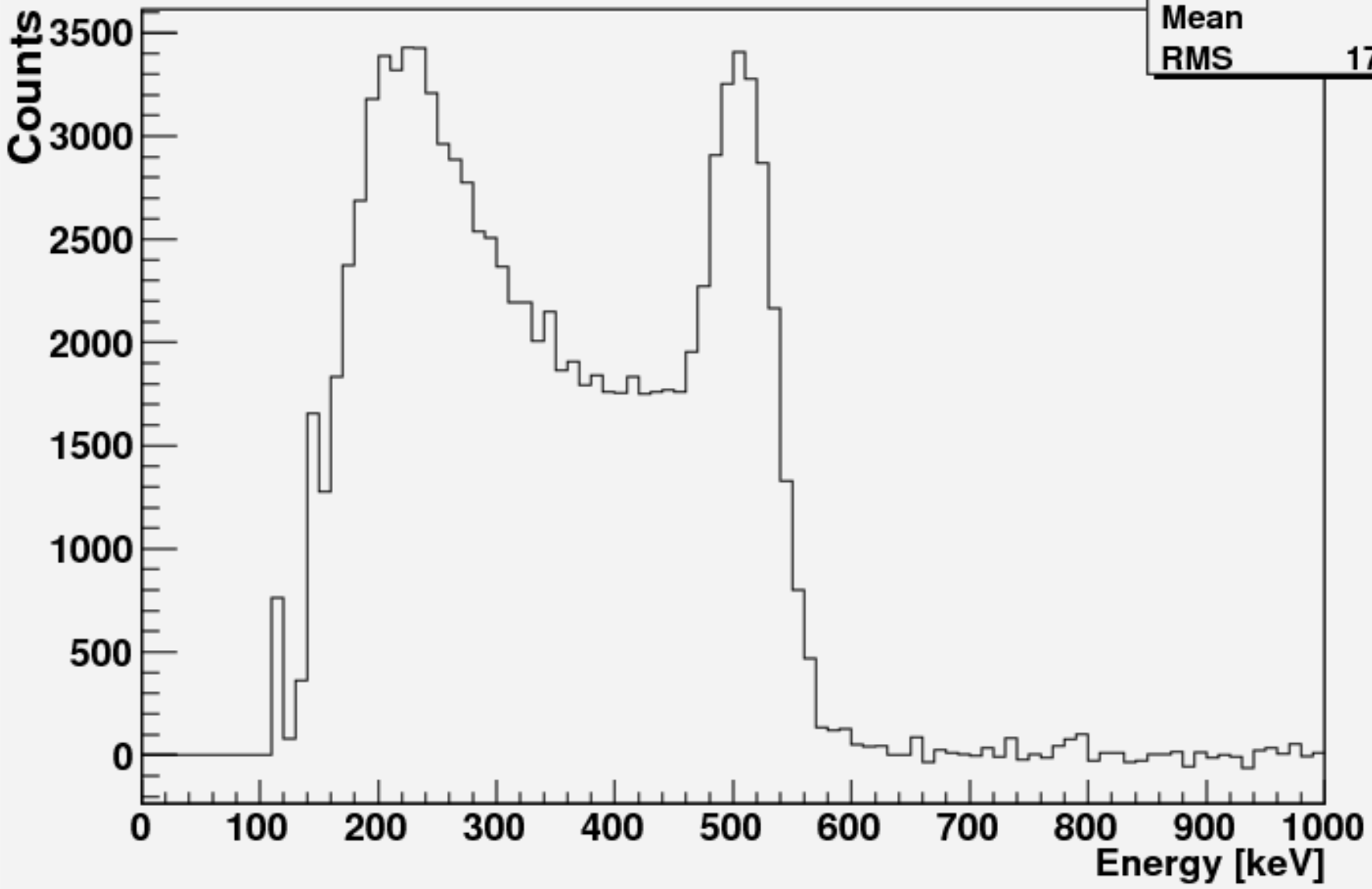
h4	
Entries	2310614
Mean	463.4
RMS	103.6

[keV]

h3

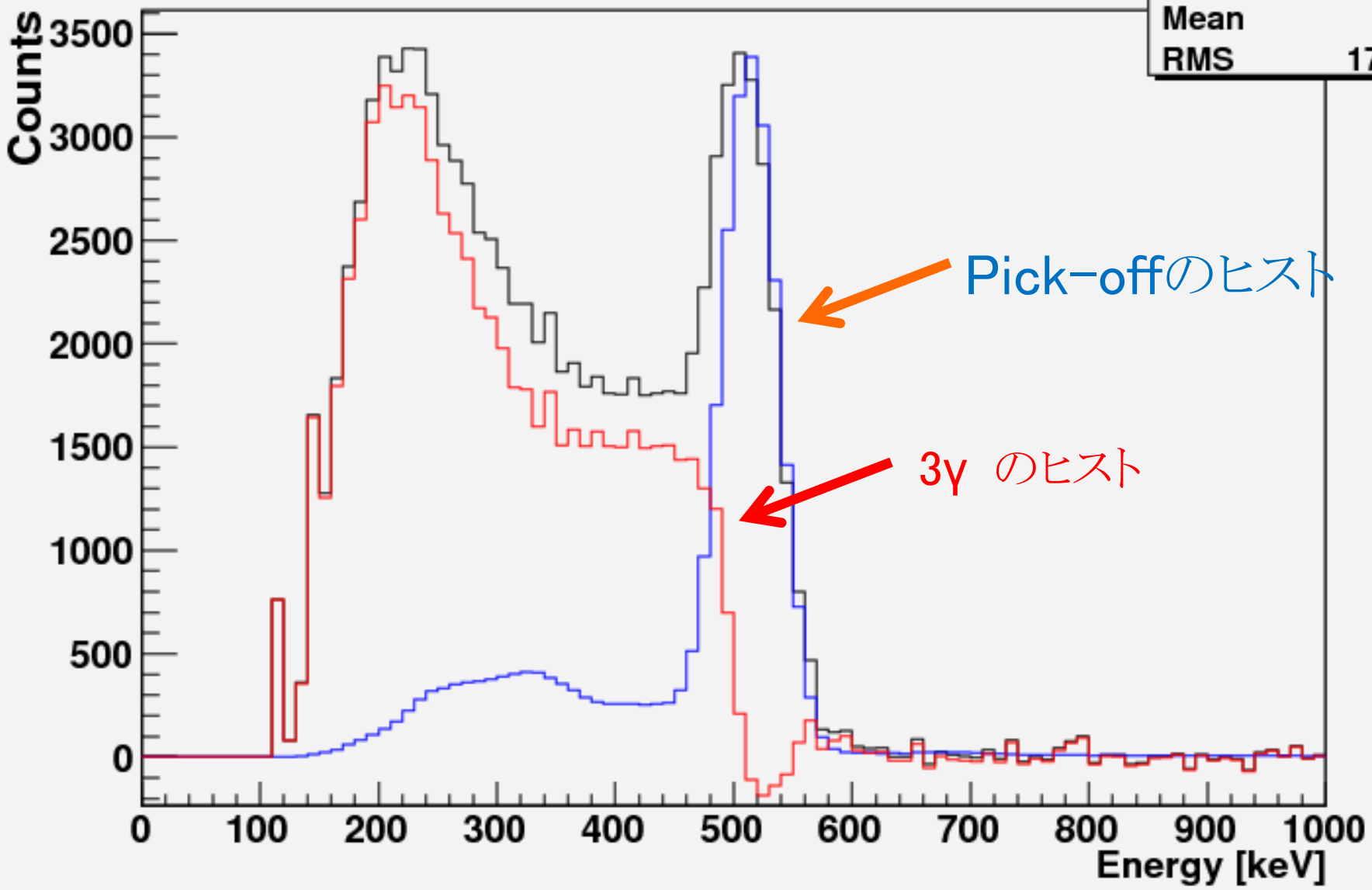
バックグラウンドを引いたもの

h3	
Entries	134624
Mean	392
RMS	177.2

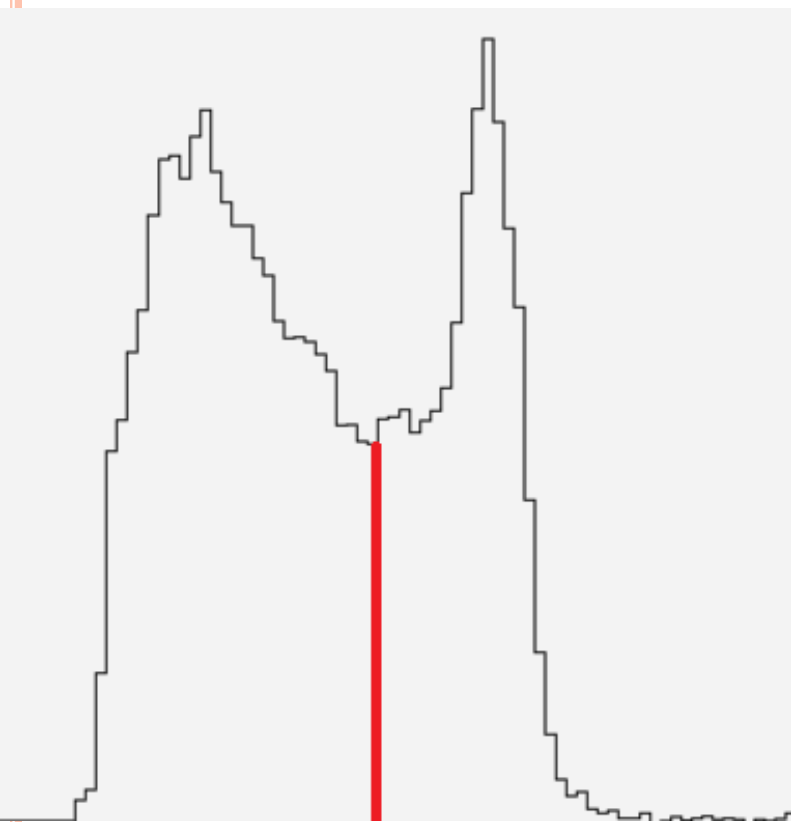


h3

h3	
Entries	134624
Mean	392
RMS	177.2

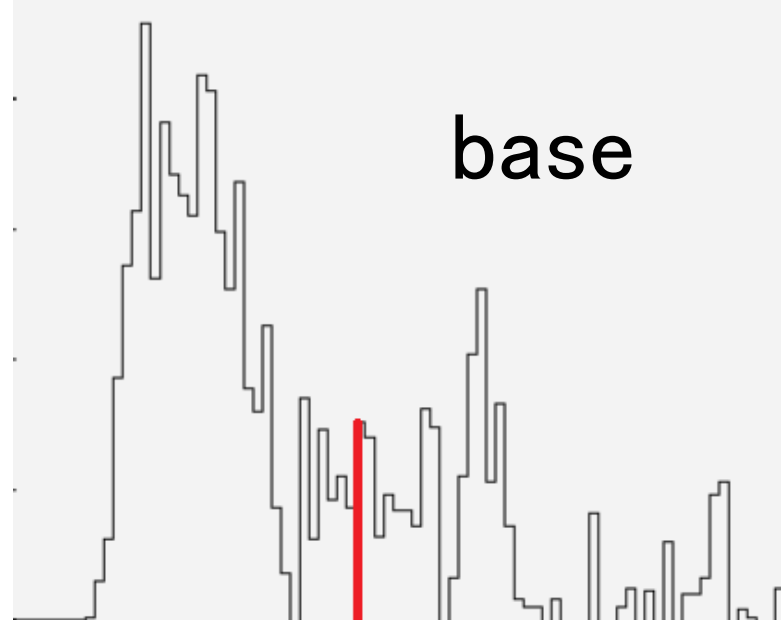


全体



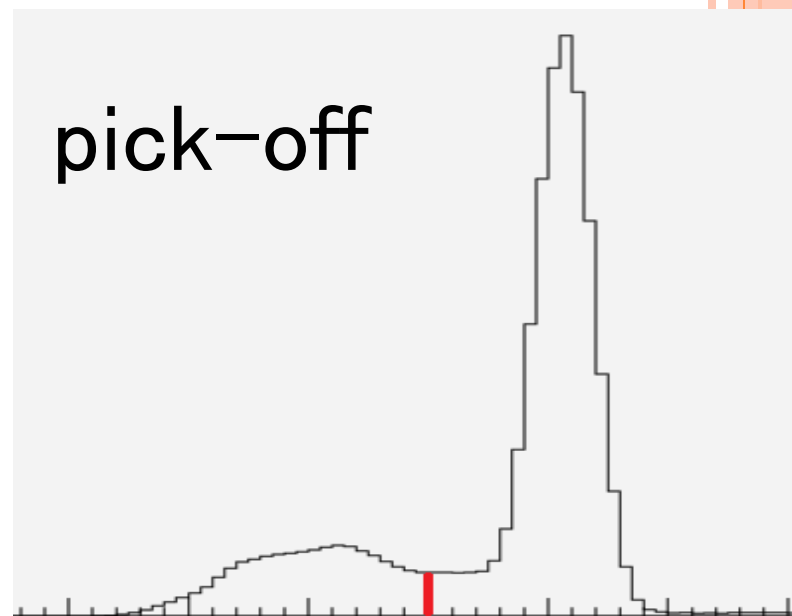
=

base



+

pick-off



…となるように**base**と
pick-offを規格化する！

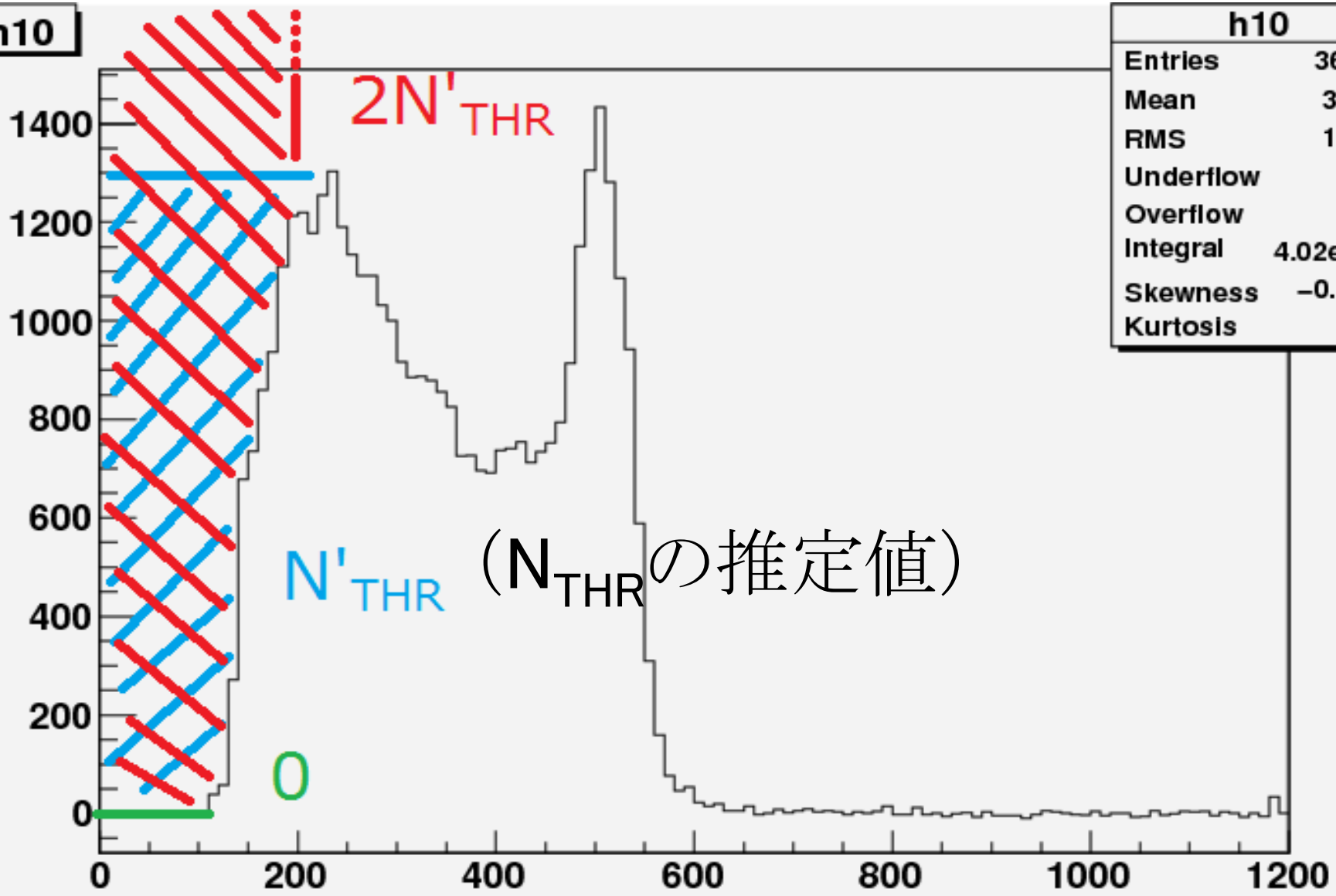
再考...

- ・ *pick-off* の *Compton* 効果は無視できるほど少ない
- ・ *threshold* でカットされたカウント数は、推定値 N'_{THR} を用いてよい
- ・ *base* ヒストグラムに混ざっている *pick-off* のカウント数は無視できるほど少ない



N_{THR} のエラー

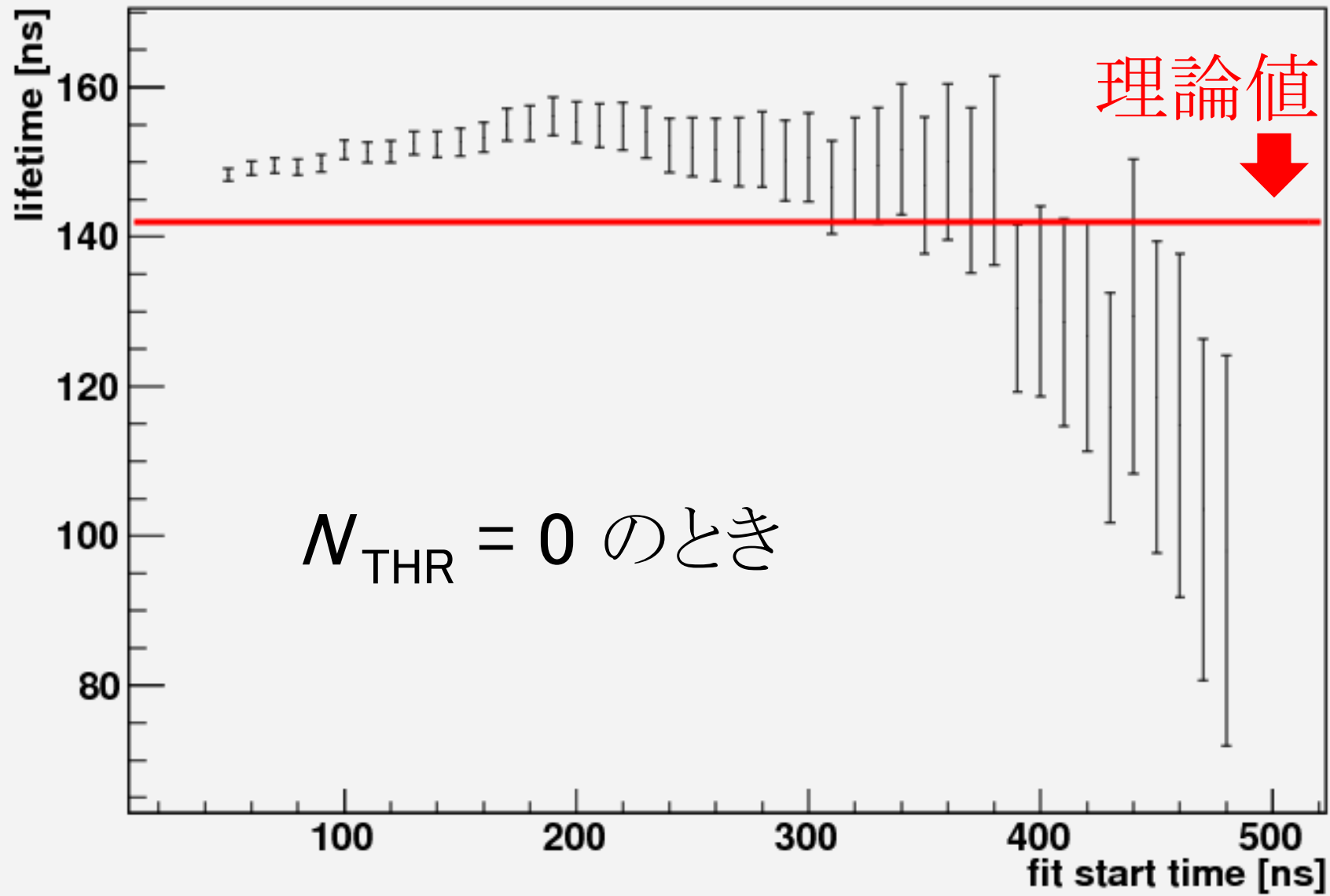
h10



h10	
Entries	36565
Mean	374.2
RMS	178.7
Underflow	0
Overflow	0
Integral	4.02e+04
Skewness	-0.1585
Kurtosis	-2.3

[keV]

Graph



Graph

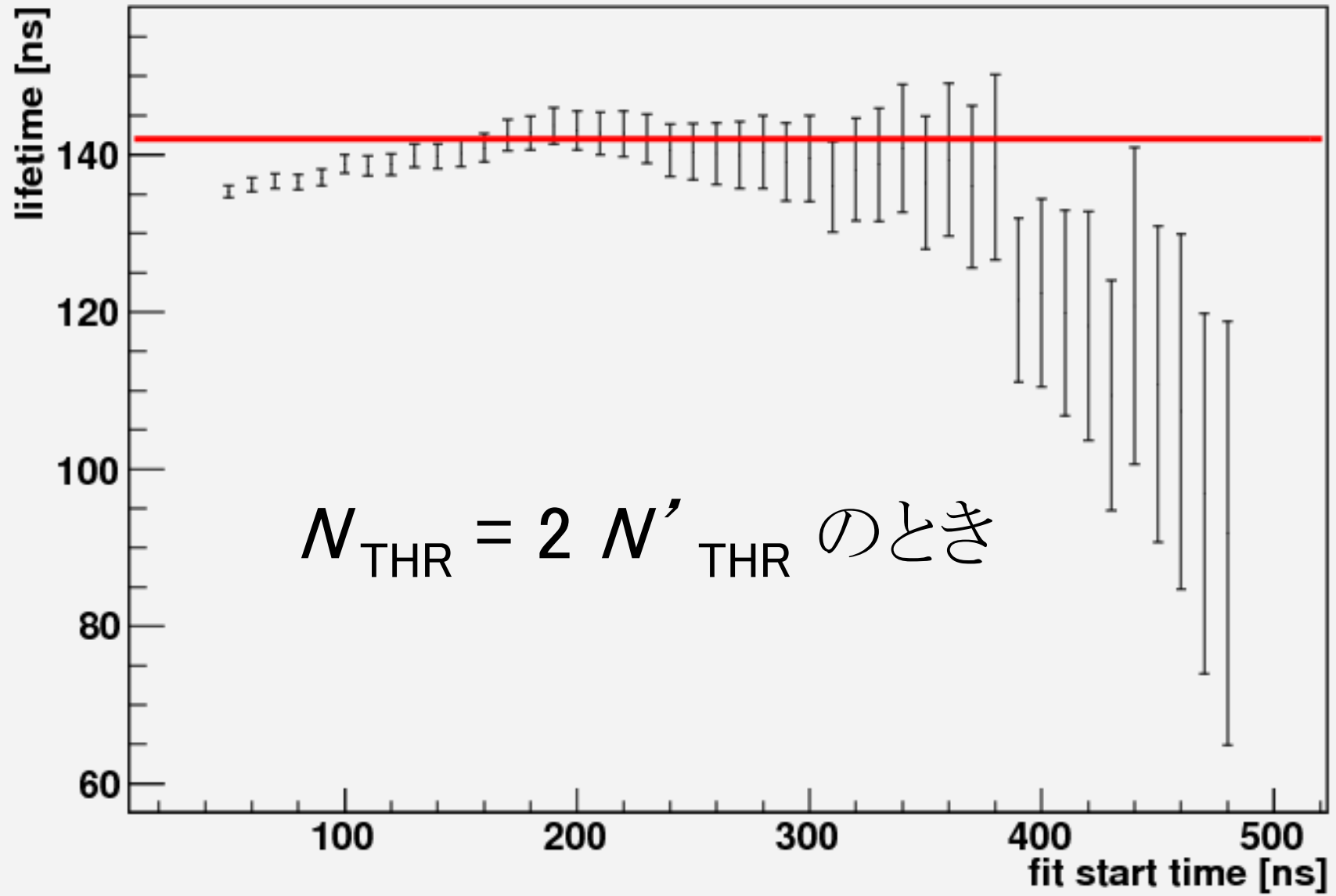


表 1.5: 各場合の寿命

N_{THR}	$\tau_{3\gamma}$
0	$1.506 \times 10^2 \pm 0.3$
N'_{THR}	$1.435 \times 10^2 \pm 0.3$
$2N'_{THR}$	$1.380 \times 10^2 \pm 0.3$

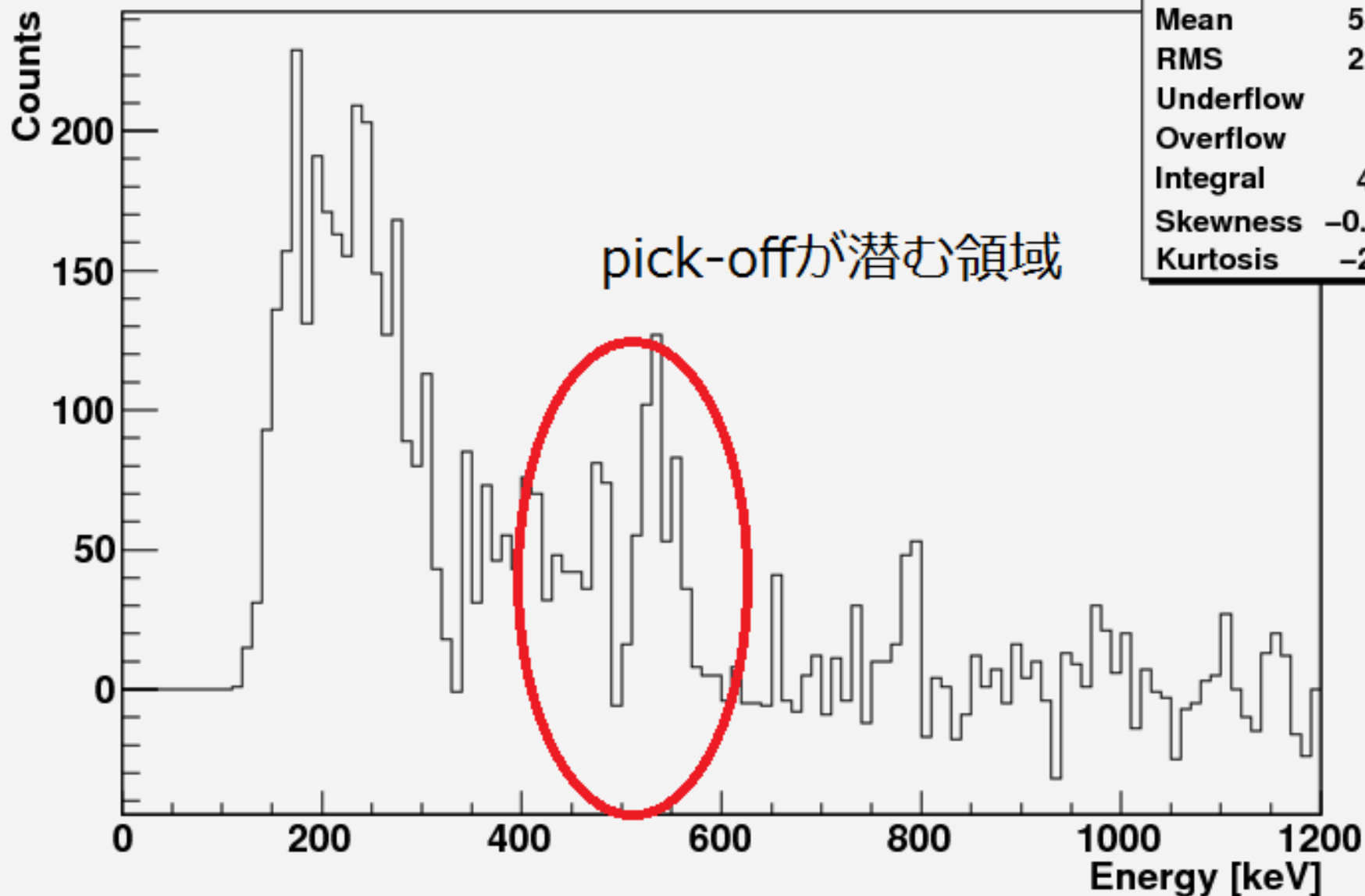
系統誤差、約5%

再考...

- ・ *pick-off* の *Compton* 効果は無視できるほど少ない
- ・ *threshold* でカットされたカウント数は、推定値 N'_{THR} を用いてよい
- ・ *base* ヒストグラムに混ざっている *pick-off* のカウント数は無視できるほど少ない



base2



base2

Entries	18747
Mean	522.4
RMS	293.4
Underflow	0
Overflow	0
Integral	4213
Skewness	-0.7021
Kurtosis	-2.158

表 1.6: pick-off の割合

N_{THR}	base 全体に占める pick-off の割合
0	0.169
N'_{THR}	0.104
$2N'_{THR}$	0.0751

割合は N_{THR} の
取り方で変わる
ので...

表 1.7: 各場合の寿命

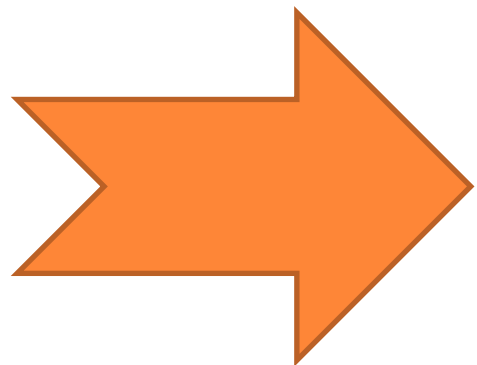
N_{THR}	$\tau_{3\gamma}$
0	$1.647 \times 10^2 \pm 0.4$
N'_{THR}	$1.565 \times 10^2 \pm 0.3$
$2N'_{THR}$	$1.529 \times 10^2 \pm 0.3$

系統誤差、約11%



他の誤差はどうか...

- キャリブレーション
- TQ補正



影響は小さい



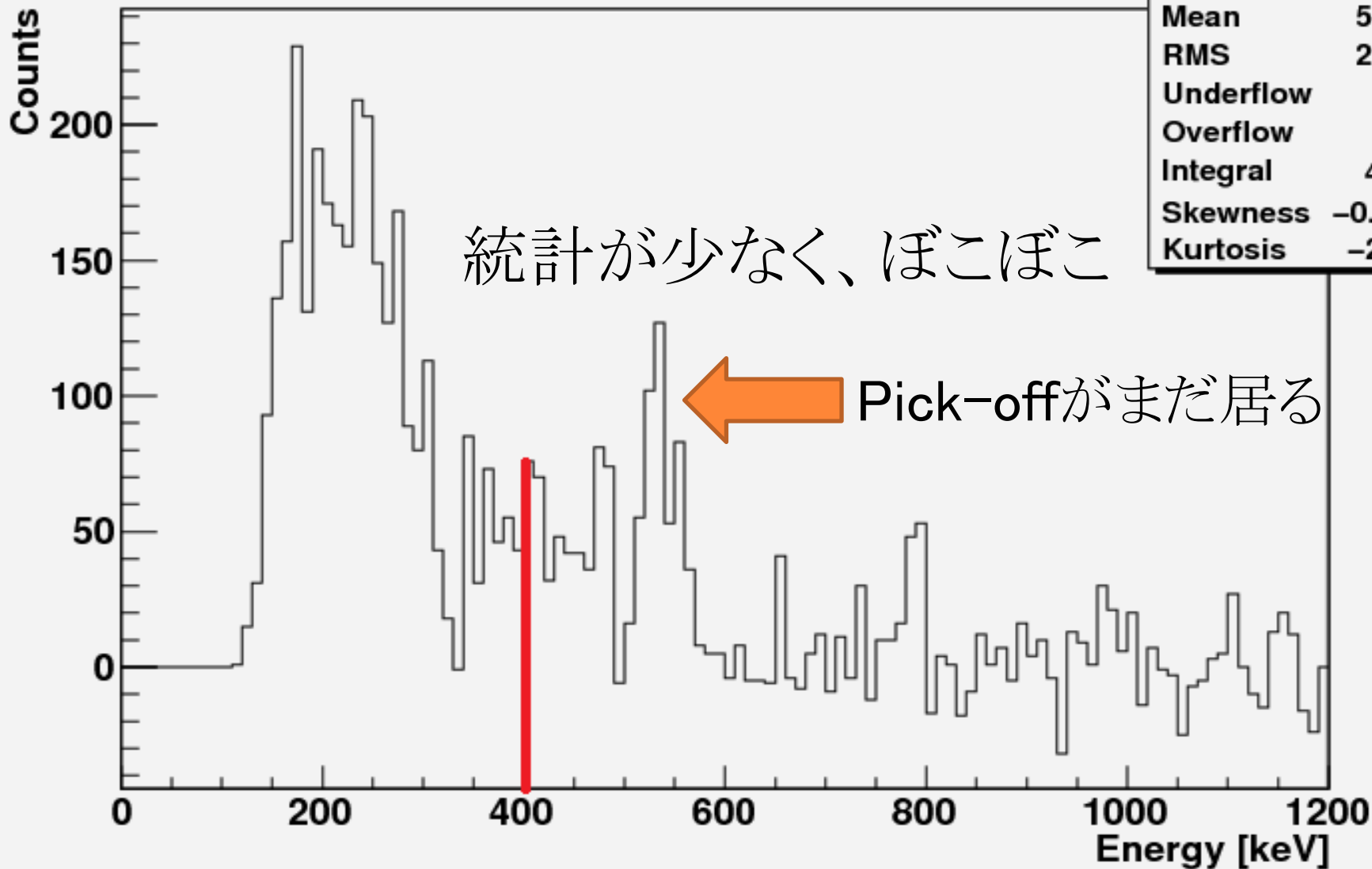
より精度を上げるには？

- より多くの統計をためること
- threshold を下げる
- モンテカルロシミュレーション

系統誤差を減らせ！！



base2



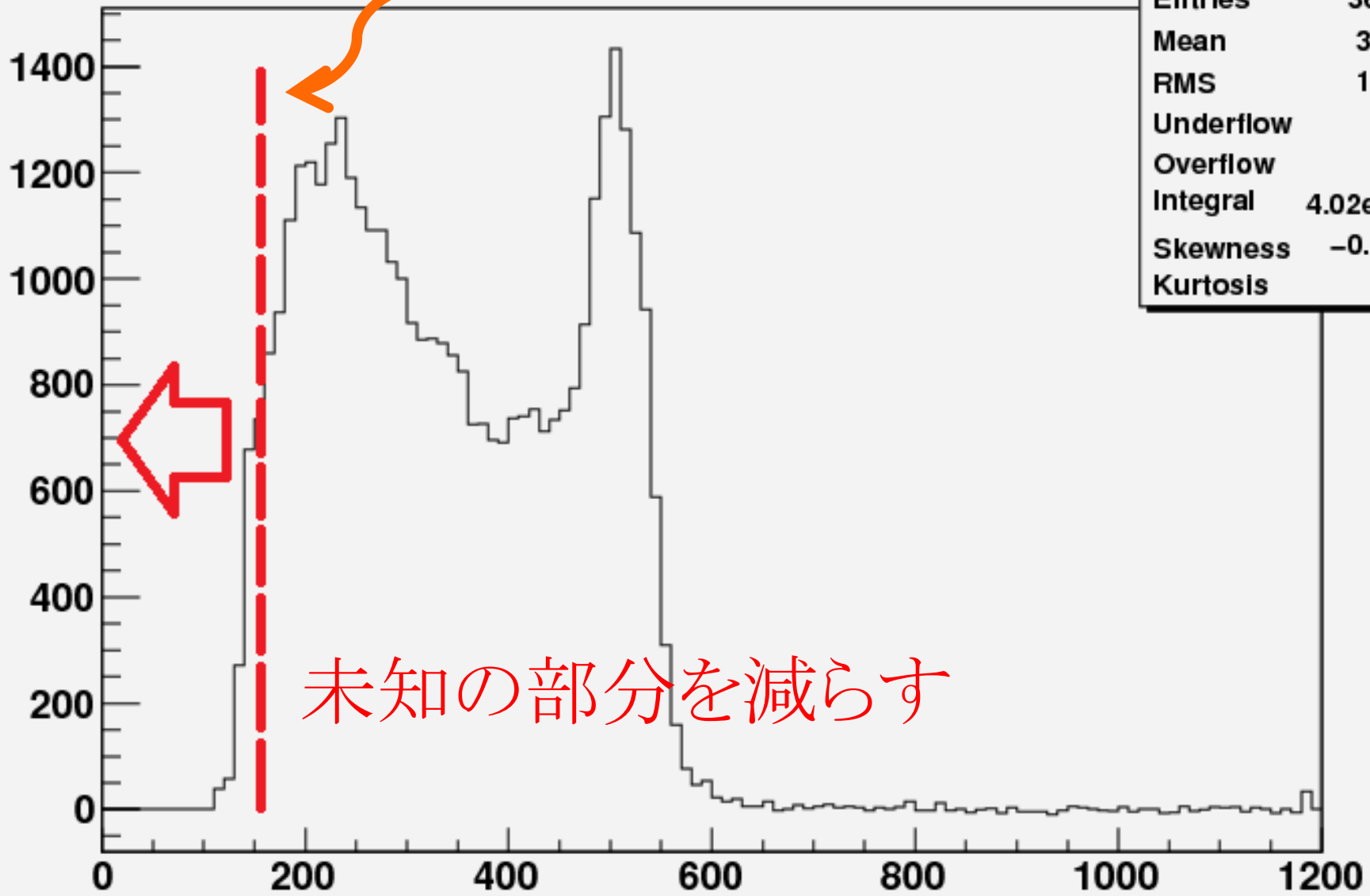
base2

Entries	18747
Mean	522.4
RMS	293.4
Underflow	0
Overflow	0
Integral	4213
Skewness	-0.7021
Kurtosis	-2.158

h10

Thresholdはこのへん

h10	
Entries	36565
Mean	374.2
RMS	178.7
Underflow	0
Overflow	0
Integral	4.02e+04
Skewness	-0.1585
Kurtosis	-2.3



未知の部分を減らす

[keV]

シミュレーション万能説



何をしみゆれーとすればいいの？

- エネルギースペクトルのthreshold 付近での振る舞い
- pick-off 2γ と 3γ がどのような割合でシンチレータに検出されるか？



系統誤差がぐんと減るのではないか？



5. まとめ

- 寿命は $143.5 \pm 0.3 \text{ ns}$
- 系統誤差は約11%
- シミュレーションなどが必要





ありがとうございました