

2008/9/29

# オルソポジトロニウムの 寿命測定

池田 達彦  
片倉 正一郎  
鈴木 大二郎  
松岡 佳大  
村瀬 健太

2008年度前期

課題演習A1

# 内容

1. イントロダクション
2. セットアップと実験原理
3. キャリブレーションと補正
4. 実験結果と解析
5. 結論

# 1. イントロダクション

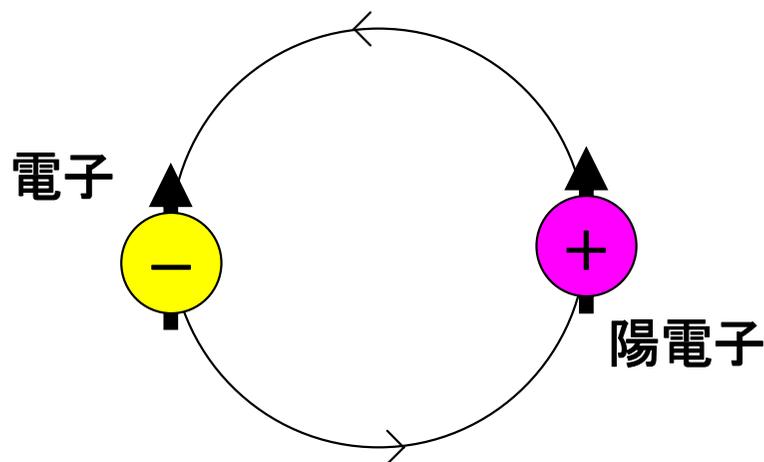
# 1.1 オルソポジトロニウムとは

- ・ポジトロニウム (Ps) とは、電子と陽電子の束縛状態。
- ・電子と陽電子のスピンの反平行 (全スピンの0) のパラポジトロニウム (p-Ps) と、スピンの平行 (全スピンの1) のオルソポジトロニウム (o-Ps) が存在。

p-Psの真空中での寿命・・・約123psec

o-Psの真空中での寿命・・・約142nsec

およそ1000倍違う。



# オルソポジトロニウムの性質

- ・保存則より、 $o$ -Psは主に3つの光子に崩壊。
- ・物質中では、 $o$ -Psは物質とも反応するため、真空中より寿命が短くなる。

今回我々が注目する物質中での主な反応としては、Psが物質と衝突の際に電子のスピンの反転し $p$ -Psになり、すぐさま $2\gamma$ 崩壊してしまう反応と、Ps中の陽電子と物質中の電子が対消滅する反応がある。

今後これらをまとめてpick-off消滅反応と呼ぶことにする。  
(今回の実験では区別の必要がないため、正式な名前とは異なるがまとめて扱うことにした。)

## 1.2 実験目的

- ・本実験の目的はo- $\text{Ps}$ の真空中の(平均)寿命を求めることである。
- ・さらには、QED(量子電磁力学)から予測される寿命と比較することで、理論の検証を試みることである。

ここでの寿命  $\tau$  は、 $N$ を時刻 $t$ でのo- $\text{Ps}$ の数、 $N_0$ を測定開始時刻( $t_0=0$ )でのo- $\text{Ps}$ の数としたときに次式に出てくる  $\tau$  である。

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

## 1.3 実験方法

- ・Na線源の $\beta^+$ 崩壊によって出てくる陽電子をシリカパウダー（主成分： $\text{SiO}_2$ ）と反応させてPsを生成する。

- ・Psが発生した時刻を知るために崩壊によって出てきた陽電子をプラスチックシンチレータで検出し、Psが崩壊した時刻を知るためにPsの崩壊によって出てくる $\gamma$ 線をNaIシンチレータで検出する。

- ・これらの検出時刻の差からPsの崩壊までにかかった時間を求め、イベント数をためることにより、Nとの関係を統計的に求め、o-Psの寿命を求める。

（ただし、NaIシンチレータで検出する $\gamma$ 線はo-Psからだけでなく、p-Psから生成されるものもふくまれるため、それらを正確に見分けること、pick-offの影響を見積もることがo-Psの寿命を求めることの鍵となる。）

詳しくは実験原理や解析のところで説明する。

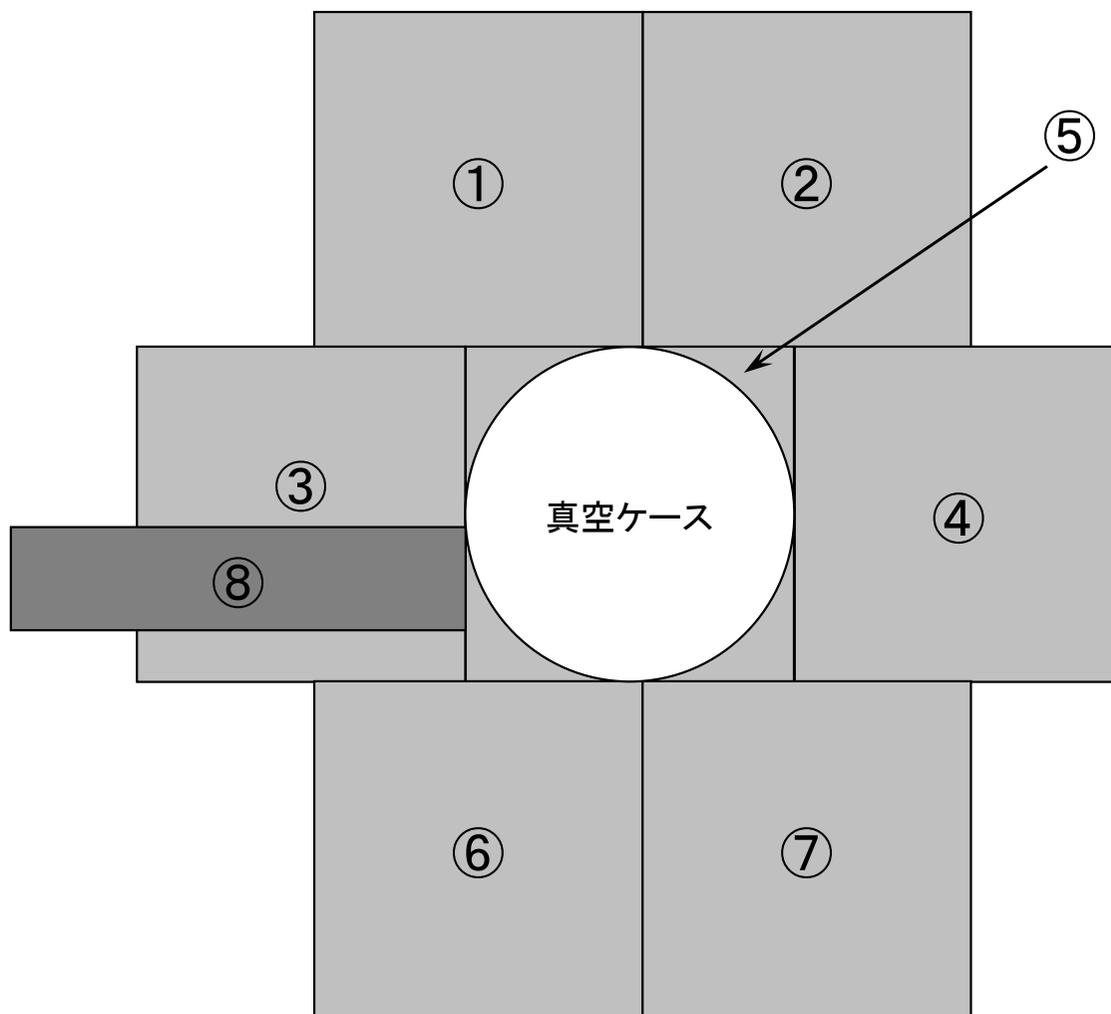
## 2. セットアップと実験原理

## 2.1 検出器のセットアップ

写真のように、NaIシンチレータ、PMT、真空容器(線源、シリカパウダー)、遮蔽用の鉛を設置した。



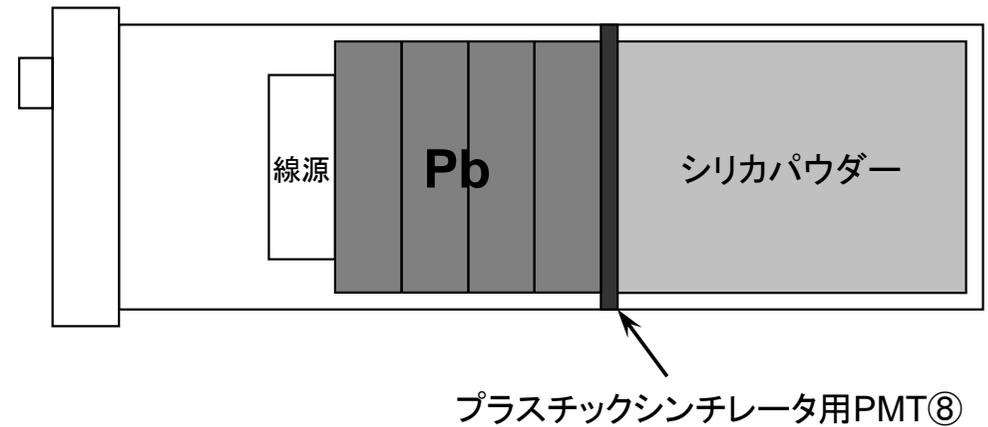
## 矢印の向きから見た設置の様子



①～⑦はNaIシンチレータ

⑧はプラスチックシンチレータからの光を検出するPMT

## 真空容器の写真とその概略図



- ・写真はNa線源、遮蔽用の鉛(ドーナツ状)、シリカパウダーを入れて、内部を真空にするための容器である。

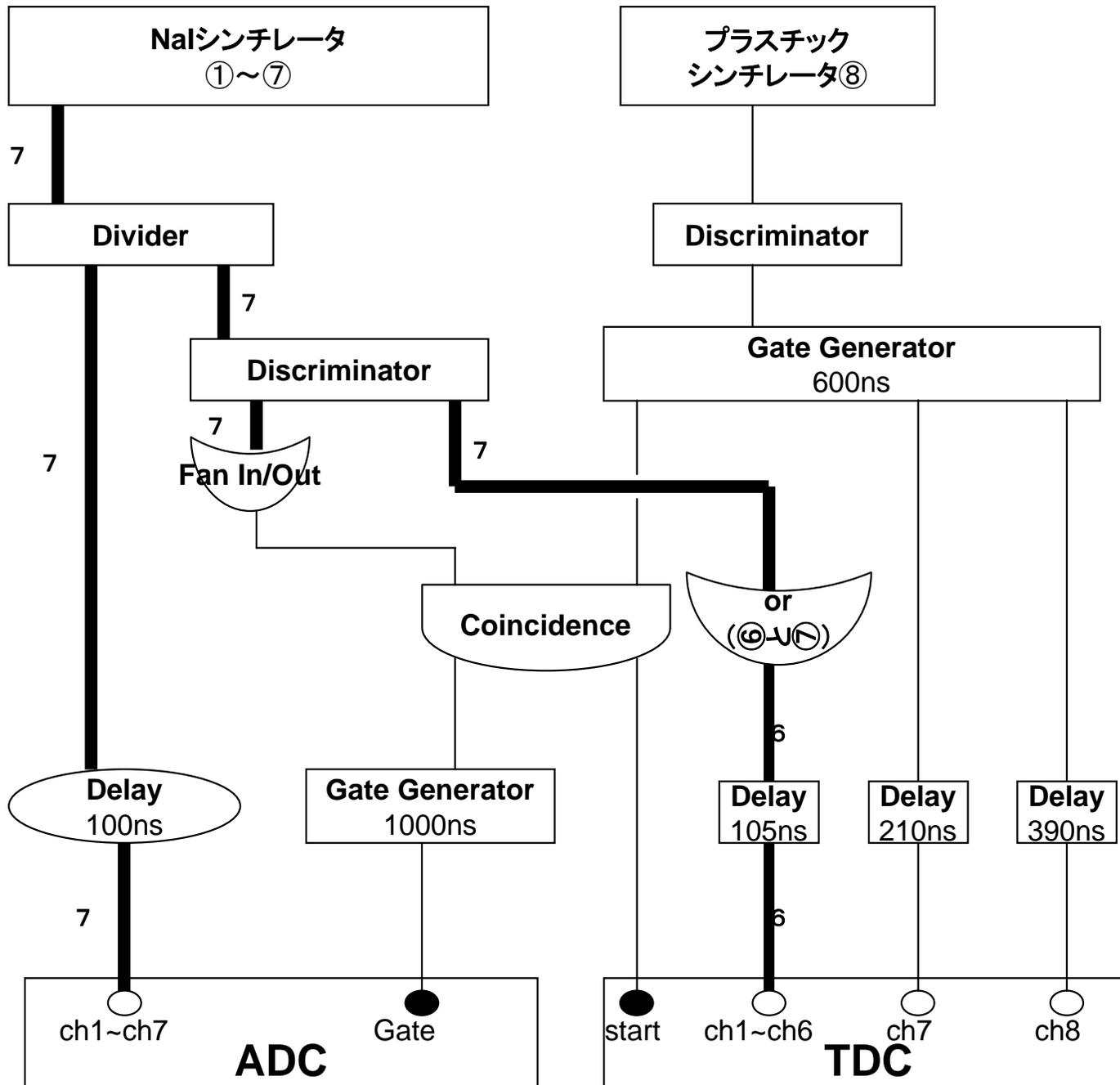
- ・シリカパウダーは、Na線源から出た $\beta^+$ を減速させ、Psを生成するために設置してある
- ・遮蔽用鉛は、Na線源から出るがシリカパウダーを通過せずに直接検出器に入ることがないようにするために設置してある
- ・容器の中を真空にするのは、我々の目的が真空中でのo-Psの寿命を求めることであるから

プラスチックシンチレータの出す光は極めて微弱なため余計な光があるとうまく測定ができない。

そこでプラスチックシンチレータのすぐそばに⑧のPMTを置き、余計な光がこのPMTに入らないように、検出装置全体を暗箱、暗幕、暗幕(分厚いカーテン)に入れて外部からの光をさえぎった。

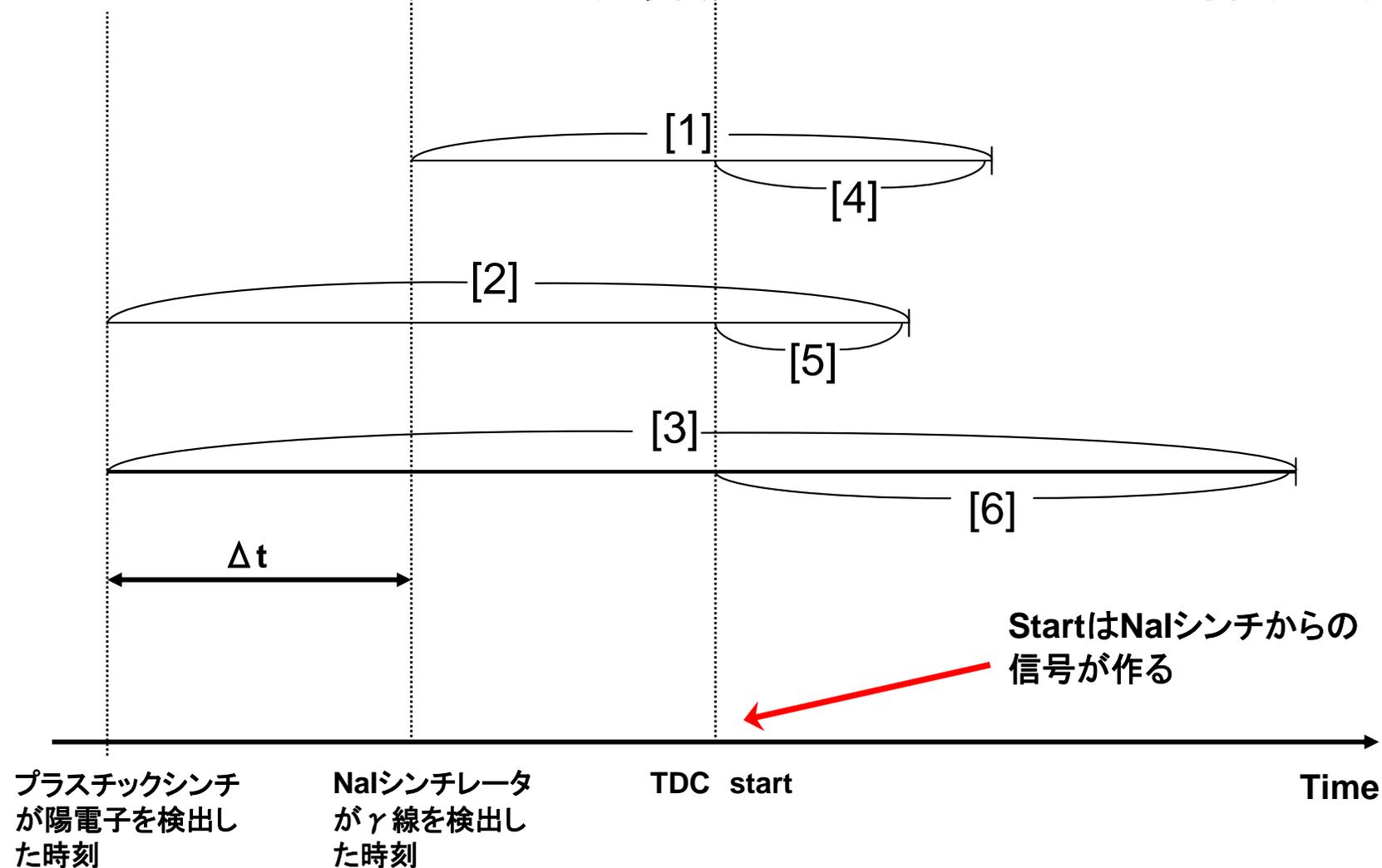


## 2.2 電子回路ユニットの配線



## 2.3 実験原理

### (1) Psが生成されてから崩壊するまでにかかった時間の求め方



上の図より  $\Delta t = [2] + [4] - [1] - [5]$

または  $\Delta t = [3] + [4] - [1] - [6]$

## (2)Psの寿命 $\tau$ の求め方

時間間隔の定数分のシフト及び符号の反転は、我々の寿命の求め方に影響しない。ゆえに、 $\Delta t$ の変わりに以下の $\Delta t'$ をつかう。これは測定データと単純な関係にある。

$$\Delta t' (= \Delta t - [2] - [4] + [1]) = -[5]$$

$$\text{または } \Delta t' (= \Delta t - [3] - [4] + [1]) = -[6]$$

カウント数Nと上の[5](または[6])の片対数グラフを描き、その適切な部分の傾きの逆数から寿命を求める。

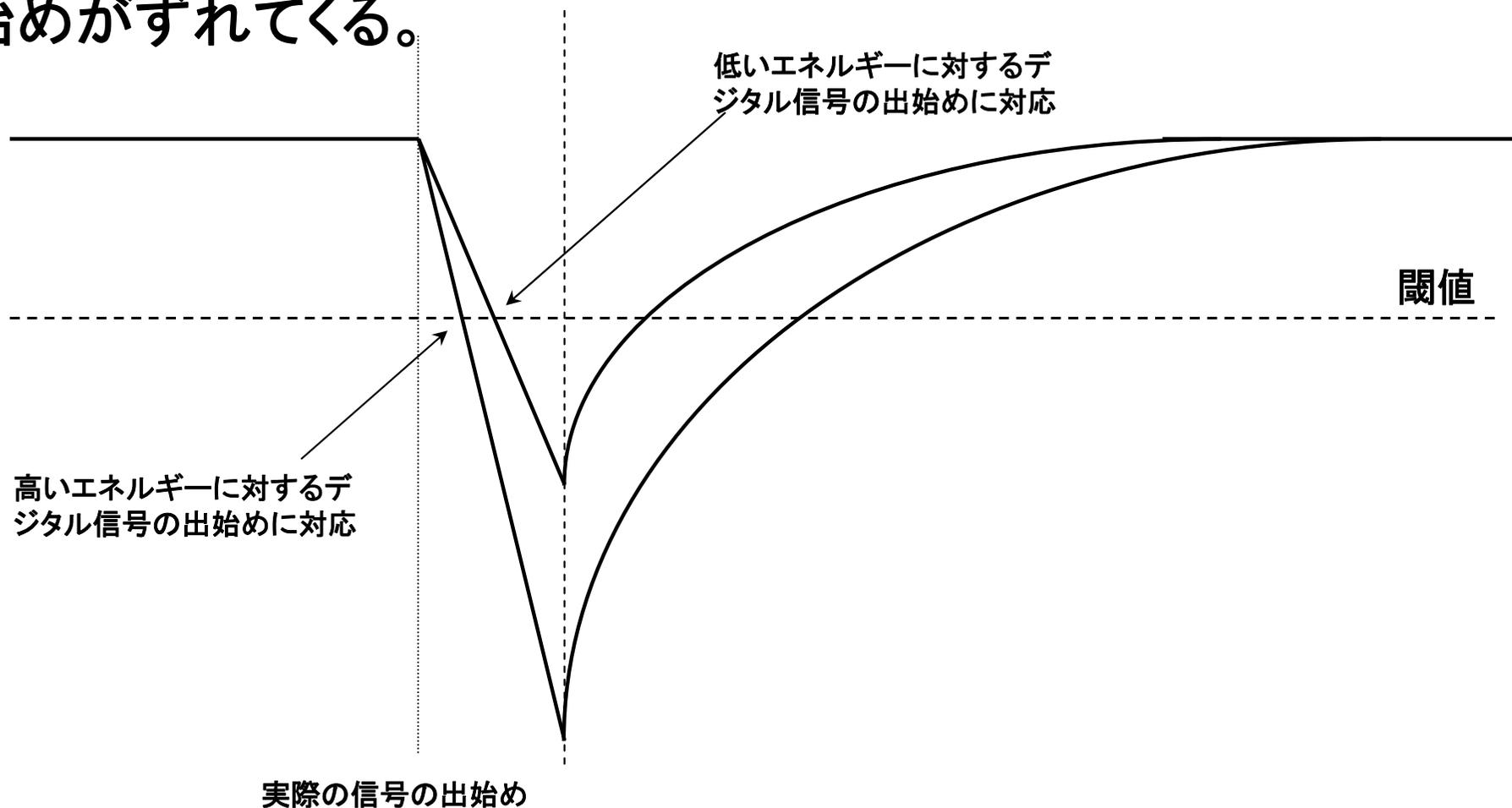
### (3)Psがいくつかの光子に崩壊したかの判断方法

TDCのCh.1～Ch.6で4095以外の出力値出した個数で判断した。ただし、Ch.6に関してはorをとっているので、ADCの出力値でNaIシンチレータ⑥と⑦のどちらまたは両方反応したかを判断した。

この個数をPsが崩壊して出てきた光子数と大雑把に等しいとする。ただし、1つの光子がいくつかのNaIシンチレータに入ったり、1つのNaIシンチレータに複数の光子が入ったり、NaIと反応しなかった光子があったりなどのために必ずしも等しいわけではない。

## (4)補正について

閾値を設定してあるため信号がDiscriminatorを通過するとき、エネルギーによって立ち上がり方が違うので、デジタル信号の出始めがずれてくる。



補正用にデータを取り、511keVのエネルギーを基準にし、そこから時間の「ずれ」をエネルギーの関数として求める。

## (5) [6]が必要な理由

我々が使ったTDCの最大の出力値4095に対応する実際の時間は約220ns( o-Psの寿命の約1.5倍)である。これでは精度が悪い。

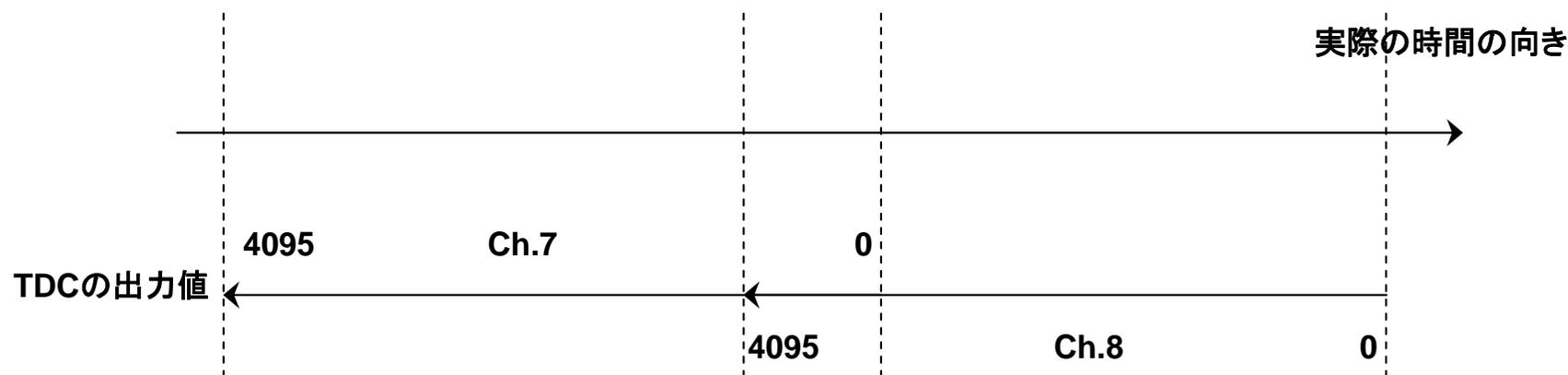
最低でも寿命の3倍程度は測定できるようにしたいので、TDCのCh.8に入る信号のDelayをCh.7に入る信号よりさらに約180ns多くした。これにより、Ch.7だけの場合よりも約180ns近く多く測定できる。実際はキャリブレーションによって少しずれて約195nsになる。

TDCのCh.7とCh.8に入る信号のDelayの差を220nsより小さい180nsにしてあるので、TDCのCh.7とCh.8の両方が4095でない値を出力することがある。それを下にこれらの2次元プロットをする。

実際の時間の向きとTDCの出力値の増加の向きが異なるので、接続はCh.7の出力値0側とCh.8の出力値4095側で行われる。

下図を参照。

Ch.7の出力値が0ときのCh.8の出力値を外挿して得ることで、接続の位置が決まる。



### 3. キャリブレーションと補正

## 3.1 ADCのキャリブレーション

- ・各NaIシンチレータごとに、以下のaとbを決めた。
- ・このaとb値は、2種類以上の実際のエネルギーがわかっている $\gamma$ 線をNaIシンチレータで検出し、ADCの出力値との対応をみれば求まる。
- ・我々の実験では、今回 $\beta^+$ を得るためにも使ったNa線源からでる511keVと1275keVの $\gamma$ 線を利用した。

$$\text{energy[keV]} = a \times (\text{ADCの出力値}) + b$$

## 3.2 TDCのキャリブレーション

- ・TDCの出力値と実際の時間を対応させる必要がある。
- ・この対応は線形であり、TDCのチャンネルによって決まる。
- ・1つのstart信号とそれに対して2種類以上の実際の時間間隔(72ns、128ns、188ns)がわかっている信号を用意し、その時間間隔とTDCの出力値を対応させればよい。

$$(time[ns]) = a \times (\text{TDCの出力値}) + b$$

### 3.3 t-Q補正

- ・各NaIシンチレータに対して時間の「ずれ」をエネルギーの関数として求めた。
- ・補正用の実験データのエネルギーと時間の「ずれ」の関係を次の関数でfitした。

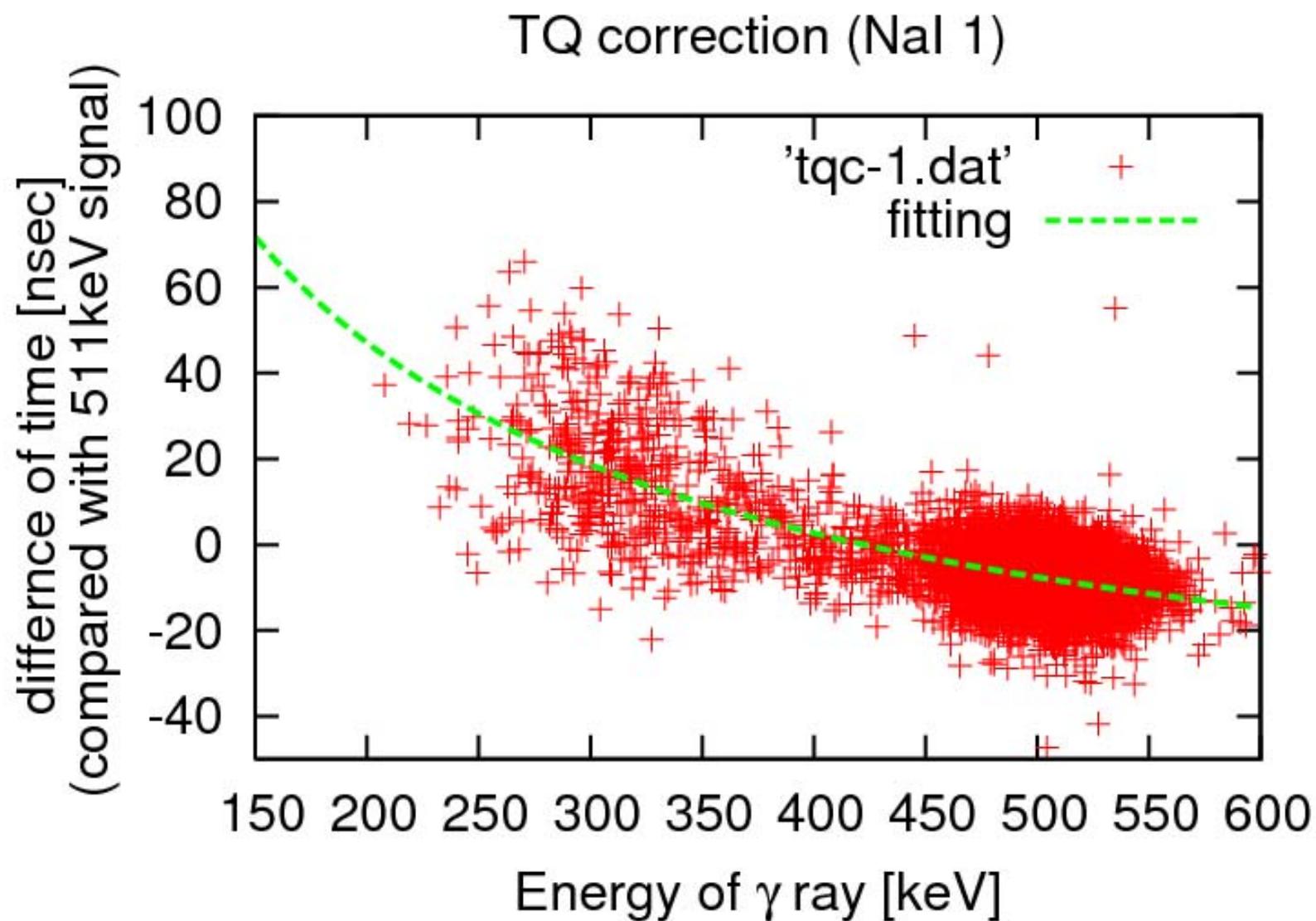
$$f(E) = \frac{a}{E - b} + d$$

E: 検出したエネルギー

a,b,d: NaIシンチレータごとに異なるパラメータ

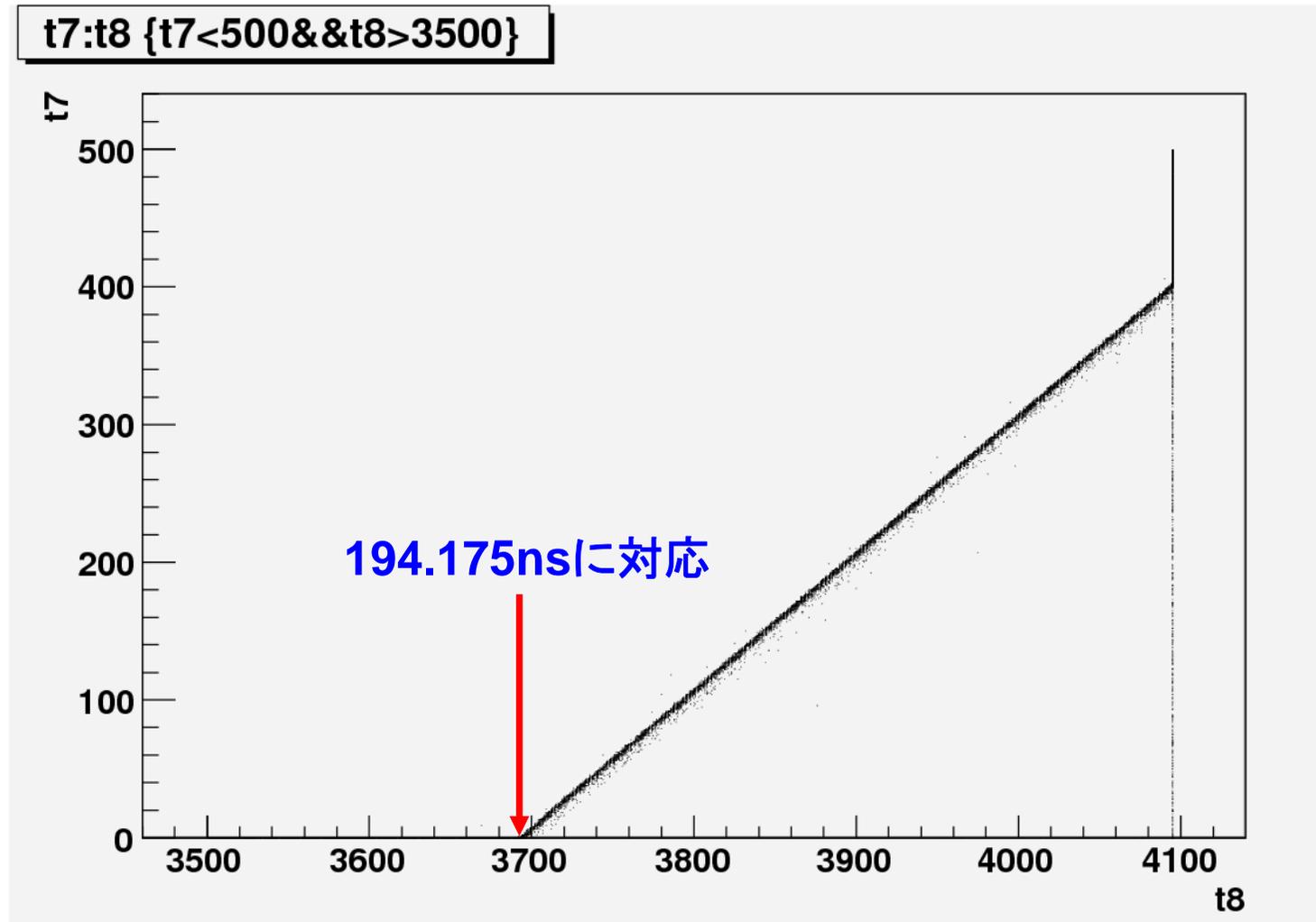
上の関数でfitした理由は、我々の関心があるPsの3 $\gamma$ 崩壊で出てくる光子の主なエネルギーの範囲(約250keVから約400keV)と基準の511keV付近でうまくfitできるからである。

# Fitの様子の一例



## 3.4 接続

- ・TDCのCh.7とCh.8の2次元プロットにおいて、Ch.7の出力値が0ときのCh.8の出力値を外挿して得た。
- ・キャリブレーション後のその値は194.175nsである。



## 4. 実験結果と解析および考察

## 4.1 実験データ

- ・いくつか実験データのうち、真空度がほとんど変化しなかったと思われる測定データ”soku4”(イベント数:550万件)を解析に使うことにする。
- ・真空度の判断は、測定中およそ1時間おきに1分間にたまるイベント数をscalerで数えてやり、その変化があまりないかどうかで判断する。
- ・”soku4”の測定では、5日間の測定の間で1分間あたりのイベント数(およそ900)はほとんど変わらなかった。

## 4.2 解析

### 解析の基本方針

- ・完全な真空が実現できた理想的な場合

$$\frac{dN}{dt} = -\Gamma_{3\gamma} N$$

$$\tau_{3\gamma} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma}}$$

これが求めたいo-Posの寿命

- ・我々の実験の場合

$$\frac{dN}{dt} = -(\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick-off}})N = -\Gamma_{\text{total}} N$$

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

pick-offの影響が出てくる

3光子崩壊からnヒットする確率:  $P_{3\gamma \rightarrow n}$

2光子崩壊からnヒットする確率:  $P_{2\gamma \rightarrow n}$

崩壊時刻からの微小な時間間隔において測定されるイベント数は、

$$\left( P_{3\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{\text{pick}} \right) N(t) \Delta t \times C$$

ここで  $C$  は3光子崩壊と2光子崩壊の両方の場合に検出効率にかかってくる因子である。 $N(t)$  は、式(2.3)、(2.4)から求められるo- $P_s$ の個数で、

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{total}}}\right)$$

に従う。補正後のデータで、我々の測定できるイベントの件数と崩壊時間のヒストグラムをfittingしたときのグラフの傾きの逆数の大きさは、 $\tau_{\text{total}}$  となる。つまり、我々は補正後のデータに対してfittingをうまくしてやることで、すぐに  $\tau_{\text{total}}$  は求められる。

$\Gamma_{\text{total}}$  と  $\Gamma_{3\gamma}$  の比を求めてやれば、

$$\tau_{3\gamma} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{\Gamma_{\text{total}}}{\Gamma_{3\gamma}} \tau_{\text{total}}$$

に従って、求めたいo- $\text{Ps}$ の寿命を求めることができる。

解析は、光子を検出したNaIシンチレータの数(hit数1~3)ごとに行う。

”soku4”のデータ5500000イベントを各イベントに振り分けてやると、

1 hit eventは4792773イベント、

2 hit eventは636569イベント、

3 hit eventは28794イベント、

それ以外は41864イベント。

各データにおいて、 $\gamma$ 線を検出したNaIシンチレータの吸収したエネルギー値をシンチレータ番号(①~⑦)の若い順にE1、E2、E3を割り当てていく。

1 hit eventは、データ数が圧倒的に多く、統計的に精度がよいという利点がある。

2 hit eventは、2  $\gamma$  崩壊のイベントが割合的に多く、pick-offの影響が見積もりやすいと思われる。

3 hit eventは、3  $\gamma$  崩壊のイベントの割合が多く、pick-offの影響があまりないという利点がある。

各hit数ごとに、寿命の計算に使うエネルギーと崩壊時間の範囲を定め、 $\Gamma_{3\gamma}$  と  $\Gamma_{\text{total}}$  の比を求め、o-Pos寿命を求める。

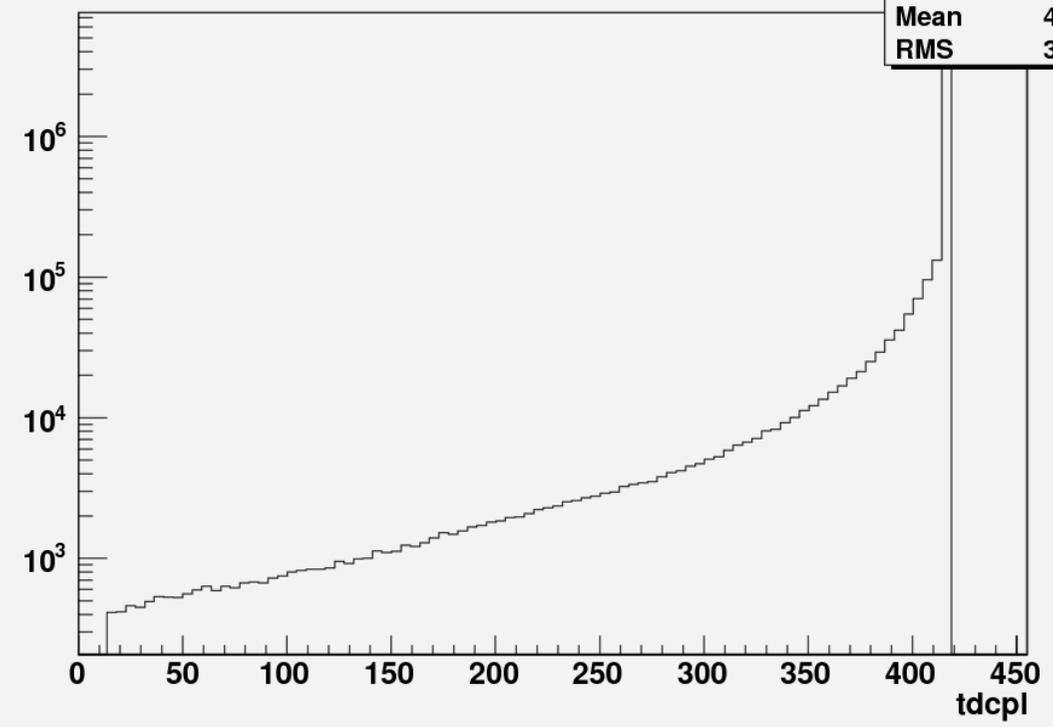
# 1 hit eventの解析と考察

tdcplの生データ→

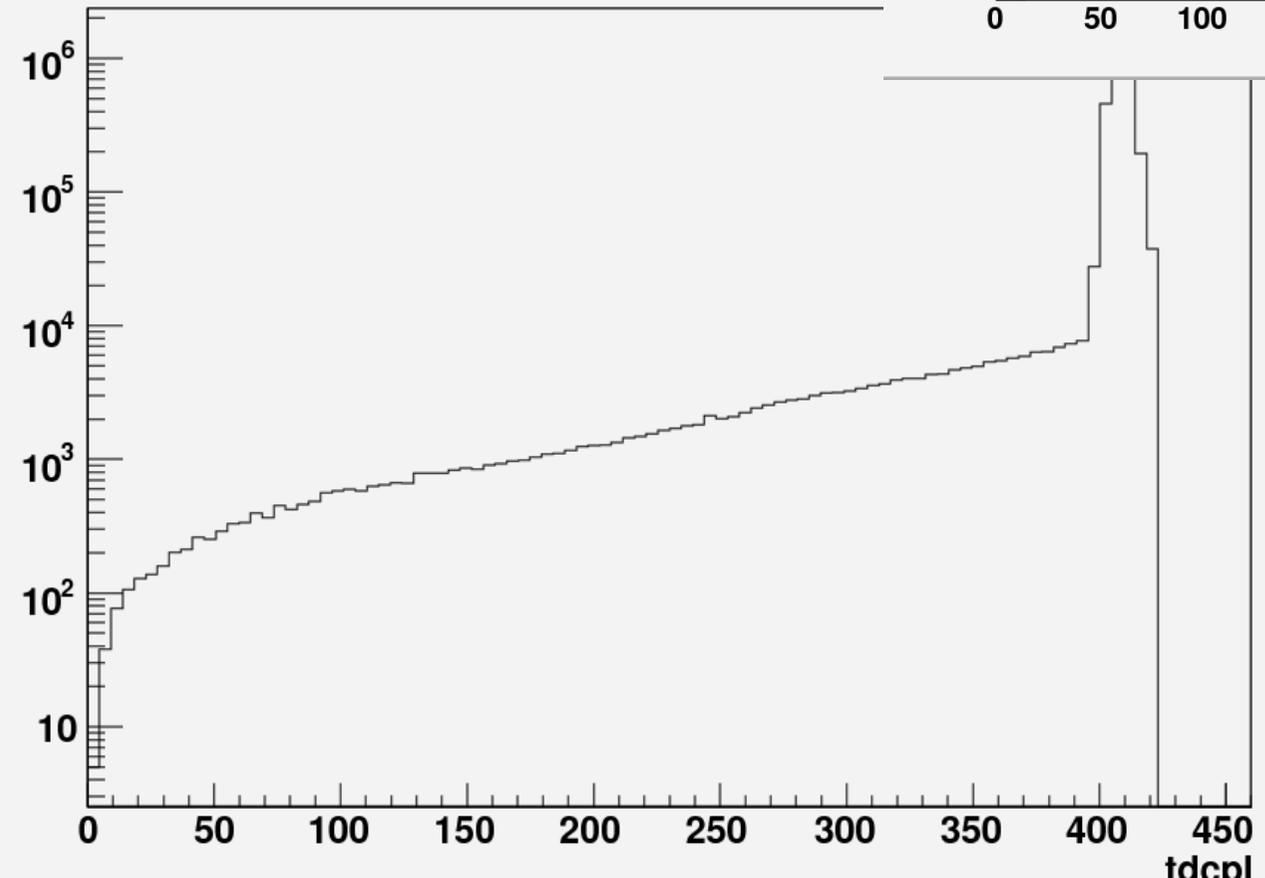
↓ tq補正後

tdcpl {tdcpl>0&&tdcpl<420&&E1>0&&E1<600}

htemp	
Entries	4761300
Mean	406.5
RMS	33.95



tdcpl {E1>0&&E1<600&&tdcpl>0&&tdcpl<420}



## データのカット範囲

・エネルギーの範囲について 150keV~390keV

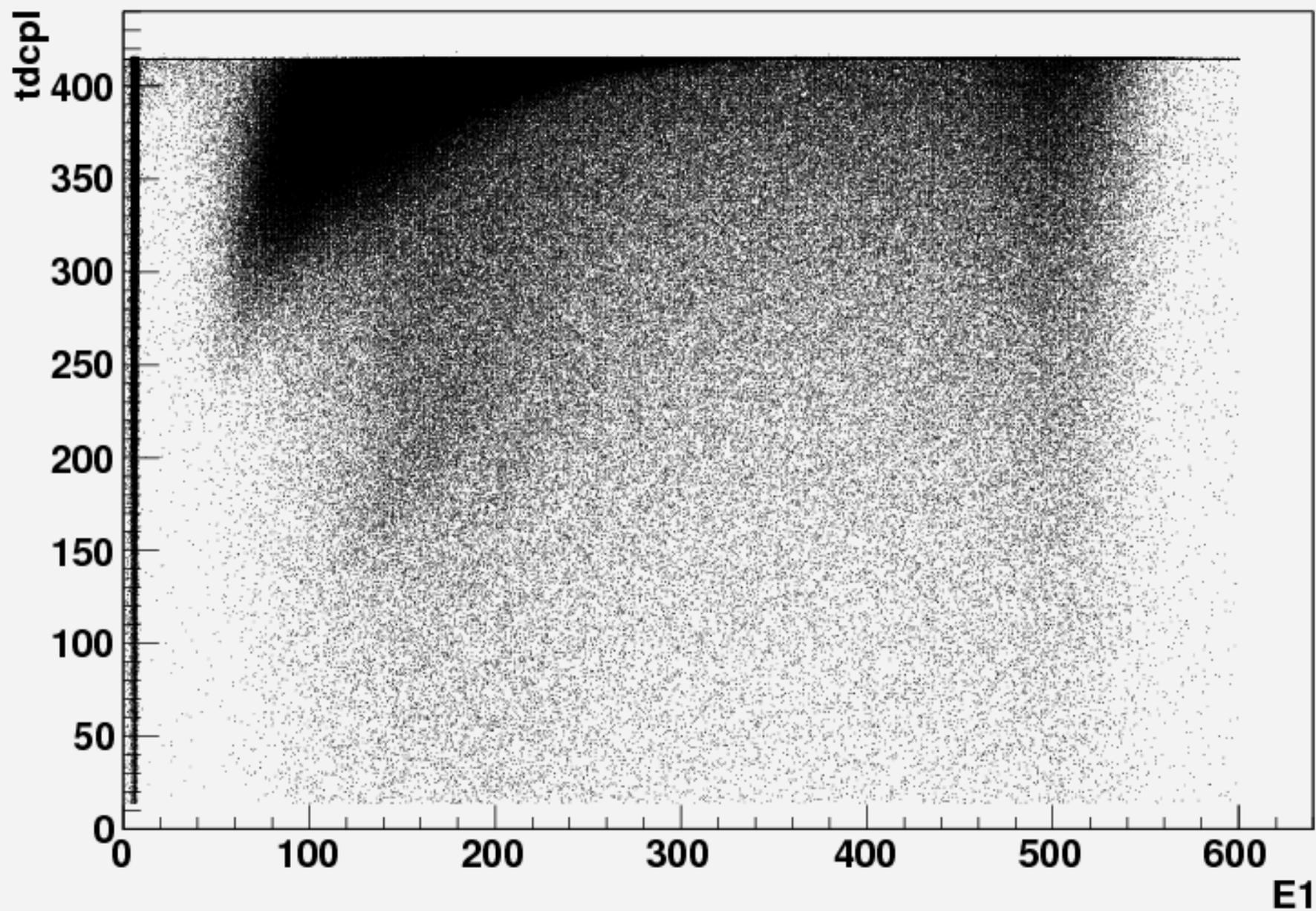
上限……パラポジトロニウム、オルソポジトロニウムのpickoff消滅等に由来する511keV付近のエネルギーを持つガンマ線をカット

下限……tq補正後のtdcpl-E1グラフにおいてデータが存在しうる範囲を考慮

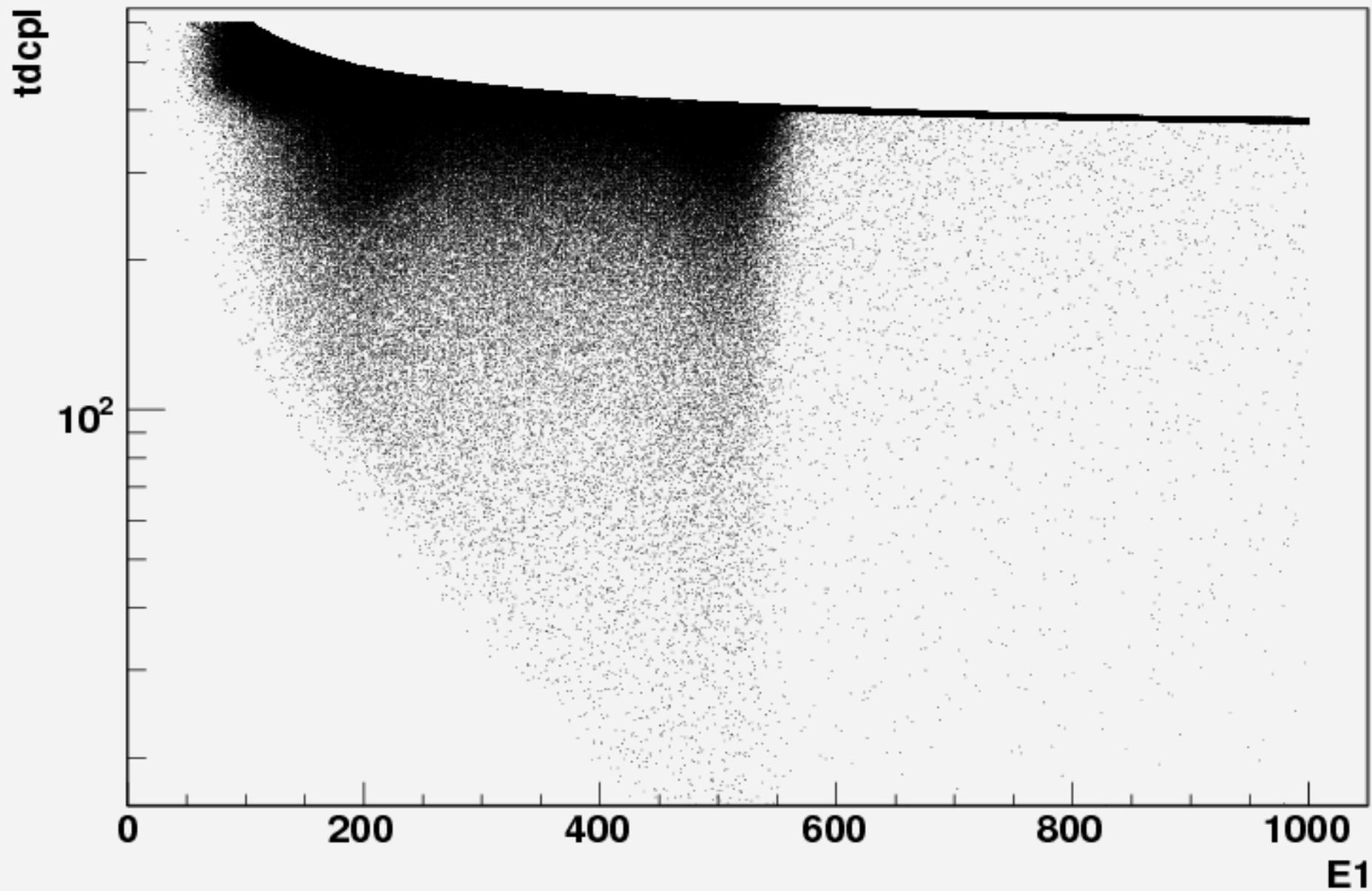
・時間の範囲について

Tq補正後のtdcplグラフ、tdcpl-E1グラフをみてデータ数ができるだけ多くなるような範囲100~350nsecに設定した。

tdcpl:E1 {tdcpl>0&&tdcpl<450&&E1>0&&E1<600}

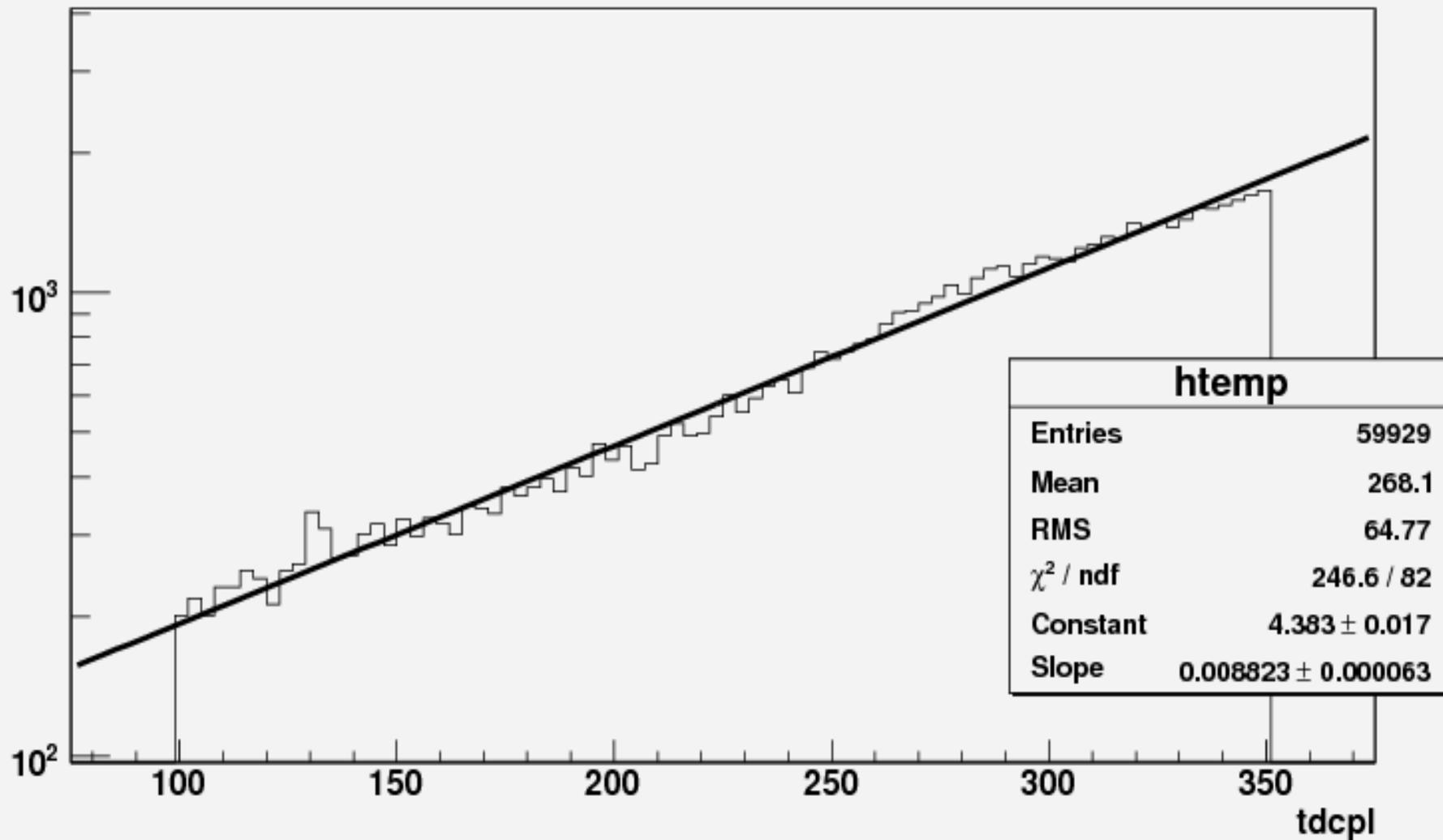


tdcpl:E1 {E1>0&&tdcpl>0&&tdcpl<600&&E1<1000}



$N = N_0 \exp(-\Gamma t)$  でfittingすると  
 $\Gamma = 0.008823 \pm 0.000063$  が得られる  
 $\tau = 113.3 \pm 6.6 \text{ ns}$  が得られる

tdcpl {99<tdcpl&&tdcpl<351&&150<E1&&E1<390}



ここからは先は本来は2hit、3hitのイベントでセットアップがうまくいっていて、イベント数が多く、目的にあったデータがうまく取れていればそちらに任せていた部分(pick-offの影響の見積もり)を、代わりに行う。ここからは一部精密さを欠いている。

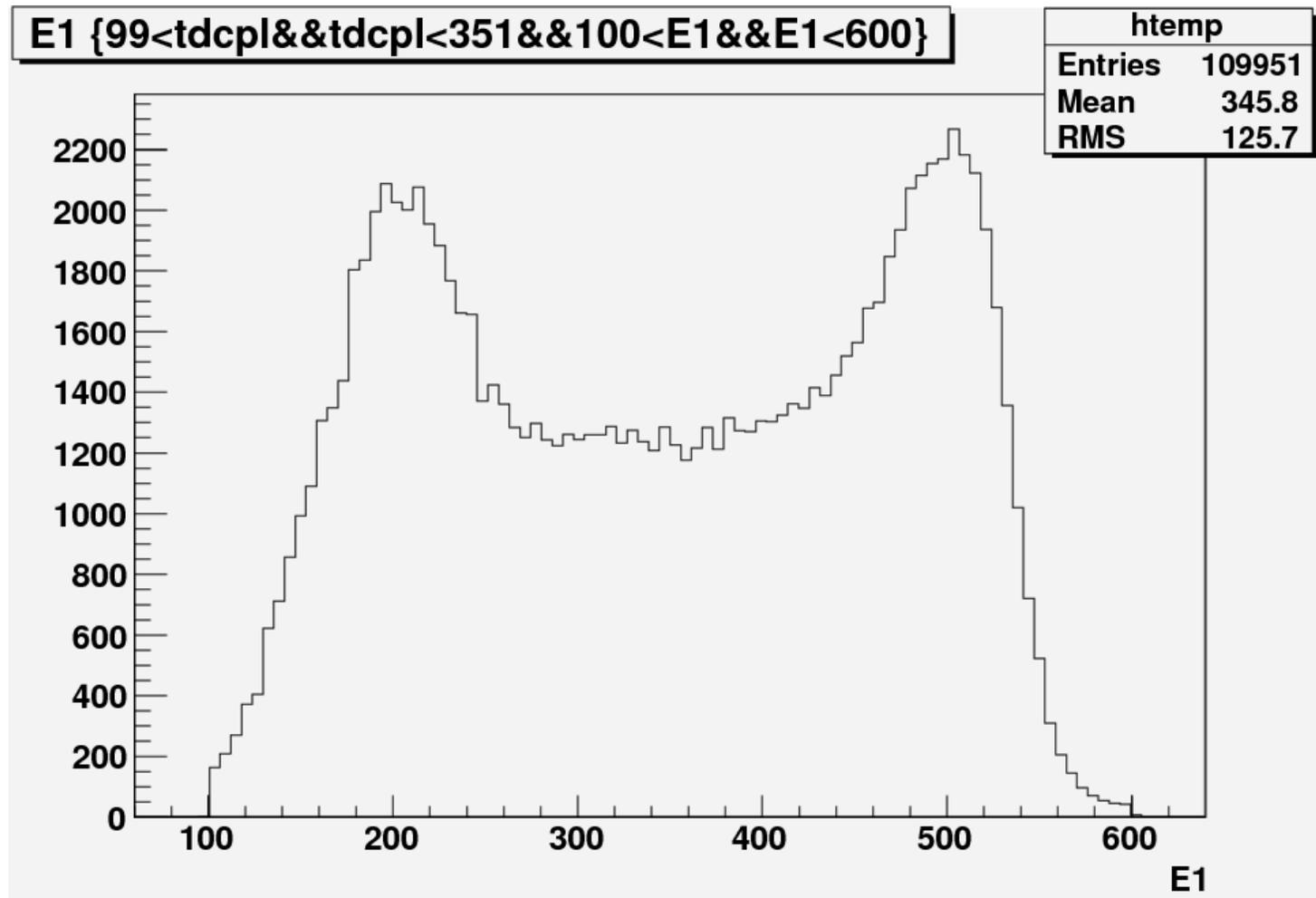
入射  $\gamma$  線が511keVのときの吸収されるエネルギーの分布を知ることにより、 $P_{3\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数のうちどれだけが  $P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数であるかを判断し、あとは  $\Gamma_{3\gamma}$  と  $\Gamma_{\text{pick}}$  の比を求めていく。

そのために、まずは検出効率を求めておく。今回は3光子崩壊から1ヒットする確率  $P_{3\gamma \rightarrow 1}$  と2光子崩壊から1ヒットする確率  $P_{2\gamma \rightarrow 1}$  の比を求める。  
セットアップなどから

$$P_{3\gamma \rightarrow 1} : P_{2\gamma \rightarrow 1} = 0.8181 : 1$$

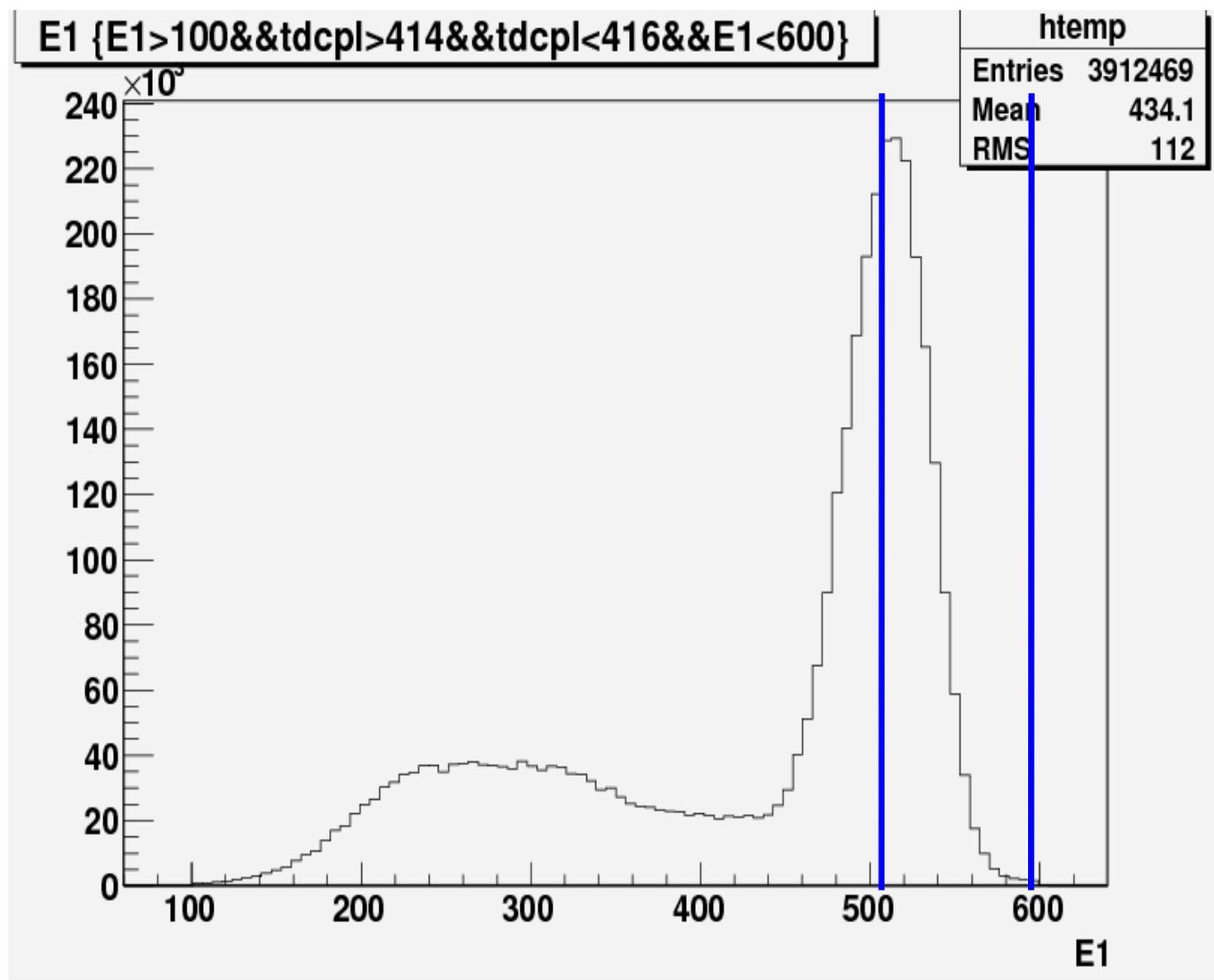
がわかる。

順に数を見積もっていく



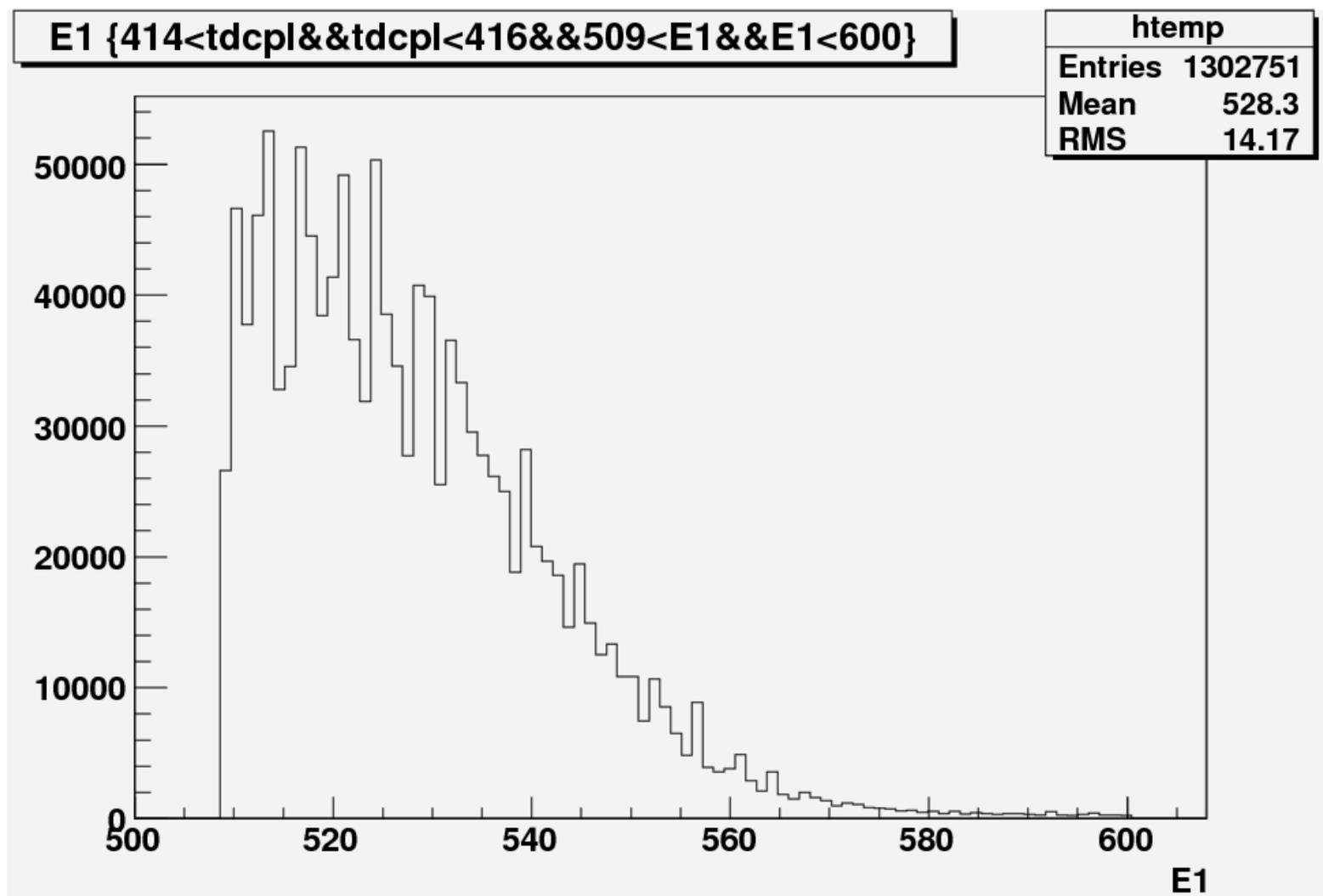
**109951**

# p-Psからの崩壊が多いPs生成直後のカウント数



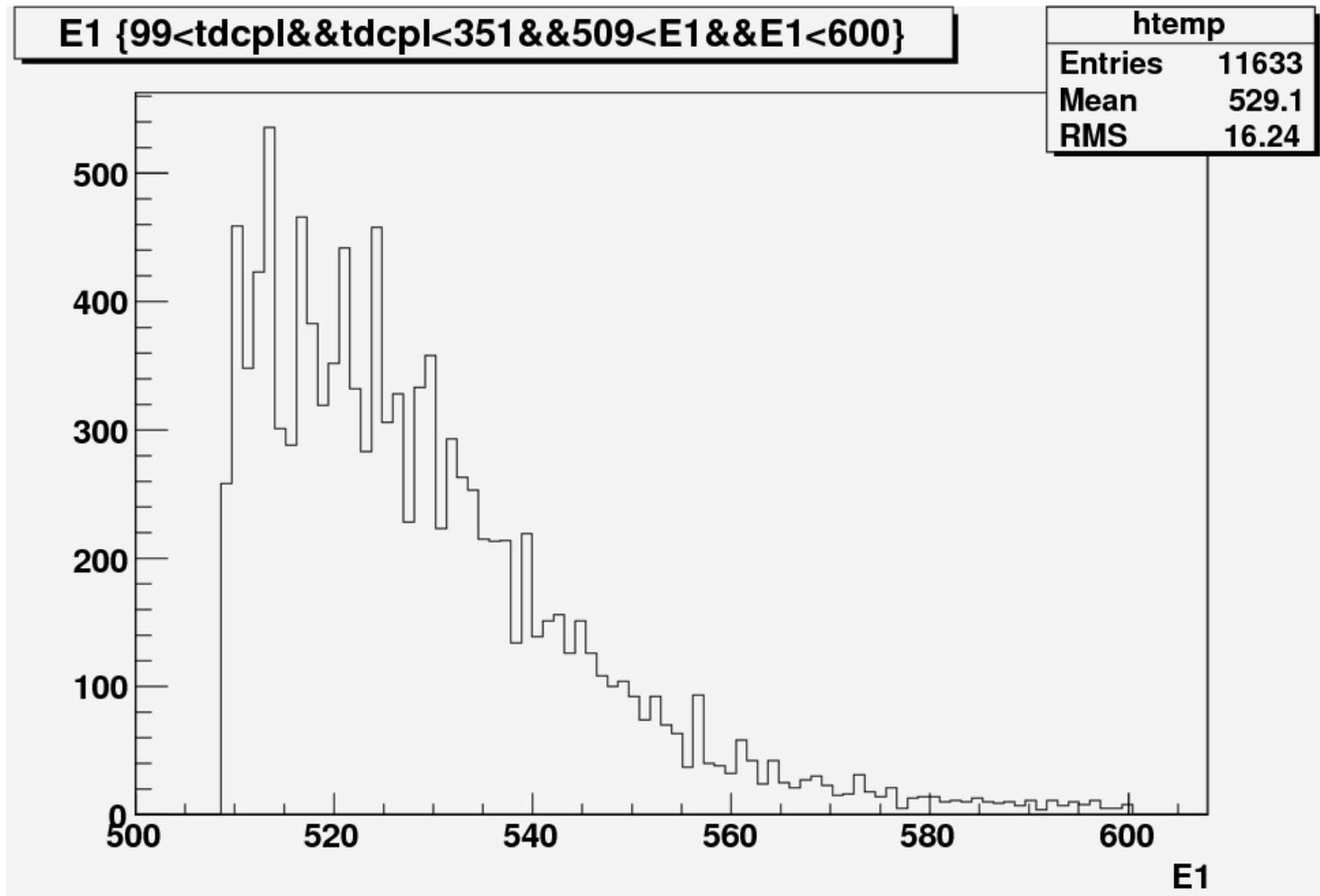
**3912469**

# Ps生成直後での光電吸収の右側のカウント数



1302751

# fittingに使う時間範囲での $2\gamma$ 崩壊由来の光電吸収の片側分のカウント数



11633

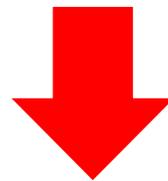
fittingの時間範囲での  $P_{2\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数は、  
 $11633 \times 0.92 \times 3912468 / 1302751 \doteq 32142$

$P_{3\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数は109951

$P_{3\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma}$  に対応するカウント数は  $109951 - 32142 = 77809$

よって  $\frac{\Gamma_{\text{pick}}}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{32142}{77809} \times \frac{P_{3\gamma\rightarrow 1}}{P_{2\gamma\rightarrow 1}} \cong 0.3379$  少し多い?

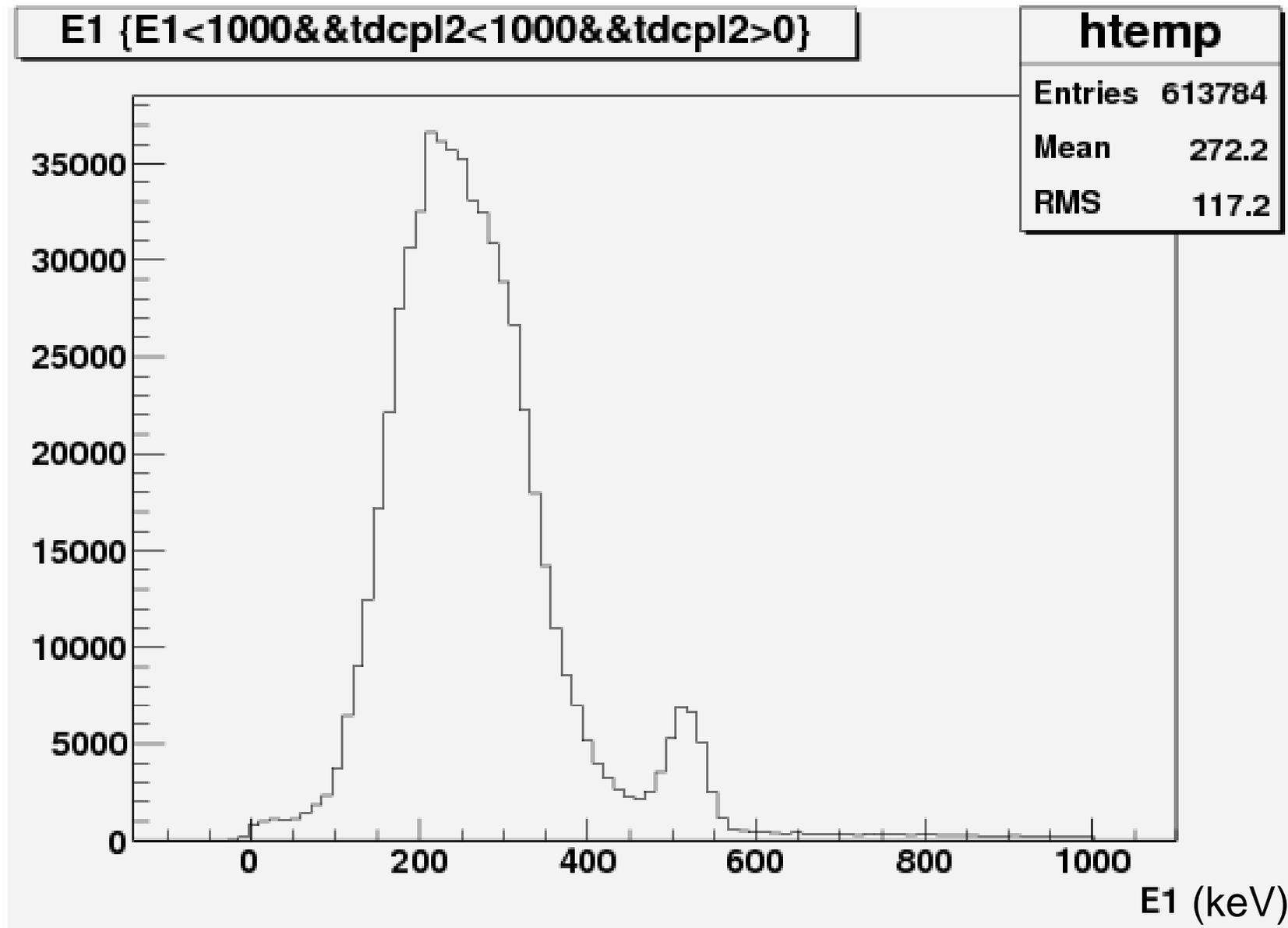
誤差も見積もって寿命を求めると、



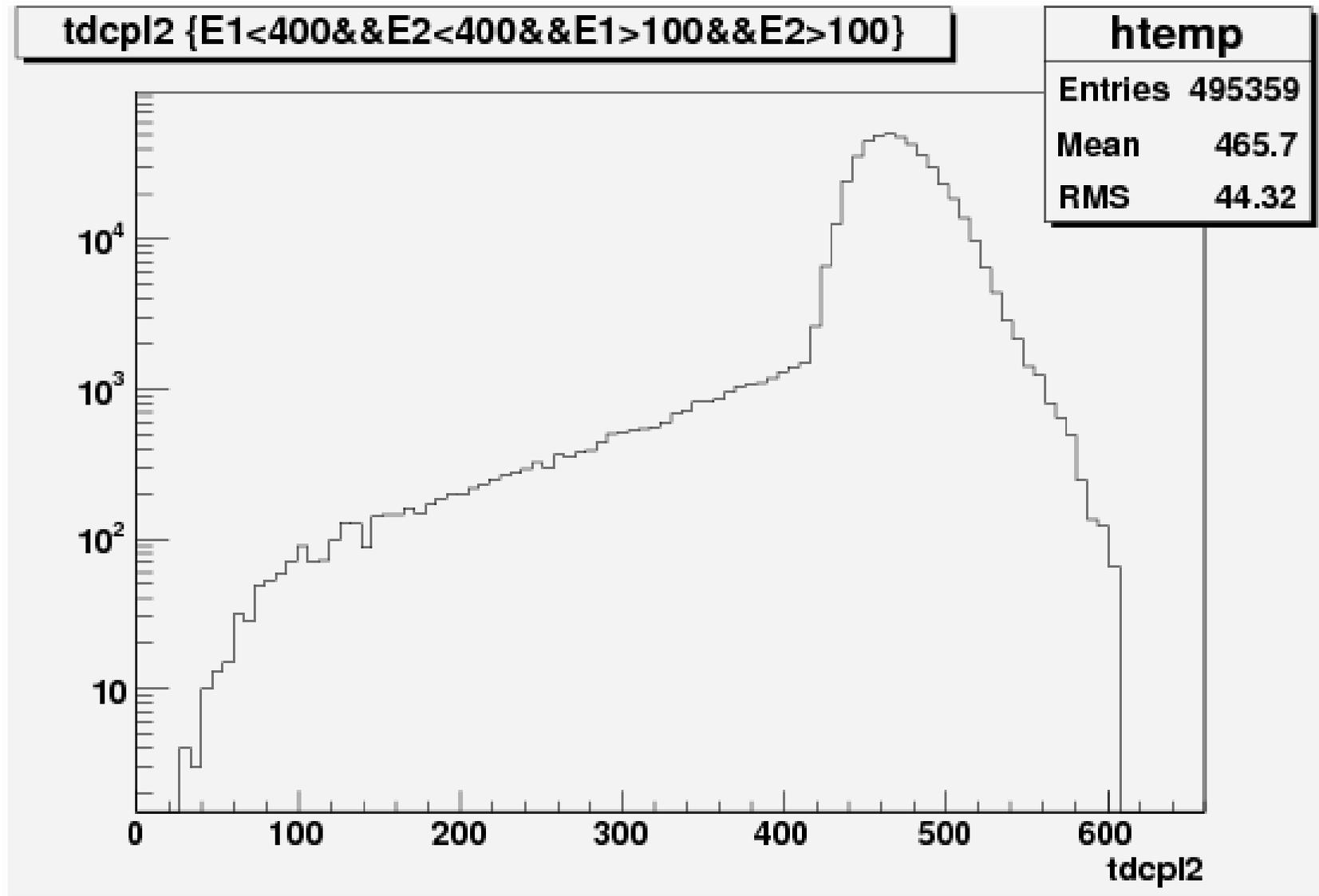
$$\tau_{3\gamma} = 151.58 \pm 8.8 [n \text{ sec}]$$

## 2 hit eventの解析と考察

# 我々の興味のあるエネルギーと時間の領域でのエネルギー分布図

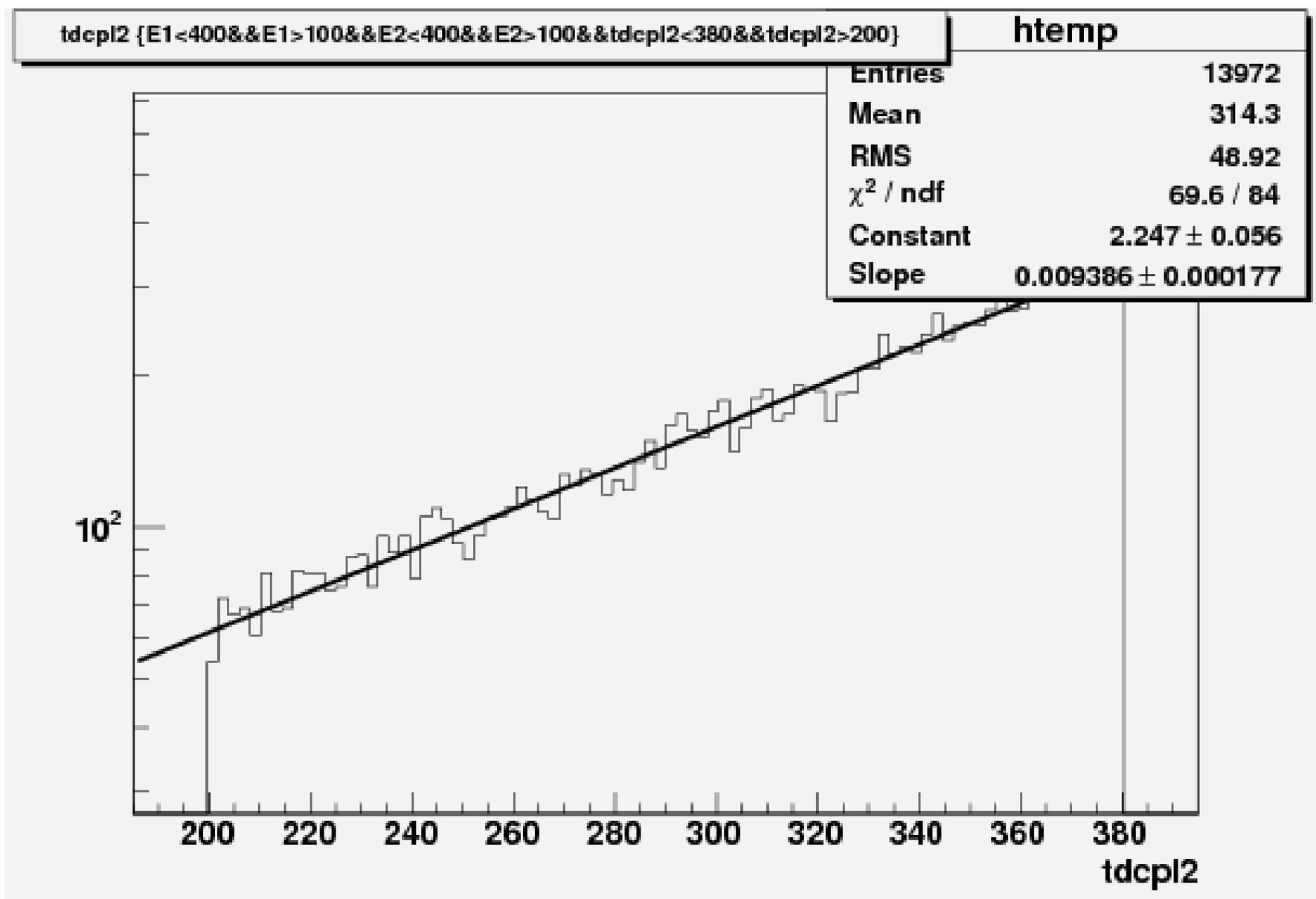


### 3 $\gamma$ 崩壊の主なエネルギー領域での崩壊の様子



tdcpl2の値の大きい所と小さい所では、t-Q補正のうまくfitできていない部分の影響が出ているのでその範囲はo- $P_s$ の寿命を求めることには使わない。

# 先の範囲に加えてt-Q補正がうまくできている範囲に絞ったの fittingの様子



先ほどのfittingから、誤差も評価して $\Gamma$ 及び寿命を求める。

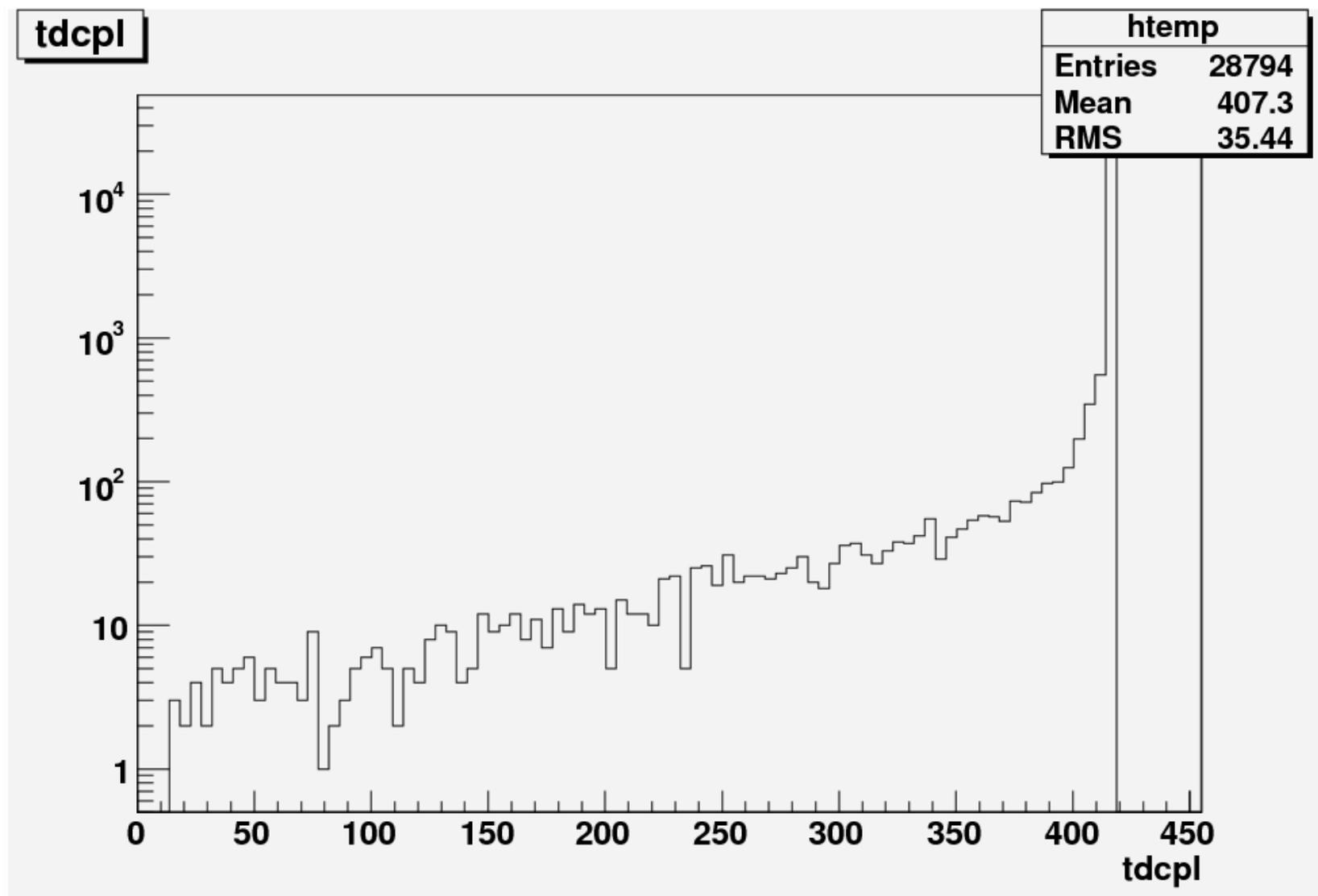
$$\Gamma_{\text{total}} = 0.00938586 \pm 0.000177$$

$$\tau_{\text{total}} = \frac{1}{\Gamma_{\text{total}}} = 106.5432 \pm 2.0092$$

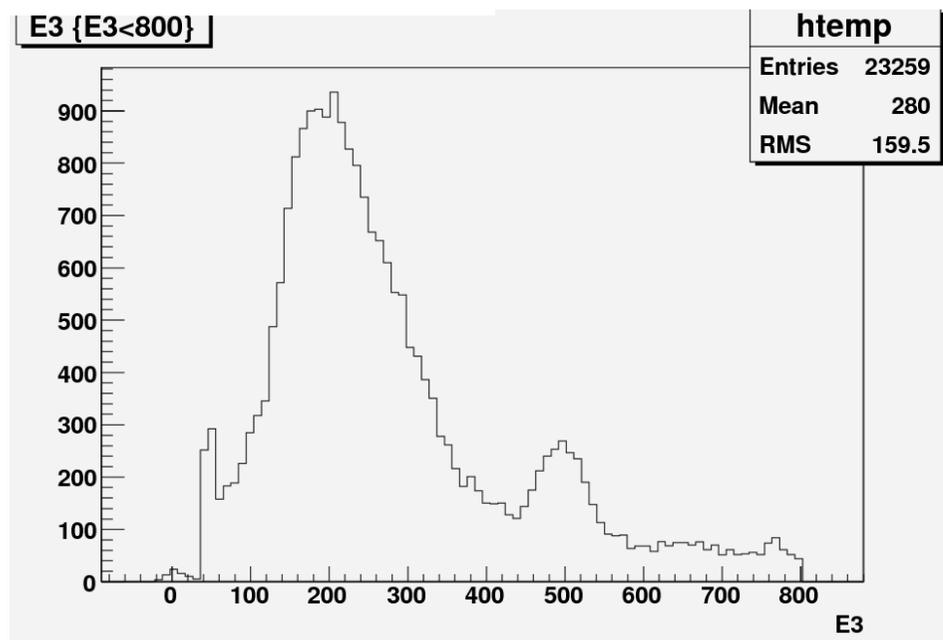
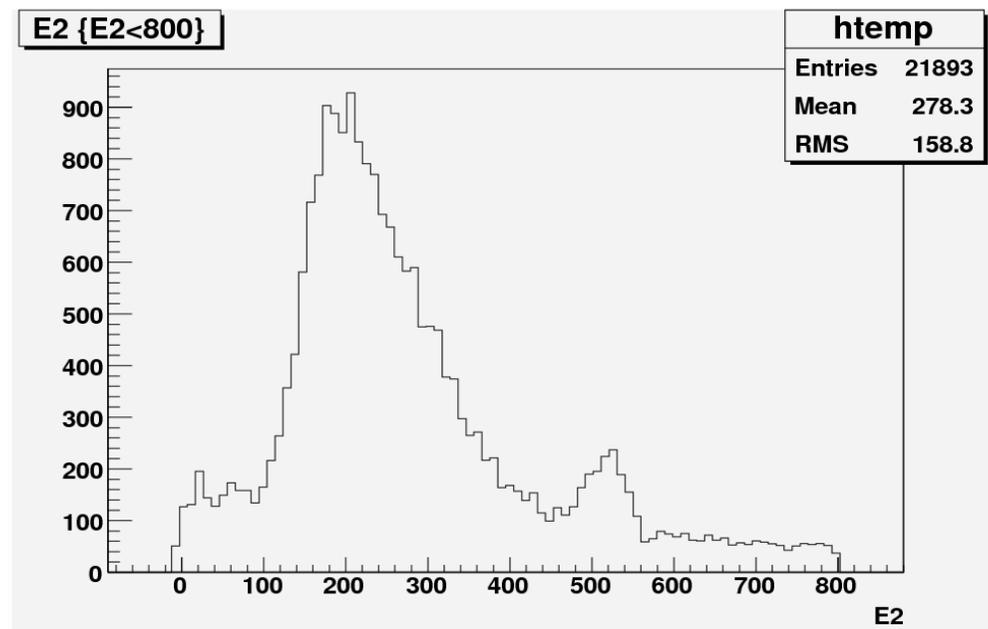
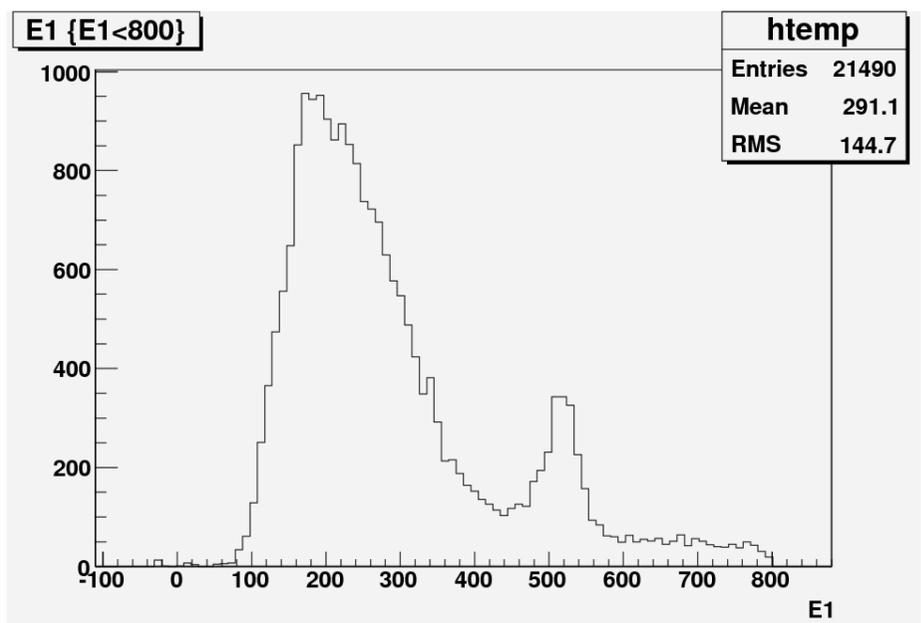
## **3 hit eventの解析と考察**

# 生データ

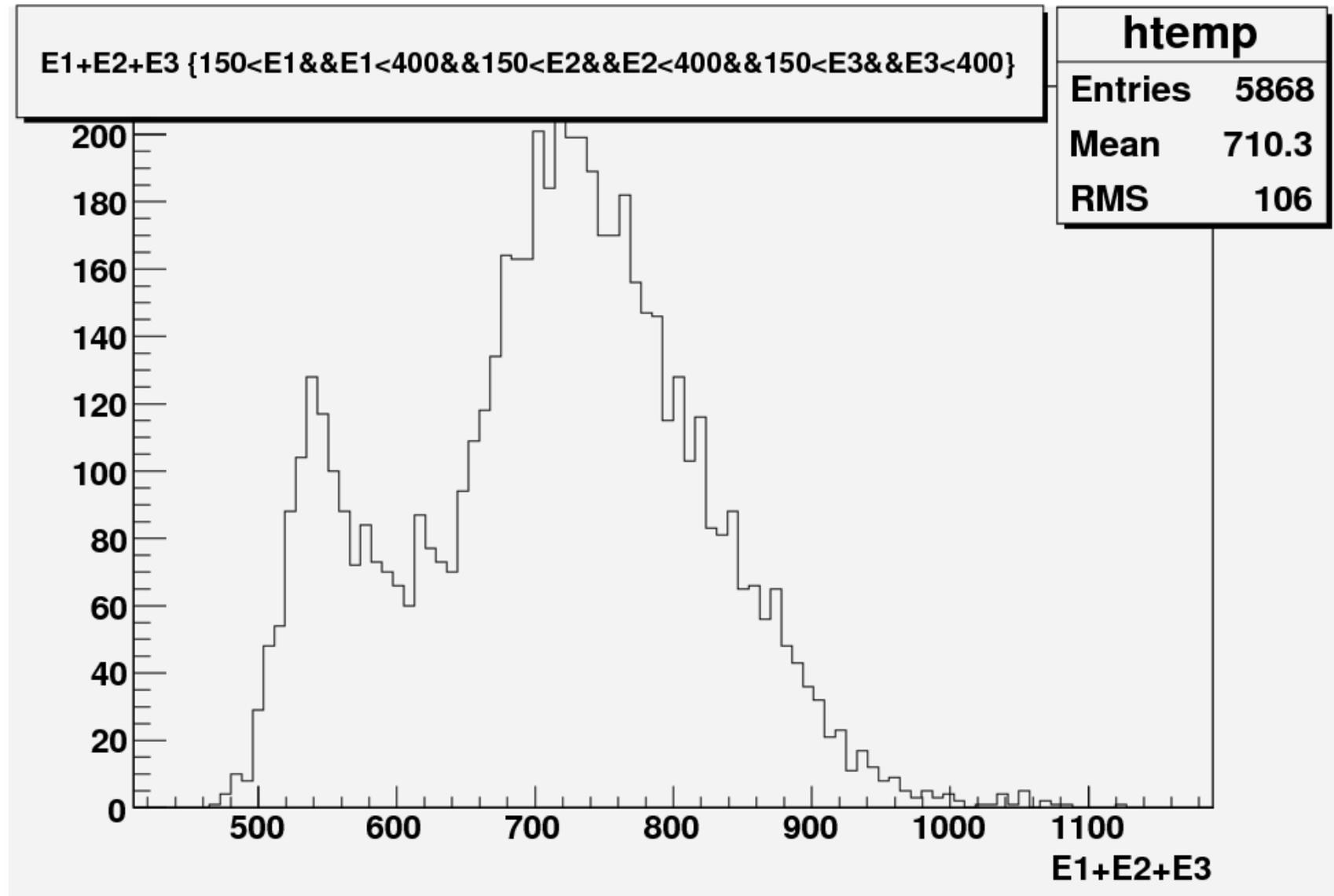
何の条件もかけていないデータ  
イベント数: 28794



# 3hitのエネルギーをそれぞれ見やすいようにある程度cutしたもの

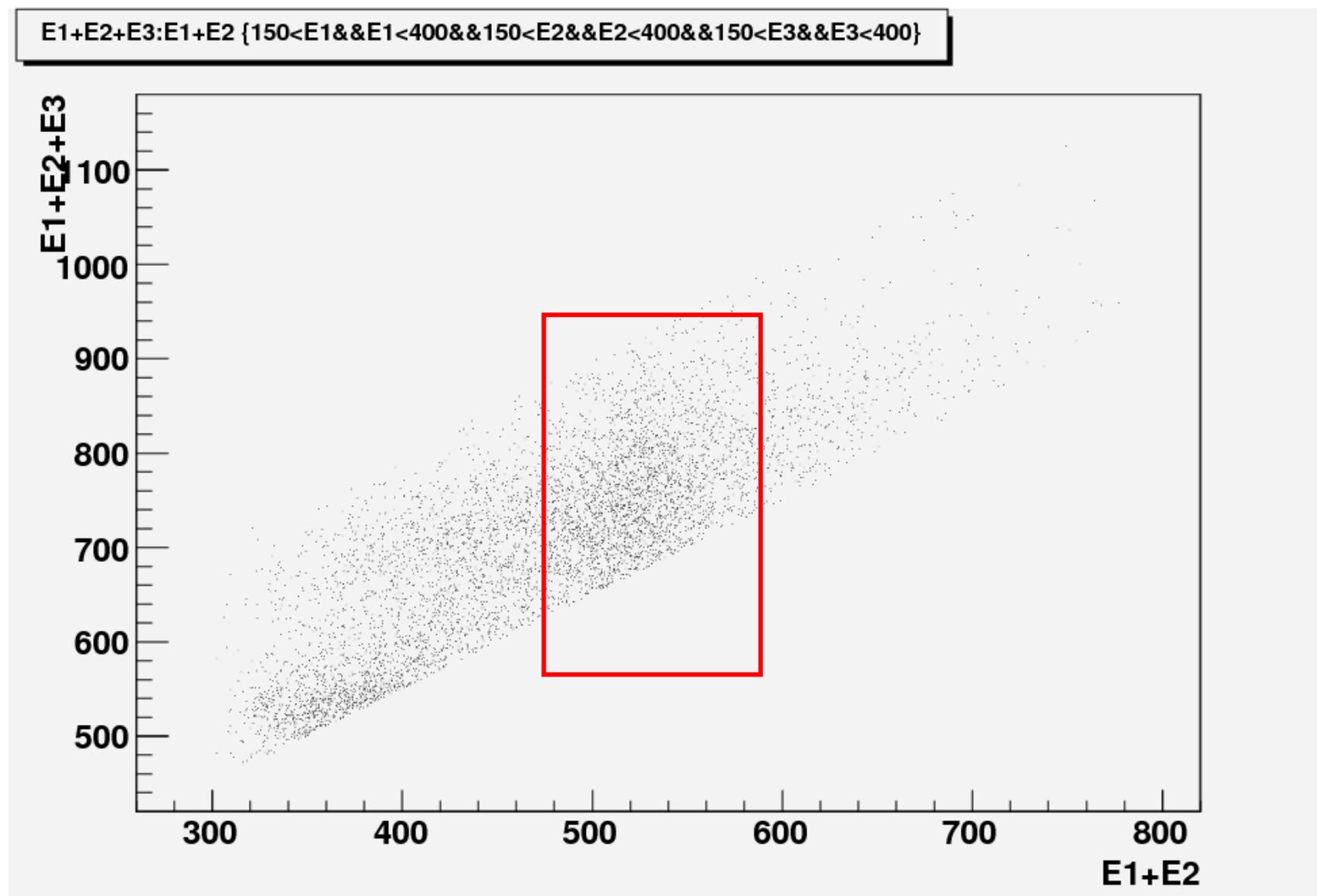


各エネルギーが150keV以上400keV以下の範囲での、3hit  
それぞれのエネルギーの合計値



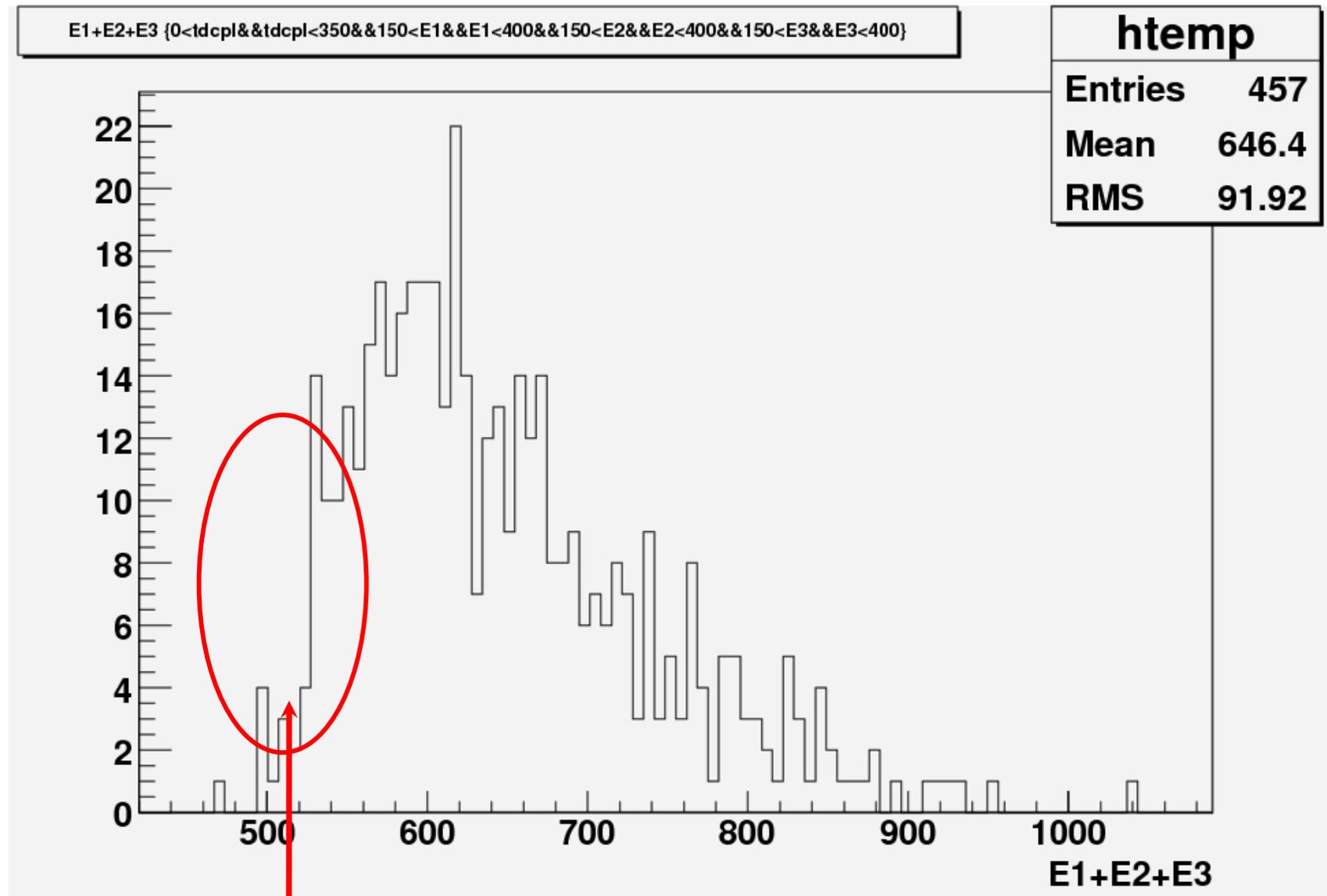
理想的には、この中で合計値が1022keVのもののみで寿命を求めてやれば、特殊なアクシデンタルな場合を除き、o-Psの寿命が求まる

# エネルギーが3つの合計と2つの合計の二次元プロット



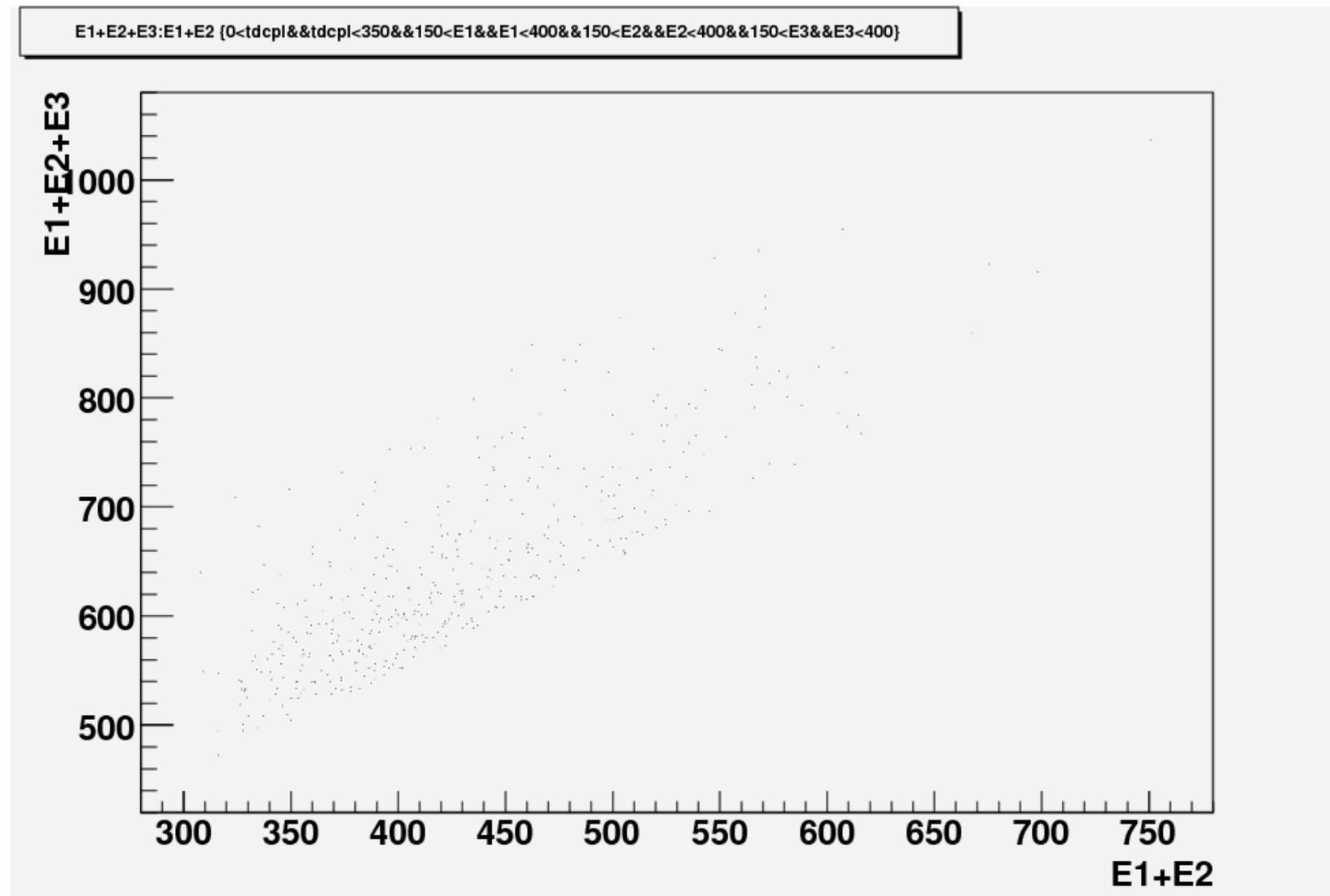
$E1+E2$ が511keVで $E3$ の値が150~400keVのデータが多く、これらもp- $P_s$ から来ているものと考えられる。

# tdcplの値に350ns以下という制限をつけた場合 制限をつけた後



511keVのピークが消滅

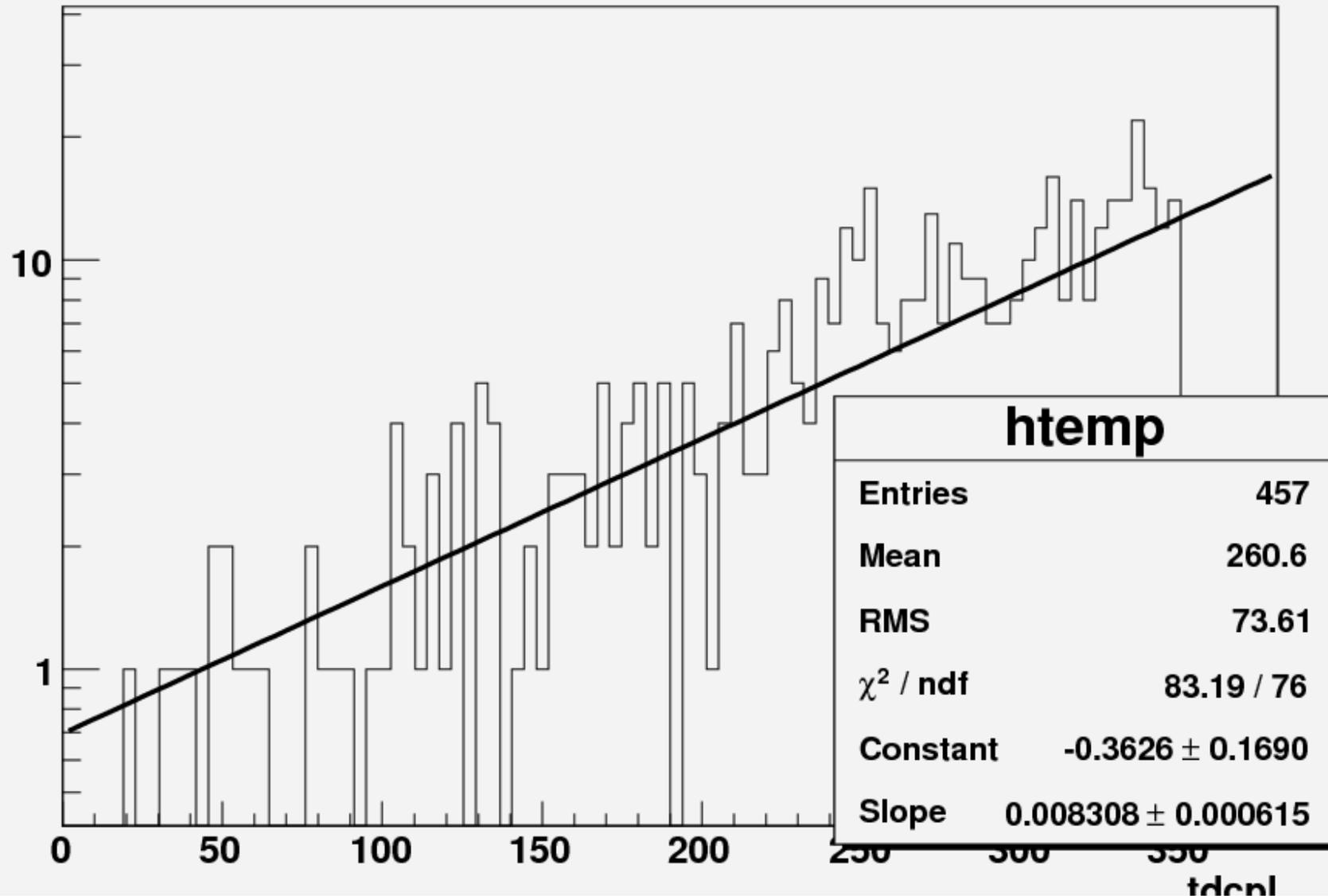
# 同じ条件で、3つのエネルギーの合計と2つのエネルギーの合計の二次元プロットをみる



相関が消滅したように思われる。

# Fittingして寿命を求めてみる

```
tdcpl {0<tdcpl&&tdcpl<350&&150<E1&&E1<400&&150<E2&&E2<400&&150<E3&&E3<400}
```



# 結果

$\Gamma$	$\Gamma$	$\tau$ (ns)	$\tau$	$\chi^2$	Entries
0.0830	0.0061	120.4	8.9	1.095	457
8	5				

$$\tau_{3\gamma} = 120.4 \pm 8.9[\text{nsec}]$$

## 5. 結論



