

# オルソポジトロニウムの寿命測定

名前

翁 昂平

西辻 裕紀

吉川 尚孝

岡田 裕行

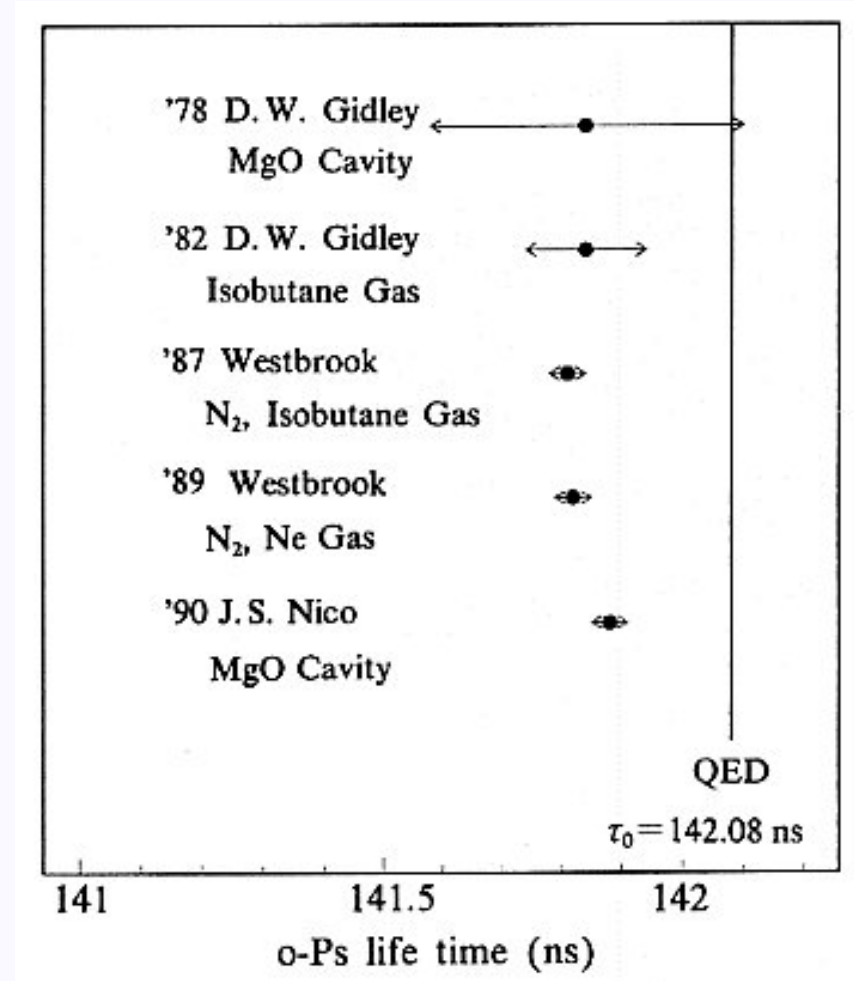
古賀 太一郎

# 0. 目的

オルソポジトロニウムの寿命を測定し、QEDが正しいものであるか検証する。

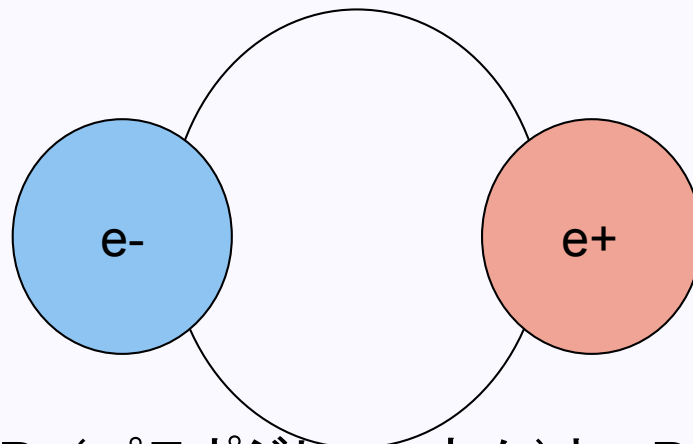
# なぜオルソポジトロニウムか？

- ・寿命が長く(QEDで真空中142.08ns)、直接測定ができる。
- ・過去に測定されている値が理論値より短い。(1999、陣内浅井小林の実験により解決？)



# 1. 物理的背景

ポジトロニウムとは... $e^+$ と $e^-$ の束縛状態



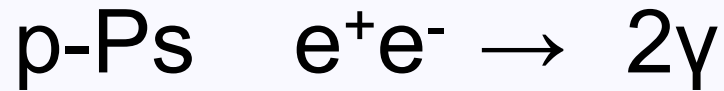
スピン状態により、p-Ps(パラポジトロニウム)とo-Ps(オルソポジトロニウム)の二種類に分類される。

p-Ps スピン0  $\frac{|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle}{\sqrt{2}}$

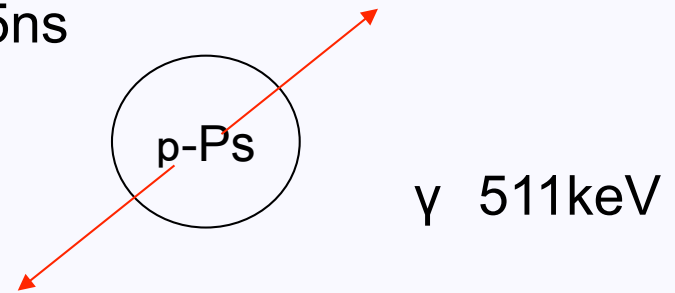
o-Ps スピン1  $|\uparrow\uparrow\rangle, \frac{|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle}{\sqrt{2}}, |\downarrow\downarrow\rangle$

# p-Ps, o-Psの崩壊

主な崩壊：電磁相互作用による



寿命 0.125ns



寿命142ns

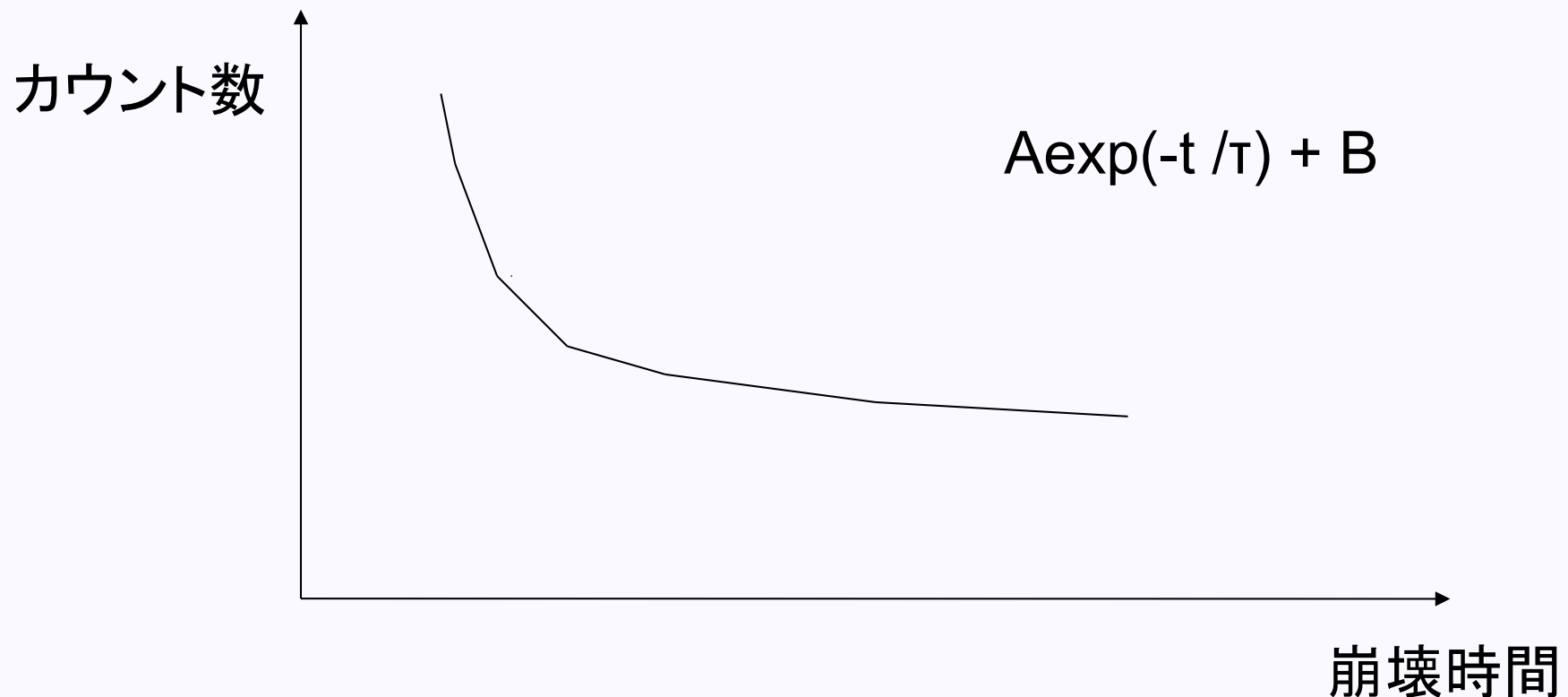


光子はスピン1, o-Psは2γに崩壊できない！

寿命 $\tau$

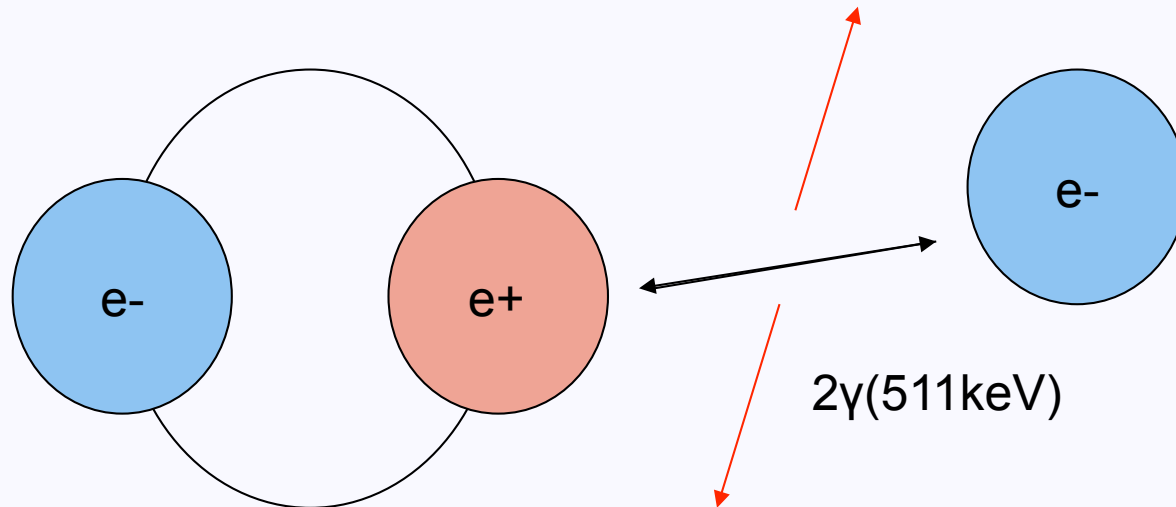
$$N(t) \propto \exp(-t / \tau)$$
$$dN/dt \propto \exp(-t / \tau)$$

o-Posの崩壊時間を測定し、カウント数をexpで fittingすることにより直接寿命を求める。

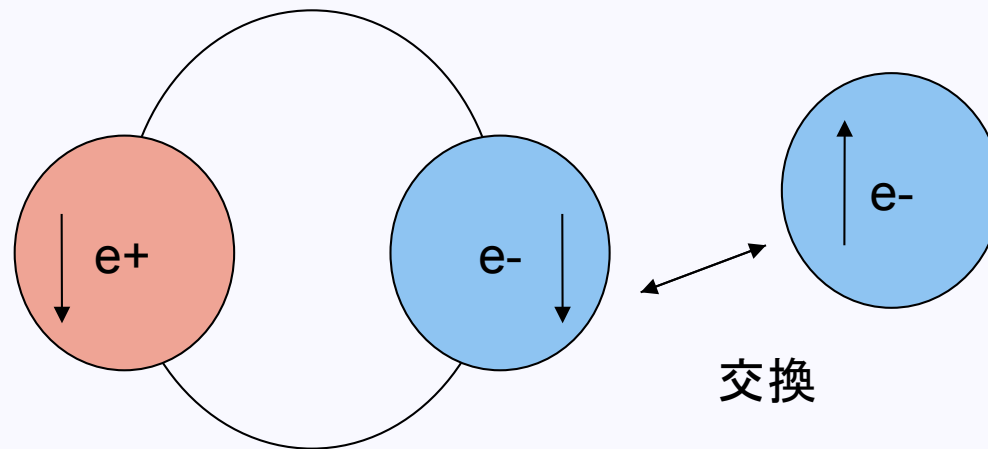


# o-Psのその他の崩壊

pick-off ……o-Ps中の陽電子と物質中の電子との間で起こる対消滅。



スピン交換反応……o-Ps中の電子が物質中の電子と交換され、p-Psを生成する反応。

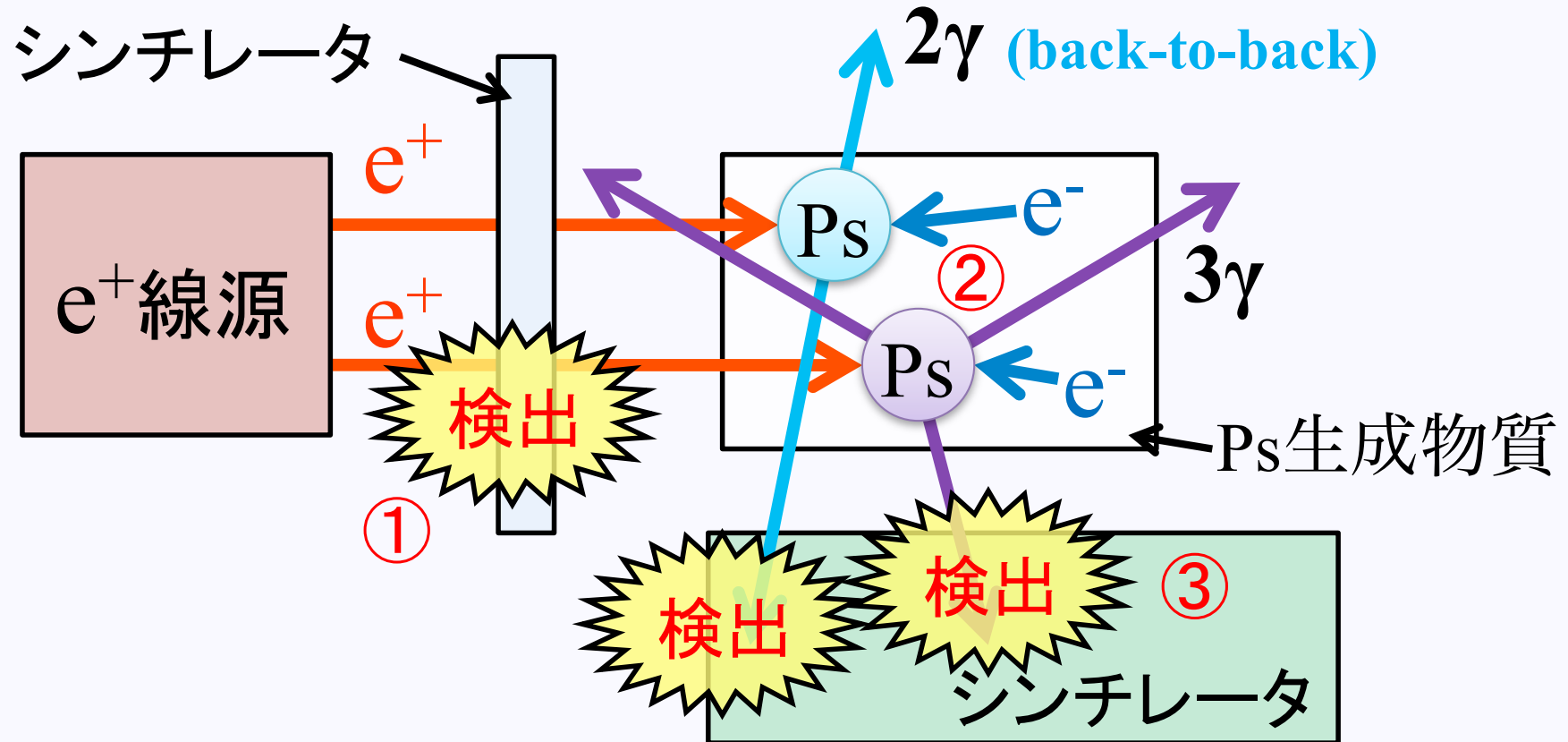


生成された直後、o-Psは約1eVの運動エネルギー（速さ $\sim c/700$ ）を持ち、pick-off、スピン交換反応の確率は大きい。減速するので崩壊率は時間による。



## 2.実験方法

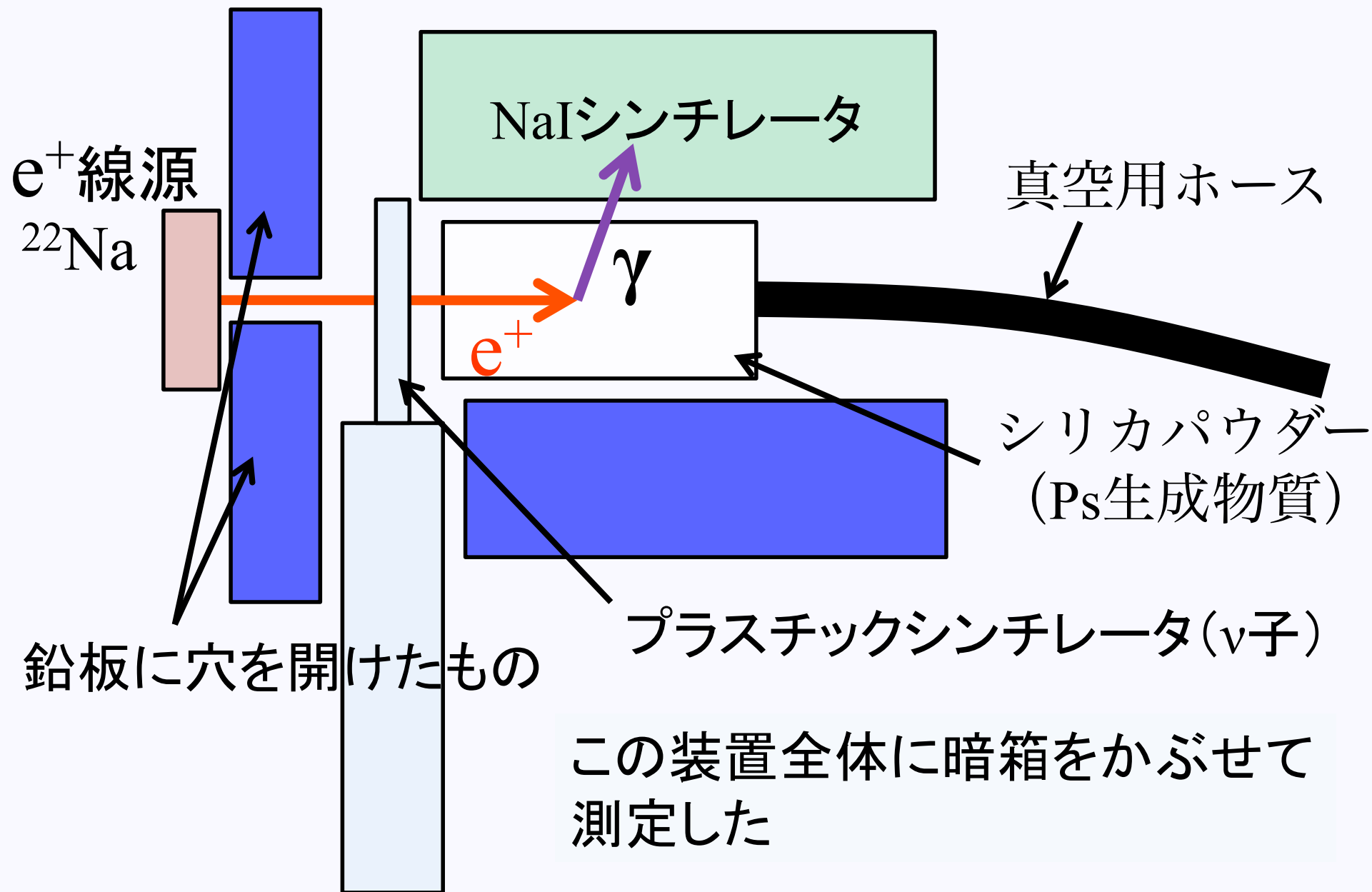
# 実験の原理



- ①シンチレータが $e^+$ の通過を検出
- ②Ps生成物質中でポジトロニウム（パラ，オルソ）が生成，~~崩壊~~壊により生じた $\gamma$ 線をシンチレータが検出

**➡ ①と③の時間差をPsの寿命として測定**

# 測定装置

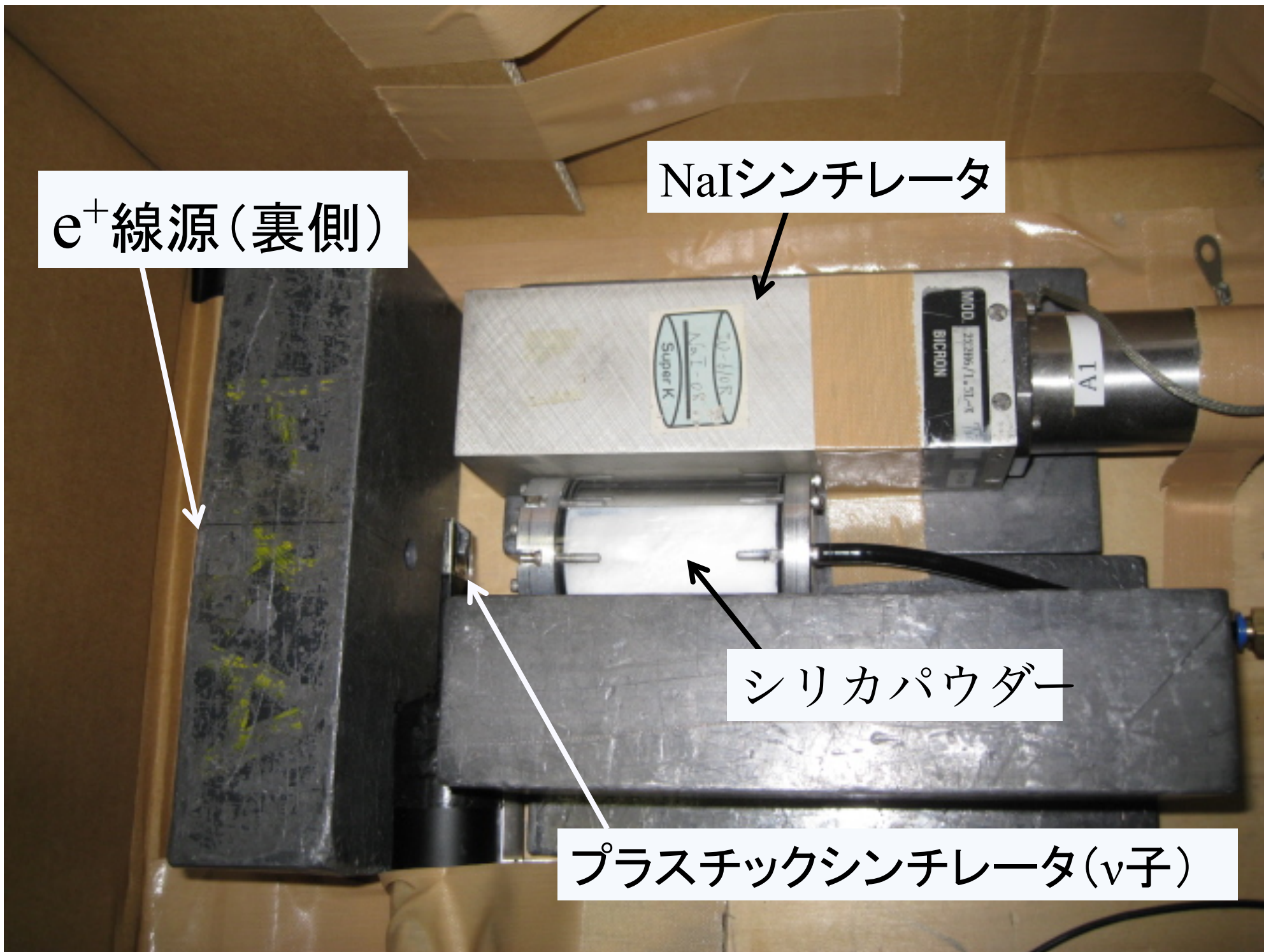


$e^+$ 線源(裏側)

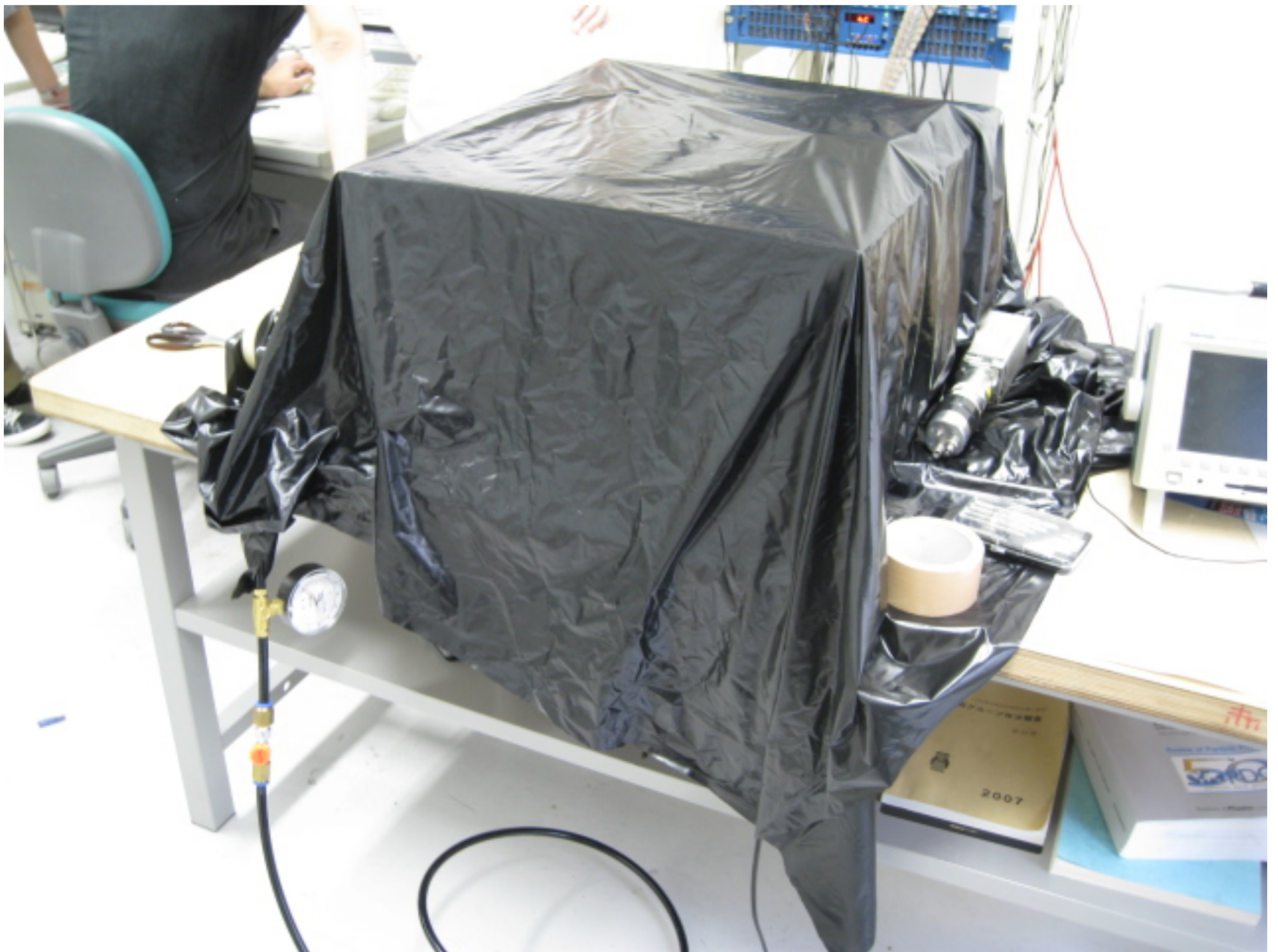
NaIシンチレータ

シリカパウダー

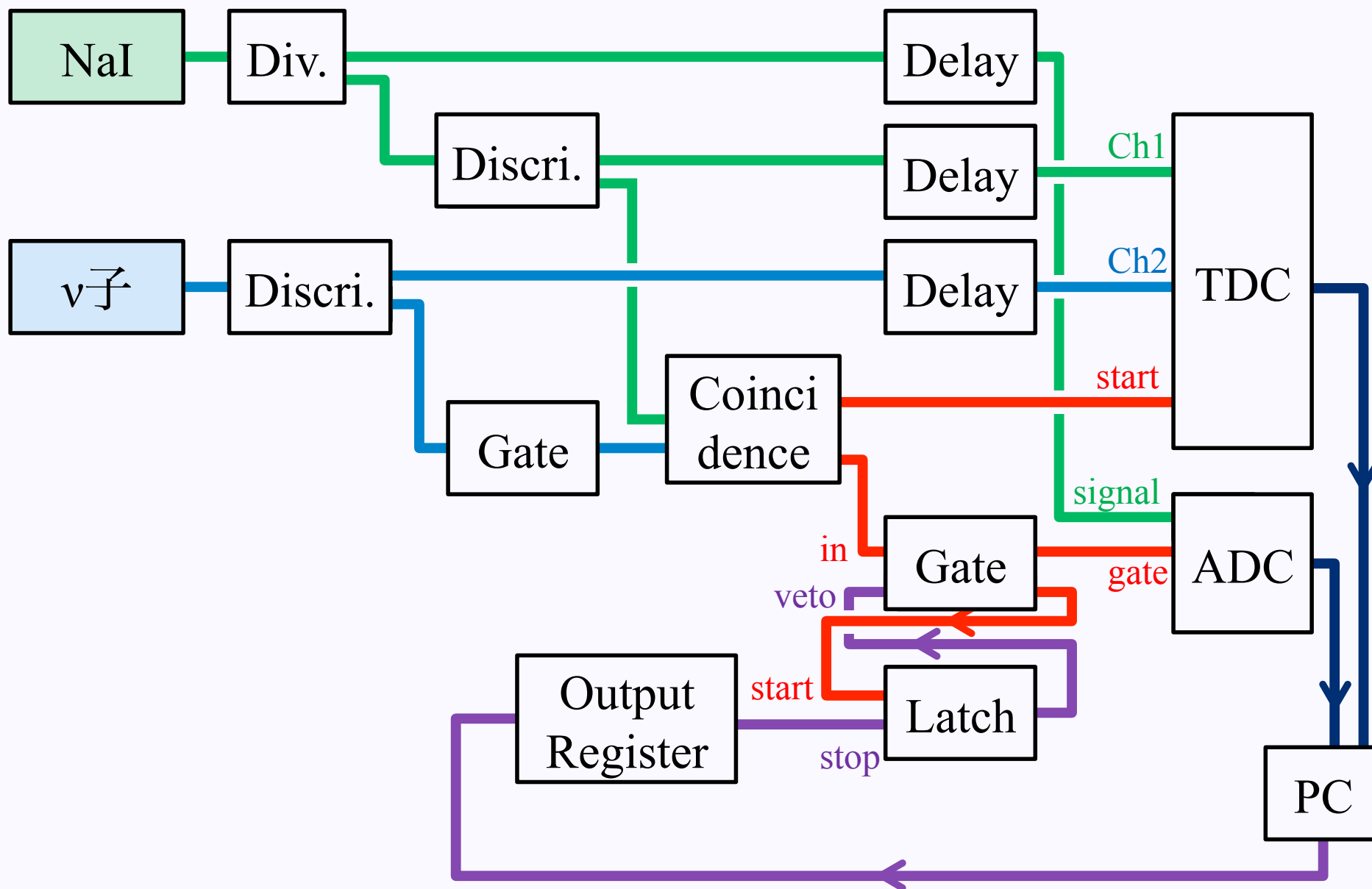
プラスチックシンチレータ( $\nu$ 子)

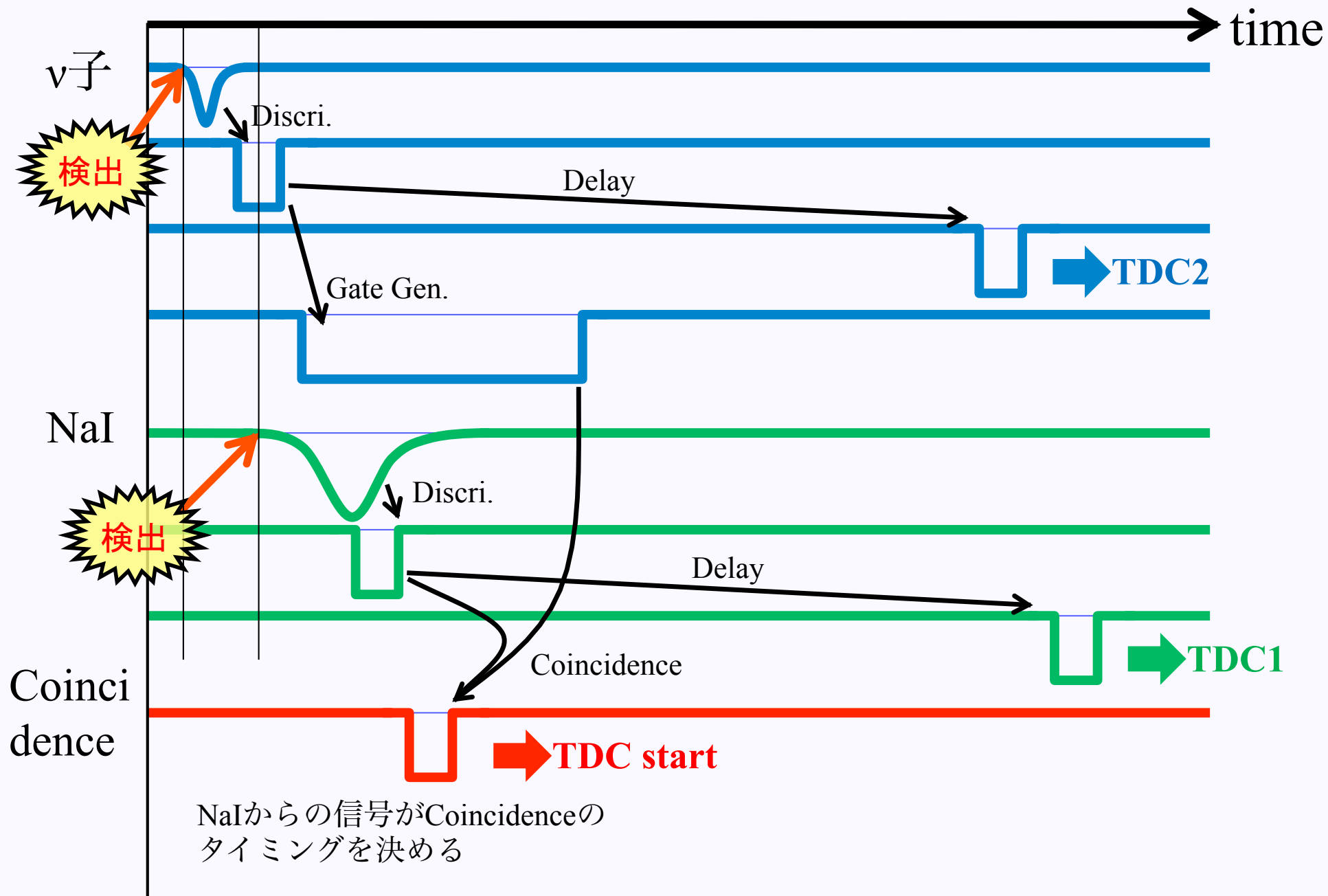




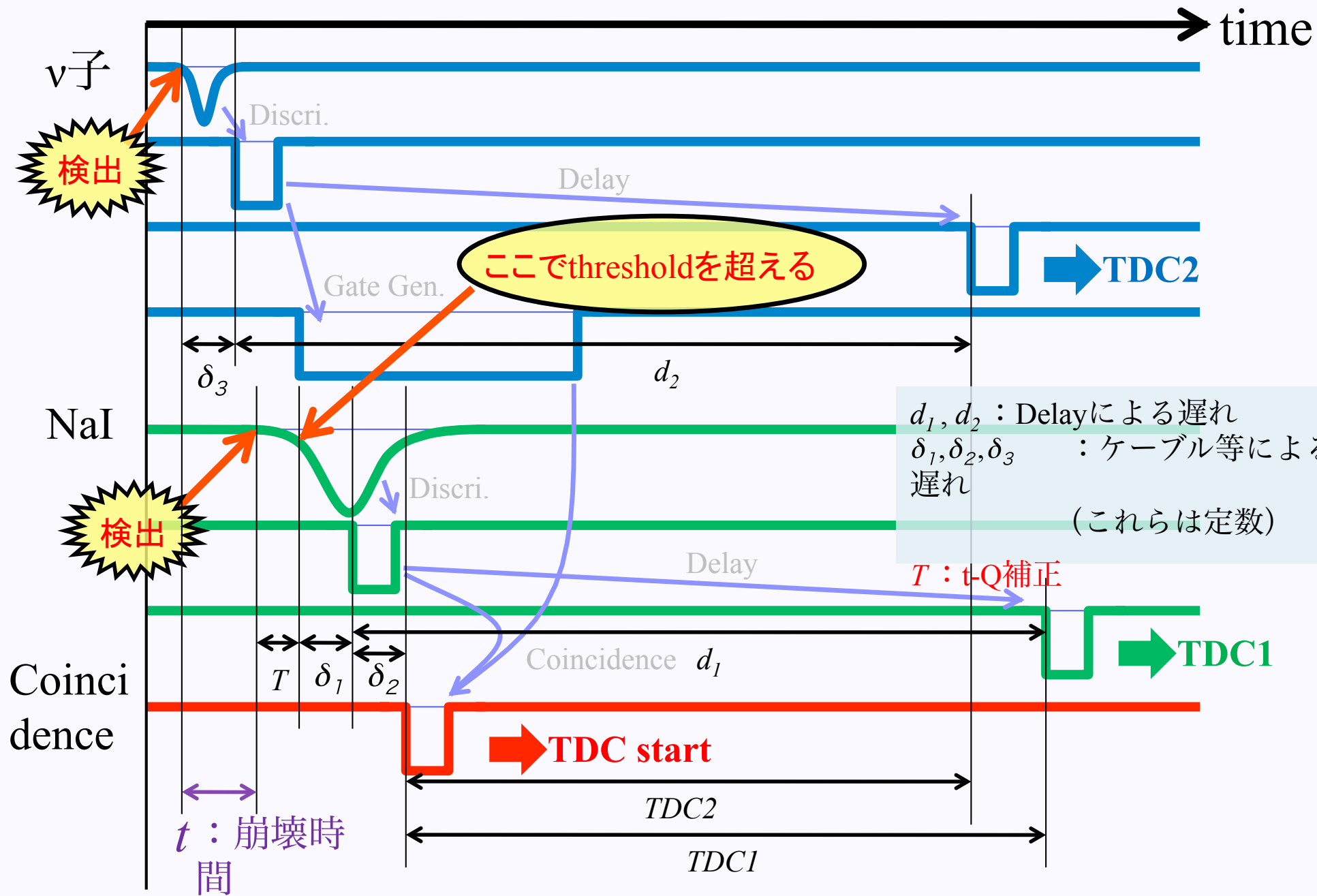


# 回路図









$$TDC1 = d_1 - \delta_2, TDC2 = d_2 + \delta_3 - t - T - \delta_1 - \delta_2$$

$$TDC1 = d_1 - \delta_2$$

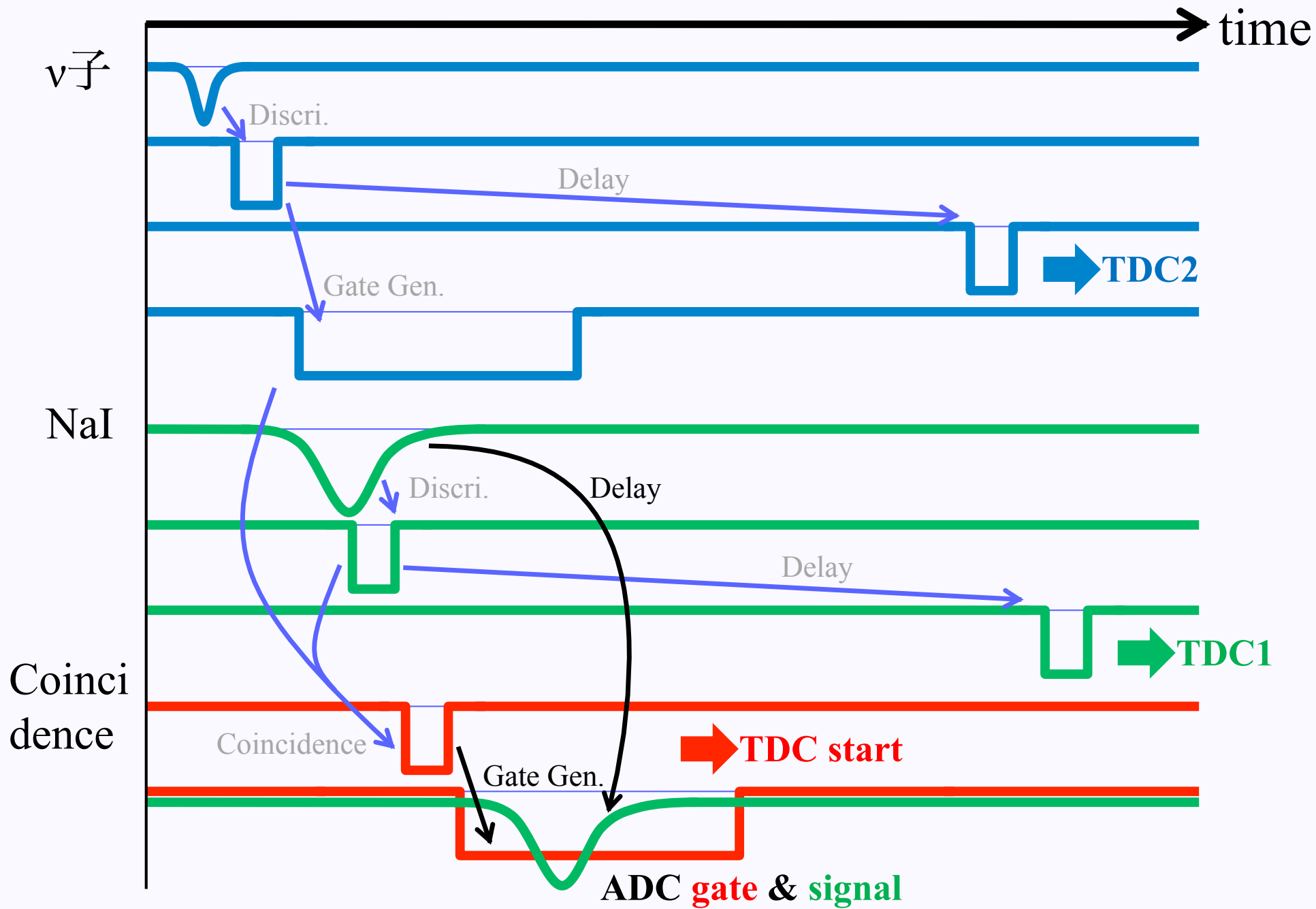
$$TDC2 = d_2 + \delta_3 - t - T - \delta_1 - \delta_2$$

$d_1, d_2$  : Delayによる遅れ  
 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  : ケーブル等による遅れ

(これらは定数)

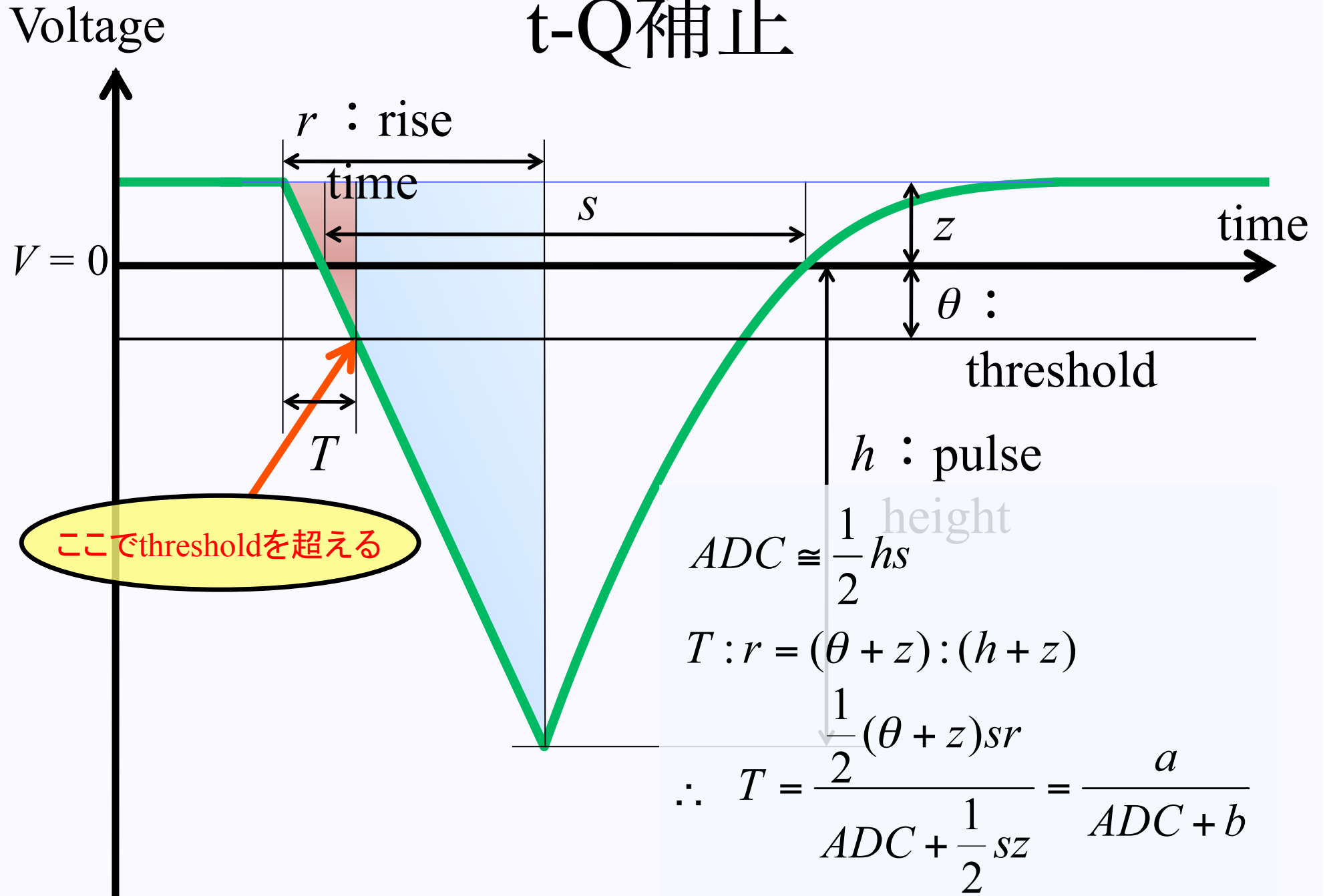
$T$  : t-Q補正

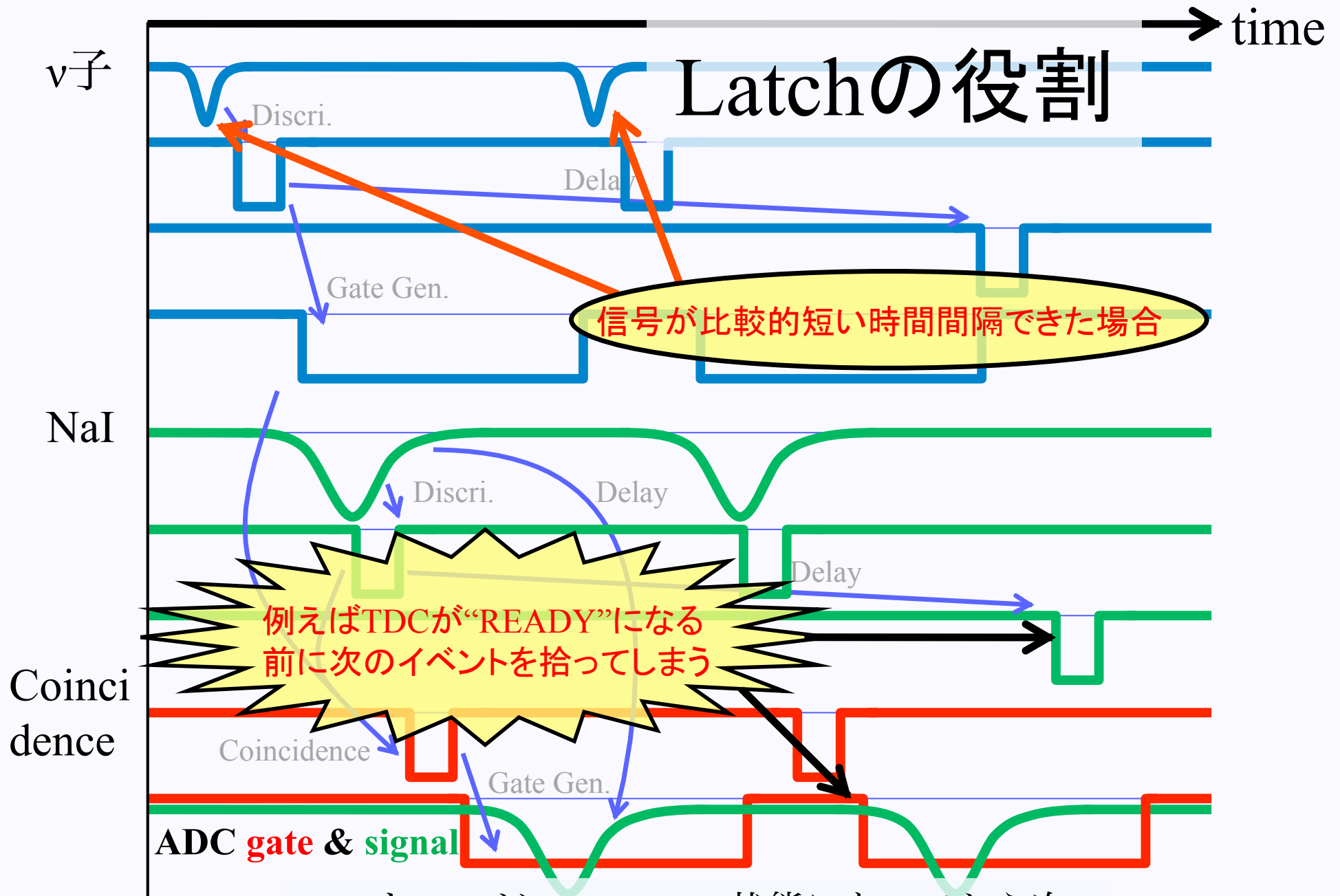
$$\begin{aligned} \therefore t &= TDC1 - TDC2 - T + (d_2 - d_1 + \delta_3 - \delta_1) \\ &= TDC1 - TDC2 - T + const. \end{aligned}$$



ADC gate & signal  
 Coincidenceの作るGateにNaIのsignalが入るようにDelayさせる

# t-Q補正

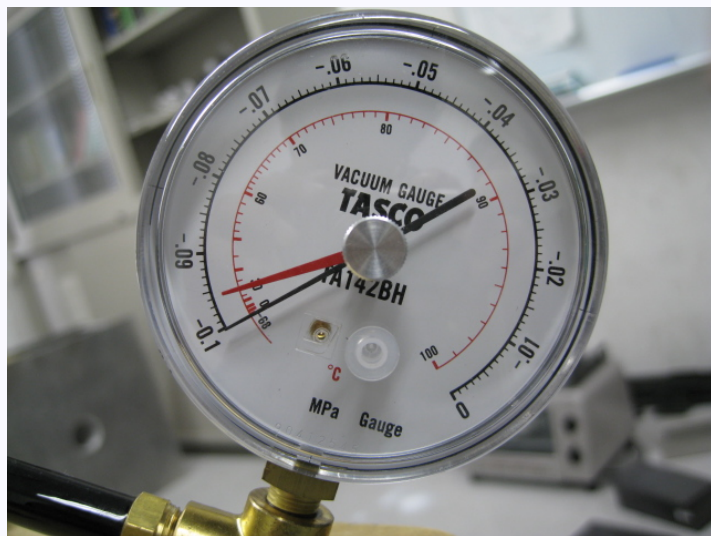




ADCとTDCが“READY”の状態になってから次のイベントを取り始めるようにLatchを使用する

# 3. 実験データ

# 気圧



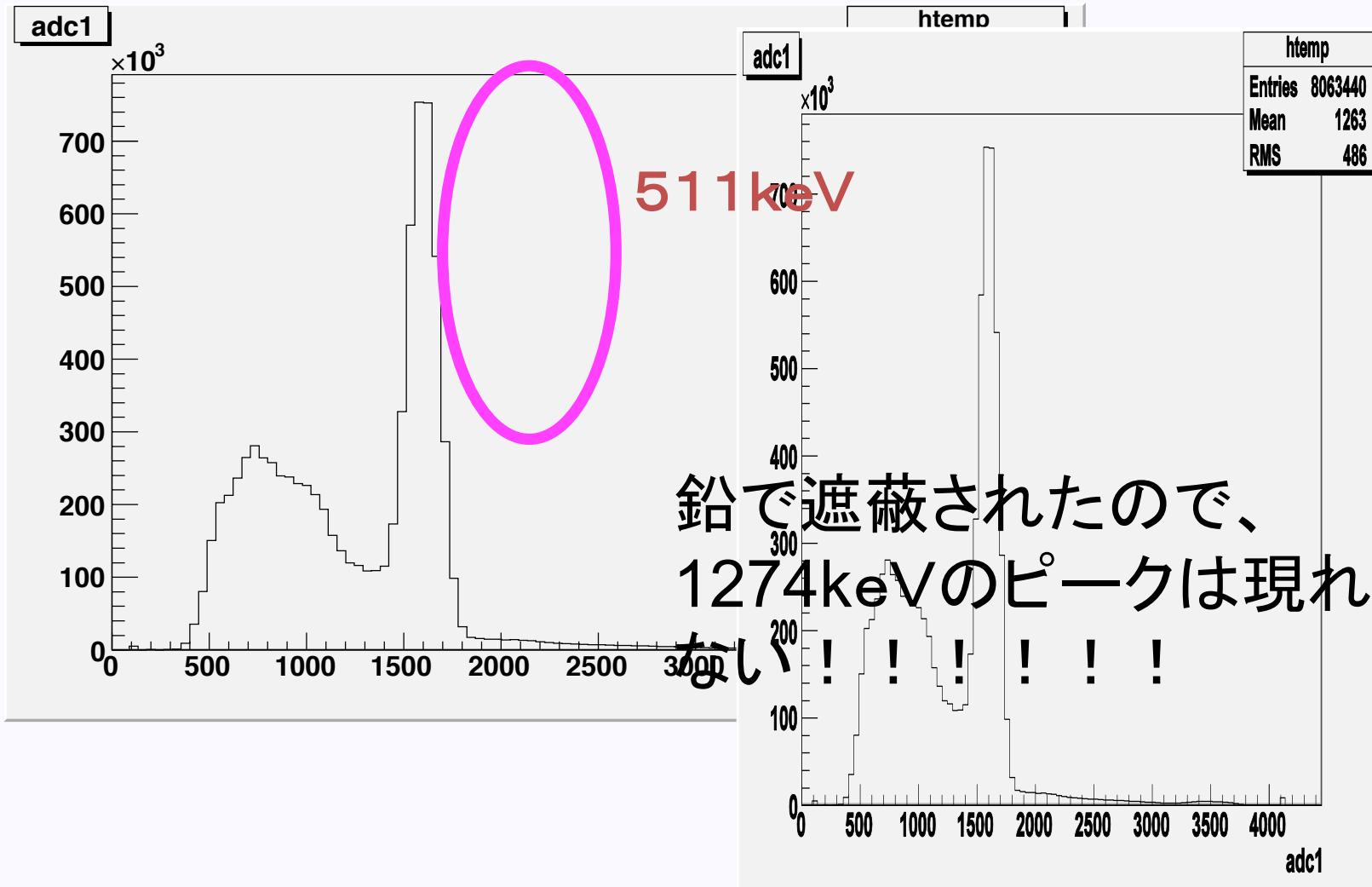
実験開始直後

-0.1MPa

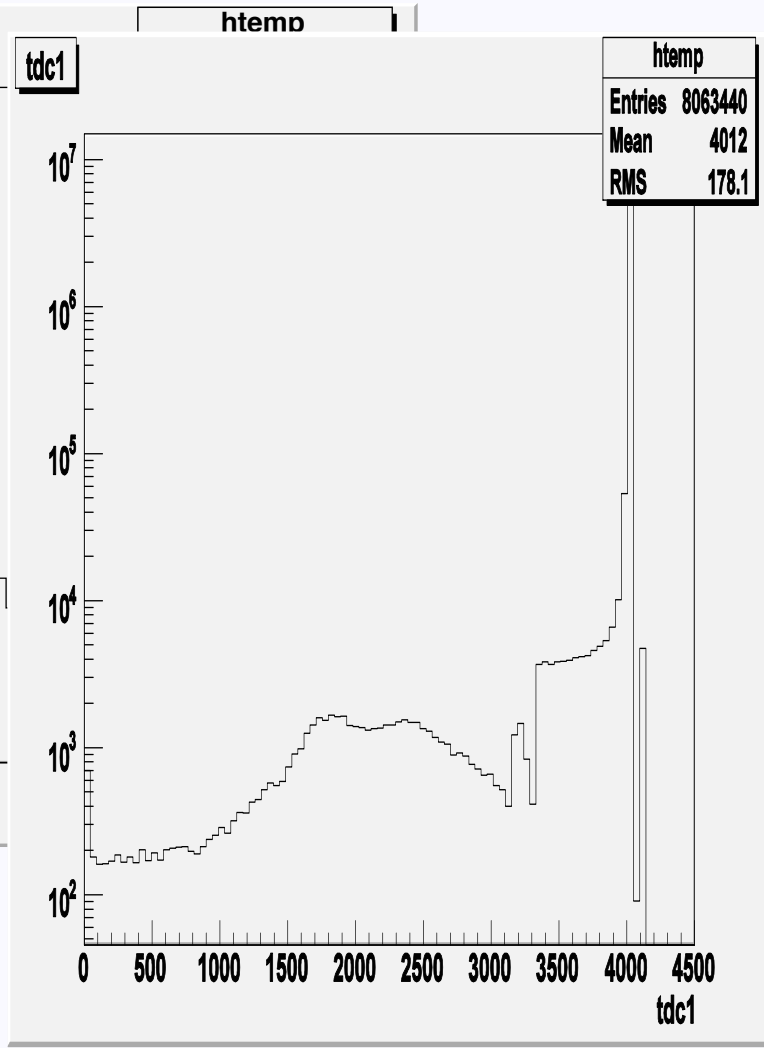
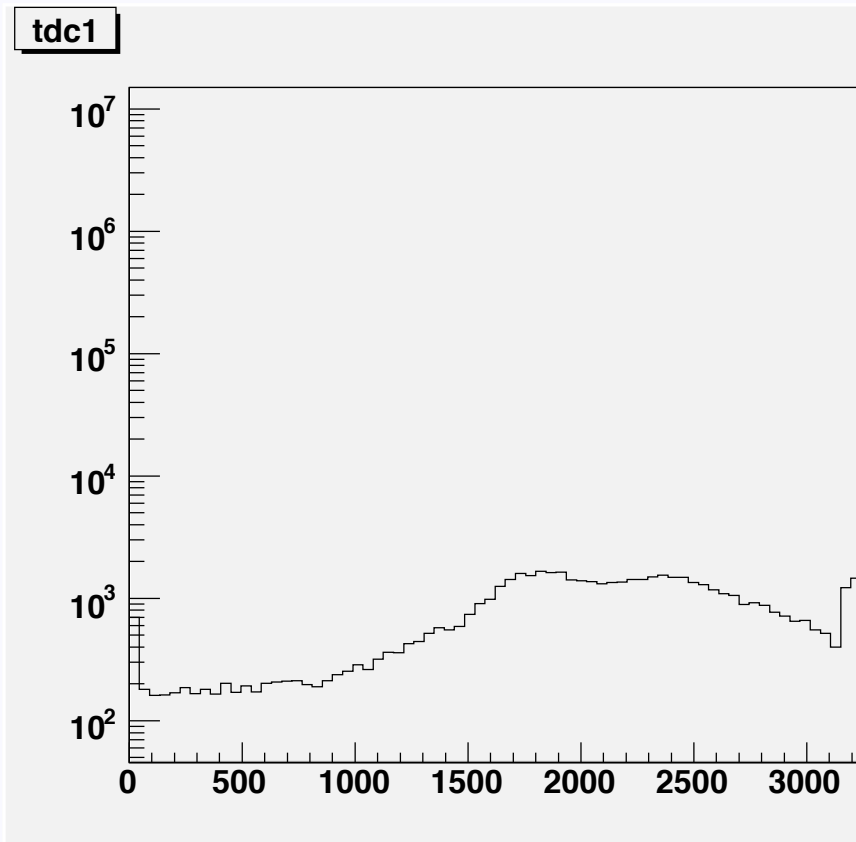


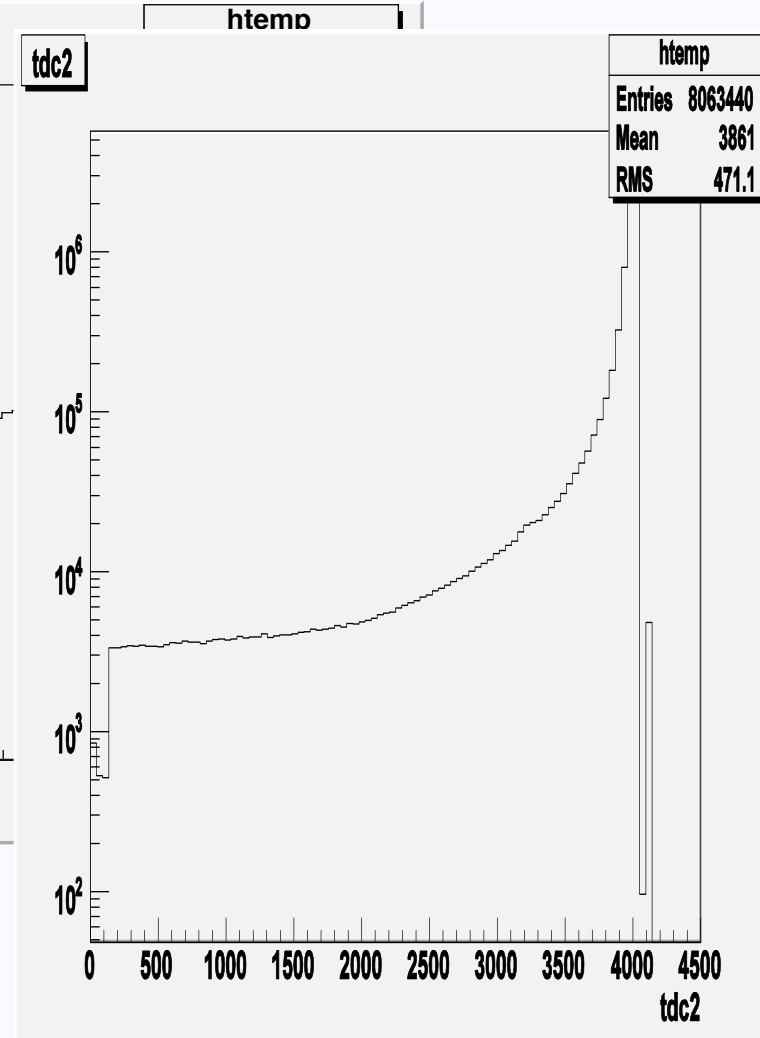
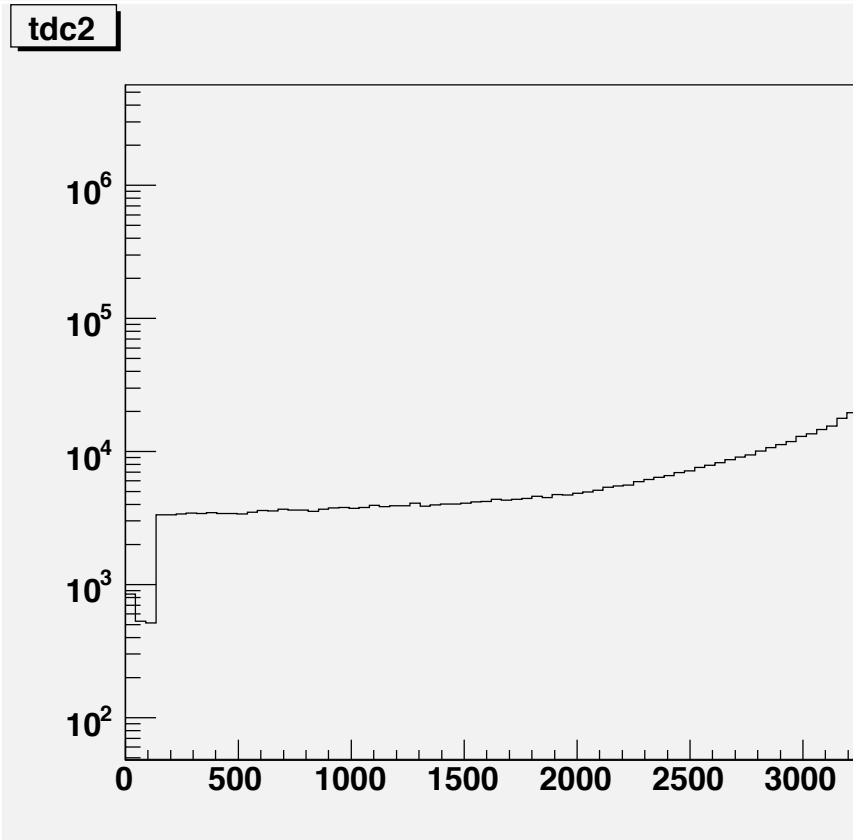
実験終了間際

-0.1MPa



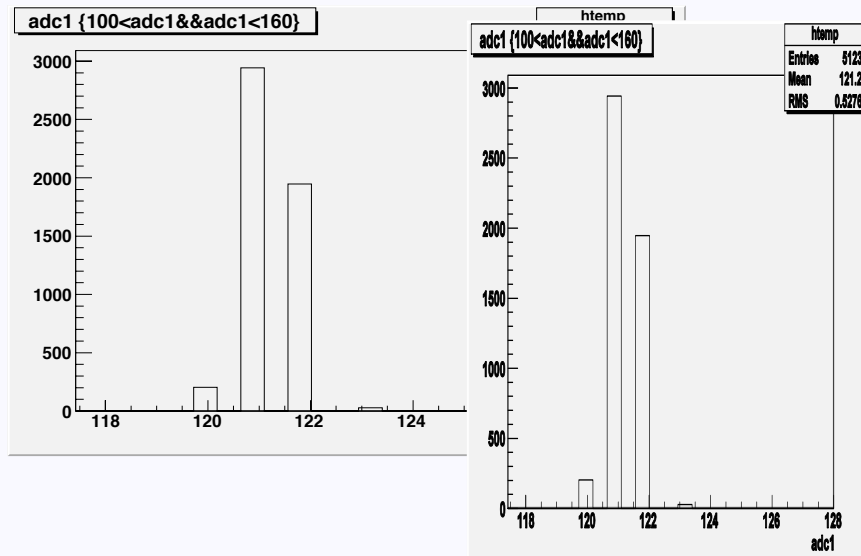
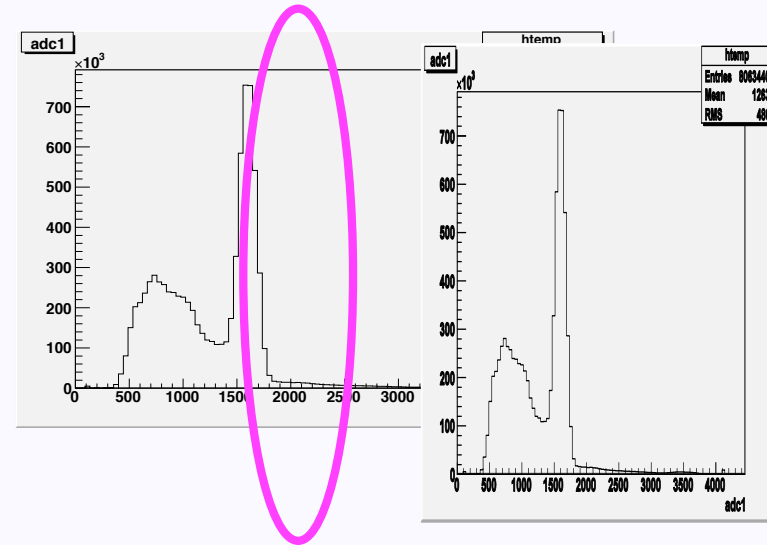






# ADCキャリブレーションの方法

本実験のデータを使ってキャリブレーションを施した。  
511keVは、ADC=1400~1800でfitting。さらに、ADC=121付近に小さなピークがあるのでその周辺120から123でpedestalをfittingした。



# ADCキャリブレーション

- $\text{energy}[\text{keV}] = p(\text{ADC}) + q$

	p	q
NaI	0. 3469	-42. 1

# TDCキャリブレーションの方法

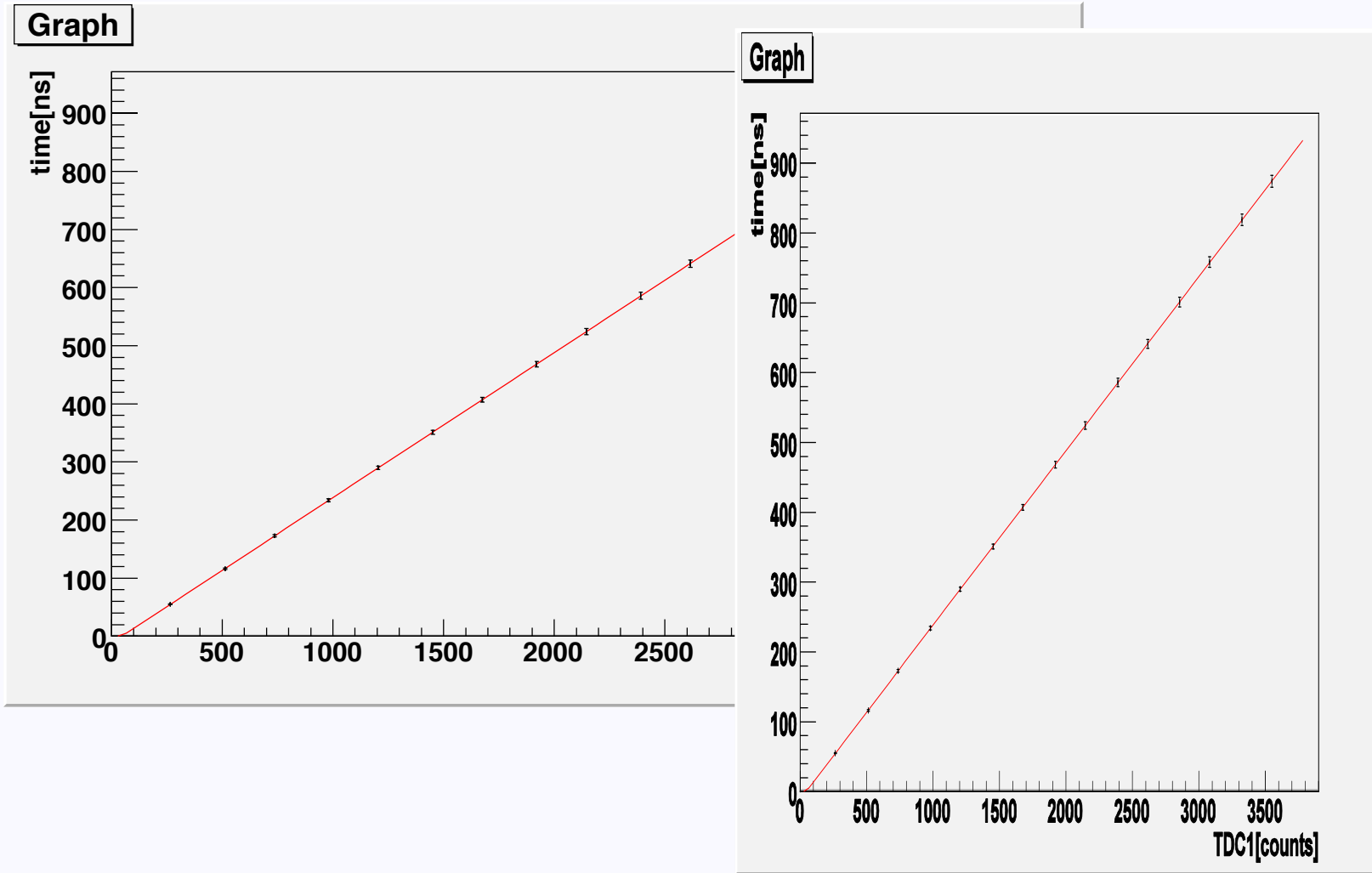
- クロック信号の一方をTDC start、他方を一定の間隔でdelayさせたあと各channelに入れて測定した。各delayの間隔はオシロスコープで計4人がdelay時間を計測し各自の4つの値の平均をとったものを採用した。

# TDCキャリブレーション

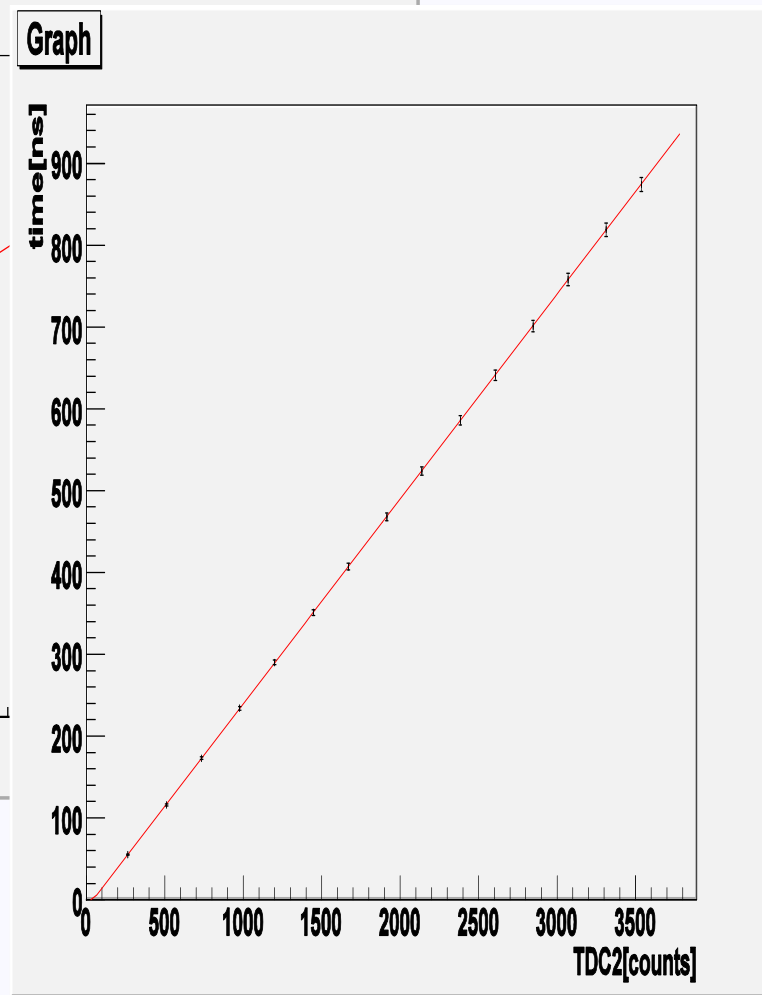
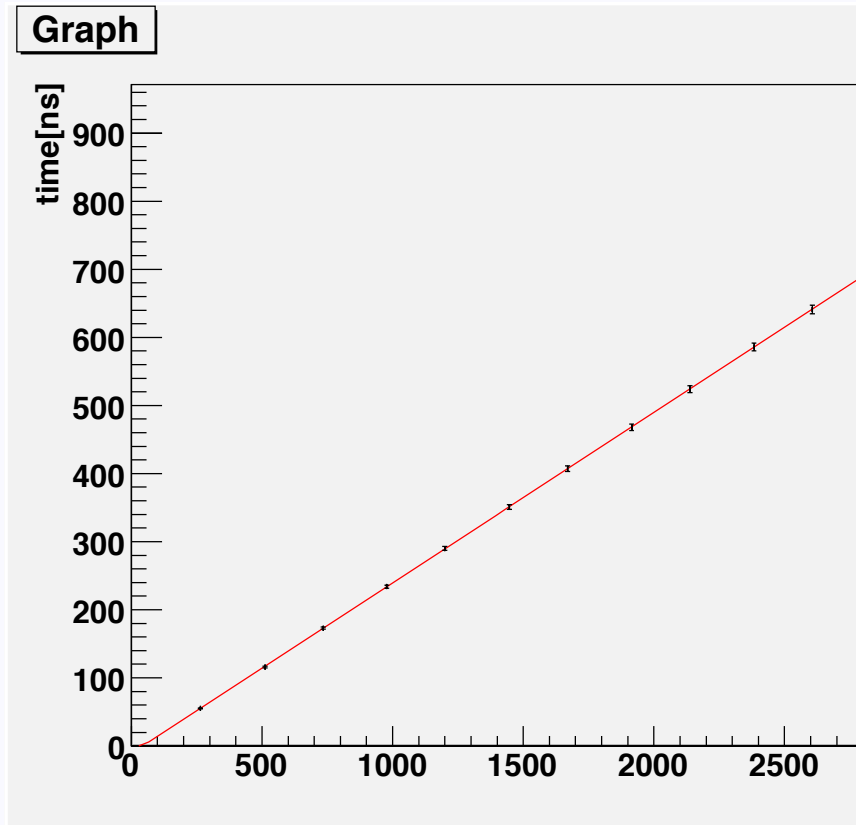
TDC1 [count]	264.8	513.5	736.9	980.7	1204.3	1451.7	1674.8
TDC2 [count]	264.0	511.8	734.3	977.6	1200.0	1447.2	1669.5
時間間隔 [ns]	55	116	173	234	290	351	407

1920.9	2144.9	2391.1	2614.9	2856.0	3080.0	3324.5	3548.6
1914.7	2137.8	2383.3	2606.3	2846.6	3070.0	3313.1	3536.6
468	524	586	641	701	758	819	874

# TDC1 キャリブレーション



# TDC2キャリブレーション



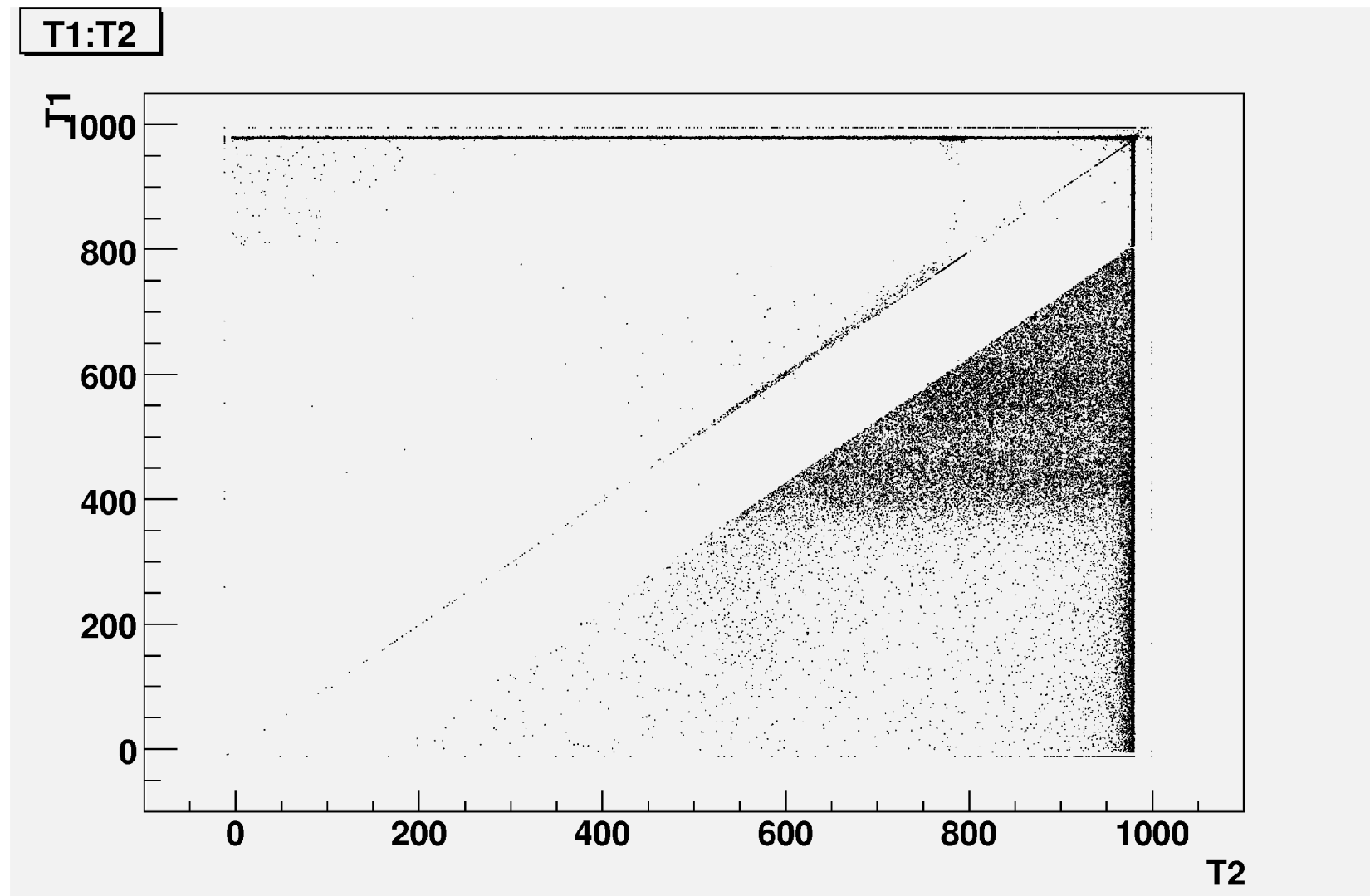


# TDCキャリブレーション

$$y[\text{ns}] = ax[\text{counts}] + b$$

	<b>a</b>	<b>b</b>
<b>TDC1</b>	<b>0. 249</b>	<b>-11. 1</b>
<b>TDC2</b>	<b>0. 250</b>	<b>-11. 1</b>

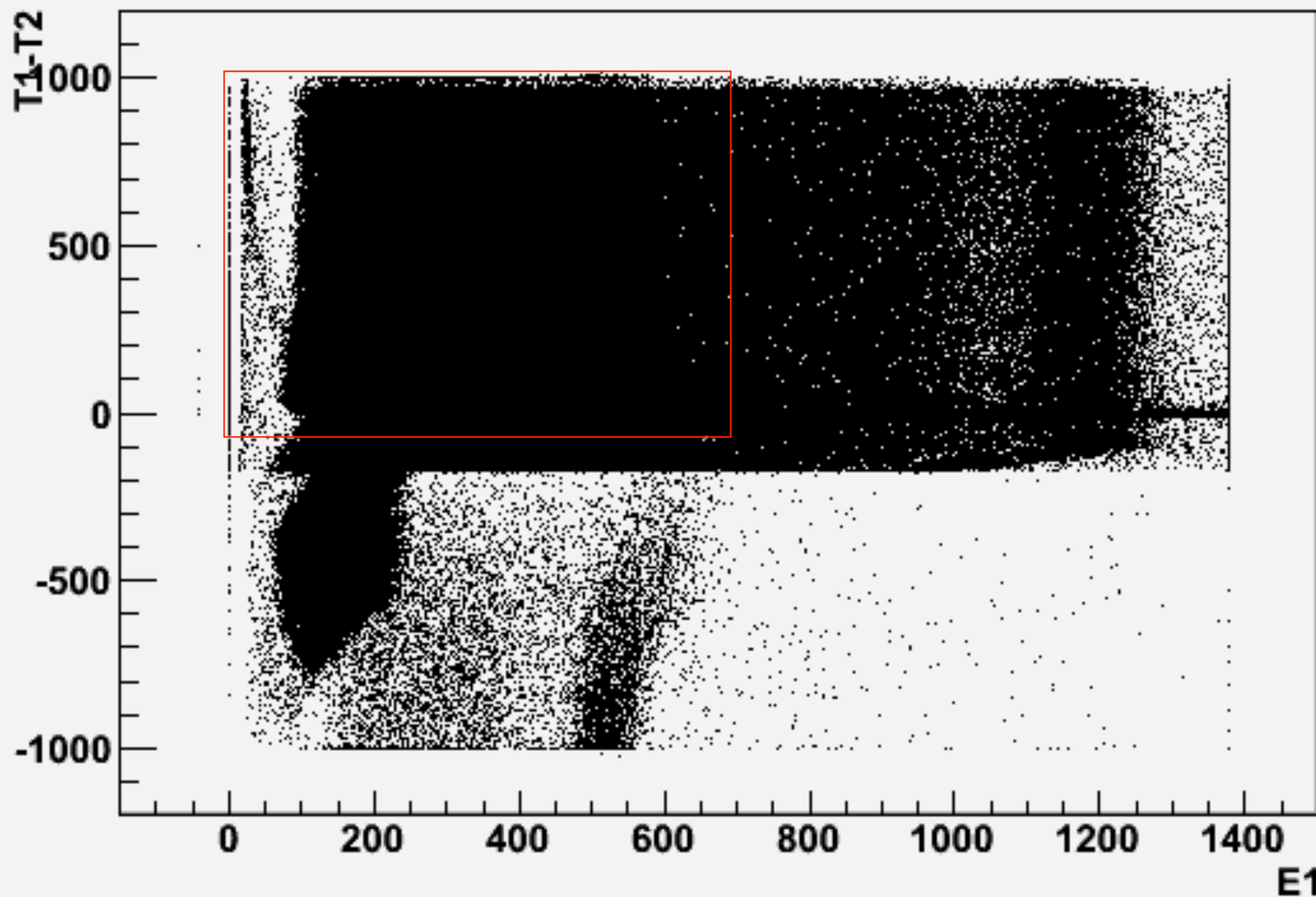
# T1とT2の相関



# 4. 解析

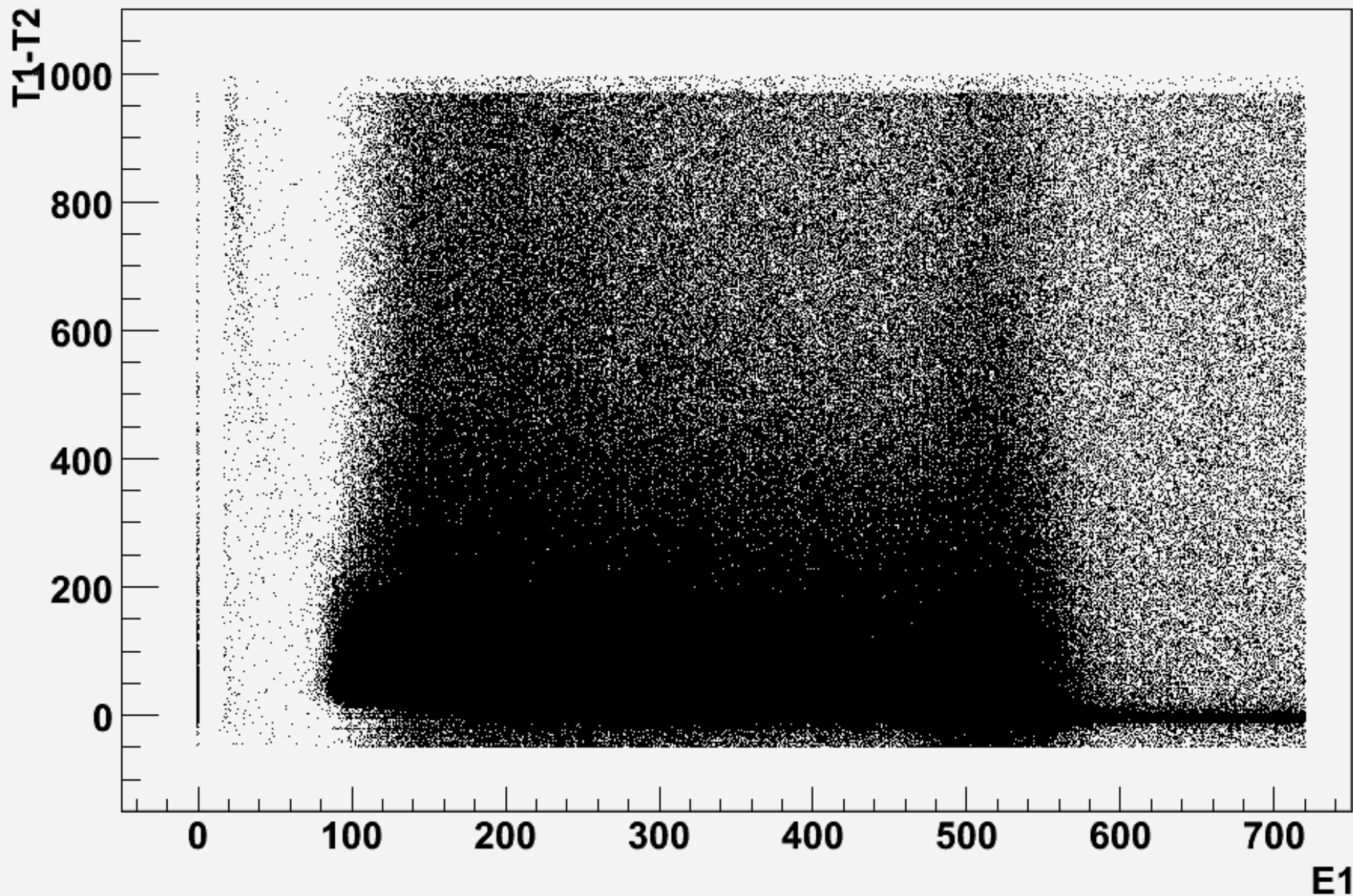
# エネルギー：時間

T1-T2:E1



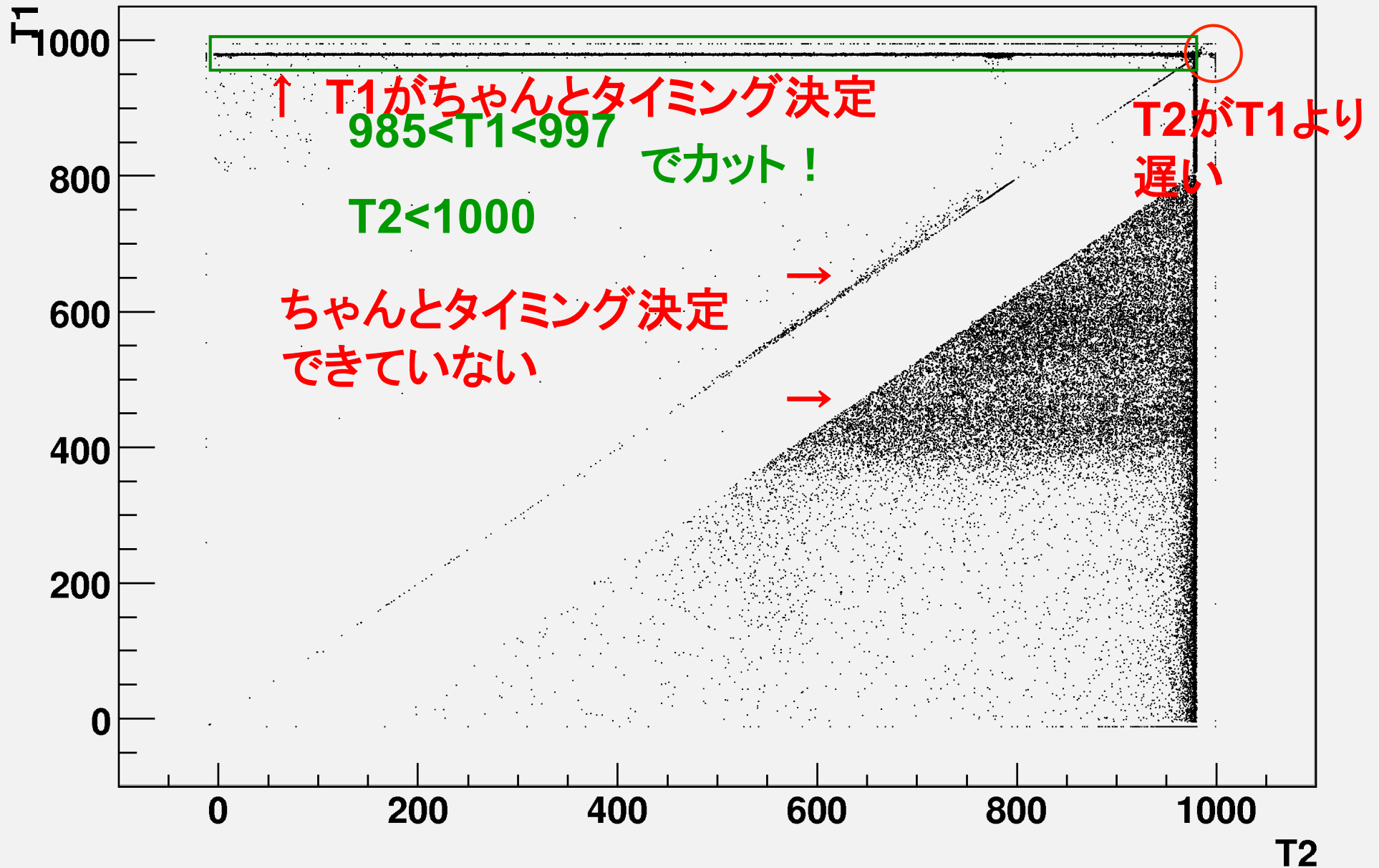
# エネルギー：時間

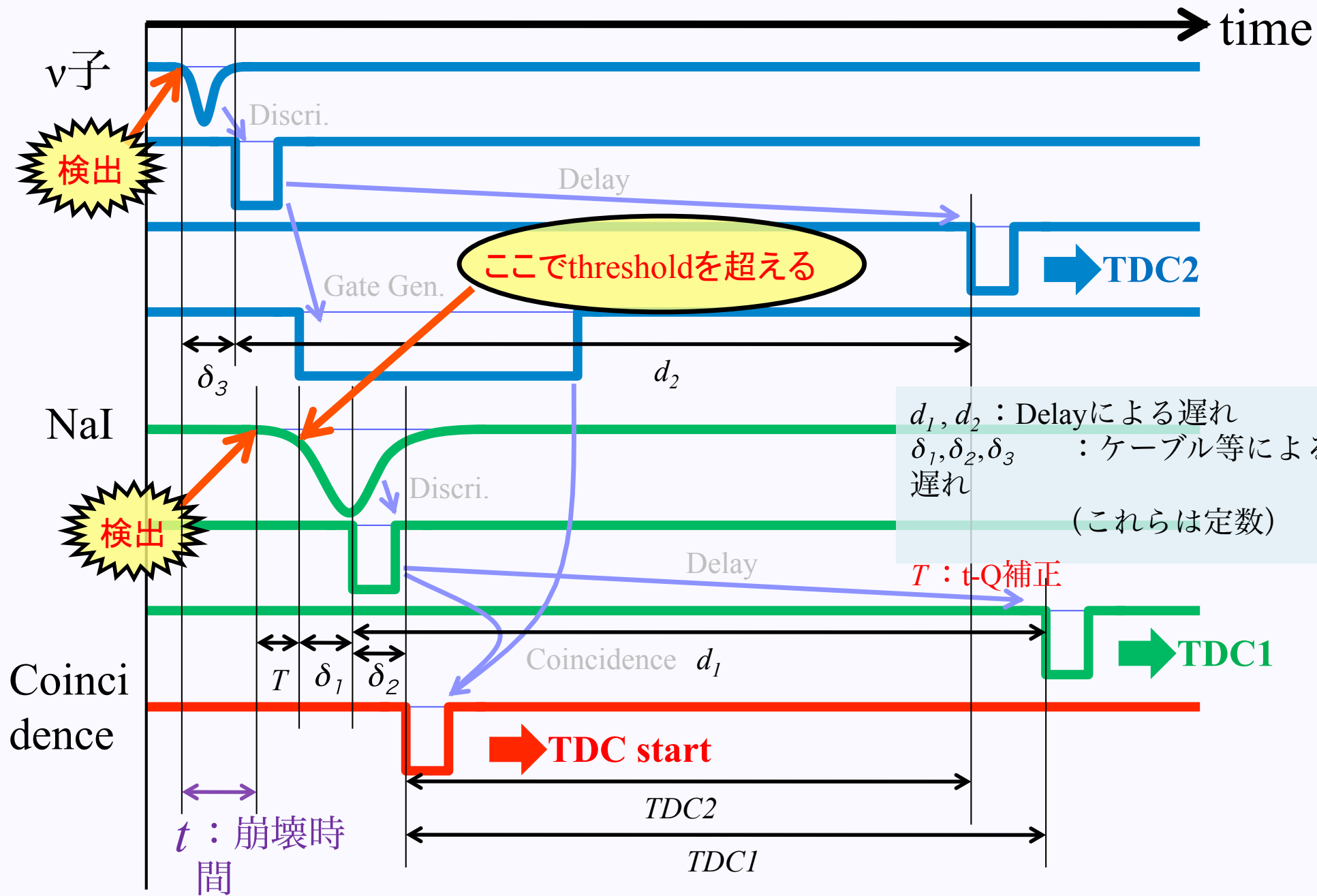
T1-T2:E1 {T1-T2>-50&&T1-T2<1000&&E1>-20&&E1<720}



# カット①

T1:T2

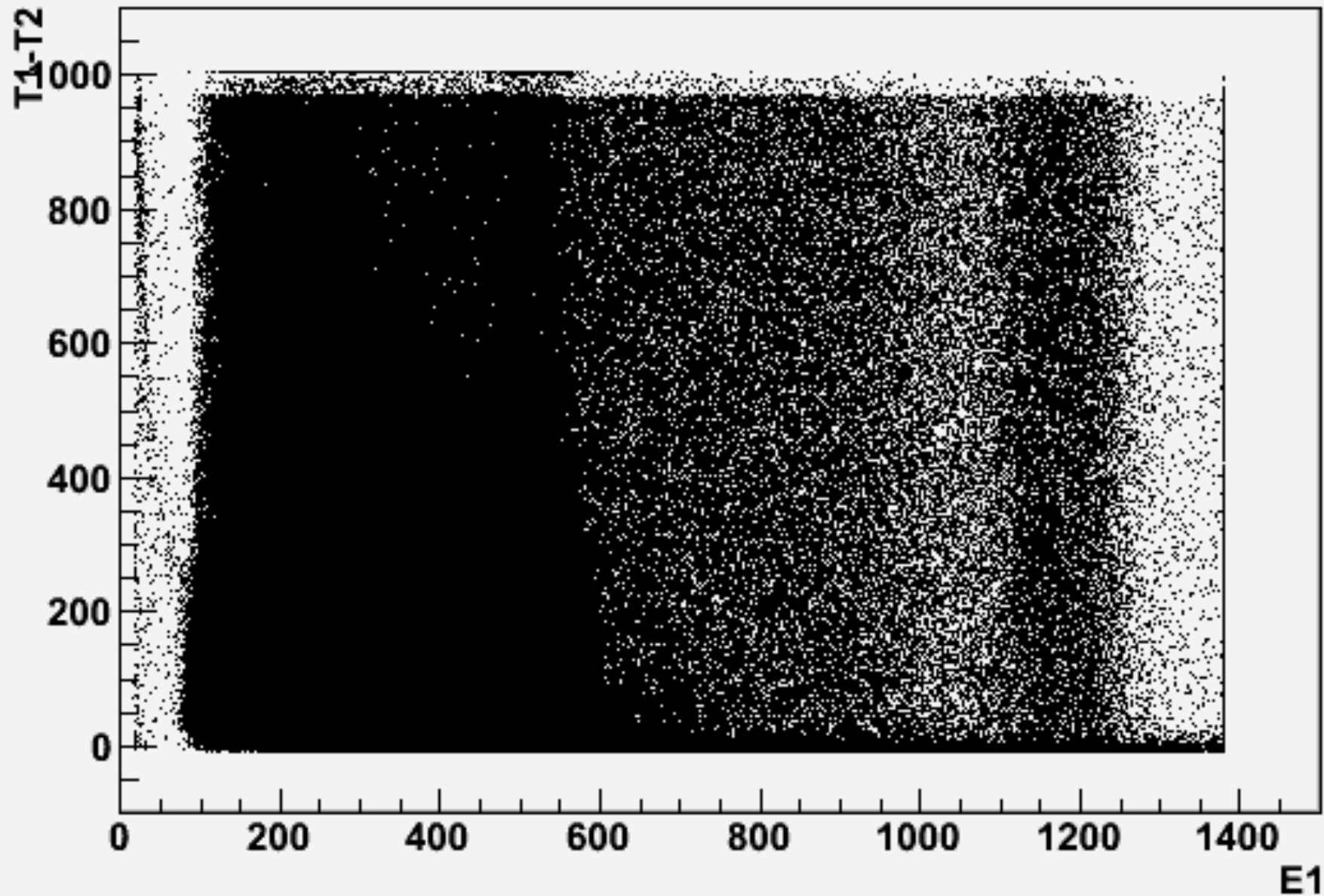




$$TDC1 = d_1 - \delta_2, TDC2 = d_2 + \delta_3 - t - T - \delta_1 - \delta_2$$

# カット①後

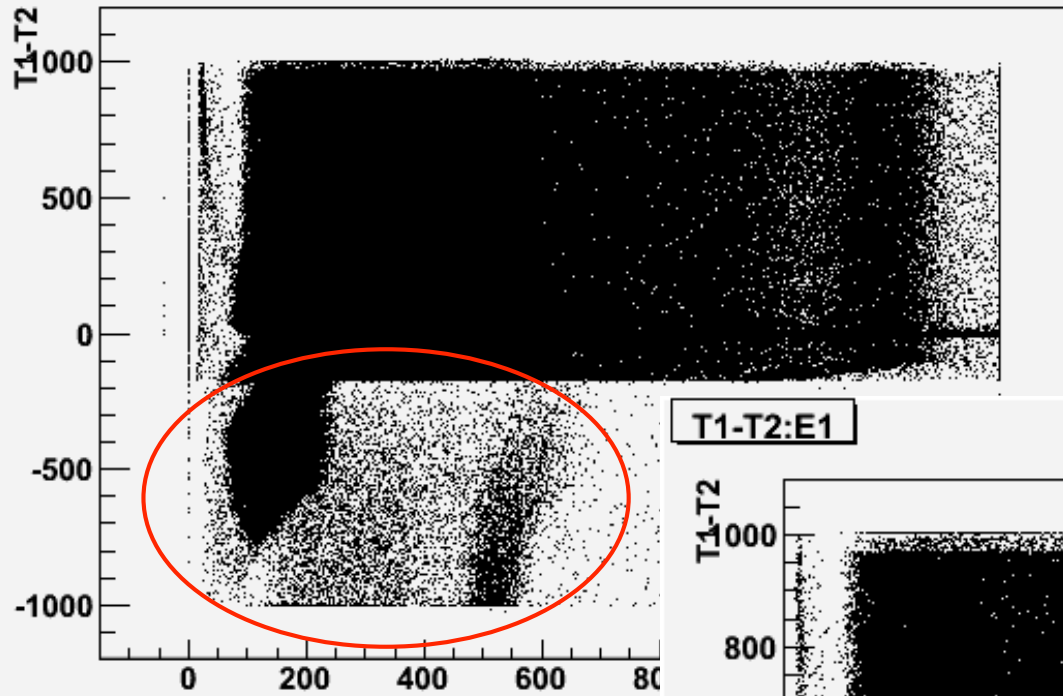
T1-T2:E1



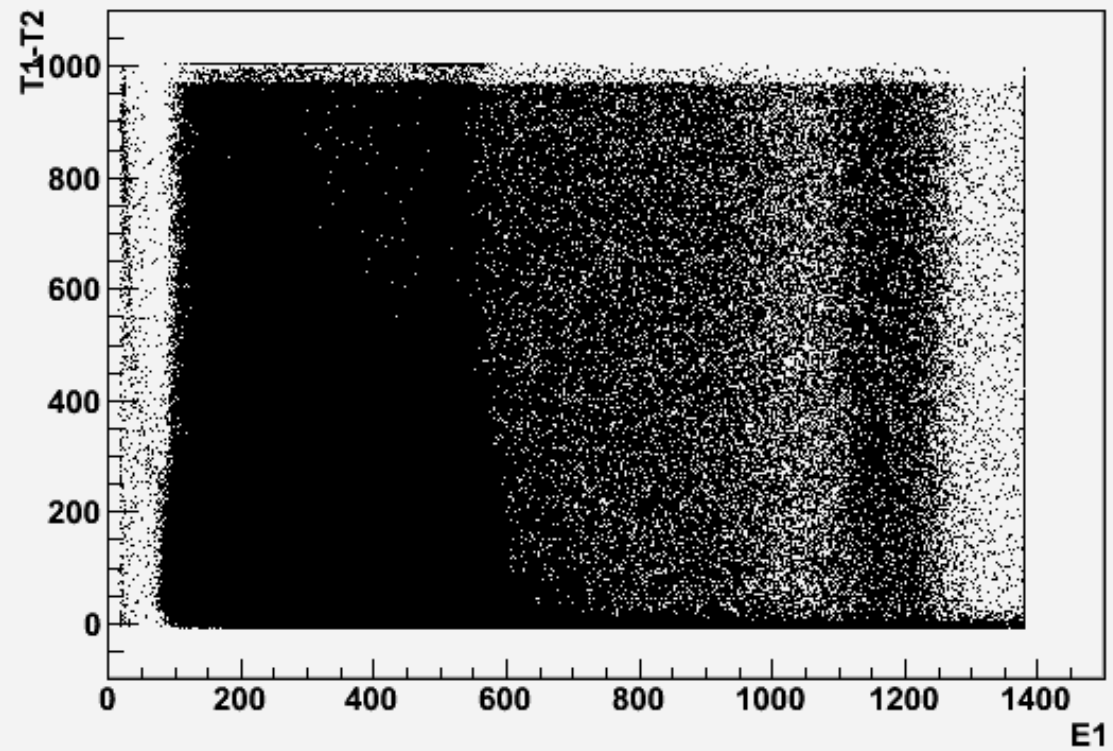


# カット①後

T1-T2:E1

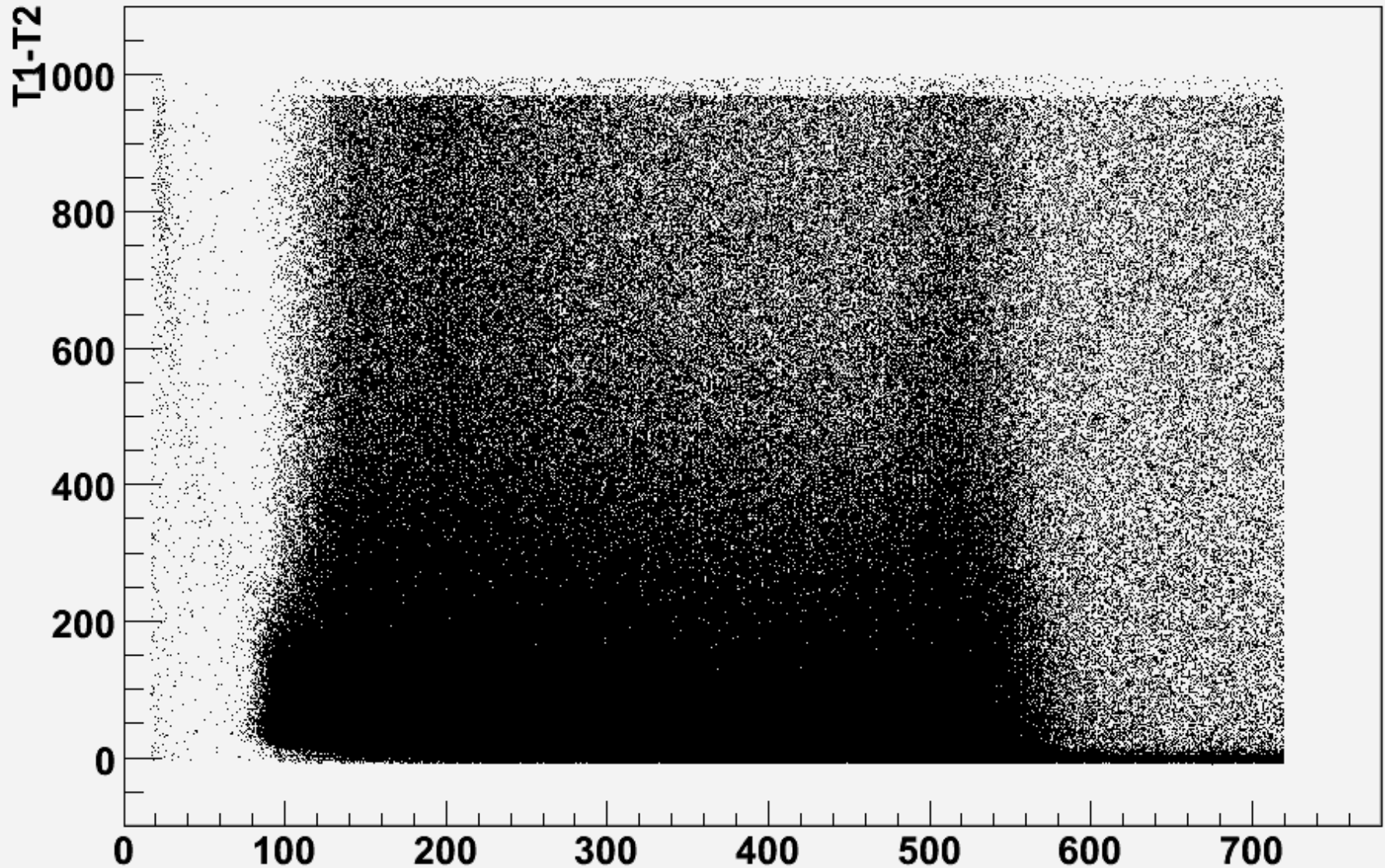


T1-T2:E1



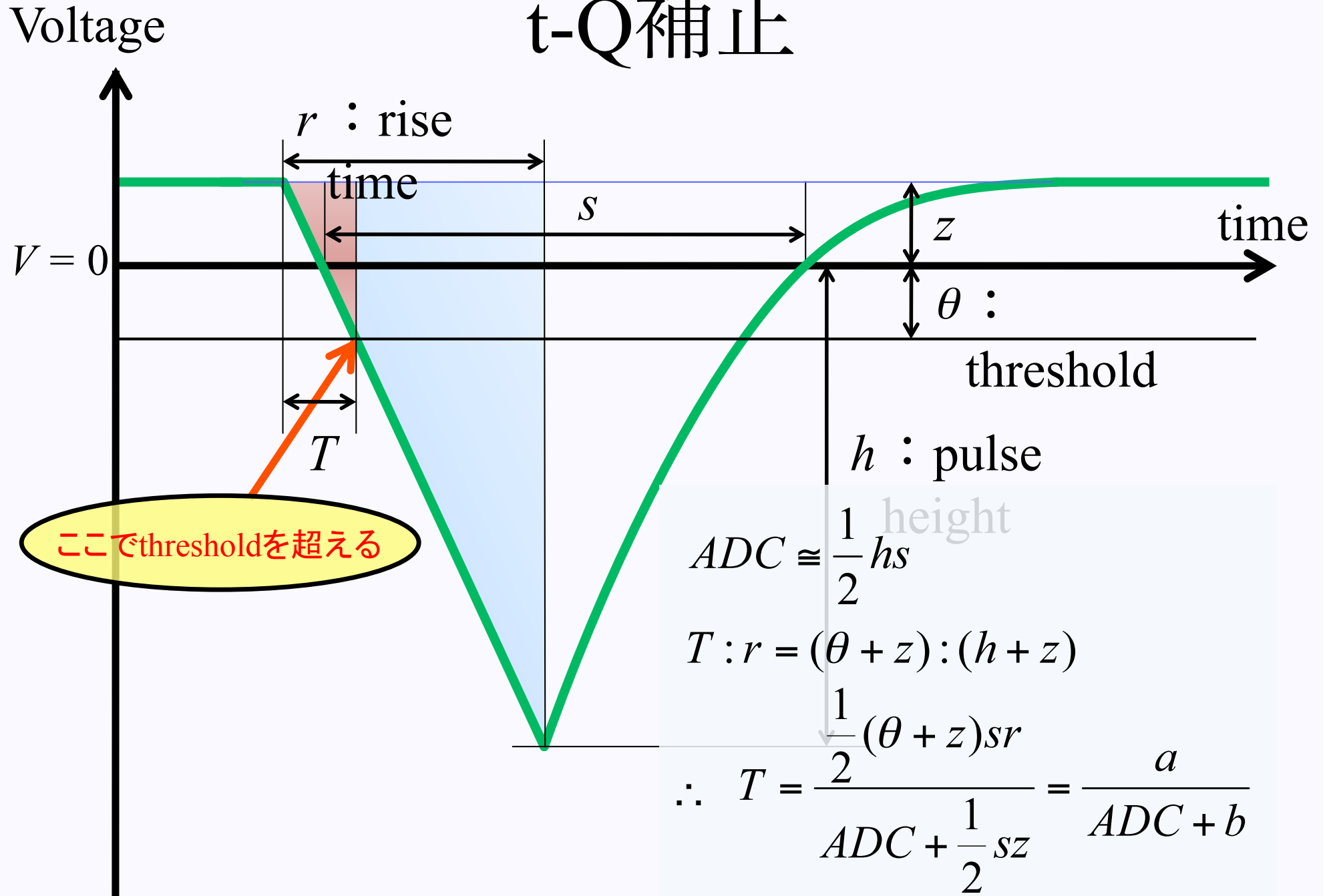
# カット①後

T1-T2:E1 {T1-T2>-50&&T1-T2<1000&&E1>-20&&E1<720}



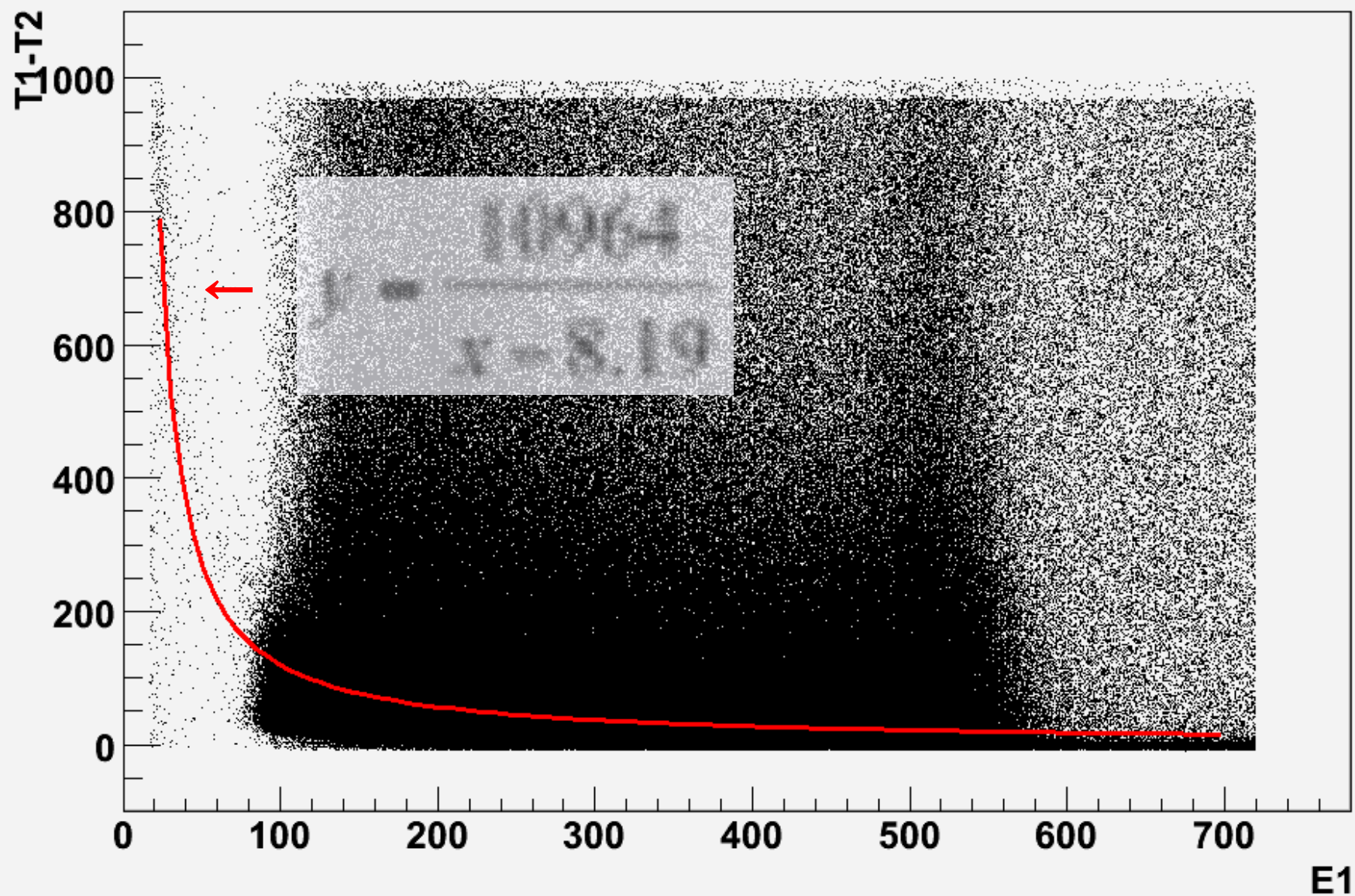
E1

# t-Q補正



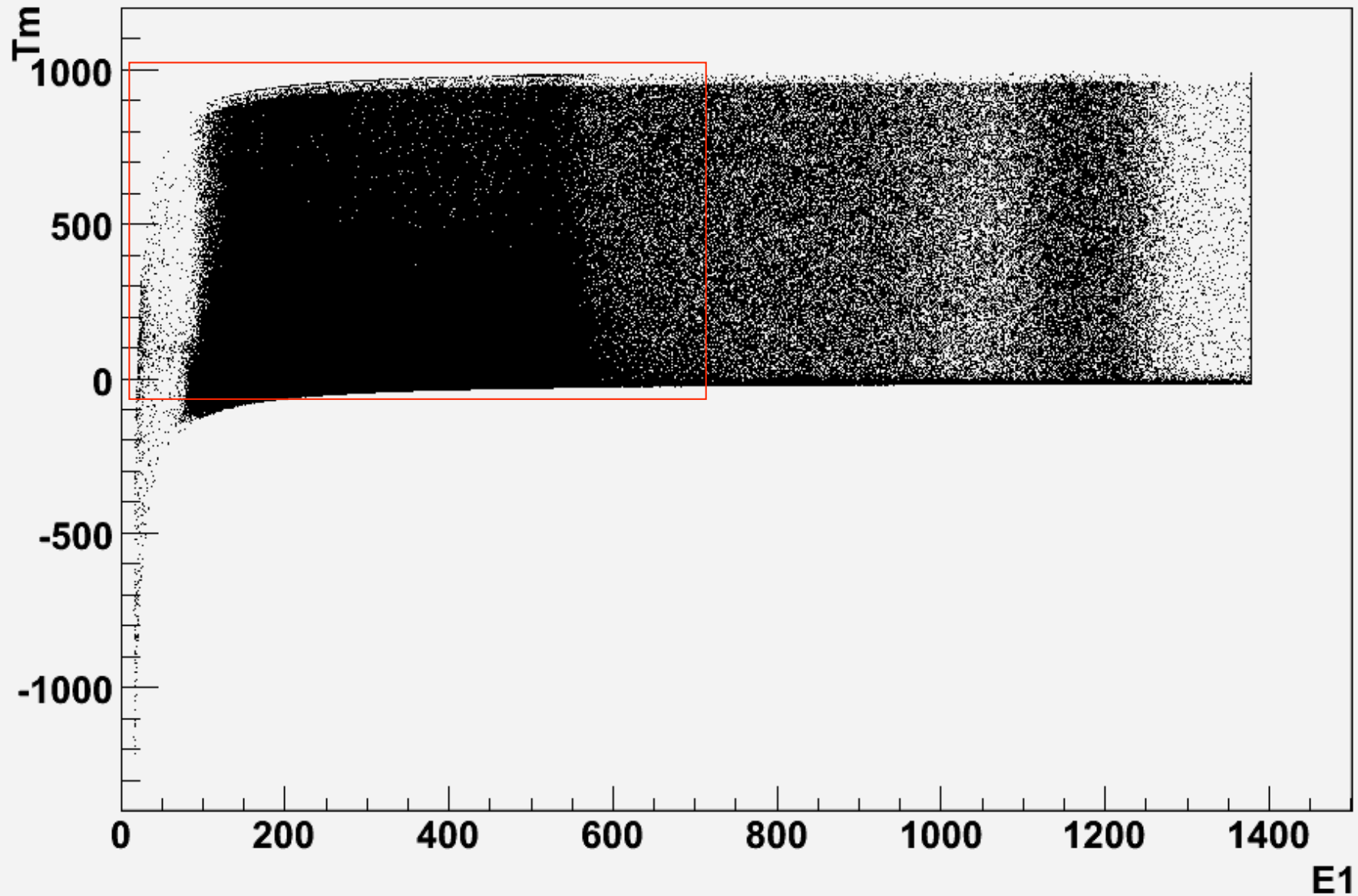
# t-Q補正

T1-T2:E1 {T1-T2>-50&&T1-T2<1000&&E1>-20&&E1<720}



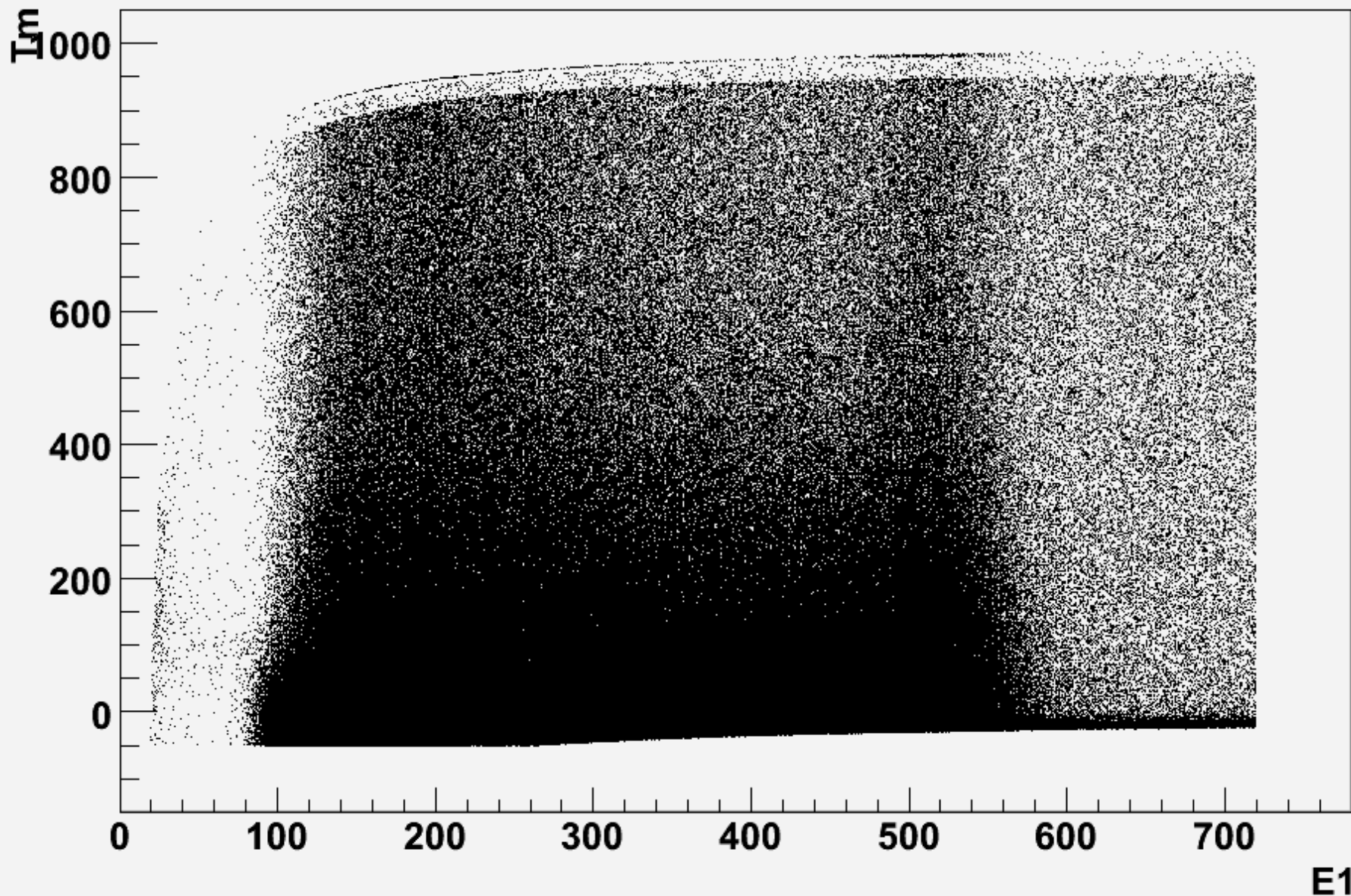
# t-Q補正後

Tm:E1



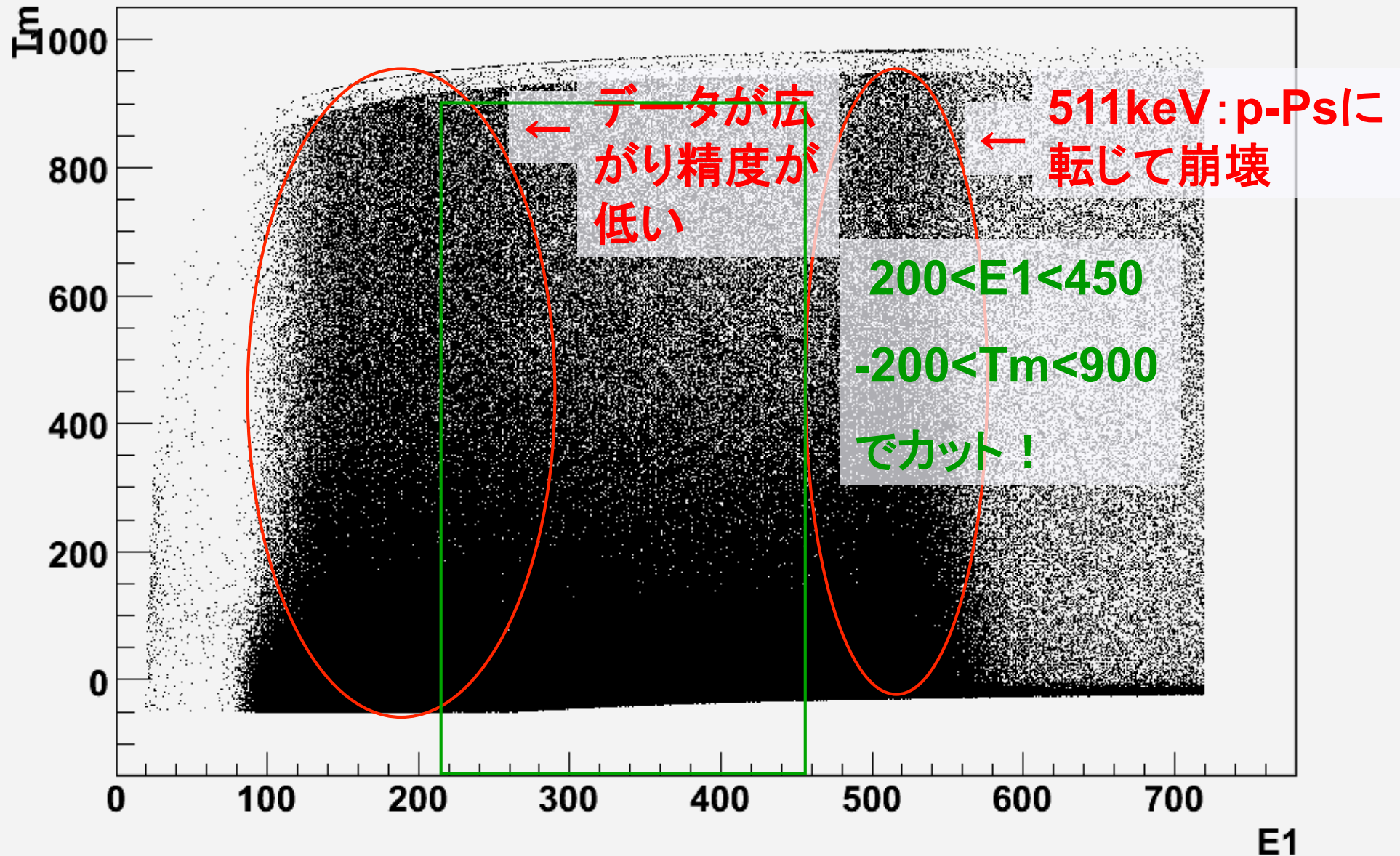
# t-Q補正後

Tm:E1 {Tm>-50&&Tm<1000&&E1>-20&&E1<720}



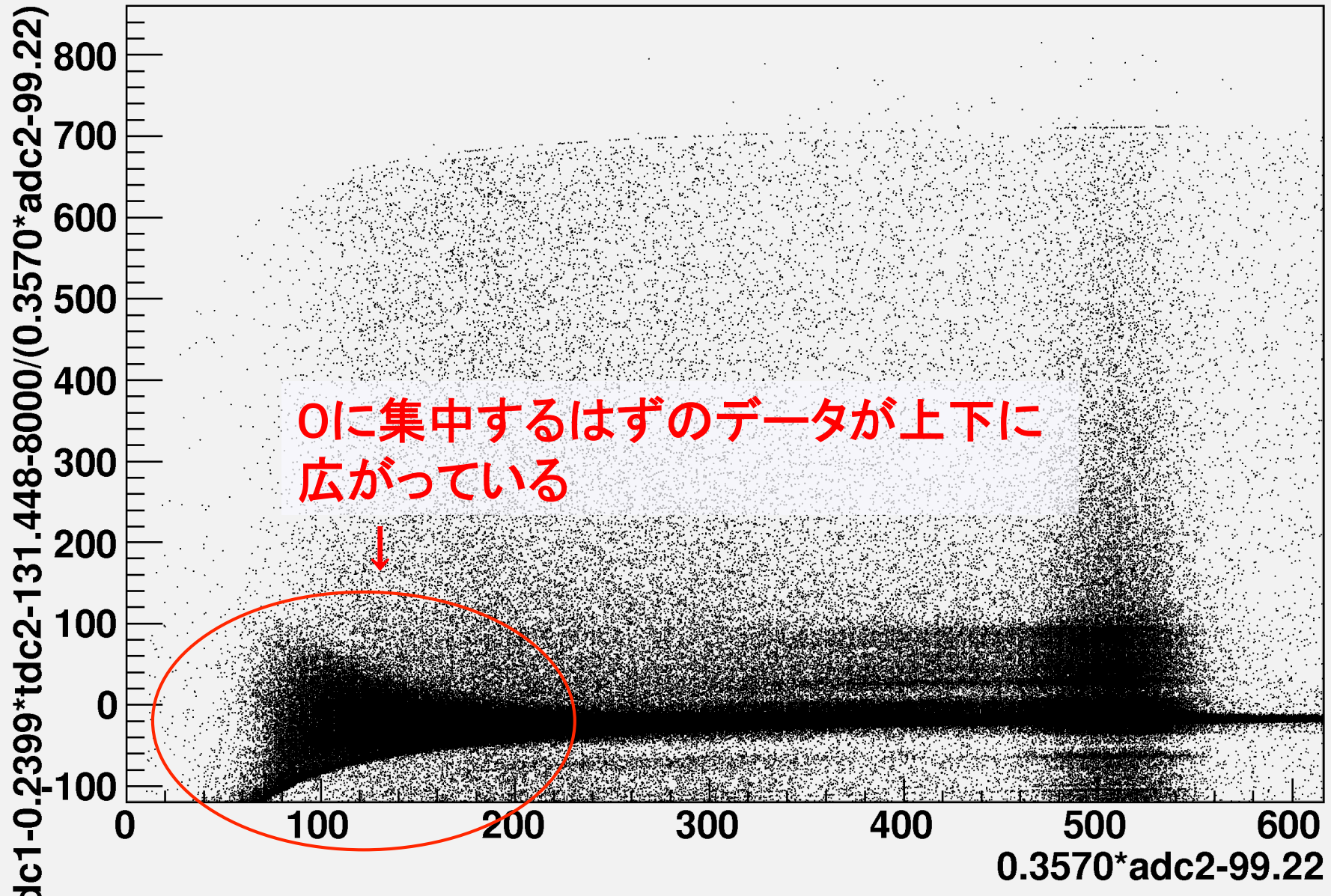
# カット②

$T_m: E1 \{ T_m > -50 \&\& T_m < 1000 \&\& E1 > -20 \&\& E1 < 720 \}$



# データが広がり・・・??

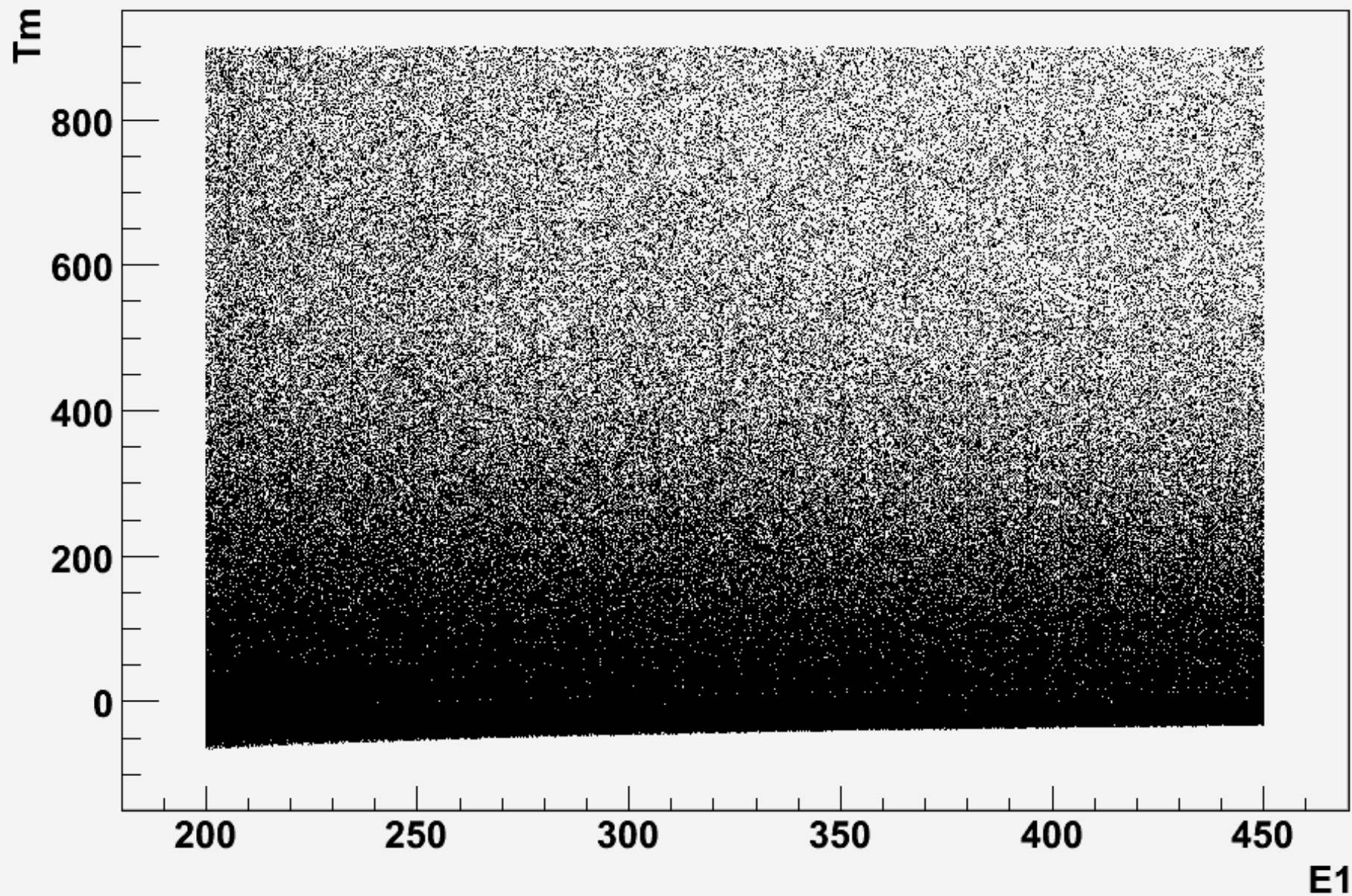
$0.2398*tdc1-0.2399*tdc2-131.448-8000/(0.3570*adc2-99.22):0.3570*adc2-99.22 \{0.3570*adc2-99.22>10\}$



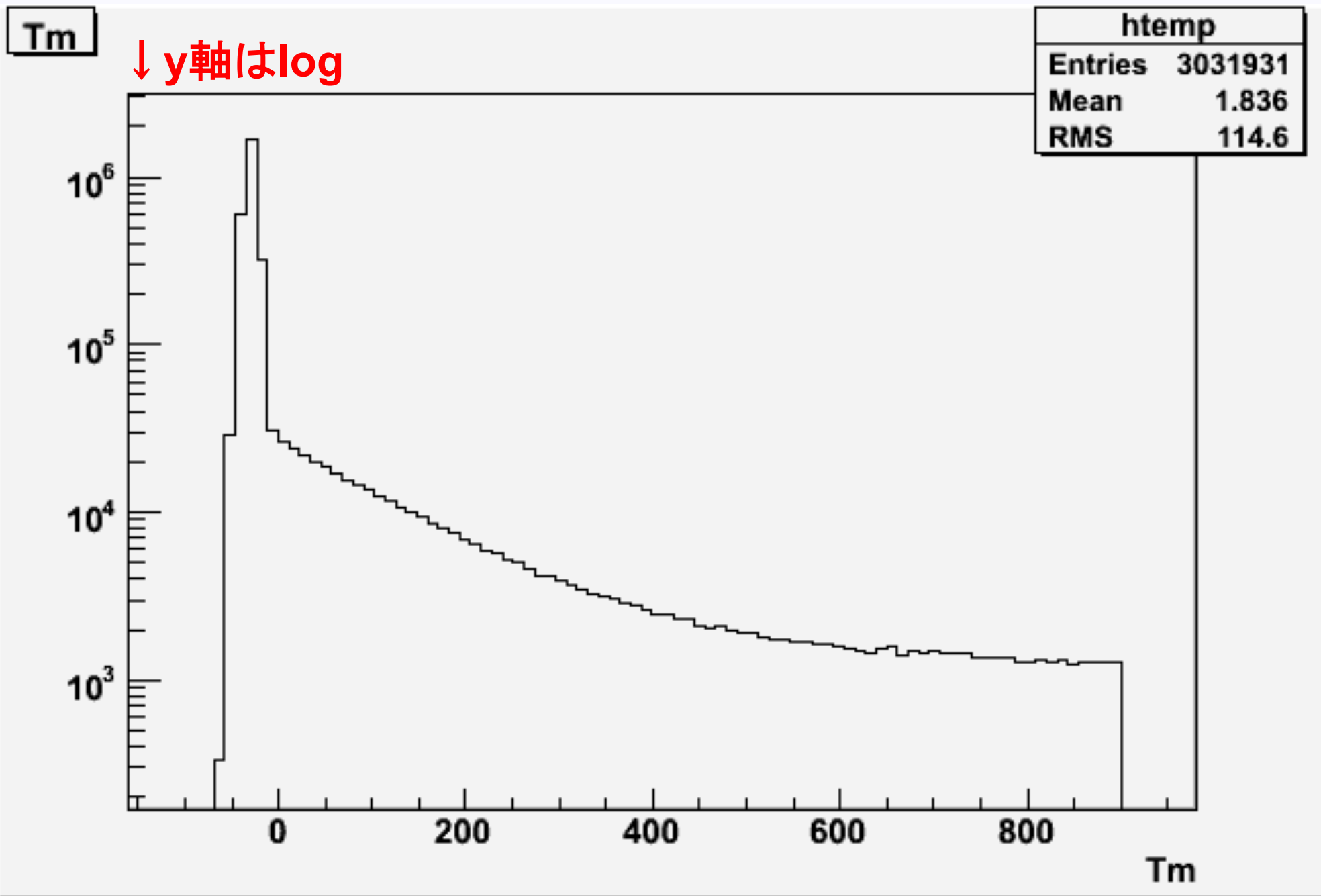


# カット②後

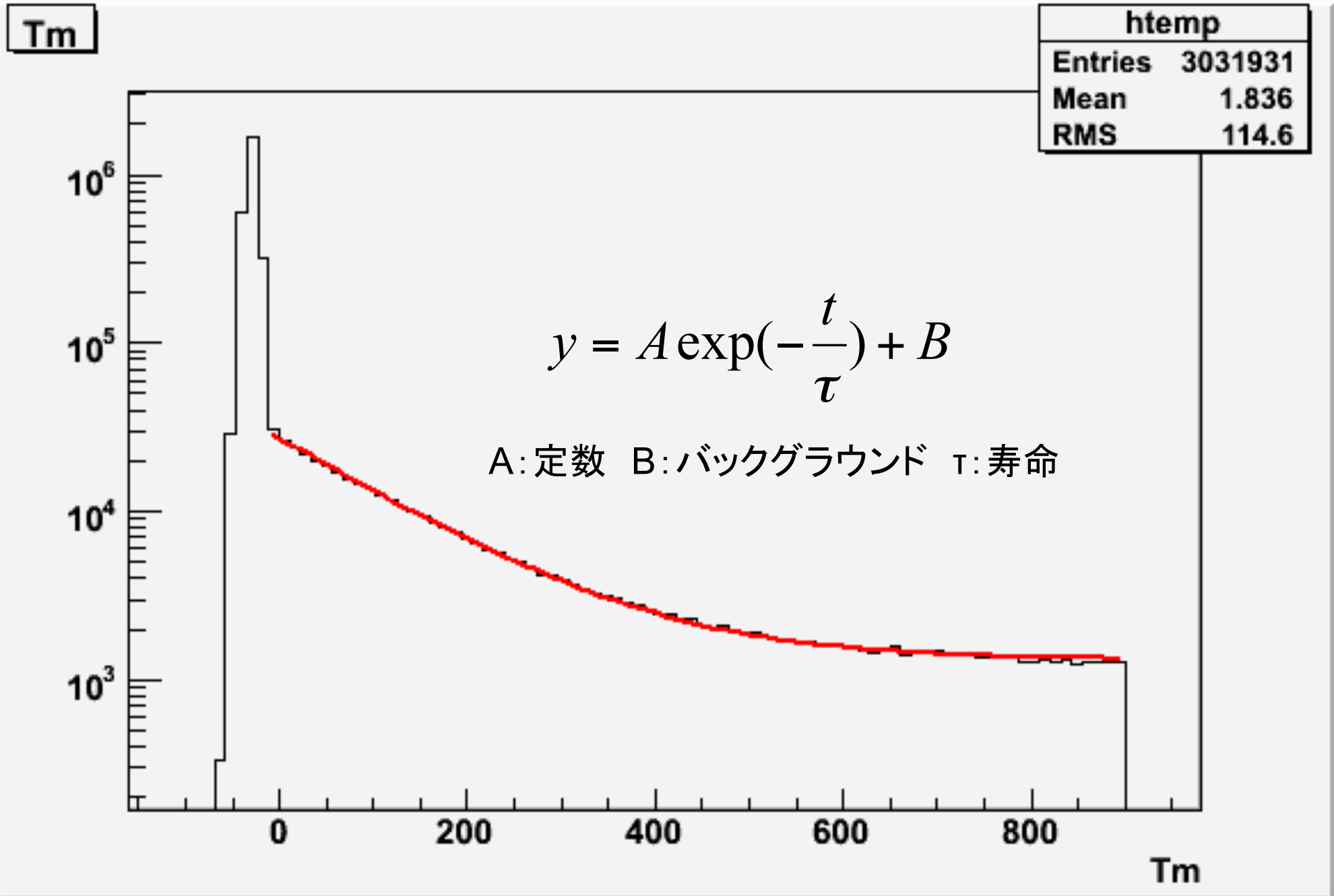
Tm:E1



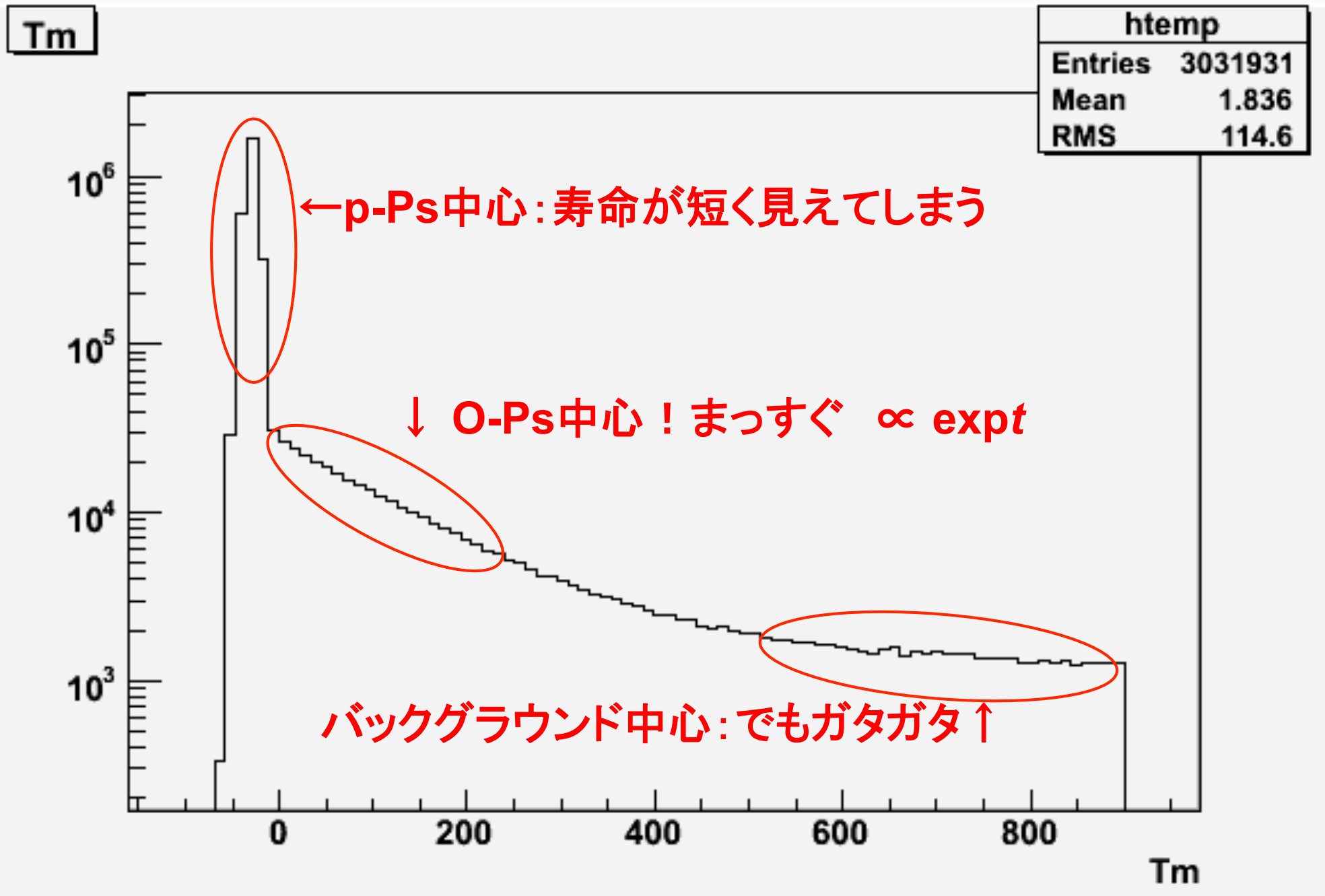
# Tmヒストグラム



# フィッティング



# フィッティング

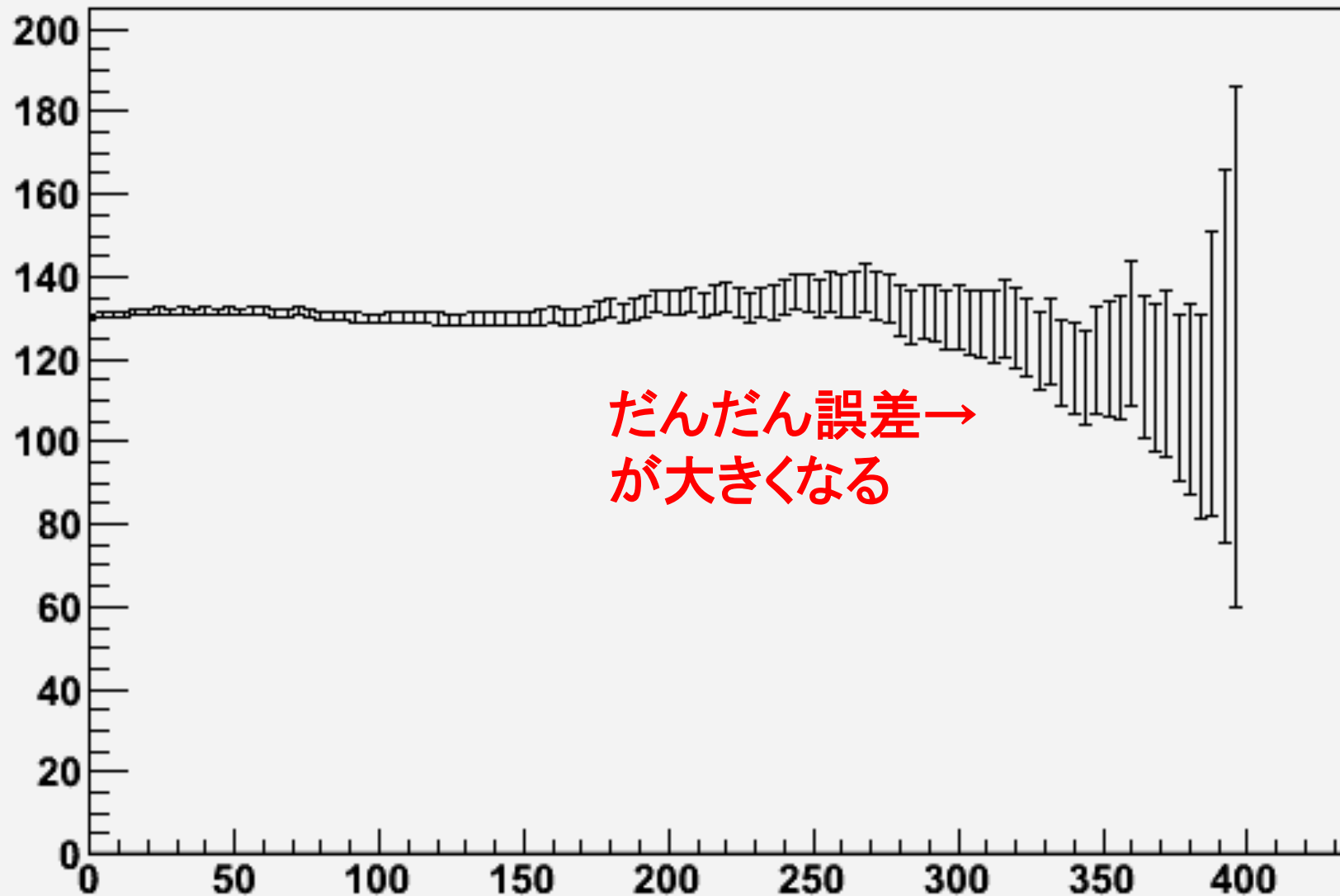


# フィッティング

- 600以降がないほうが精度が上がるのでは？  
⇒600まででフィッティング
  - より長くバックグラウンドを取ったほうが正確な  
のでは？  
⇒900まででフィッティング
- ⇒どちらも開始を動かしてみる

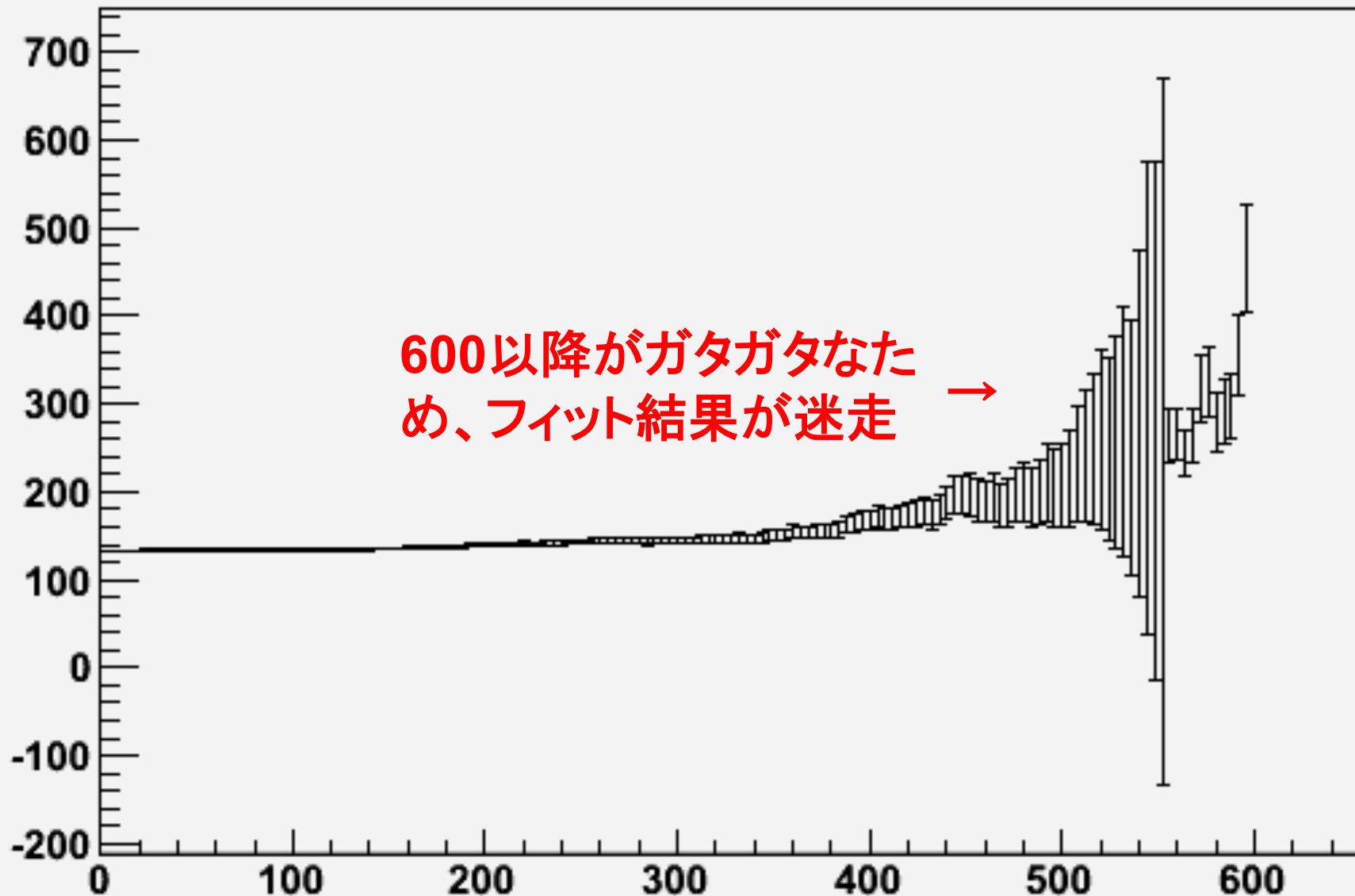
# 600まででフィッティング

Graph



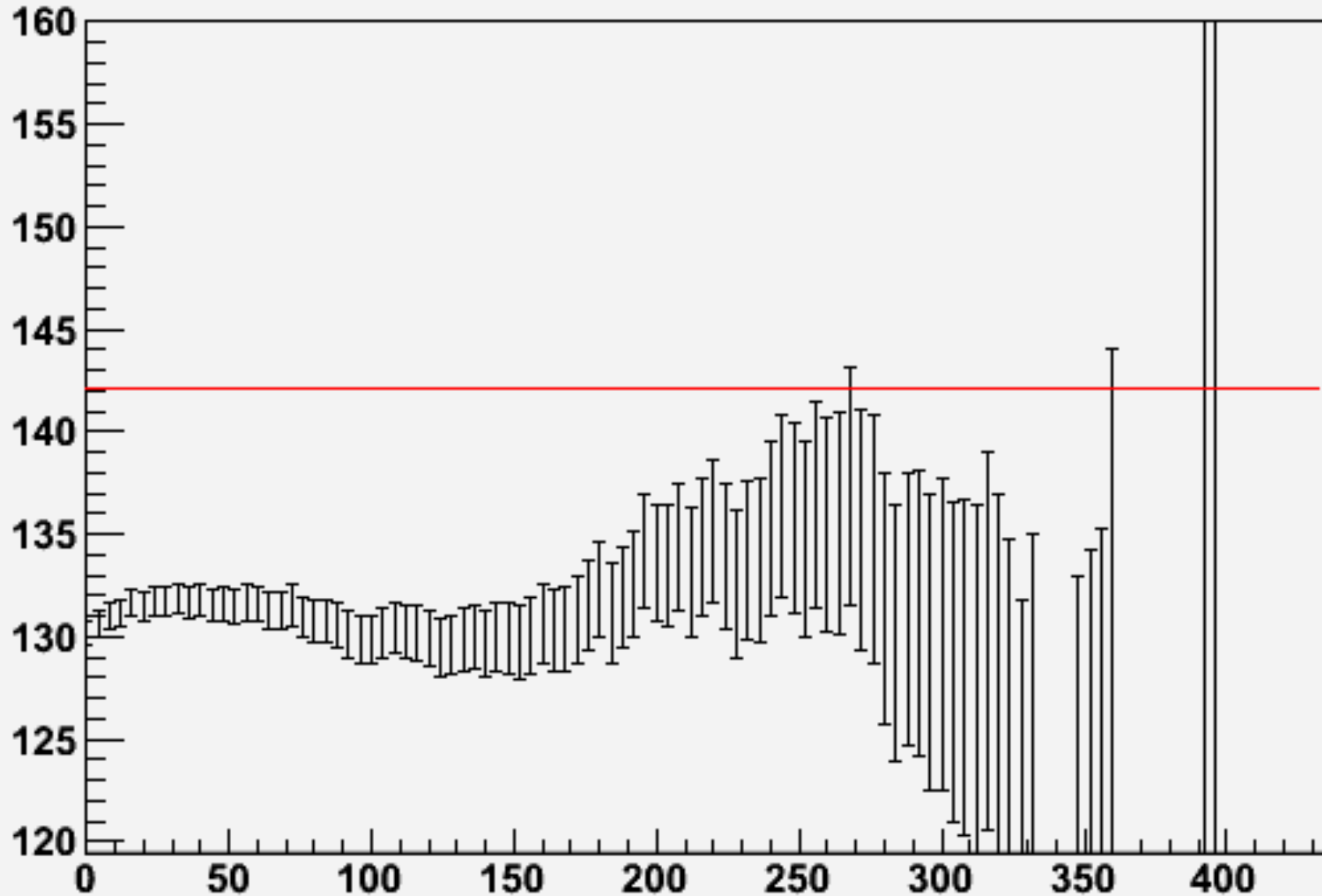
# 900まででフィッティング

Graph



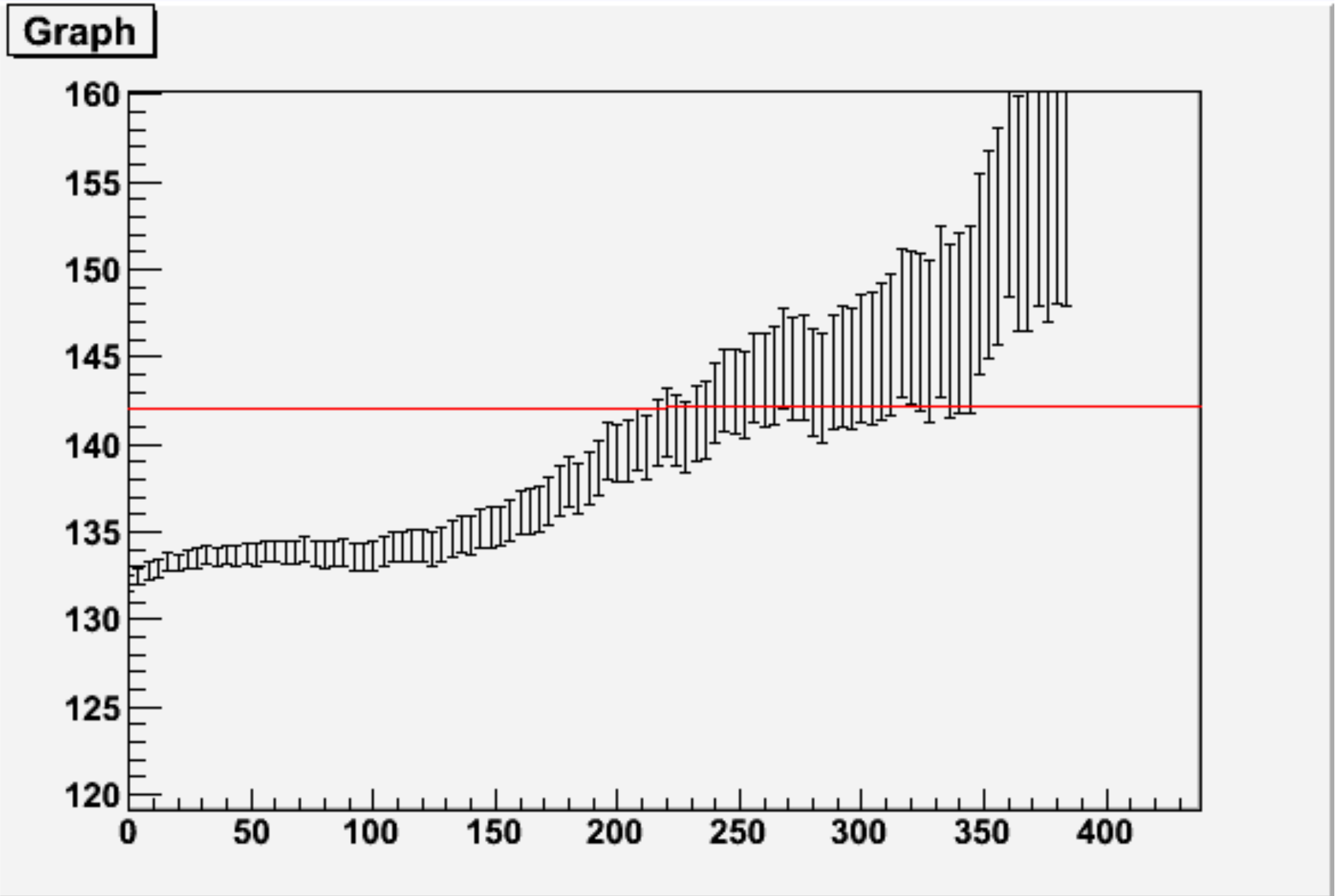
# 600まででフィッティング

Graph



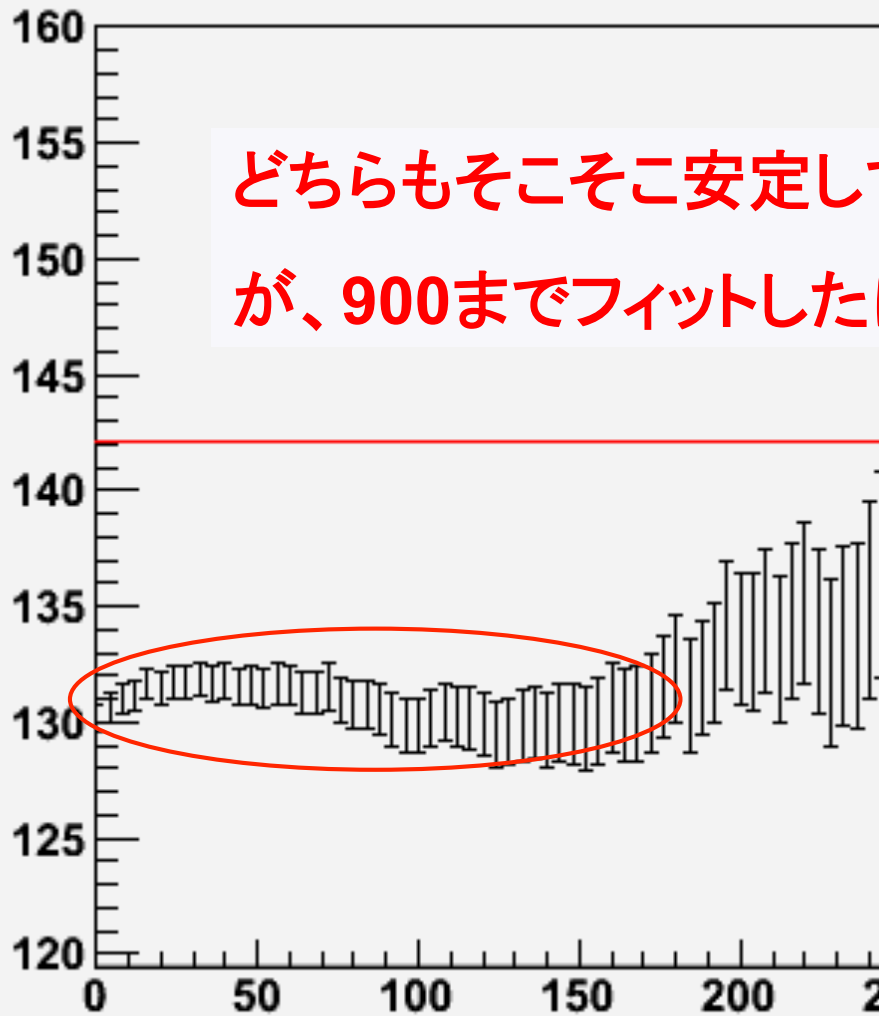


# 900まででフィッティング



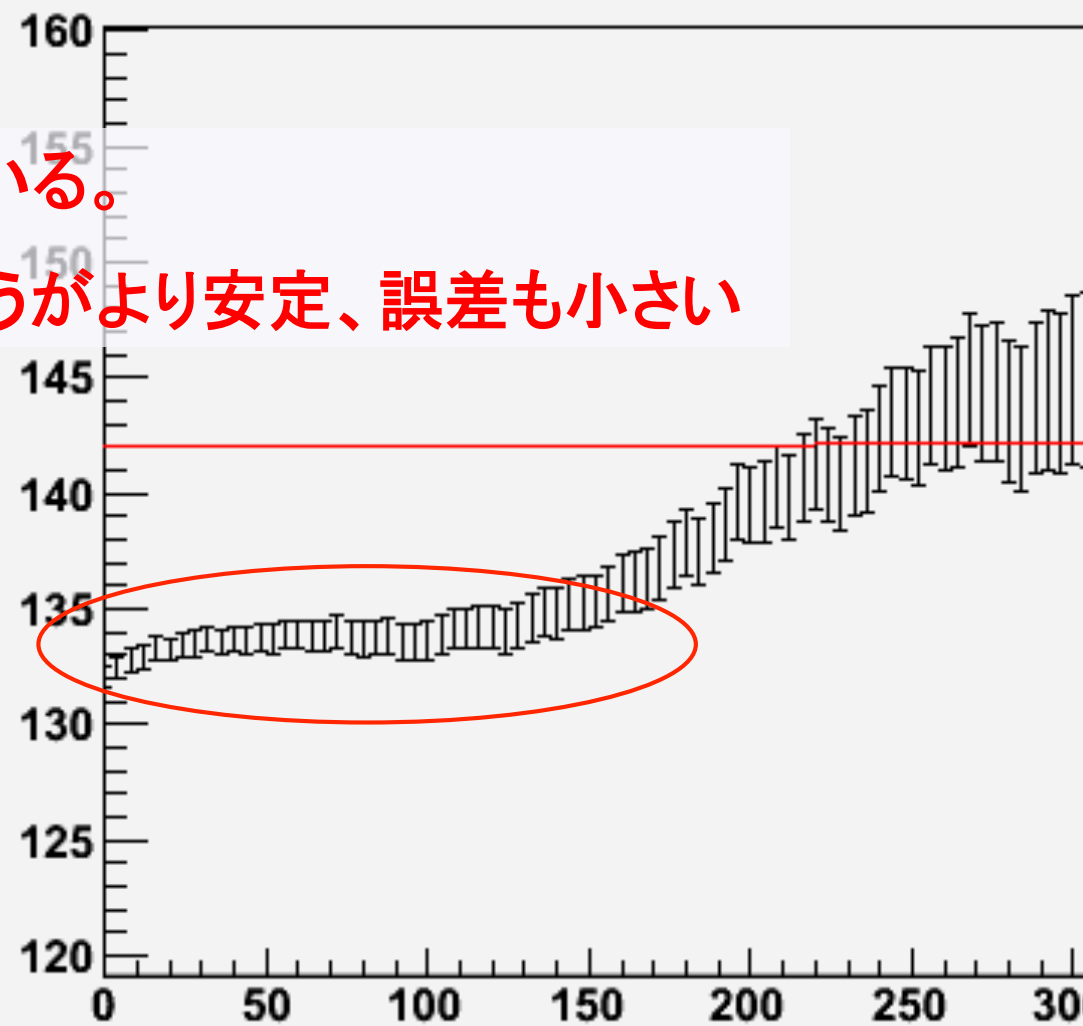
# 600 vs. 900

Graph



どちらもそこそこ安定している。  
が、900までフィットしたほうがより安定、誤差も小さい

Graph



# 600 vs. 900

	フィット開始	寿命 $\tau(\times 10^2)$	誤差 $\sigma(\times 10^{-1})$
600	40	1.317414	7.781320
	80	1.307290	10.22472
	120	1.299084	13.76082

	フィット開始	寿命 $\tau(\times 10^2)$	誤差 $\sigma(\times 10^{-1})$
900	40	1.336921	5.701099
	80	1.336967	7.243491
	120	1.342382	9.362274

**900までのフィッティングを採用**

# 結果

今実験での寿命として、統計誤差の小さくて、安定していた  
範囲 40~900でのfittingデータ

$$\tau = 133.6921 \pm 0.5701 [\text{ns}]$$

を採用する

## 5. 考察

# 誤差の評価

物理量  $z(x_1, x_2, \dots, x_n)$  の誤差  $\equiv \sigma_z^2$

$x_1, x_2, \dots, x_n$  の誤差  $\equiv \sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2, \dots, \sigma_{x_n}^2$  とすると

$$\sigma_z^2 = \left( \frac{\partial z}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial z}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2$$

が 成り立つ

但し

$x_1, x_2, \dots, x_n$  が独立な場合。

## 今実験での寿命 $\tau$ の求め方は

① tdc, adcより、各データの崩壊時間t(+定数)を

$$t = (a_1 \times TDC1 + b_1) - (a_2 \times TDC2 + b_2) - \frac{c}{a_E \times ADC - b_E}$$

で導出

② 各tでの崩壊数 =  $A \exp(-t/\tau) + B$  として最小二乗法でfitting

すると、

効いてくる誤差 —— ( i ) オシロを読み取る時の誤差(TDC calibrationの際)、  
( ii ) TDCでfittingしたときのGaussianの誤差、  
( iii ) 最小二乗法でのTDC calibrationの係数 aの誤差

まず効かない誤差 —— ADCのcalibration, t-Q補正の誤差(無視できるほど小さい)、  
TDCのcalibrationの切片

( i ) オシロの読み取り誤差 は各人1%としたので 相対誤差は

$$\sigma_1 = \frac{0.01}{\sqrt{4}}$$

( ii ) TDCをfittingしたときのGaussianの相対誤差は

各TDC値により違い、値は $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ 程度 ...  $\sigma_{\text{TDC}}$  とおく

( iii ) LINEST関数でのTDC calibrationの係数 aの相対誤差

$$TDC1 \cdots \left( \frac{0.0001}{0.2495} \right) = \sigma_{a1}, \quad TDC2 \cdots \left( \frac{0.0001}{0.2503} \right) = \sigma_{a2}$$

そして、寿命fittingでの相対誤差は、範囲40~900のデータを使って

$$\sigma_\tau = \left( \frac{0.6}{133.7} \right)$$

よって、誤差の伝播により寿命 $\tau$ の相対誤差は

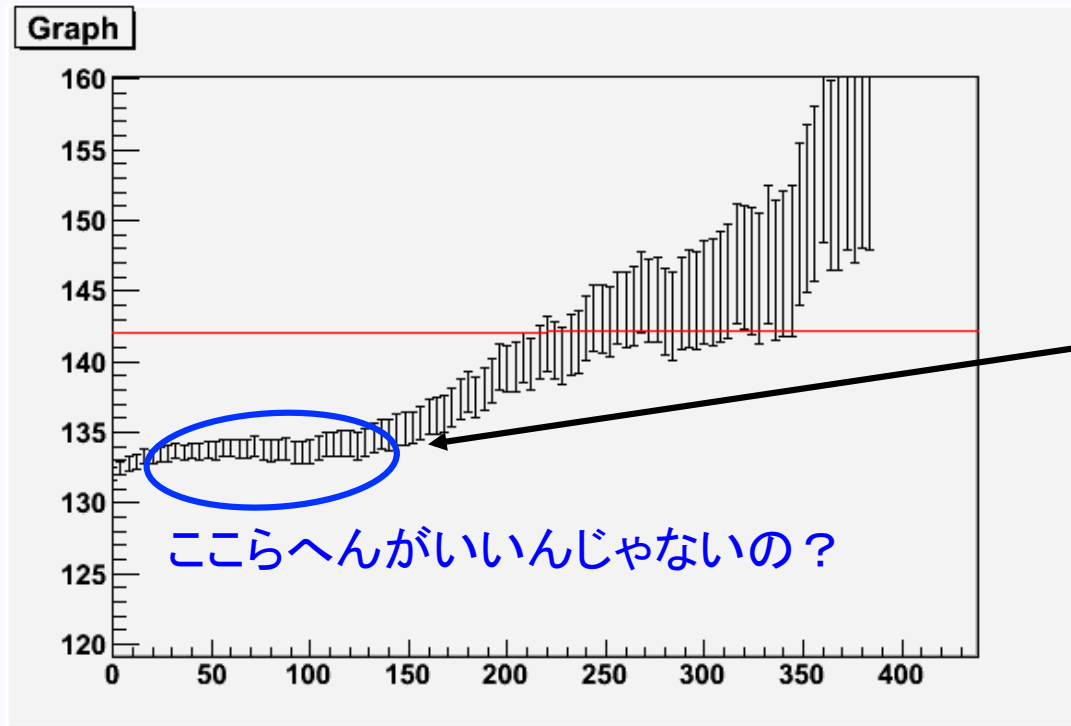
$$\sigma^2 = \sigma_\tau^2 + \sigma_1^2 + \sigma_{\text{TDC}}^2 + \sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 \cong \sigma_\tau^2 + \sigma_1^2 \cong 4.5 \times 10^{-5} \rightarrow \sigma = 6.7 \times 10^{-3}$$

?



# pick offの評価

## 今実験の結果



寿命は $133.69 \pm (\text{誤差}) \text{ ns}$   
(fitting40~900での値)  
と結論づけた

が！ 理論値は  $142.08 \text{ ns}$

このずれは何？

そーいえば …

Fittingで求めた 崩壊率  $1/\tau$  は  
オルソポジトロニウムの崩壊 + pick off



ジャマ

このpick offの影響を差し引いて、  
より正確なo-Posの寿命を弾き出したい。

# pick offの評価方法

$\tau$ ...実験で得た(見かけの)寿命  
 $\lambda_{3\gamma}$  ...o-Psから $3\gamma$ への崩壊率  
 $\lambda_{\text{pick-off}}$  ...o-Psのpick off(からの $2\gamma$ 崩壊)率

$$(i) \quad \frac{1}{\tau} = \lambda_{3\gamma} + \lambda_{\text{pick-off}} \quad \text{として}$$
$$(ii) \quad \frac{t}{\tau} = \int (\lambda_{3\gamma} + \lambda_{\text{pick-off}}(t)) dt \quad \text{として}$$

×

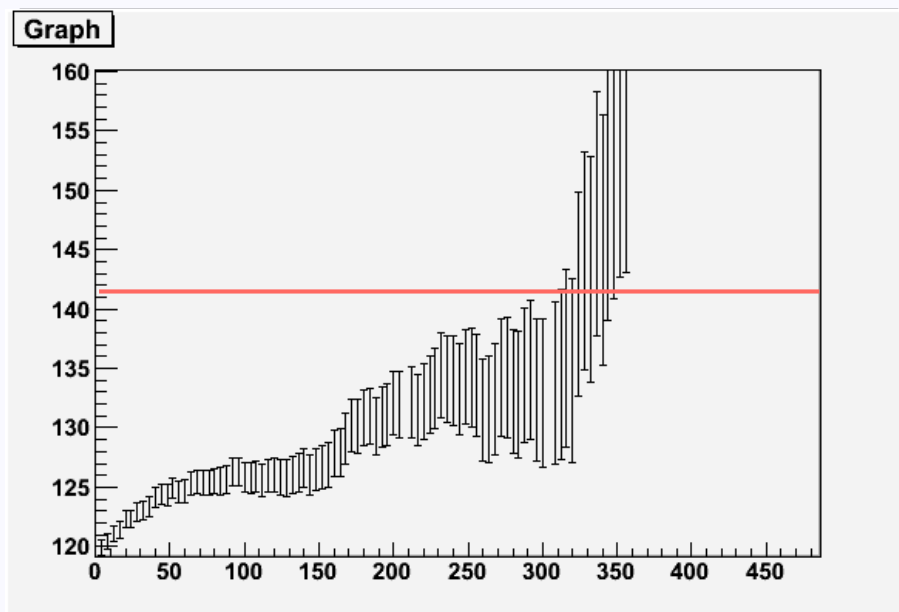
- ① いろいろな気圧での測定から、真空時での値を外挿する。  
ただし、線形な変化を見せるとは限らない。
- ② ある気圧下での測定から、摂動で得た理論値に基づくシミュレーションと比較する。

しかし

真空計のメーターはすでに-0.1MPa(0気圧)を示しており、  
どのような外挿を考えようと今のデータが真空での値と解釈せざるを得ない。

# さらに

シリカパウダーに水分が含まれていると、  
この水分子のせいで多量のpick offが生じる(>\_<)

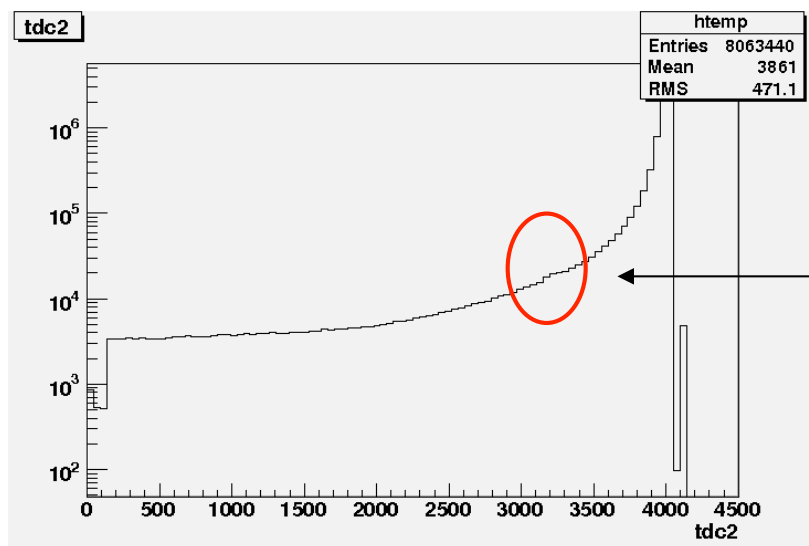


↑ honjikken1での寿命 $\tau$ の導出結果

実は、最初の本実験honjikken1は、  
解析の結果、寿命が左図のように低く出  
たので、『真空びきとシリカパウダーの焼  
きが甘かった』  
と判断。チューブを換え、シリカパウダー  
の焼きを手際よく行いもう一度  
行ったのが今回のhonjikken2である

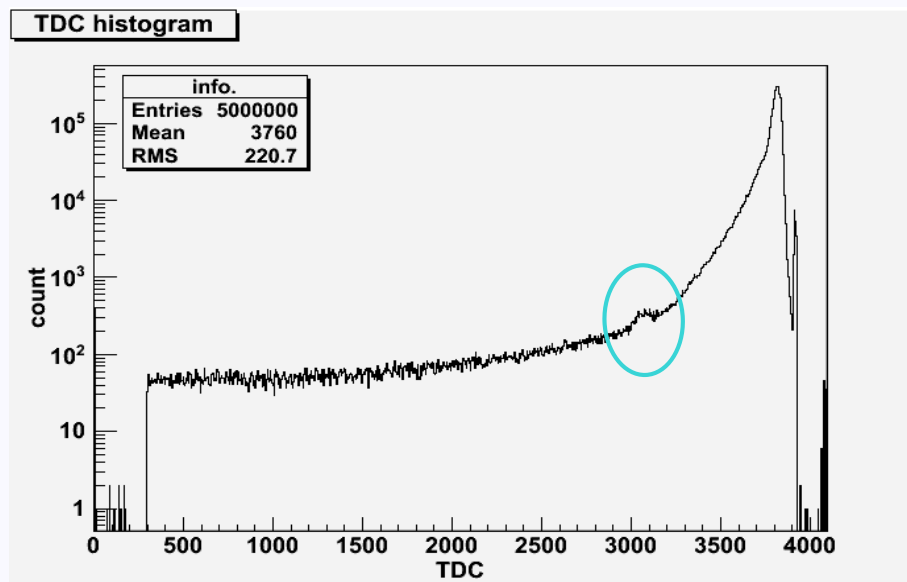
… pick offの評価は簡単ではない。

# TDC2のグラフのコブ



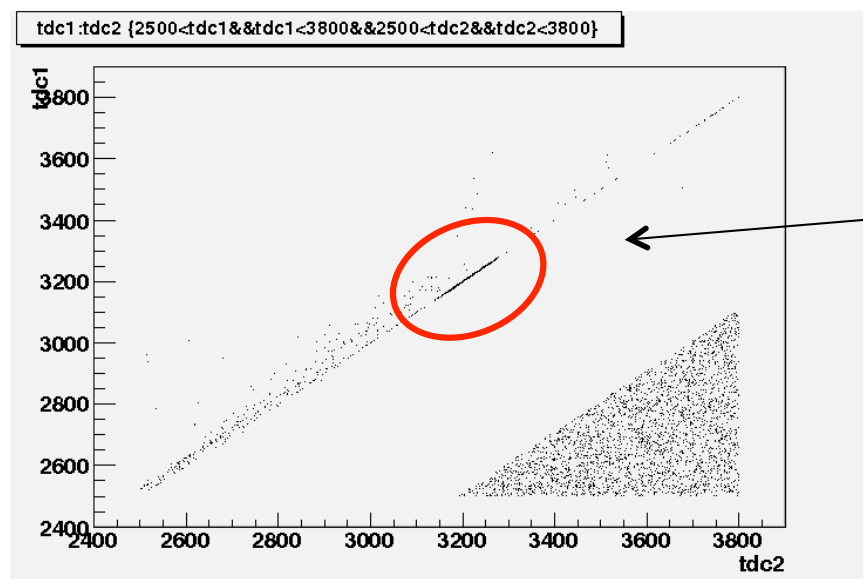
TDC2のヒストグラム  
約3100~3300の値(約180ns~230ns)  
にちっちなコブ

(参照)



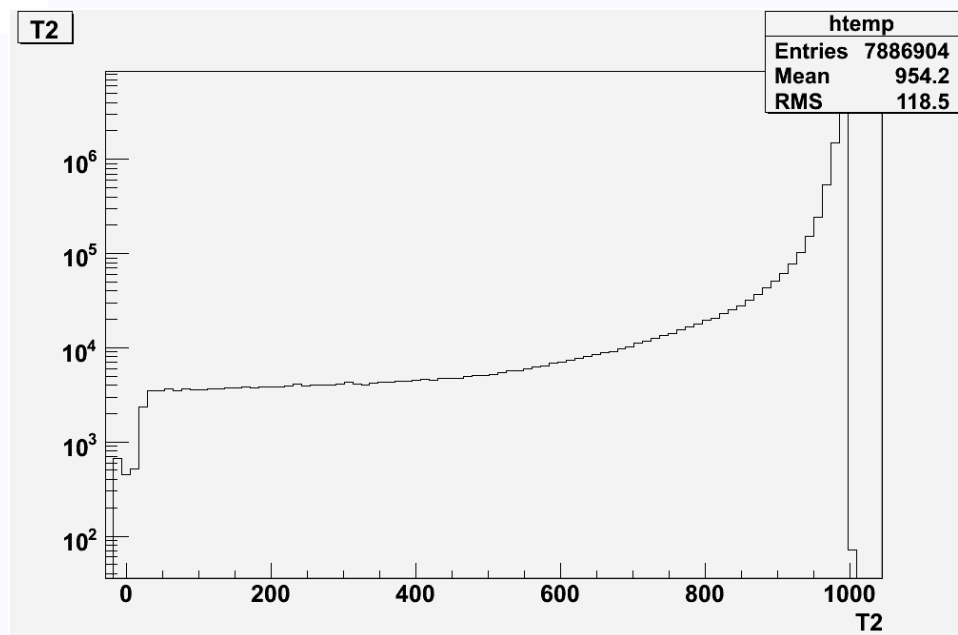
2009 後期A2実験  
この時もコブが見受けられる

## TDC1 VS TDC2の図をみると...



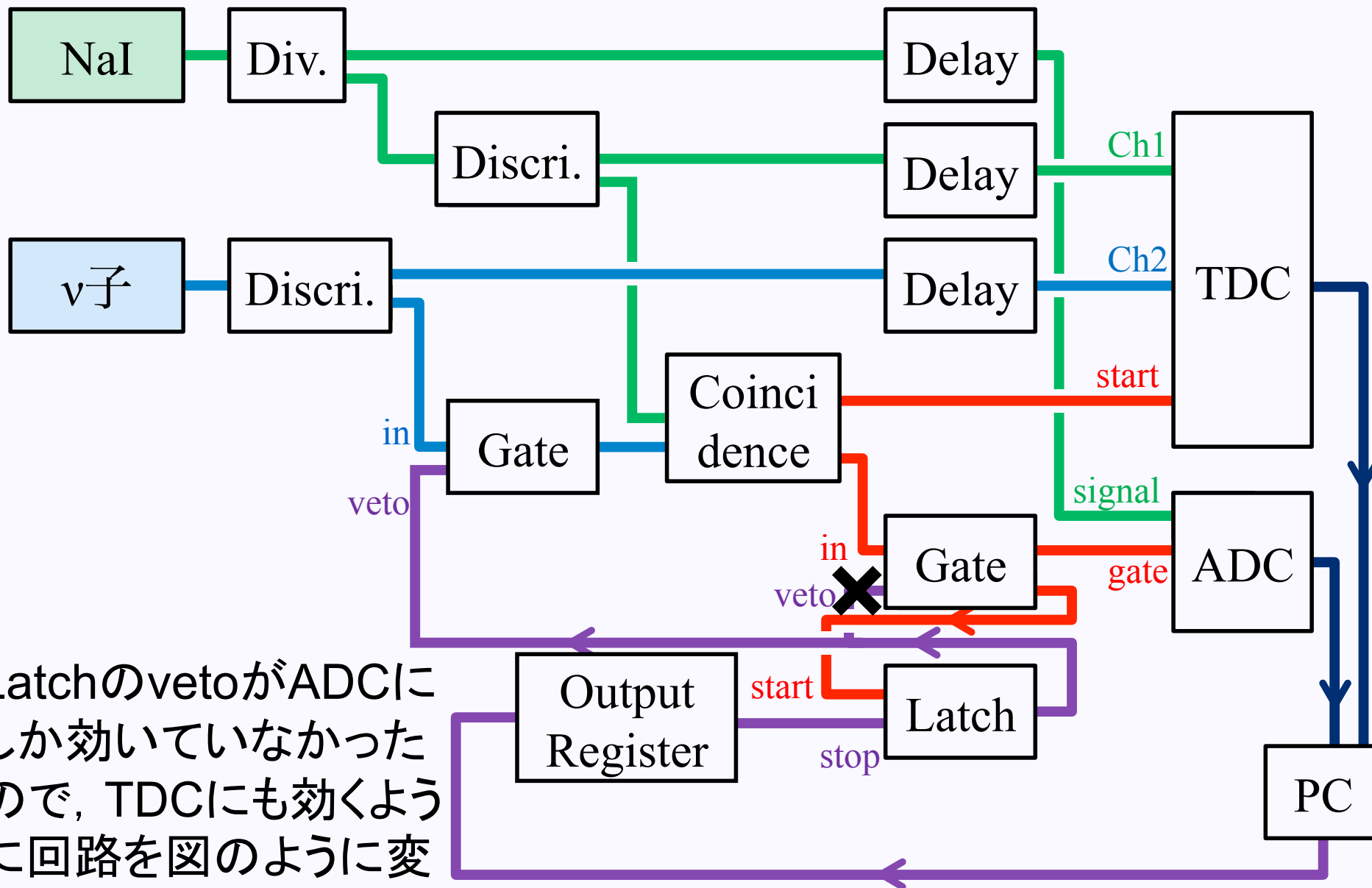
前述の範囲のみ  
TDC1=TDC2(もしくはT1=T2)  
の直線上のプロットが分布を増す

よってOkinaCut  
( $985 < T1 < 997 \rightarrow 4000 < \text{tdc1} < 4049$ )を  
施すと(右図)となり、  
コブの除去に成功した。



## 後は...

- 約六日の実験期間中、環境の変化(室温など)により calibration値の変動が十分考えられる。
- プロットが濃すぎてどこをt-Q補正に使ったらいいかわかんない  
(t-Q補正には崩壊時間がほぼ0nsのデータのみを使いたい)
- 寿命fittingのためにもっと長いスロープがほしい。



LatchのvetoがADCにしか効いていなかった  
ので、TDCにも効くよう  
に回路を図のように変  
更する必要がある。



# 一歩進んだ実験をするには...

## ・pick offの評価のために

- ・真空計の精度を上げる
- ・シリカパウダーの焼き具合を知る(焼く前と焼いた後の重さを比べるetc.)
- ・いろいろな気圧でのデータをとり、pick off数を気圧の関数として評価する

## ・Back Groundの量を減らすために

- ・強度が弱い線源を使用する  
(3 $\gamma$ 崩壊イベントが線源強度に比例する一方  
back groundは線源強度の2乗に比例する)

## ・長時間の計測での環境変化のために

- ・遮光、真空ポンプ、室温保つ装置のqualityをup!
- ・実験の開始直後、終了寸前などのデータを比較して、環境変化の影響を調べる。

ご静聴ありがとうございました



拍手！