

# ミューオン崩壊由来電子の エネルギースペクトル測定

南條研究室

尾前丈一郎

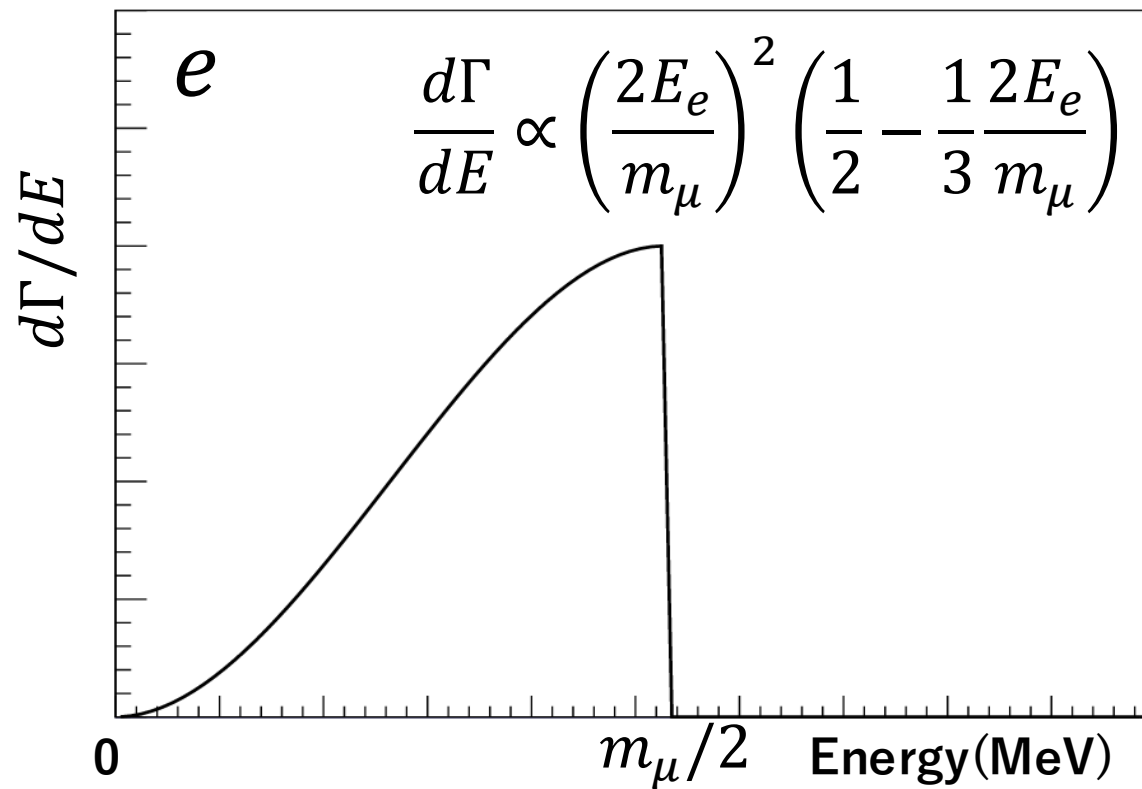
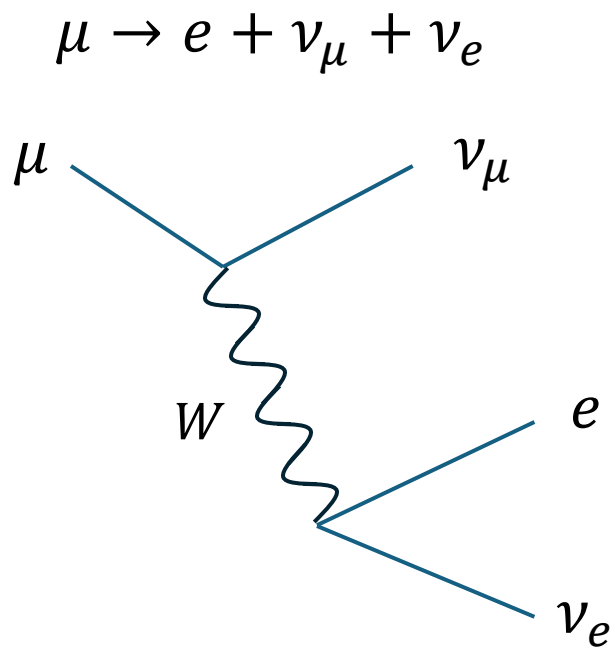
京極貴文

森敦也

# Outline

1. イントロダクション
2. セットアップ、DAQについて
3. 検出器の性能について
4. イベントセレクションについて
5. 解析方法について
6. 結果と考察、総括

# Introduction



電子のエネルギースペクトルを測定する

# 電子の相互作用

エネルギーの測定→電子の全エネルギーを“**見たい**”

50MeV電子の反応



Collision Loss

見える (シンチレーター)

制動放射

$e + \text{Nucleus} \rightarrow e + \gamma + \text{Nucleus}$

見えない (Escape Photon)

★ Photonの持ち去るエネルギーを“見える”ようにしたい

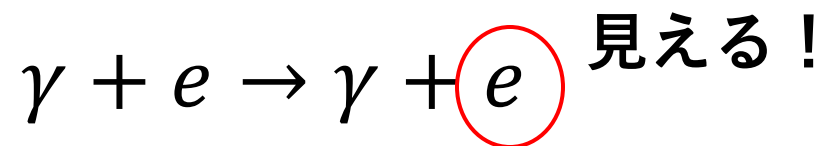
# 光子の相互作用

対生成



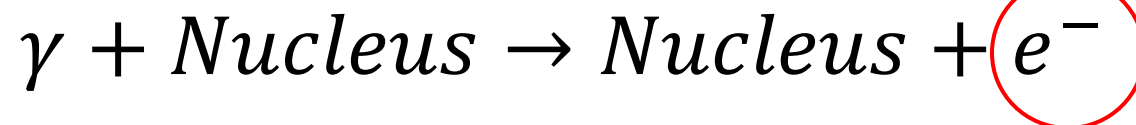
見える！

コンプトン散乱



見える！

光電効果



見える！

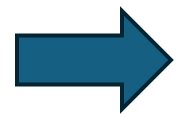


光子に対する反応断面積の大きい物質をシンチレーターとして用いる

# CsI シンチレーター

KOTO実験所有のCsIシンチレーター+PMTを必要分お借りした

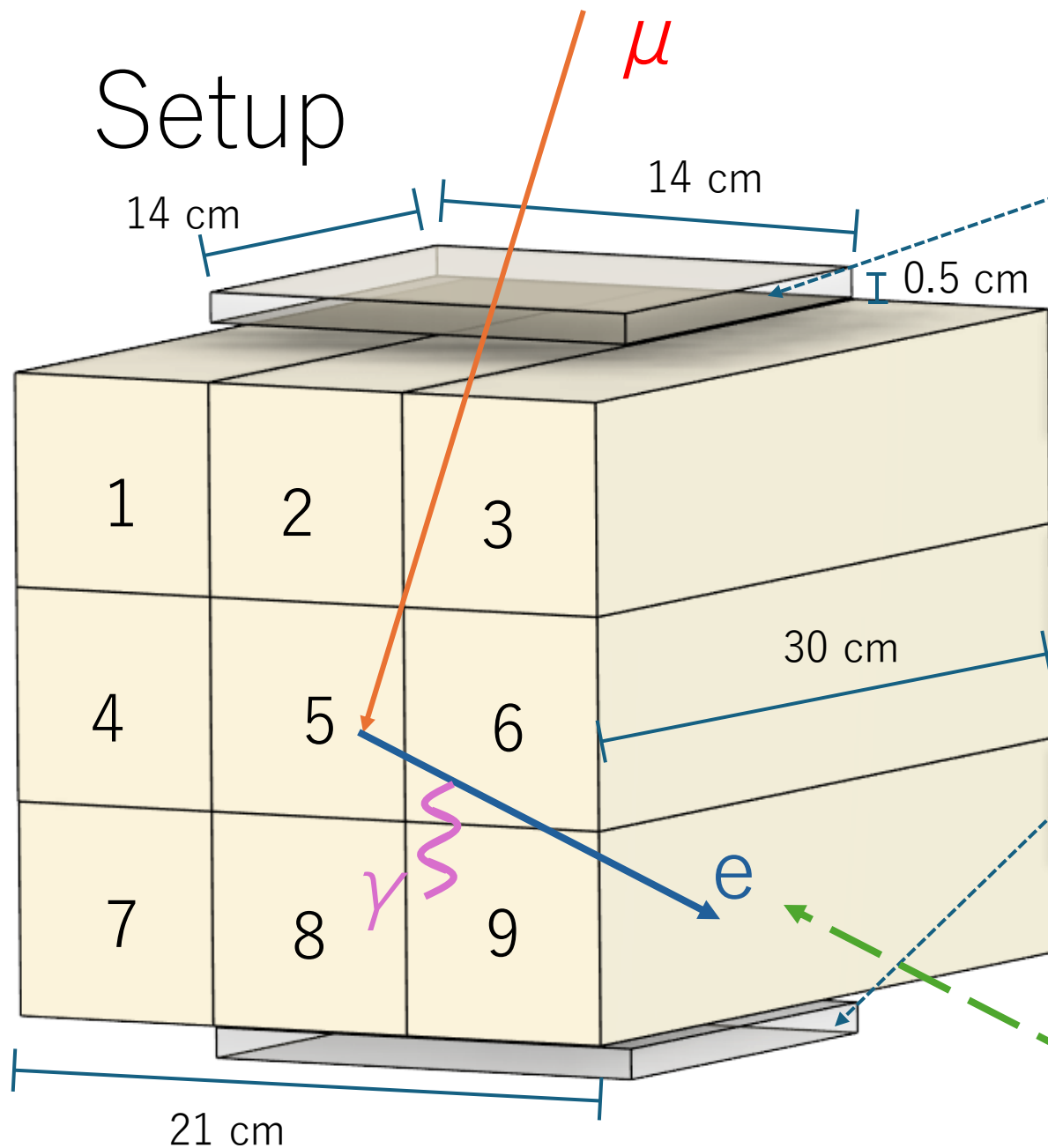
- 7 cm × 7 cm × 30 cmのPure CsI Crystal
- 大きな光子反応断面積
- 放射長 1.86 cm
- 潮解性



密封・除湿して使用

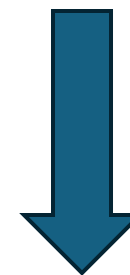


## Setup



プラスチックシンチレーター  
(from Aoki Lab)

CsIでミュオンを止める！

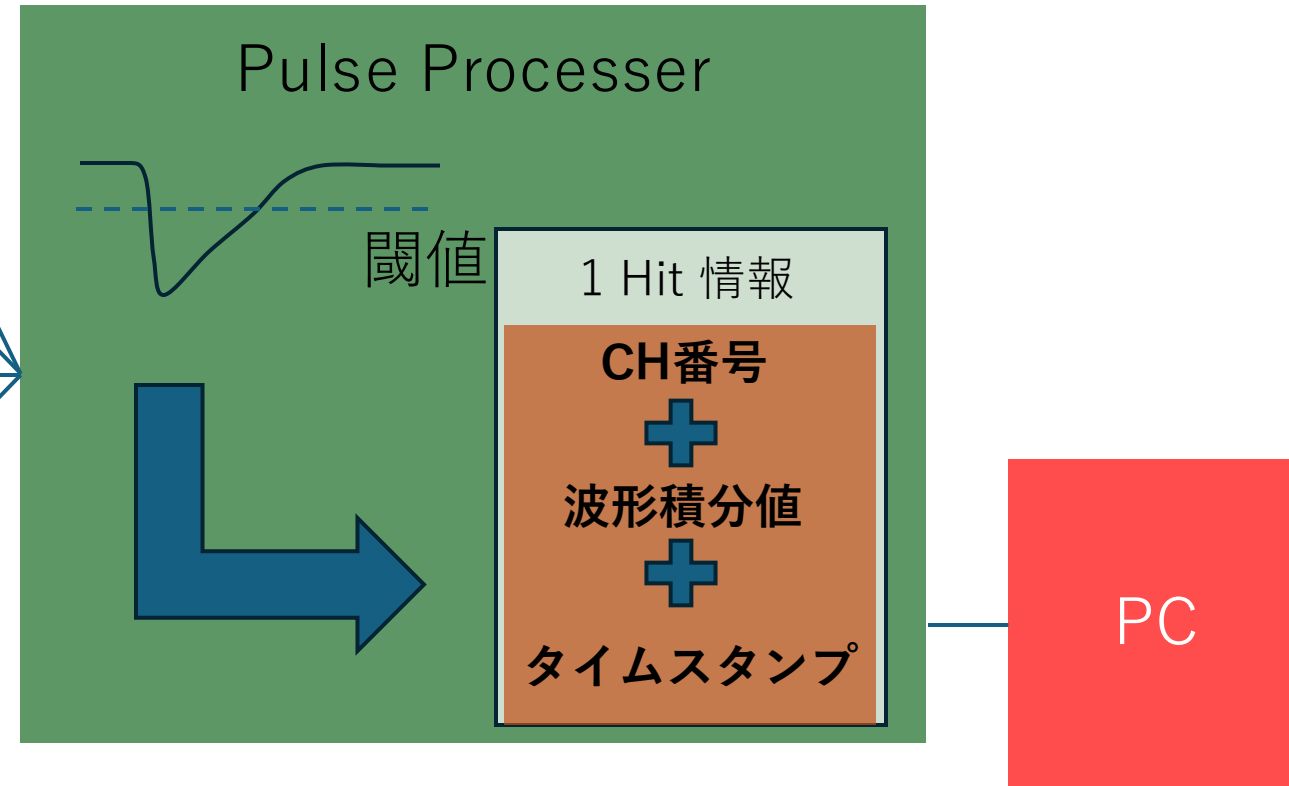
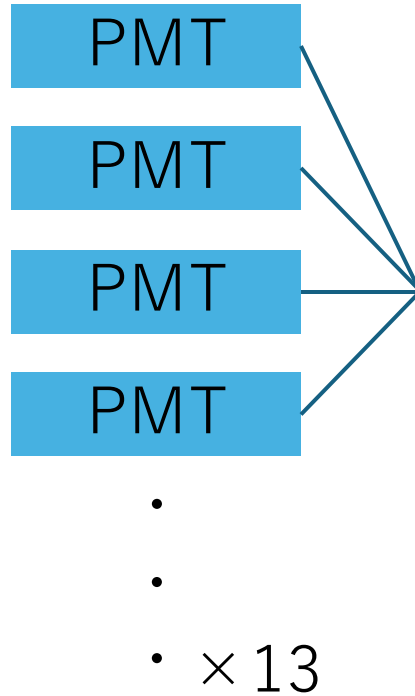


CsIで電子のエネルギーを測る！

3 x 3 array Pure CsI Crystal(from KOTO)

# DAQ

TechnoAP社製16chパルスプロセッサ「APV8516-14」を使用したデータ収集



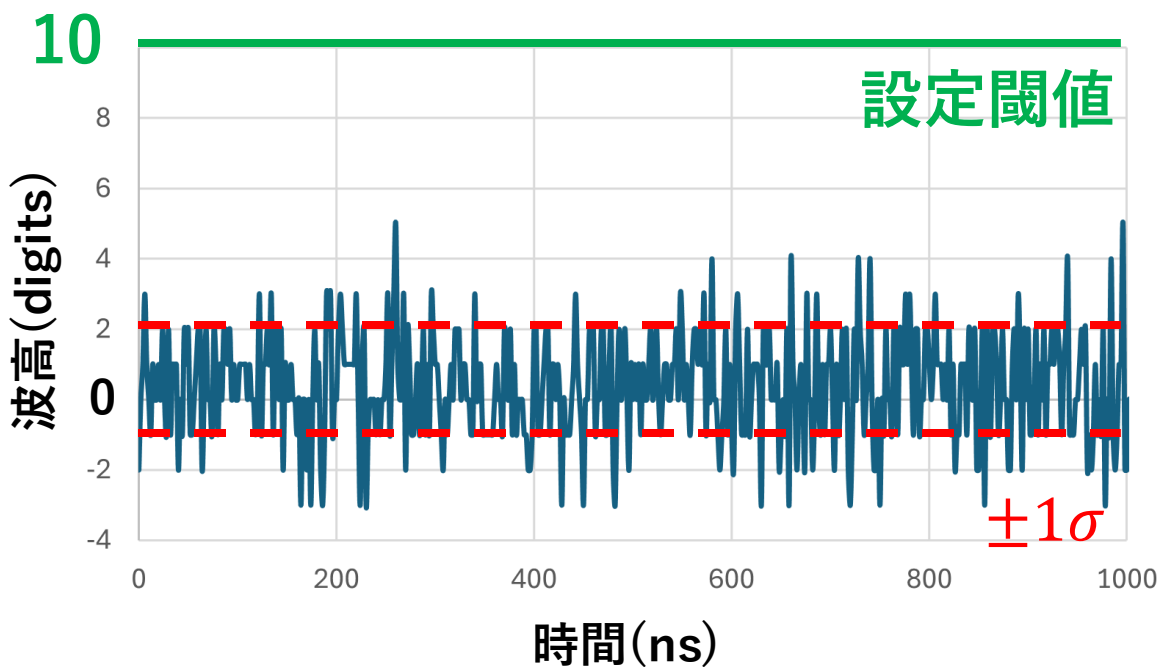
セルフトリガー形式 = 各PMTについて独立にデータ取得



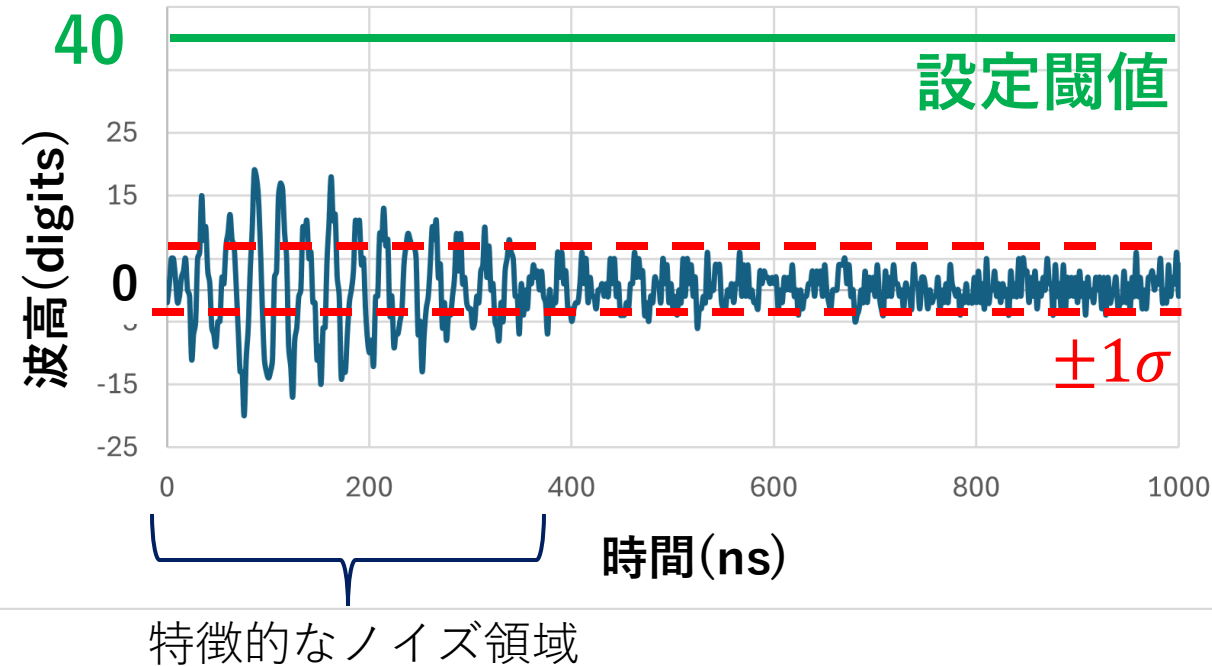
# 閾値設定

- ベースライン波形から計算したゆらぎを目安に閾値を設定。
- ただし、特徴的なノイズが見られるCHは、閾値をそれにあわせて高くした。

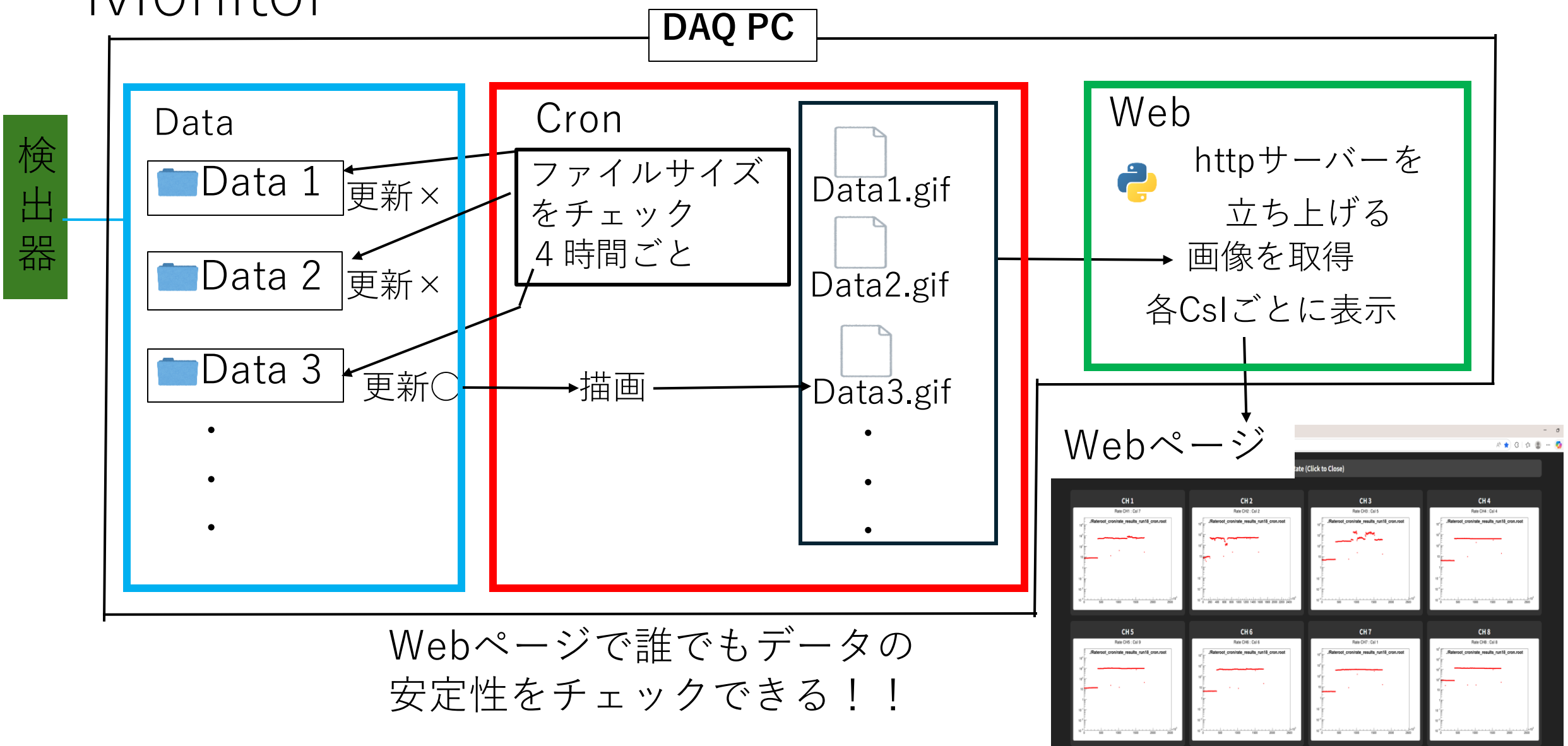
Baseline of Csl#1



Baseline of Csl#3



# Monitor



Webページで誰でもデータの安定性をチェックできる！！

# 取得データ

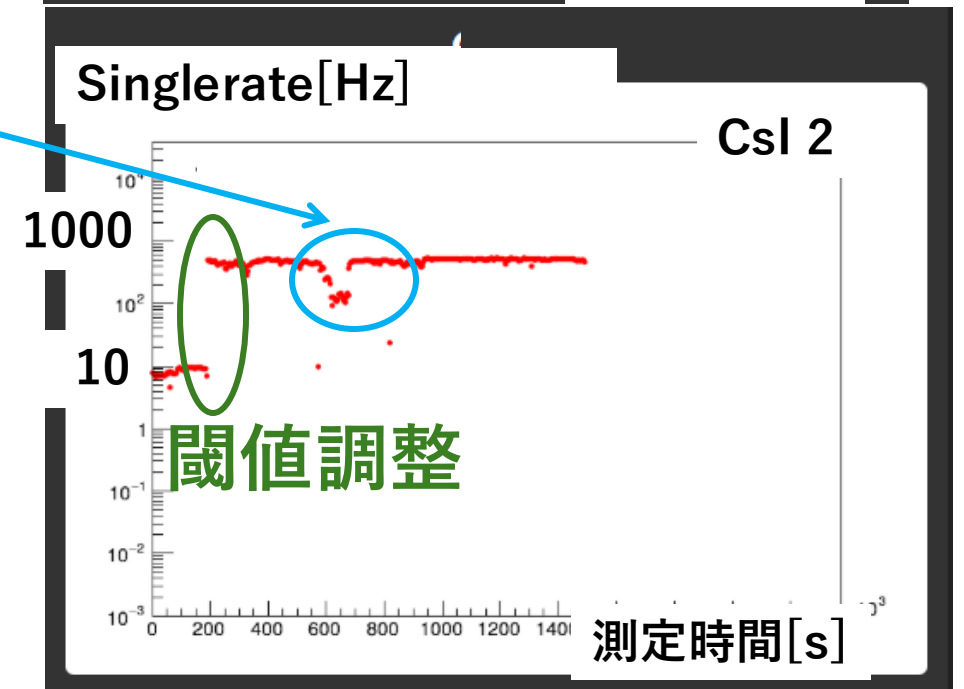
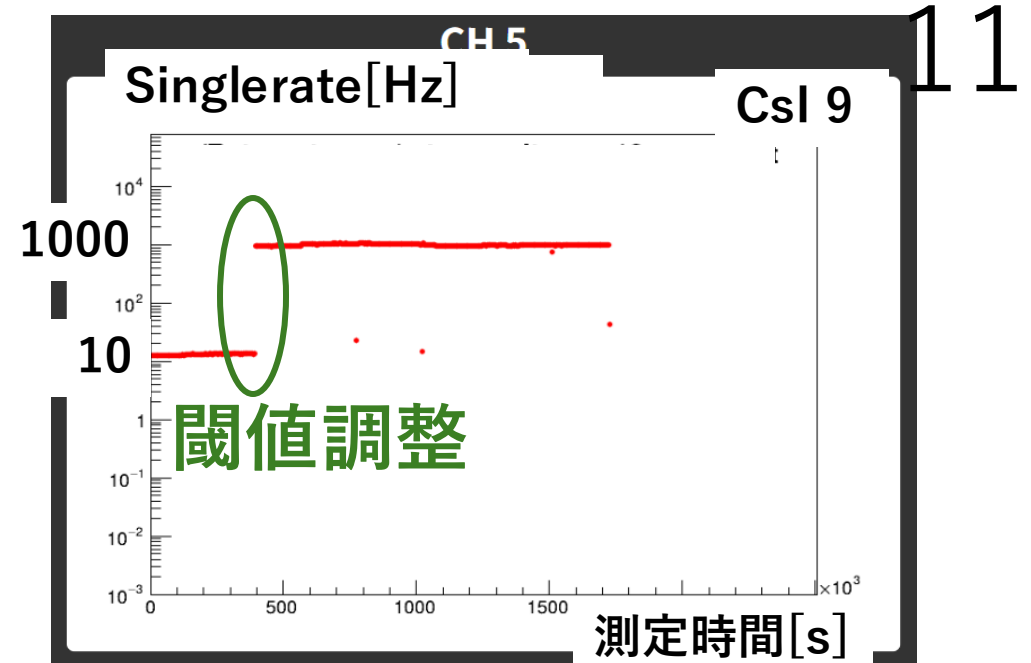
## データ取得期間

1/17~2/16 (約500時間)

モニタリングツールでデータの質を担保

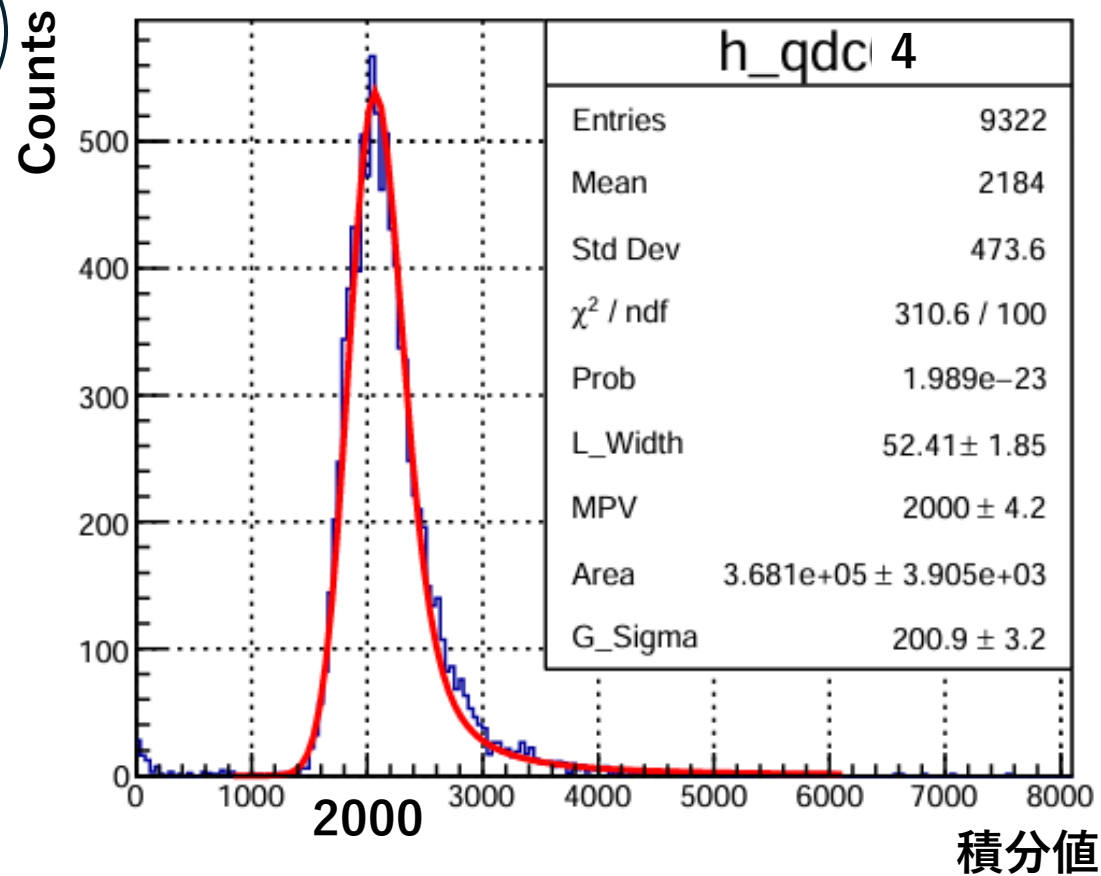
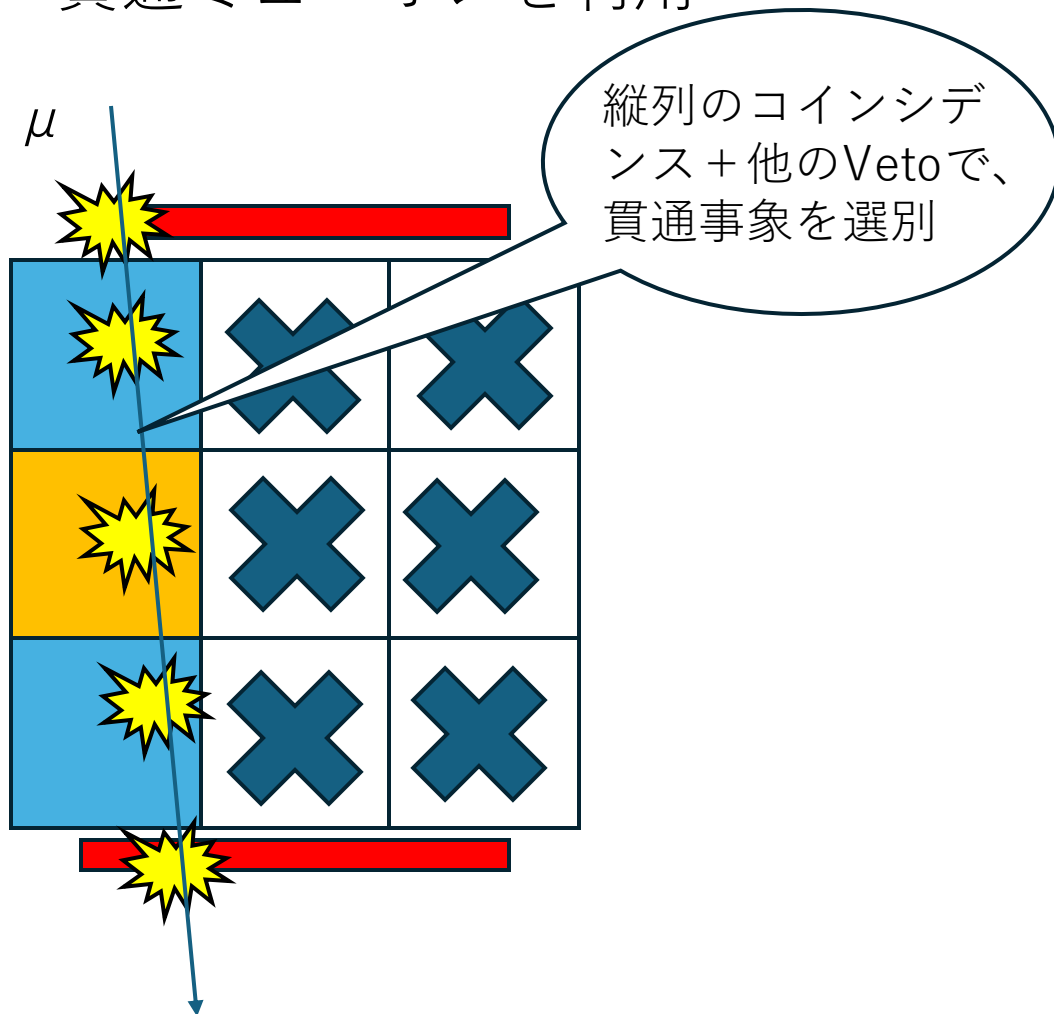
## 各PMTの安定性

シングルレートの変動を観測  
→この時間帯のデータは解析しない



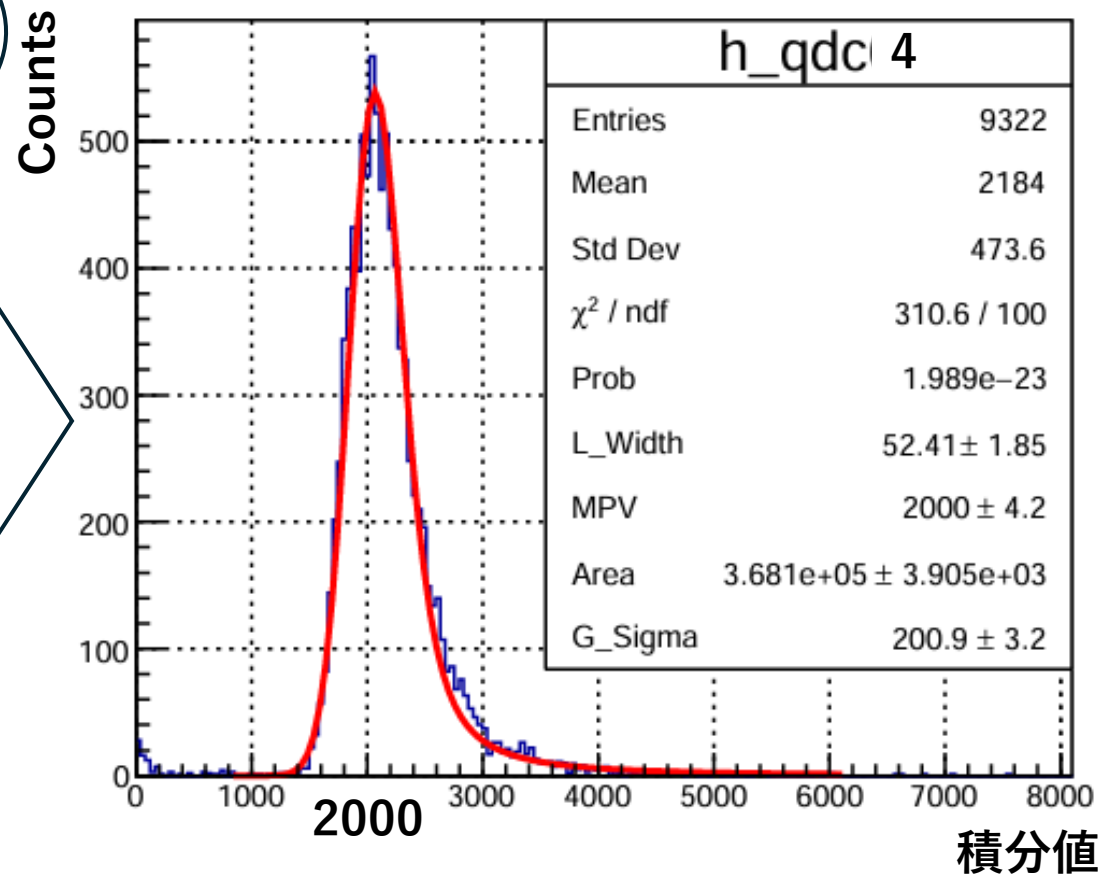
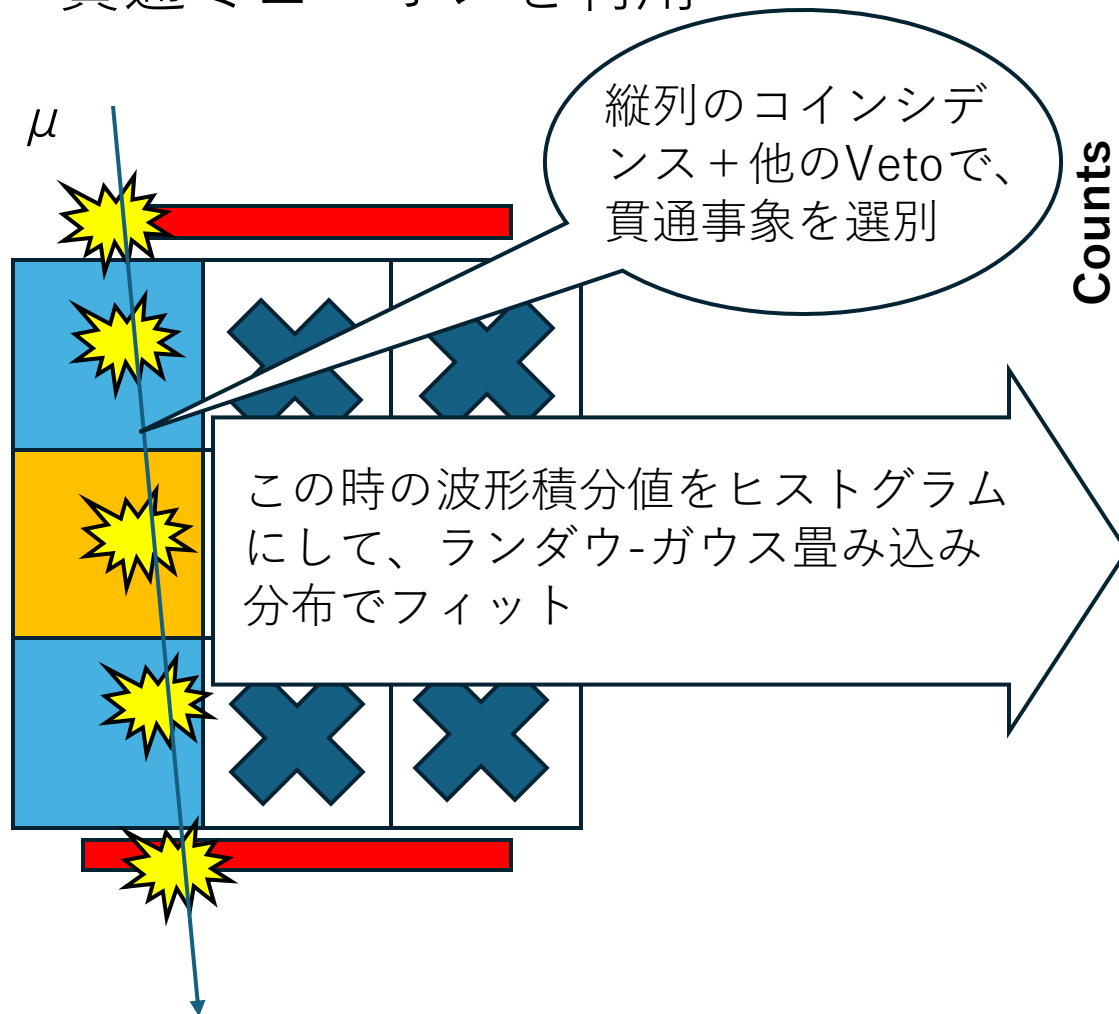
# Energy Calibration

- 貫通ミューオンを利用



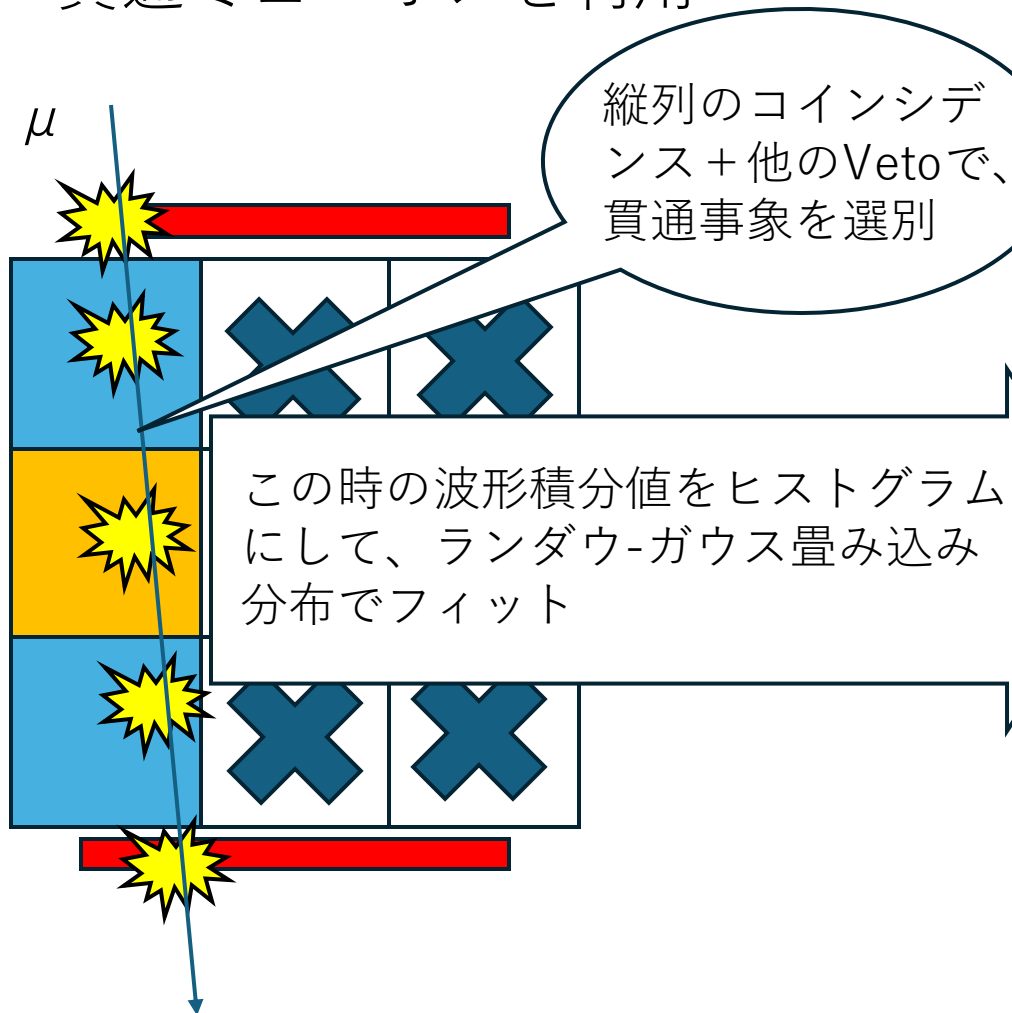
# Energy Calibration

- 貫通ミュオンを利用

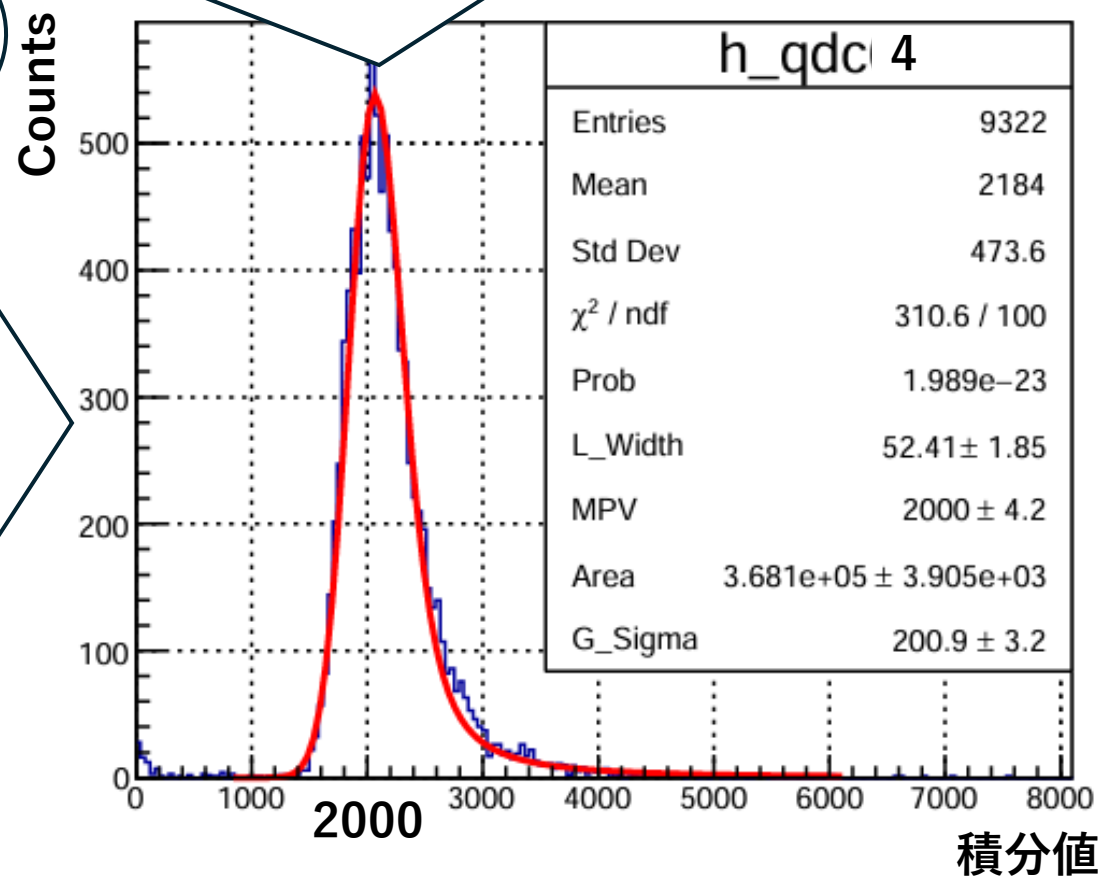


# Energy Calibration

- 貫通ミュオンを利用

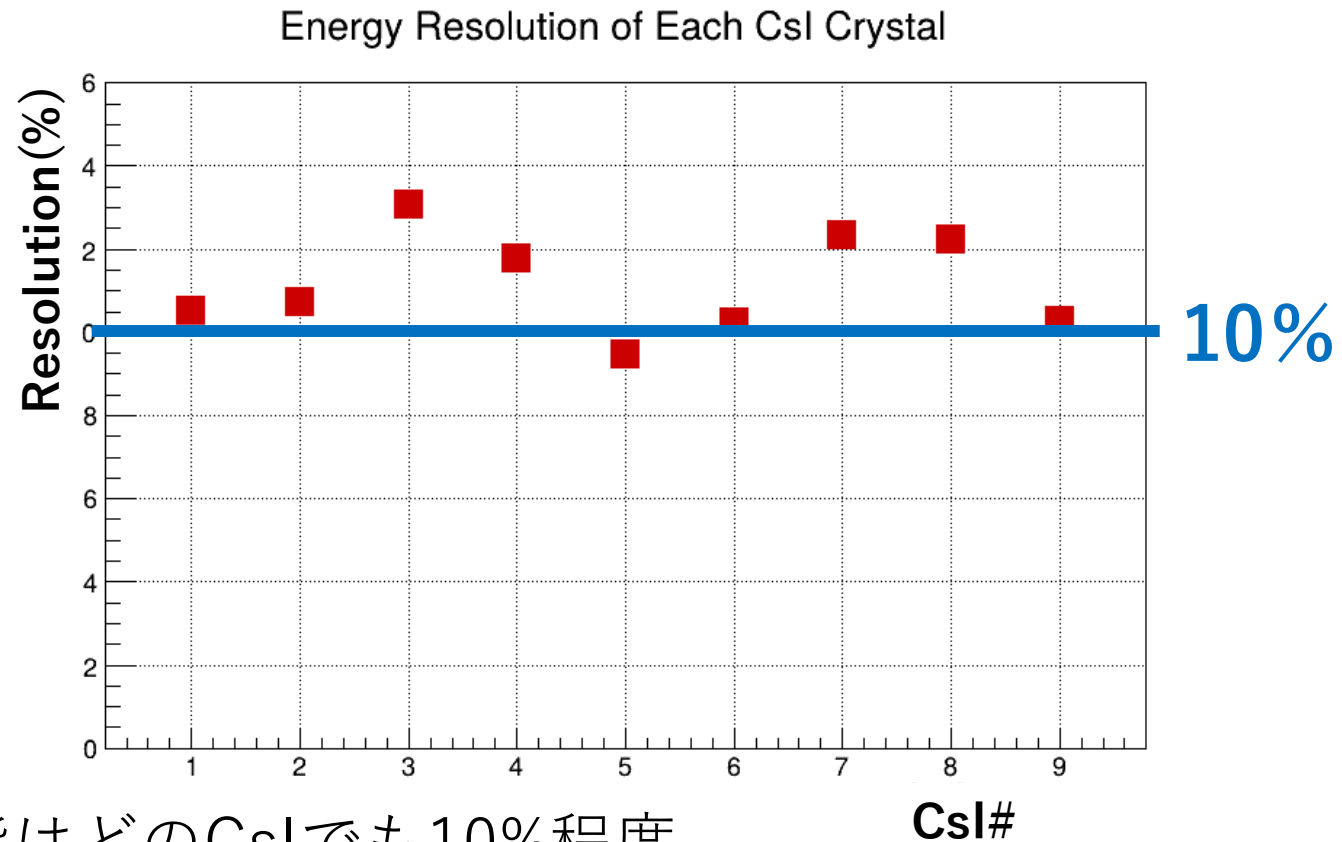
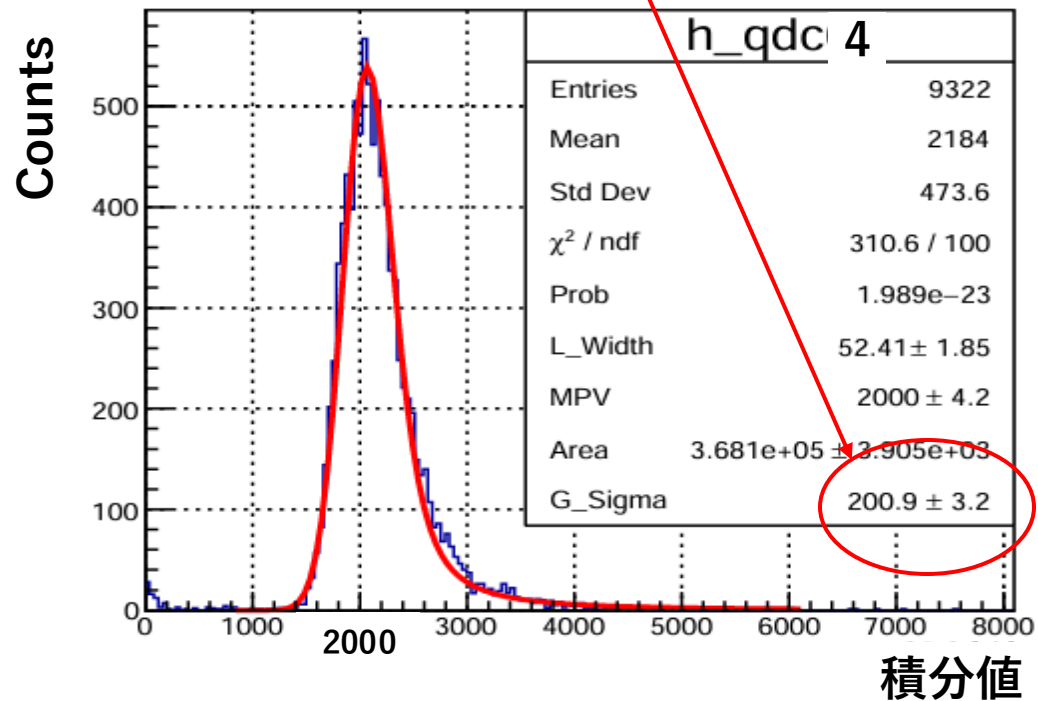


フィット結果の最頻値が、ミュオンのエネルギー損失シミュレーション結果の最頻値( $\approx 50$  MeV)と一致するとして較正



# Energy Resolution

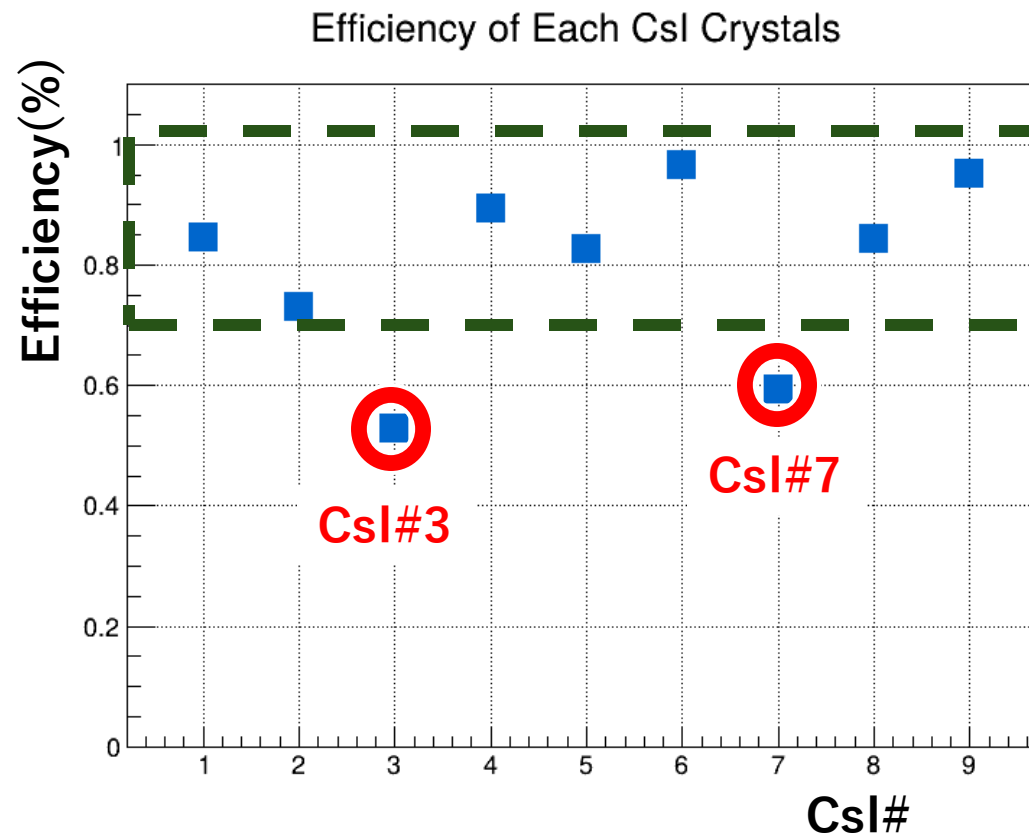
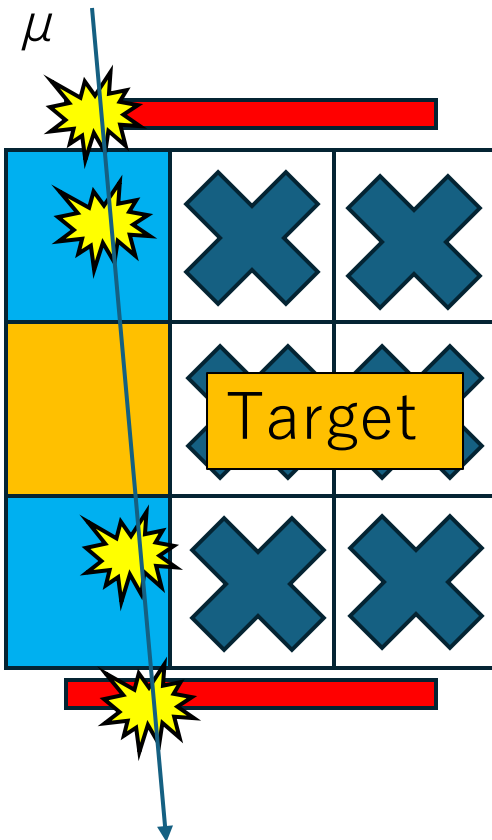
- 最頻値とガウス分布の標準偏差から、 $\text{Resolution} = \frac{\sigma_E}{E}$ が計算できる。



- ピーク位置(~50MeV)での分解能はどのCsIでも10%程度

# Efficiency

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{(分母のうち、さらにターゲットの同時計数があった事象)}}{\text{(ターゲットの上下に存在するシンチレーターのみでの同時計数事象)}}$$

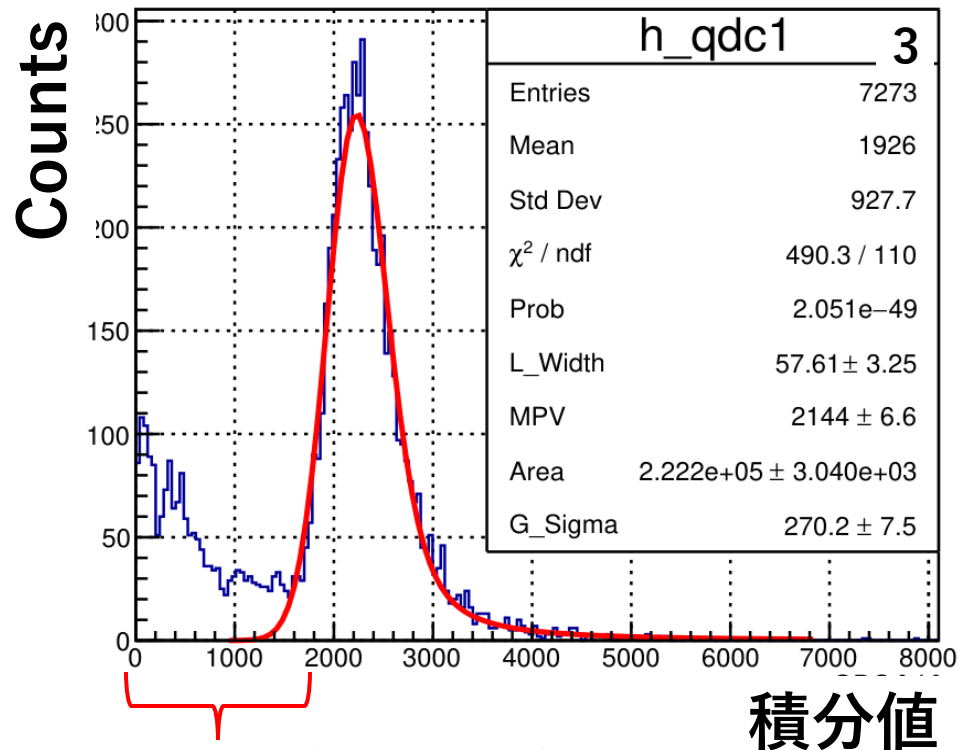


- 7個のCsIは95~80%程度の効率  
→十分な効率
- 効率が悪いCsIがある  
→これらのCsIはともに特徴的なノイズが見える。



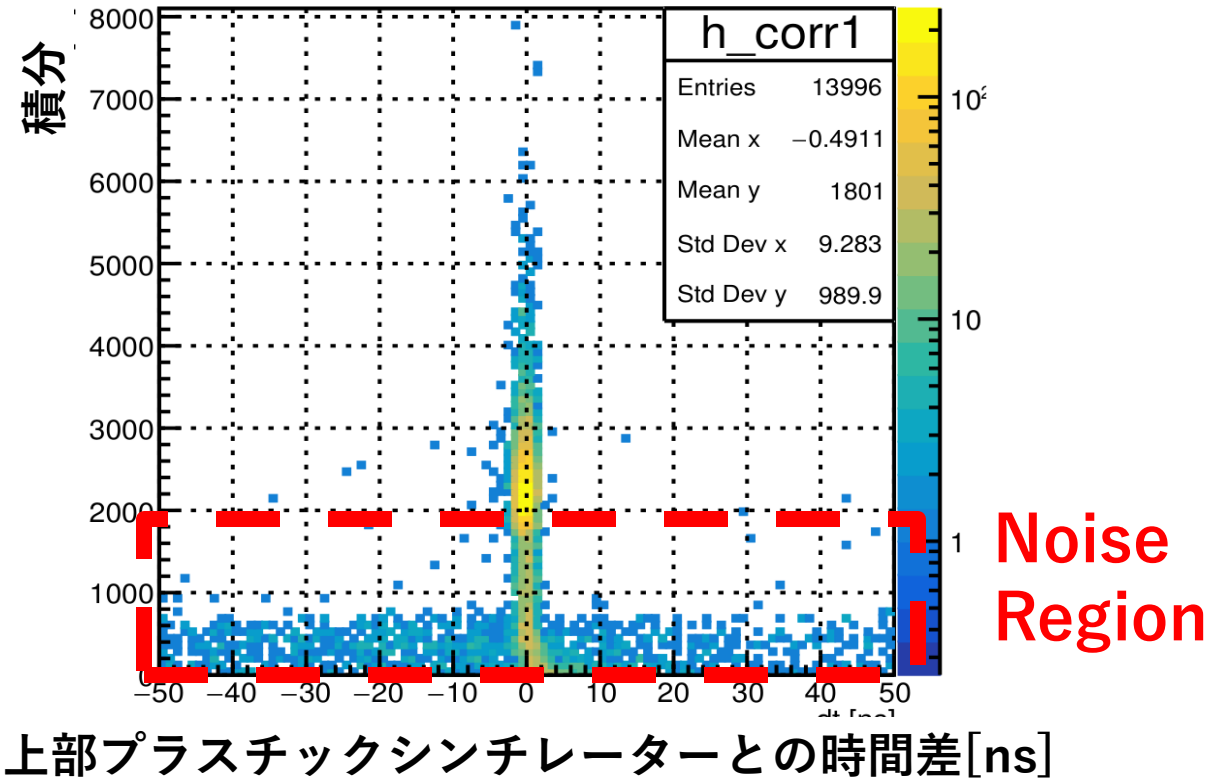
# CsI#3,#7の効率

## 効率56%のCsI(#3)



低エネルギーの事象が多い→何か関係がある？

## 上部プラスチックシンチレーターとの時間差vs 波形積分値ヒストグラム



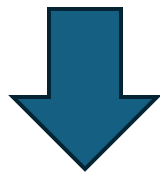
- ・コインシデンスが**取れる**低エネルギー事象が多い。
- ・ミュオンのエネルギーロスを通小評価している→ゲイン変動

# 解析の方針

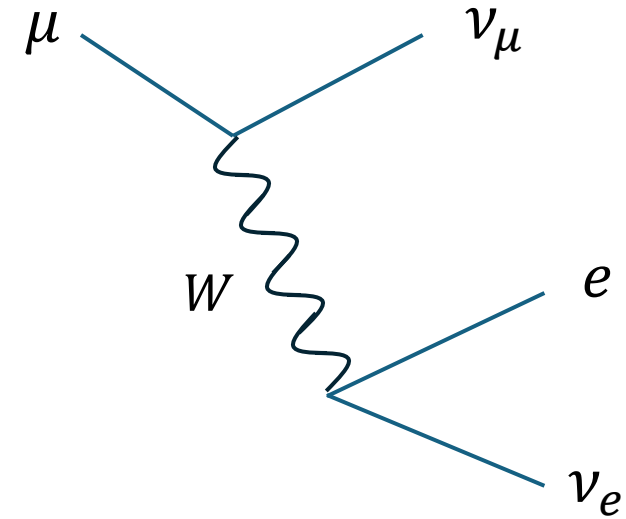
測定したいのは電子のエネルギースペクトル

↔ ミューオンの崩壊が絶対条件

ミューオンの崩壊イベントを探索

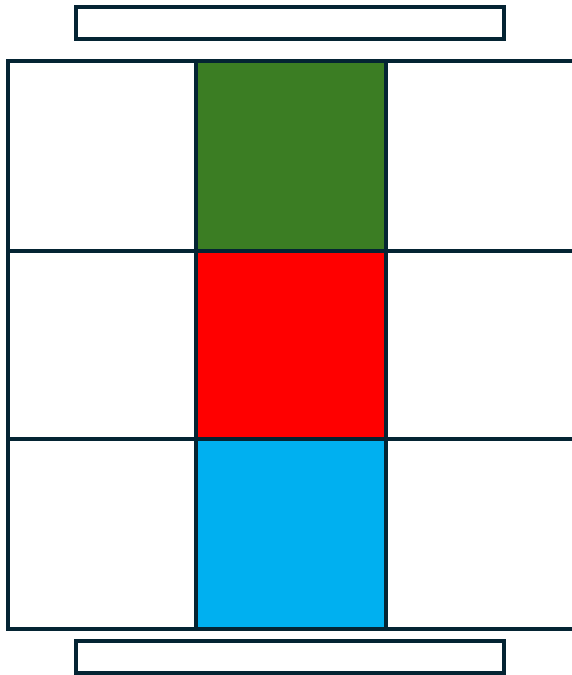


対応する電子信号を探索



# Event Selection

上段/中段/下段 中央のCsIでミュオンが崩壊したイベントを探索



- Vetoロジックの堅牢性



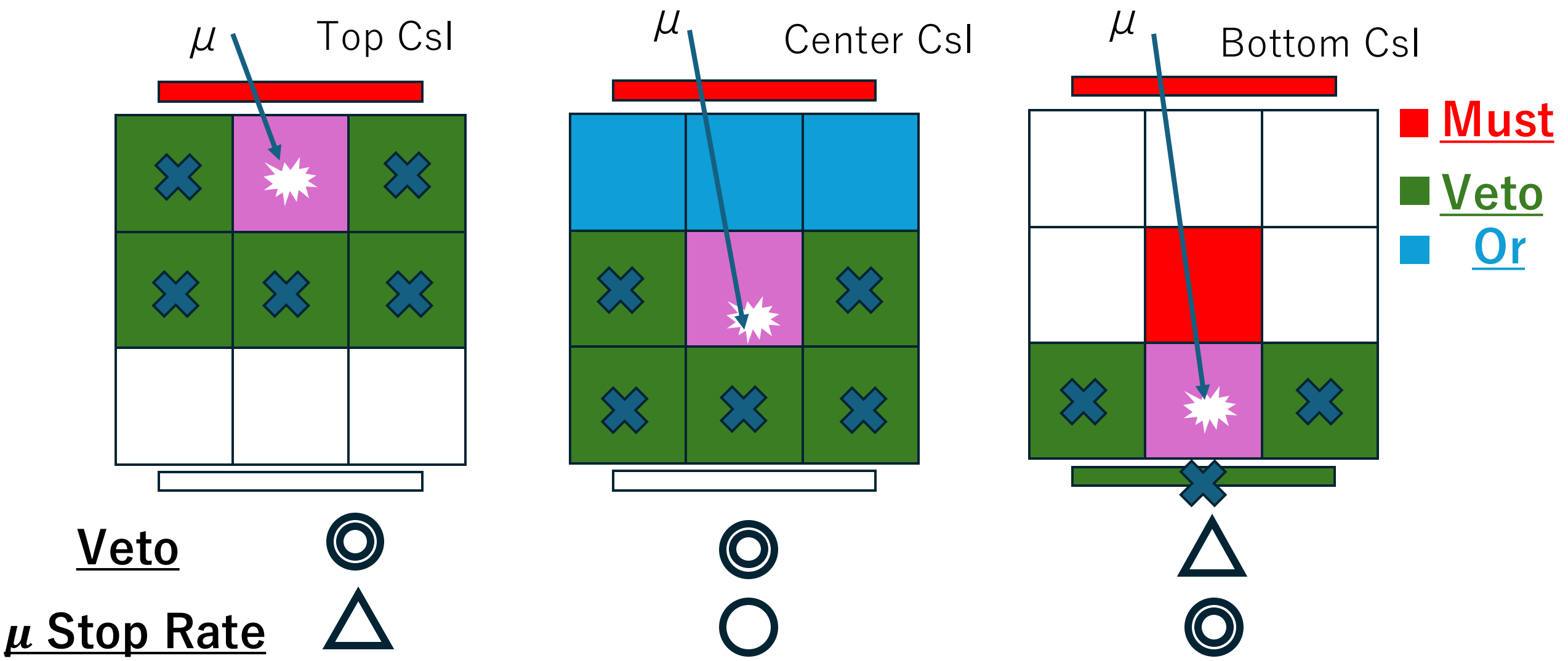
ミュオンの停止を保証

- 放出される電子に対する経路制限



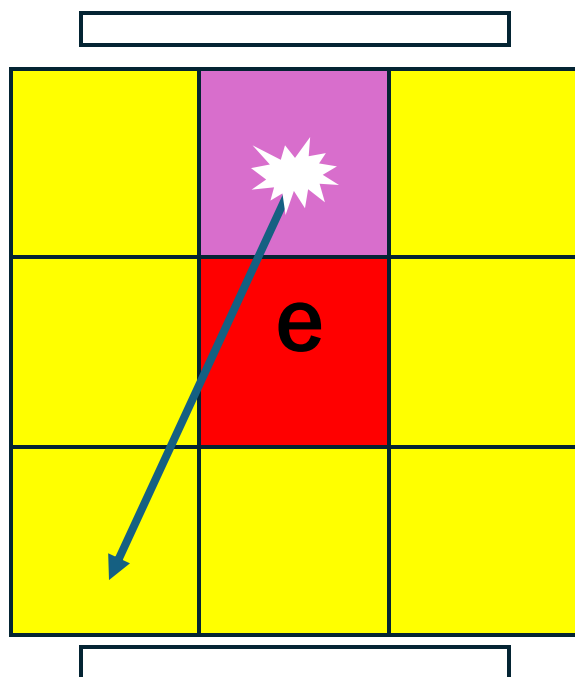
測定精度の向上

解析：ミュオン崩壊まで

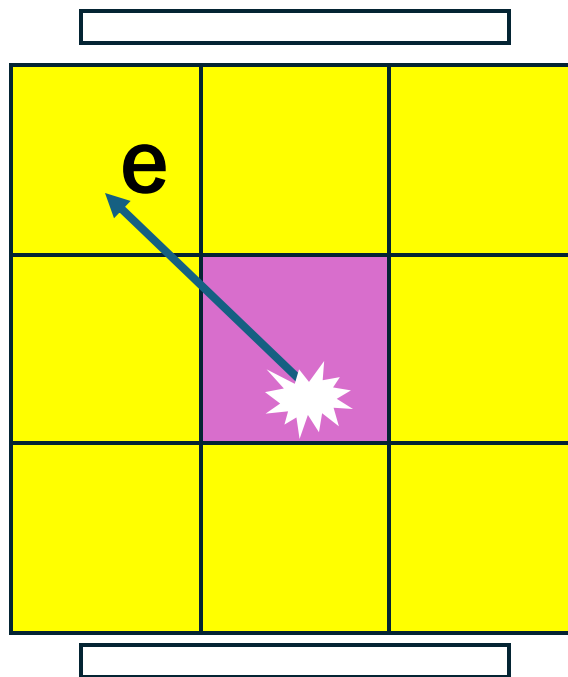


# 解析：放出電子

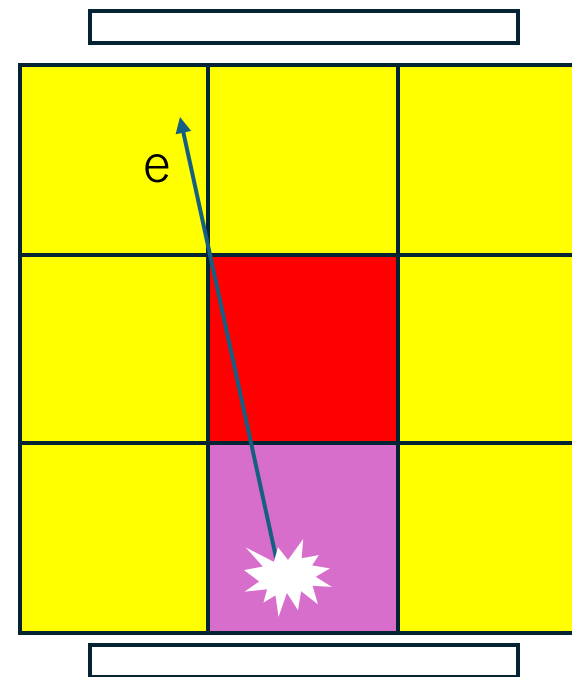
Top Csl



Center Csl



Bottom Csl



■ Must

□ If Any

Acceptance

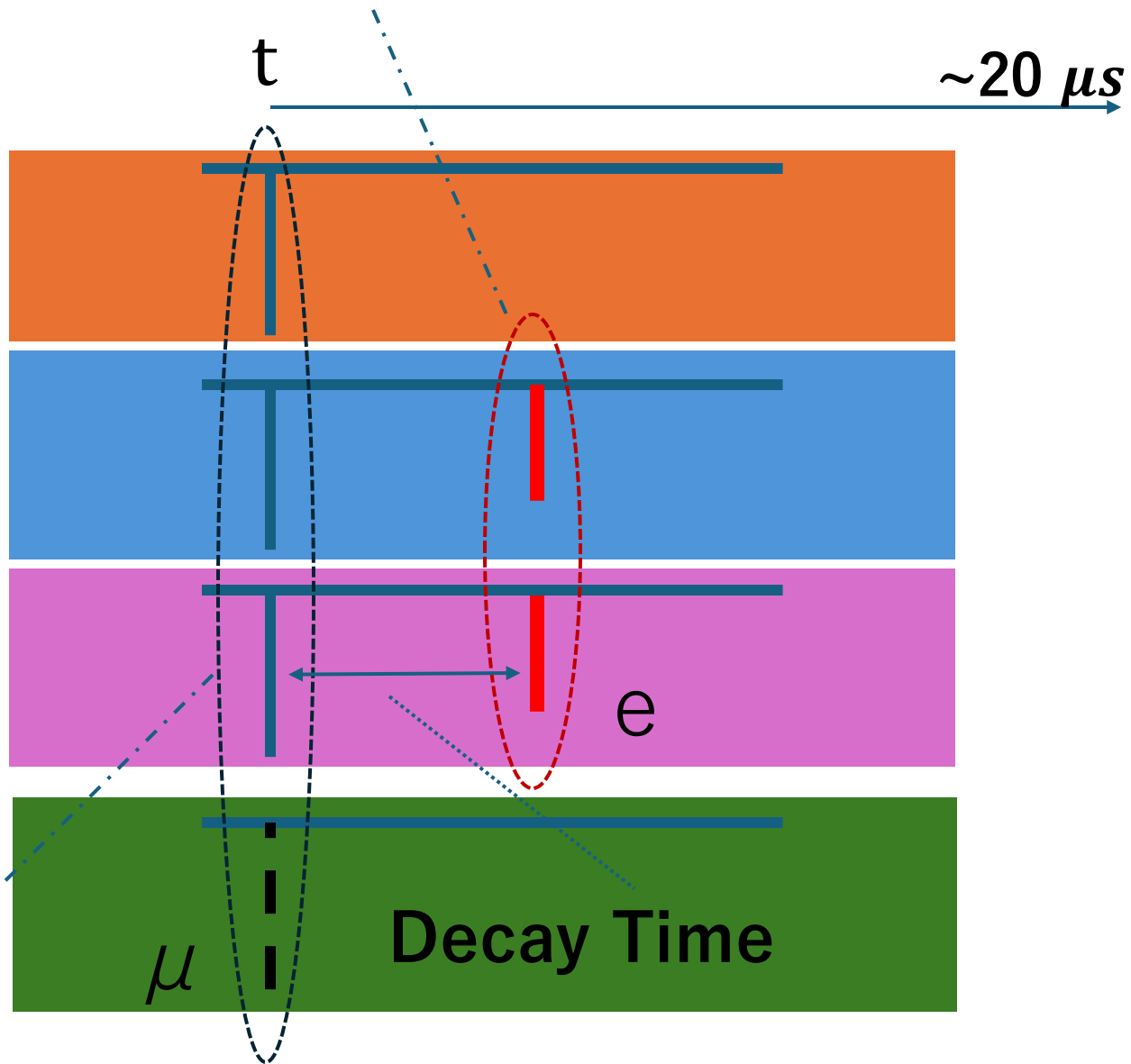
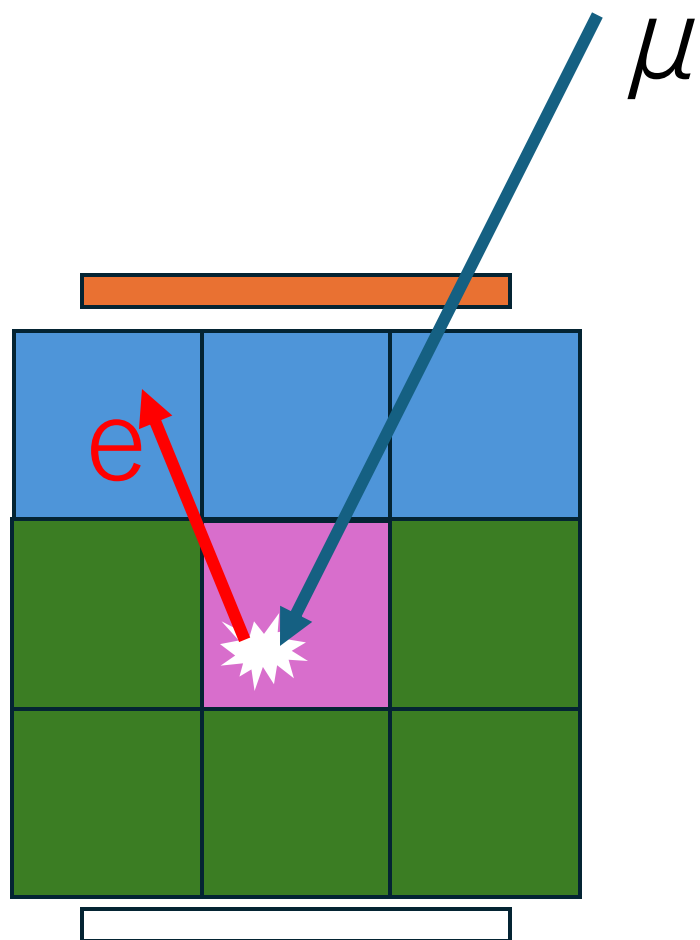


Path Length



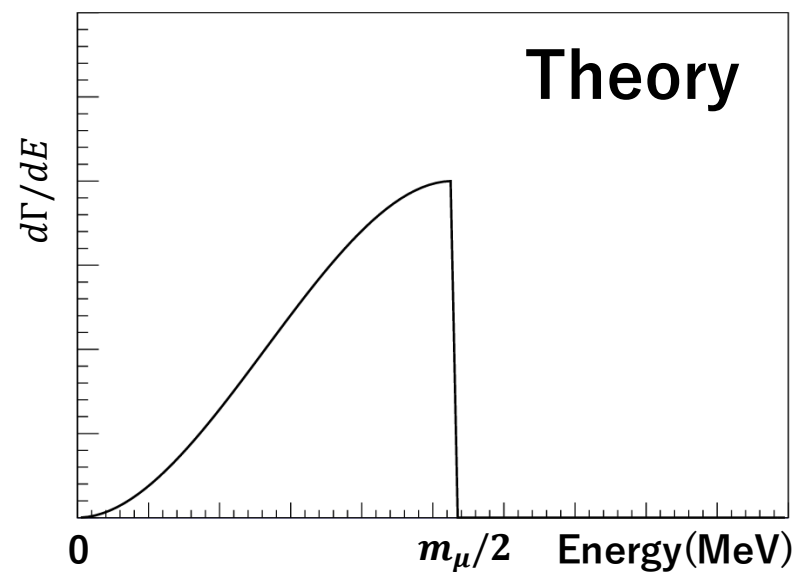
## 2. Electron Delayed Coincidence を探索

### 電子信号探索



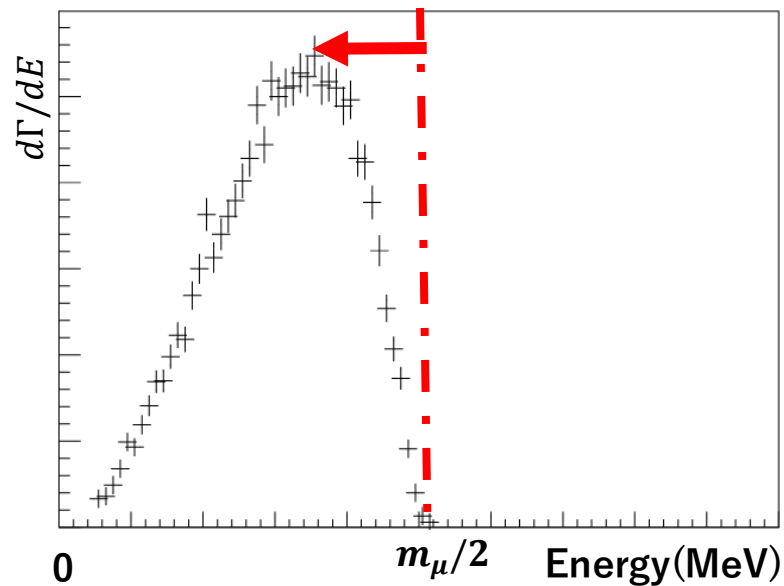
## 1. Muon Coincidence を探索

# 予想スペクトル

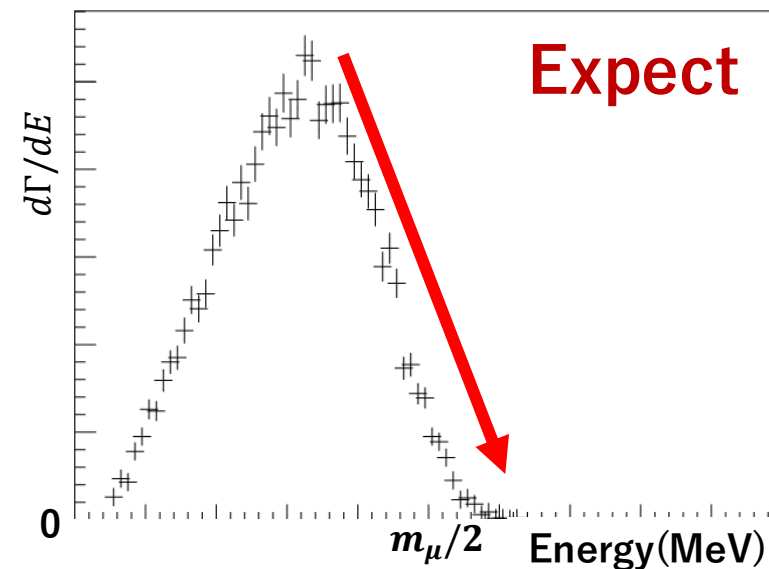


自作  
MC

Escape E



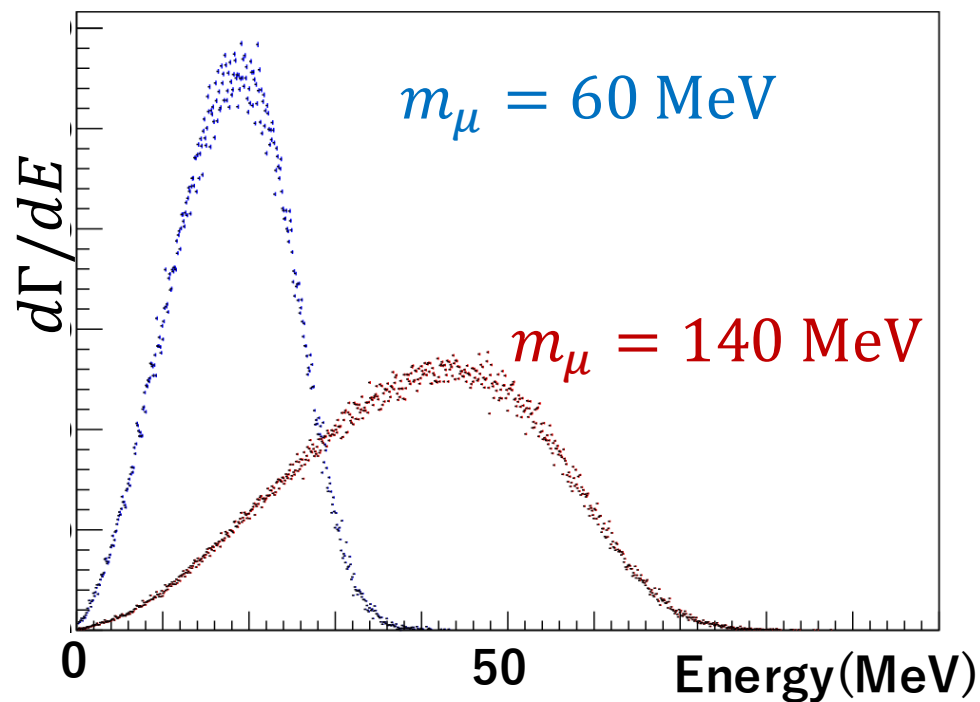
Resolution  
Exp



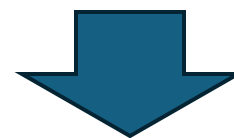
“見えるはずのスペクトル”で測定スペクトルを評価

# ミューオン質量の推定

$$\frac{d\Gamma}{dE} \propto \left(\frac{2E_e}{m_\mu}\right)^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \frac{2E_e}{m_\mu}\right)$$



スペクトルからミューオンの質量がわかる



様々な $m_\mu$ を仮定して予想スペクトルを用意  
比較したい

But... 想定 $m_\mu$ 全てでMC



マシンパワー要求

Theory → Expectを直接推定したい

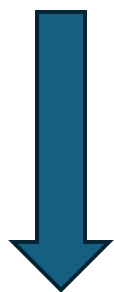


# 検出器応答の推定

ミュオン停止位置情報(MC)



Electrons(Random E)を生成



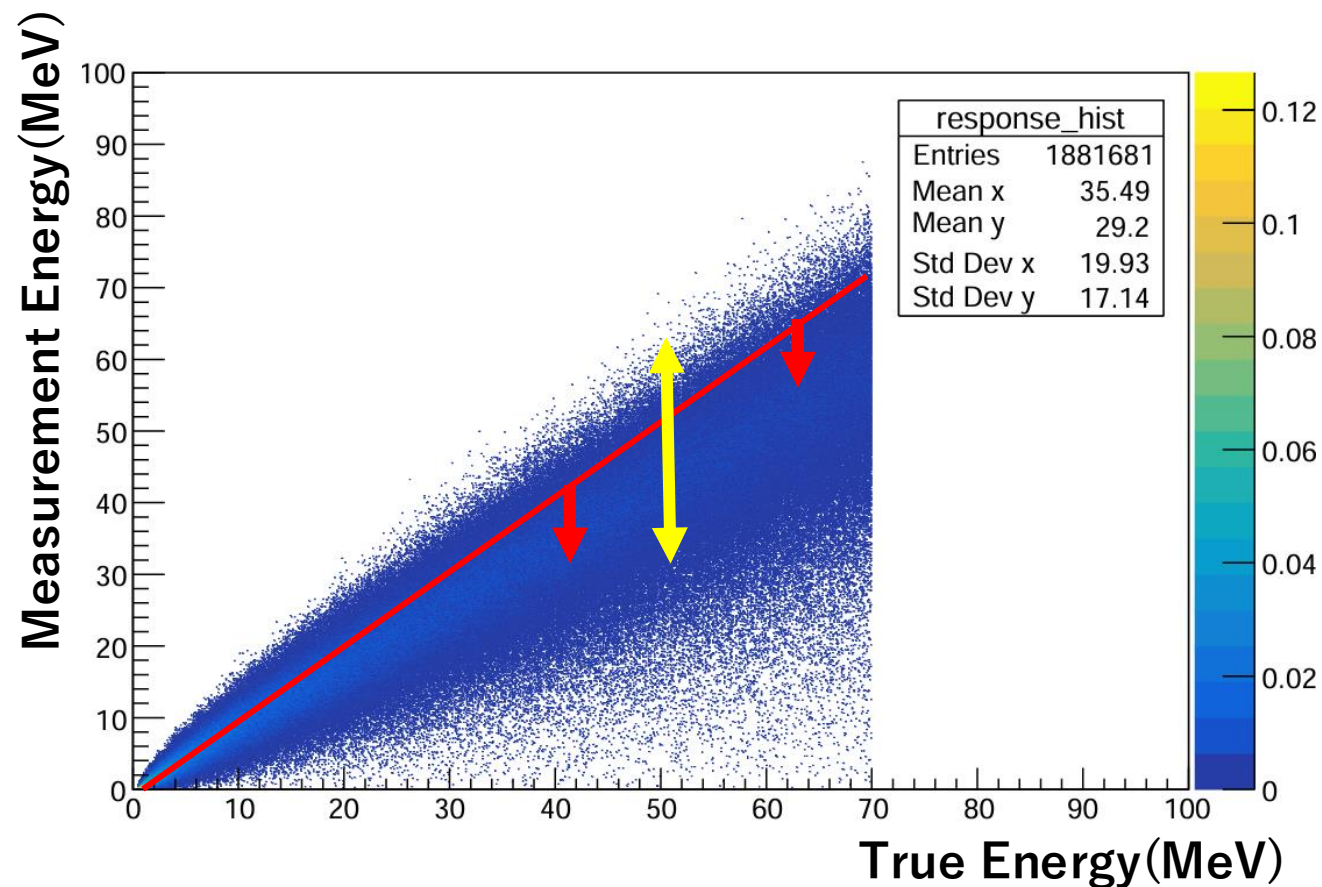
MC

Resolution

Escape E

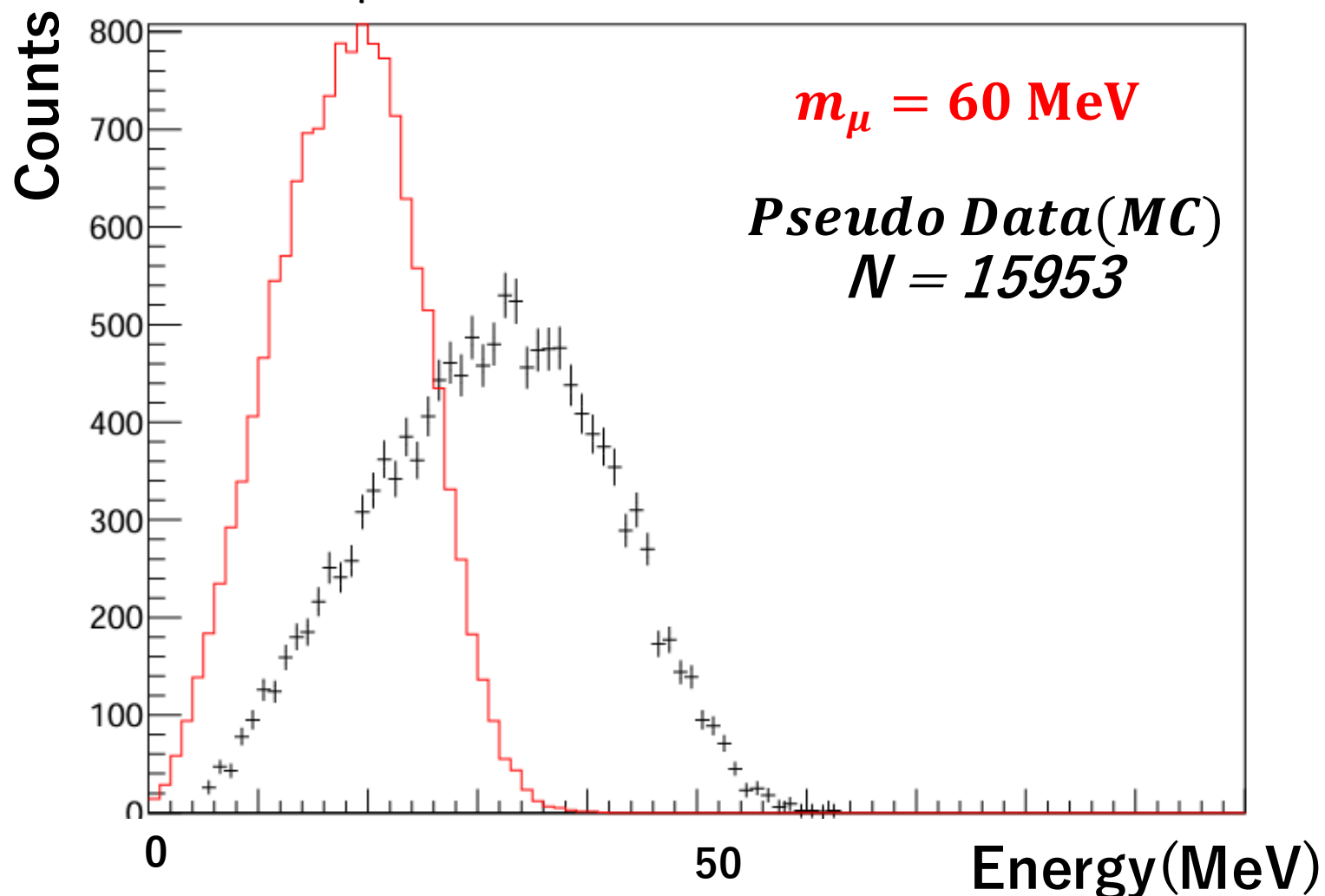
**True→Measurementの変換行列を取得**

**Theory→Expectへの直接変換が可能!!**



# 質量推定のデモンストレーション

Target :  $m_\mu = 105.6$  MeV でのMC Sample



どのミュオン質量が  
尤もらしいか決める

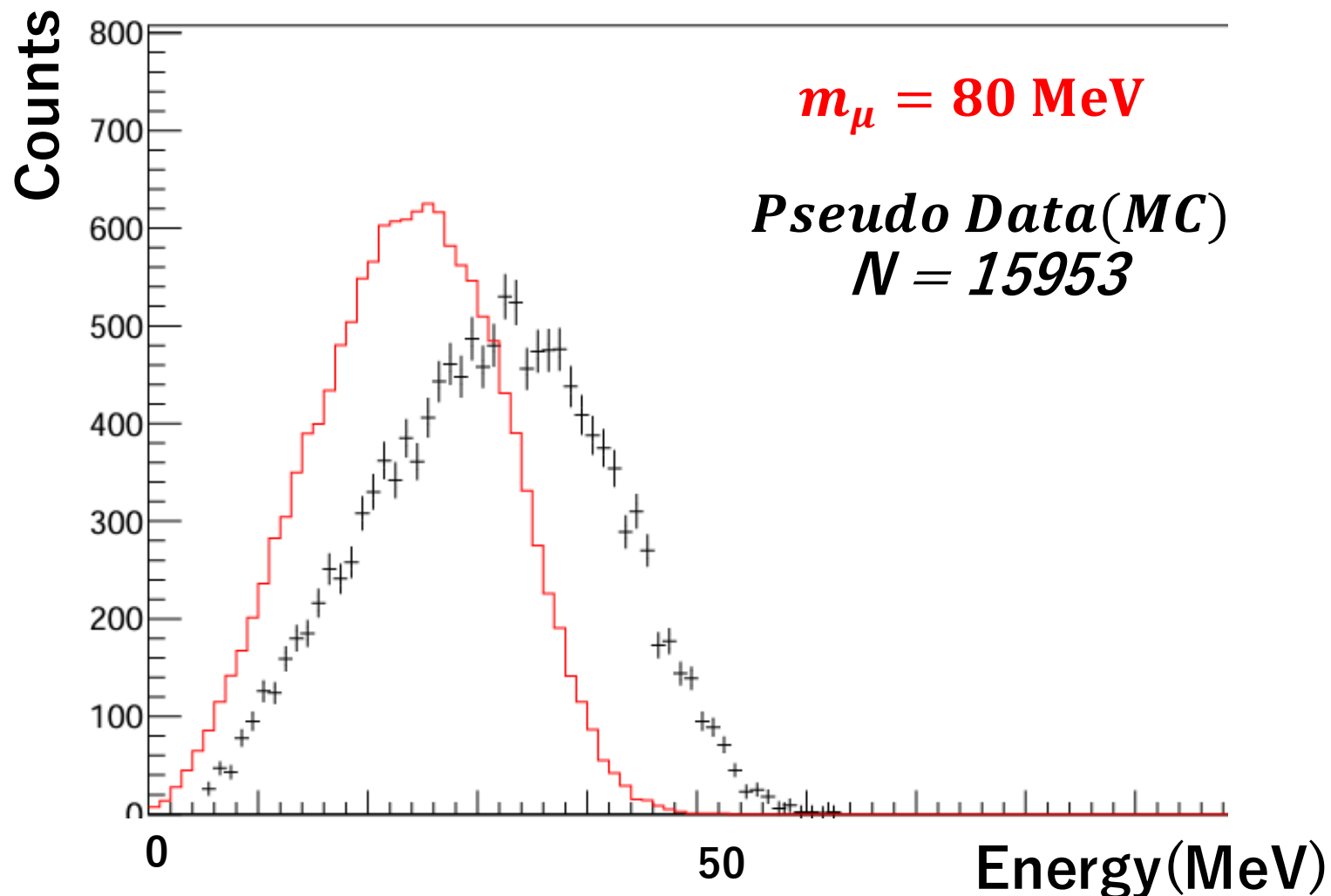


$\chi$  二乗検定

Input  $m_\mu$  が得られるか?

# 質量推定のデモンストレーション

Target :  $m_\mu = 105.6$  MeV でのMC Sample



どのミューオン質量が  
尤もらしいか決める

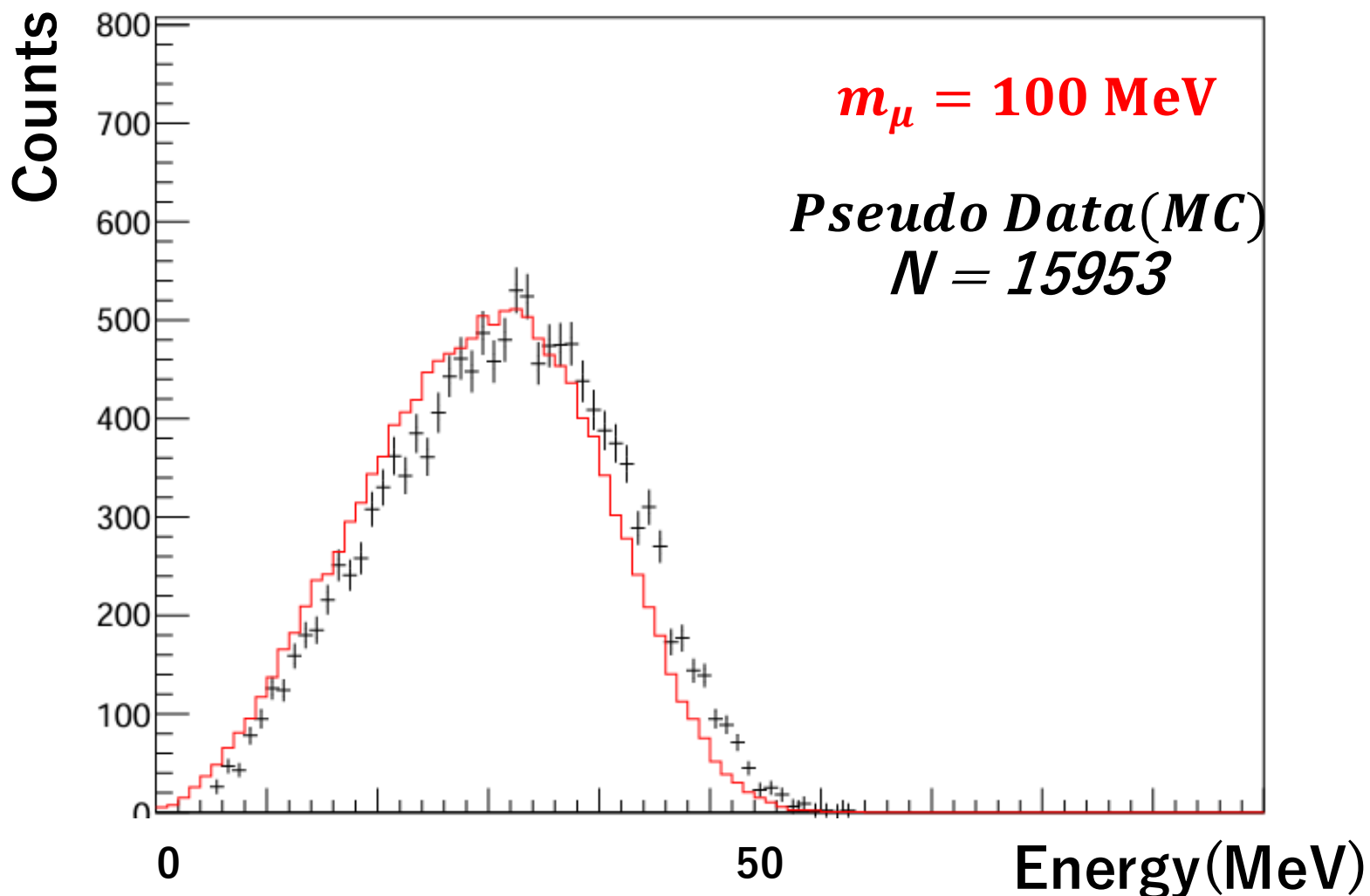


$\chi$  二乗検定

Input  $m_\mu$  が得られるか？

# 質量推定のデモンストレーション

Target :  $m_\mu = 105.6$  MeV でのMC Sample



どのミュオン質量が  
尤もらしいか決める

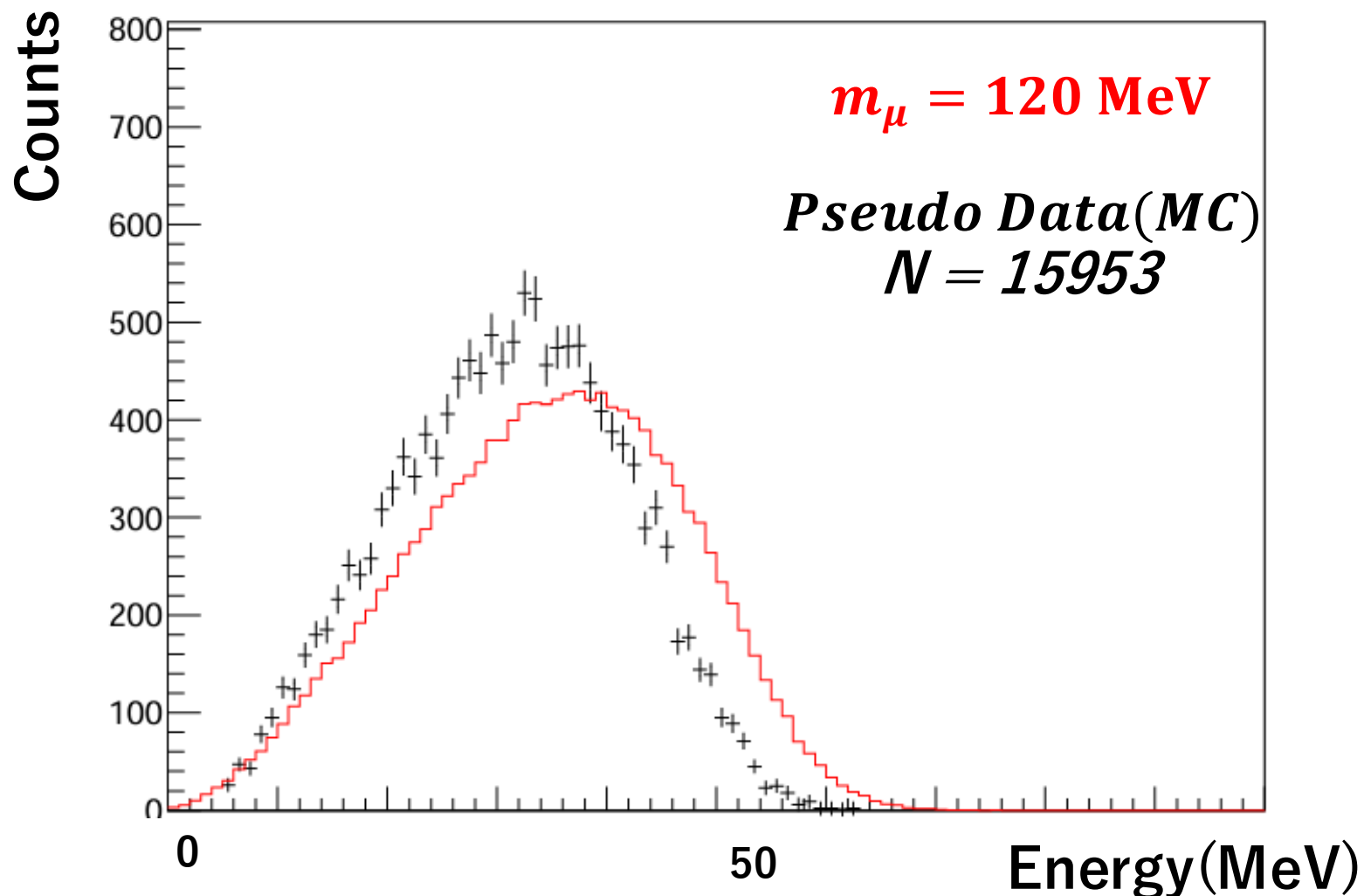


$\chi$  二乗検定

Input  $m_\mu$  が得られるか?

# 質量推定のデモンストレーション

Target :  $m_\mu = 105.6$  MeV でのMC Sample



どのミュオン質量が  
尤もらしいか決める

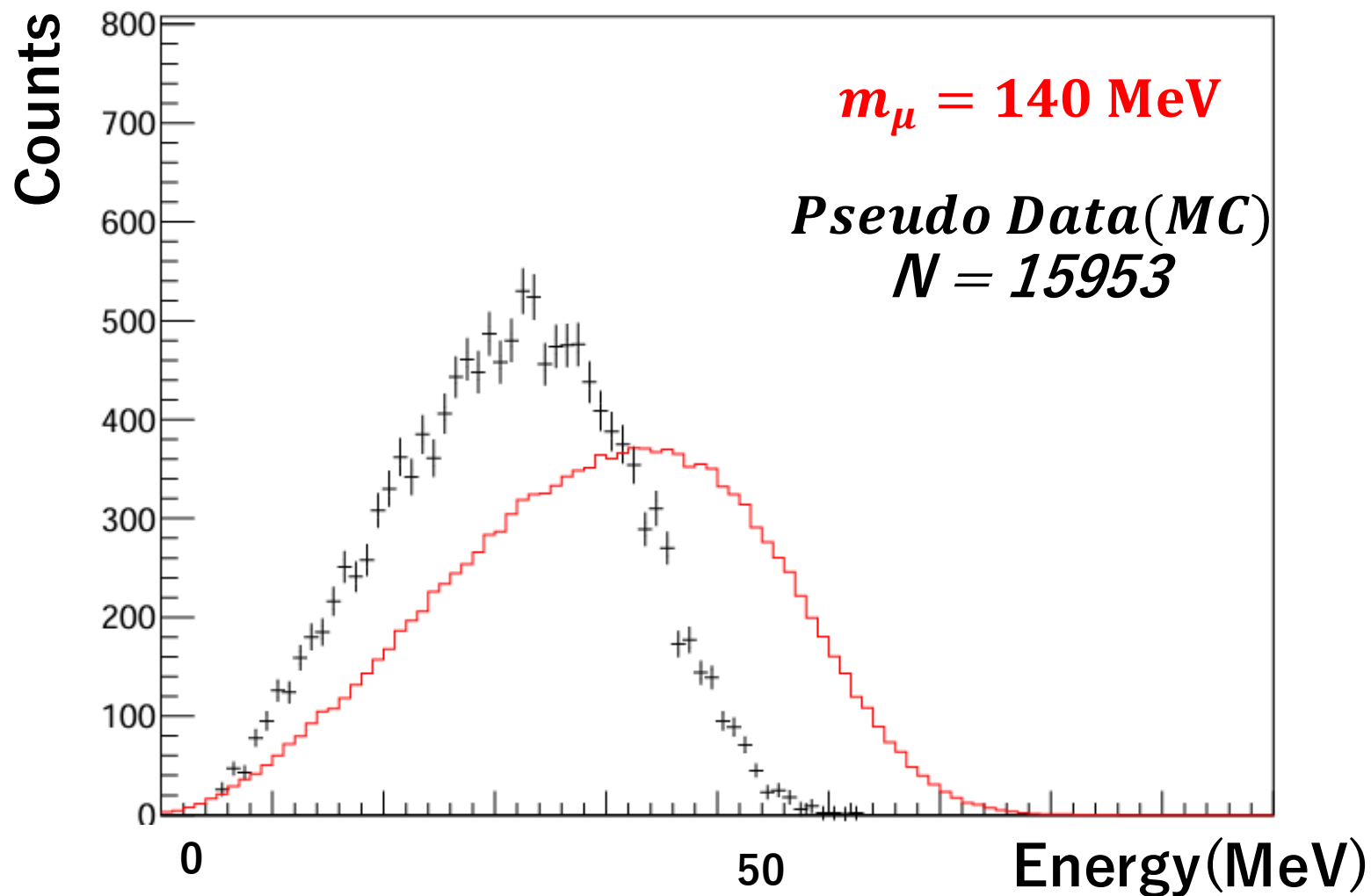


$\chi$  二乗検定

Input  $m_\mu$  が得られるか？

# 質量推定のデモンストレーション

Target :  $m_\mu = 105.6$  MeV でのMC Sample



どのミューオン質量が  
尤もらしいか決める



$\chi$  二乗検定

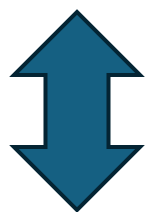
Input  $m_\mu$  が得られるか？

# 質量推定

Stop Center Csl

Estimate :

$105.400 \pm 0.014$  MeV

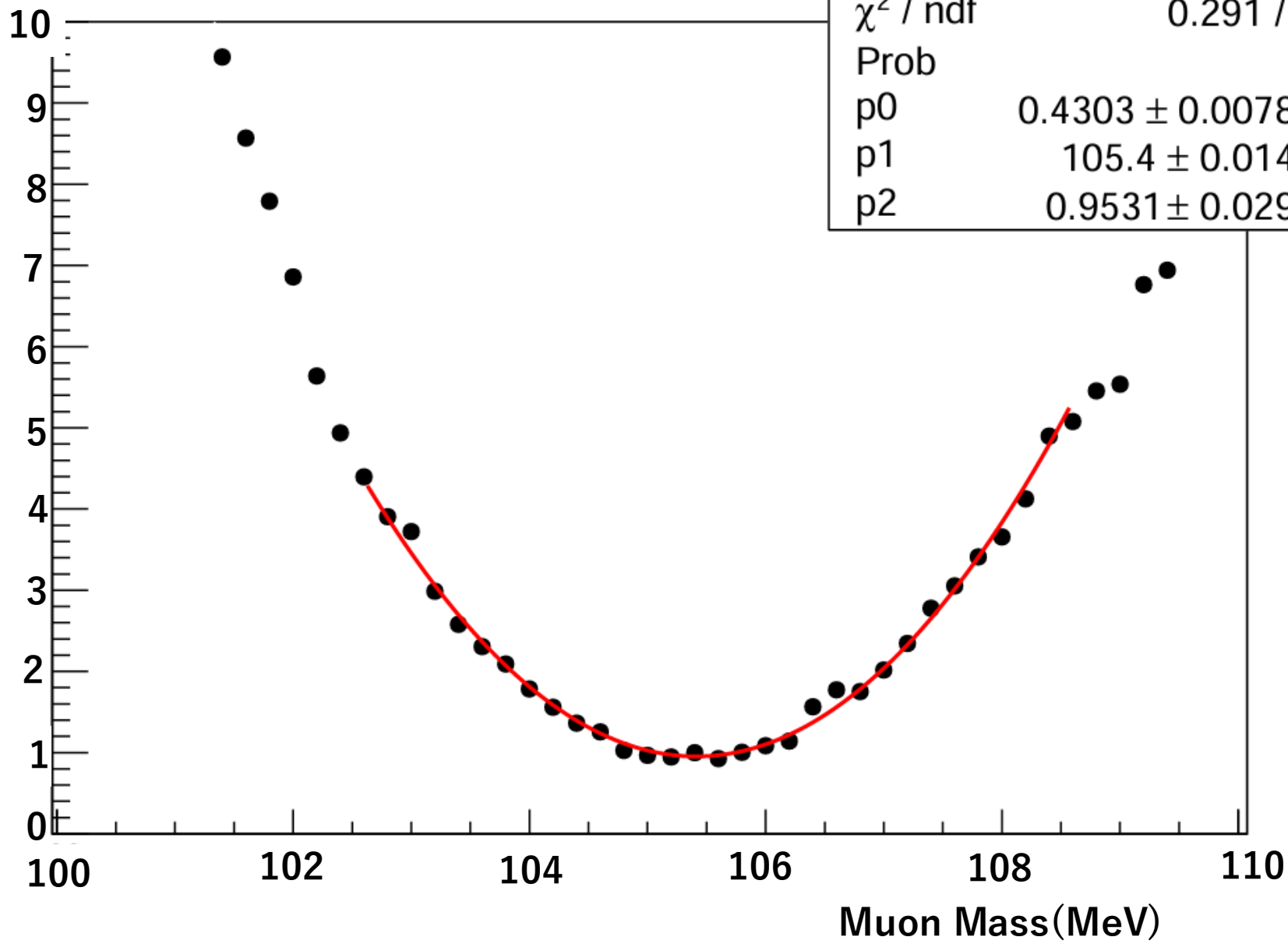


Input : 105.6 MeV

MeVオーダーで一致

系統誤差として  
 $\pm 0.2$  MeV

Chi2/NDF



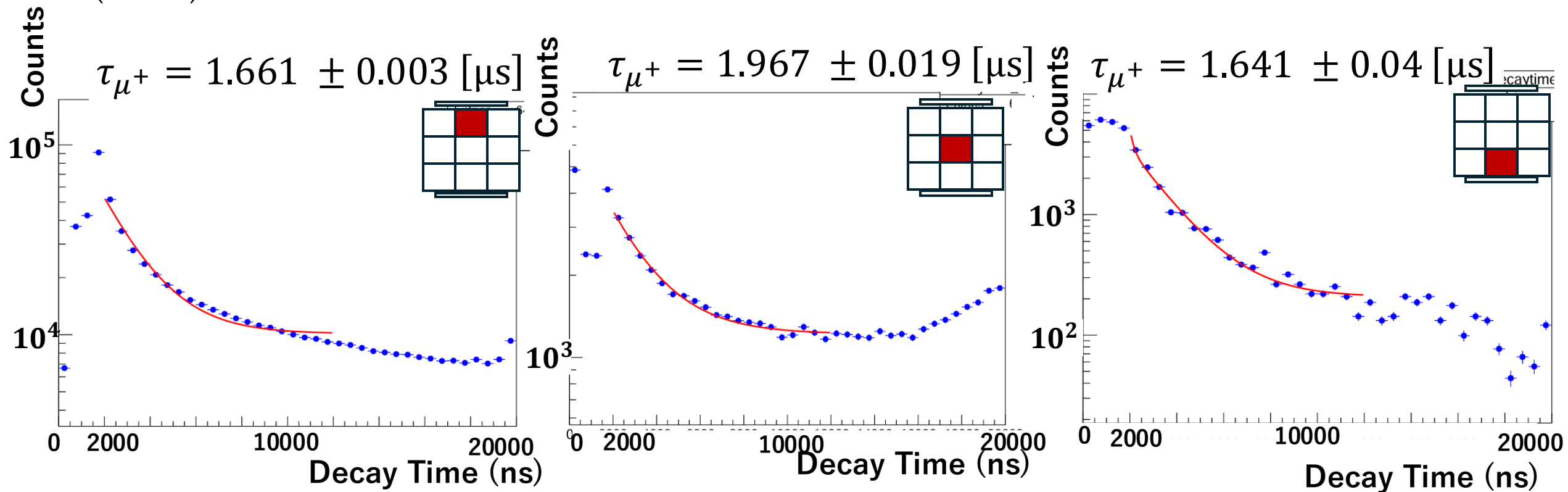
Result



## 寿命

$$\tau_{\mu^+} = 2.1969811 \pm 0.000022 \mu\text{s} \quad y = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^+}}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\mu^-}}\right) + C$$

(PDG)



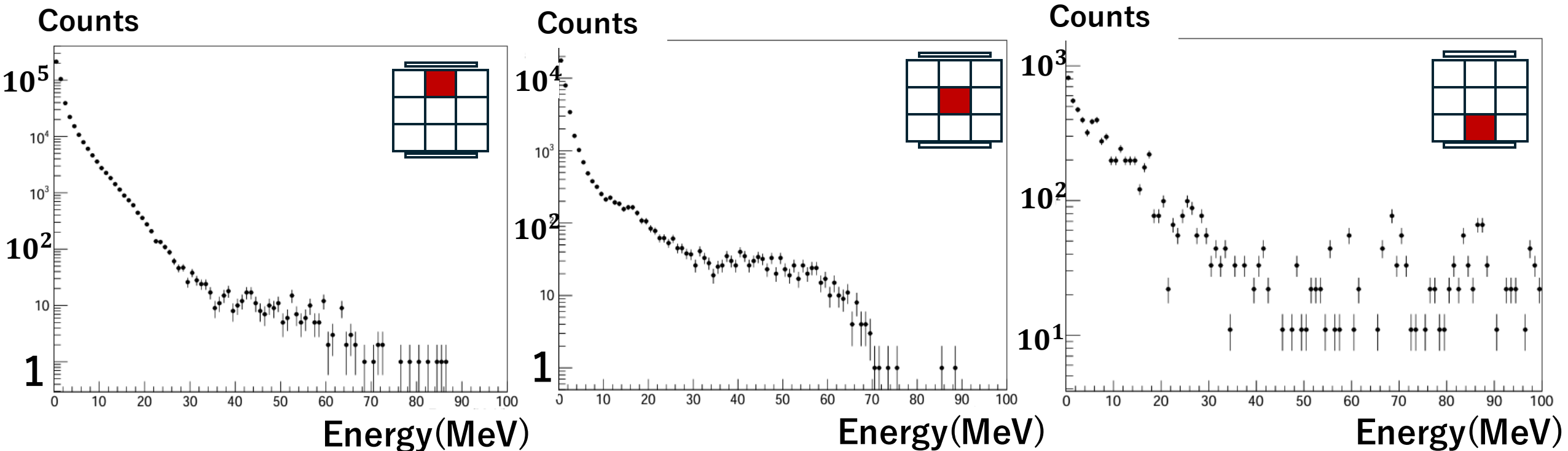
どのイベントセレクションでも寿命が短く見えている



信号に付随するような時間的ノイズを示唆？

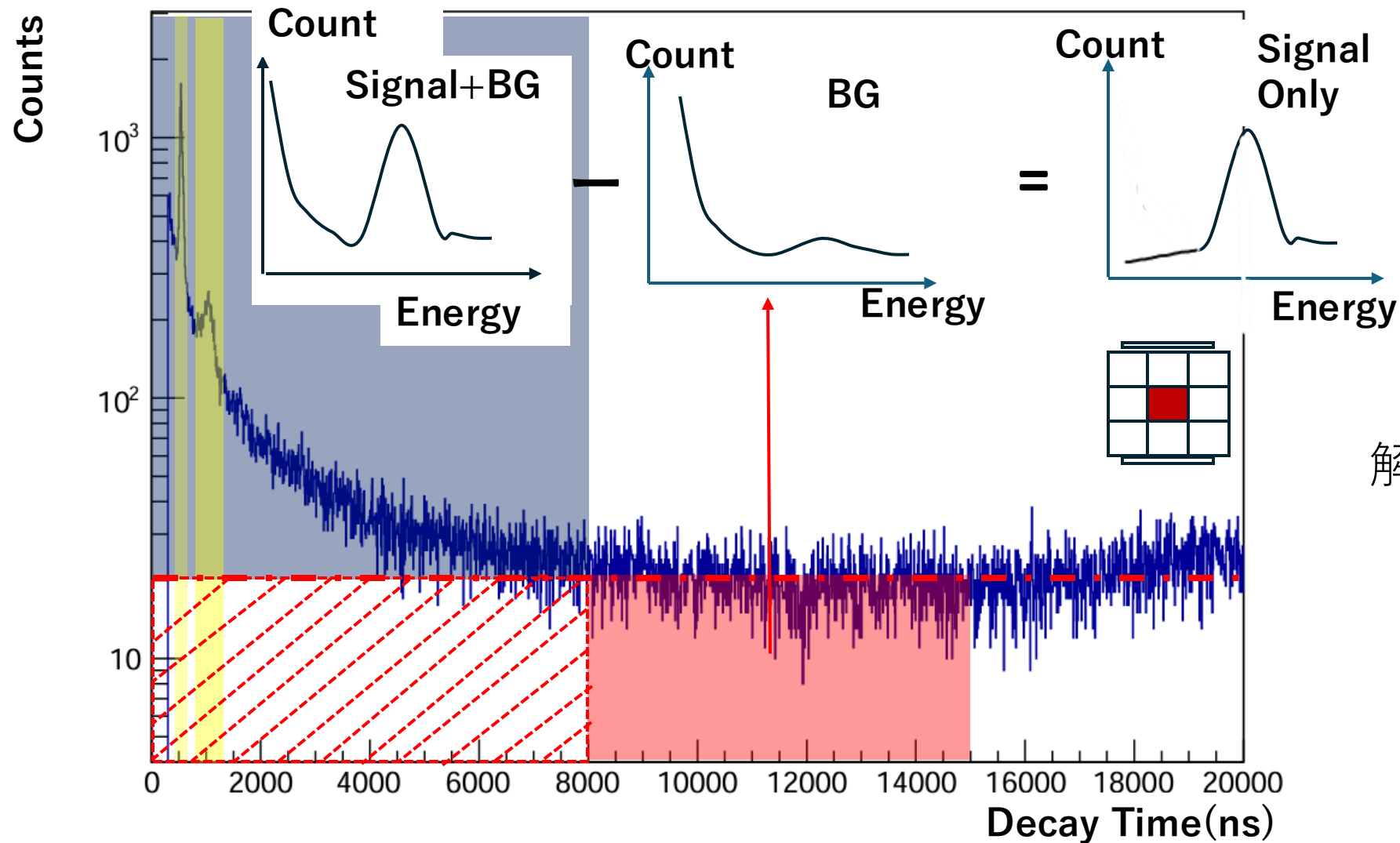
# 電子のエネルギースペクトル

● Signal + BG

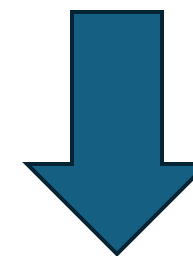


まだ、電子のエネルギー分布は見えていない

# Background Estimate



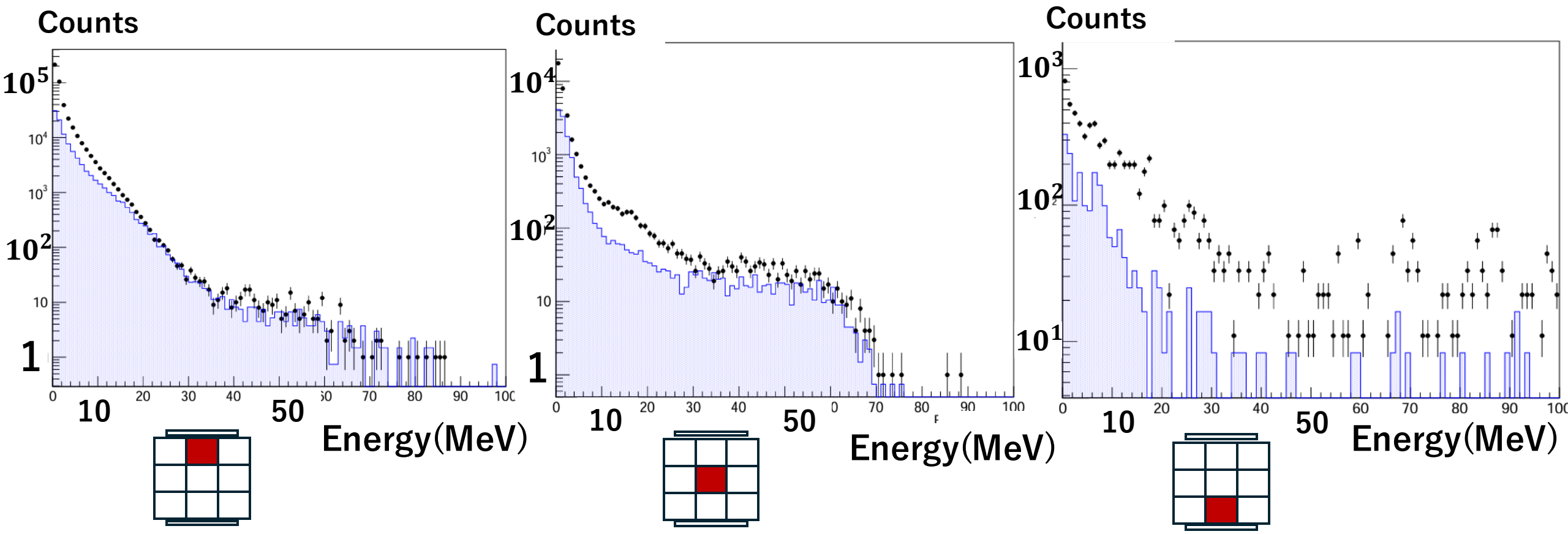
$4\tau_{\mu^+}$ 以降は  
BGが支配的



**BG Region**として  
解析範囲のBG除去に使用

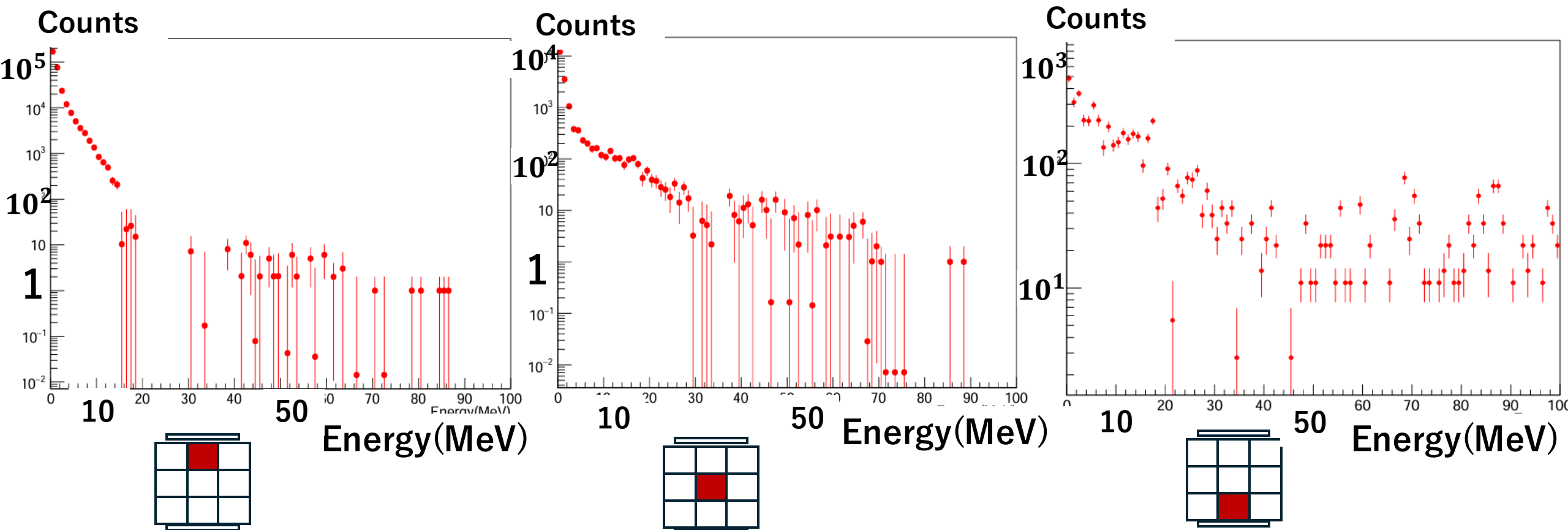
# 電子のエネルギースペクトル + BG

● Signal + BG      ● BG



# 電子のエネルギースペクトル (BGなし)

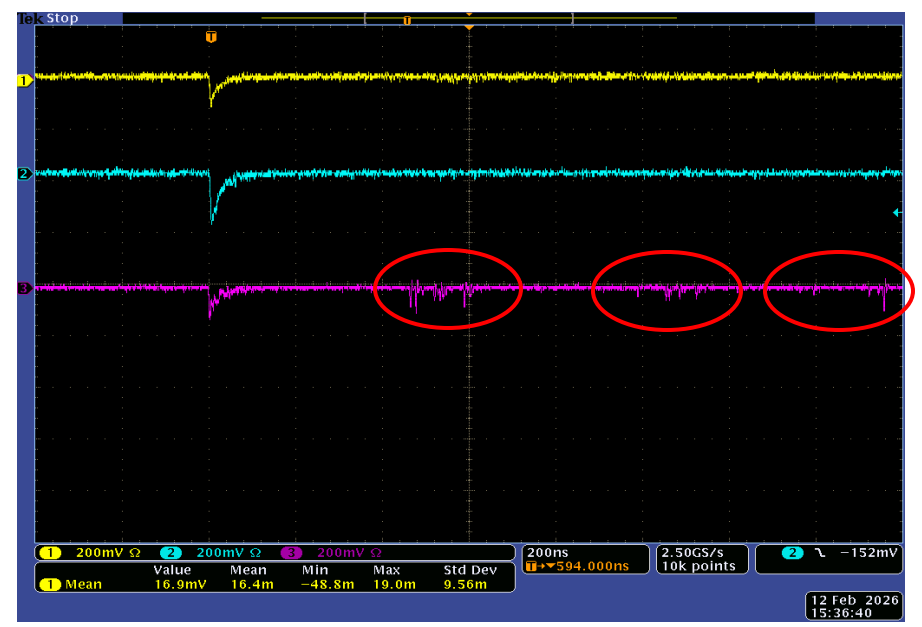
● Signal



期待していたような電子のエネルギー分布は見えていない...

# なぜ電子のエネルギー分布が見えない？

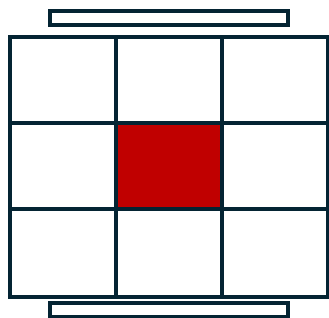
CsI  
上段中央  
CsI  
中段中央  
CsI  
下段中央



CsI下段中央：広範囲にアフターパルスが存在  
 → 低エネルギー成分として見えている？

その他のイベントセレクション  
 → ミューオン信号の直後に何らかのノイズ？

## イベント再探索

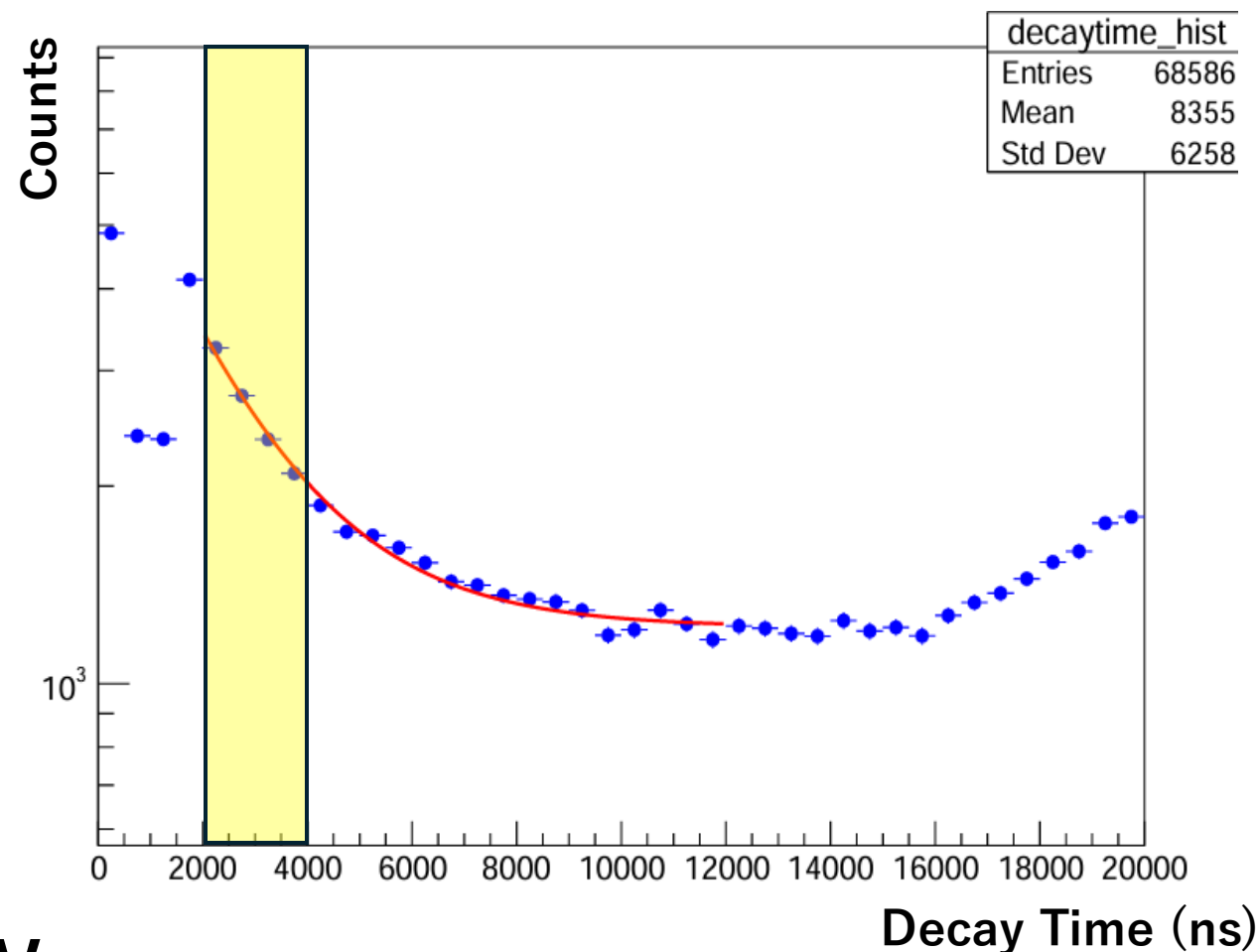


$$\tau_{\mu^+} = 1.967 \pm 0.019 [\mu\text{s}]$$

➡ それらしい値が見えている

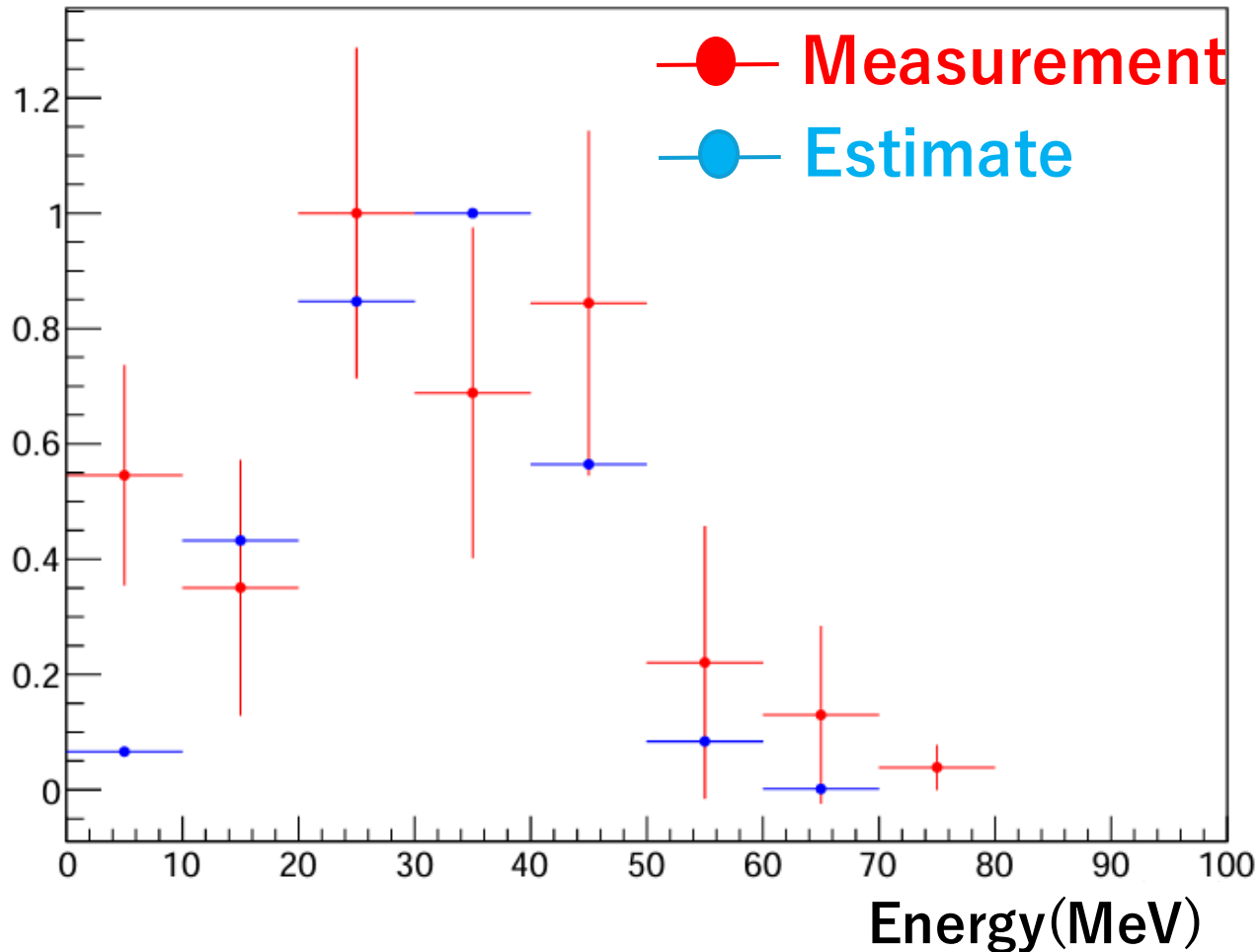
Signal-BG Ratio が良い領域で  
さらに厳しく Event Selection

**CsI#5の電子信号に閾値：5 MeV**



## Re : Result

Ratio

 $N = 147$ 

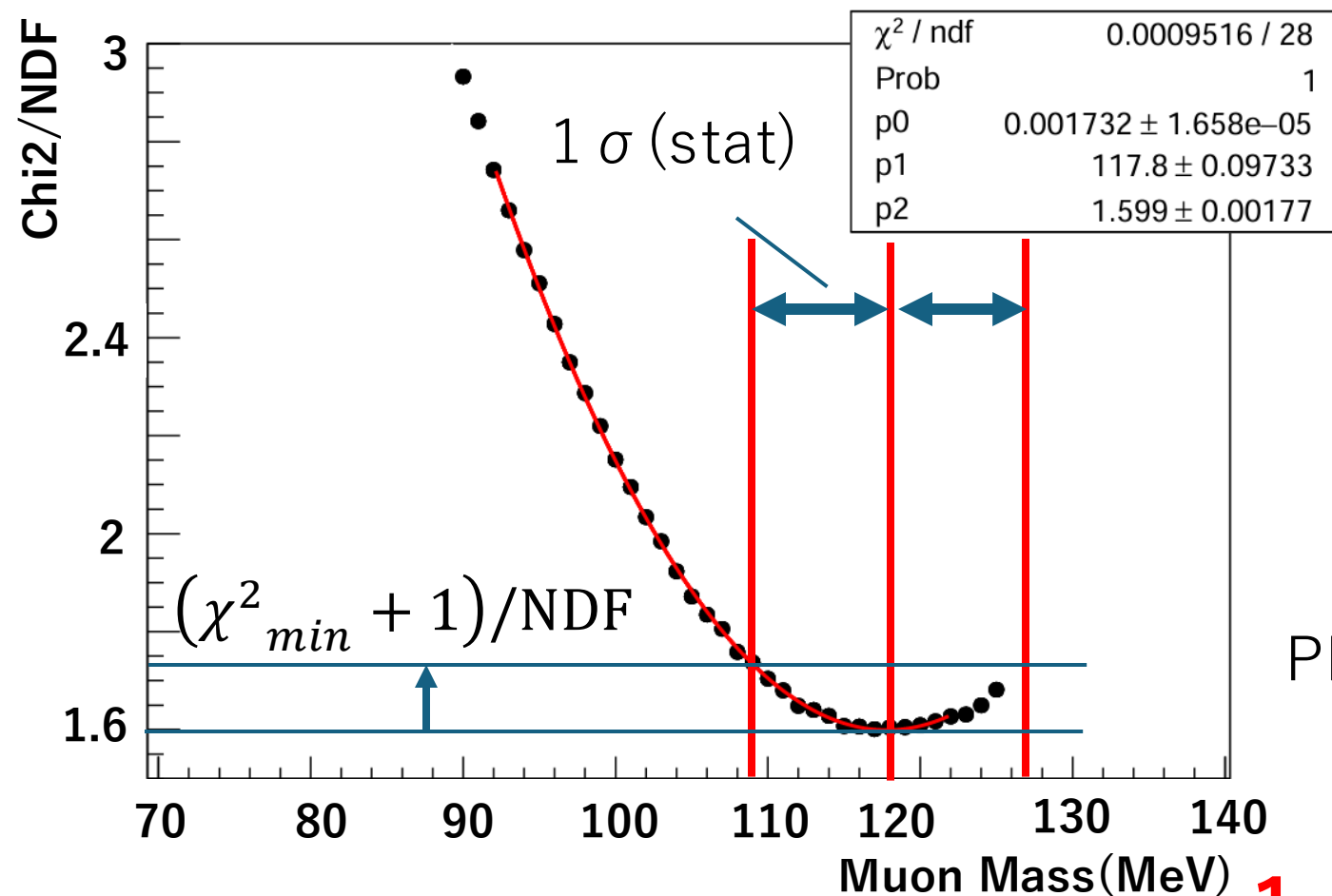
統計は少ない...

But.. 誤差の範囲で一致！！



# ミューオンの質量推定

cf. Wilks's Theory



$$m_\mu = 117.8 \pm 9.2(\text{stat}) \pm 0.2(\text{sys}) \text{ [MeV]}$$

PDG :  $105.6583755 \pm 0.0000023 \text{ MeV}$

1.4σの範囲で一致している！！

# Conclusion

- CsIシンチレーターを用いてミュオンの崩壊に伴う電子のエネルギーを測定した
- MIPの宇宙線ミュオンを用いてエネルギー較正を行った
- 複数のシンチレーターを組み合わせてVetoを構成することにより、特定領域でのミュオンの停止を保証した
- 電子のエネルギースペクトルが誤差の範囲で理論からの予想と一致した
- ミュオンの質量は $117.8 \pm 9.2 \pm 0.2$  MeVと見積もられた

Back Up

# 測定誤差

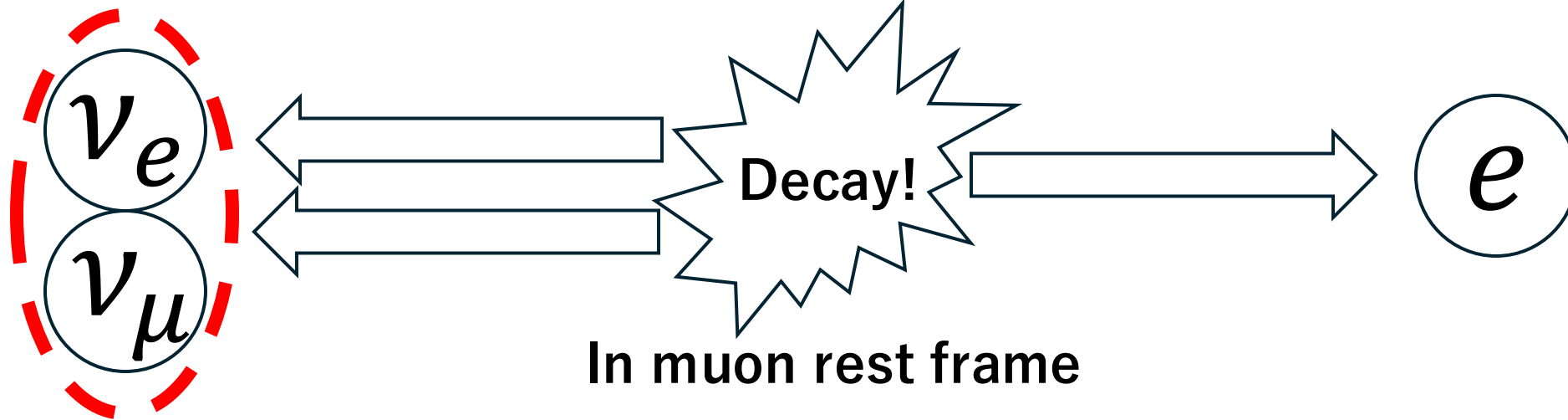
統計誤差： $\chi^2$ に対するフィッティングの誤差  $\pm 0.1 \text{ MeV}$

最小 $\chi^2$ をとる質量パラメータの誤差  $\pm 9.2 \text{ MeV}$

系統誤差：質量推定手法に伴う誤差  $+ 0.2 \text{ MeV}$

# 崩壊電子スペクトル

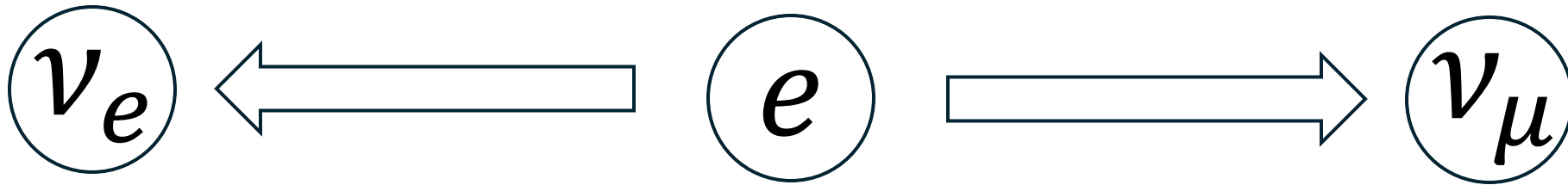
- 電子の持つエネルギーが最大になるのは以下のような時



- ニュートリノは軽いので両方ともほぼ光速で動く  
→ 二つのニュートリノをひとまとめで扱い、二体崩壊のように考えると、電子はミューオン質量の半分相当のエネルギーを持って行くはず。  
→ **電子の質量も無視すれば、電子の運動エネルギーはほぼ  $m_\mu/2$  !**

# 崩壊電子スペクトル

- 電子の持つエネルギーが最小になるのは以下のような時



In muon rest frame

- 二つのニュートリノが同じ運動量で正反対に放出されなくてはならない  
→ 位相空間的に強い制約を受けるため、電子が少ない運動エネルギーで飛んでいく事象は起きにくい！

# 制動放射

- CsIのCritical Energy  $\sim 10\text{MeV}$

→ミューオン崩壊後に出る電子は、そのエネルギーの多くを制動放射で失っていく。

# 光子に対する反応断面積

- 光子の反応断面積は、原子番号 $Z$ に大きく依存する。

→ 対生成の断面積

$$\sigma_{\text{pair production}} \propto Z^2$$

コンプトン散乱の断面積

$$\sigma_{\text{Compton Scattering}} \propto Z$$

光電効果の断面積

$$\sigma_{\text{photoelectric effect}} \propto Z^5$$

- CsIの $Z$ は、プラスチックの $Z$ のおよそ5倍

→ **CsIを使うことで、 $\sigma_{\text{pair production}}$  は25倍、**

**$\sigma_{\text{Compton Scattering}}$  は5倍、 $\sigma_{\text{photoelectric effect}}$  は3125倍になる！**

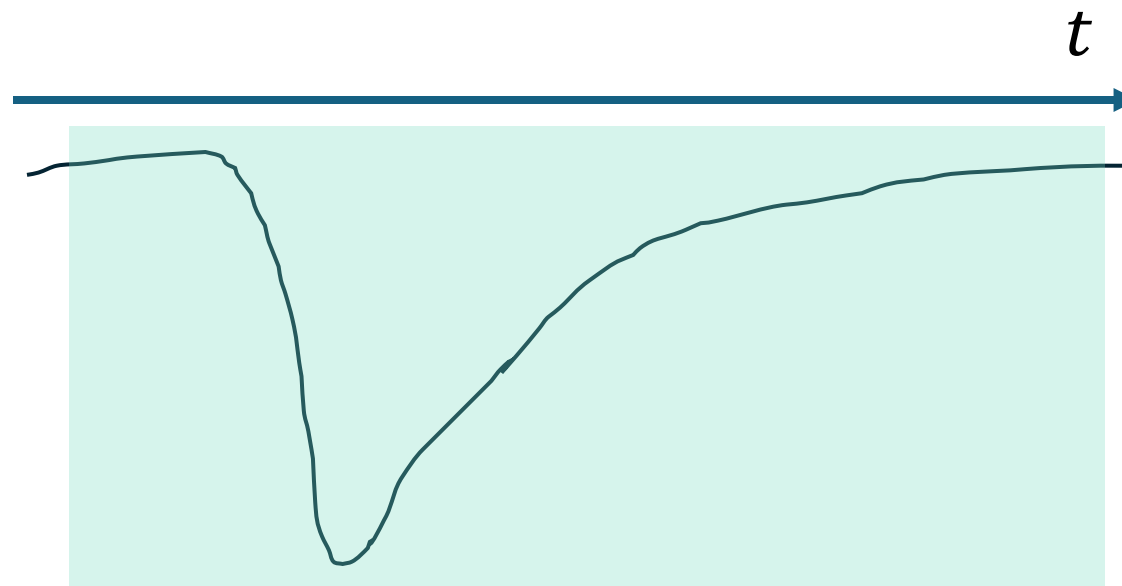
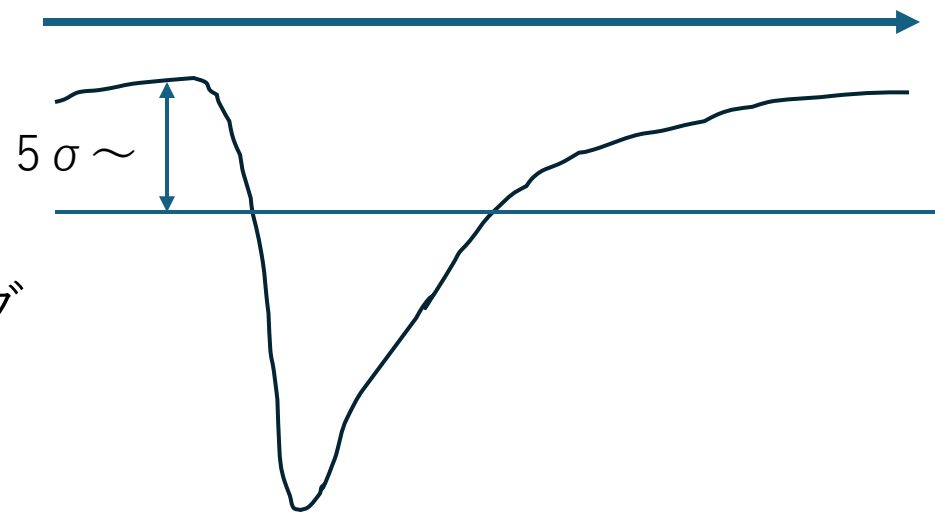


# 波形解析

ヒット：PMTごとに設定した閾値を超えた信号

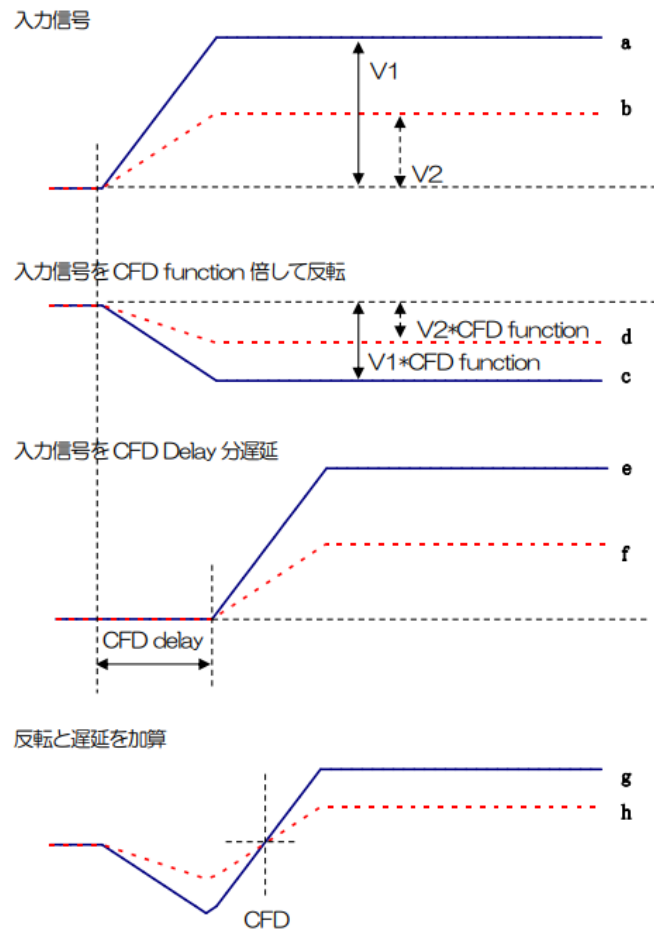
ヒット時間：コンスタントフラクショナルタイミング

波形積分区間：ヒット時間の8ナノ秒前から、  
200ナノ秒間



# コンスタントフラクションタイミング

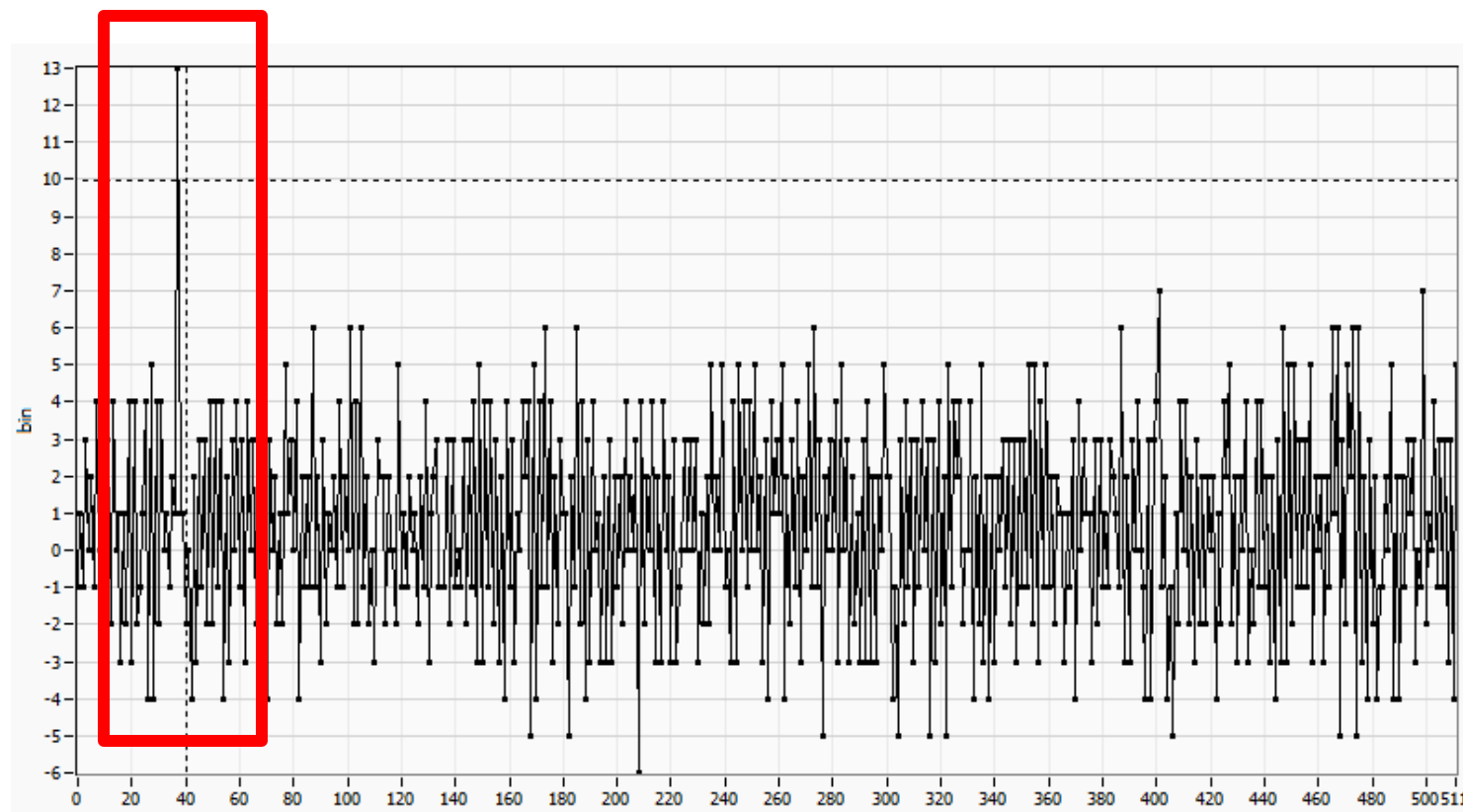
「CFD」：コンスタントフラクションタイミング (Constant Fraction Discriminator Timing)



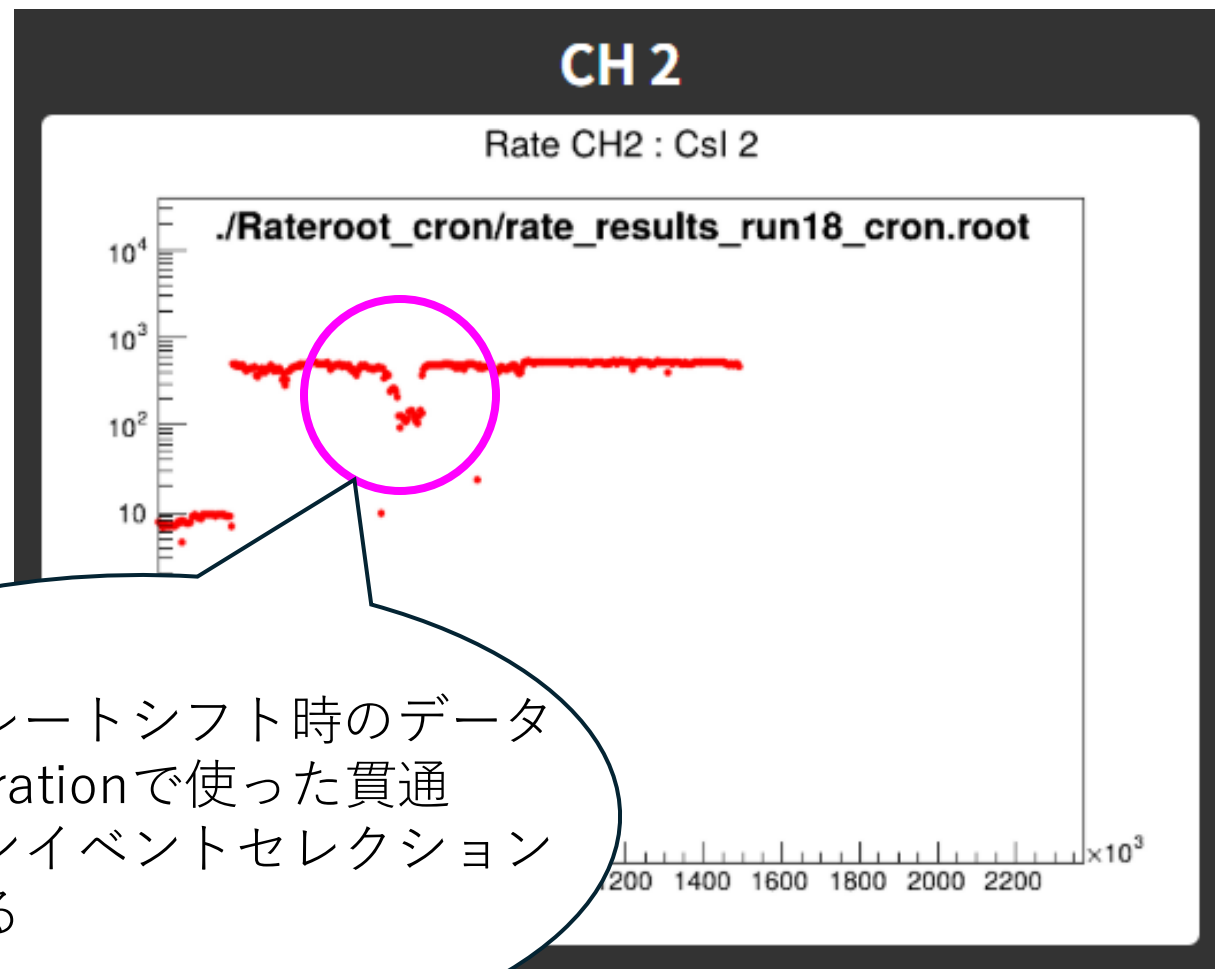
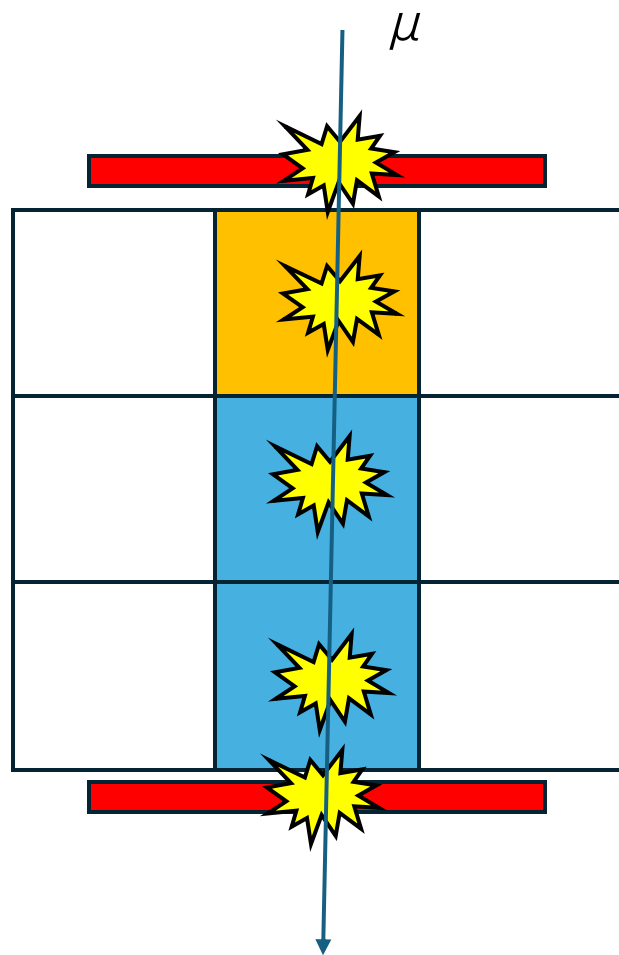
入力信号から、立ち上がり時間  
にのみ依存する時間の基準を得  
る手法。

# 閾値のエネルギー換算

- ・右のような閾値にギリギリで引っかけた波形をchごとに数個集め、実際に波形積分値を計算してみると、平均的には3~12の範囲に収まった。  
→エネルギーに較正してみると、おおよそ200keV~0.2MeVに相当。



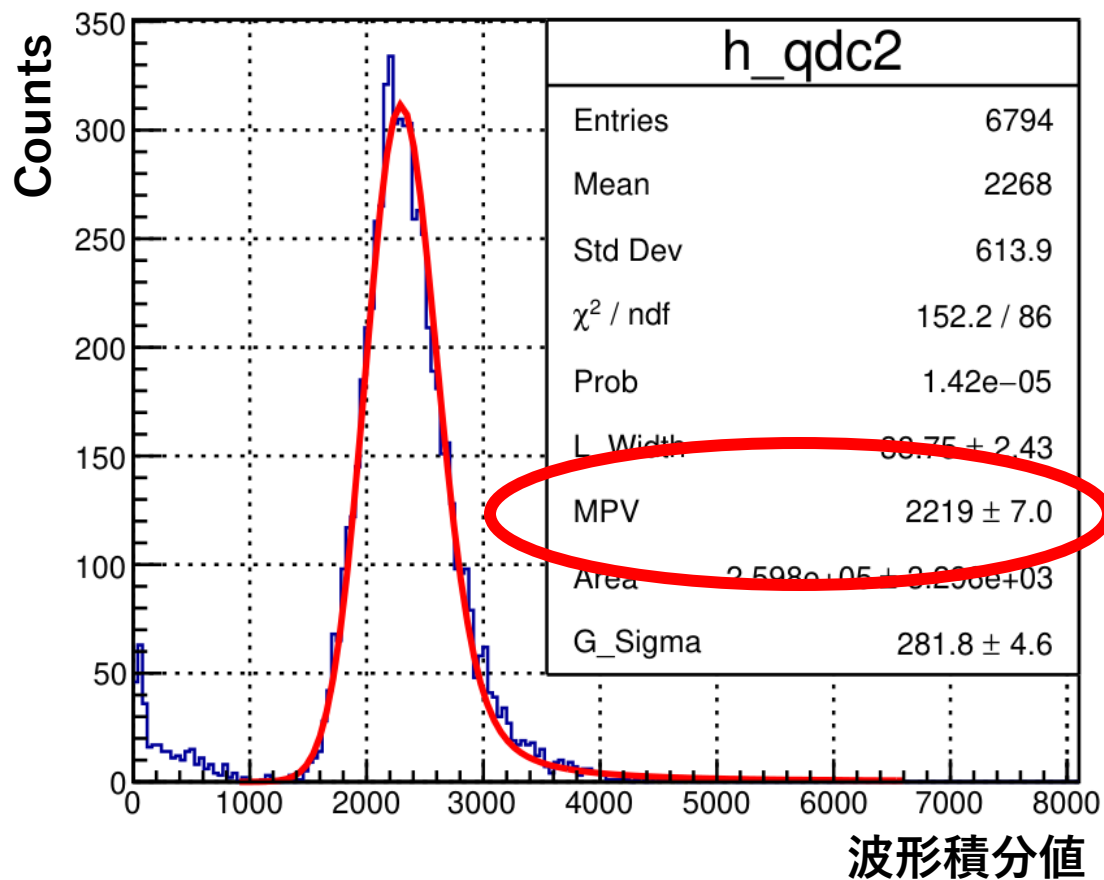
レートシフト時には何が起こっていた？



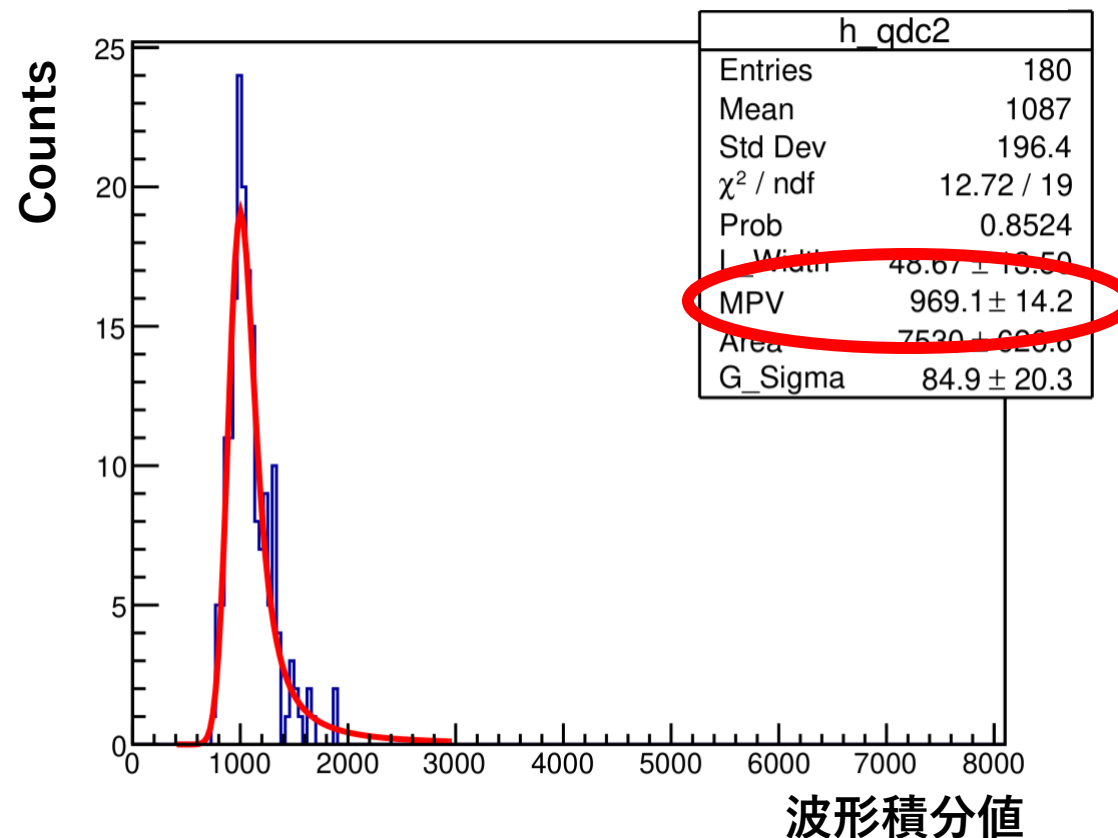
シングルレートシフト時のデータで、Calibrationで使った貫通ミュオンイベントセレクションを試してみる

# レートシフト時には何が起こっていた？

## レート安定時の波形積分値スペクトル #2



## レート不安定時の波形積分値スペクトル #2

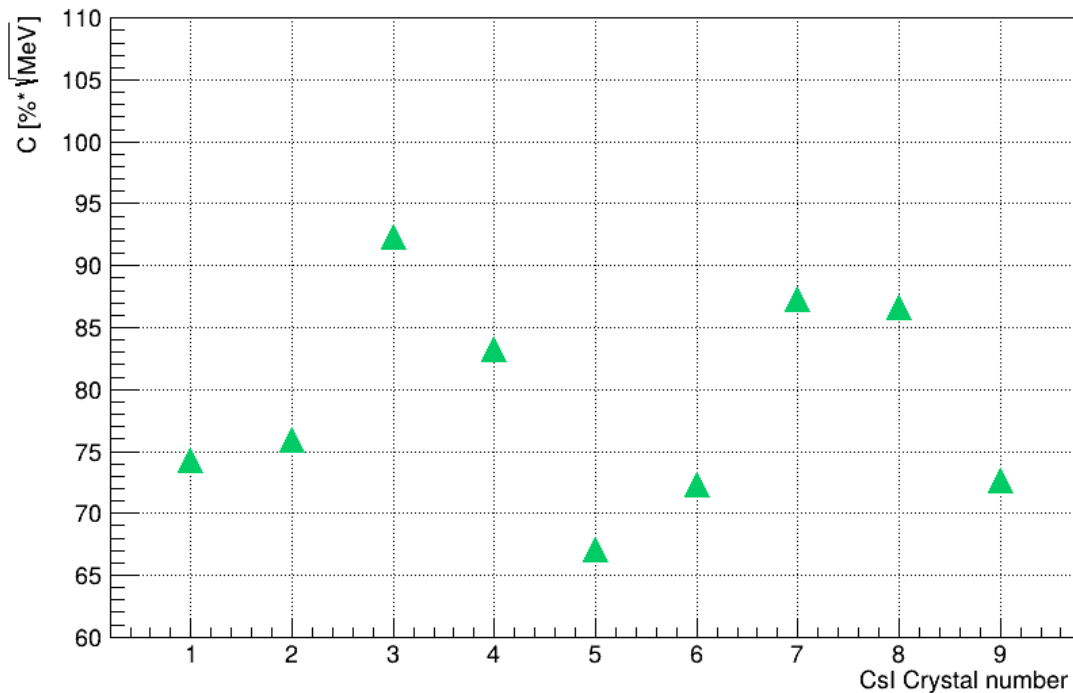


- 同じ条件下なのにもかかわらず、最頻値が異なる → ゲインが変動していた！

# Energy Resolution

- 分解能は、 $\text{Resolution} = \frac{\sigma_E}{E} \simeq \frac{C}{\sqrt{E(\text{MeV})}} \%$ と変形でき、この $C$ が計算できる。
- エネルギー依存性のない、より本質的な分解能の情報

Energy Resolution of Each CsI Crystals



- ばらつきは大きいですが、 $C \simeq 80 [\% \cdot \sqrt{E(\text{MeV})}]$
- 分解能が光量でのみ決まるとすると、これは1.6 p.e./MeV に相当。

→ 借り受けた時に聞いた20p.e./MeVという値の一桁下。

なぜ、

# Fittingと分解能計算

- 検出器中での粒子のエネルギー損失はランダウ分布に従う。
- それに加えて、エネルギーは検出器の分解能、飛程の分布に従って揺らぐ。

→ランダウ分布に、ガウス分布をたたみ込んだ関数でフィッティングを行う。

- 分解能は、たたみ込んだガウス分布の標準偏差から、シミュレーションで得た飛程分布の標準偏差を引いて求める。



## 分解能計算②

・分布から得られるエネルギーの相対誤差は  $\sigma_r = \frac{\sigma_{gauss}}{MPV}$  で求められる。それは分解能によるエネルギーの相対誤差  $\sigma_{reso}$  と飛程によるエネルギーの相対誤差  $\sigma_{path}$  を用

いて、 $\sigma_r = \sqrt{\sigma_{reso}^2 + \sigma_{path}^2} = \sigma_{reso} \oplus \sigma_{path}$  と書ける。

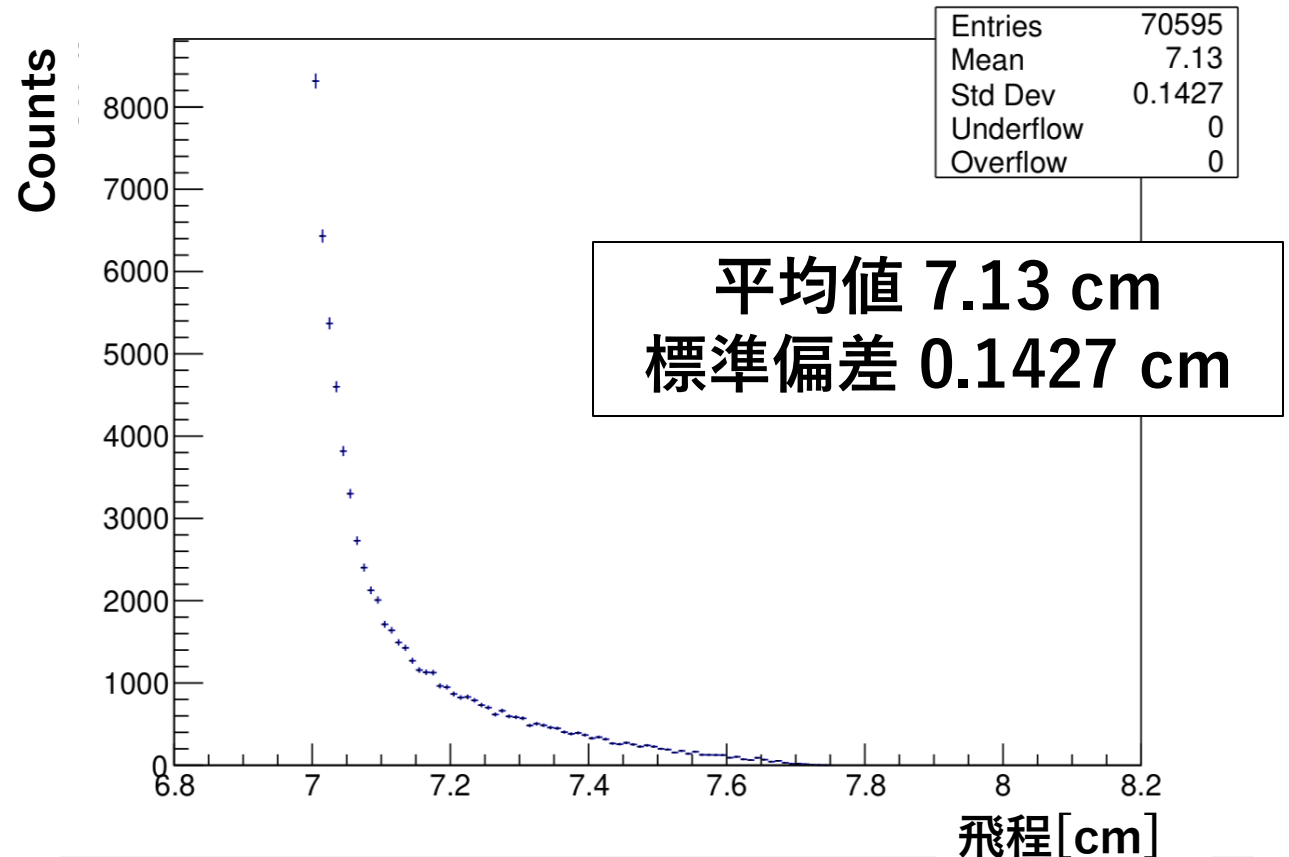
ここから、 $\sigma_{reso}$  は、 $\sigma_{reso} = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_{path}^2}$  となる。

$\sigma_{reso} = \frac{\text{分解能によるエネルギー揺らぎ(MeV)}}{E(\text{MeV})}$ 、分解能によるエネルギー揺らぎ(MeV)  $\propto \sqrt{E}$  をあわせると、 $\sigma_{reso} \propto 1/\sqrt{E(\text{MeV})}$  となる。

# 飛程分布

- ・ 飛程のシミュレーションを行い、各チャンネルでの飛程の揺らぎを見た。  
→ 揺らぎはおよそ2%

## 飛程分布 Csl#5

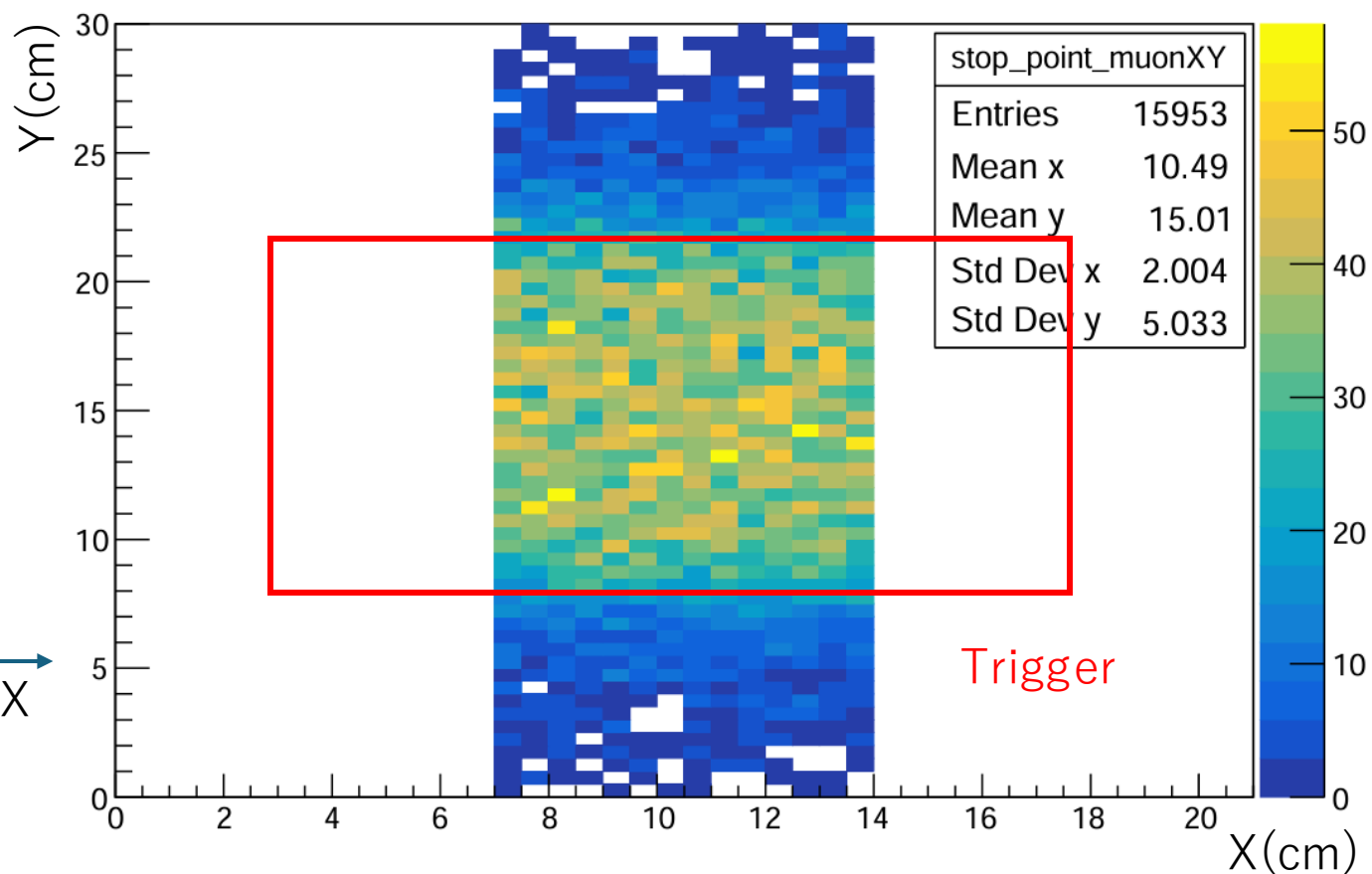
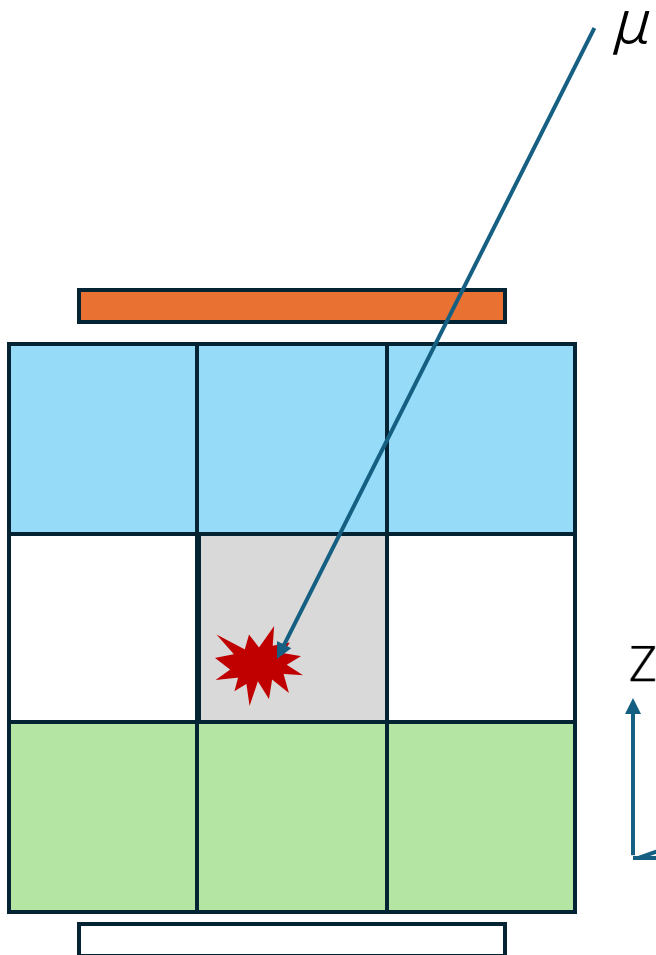


# 検出器応答の推定

ミューオンの停止までをシミュレーション



各イベントセレクションでの停止位置分布を取得



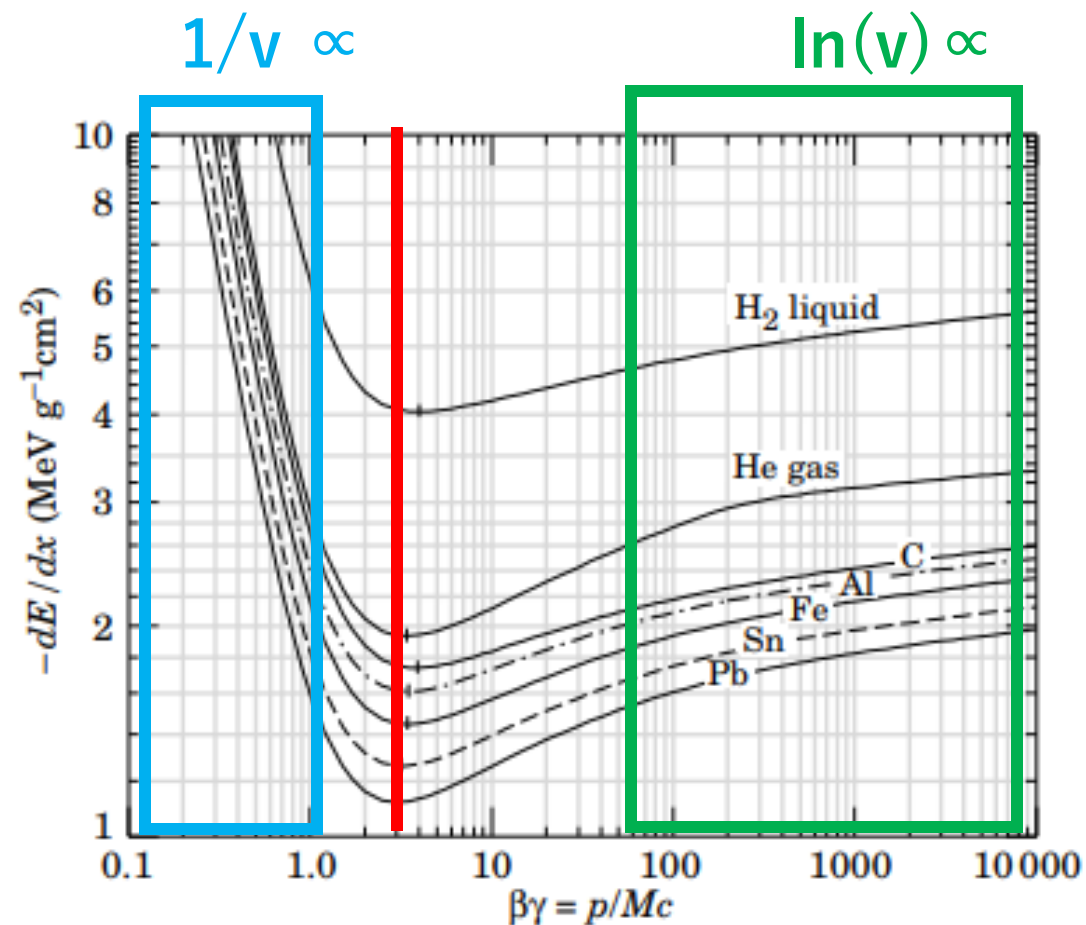
# MIP

MIP : Minimum Ionization Particle

エネルギーを最も落とさない



貫通する際は粒子はMIP  
だと思える



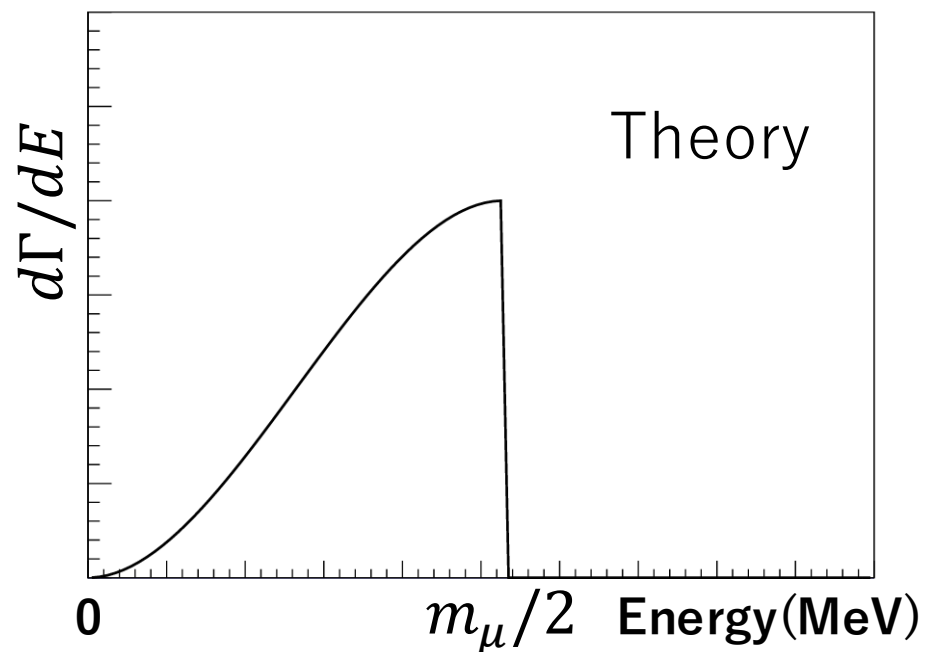
# スペクトルはどう見えるか？

Resolution : スペクトルが広がる

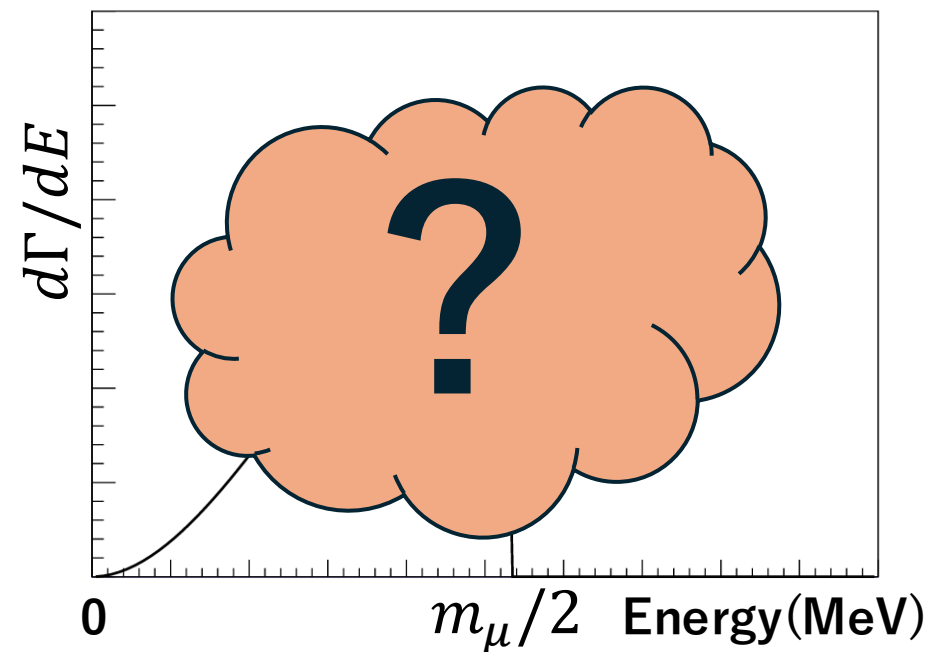
Escape E : 低エネルギーにシフト



理論スペクトルそのままでは見えない

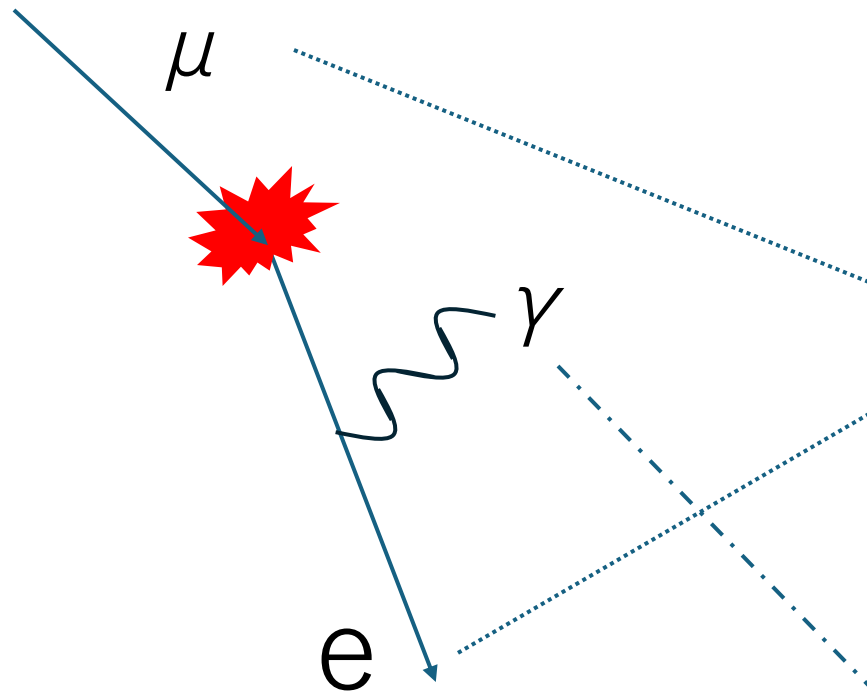


Resolution  
Escape E



# Simulation

自作モンテカルロシミュレーションプログラムで検出器応答を再現



## Charged Particle :

Bethe-Bloch+LandauでのCollision Loss

## Electron :

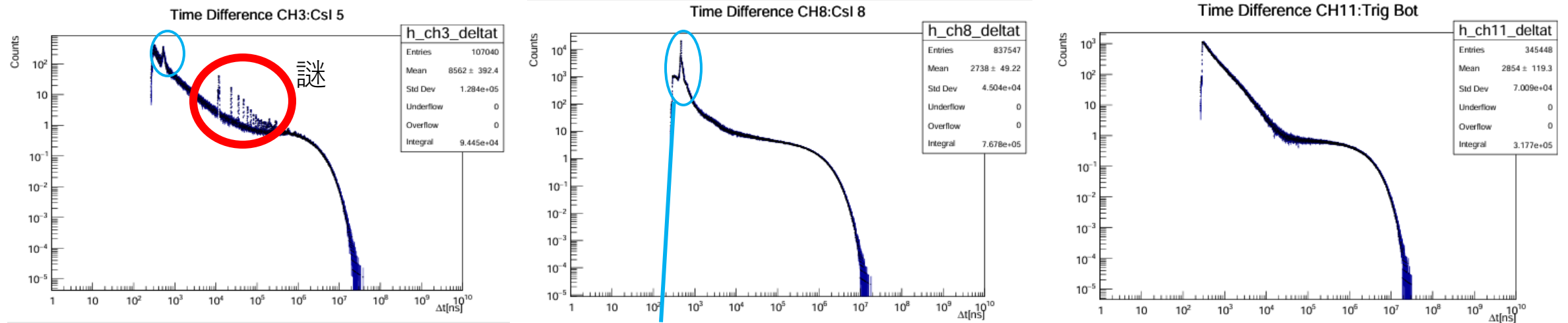
制動放射・多重クーロン散乱

$\gamma$  : 光電効果・対生成・コンプトン散乱

Step By Stepで反応の処理

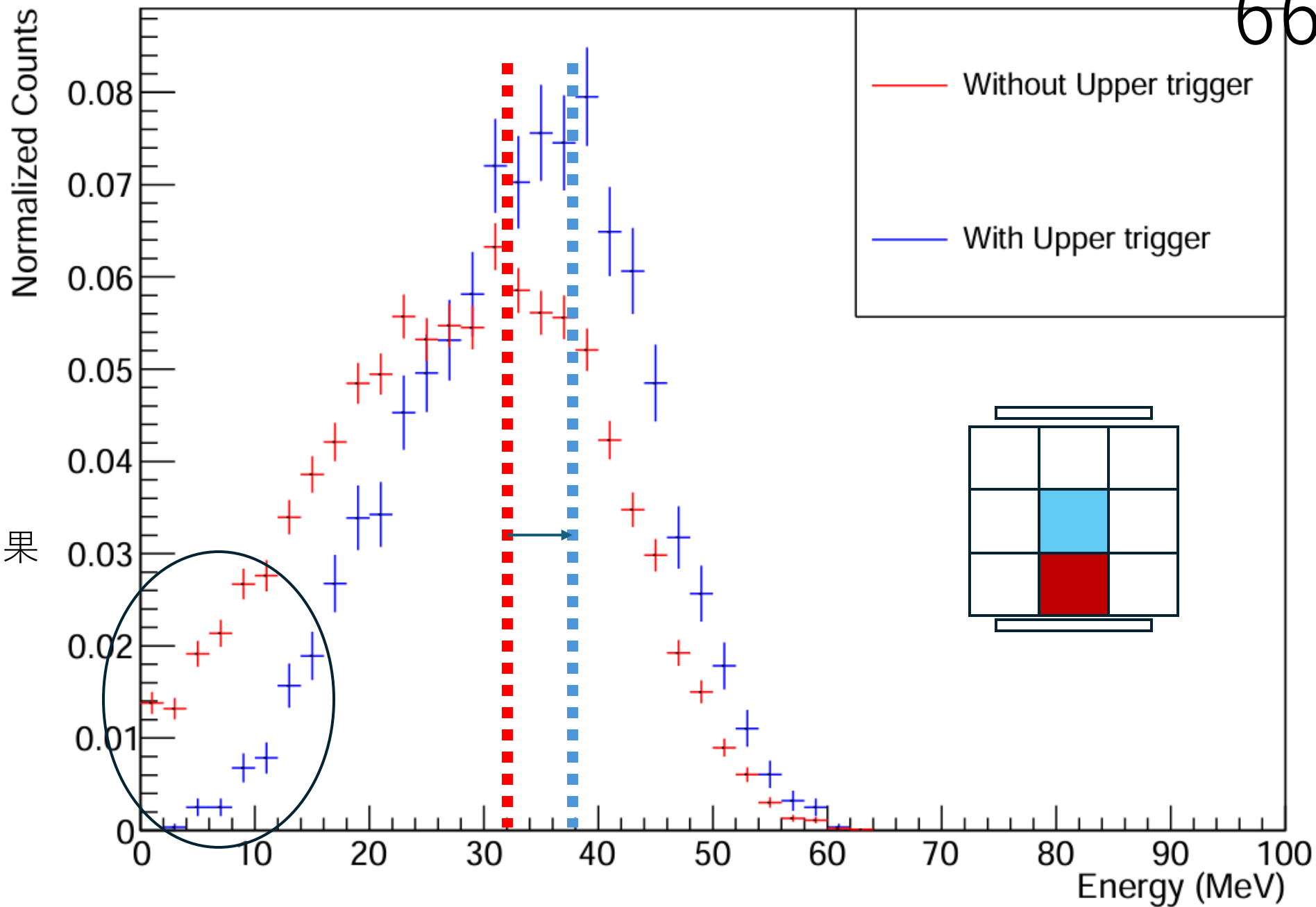
# Time Difference

各チャンネルでの信号間の時間差  $\Delta t$  [ns]



アフターパルスによるピーク

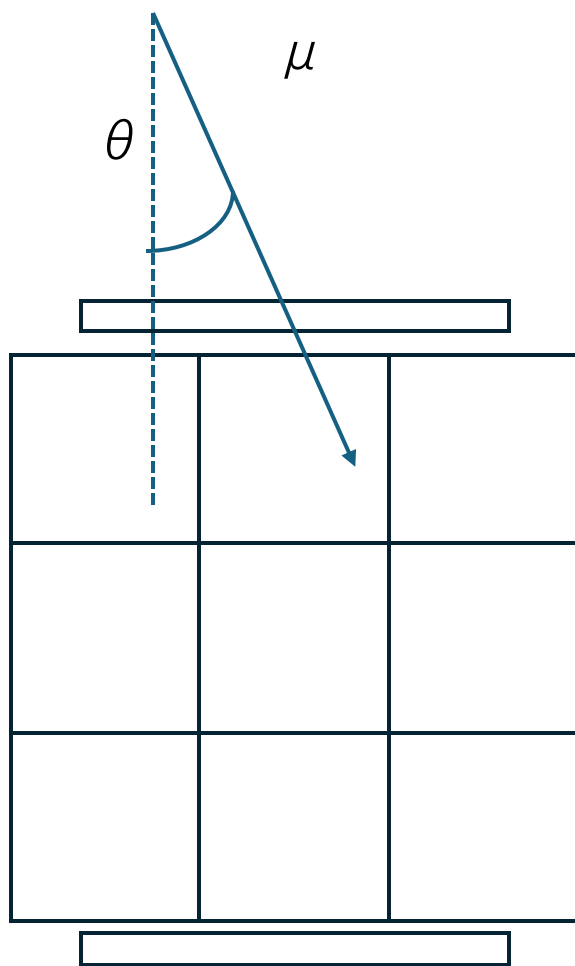
1.2  $\mu$ s 間隔での時間差のピーク



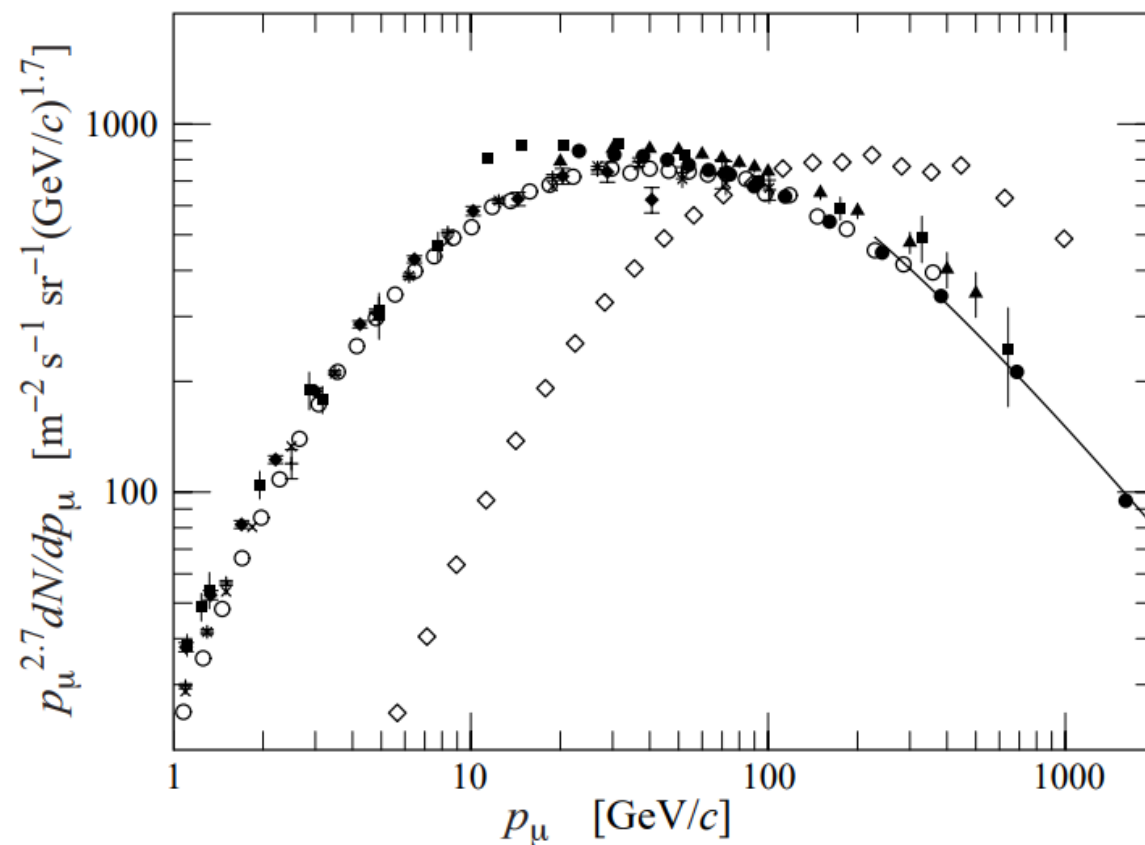
高エネルギー  
低エネルギー  
ともに経路制限の効果  
できれいに見える



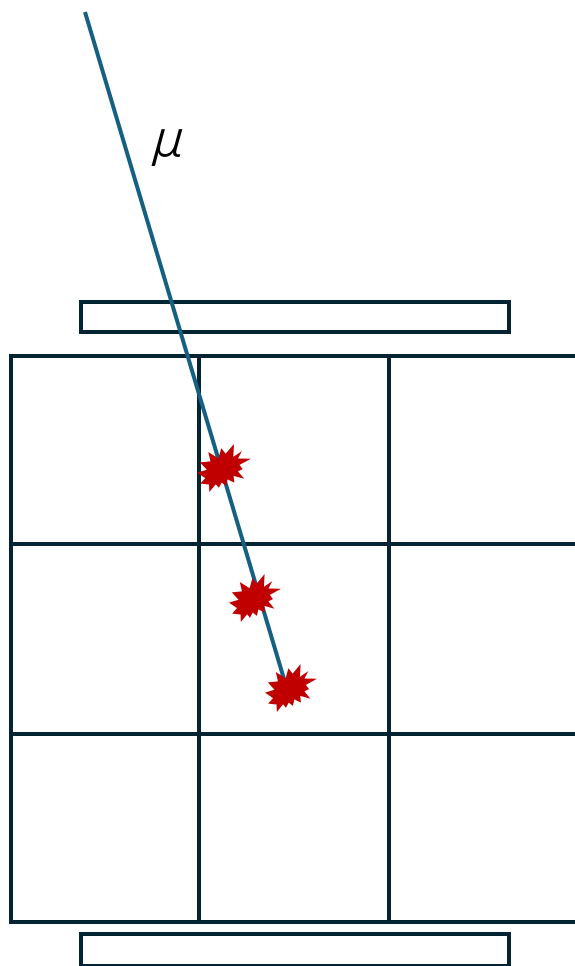
# 自作MC Simulationの詳細



$\theta \Rightarrow \cos^2 \theta$  で乱数

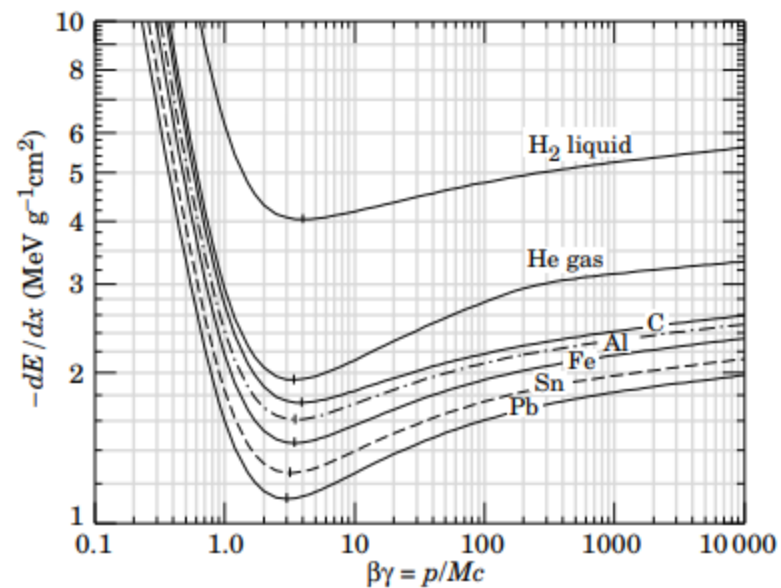


# 自作MC Simulationの詳細



ミューオンのエネルギーロス

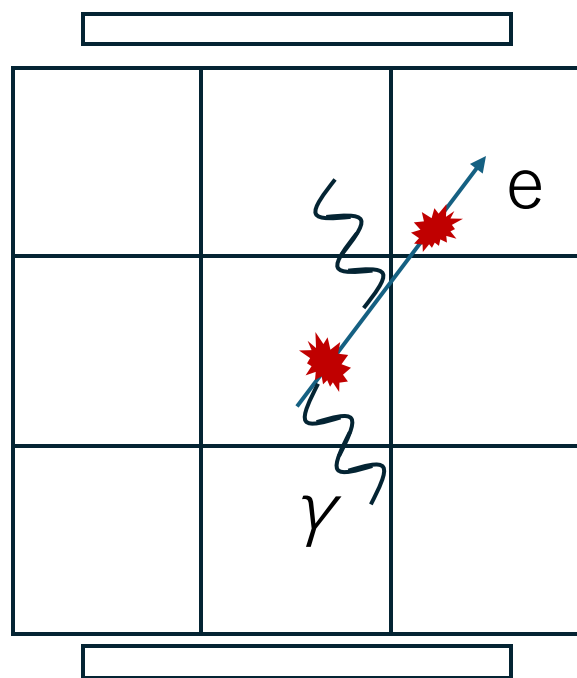
Bethe-Bloch + Landau



# 自作MC Simulationの詳細

電子のエネルギーロス

Bethe-Bloch + Landau



制動放射



(多重クーロン散乱)

# 自作MC Simulationの詳細

光子のエネルギーロス

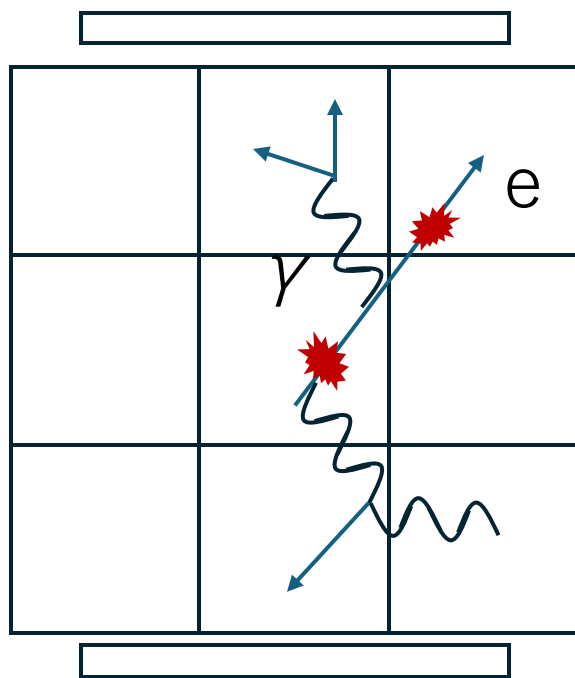
光電効果



対生成

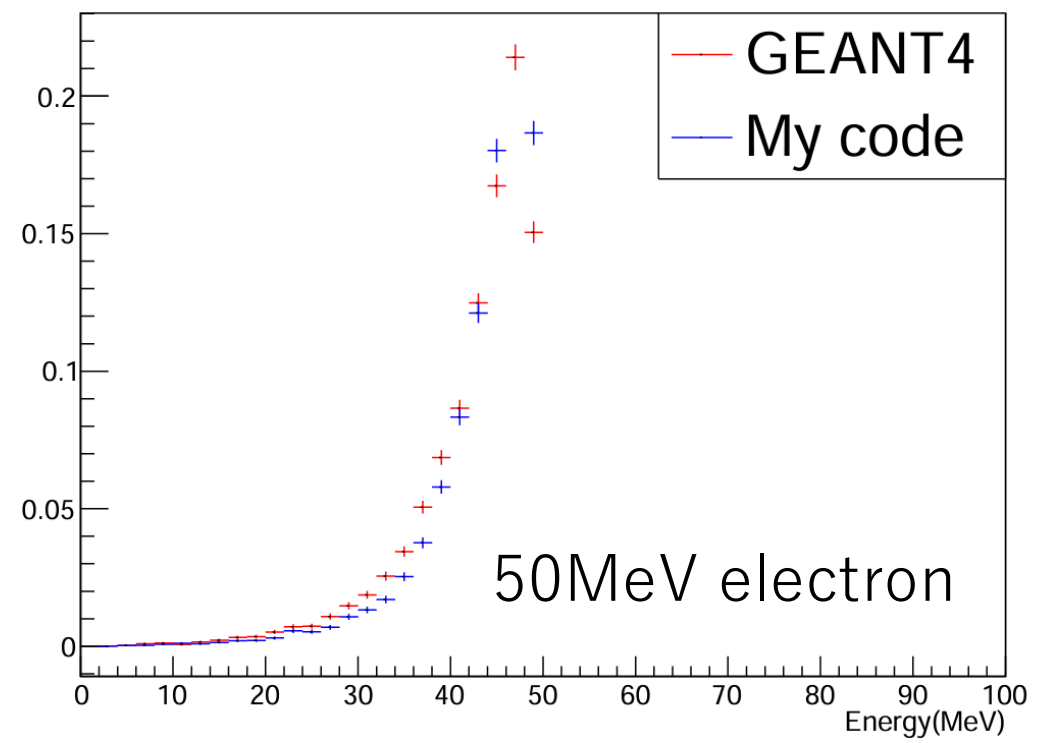
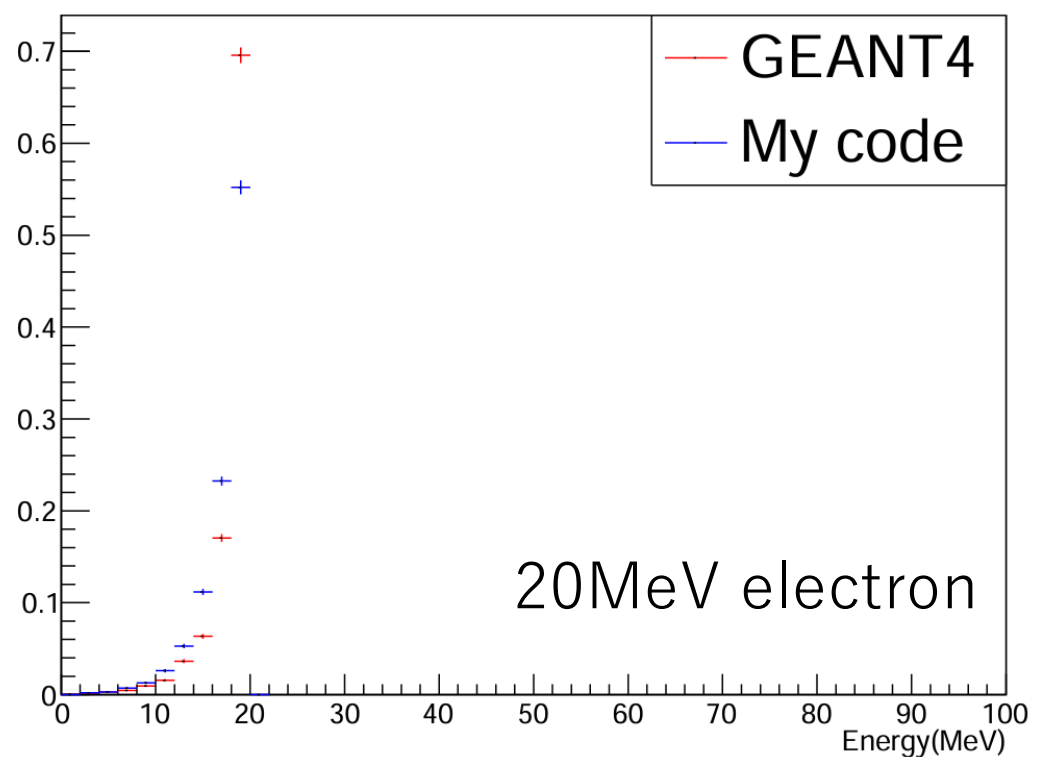


コンプトン散乱



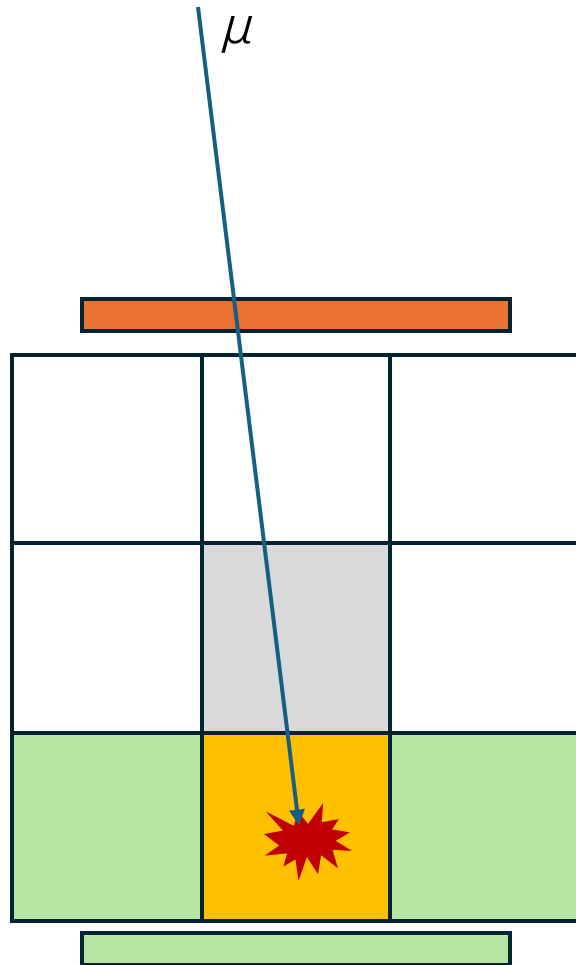


# 自作MC vs GEANT4



低エネルギーの電子で乖離 ➡ クーロン散乱の過小評価？

# Analysis : Muon Stopping in Bottom Csl



下段中央のCslでミュオンが停止したイベントを探索する

上部のトリガーシンチレータでヒットがある

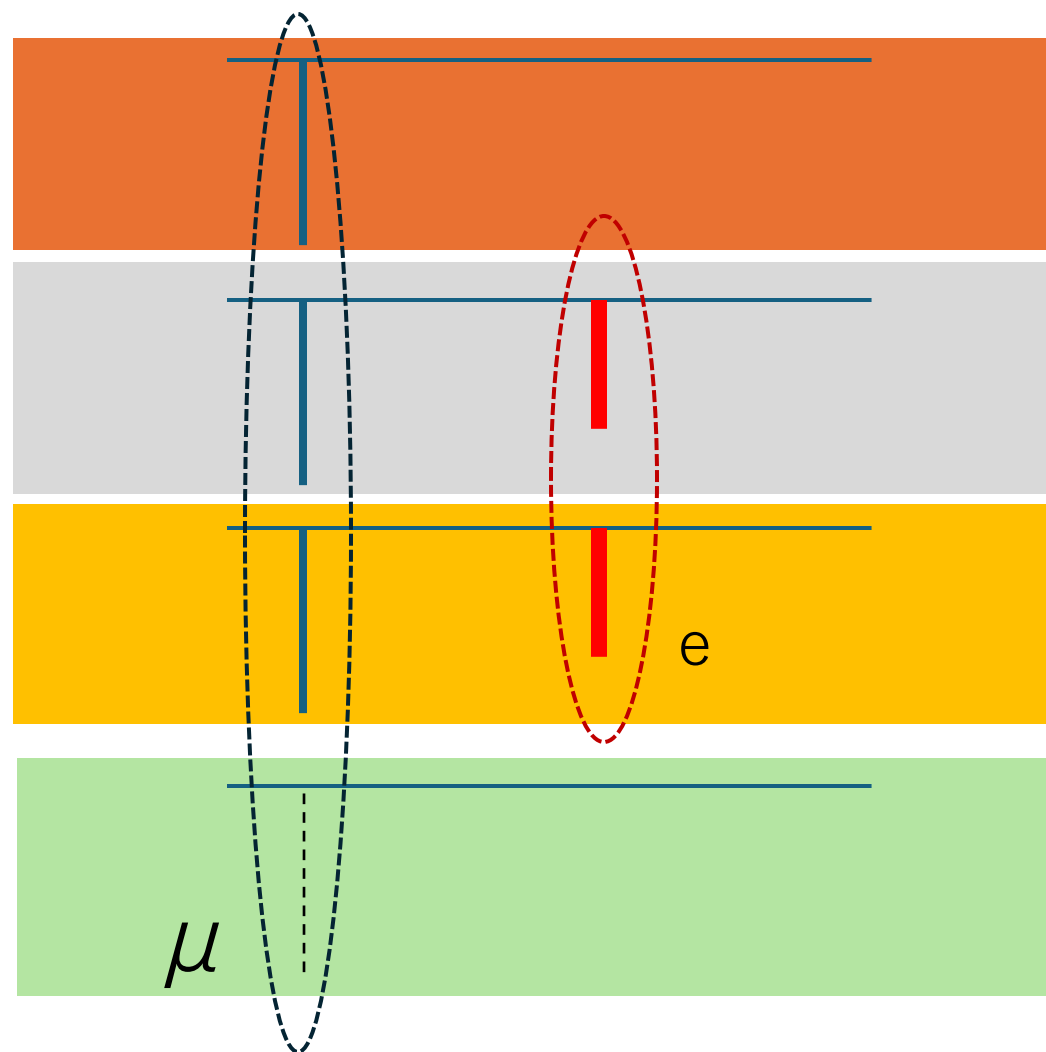
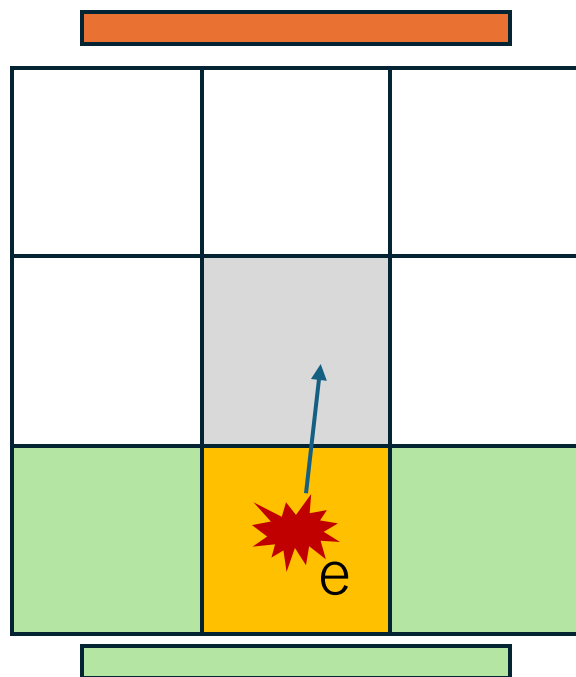
中段中央のCslでヒットがある

下段中央のCslでヒットがある

下段の他のCslでヒットがない  
下段のトリガーシンチレータでヒットがない

この4つを同時に満たしたとき、下段中央でのミュオン停止イベントと判定する

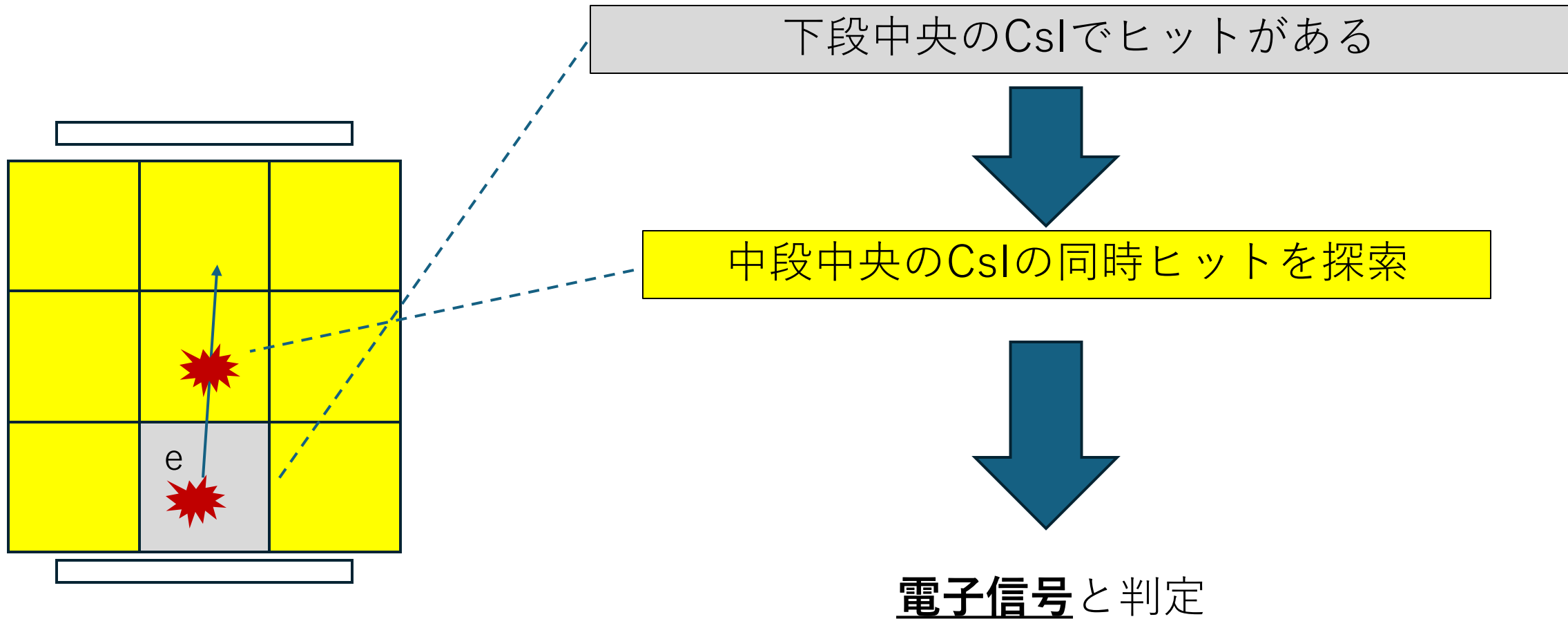
# Analysis : Electron from Bottom Csl



ミューオンの後に見えたヒットは電子だろう

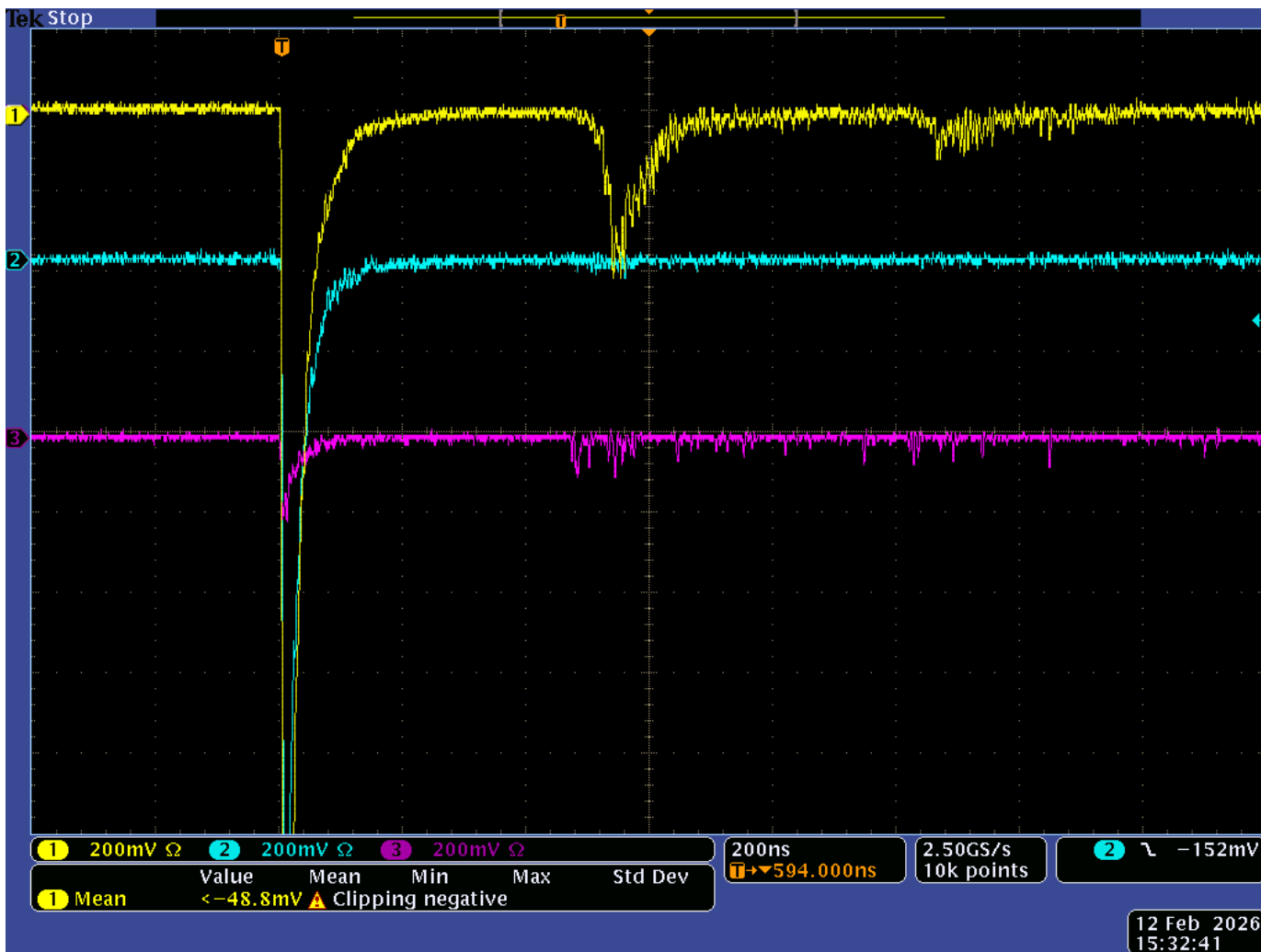
# Analysis : Muon Stopping in Bottom CsI

ミュオン停止後の信号を探索する      After 300ns~10000ns





# Saturation



パルスプロセッサの入力電圧：±1 V

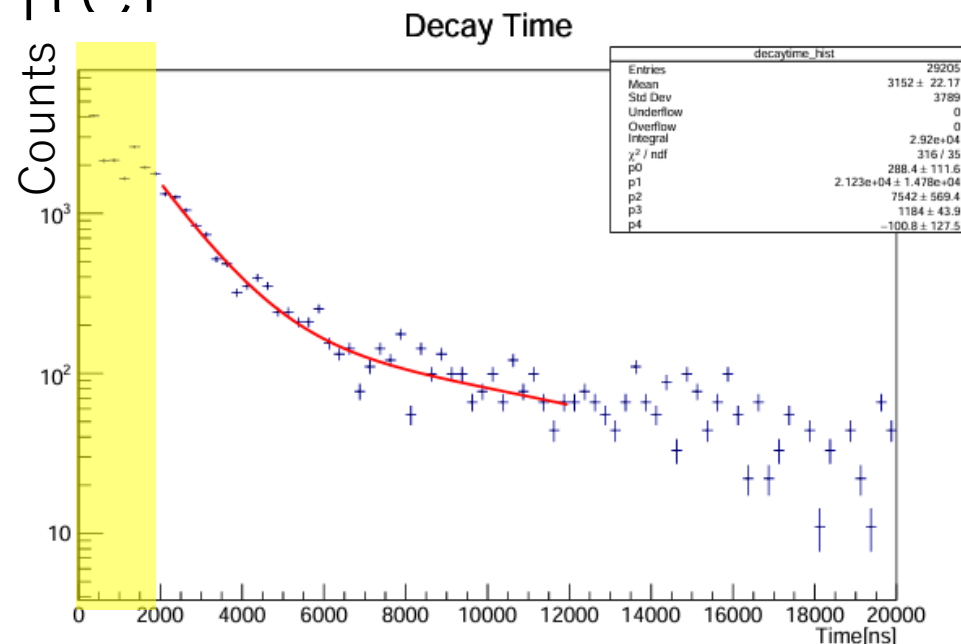
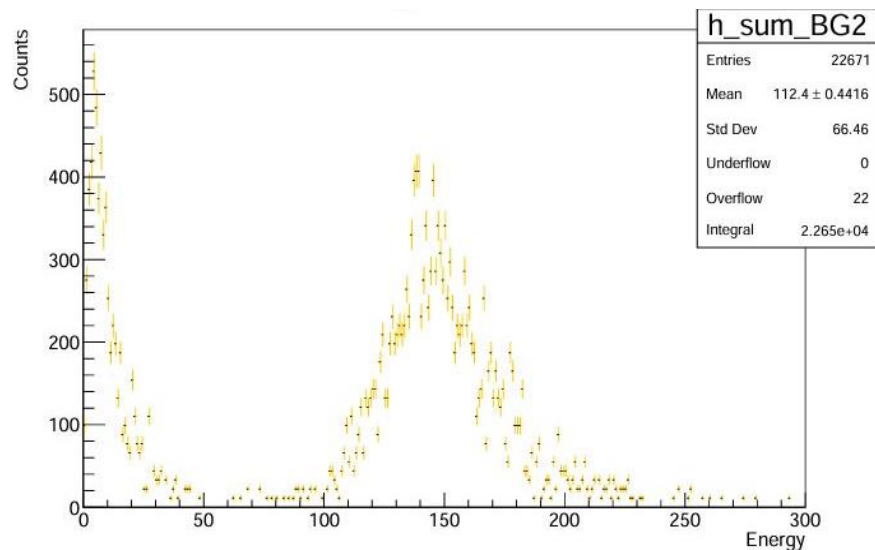


信号が飽和

エネルギー較正の線形性が失われる

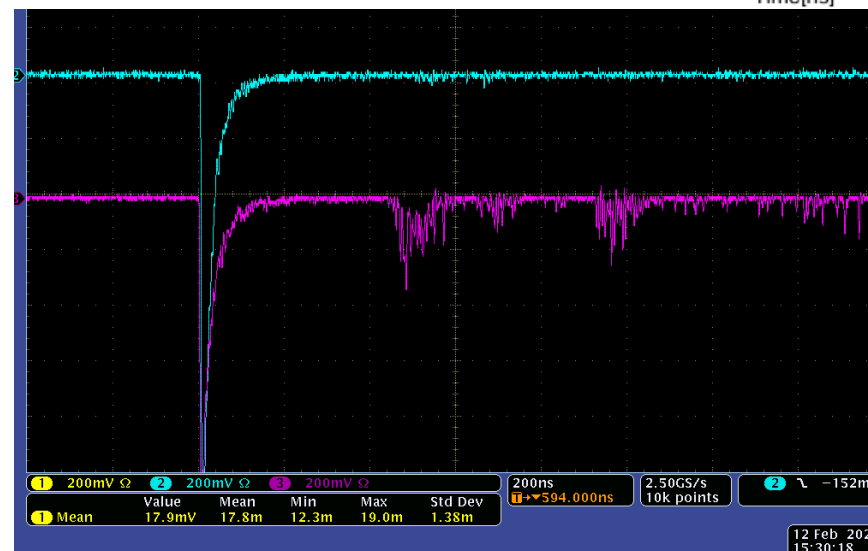
MIPでは200mV程度なので  
電子エネルギーの測定には影響なし

# Stopped at Bottom Center

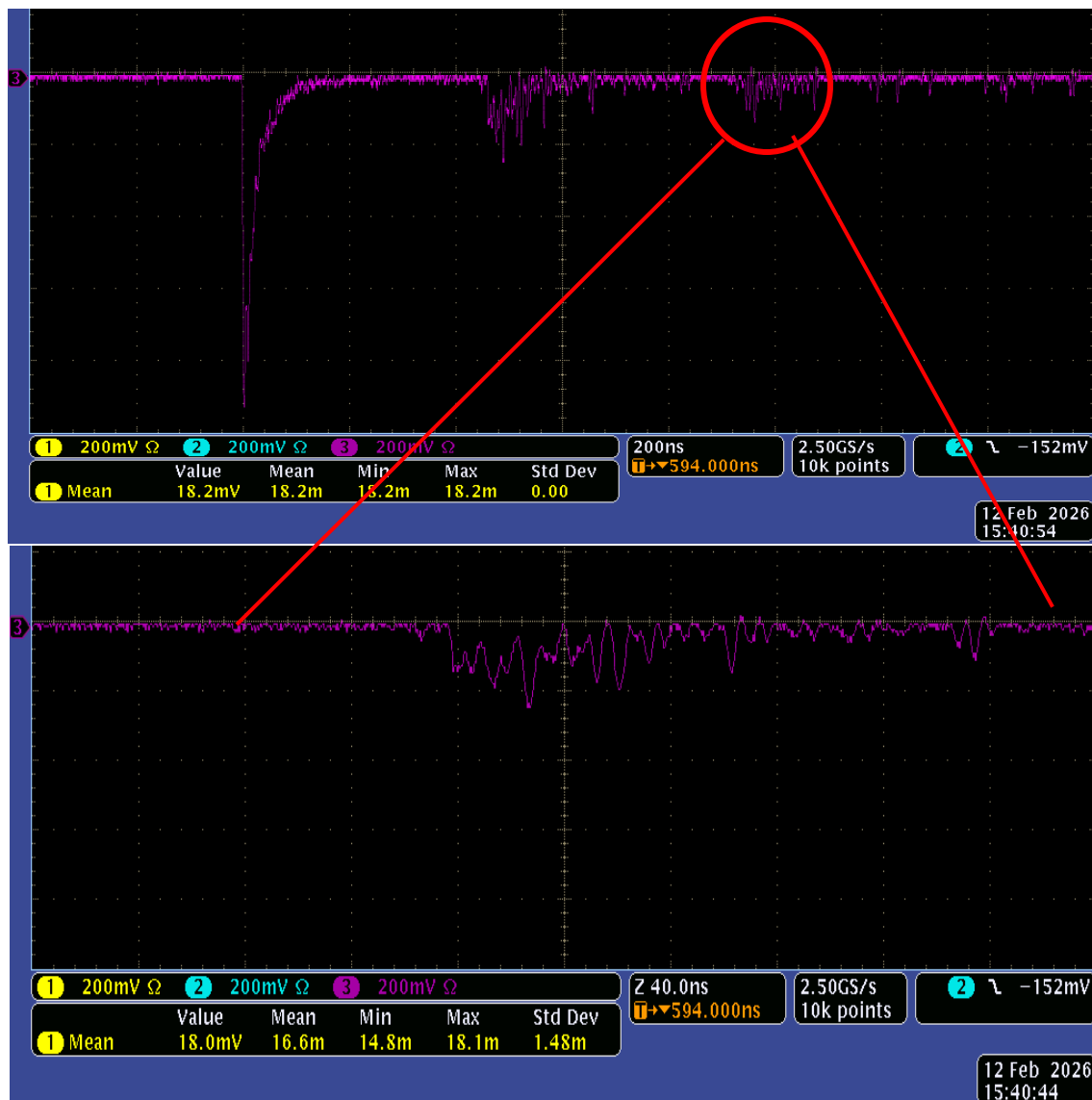


短寿命領域では大きなエネルギードロップ

停止  $\mu$  による大きなエネルギードロップ  
 → 大きなアフターパルス  
 → それの足し合わせ？



# After Pulse of Bottom Center Csl

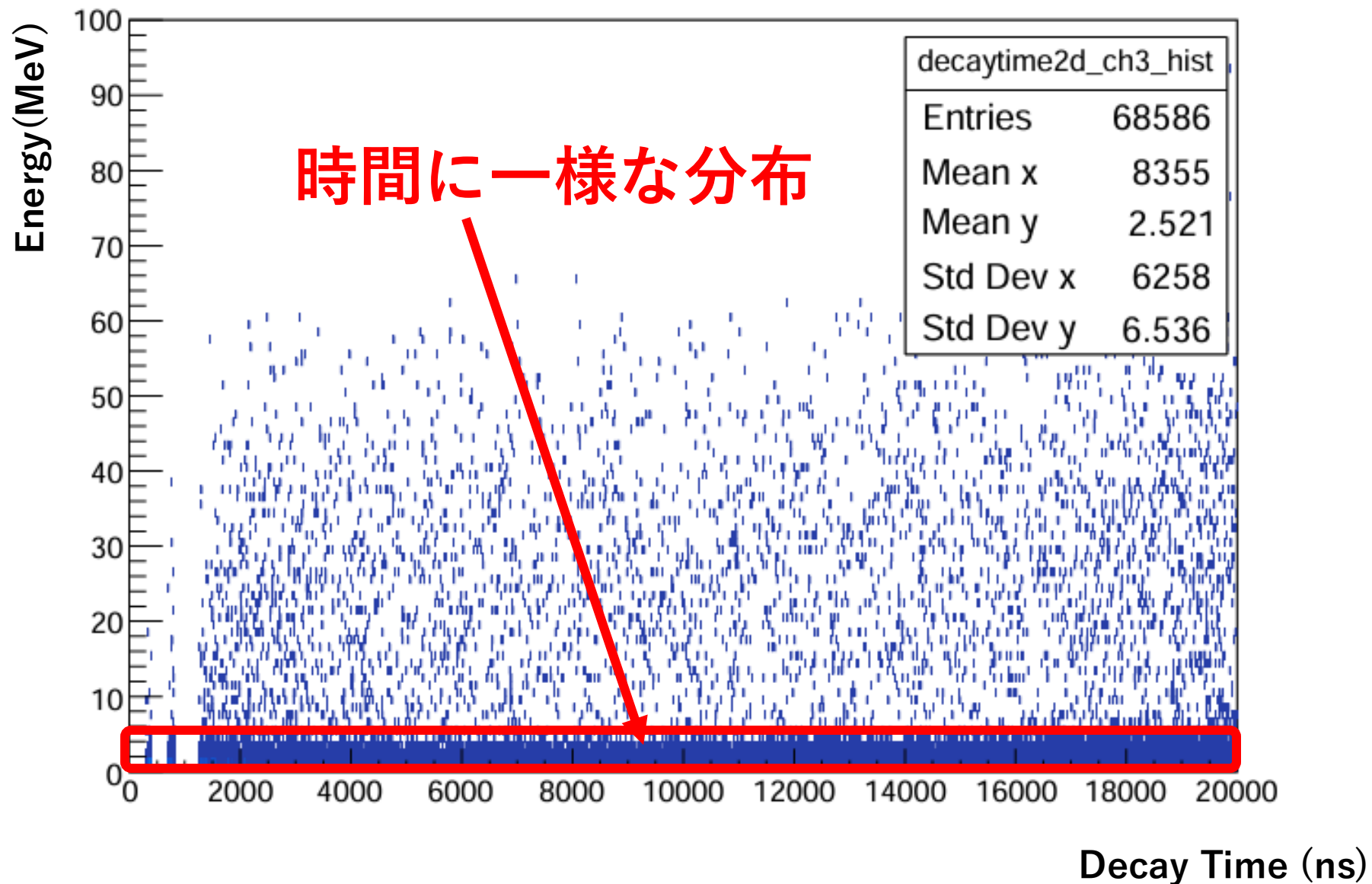


複数のアフターパルスを確認

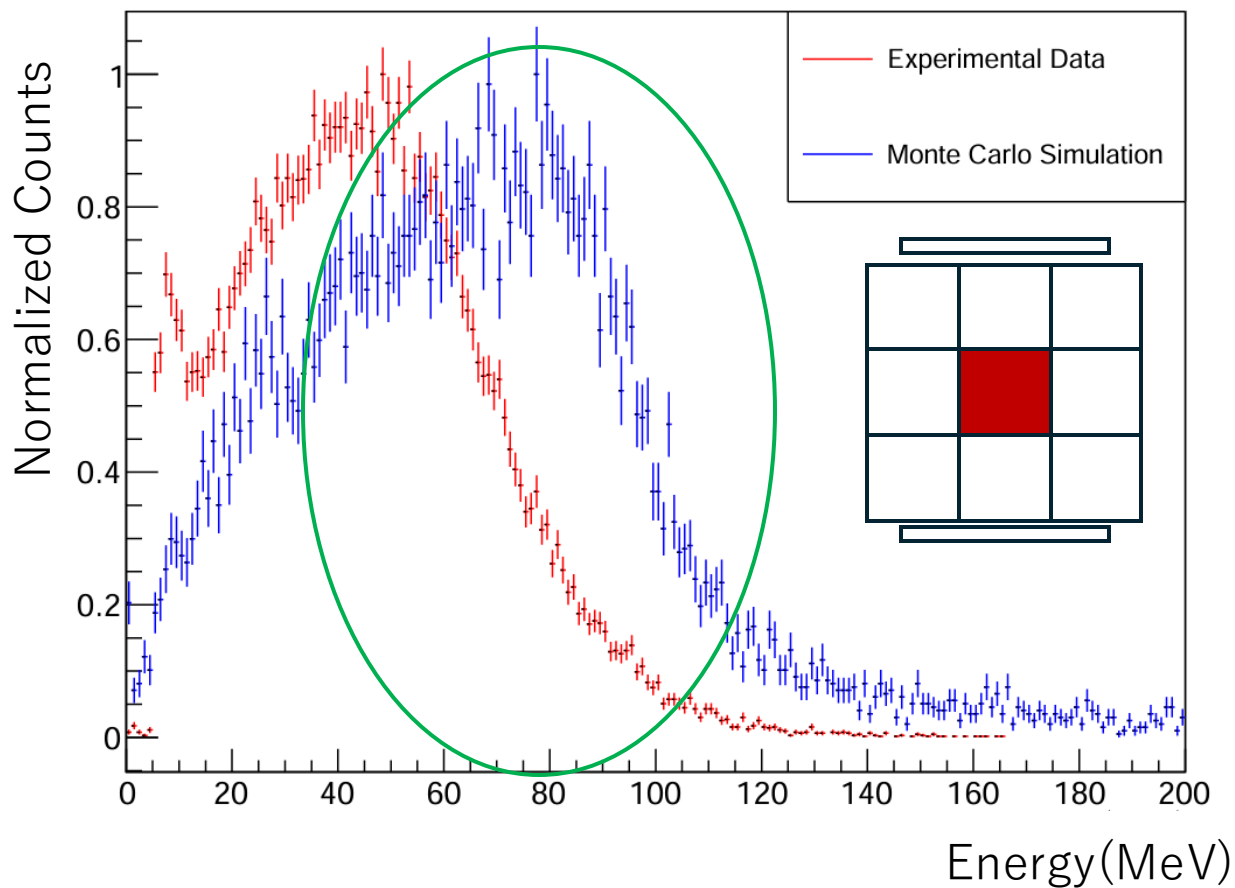
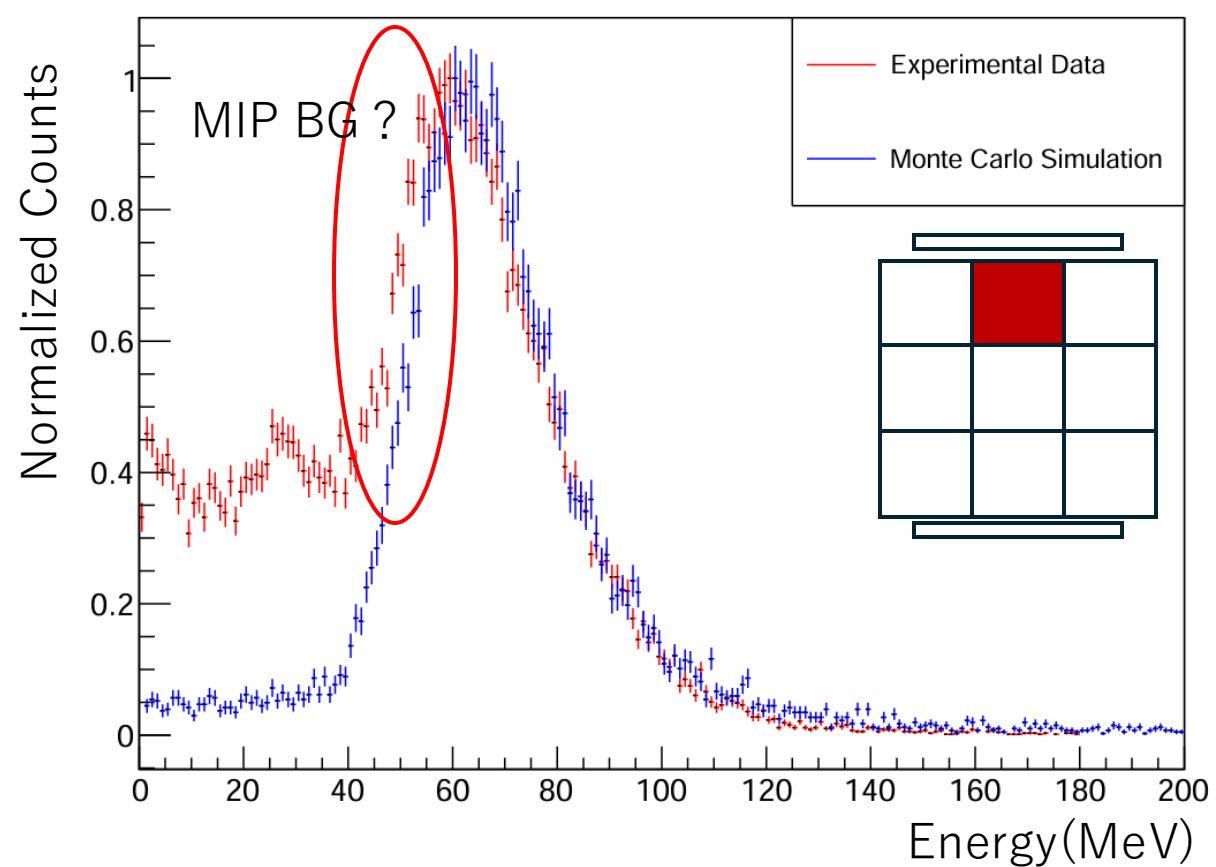
振動しているアフターパルス  
振動の周期は数ns

デジタイザーでは複数の振動をまとめて  
1つの波形積分値を取得する

# 崩壊時間vs電子エネルギー

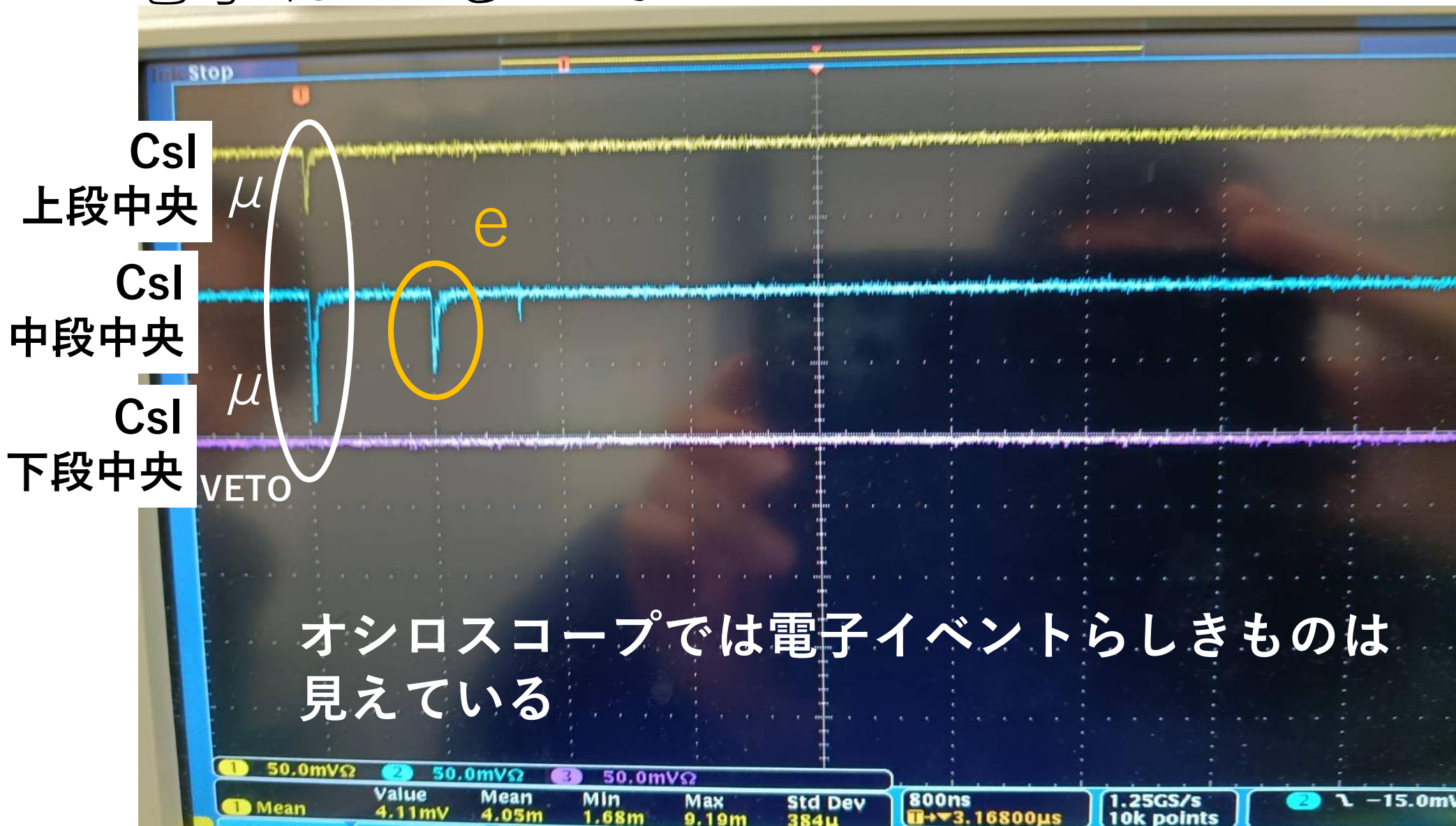


# 本当にミュオン停止イベントか？

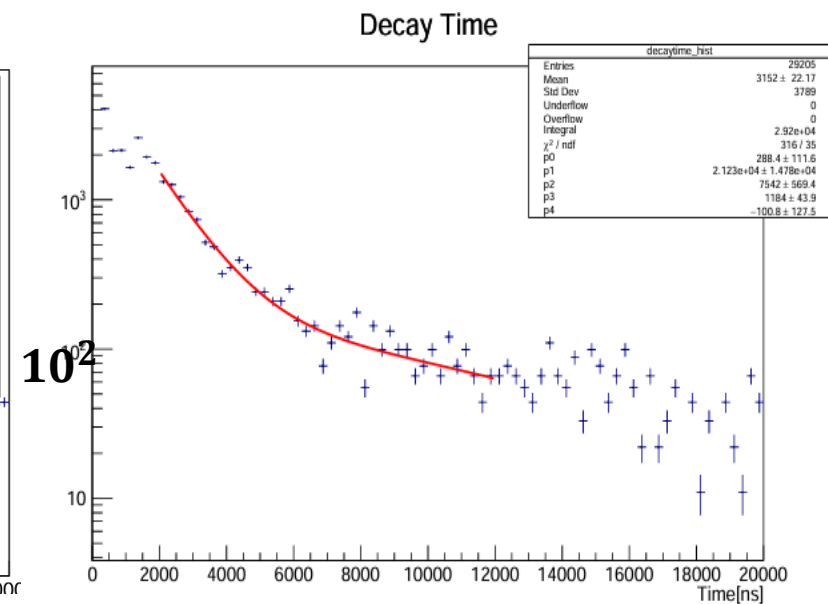
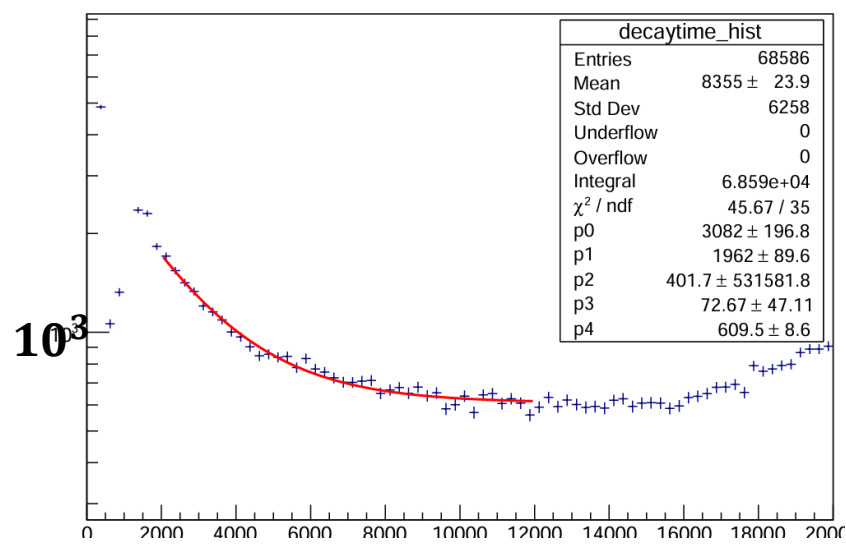
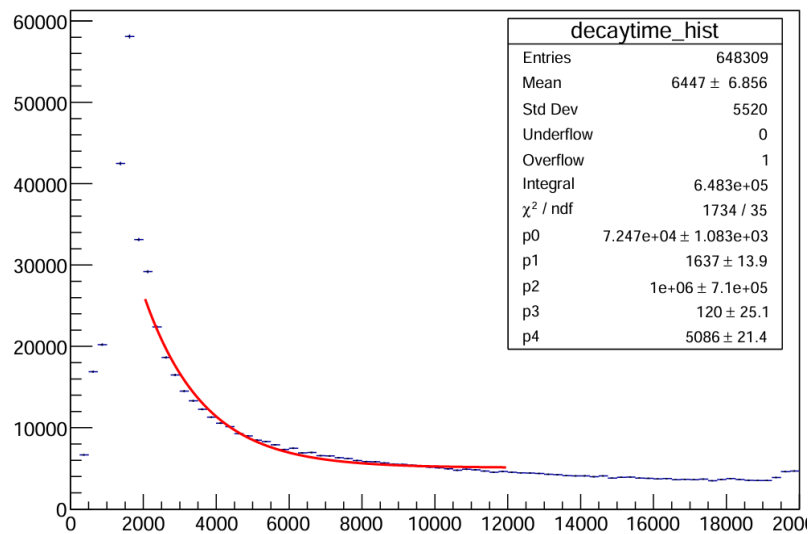


ミュオン自体は止まっているのでは？

電子はいるのか



## 寿命





# 誤差の推定

Wilksの定理 Likelihood と  $\chi^2$  を結ぶ

$$2 \log \left( \frac{L^*}{L} \right) = \chi^2$$

パラメータ  $\theta$  (ミューオン質量) のばらつき

➡ ガウス分布

$$\chi^2 = \chi_{min}^2 + \left( \frac{\theta - \bar{\theta}}{\sigma} \right)^2$$

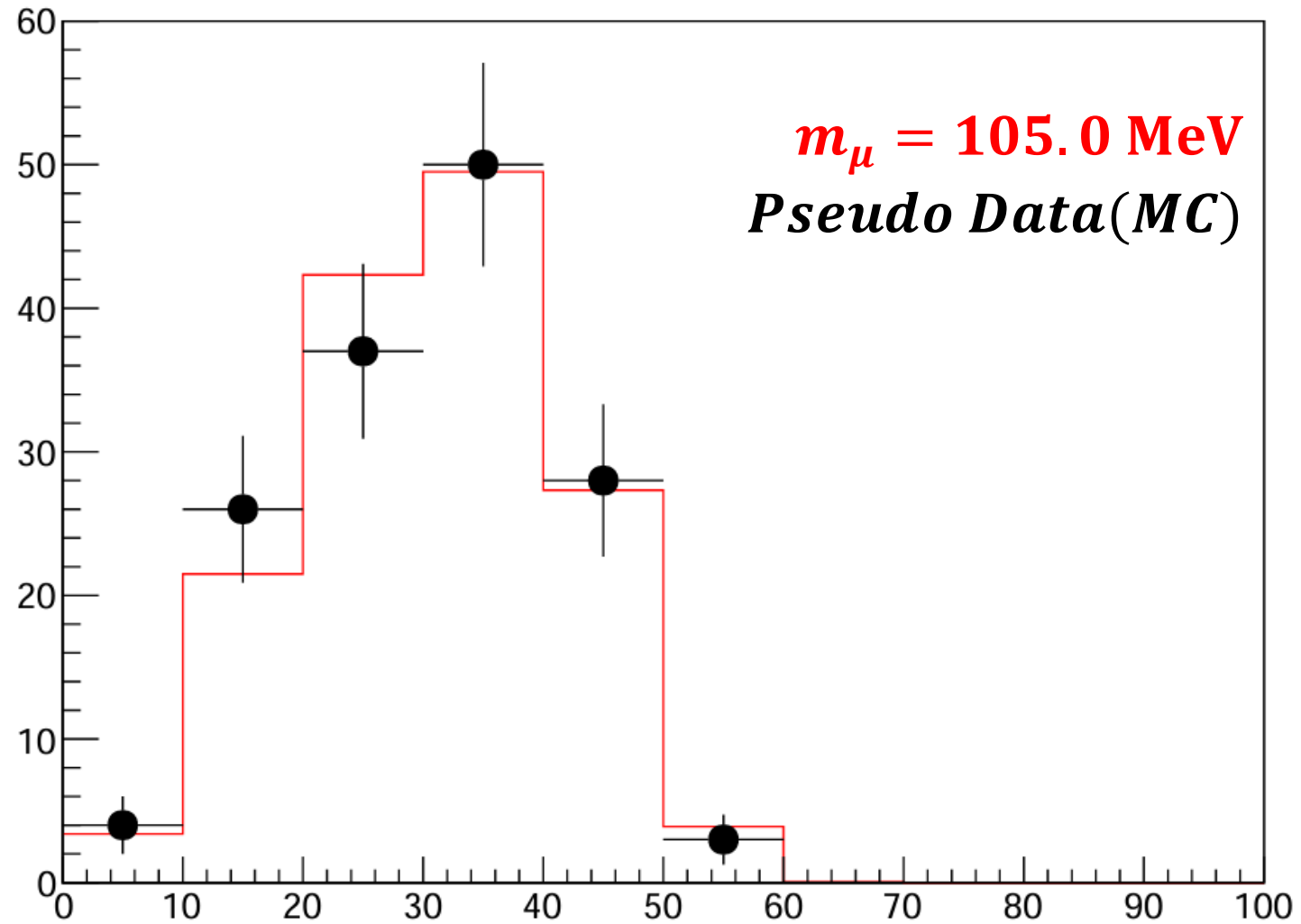
If  $\theta = \bar{\theta} + \sigma$

➡

$\sigma \longleftrightarrow \chi^2 = \chi_{min}^2 + 1$

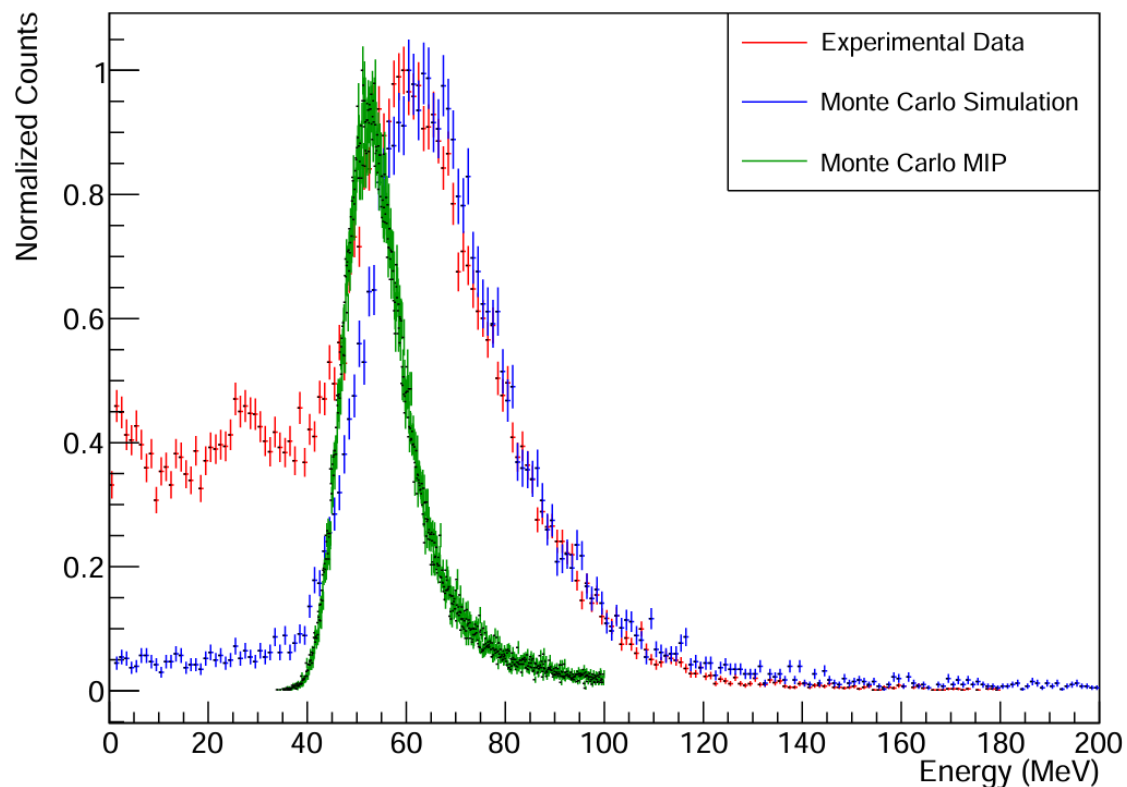


## Re : Event Selection

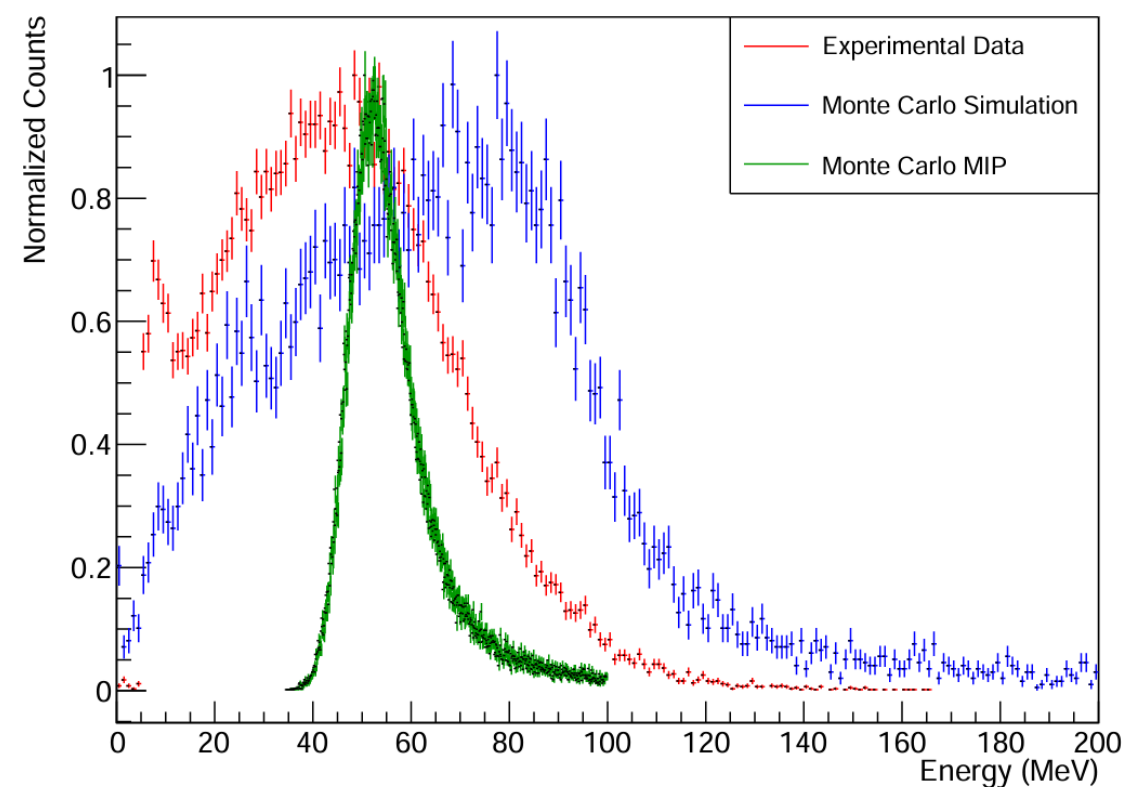


# 本当に停止ミューオンか？

Muon Energy Distribution Comparison (Top Crystal)



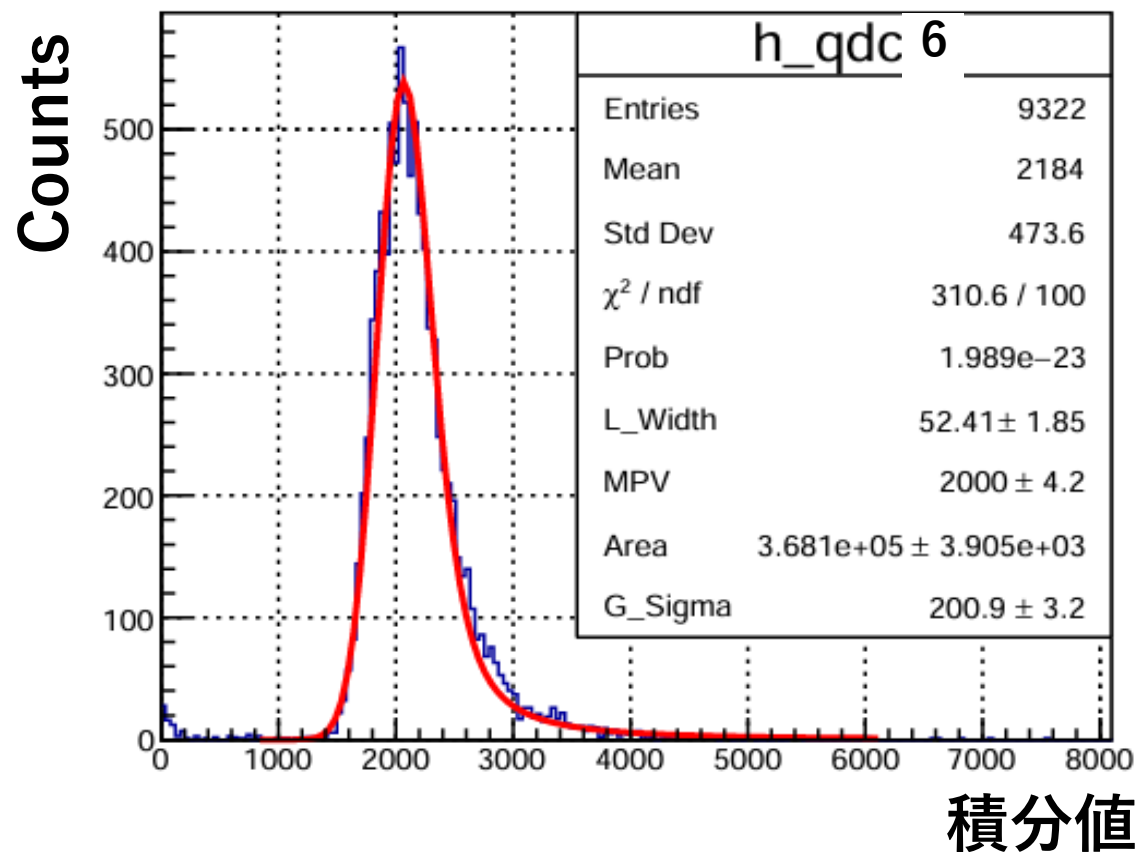
Muon Energy Distribution Comparison



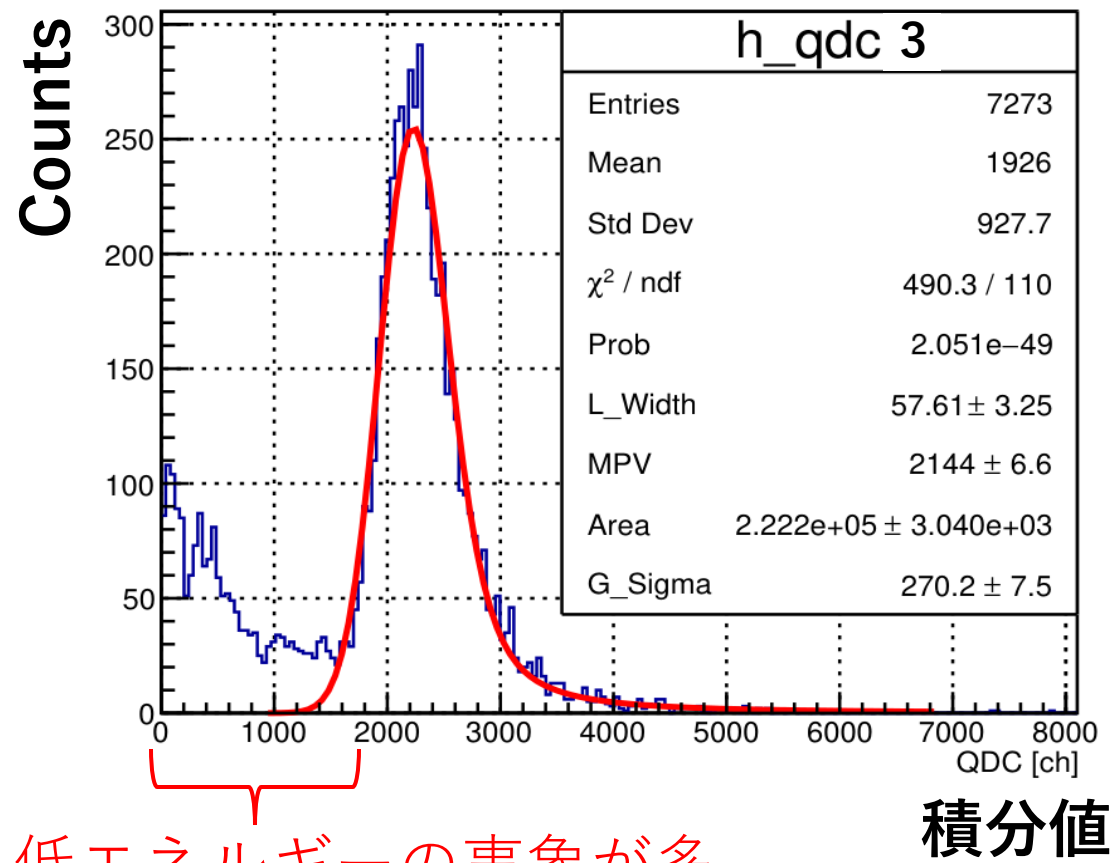
MIPでもなさそう

## CsI#3,#7の効率

効率95%のCsI(#6)



効率56%のCsI(#3)



低エネルギーの事象が多い  
→何か関係がある？

# CsI#3,#7の効率

- ・ コインシデンスが**取れる**ノイズが多い。
- ・ 両方とも、特徴的なノイズが見え、レートがほかのCsIより多い。
- レートの影響でDead Timeが多い。

上部プラスチックシンチレーターとの時間差vs  
波形積分値ヒストグラム

