

# NA61/SHINE実験 低運動量ハドロンビームライン建設に向けた ビームモニター開発の現状

計測システム研究会2025

J-PARC 東海1号館

11月17 – 18日（1日目）

浅井彩那, 小汐由介, 目黒希, 畑中莉桜, 坂下健<sup>A</sup>, 中平武<sup>A</sup>, 日野陽太<sup>A</sup>, Megan  
Friend<sup>A</sup>, 永井義一<sup>B</sup>  
岡山大理, 高エネ研<sup>A</sup>, ELTE<sup>B</sup>



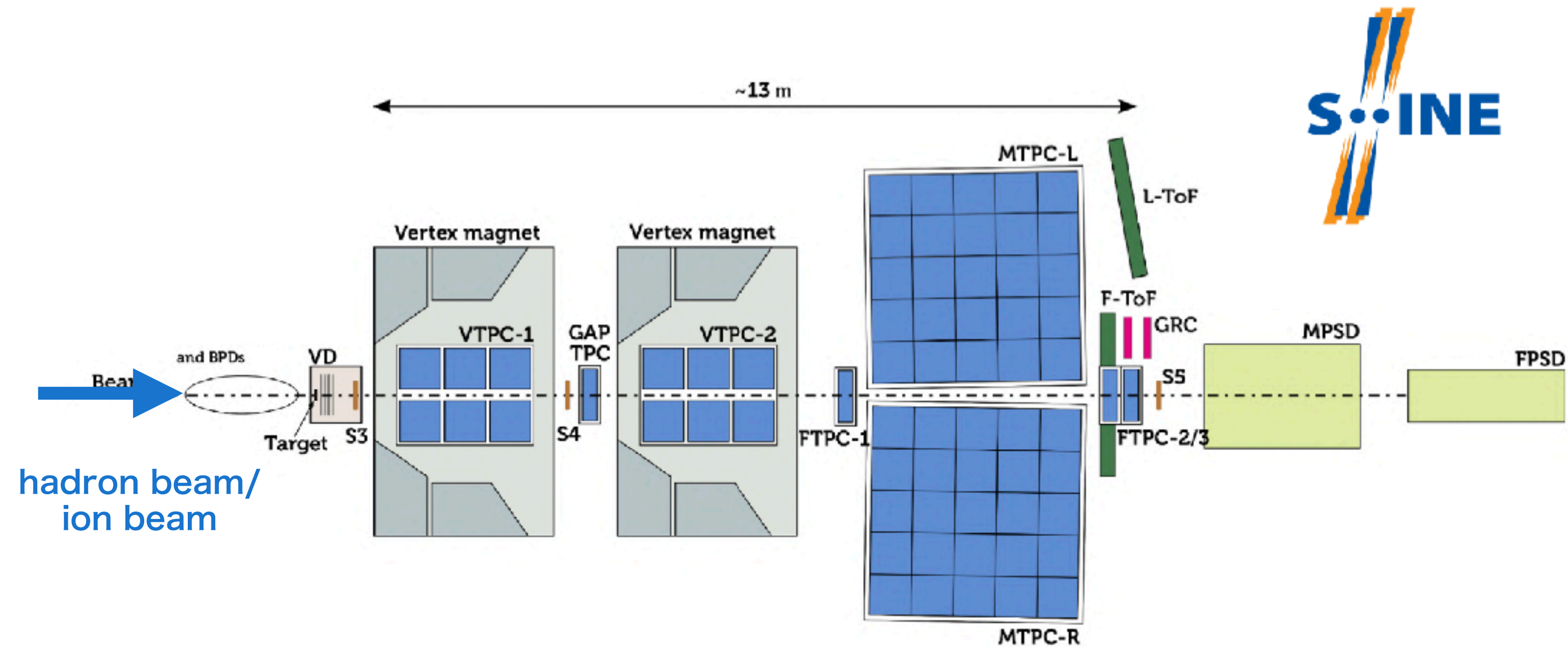
# NA61/SHINE 実験

"The SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment"

2



<http://www.lhc-closer.es/>より

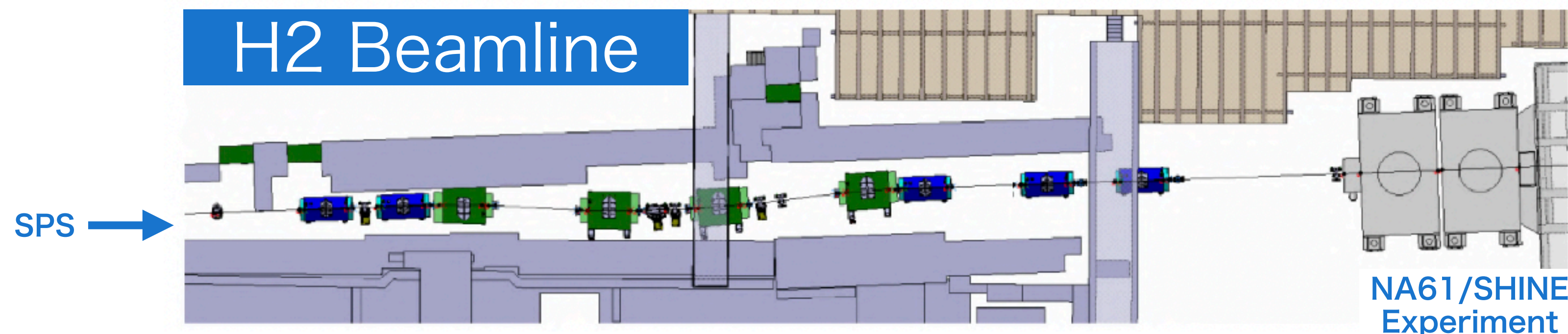
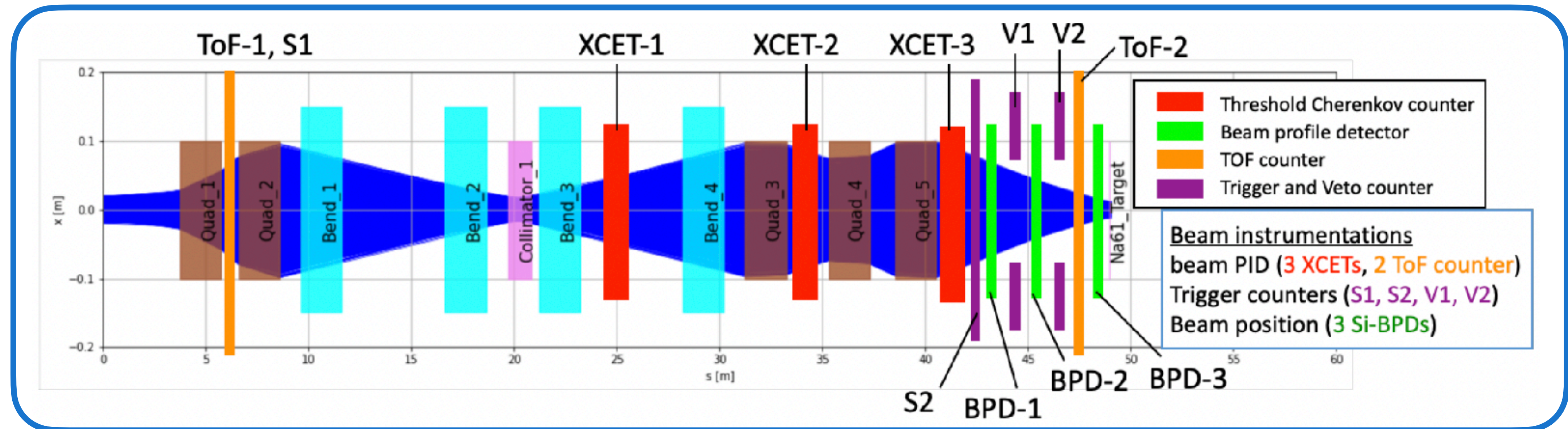


- CERN SPSの取り出しビームをBe標的に当て、生成した二次ビームを用いた固定標的実験
- 複数のTPCにより、標的で生成された粒子の飛跡を観測し、粒子識別、運動量測定が可能
- 低運動量領域のハドロン生成反応の測定により、大気ニュートリノ、加速器ニュートリノのフラックス精度向上が期待できる



# NA61/SHINE 低運動量ハドロンビームライン 3

- ・ 2 - 13 GeV/cのハドロン ( $p$ ,  $\pi^+$ ,  $K^+$ ) ビームラインの実現に向け、  
広範囲ビームプロファイルモニター、**低運動量に適した粒子識別検出器**の開発を進めている

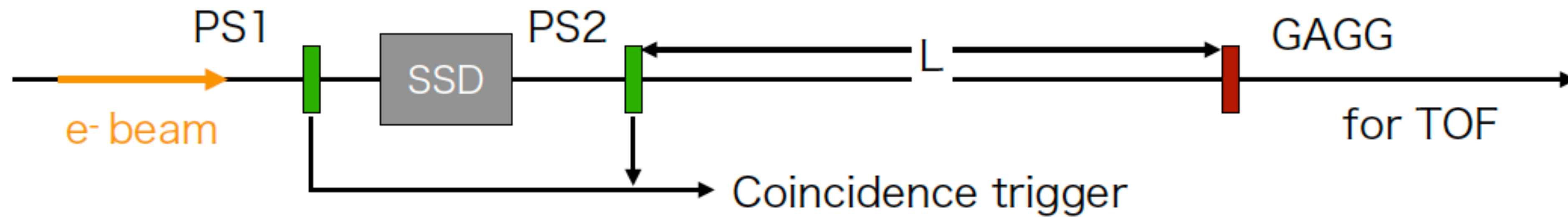


**TOF (Time of Flight) 検出器**  
**の開発・評価 (本講演内容)**



# 過去のビームテスト

4

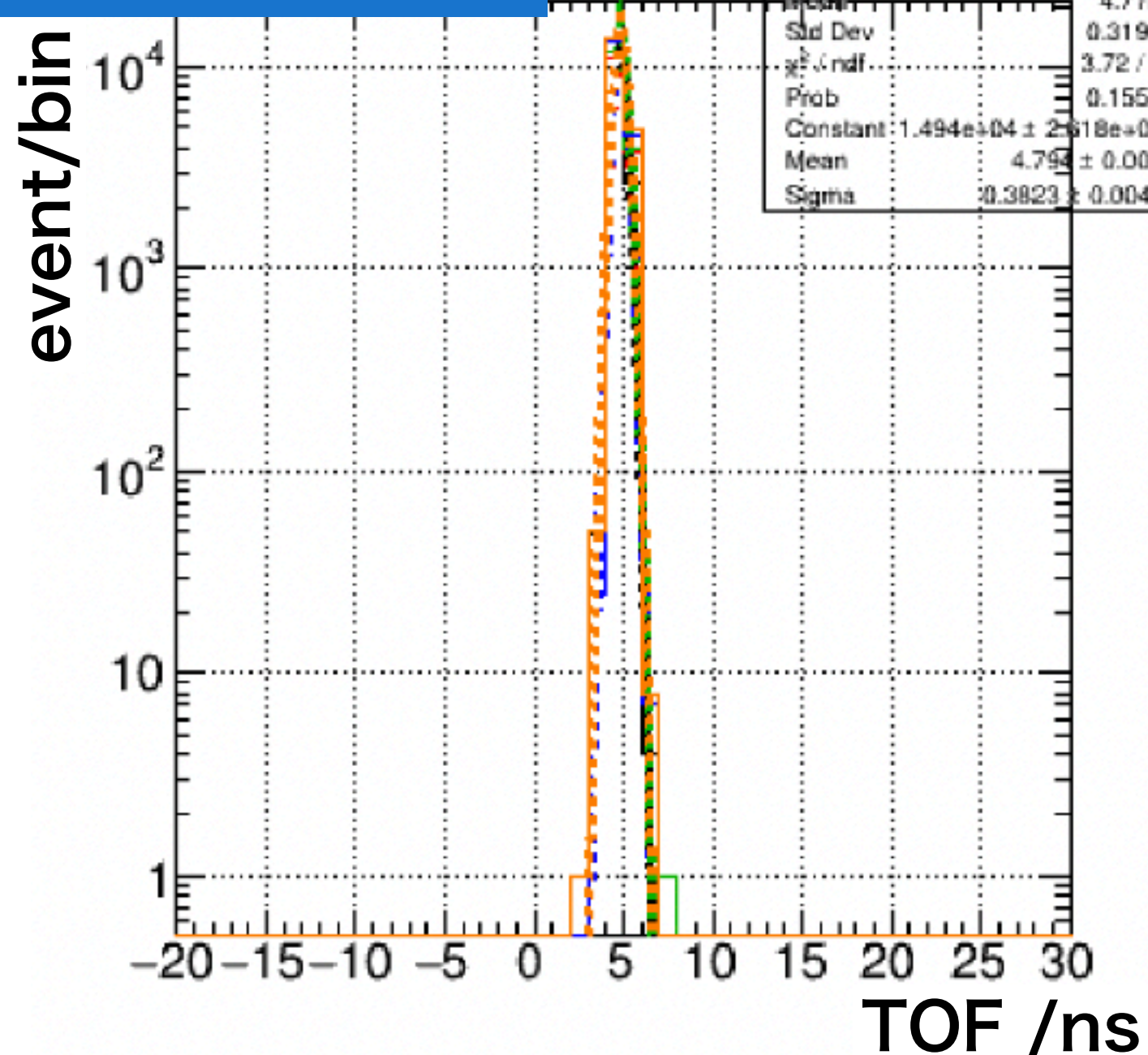


Beam test @KEK ARTBL (2023/12/24 - 27)

プラスチック  
シンチレータ



PS1-2 TOF



要求： 低ビームロス ( $\leq 5$  mm厚) & 高分解能 ( $< 500$  ps)

現状： • GAGG:  $\sigma_{\text{TOF}} \sim 900$  ps (average)

• プラスチックシンチレータ (1 cm厚):  $\sigma_{\text{TOF}} \sim 390$  ps  
-> 5 mm厚だと光量 1/2 ? -> 要求に届かない可能性

改良： • MCシミュレーションでデザイン再検討

• 試作TOF検出器をビームテストで評価

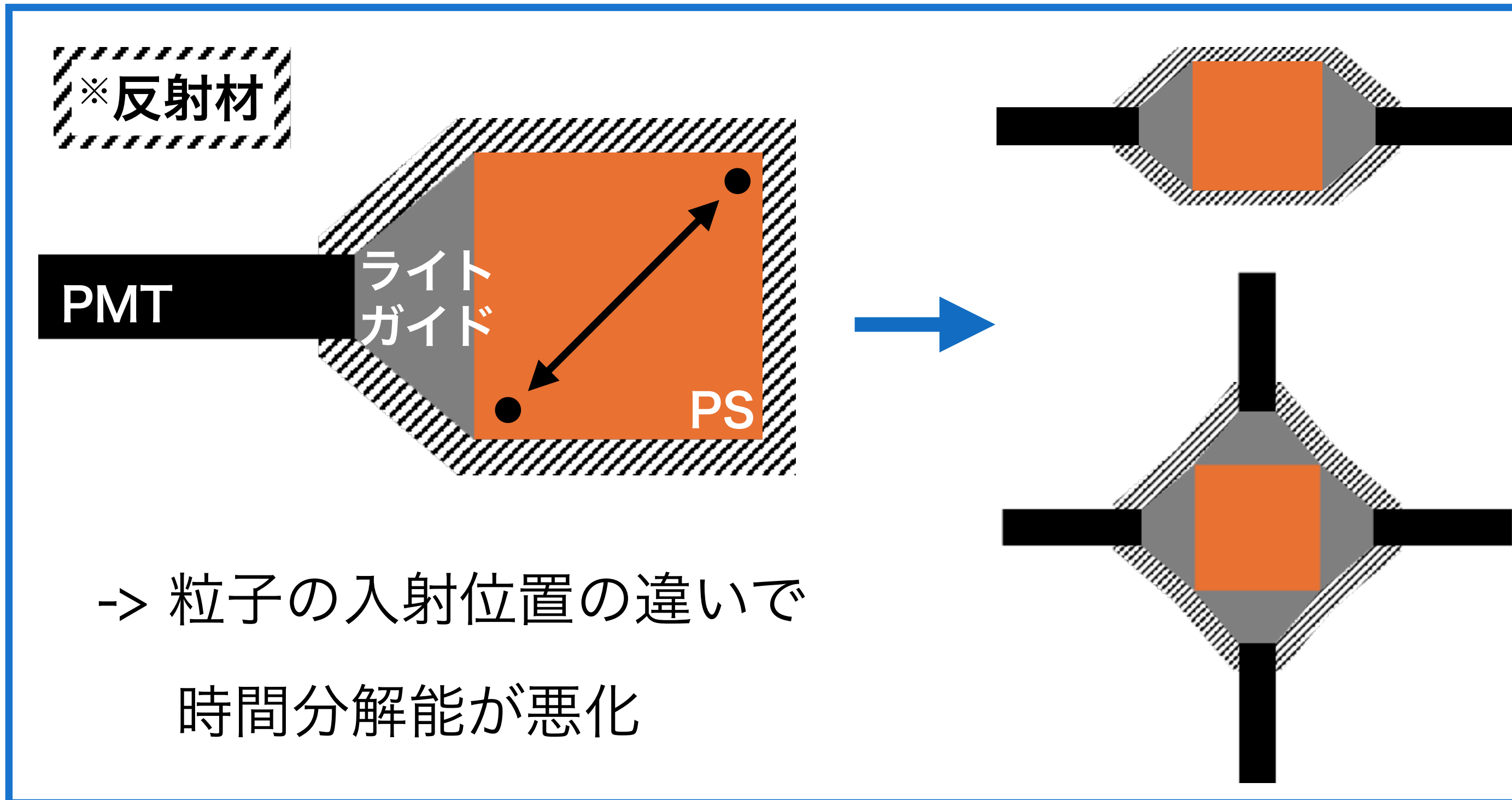


# MCシミュレーション

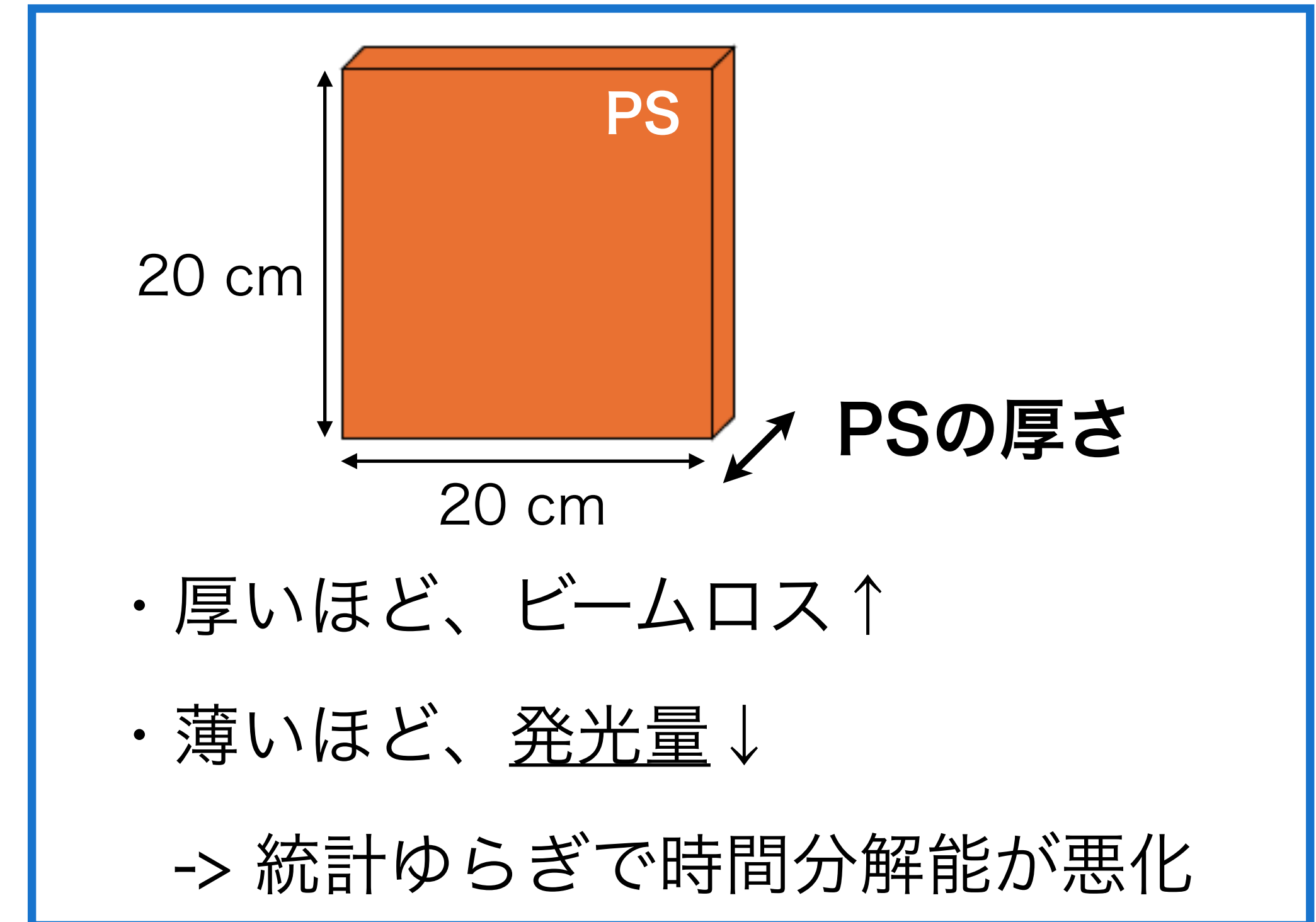
5

## プラスチックシンチレータのデザインを改良

### ① 信号読み出しのPMTの本数



### ② シンチレータの厚さ



## Geant4によるMCシミュレーション



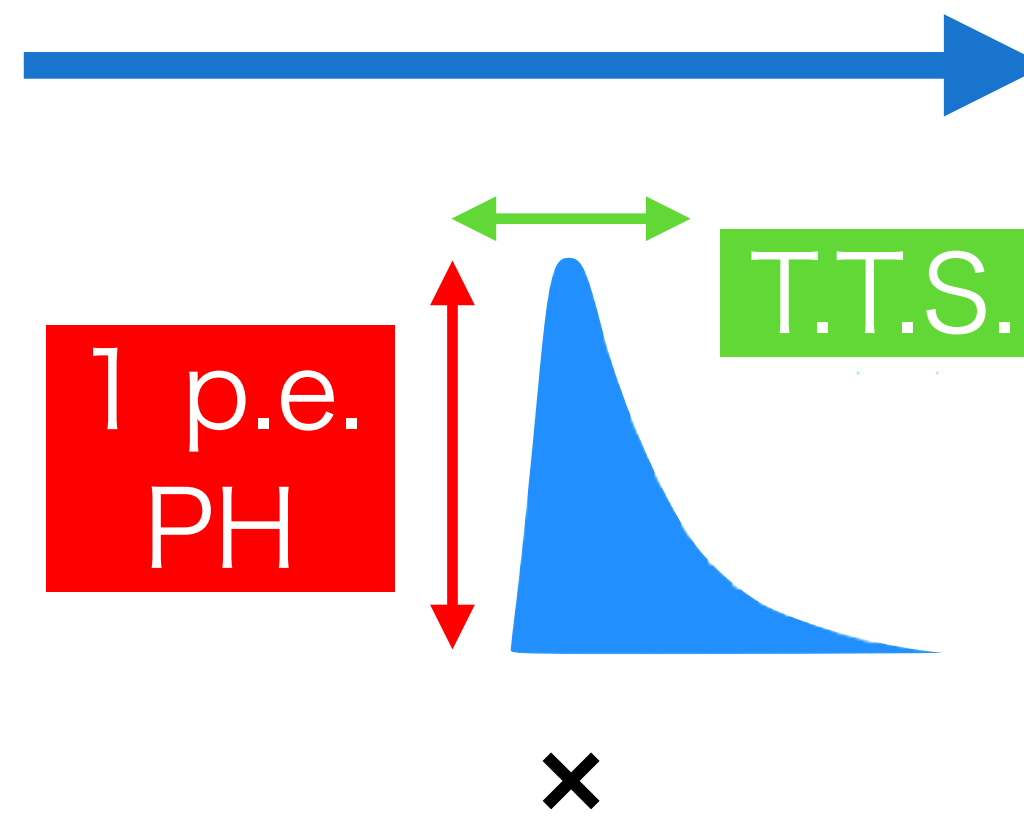
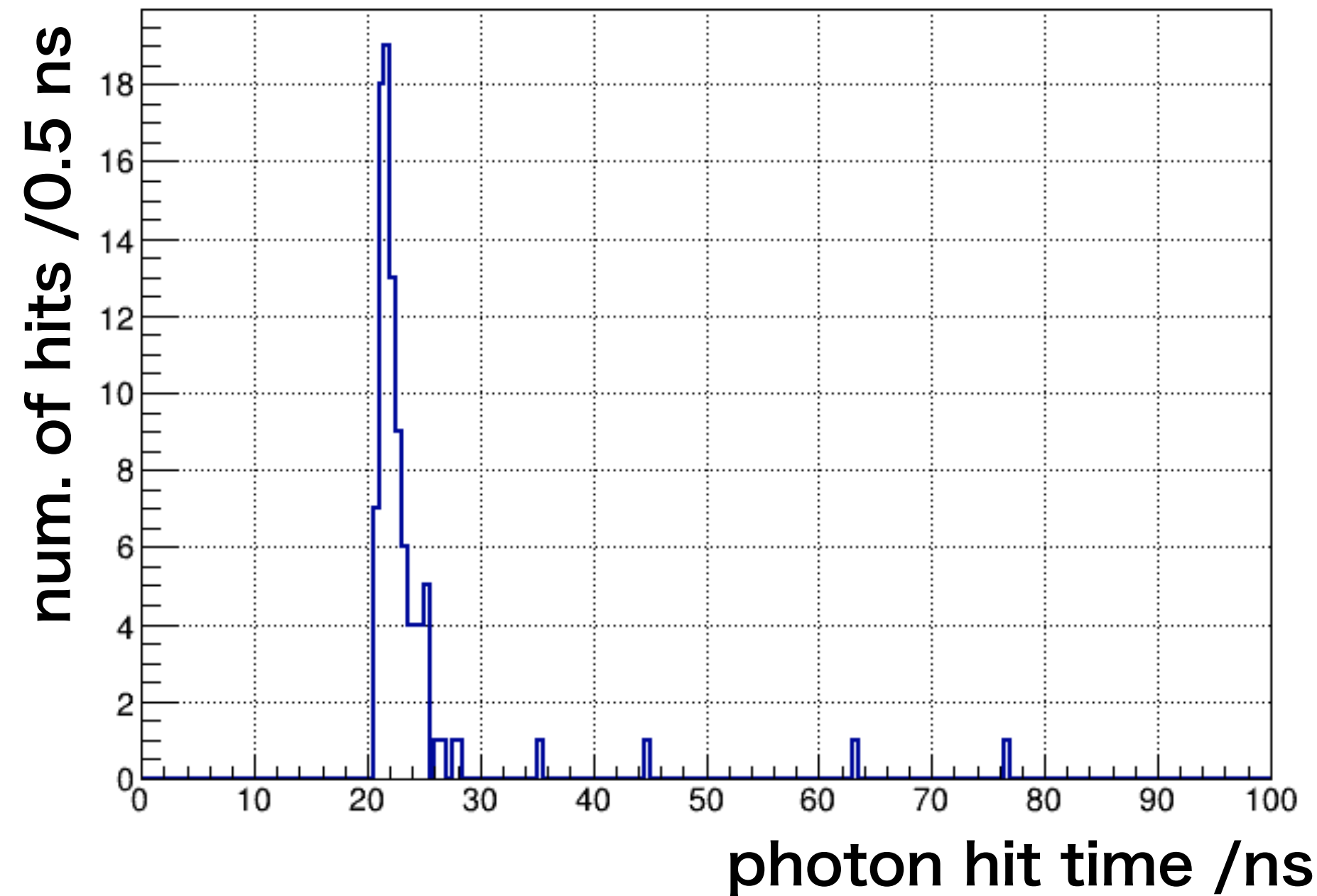
- ・ 1 GeVの $\mu^+$ 粒子を、シンチレータ中央に照射（ビームの拡がり無視）
- ・ 1000回 照射 × 10 run = 10k events



# 波形生成

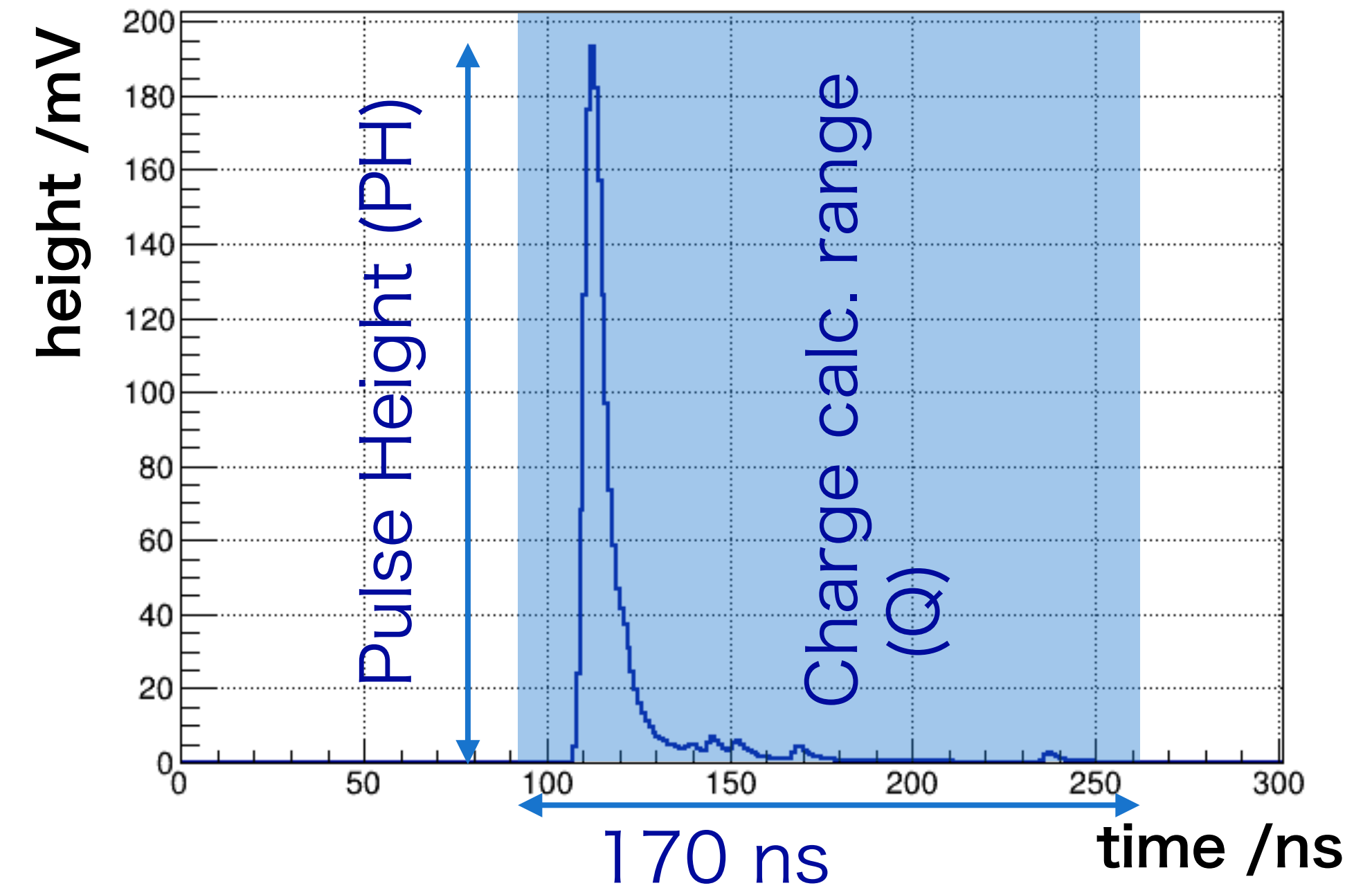
6

## Photon Hit Time

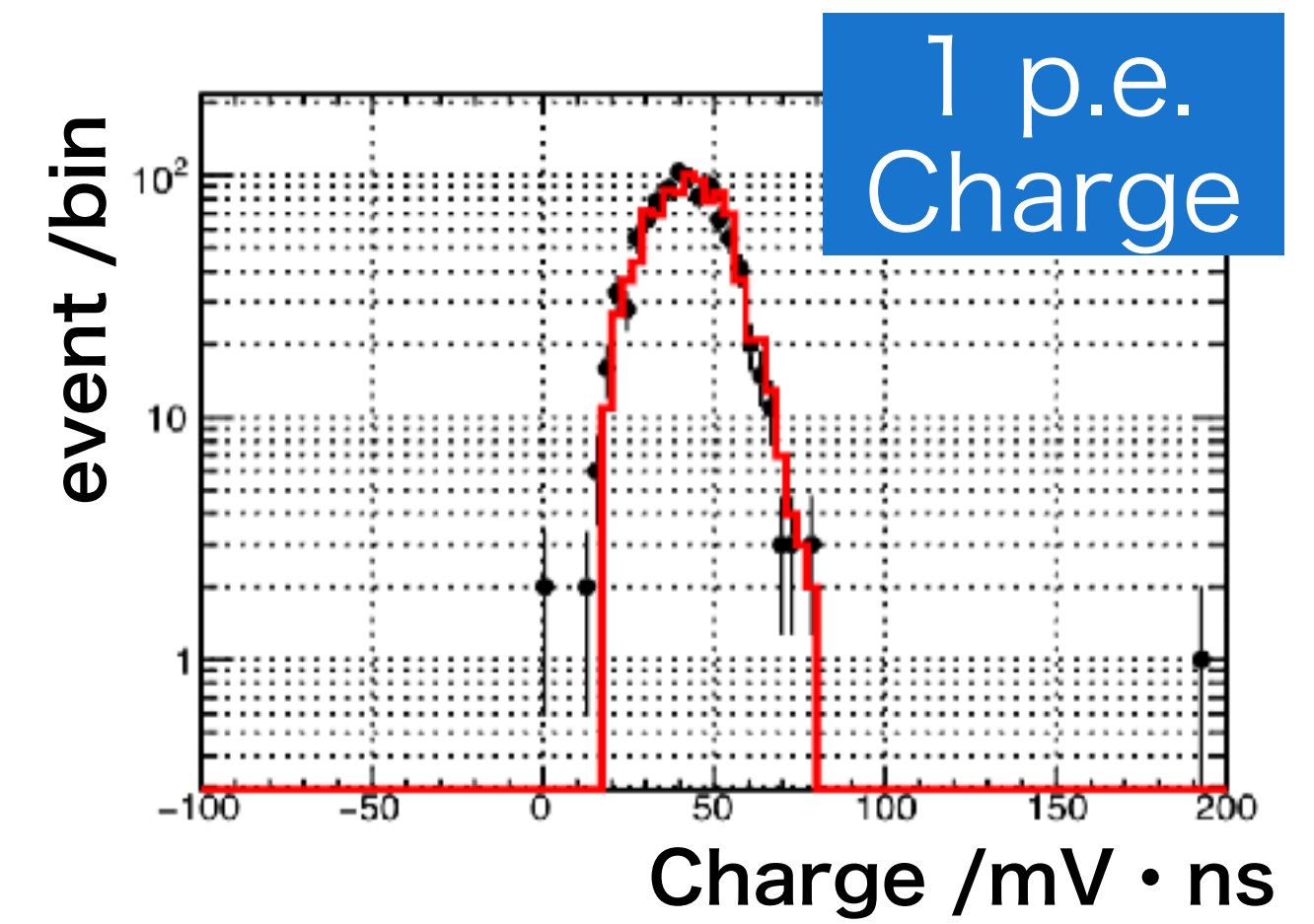
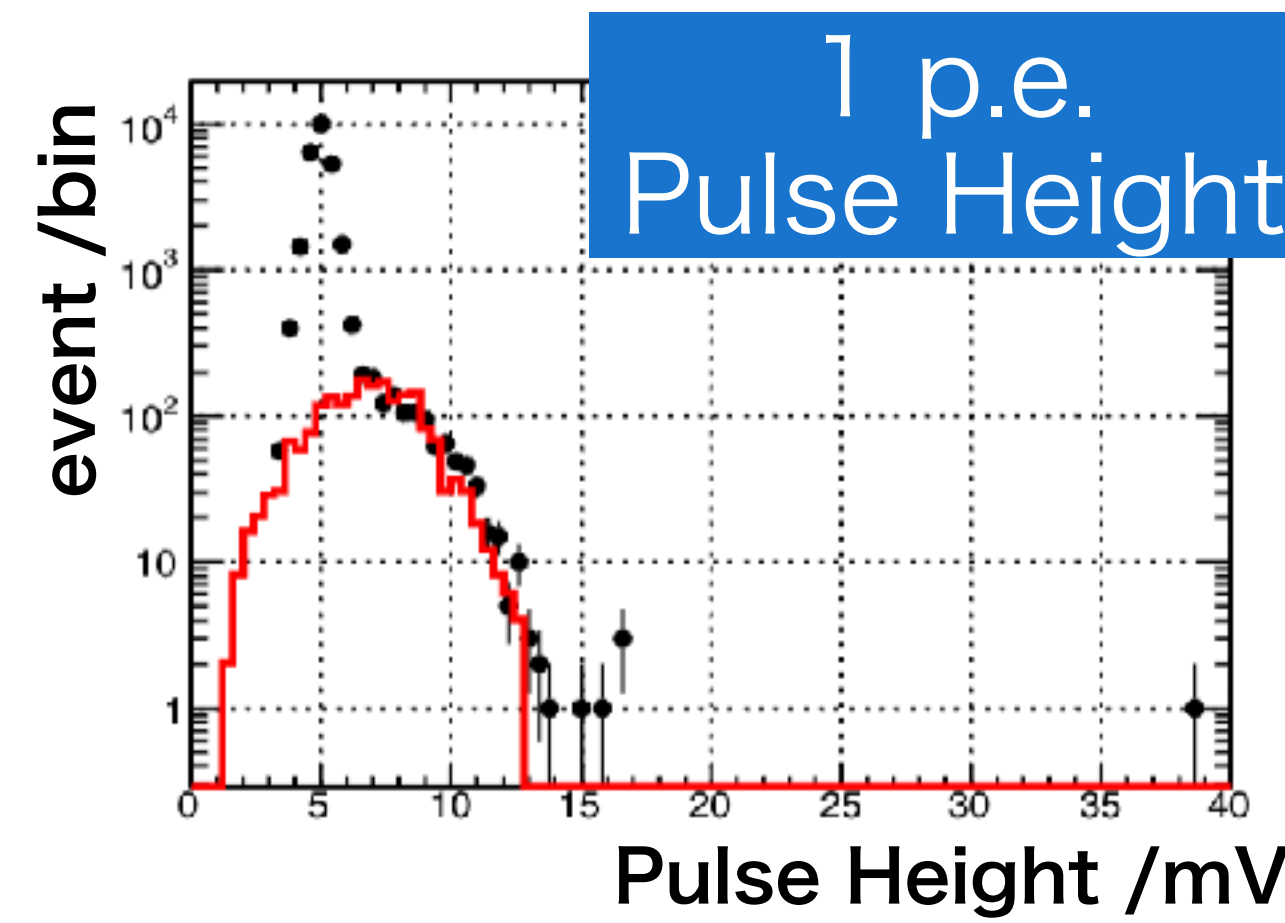


観測光子数

## 1 イベント波形



- Photon Hit Timeに従って、
  - 1 p.e. 波形を重ね合わせ
  - Transit Time Spread (T.T.S.)
  - 1 p.e. 波高値分布を乱数で振って考慮
- 1 p.e. 波形はLandau関数でモデル化

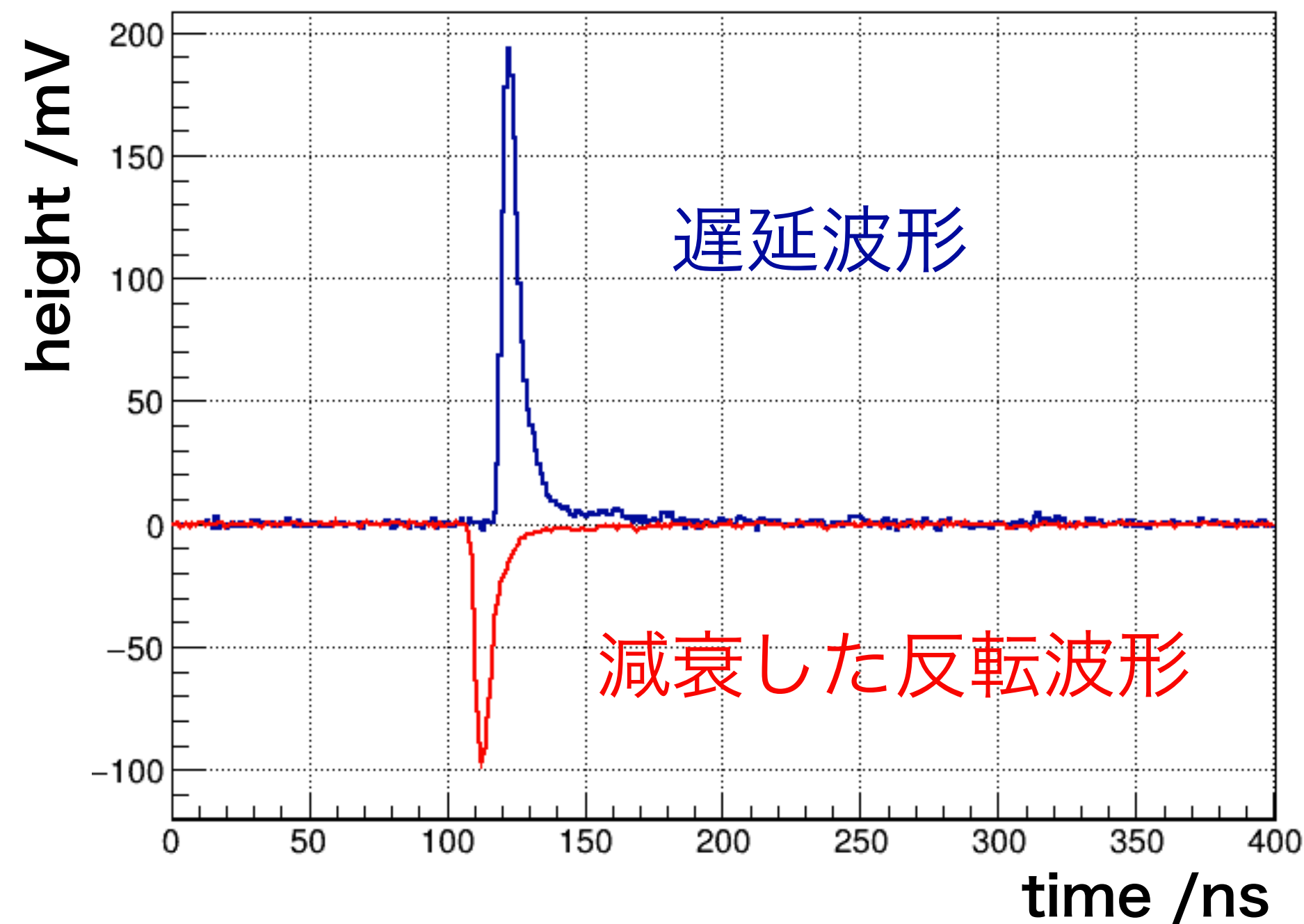




# Hit時間の決定

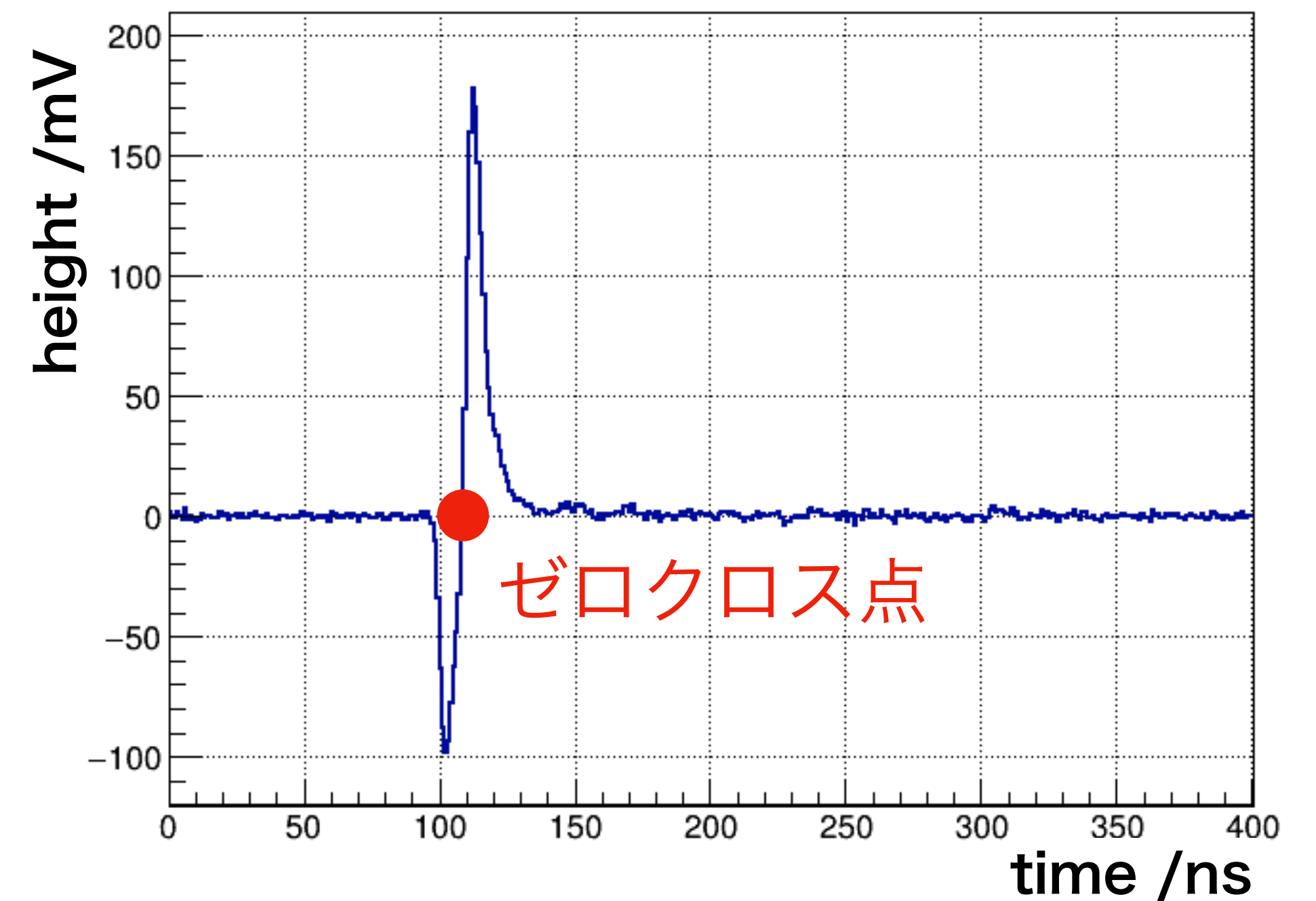
7

CFD入力



重ね合わせ

CFD波形



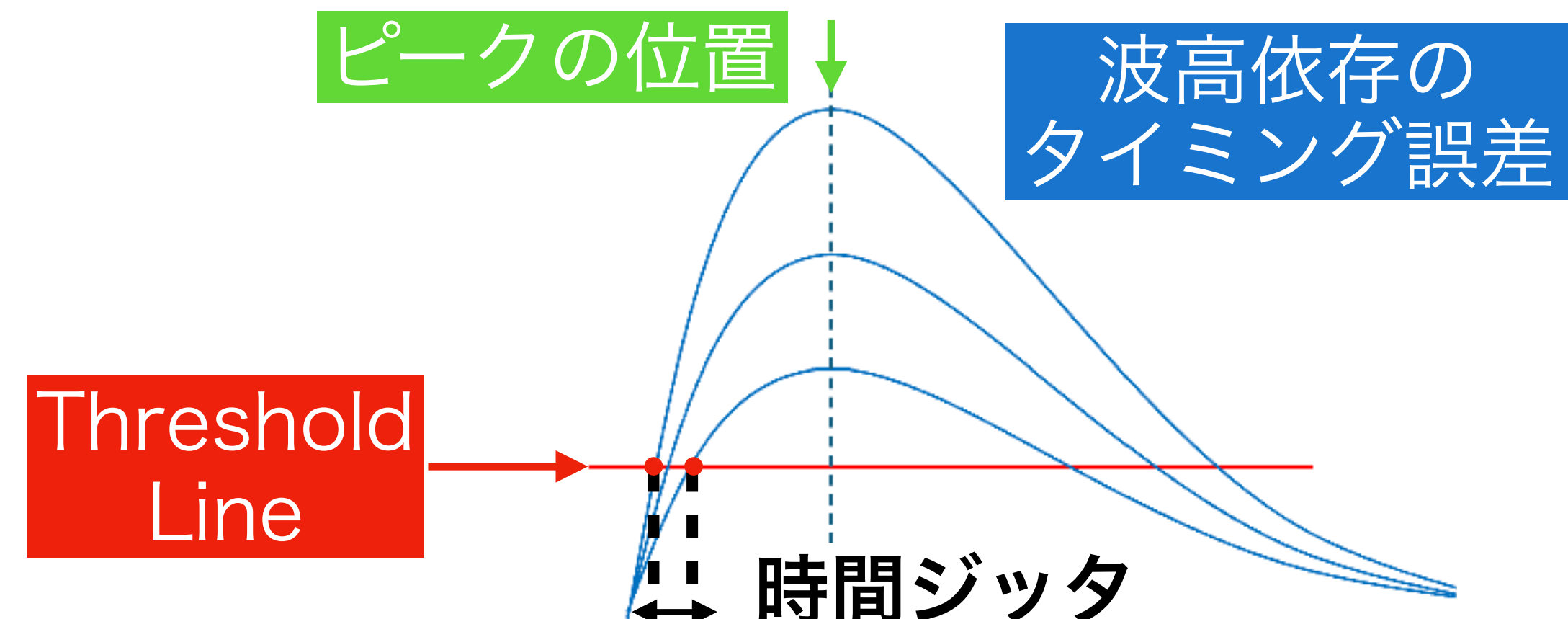
- Constant Fraction Discriminator (CFD) 法を採用し、  
波高値ゆらぎによる時間ジッタを低減
- CFD波形のゼロクロス点の時刻を "Hit 時間" と定義
  - 取得波形は1 GHzサンプリング
  - ゼロクロス時刻は3次スプライン補間により算出

ピークの位置

波高依存の  
タイミング誤差

Threshold  
Line

時間ジッタ





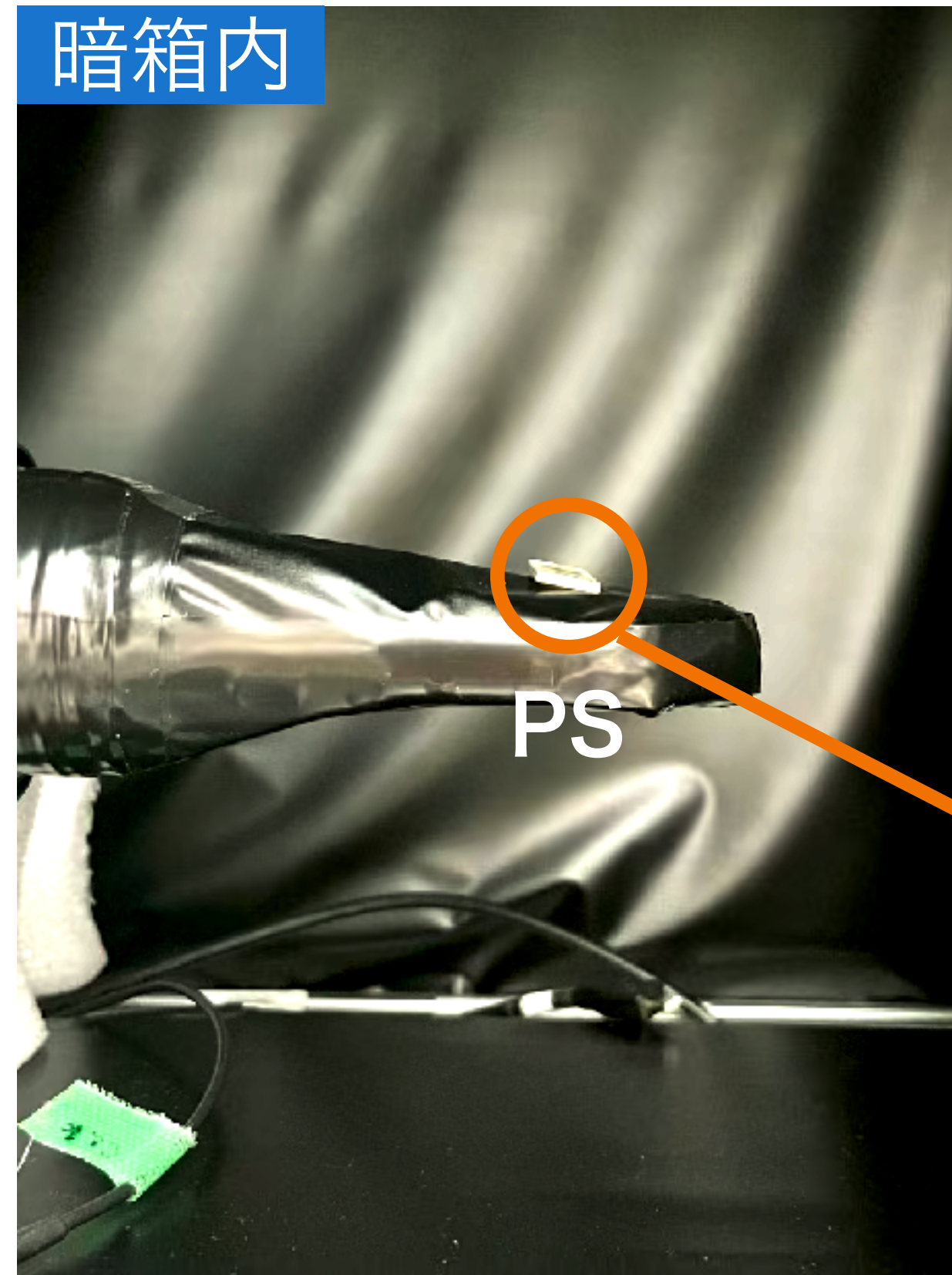
# MC Tuning (線源測定)

8

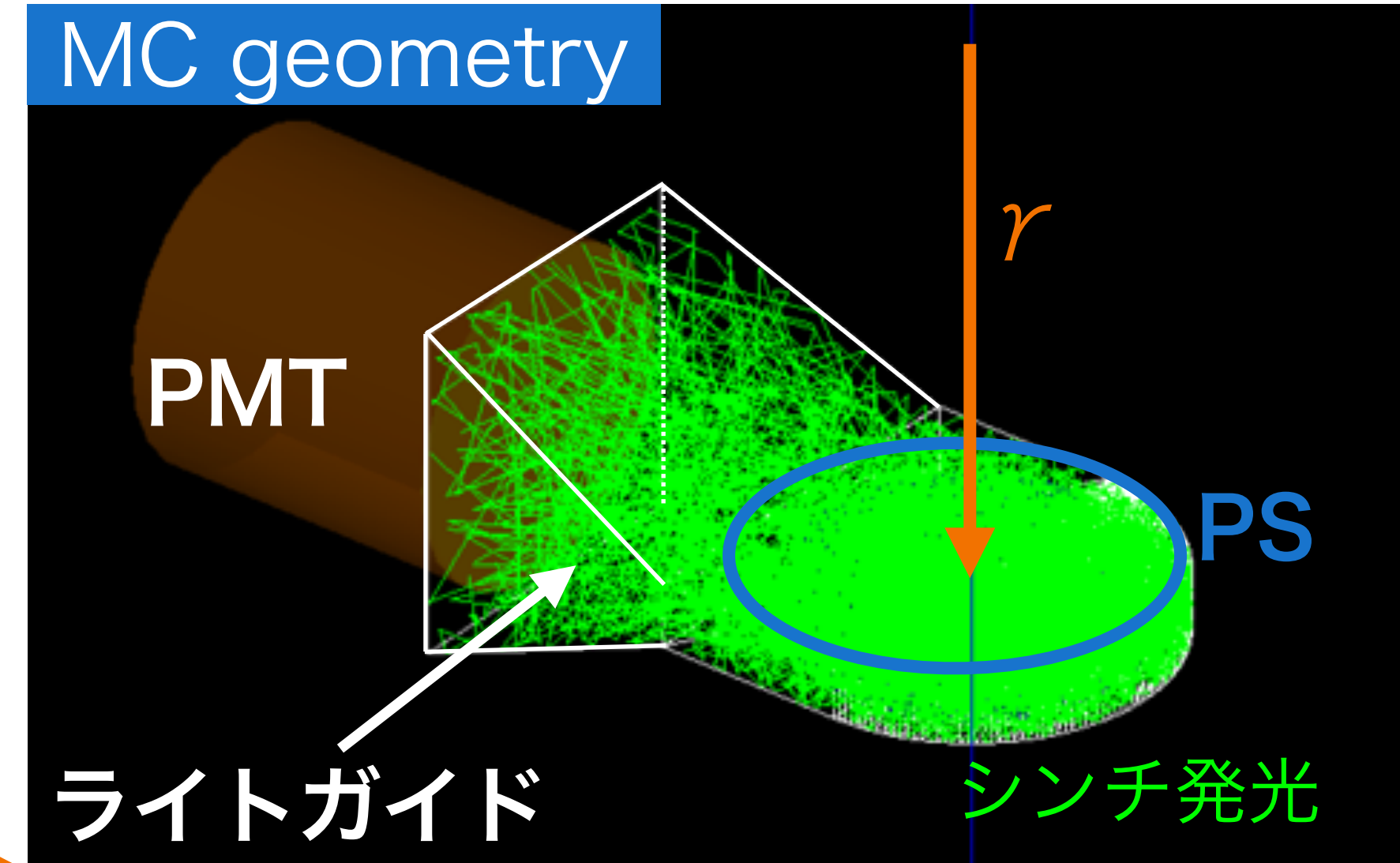
暗箱



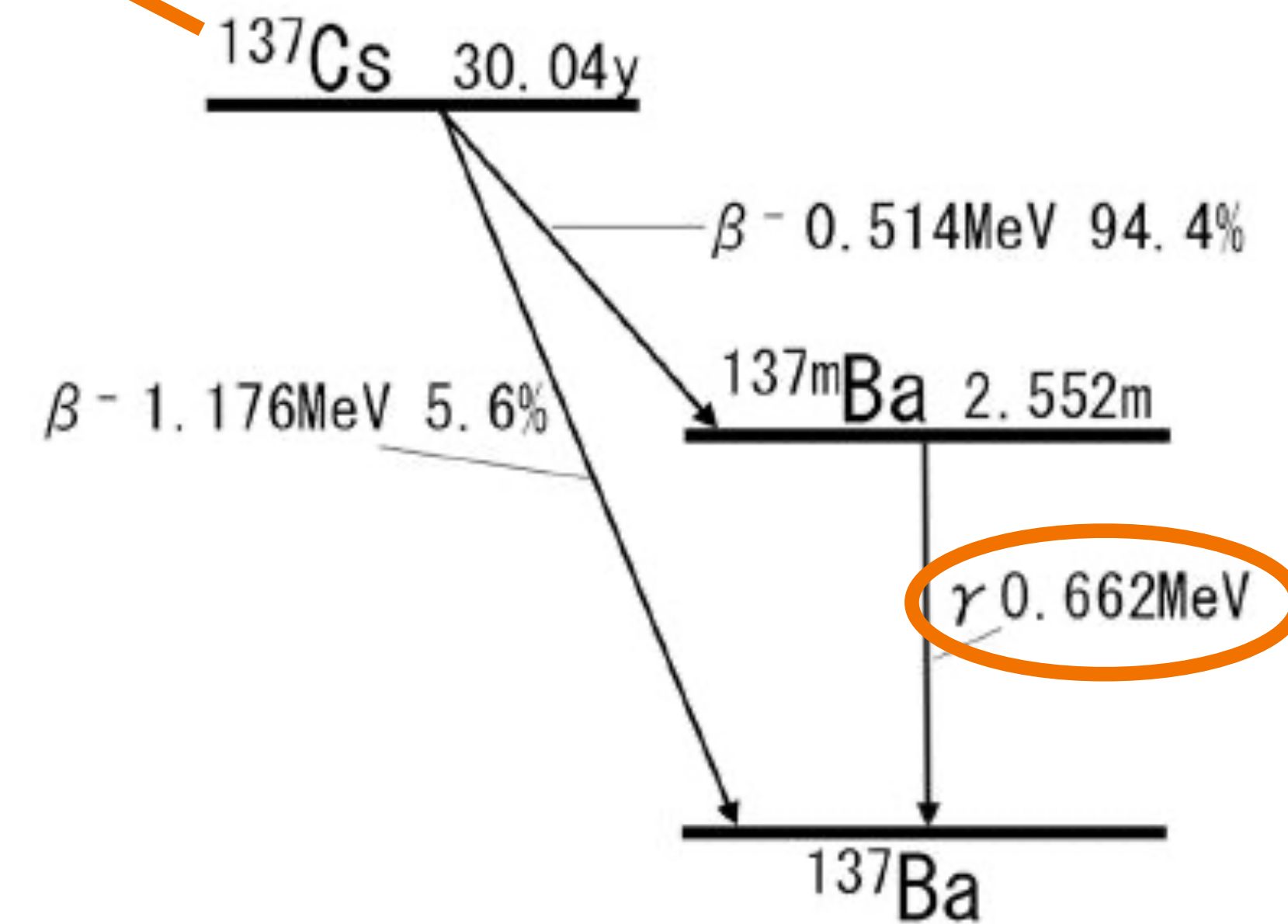
暗箱内



MC geometry



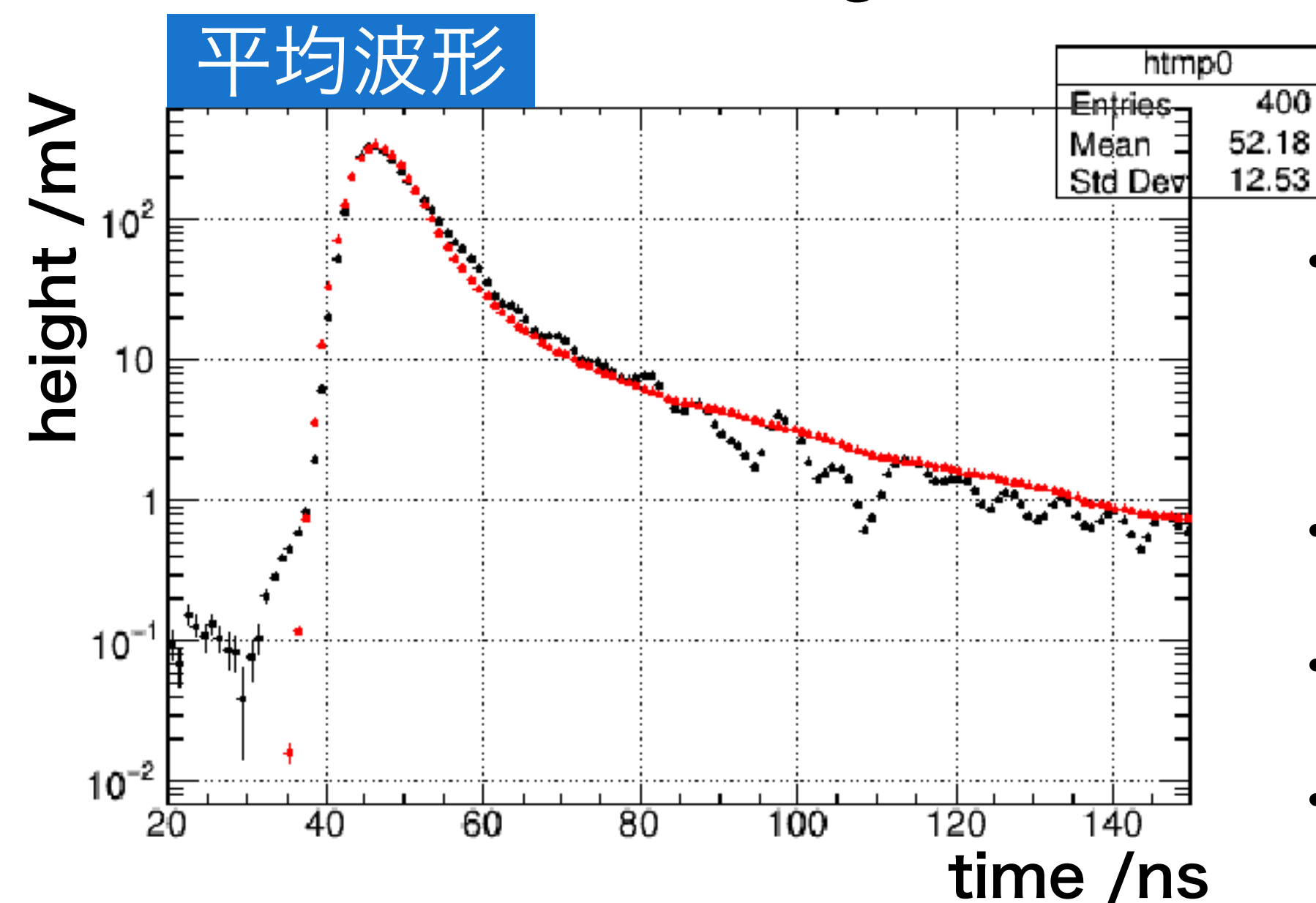
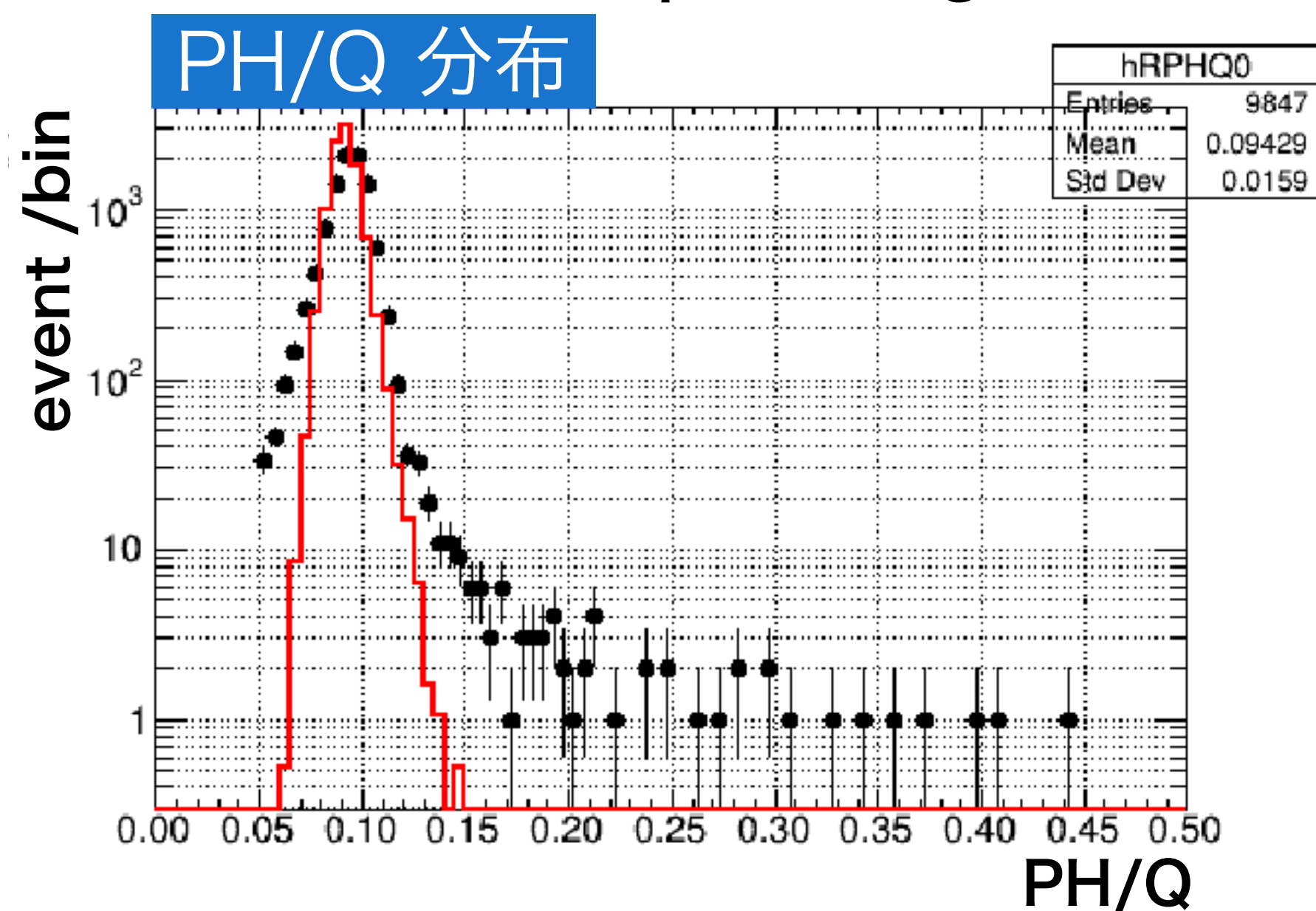
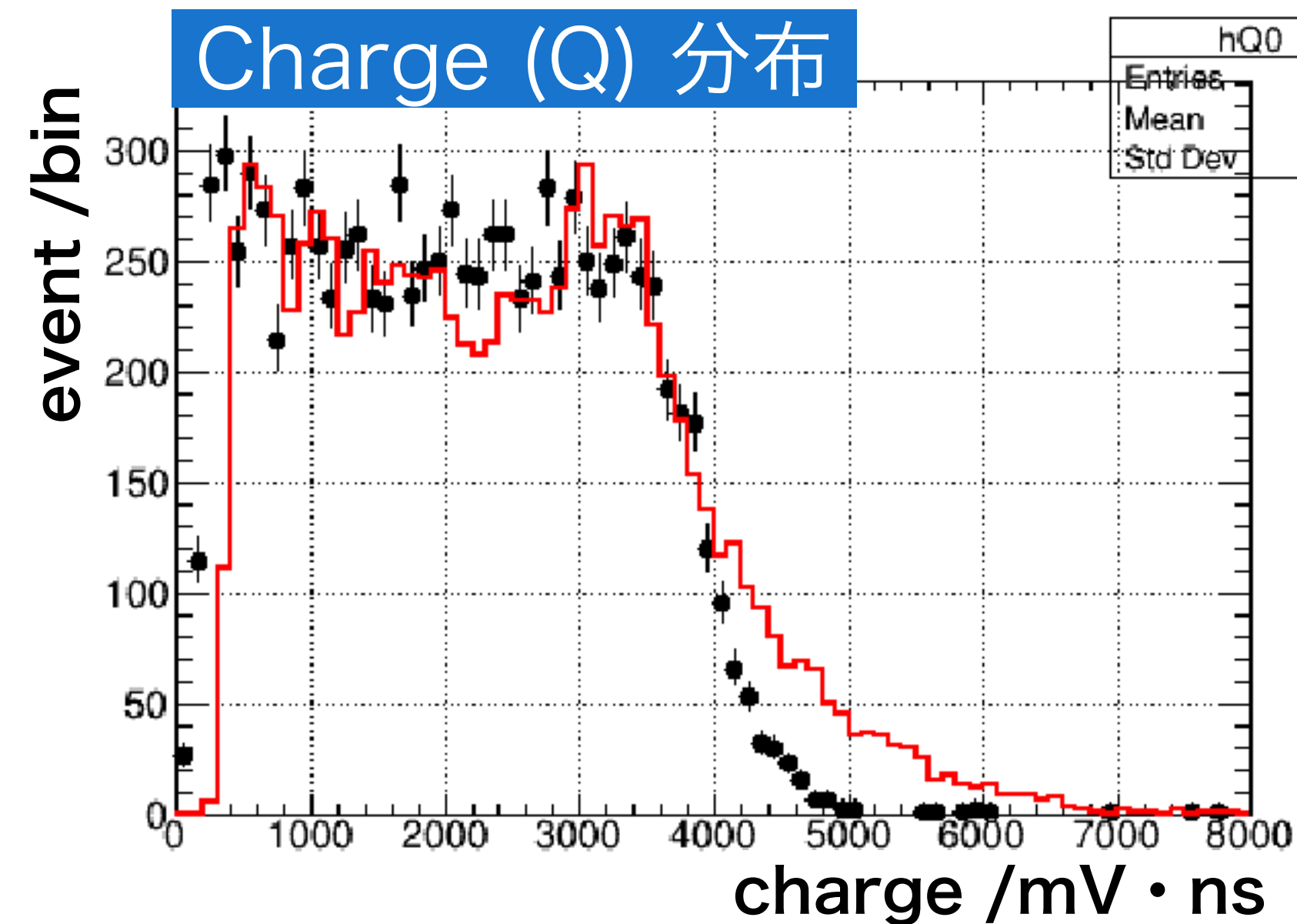
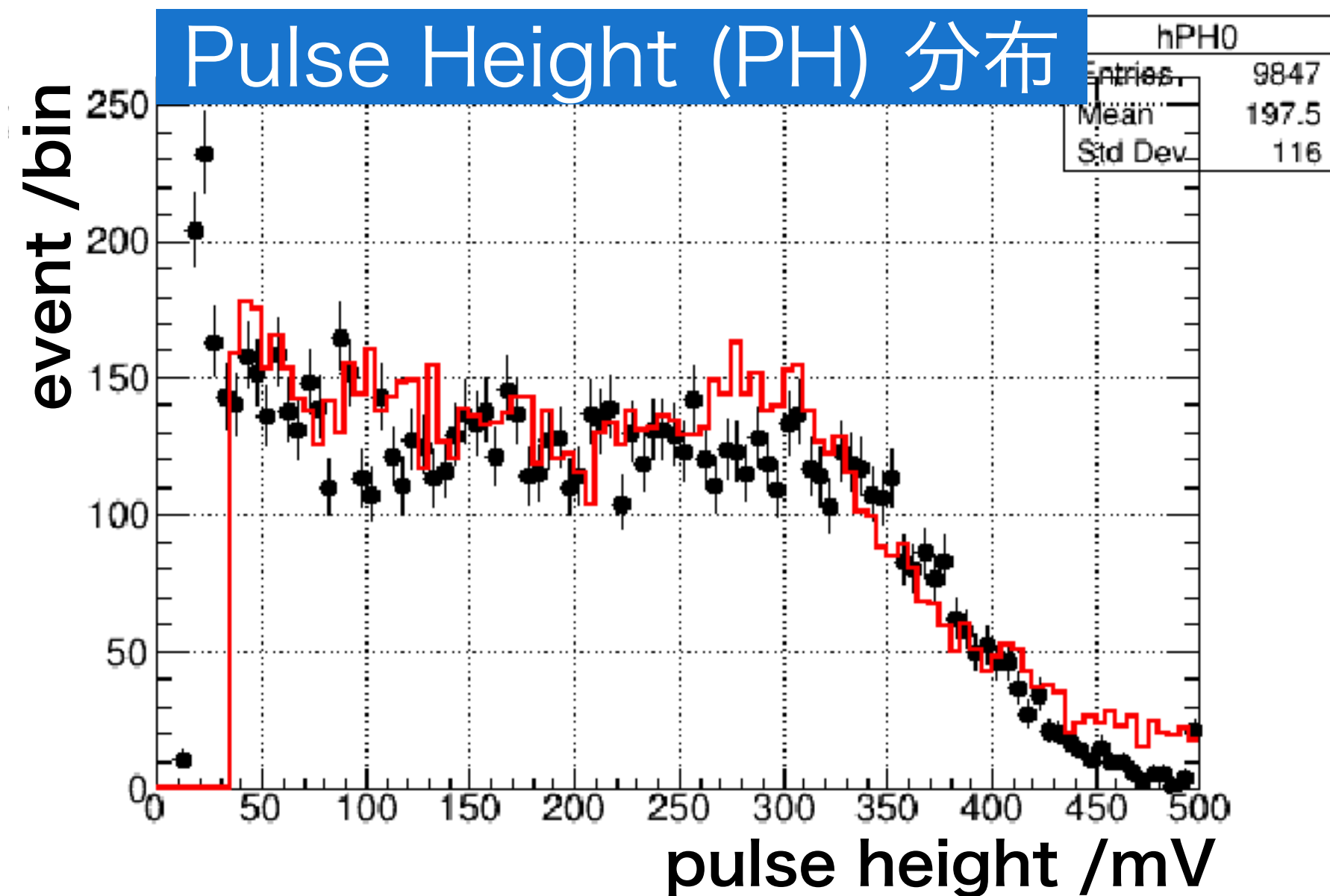
- ・  $^{137}\text{Cs}$ 線源のコンプトンエッジを測定して、MCと比較
- ・ 過去ビームテストで使用した片側読み出しのTOF検出器を使用





# MC Tuning の結果

9



- 黒：data、赤：MC
- Q, PH, PH/Qはラフには一致している
- 平均波形は振幅、形状ともに一致している

## PMT変数

- T.T.S. = 2.0 ns

## シンチレータ変数

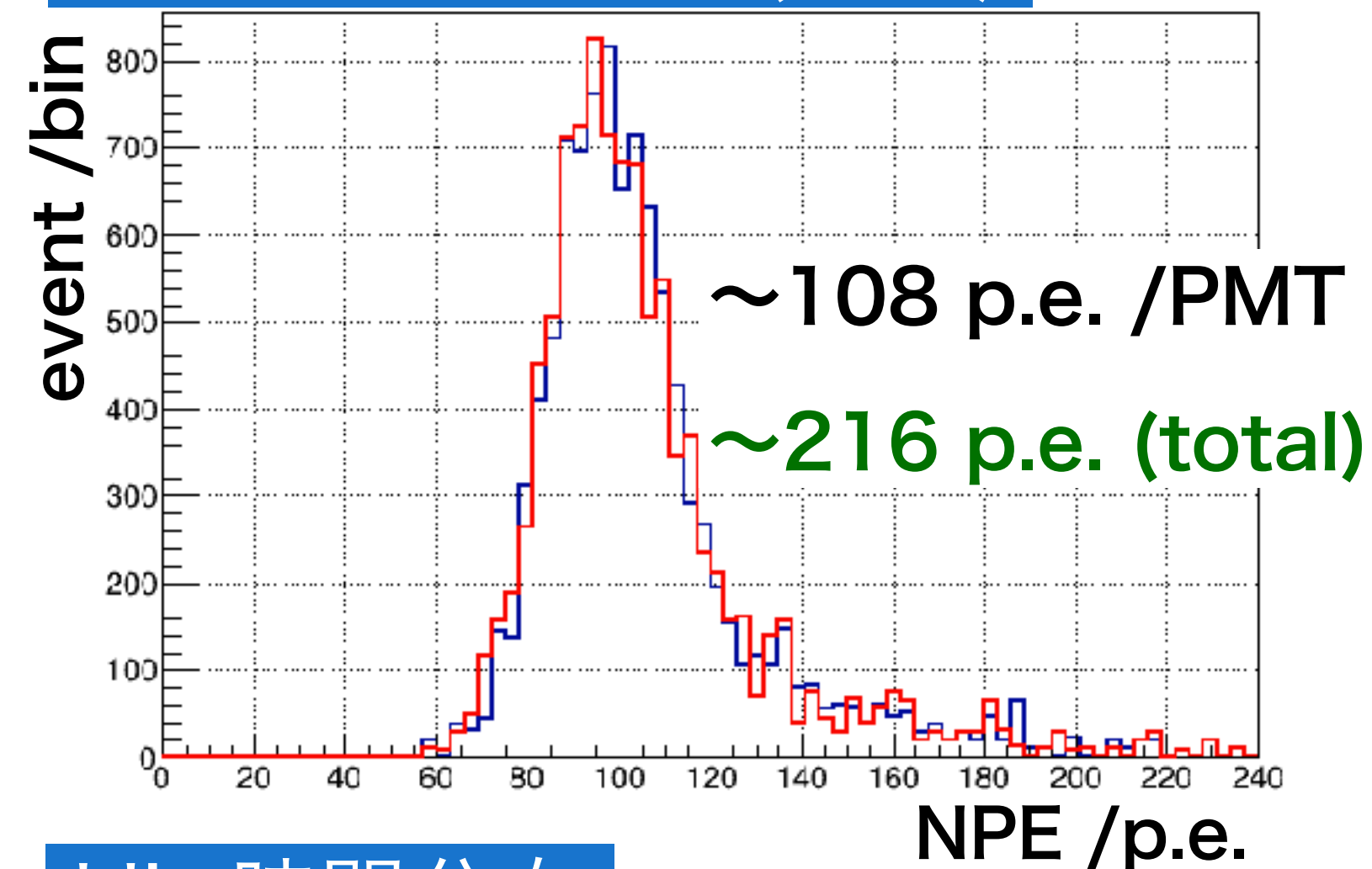
- 発光量 = 8 photon/keV
- 時定数 (速い成分) = 1.5 ns
- 時定数 (遅い成分) = 60 ns

# PMT本数比較のMC結果

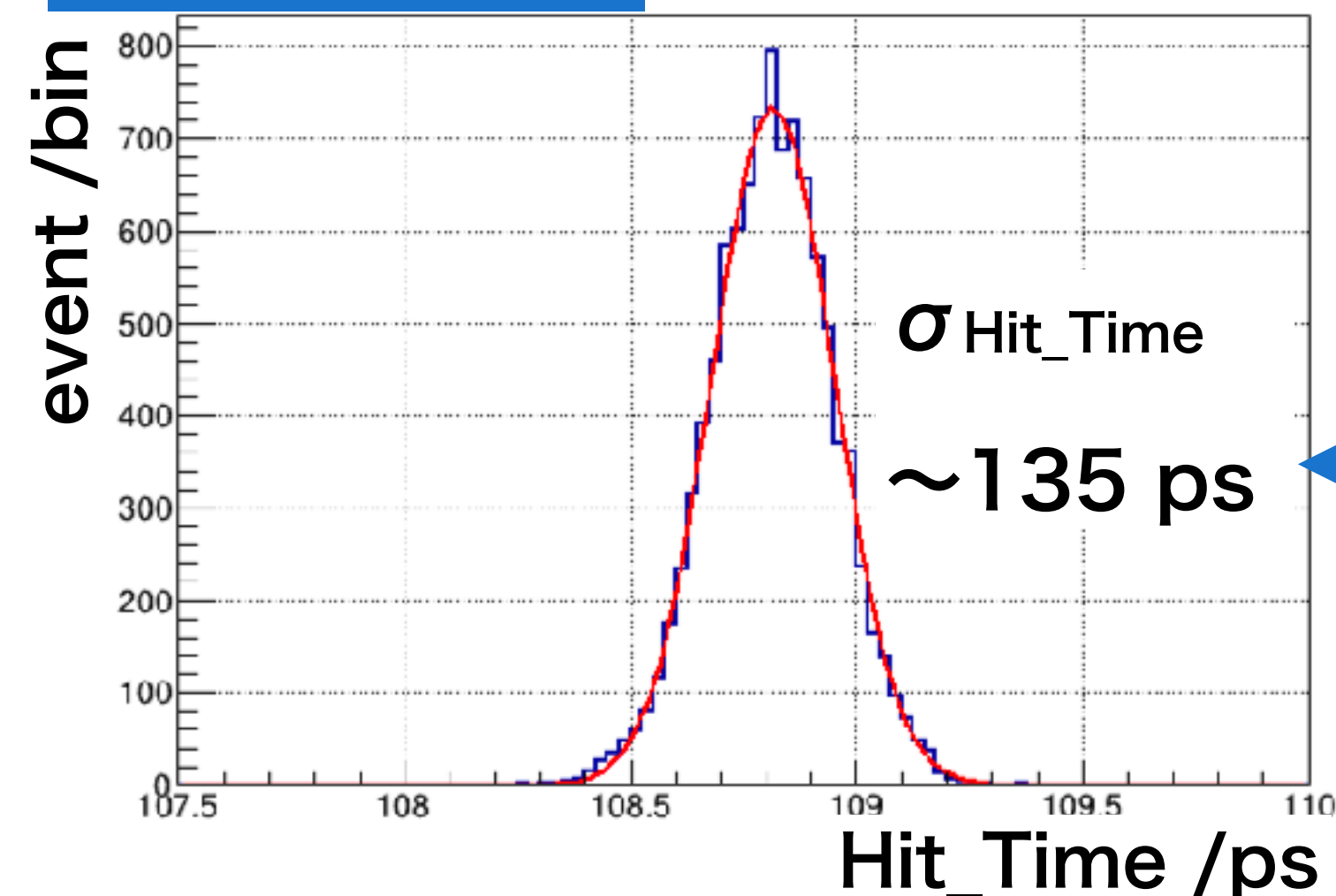
10

## PMT2本

### 各PMT入射光量 (NPE)

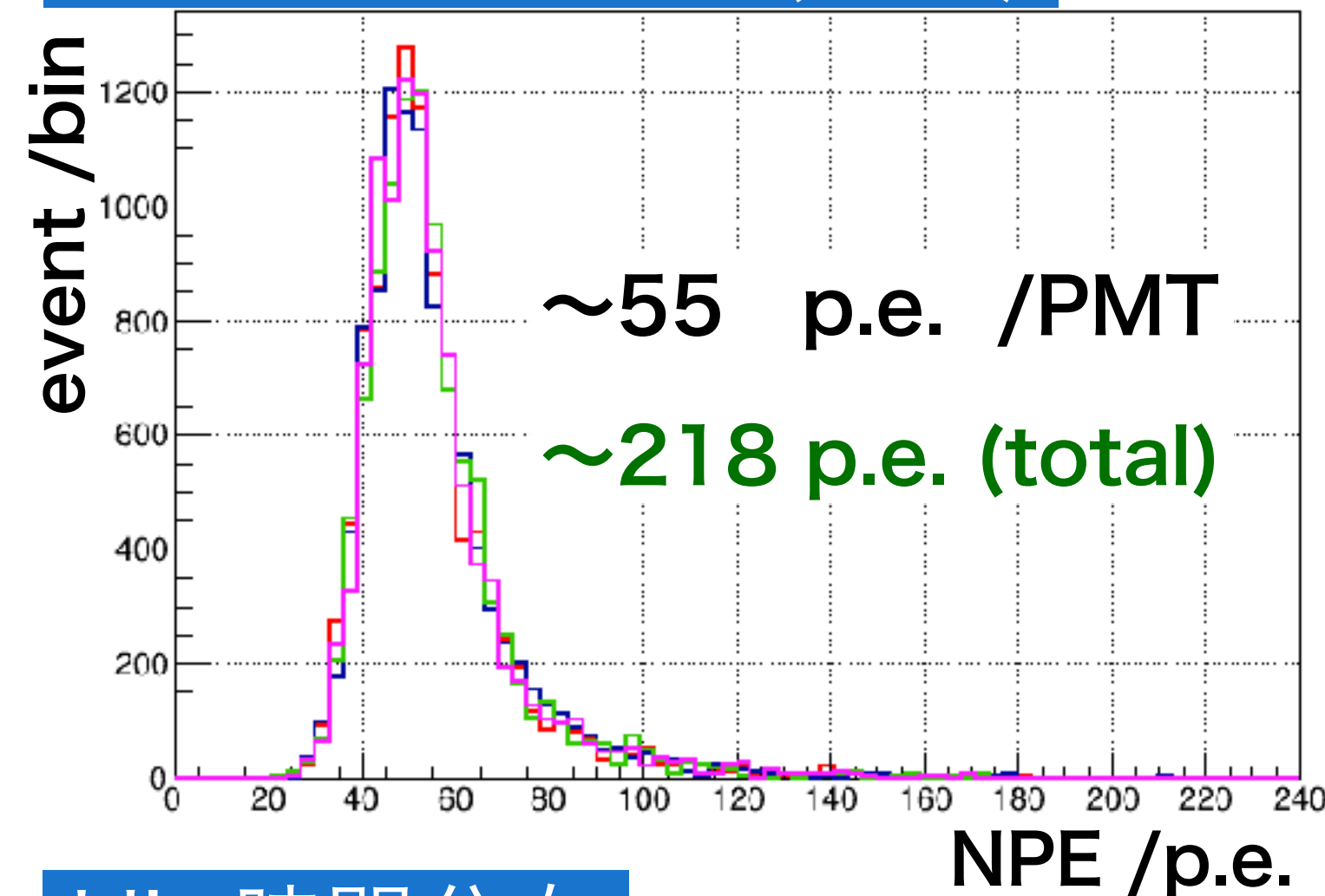


### Hit 時間分布

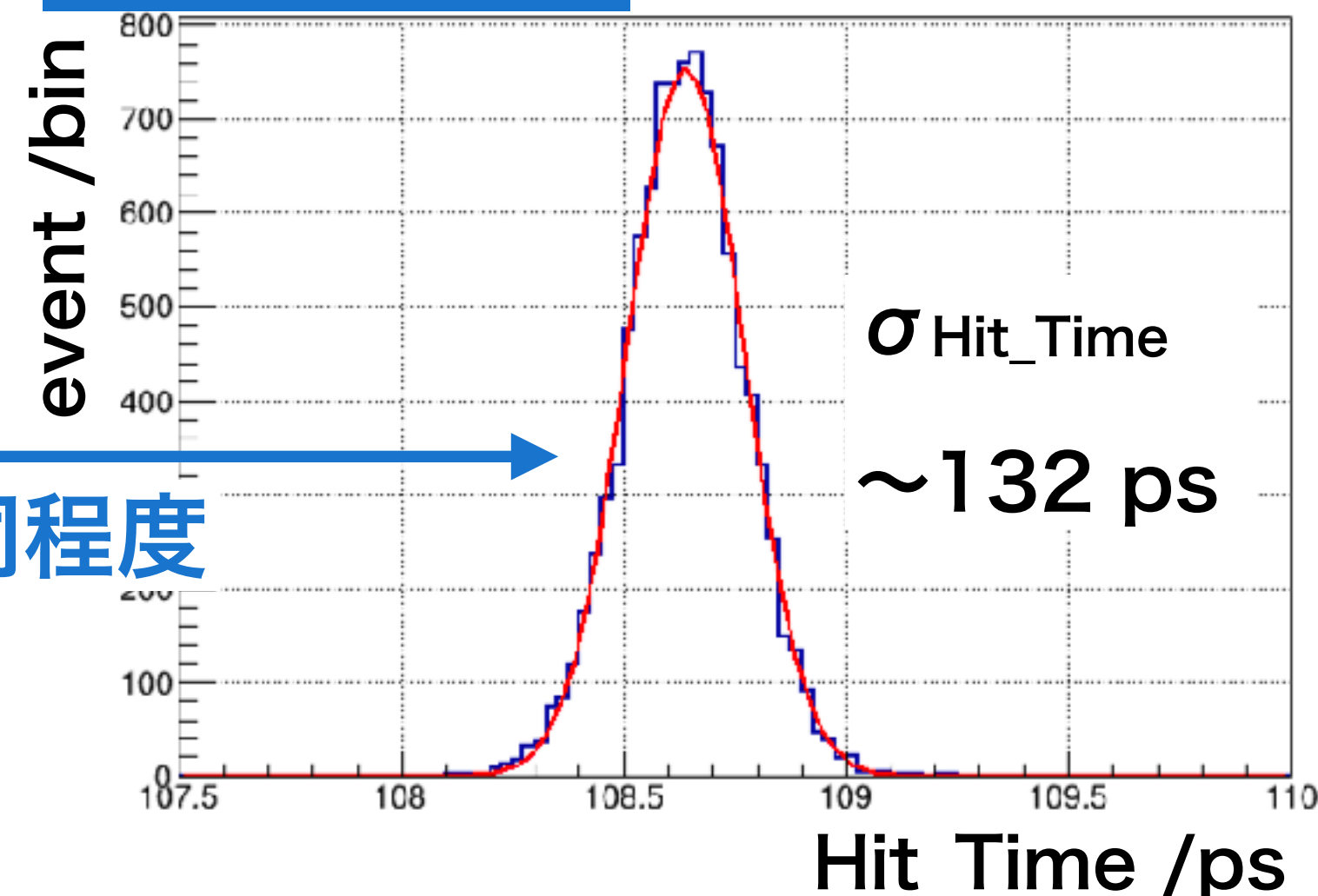


## PMT4本

### 各PMT入射光量 (NPE)



### Hit 時間分布



同程度

• 2PMTで  $\sigma_{\text{Hit\_Time}} \sim 135 \text{ ps}$

->  $\sigma_{\text{TOF}} \sim 191 \text{ ps}$

(TOF = 2検出器の時間差)

• 4PMTと同等の時間分解能を実現

-> PS外側に反射材を配置

→ 光子ロスを抑制

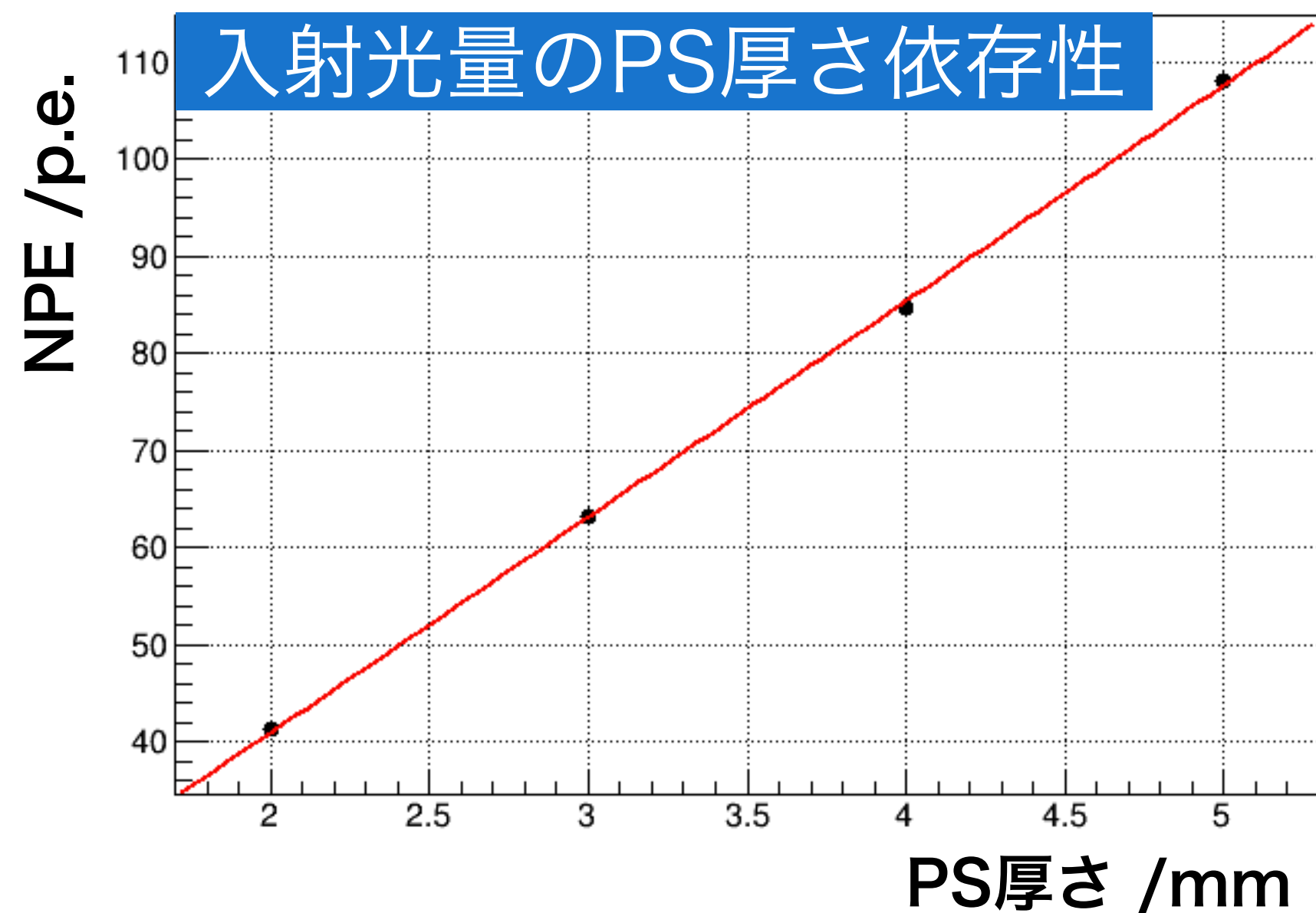
-> 反射光 (~1ns程度の遅れ)は速い  
発光成分に重なる

→ 反射光も立ち上がりに寄与

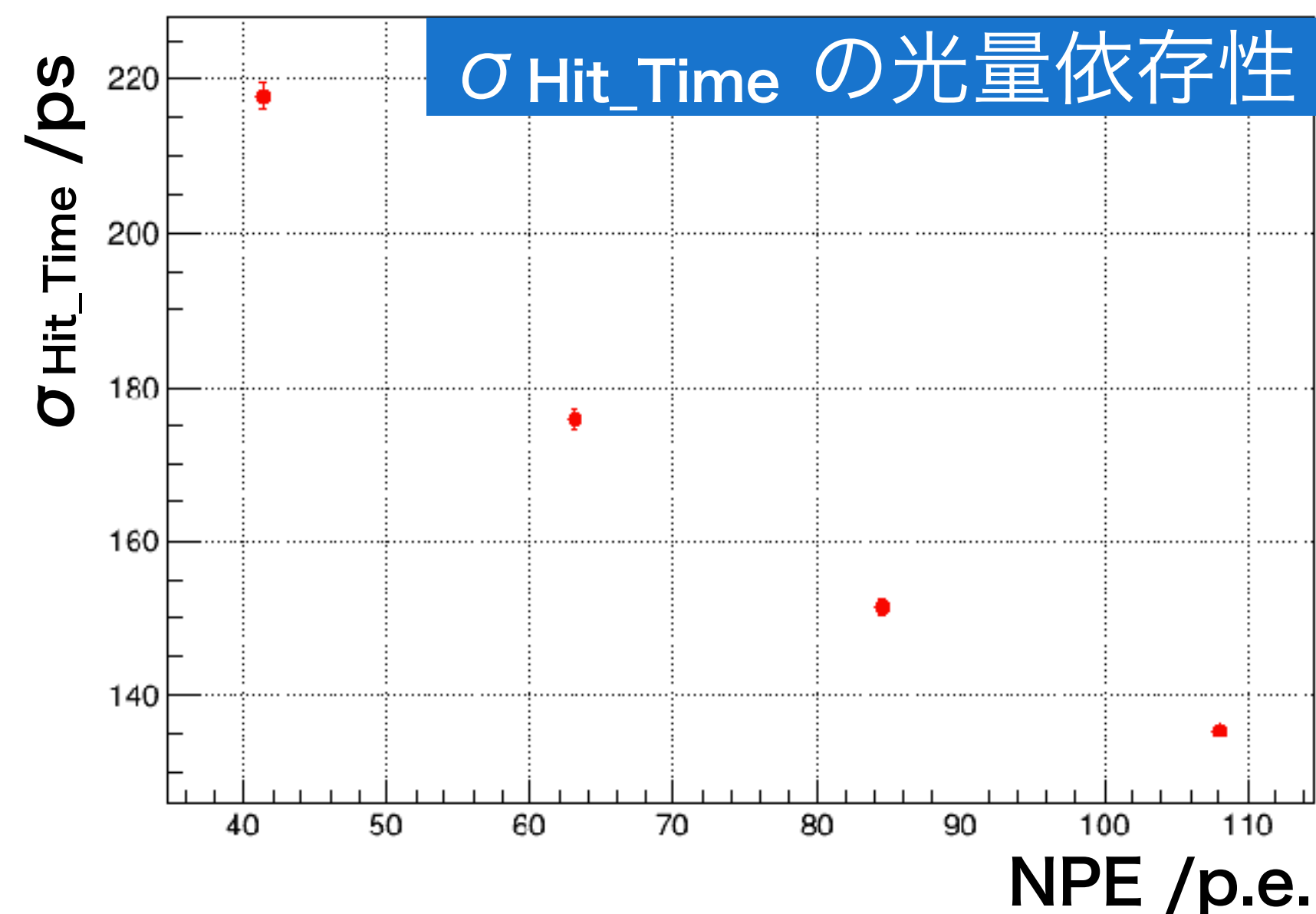


# シンチレータ厚さ比較のMC結果

11

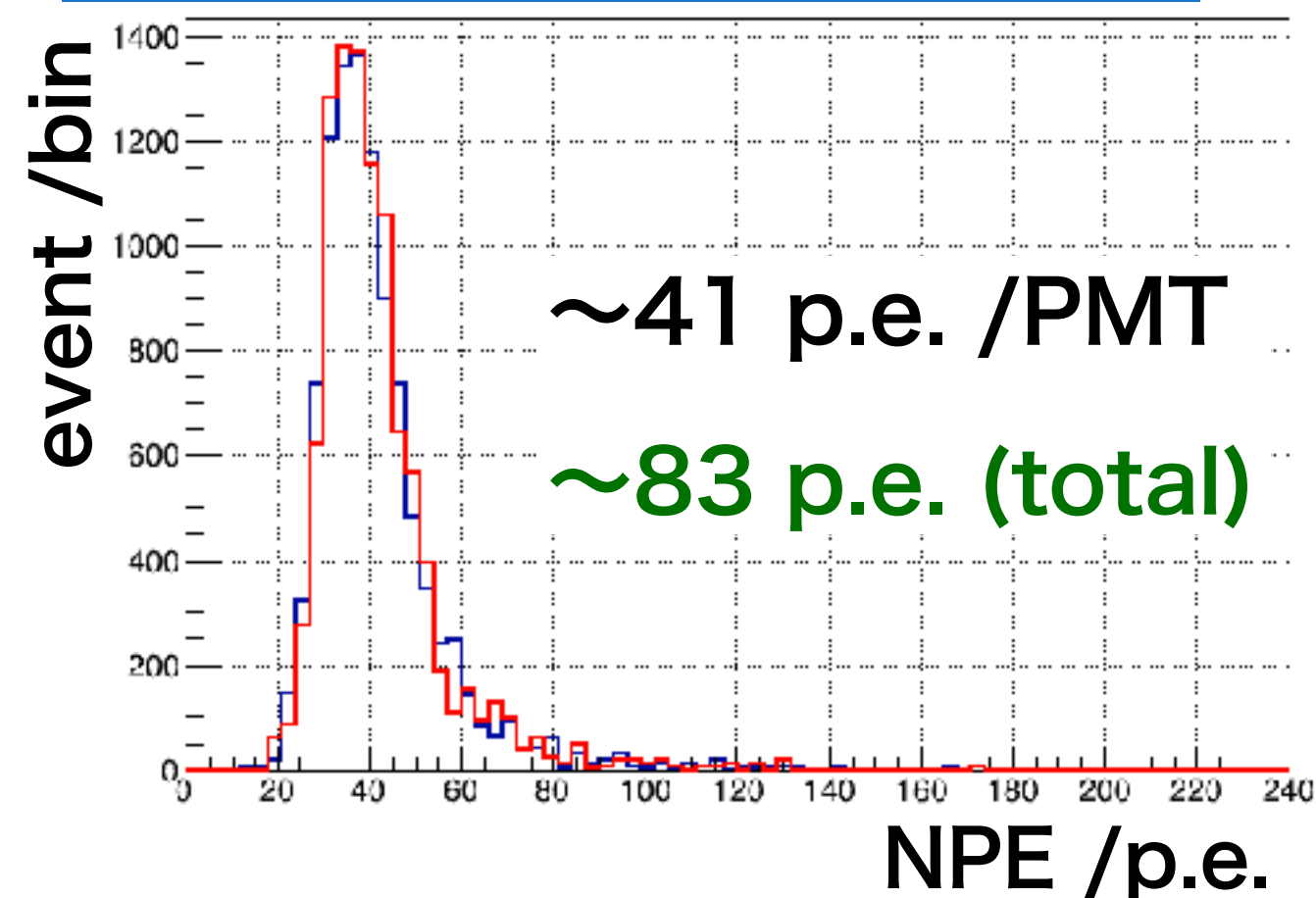


- PMTへの入射光量  $\propto$  PS厚み
  - 入射光量が増えると、 $\sigma_{\text{Hit\_Time}}$  が統計的に改善
  - 2 mm厚のシンチレータで  $\sigma_{\text{Hit\_Time}} \sim 218$  ps
- >  $\sigma_{\text{TOF}} \sim 308$  ps (要求の  $< 500$  psを十分満たす)

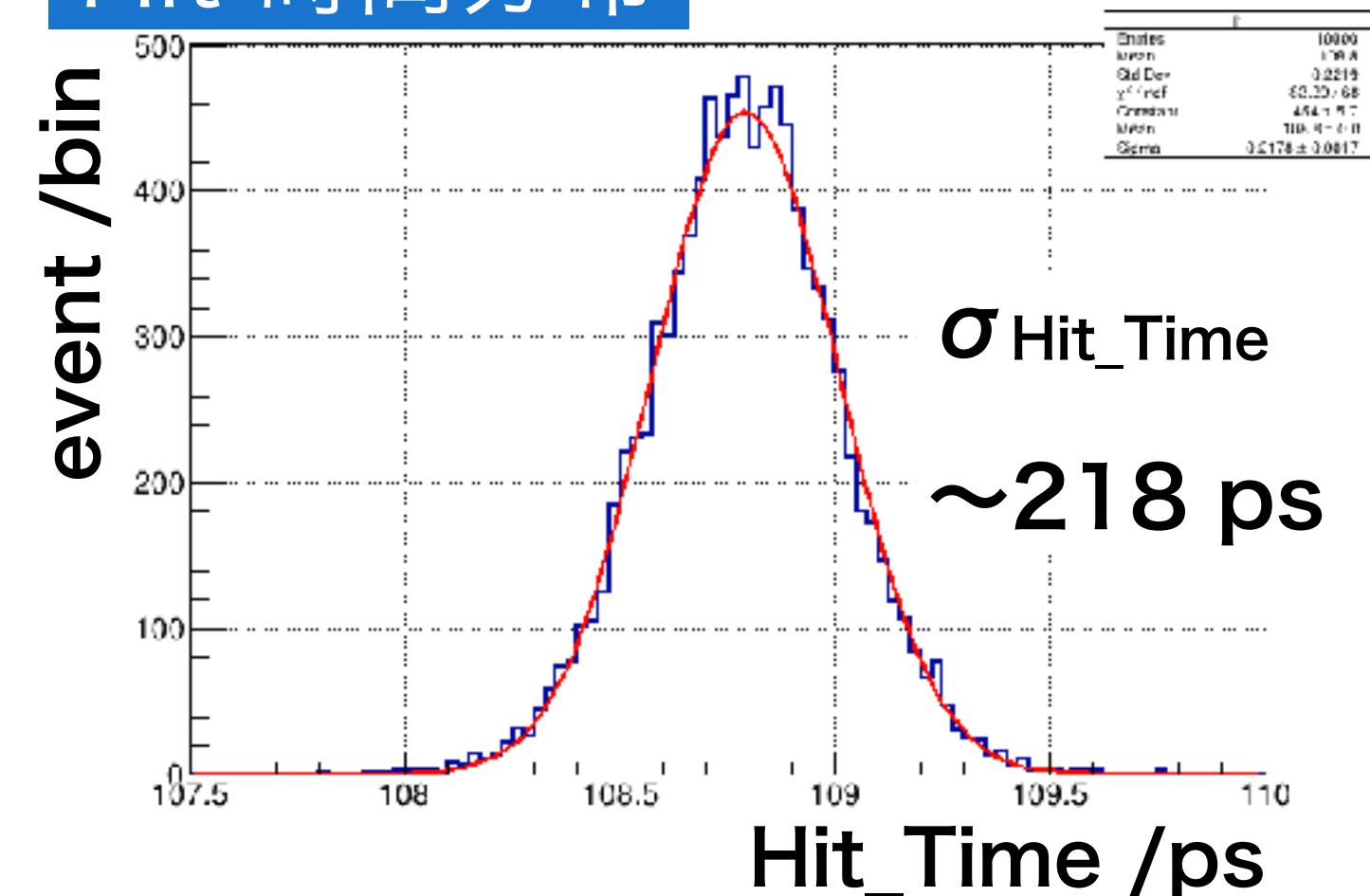


## シンチレータ厚 2mm のMC結果

### 各PMT入射光量 (NPE)



### Hit 時間分布

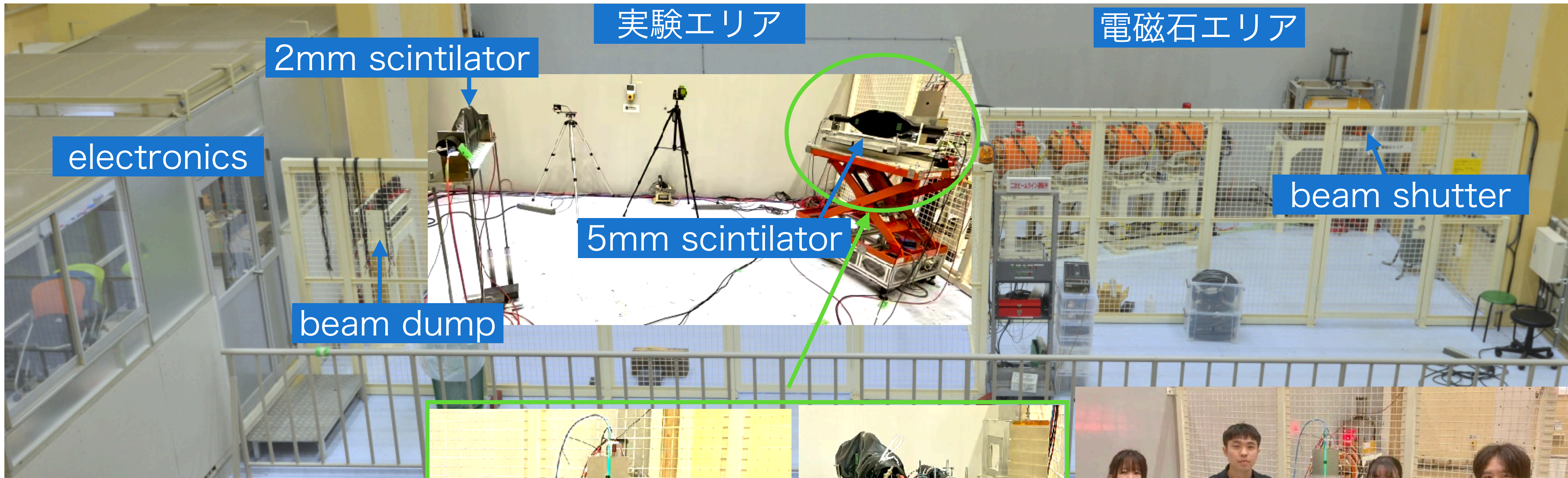




# BeamTest

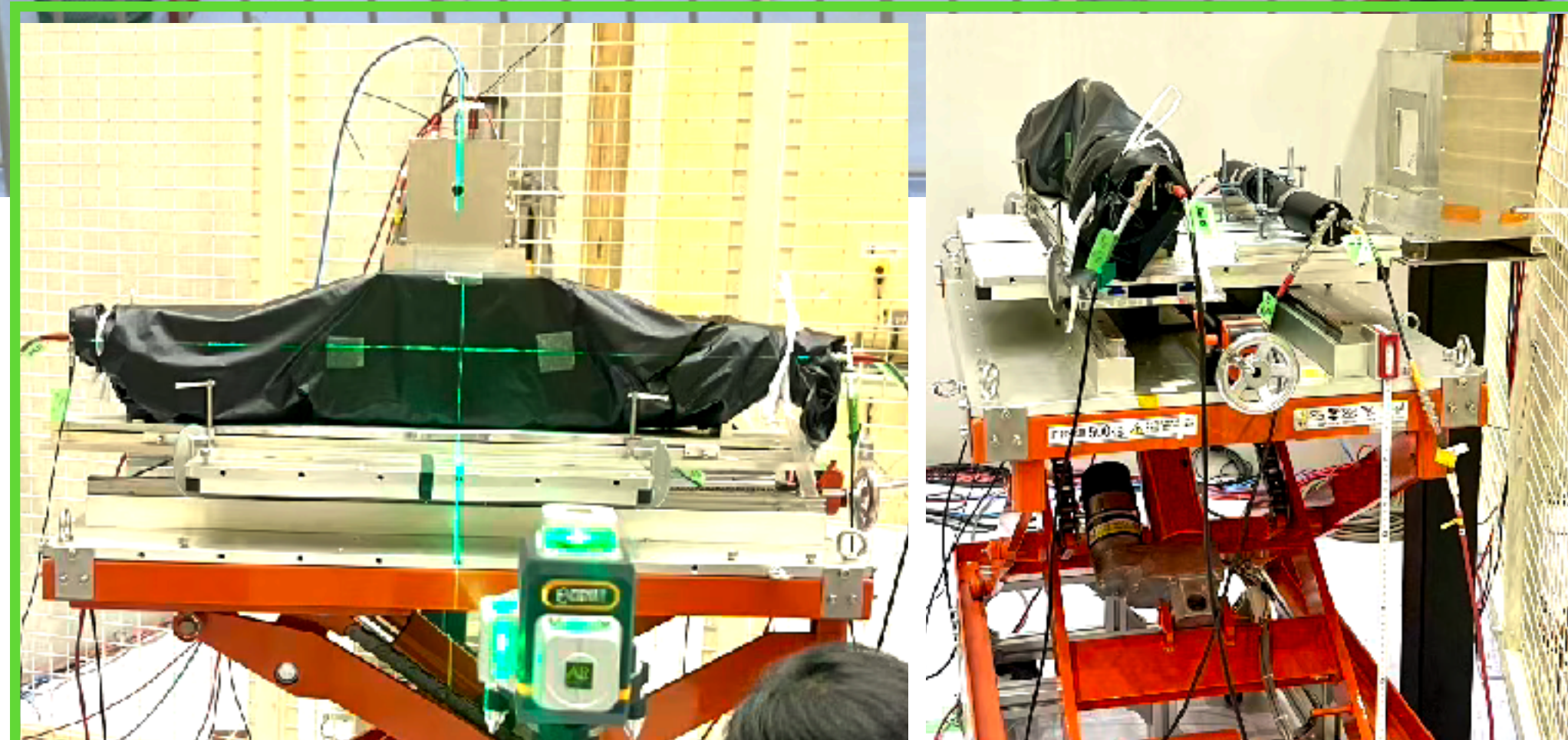
12

Beam Test @KEK ARTBL (Nov. 10 - 12, 2025)



## TOF検出器の評価

2mmおよび5mm厚の  
両側読み出し型  
プラスチックシンチレータ

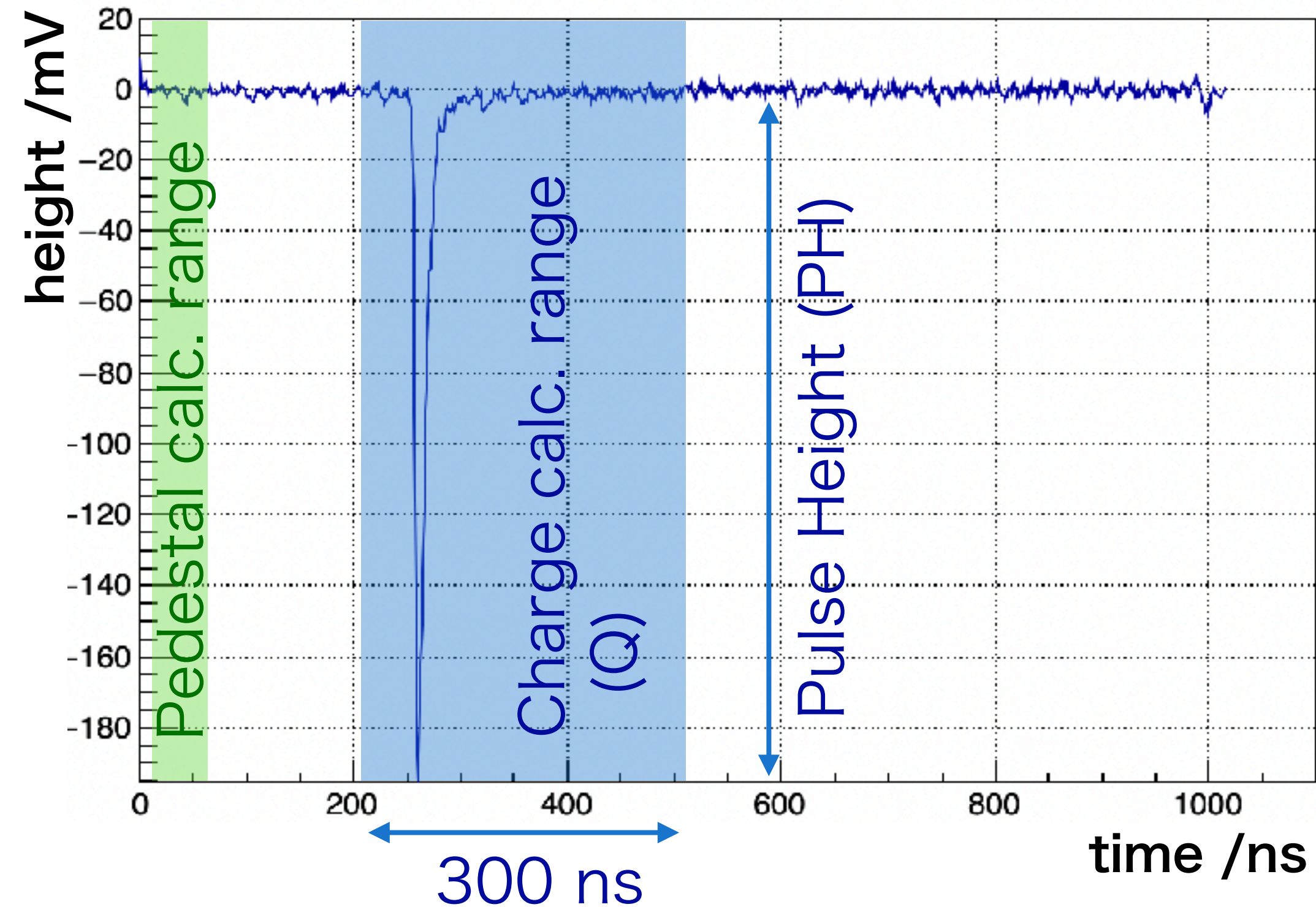




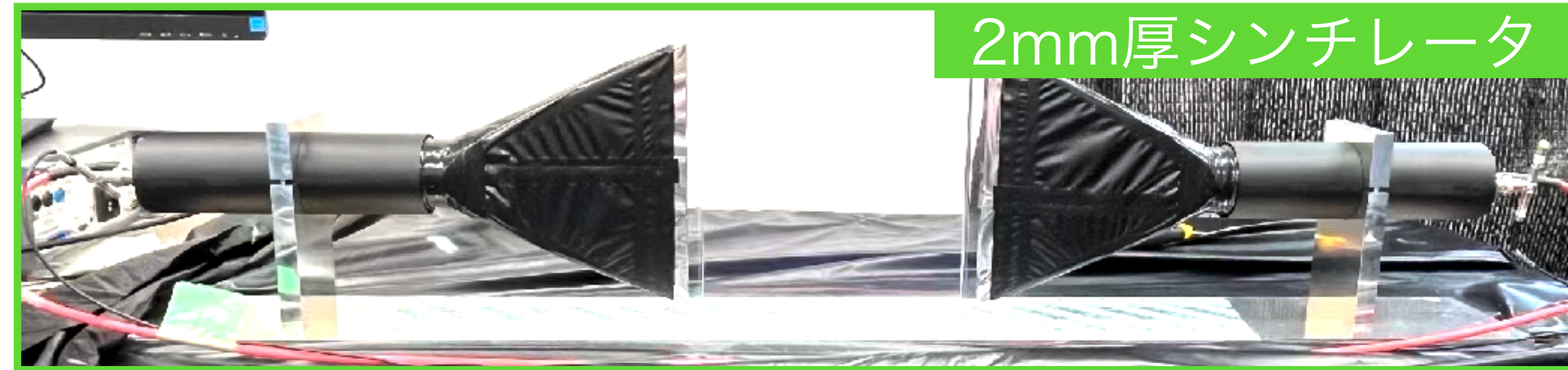
# 宇宙線の測定

13

- ・ BeamTestの前に宇宙線ミュオンを測定し、MIPのイベントを確認
- ・ 各検出器の両側PMTのgainを合わせる



- ・ 取得波形のサンプリングレートは1 GHz
- ・ PH、Qの定義はMCと同様
- ・ Pedestal (PD) は波形の10 - 60 nsの平均値として定義



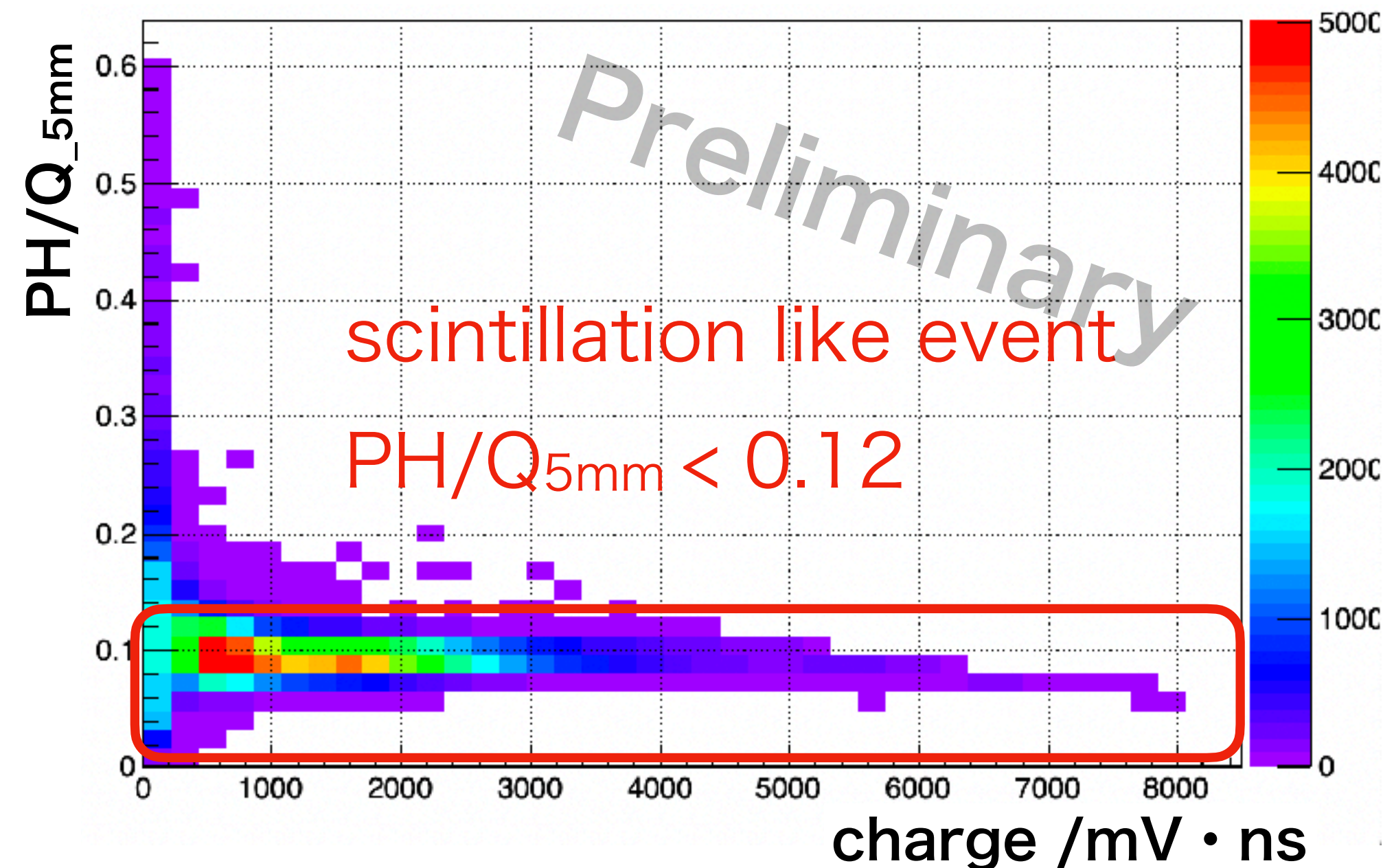


# 宇宙線の測定

14

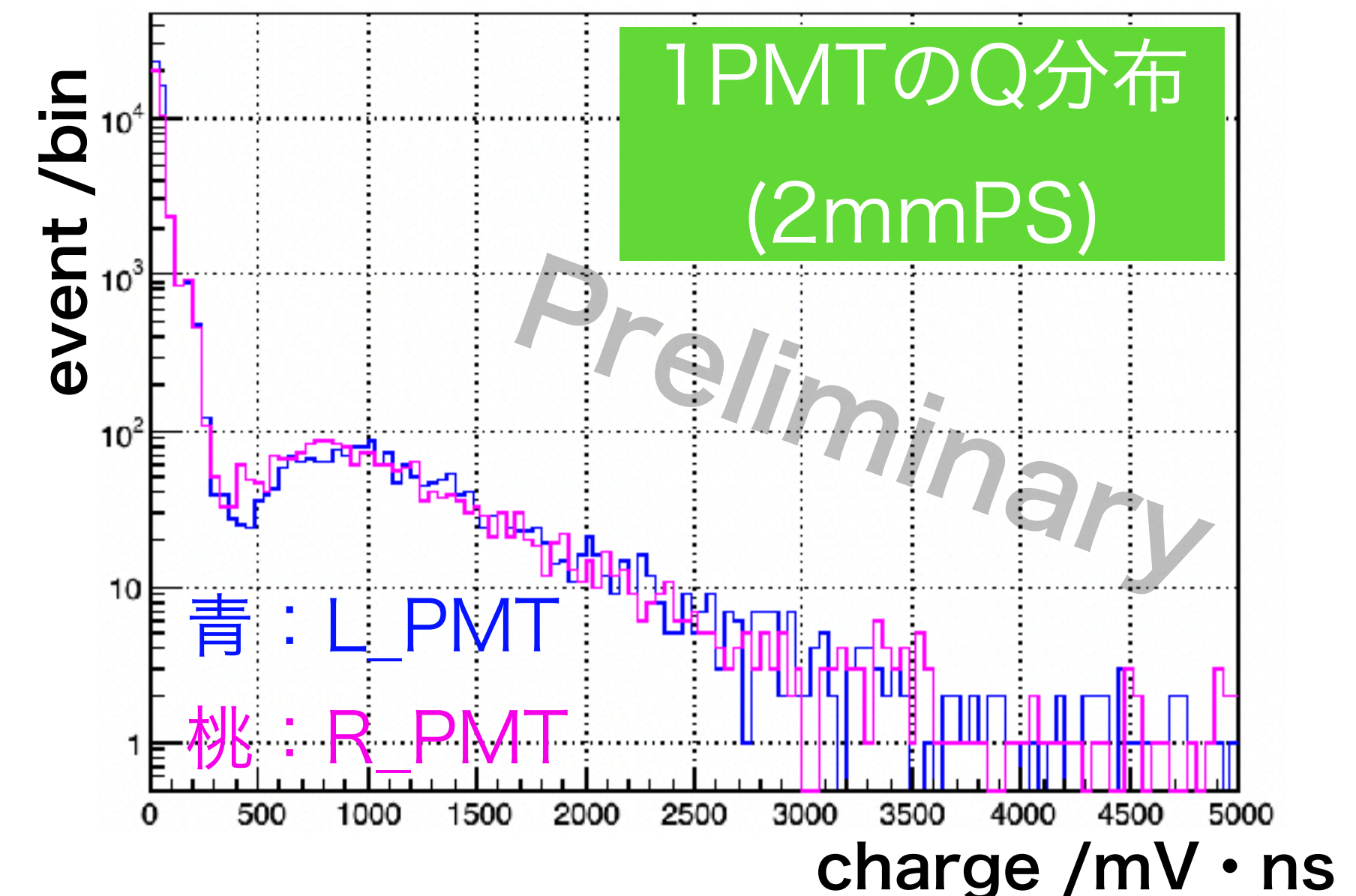
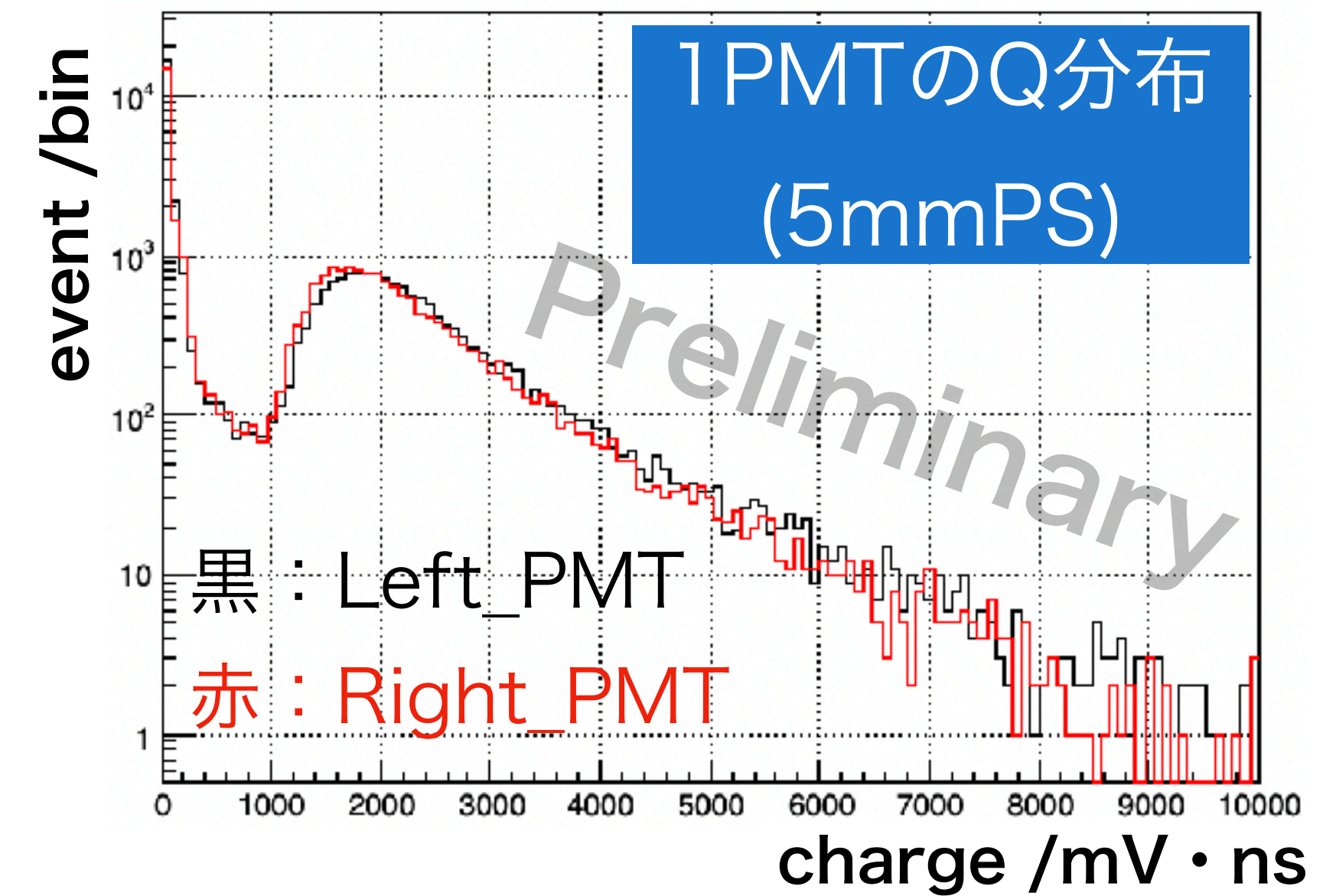
- ・ イベントの選択
  - ・ 波高・電荷比  $PH/Q < 0.12$  を要求し、シンチレーションらしいイベントを選択

PH/Q分布 (5mm厚検出器)

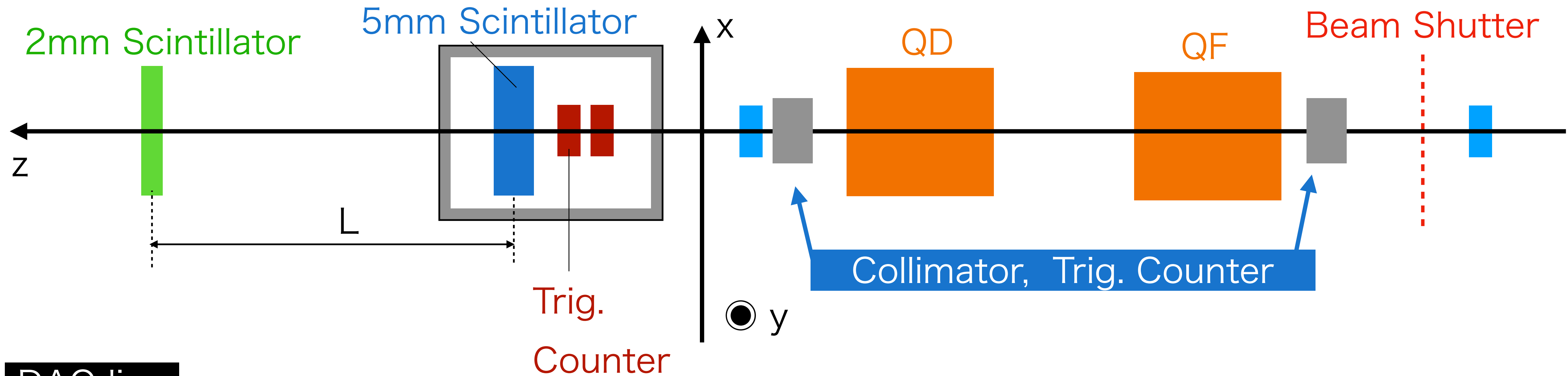


イベント選択後の  
Charge(Q)分布

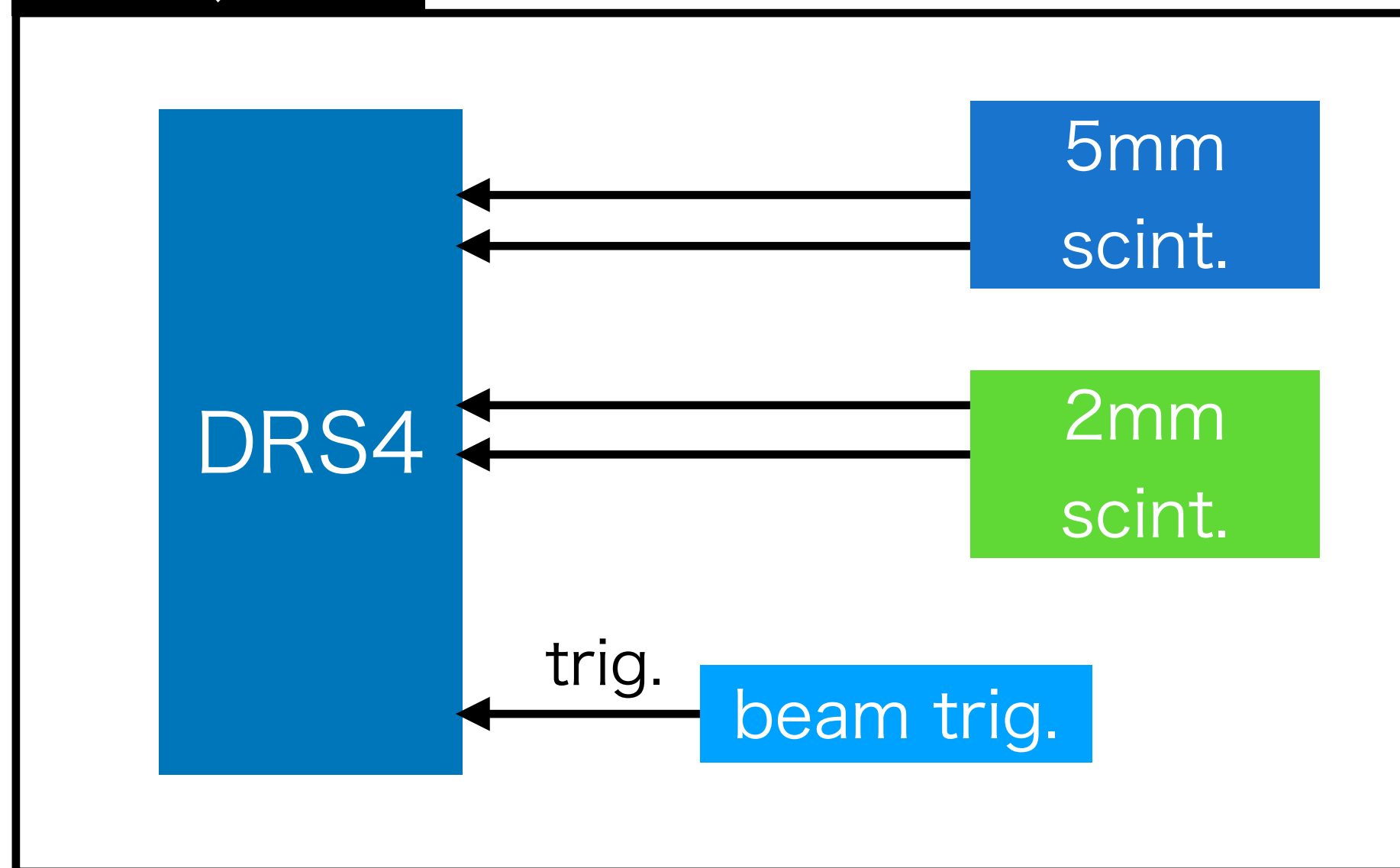
※ 1 PMTあたり



- ・ MIP事象を確認
- ・ PMTのgainがそれぞれ大体揃った



DAQ line



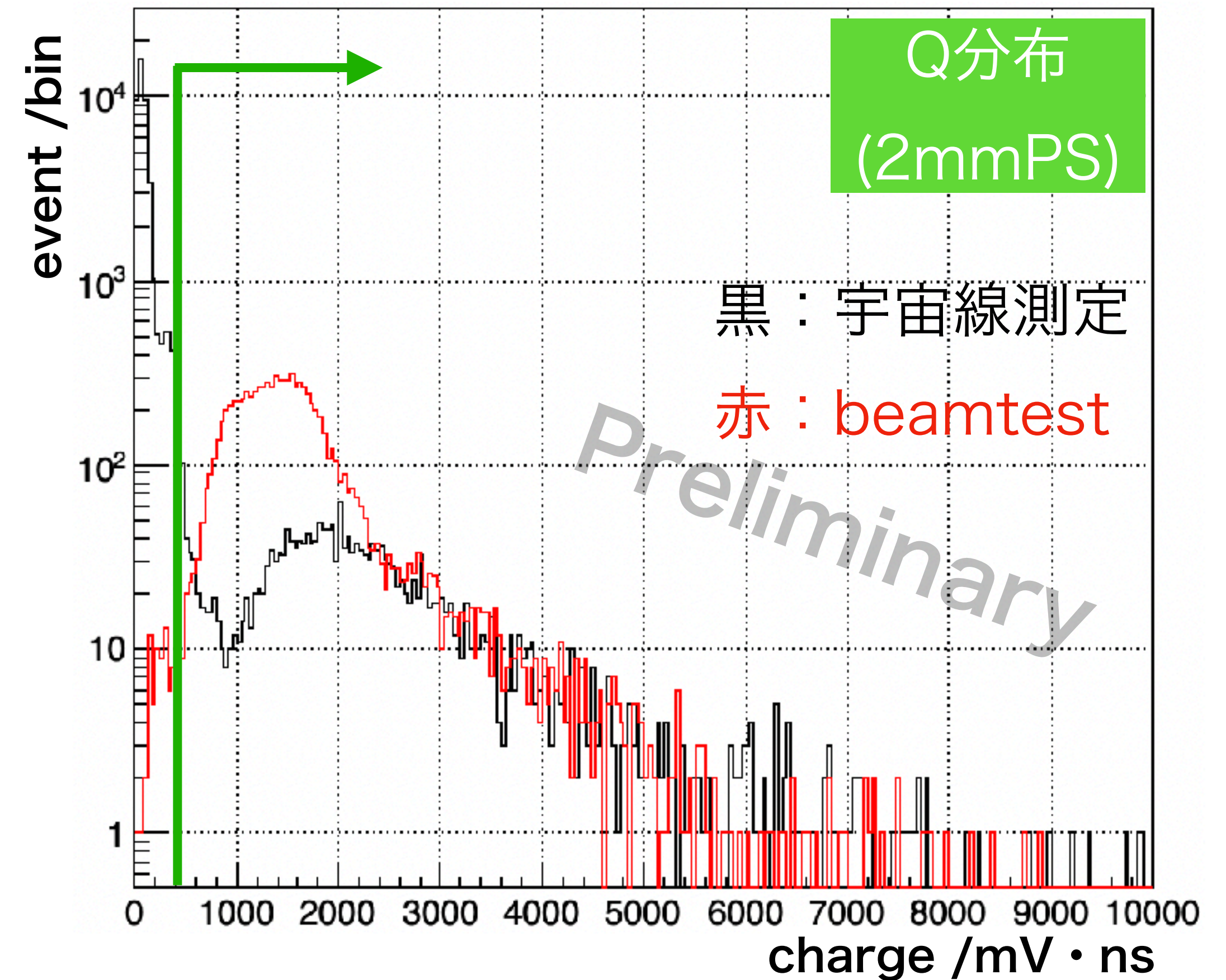
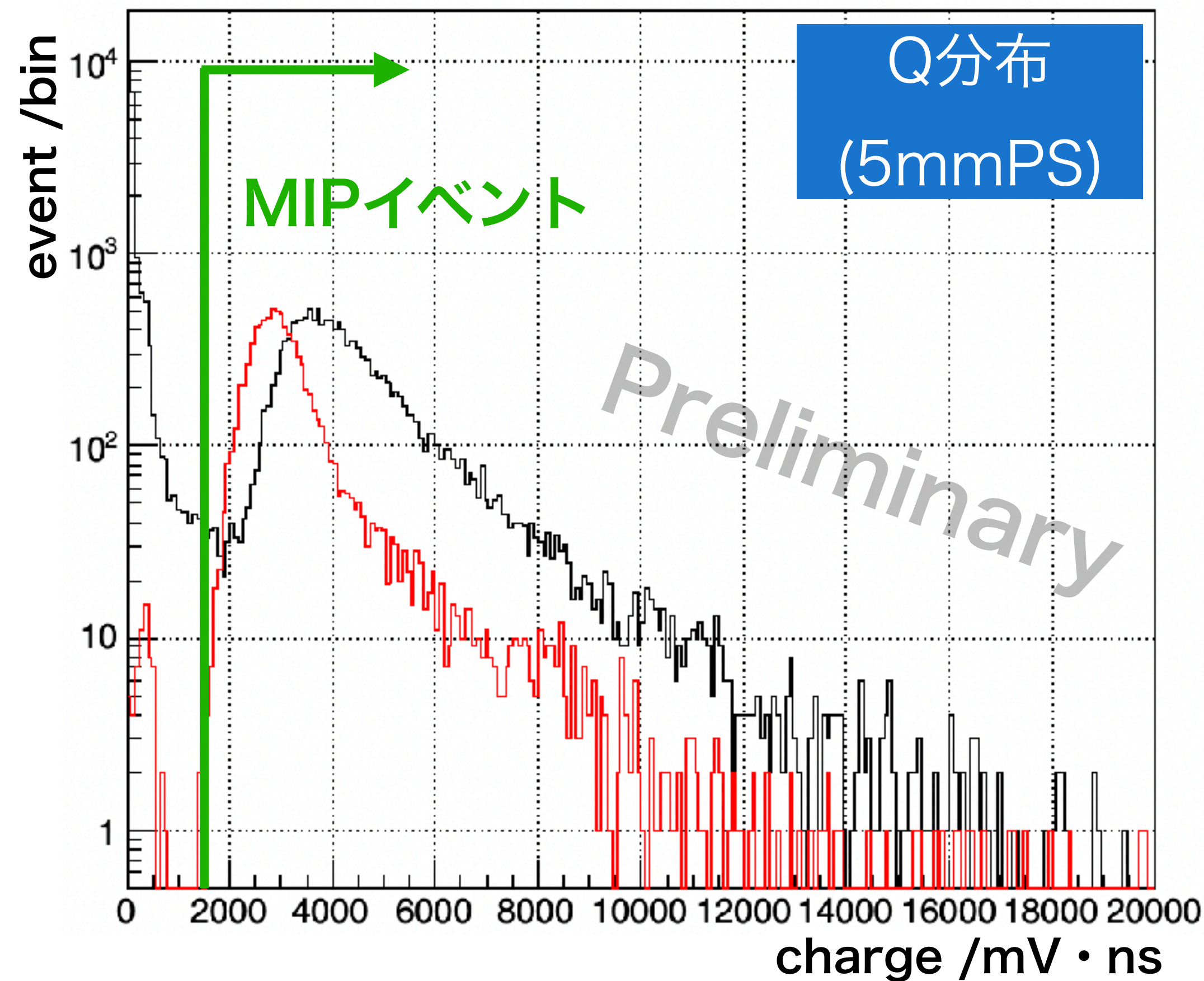
- 4 GeV/c の  $e^-$  をシンチレータ中央に照射
- 5mm厚シンチレータ検出器と2mm厚シンチレータ検出器の粒子のHIT時間差からTOFを測定
- データとMCで時間分解能を比較



# BeamTest結果：Q分布

16

各検出器（2PMT）の Charge(Q)：



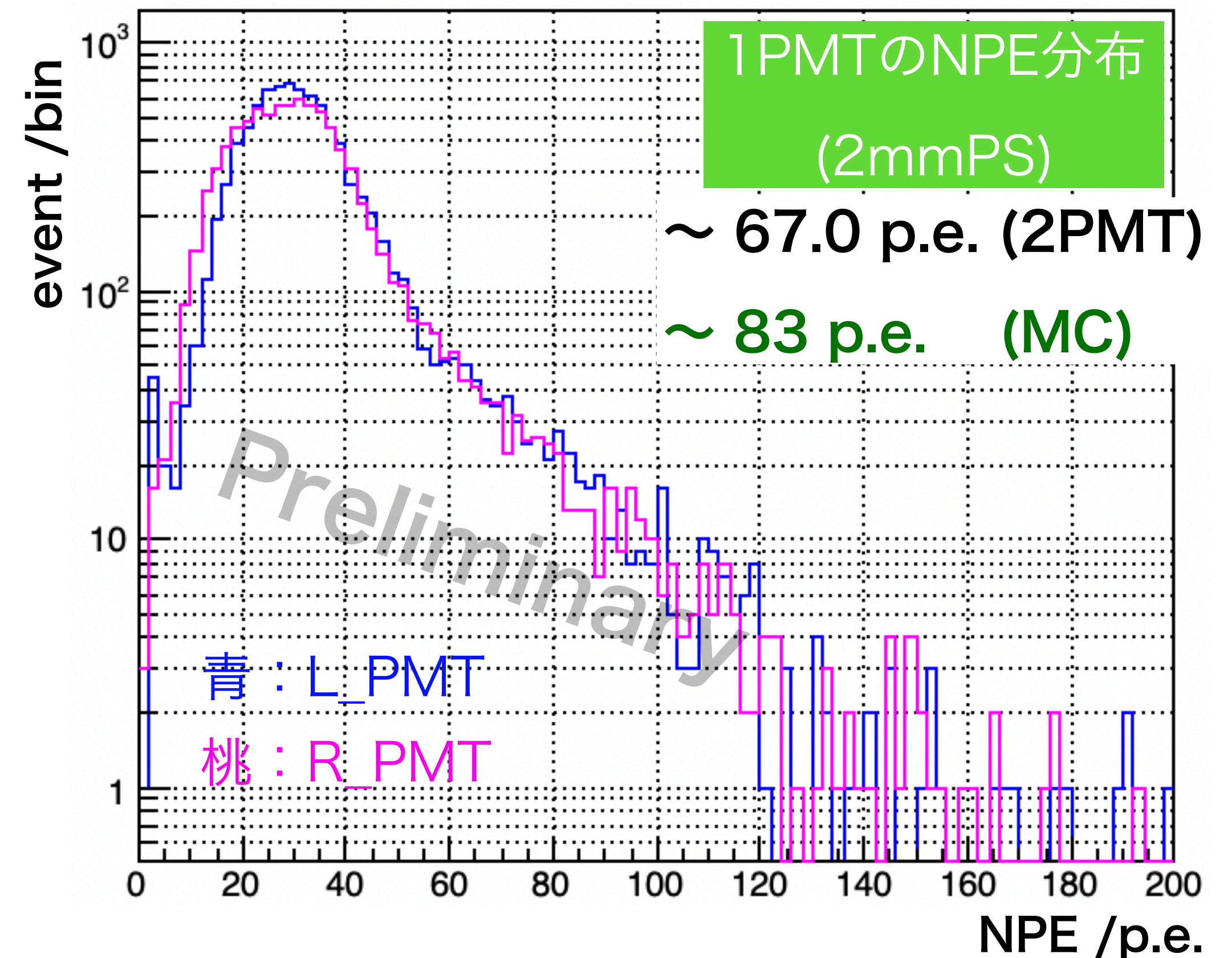
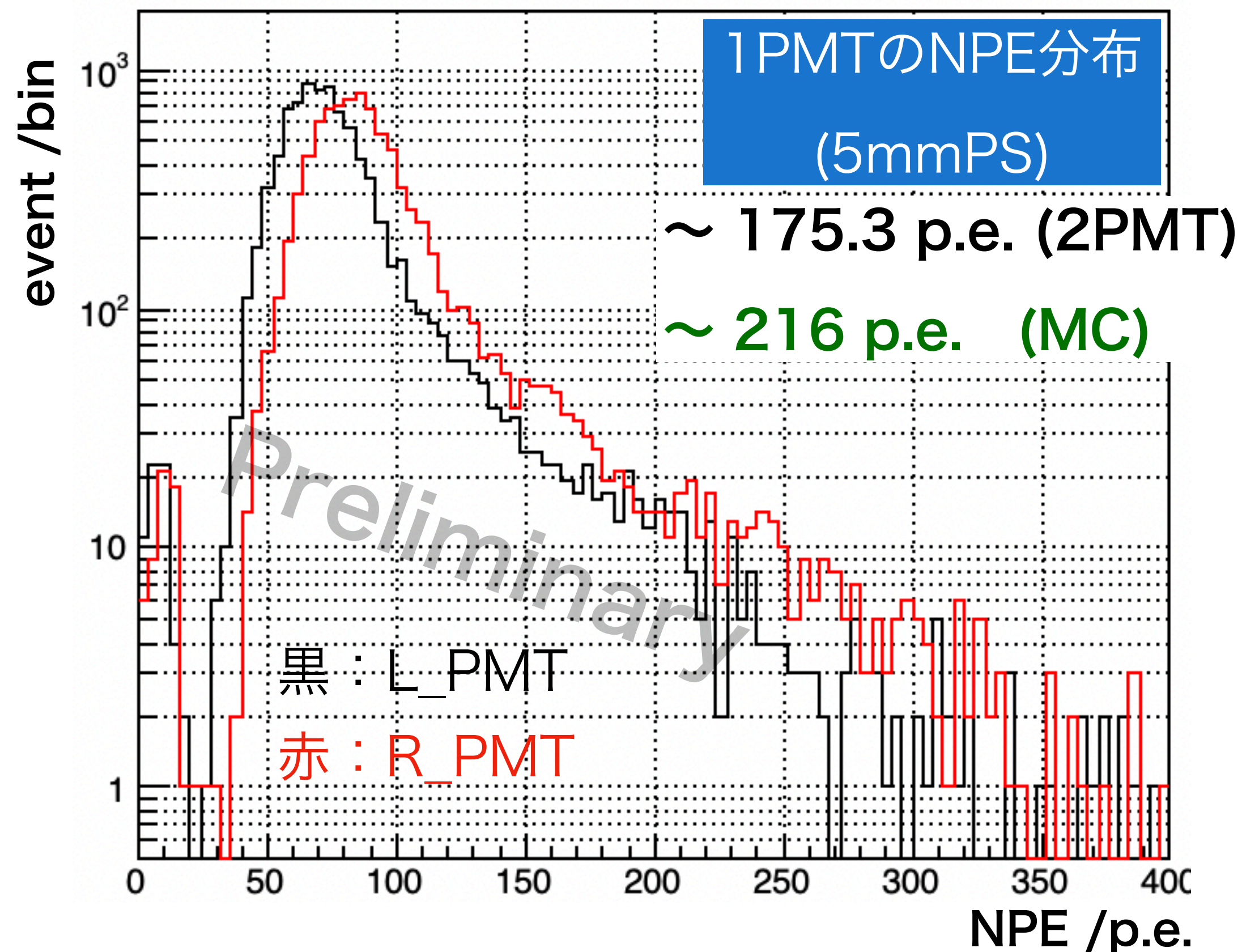
- ・ 宇宙線はシンチレータ面に斜めにも多く入射する -> 高Charge側の割合が大きくなる
- ・ 5mm厚プラシンは、宇宙線測定時からgainが変わっている？



# BeamTest結果：観測光量

17

1PMTあたりの観測光量NPE：

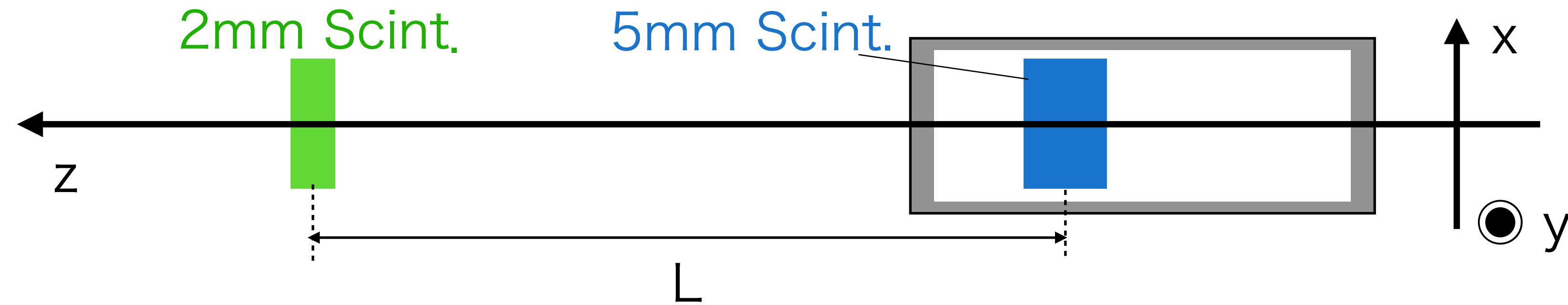


- 1 photonのChargeデータ（微弱LEDパルスで測定）より、Q分布から観測光量（NPE）に書き換え
- 観測光量は、MCの 約81.2%（5mm検出器）、約80.7%（2mm検出器）



# BeamTest結果：TOF

18



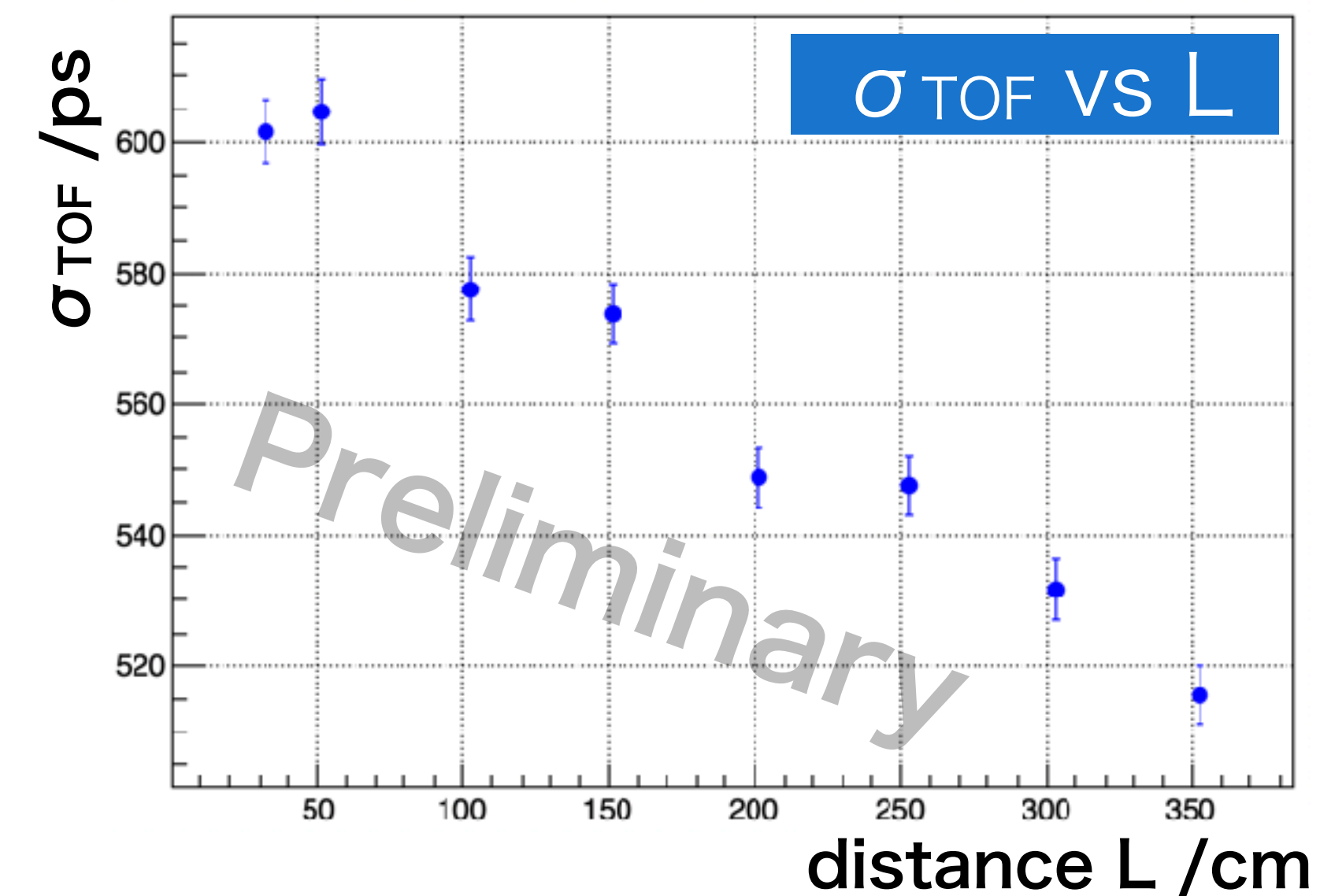
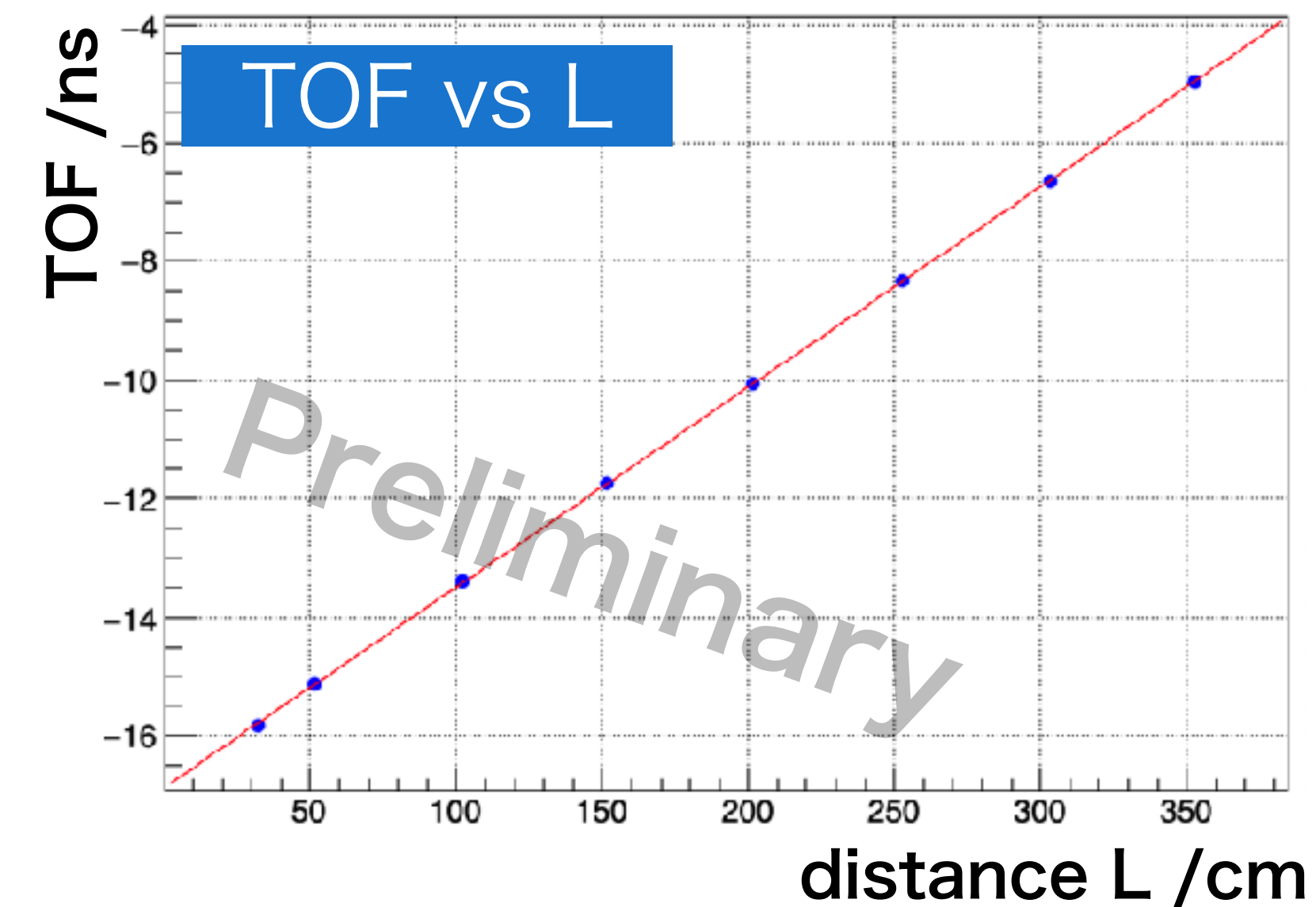
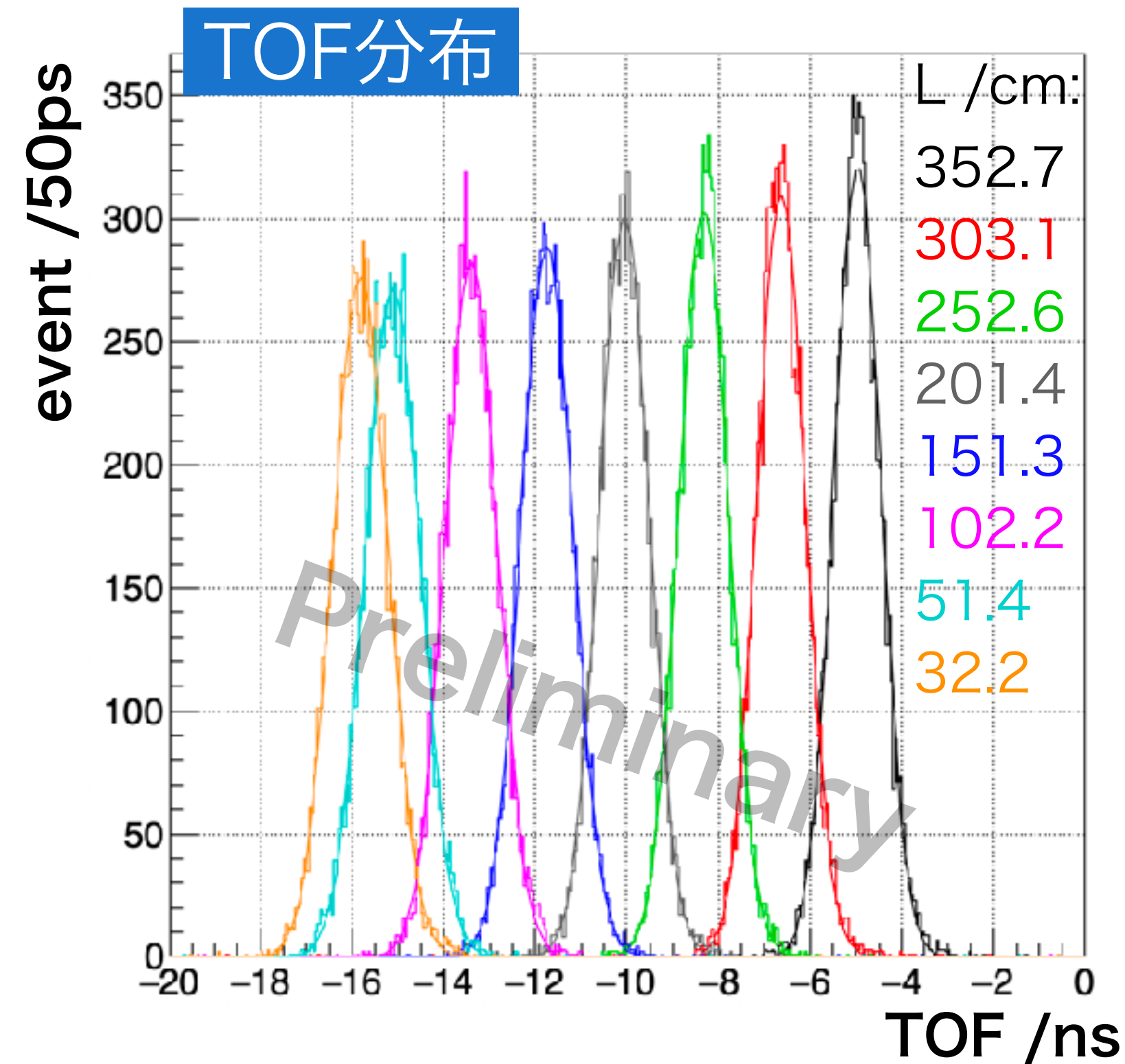
- 検出期間距離を変えてTOFを測定  
 $L = 32.2 \text{ cm} \sim 352.7 \text{ cm}$ の8点

- CFD法によりHit時間 (T) を定義  
 $\text{TOF} = T_{2\text{mmPS}} - T_{5\text{mmPS}}$ と定義

- TOF分布をGaussianでfit

-> average  $\sigma_{\text{TOF}} = 562.6 \text{ ps}$   
v

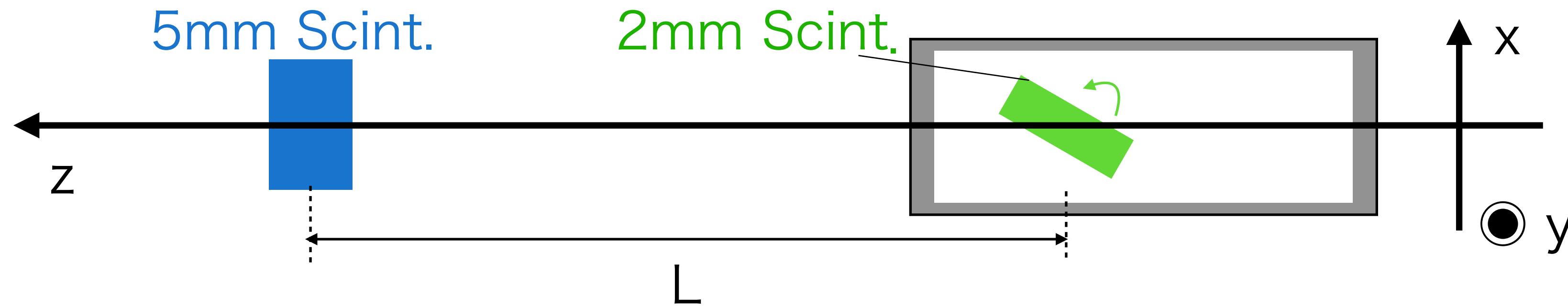
要求値 500 ps





# 入射角による光量とTOF分解能の向上

19



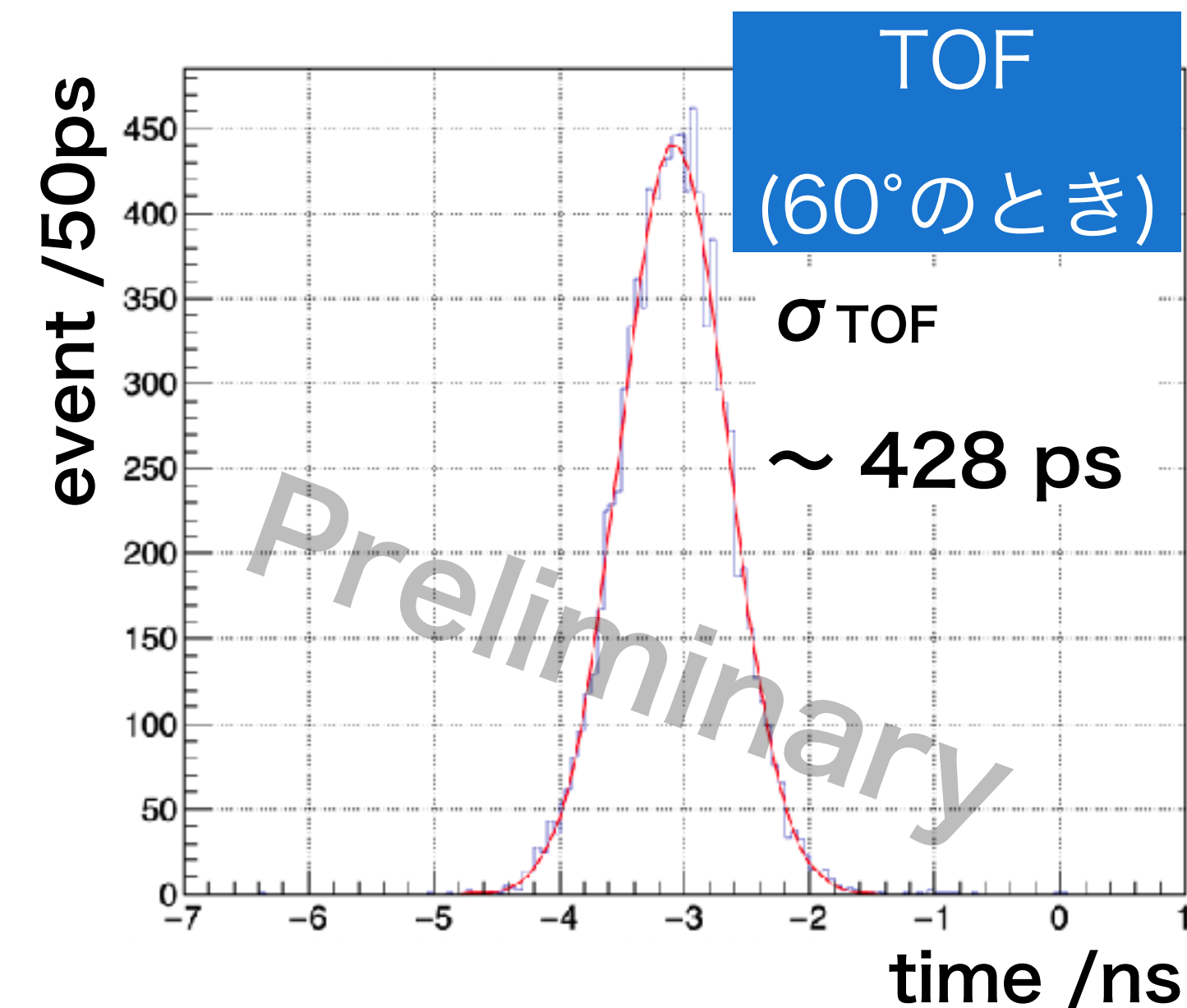
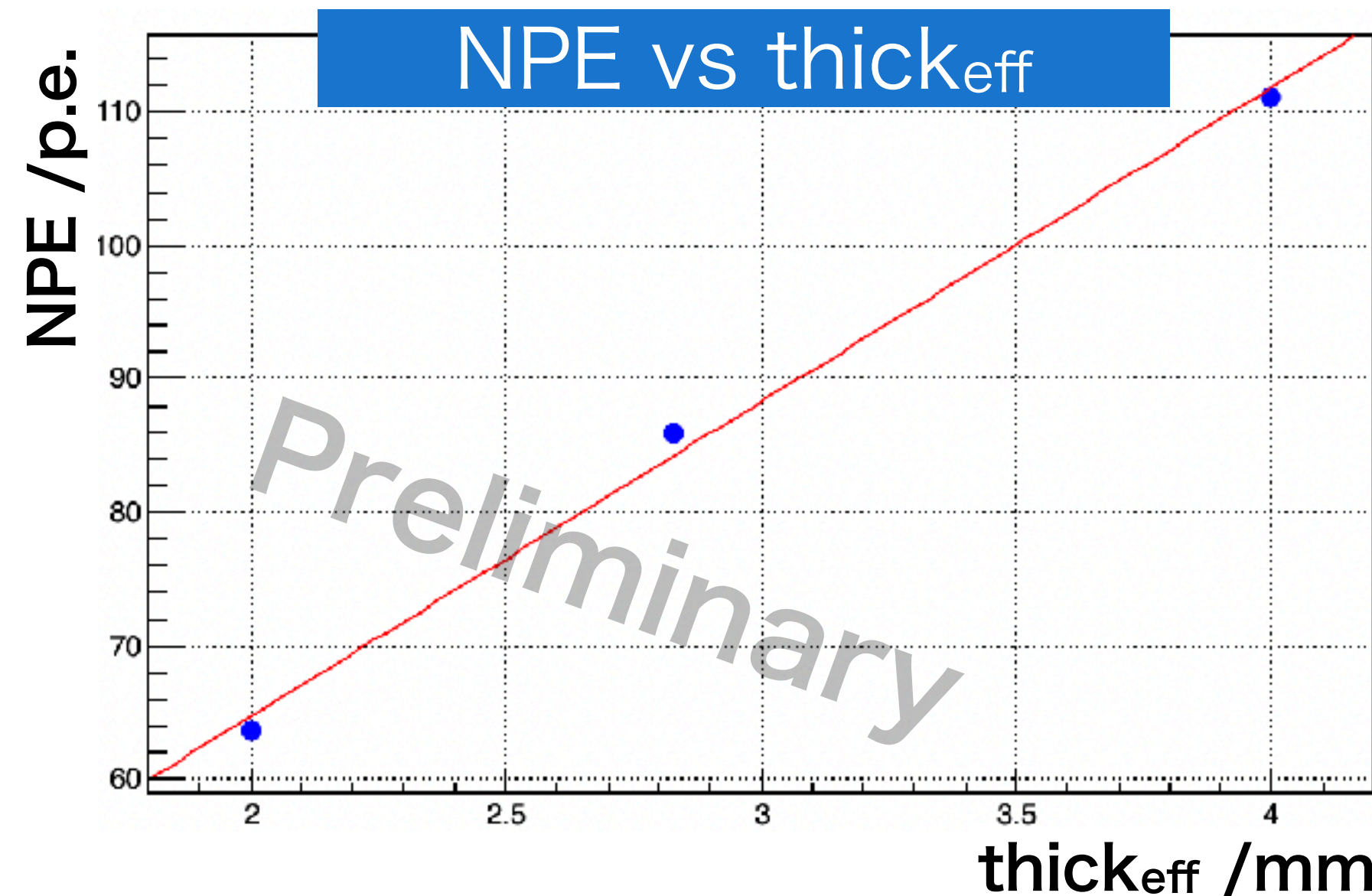
- ・ 2mmシンチレータを回転させ、ビーム入射角を $0^\circ$  (面とビームが垂直)、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ に変えながら測定  
-> ビームがシンチレータ中を通過する実効長は、それぞれ2mm、 $2\sqrt{2}$ mm、4mm

## 2mm検出器の観測光量NPE

- $0^\circ$  : 63.7 p.e. (基準)
- $45^\circ$  : 86.0 p.e. (1.35 倍)
- $60^\circ$  : 111.1 p.e. (1.74 倍)
- ※ ( ) 内は  $0^\circ$  に対する相対比

- ・  $60^\circ$  で  $\sigma_{\text{TOF}} \sim 428 \text{ ps}$  まで改善

-> 5mm厚シンチは要求値(< 500 ps)を満たせる





- ・ NA61 / SHINE実験の低運動量ハドロンビームライン新規建設に向け、ビームモニター検出器であるTOF検出器の開発を進めている
- ・ MCシミュレーションの結果を受け、2mm厚・5mm厚の両側読み出し型プラスチックシンチレータ検出器を製作し、2025年11月にKEK PF-ARテストビームラインにてビームテストを行った
  - 5mm厚シンチレータでは、要求時間分解能 ( $< 500$  ps) を満たす可能性が示されており、現在詳細な解析を進めている
  - 今後、シミュレーションとのずれについての調査を行なっていく

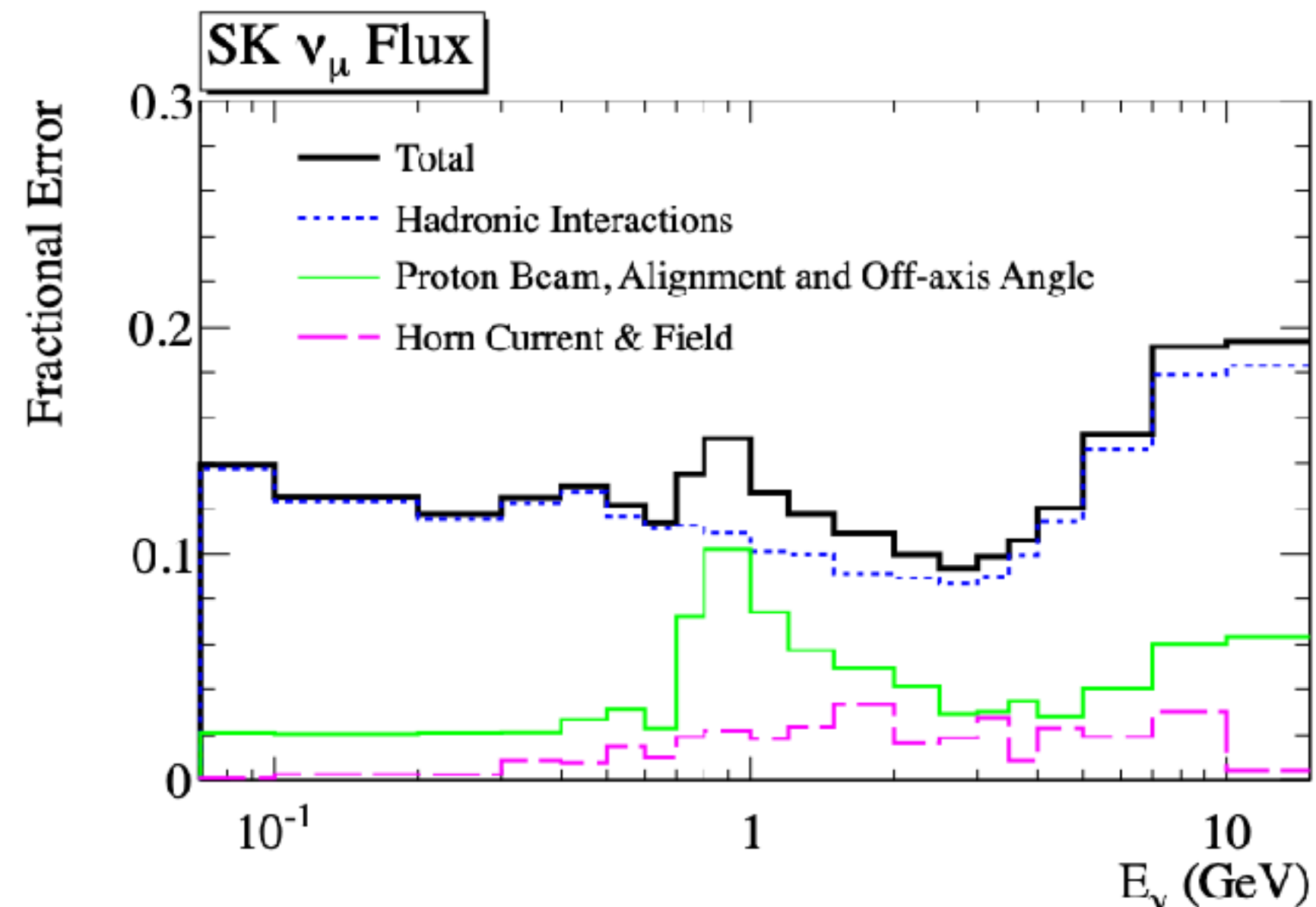


# Backups



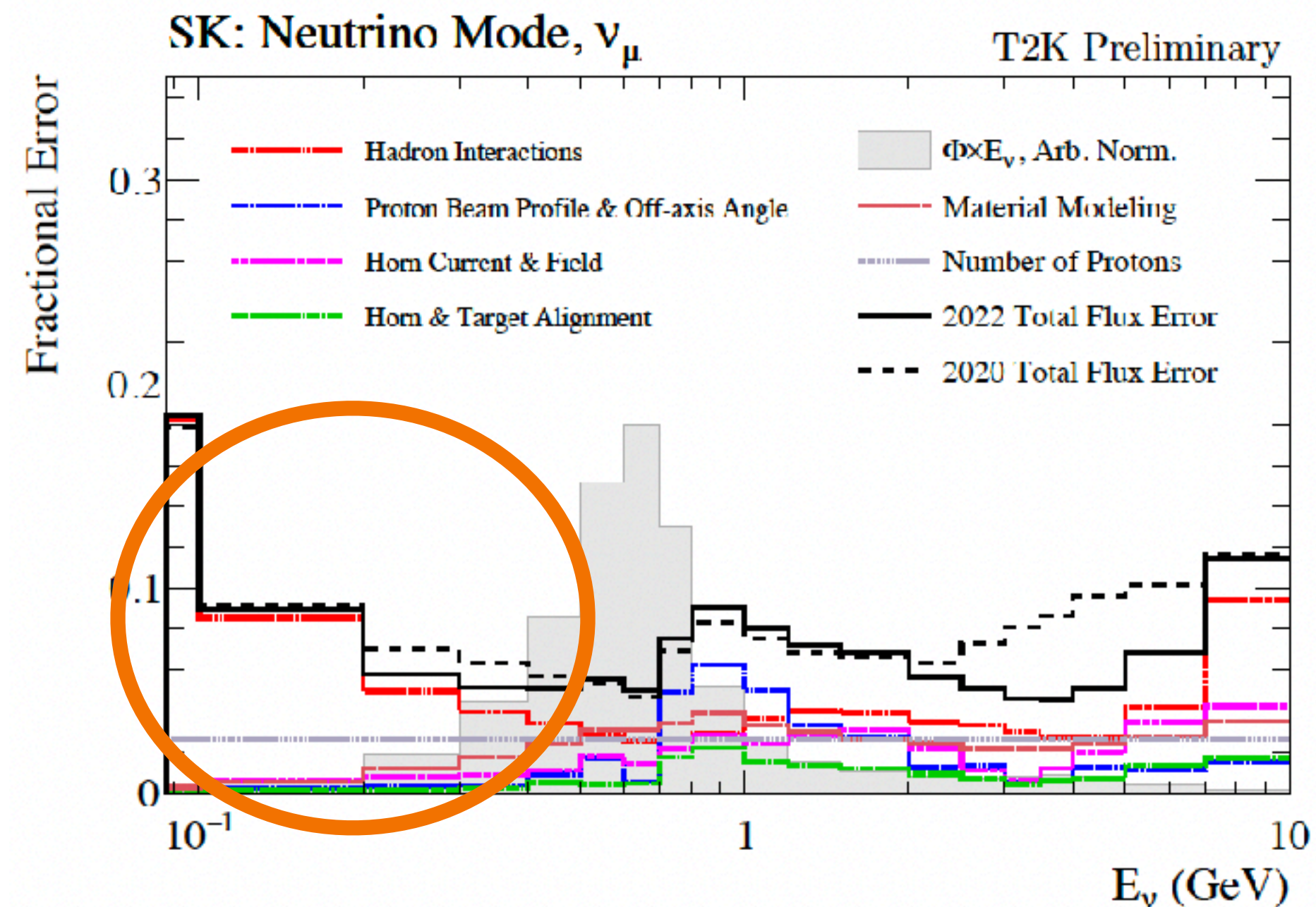
ex.) T2K実験におけるニュートリノフラックスの不定性

NA61/SHINE thin target data only

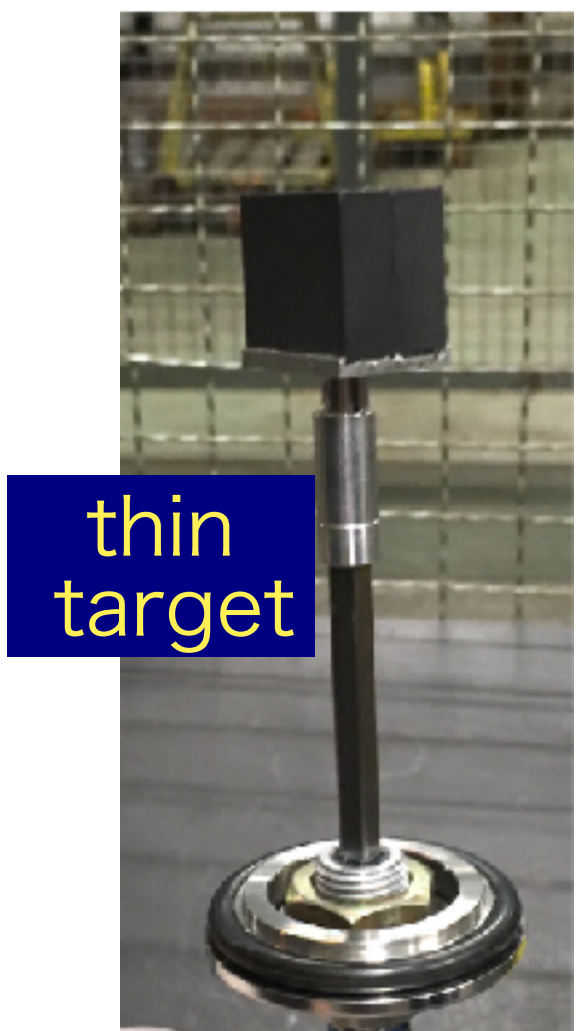


(T2K: Phys. Rev. D87, 012001 (2013) )

NA61/SHINE thin + replica target data



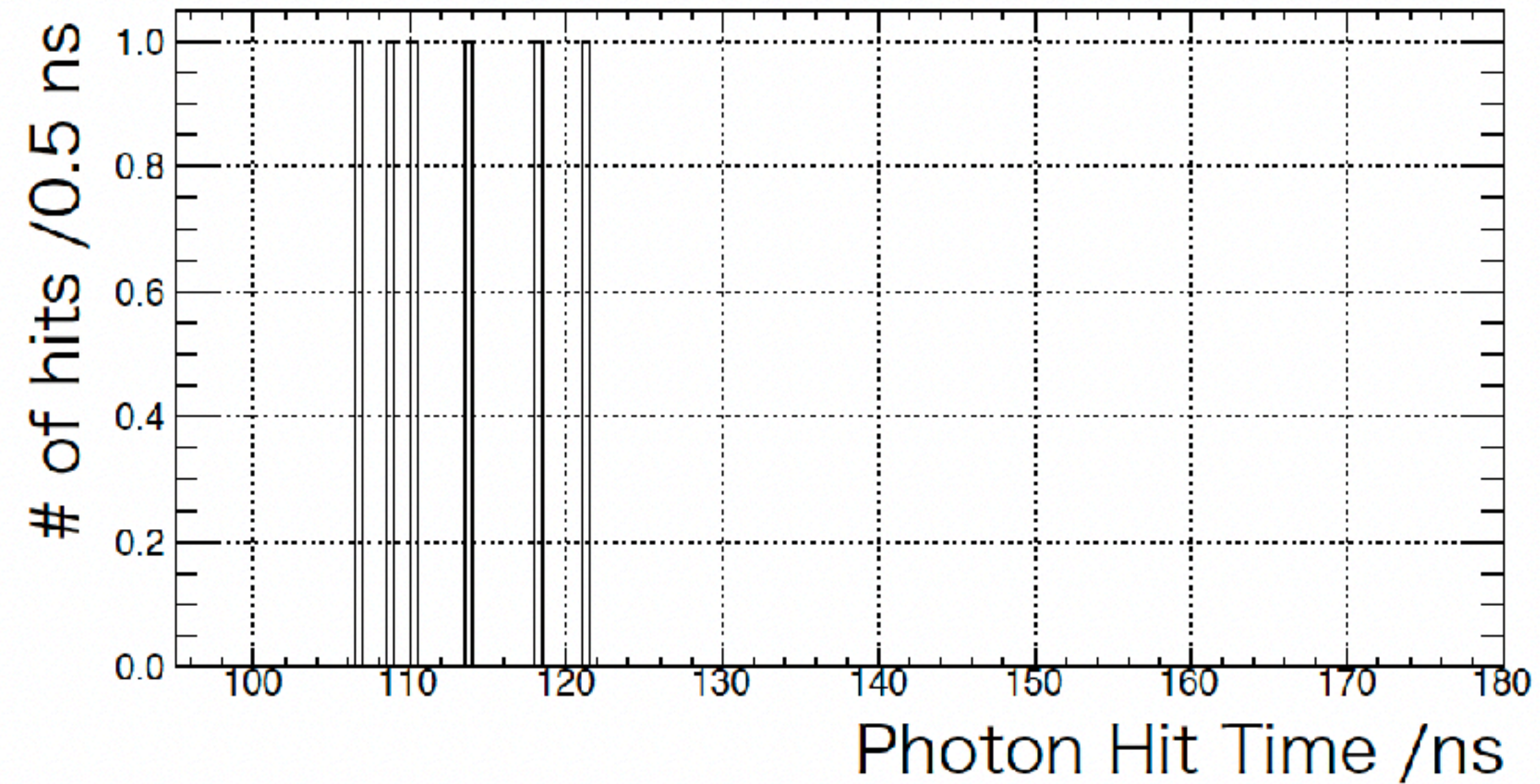
(T2K collaboration. T2K internal document. )



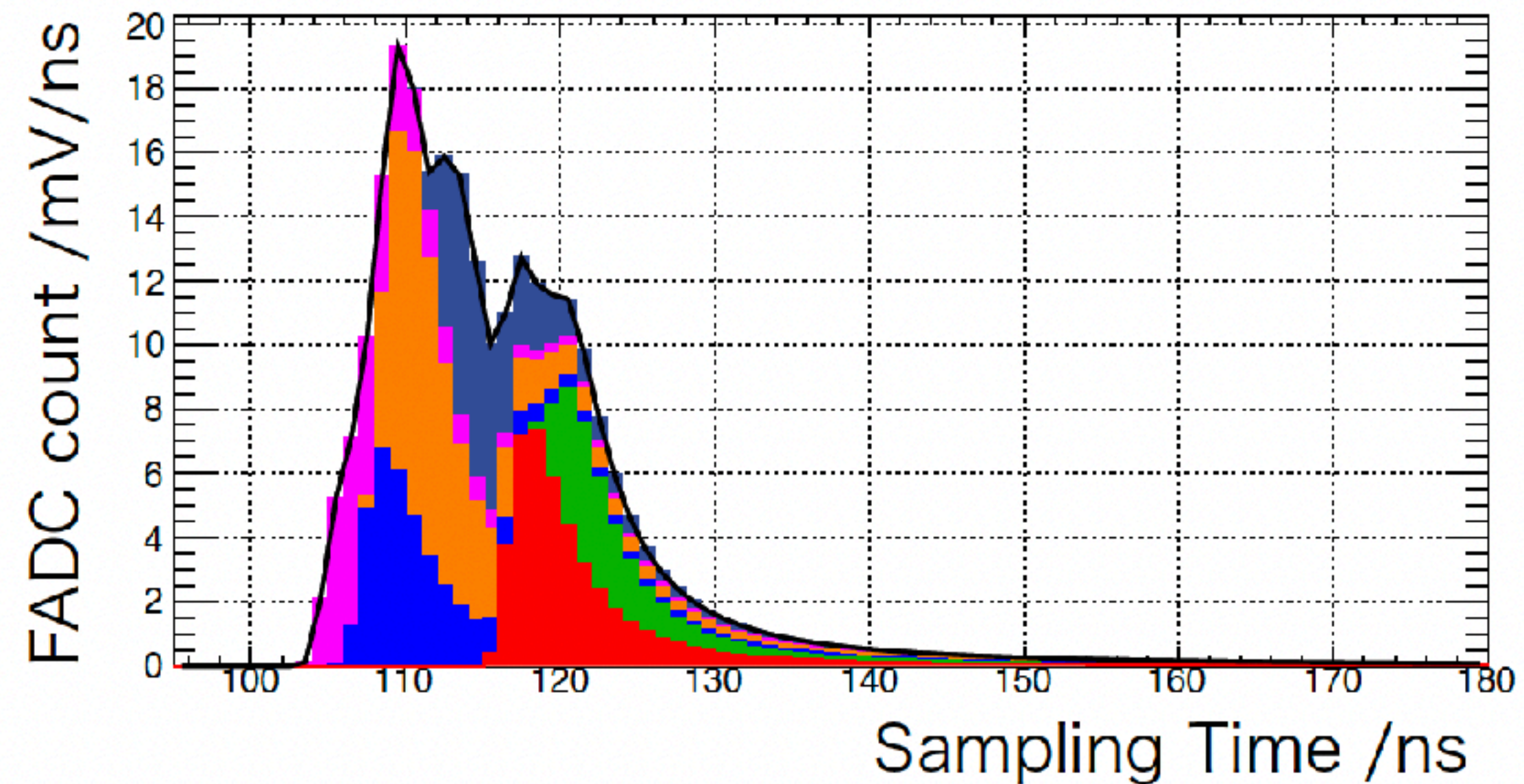
- ・ 不定性は、フラックスピークにおいては 5% 程度まで削減されている
- ・ ピークより低いエネルギー領域では、実測値が不足しているため、未だにフラックス不定性が大きい







<- Photon Hit Time (MC結果)



<- TTSによるふらつきを考慮し、  
1 p.e. 波形を重ね合わせる

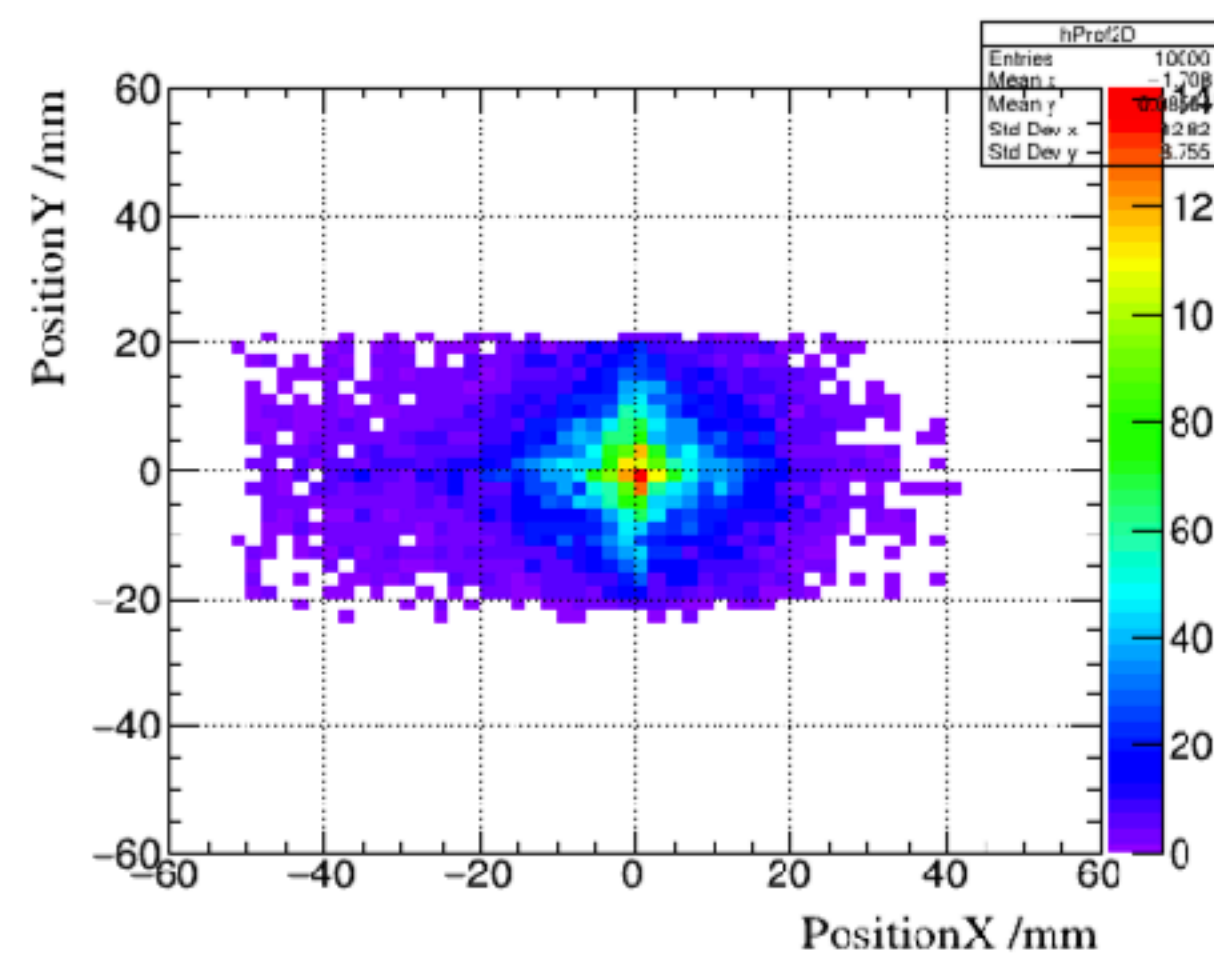
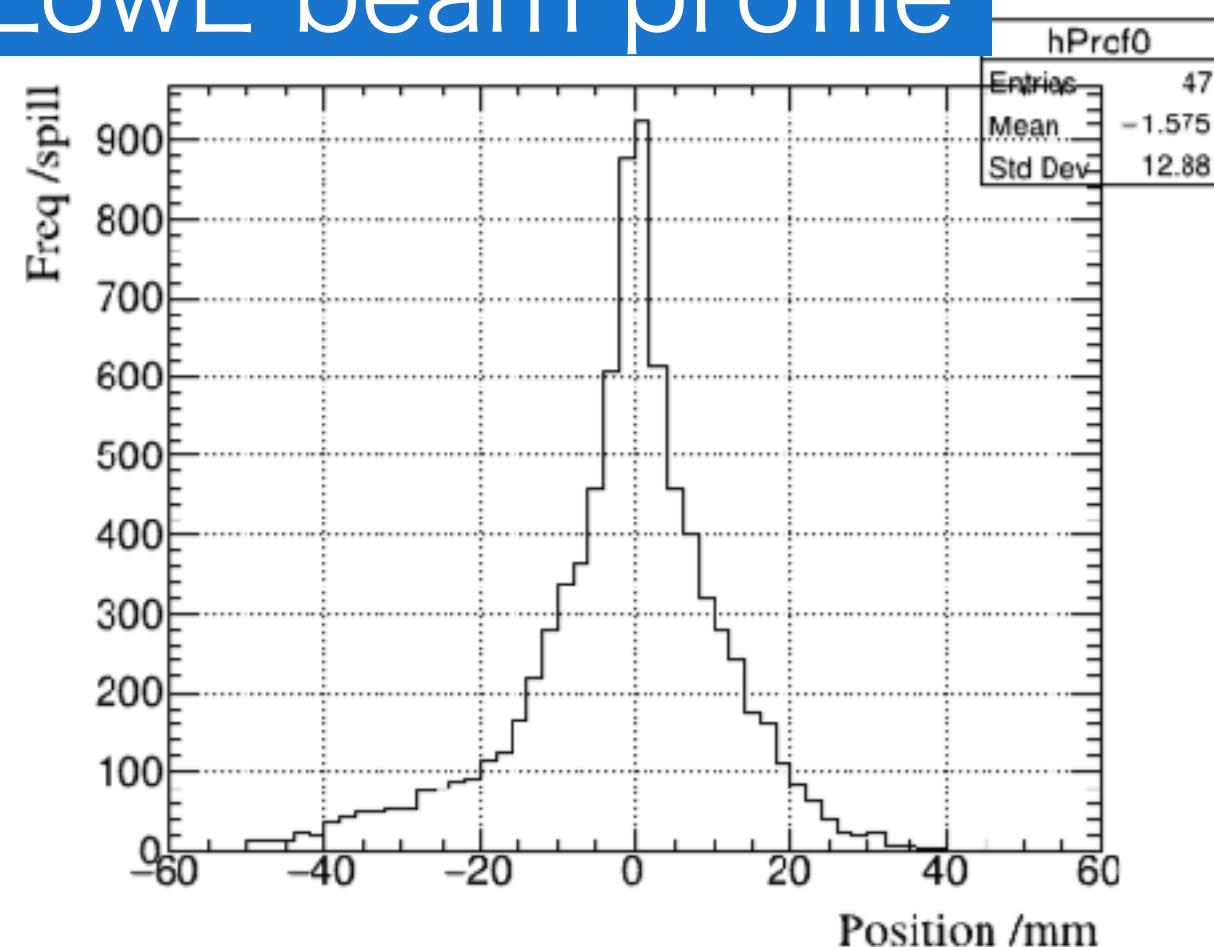


# ビーム拡がりの評価

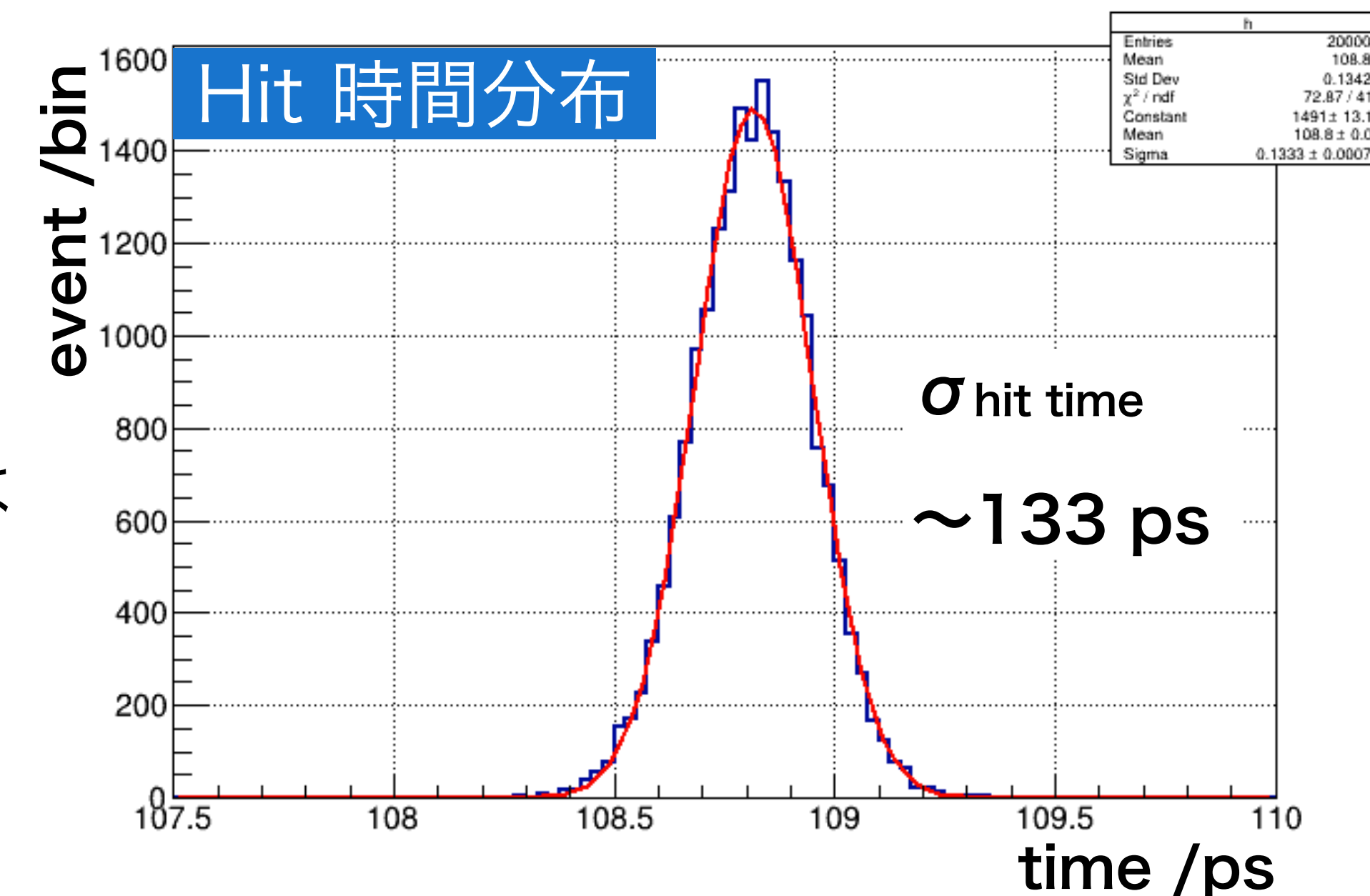
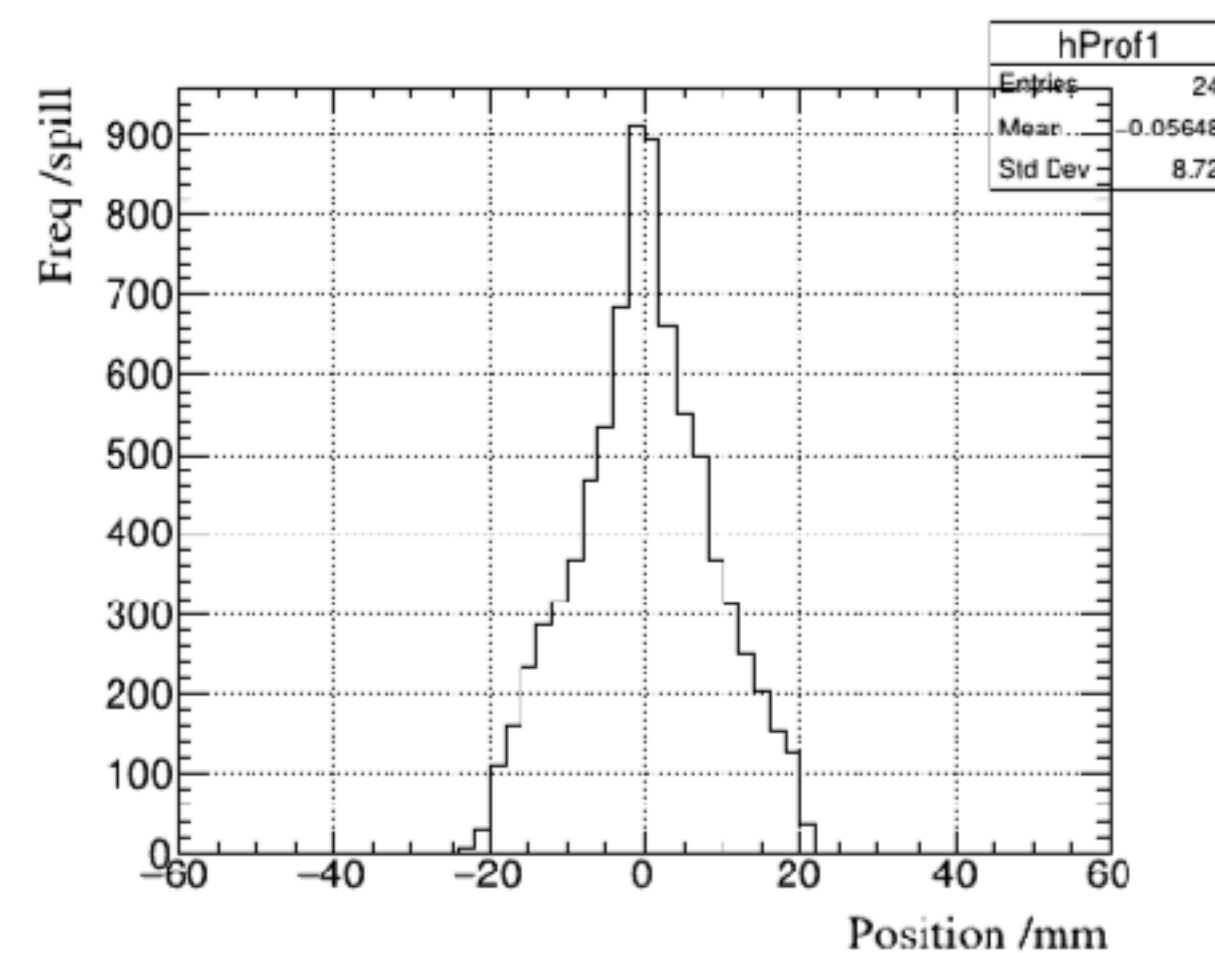
backup

2次元 LowE ビームプロファイル情報を用いて、ビーム拡がりの影響を評価

## LowE beam profile



- Pensil beamの結果 ( $\sigma_{\text{hit\_time}(5\text{mm})} \sim 135 \text{ ps}$ ) と同程度の分解能
- 入射位置の違いによる到達時間差は PS発光のスケールに埋もれる  
-> 時間分解能を悪化しない

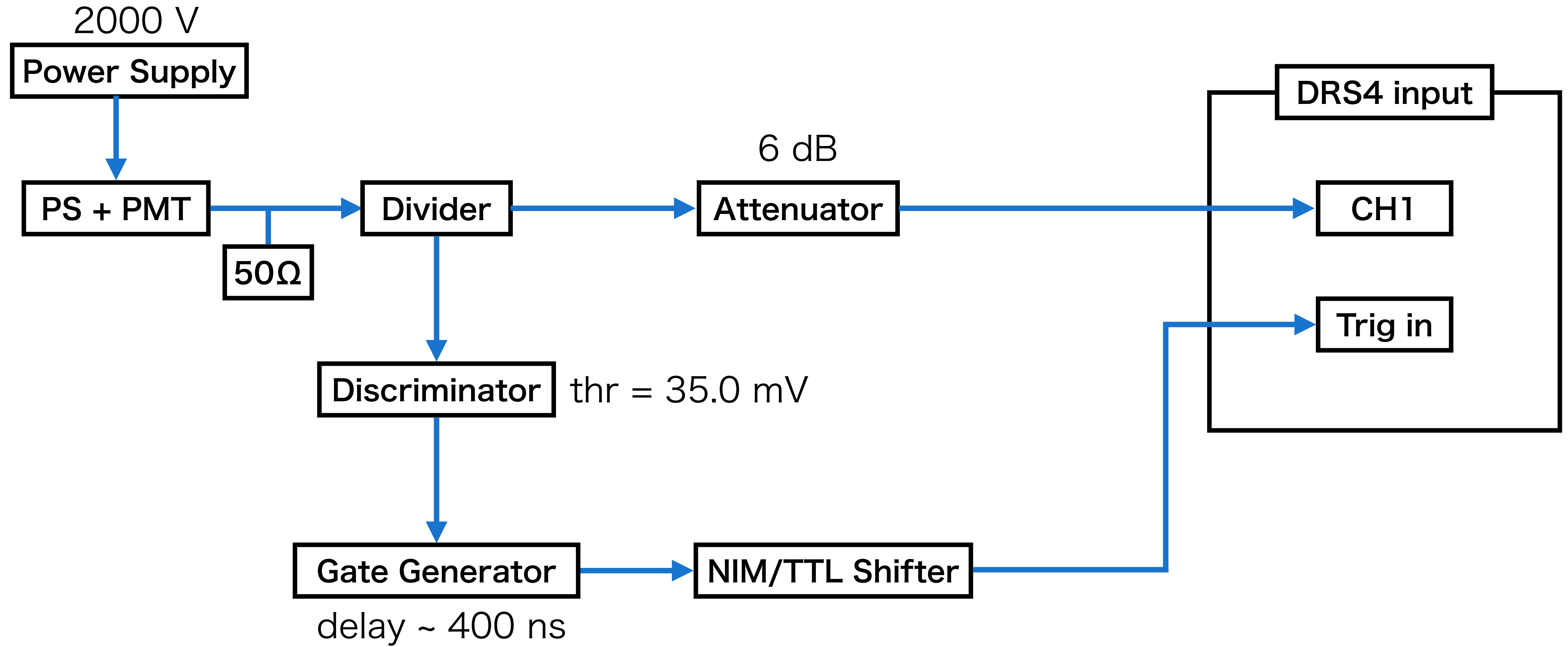


PMT本数	2
PS 厚み /cm	0.5
PS サイズ /cm角	20.0
Sim. events /run	1000
Run number	20
Beam type	LowE profile



# 線源測定回路

backup





# 2mm厚プラスチックシンチレータ

backup

正面から見た図



上から見た図

