

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）

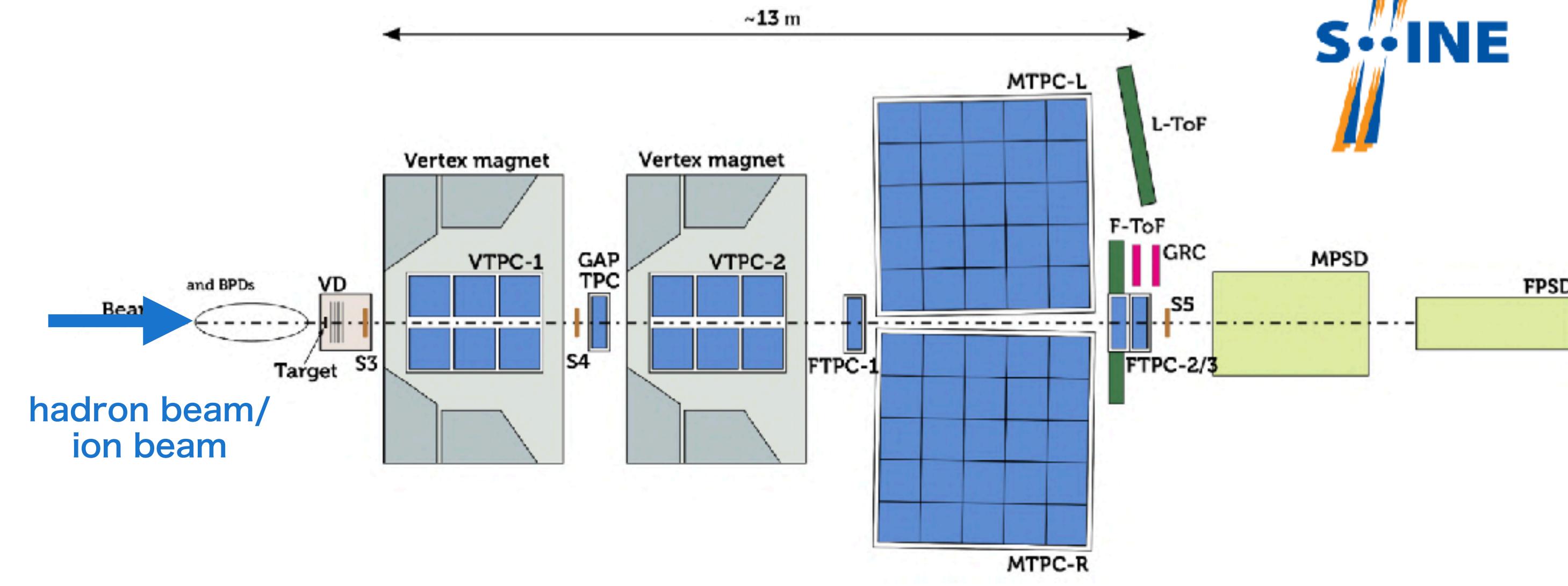
浅井彩那, 小汐由介, 目黒希, 畑中莉桜, 坂下健^A, 中平武^A, 日野陽太^A, Megan Friend^A, 永井義一^B

岡山大理, 高工ネ研^A, ELTE^B

NA61/SHINE 実験

"The SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment"

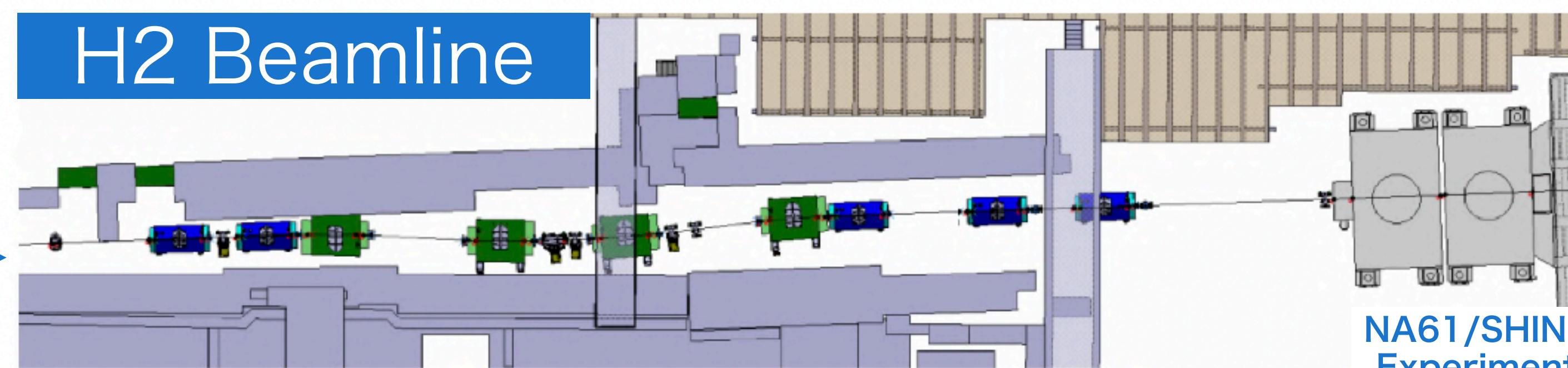
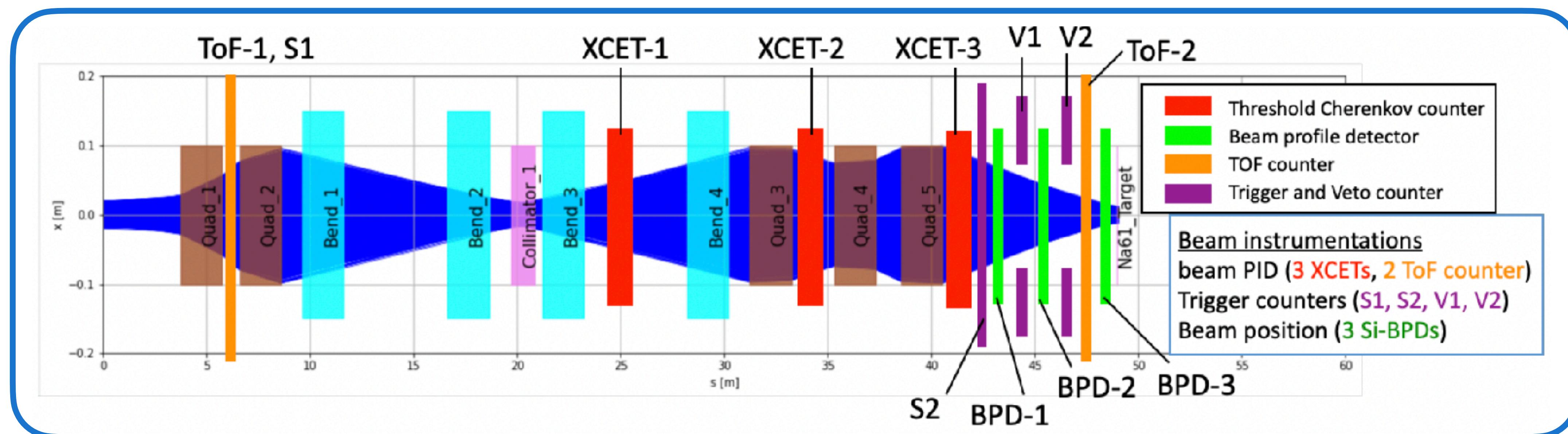
2



- 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

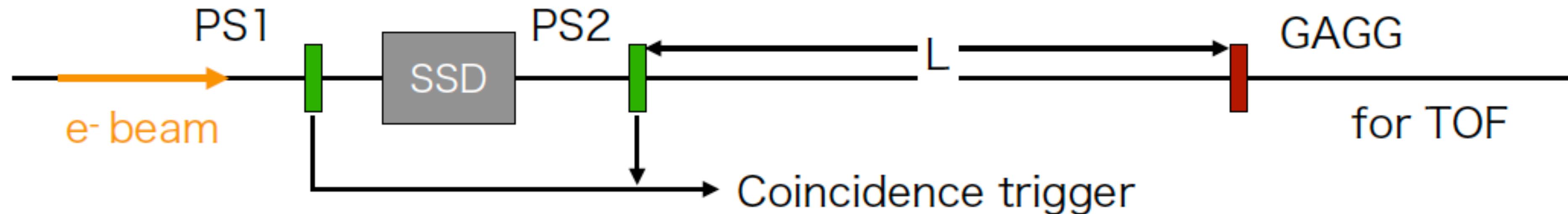
- 2 - 13 GeV/cのハドロン (p , π^+ , K^+) ビームラインの実現に向け、
広範囲ビームプロファイルモニター、低運動量に適した粒子識別検出器の開発を進めている



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

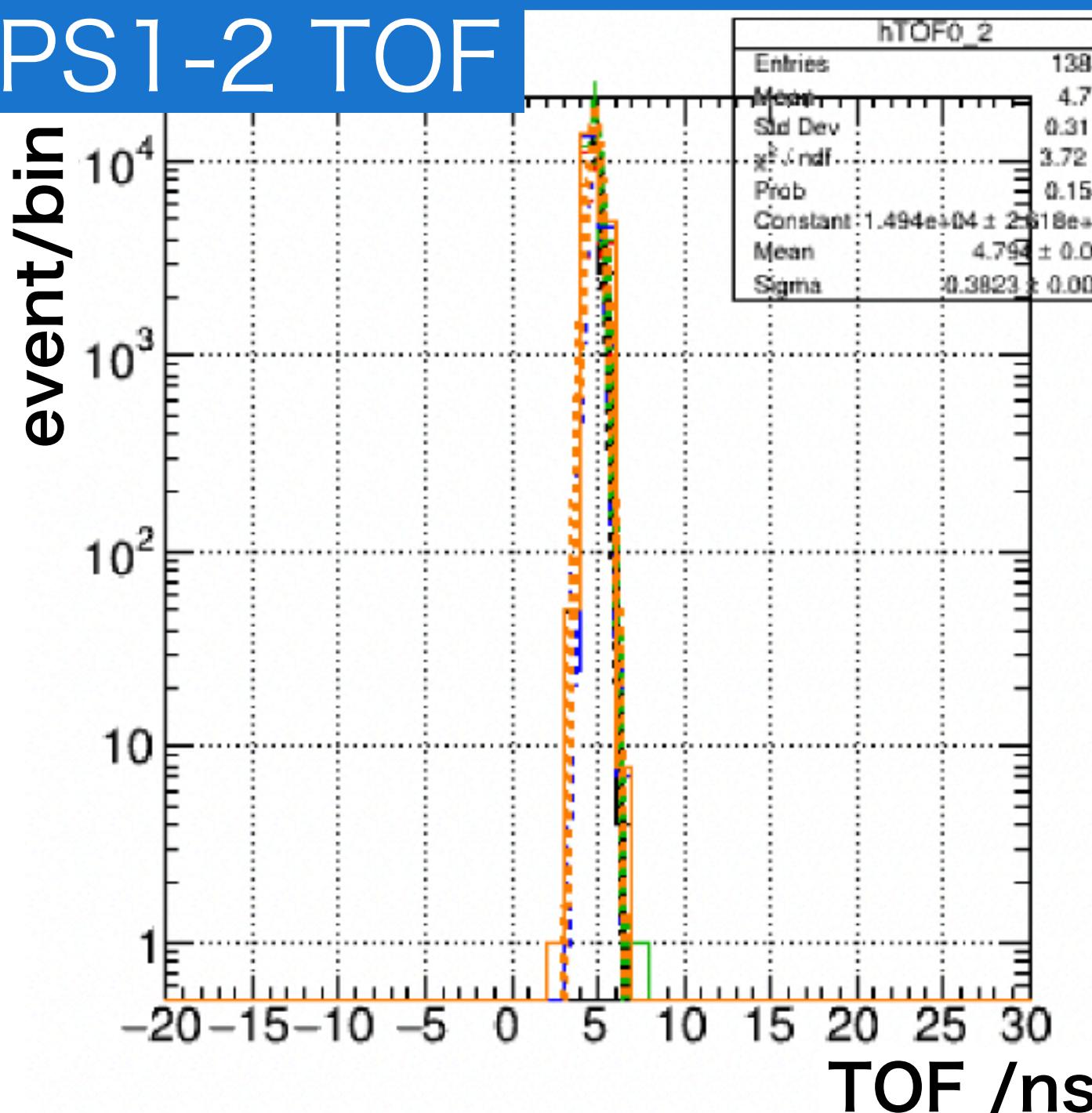


プラスチック
シンチレータ



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

PS1-2 TOF



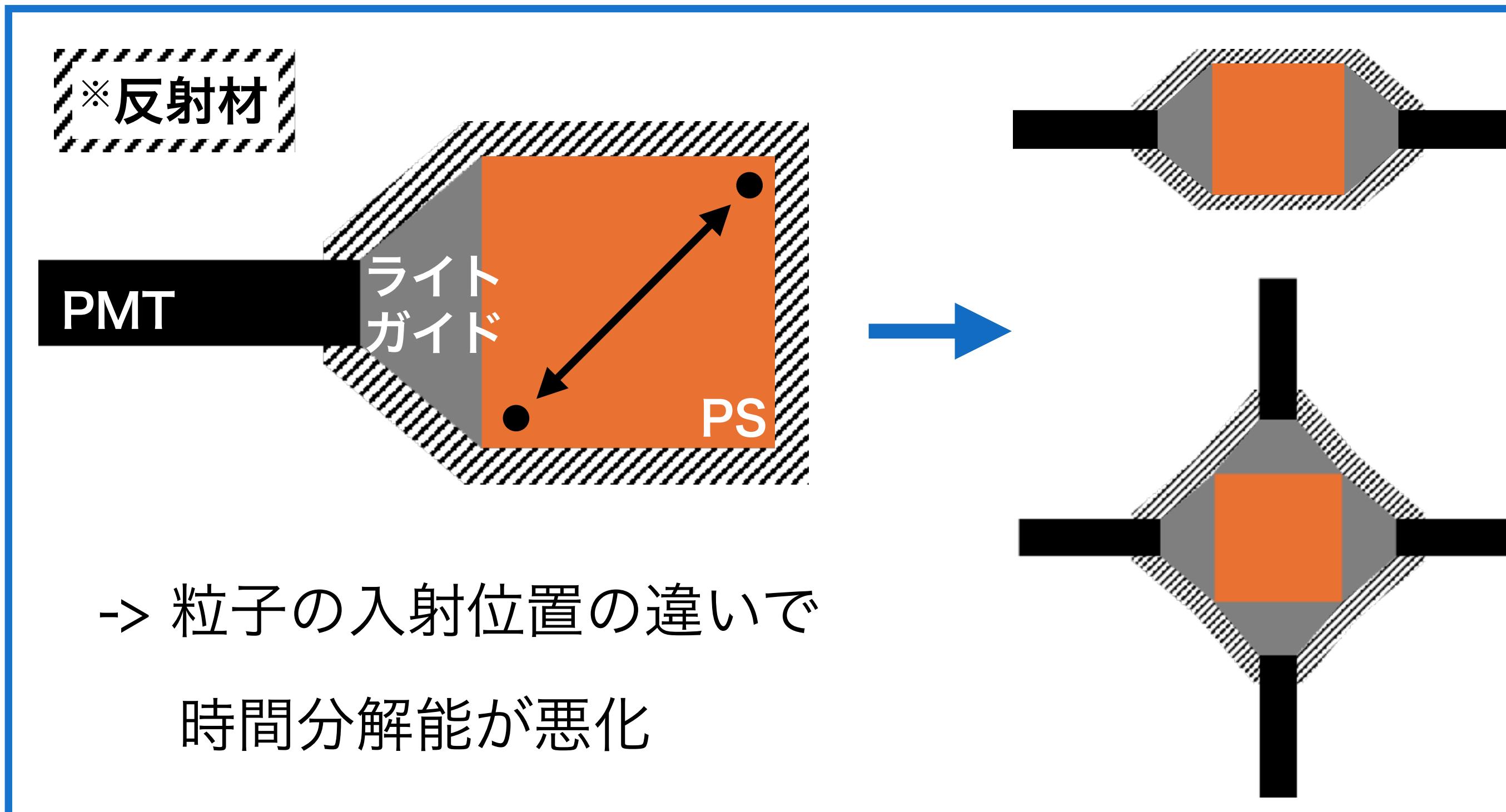
要求：低ビームロス (≤ 5 mm厚) & 高分解能 (< 500 ps)

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

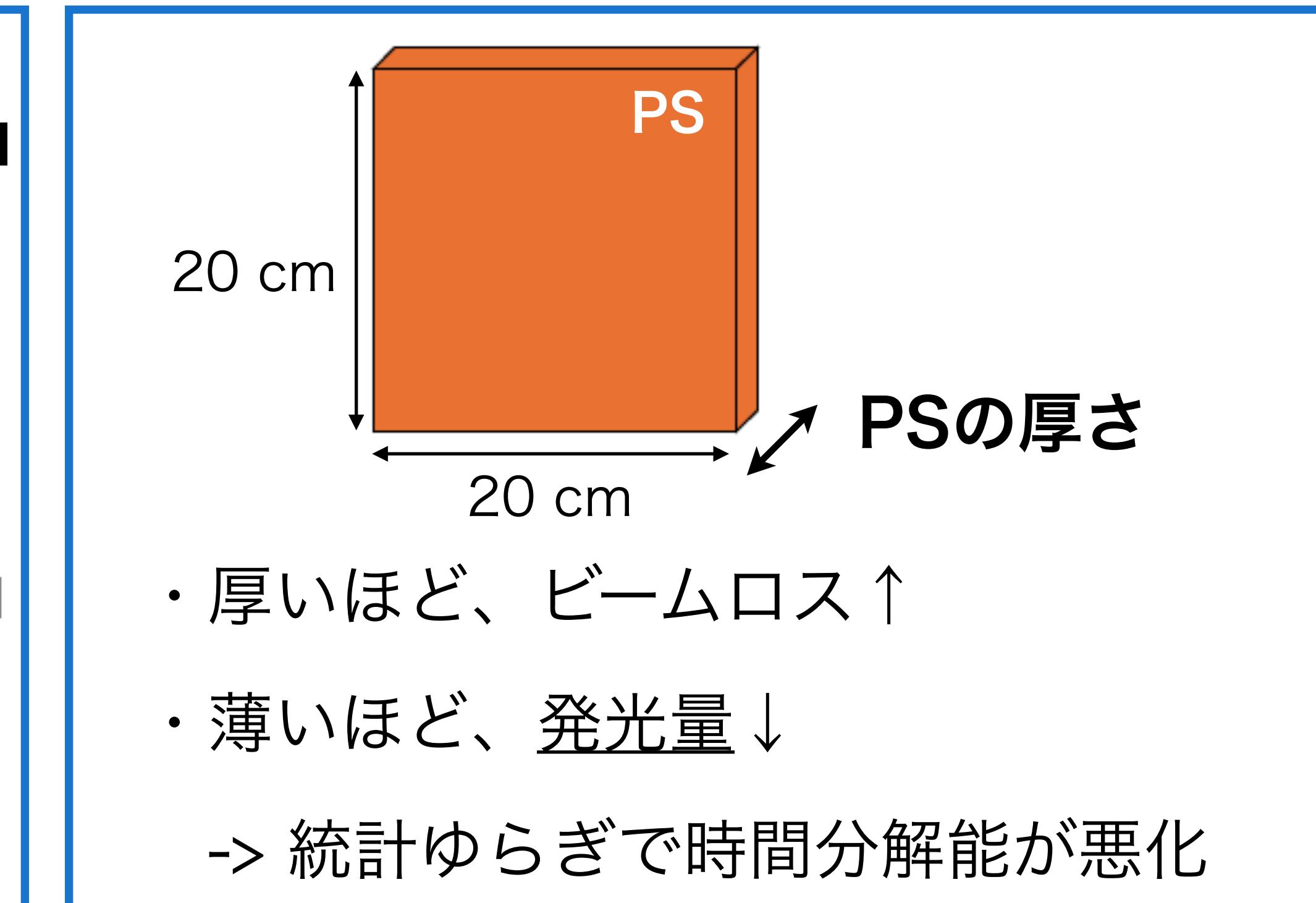
改良：• MCシミュレーションでデザイン再検討
• 試作TOF検出器をビームテストで評価

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



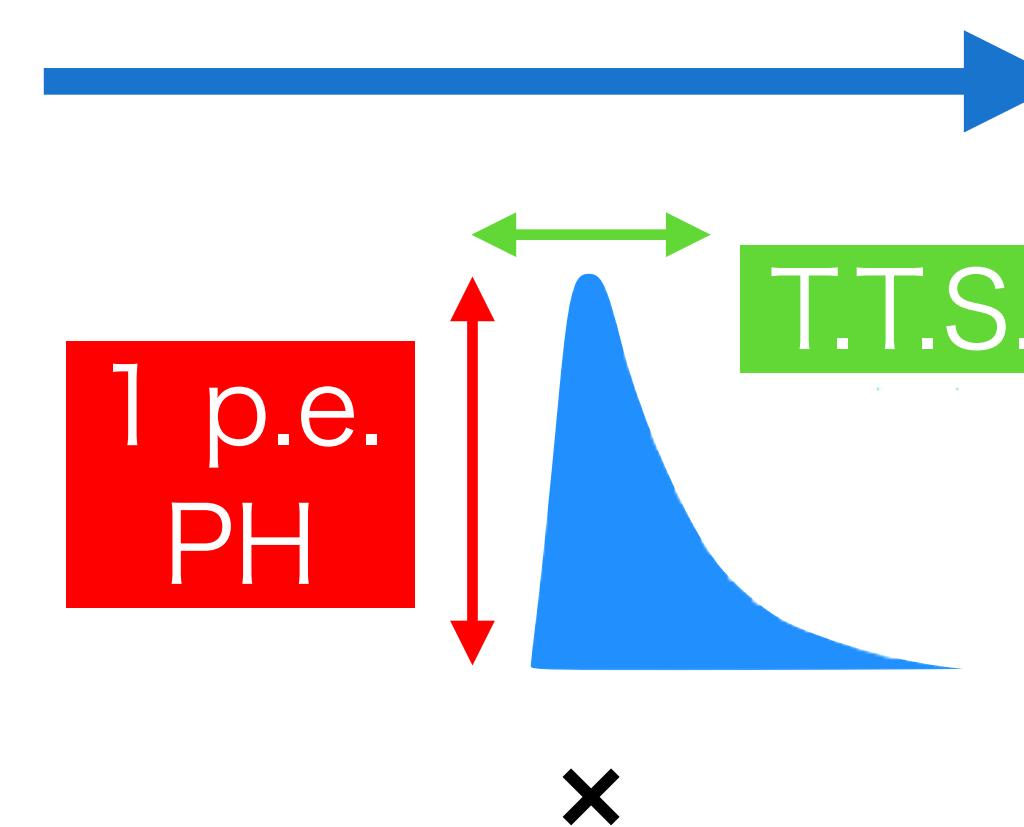
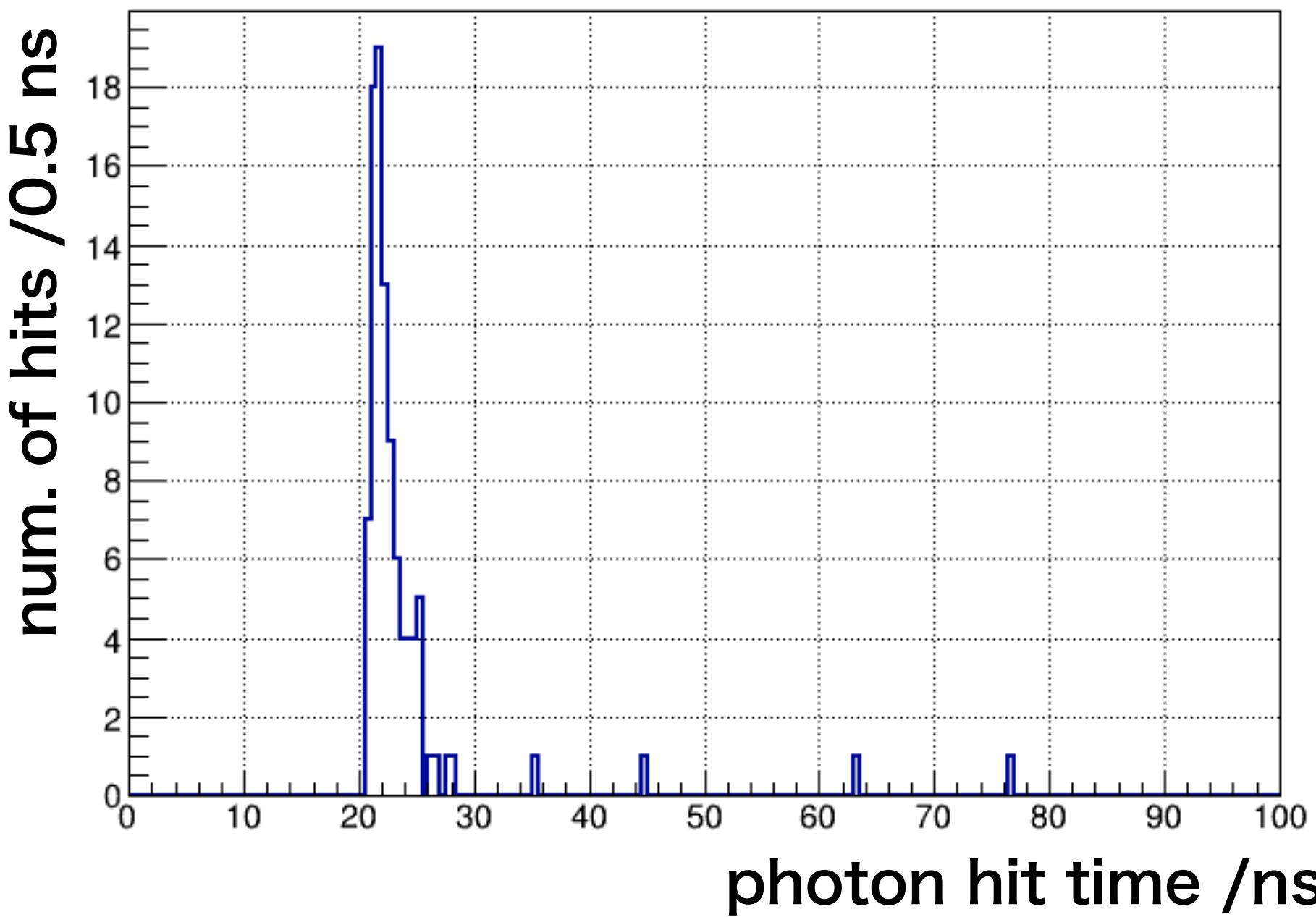
Geant4によるMCシミュレーション



- ・ 1 GeVの μ^+ 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 \times 10 run = 10k events

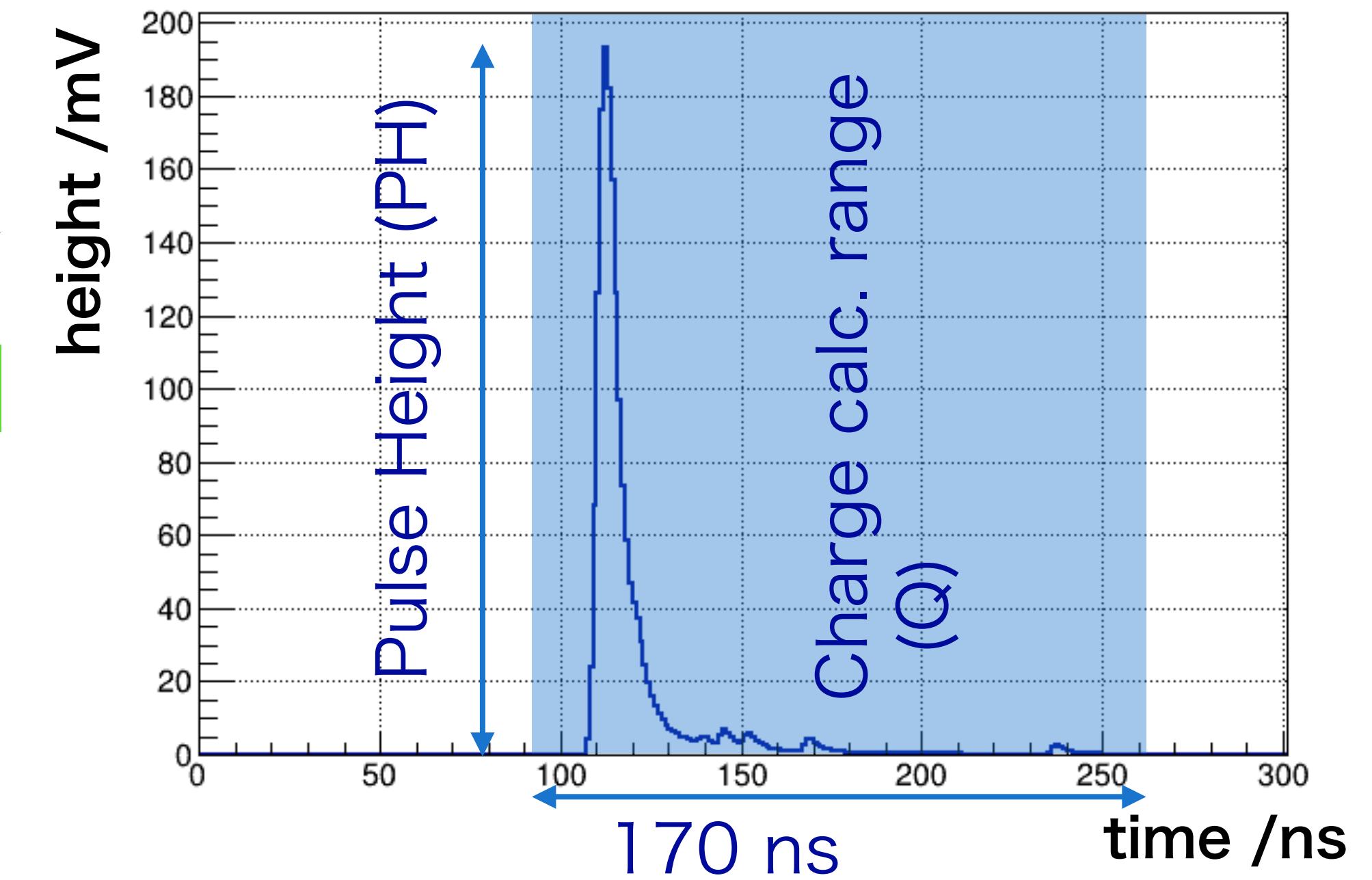
波形生成

Photon Hit Time

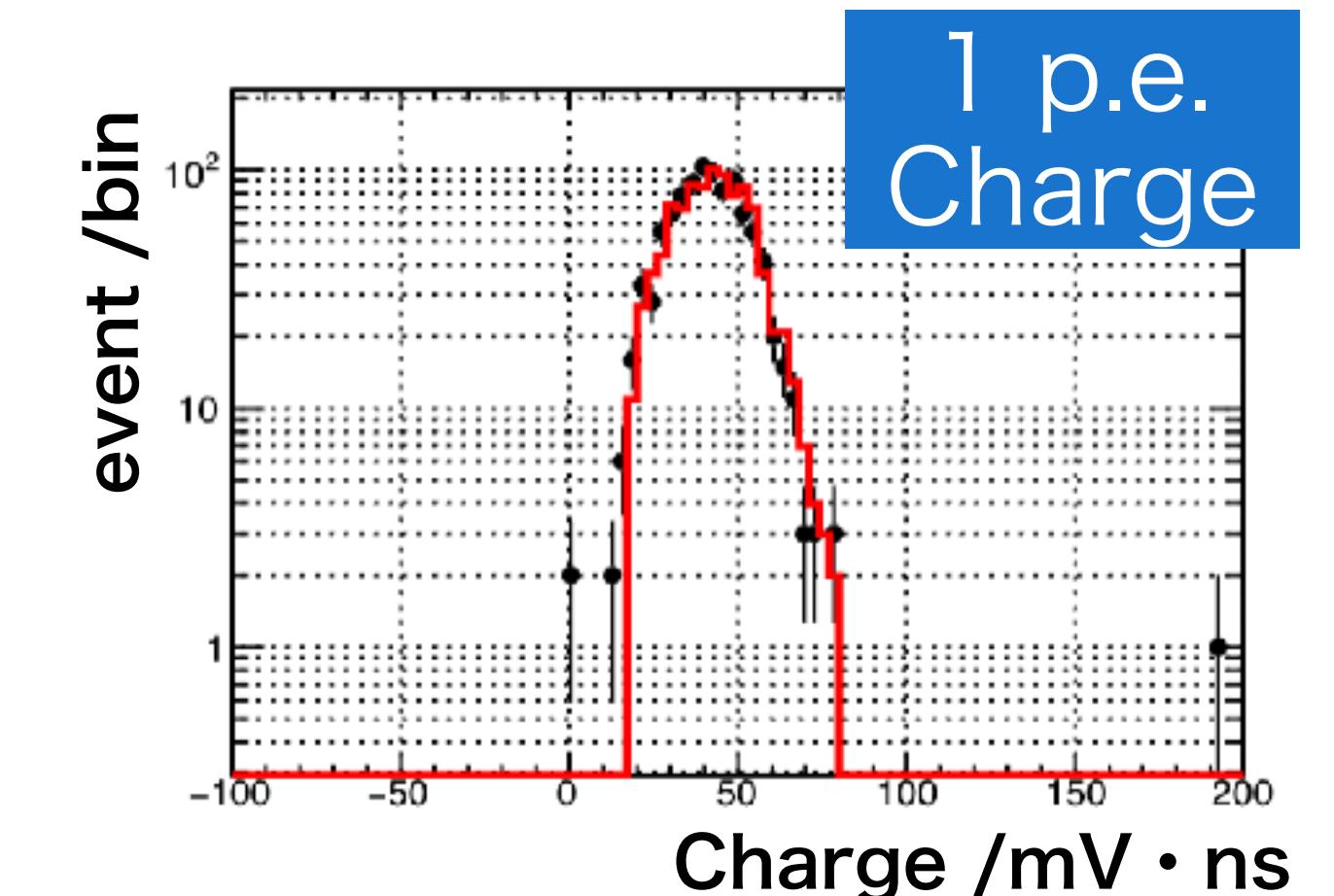
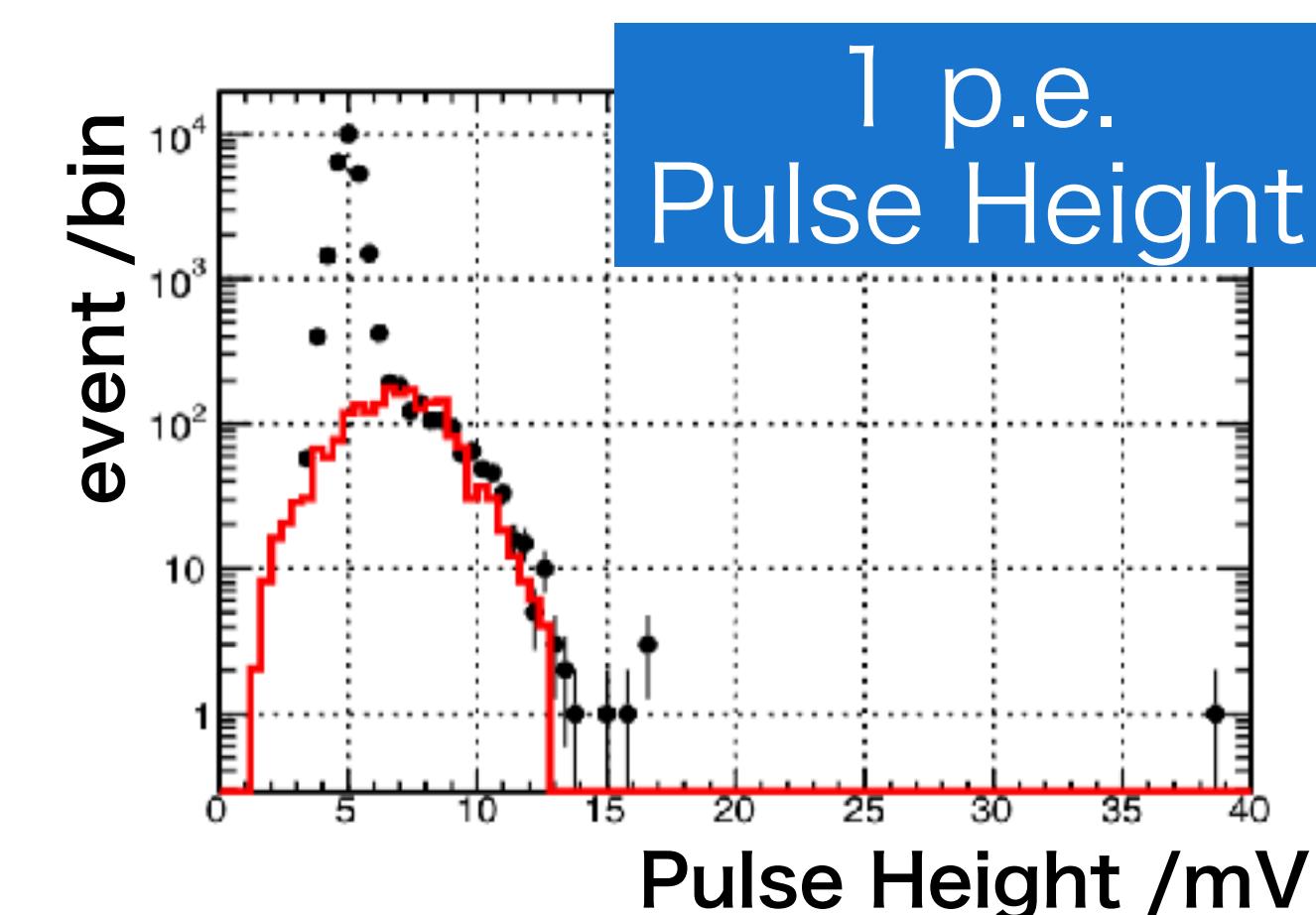


観測光子数

1 イベント 波形

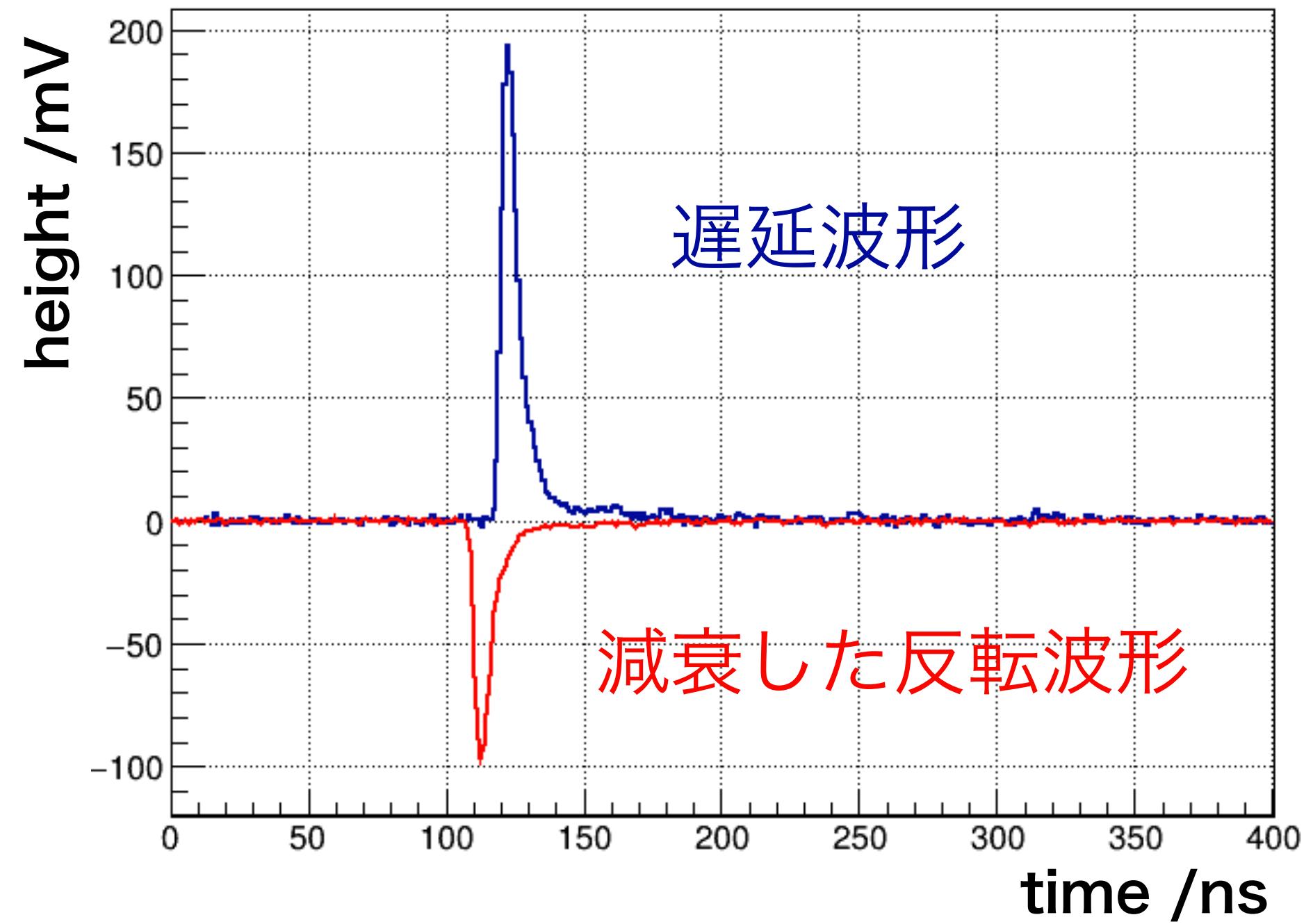


- Photon Hit Timeに従って、
1 p.e. 波形を重ね合わせ
 - Transit Time Spread (T.T.S.)
 - 1 p.e. 波高値分布を乱数で振って考慮
- 1 p.e. 波形はLandau関数でモデル化

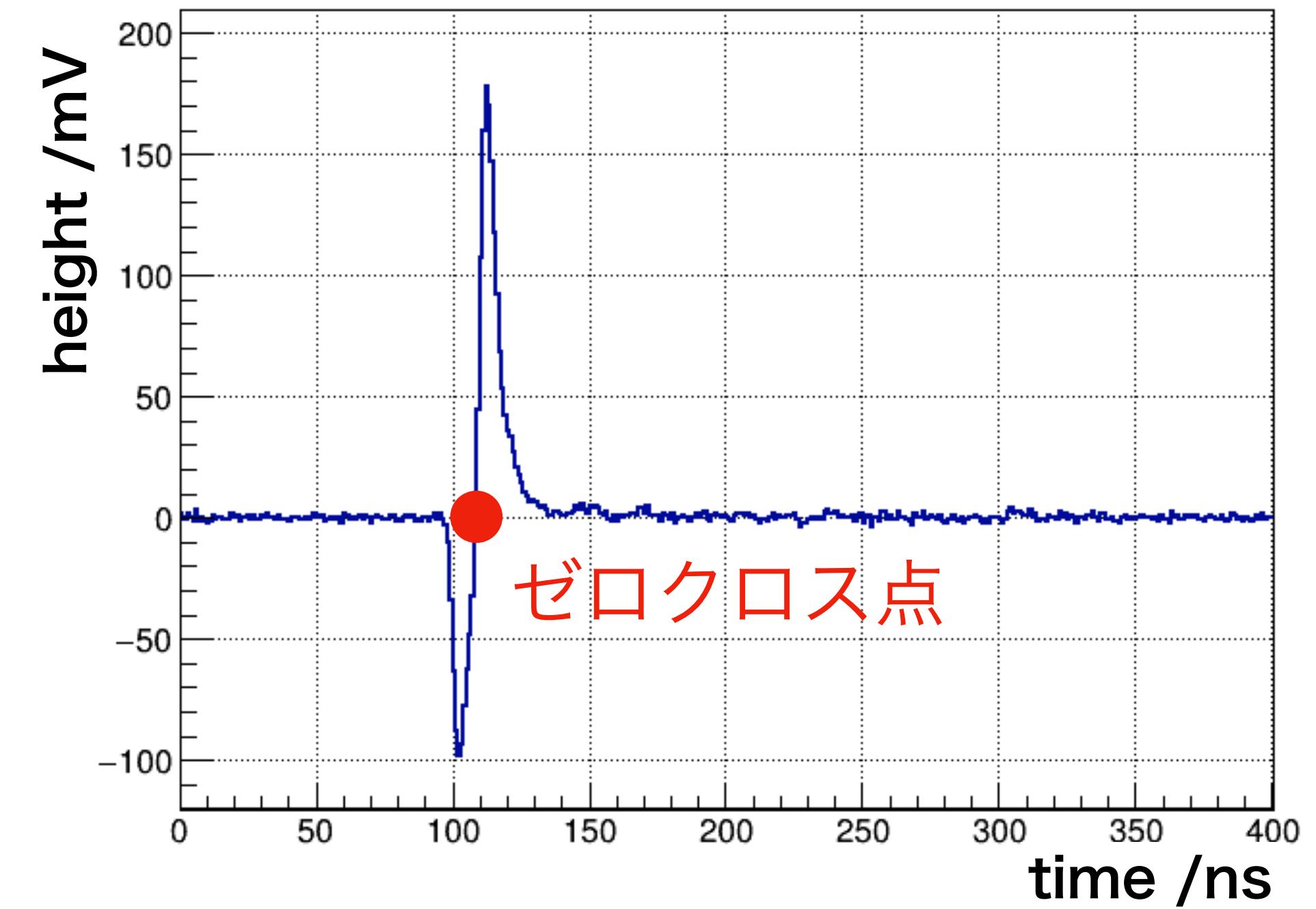


Hit時間の決定

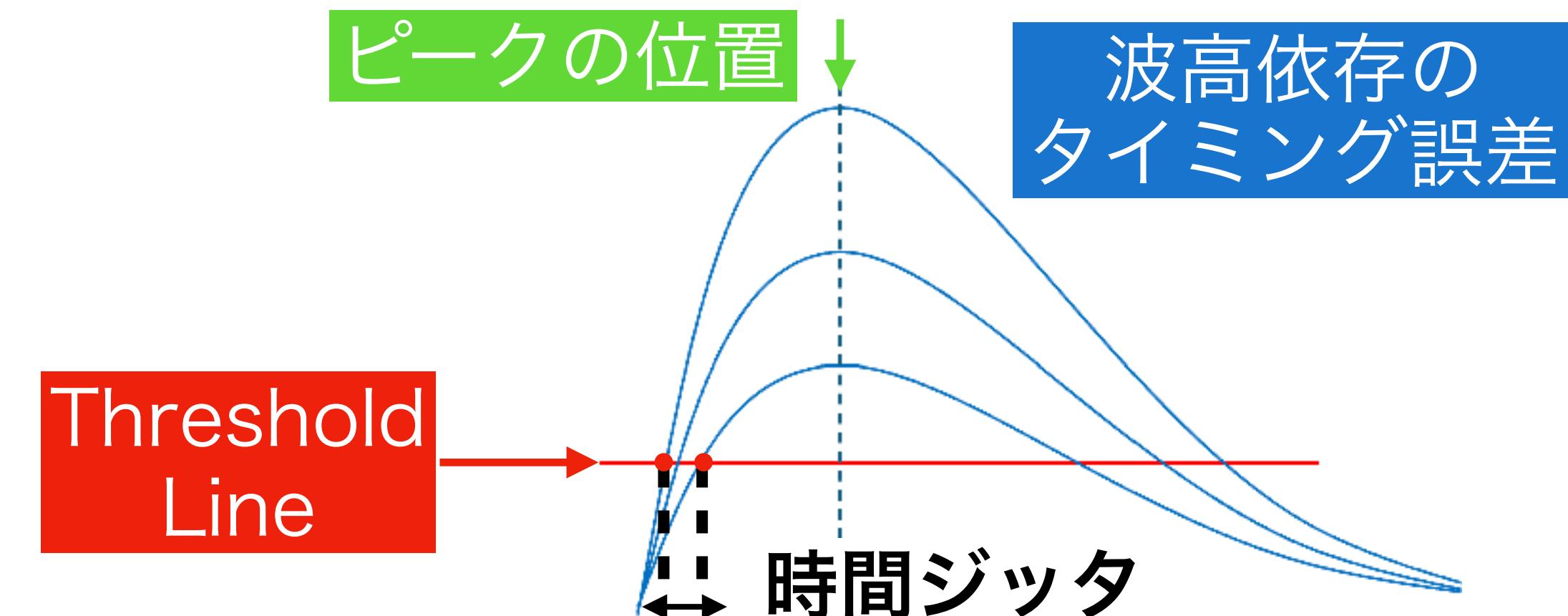
CFD入力



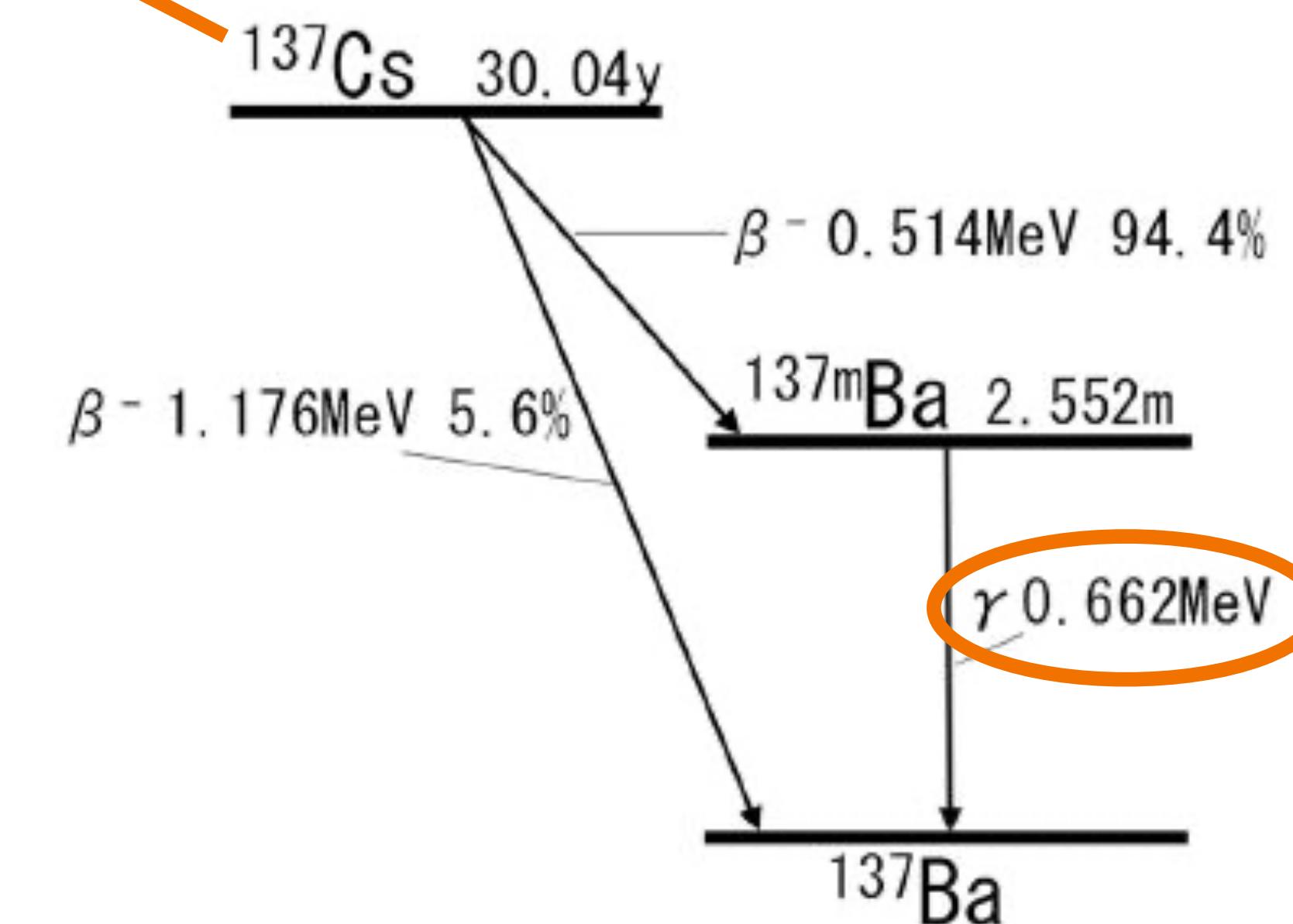
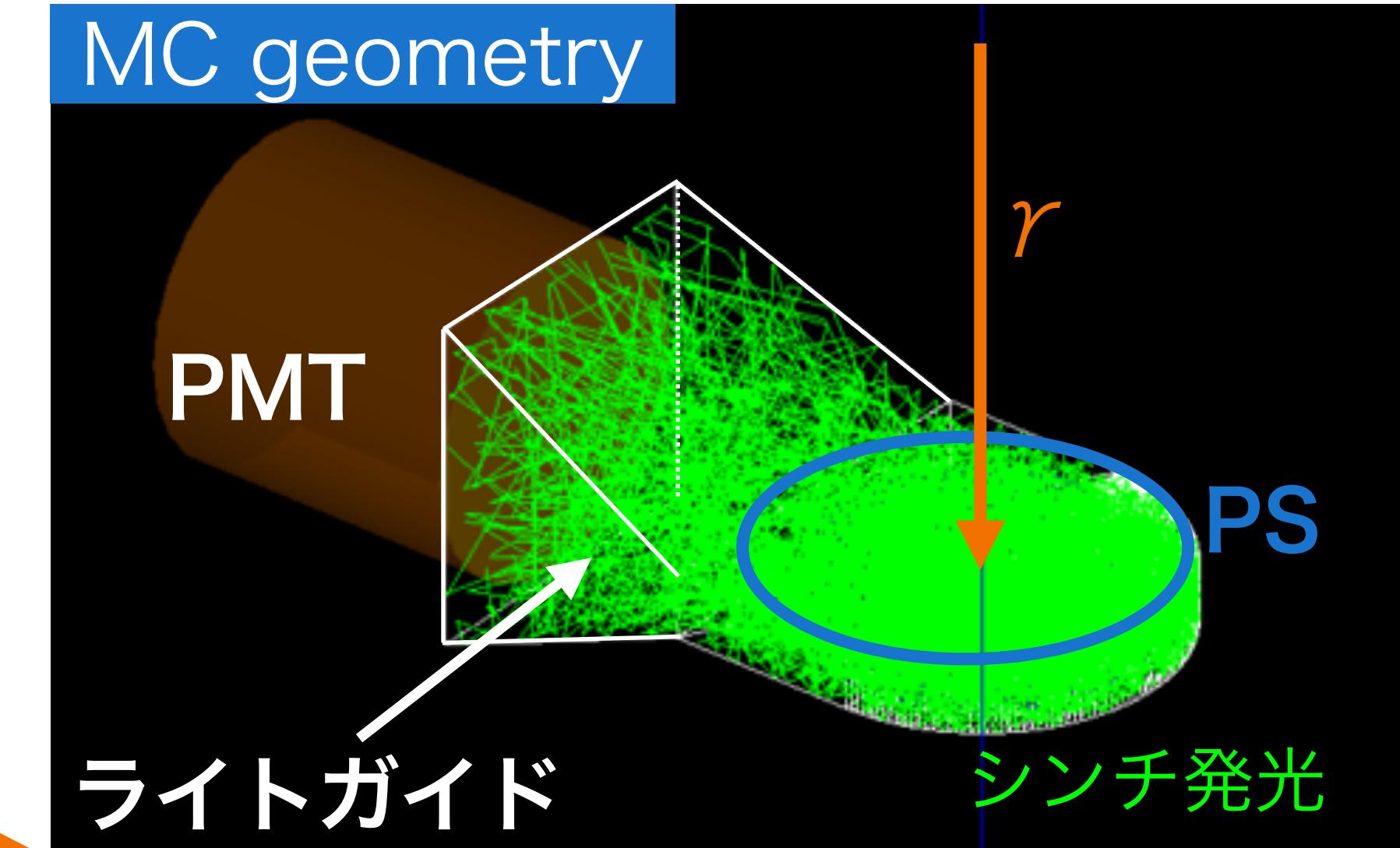
CFD波形



- 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

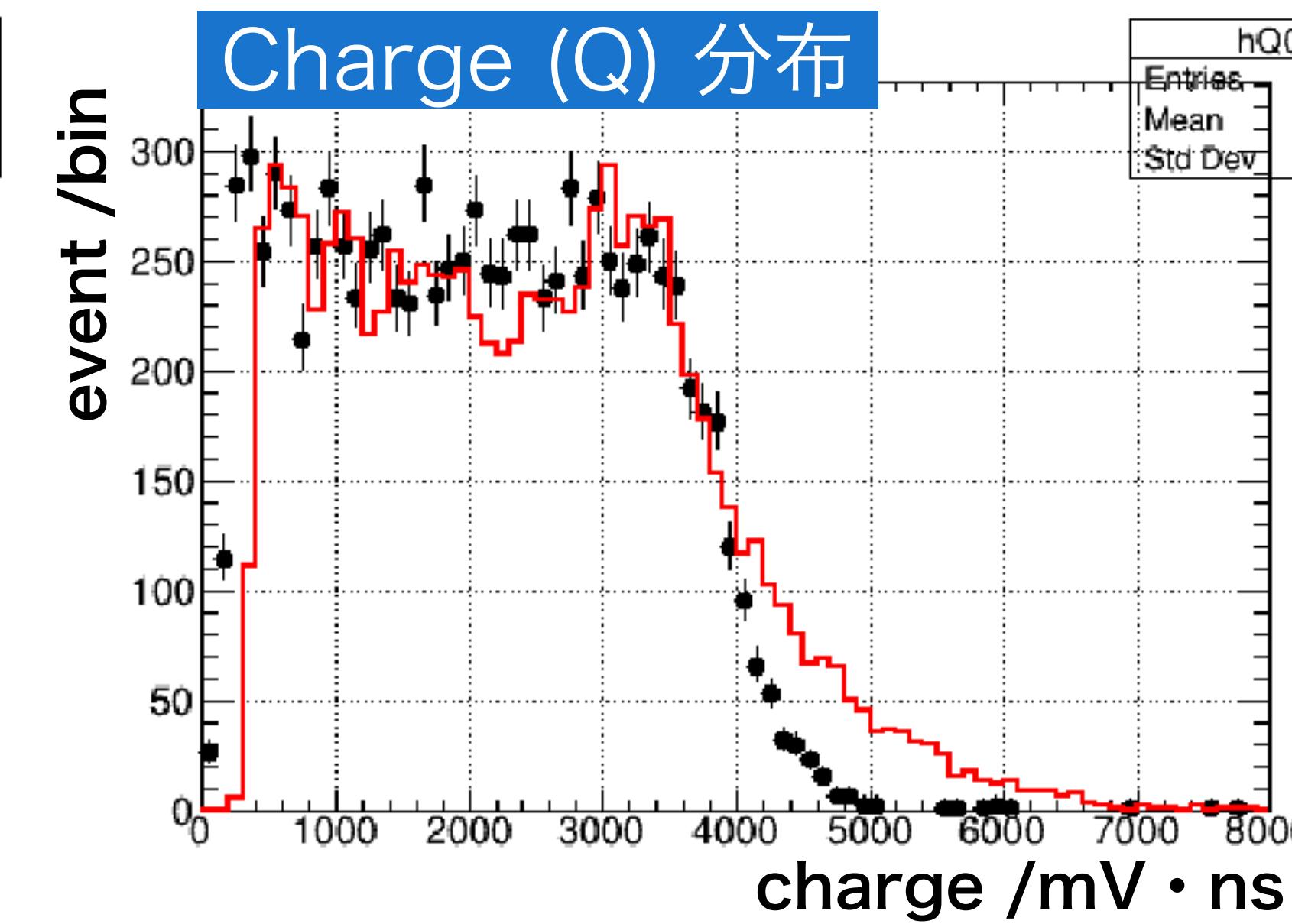
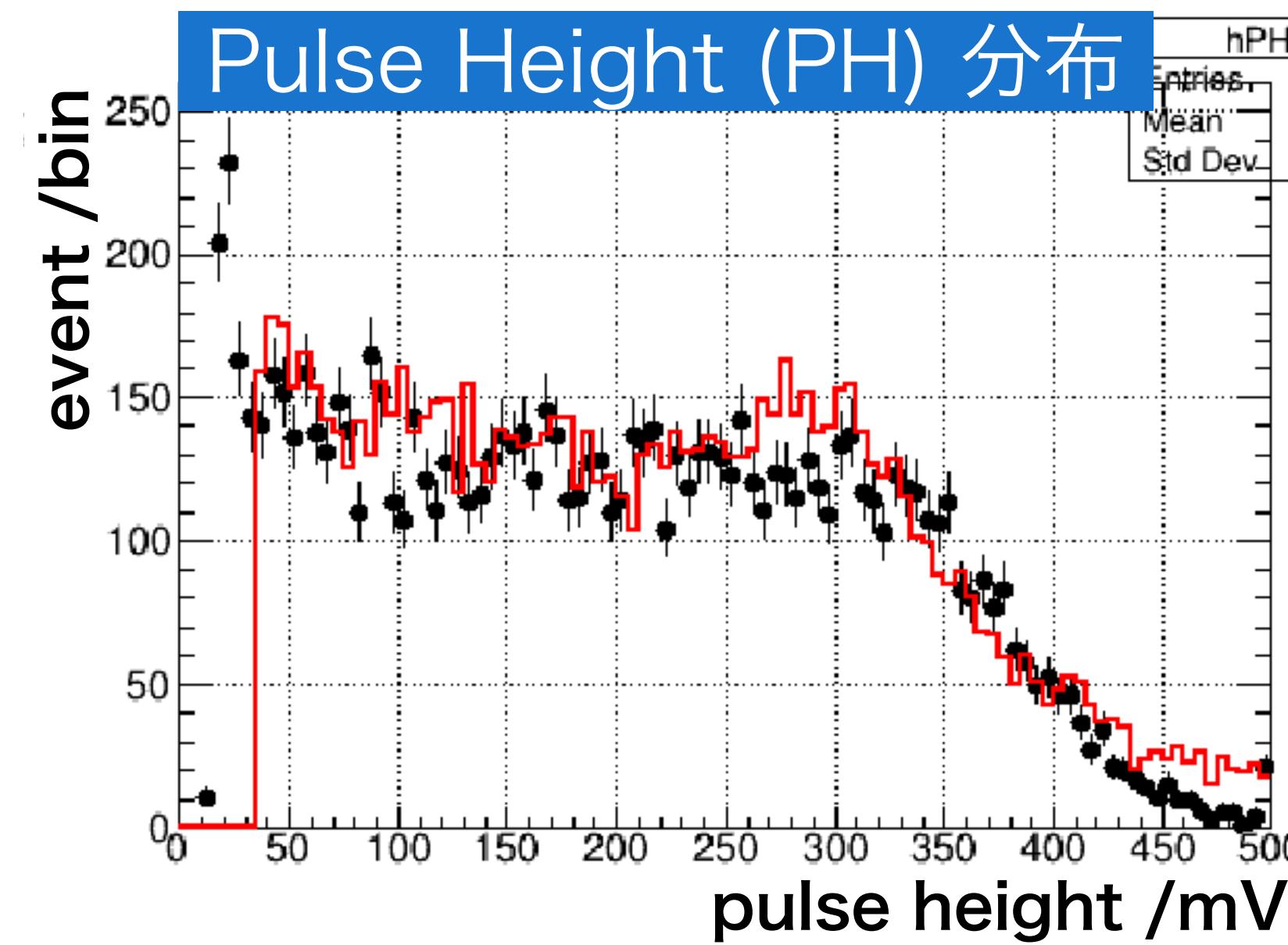


MC Tuning (線源測定)

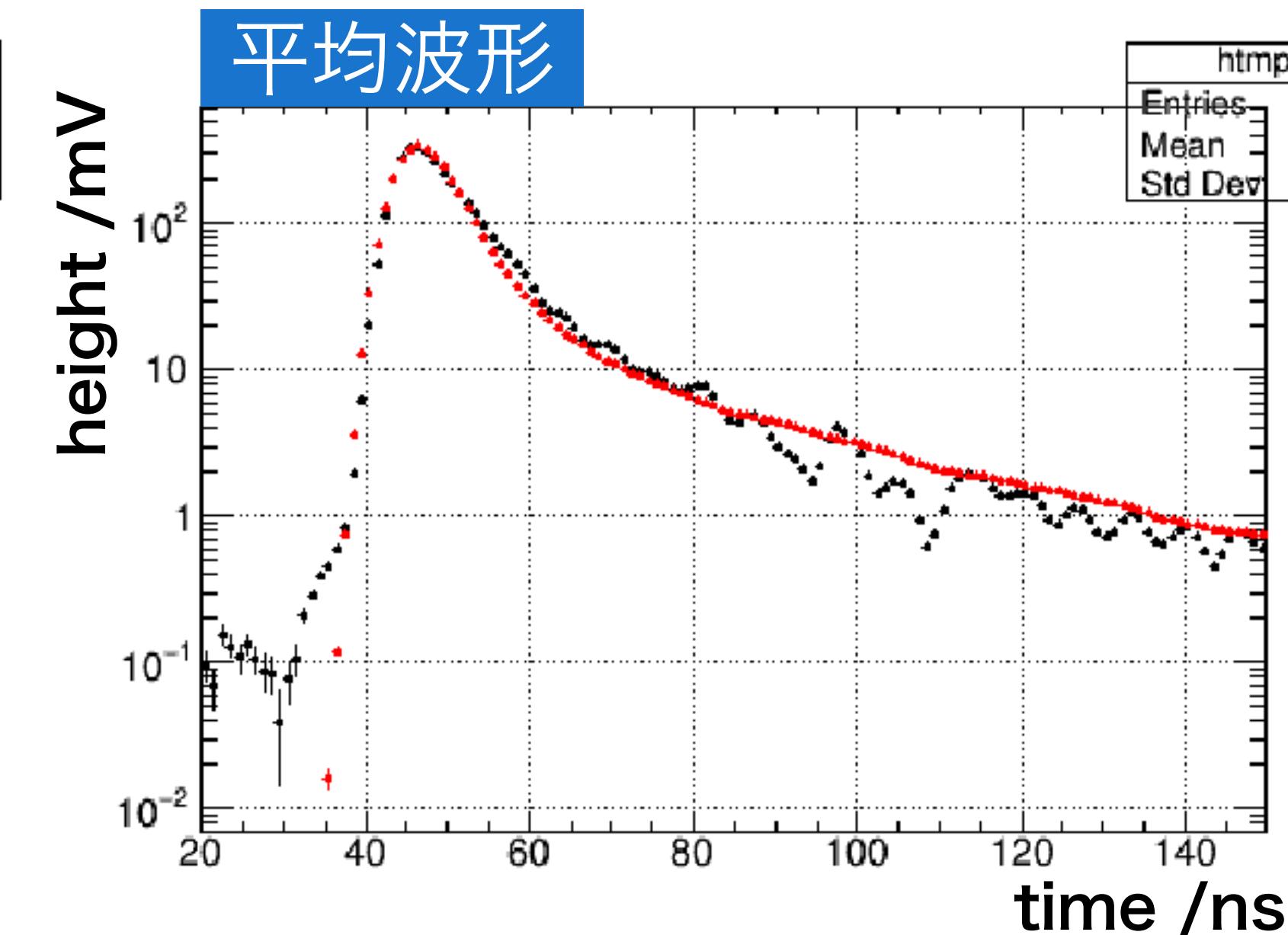
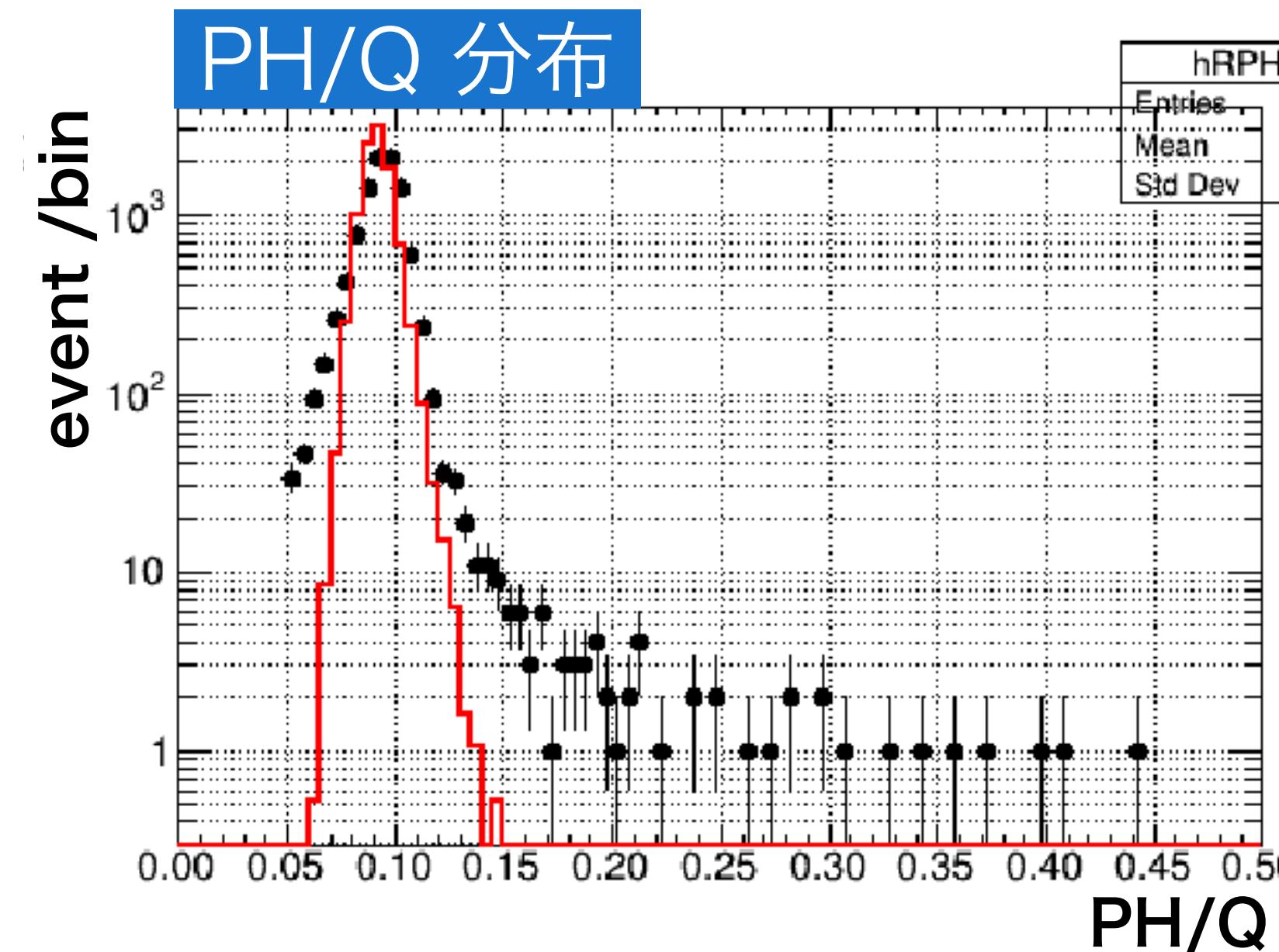


- ^{137}Cs 線源のコンプトンエッジを測定して、MCと比較
- 過去ビームテストで使用した片側読み出しのTOF検出器を使用

MC Tuning の結果



- 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 变数

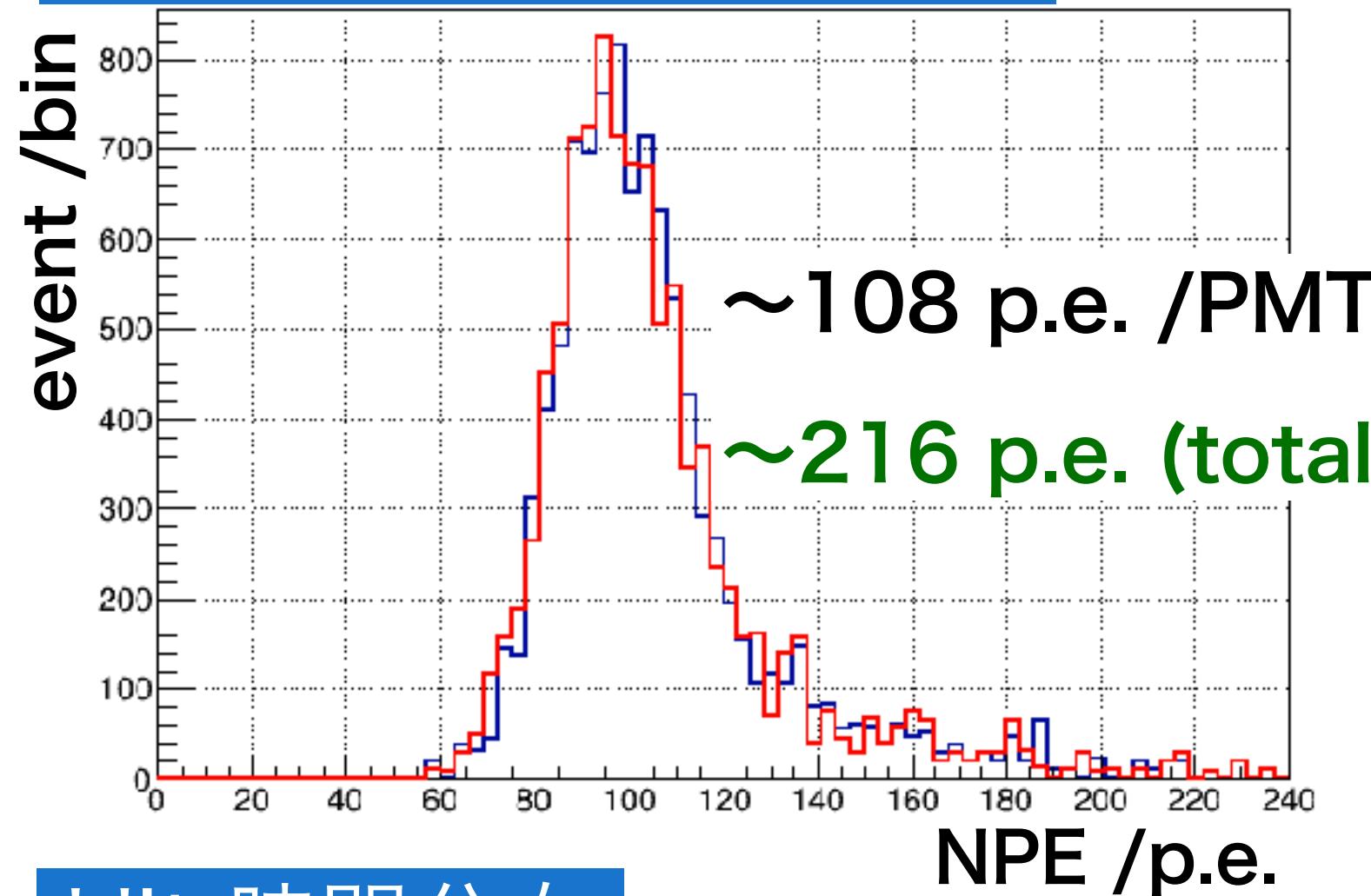
- T.T.S. = 2.0 ns
- シンチレータ变数
- 発光量 = 8 photon/keV
- 時定数 (速い成分) = 1.5 ns
- 時定数 (遅い成分) = 60 ns

PMT本数比較のMC結果

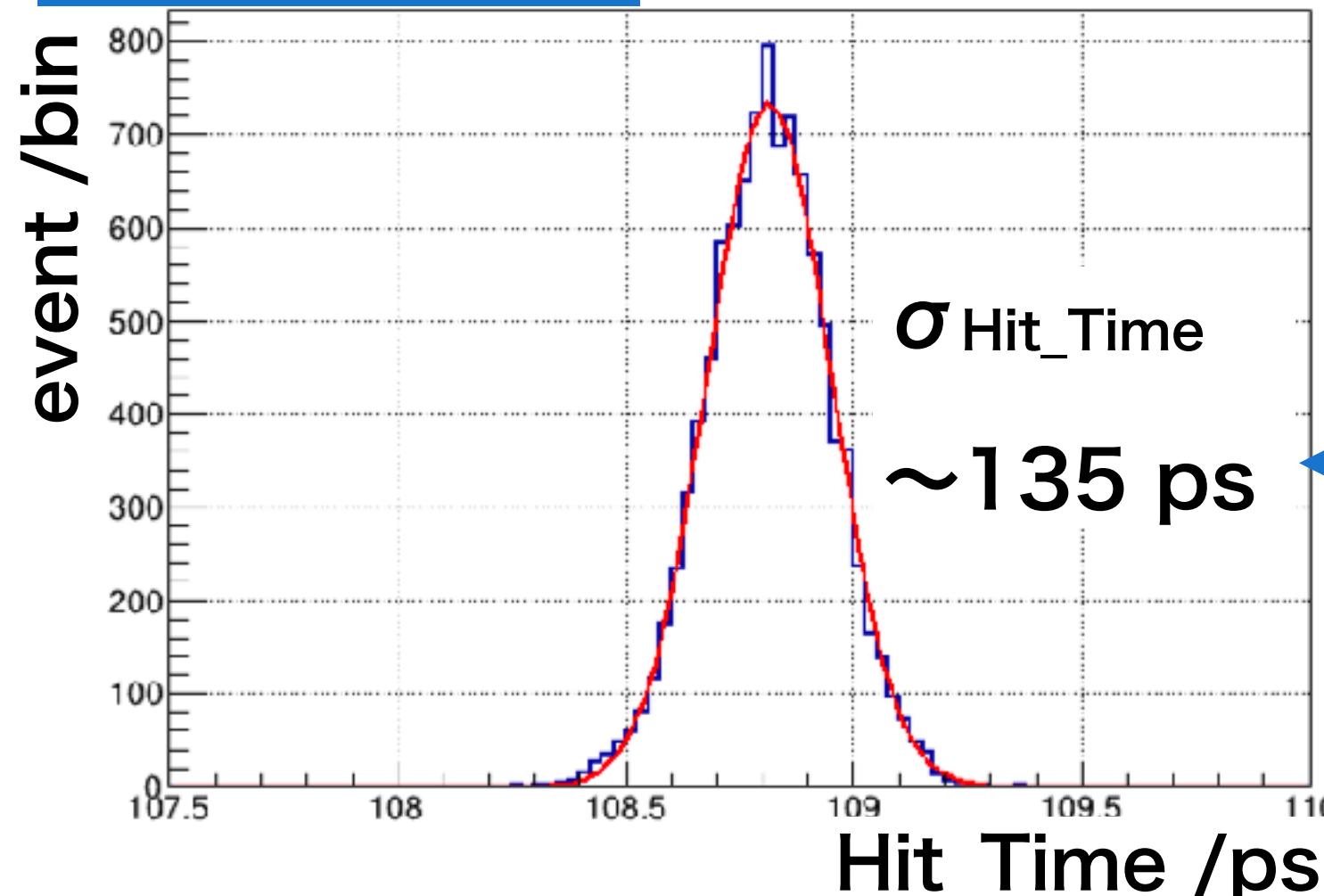
10

PMT2本

各PMT入射光量 (NPE)

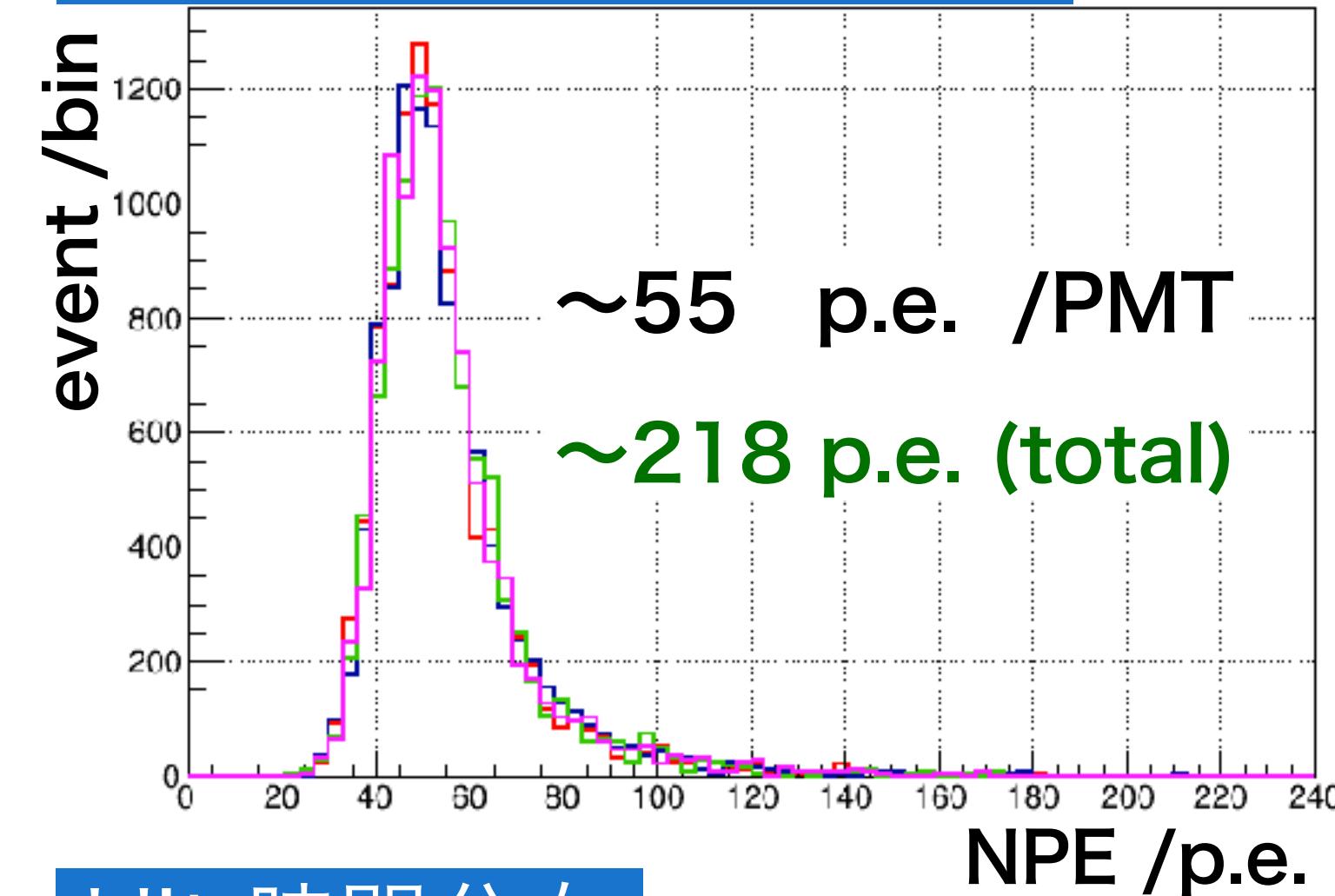


Hit 時間分布

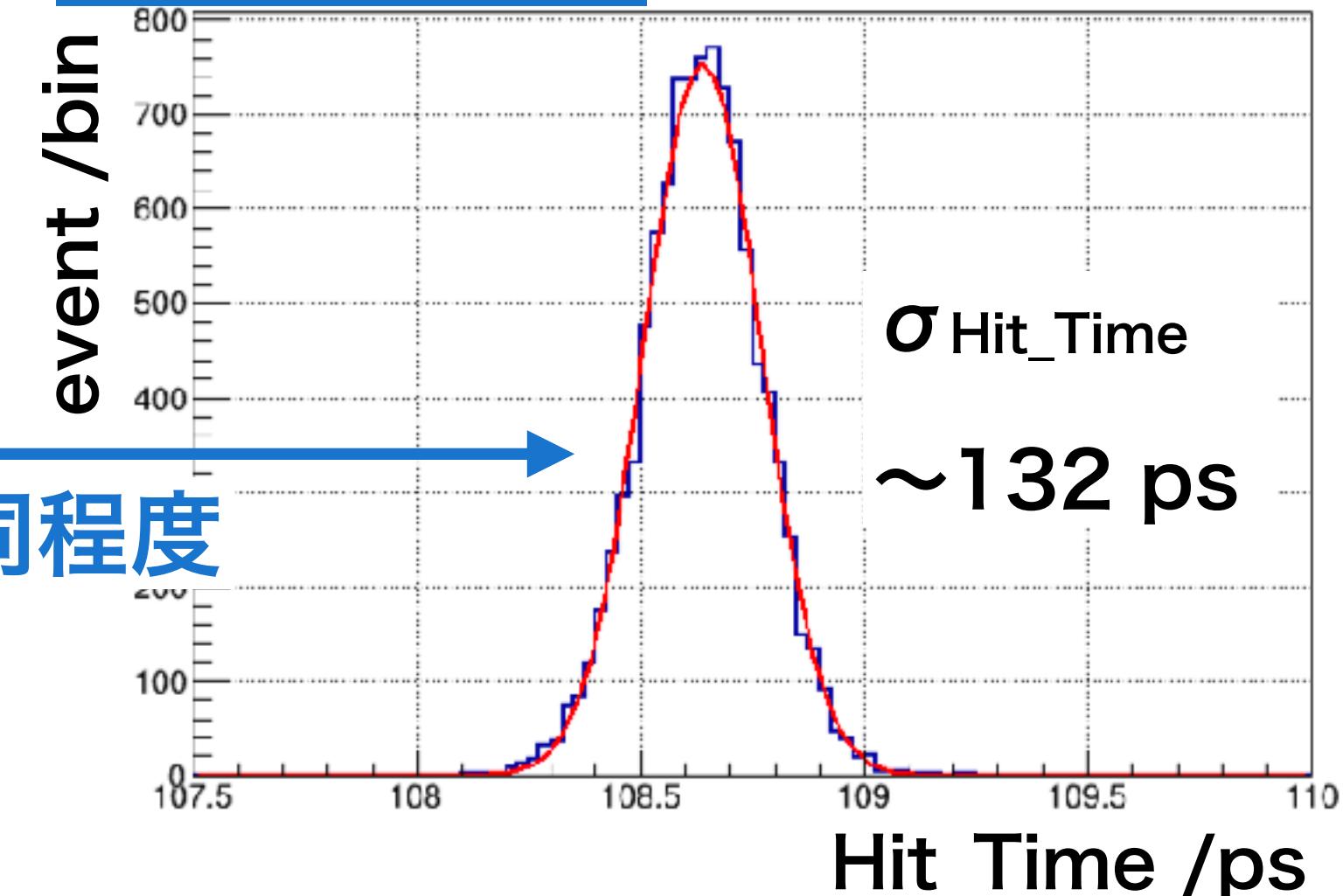


PMT4本

各PMT入射光量 (NPE)



Hit 時間分布



- 2PMTで $\sigma_{\text{Hit_Time}} \sim 135$ ps

$\rightarrow \sigma_{\text{TOF}} \sim 191$ ps

(TOF = 2検出器の時間差)

- 4PMTと同等の時間分解能を実現

\rightarrow PS外側に反射材を配置

→ 光子ロスを抑制

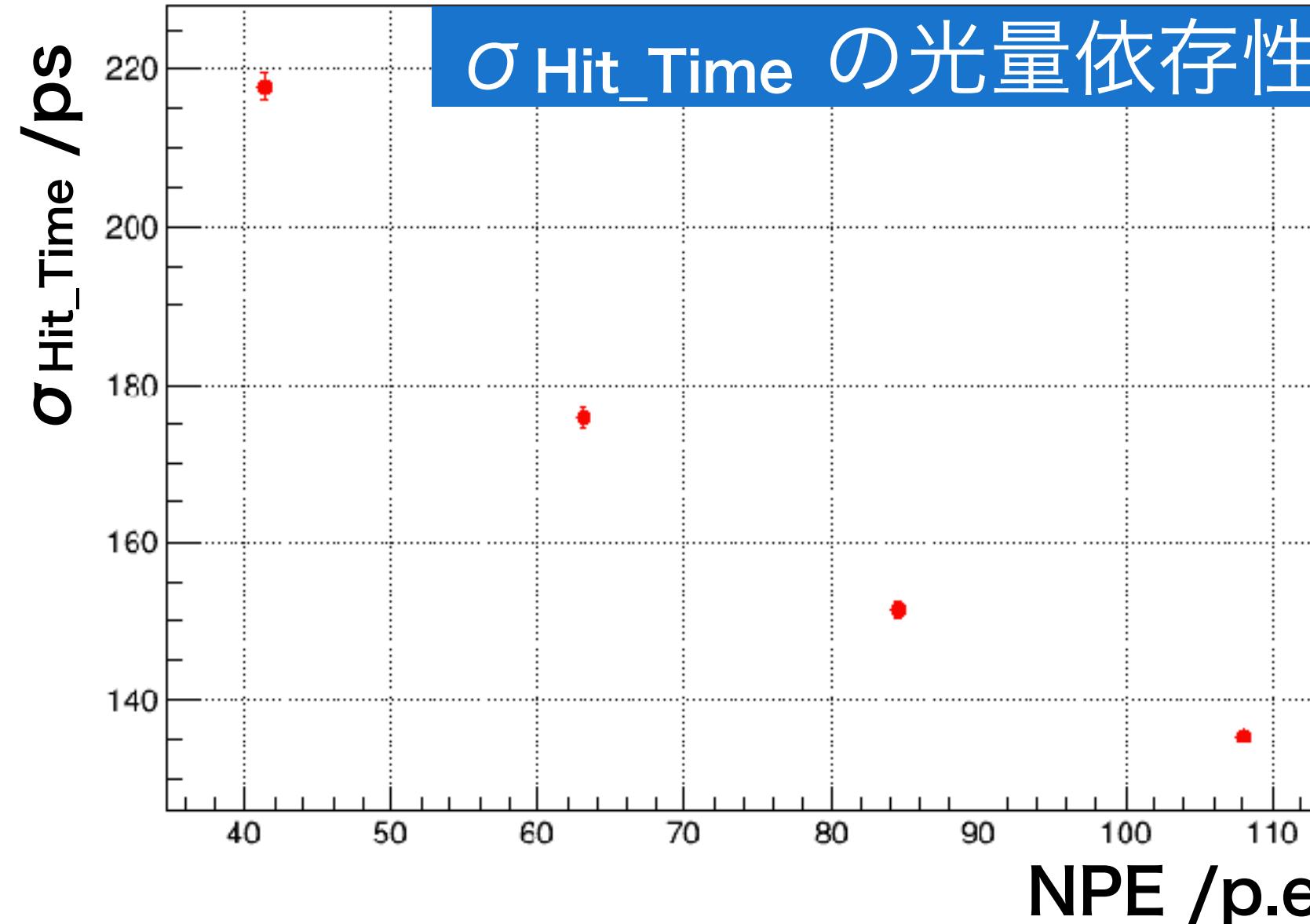
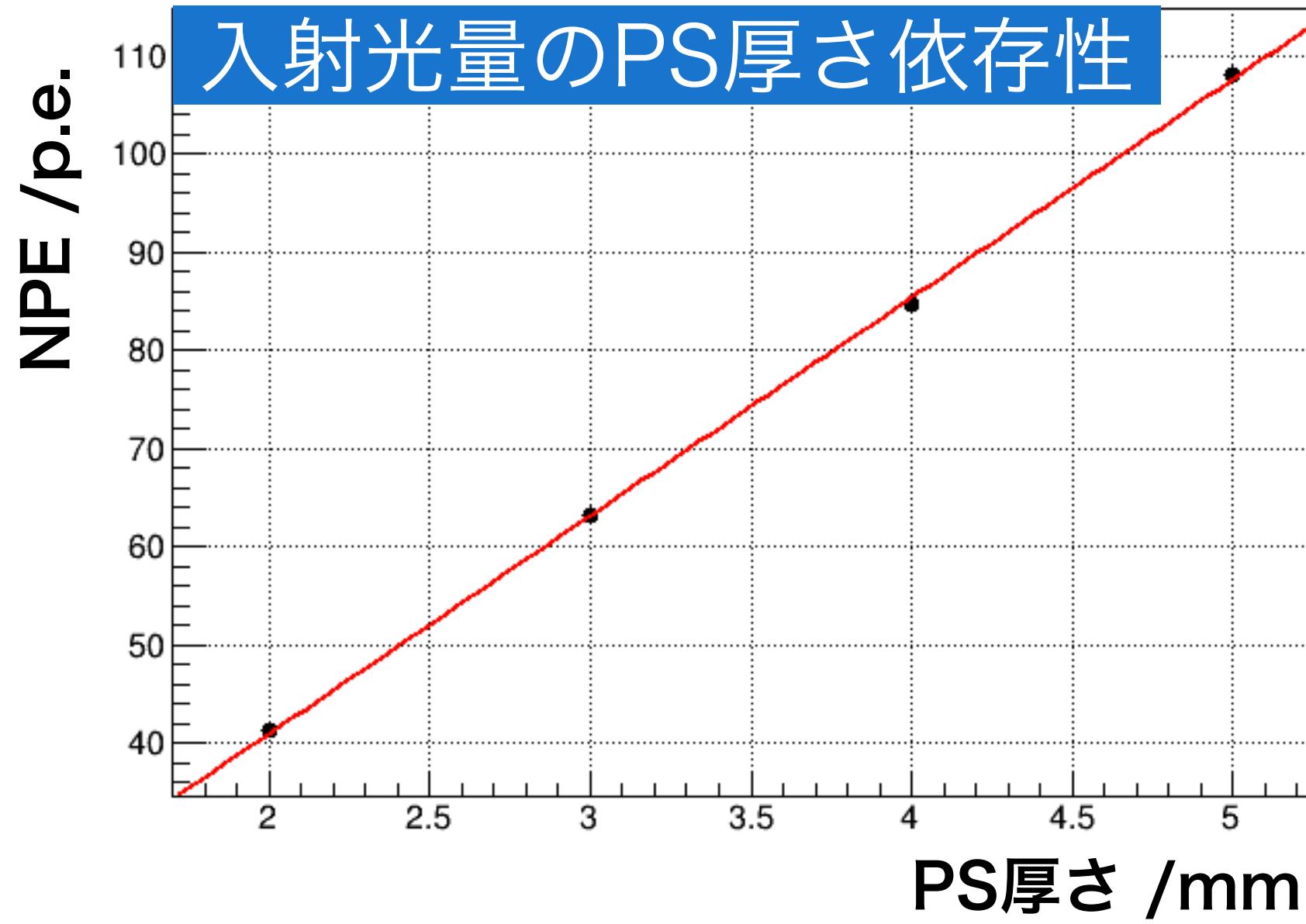
\rightarrow 反射光 (~ 1 ns程度の遅れ)は速い

発光成分に重なる

→ 反射光も立ち上がりに寄与

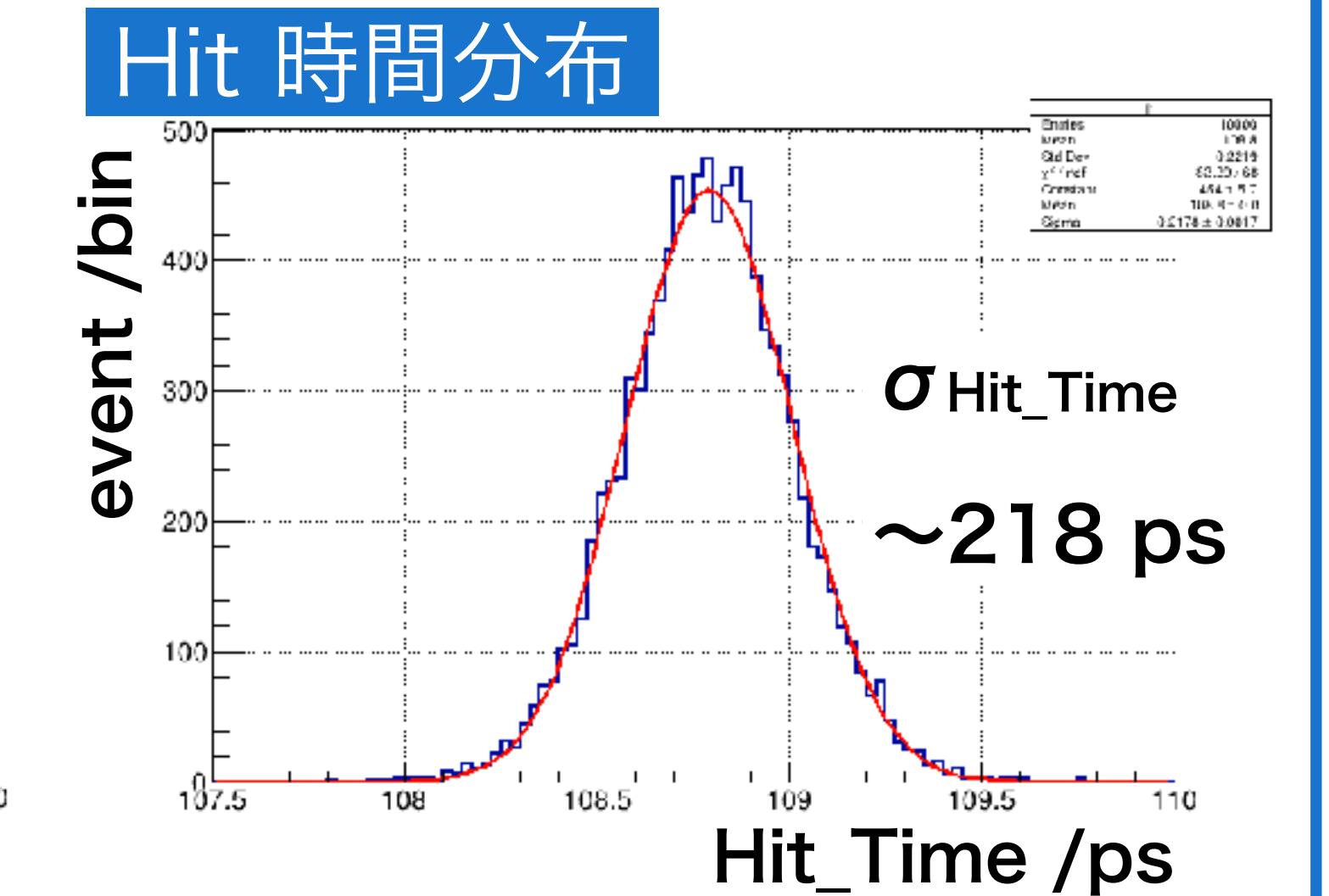
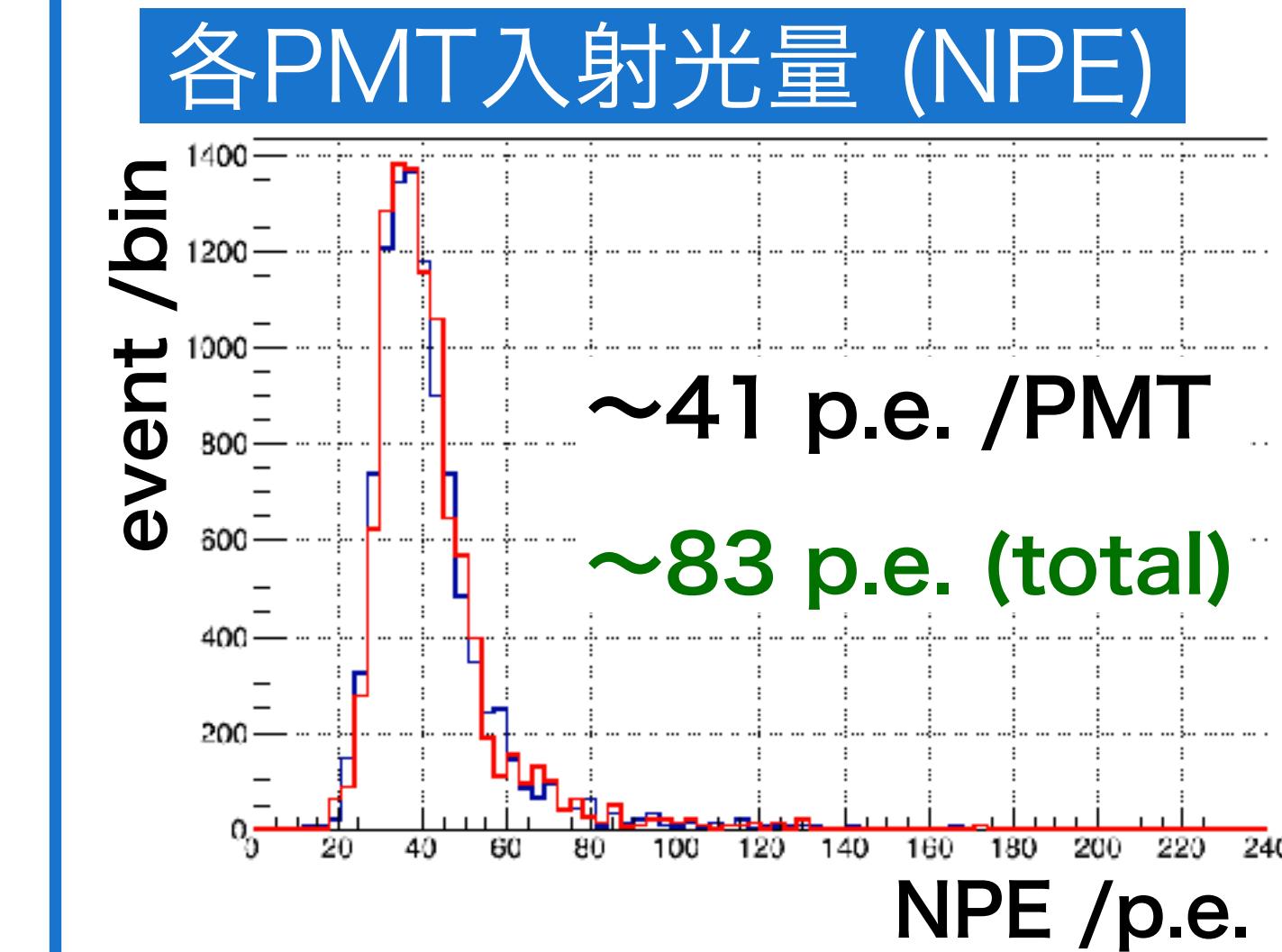
同程度

シンチレータ厚さ比較のMC結果



- 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 $\sigma_{\text{Hit_Time}} \sim 218 \text{ ps}$
- > $\sigma_{\text{TOF}} \sim 308 \text{ ps}$ (要求の $< 500 \text{ ps}$ を十分満たす)

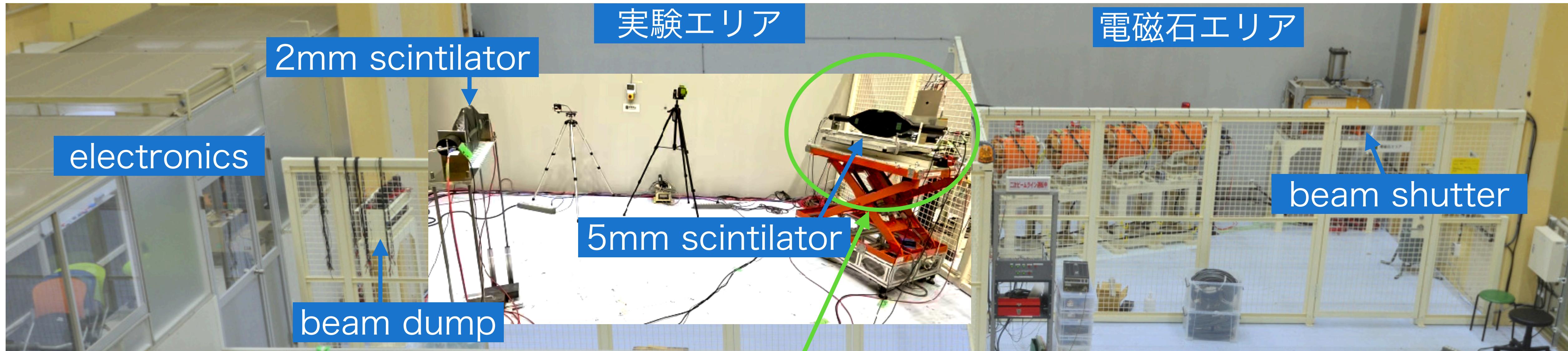
シンチレータ厚 2mm のMC結果



BeamTest

12

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



electronics

2mm scintillator

beam dump

実験エリア

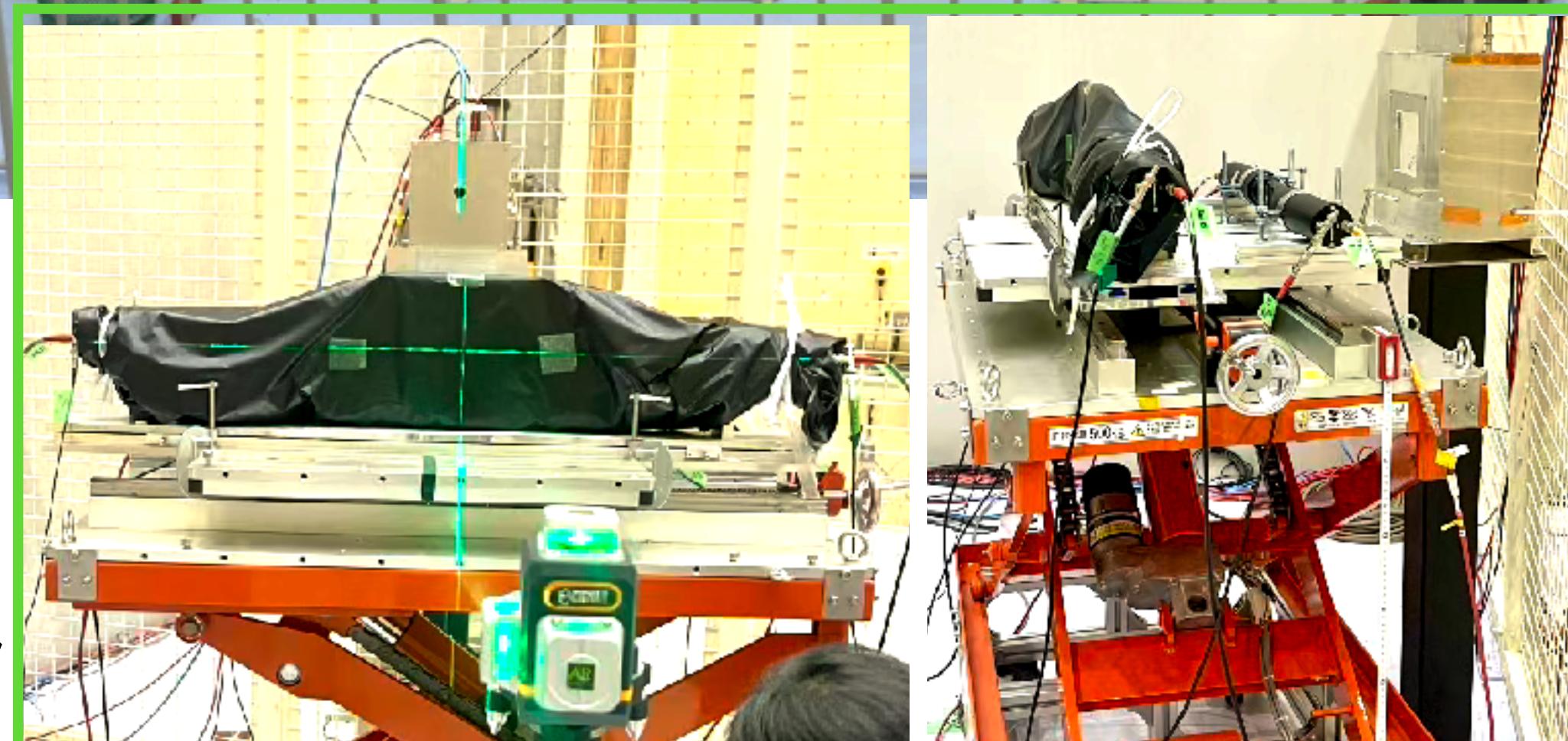
5mm scintillator

beam shutter

電磁石エリア

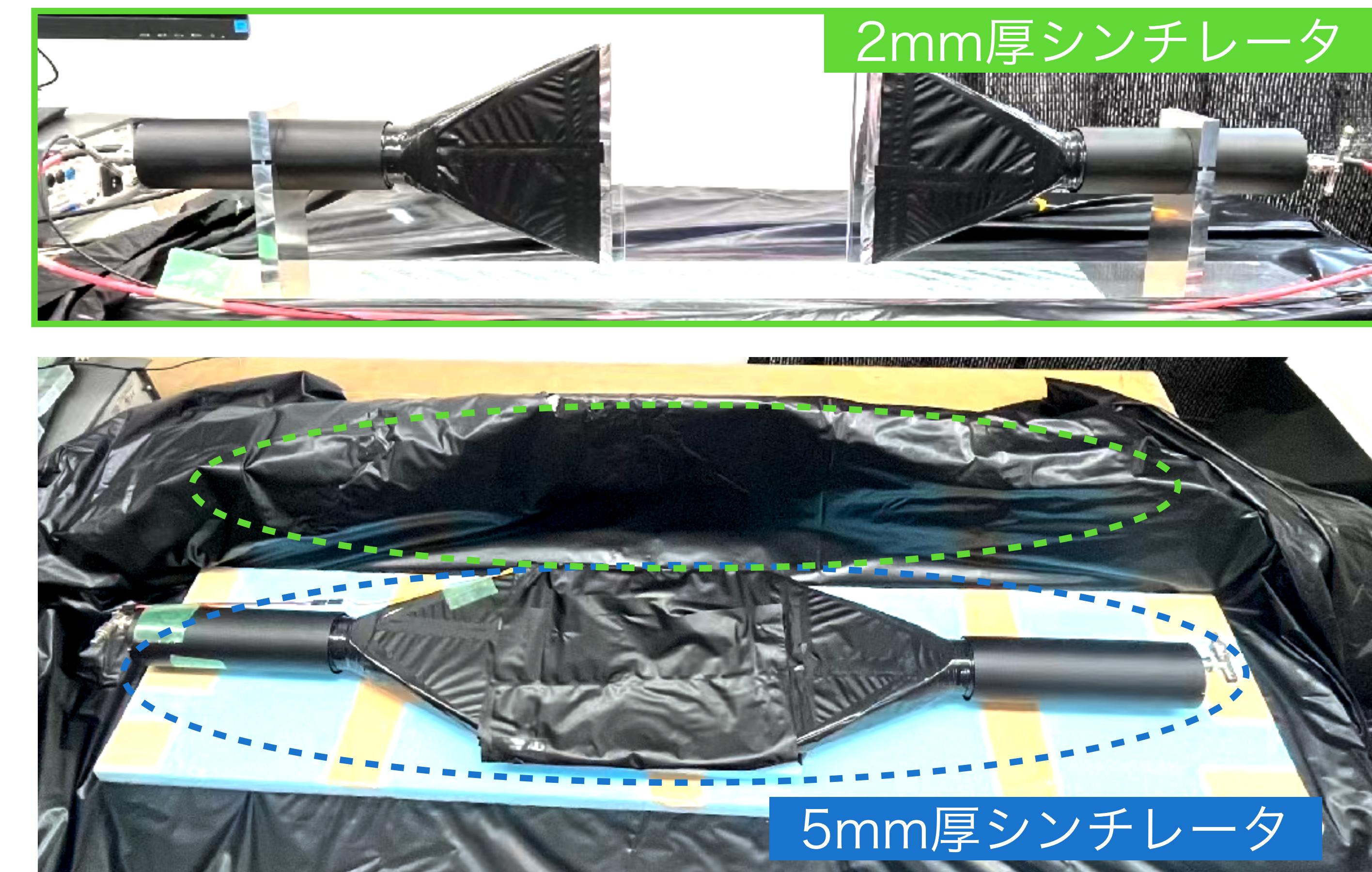
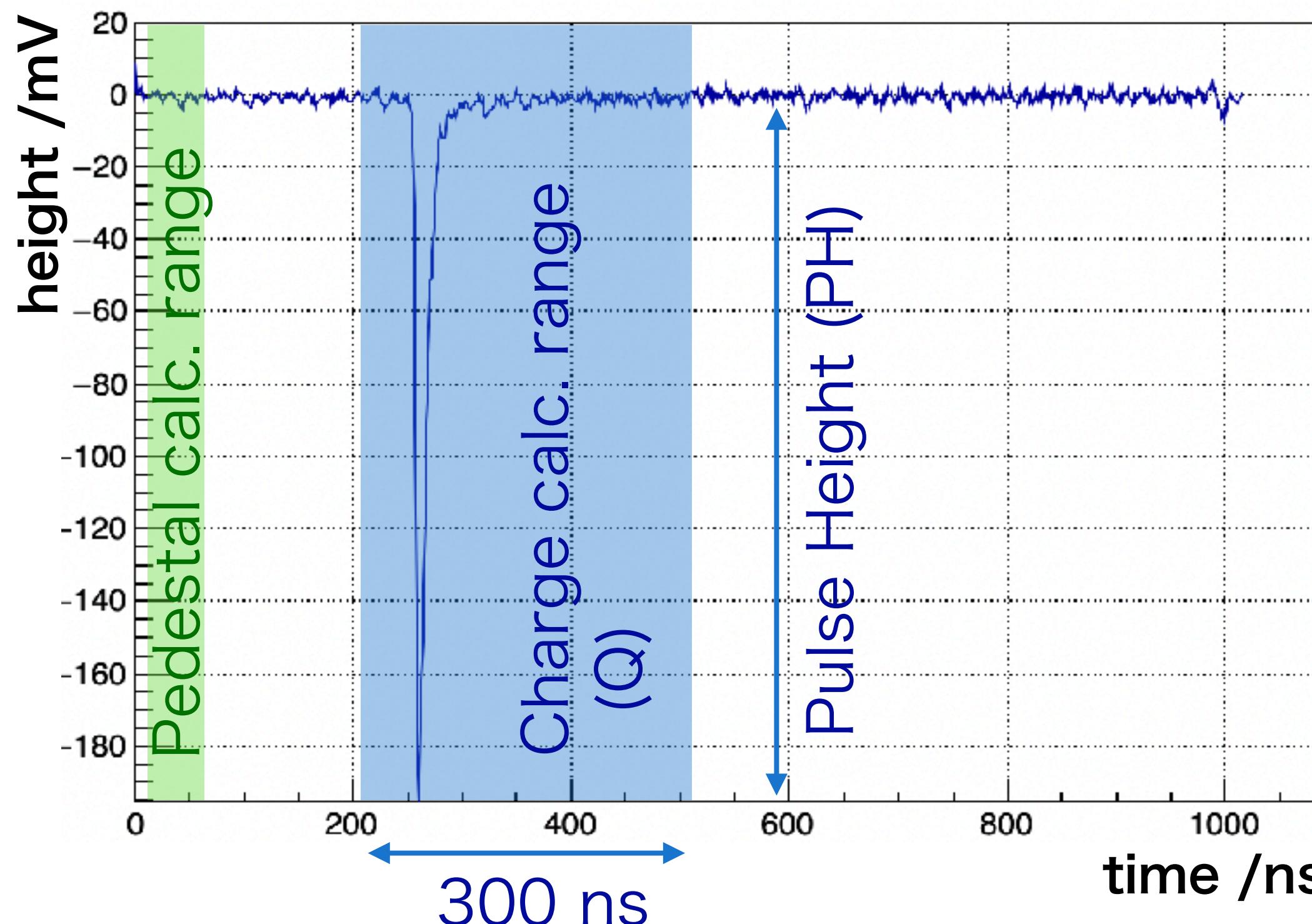
TOF検出器の評価

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

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



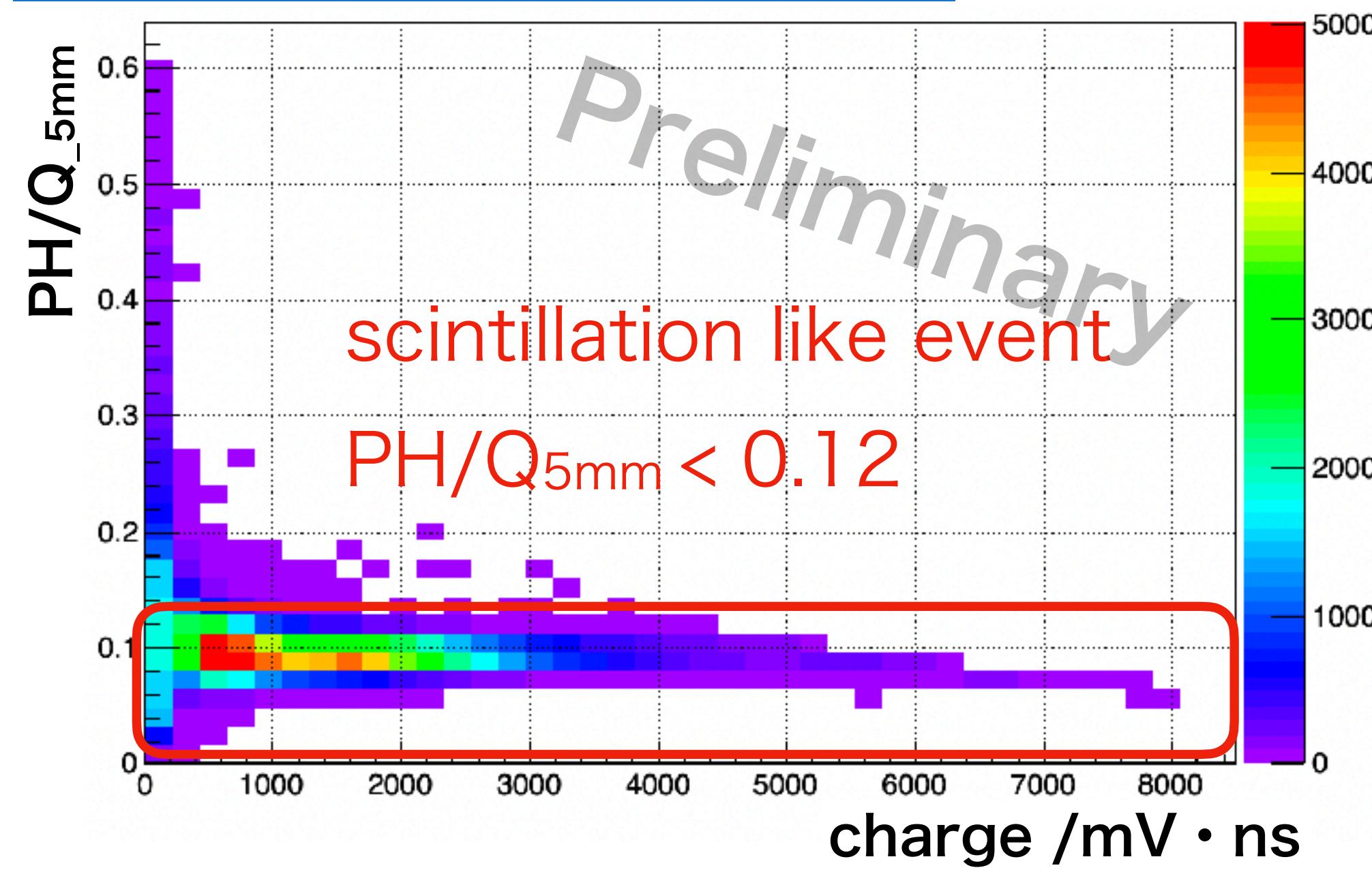
- 取得波形のサンプリングレートは1 GHz
- PH、Qの定義はMCと同様
- Pedestal (PD) は波形の10 - 60 nsの平均値として定義

宇宙線の測定

14

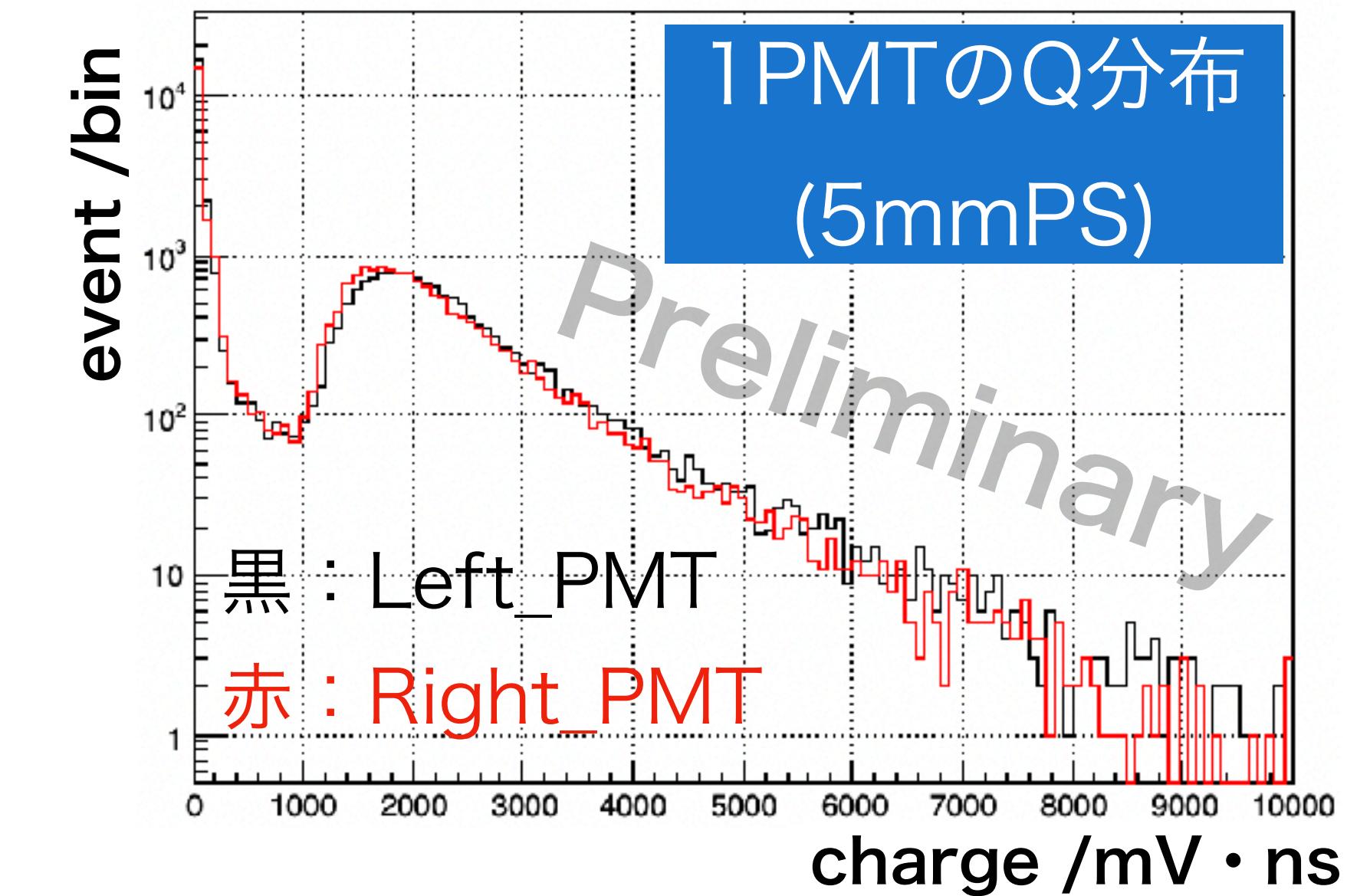
- ・イベントの選択
 - ・波高・電荷比 $\text{PH}/\text{Q} < 0.12$ を要求し、シンチレーションらしいイベントを選択

PH/Q分布 (5mm厚検出器)

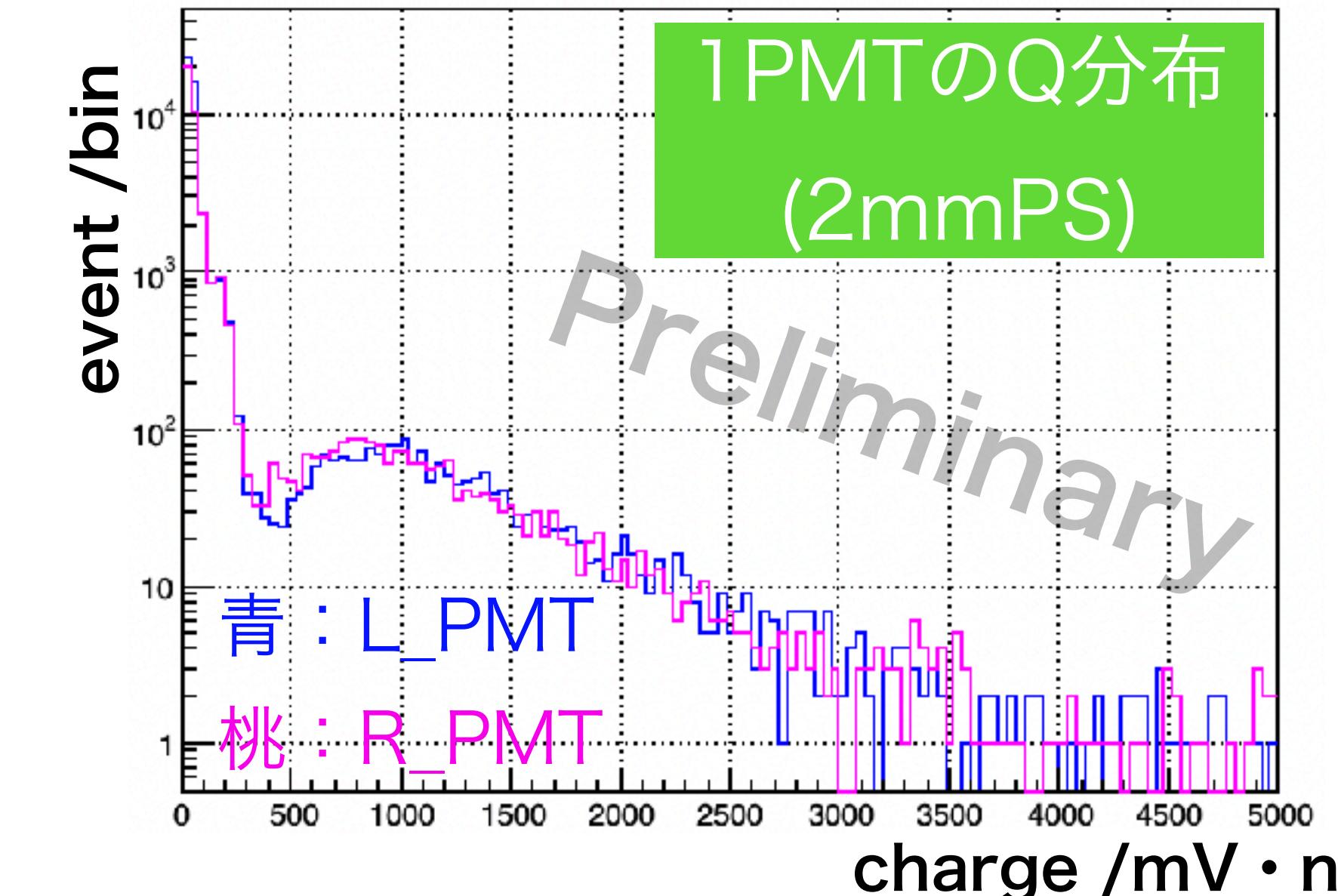


イベント選択後の
Charge(Q)分布

※ 1 PMTあたり



1PMTのQ分布
(5mmPS)

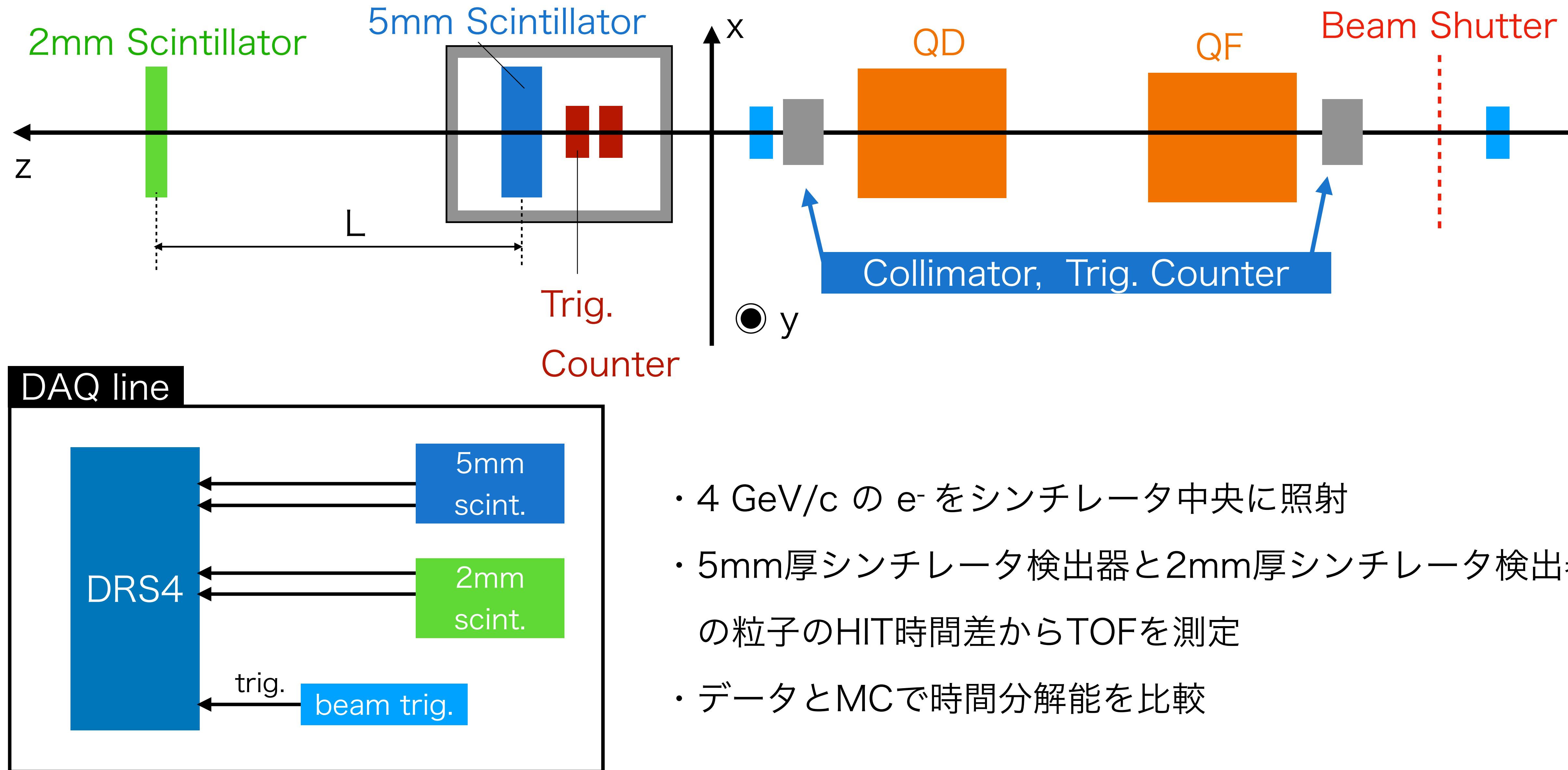


1PMTのQ分布
(2mmPS)

- ・MIP事象を確認
- ・PMTのgainがそれぞれ大体揃った

実験セットアップ

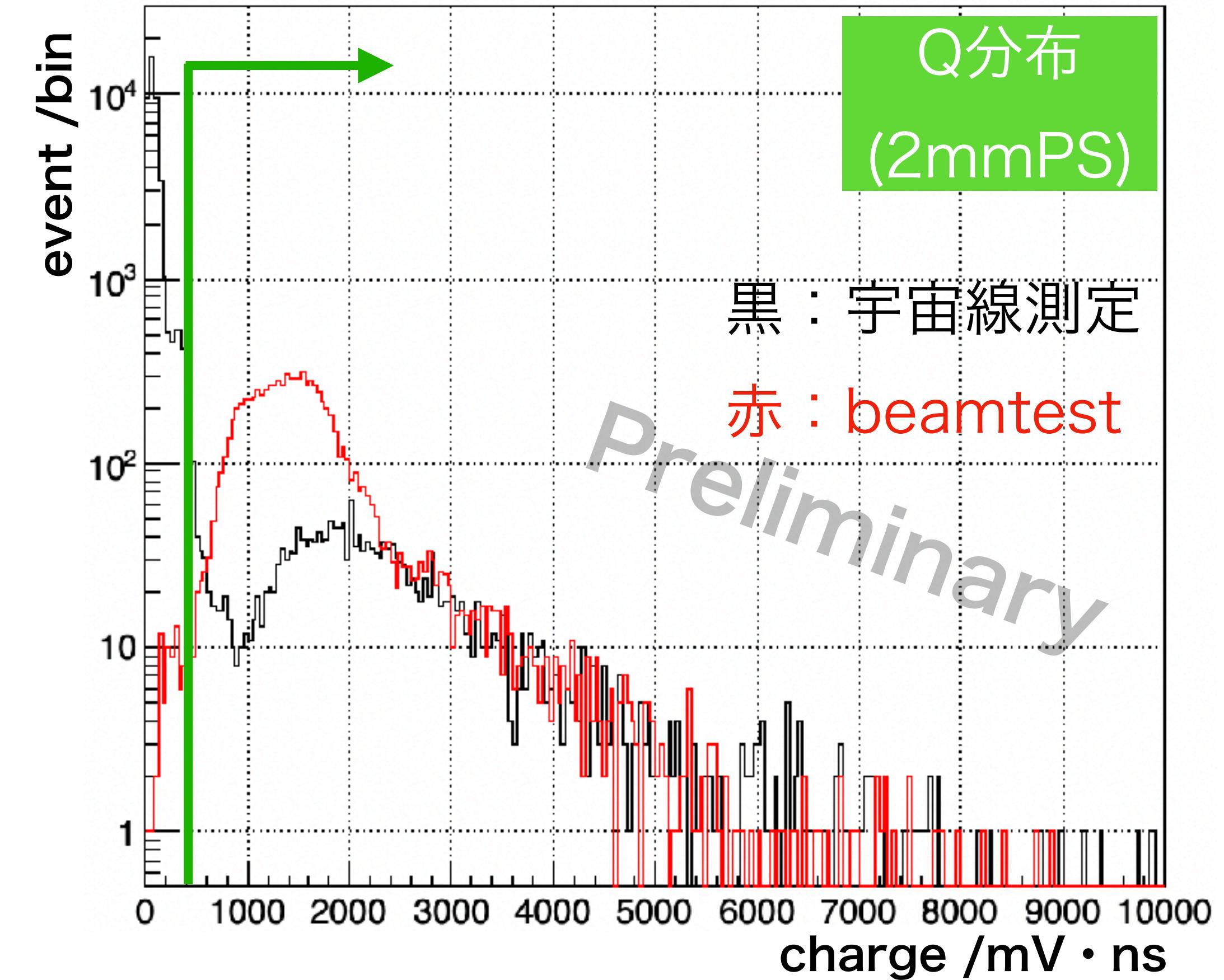
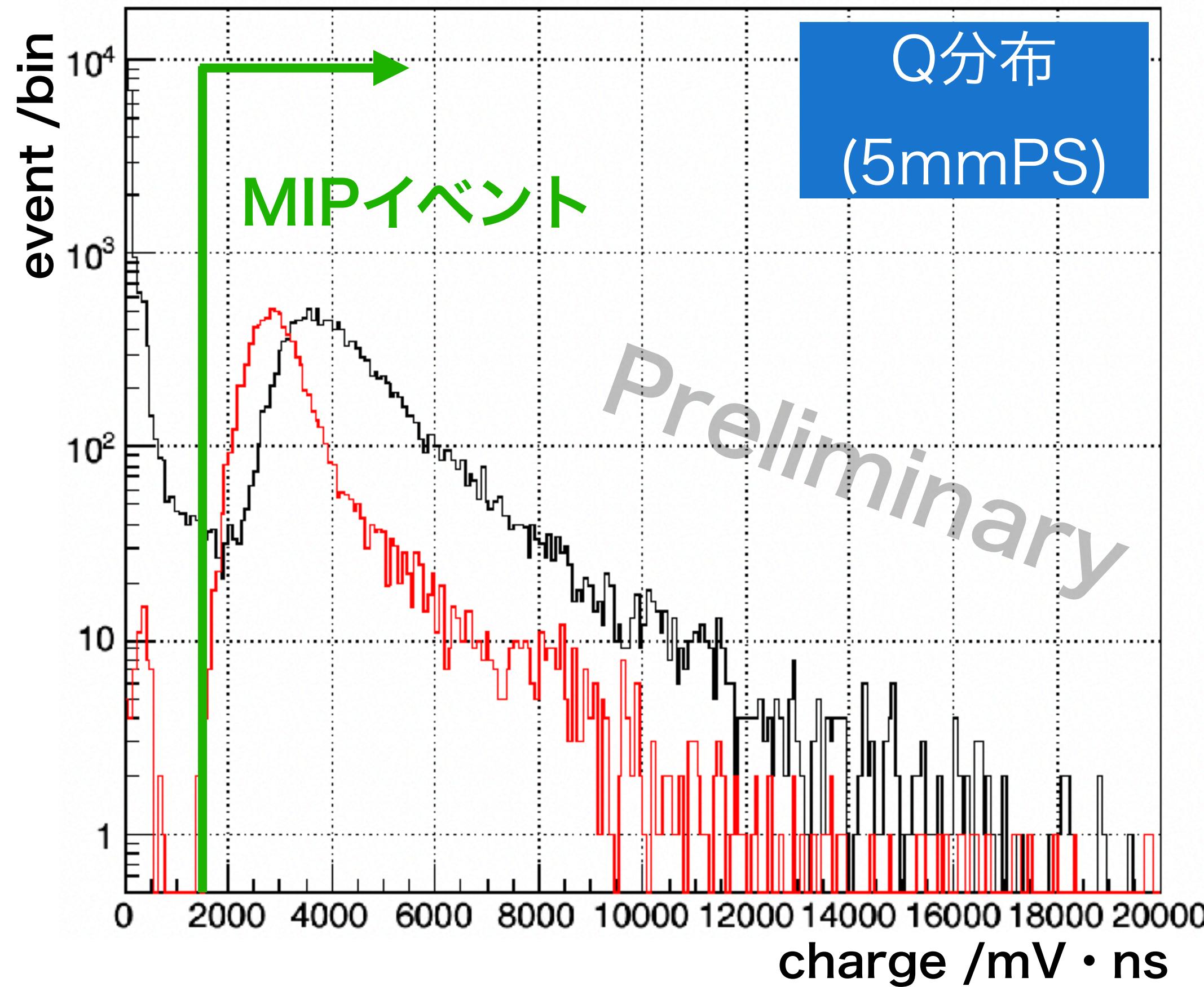
15



BeamTest結果：Q分布

16

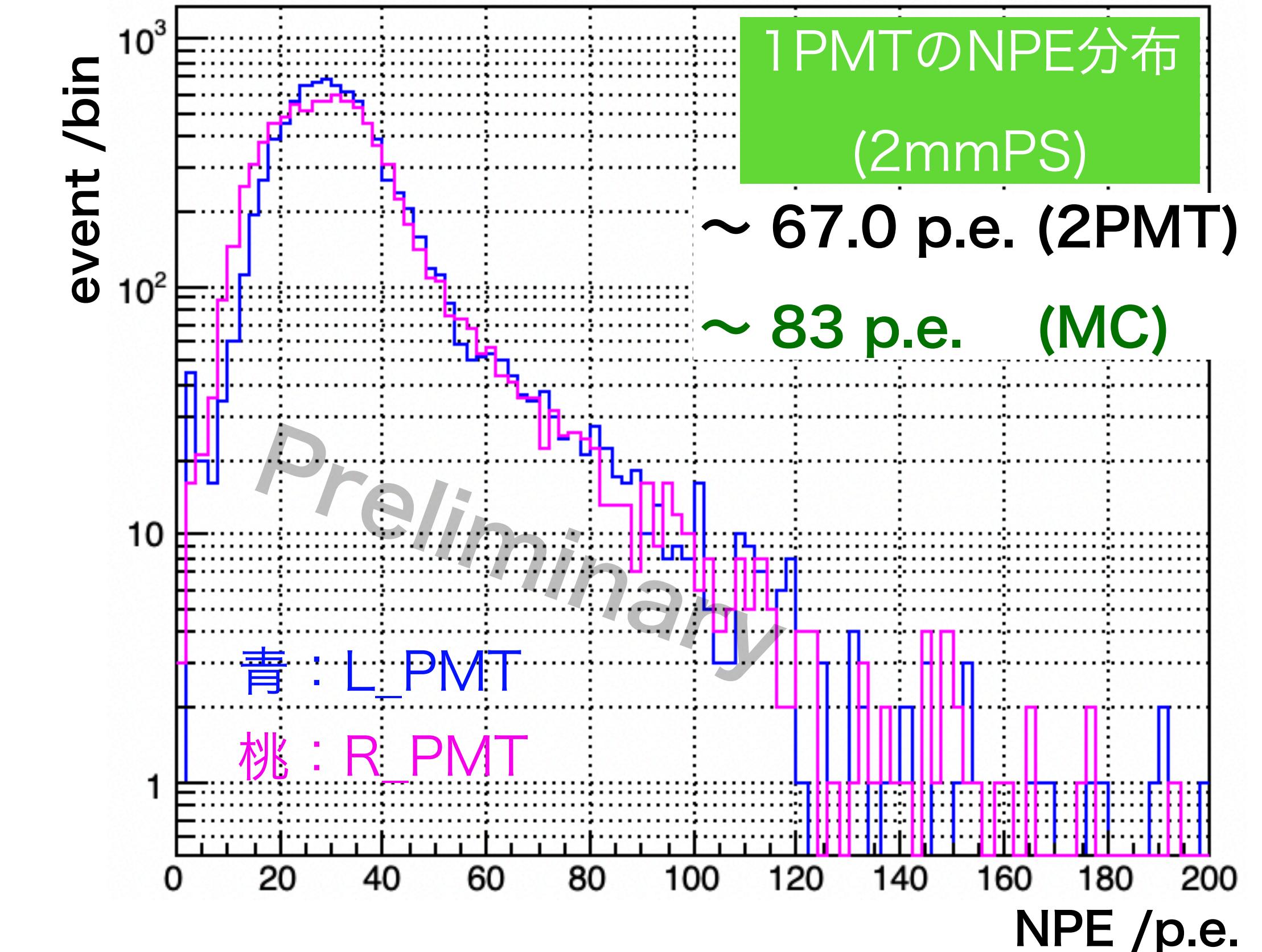
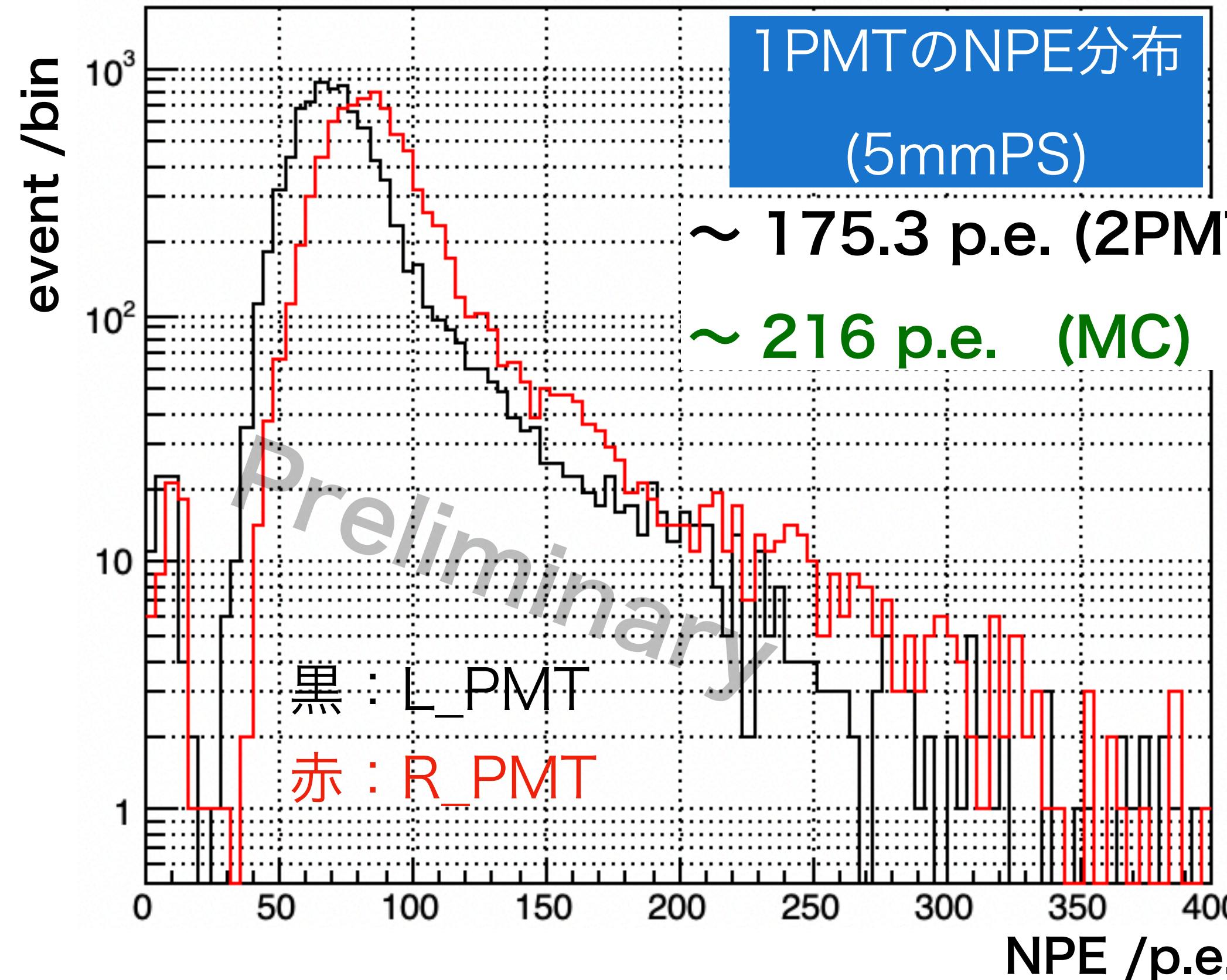
各検出器 (2PMT) の Charge(Q) :



- ・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

1PMTあたりの観測光量NPE：



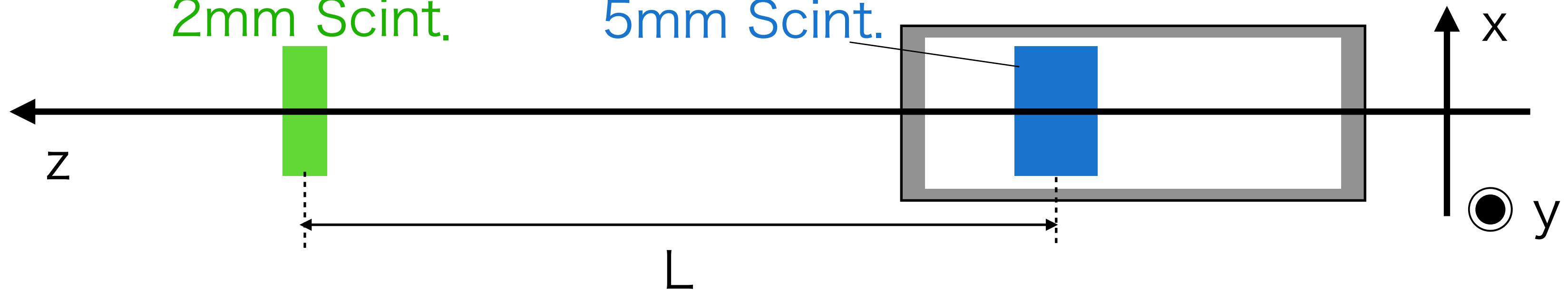
- 1 photonのChargeデータ（微弱LEDパルスで測定）より、Q分布から観測光量（NPE）に書き換え
- 観測光量は、MCの 約81.2% (5mm検出器) 、約80.7% (2mm検出器)

BeamTest結果：TOF

18

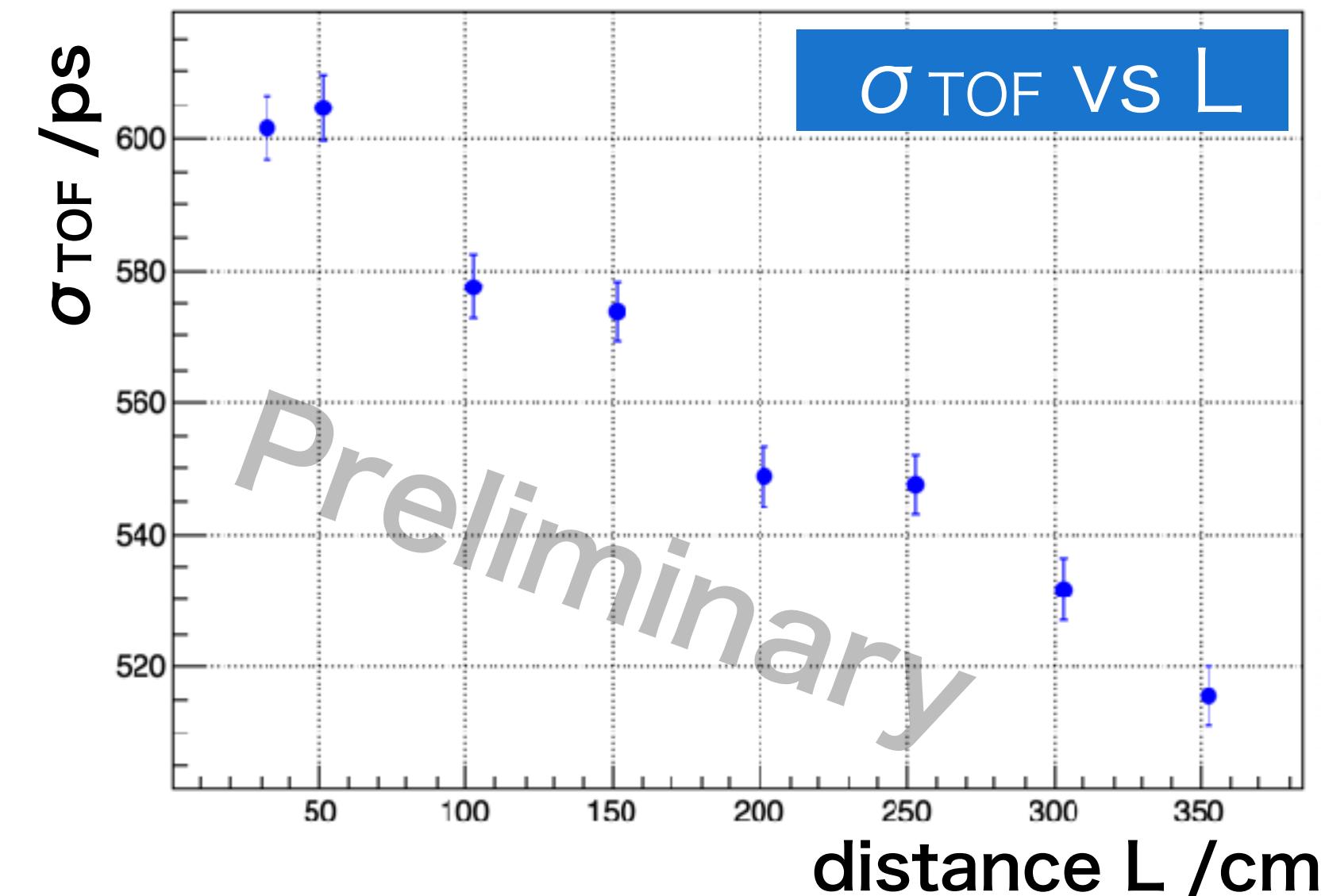
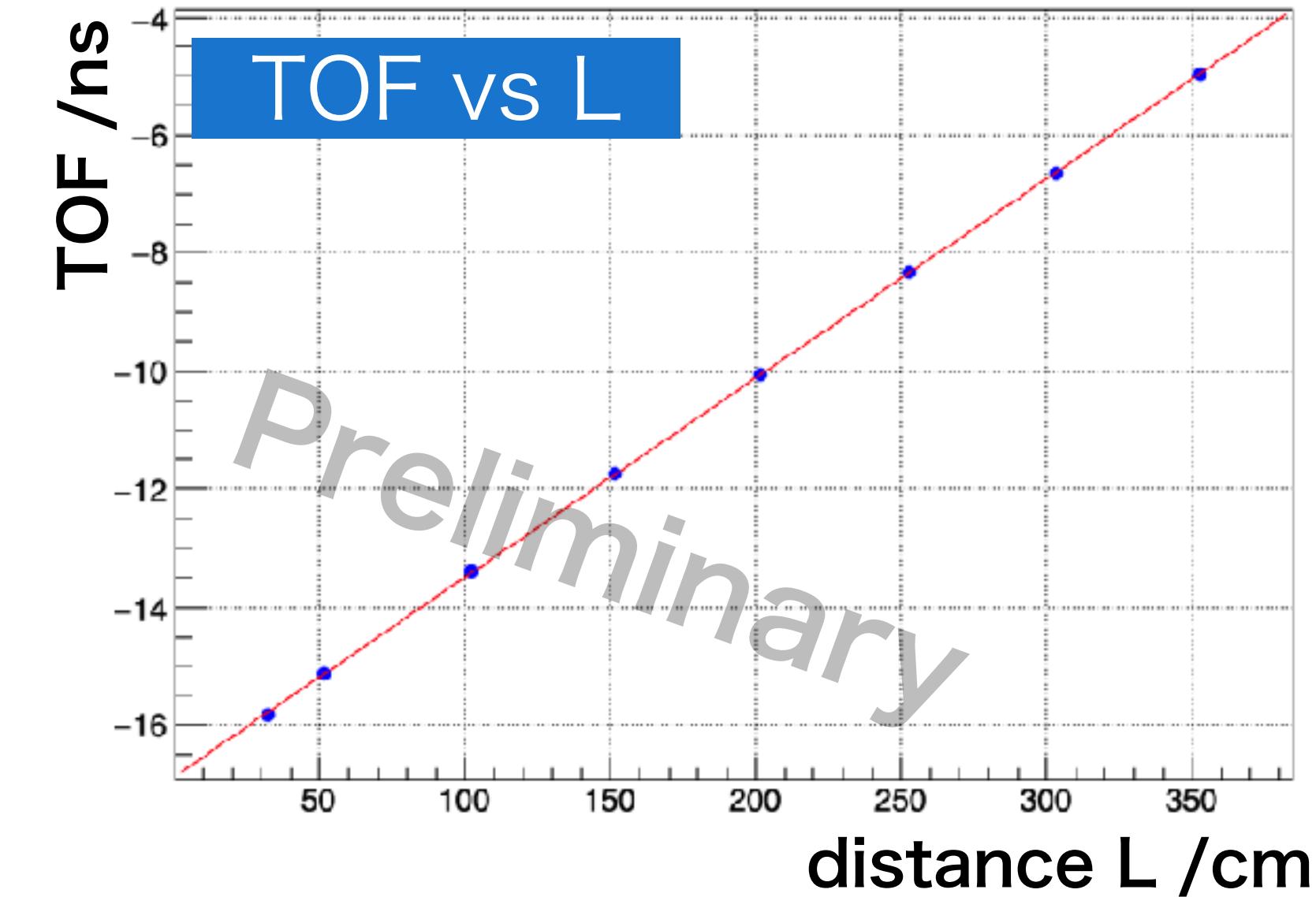
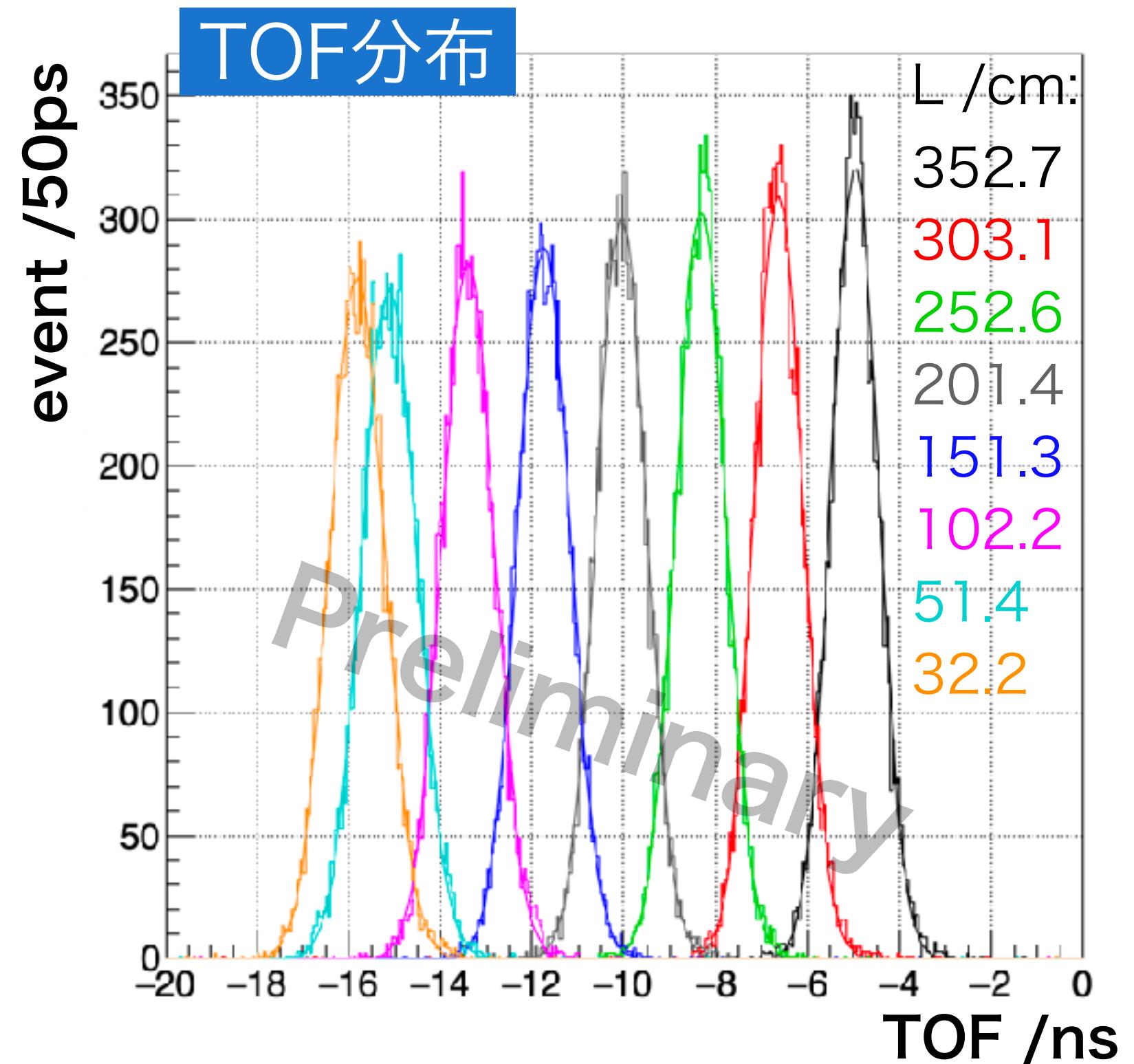
2mm Scint.

5mm Scint.

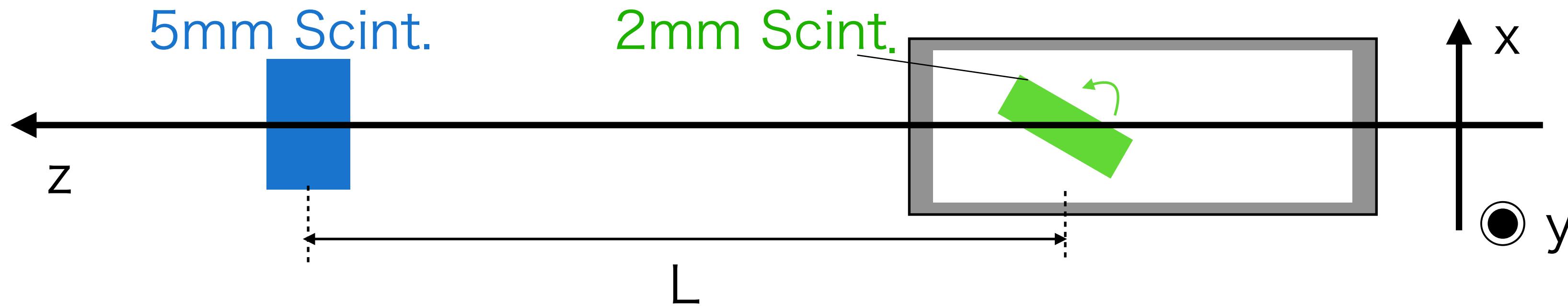


- ・検出期間距離を変えてTOFを測定
 $L = 32.2 \text{ cm} \sim 352.7 \text{ cm}$ の8点
- ・CFD法によりHit時間 (T) を定義
 $\text{TOF} = T_{2\text{mmPS}} - T_{5\text{mmPS}}$ と定義
- ・TOF分布をGaussianでfit
 \rightarrow average $\sigma_{\text{TOF}} = 562.6 \text{ ps}$

要求値 500 ps



入射角による光量とTOF分解能の向上



- 2mmシンチレータを回転させ、ビーム入射角を 0° (面とビームが垂直)、 45° 、 60° 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 、 $2\sqrt{2}\text{mm}$ 、 4mm

2mm検出器の観測光量NPE

0° : 63.7 p.e. (基準)

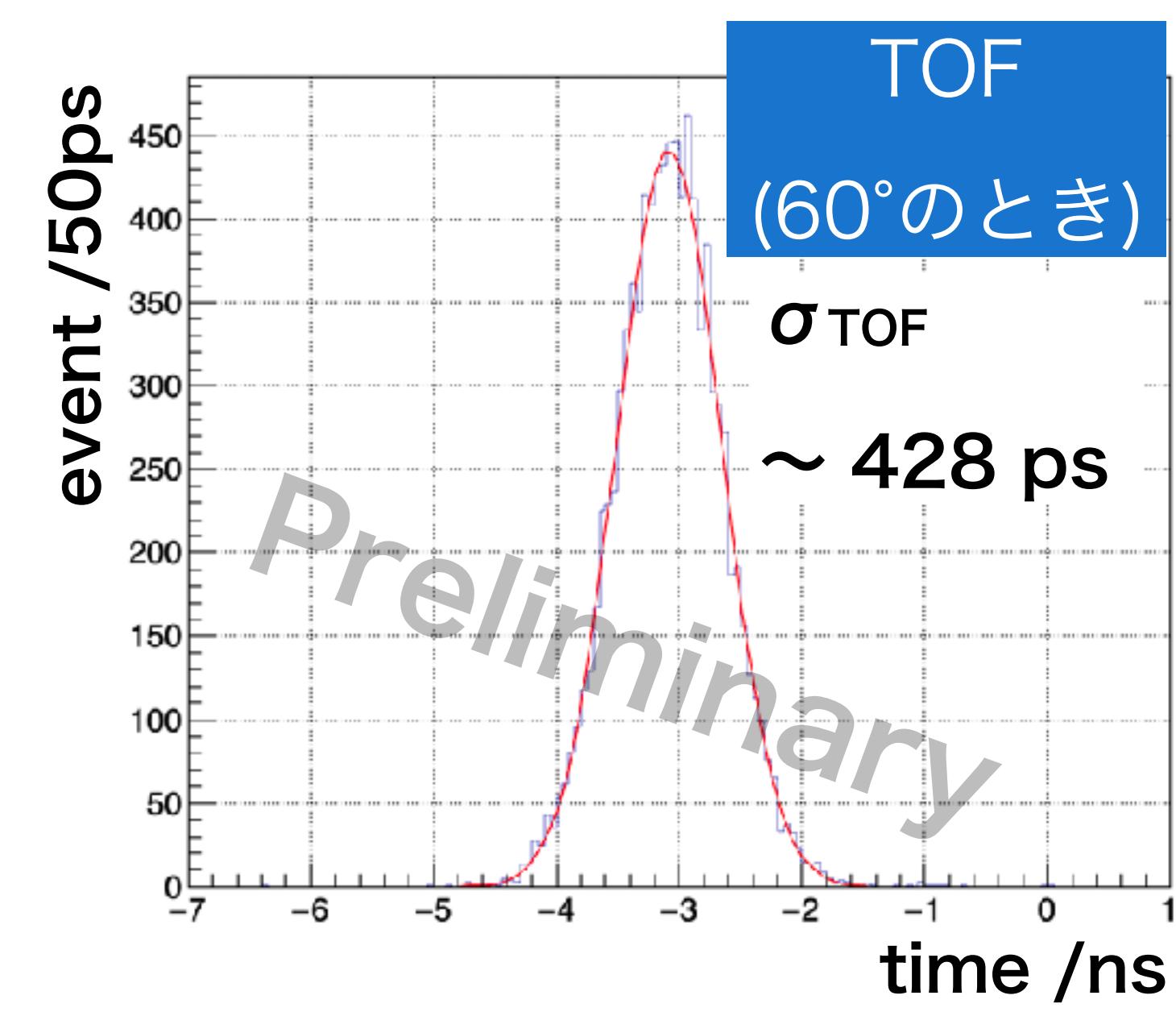
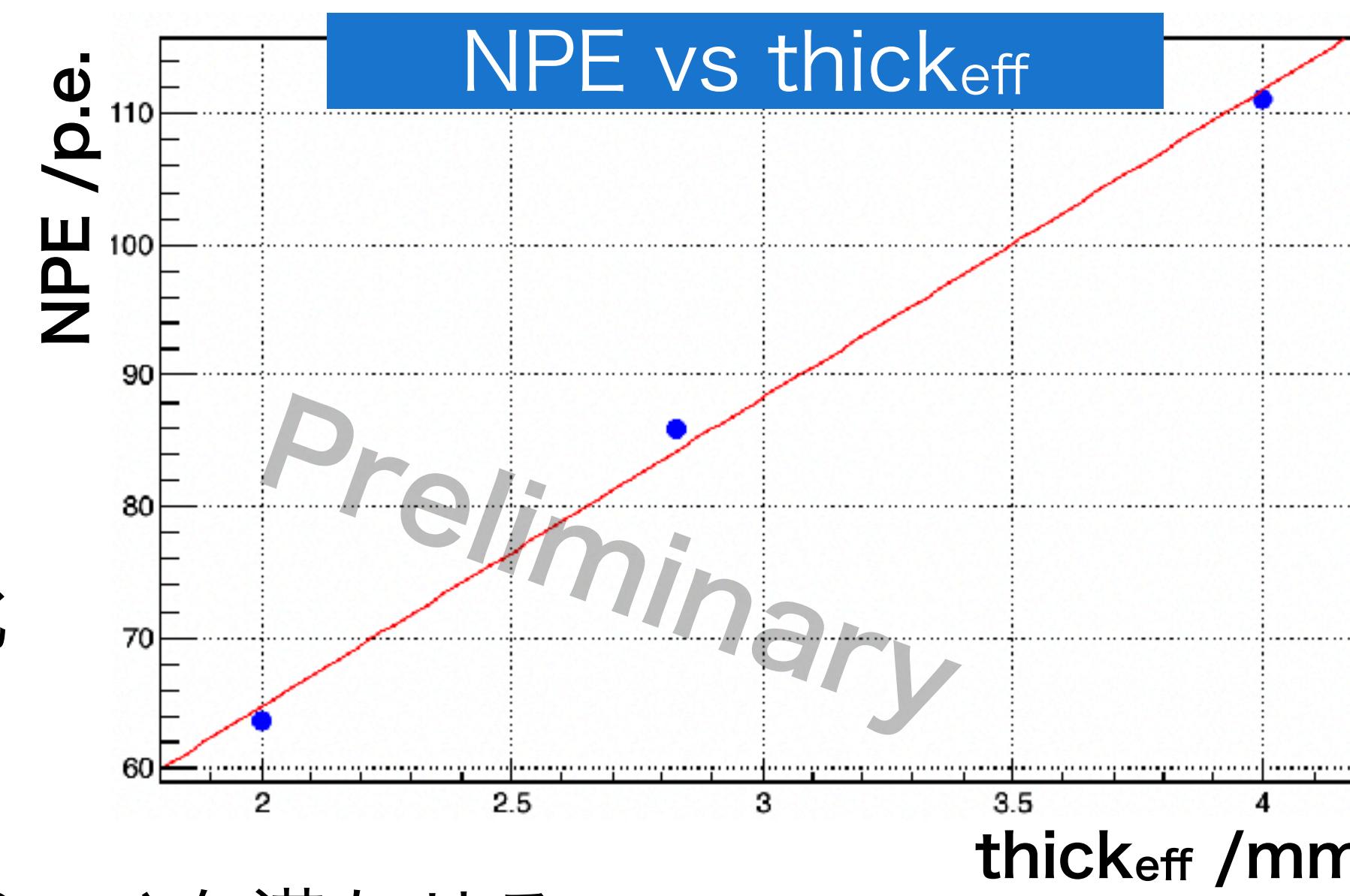
45° : 86.0 p.e. (1.35 倍)

60° : 111.1 p.e. (1.74 倍)

※ () 内は 0° に対する相対比

• 60° 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 ($< 500 \text{ ps}$) 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

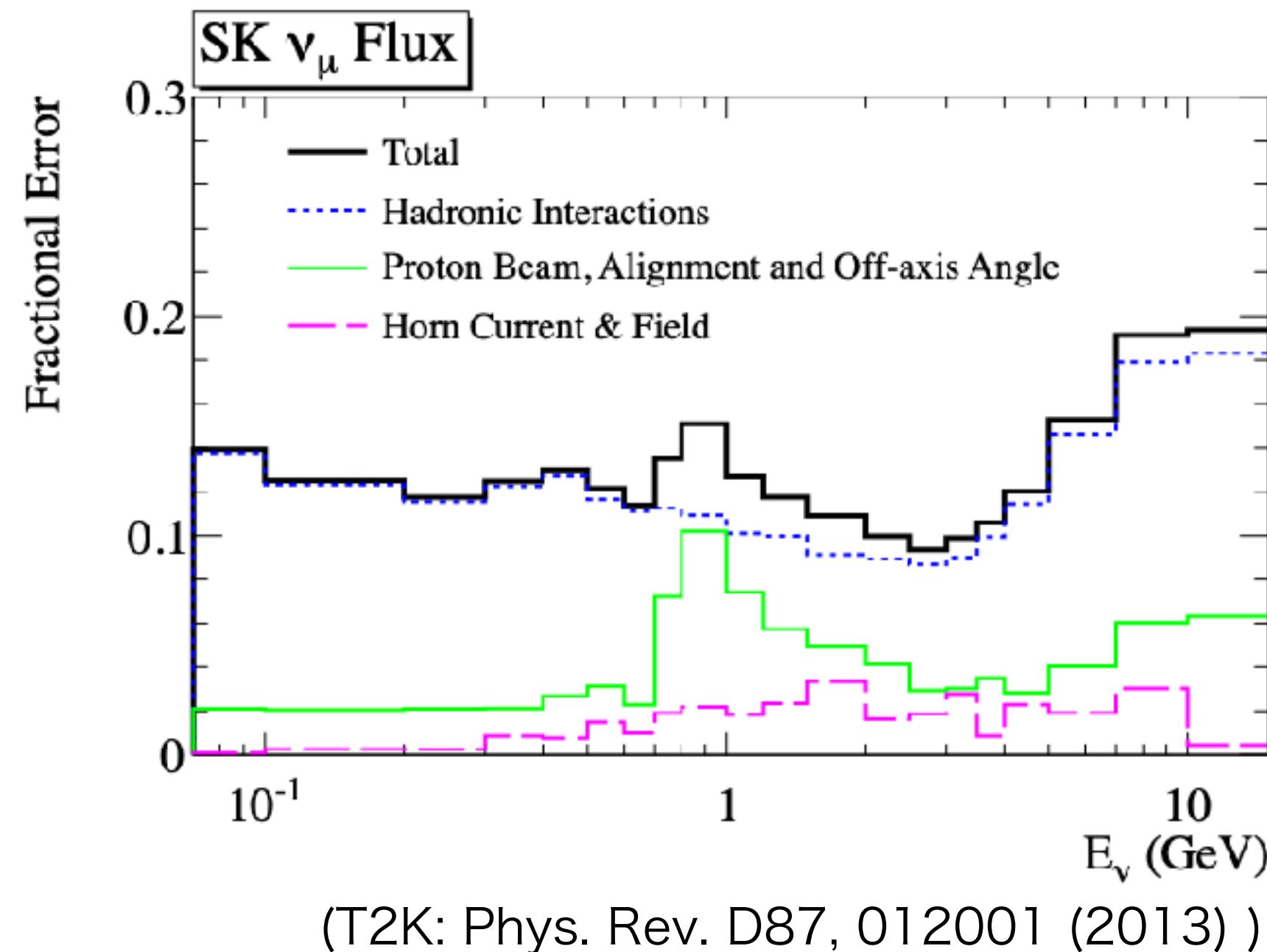
Physics Motivation



backup

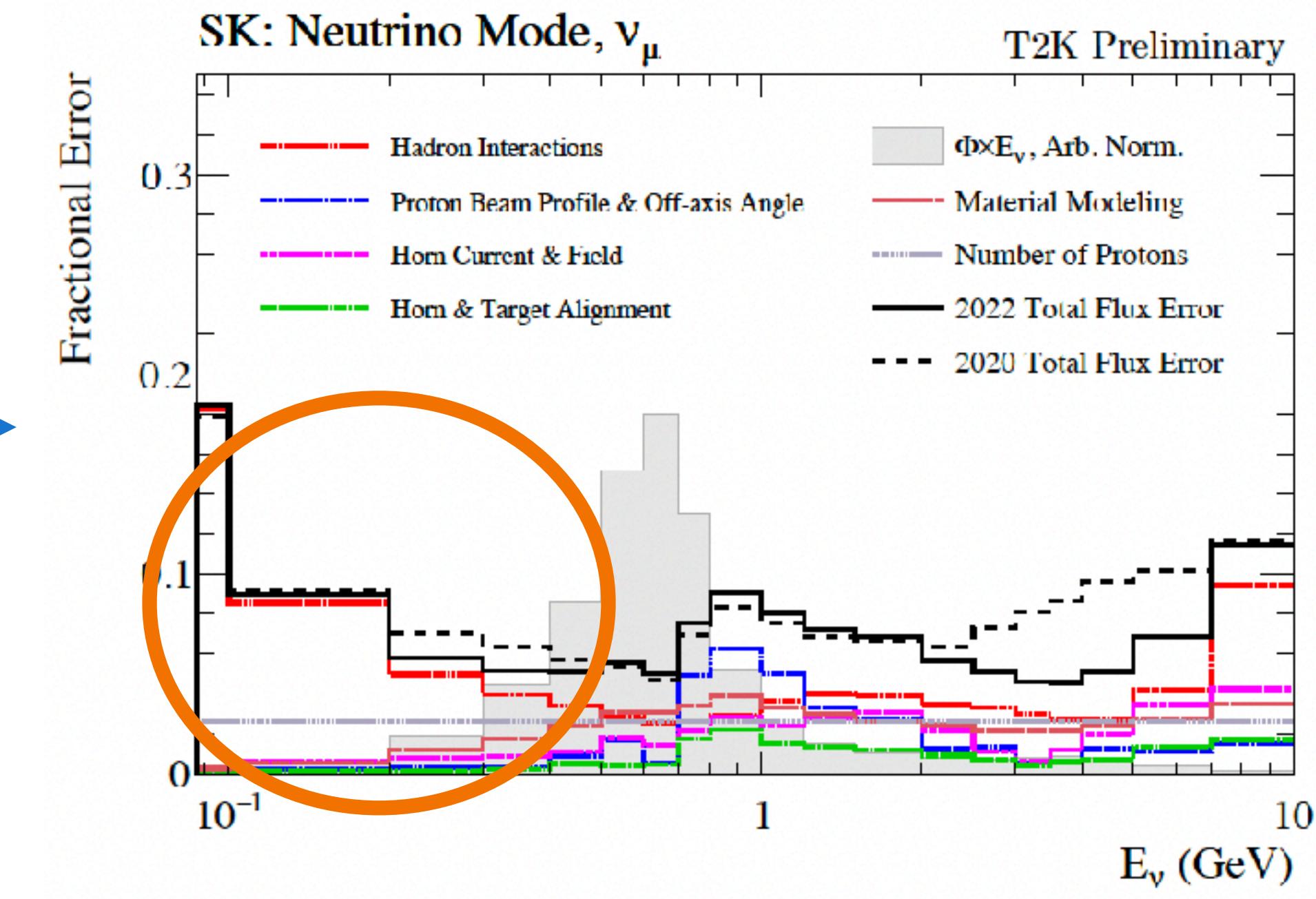
ex.) T2K実験におけるニュートリノフラックスの不定性

NA61/SHINE thin target data only



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

NA61/SHINE thin + replica target data



(T2K collaboration. T2K internal document.)



thin target

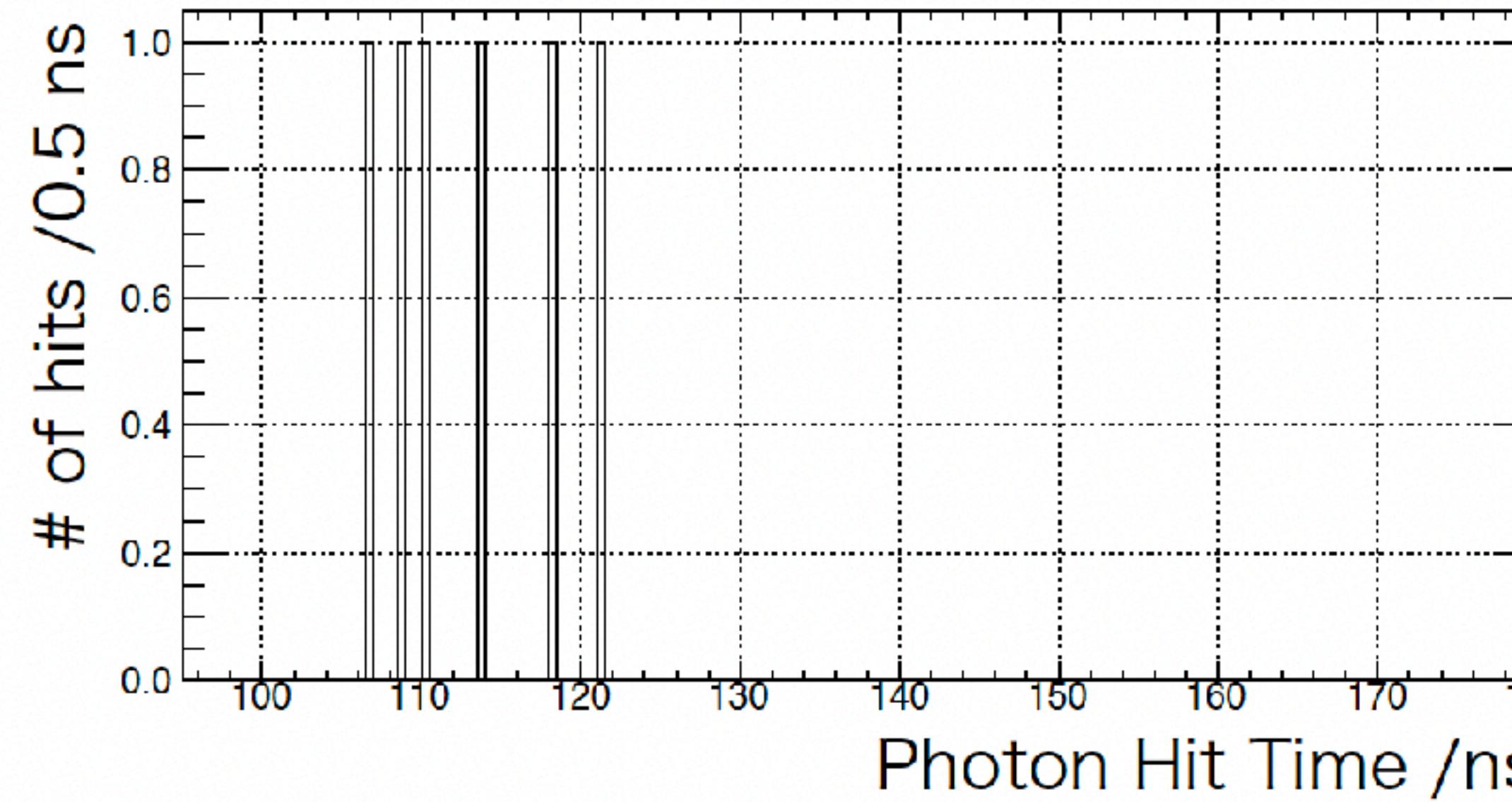
- ・ 不定性は、フラックスピークにおいては 5% 程度まで削減されている
- ・ ピークより低いエネルギー領域では、実測値が不足しているため、未だにフラックス不定性が大きい



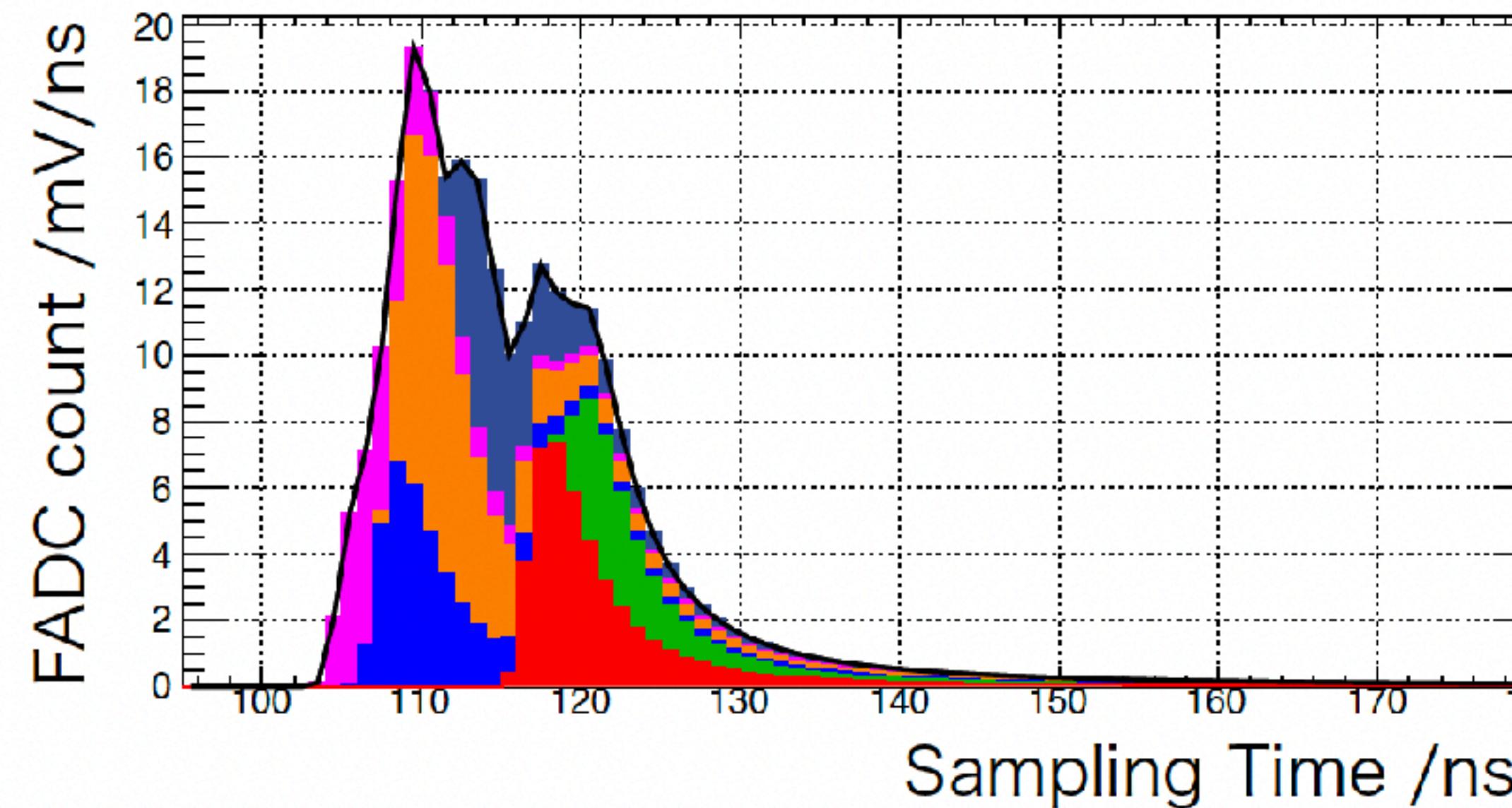
T2K replica target

波形生成

backup



<- Photon Hit Time (MC結果)



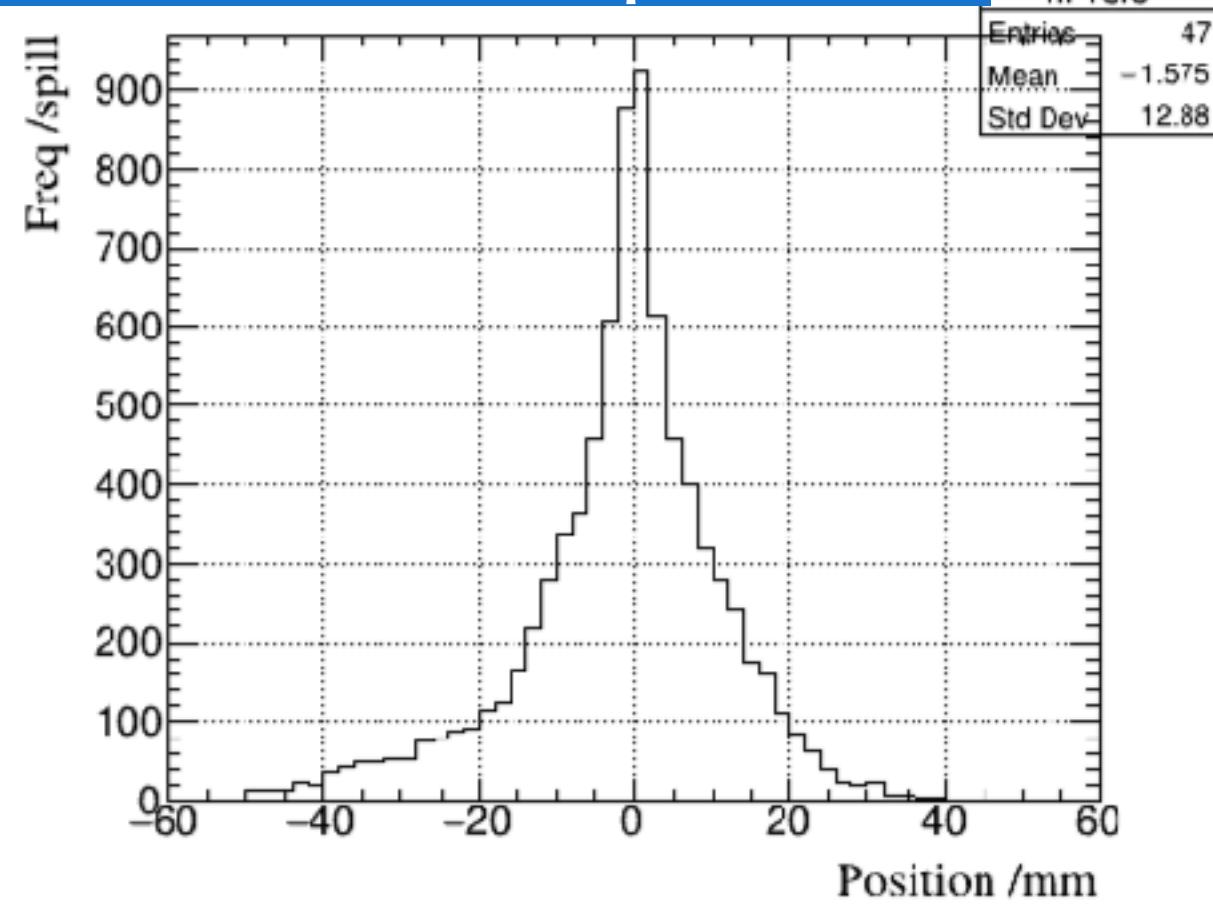
<- TTSによるふらつきを考慮し、
1 p.e. 波形を重ね合わせる

ビーム拡がりの評価

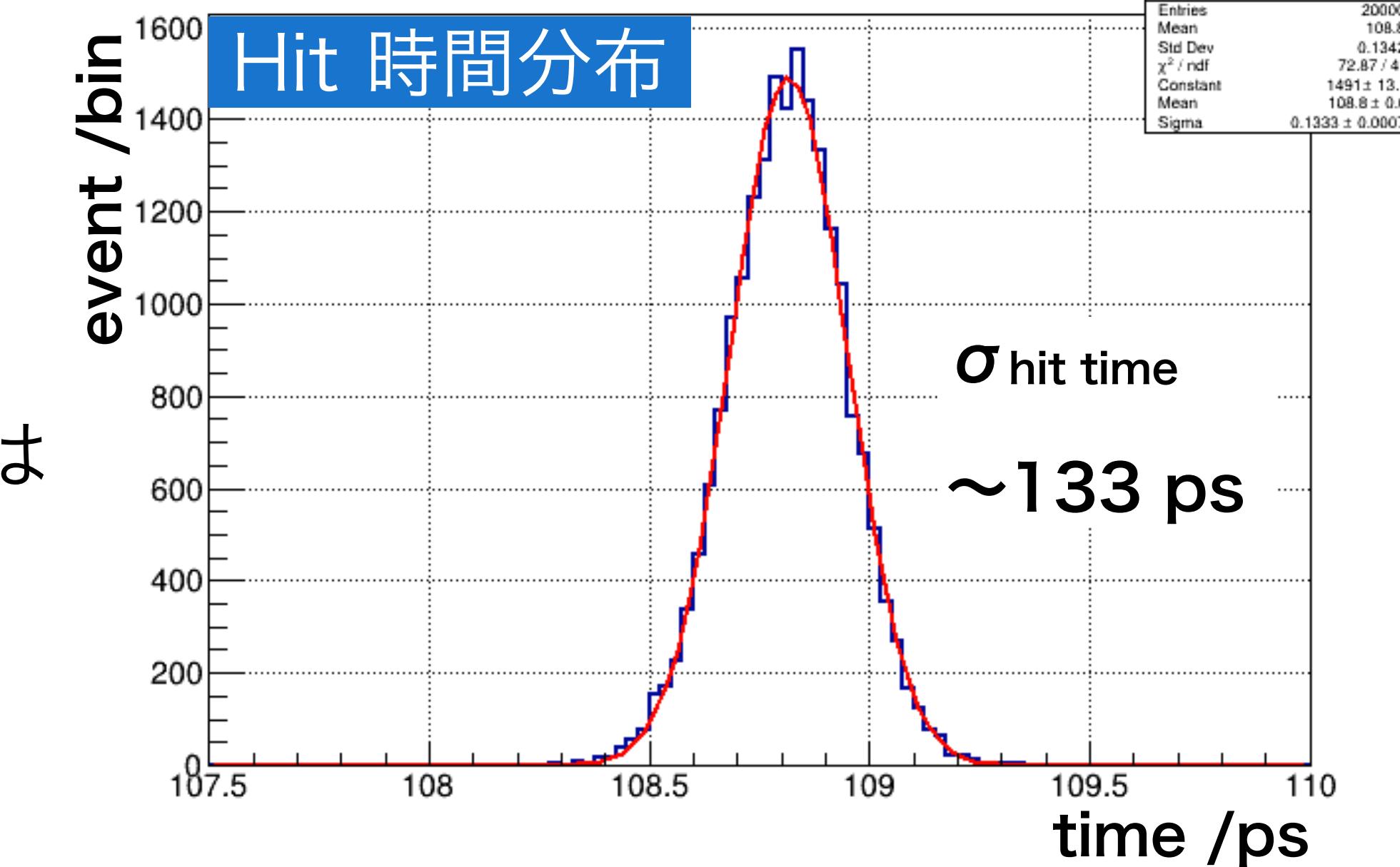
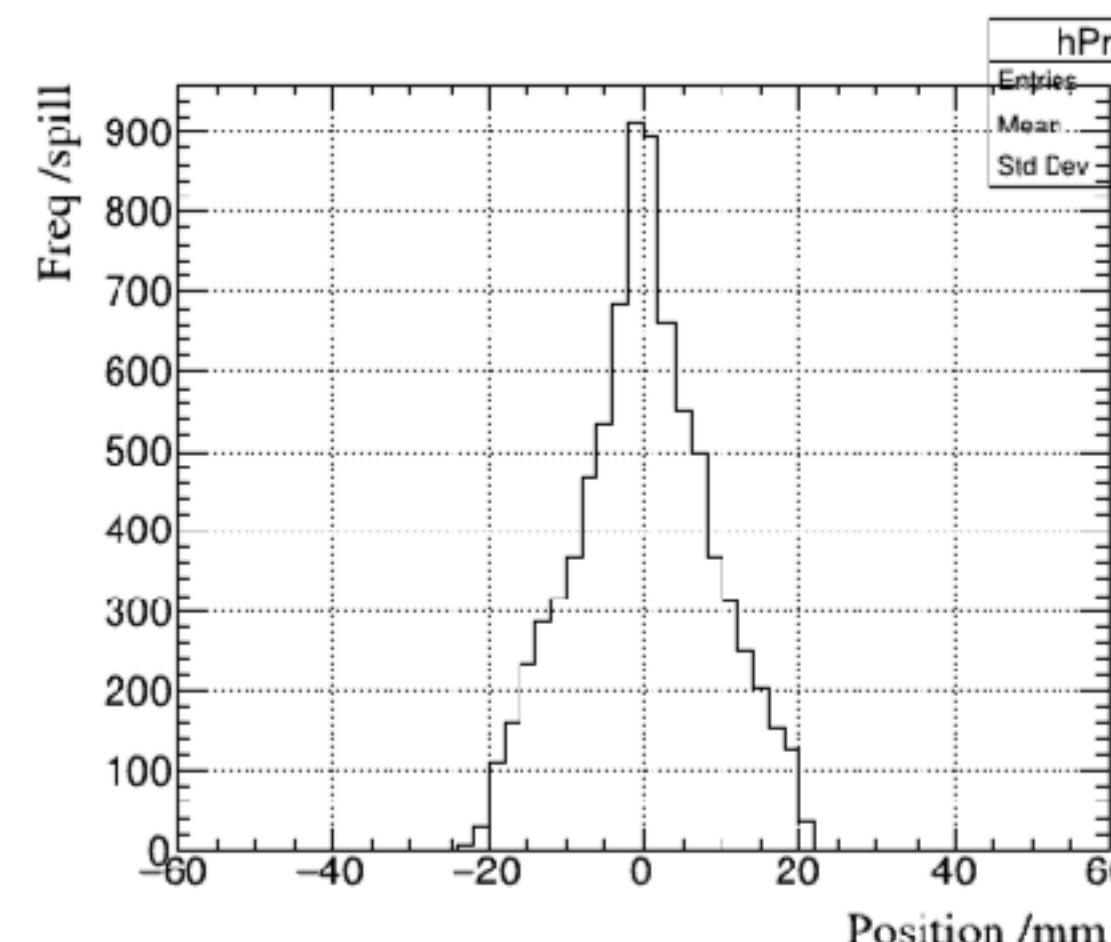
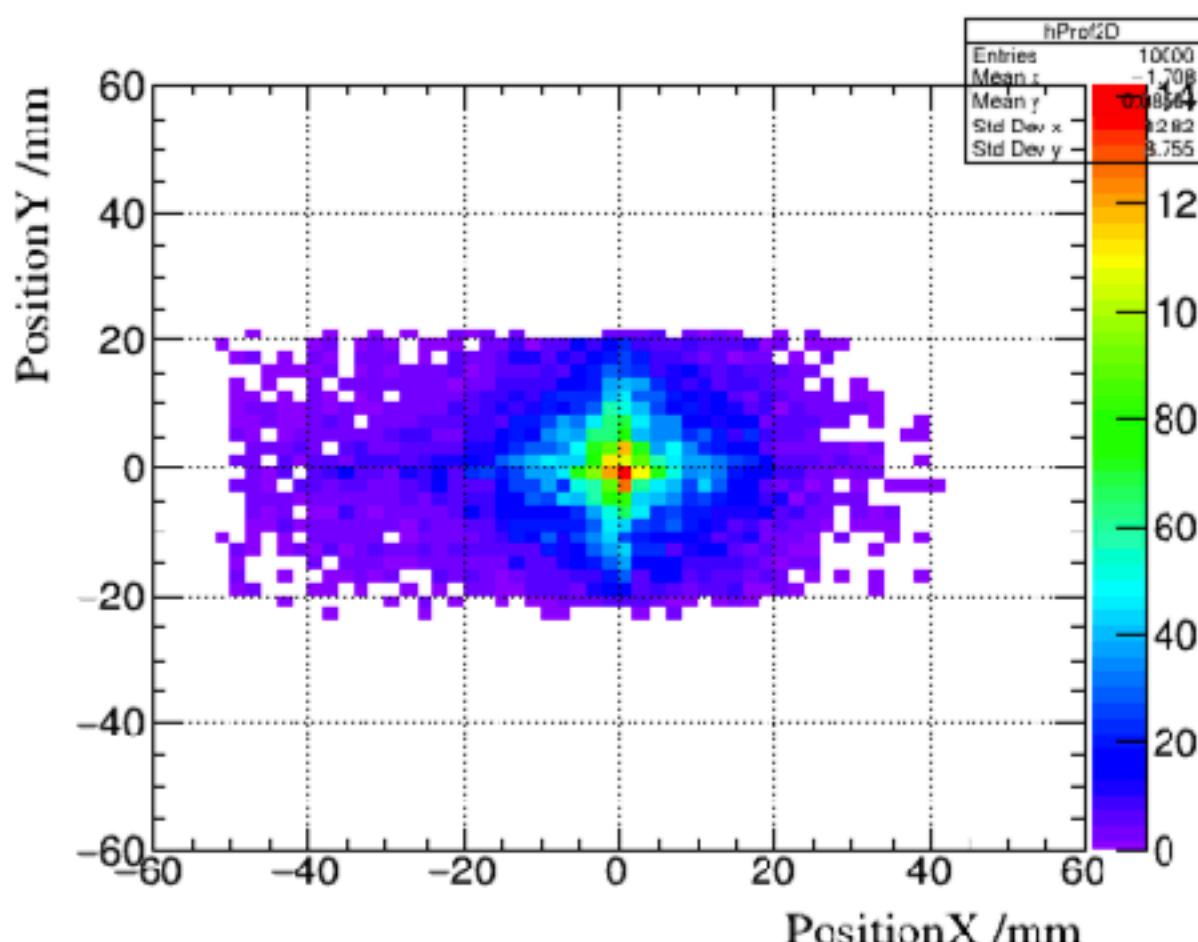
backup

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



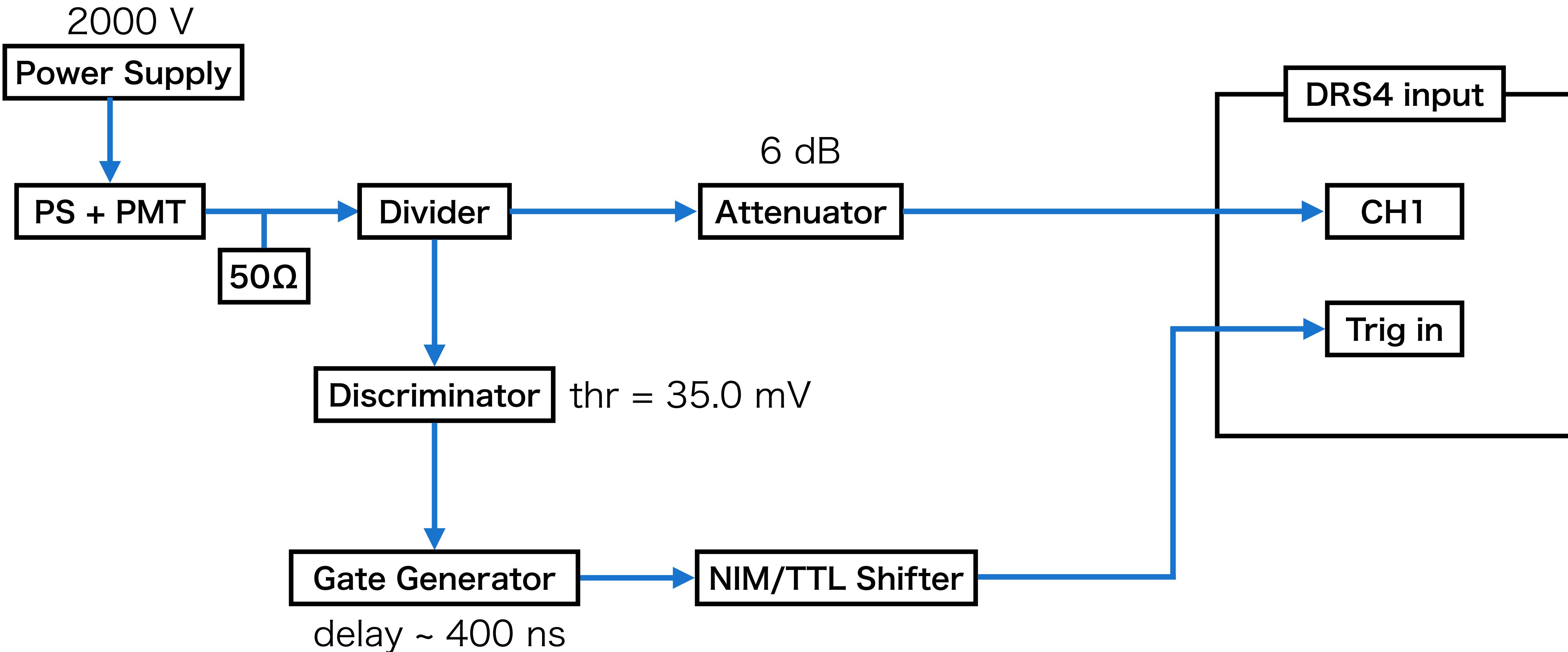
- Pensil beamの結果 ($\sigma_{\text{hit_time}}(5\text{mm})$ ~135 ps) と同程度の分解能
- 入射位置の違いによる到達時間差は PS発光のスケールに埋もれる
-> 時間分解能を悪化しない



| | |
|------------------|--------------|
| 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 |

線源測定の回路

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

