

NA61/SHINE実験

低運動量ハドロンビームライン建設に向けた

TOF検出器開発の現状

日本物理学会 2026年春季大会

(オンライン)

3月23 – 26日 (3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, 高エネ研^A, ELTE^B

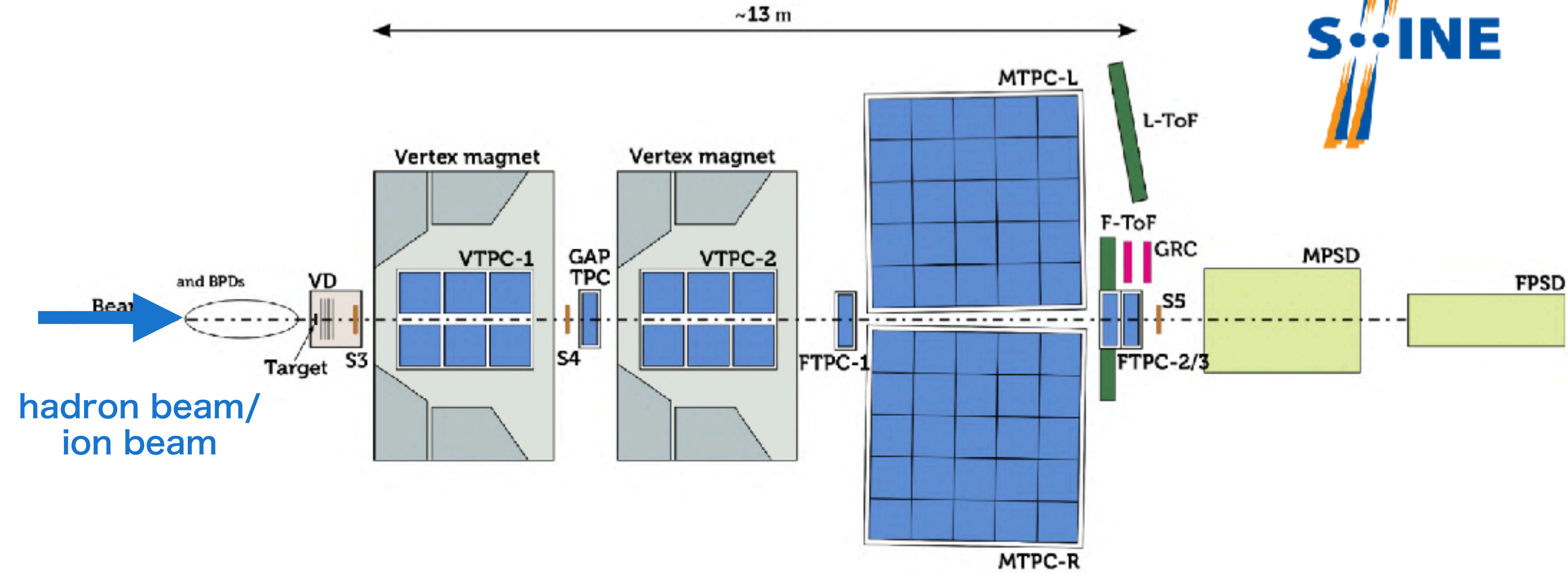
講演番号: 25aT1-1

NA61/SHINE 実験

"The SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment"



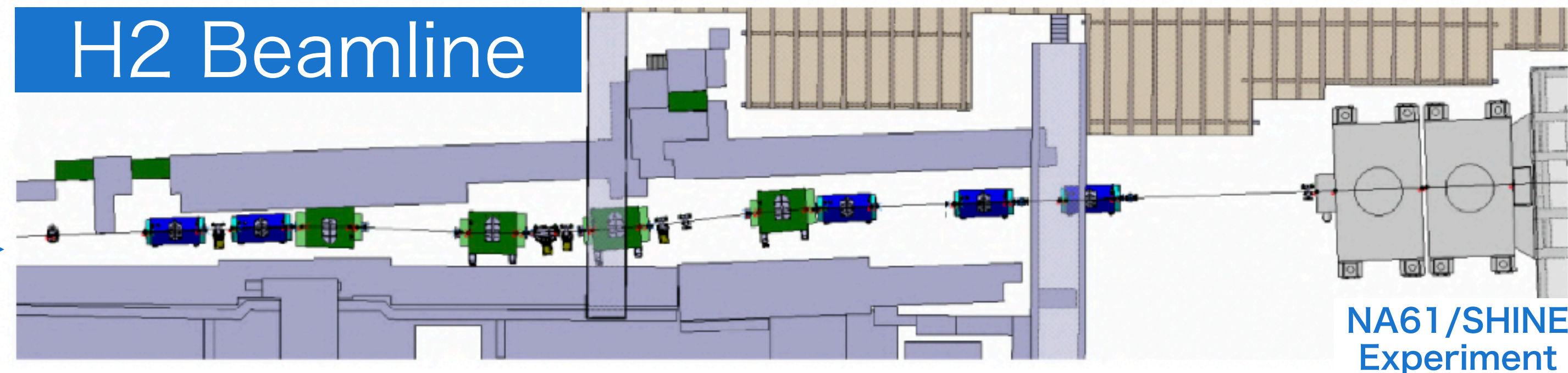
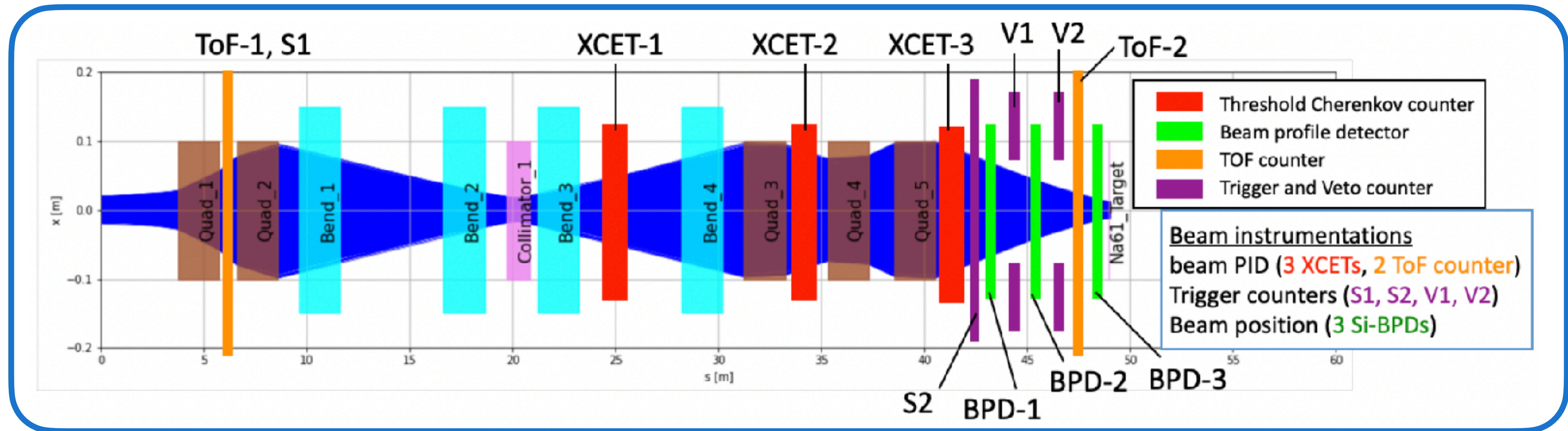
<http://www.lhc-closer.es/>より



- CERN SPSの取り出しビームをBe標的に当て、生成した二次ハドロン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

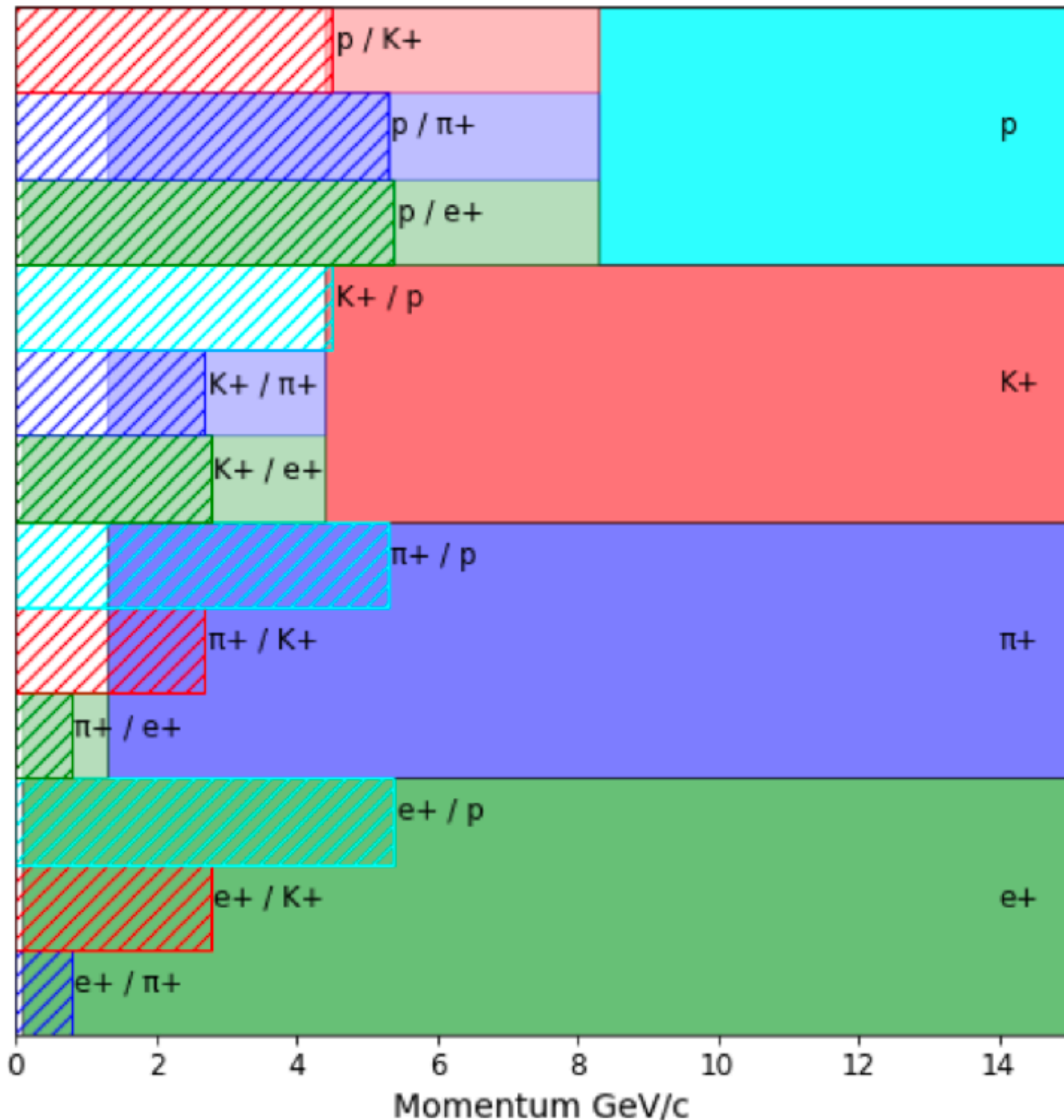
- ・ 2 - 13 GeV/cのハドロン (p , π^\pm , K^\pm) ビームラインの実現に向け、
広範囲ビームプロファイルモニター、**低運動量に適した粒子識別検出器**の開発を進めている



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

TOF検出器の要求性能

PID可能な運動量領域
(TOF時間分解能 500 ps の場合)

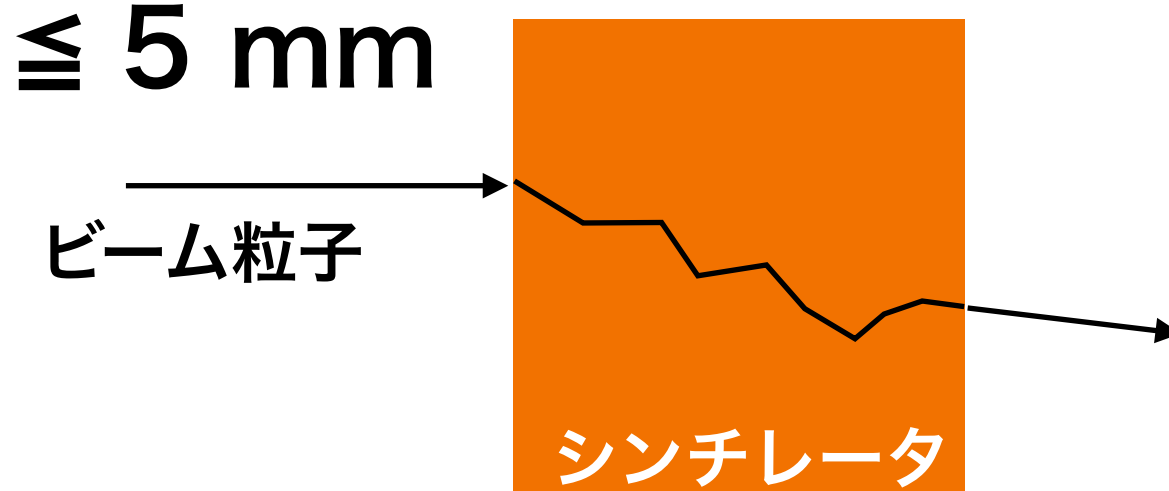


時間分解能に対する要求

- TOF検出器と閾値チェレンコフカウンターによりPIDする
- PIDできる運動量領域は、
斜線：TOF検出器 実線：閾値チェレンコフカウンター
- 2 - 13 GeV/c 全領域をカバーするには、TOF検出器の **時間分解能 < 500 ps** が必要

厚さに対する要求

- Coulomb scattering により、ビームエミッタンスが悪化
-> 標的でのビームサイズ < 20mm RMS を満たすには
(プラスチック) シンチレータの厚さ ≤ 5 mm



(目標性能)

時間分解能 $\sigma < 500 \text{ ps}$ & シンチレータの厚さ $\leq 5\text{mm}$

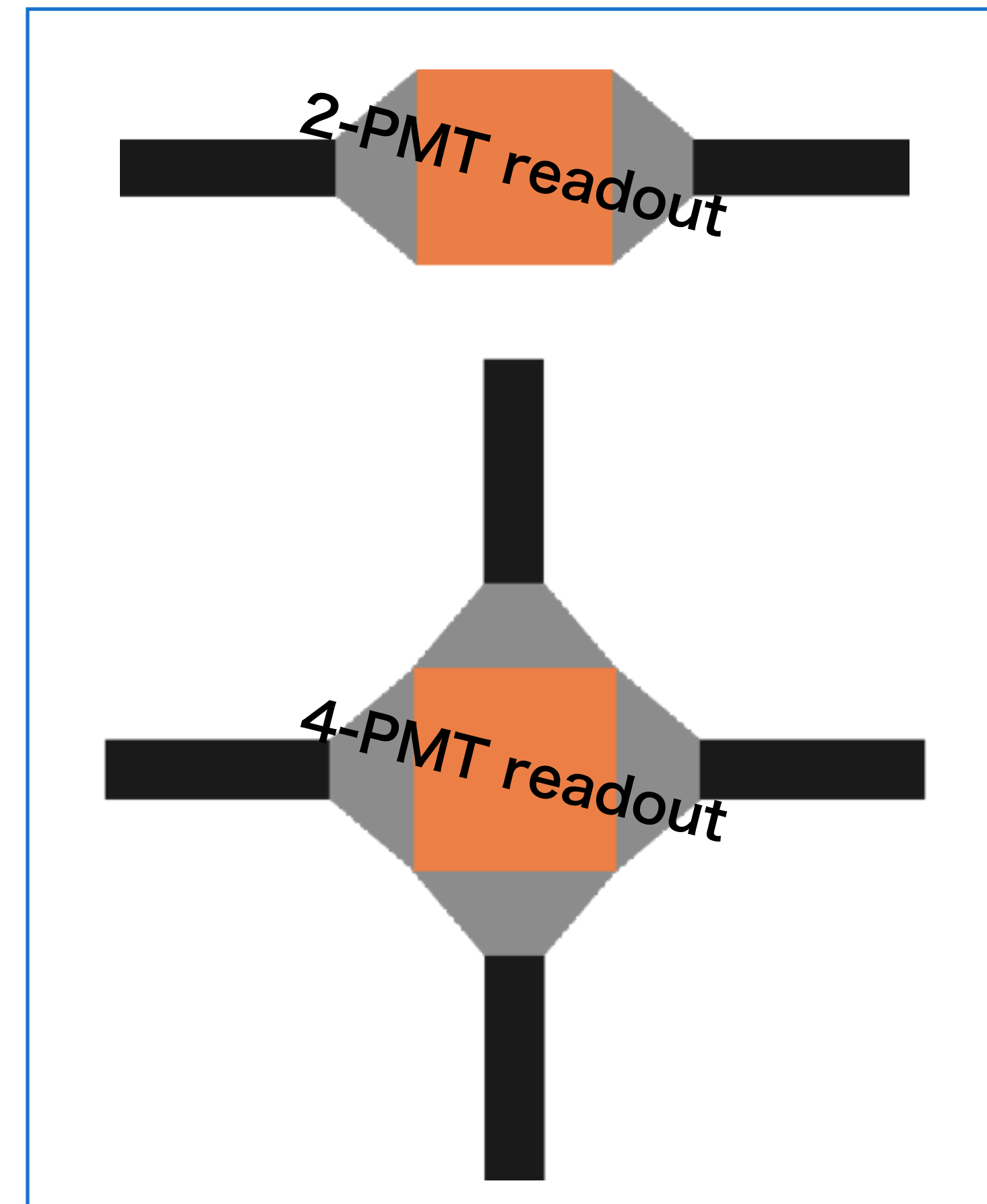
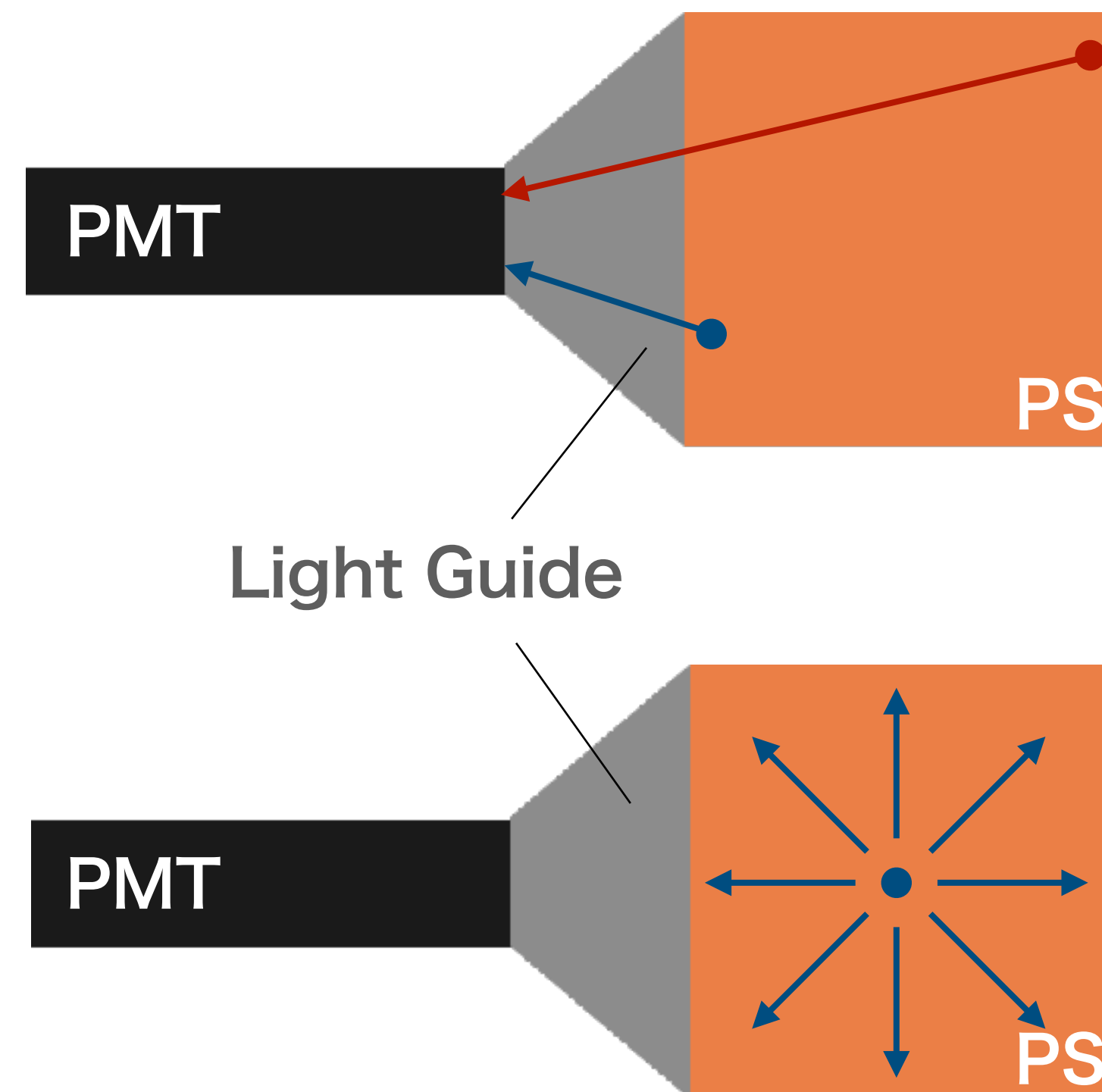
- MCシミュレーションによる検出器デザインの最適化
- ビームテストによる性能評価

MCシミュレーション (Geant4)

- プラスチックシンチレータ検出器のデザインを改良する
- Geant4によるMCシミュレーション
 - 1 GeV μ^+ 粒子を、シンチレータ中央に照射 (ビームの拡がり無視)

1. 読み出しPMTの本数を増やす

- 粒子の入射位置の違いに起因する時間分解能の低下を改善
- 検出光子数を増やすことで、統計ゆらぎを抑え、時間分解能を改善

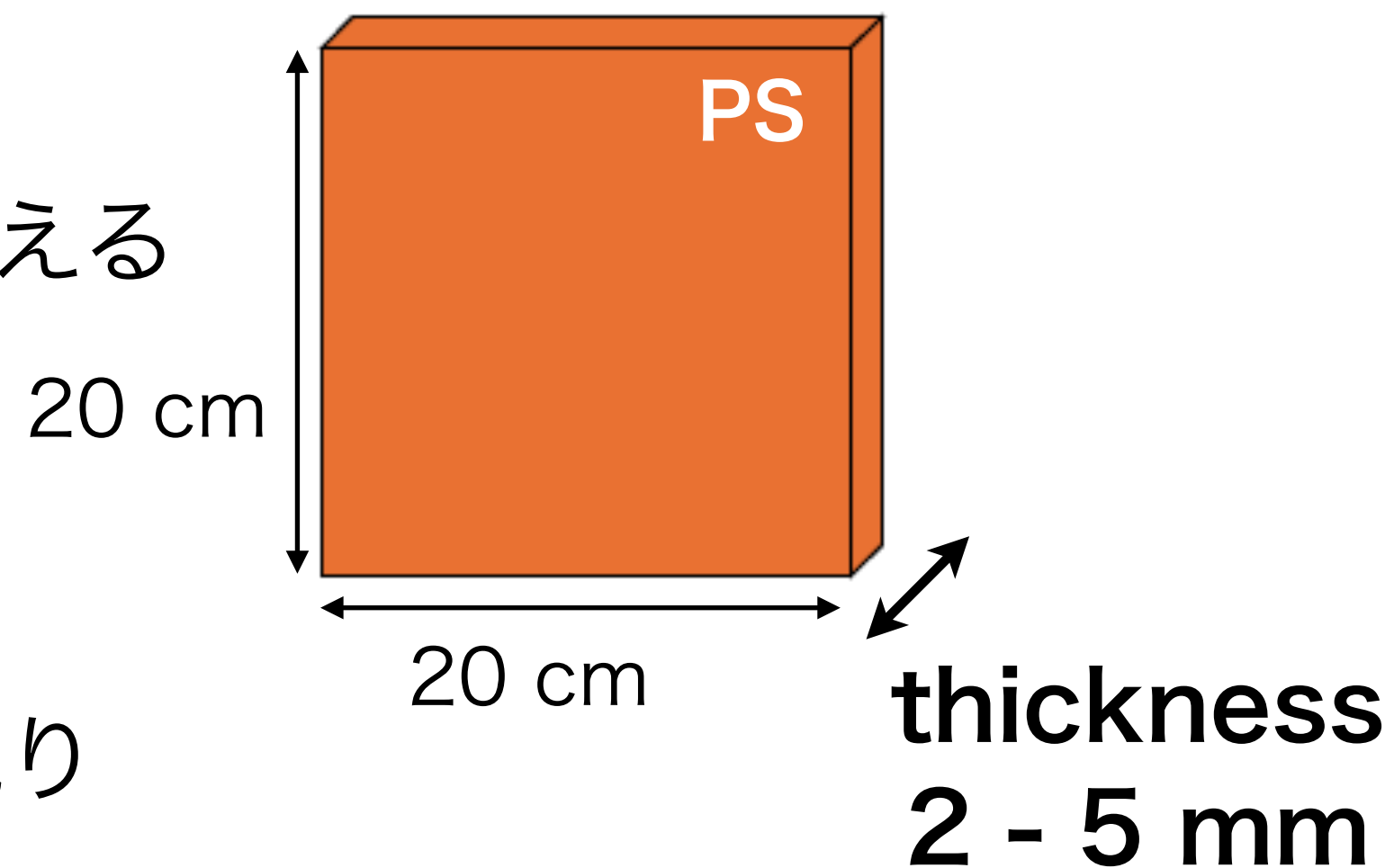


MCシミュレーション (Geant4)

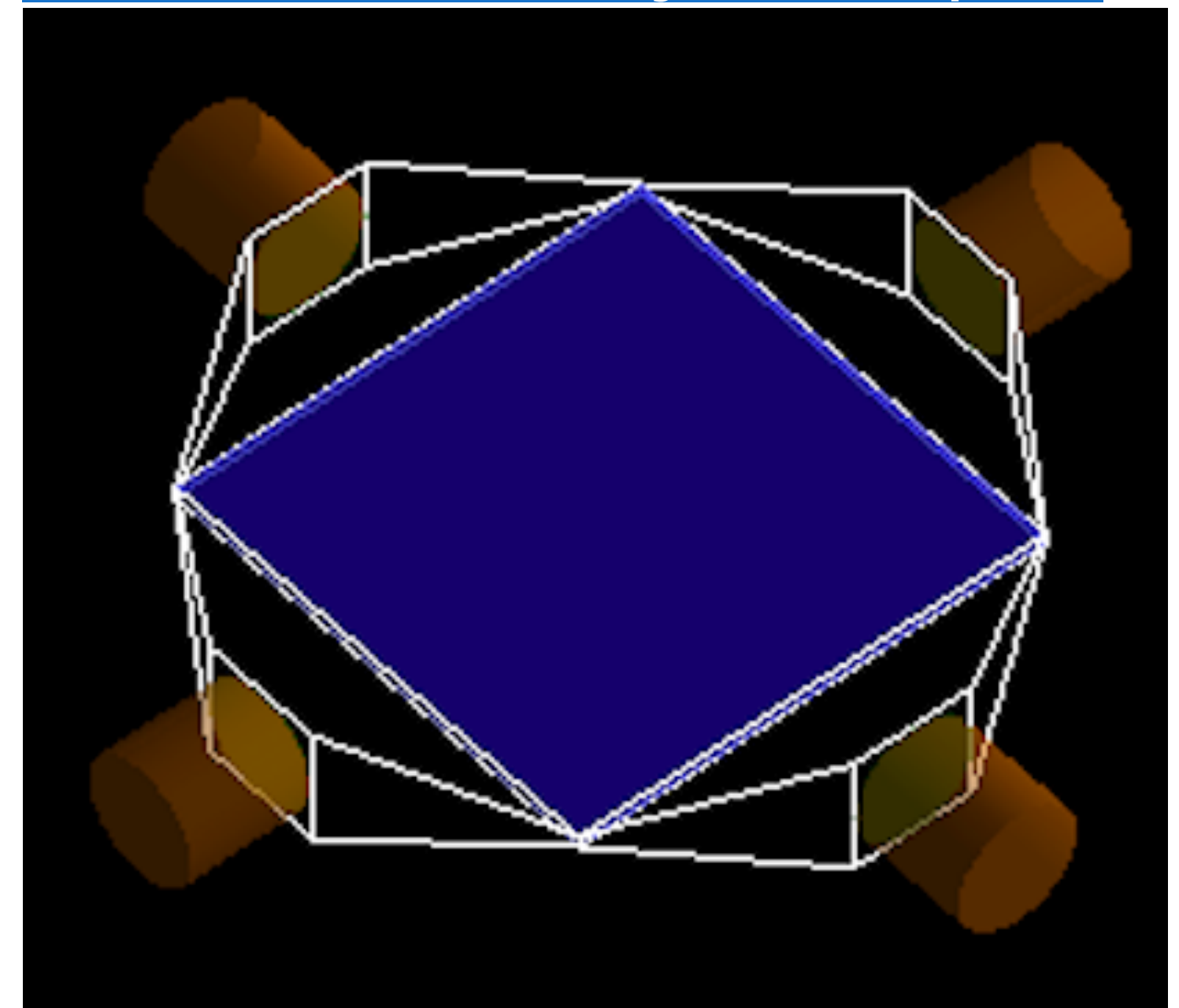
- ・プラスチックシンチレータ検出器のデザインを改良する
- ・ Geant4によるMCシミュレーション
 - 1 GeV μ^+ 粒子を、シンチレータ中央に照射 (ビームの拡がり無視)

2. シンチレータの厚さ

- ・ 厚くすれば、ビームロスが増える
 - 要求値は $\leq 5\text{mm}$
- ・ 薄くすれば、検出光子数が減り
時間分解能が悪化

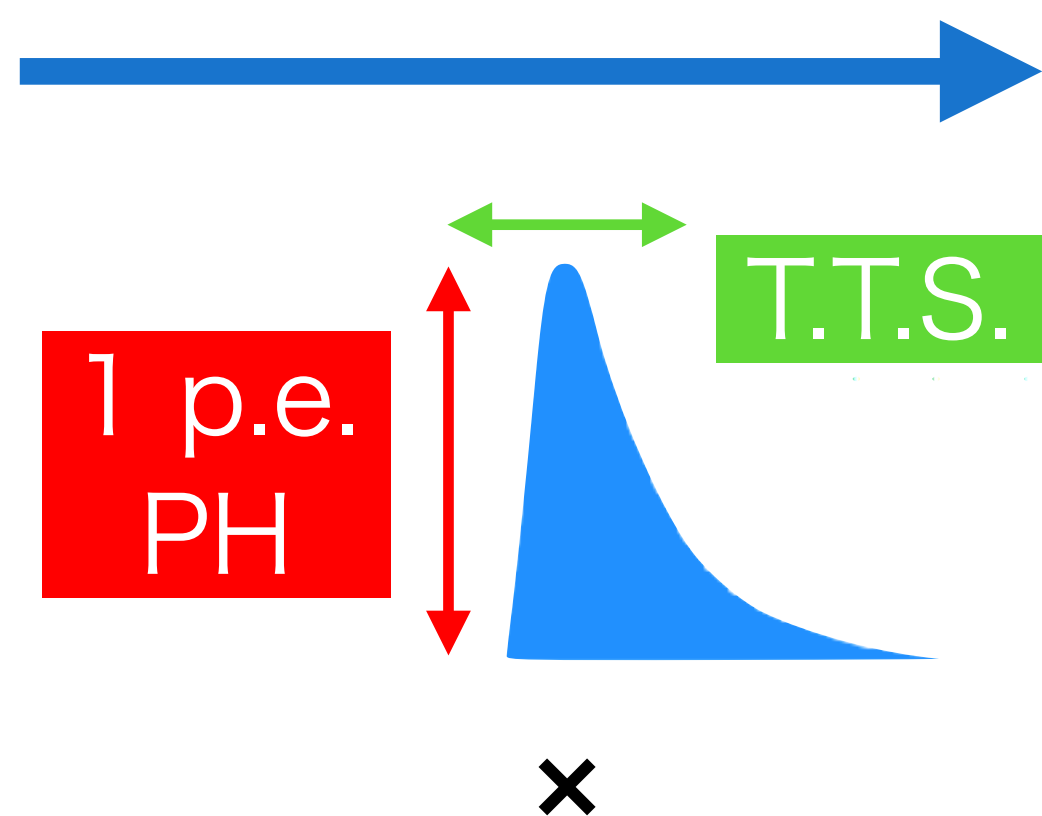
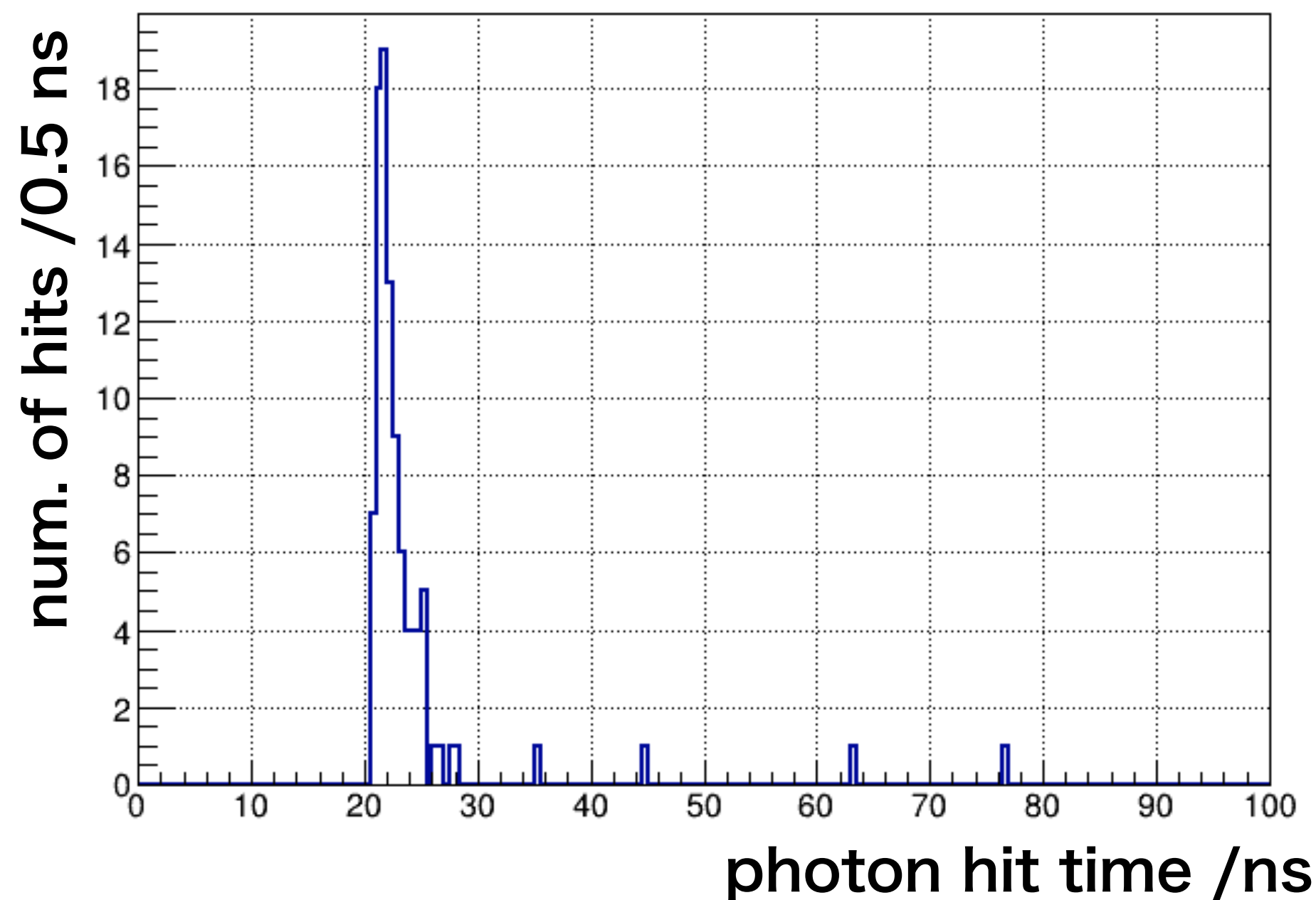


Sim. Geometry example



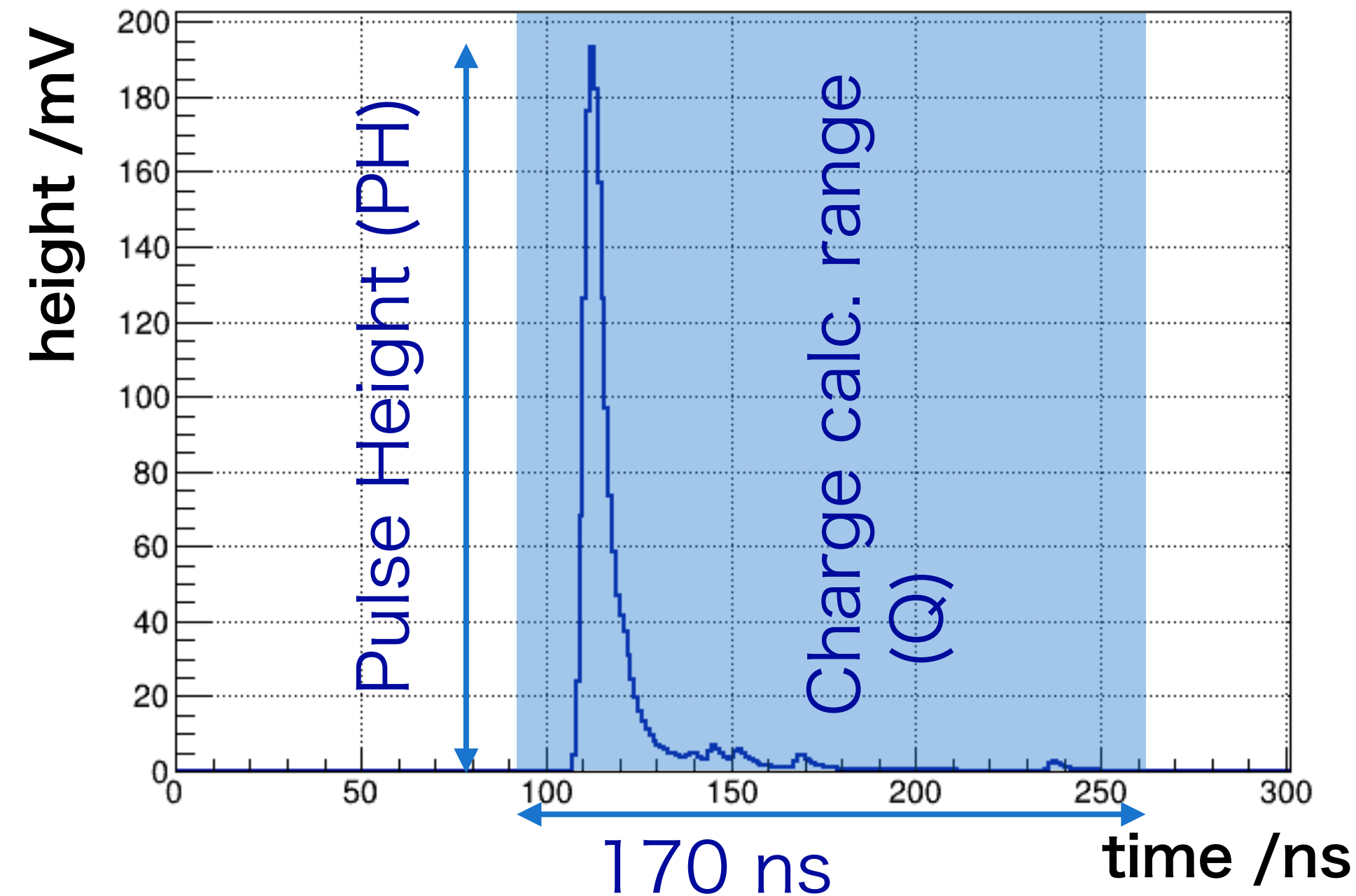
シミュレーション波形の生成

Photon Hit Time

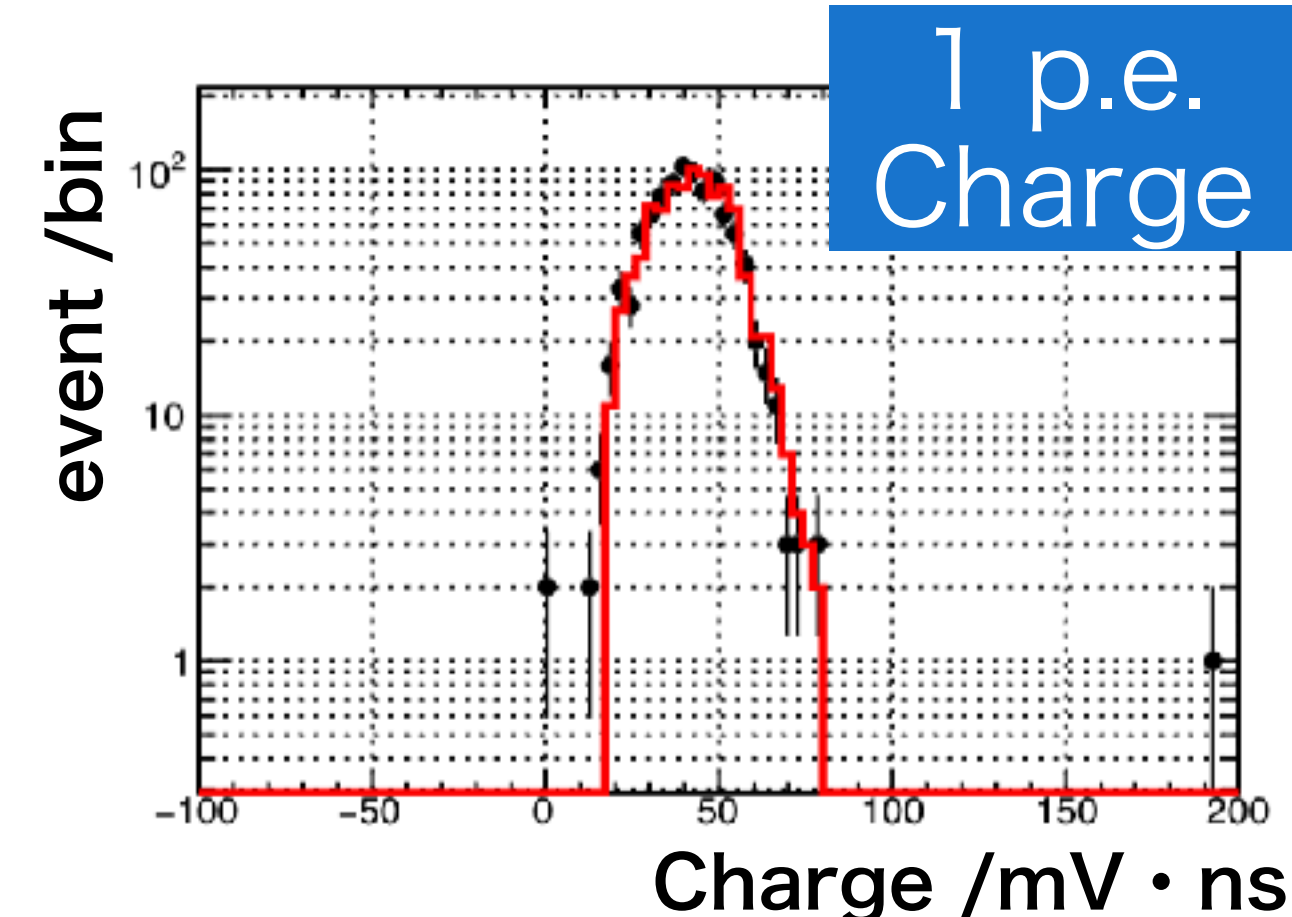
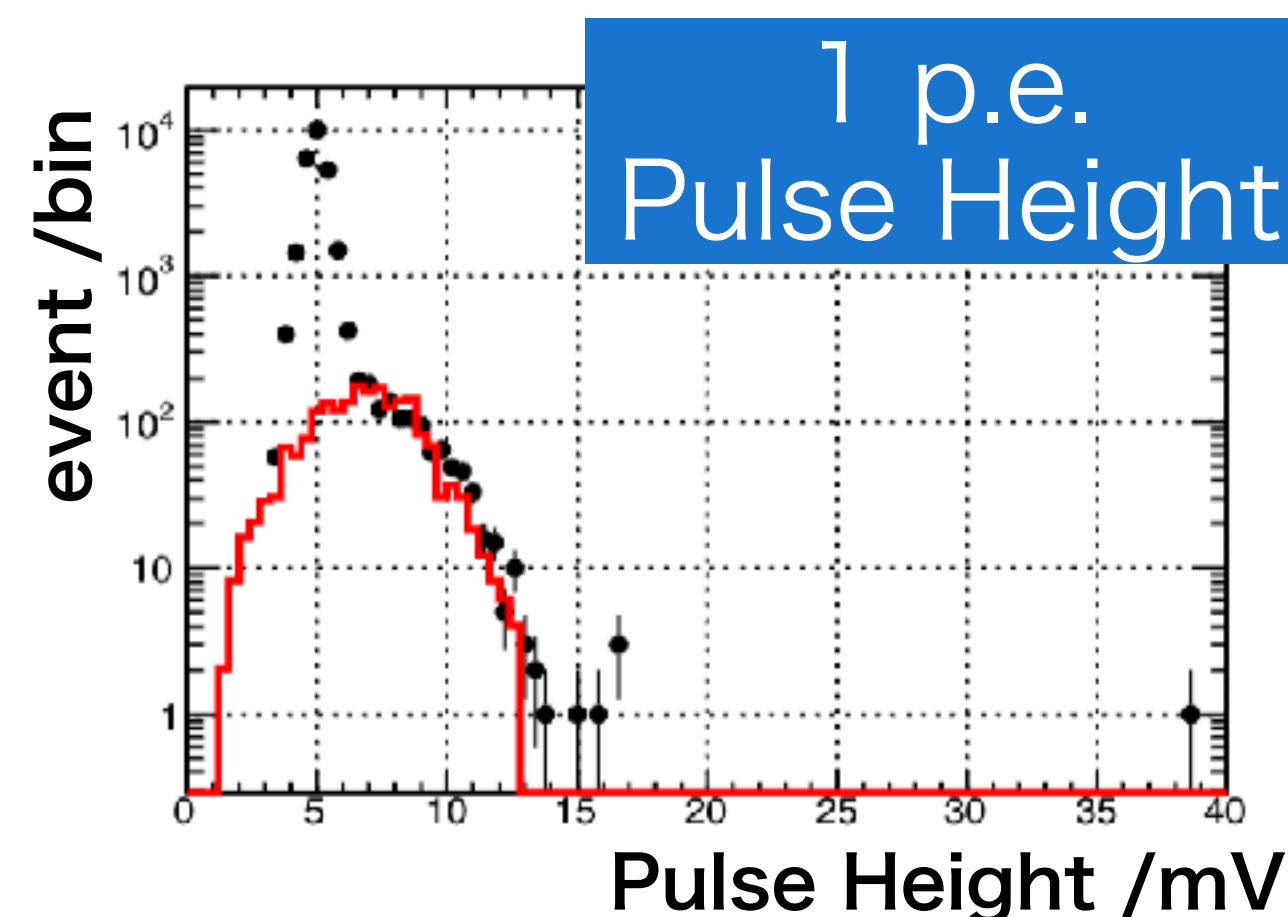


観測光子数

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

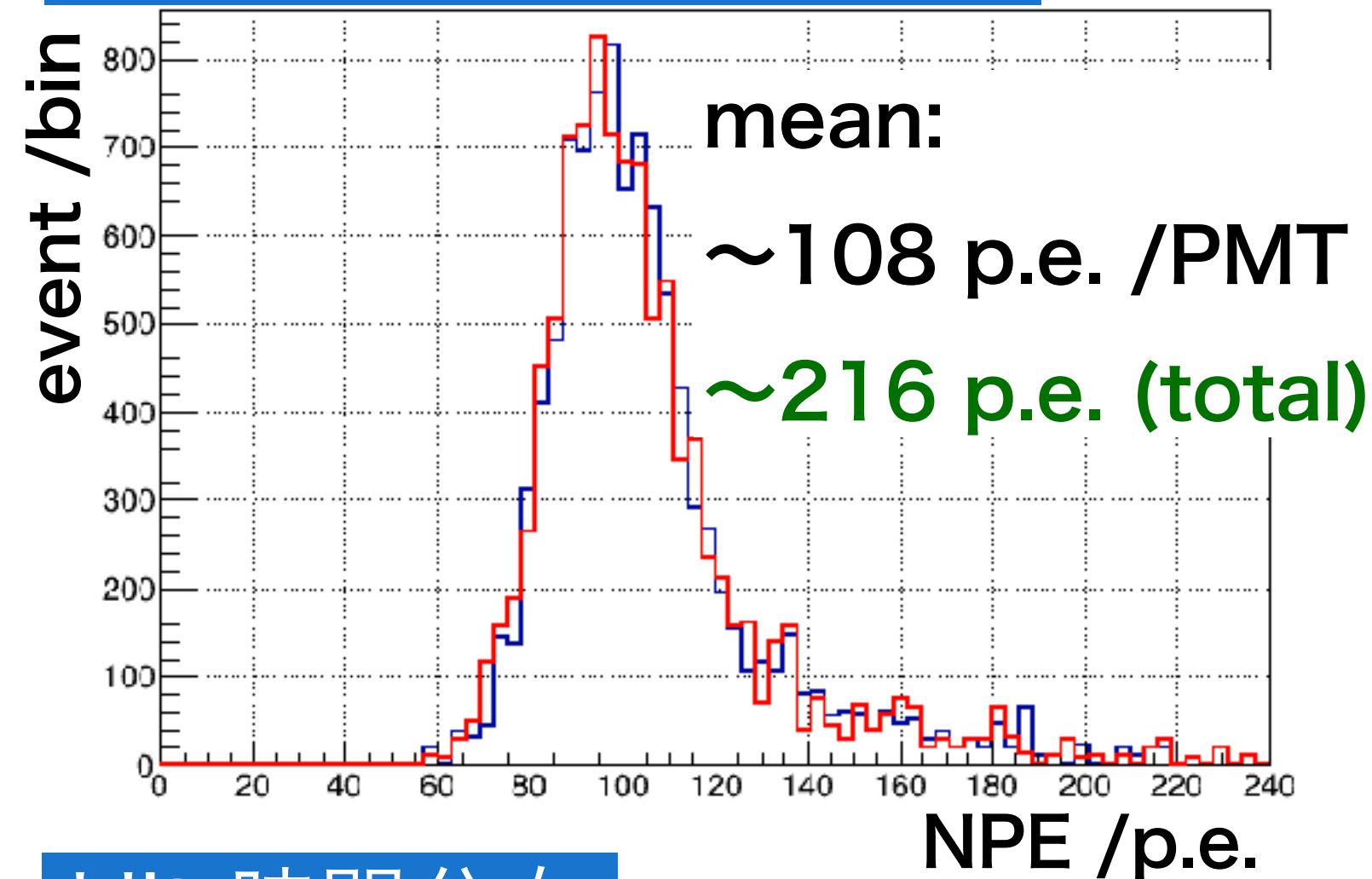


PMT本数比較のMC結果

※ 5mm厚シンチレータ

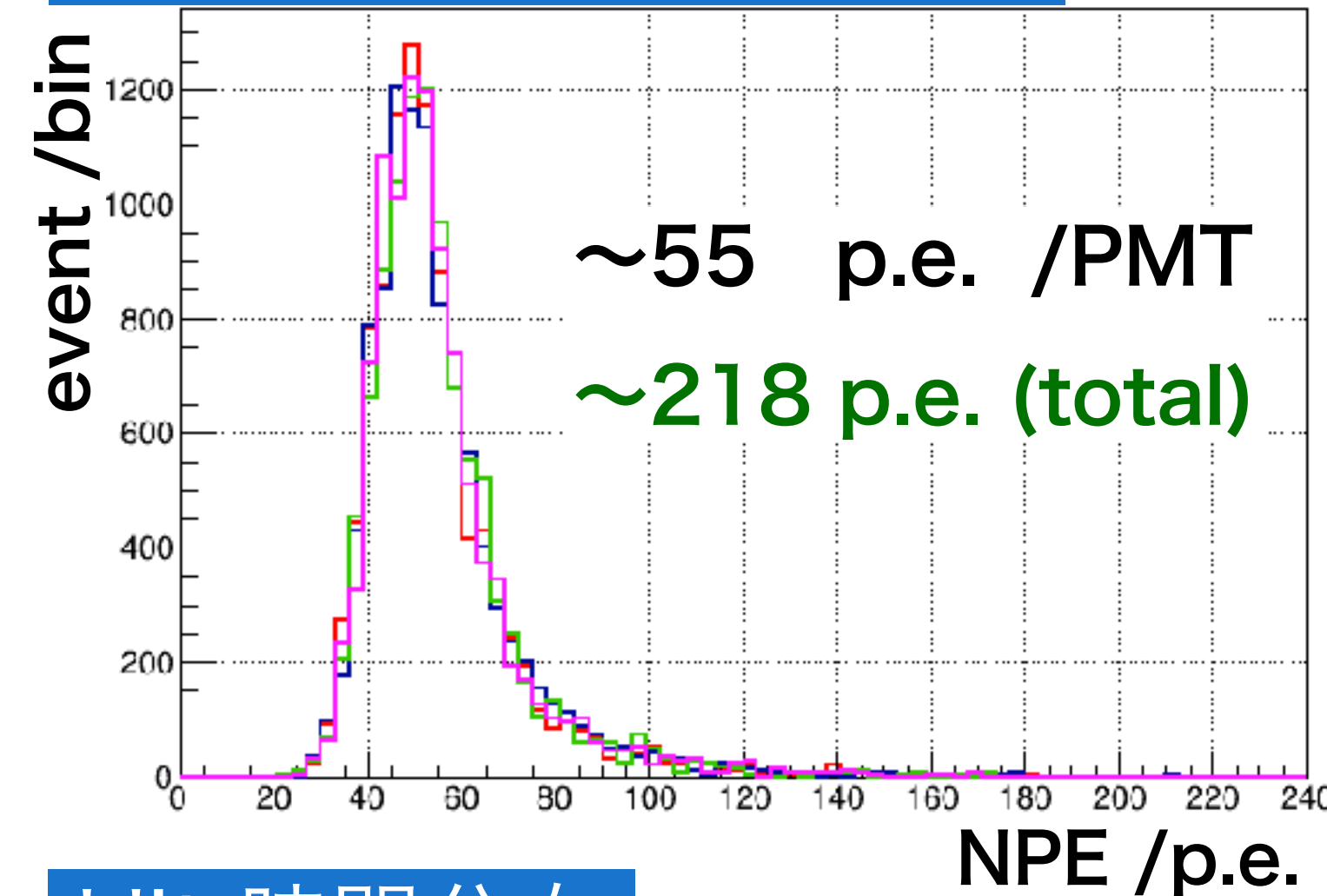
PMT2本

各PMT入射光量 (NPE)

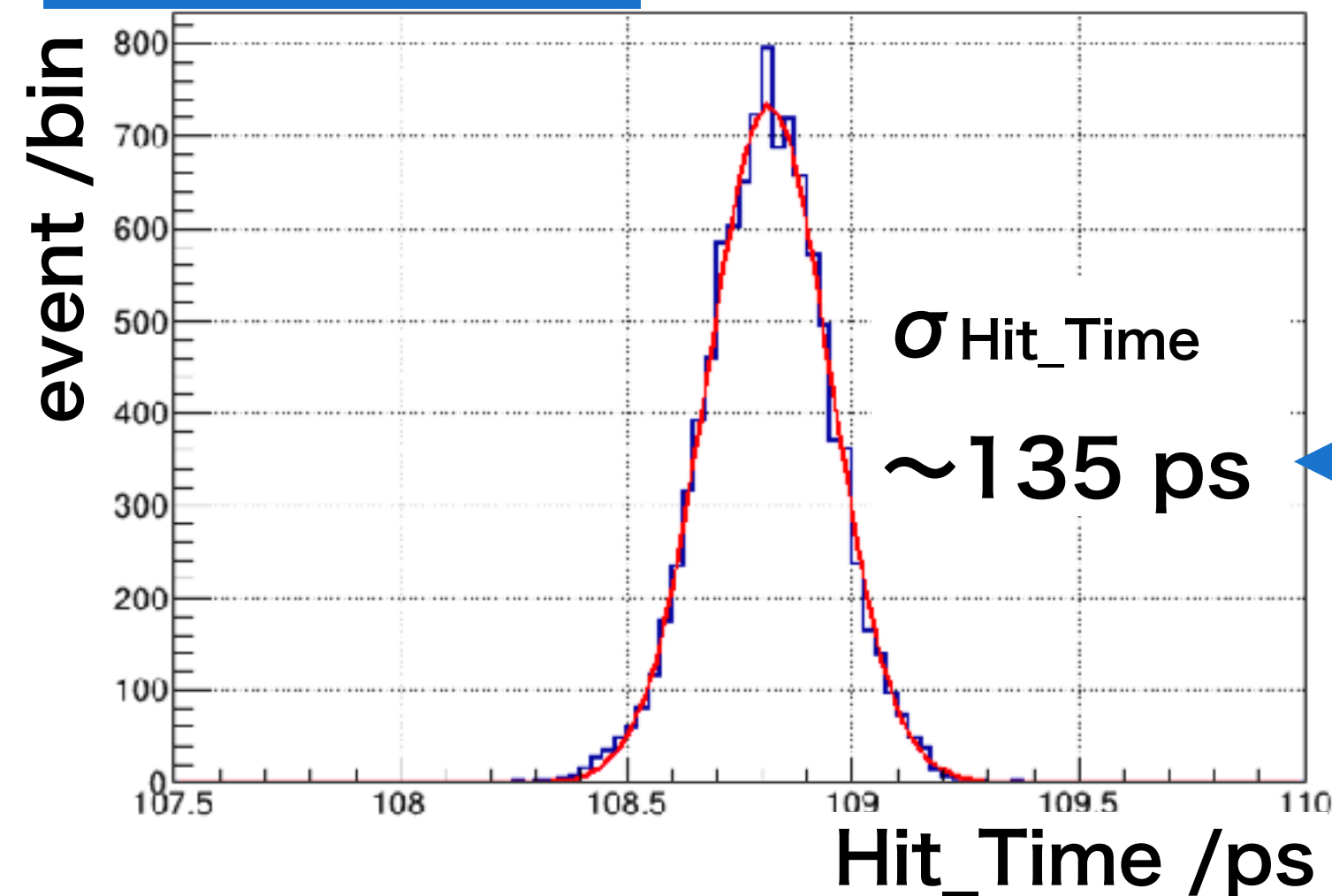


PMT4本

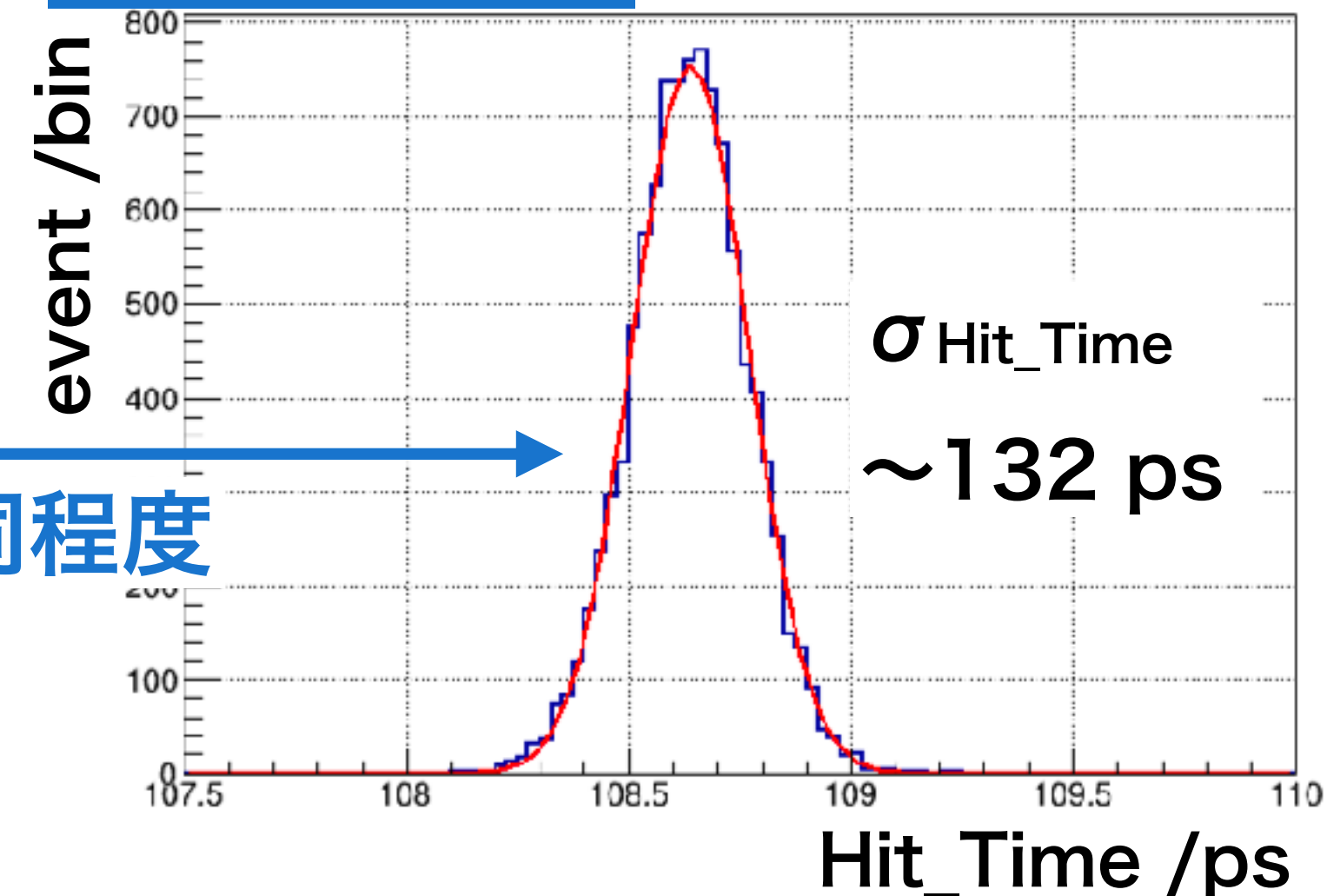
各PMT入射光量 (NPE)



Hit 時間分布



Hit 時間分布

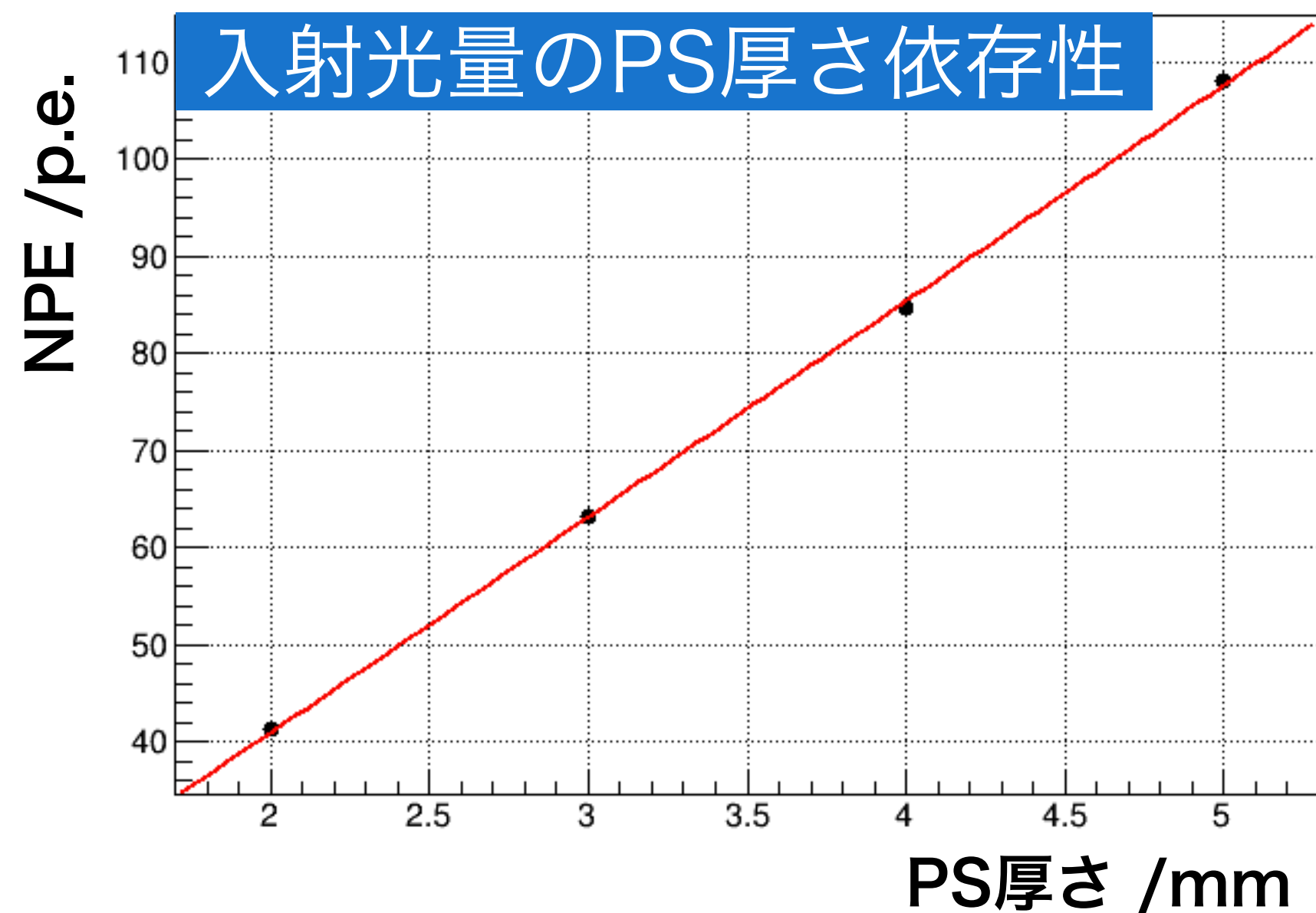


同程度

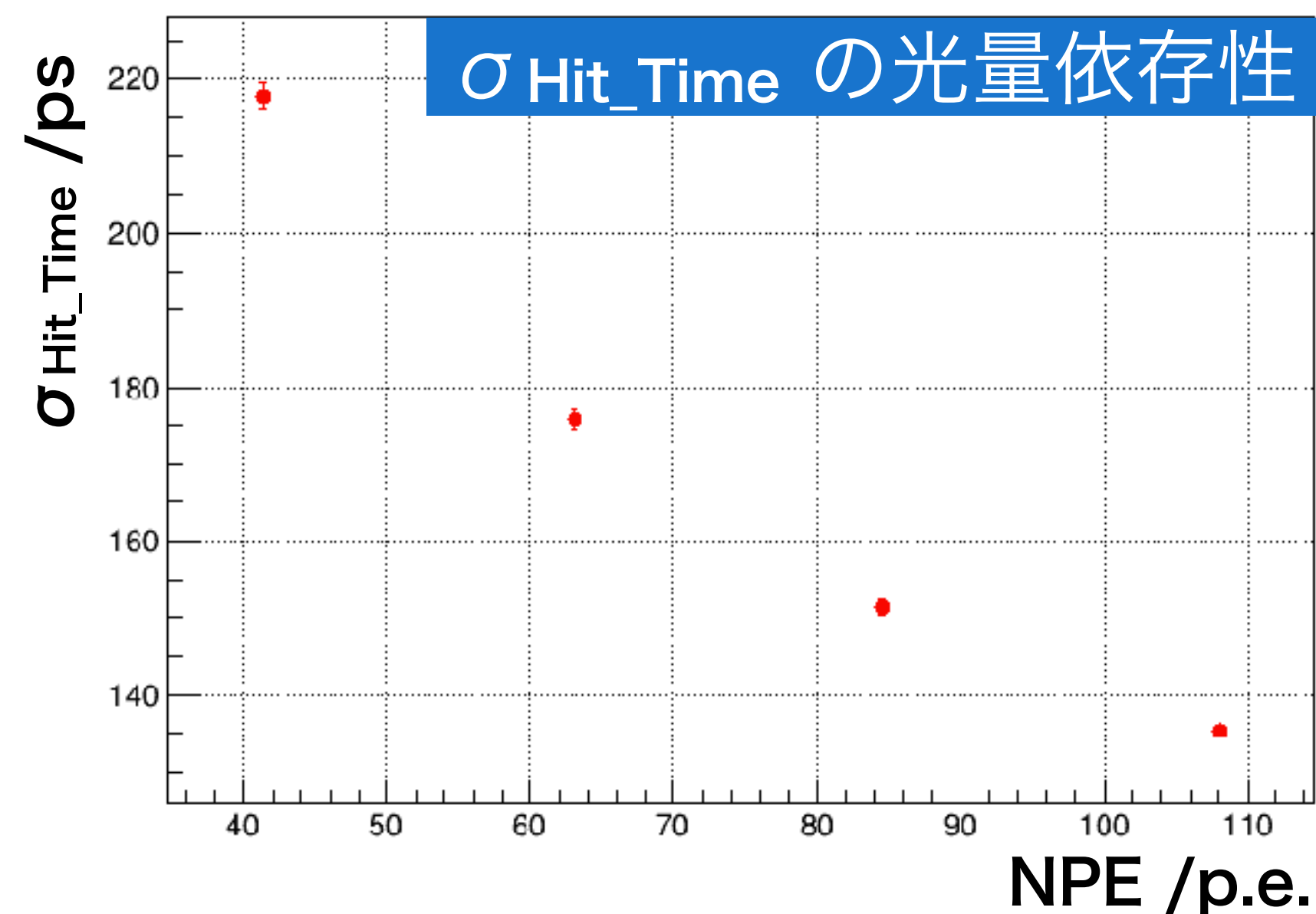
- 2PMTで $\sigma_{\text{Hit_Time}} \sim 135 \text{ ps}$
-> $\sigma_{\text{TOF}} \sim 191 \text{ ps}$
(TOF = 2検出器の時間差)

- 4PMTと同等の時間分解能を実現
-> 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

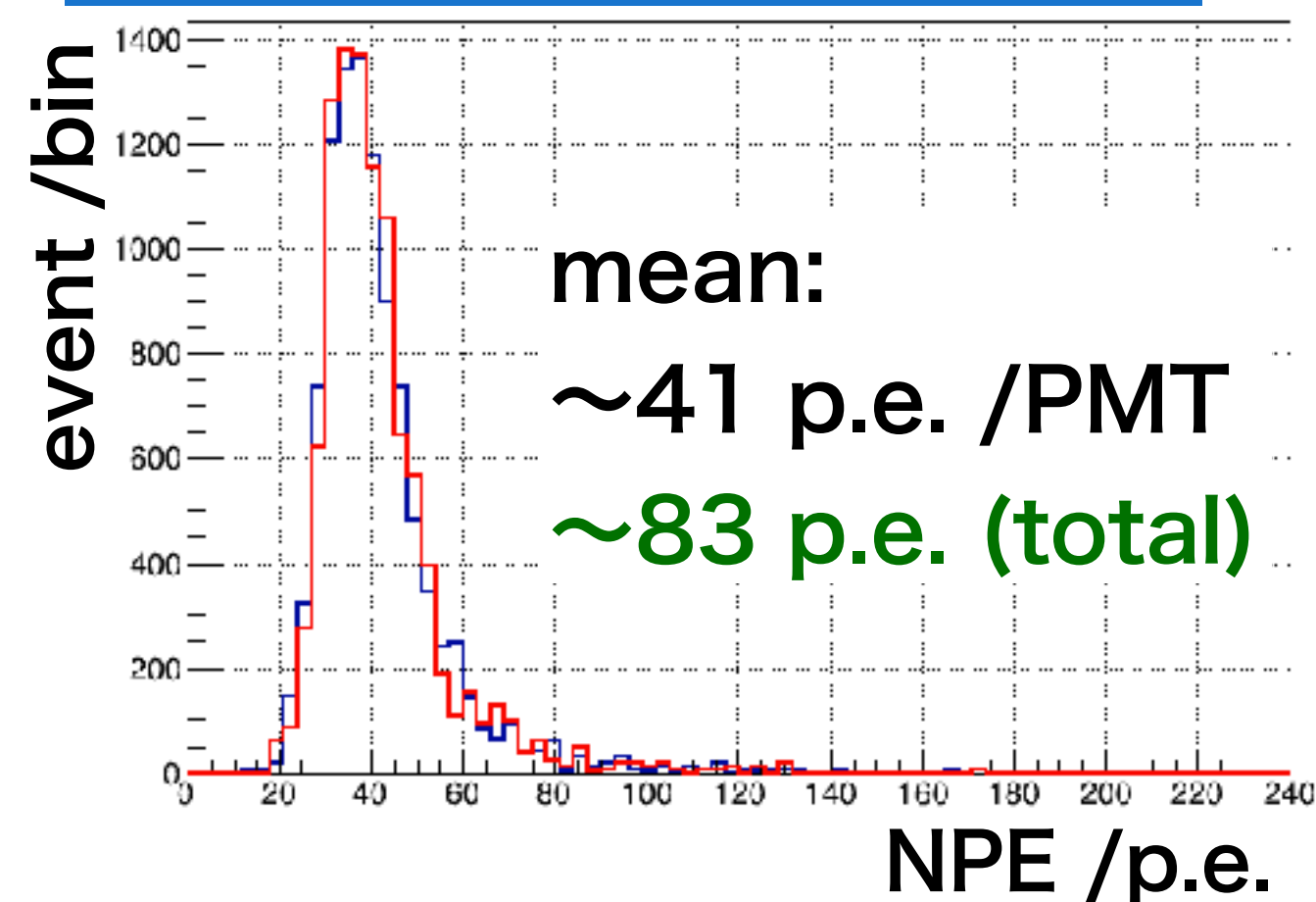


- PMTへの入射光量 \propto PS厚み
- 入射光量が増えると、 $\sigma_{\text{Hit_Time}}$ が統計的に改善
- 2 mm厚のシンチレータで $\sigma_{\text{Hit_Time}} \sim 218$ ps
→ $\sigma_{\text{TOF}} \sim 308$ ps (要求の < 500 psを十分満たす)

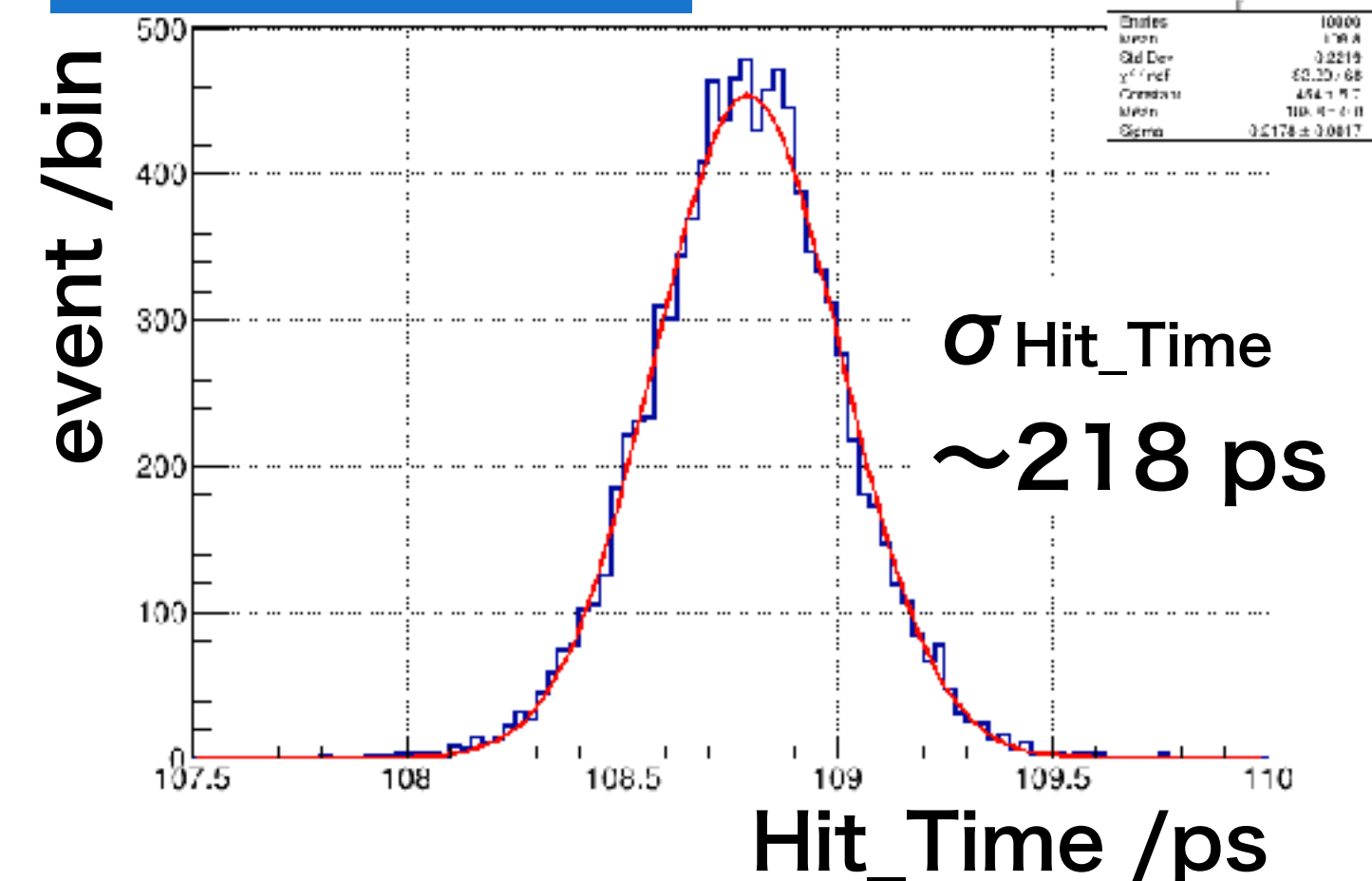


シンチレータ厚 2mm のMC結果

各PMT入射光量 (NPE)

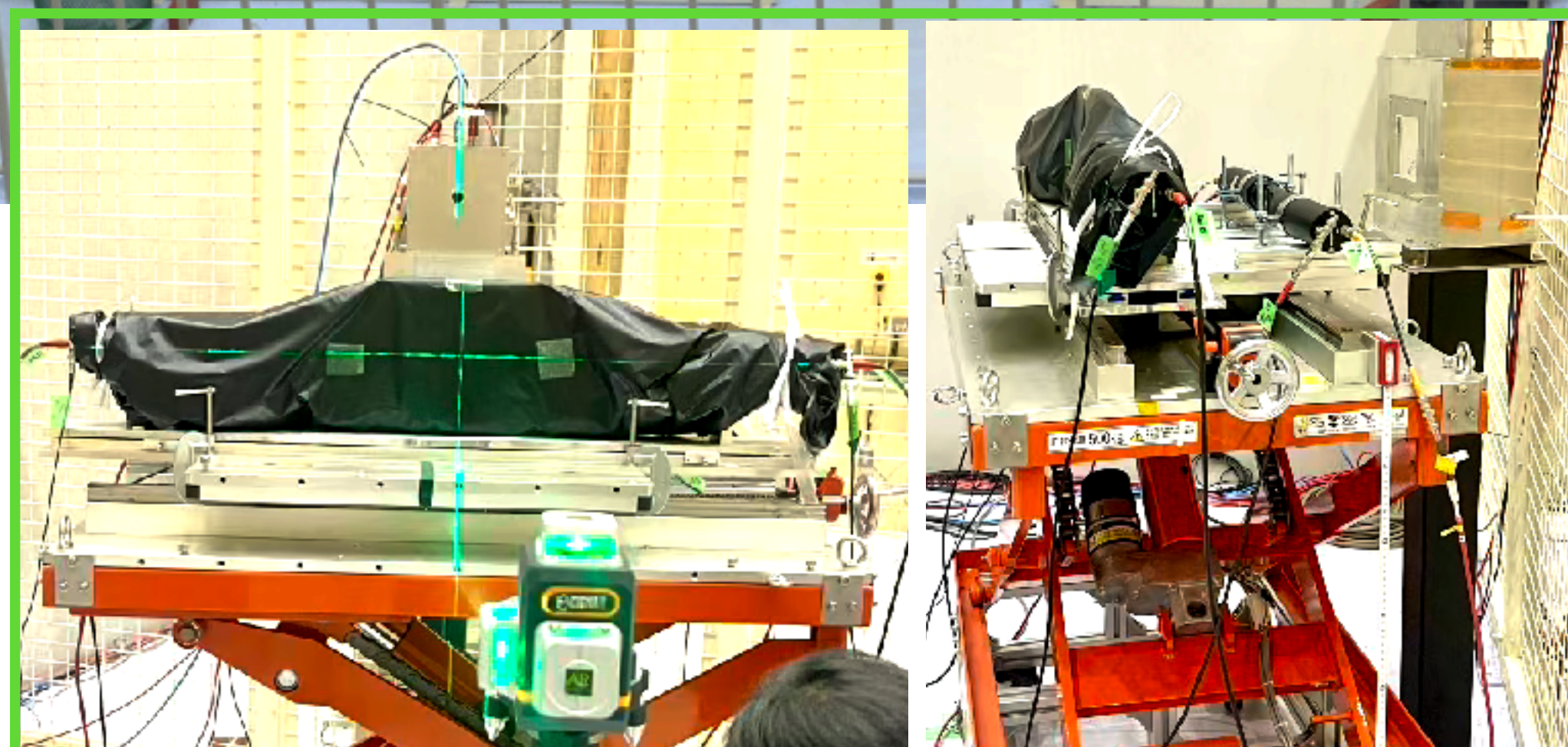
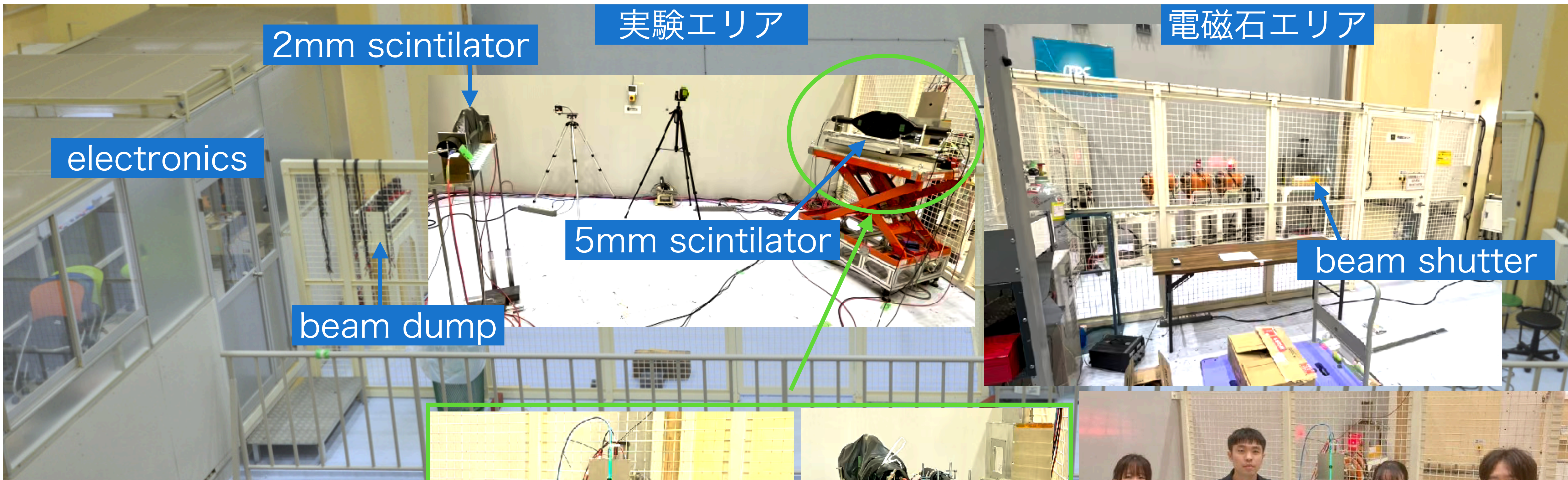


Hit 時間分布



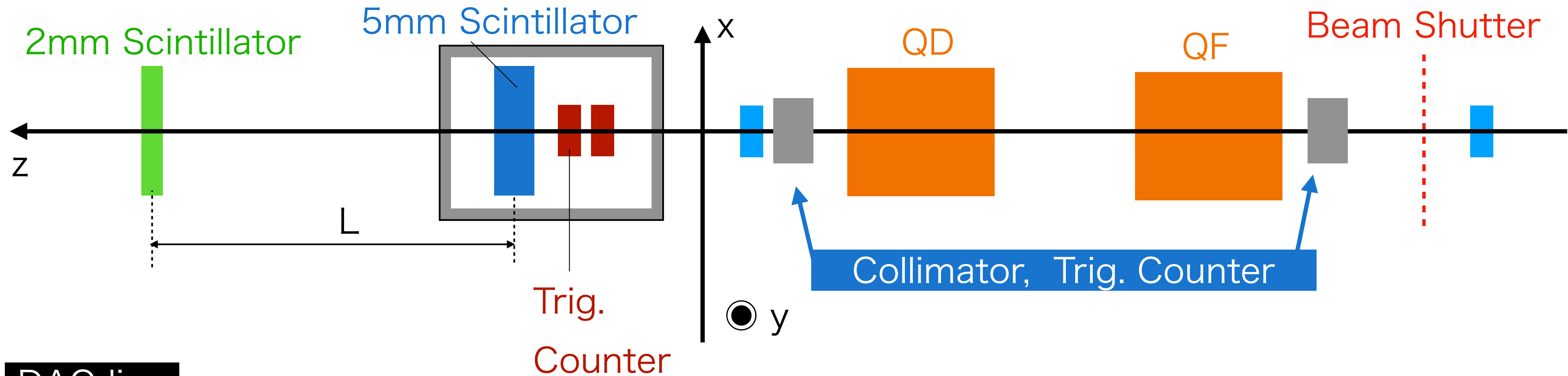
Beam Test

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



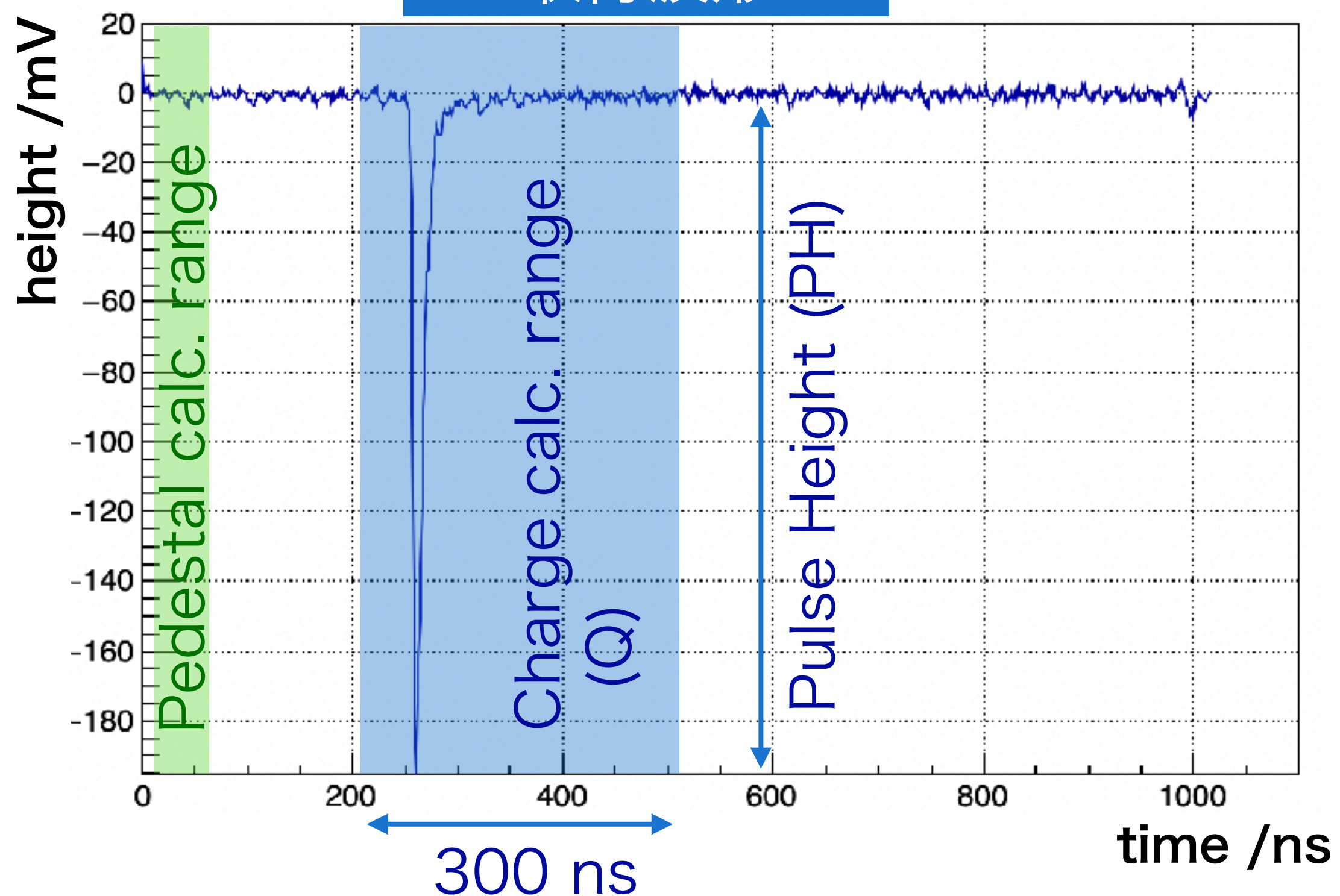
TOF検出器の評価

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



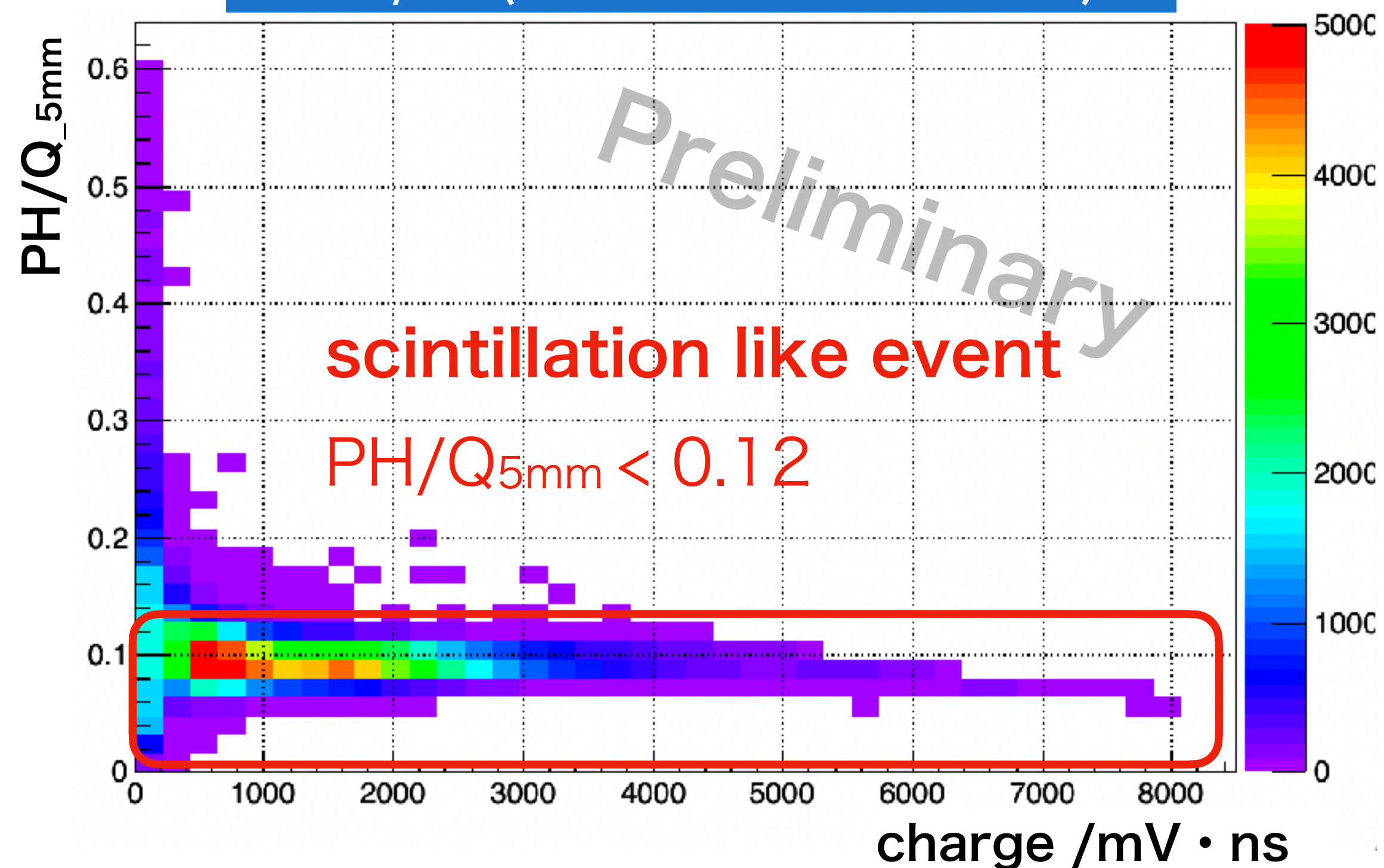
- 4 GeV/c の e^- をシンチレータ中央に照射
- 取得信号は DRS4 Evaluation Board (1GHz sampling) により読み出し
- 5mm厚シンチレータ検出器と2mm厚シンチレータ検出器の粒子のHIT時間差からTOFを測定
- データとMCで時間分解能を比較

取得波形



- 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

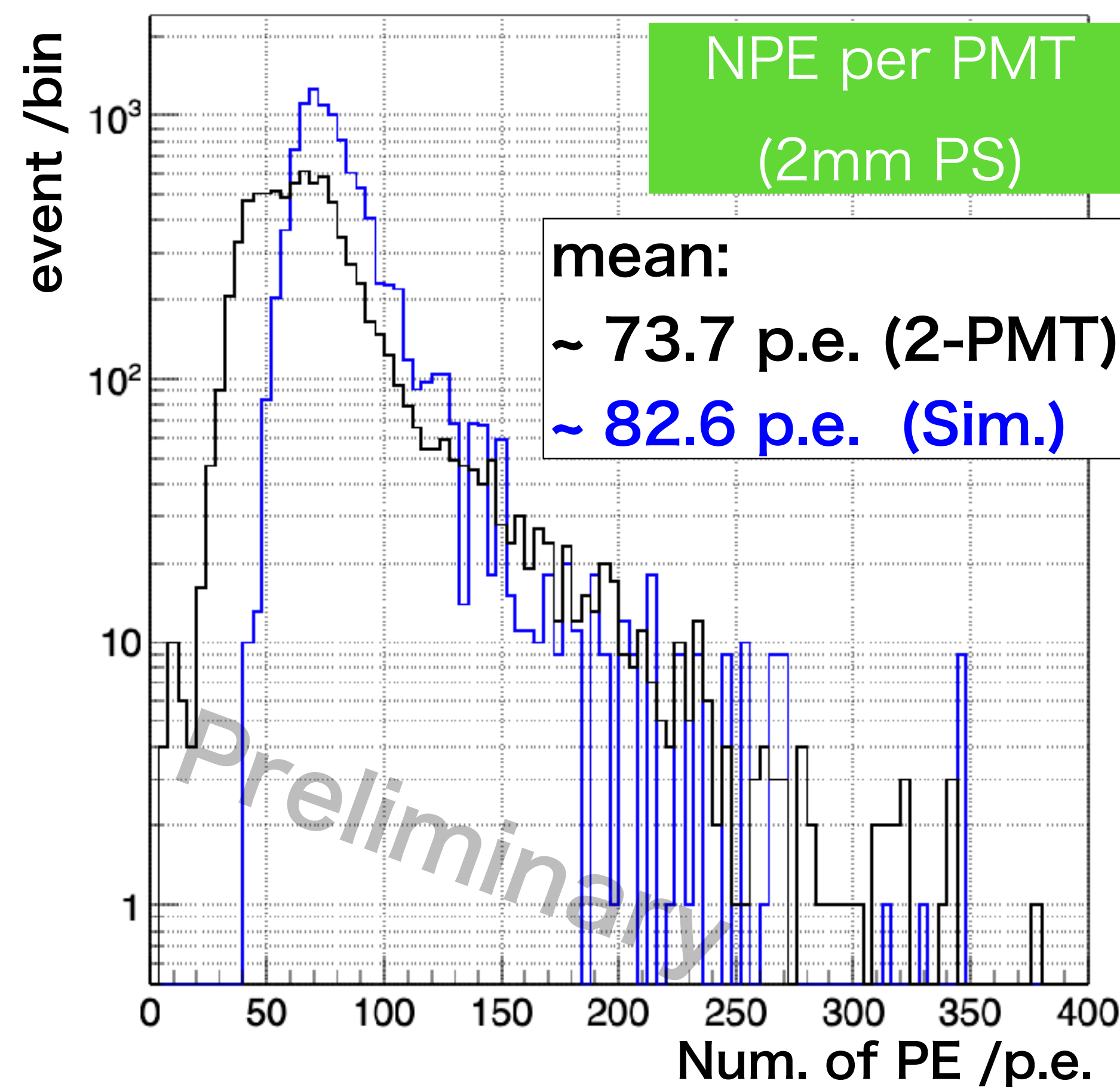
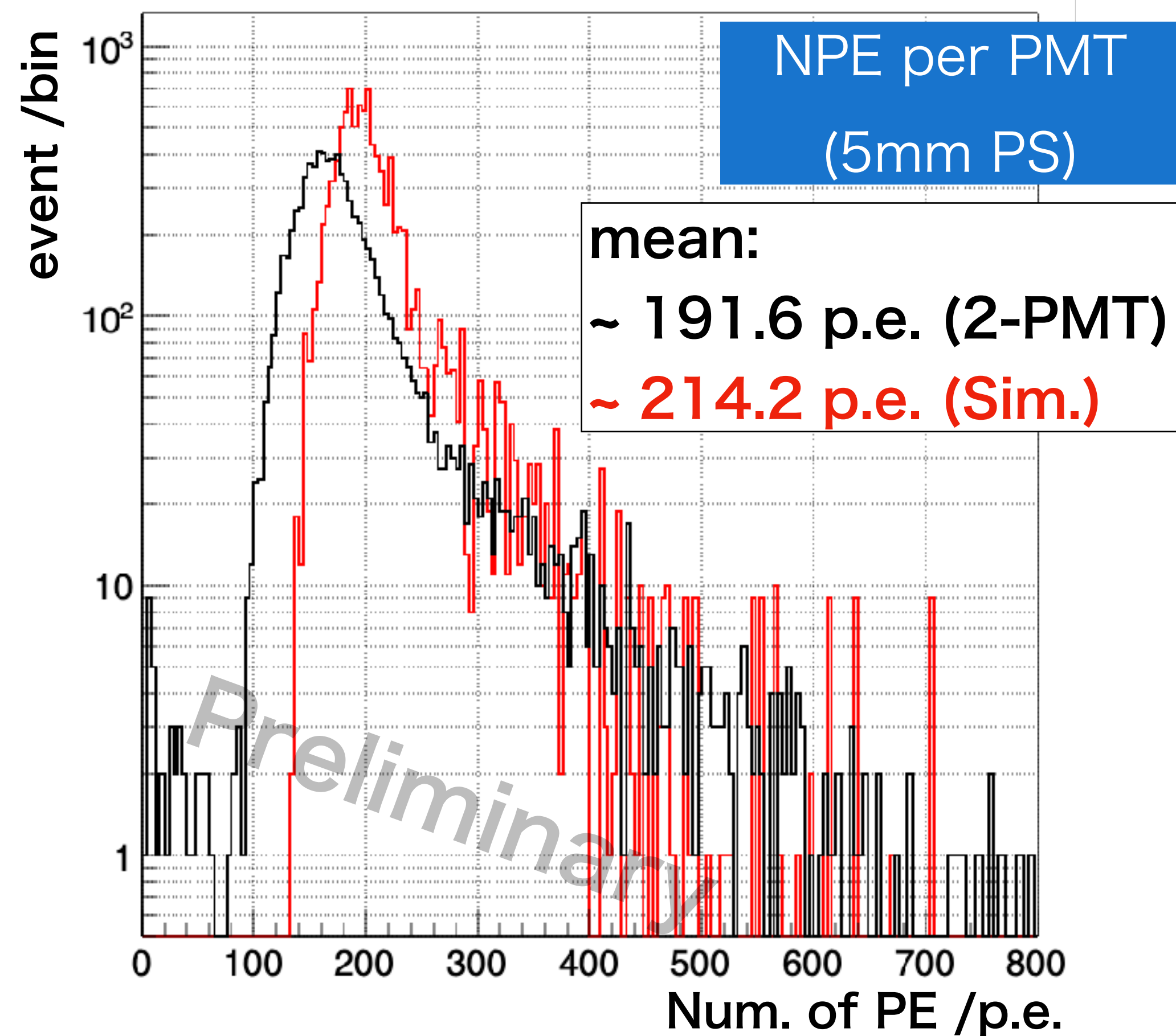
PH/Q (5mm PS Detector)



- 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

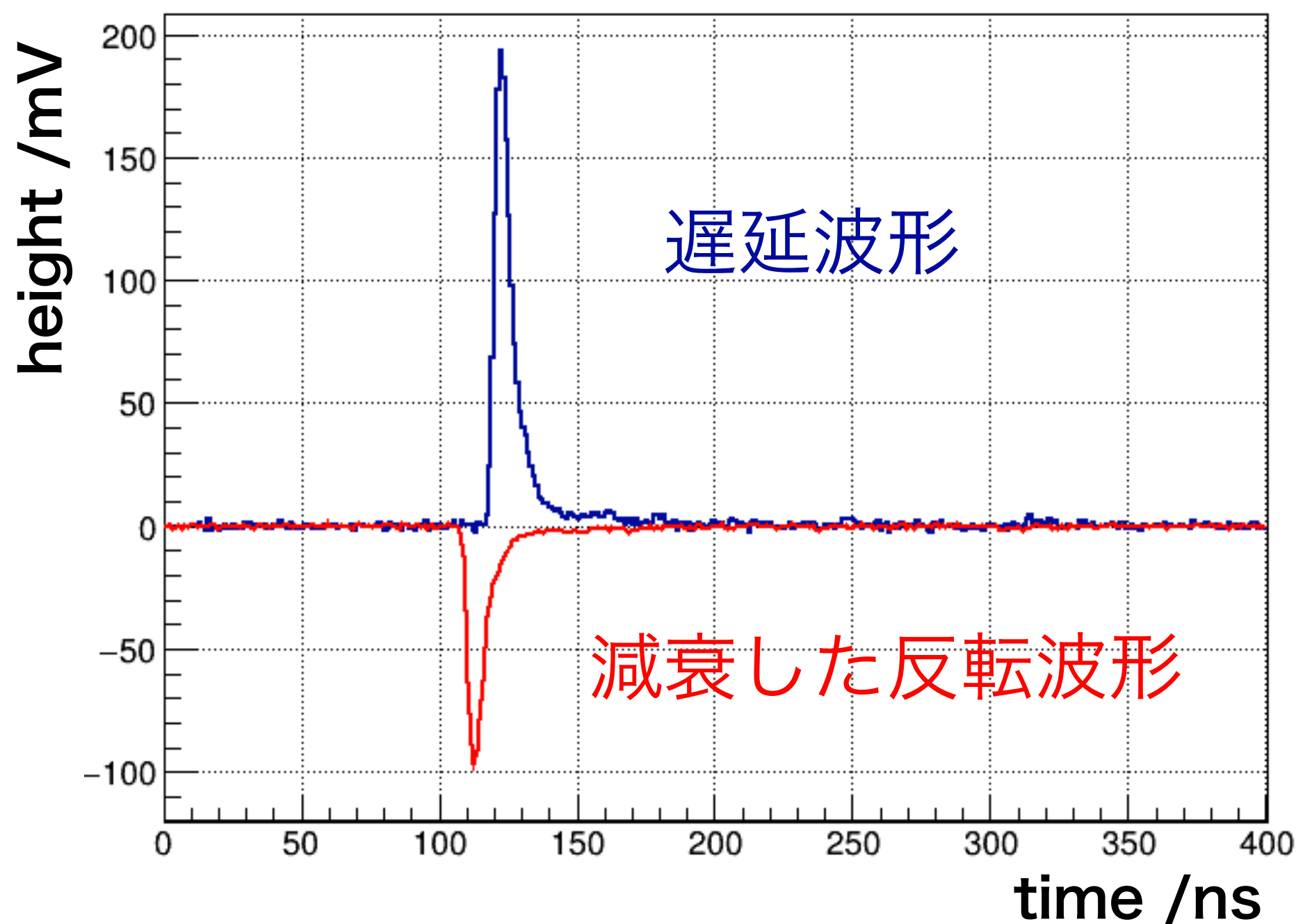
Beam Test結果：観測光量

1PMTあたりの観測光量（光子数）NPE：



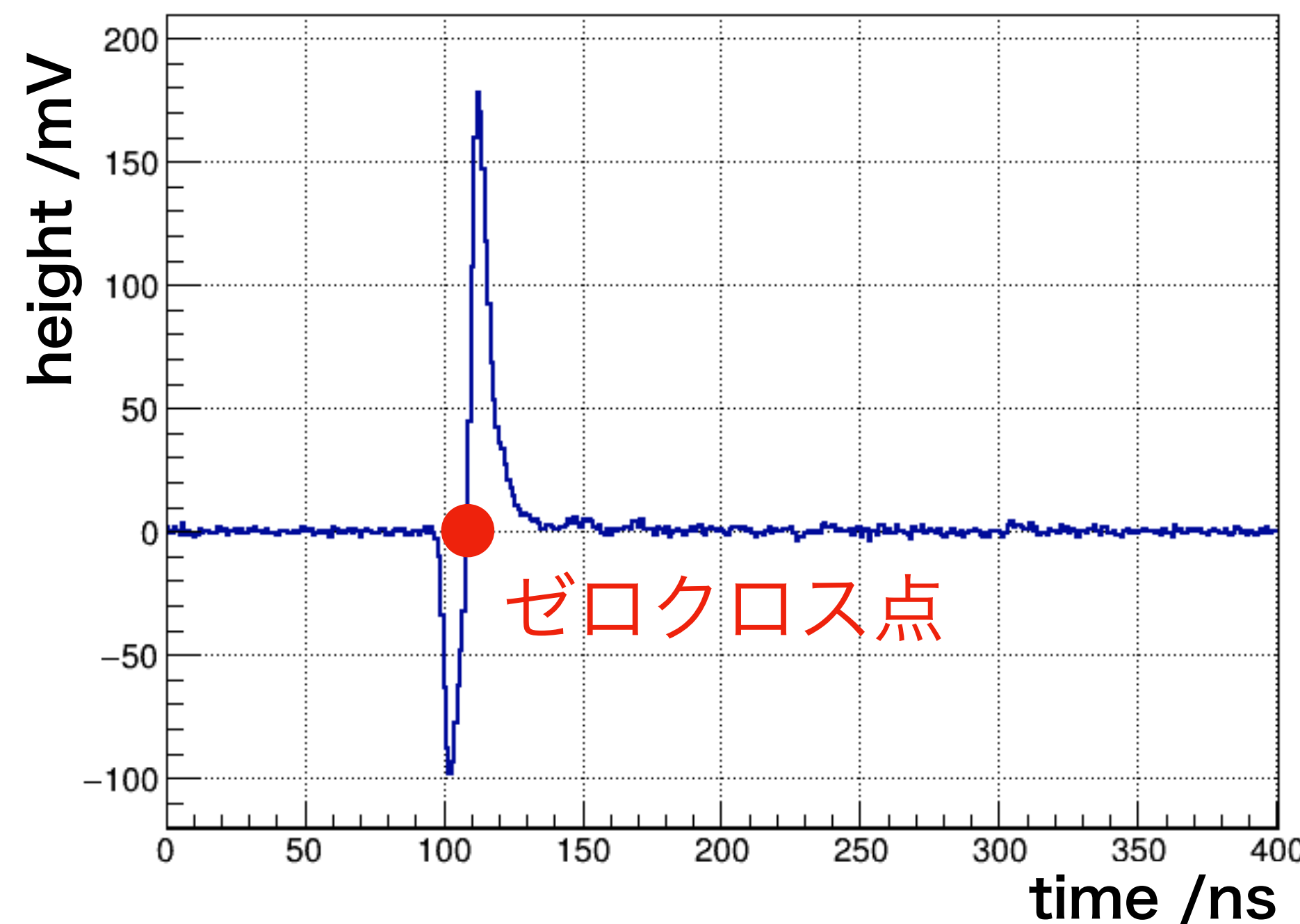
- 1 photonのChargeデータ（微弱LEDパルスで測定）より、Q分布から観測光量（NPE）に変換
- 観測光量は、MCの約89.5%（5mm検出器）、約89.2%（2mm検出器）

CFD入力



重ね合わせ

CFD波形



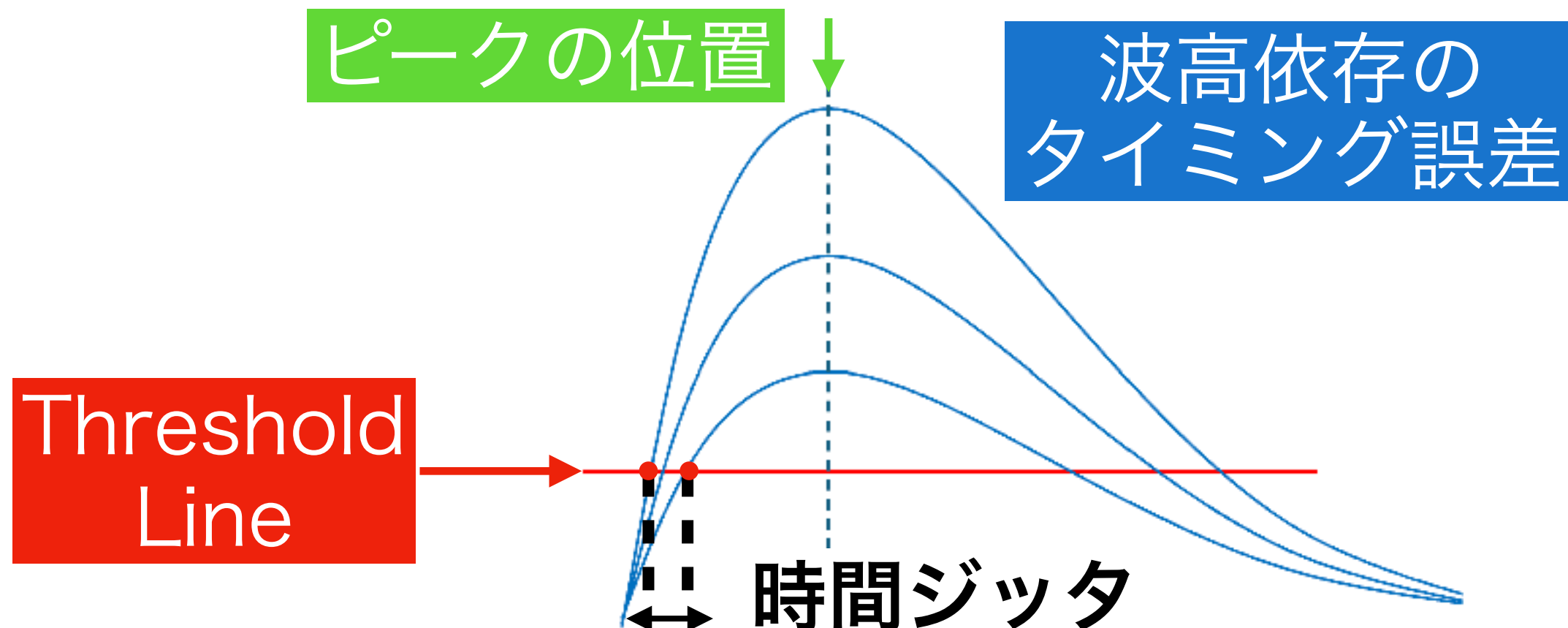
- Constant Fraction Discriminator (CFD) 法を採用し、波高値ゆらぎによる時間ジッタを低減
- CFD波形のゼロクロス点の時刻を "Hit 時間" と定義
 - 取得波形は1 GHzサンプリング
 - ゼロクロス時刻は3次スプライン補間により算出

ピーク的位置 ↓

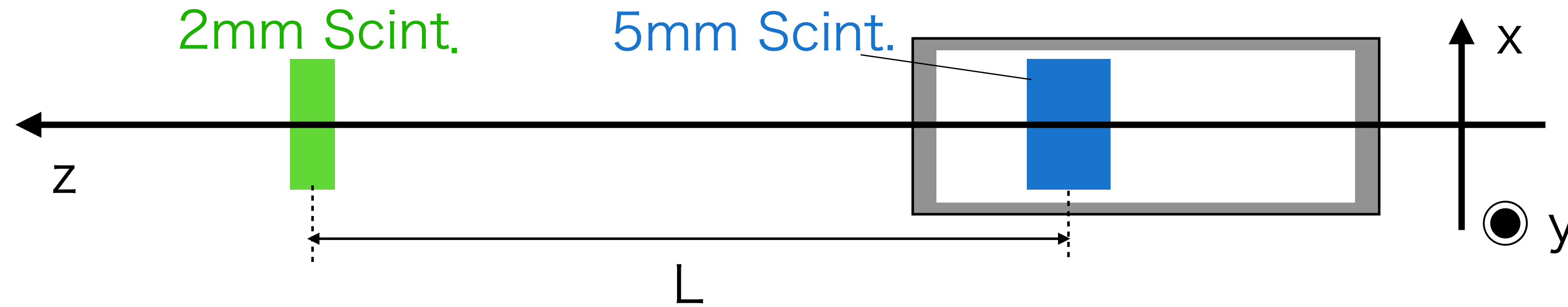
波高依存の
タイミング誤差

Threshold
Line

時間ジッタ



Beam Test結果 : TOF



- 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

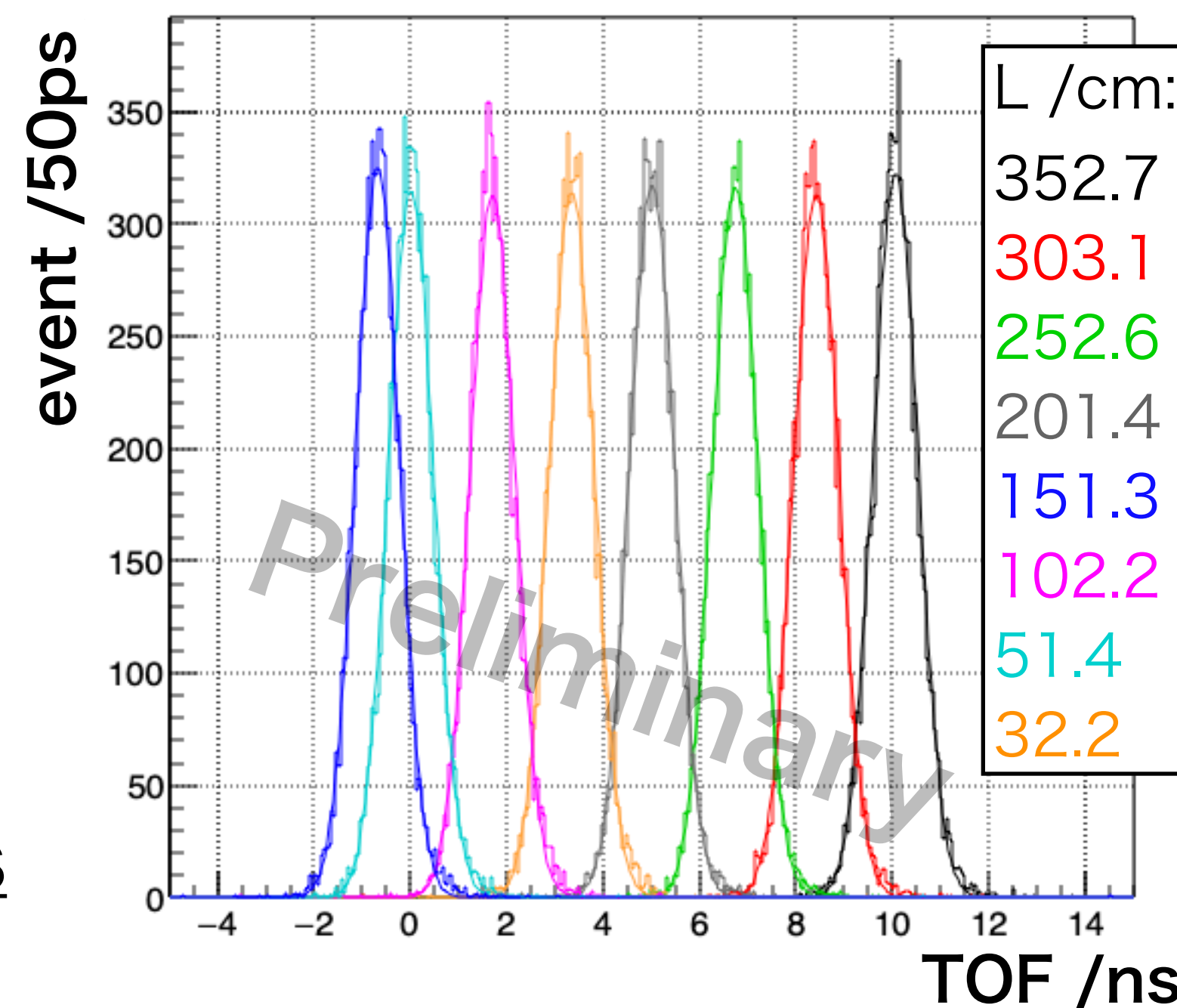
$\text{TOF} = T_{2\text{mmPS}} - T_{5\text{mmPS}}$ と定義

- TOF分布をGaussianでfit

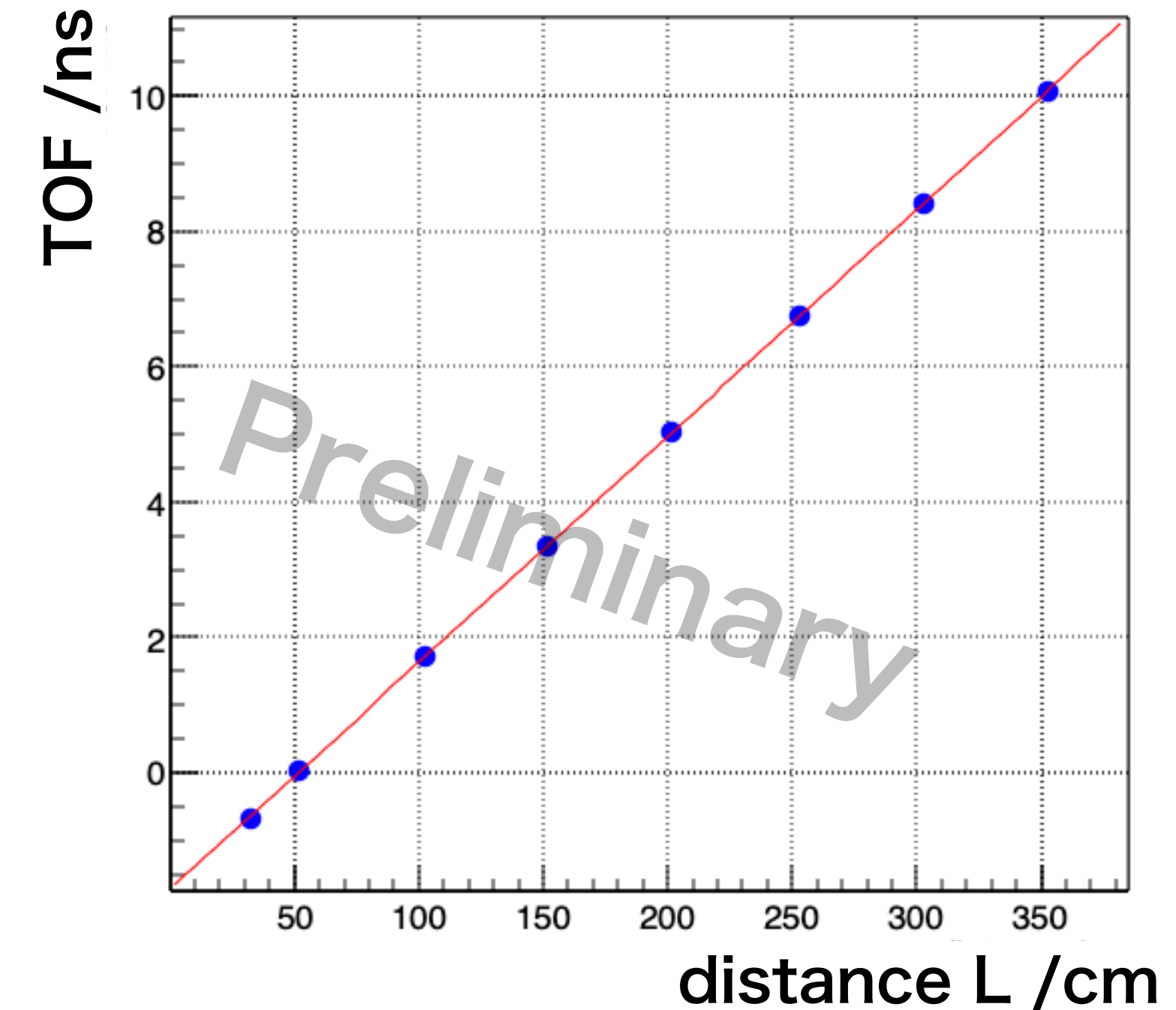
-> average $\sigma_{\text{TOF}} = 472.385 \text{ ps}$

要求値 500 ps

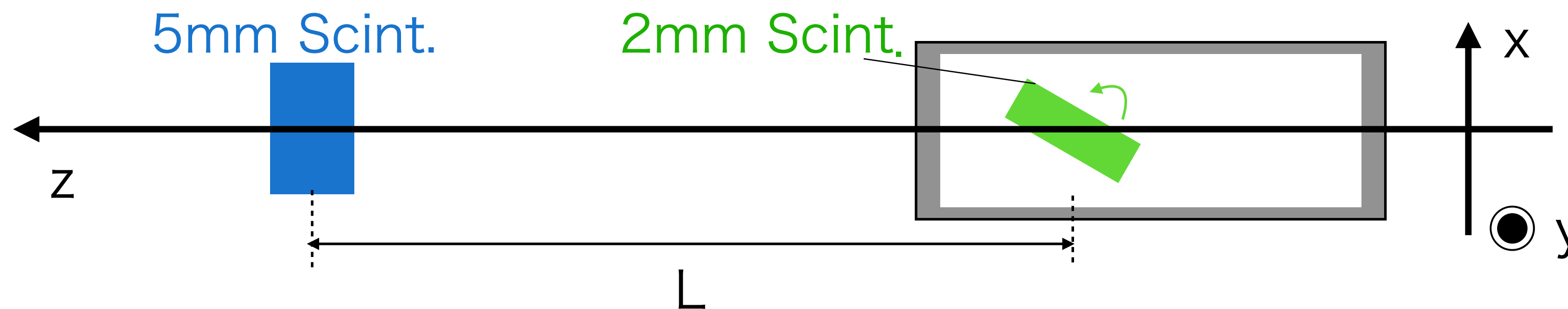
TOF分布



TOF vs L



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、 $2\sqrt{2}$ mm、4mm

2mm検出器の観測光量NPE

0° : 70.5 p.e. (基準)

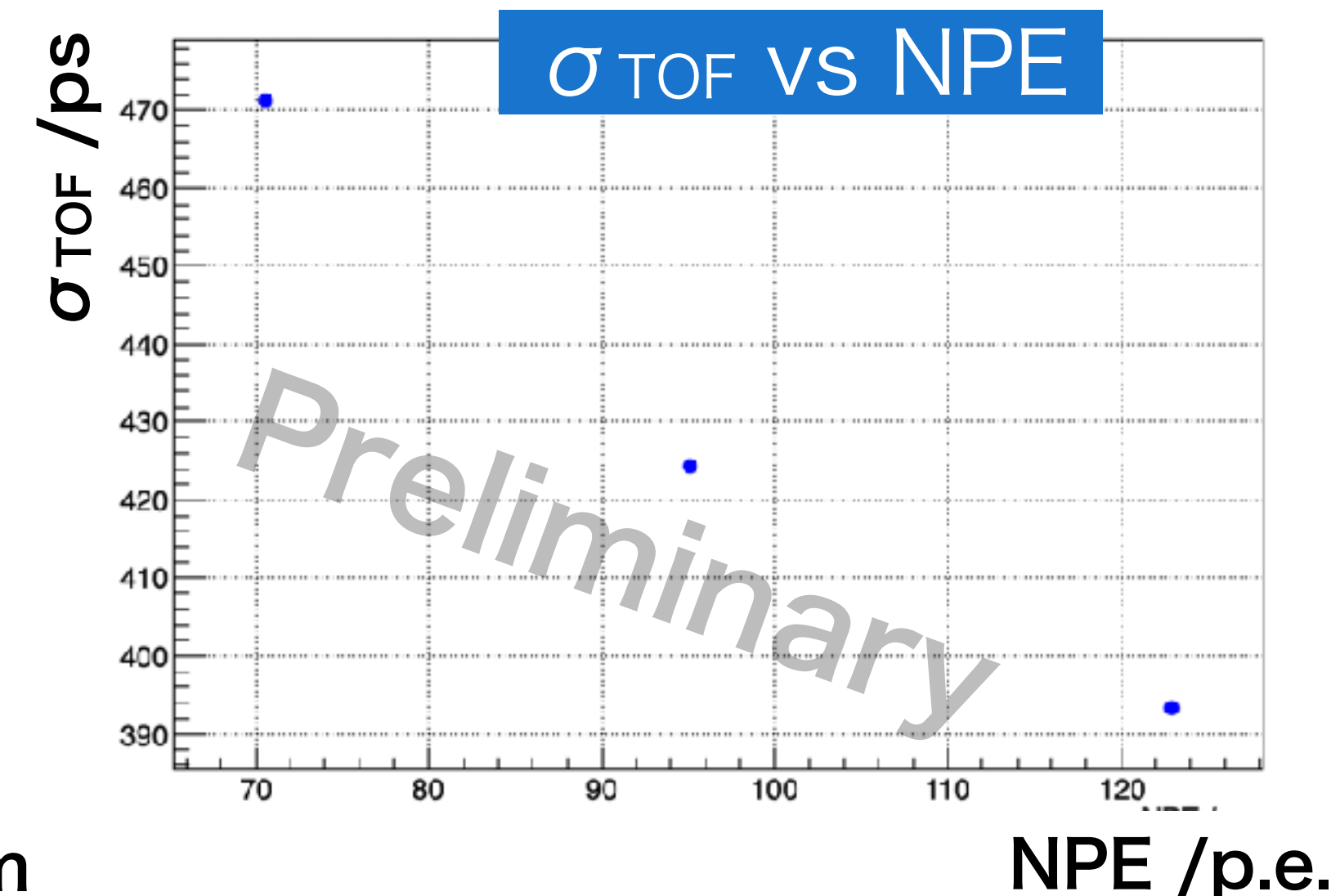
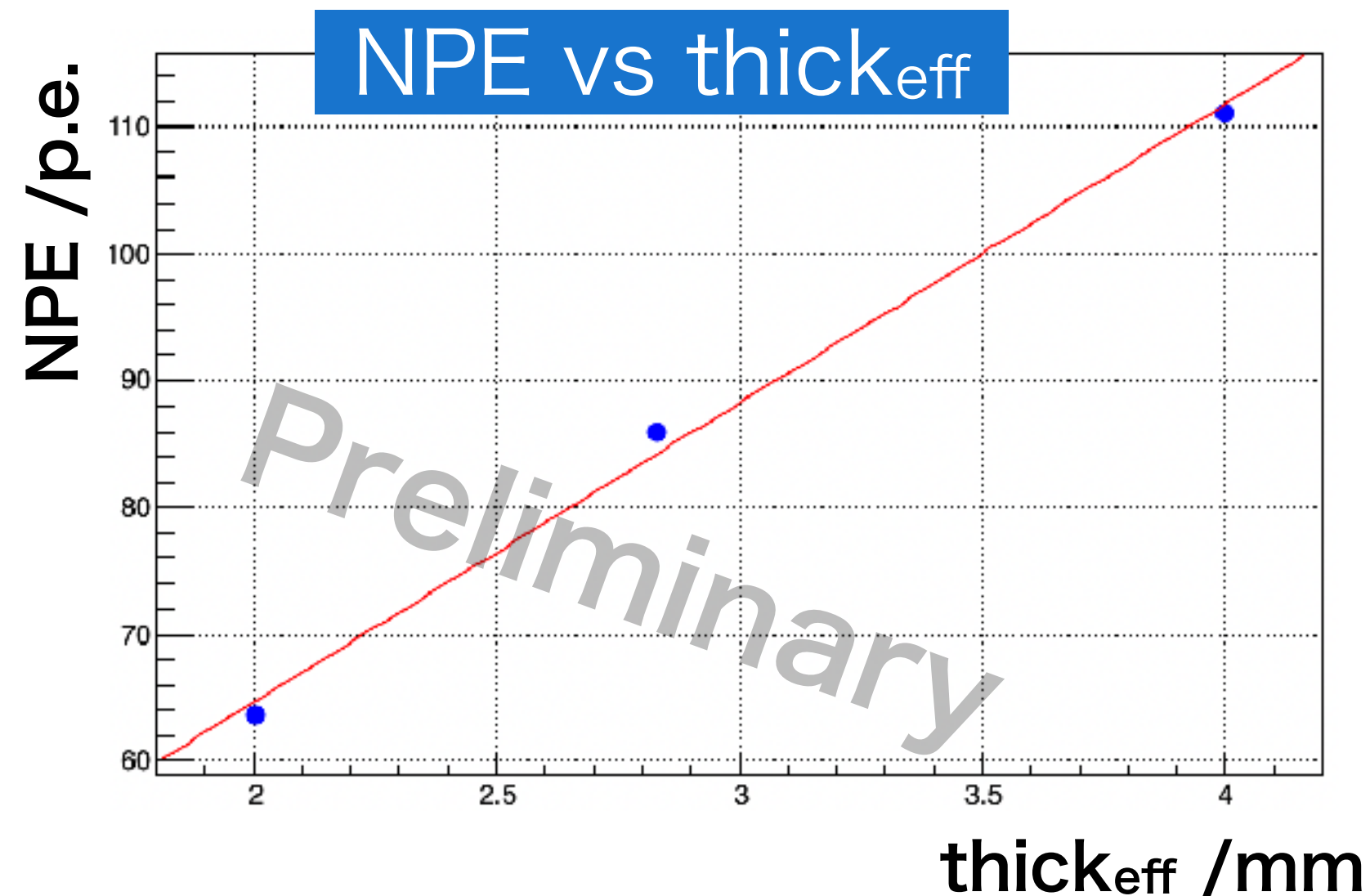
45° : 95.1 p.e. (1.35 倍)

60° : 123.0 p.e. (1.74 倍)

※ () 内は 0° に対する相対比

- 60° で $\sigma_{\text{TOF}} \sim 393 \text{ ps}$ まで改善

-> 5mm厚シンチでは、要求値を十分にクリアできる



- ・ 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
 - (2mm-5mm厚で) 要求性能 500 ps を達成した (~ 472 ps)
 - シミュレーションとの違いは現在調査中
 - 今後は、薄いシンチレータでも余力性能を持たせられるよう、引き続き開発を進めていく
 - > 現在、4-PMT読みだし型の検出器を製作している

Backups

Motivation - T2K Experiment (Example)

Kamioka

Tokai

スーパーカミオカンデ

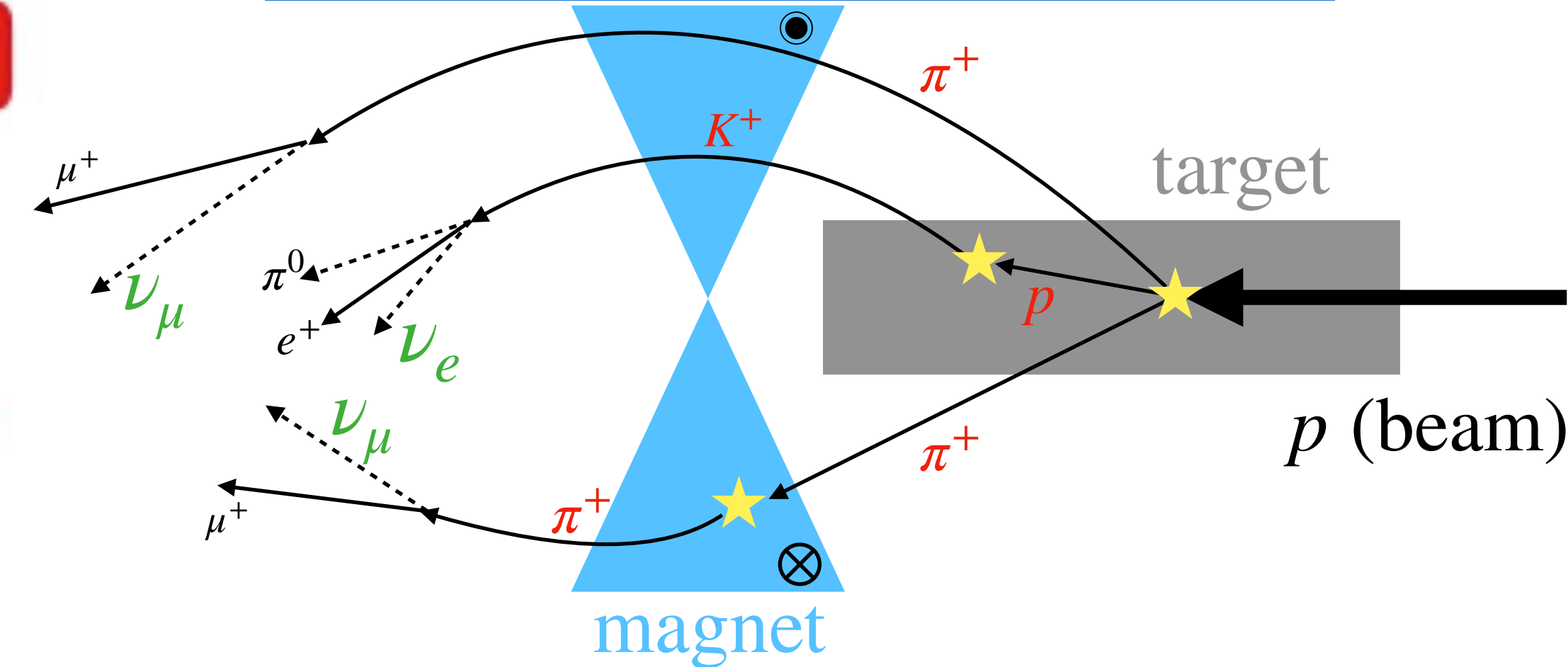
前置検出器

J-PARC



$\nu_e / \bar{\nu}_e$ ← $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$

Beam - Target Interaction



- Measure ν oscillation
- ν generated by hadron decay

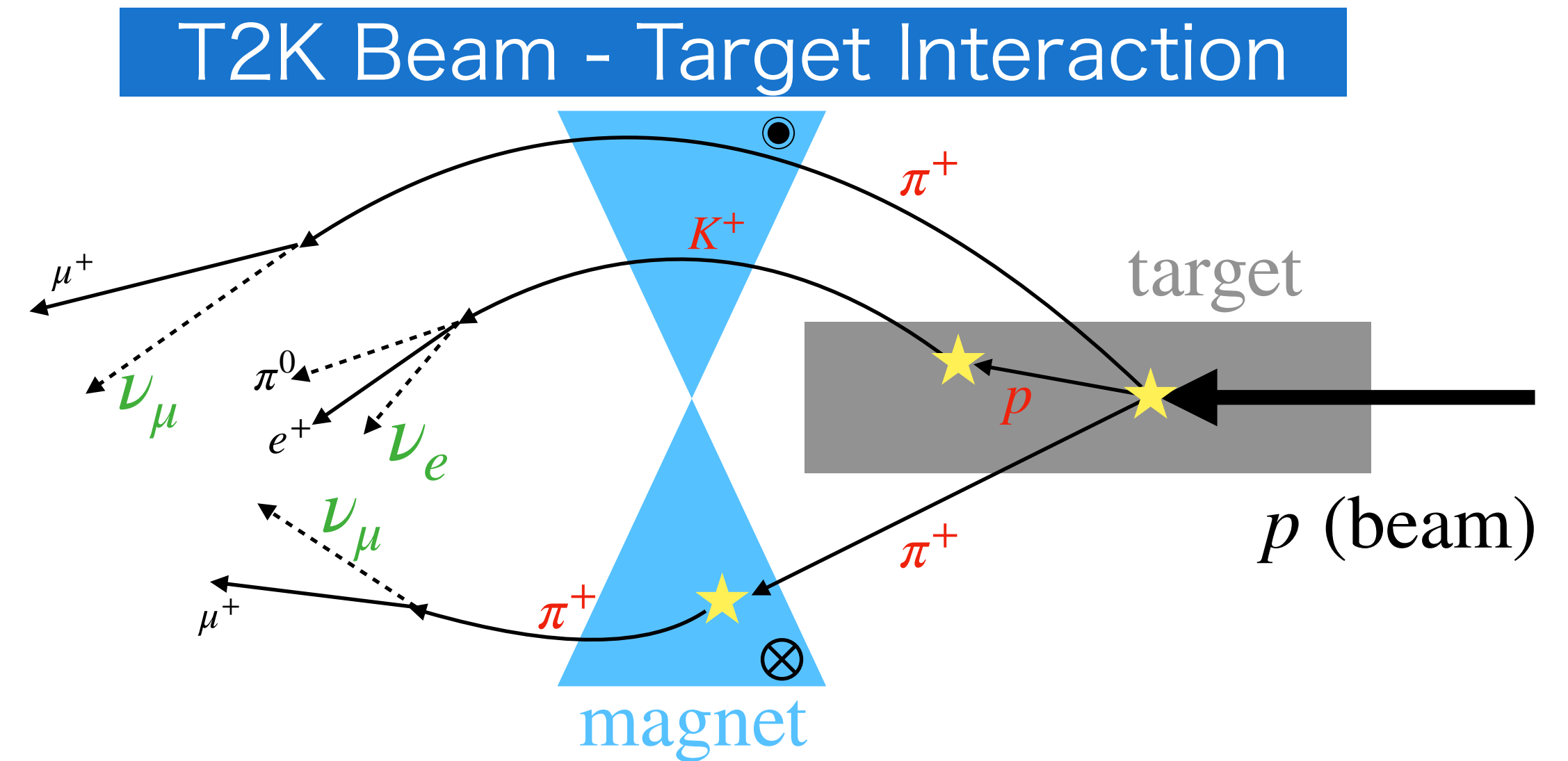
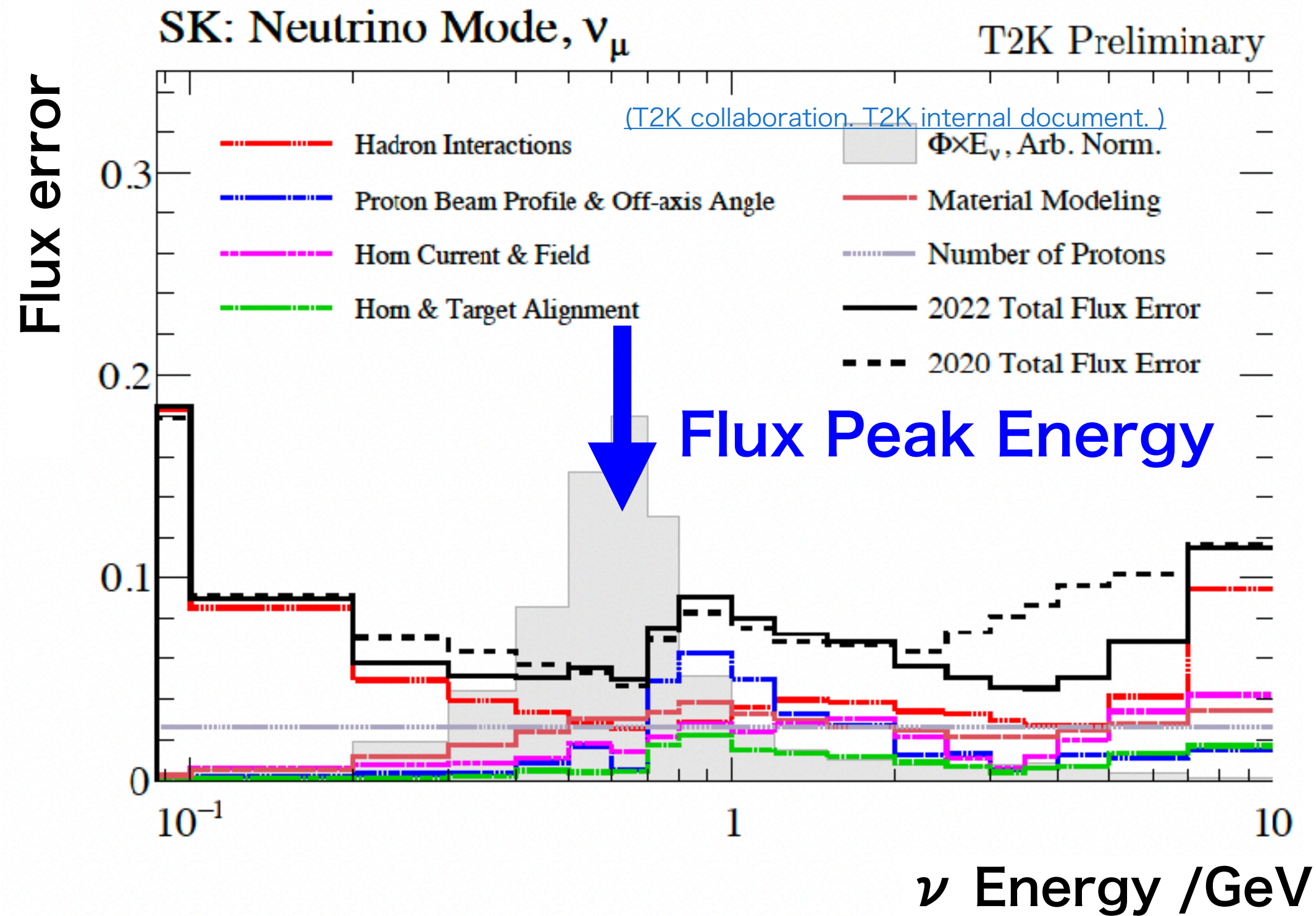
For ν flux prediction,

Understand **Hadron Production & Interaction** is very Important

Motivation - T2K Experiment (Example)

Past Results of NA61/SHINE

ν Flux Error

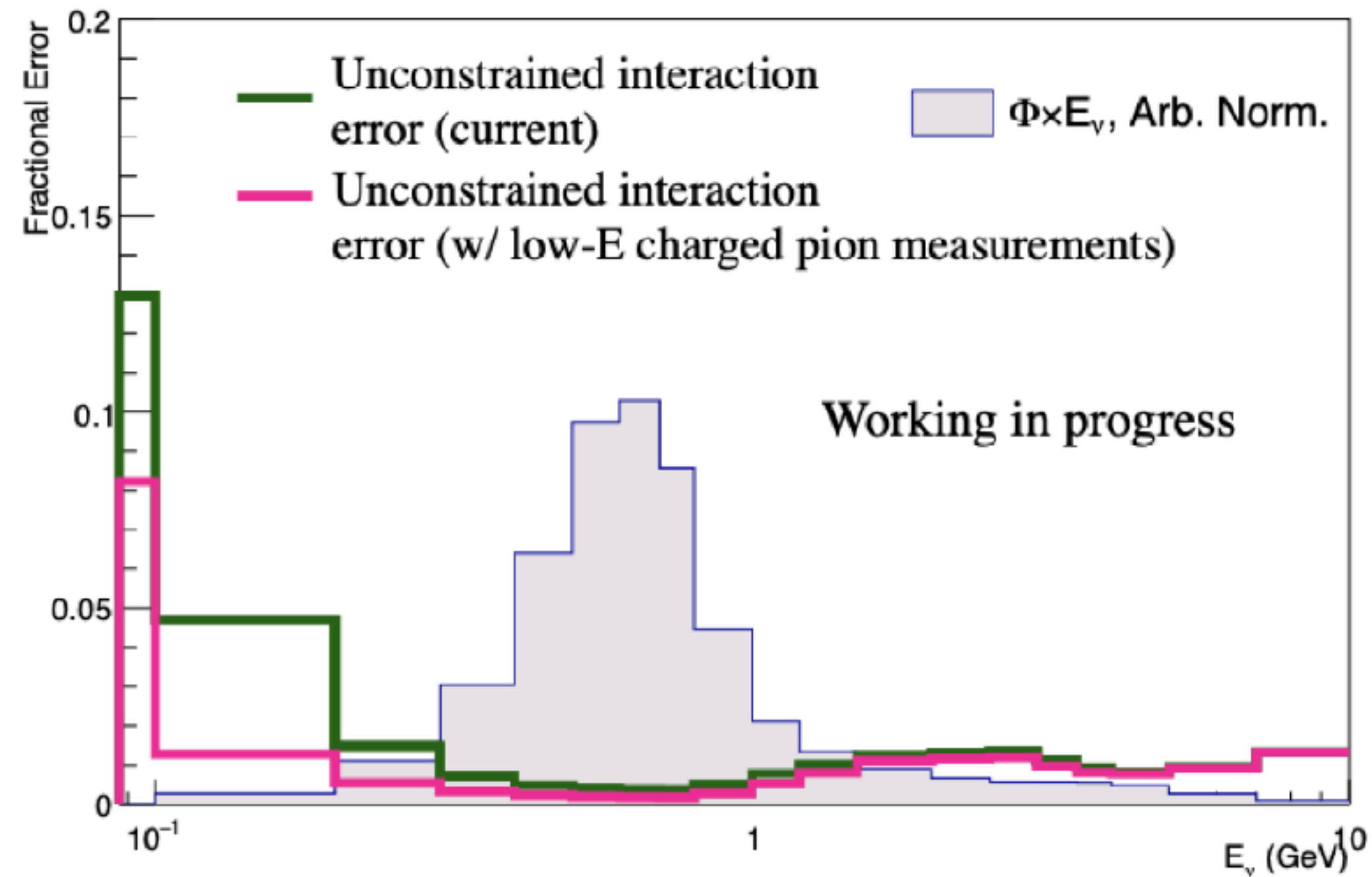


- Achieve: ν flux error down to 5% (peak)
- Future: Improve Large flux error at Low-Energy

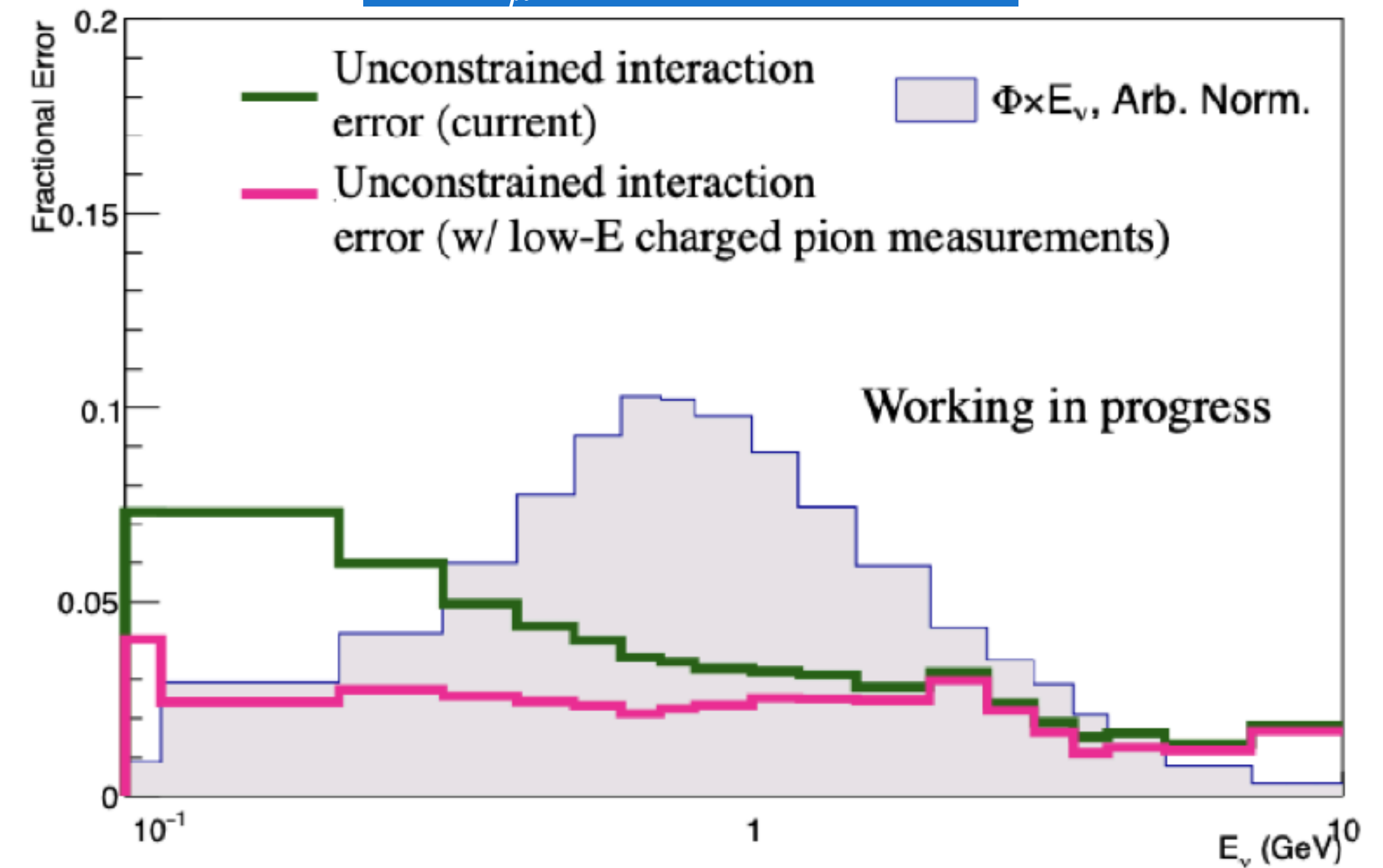
Hadron Production & Interaction data needed

Motivation - T2K Experiment (Example)

ν_μ Flux Error



$\bar{\nu}_\mu$ Flux Error

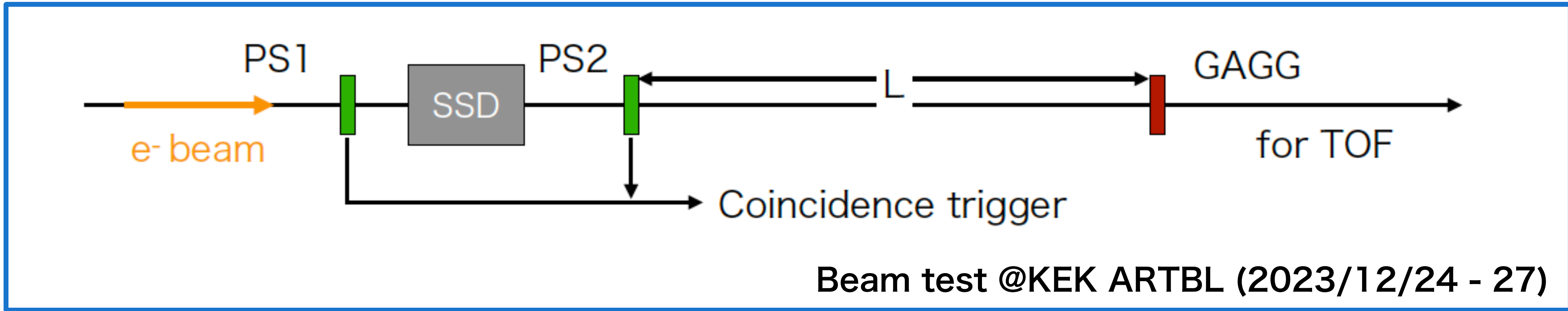


[Y. Nagai. "Additional Information concerning the Low Energy Beam project", \(2022\).](#)

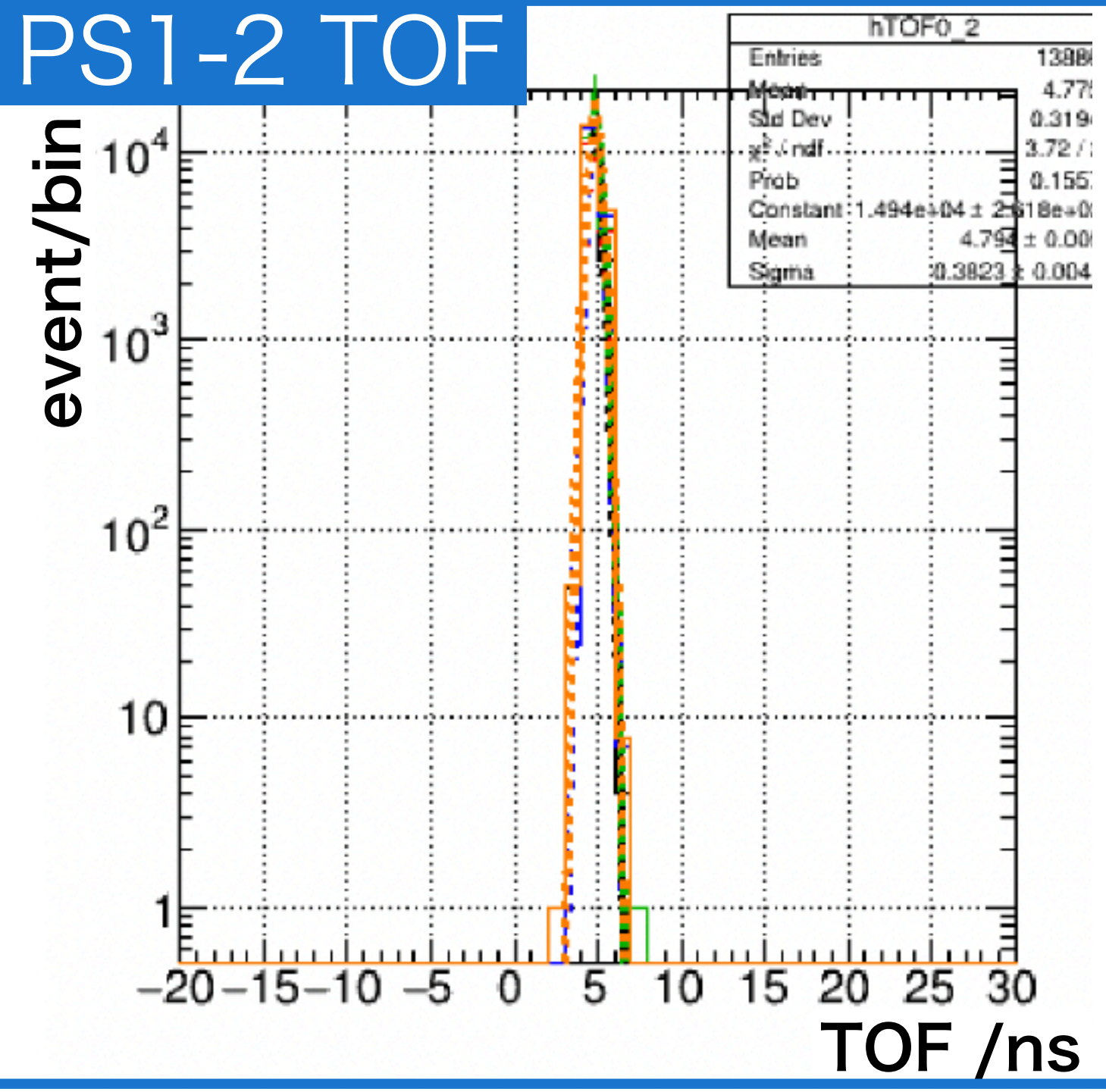
Expected Improvement of the unconstrained interaction in the T2K near detector
(Under assumption of Charged Pion Interaction measurements at the Low-E beamline)

Without -> **With** NA61/SHINE Low-E Beamline Data

過去のビームテスト



プラスチック
シンチレータ



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

シミュレーション波形の生成

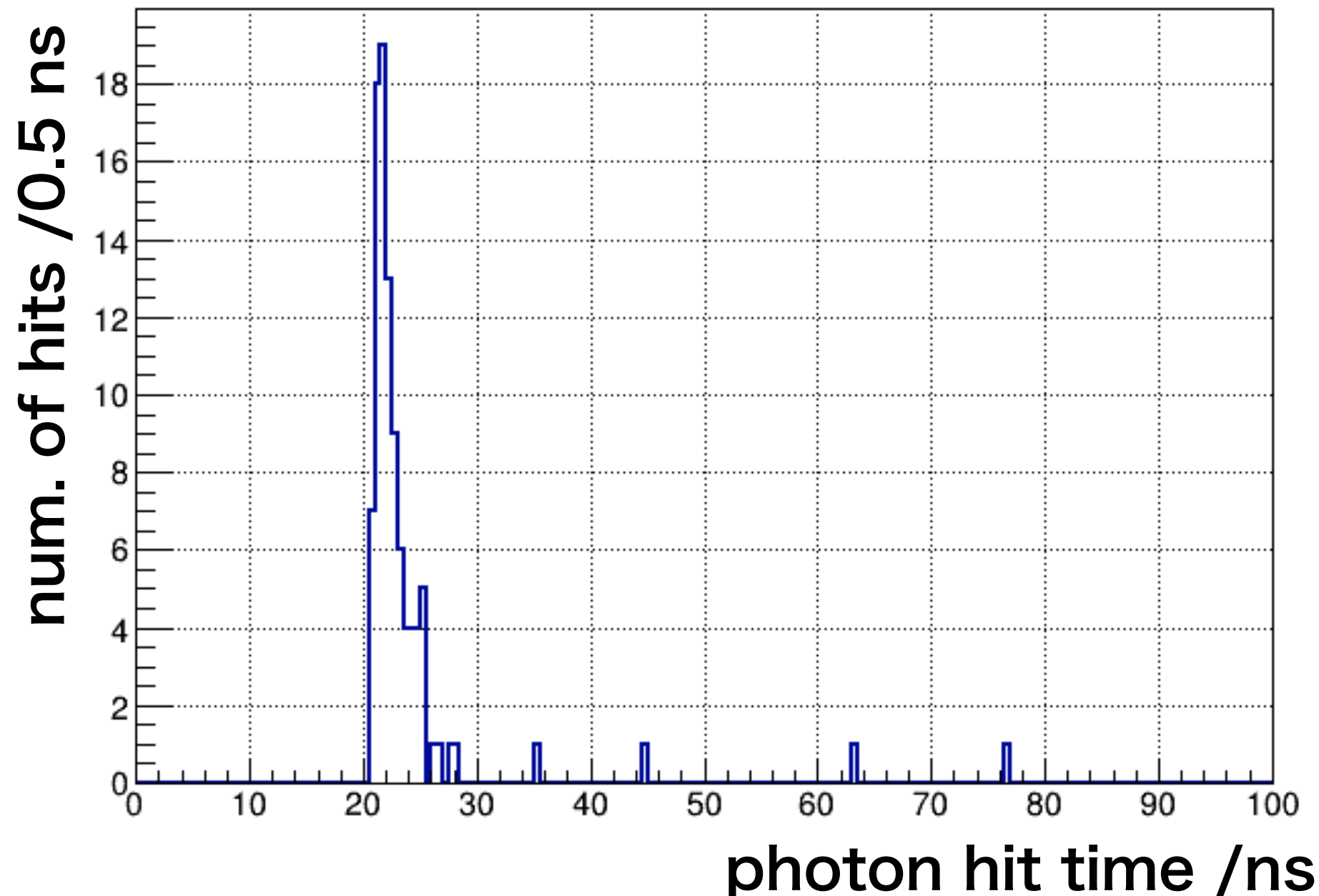


シミュレーション開始 (t = 0)



PMT光電面到達 (t = Photon Hit Time)

Photon Hit Time

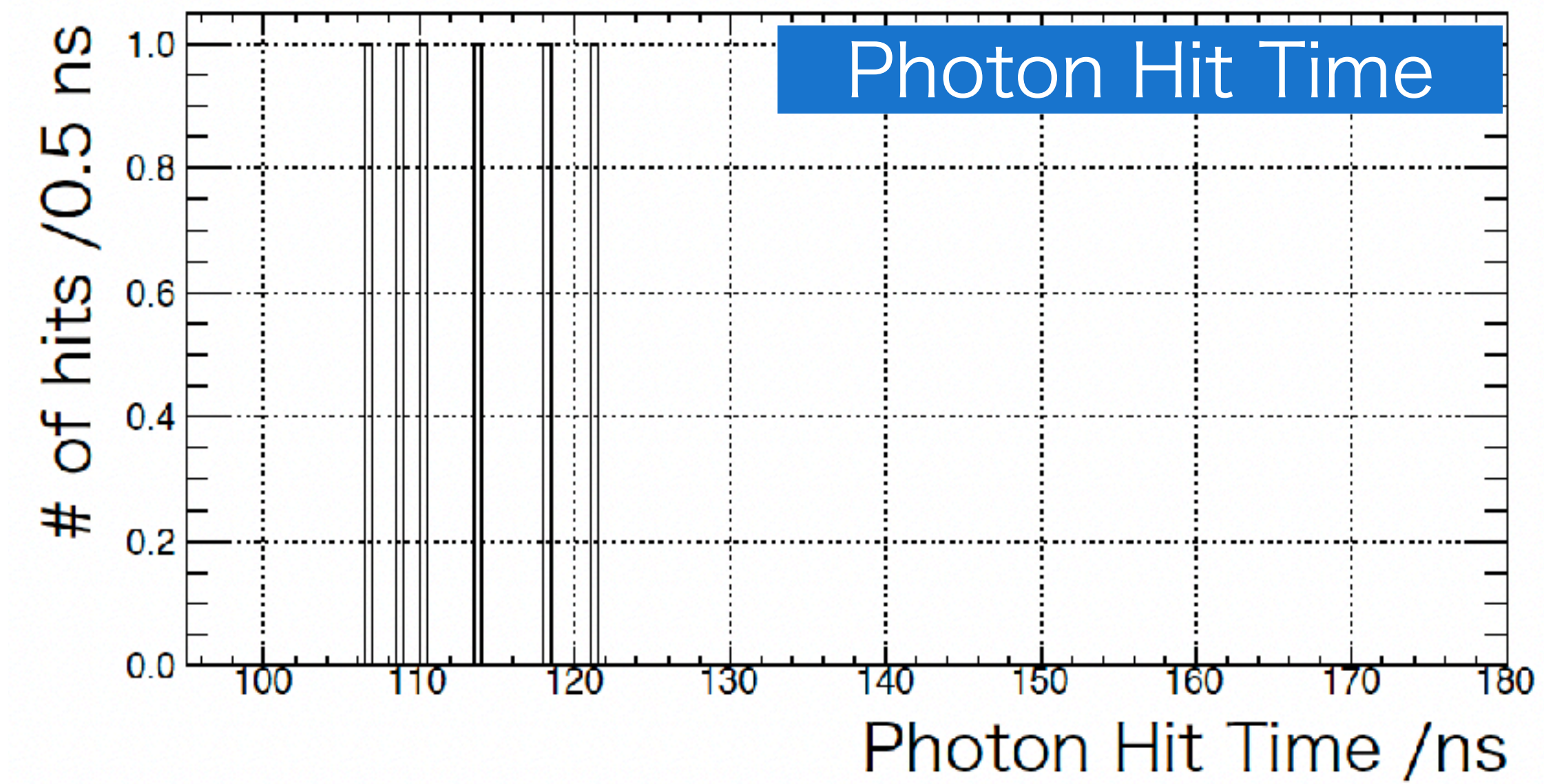


- Photon Hit Time = PMT光電面への到達時間
- PMT内部の走行時間ゆらぎは、後から付加

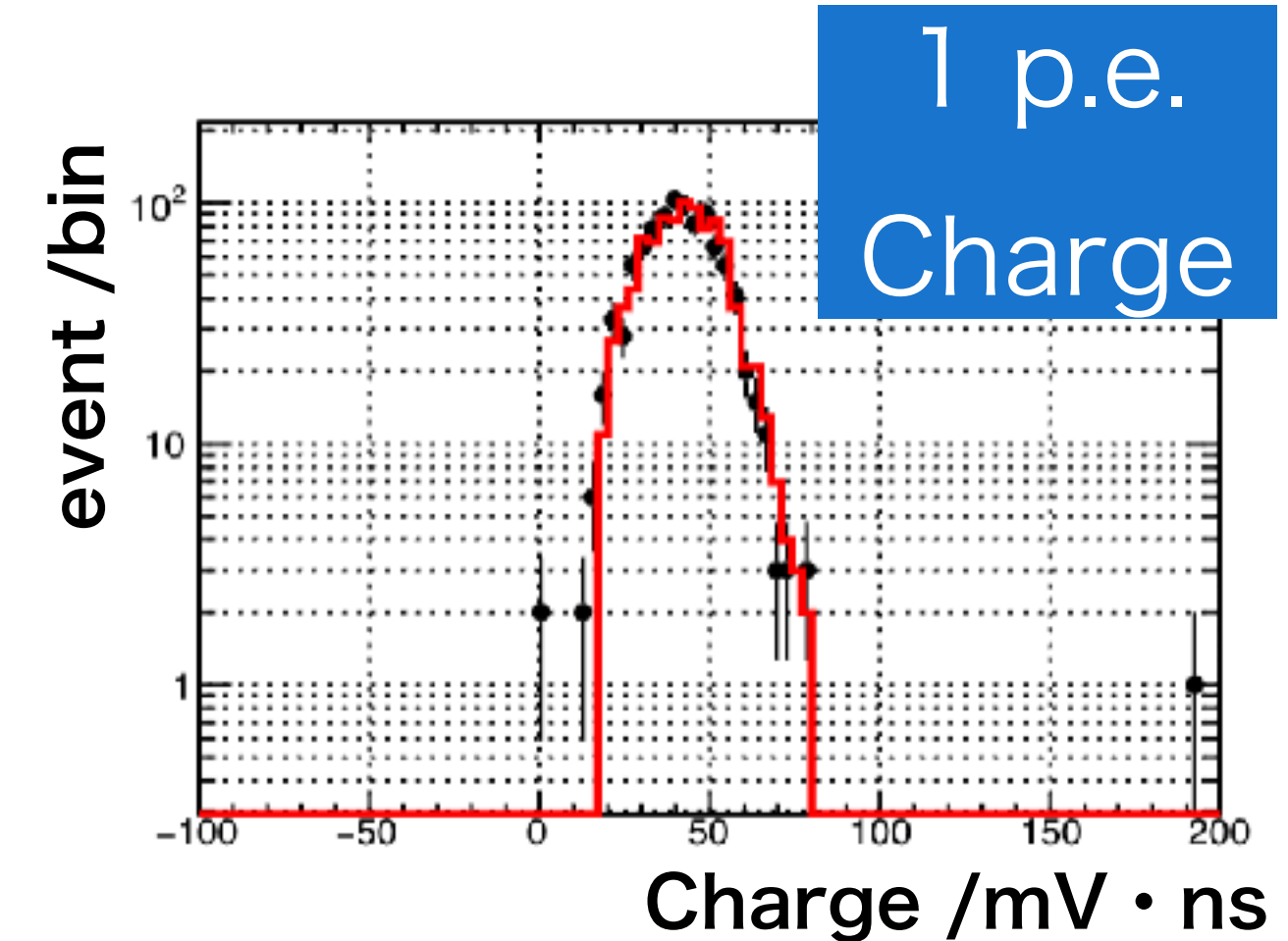
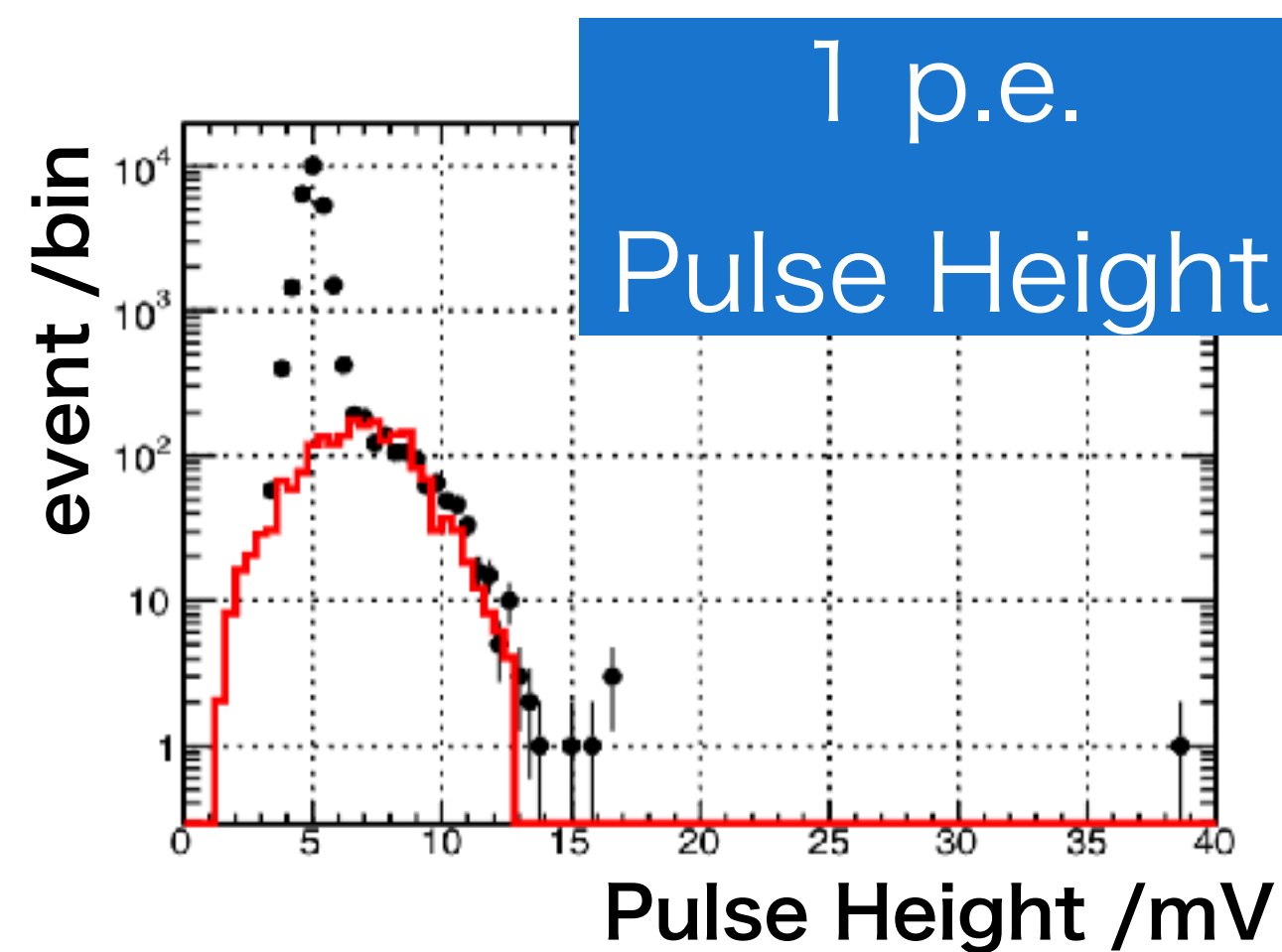
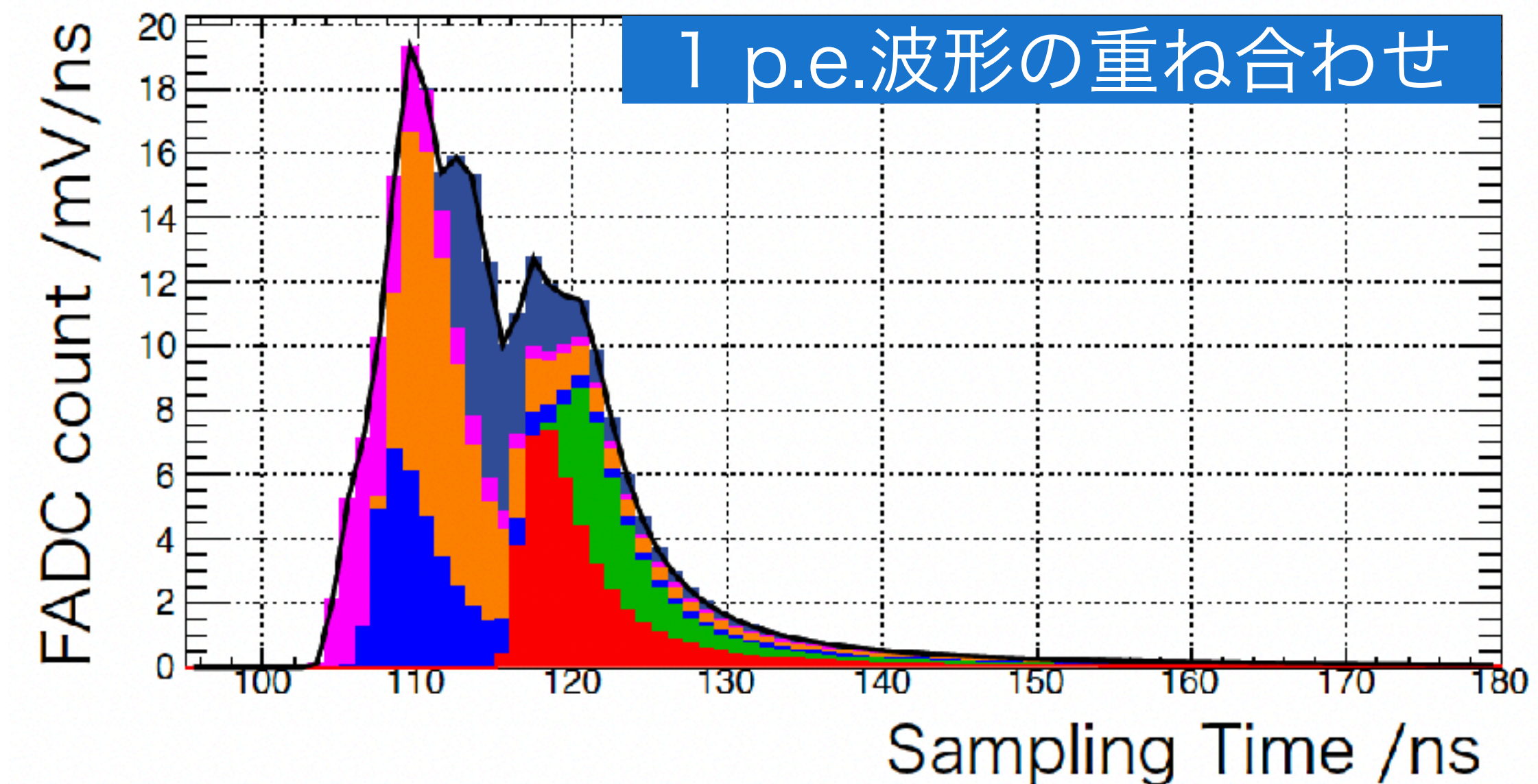
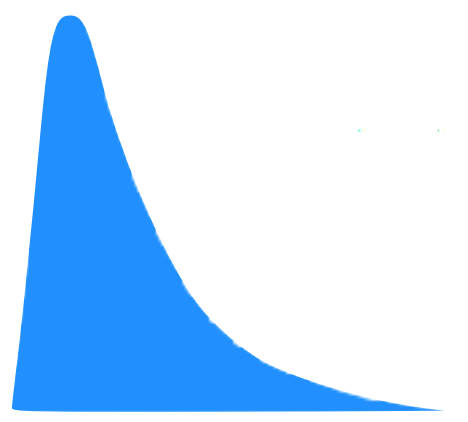
```
double tpe = HitT[ich][i]; //ns
pehit[ich][i] = tpe;
tpe += rand0.Gaus(tt, tts) + 100.; //ns
```

-> この 'tpe' が、各光子の到達時間

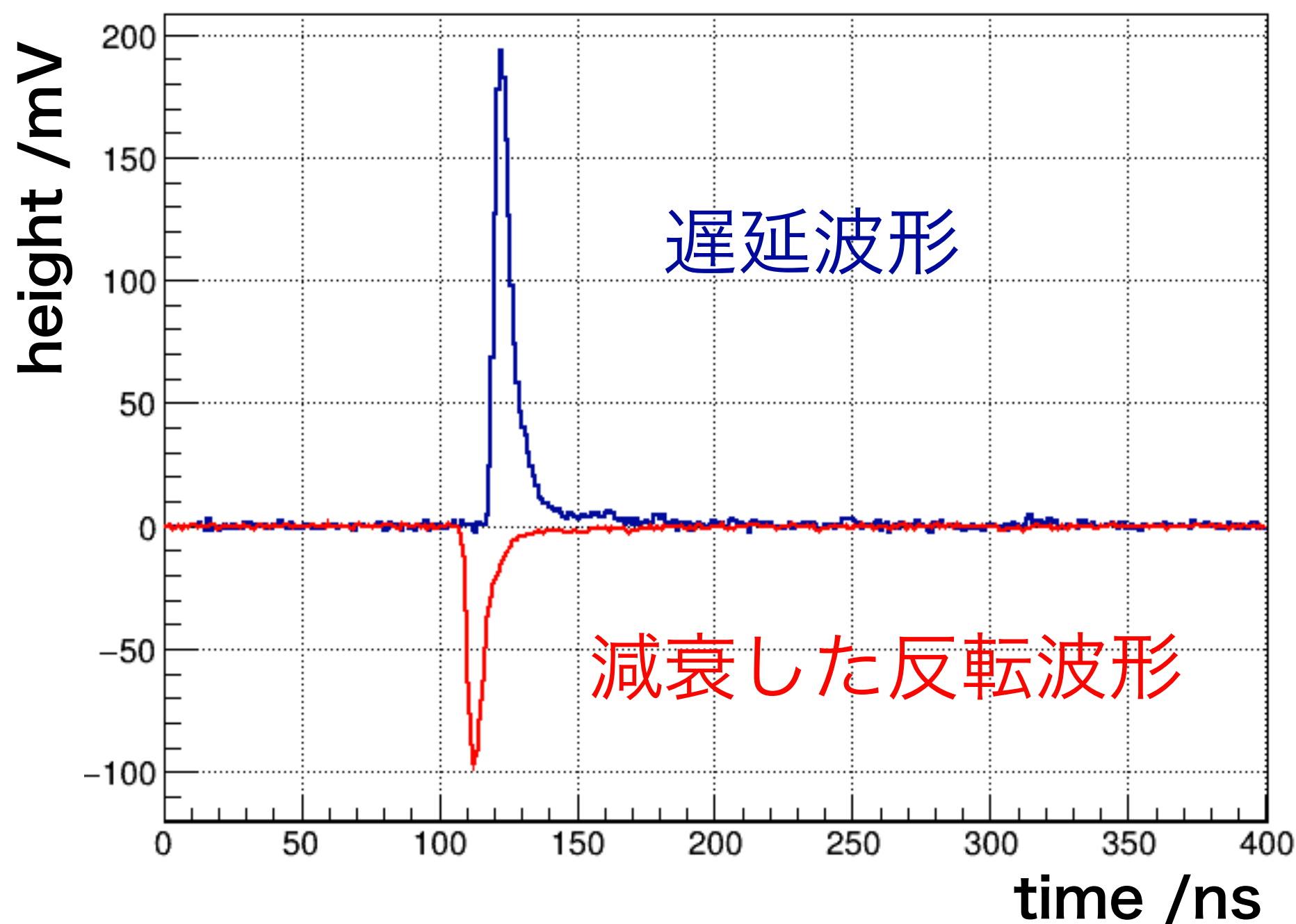
シミュレーション波形の生成



- Photon Hit TimeにPMTのTTSを考慮した到達時間に従って、1 p.e.波形を重ね合わせる
- 1 p.e.波形はLandau関数でモデル化
 - 高さ は実測の波高値分布に基づいて決定
 - 形状 は実測のチャージ分布に基づいて決定
- これを (1event の) 観測光子数分、重ね合わせる

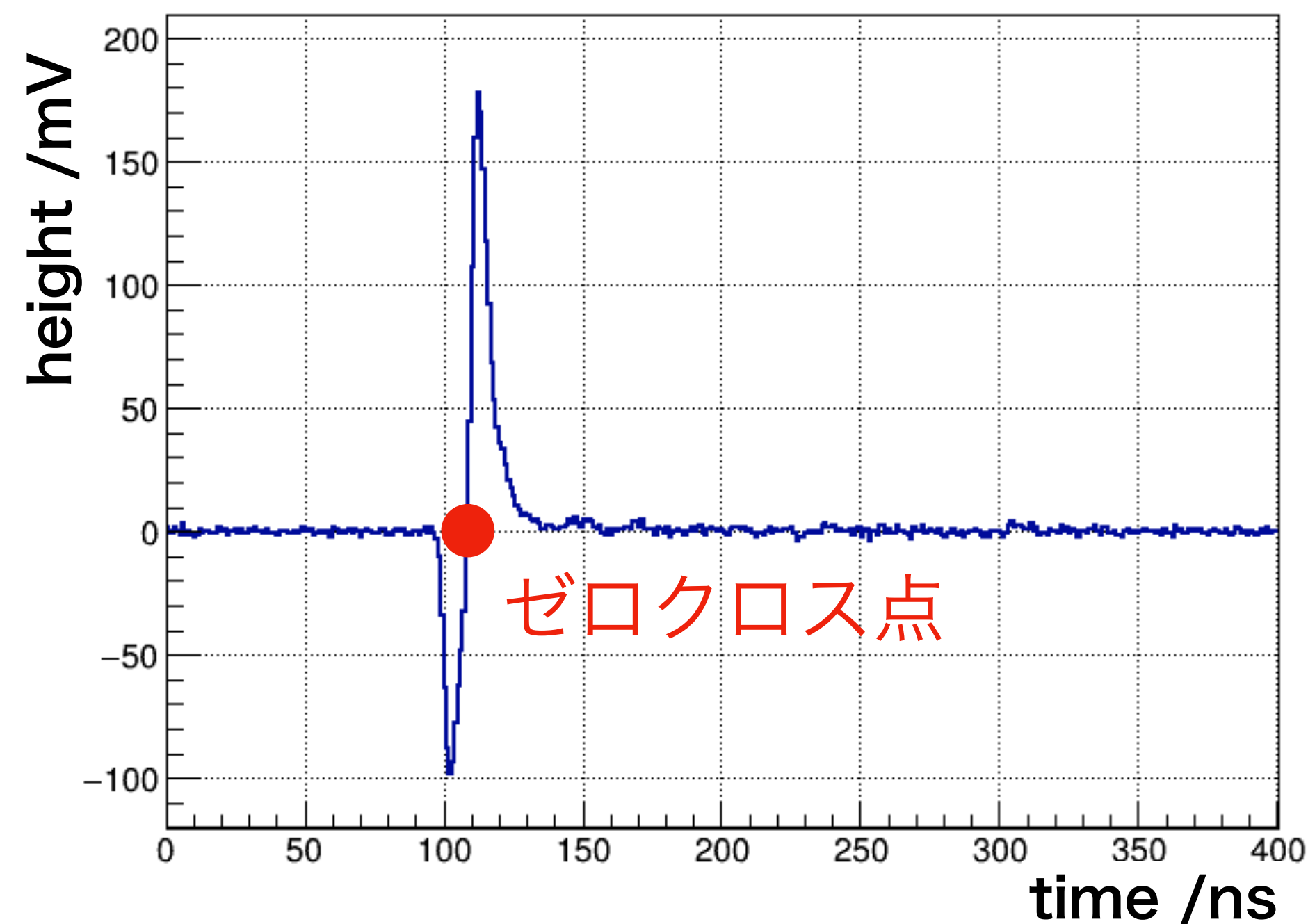


CFD入力



重ね合わせ

CFD波形



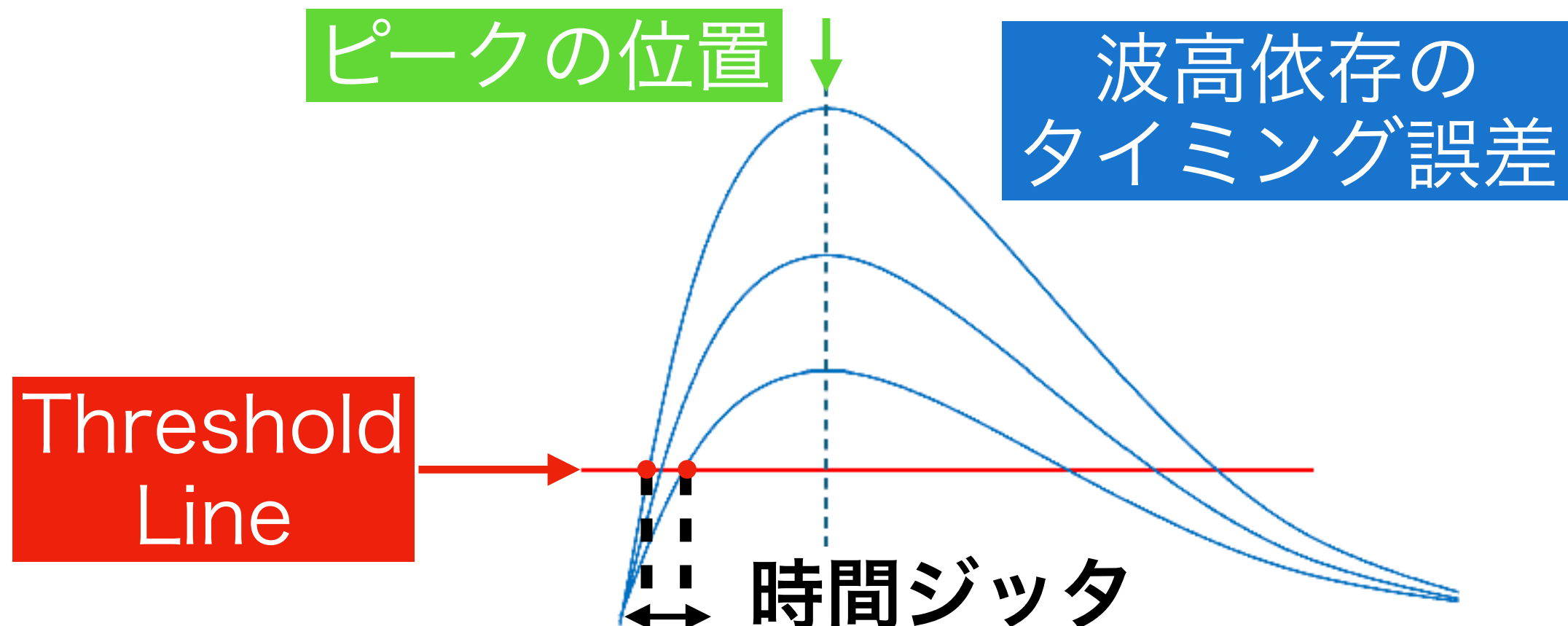
- Constant Fraction Discriminator (CFD) 法を採用し、
波高値ゆらぎによる時間ジッタを低減
- CFD波形のゼロクロス点の時刻を "Hit 時間" と定義
 - 取得波形は1 GHzサンプリング
 - ゼロクロス時刻は3次スプライン補間により算出

ピーク的位置 ↓

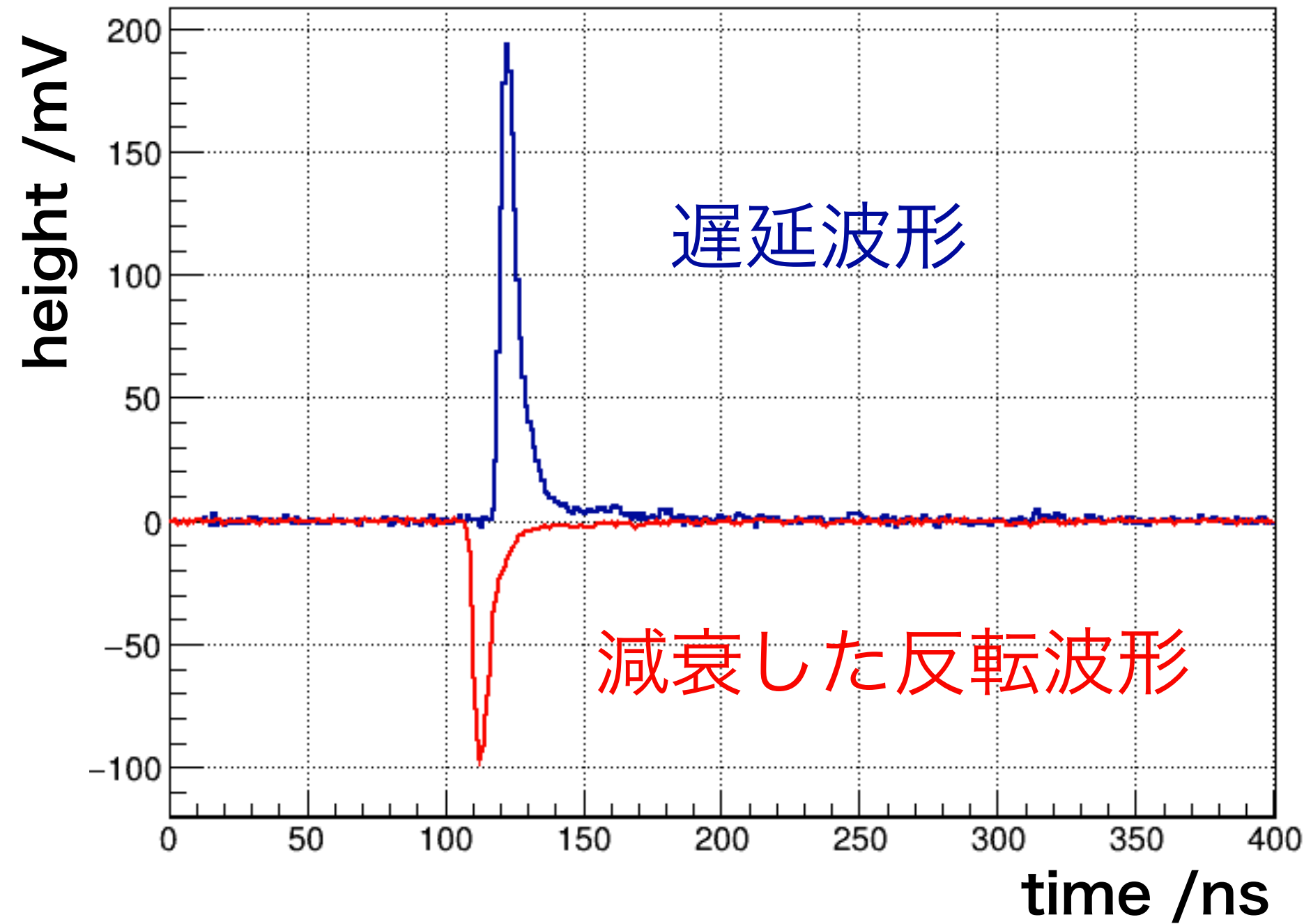
波高依存の
タイミング誤差

Threshold
Line

時間ジッタ

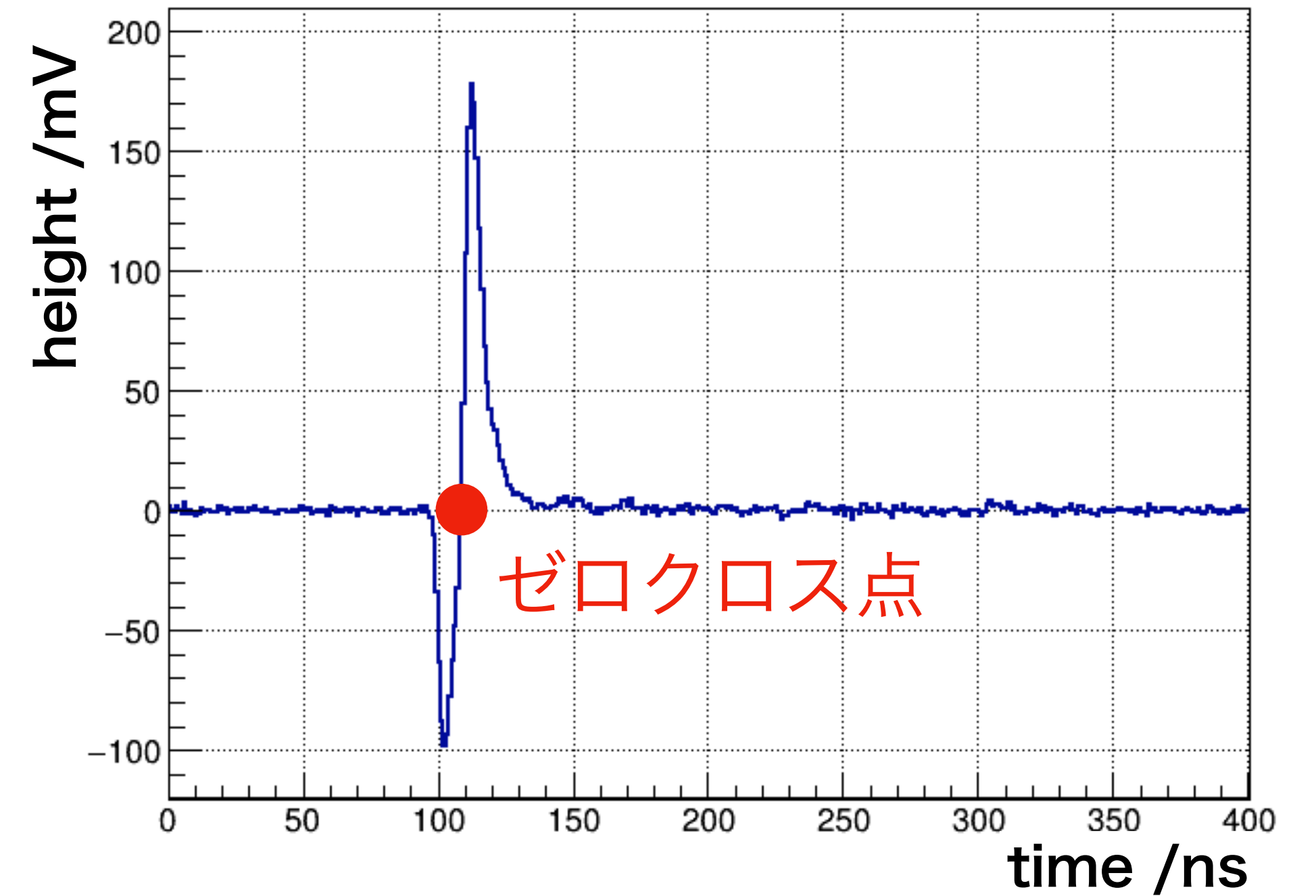


CFD入力



重ね合わせ

CFD波形



立ち上がり直後を線形近似

$$V(t) \propto \underbrace{A}_{\text{振幅}} \cdot (t - t_0)$$

※線形近似ができるような立ち上がり時刻

$$V_{\text{CFD}}(t) = V_{\text{delayd}}(t) - V_{\text{scaled}}(t)$$

$$= V(t - \Delta t) - \alpha V(t)$$

遅延時間 減衰割合

$$\approx A \cdot (t - t_0 - \Delta t) - \alpha A \cdot (t - t_0)$$

$$= A(1 - \alpha)(t - t_0) - A\Delta t$$

$$V_{\text{CFD}}(t_{\text{hit}}) = 0$$

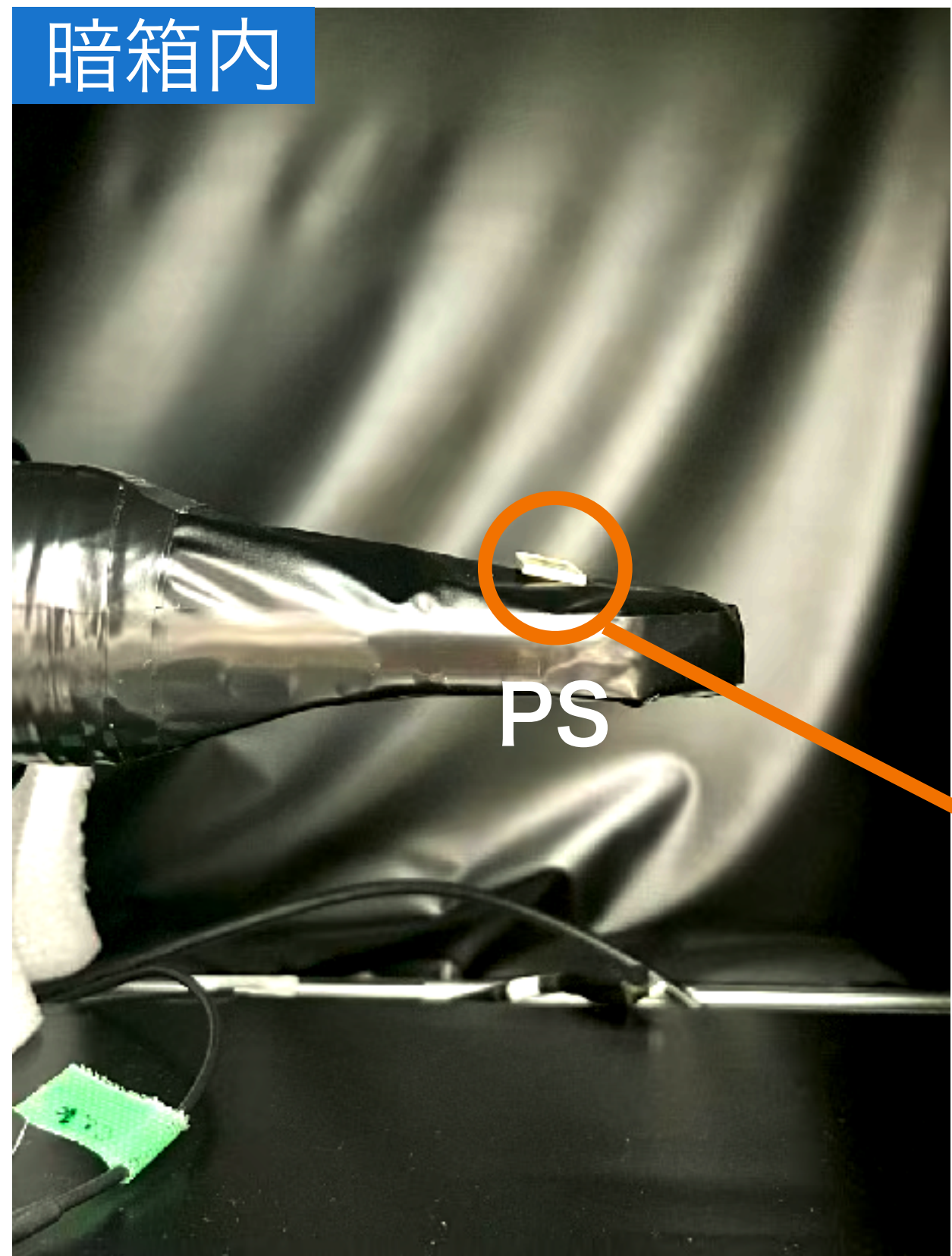
$$t_{\text{hit}} = t_0 + \frac{\Delta t}{1 - \alpha}$$

MC Tuning (線源測定)

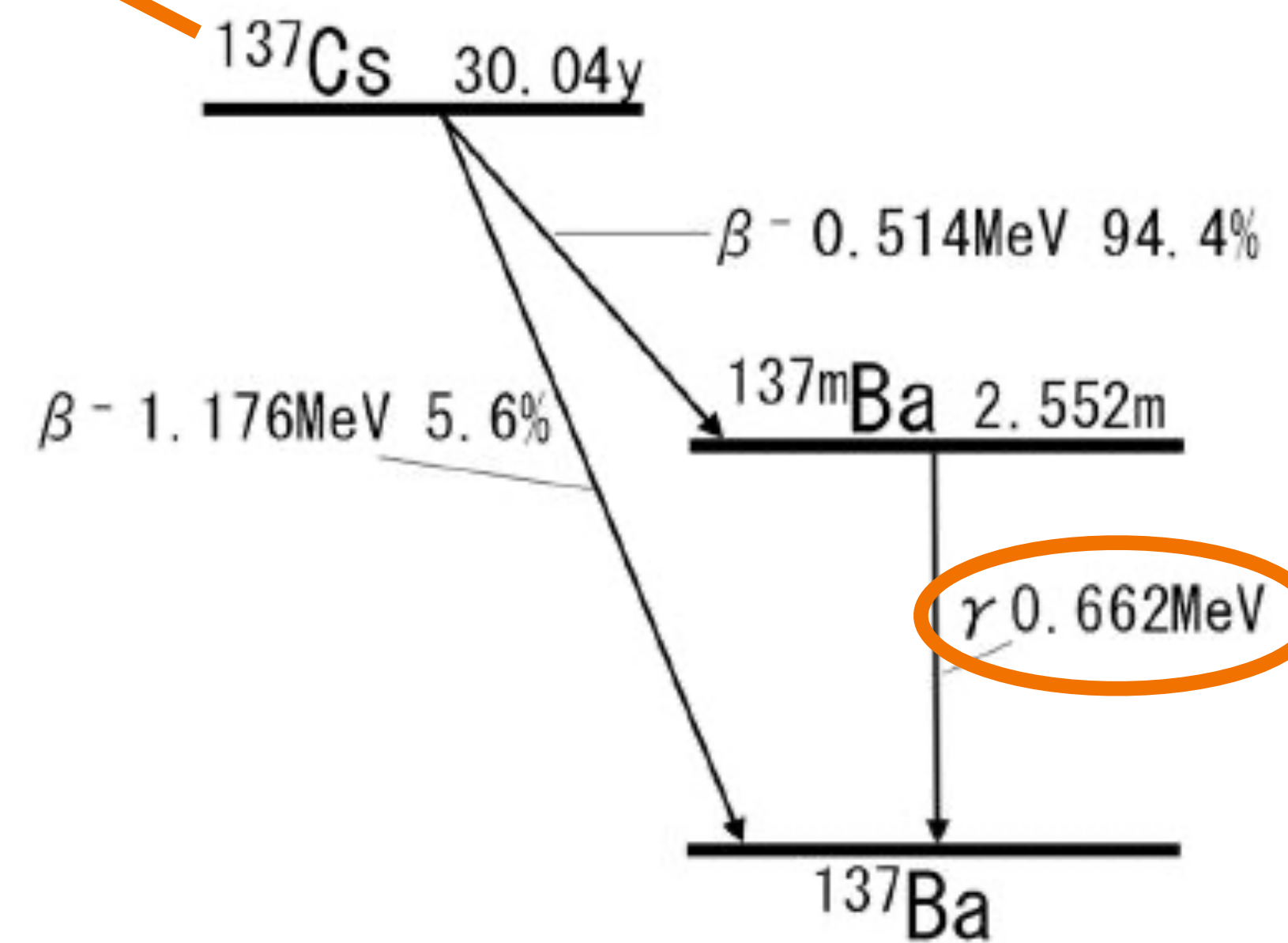
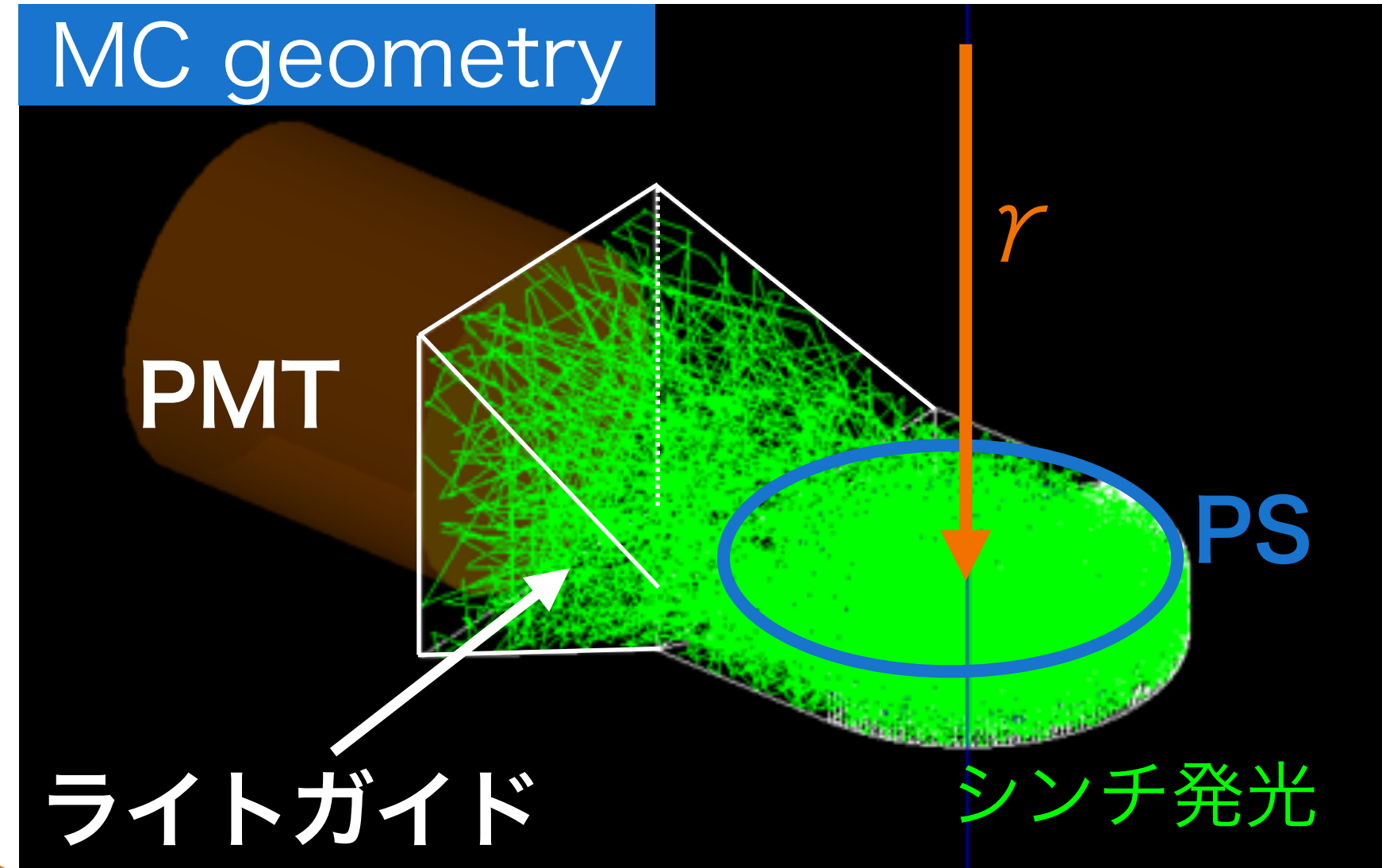
暗箱



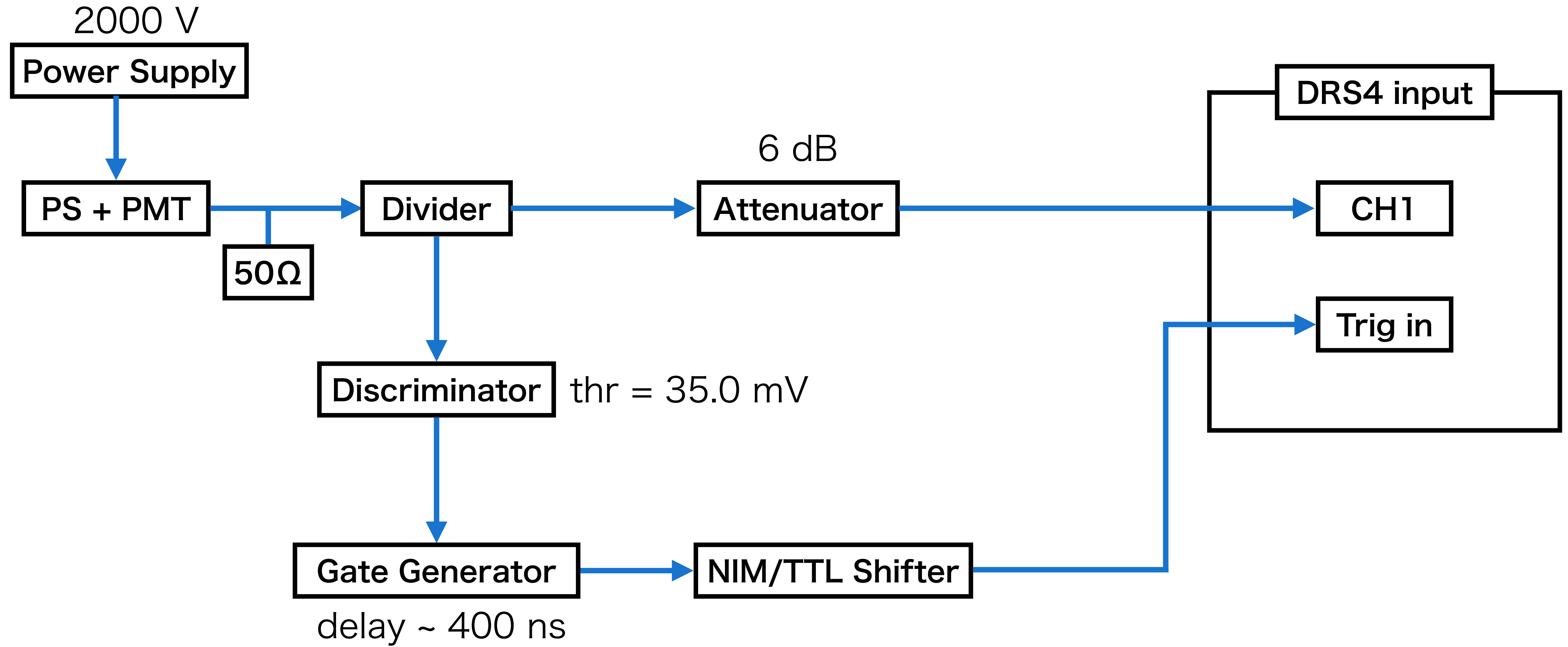
暗箱内



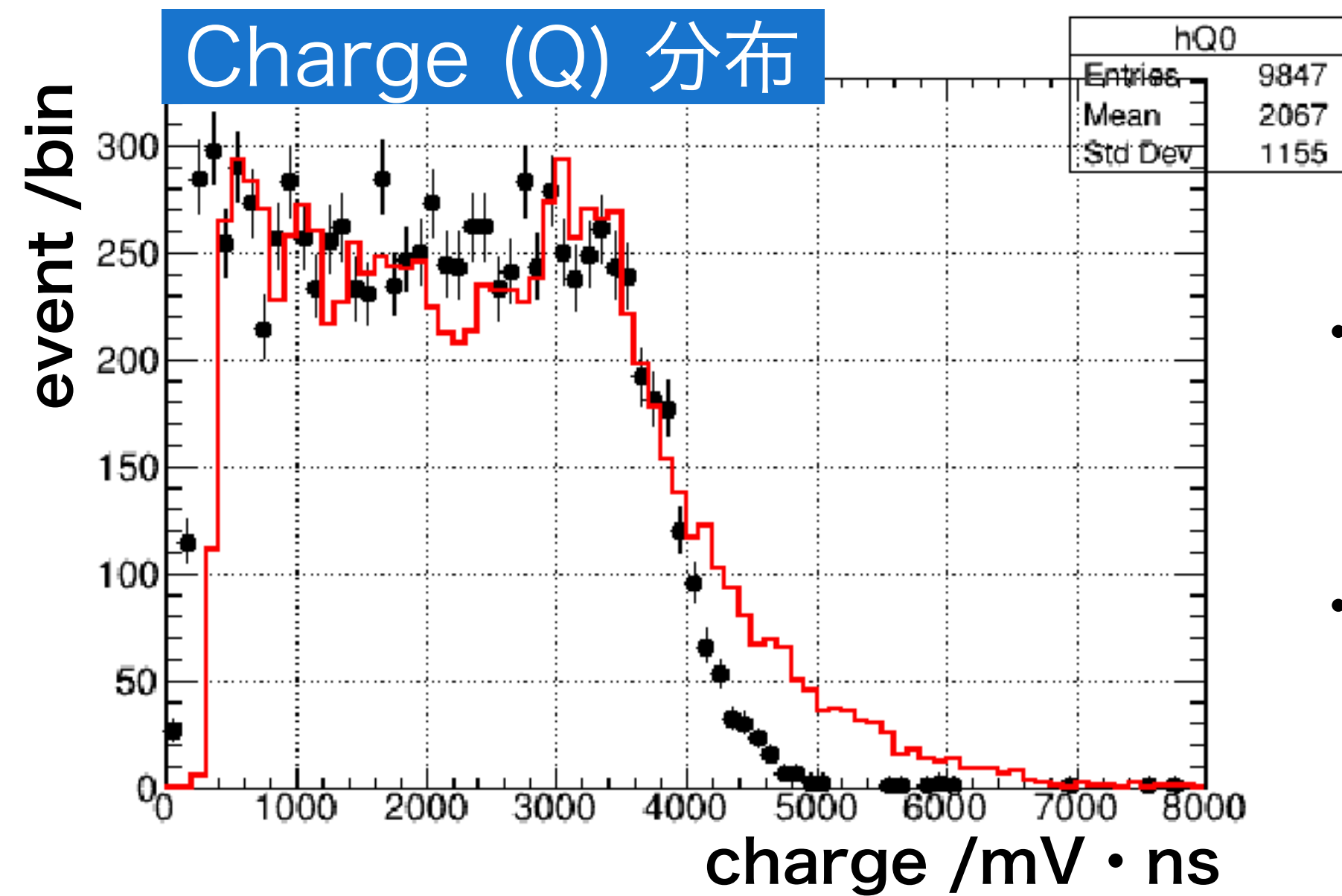
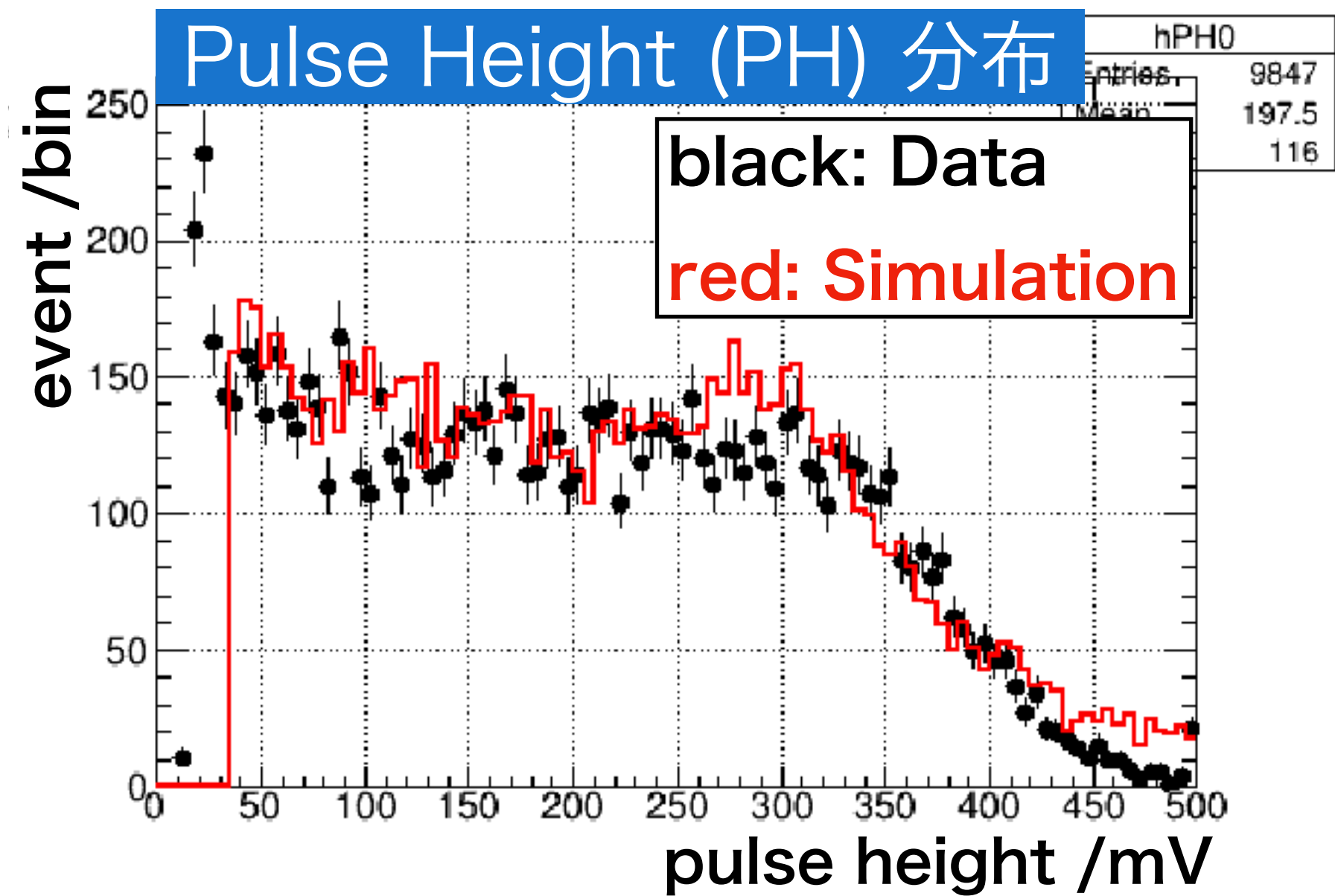
MC geometry



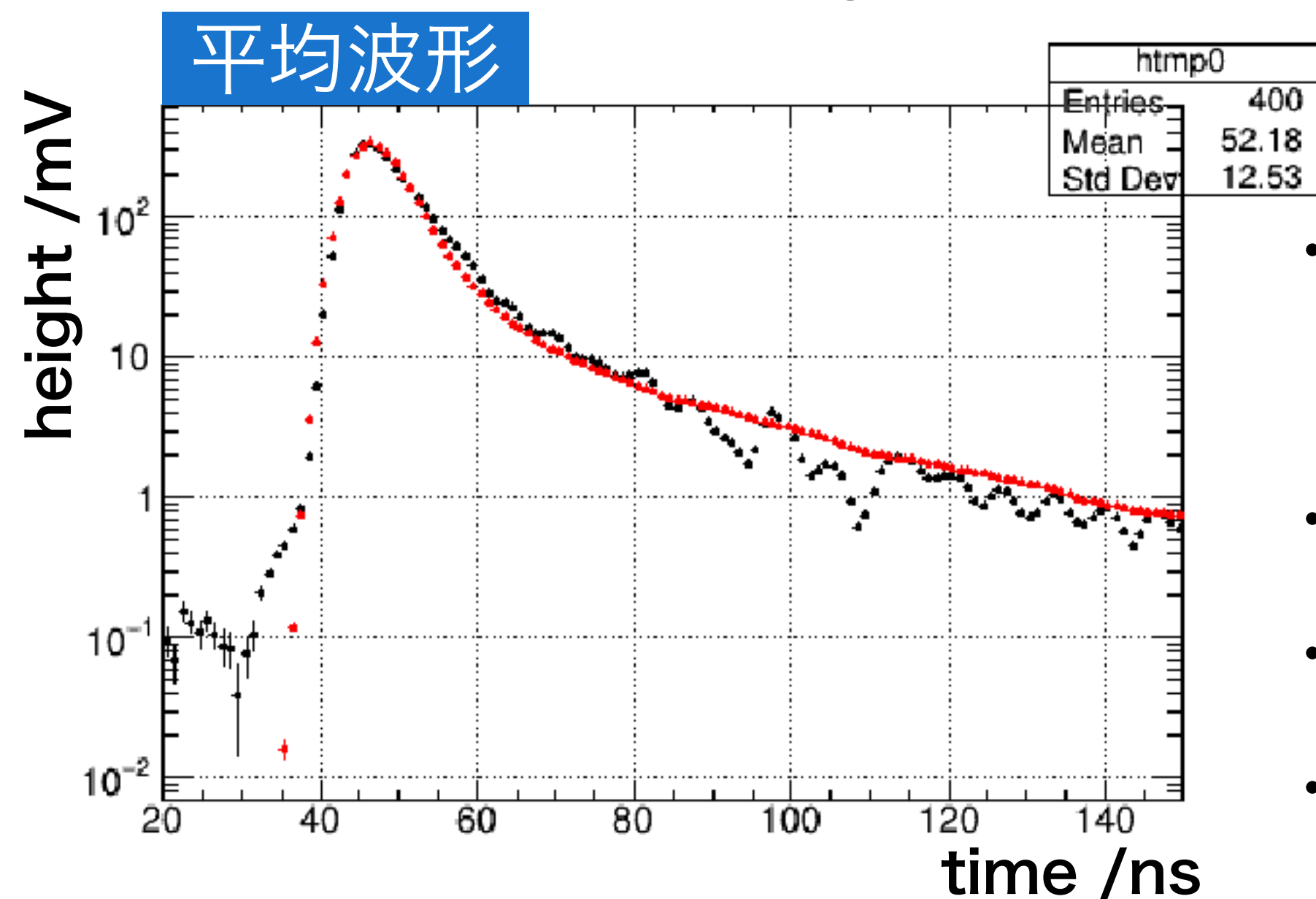
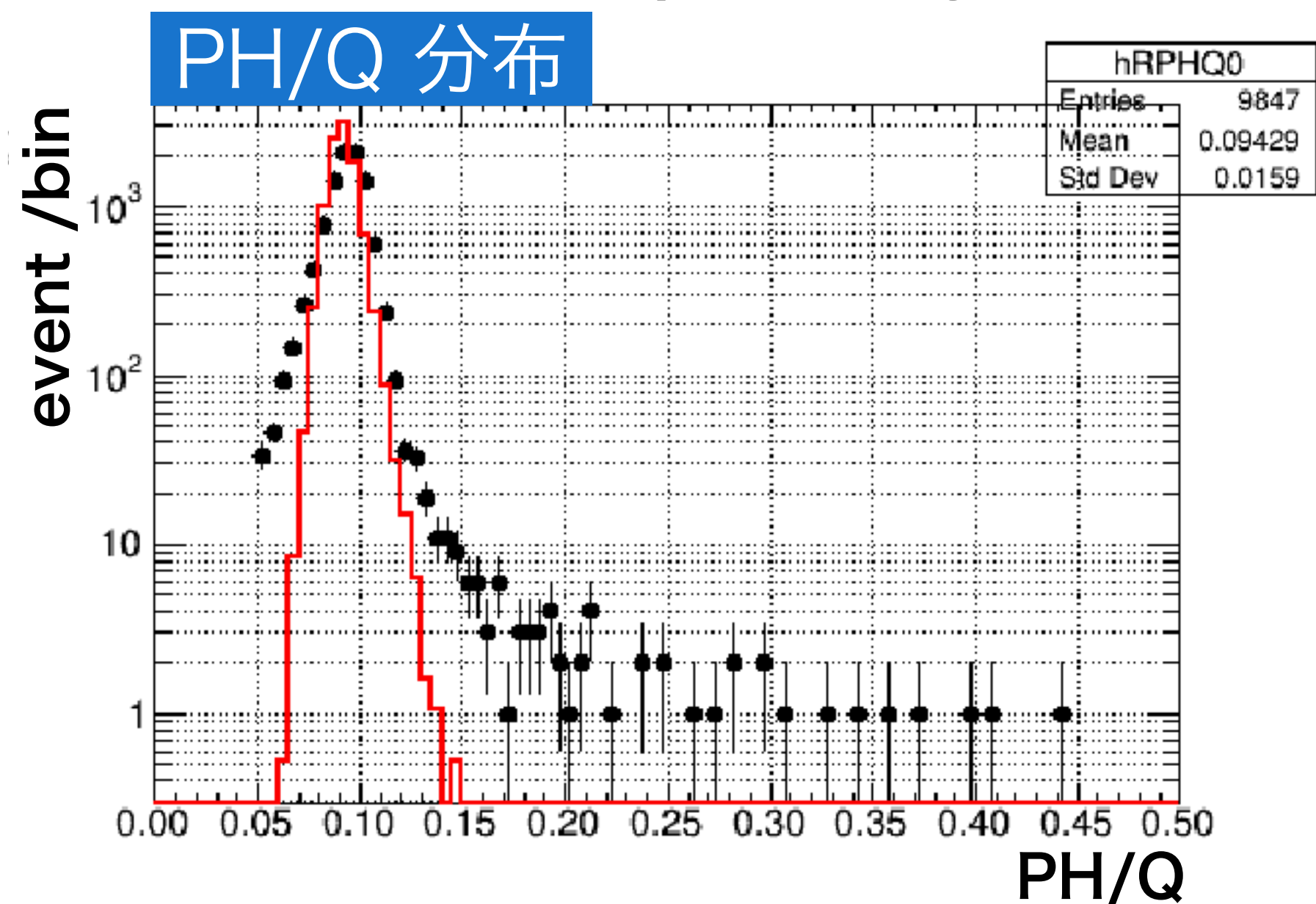
- ^{137}Cs 線源のコンプトンエッジを測定して、MCと比較
- 過去ビームテストで使用した片側読み出しのTOF検出器を使用



MC Tuning の結果



- 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



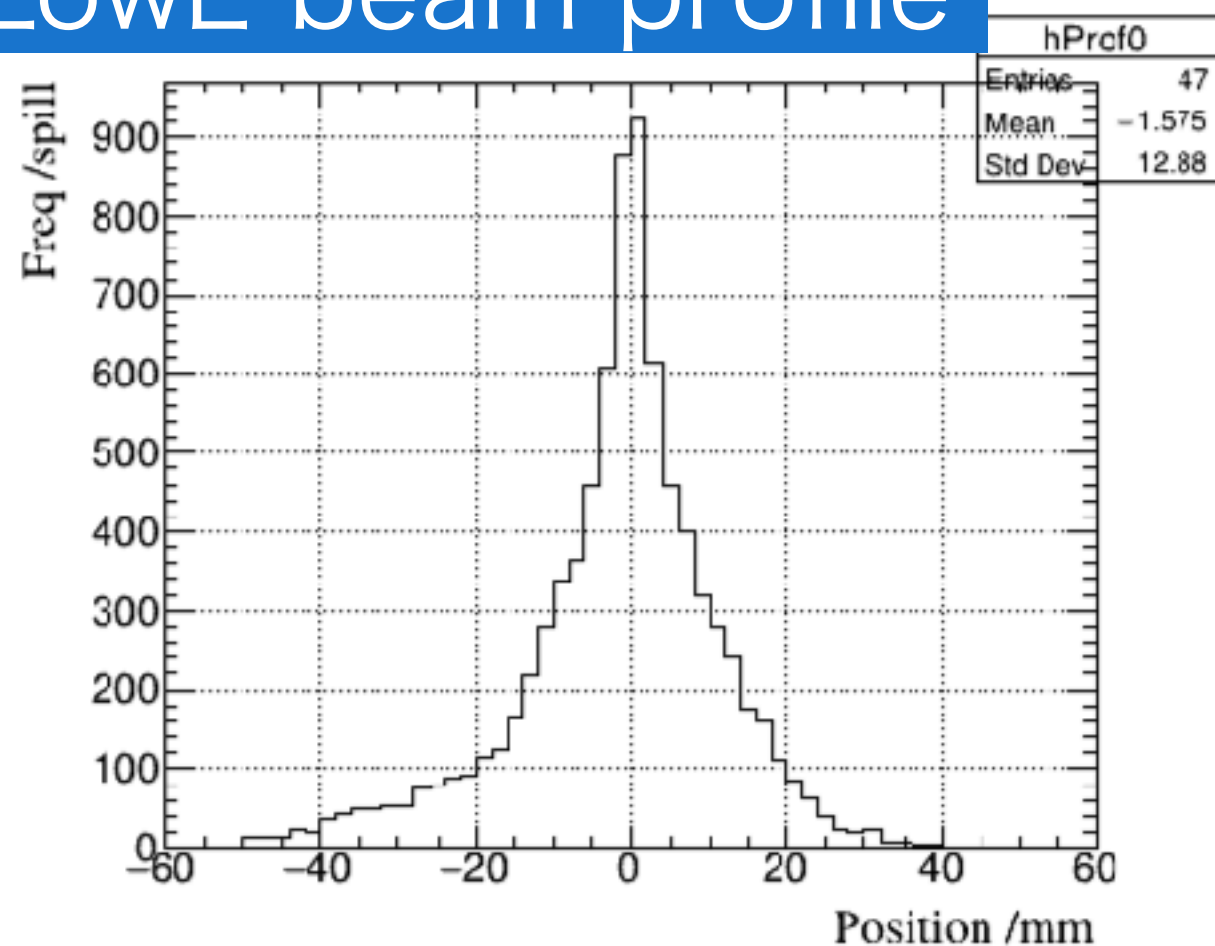
PMT変数

- 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

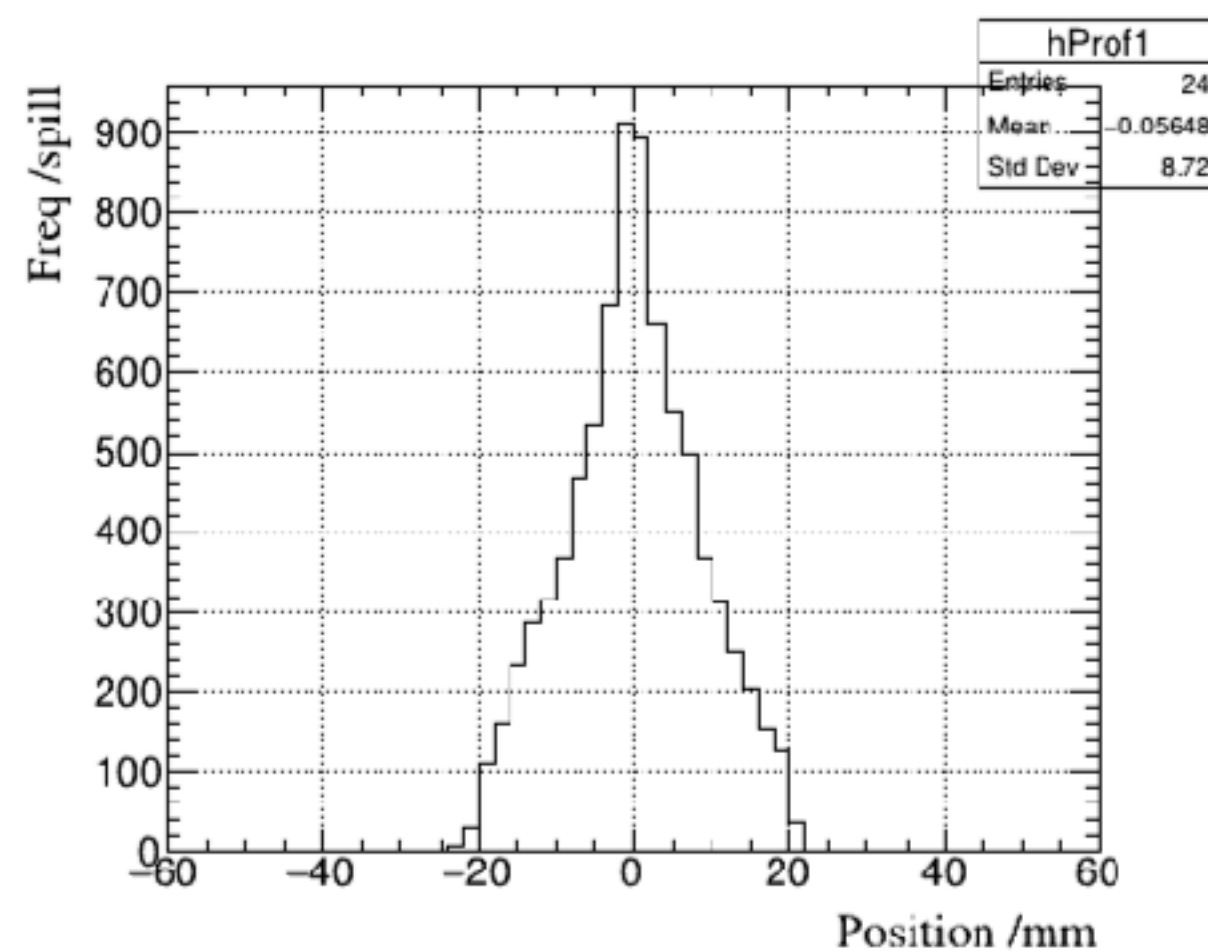
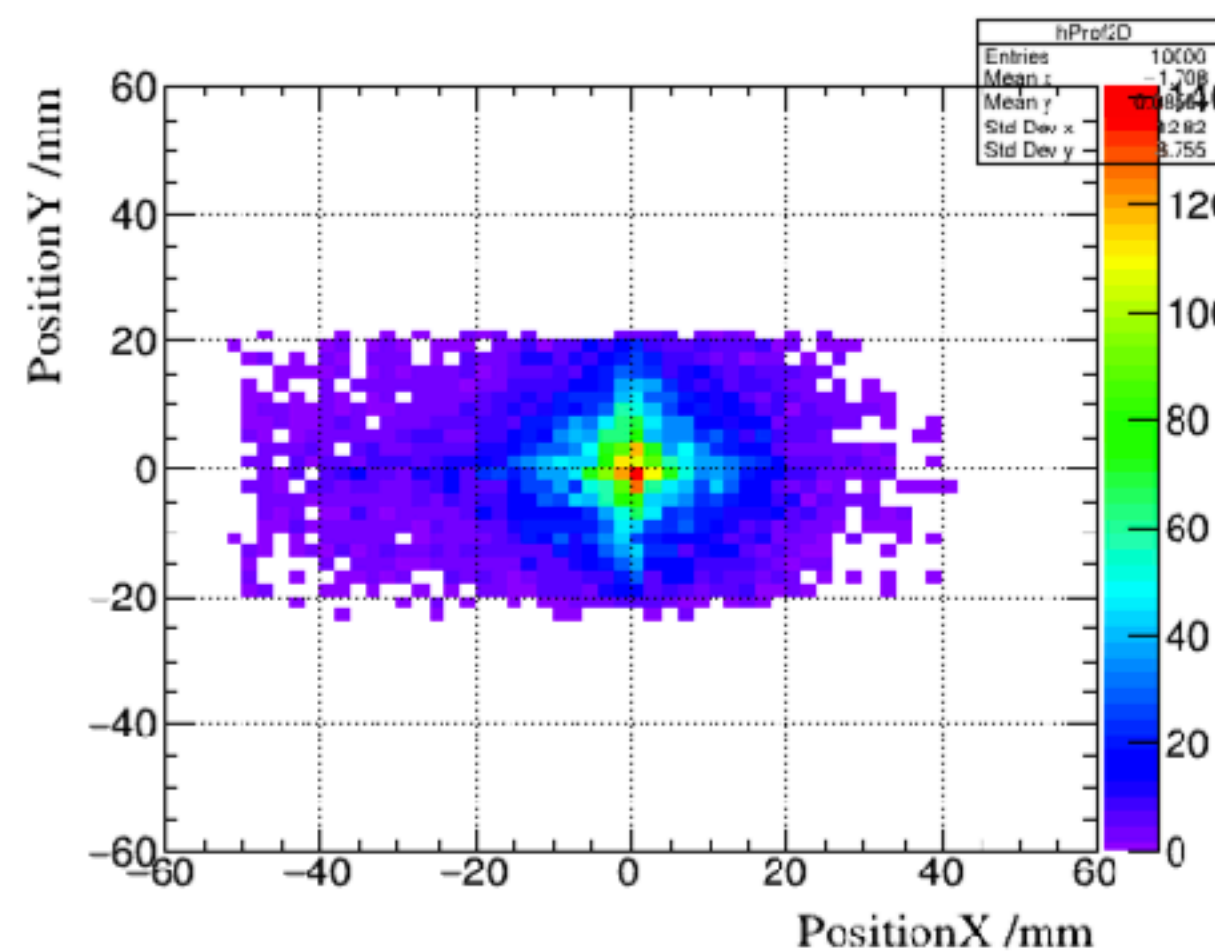
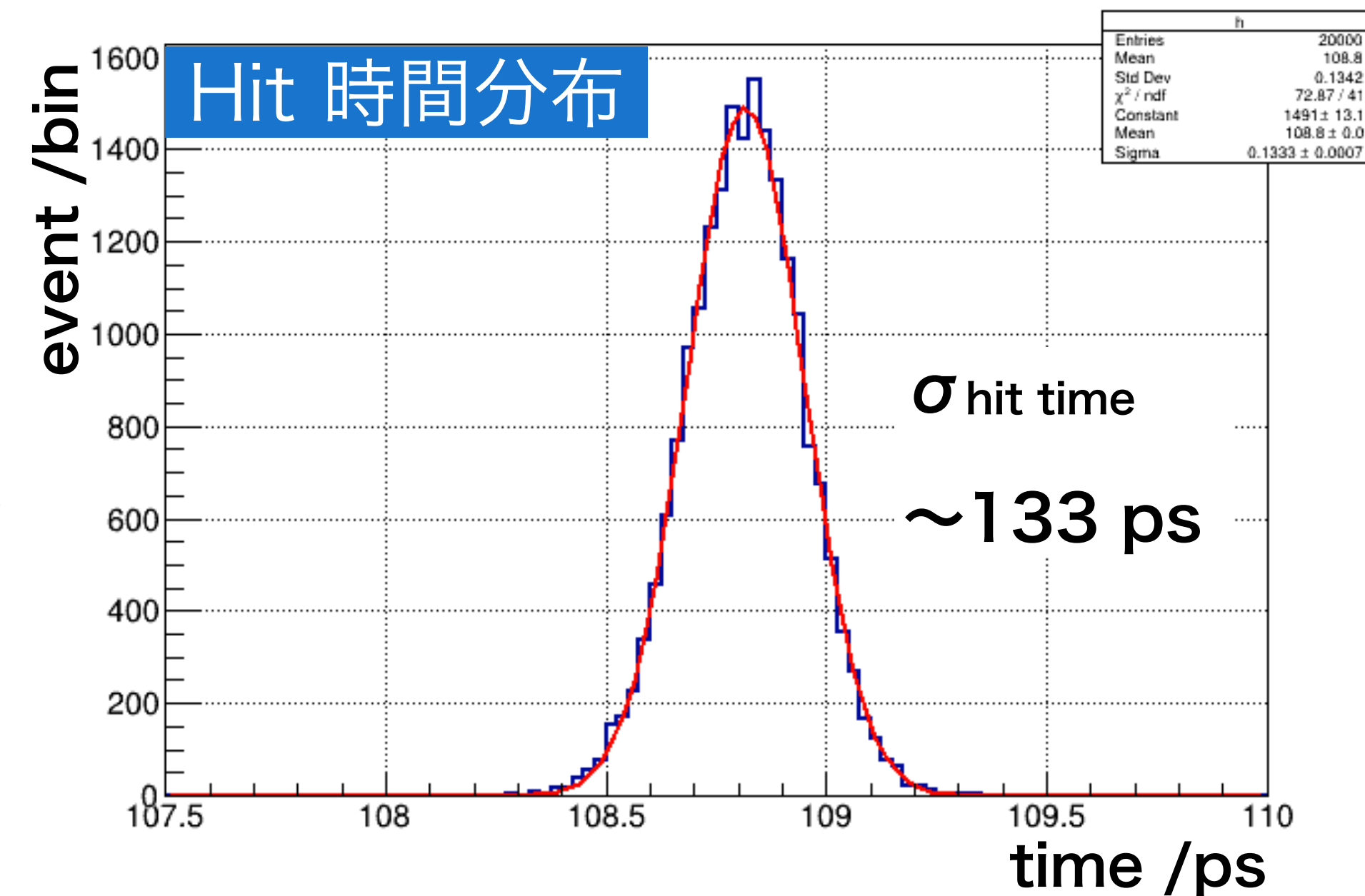
ビーム拡がりの評価

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



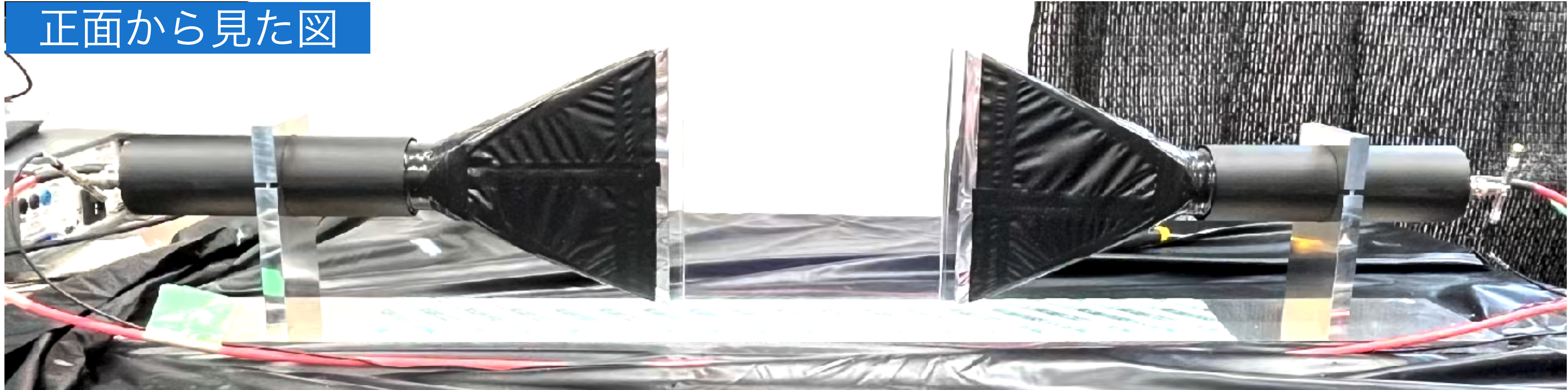
- Pensil beamの結果 ($\sigma_{\text{hit_time}}(5\text{mm}) \sim 135 \text{ ps}$) と同程度の分解能
- 入射位置の違いによる到達時間差は PS発光のスケールに埋もれる
-> 時間分解能を悪化しない



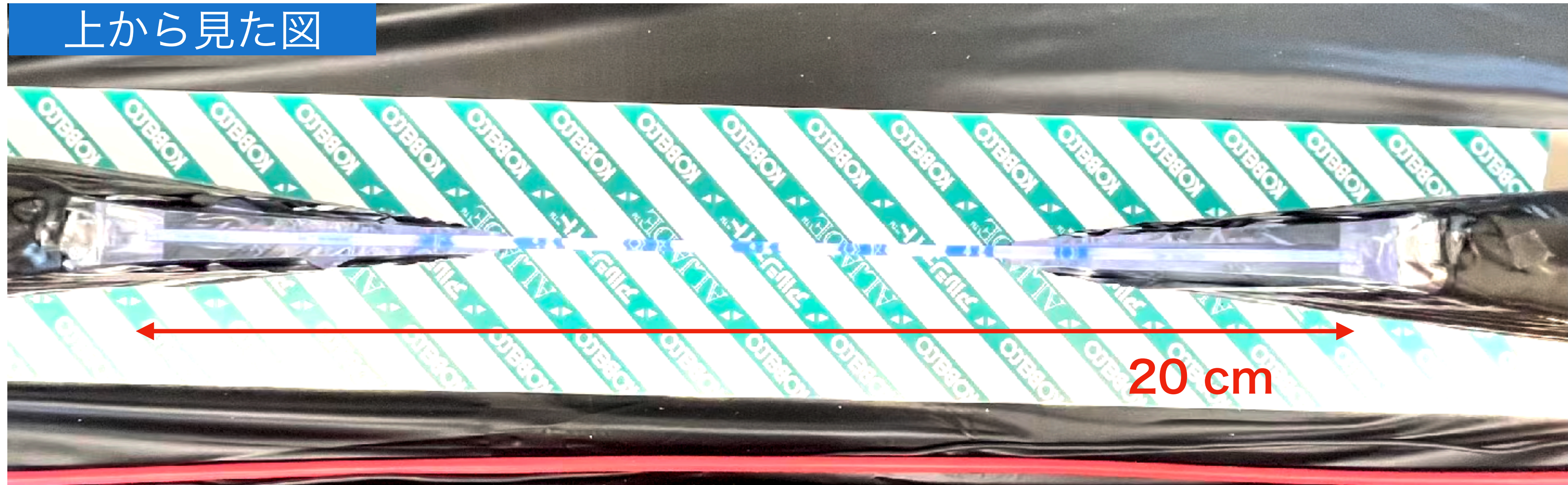
PMT本数	2
PS 厚み /cm	0.5
PS サイズ /cm角	20.0
Sim. events /run	1000
Run number	20
Beam type	LowE profile

2mm厚プラスチックシンチレータ

正面から見た図



上から見た図



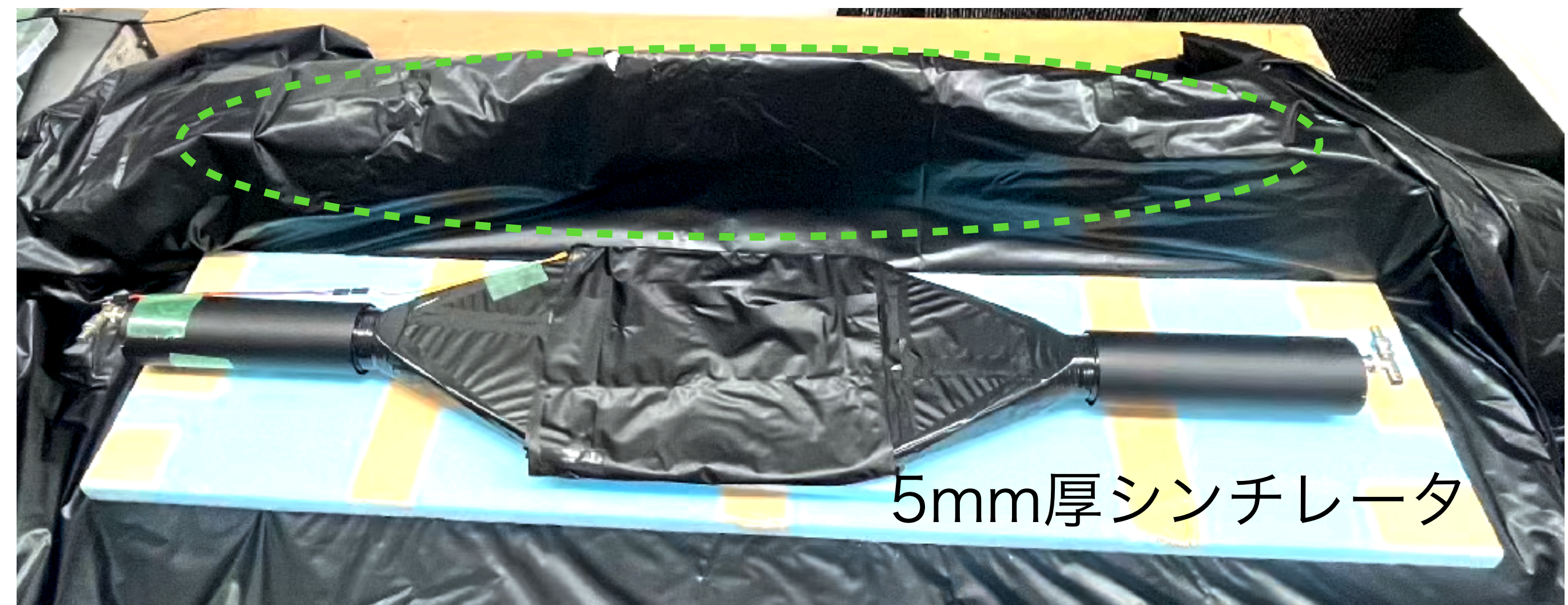
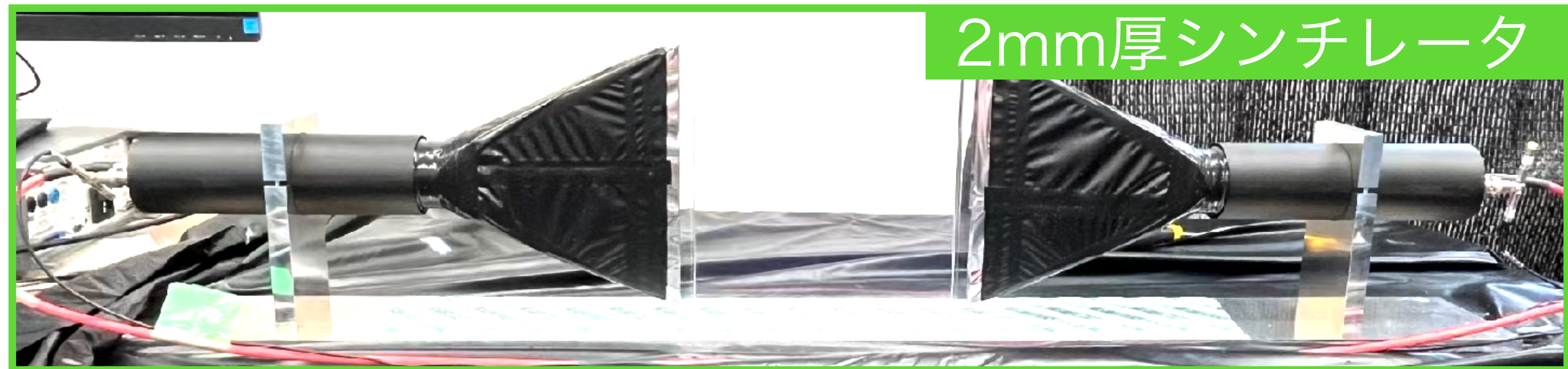
宇宙線ミュオンを測定し、MIPイベントを確認する -> 各検出器の両側PMTのgainを合わせる

・ 5mm厚シンチレータ検出器のcalibration

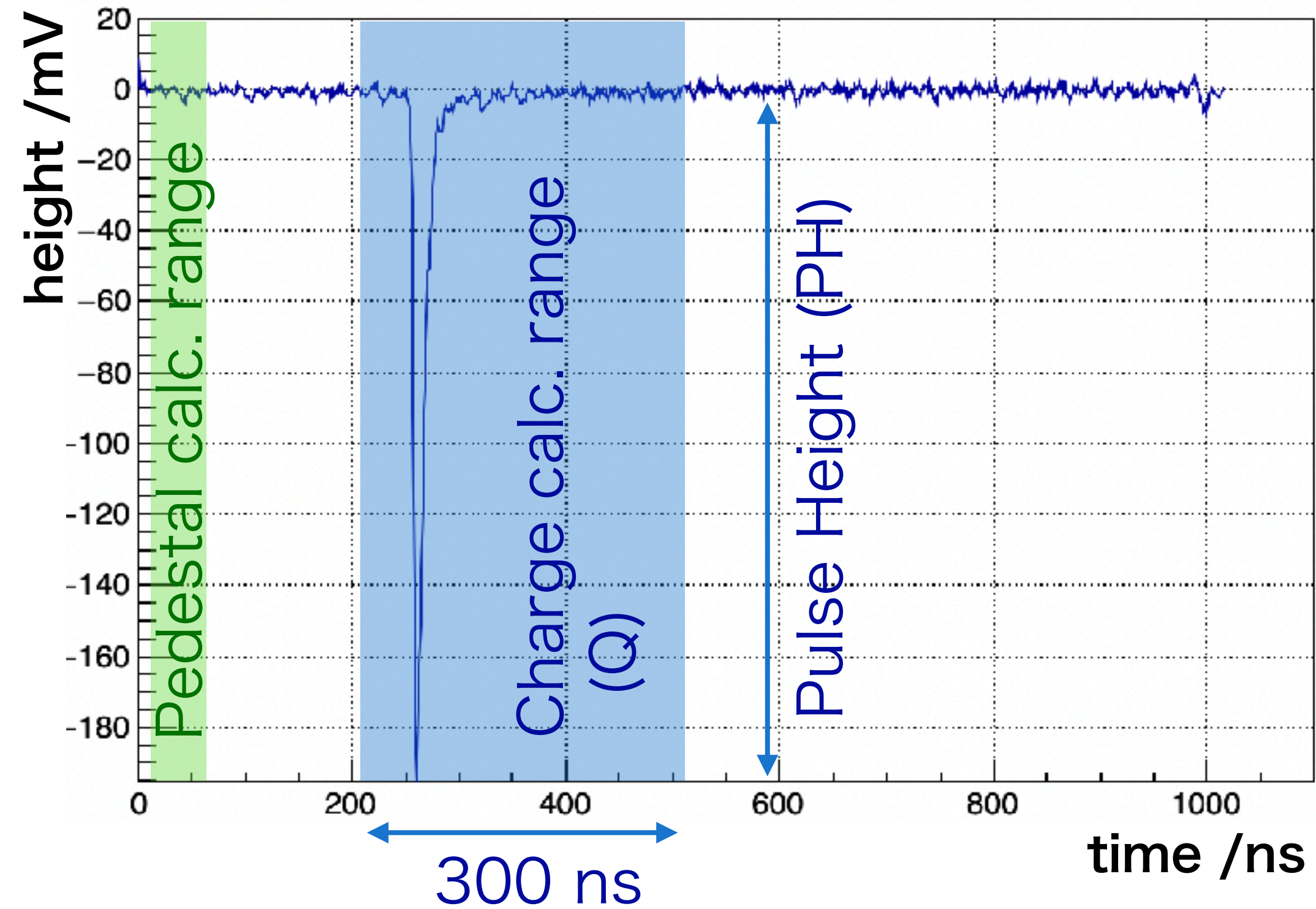
・ 2mm厚シンチレータ検出器のcalibration



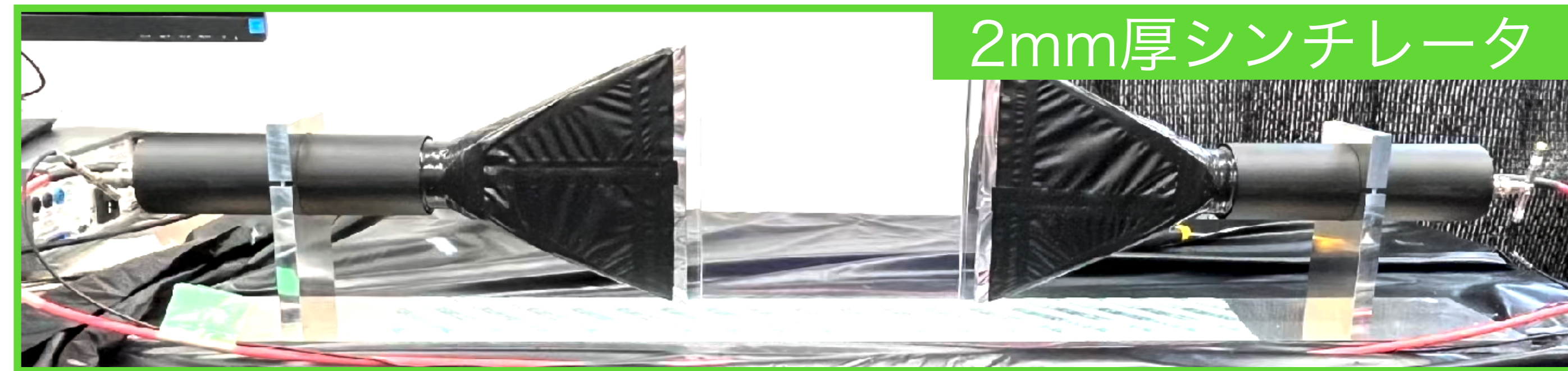
↓ 重ねる



- 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

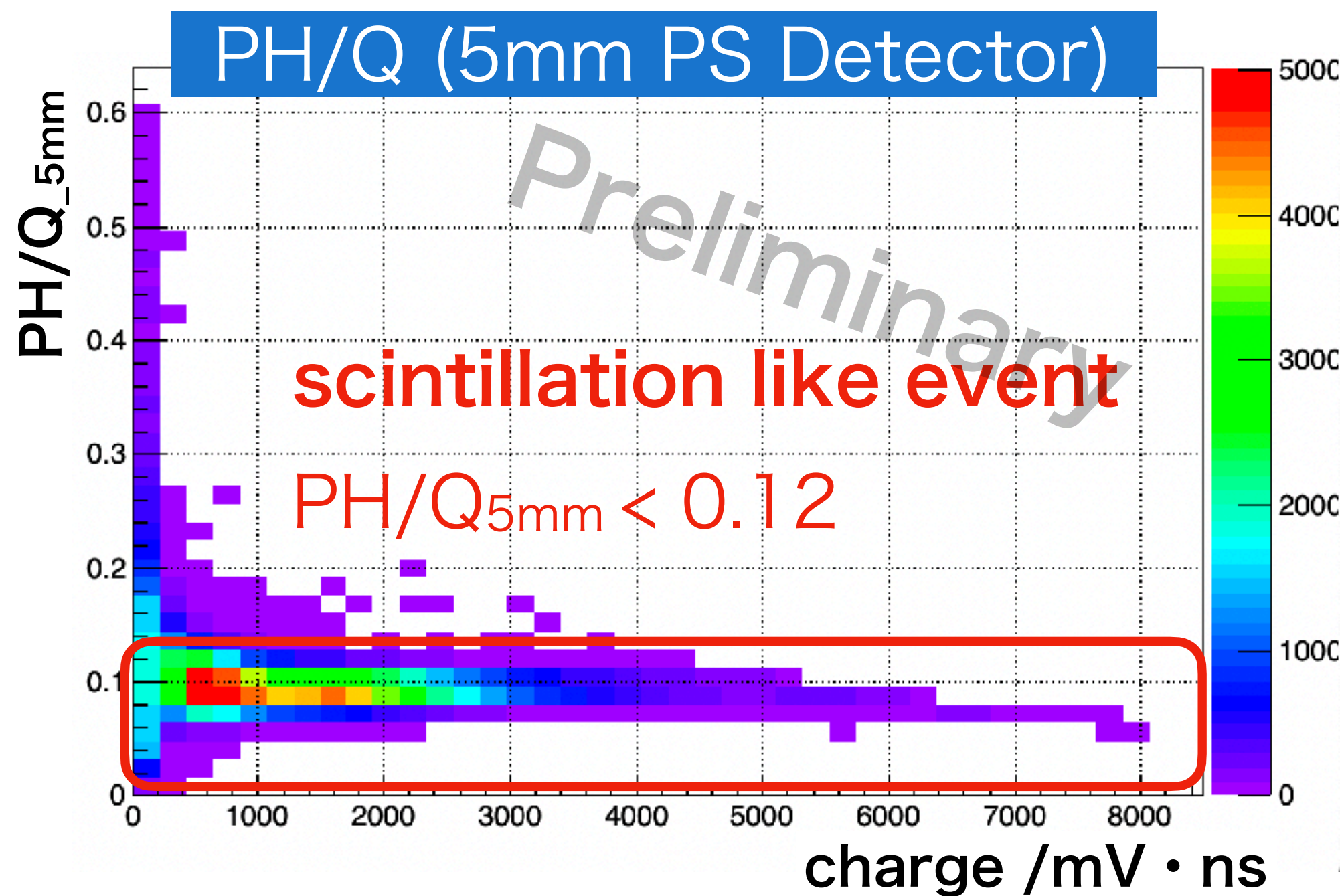


- 取得波形のサンプリングレートは1 GHz
- PH、Qの定義はMCと同様
- Pedestal (PD) は波形の10 - 60 nsの平均値として定義



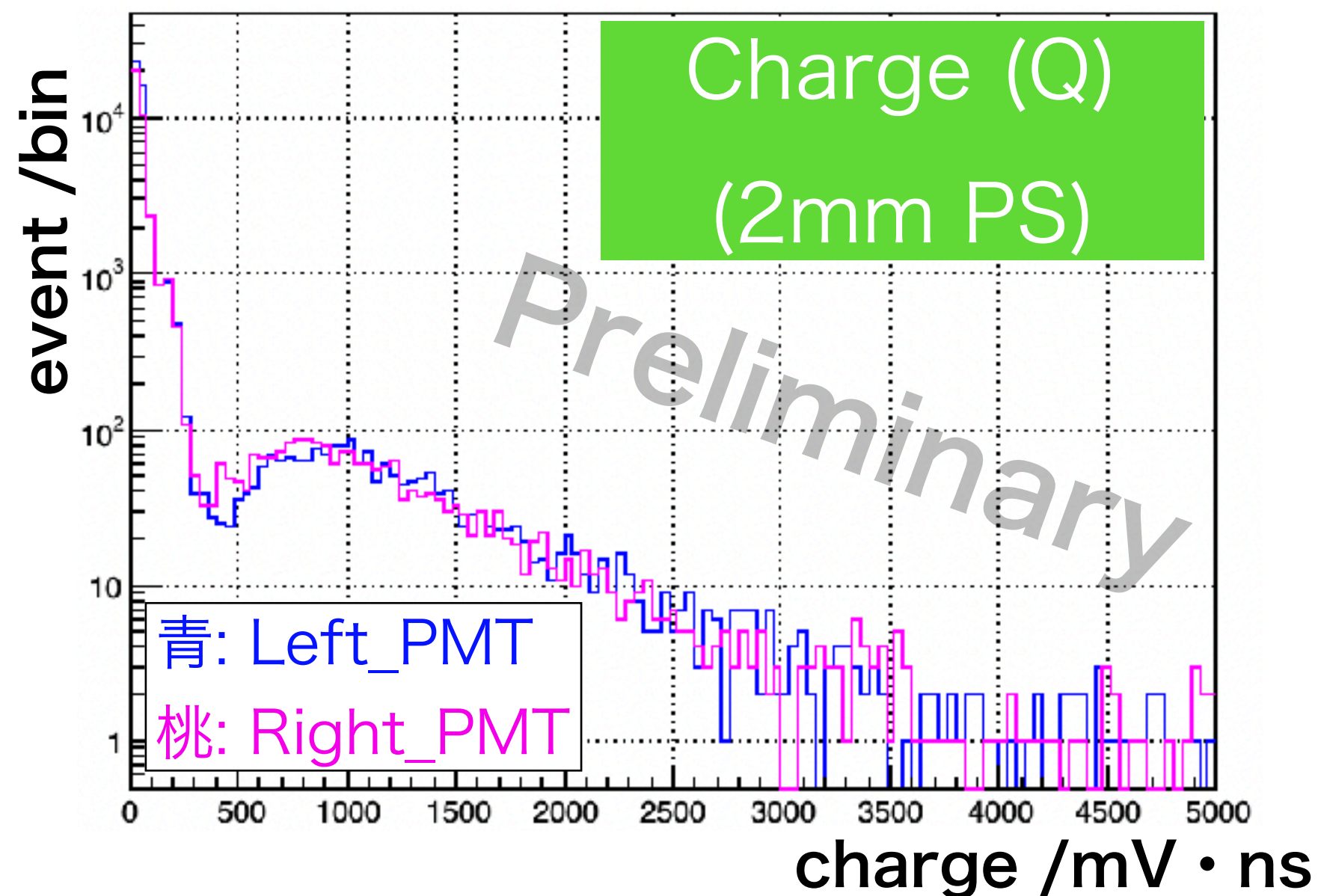
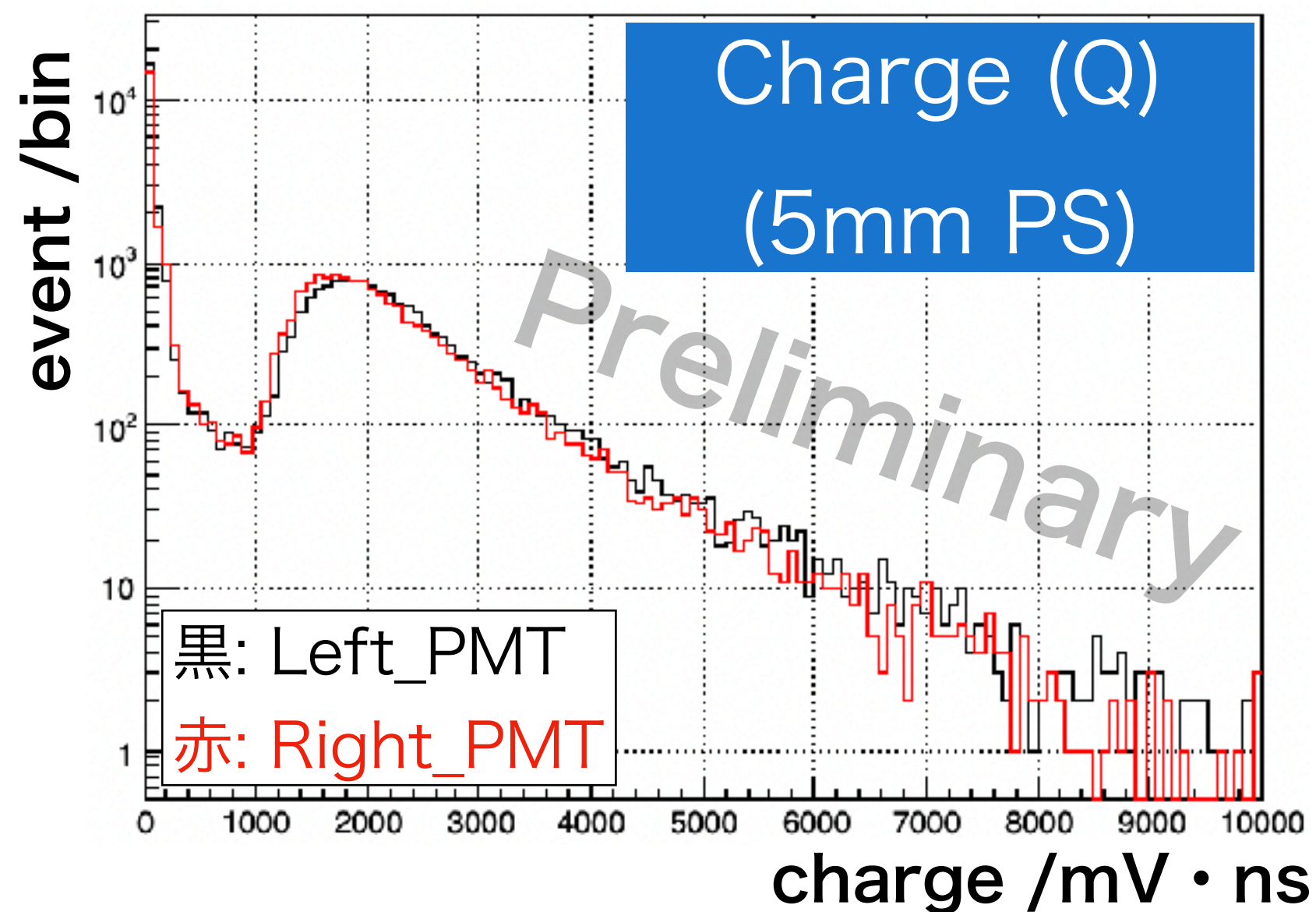
宇宙線の測定

- 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



イベント選択後の
Charge(Q)分布

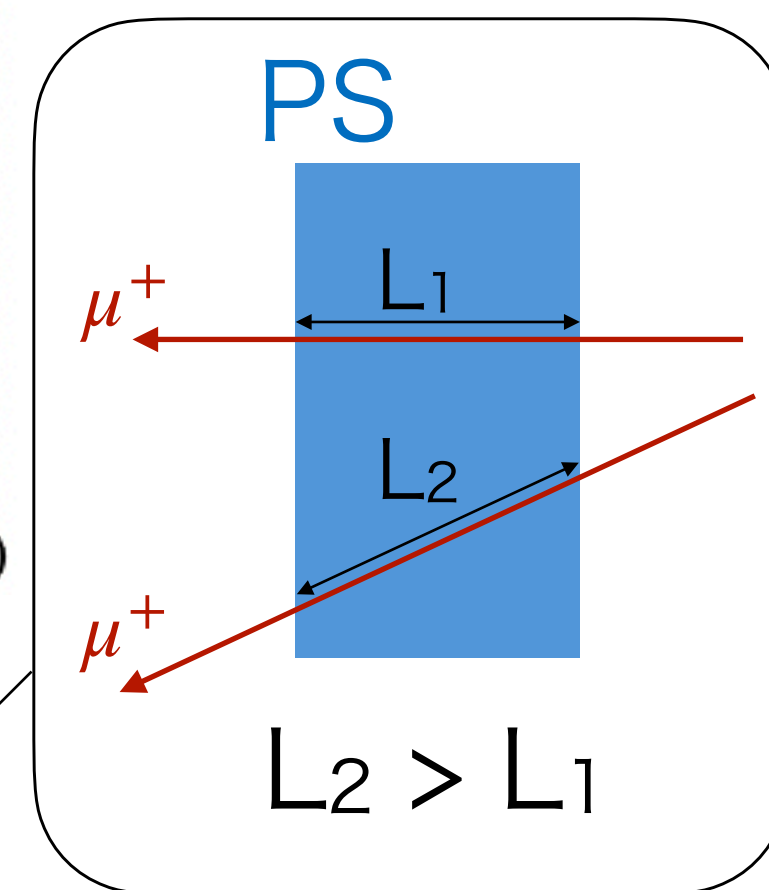
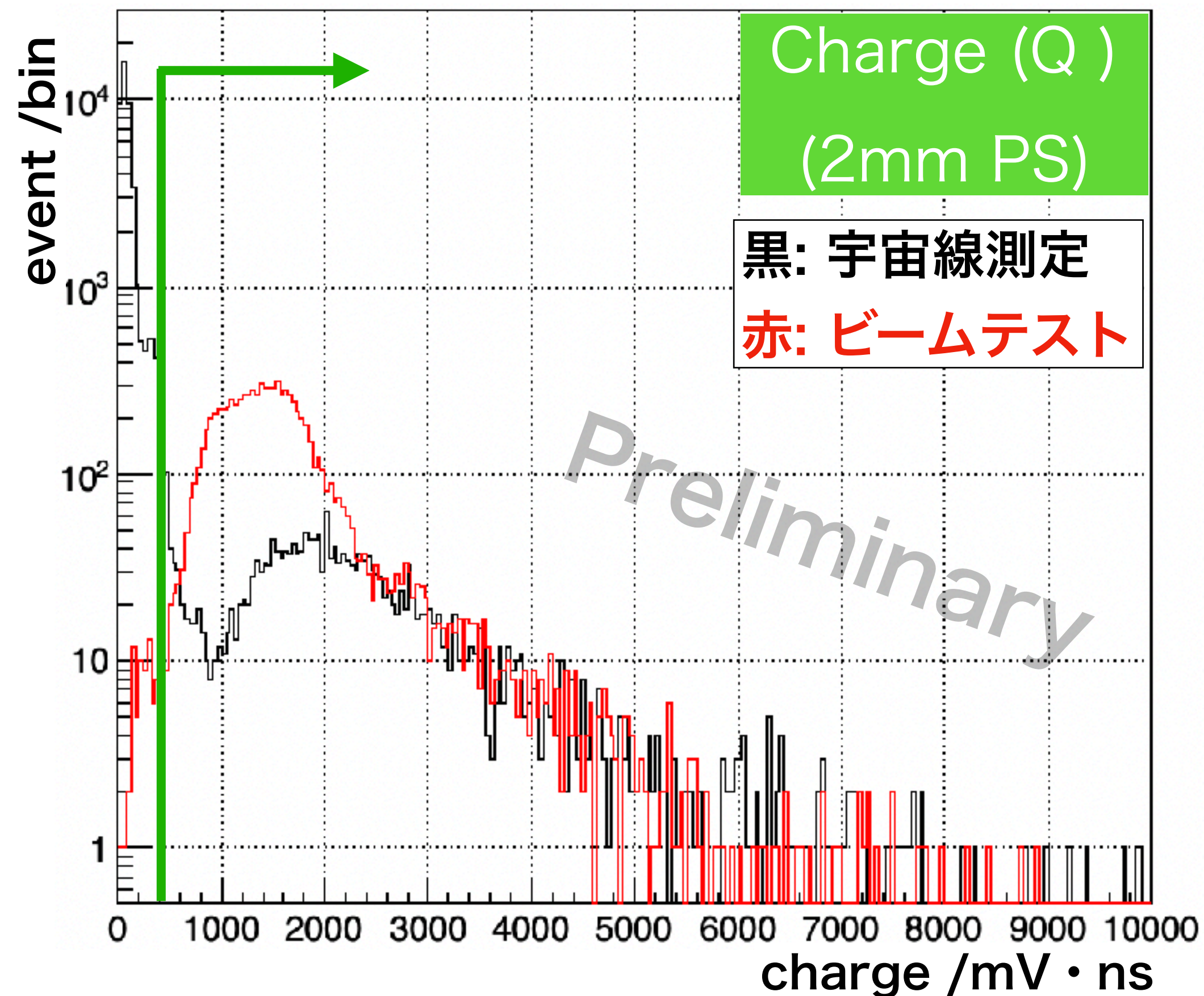
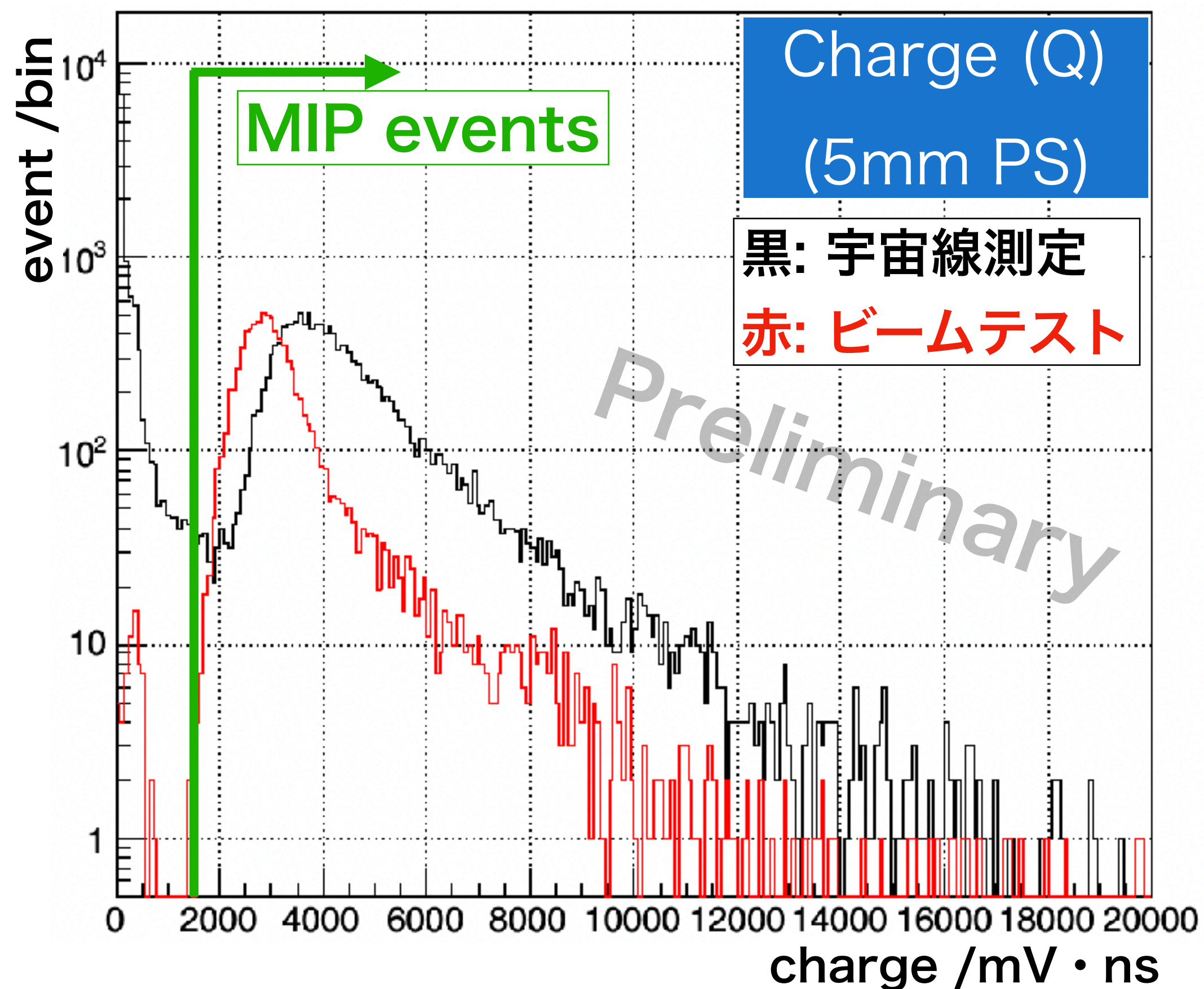
※ 1 PMTあたり



- MIP事象を確認
- PMTのgainがそれぞれ大体揃った

BeamTest結果：Q分布

各検出器 (2PMT) の Charge(Q) :

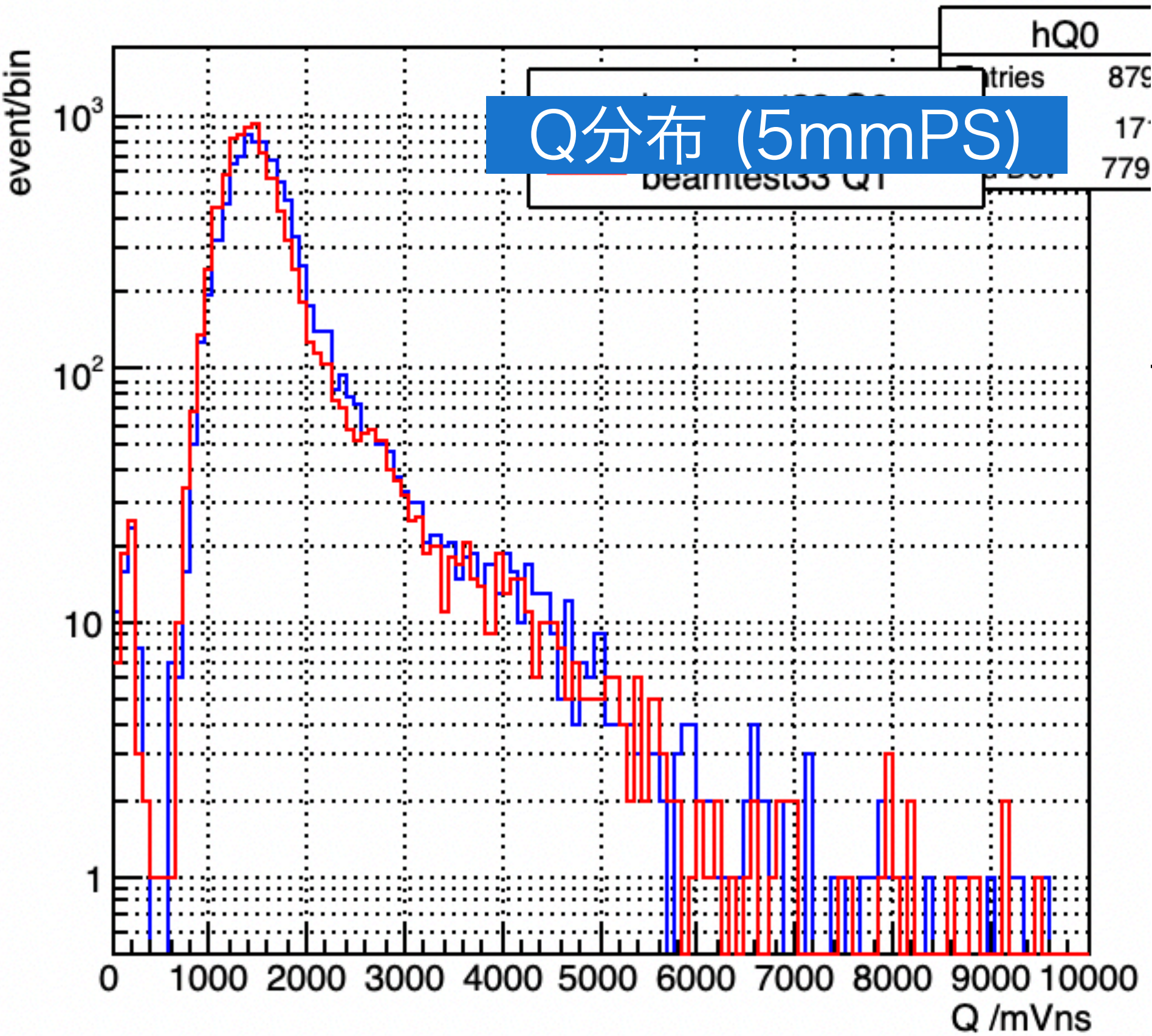


- 宇宙線はシンチレータ面に斜めにも多く入射する -> 高Charge側の割合が大きくなる
- 5mm厚プラシンは、宇宙線測定時からgainが変わっている？

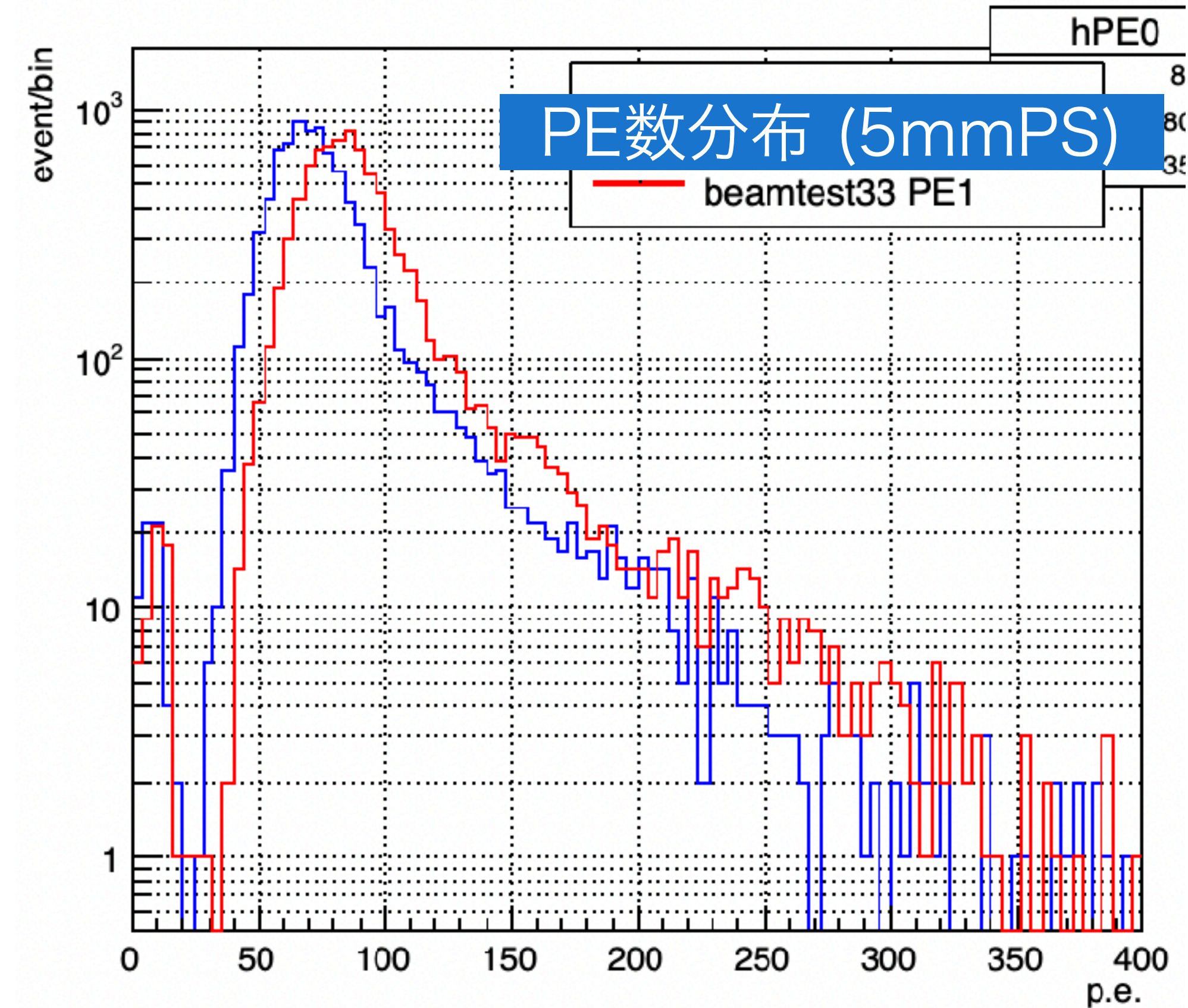
BeamTest結果：Q分布 → PE数分布

- Charge(Q)を観測光量に置き換える
- 微弱なLEDパルス光を測定し、検出器のsingle-photon応答を取得

beamtest33 Q0



beamtest33 PE0



Q分布 (1PE測定)

