

レプトン普遍性精密検証実験PIONEERのための 液体キセノンカロリメーター再構成手法の開発

山本 健介、岩本敏幸、内山雄祐^A、大谷航、小川拓泰^B、鈴木大夢^{B,C}、清野拓己^B、潘晟、三原智^A、森俊則
(東大ICEPP、^AKEK、^B東大理、^C神戸大理)

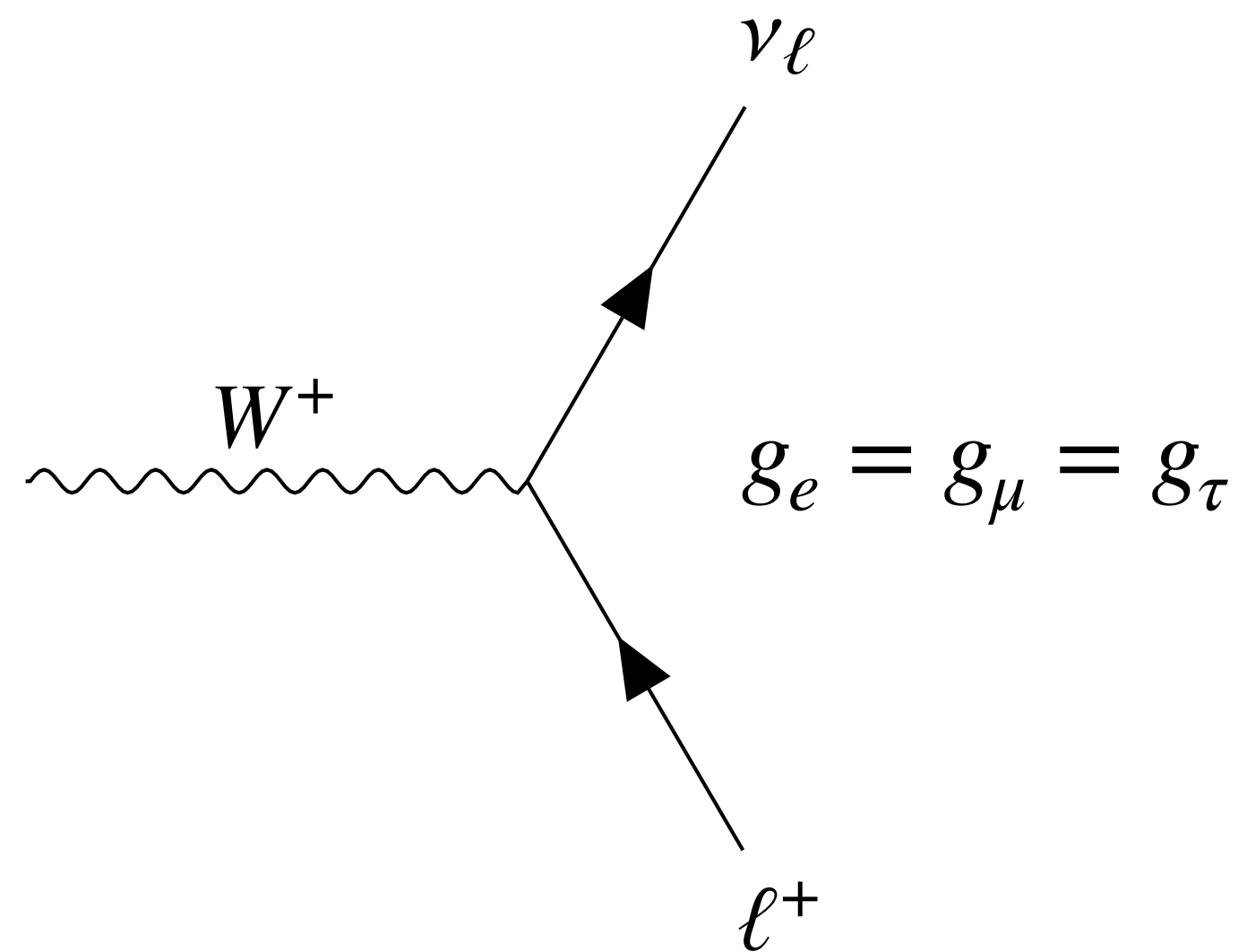
日本物理学会2026年春季大会

2026年3月23日(月)-26日(木)

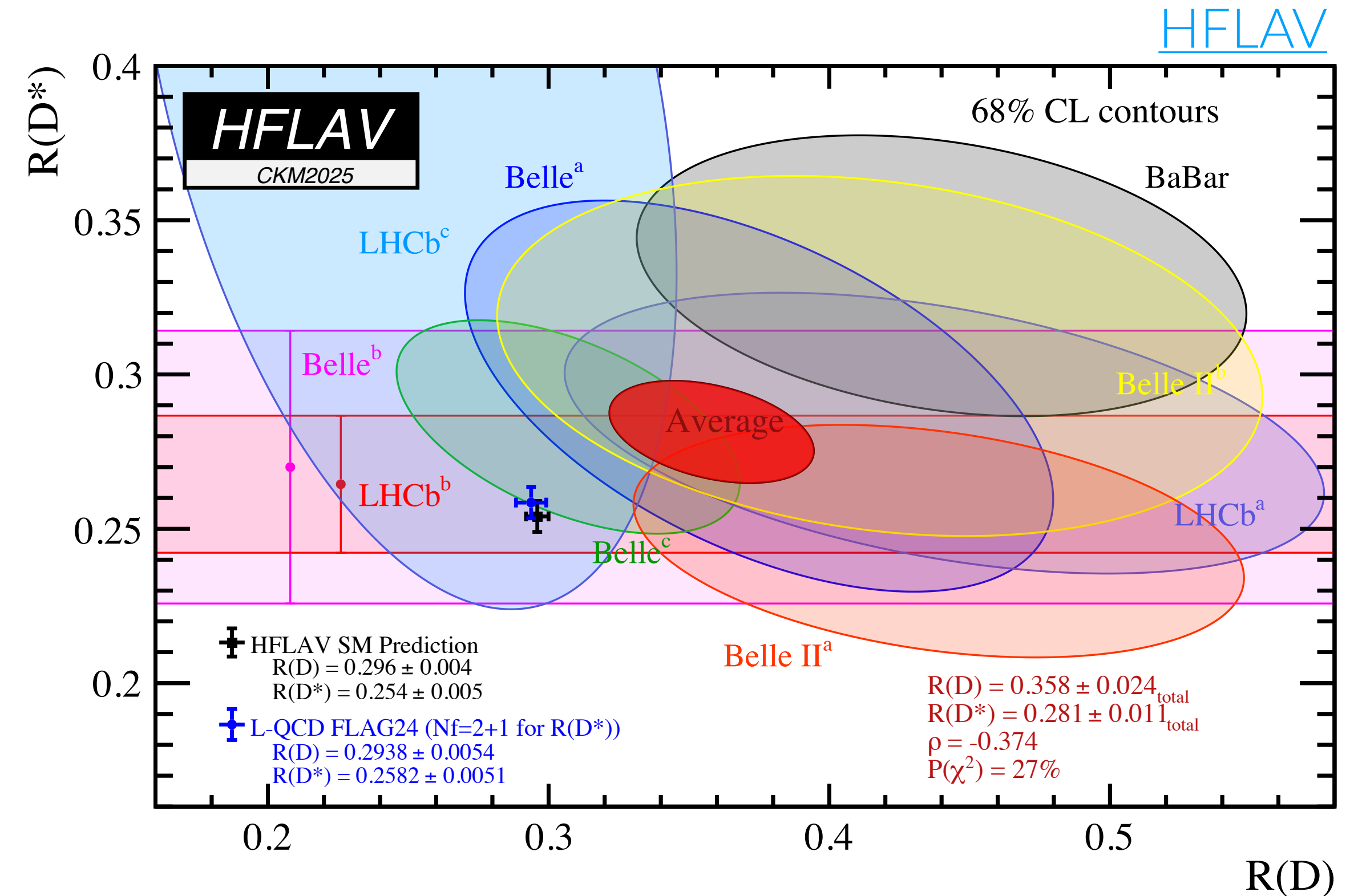
25pT3-5

レプトン普遍性とアノマリー

- 標準理論ではレプトン普遍性は成り立つ
 - レプトンに対する相互作用の大きさは同じ



- レプトン普遍性に関連する**アノマリー**
 - $R(D^{(*)})$ で標準理論から 3.8σ のずれ
 - ミュー粒子 $g - 2$?



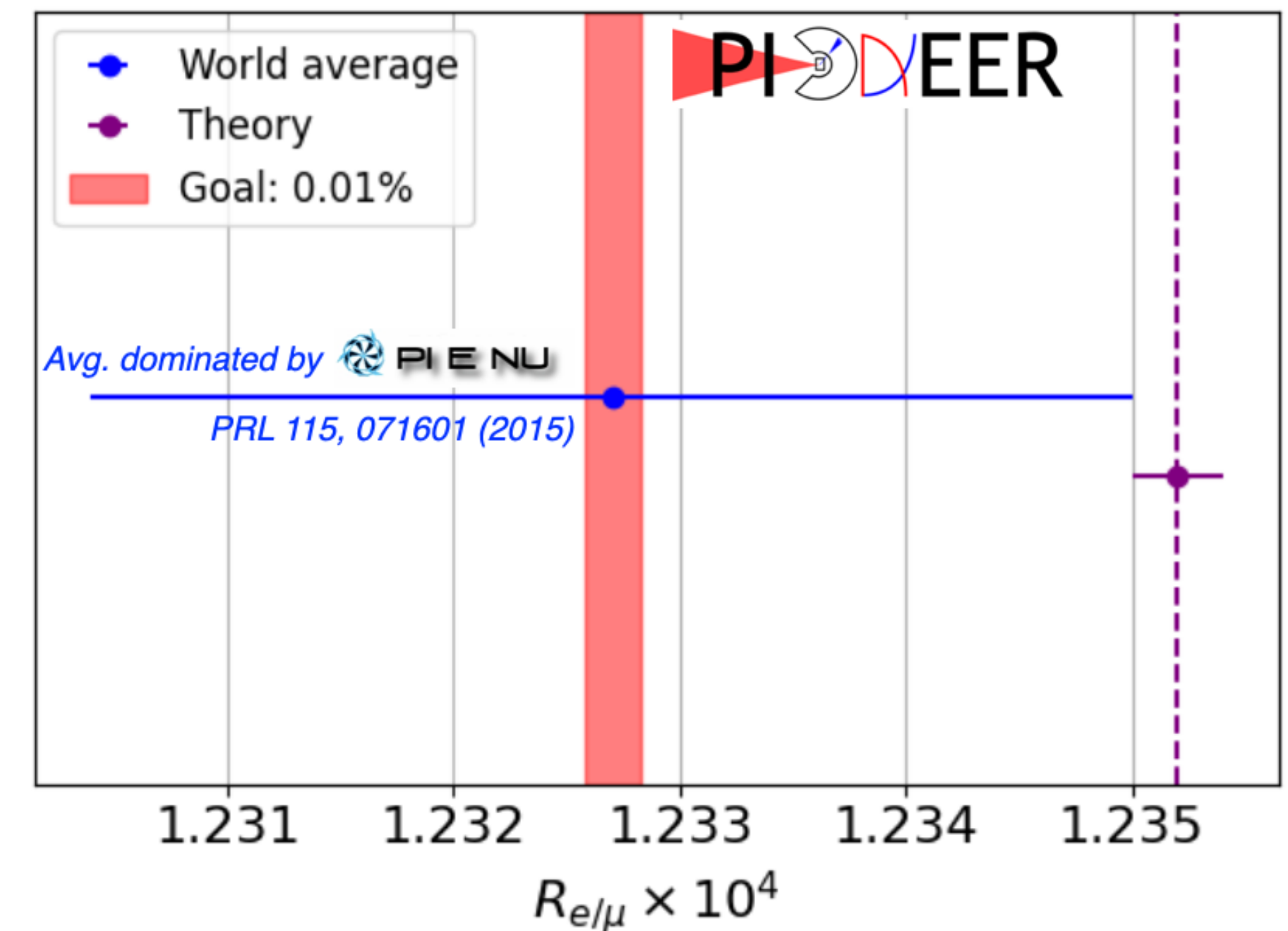
$$R(D^{(*)}) = \frac{BR(\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)}\tau^-\bar{\nu}_\tau)}{BR(\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)}\ell^-\bar{\nu}_\ell)}$$

$R_{e/\mu}$ を精密に測定するPIONEER実験 Phase I

- $R_{e/\mu} = \Gamma(\pi \rightarrow e\nu)/\Gamma(\pi \rightarrow \mu\nu)$ を調べてレプトンフレーバー普遍性を精密検証する
- 標準理論で最も精度良く計算できる値の1つ

$$R_{e/\mu} = \left| \frac{g_e}{g_\mu} \right|^2 \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2$$

- **標準理論の精度 (0.01%) に匹敵する精度で測定する**
- PeVスケールの新物理に感度 [D. Bryman, et al. \(2011\)](#)

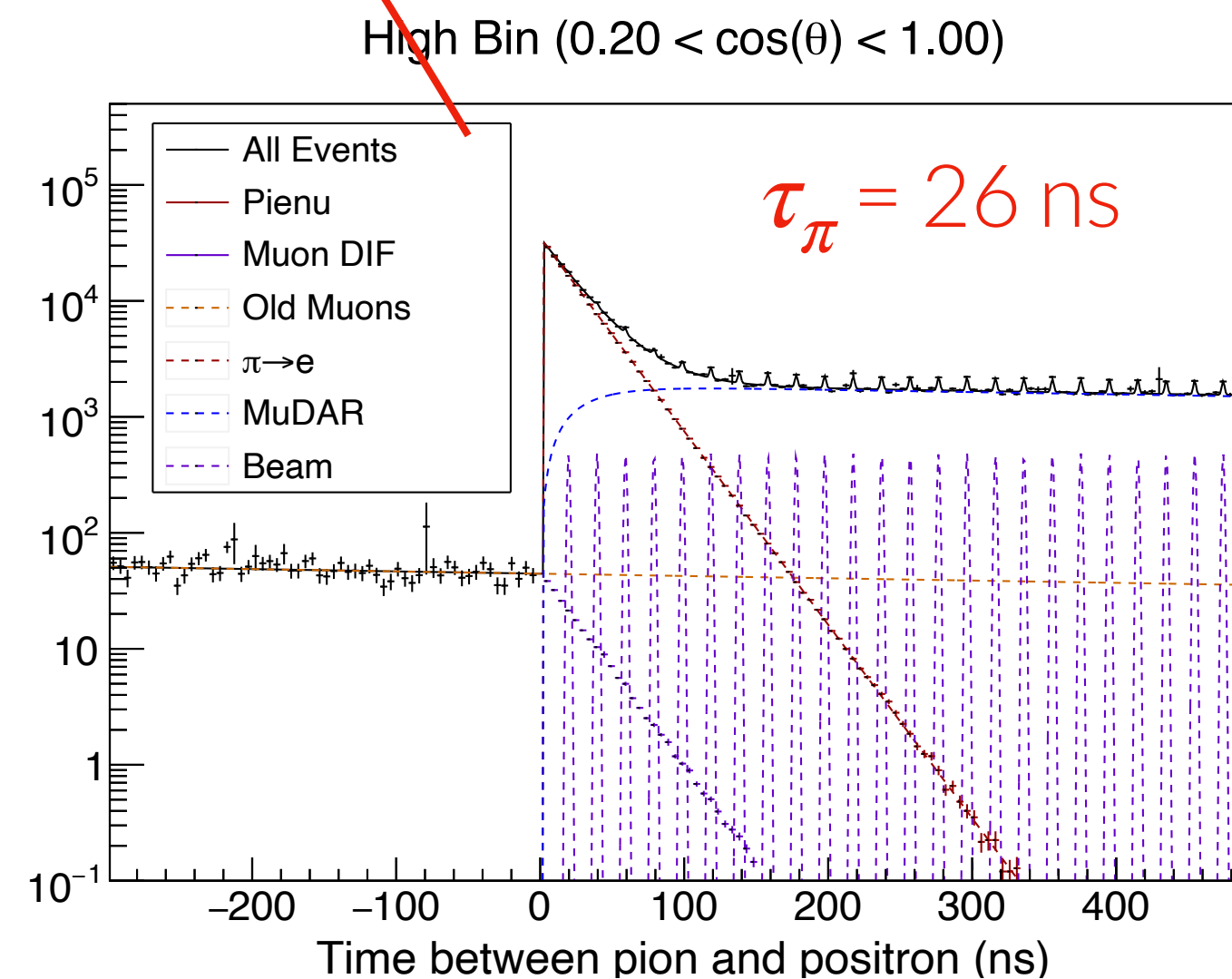
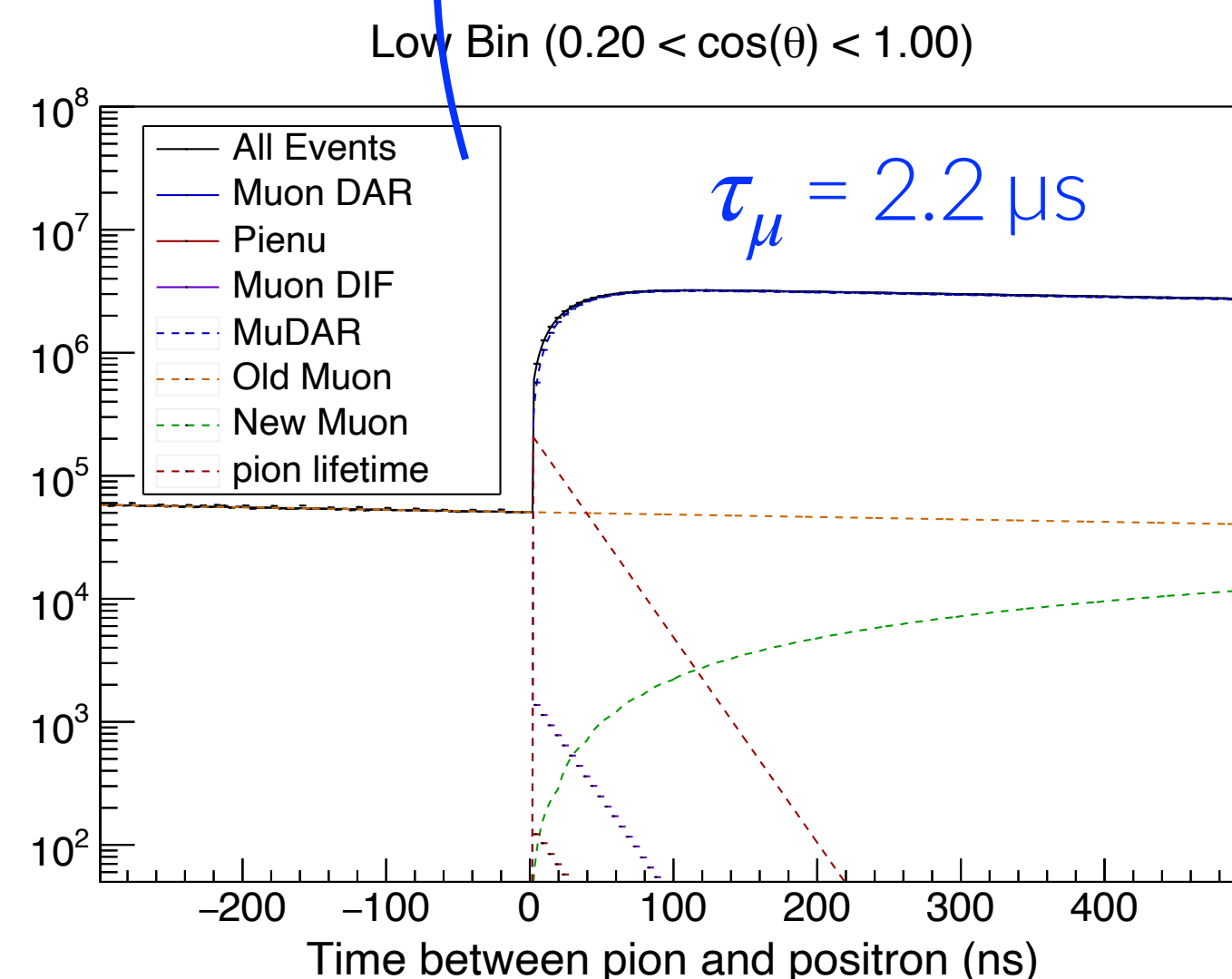
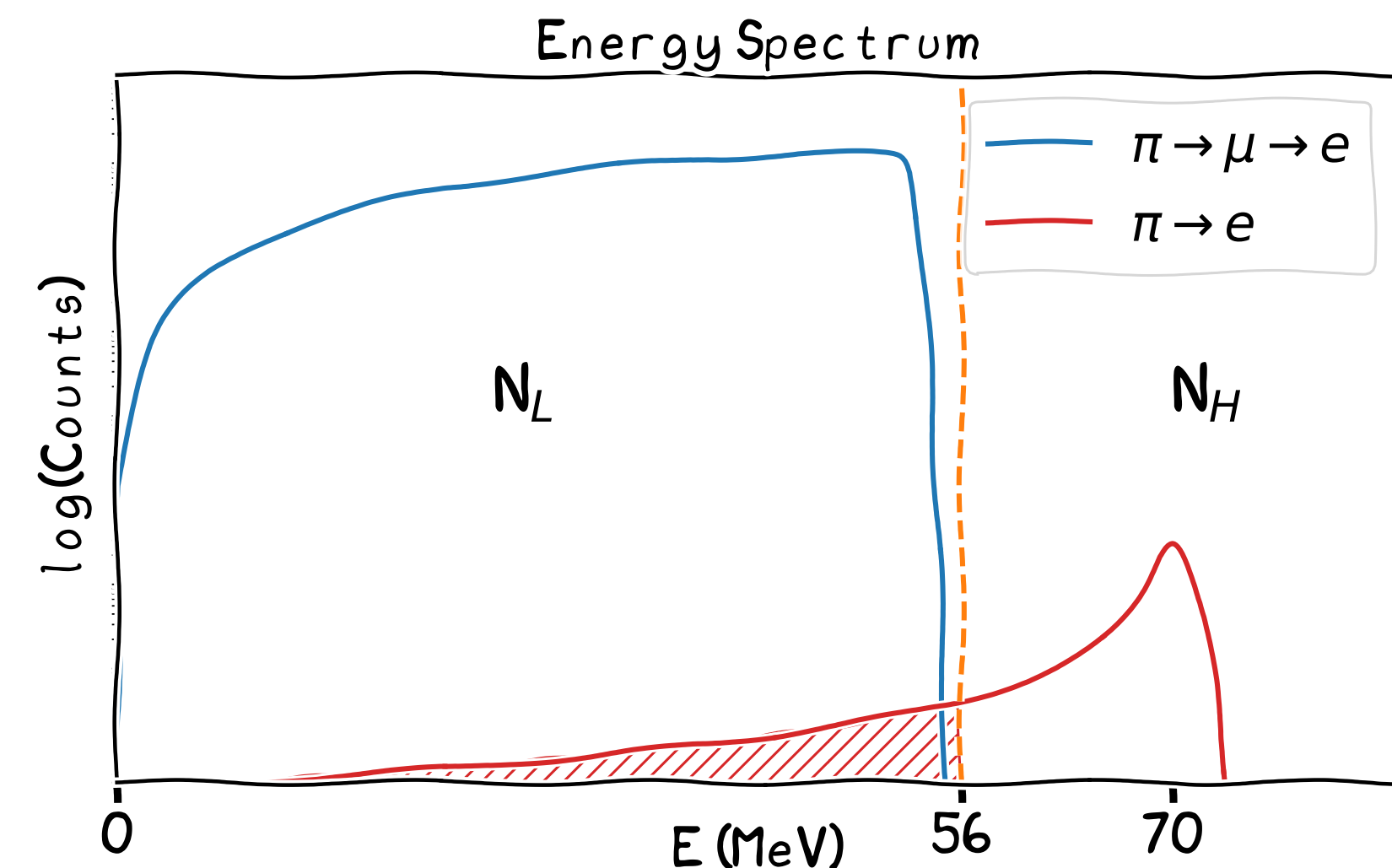


$R_{e/\mu}$ 測定戦略 = 大統計 x 正確な事象同定

$$R_{e/\mu} = \left\langle \frac{N_{\pi-e}^H(\theta)}{N_{\pi-\mu-e}^L(\theta)} \times [1 + c_{\text{tail}}(\theta)] \times R^\varepsilon(\theta) \right\rangle$$

アクセプタンス

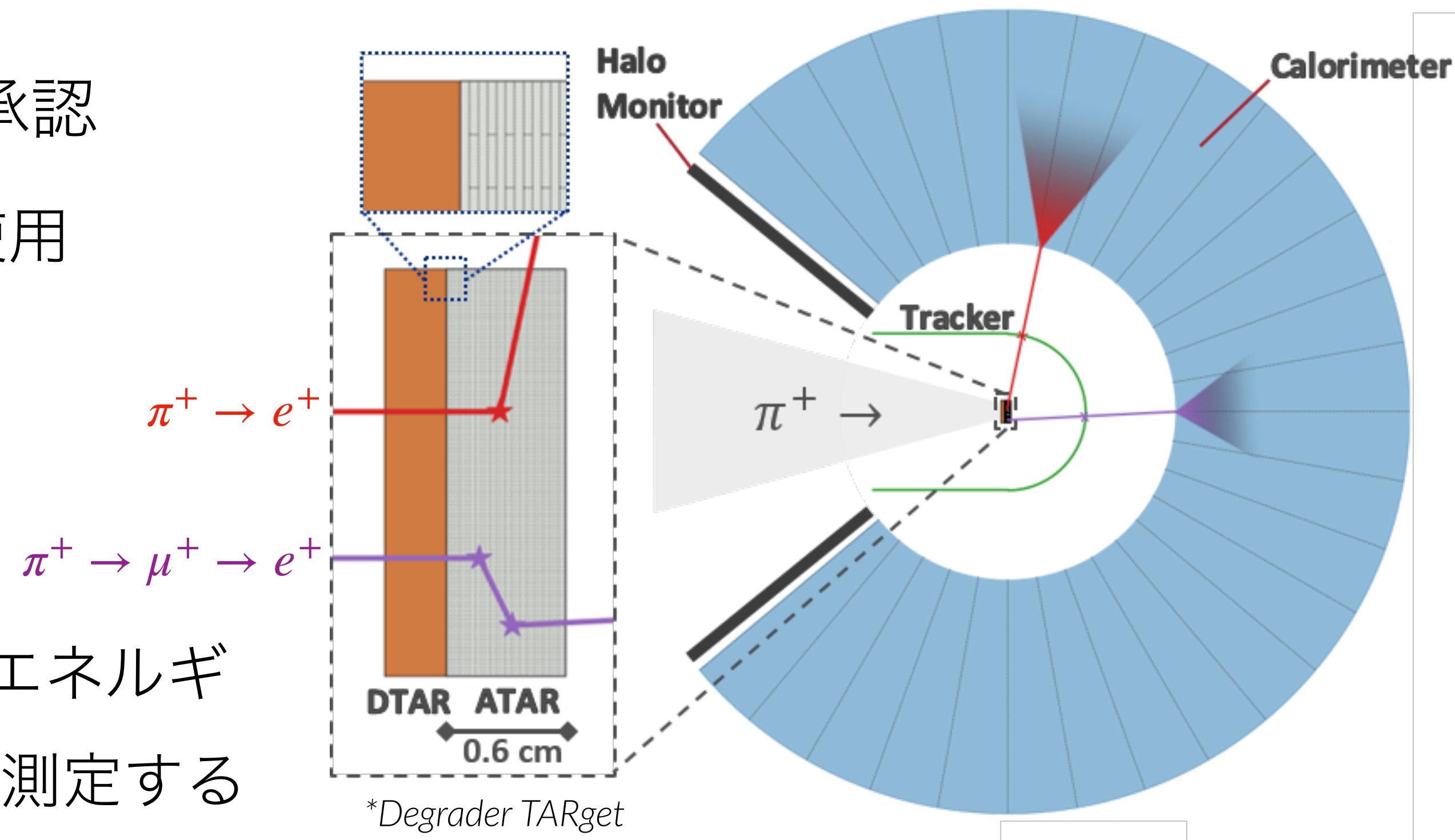
低エネルギーテールの補正



	目標値	要求精度 (%)
N^H	2×10^8	<0.01
N^L	2×10^{10}	<0.01
c_{tail}	0.01	1
R^ε	1	<0.01
$R_{e/\mu}$	1.23×10^{-4}	0.01

PIONEER実験 @ Paul Scherrer Institut

- 2022年にPaul Scherrer Institut (スイス)で承認
 - 世界最大強度の陽子ビームの二次 π 粒子を使用
- 検出器R&Dが進行中
 - Active TARgetで π^+ を静止させて、
 - 崩壊して出てくる e^+ の放出角、放出時間、エネルギーをATAR・トラッカー・カロリメーターで測定する
- 2030年に物理データ取得を目指す



65 MeV/c π ビーム

- 静止レート at 300 kHz
- サイズを2 cmにフォーカスする必要

LGAD-based Active TARget

- 5D tracking (x, y, z, t, E)
- 現在達成しているヒット分解能:
60 μm , 200 ps, 20%

カロリメーター

- 深さ $20X_0$ (低エネルギーテールを減らす)
- 広いアクセプタンス ($\theta \sim 120^\circ$)
- LYSO or LXe

液体キセノンカロリメーター

● 4.5tの液体キセノン

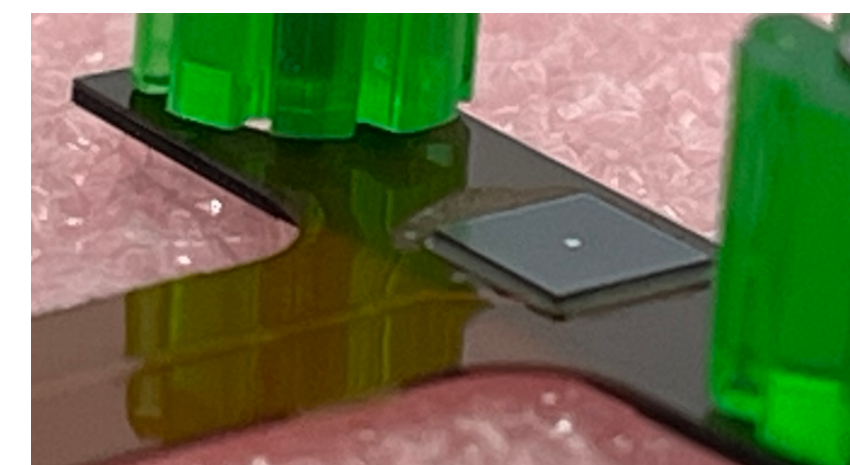
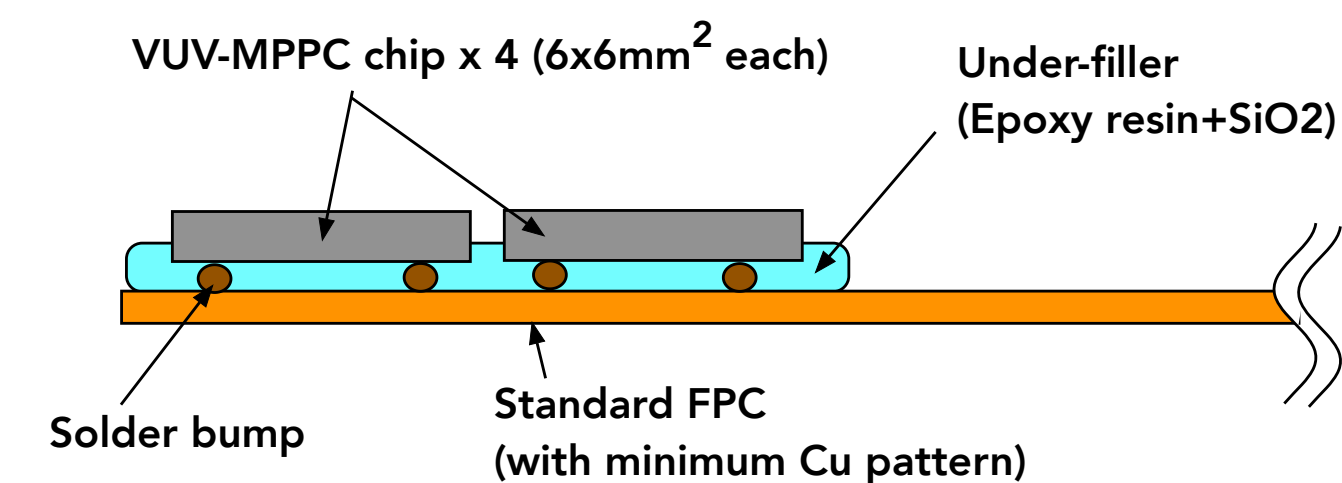
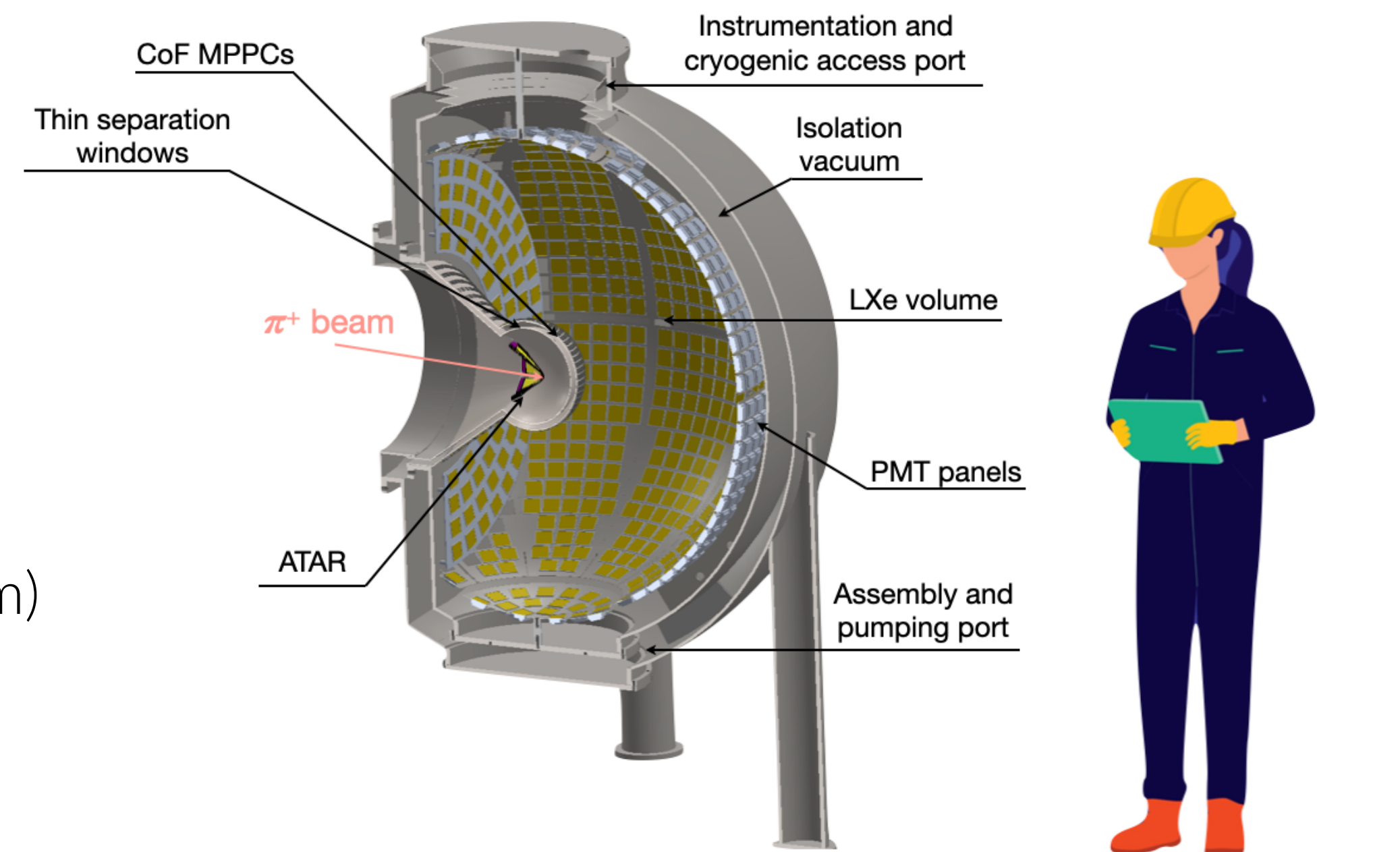
- 大光量 (46000 photons/MeV)
- 速い応答 (45 nsの時定数)
- 実装するためのチャレンジ
 - 低温環境 (160 K)、VUV領域のシンチレーション光 (175 nm)

● 陽電子の入射面に~1200個の低物質質量MPPC

- Chip-on-film技術
- Dead materialをなるべく抑えて実装する必要 (鈴木の講演)
- VUV光に感度があり放射線損傷に強いCOF-MPPCの開発 (小川の講演)

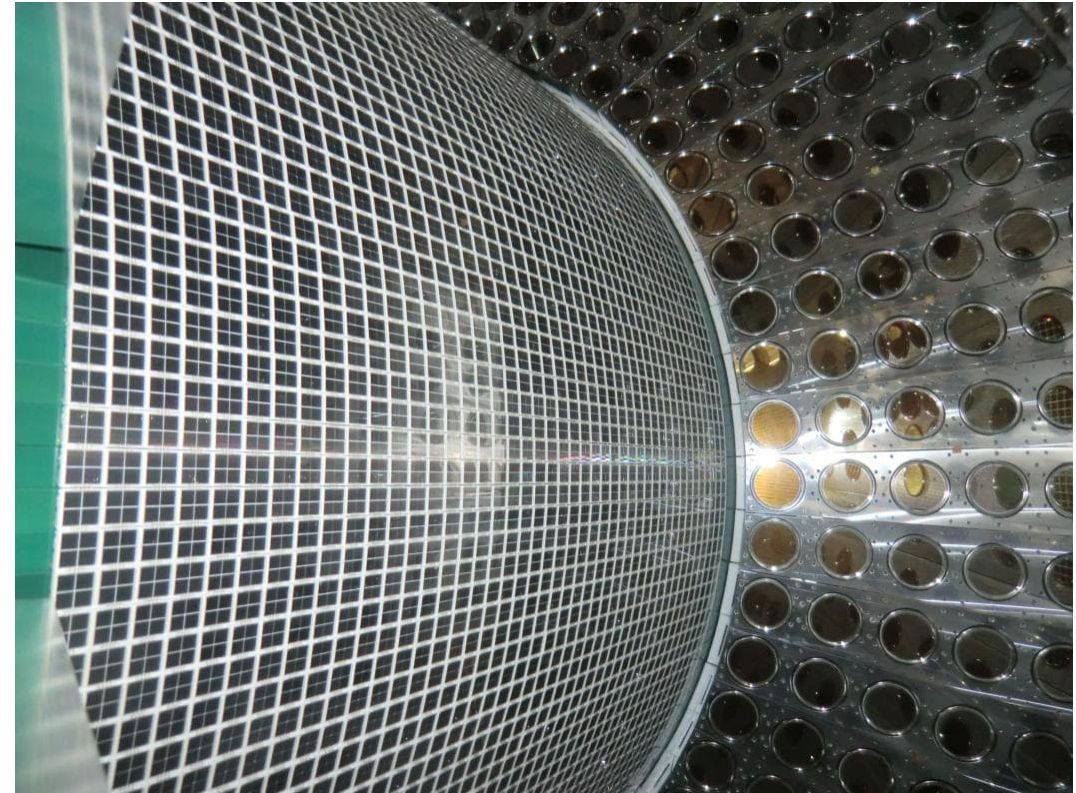
● 外側の面には~700本の光電子増倍管

- MEG II実験での経験から良い性能が出ることは知っている



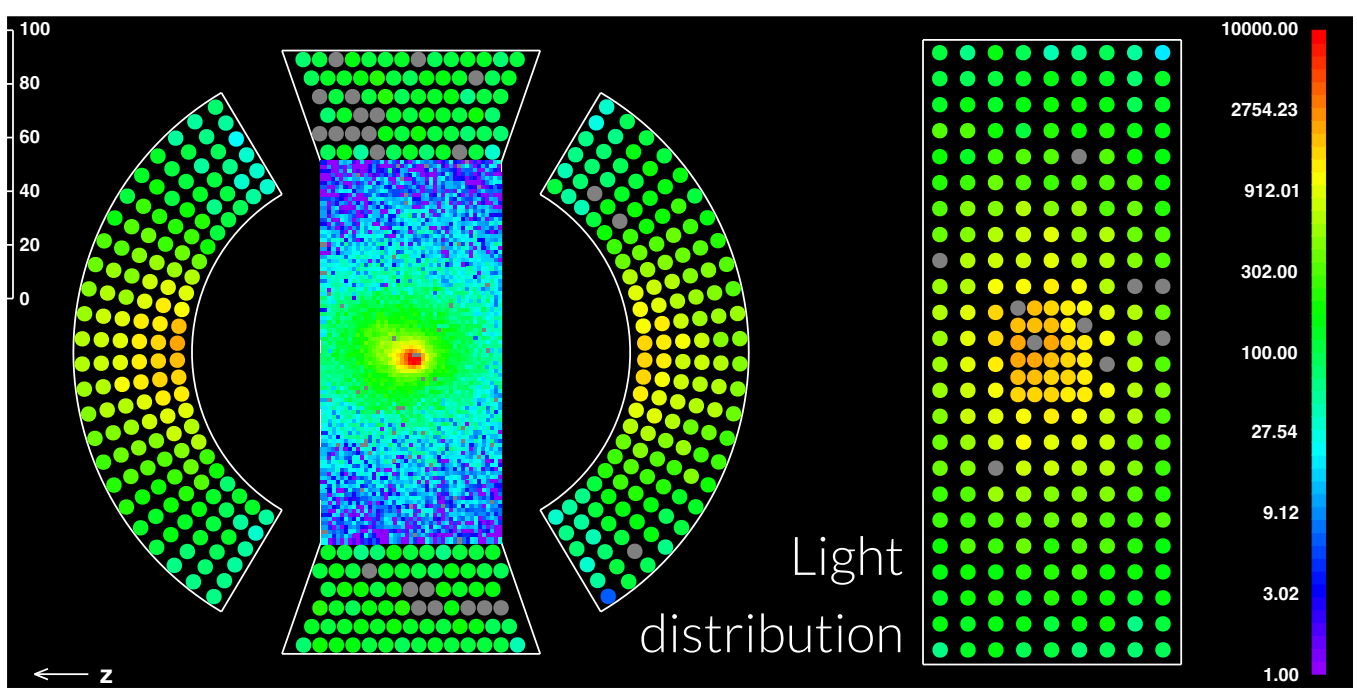
MEG II 液体キセノンガンマ線検出器

- 53 MeV付近のガンマ線の位置・時間・エネルギーを測定
 - 2.7t (900 L) の液体キセノン
 - ガンマ線入射面に4092個のMPPC + そのほかの面に668個のPMT

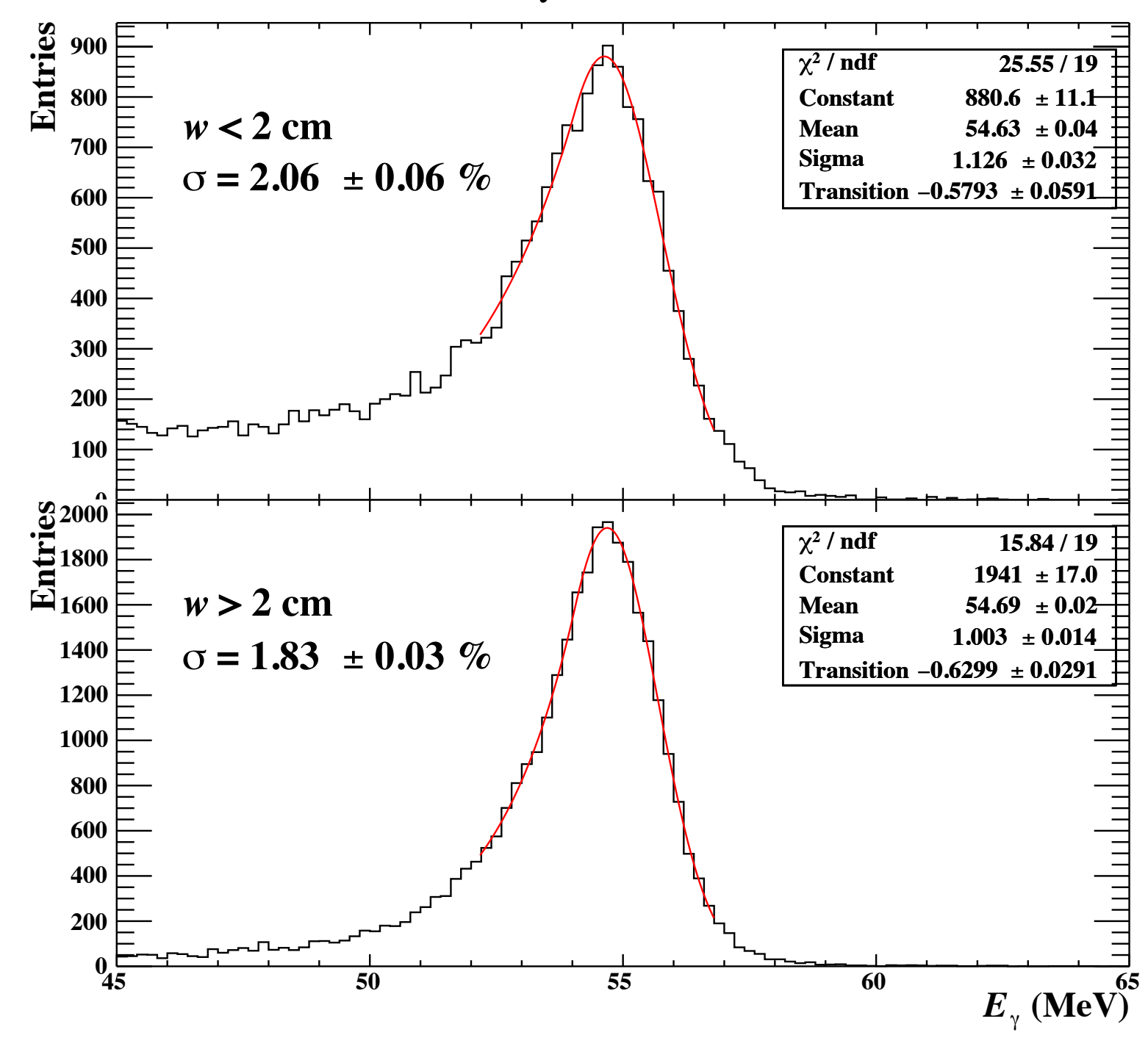


実測分解能@52.8 MeV

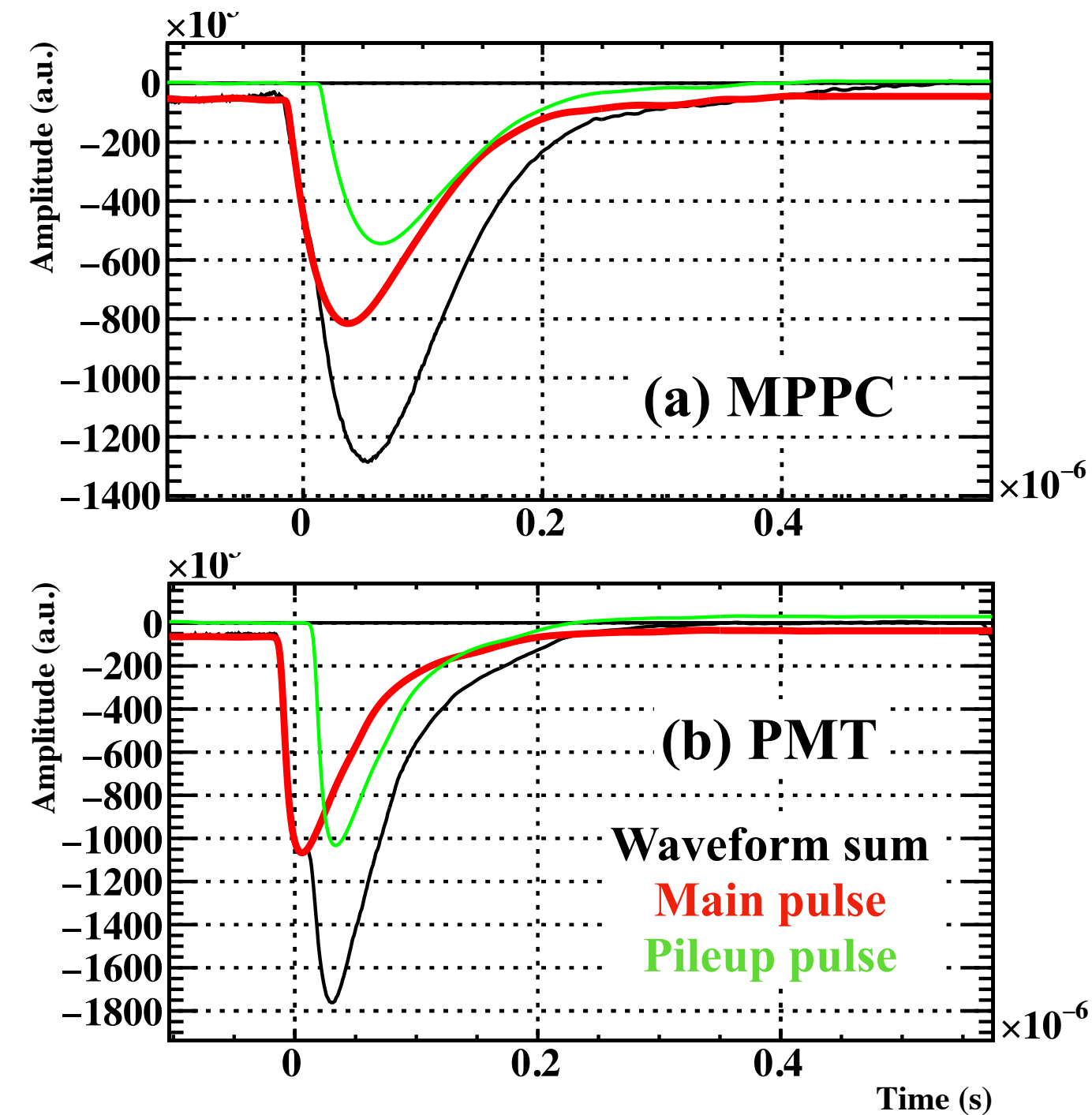
	分解能
位置	2.5 mm
時間	63 ps
エネルギー	2.1% / 1.9% (浅い / 深いイベント)



55 MeV γ に対する応答



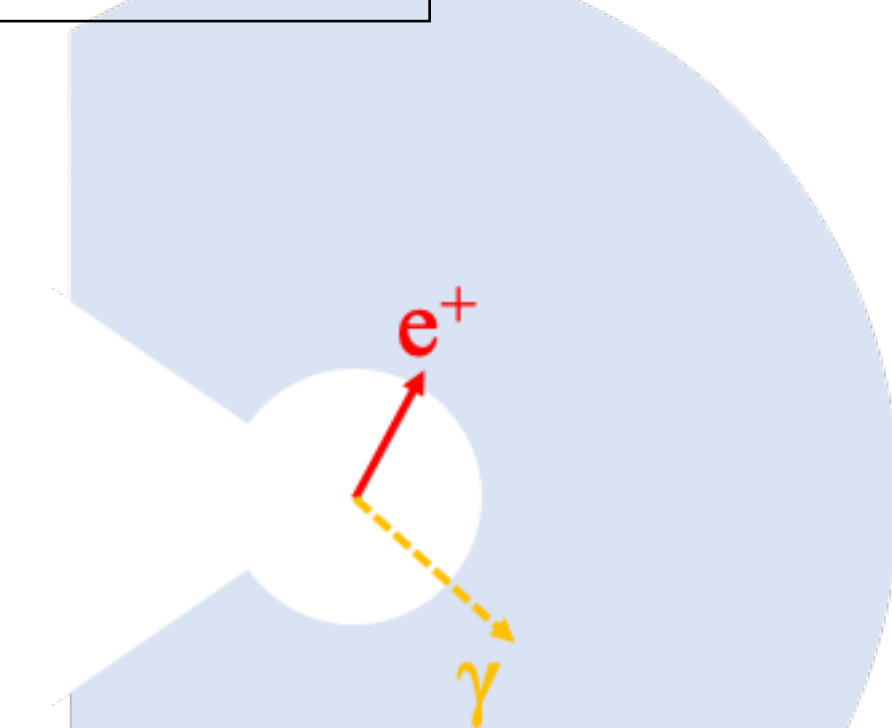
和波形を使ったパイルアップ分離



PIONEER実験での陽電子測定のエッセンス

- 1つの~53 MeVのガンマ線に対して良い性能が出るのはよく知っている
- PIONEER実験ではスペクトル測定が重要
- **パイルアップを分離してそれぞれの陽電子を良い分解能で再構成する必要**
 - 複数イベントの分離 → クラスタリング・和波形解析

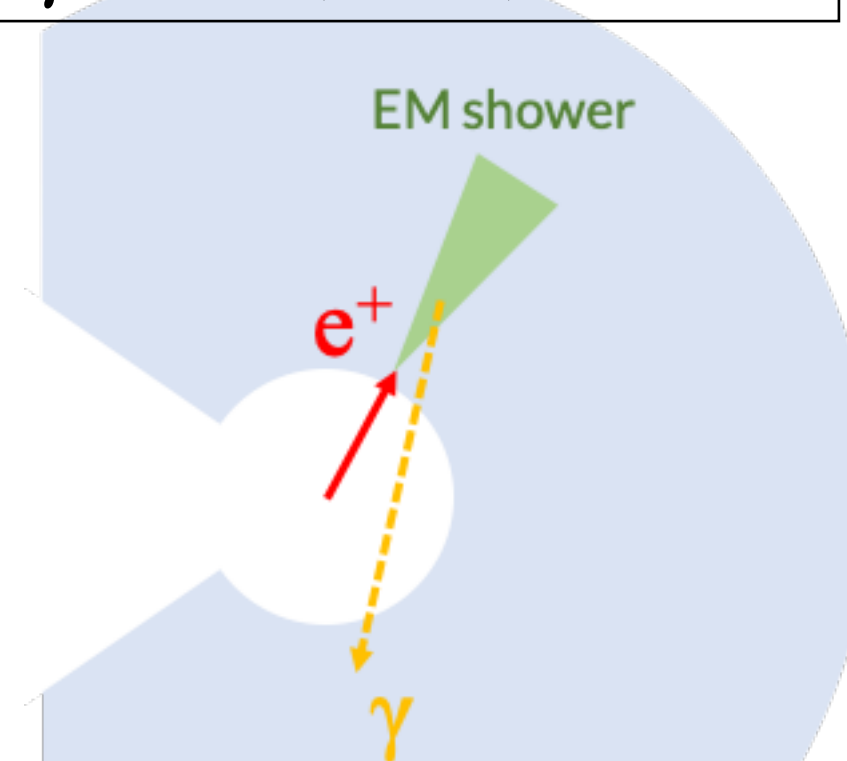
輻射崩壊: 同時刻



不変質量を計算する

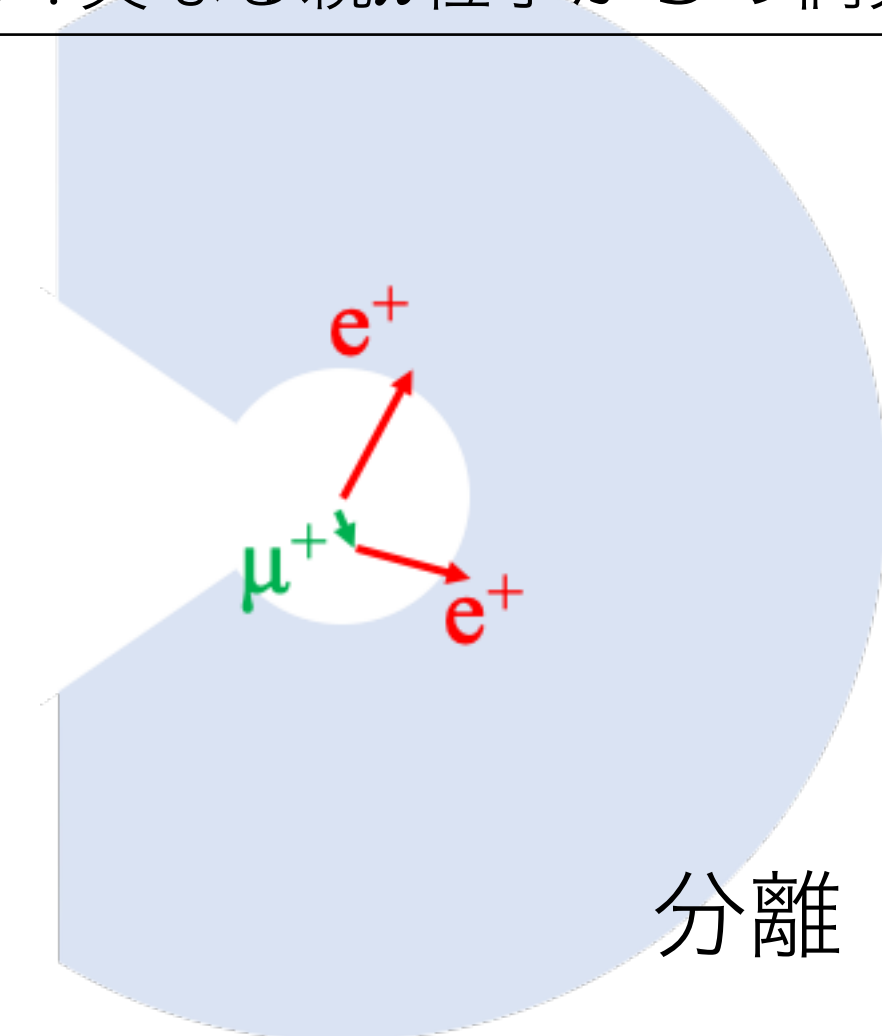
$$E = \frac{1}{2} (p_\nu + E_\gamma + E_e)$$

Albedo: γ のTOF (~1 ns)の時間差



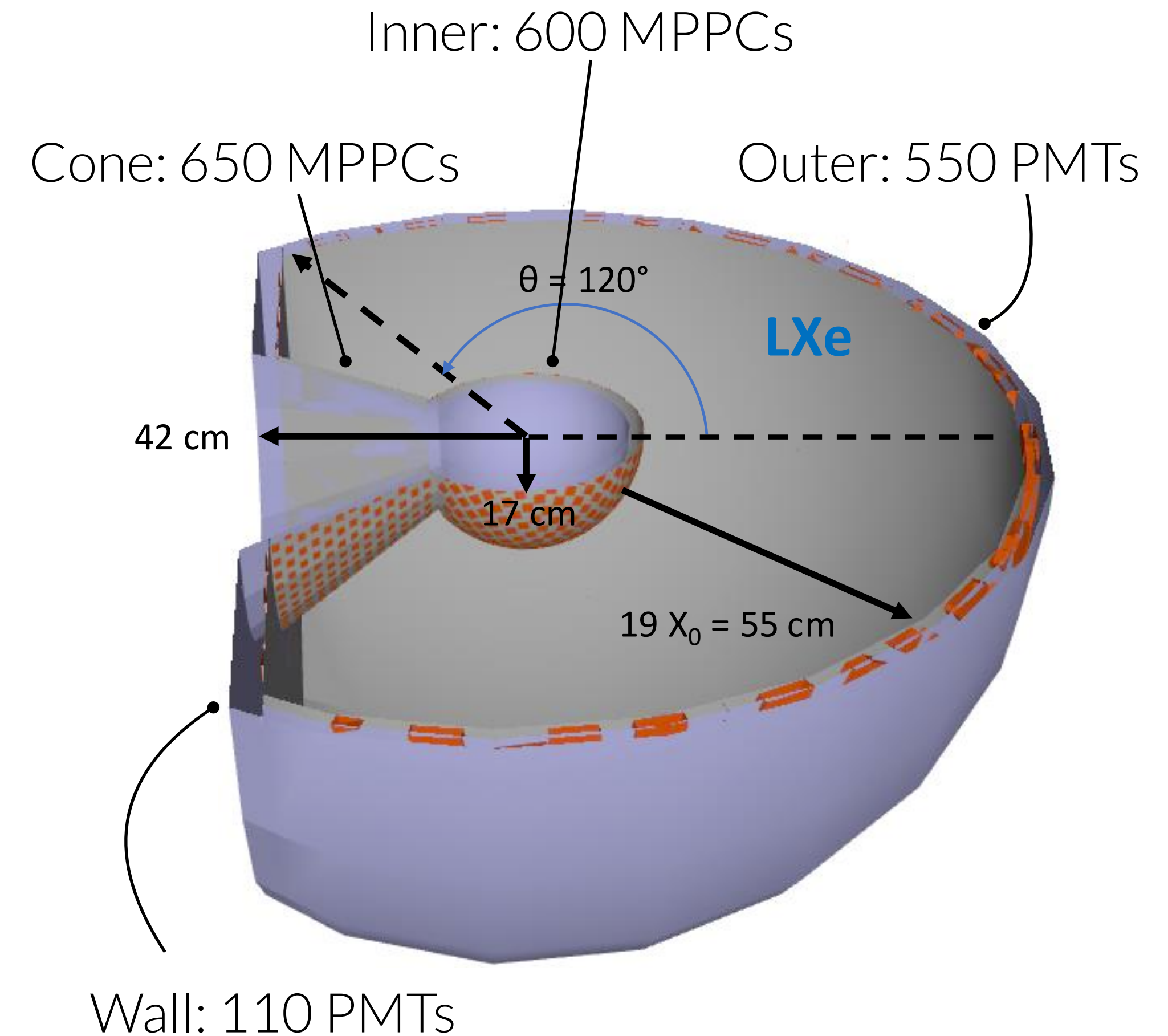
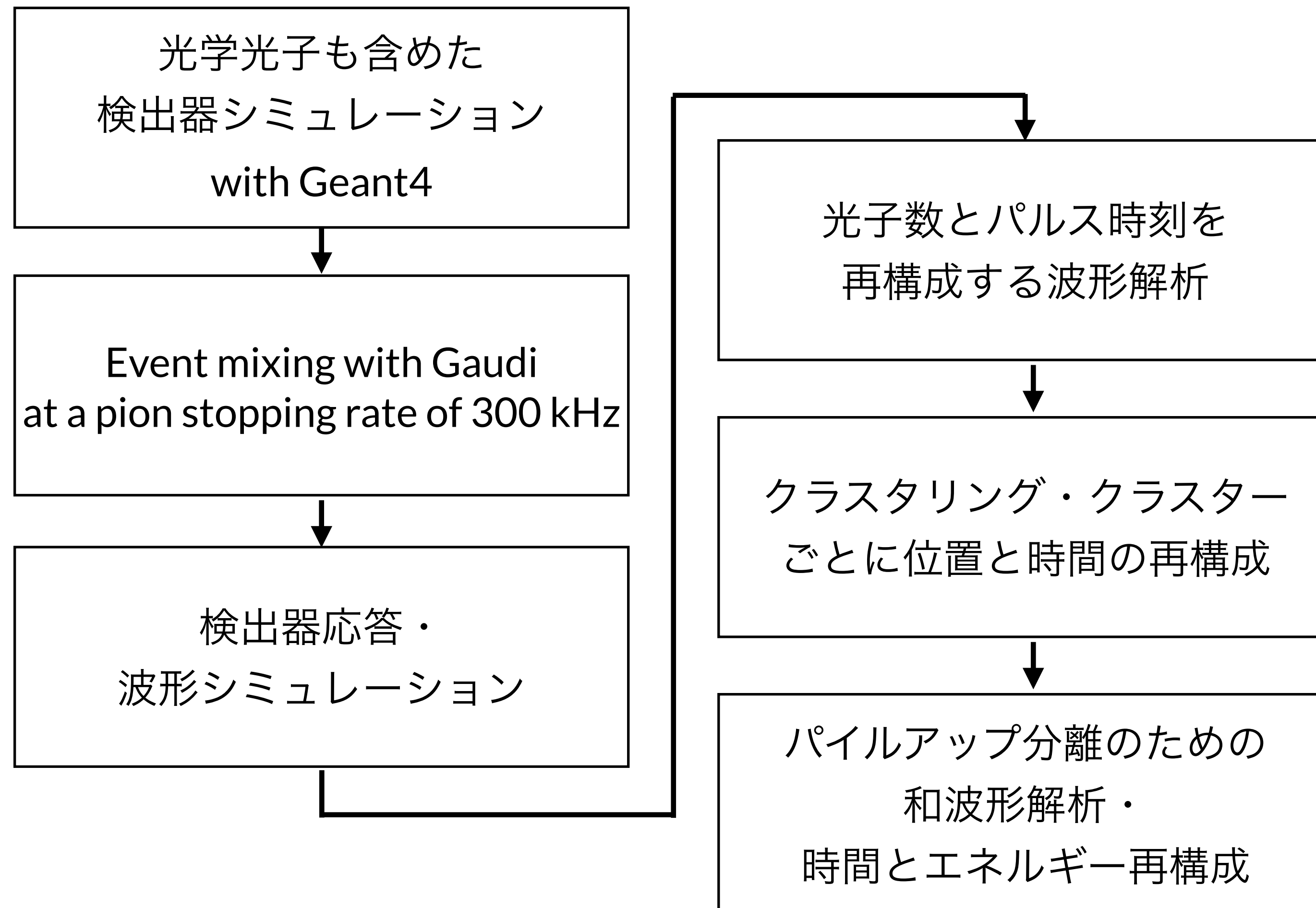
陽電子エネルギーに足し上げる

パイルアップ: 異なる親 π 粒子からの偶発的な重なり

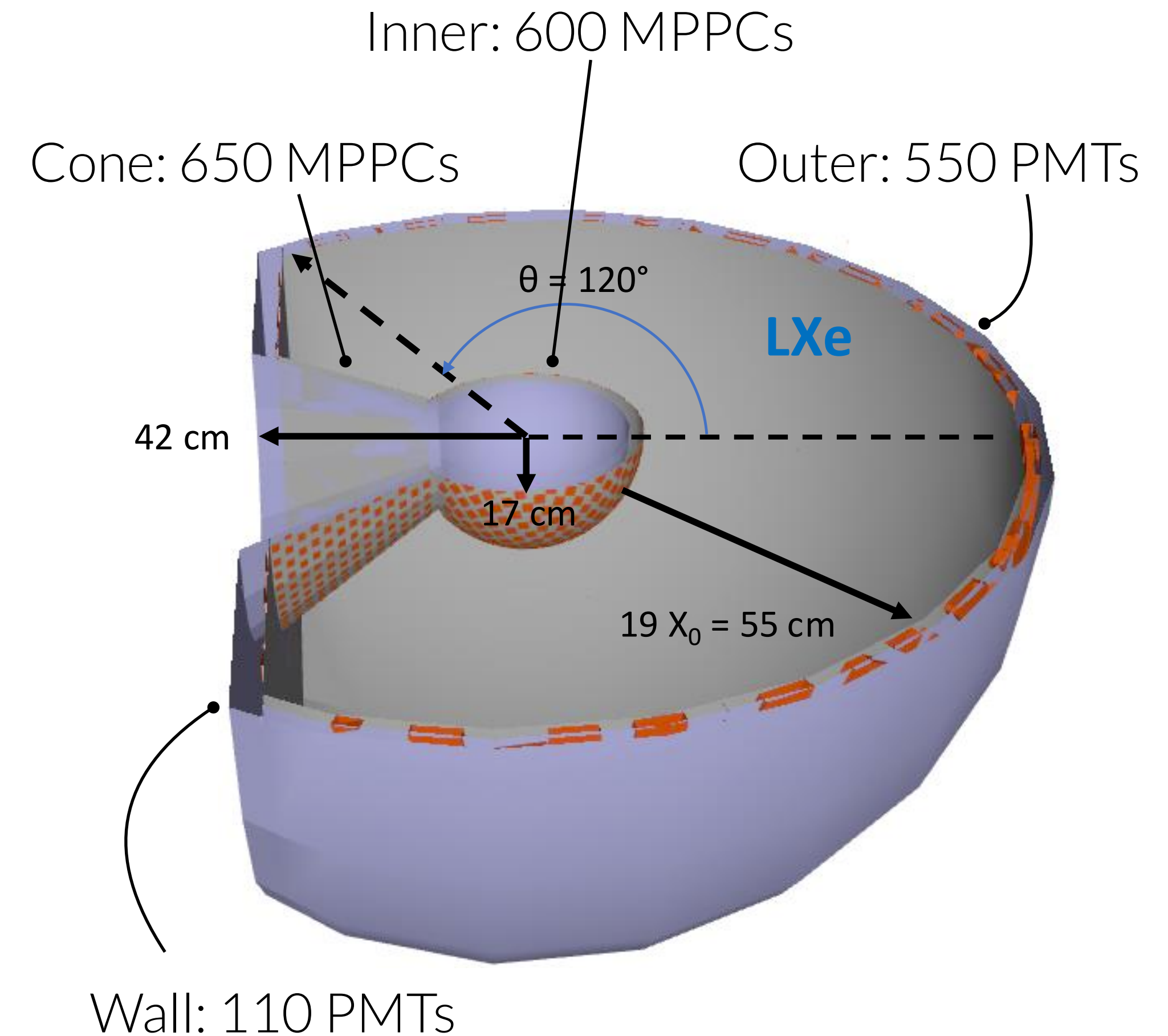
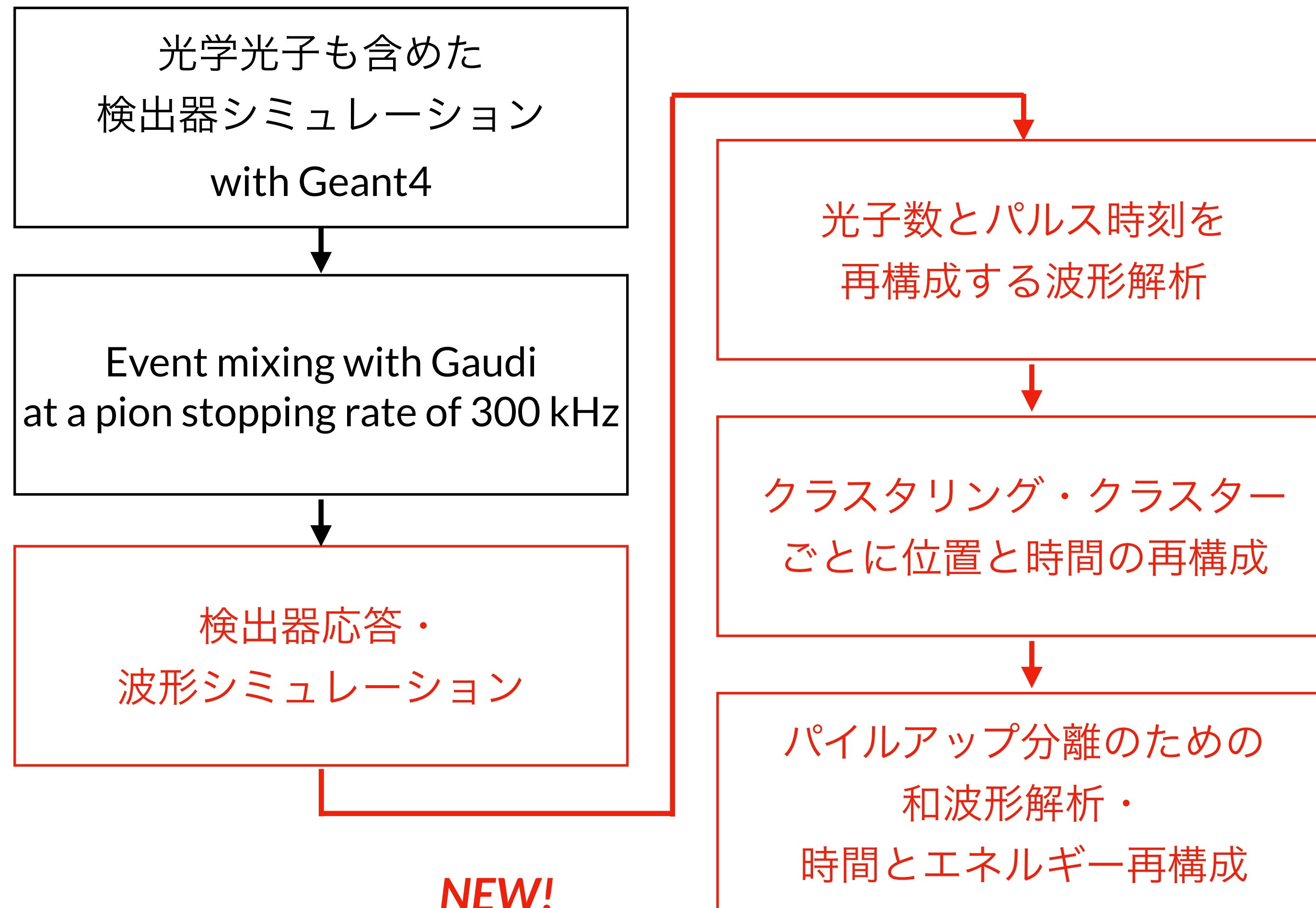


分離

シミュレーション・再構成の流れ

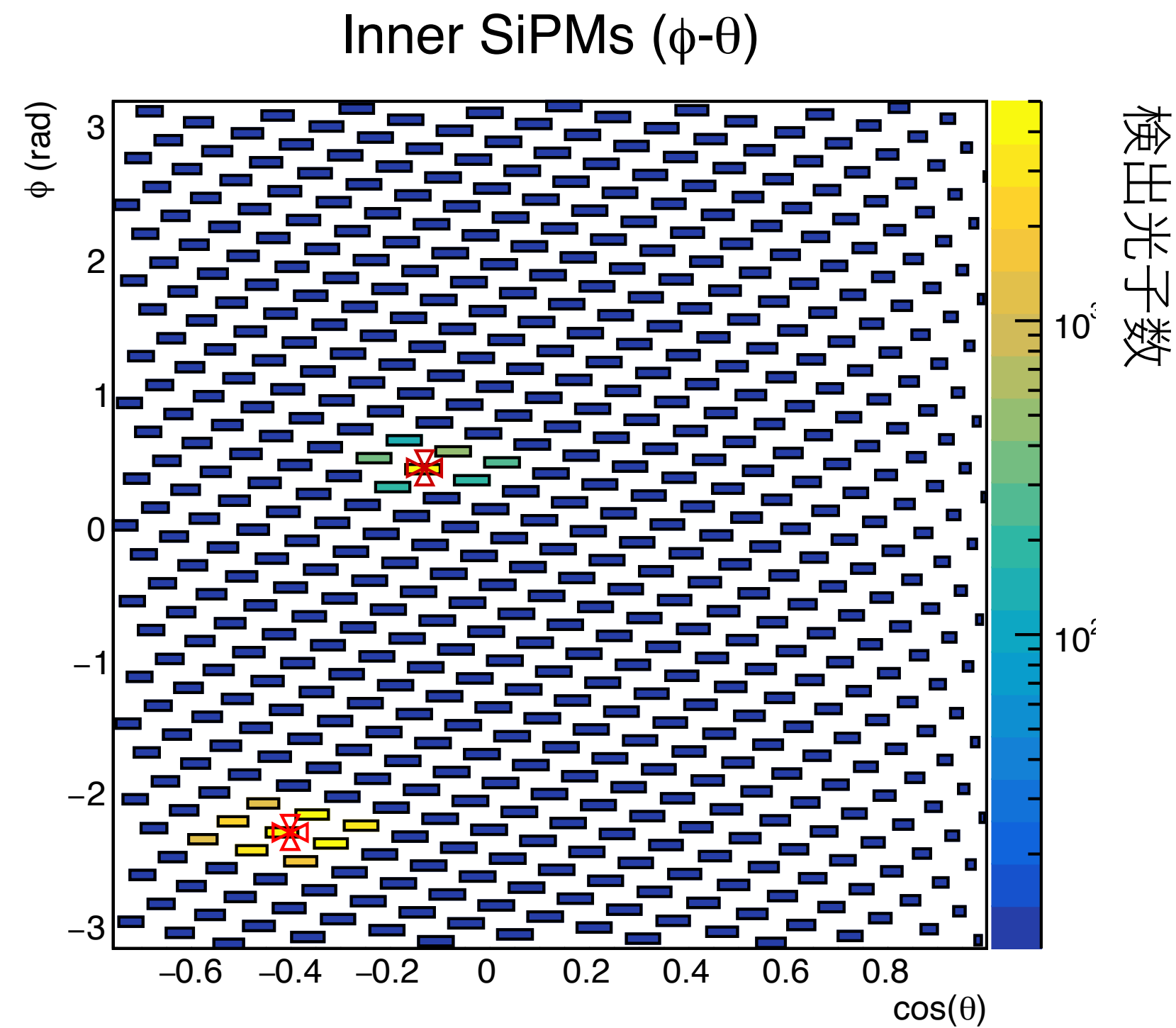


シミュレーション・再構成の流れ



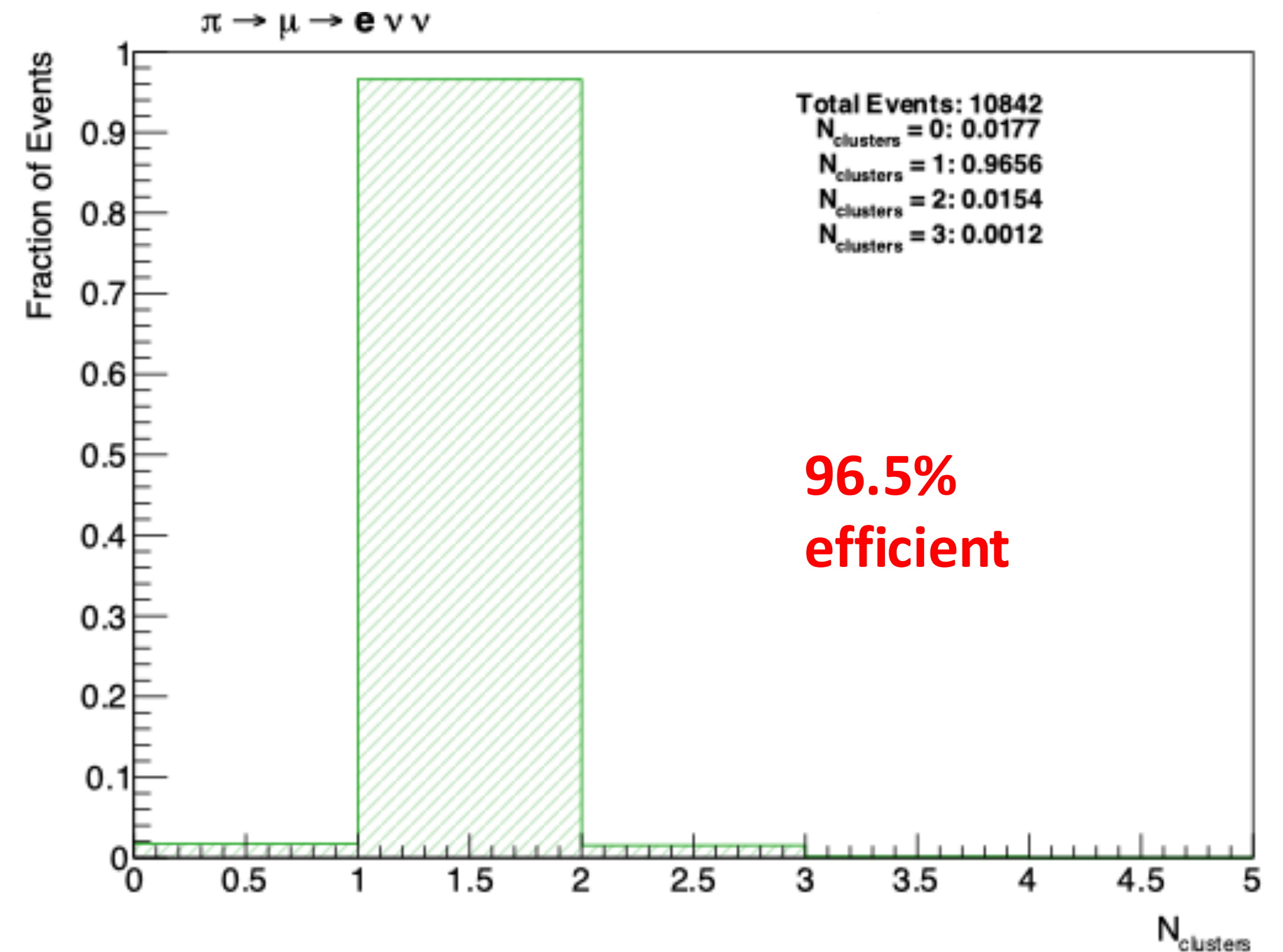
クラスタリング

- 入射粒子ごとにヒットをグルーピング
 - 検出光子数 + 検出時間でグルーピング
 - クラスターごとに位置と時間を計算



*球面を ϕ - $\cos \theta$ 平面に展開

Single hit clustering efficiency for <53 MeV e^+



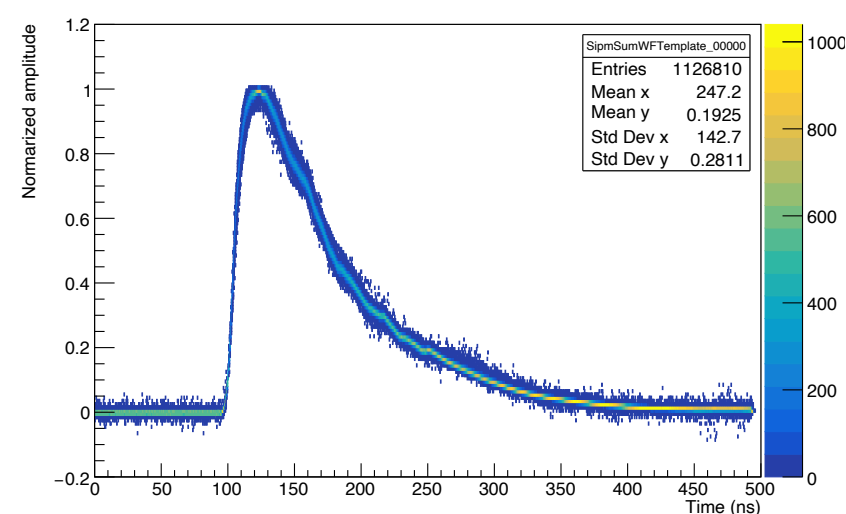
パイルアップ分離のための和波形解析

SiPMとPMTで独立に和波形を作る

クラスタリングの結果からシードパルスを入力する

$(n_{\text{pulse}}, N_{\text{cluster}}, t_{\text{cluster}})$

SiPMテンプレート波形



テンプレート波形でフィット

$$\chi_{\text{wf}}^2 = \sum_{\text{MPPC, PMT}} \int \frac{\left(V(\tau) - \sum_i^{n_{\text{pulse}}} f(\tau; A_i, T_i) \right)^2}{\sigma_f^2(\tau)} d\tau$$

n.b. $T_{\text{MPPC},i} = T_{\text{PMT},i} - 5 \text{ ns}$

$\chi_{\text{wf}}^2 / NDF < 10$

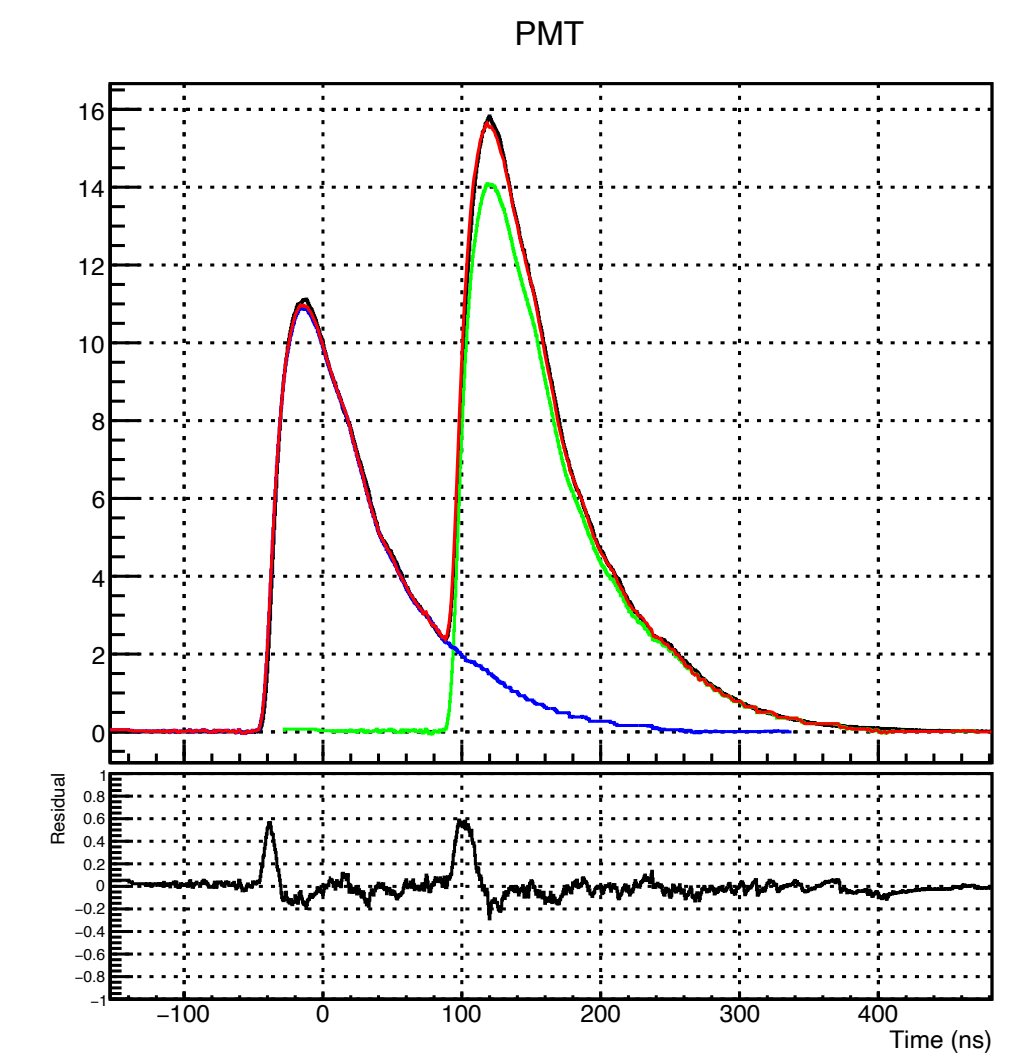
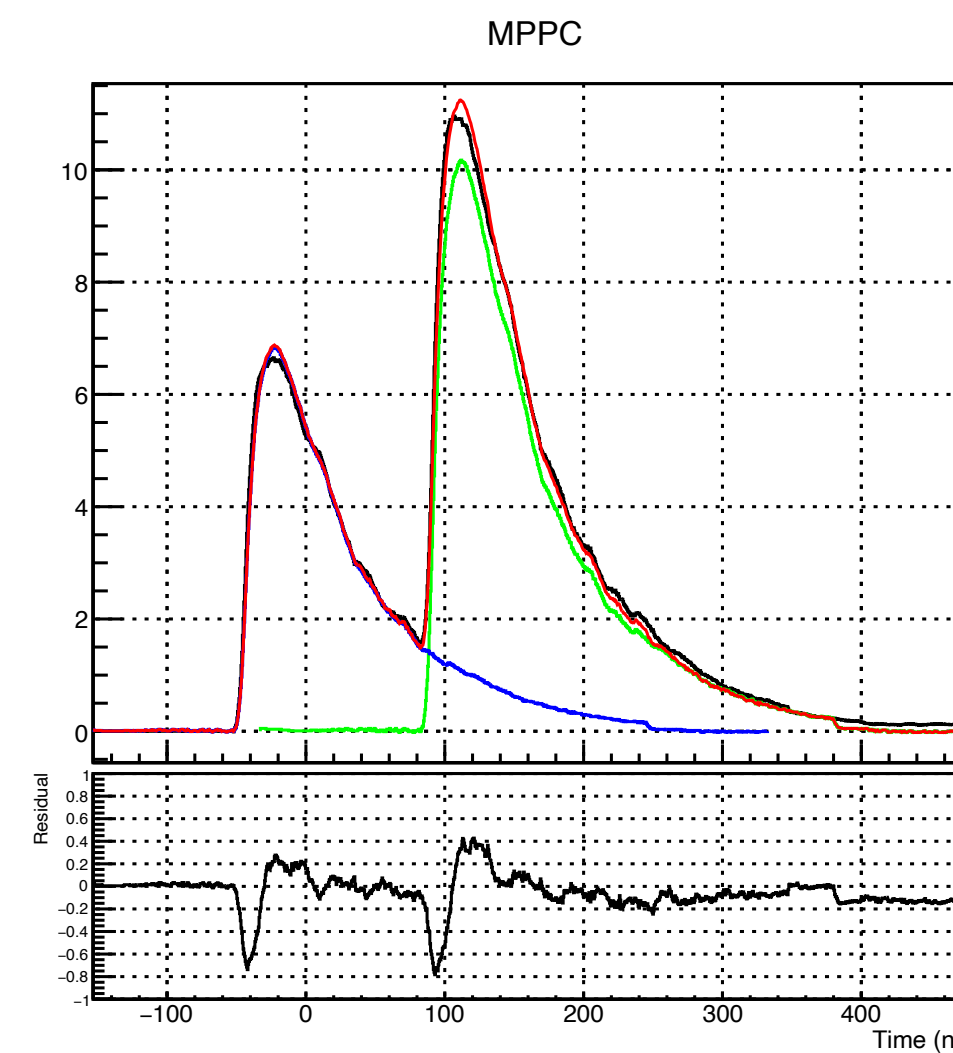
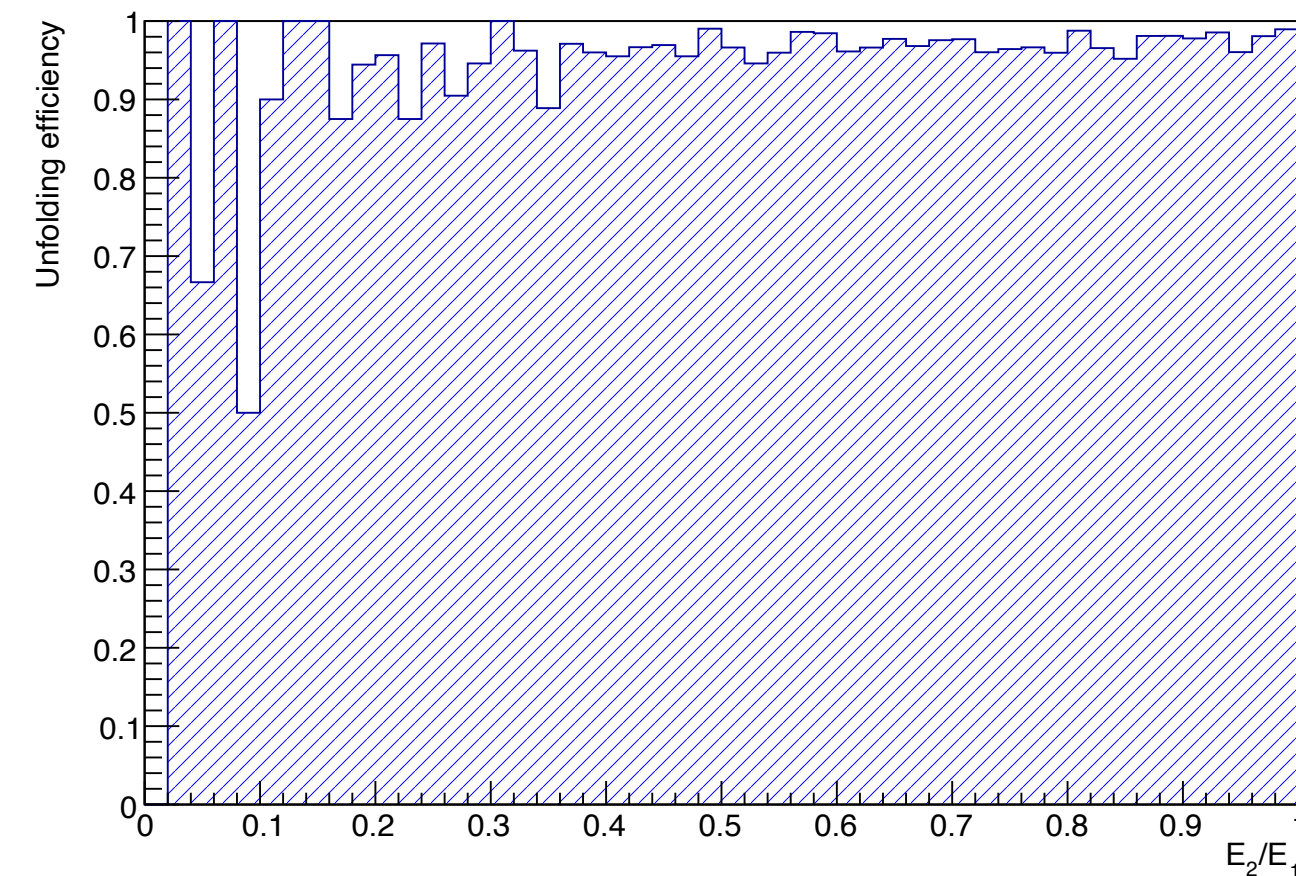
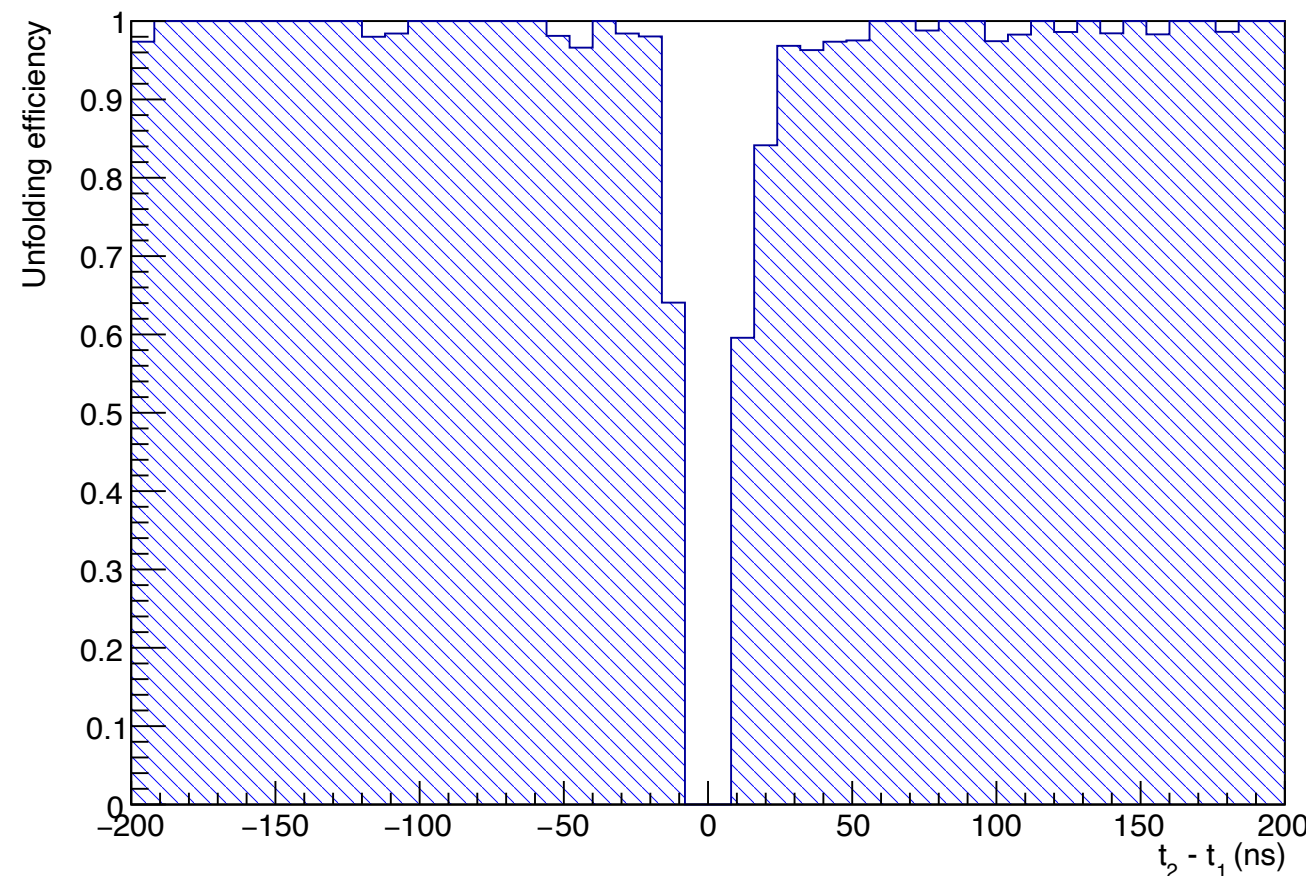
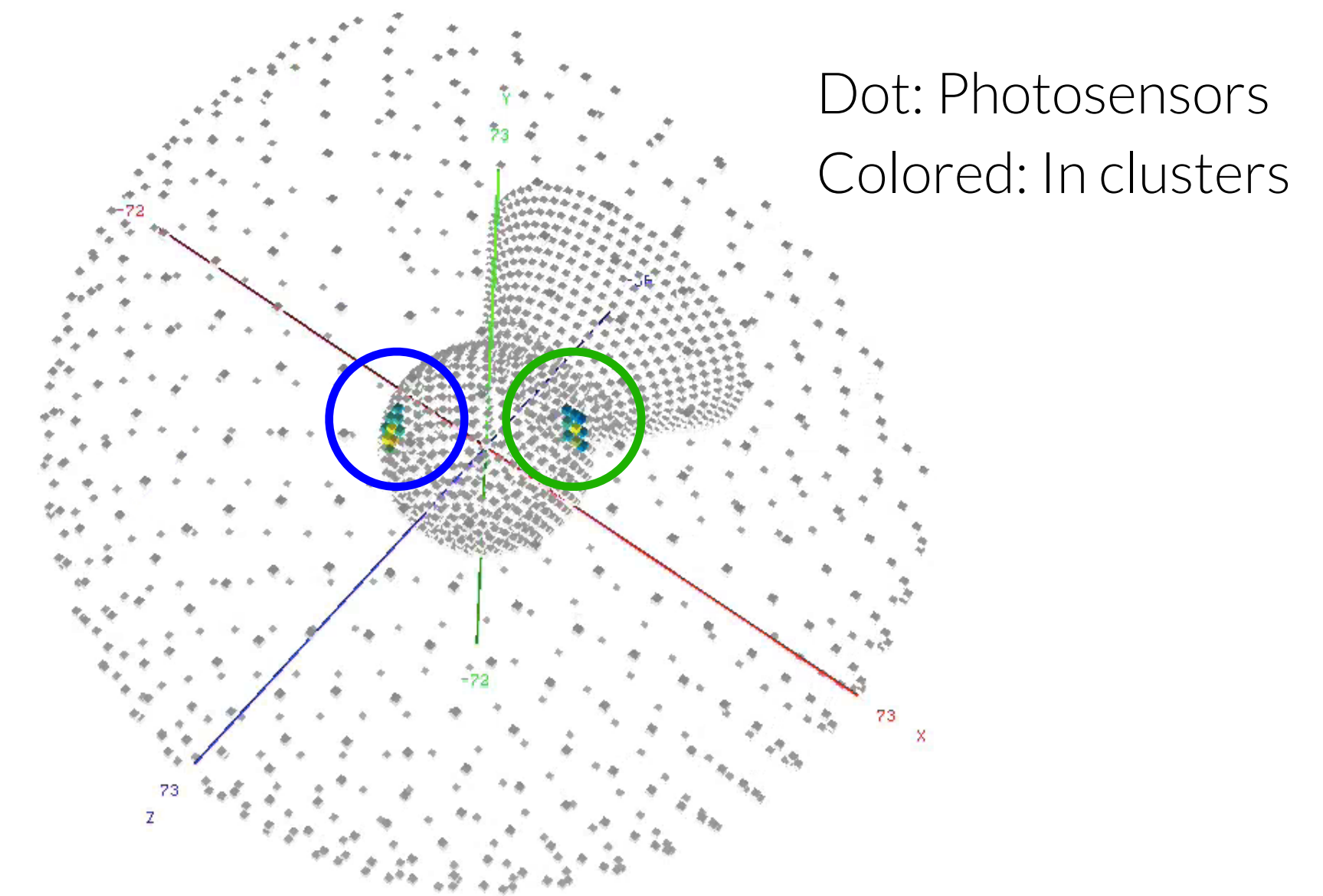
分離してそれぞれを再構成

$\chi_{\text{wf}}^2 / NDF > 10$ or abnormal fit status

パイルアップイベントとして処理

パイルアップ分離性能

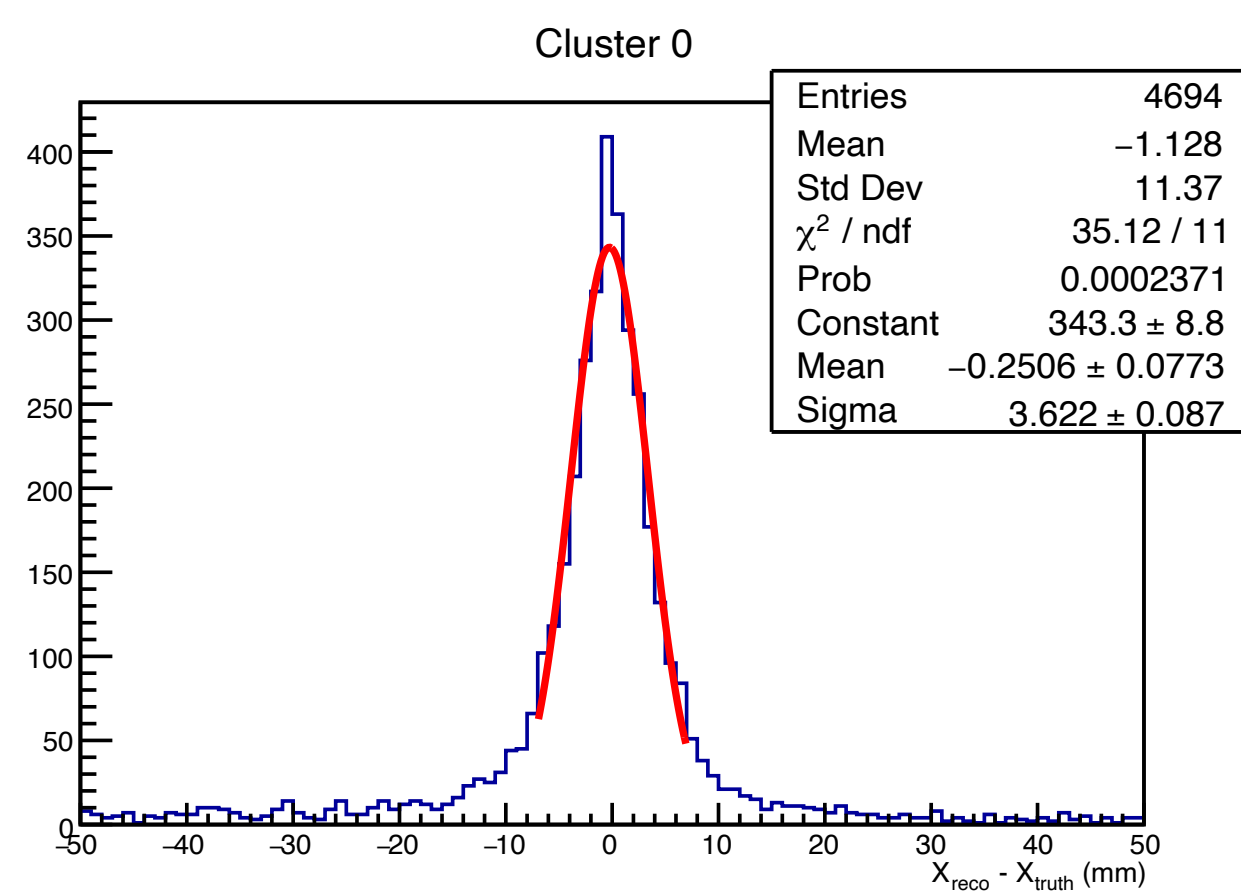
- 2粒子パイルアップイベントに対して97%
の効率で分離
- もう1-2桁改善する必要あり
- 現在改善中



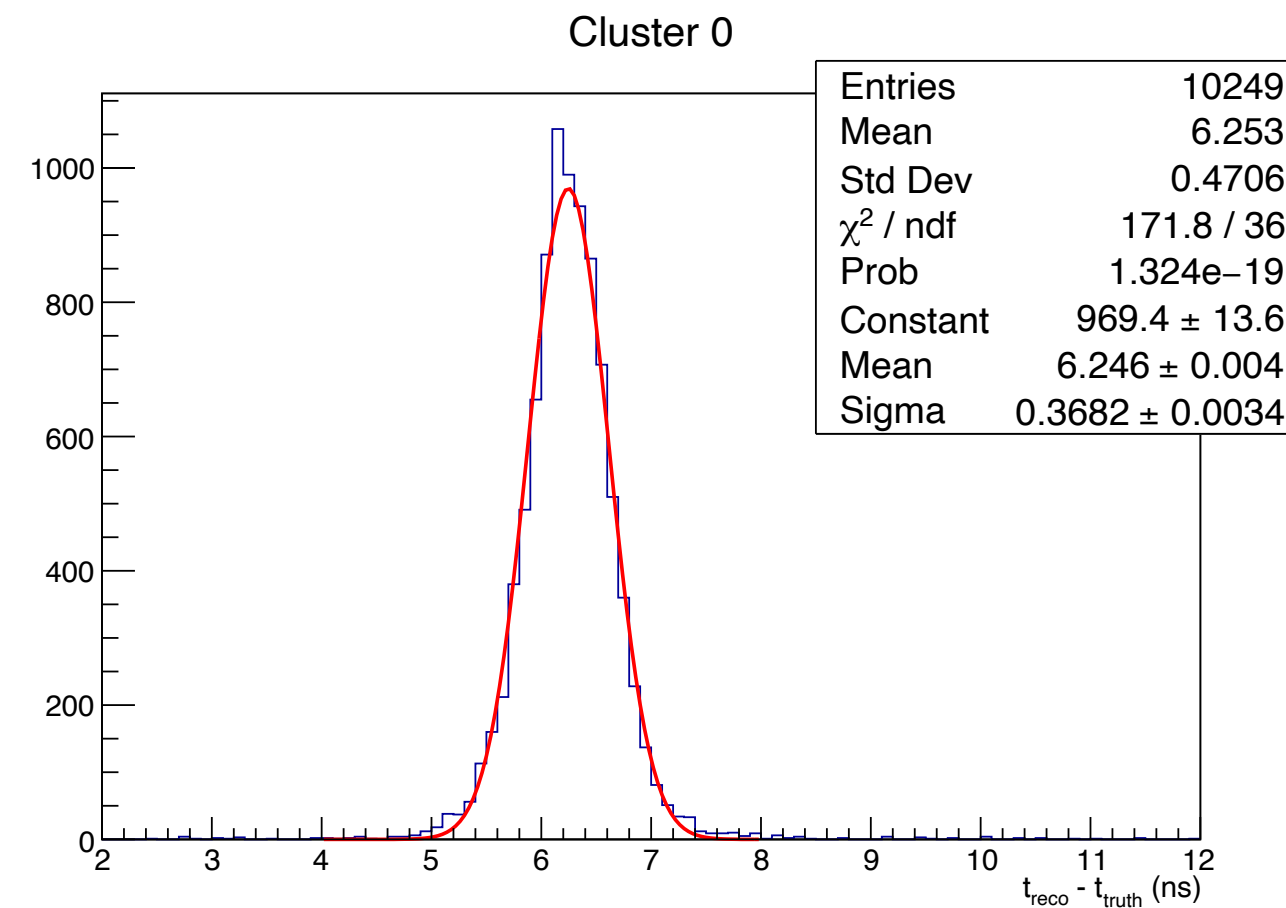
Preliminaryな分解能

- 再構成アルゴリズムに多くの改善の余地あり
 - 時間再構成: PMT情報を使う、計算に使うセンサー数の増加 (現在は10個以下)
 - エネルギー再構成: 陽電子入射位置によるセンサーの重みづけ

(主に) $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ 連鎖事象を使った評価

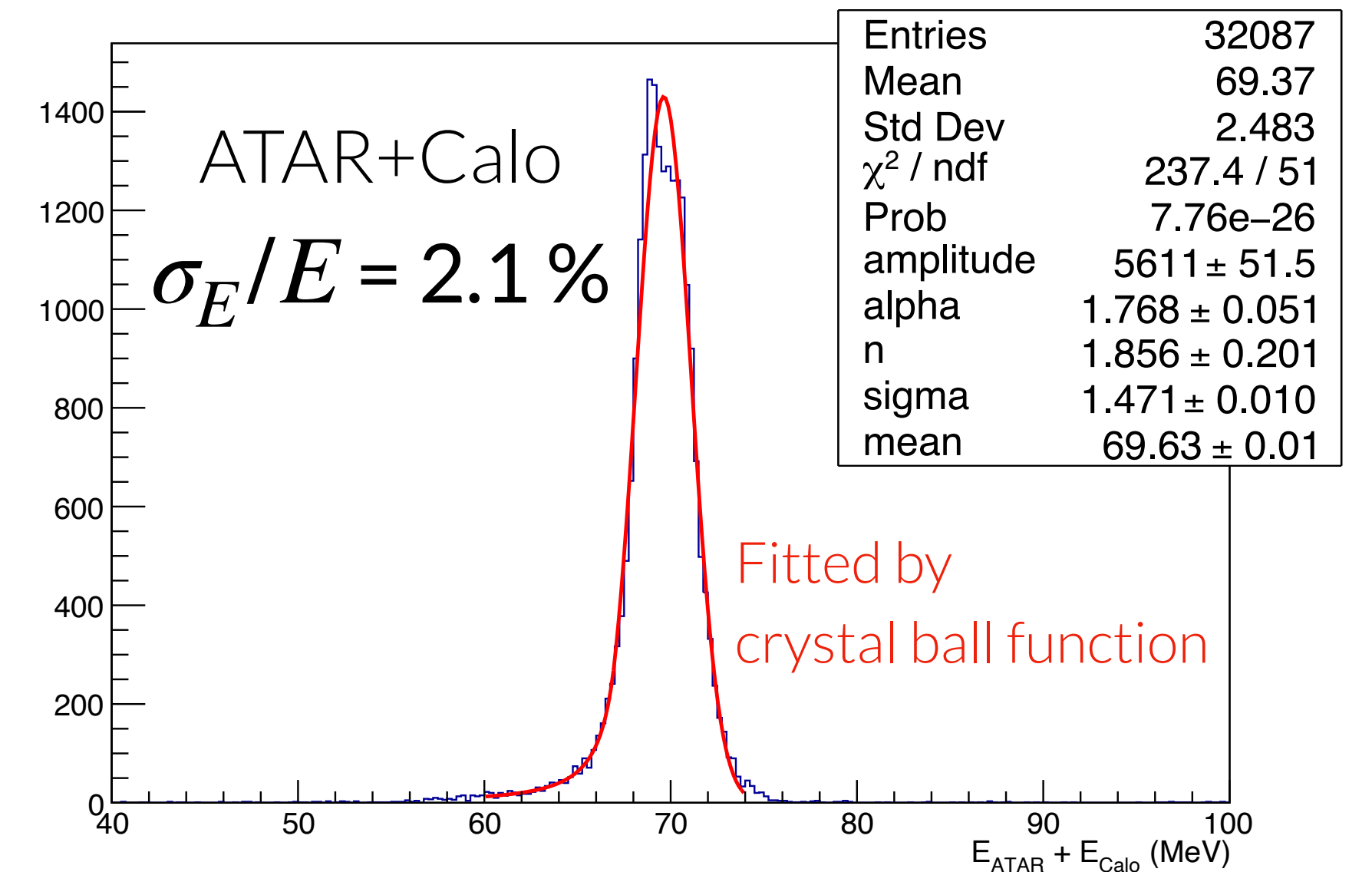


$$\sigma_{\vec{x}} = 3\text{-}4 \text{ mm}$$



$$\sigma_t = 370 \text{ ps}$$

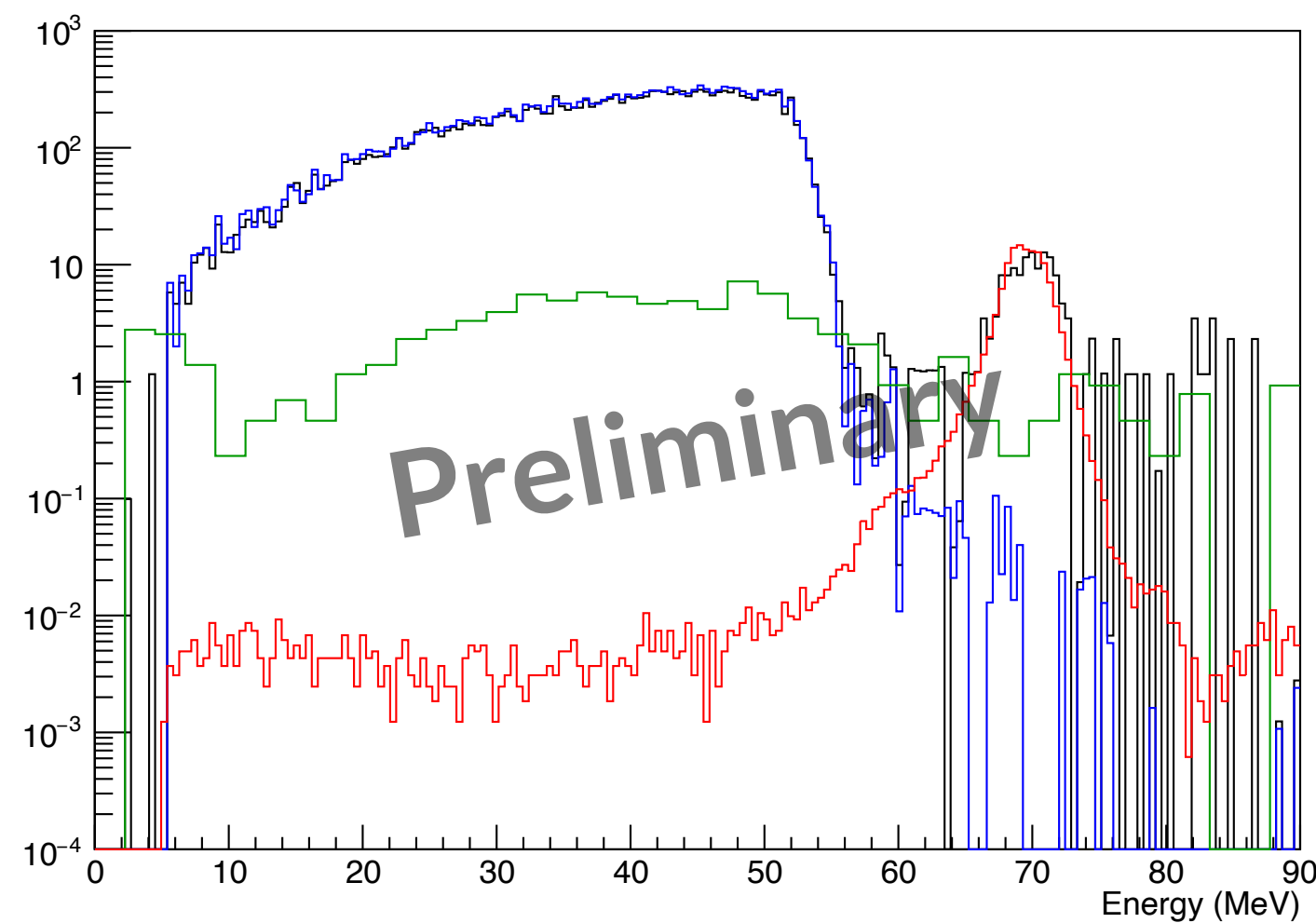
$\pi \rightarrow e\nu$ 事象を使った評価



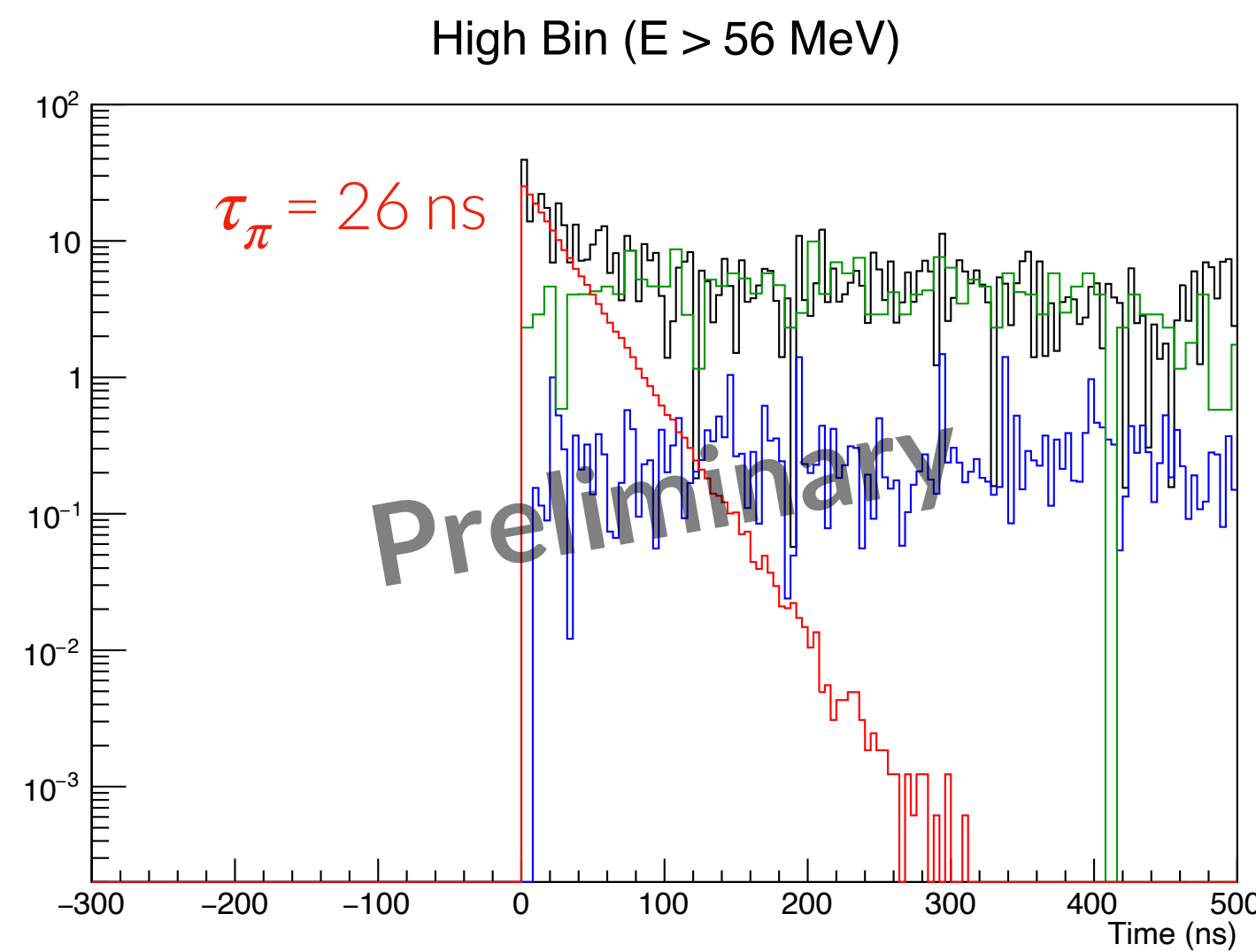
N^H/N^L 測定に向けて

$$R_{e/\mu} = \left\langle \frac{N_{\pi-e}^H(\theta)}{N_{\pi-\mu-e}^L(\theta)} \times [1 + c_{\text{tail}}(\theta)] \times R^\varepsilon(\theta) \right\rangle^{15}$$

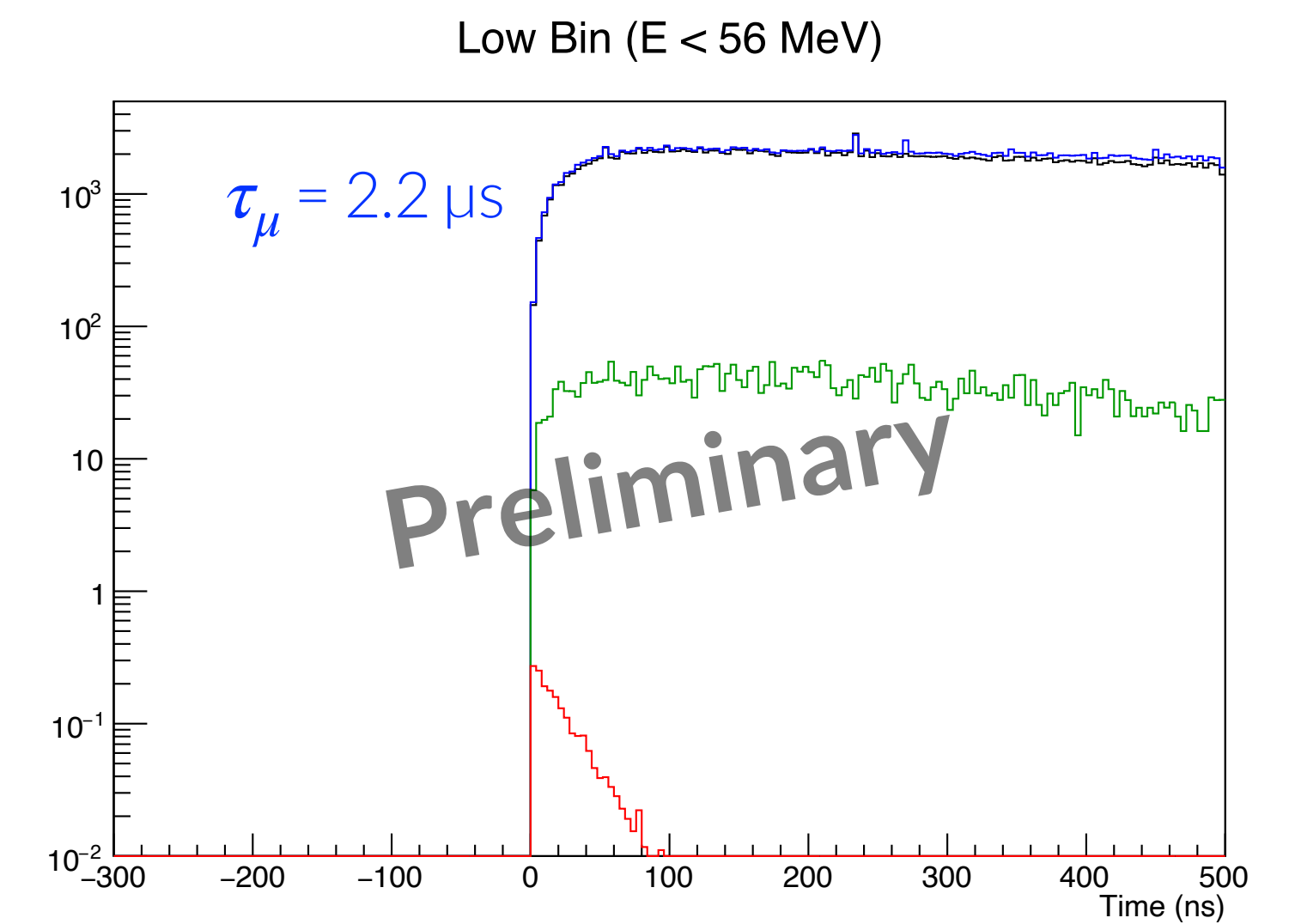
- 高エネルギー領域に入り込んでいるパイルアップを減らす必要あり
- 各変数とその不定性を見積もりを進める



All channels at stopping rate of 300 kHz
Pileup flagged events at 300 kHz
 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ at stopping rate of 1 Hz
 $\pi \rightarrow e\nu$ at stopping rate of 1 Hz



フィットして
 $\pi \rightarrow e\nu$ 事象数 ($=N^H$)を見積もる



フィットして
 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ 事象数 ($=N^L$)を見積もる

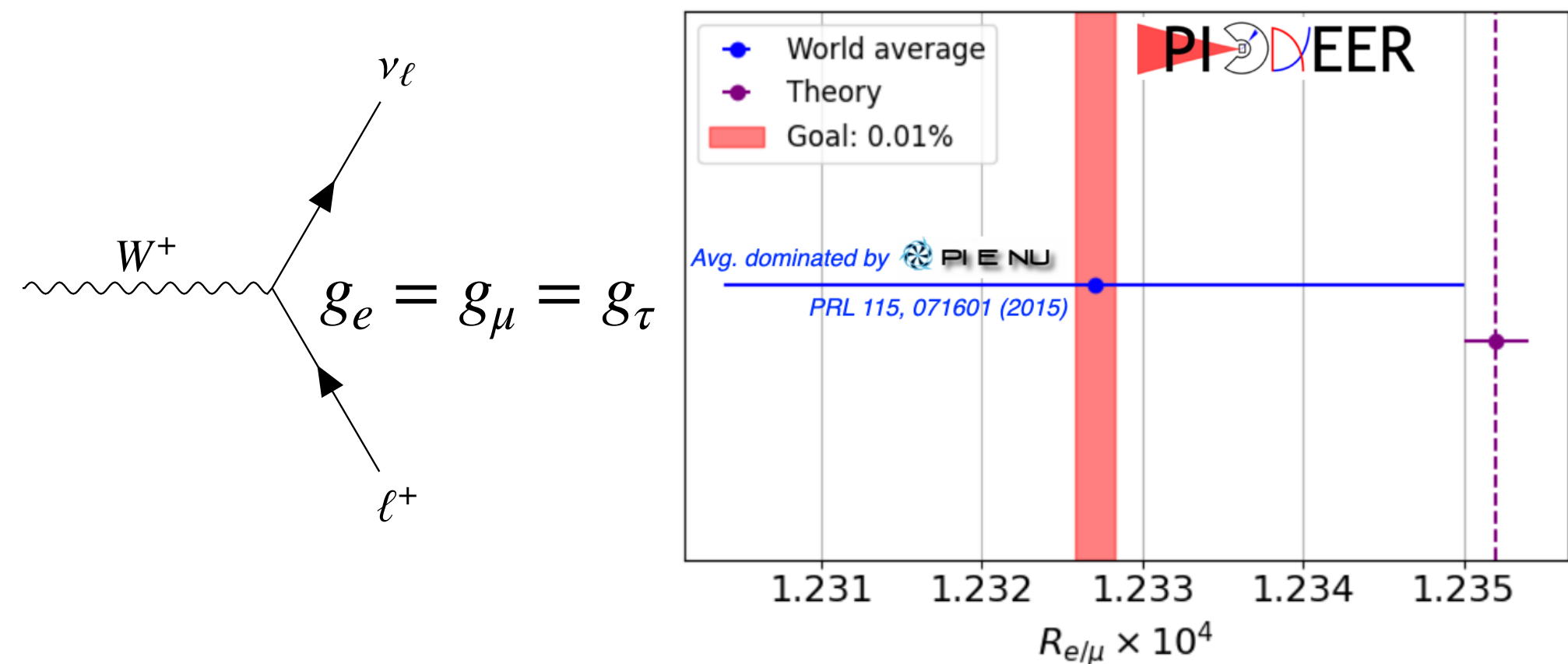
まとめ

- レプトン普遍性の精密検証のため、 $R_{e/\mu}$ を0.01%の精度で測定を目指す
PIONEER実験を準備中
 - 2030年の物理データ取得を目指し、検出器R&Dが進行中
- 液体キセノンカロリメーターでの事象再構成を開発している
 - 枠組み作りは完了
 - パイルアップのさらなる削減・分解能向上に向けて開発を継続
- ハードウェアの開発も並行して進める
 - Chip-on-film MPPCの開発・実装方法の研究 ← 次の講演

Backup

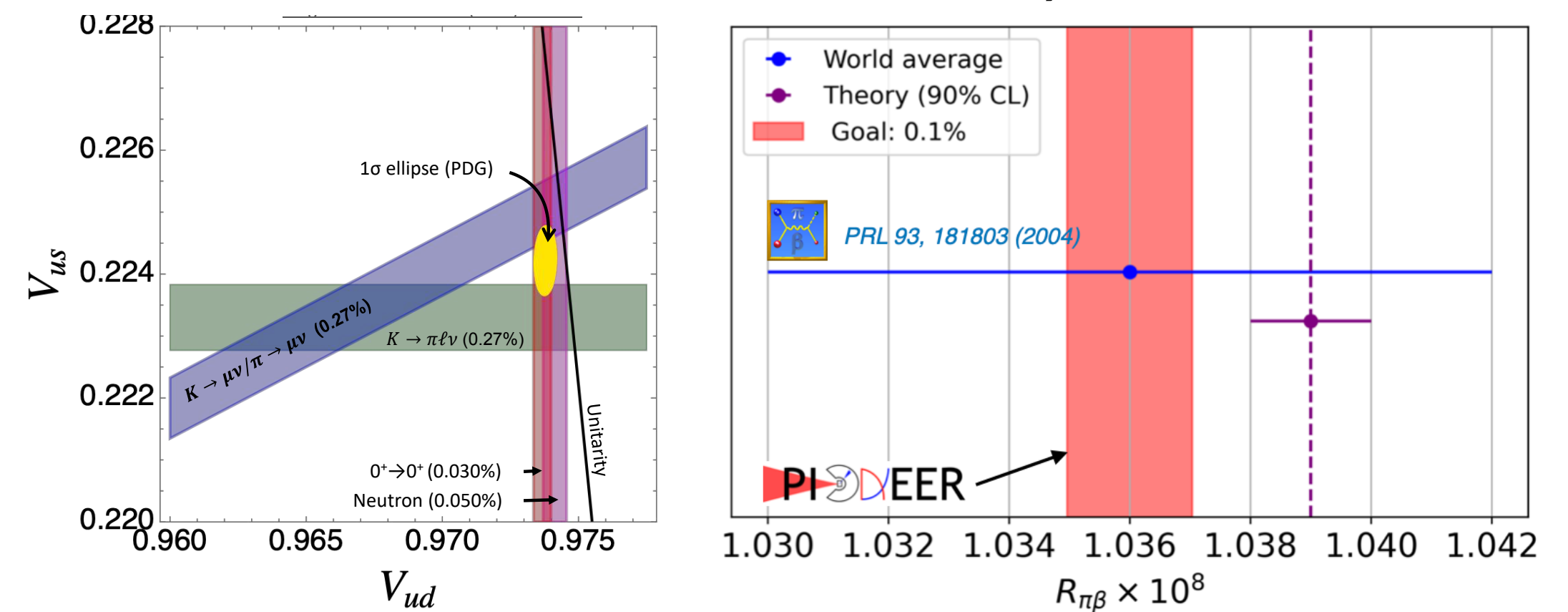
PIONEER physics goals

Goal 1: Precision test of lepton flavour universality



$$R_{e/\mu} = \frac{\Gamma(\pi \rightarrow e\nu)}{\Gamma(\pi \rightarrow \mu\nu)} = \underbrace{\left| \frac{g_e}{g_\mu} \right|^2}_{\text{LFU}} \underbrace{\frac{m_e^2}{m_\mu^2}}_{\text{Helicity suppression}} \underbrace{\left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2}_{\text{Phase space}}$$

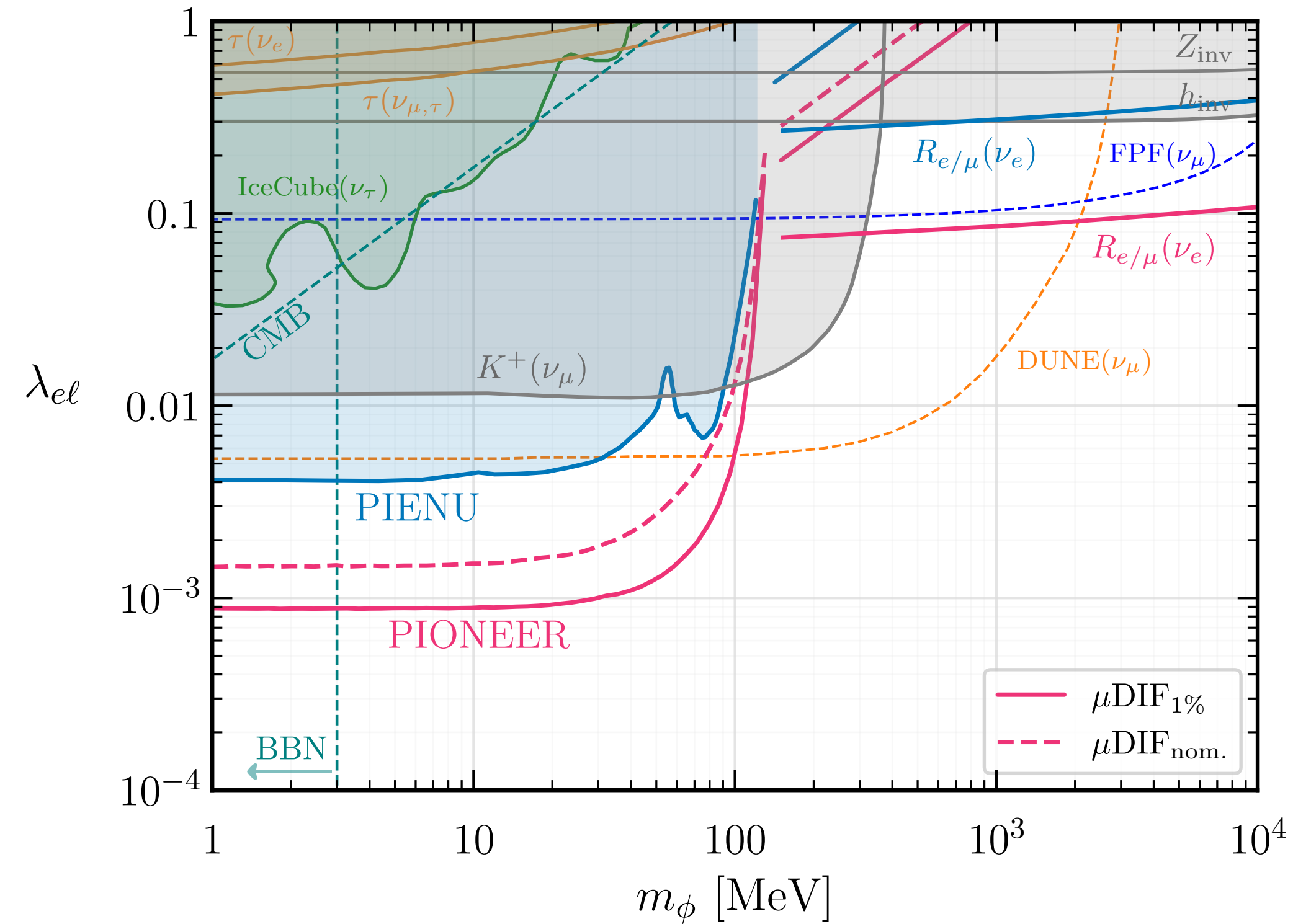
Goal 2: CKM unitarity test



$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1 \quad R_{\pi\beta} = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu)}$$

Pion beta decay provides the theoretically cleanest determination of $|V_{ud}|$ as the dominant uncertainties from hadronic and nuclear structure

Exotic decay searches in PIONEER



- Sterile neutrinos ($\pi \rightarrow \ell \nu_H$)
- Dark sector ($\pi \rightarrow e \nu X$)