CTAO 報告 262

SiPM 入射角度依存性評価のための絶対光検出効率測定系の開発

原田朋幸、安藤大地、奥村曉[A]、髙橋光成[A]、田島宏泰、古田和浩

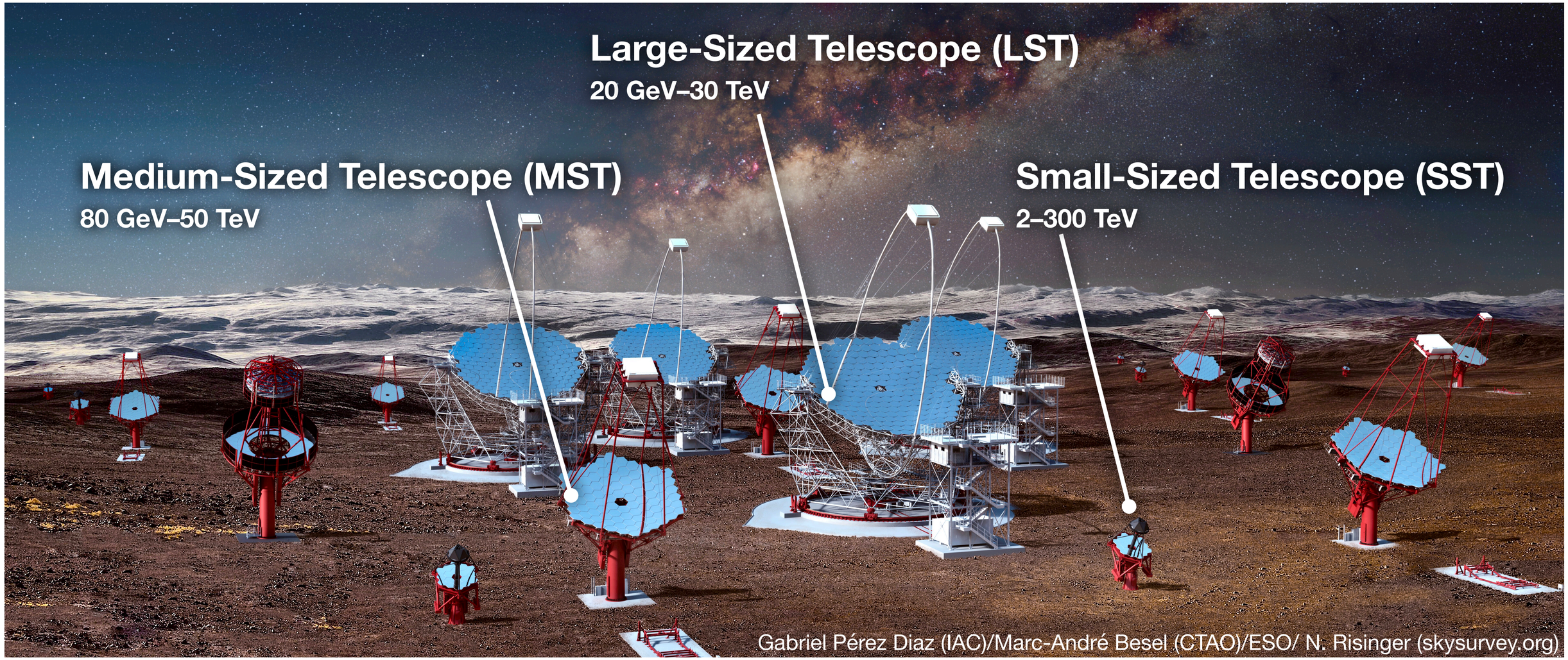
名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）

[A] 東京大学宇宙線研究所（ICRR）

日本物理学会

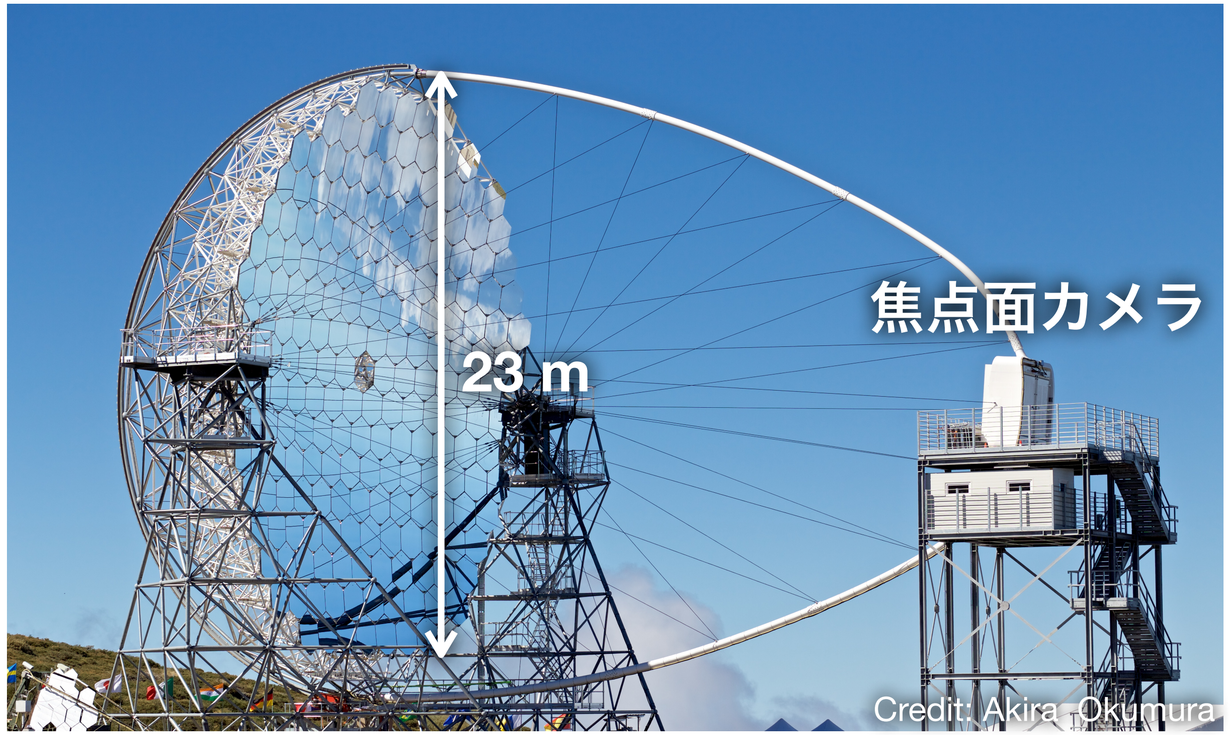
2026 年 9 月 14 日

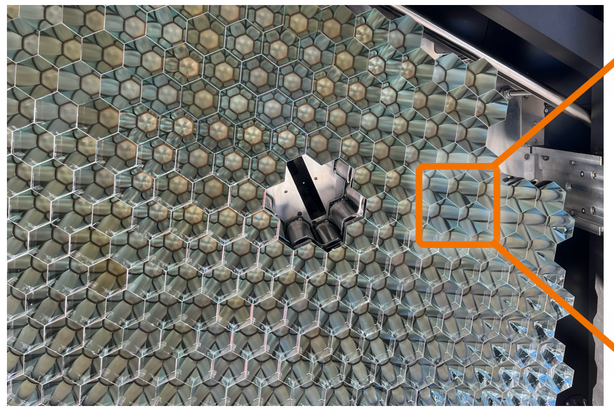
チェレンコフ望遠鏡アレイ天文台（CTAO）



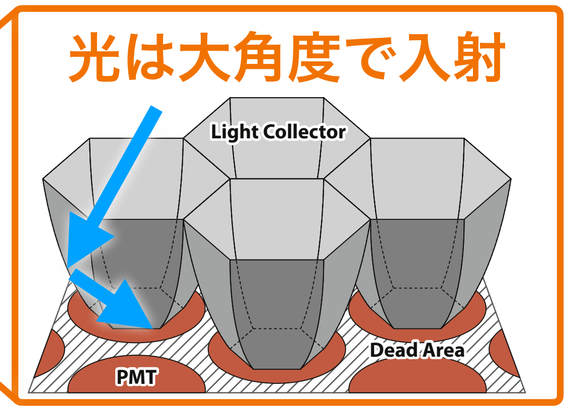
- 南北半球に約 100 台の望遠鏡を配置する次世代ガンマ線天文台
- 20 GeV–300 TeV の広いエネルギー範囲をカバーし、従来装置の約 10 倍の感度向上を目指す

将来の LST 焦点面カメラへの SiPM 導入検討





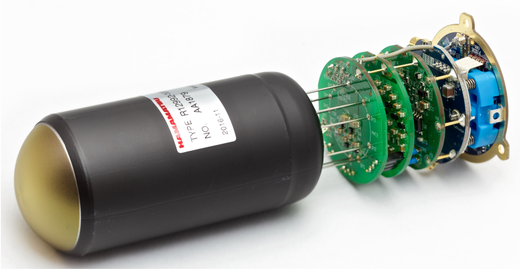
Credit: Mitsunari Takahashi



Okumura (2012)

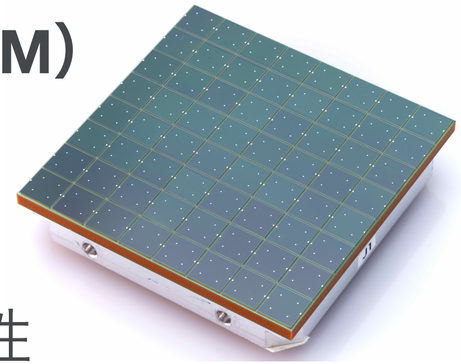
大口径望遠鏡（LST）

- 現行焦点面カメラには光電子増倍管（PMT）



次世代焦点面カメラの候補
半導体光電子増倍素子（SiPM）

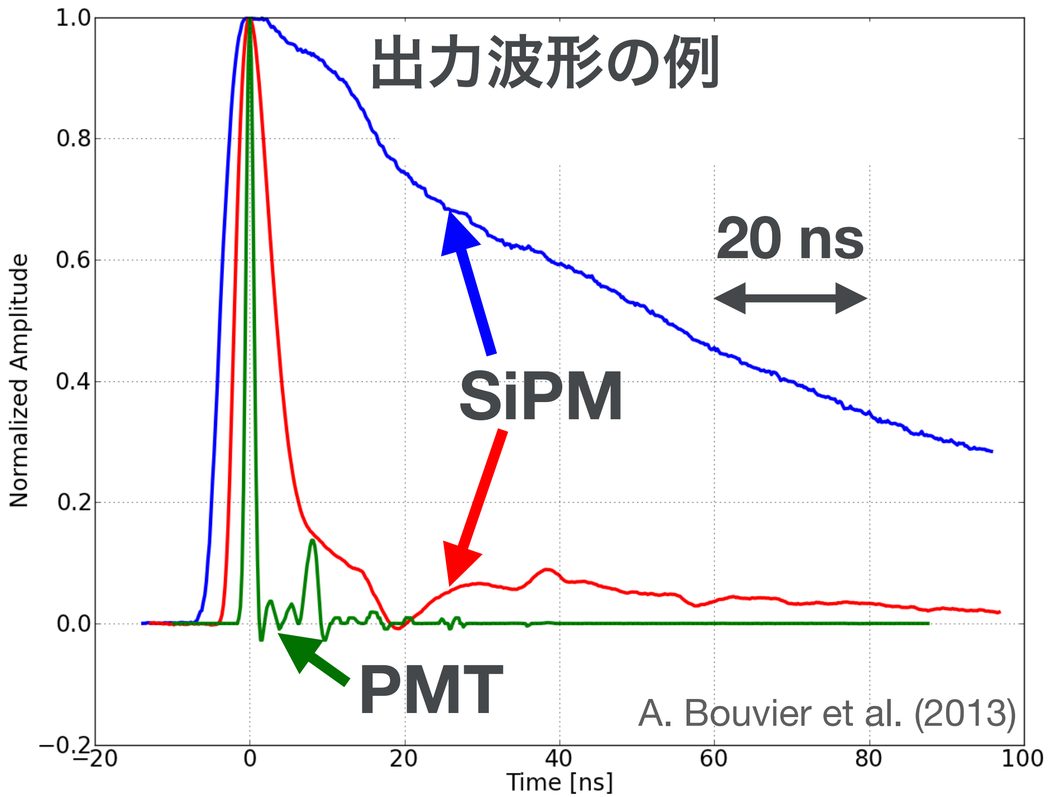
- 高い光検出効率
- ピクセルの小型化が容易
- 大光量に対する高い耐久性

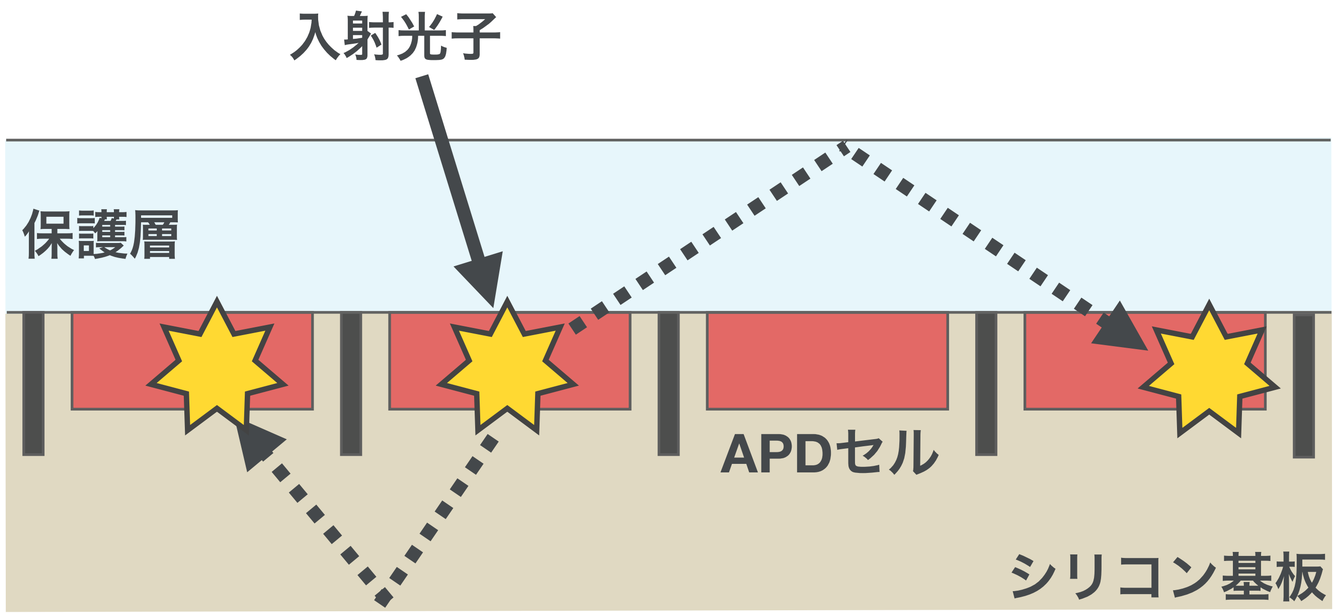


Credit: Akira Okumura

→ 入射角依存性を含む光検出効率を測定し複数製品の性能を比較したい

SiPM の光検出効率を求める際の課題





正確な Gain 測定が困難

信号の減衰が遅く、波形は製品ごとに異なる

→ 積分範囲によって電荷量が変わる

Optical Crosstalk (OCT)

検出した光子の数よりも多くのセルが反応する

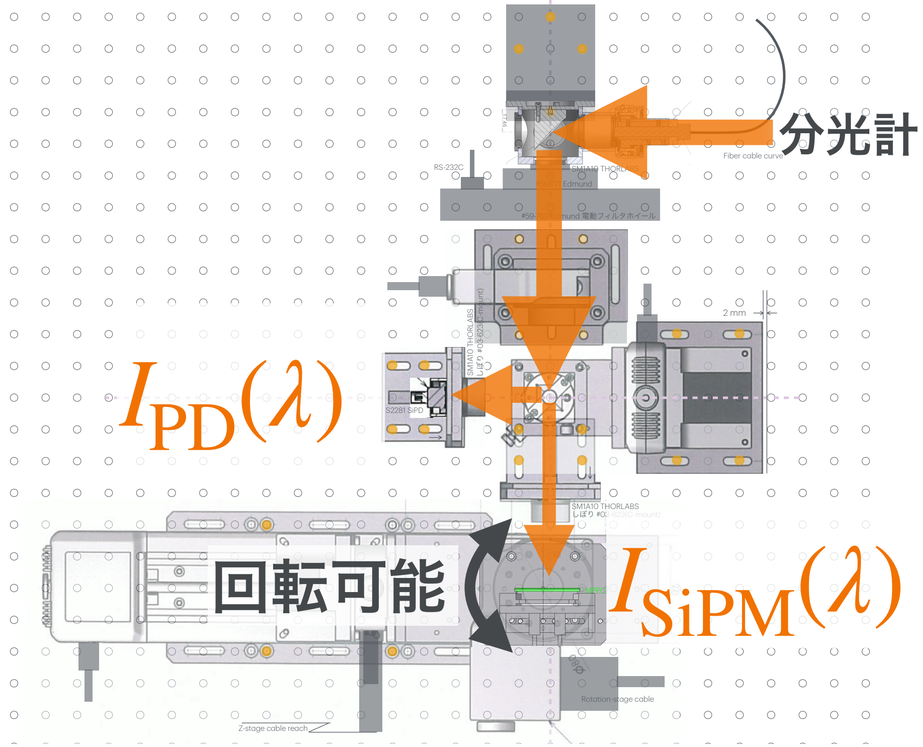
→ 信号の電荷量が増える

Gain 測定・Crosstalk 補正を必要としない方法で、光検出効率を測定したい

光検出効率（PDE）の波長・入射角依存性の測定方法

先行研究の測定系

安藤大地 修士論文, 2026



Gain 含む

$$\varepsilon_{\mathrm{SiPM}}(\lambda) \propto \frac{I_{\mathrm{SiPM}}(\lambda)}{I_{\mathrm{PD}}(\lambda)} \varepsilon_{\mathrm{PD}}(\lambda)$$

先行研究｜電流比較による相対 PDE 測定

- 波長・入射角依存性を測定可能

相対 PDE を絶対値へ換算するには
基準条件での絶対 PDE が必要

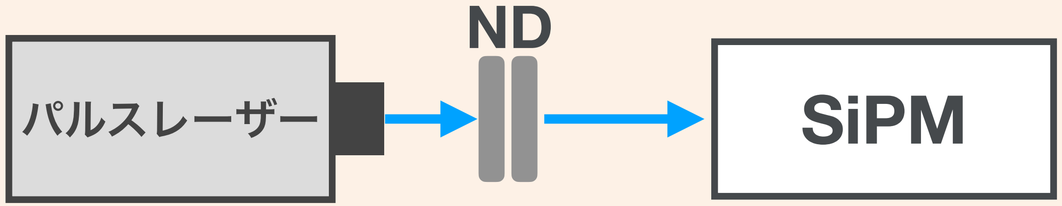
本研究｜絶対 PDE 測定系の構築

- 製品間・個体間の PDE を比較したい
  - **Gain 測定・Crosstalk 補正が不要**
  - **簡便かつ短時間で測定できる**
- フォトダイオード（PD）の較正確度は約 2%
  - **その他の不定性を約 1% に抑える**

絶対光検出効率 $\varepsilon_{\mathrm{SiPM}}$ の測定原理

$$\varepsilon_{\mathrm{SiPM}} = \frac{\text{① パルスあたりの平均検出光電子数 } \mu_{\mathrm{pe\,/pulse}}}{\text{② パルスあたりの平均入射光子数 } \mu_{\gamma\,\mathrm{/pulse}}}$$

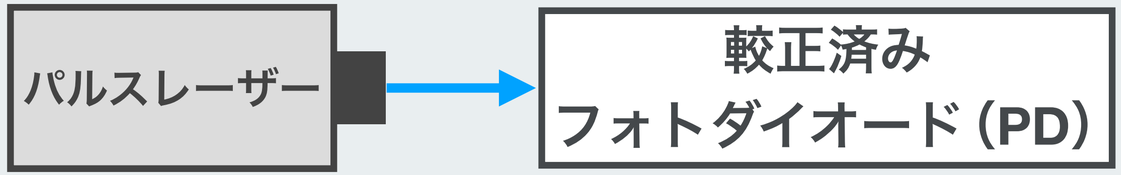
① 平均検出光電子数 $\mu_{\mathrm{pe\,/pulse}}$



信号のない事象を十分に得るため
ND を重ねて約 3 × 10^{-6} に減光

SiPM 出力波形を取得
→ 信号のない事象の割合から算出

② SiPM への平均入射光子数 $\mu_{\gamma\,\mathrm{/pulse}}$



pA 領域の測定安定性は未確認のため
十分な光量（ND なし）で電流を測定

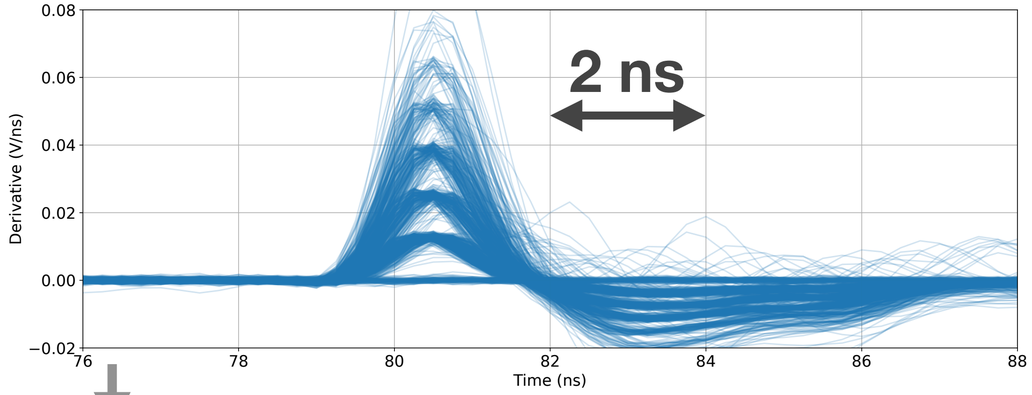
PD 電流を測定
→ ND 減光率を用いて換算

今回は測定法の概念実証 → ND 減光率を含む系統的不確かさの評価は今後

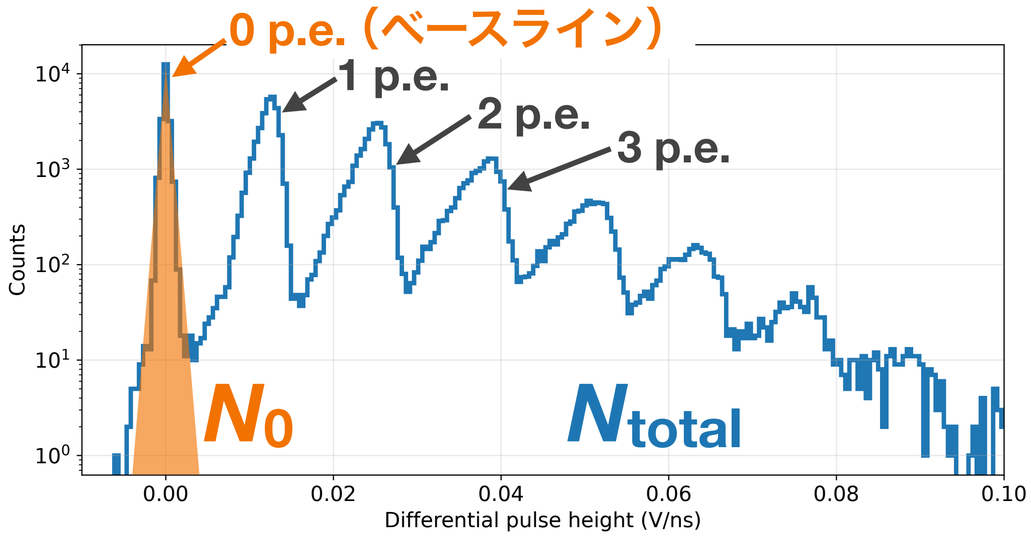
平均検出光電子数 μ_{pe} の算出方法

① パルスレーザーを SiPM に照射

② 出力波形を整形（時間微分）



③ 整形後の波高分布を作成



- 1 パルスの検出光電子数（p.e.）k は
  理想的には平均値 μ_{pe} のポアソン分布に従う

$$P(k;\mu_{\mathrm{pe}}) = \frac{\mu_{\mathrm{pe}}^{k} e^{-\mu_{\mathrm{pe}}}}{k!}$$

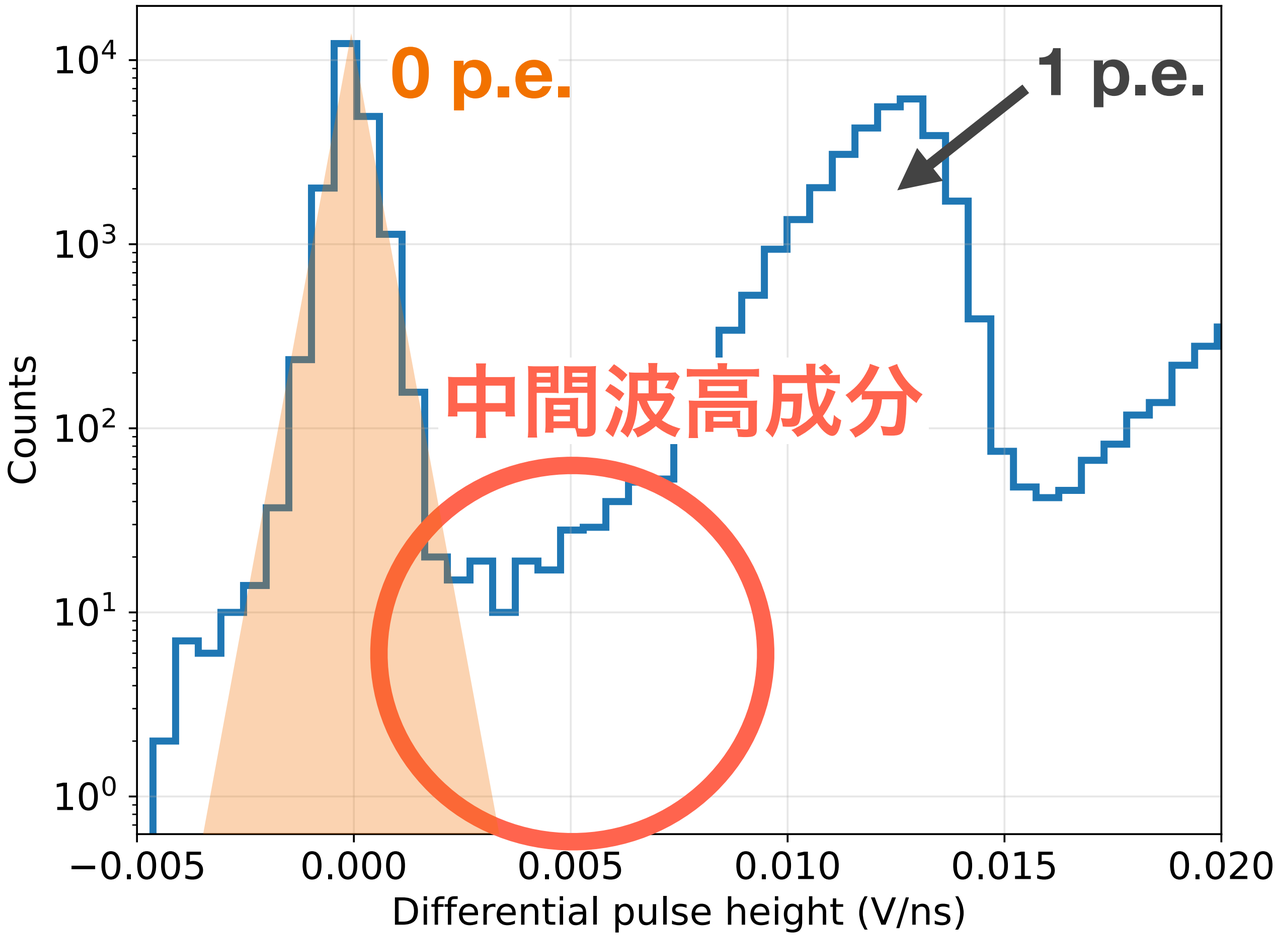
- OCT は 0 p.e. 事象数 N_0 を変化させない
  → 0 p.e. 事象の割合から μ_{pe} を推定

$$P(0) = \frac{N_0}{N_{\mathrm{total}}} = e^{-\mu_{\mathrm{pe}}}$$

$$\mu_{\mathrm{pe}} = -\ln\frac{N_0}{N_{\mathrm{total}}} \quad , \qquad \frac{\delta\mu_{\mathrm{pe}}}{\mu_{\mathrm{pe}}} = \frac{1}{\mu_{\mathrm{pe}}}\frac{\delta N_0}{N_0}$$

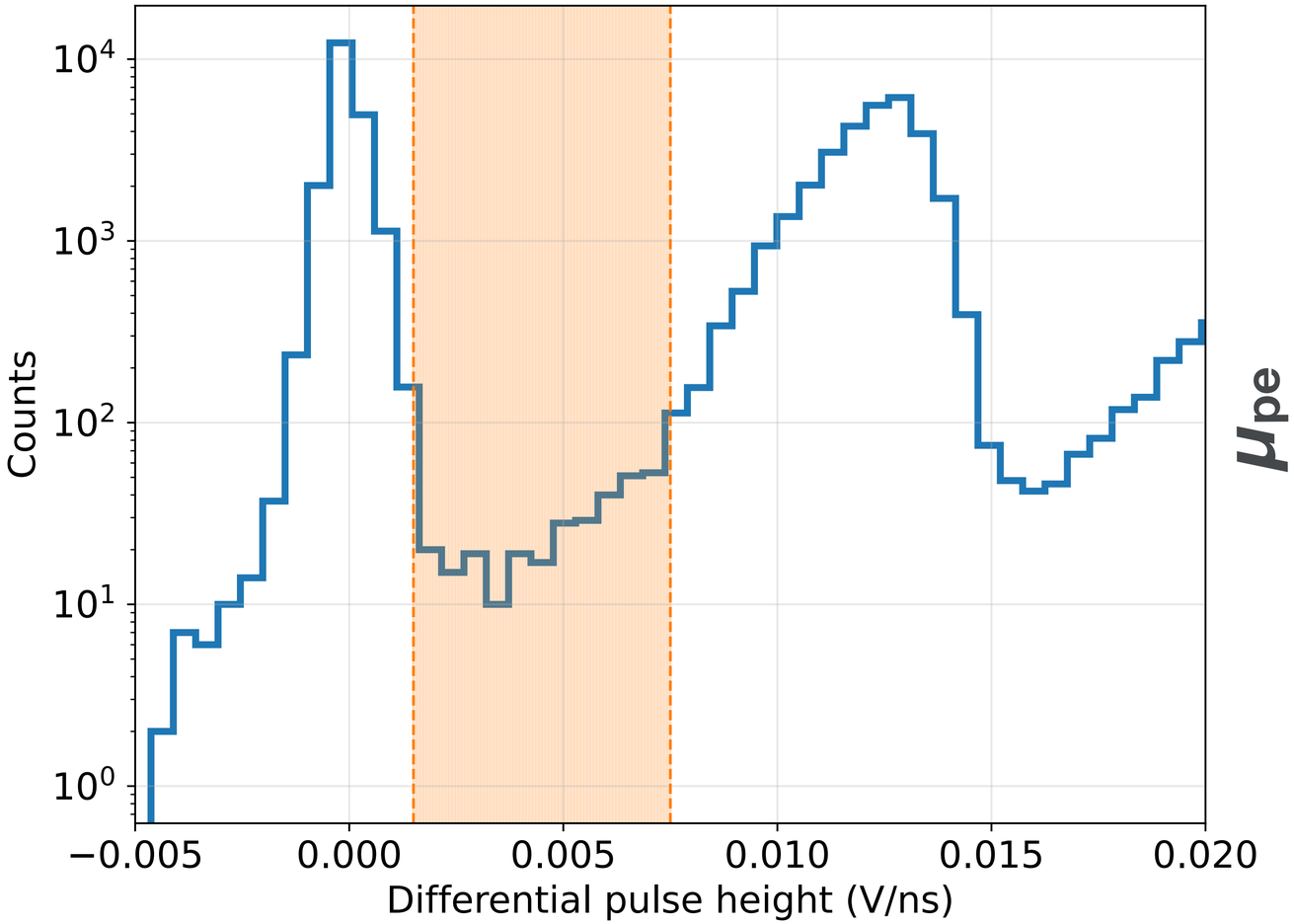
N_0 の推定精度が μ_{pe} の推定精度に直結

0 p.e. 事象数 N_0 の推定における課題

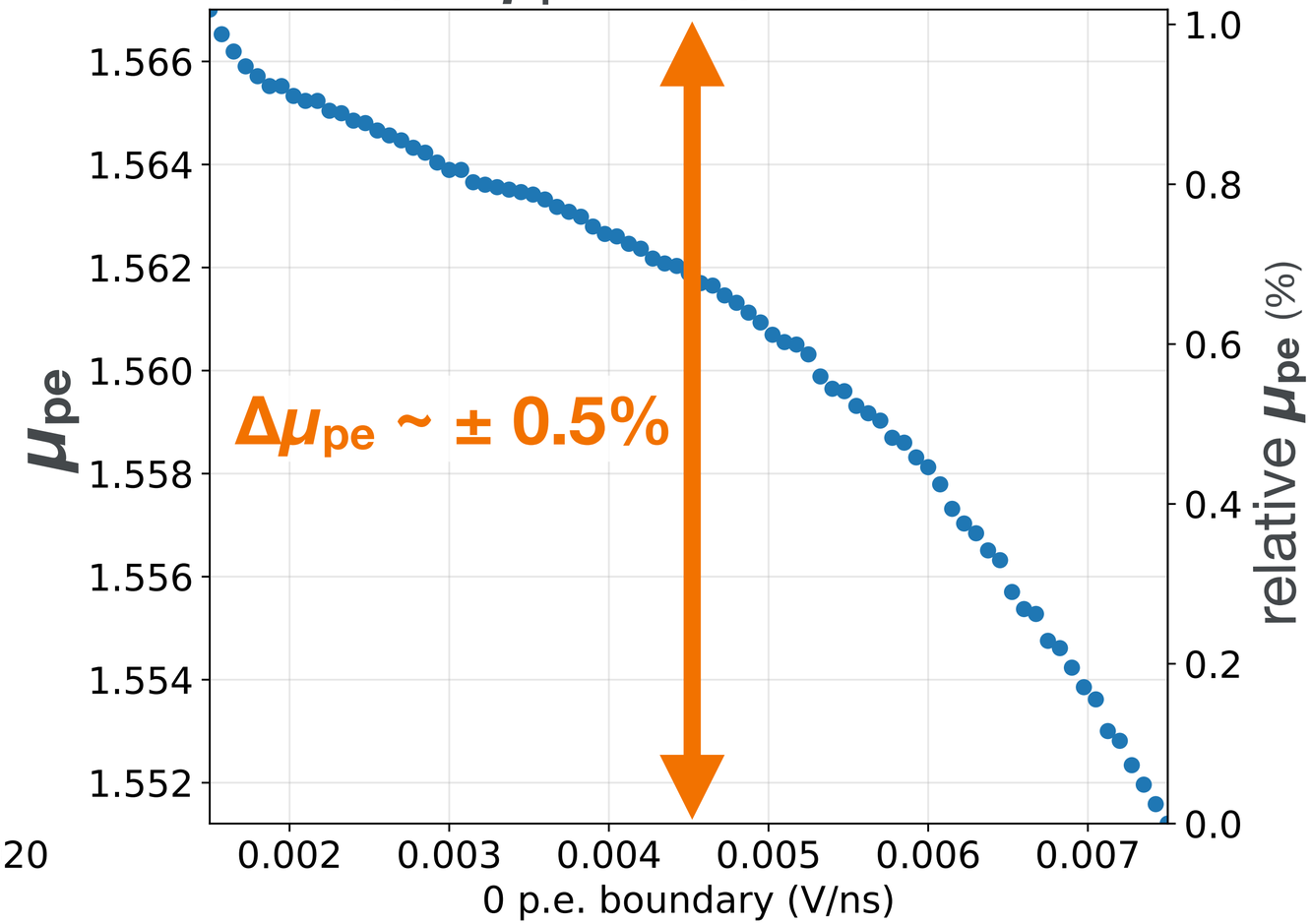


0 p.e. 事象数 N_0 の推定における課題

閾値以下を N_0 として計数



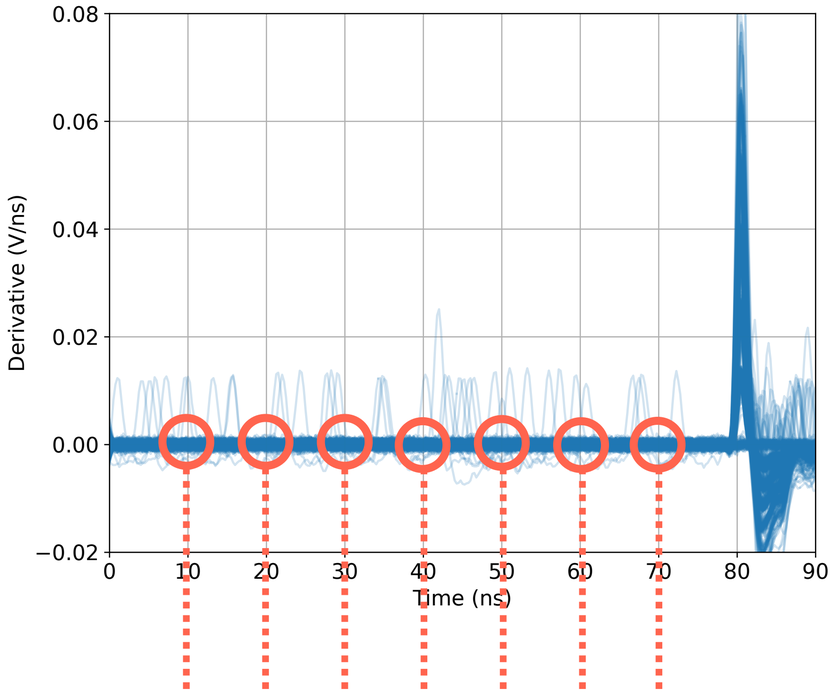
推定 μ_{pe} は閾値に依存



中間波高成分の影響を抑えた N_0 推定が必要

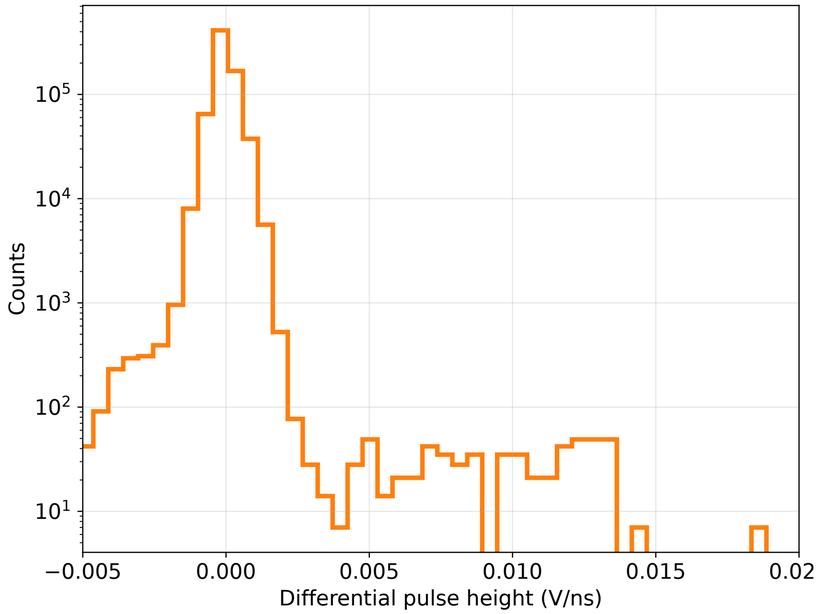
ベースラインテンプレートを用いた N_0 の推定

① レーザー到達前の波形から ベースライン波高を取得



複数区間から取得して
統計数を確保

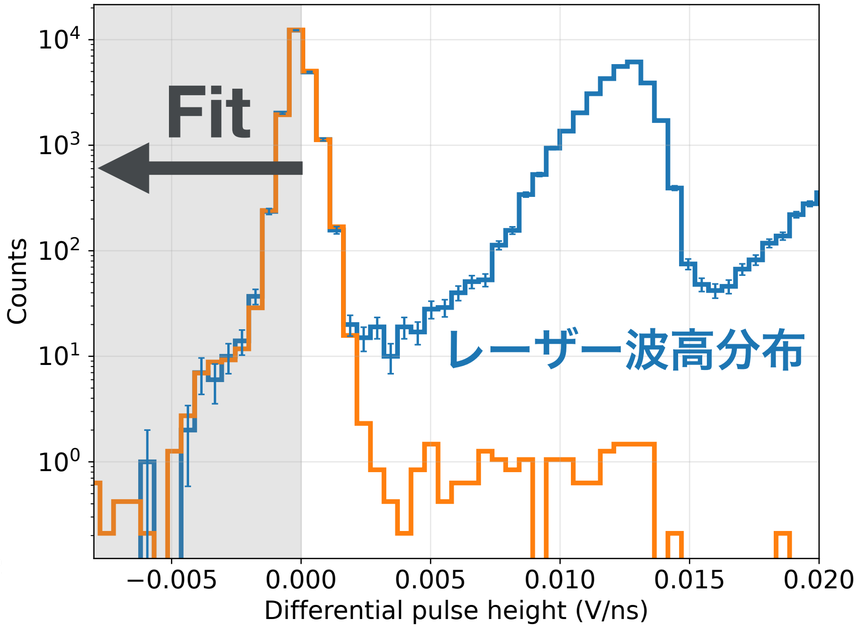
② ベースラインの テンプレートを作成



テンプレートの全事象数

N_{temp}

③ レーザー波高分布に テンプレートをフィット

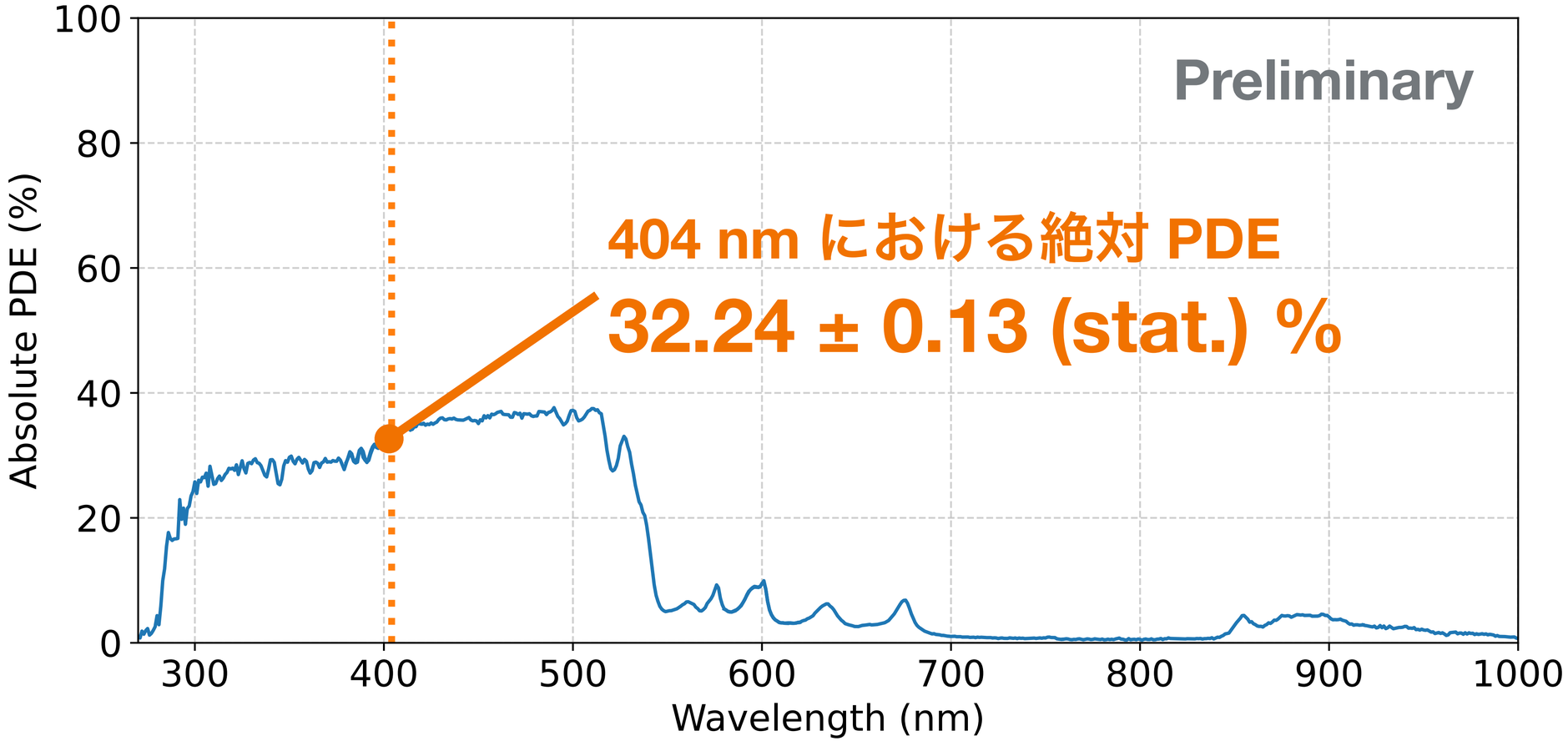


中間波高成分を避けるため
負側のみで規格化

$$N_0 = a_{\mathrm{scale}} N_{\mathrm{temp}}$$

閾値を用いず、中間波高成分を避けて N_0 を推定

絶対光検出効率（PDE）測定の結果



- 多層膜コーティング SiPM の絶対 PDE を測定
- 系統的不確かさは未評価 → 絶対値の精度検証は今後

404 nm の絶対 PDE を基準に、相対 PDE を絶対値へ換算できることを実証

まとめと今後の展望

まとめ

- Gain 測定・OCT 補正を必要としない絶対 PDE 測定系を構築し、測定手順を実証
- ベースラインテンプレートを用い、中間波高成分を避けて 0 p.e. 事象数 N_0 を推定
- 404 nm の絶対 PDE を基準に、相対 PDE を絶対値へ換算できることを確認
- ND 減光率を含む系統的不確かさは未評価 → 絶対値の精度検証が今後の課題

今後の展望

- 中間波高成分の発生要因を特定し、解析手法を確立
- PD の微小電流（~pA）測定の安定性を確認し、系統的不確かさと再現性を含めて
  絶対 PDE の測定精度を検証
- 絶対測定系と相対測定系を統合し、PDE の波長・入射角依存性を測定できる系を確立