

CTA 報告136 :

ガンマ線望遠鏡 CTA における SiPM の多チャンネル同時較正手法の実機検証

中村 裕樹、奥村 暁、片桐 秀明^A、佐々井 義矩、田島 宏康、三浦 智佳^A
他 CTA Consortium

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (ISEE) 、茨城大理^A

日本物理学会 2018年 年次大会
東京理科大学 3/22



Cherenkov Telescope Array (CTA)

- ▶ 大中小の異なる口径の望遠鏡を100台規模で設置
→ 20 GeV から 300 TeV のガンマ線において現行の望遠鏡より一桁高い感度での観測を目指している
- ▶ 到来頻度の低い100 TeVのガンマ線を観測するためには
小口径望遠鏡を多数設置し有効面積を拡大する

Large-sized
Telescope (LST)

D = 23 m

E = 20 - 200 GeV

N = 4@North + 4@South

Medium-sized
Telescope (MST)

D = 12 m

E = 100 GeV - 10 TeV

N = 15@North + 25@South

Schwarzschild-Couder
Telescope (SCT)

D = 9.6 m

E = 200 GeV - 10 TeV

N = 25@South

Small-sized
Telescope (SST)

GCT

35@South

ASTRI

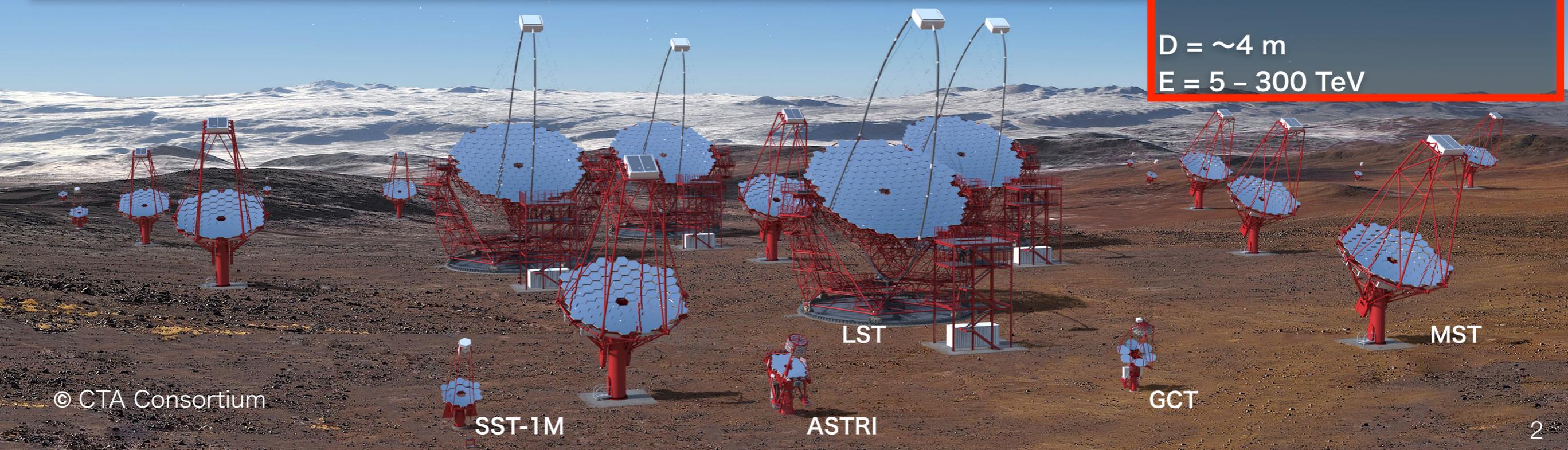
35@South

SST-1M

20@South

D = ~4 m

E = 5 - 300 TeV

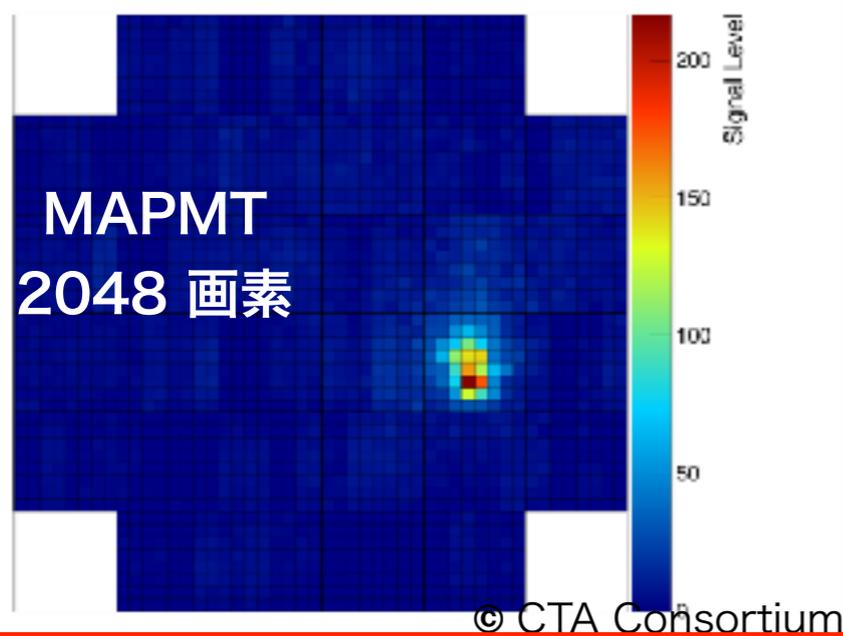
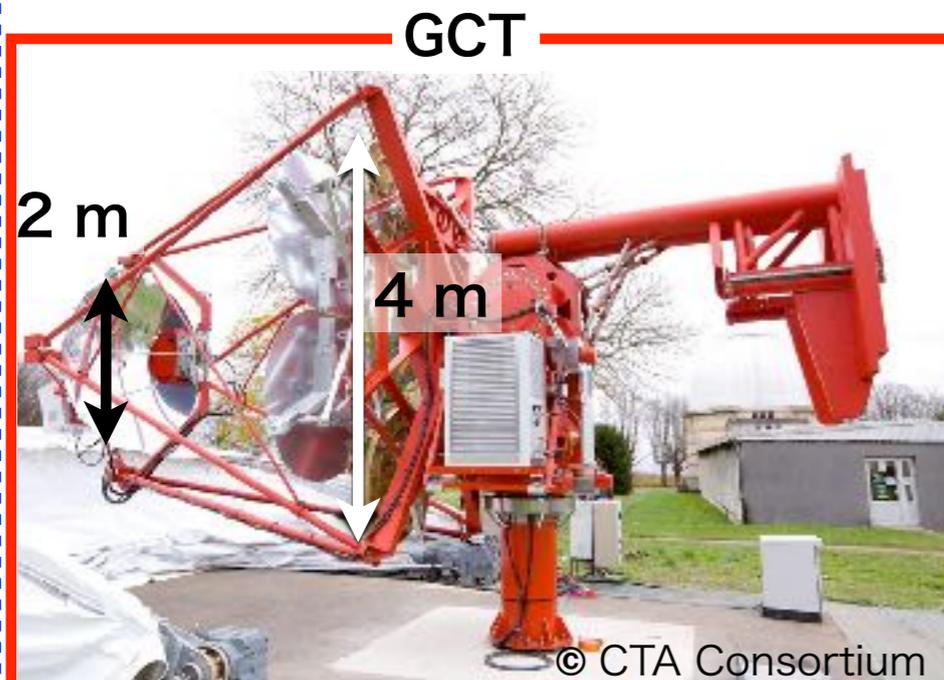


小口径望遠鏡

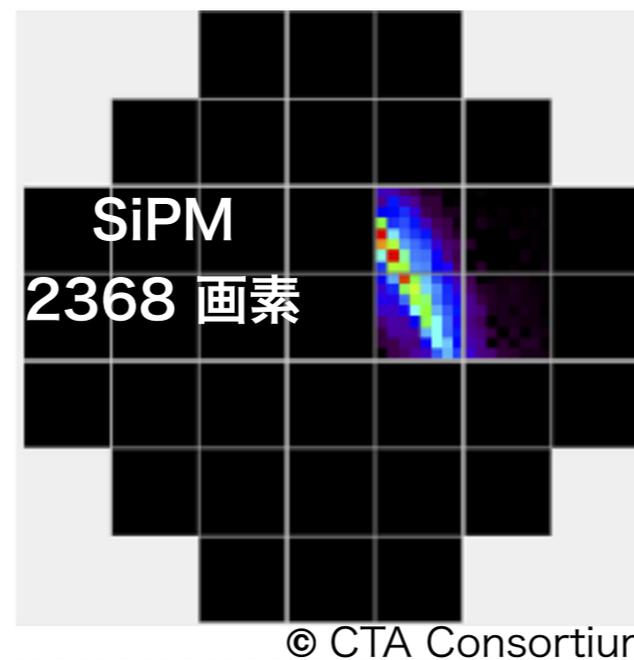
▶ 3つのデザインが提案されている

- それぞれ試作機での試験観測が行われチェレンコフ光の観測に成功

❖ Schwarzschild–Couder 光学系

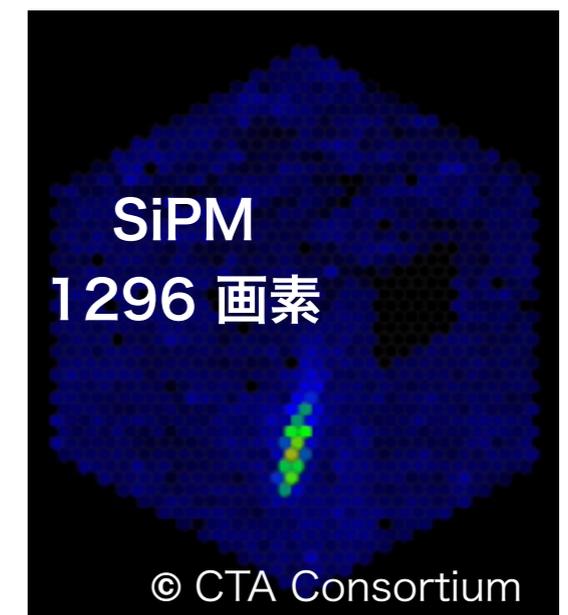


ASTRI



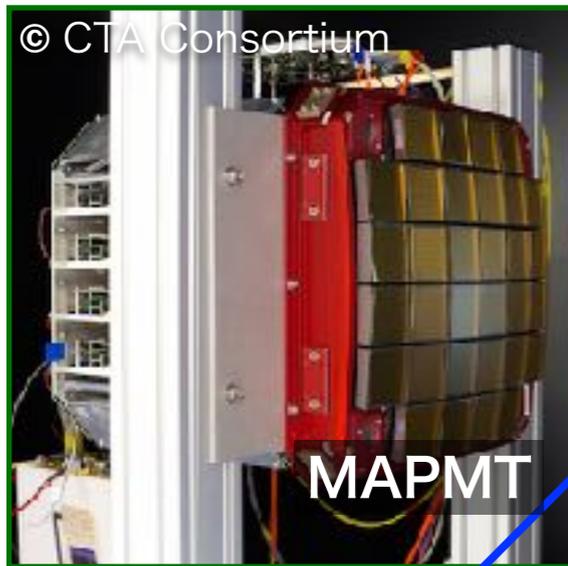
❖ Daives–Cotton 光学系

SST-1M



焦点面カメラの開発

- ▶ 光検出器を半導体光電子増倍素子（SiPM）に置き換えたカメラの開発を進めている
- ▶ GCT の焦点面カメラは ASTRI にも搭載可能な設計にしている
 - 試作焦点面カメラを GCT と ASTRI に搭載しての試験観測を今年予定している

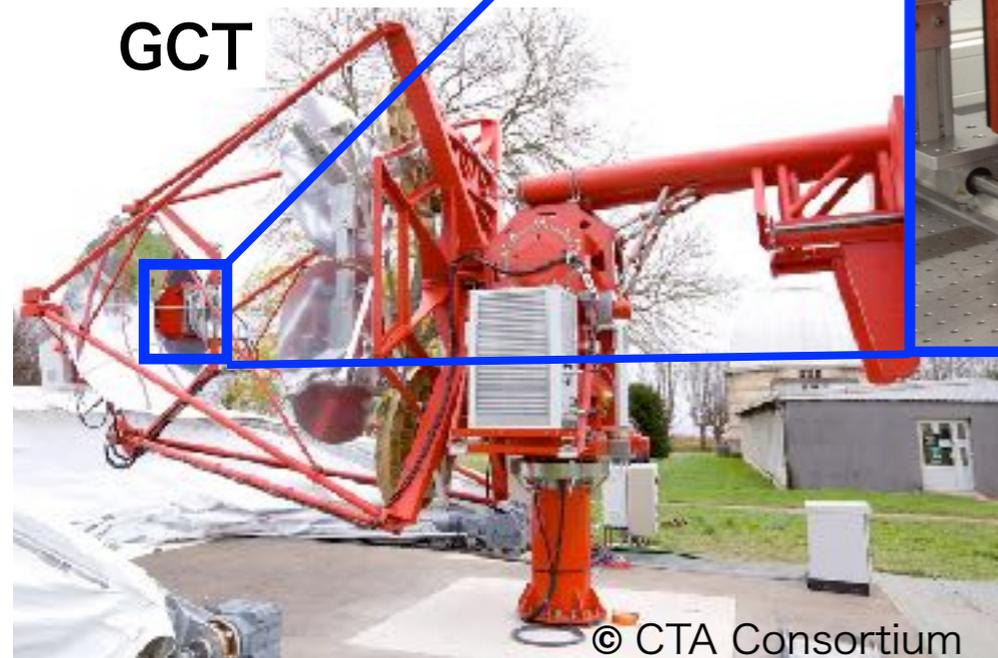


GCT 用 焦点面カメラ

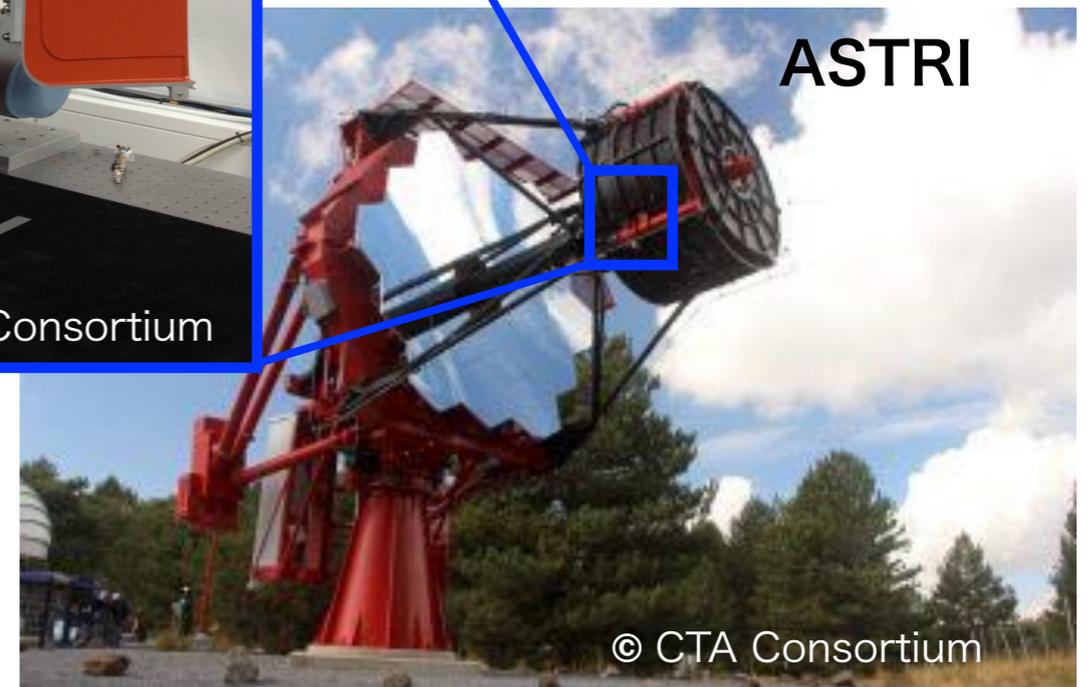


近日中に名古屋大学に
小型の焦点面カメラを導入予定

GCT



ASTRI



焦点面カメラの較正

- ❖ 2048 画素の焦点面カメラを 70 台設置 = 合計で14万画素以上
→ 全ての SiPM と電子回路を単体で較正することは現実的な時間では難しい

SiPM と電子回路を組み上げた状態での較正手法を開発する

- ▶ 多画素の較正と望遠鏡搭載後に再較正を想定
→ LED 光をカメラ全体に照射することで較正する方法開発する

- ▶ 較正項目の例
 - ・ 電子回路の電圧値記録時刻のずれ



焦点面カメラはカメラモジュール 32 個で構成される

★ SiPM と電子回路を合わせた出力波形の検出光電子数に対する非線形性 講演内容①

- ・ SiPM のオプティカルクロストーク発生確率

講演内容②

較正手法を応用

- アレイ型 SiPM のオプティカルクロストーク発生確率の表面保護層厚依存性を評価した

検出光電子数に対する出力波形の非線形性

❖ 望遠鏡搭載後は較正済みの光源が使用できないことが考えられる

→ 検出光電子数がポアソン分布に従うことを利用して決定する

* 測定方法

▶ ゲインが検出光電子数のばらつき $\sqrt{\langle N_{p.e.} \rangle}$ の間では一定と近似すると出力波形の積分値の平均 μ と標準偏差 σ は

$$\mu \pm \sigma = G(N_{p.e.}) \cdot \langle N_{p.e.} \rangle \pm \frac{d\mu}{dN_{p.e.}} \sqrt{\langle N_{p.e.} \rangle}$$

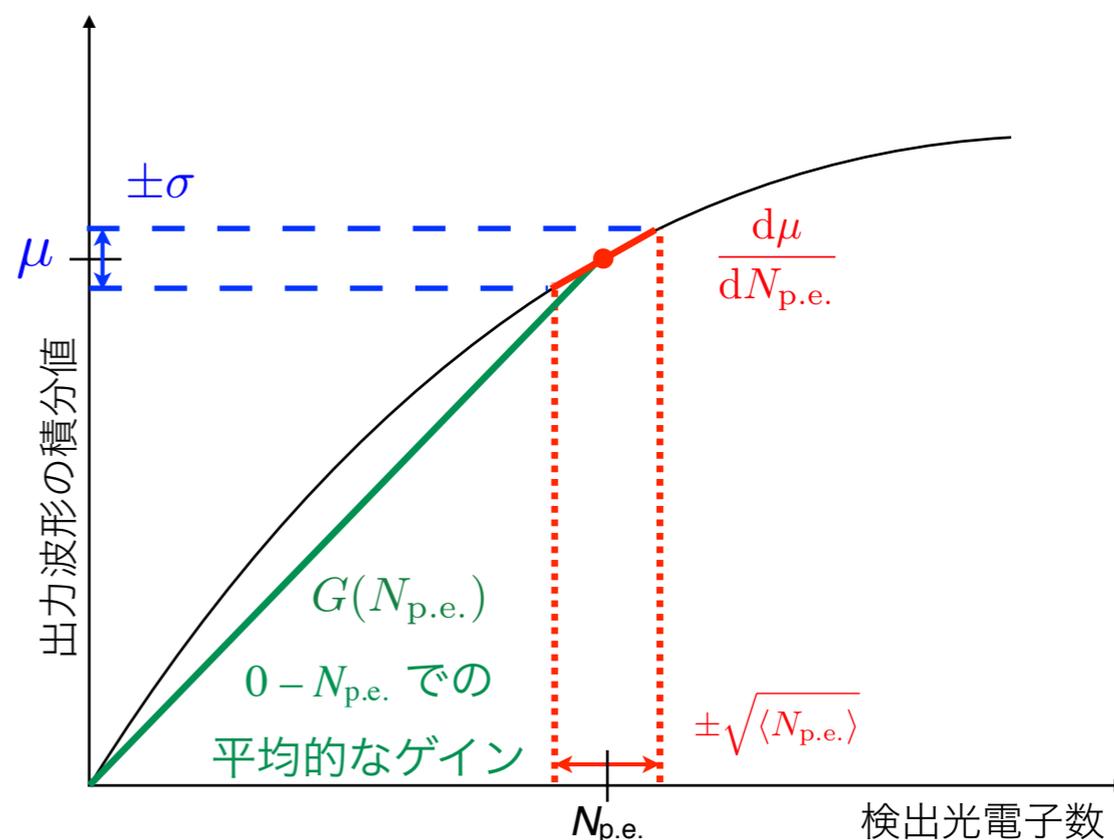
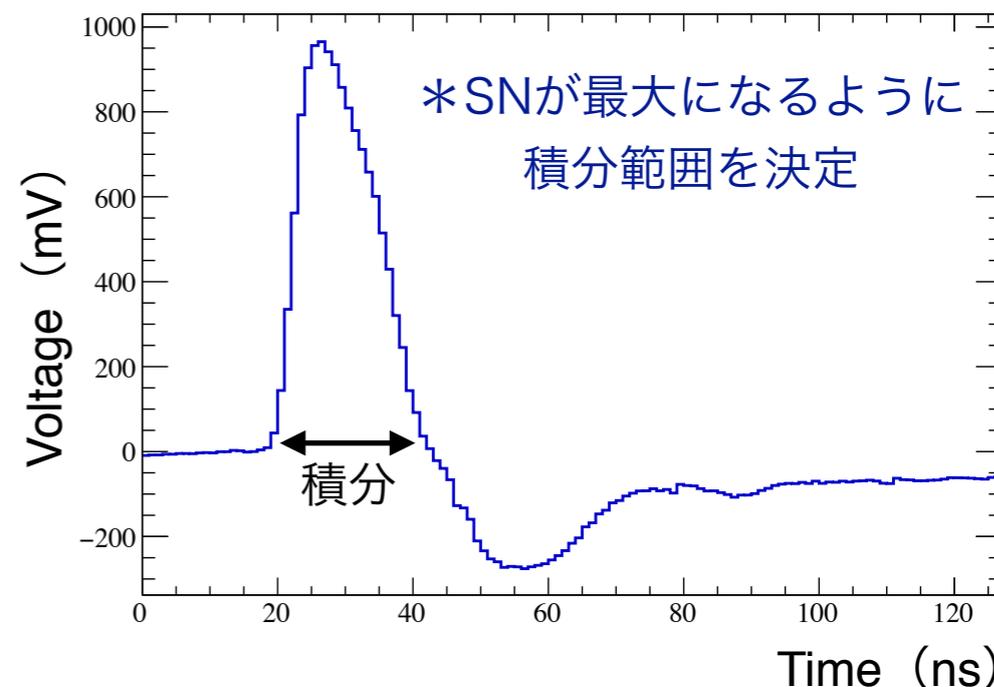
▶ 標準偏差 σ から $N_{p.e.}$ での $d\mu / dN_{p.e.}$ を決定

$$\frac{d\mu}{dN_{p.e.}} = \frac{\sigma}{\sqrt{\langle N_{p.e.} \rangle}}$$

この時の $N_{p.e.}$ は直前の $N_{p.e.}$ と $d\mu / dN_{p.e.}$ から推定する

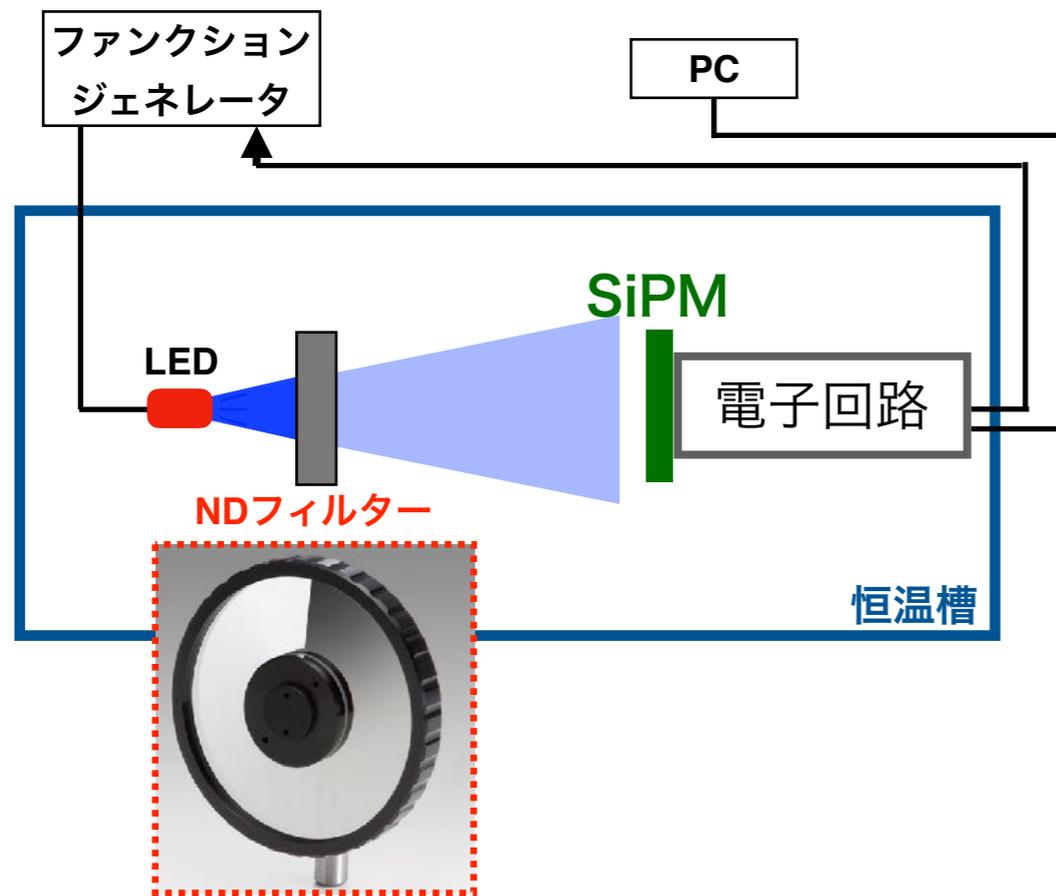
▶ 照射する光量を変化させて測定を繰り返す

出力波形の例



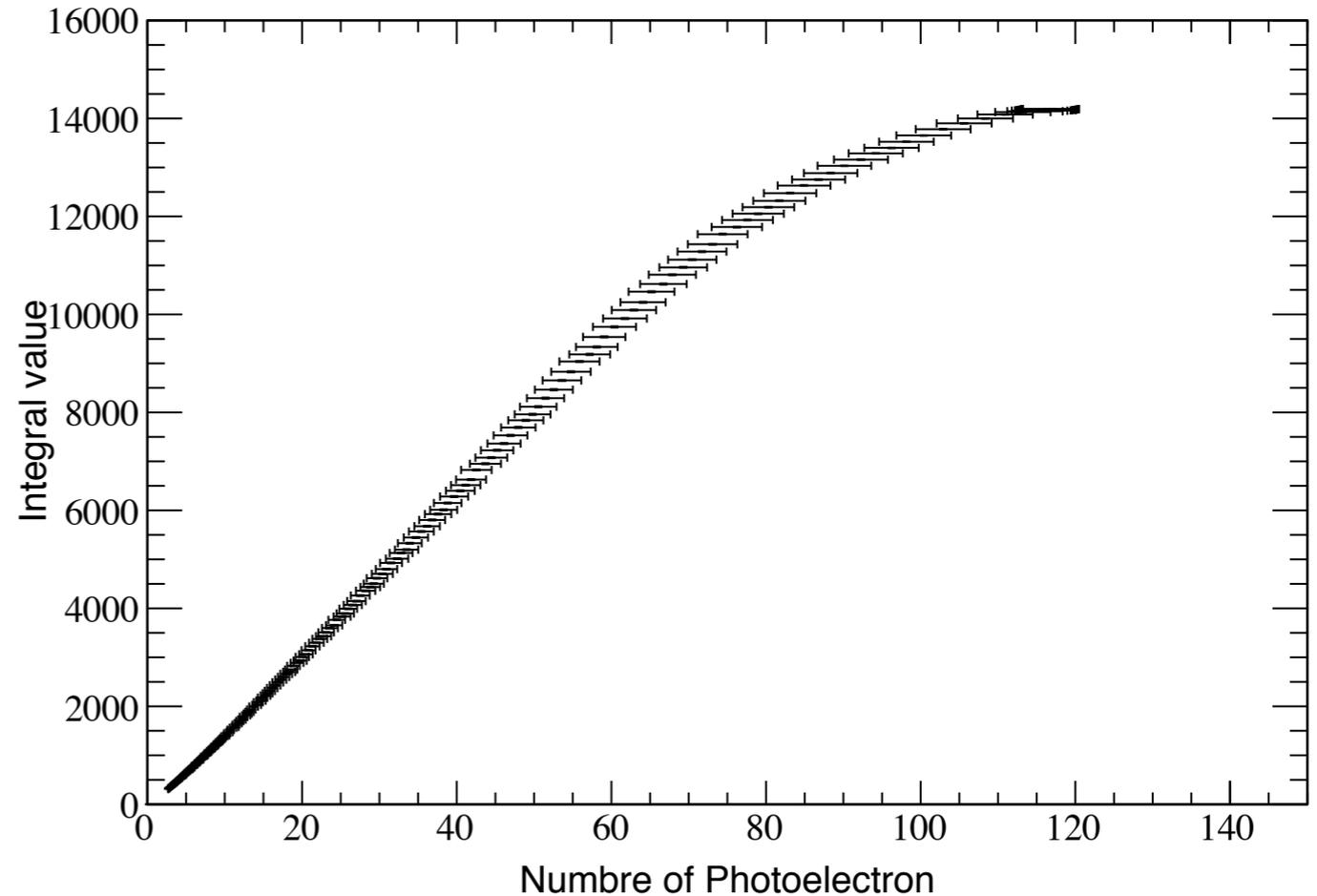
検出光電子数に対する出力波形の非線形性

◆ 測定系



* 光量はNDフィルターで変化させた

測定結果



* Np.e.は積算されるため、そのエラーは独立ではない

❖ 非線形性を含めて積分値と検出光電子数の関係を決定した

→ この関係を用いることで積分値から検出光電子を決定できる

❖ 110 p.e. 程度で飽和している

手法確立のためゲインを高く設定している (1 p.e. ~ 12 mV)、実際は 1 p.e. = 4 mV に設定する

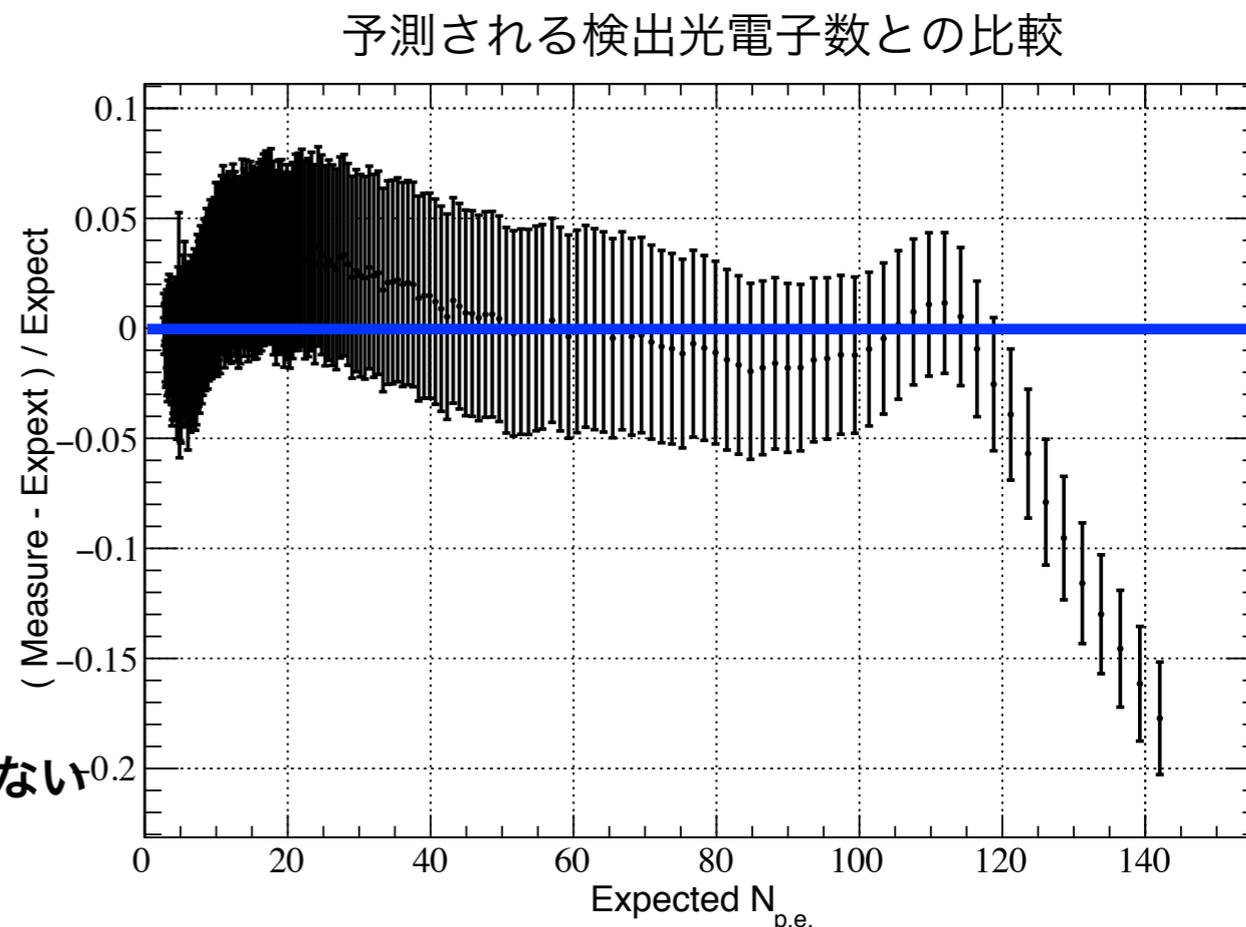
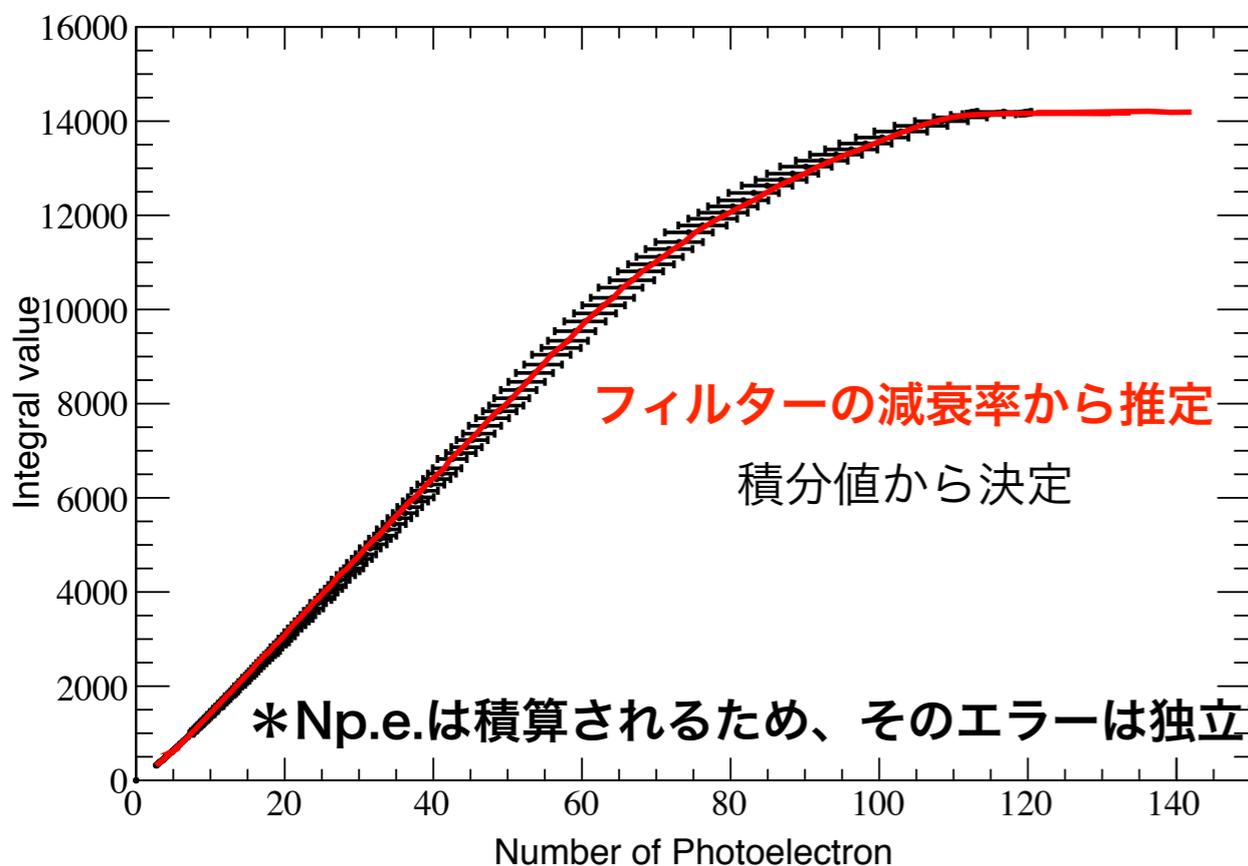
→ 将来的には 500 p.e. 程度まで測定する

検出光電子数に対する出力波形の非線形性

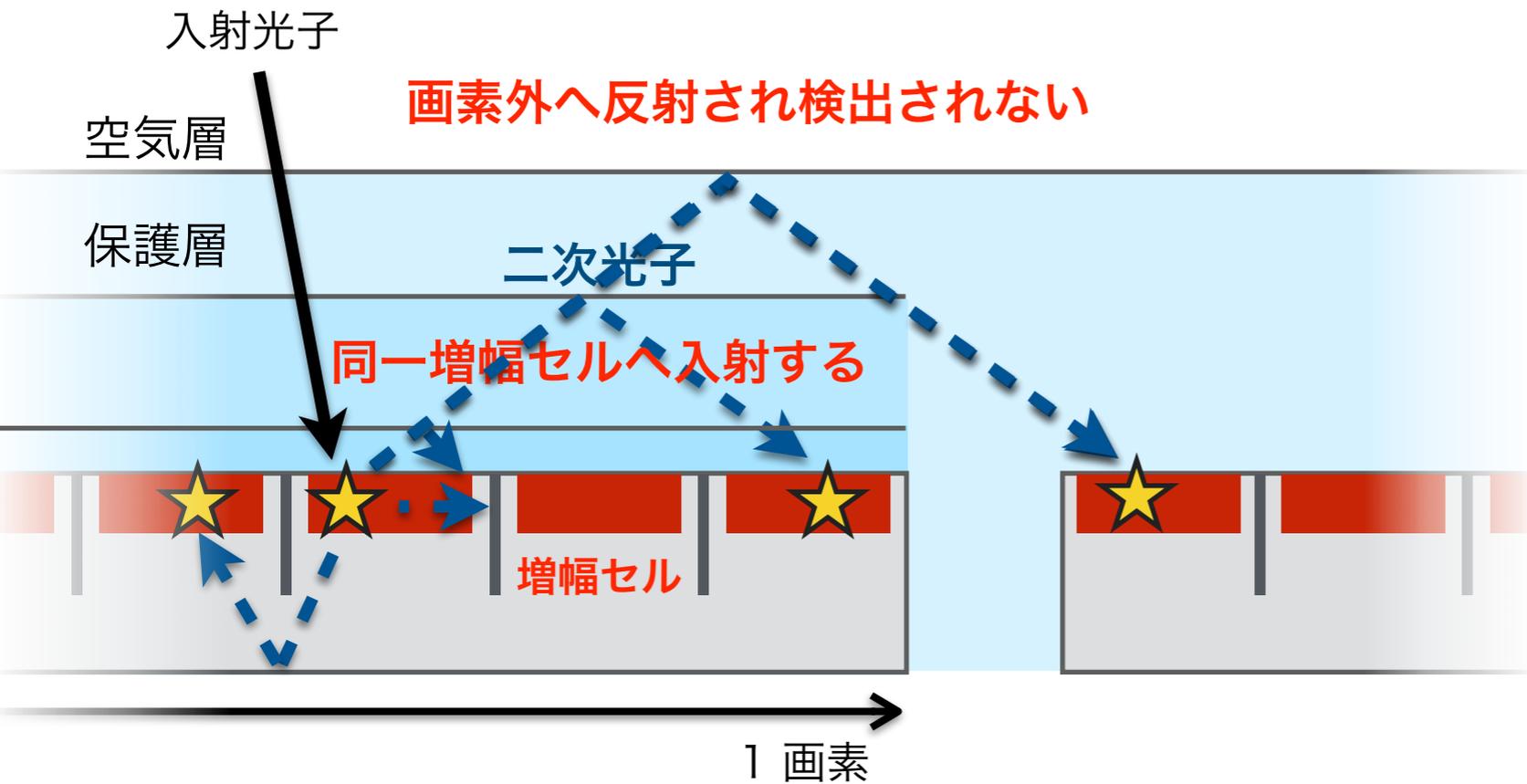
- ▶ NDフィルターの減衰率を測定（積分値が検出光電子数ごとに分離できる数 p.e.の領域で行う）
→ 校正済み光源として使用できるようにする
- ▶ 110 光電子以下では誤差の範囲で一致
→ 校正済み光源を使用した場合と同様の結果を得られている

今後の課題

- 統計量を増やし精度を向上する
- 最新版の集積回路を使用して検証する → 2048 画素の焦点面カメラに適用する

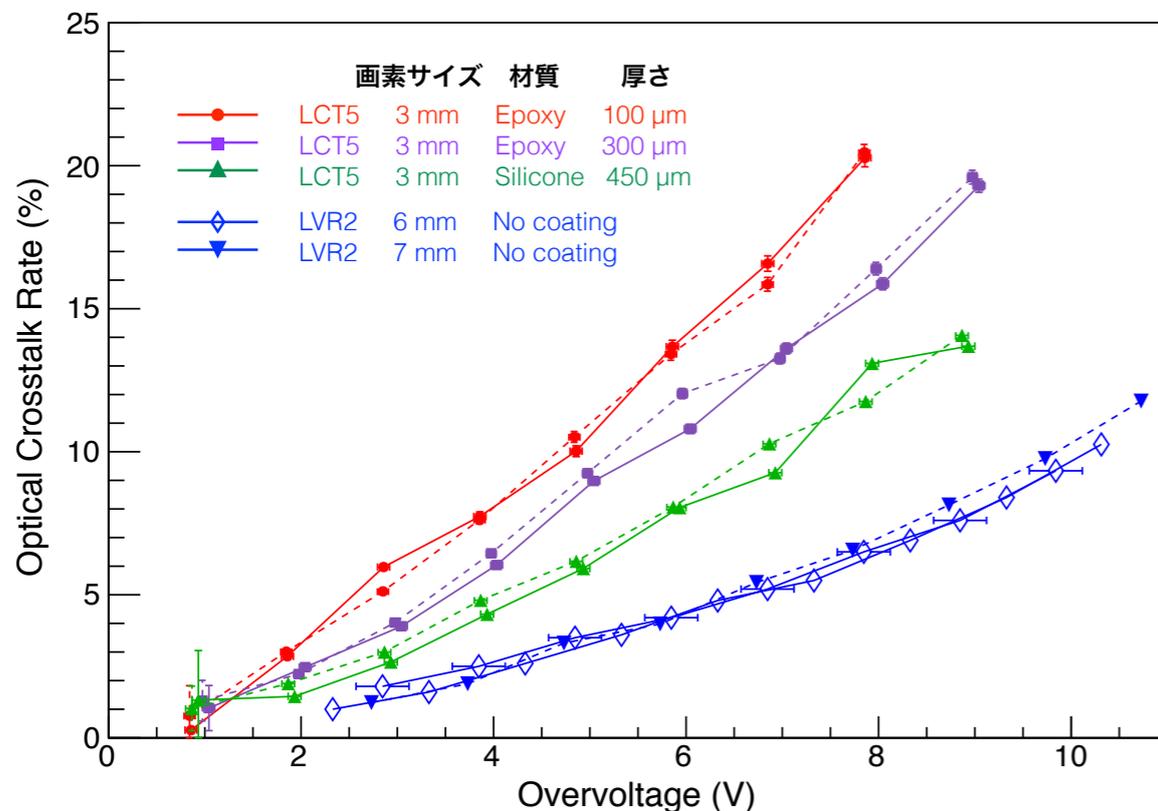


SiPM のオプティカルクロストーク発生確率



* オプティカルクロストーク

- アバランシェ増幅中に生じた二次光子を他の増幅セルで検出する

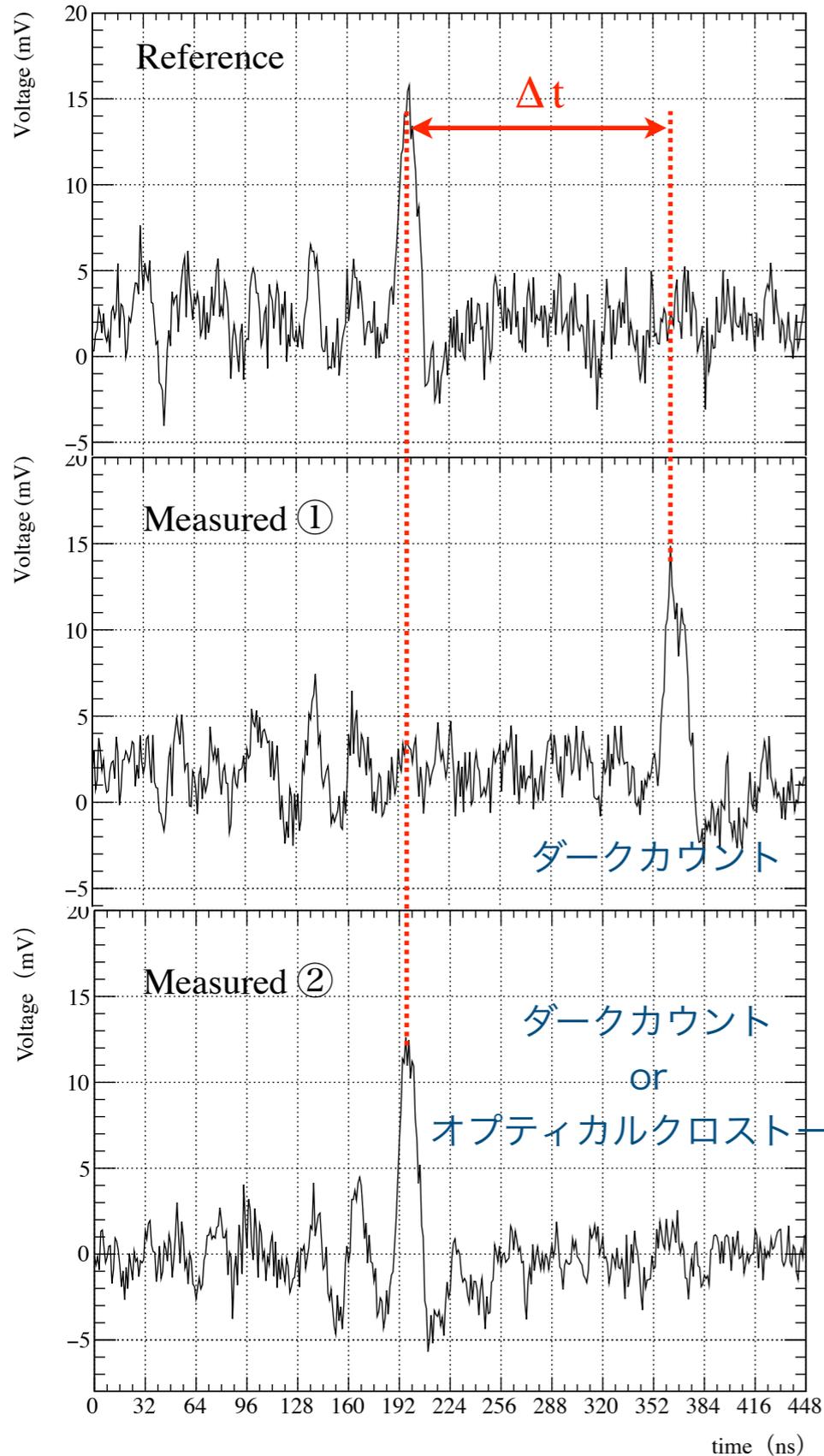


❖ 発生確率が保護層の厚さに依存する

- ▶ 厚くすると発生確率が低減する
→ 画素の外へ逃げ出しているため
- ▶ 保護層をなくしたとき最小となる
→ 同一増幅セルにもどると検出されないため

アレイ型 SiPM では周辺画素で二次光子が検出される

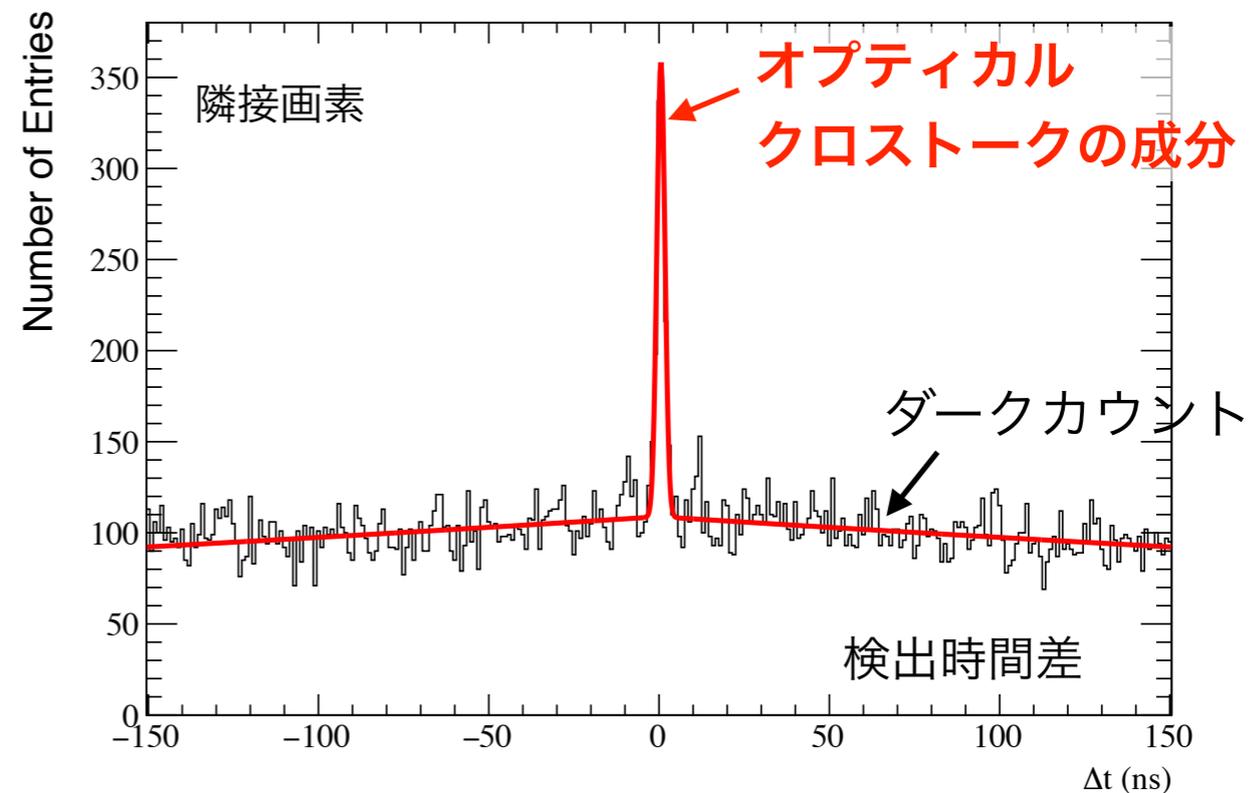
周辺画素へのオプティカルクロストーク発生確率測定方法



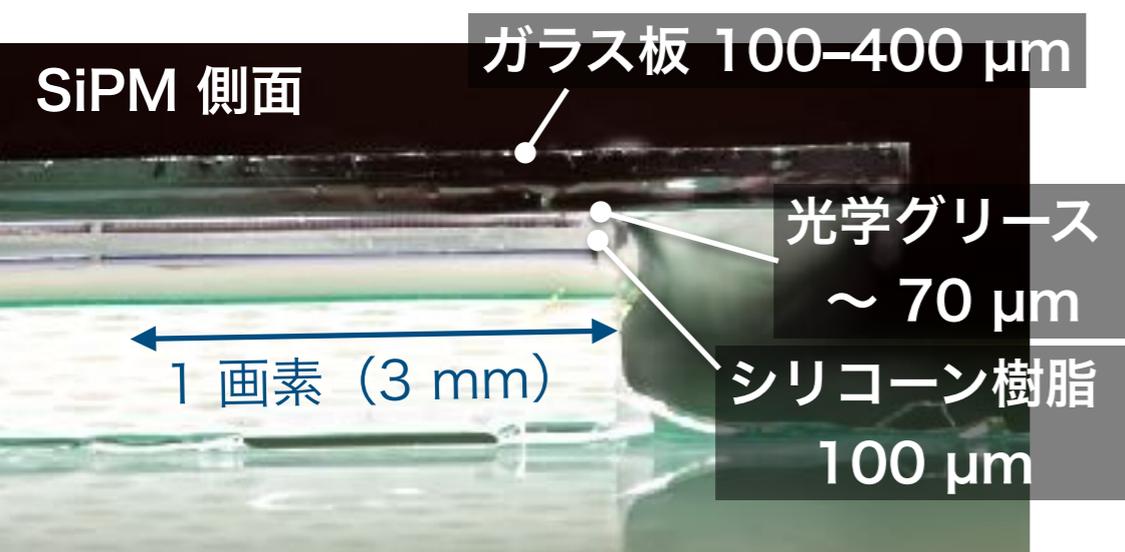
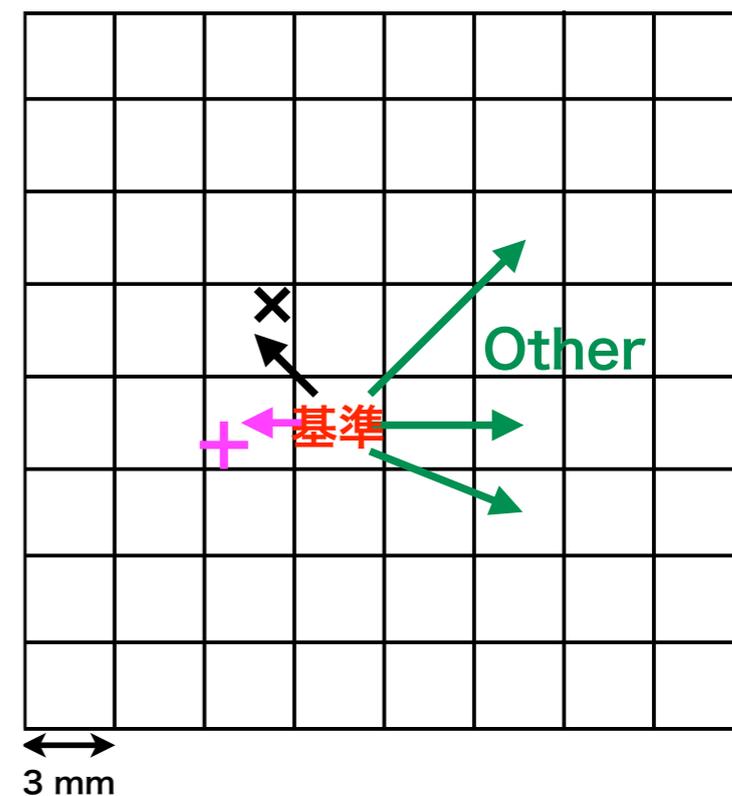
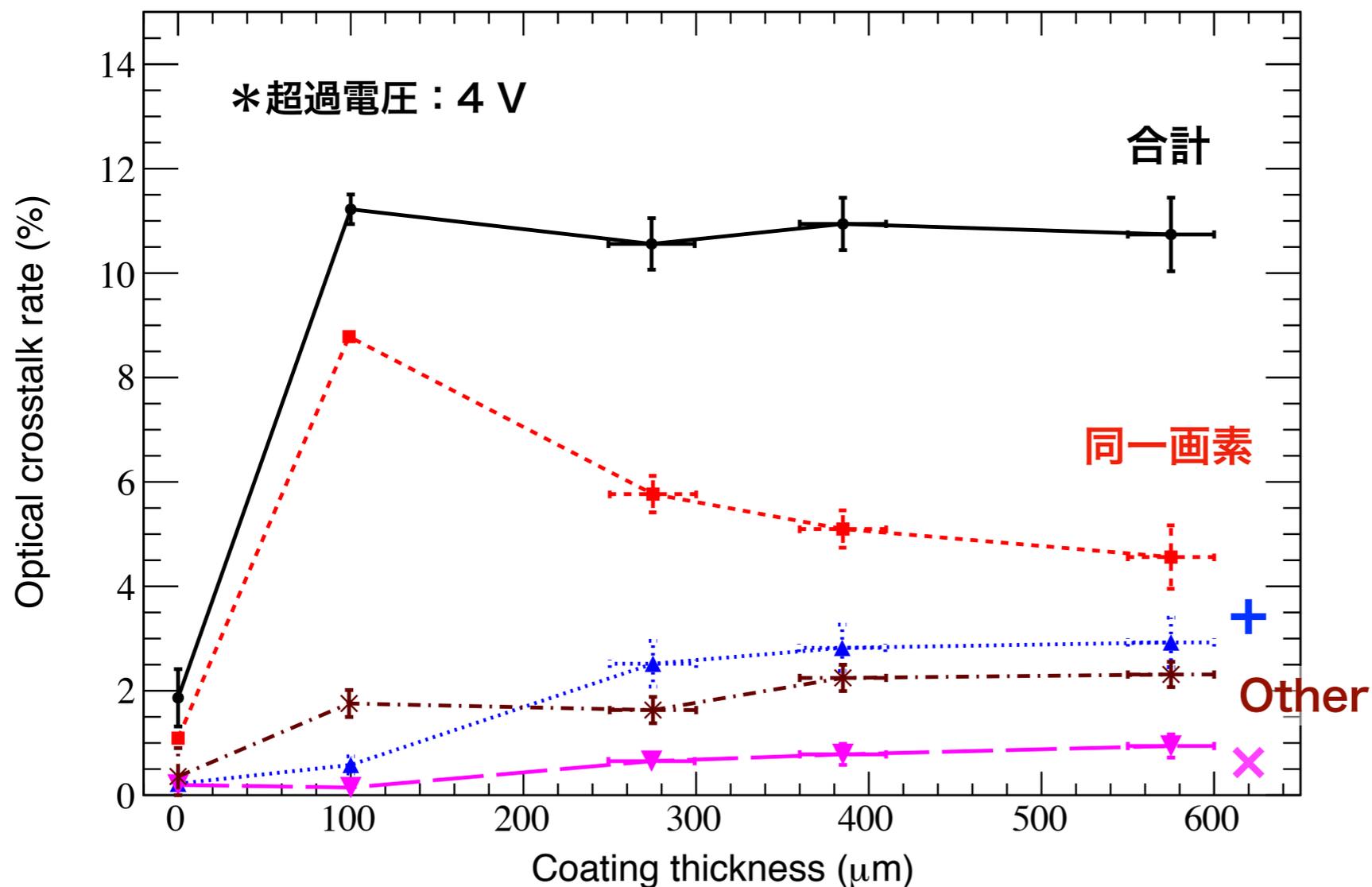
- ▶ 2つの画素での光電子検出時間差 Δt を測定し分布を作成
→ Δt はダークカウントとオプティカルクロストークの2つの成分で表される

Exp + Gaus
ダークカウント + オプティカルクロストーク

- ▶ 同時に検出される事象の増加量を測定
→ オプティカルクロストーク発生確率を決定する

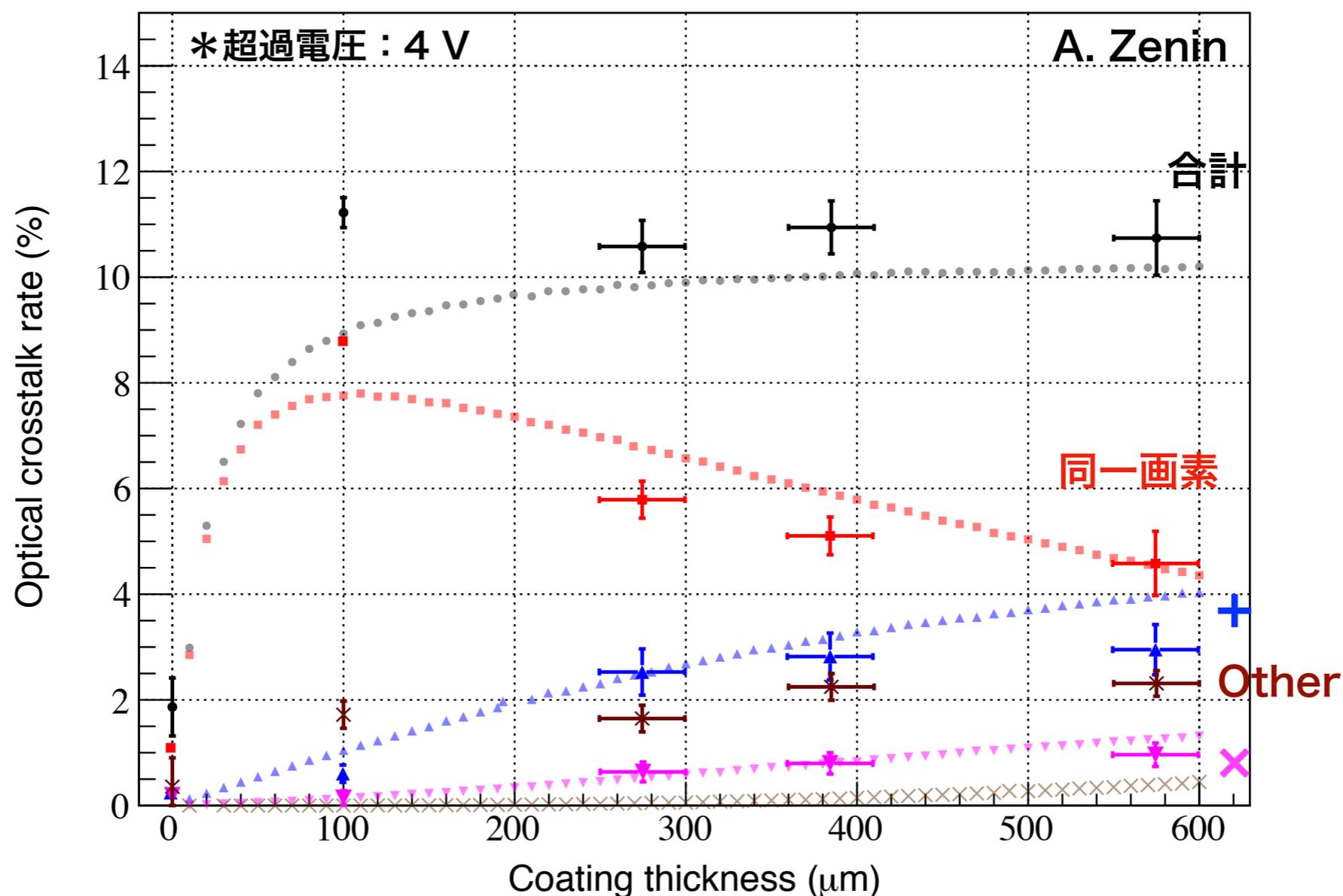


測定結果



- ❖ 発生確率は発生する二次光子の数は保護層厚によらず一定
→ 100 μm 以上で発生確率の合計は保存している
 - ❖ 保護層なしでは二次光子が検出されないため
発生確率の合計が減少する
- *保護層の厚さはガラス板を貼り付けることで変化させた

シミュレーションとの比較



❖ 実験結果と同様の傾向を再現できている

→ 保護層での反射によるオプティカルクロストークについて概ね理解できている

❖ 保護層を薄くすることでオプティカルクロストーク発生確率を抑制できる

→ この結果をもとに SiPM の仕様を決定する

まとめ

- ▶ 光検出器をSiPM に置き換えた焦点面カメラの開発が進んでいる
 - **2018年中に試験観測を予定**
- ▶ 多画素の焦点面カメラの較正に向けて較正手法を開発した
 - 望遠鏡搭載後の再較正も想定して LED 光をカメラ全体に照射することで SiPM と電子回路の検出光電子数に対する出力の非線形性を較正する方法を開発した
 - **較正済み光源を使用した方法と一致している**
 - 今後、試作焦点面カメラで検証する**
- ▶ 較正手法を応用してオプティカルクロストーク発生確率の表面保護層厚依存性を評価した
 - **保護層を薄くすることでオプティカルクロストーク発生確率を低減できる**
 - この結果をもとに SiPM の仕様を決定する**