

CTA大口径望遠鏡のための SiPMモジュールの開発

(Development of SiPM Modules for CTA Large-Sized
Telescopes)

橋山和明, 猪目祐介, 岩村由樹, 大岡秀行, 岡崎奈緒, 窪秀利, 齋藤隆之, 櫻井駿介, 高橋光成, 手嶋政廣, 野田浩司, Daniela Hadasch, Daniel Mazin (東京大学), 岩崎啓, 岡知彦, 寺内健太 (京都大学), 奥村暁, 田島宏康 (名古屋大学), 折戸玲子 (徳島大学), 片桐秀明, 野上優人, 吉田龍生 (茨城大学), 櫛田淳子, 西嶋恭司 (東海大学), 郡司修一, 門叶冬樹, 中森健之 (山形大学), 佐々木寅旭, 砂田裕志, 立石大, 寺田幸功 (埼玉大学), 田中真伸 (KEK), 溝手雅也, 山本常夏 (甲南大学), 野崎誠也 (マックスプランク物理学研究所),
他CTA-Japan Consortium

10th/Sep./2022

ICRR, The University of Tokyo

Kazuaki Hashiyama

CTA大口徑望遠鏡 (LST)

• LSTによるガンマ線観測

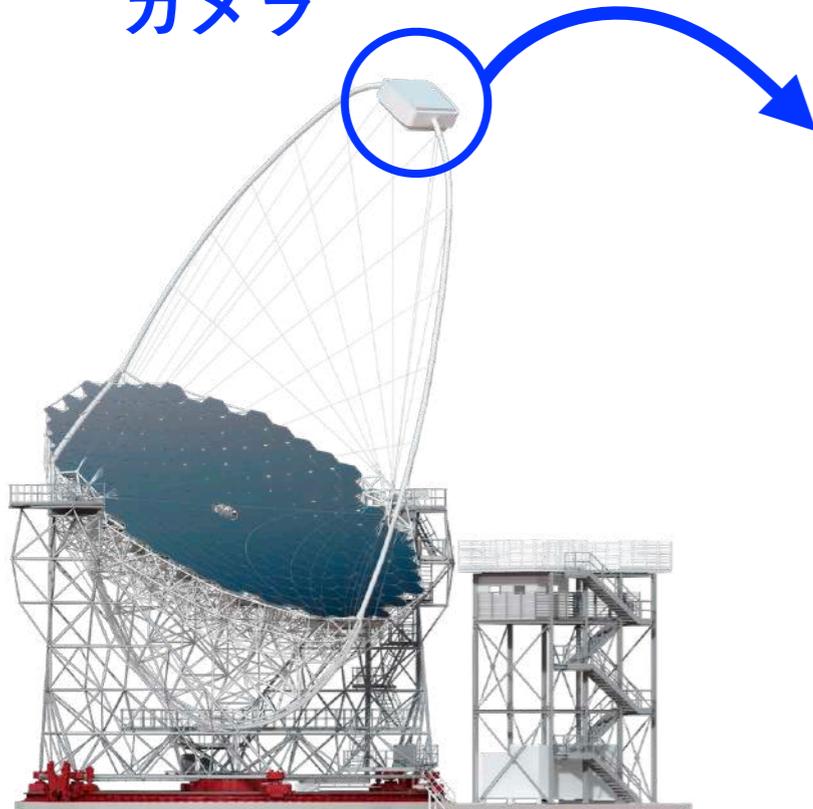
✓ **大気チェレンコフ光**を撮像し、ガンマ線のエネルギーや到来方向を推定する

→ 陽子等のハドロンからも放射され、これが背景雑音となる

→ **LSTの感度はガンマ線とハドロンの弁別性能に依存する**

◆ **カメラ画素を細かくするとイメージの細部が見える → 弁別性能が向上するはず！**

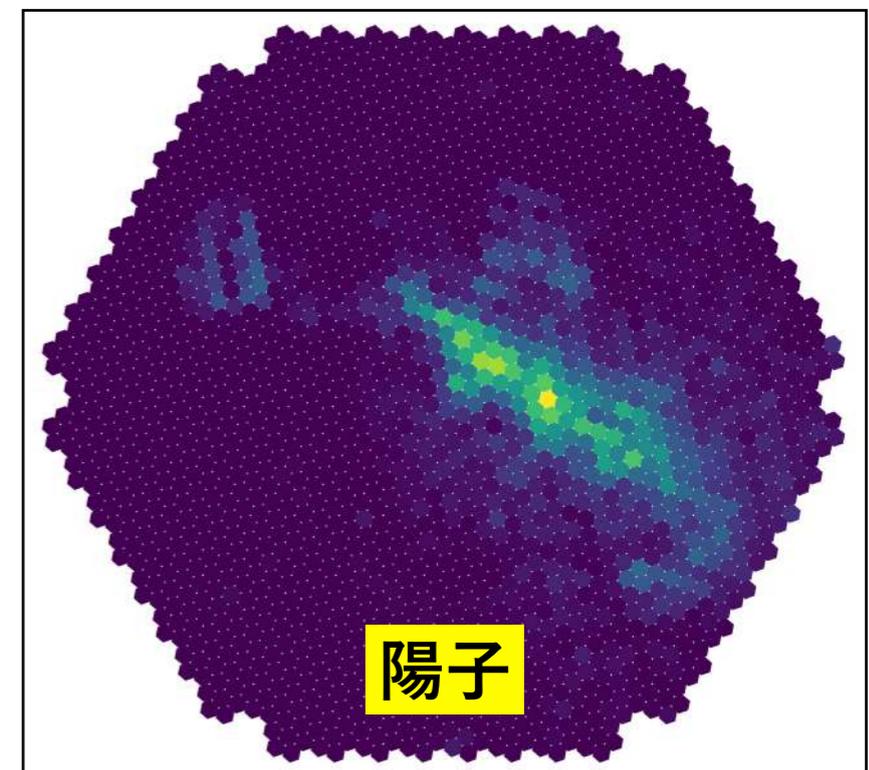
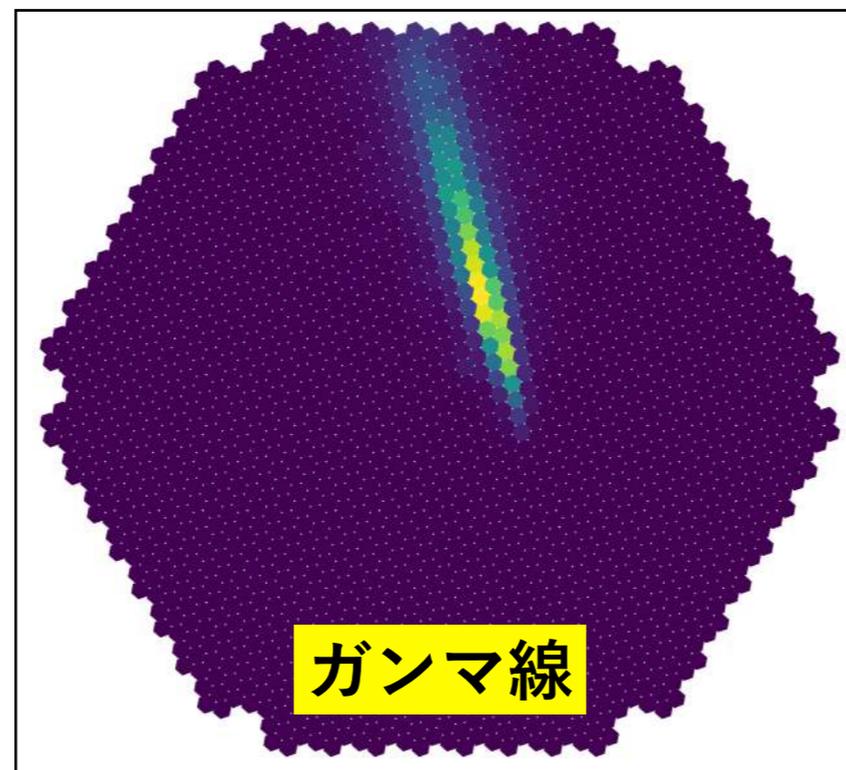
1855本のPMT製
カメラ



CTA-LST

カメラ面上のチェレンコフ光のイメージ

※シミュレーション



Silicon Photo-Multiplier (SiPM)

● 焦点面カメラ素子のSiPM化

✓ SiPM：数1000個のGAPDで構成される半導体光検出素子

PMT

- 数1000 Vの高い動作電圧
- 3 nsの短いパルス幅
- 広い受光面 ($\Phi 34$ mm/px)
 - ▶ LST-1のカメラ: 1855 px

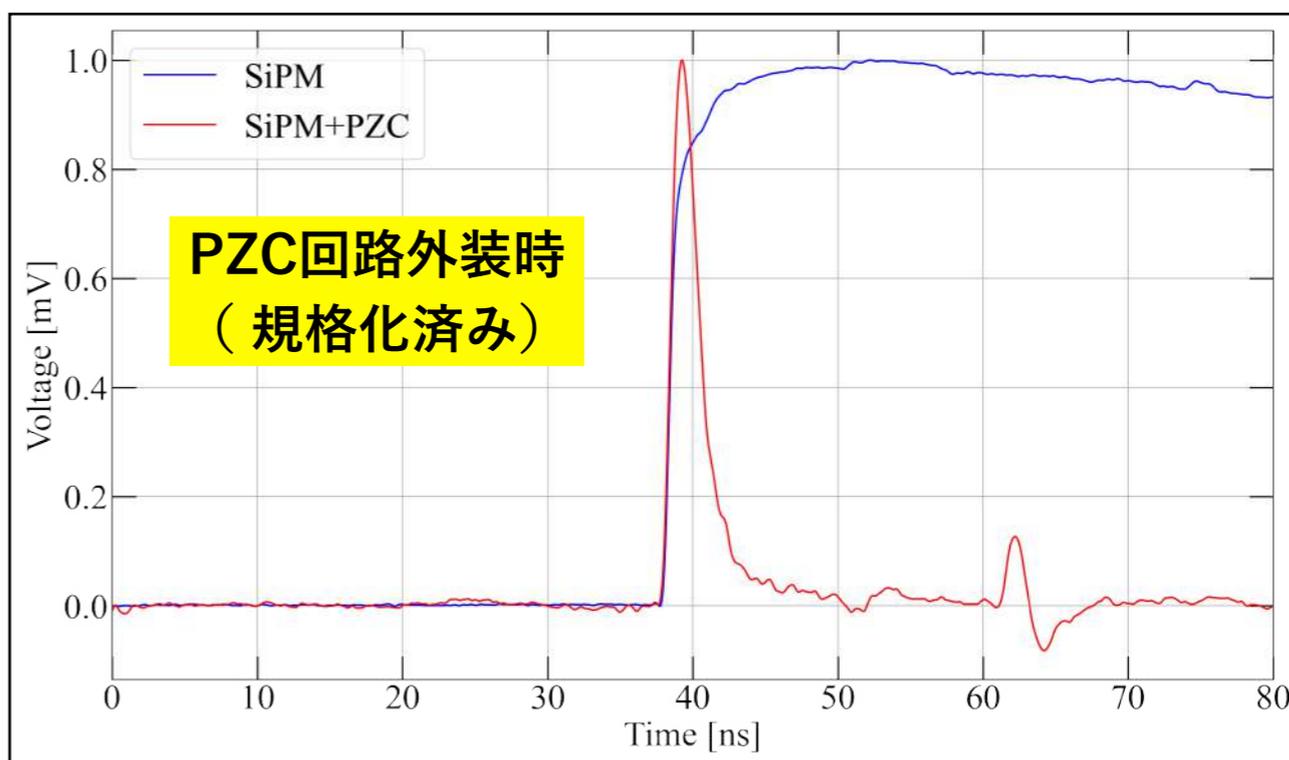
SiPM

- 40-50 V程度の低い動作電圧
- 300 ns以上の長いパルス幅
- 小さな受光面 ($\square 3-6$ mm/px)
 - ▶ SiPMカメラ: >7420 px

◆ LSTがSiPMに要求すること

- ✓ 3 ns程度の短いパルス幅
 - ▶ 夜光ノイズとの弁別のため
 - ▶ PZC回路の外装で3 nsのパルス幅は実現可能（前回講演参照）だが、消費電力が100 mW以上増加する

➔ 浜松ホトニクス社が開発した新型SiPMをLST用に評価した



新型SiPM: S13360-3050CN-UVE-1

- サイズ

- ✓ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 、GAPDの1辺は50 μm (=3600個で構成)

- 本素子の主な測定項目

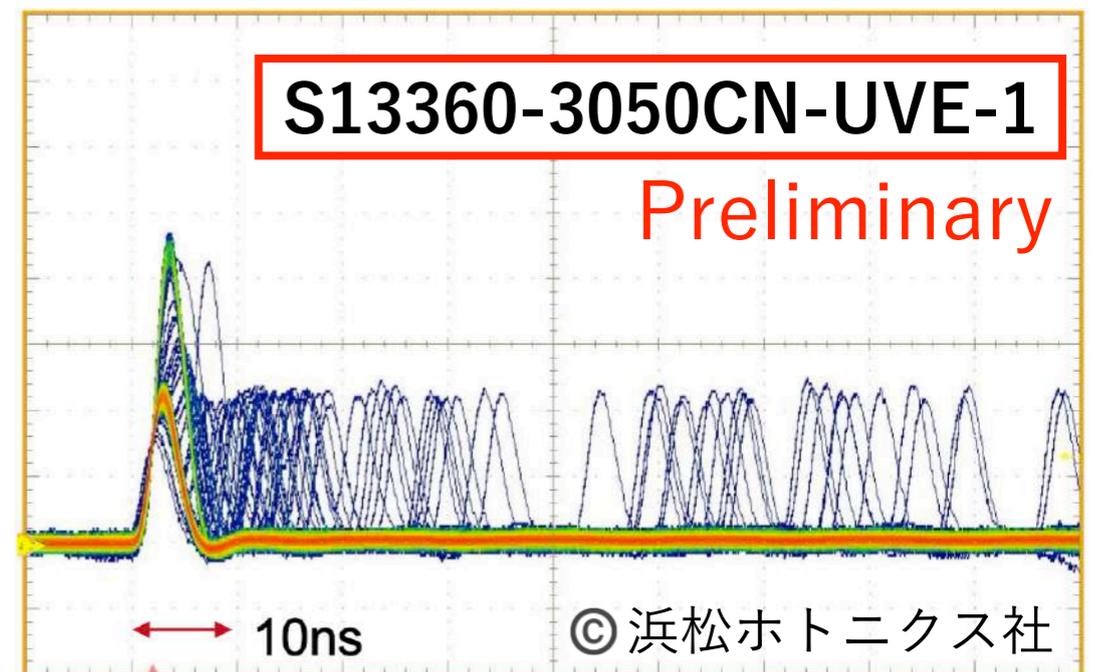
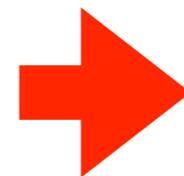
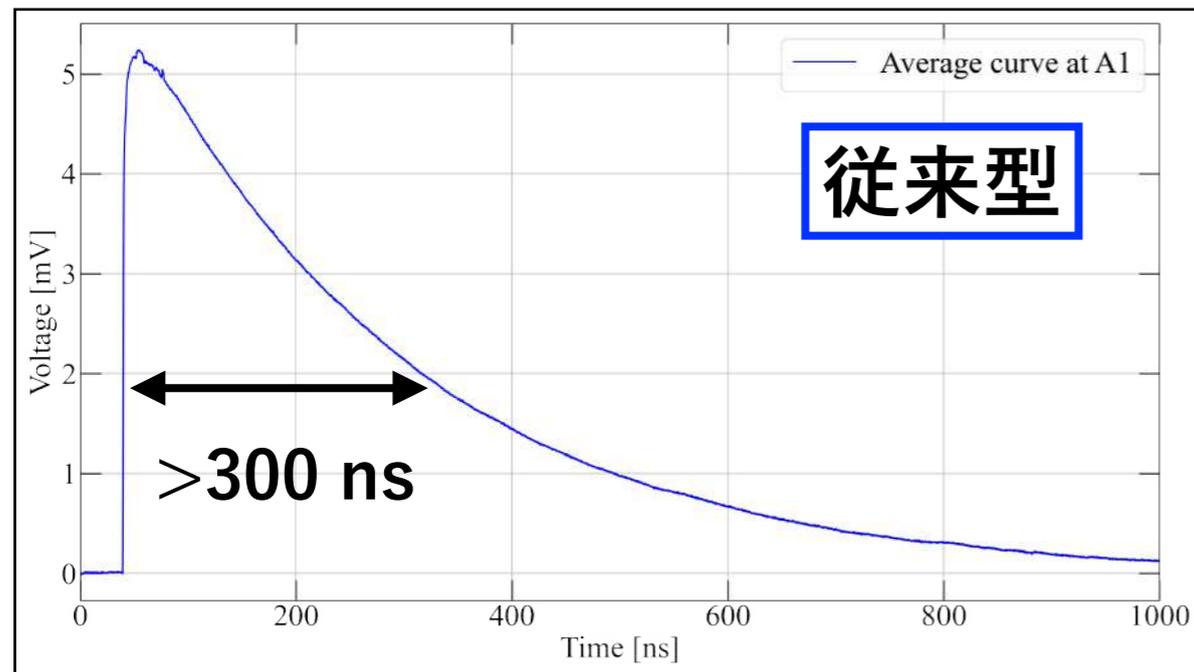
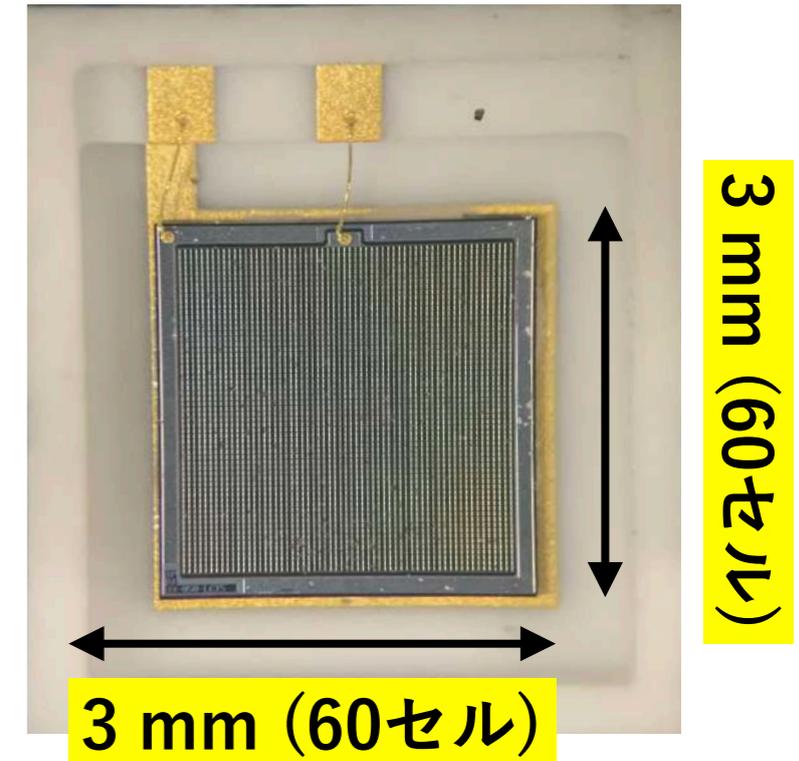
- ✓ パルス幅：半値全幅で~8 ns (PZC回路無し)

- ➔ パルス幅が長いと光子数を過大評価する

- ✓ 回復時間：充電が未完了だと100%の信号を出せない

- ➔ 回復時間が長いと光子数を過小評価する

(e.g.) 充電率30%では1光子を0.3光子と見なす



セットアップ

● 主な測定機器

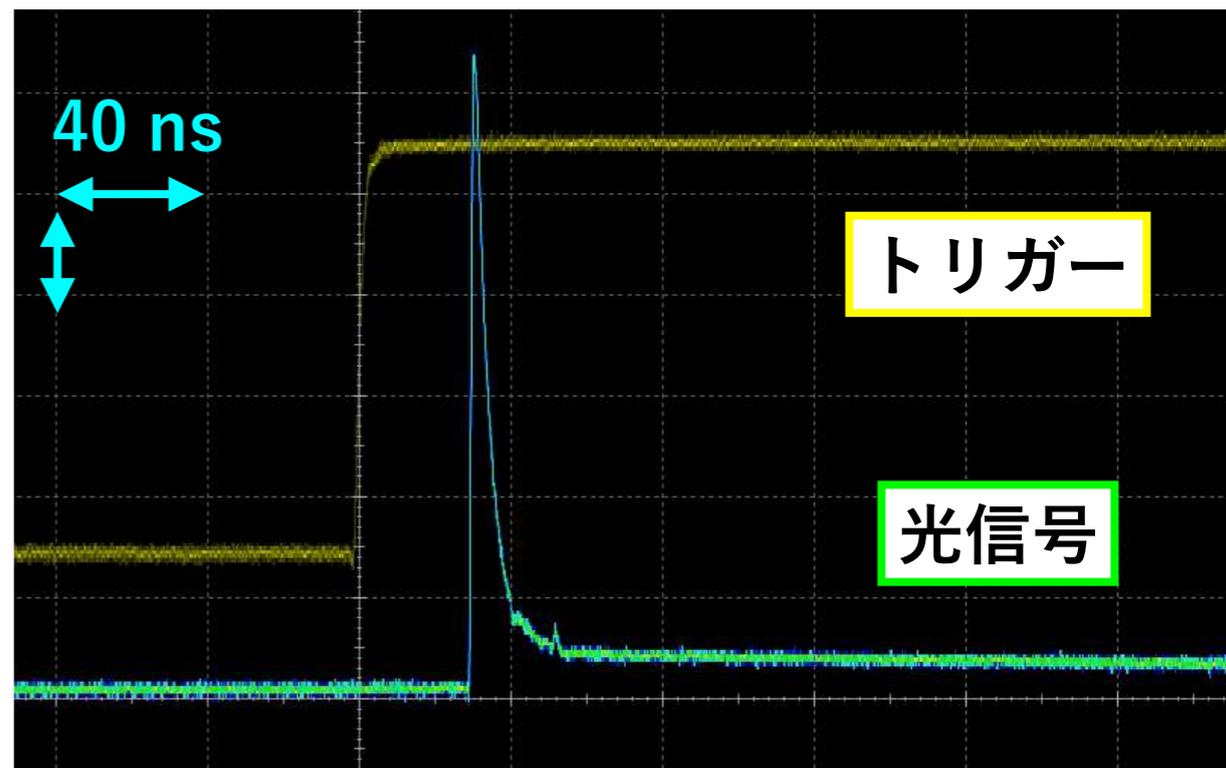
✓ パルスレーザー

500 ps, 405 nmの青波長パルス
cf) チェレンコフ光: 300–600 nm

0.5 V

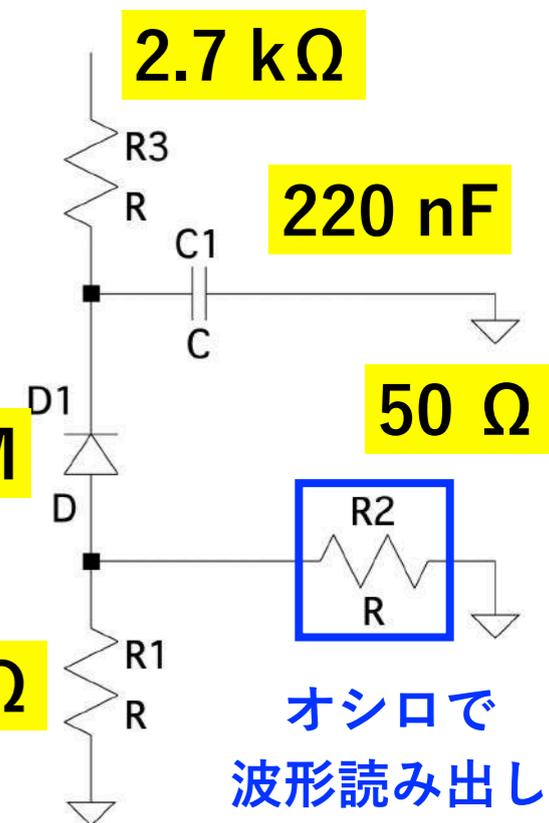
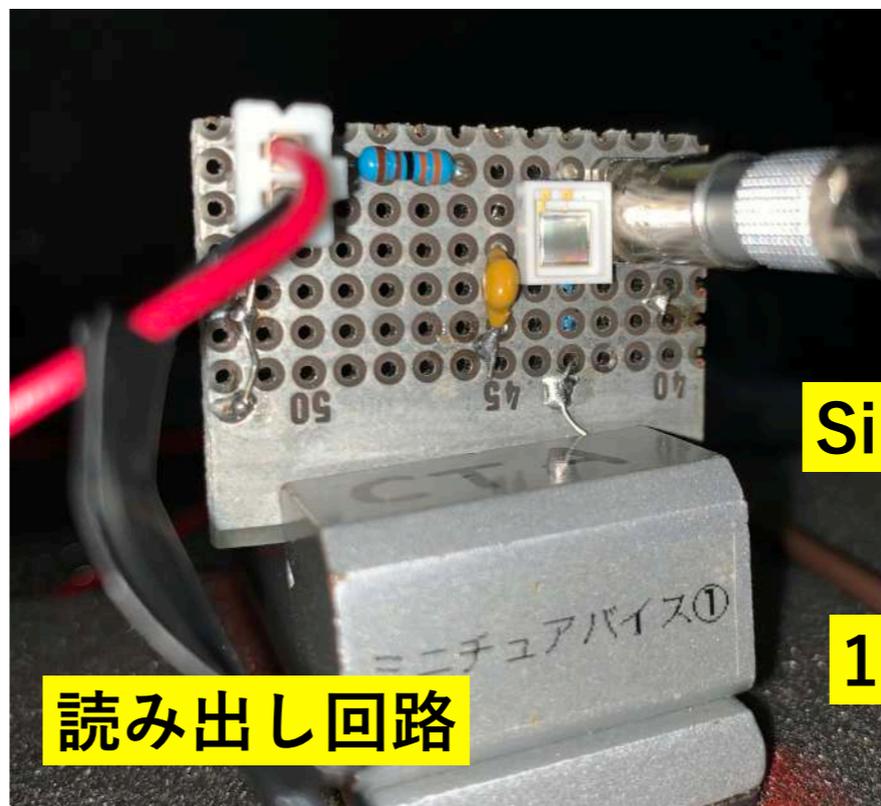
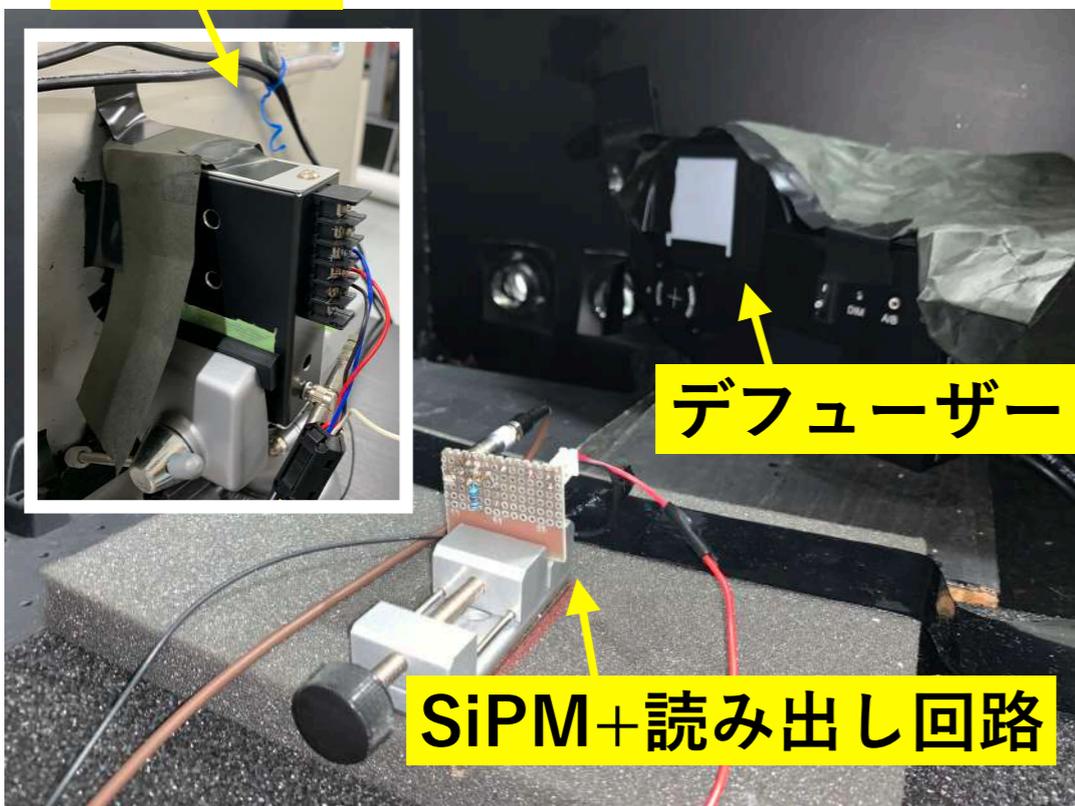
✓ パルスジェネレータ (PG)

レーザーとオシロスコープに同期した
トリガーを生成する



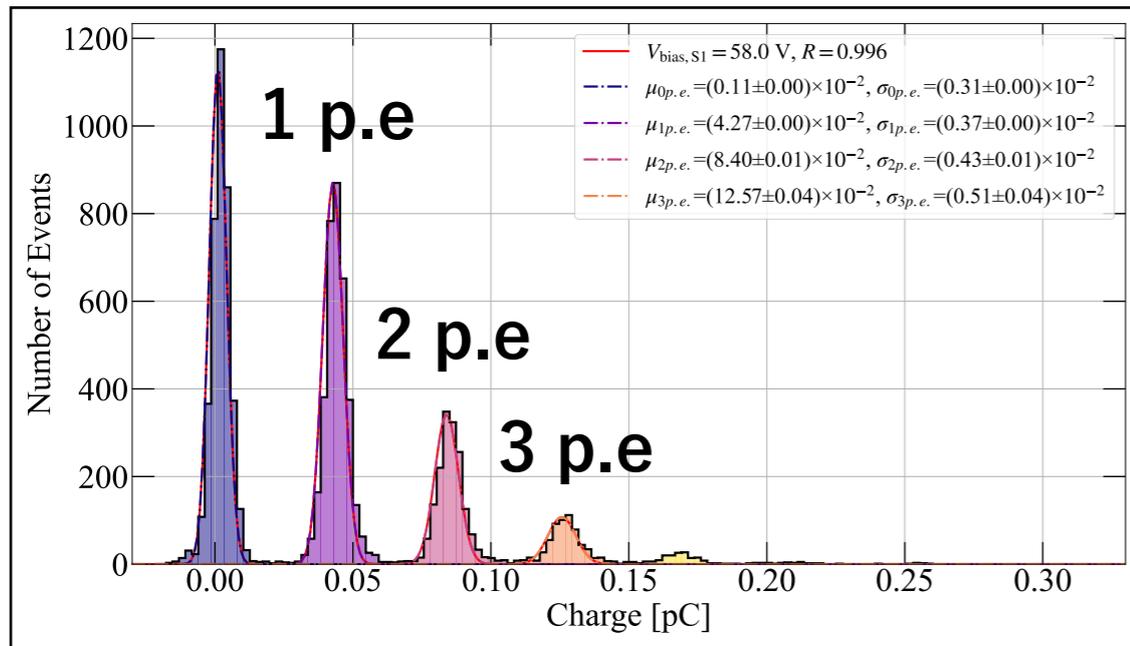
レーザー

背面

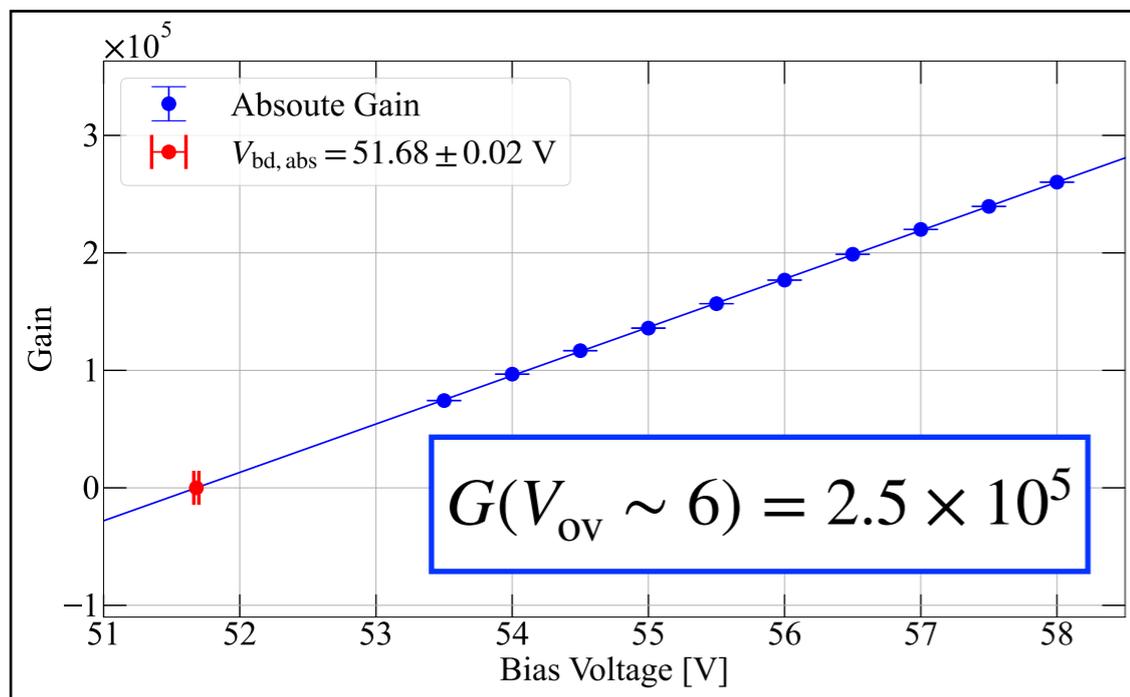


基礎特性（前回講演と同様の測定）

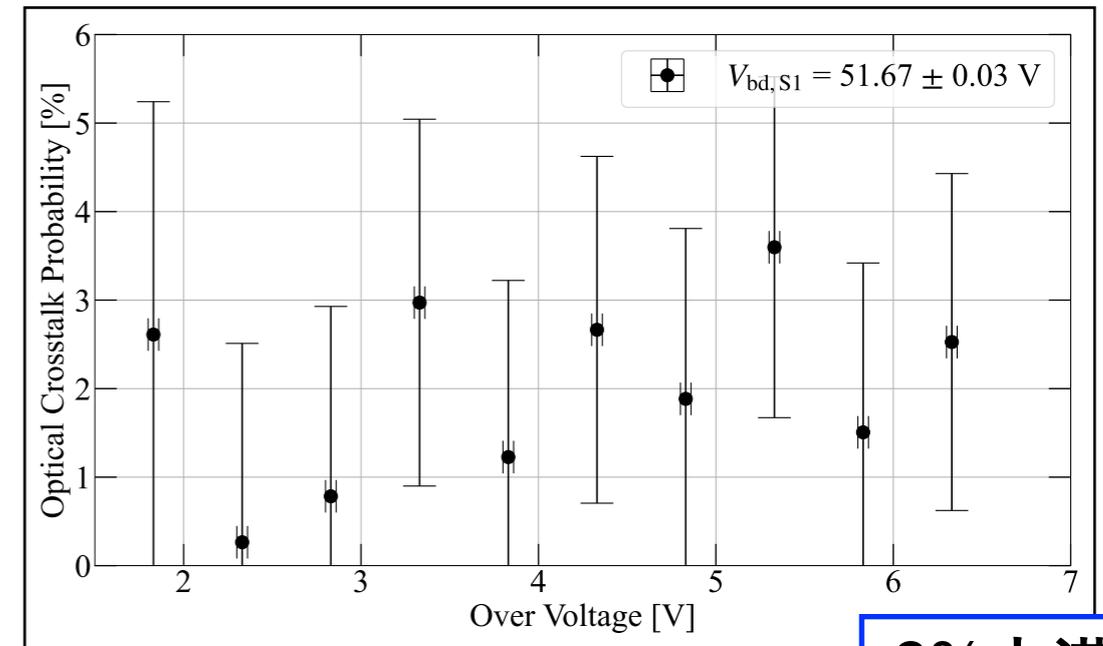
● 電荷分布



● ゲイン

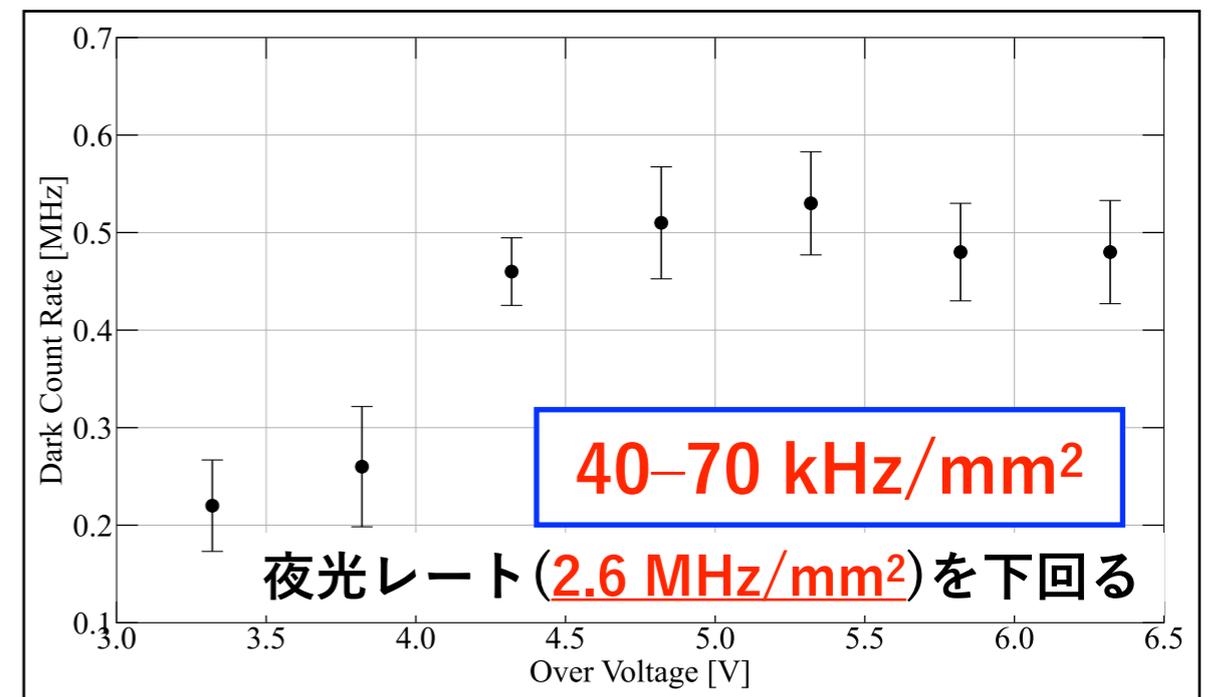


● オプティカルクロストーク



6%未満

● ダークカウントレート



出力波形

● 波形

- ✓ 50 ns以降で反射が確認された → 以降の解析では影響しない
- ✓ 1 ns以下で素早く立ち上がり、指数関数的に4.4 nsの時定数で立ち下がる

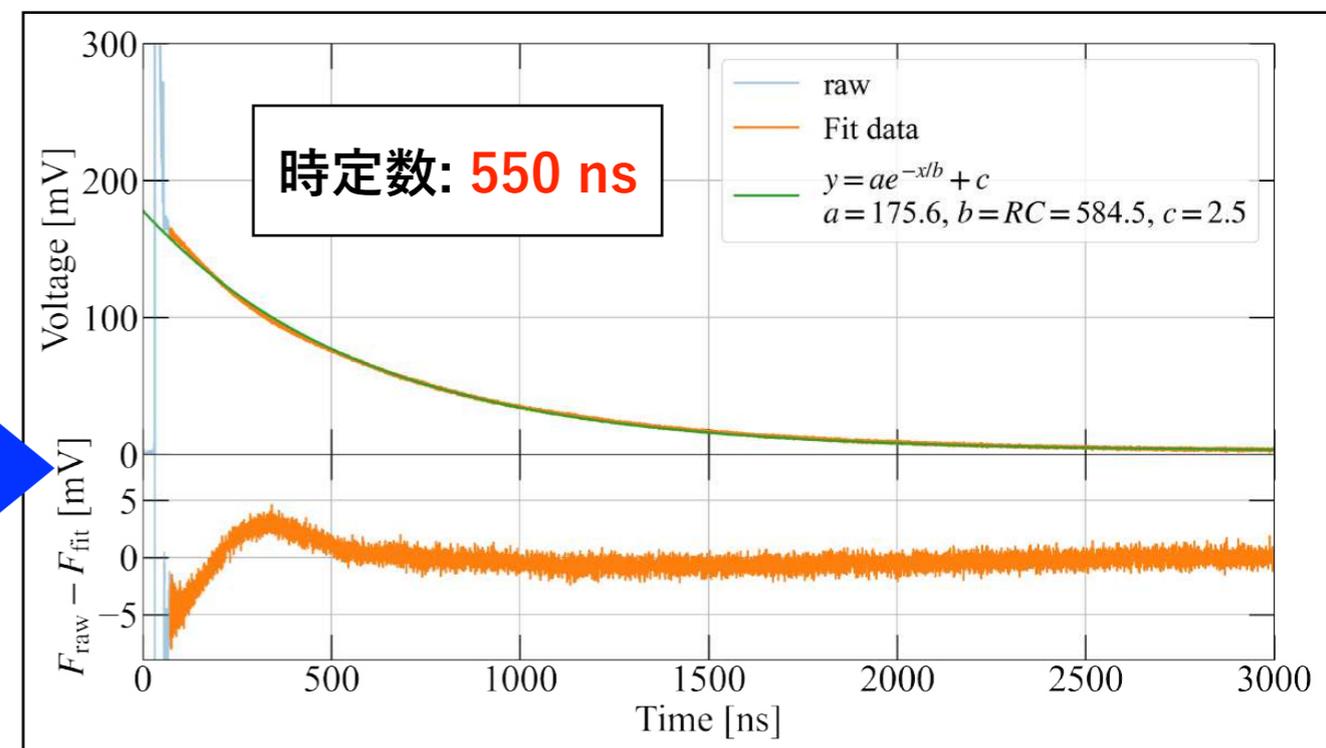
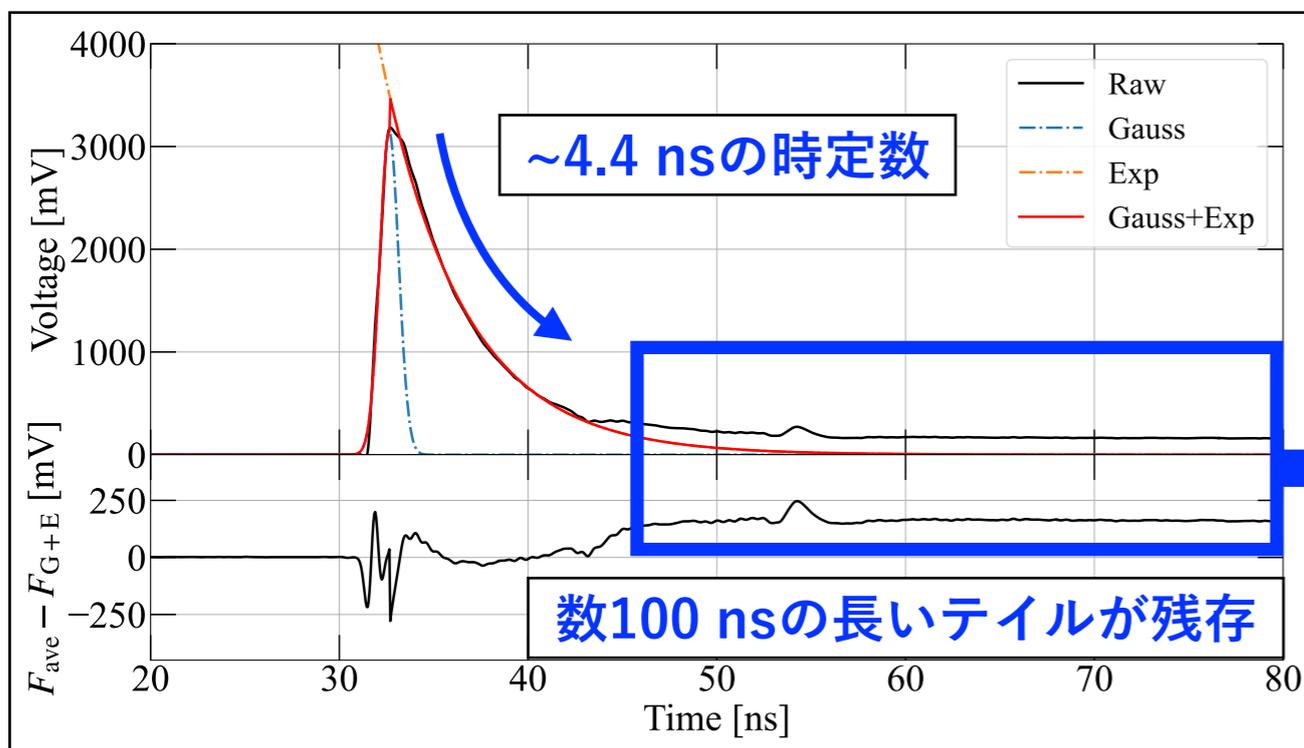
● パルス幅

- ✓ 30–40 nsの高速成分は2つのモデル関数で波形解析を行った：

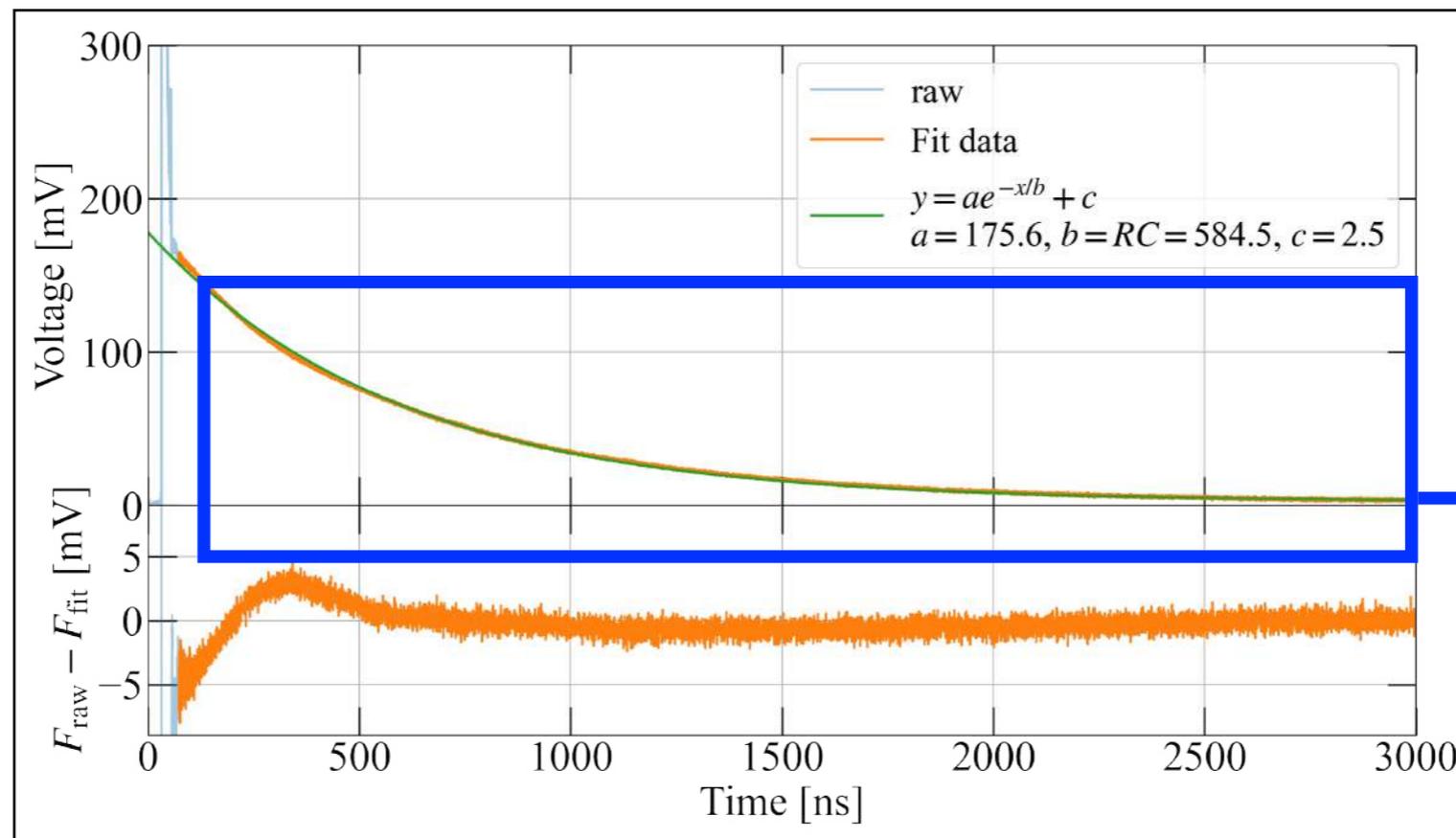
- ▶ 立ち上がり成分はガウス関数 → 半値全幅 (FWHM) は 1.2 ns
- ▶ 立ち下がり成分は指数関数 → 半値幅は 3.0 ns

とても短い
パルス幅！

3.6 ns



回復時間：目的



3 us以上の
長いテイル

● 測定目的

- ✓ PZC回路無しで3.6 nsのパルス幅を実現したが、3 us以上のテイルが残った：
 - ▶ この成分は次に検出されるパルスに影響を与えないか？
- ◆ 夜光検出後の回復時間中のゲインが下がるため、チェレンコフ光を検出した際に検出光子数を過小評価する可能性がある
 - ➔ 夜光はMHzの頻度で到来するので、この現象が定常的に起こる可能性がある
 - ➔ SiPMの回復時間を測定し、夜光の検出時間間隔と比較する

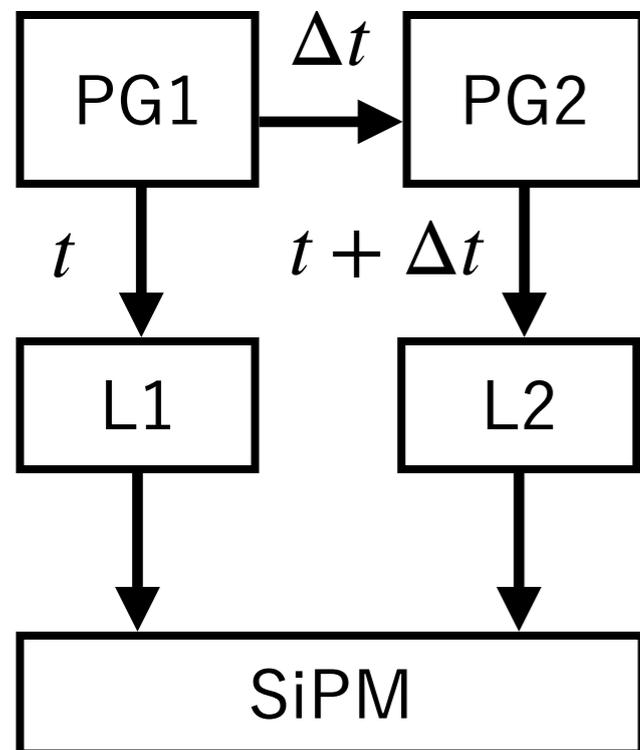
回復時間：セットアップ

- 2つのパルスレーザーによる測定

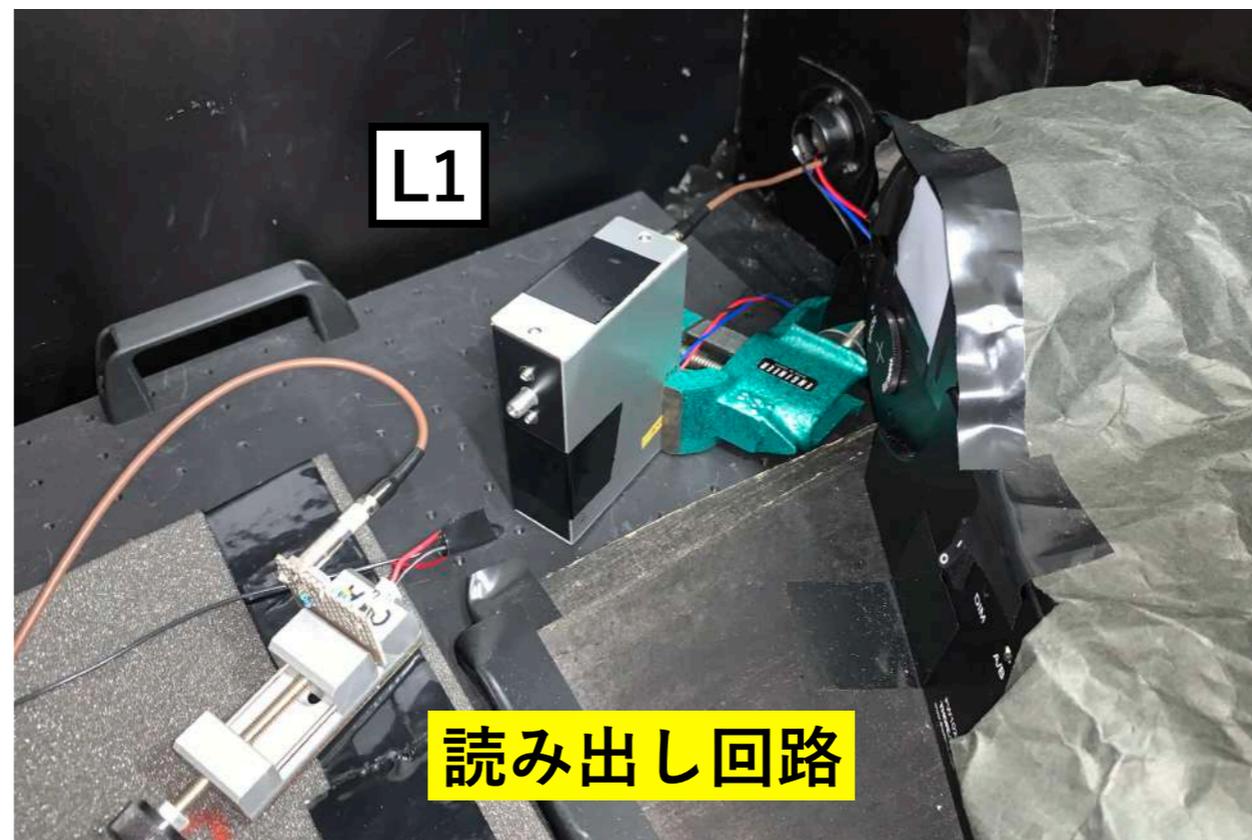
- ✓ レーザー1 (L1) : 3600 p.e.レベルの大光量パルス
- ✓ レーザー2 (L2) : 150 p.e.レベルの小光量パルス (チェレンコフ光模擬)
- L2のみを光らせた時のパルスはリファレンスパルスと定義する

◆ 回復率 R :

$$R = \frac{G_{L2}(t + \Delta t)}{G_{L1}(t)} = \frac{\text{Gain after } \Delta t}{\text{Gain at full recovery}}$$



※PG : パルスジェネレータ



回復時間：セットアップ

- 2つのパルスレーザーによる測定

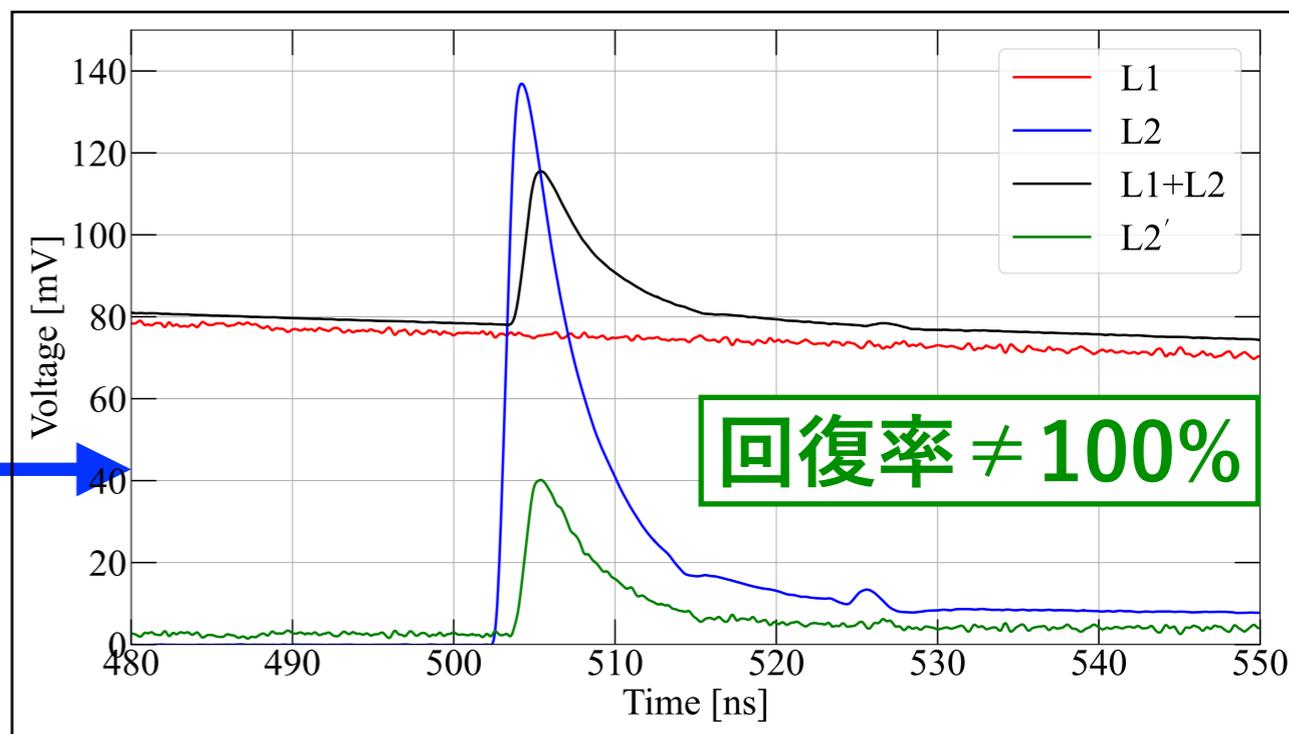
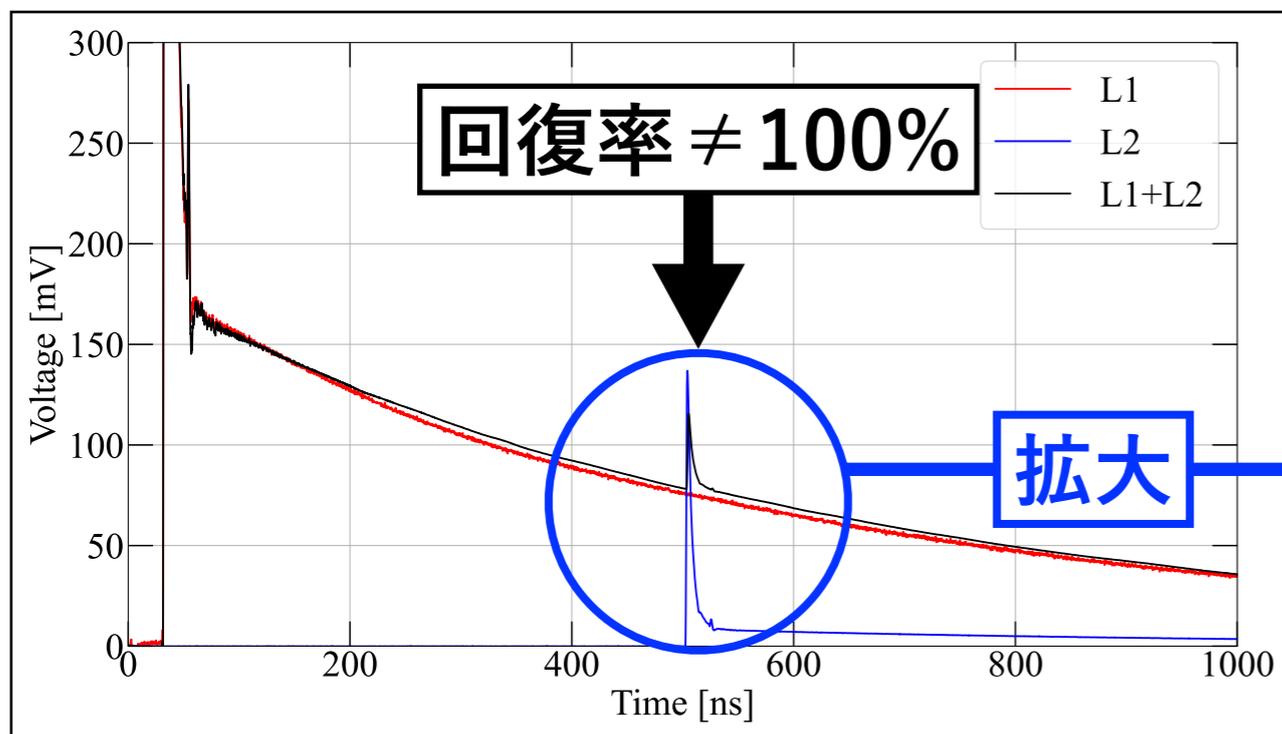
- ✓ レーザー1 (L1) : 3600 p.e.レベルの大光量パルス

- ✓ レーザー2 (L2) : 150 p.e.レベルの小光量パルス (チェレンコフ光模擬)

→ L2のみを光らせた時のパルスはリファレンスパルスと定義する

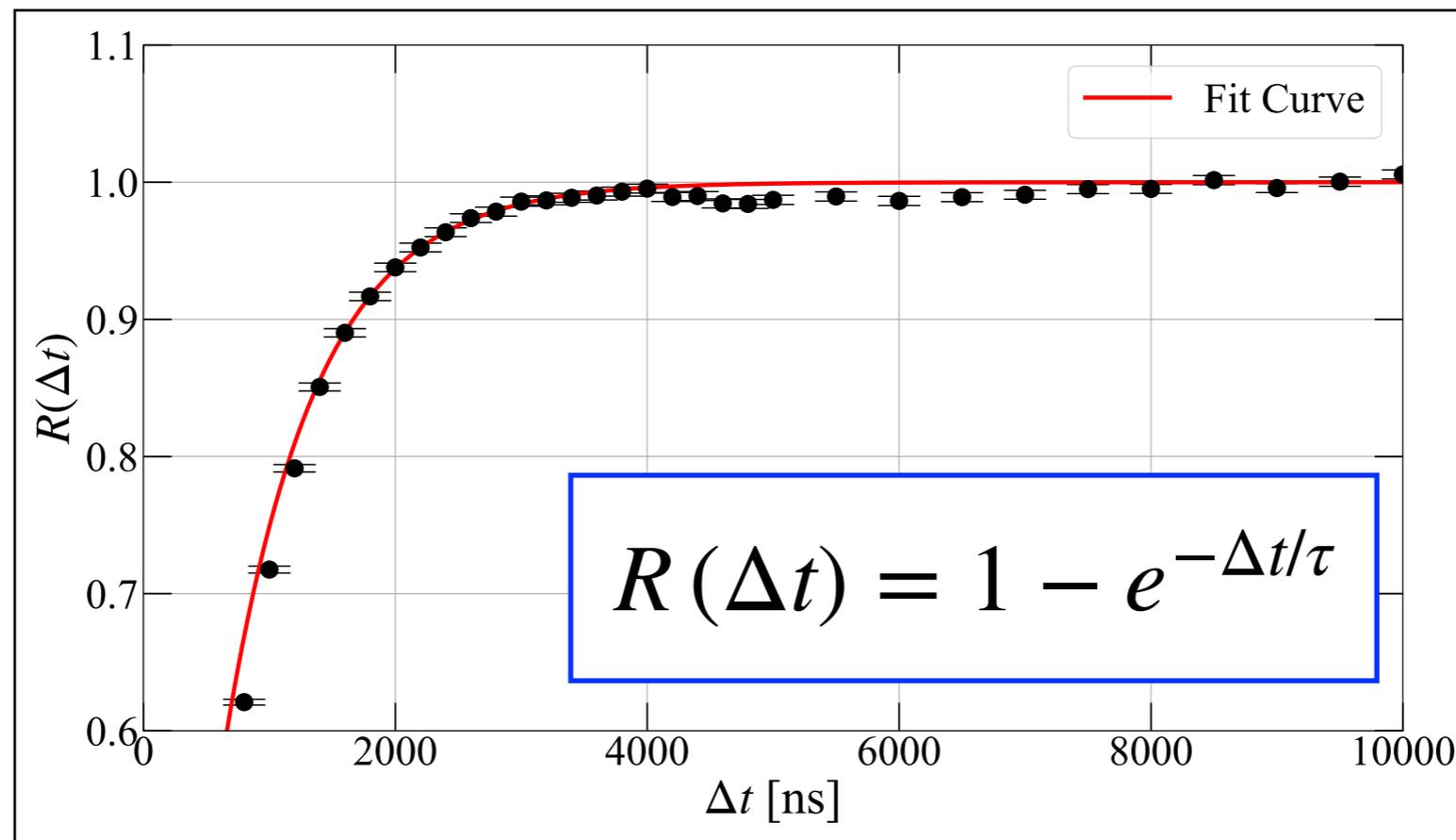
◆ 回復率 R :

$$R = \frac{G_{L2}(t + \Delta t)}{G_{L1}(t)} = \frac{\text{Gain after } \Delta t}{\text{Gain at full recovery}}$$



L2'はL1同時照射時のL2成分

回復時間：結果



● 回復時間の定義

- ✓ モデル関数を用いて細かな回復時間を推定： $R \geq 0.95$ となる時刻 τ と定義する
 - ▶ 測定値: **約2.20 us**
 - ▶ 推定値: **約2.18 us**
- ✓ SiPMが次の光子を検出するための回復時間は少なくとも**2.2 us**必要：
 - ➔ 回復時間中に次の光子が入射し、ゲイン低下の状態で光子を検出する確率は？

回復時間：夜光は問題にならないか？

- 回復時間と光検出効率を考慮した夜光レートとの比較

| | セルサイズ | 受光面積 S | 受光面積比 | 夜光 (300–900 nm) |
|----------------------|--------|-------------------------|-------|---------------------------|
| PMT | — | 907 mm ² /px | — | 0.44 MHz*/mm ² |
| S14521-0741-2 | □75 μm | 36 mm ² /px | 25 | 2.8 MHz/mm ² |
| S13360-3050-1 | □50 μm | 9 mm ² /px | 101 | 2.6 MHz/mm ² |

*立体角0.471 srのライトガイド込みで計算

- ✓ 300-900 nm帯では、新型SiPMは1セルあたり約6.4 kHzで夜光が到来する
あるセルAに夜光が入射し、完全回復前にAに再び夜光が入射した時、両検出時刻間が2.2 us以内であればゲインが下がった状態が継続する → 光子数推定精度低下
- ◆ 指数分布における下側累積確率： $\lambda \sim 0.16$ [ms]、 $\tau = 0.0022$ [ms]とすると、

$$P(t \leq \tau) = \int_0^{\tau} \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) dt \sim 0.014$$

より**1.4%**となり、ゲインが定常的に下がる確率は低いと言える

まとめ

- 研究目的

新型SiPMをLSTに搭載する上でその特性に問題がないかを測定により検証する

- 特性

| | | 降伏電圧38 V+6 V | 降伏電圧52 V+6 V |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | PMT | S14521-0741-2 | S13360-3050-1 |
| 素子サイズ | Φ 34 mm | 6 mm × 6 mm | 3 mm × 3 mm |
| セル数/セルサイズ | — | 6312/□75 um | 3600/□50 um |
| パルス幅 | 3 ns | 2 ns* | 3.6 ns |
| ゲイン | 4×10^4 | 4×10^5 | 3×10^5 |
| DCR | 10 kHz | 100–220 kHz/mm ² | 40–70 kHz/mm ² |
| 夜光レート | 0.44 MHz/mm ² | 2.8 MHz/mm ² | 2.6 MHz/mm ² |

◆ 長いテイル：時定数は約550 ns

*PZC回路使用時

◆ 回復時間：約2.2 us → 夜光による過小評価確率は約1.4%でほぼ影響しない

- 結論

新型SiPMはパルス幅と消費電力 (>100 mW減) の観点から優れた素子と考えられる