

CTA報告196: CTA大口徑望遠鏡のための SiPMモジュールの開発

橋山和明^A, 猪目祐介^A, 岩村由樹^A, 大岡秀行^A, 岡知彦^B, 岡崎奈緒^A, 奥村暁^{C, D}, 折戸玲子^E, 片桐秀明^F,
櫛田淳子^G, 窪秀利^B, 郡司修一^H, 齋藤隆之^A, 櫻井駿介^A, 佐々木寅旭^I, 砂田裕志^I, 高橋光成^A, 立石大^I,
田中真伸^J, 手嶋政廣^{A, K}, 寺内健太^B, 寺田幸功^I, 門叶冬樹^H, 中森健之^H, 西嶋恭司^G, 野上優人^F, 野崎誠也^B,
野田浩司^A, Daniel Mazin^{A, K}, Daniela Hadasch^A, 山本常夏^L, 吉田龍生^F,
他 CTA-Japan consortium

東大宇宙線研^A, 京大理^B, 名大ISEE^C, 名大KMIP^D, 徳島大理工^E, 茨城大理^F, 東海大理^G, 山形大理^H,
埼玉大理^I, KEK素核研^J, マックスプランク物理^K, 甲南大理工^L

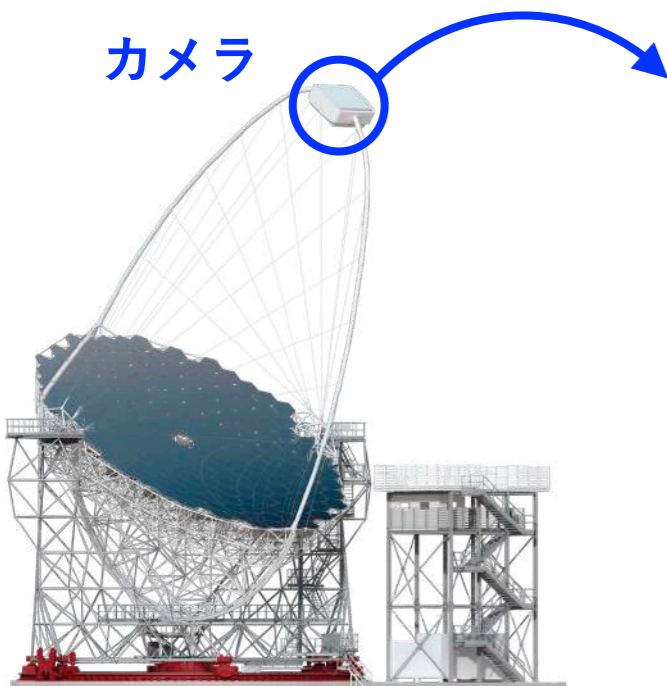
日本物理学会 第77回年次大会 2022/3/15



• LSTによるガンマ線の観測

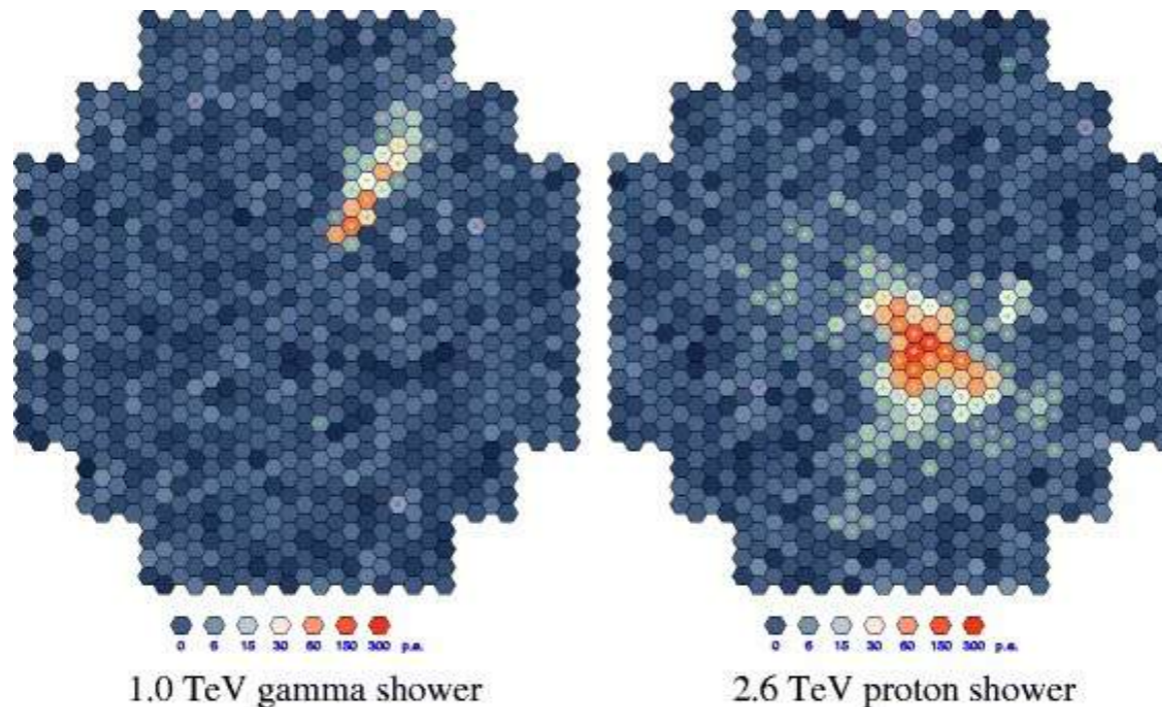
- ガンマ線が地球大気との相互する際に生じるチェレンコフ光をPMT製カメラで撮像
- イメージのパラメータ化によりエネルギー/到来方向を推定
 - ✓ チェレンコフ光は宇宙線陽子等のハドロンからも生じ, それらが背景雑音となる
 - LSTの感度はガンマ線とハドロンの弁別性能に依存
- ◆ 深層学習によるガンマ線とハドロンの弁別
 - ✓ パラメータ化する手法と比べて弁別性能が向上する可能性が示唆 (H. Abe Master Thesis, 2021)
 - ピクセルの細分化によってイメージの詳細が明らかになると深層学習による弁別性能が向上すると期待

カメラ



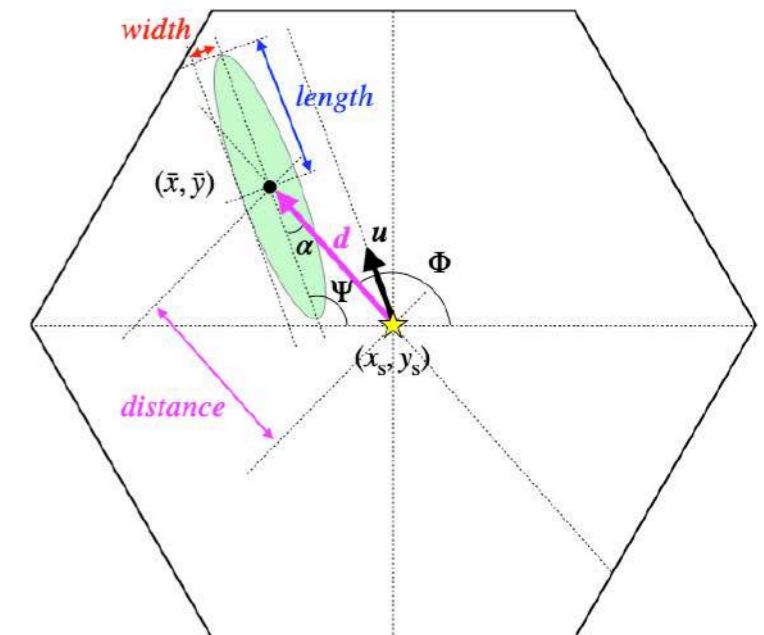
CTA LST

チェレンコフ光をカメラで撮像



©H.Völk et al (2009)

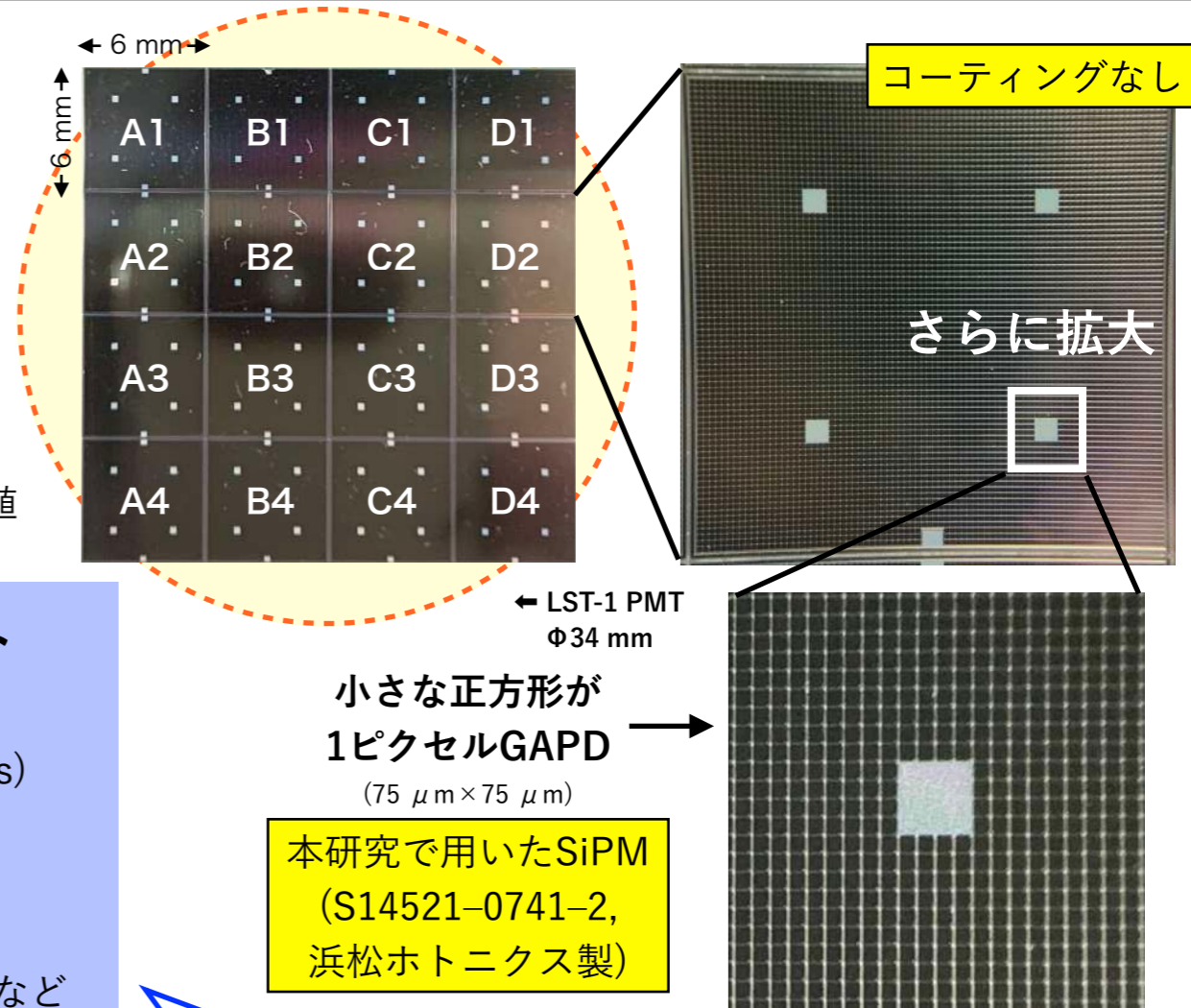
イメージをパラメータ化



カメラ面

• Silicon Photo-Multiplier (SiPM)

- 多数のガイガーモードアバランシェフォトダイオード (GAPD) で構成されている
- 光子検出機構
 - ✓ 光電効果で生じた光電子がアバランシェ増倍によって増倍される
 - ▶ 光電子と素子構成原子との衝突電離によるキャリアの雪崩増殖



SiPMのメリット

- ✓ 量子効率がPMTの約1.5倍
→ 約60% @300-500 nm
- ✓ 動作電圧が低い
→ 約40 V
- ✓ 経年劣化が少ない

など

SiPMのデメリット

- ✓ 信号のパルス幅が大きい
→ 数100 ns (PMT~3 ns)
- ✓ OCTの発生確率が高い
- ✓ 温度に強く依存する

など

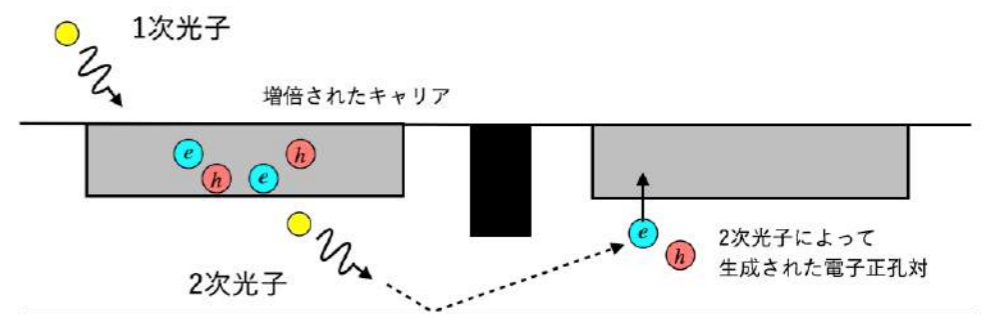
PMTとSiPMの定量的な性能の比較が重要

パルス幅やOCT, 温度依存性などのSiPM特有のデメリットがどのくらい影響するかを定量的に評価する

アバランシェ増倍で生成された電子が制動放射によって2次光子を生成
→ 2次光子が新たな電子/正孔対を作る

オプティカルクロストーク (OCT)

- 光検出と同時にSiPM自体が赤外線光子を発生させる現象
- 1光子を複数光電子と誤計測してしまう



基礎特性評価

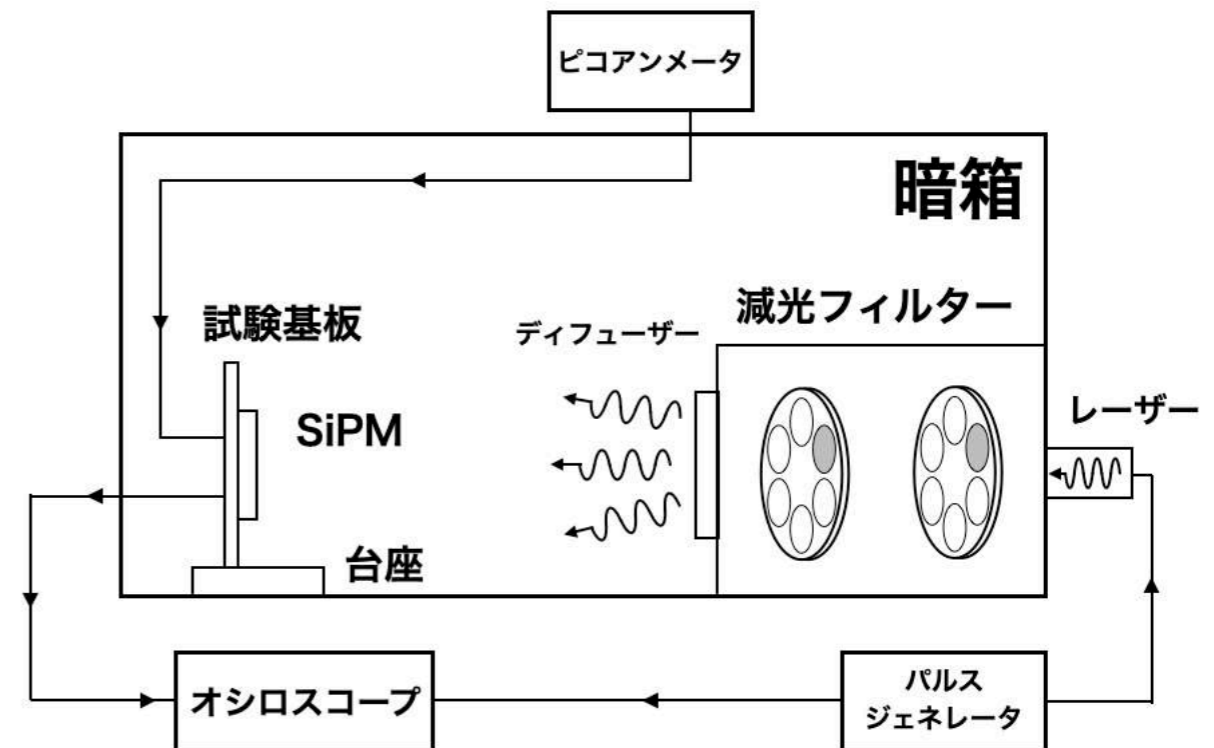
- ゲインと降伏電圧
- 信号の波形整形
- オプティカルクロストークの発生確率
- 電荷分解能
 - ✓ 1光子検出時の揺らぎとして定義
 - ✓ 検出光子数の推定精度に関わる重要な測定量

前回学会で発表

- ダークカウントレート
 - ✓ SiPM起因で発生する1光子相当の信号
 - ✓ 観測時にノイズとなる夜光の頻度と比較するため
- 各基礎特性の温度依存性
 - ✓ 温度補償回路について議論するため

信号処理回路開発のための測定

- 信号合成
 - ✓ SiPMの素子サイズが小さすぎる (PMTの1/16倍)
 - ➔ ピクセルを細分化しても, 全ピクセルのデータを記録するとデータ量が膨大となる
 - ➔ 複数のピクセルの信号を合成する必要がある
- 温度補償
 - ✓ ゲインは温度に強い依存性を持つ
 - ➔ 検出光子数の推定精度悪化に繋がる
 - ➔ 温度補償回路を用いてゲインの補正を行うため



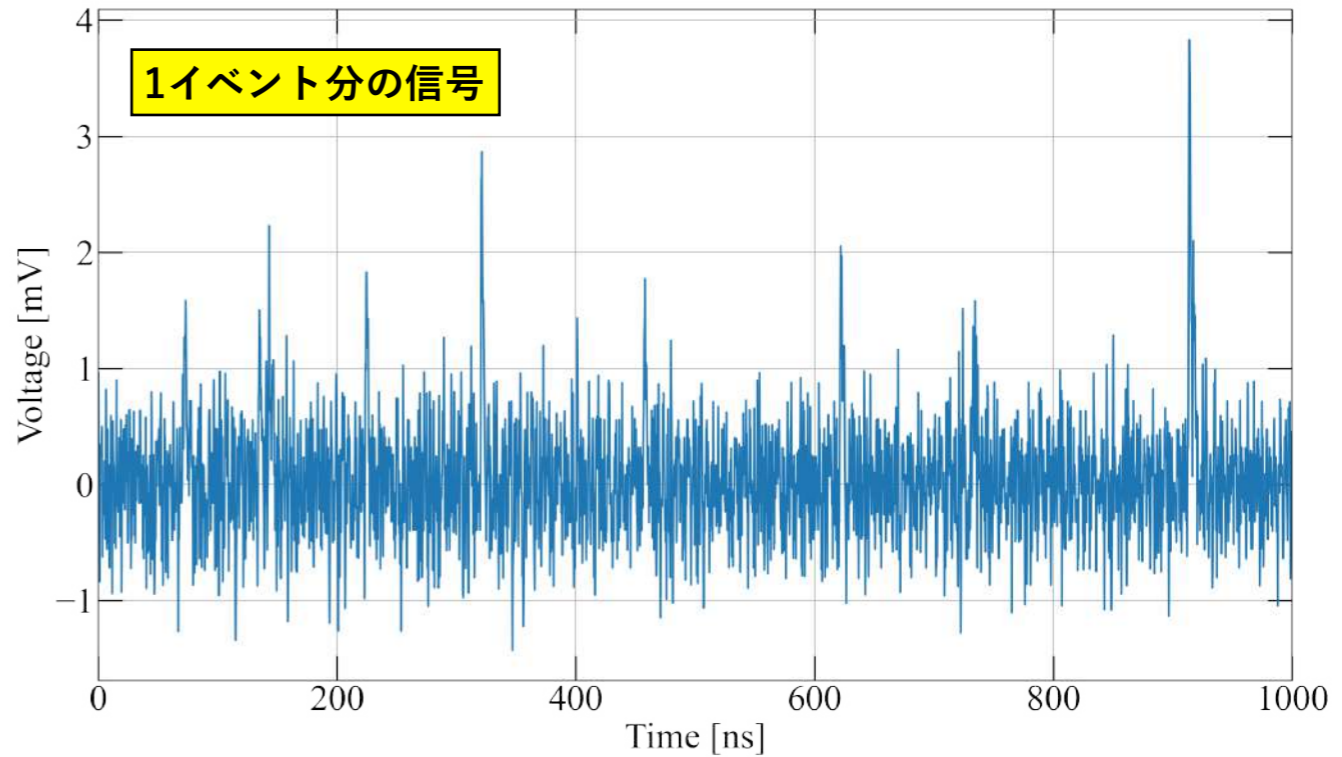
• ダークカウント

- 発生原理

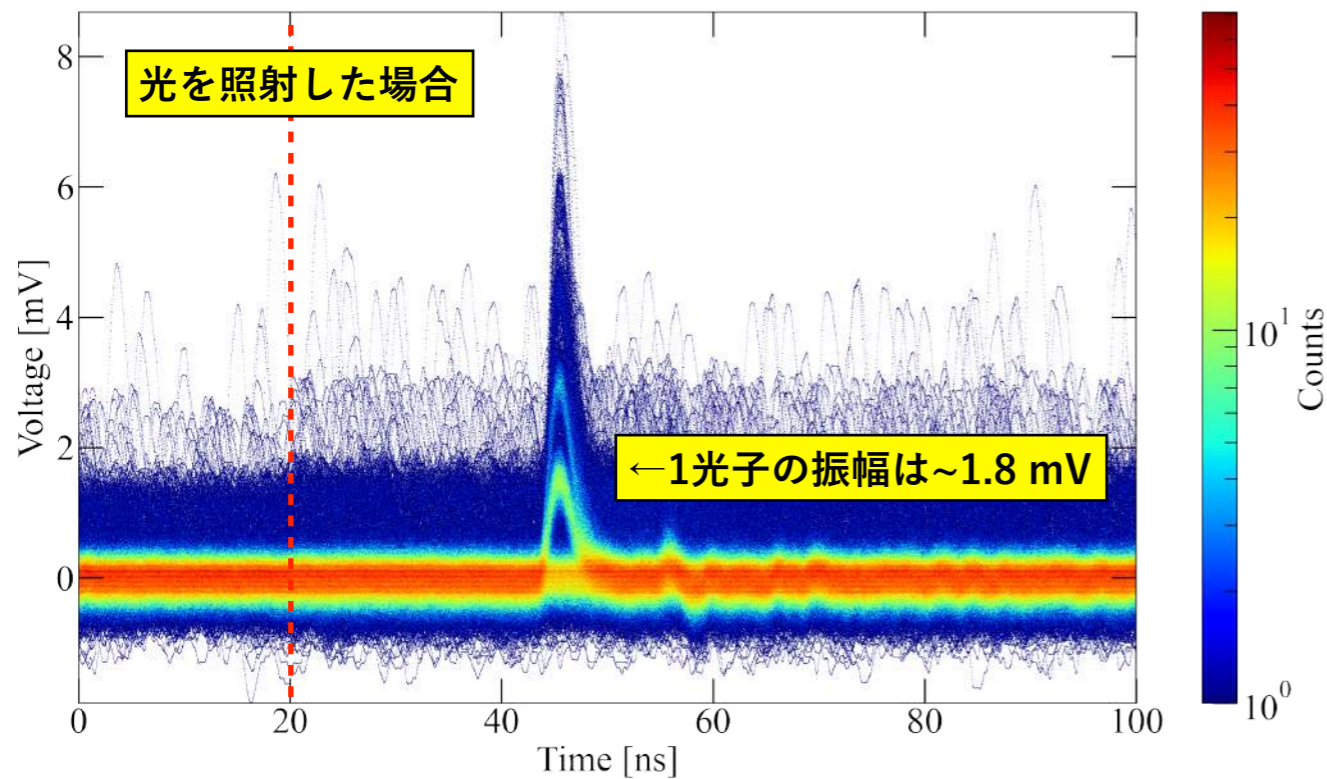
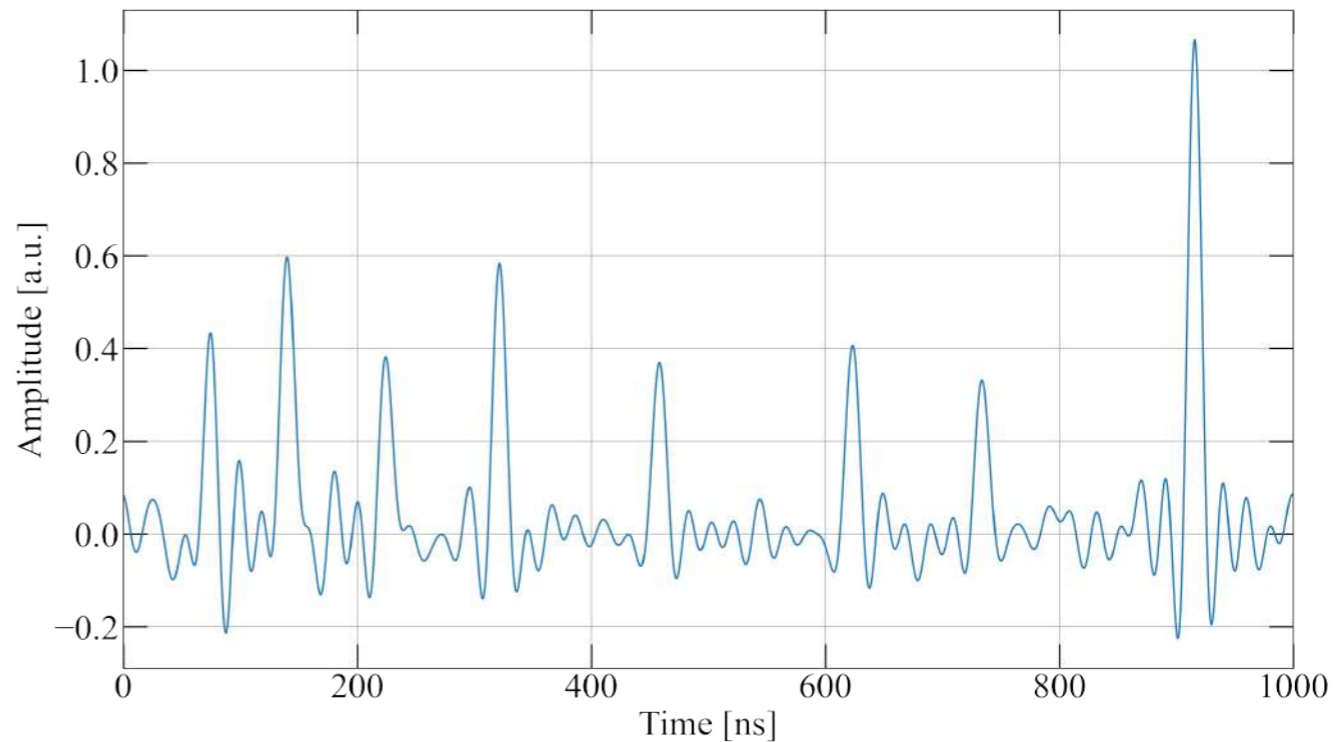
- ✓ 熱励起された電子のアバランシェ増倍によって発生

- 測定と解析

- ✓ 暗箱内で光を照射させずに測定
(温度依存性は恒温槽を用いて測定)
- ✓ デジタルローパスフィルタで高周波成分除去
 - ➔ パルスを計測しやすくするため
- ✓ 閾値電圧を超えた計測数を測定時間で割って周波数に変換
 - ➔ **第2変曲点での周波数をDCRとして採用**

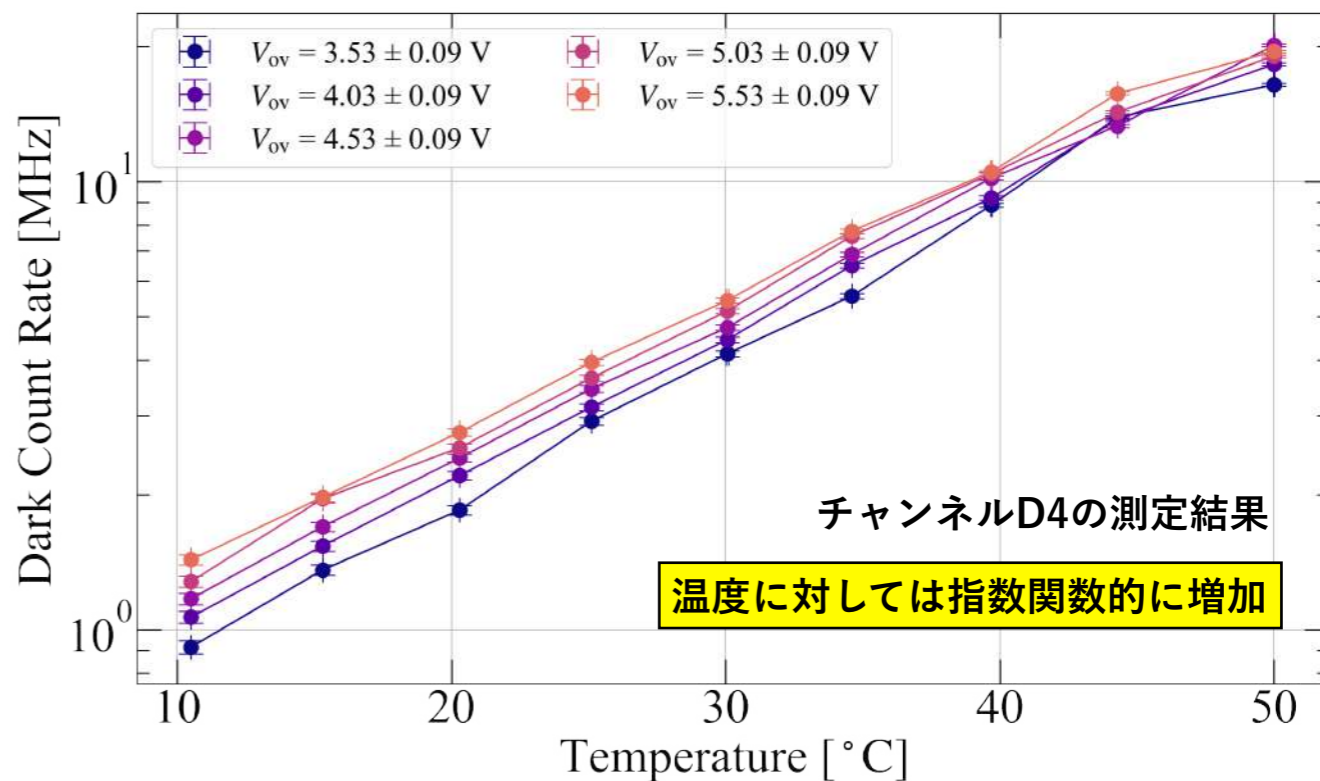
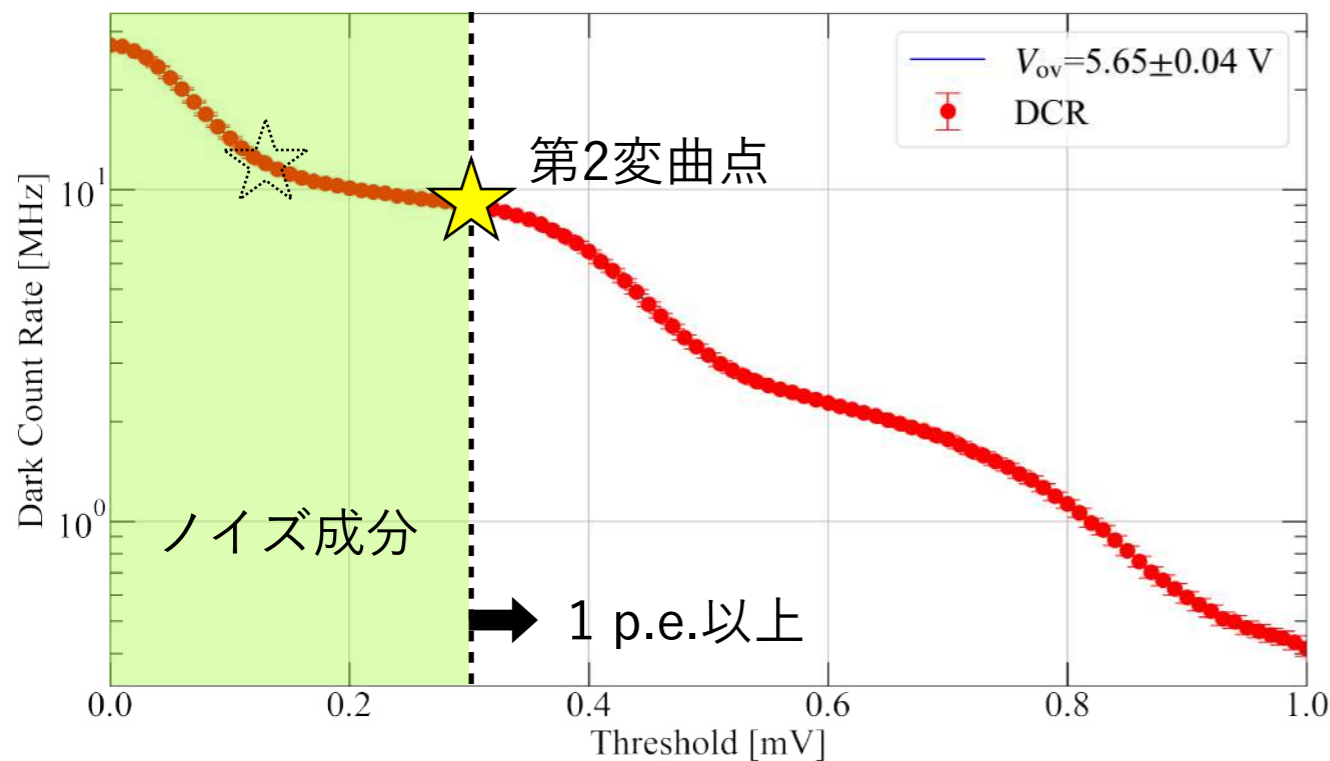
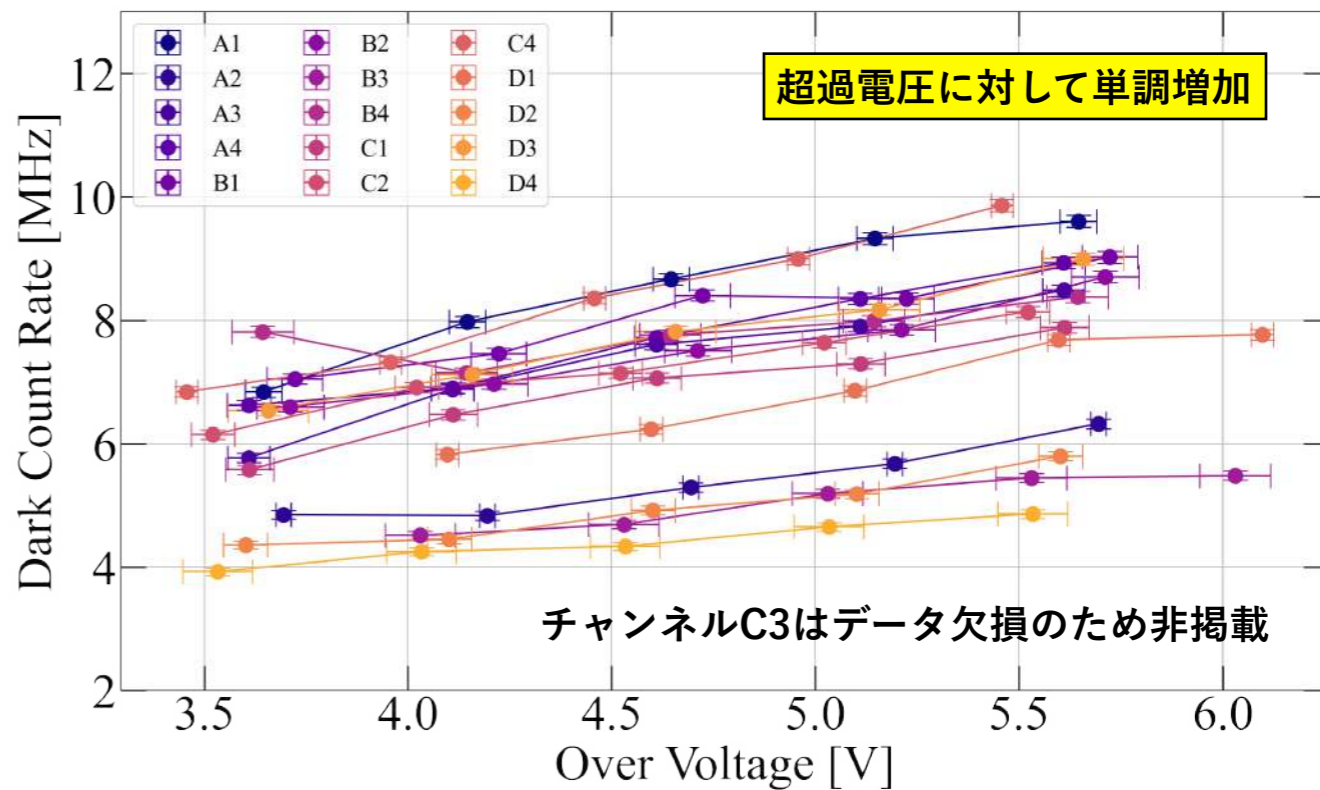


50 MHz以上の高周波成分除去後



測定結果

- 閾値に対して階段状の構造を取る
 - ✓ SiPMが検出光子数に対応した振幅を出力するため
- 超過電圧に対して単調増加
 - ✓ チャンネル毎のばらつきが大きい
 - ✓ 室温 (25°C) でのDCRは最大で~10 MHz (PMT: 数kHz)
 - c.f.) 夜光はPMT換算で約20 MHz/channel. 実際はこれの数倍.
- 温度に対して指数関数的に増加
 - ✓ 数MHz程度に抑える → [温度を低く保つ必要あり](#)

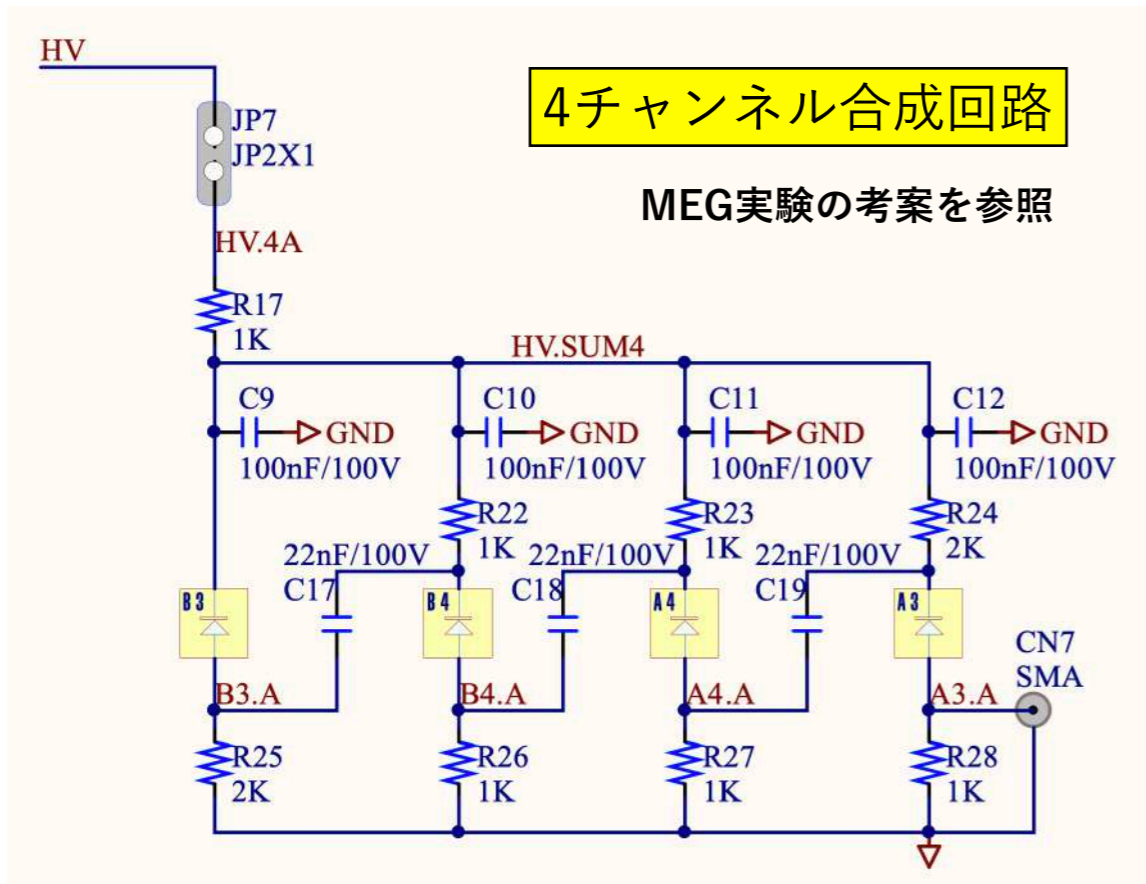


• 信号合成

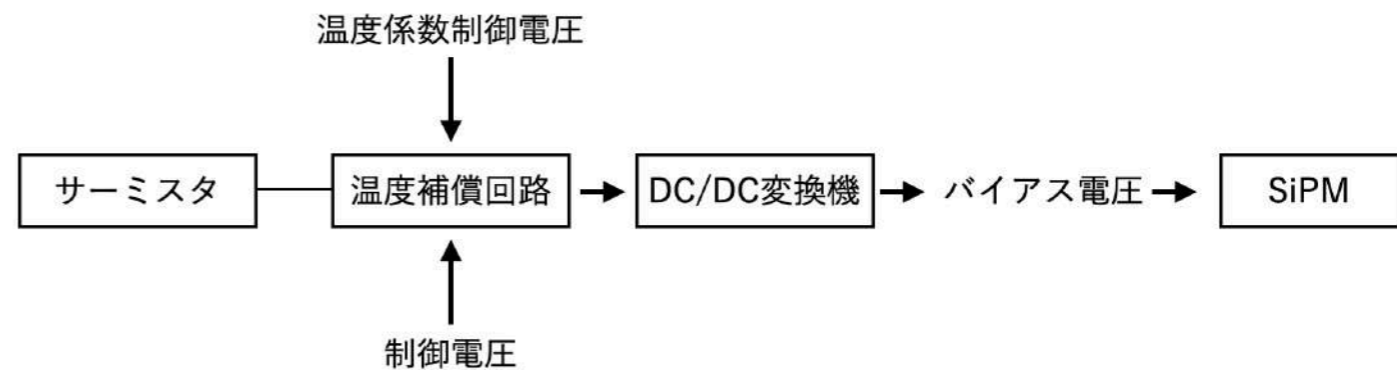
- SiPM 1チャンネルの面積はPMTの1/16
 - ✓ LSTカメラのピクセル数を16倍にできない (e.g. データ量)
- 回路図
 - ✓ 印加電圧は低いまま負荷容量を減らす回路 (MEG実験の考案を参照)
 - ➔ 電気容量を合成することなく高周波信号のみを合成

• 温度補償

- 温度変化に対するゲインの変動を抑えるため
 - ✓ 1チャンネルに対する1光子あたりの振幅が揺らぐ
 - ➔ 検出光子数の推定精度が悪化
- ゲインの電圧依存性と温度依存性
 - ✓ 超過電圧が高くなると大きくなる
 - ✓ 温度を上げると下がる



サーミスタによって温度が高くなったときに印加電圧を高くすればゲインを一定に保てる



電荷分解能

2チャンネル合成

- ✓ A1: 0.34 ± 0.02 p.e.
- ✓ A1+B1: 0.30 ± 0.02 p.e. (-12%)
- ✓ A2+B2: 0.36 ± 0.02 p.e. (+6%)

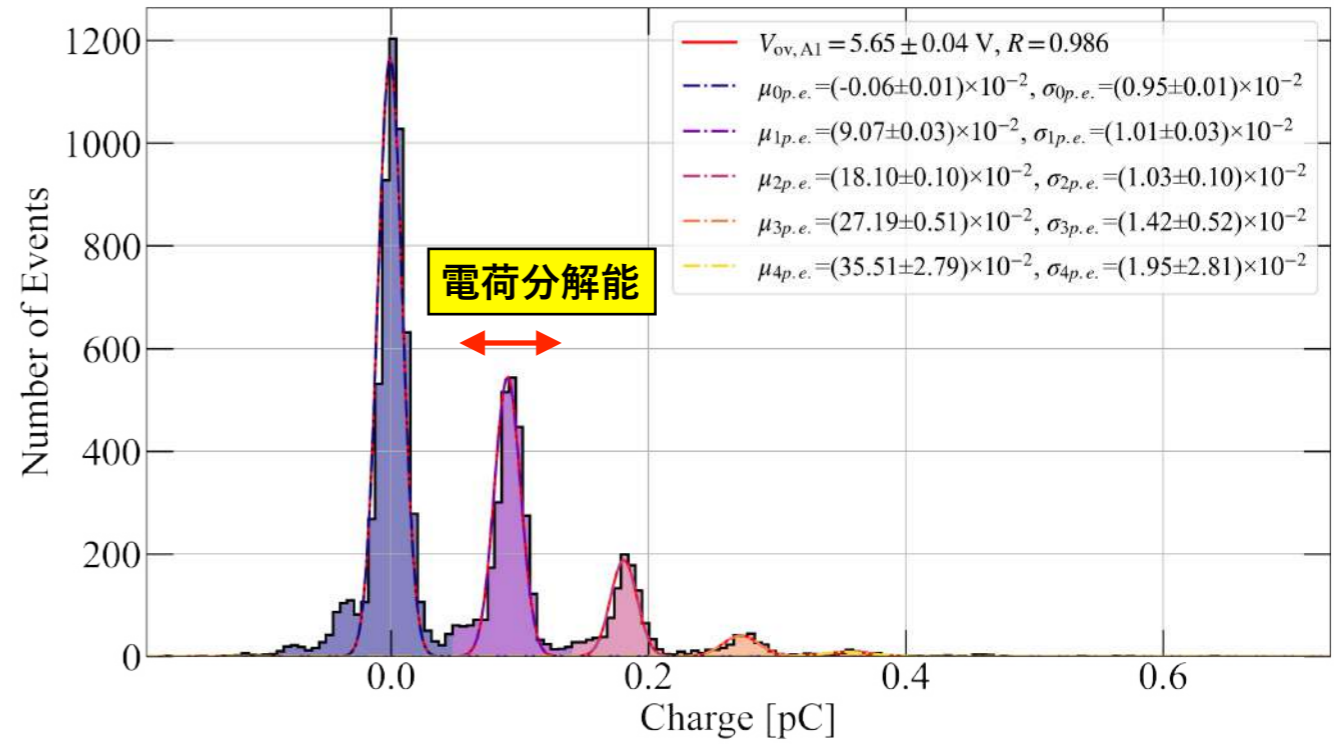
チャンネルXとYの合成を
X+Yで表している

合成チャンネルの
ゲインの不一致

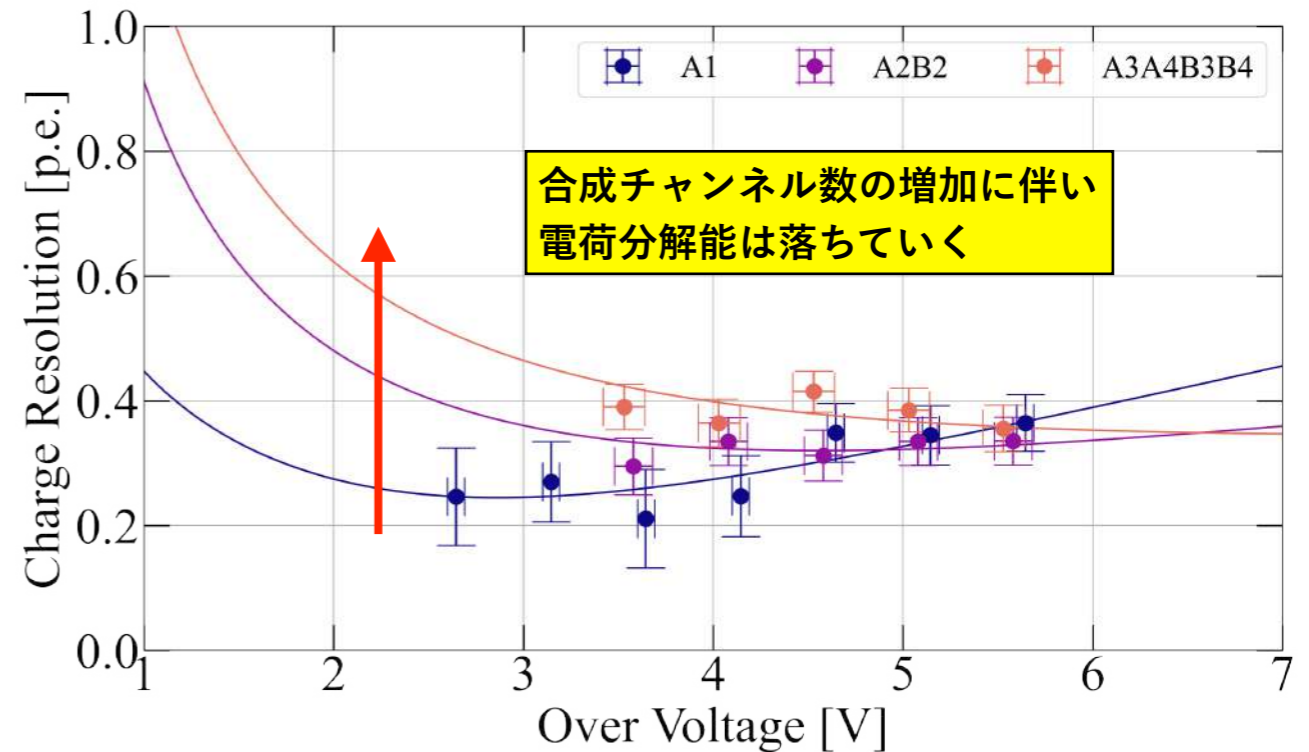
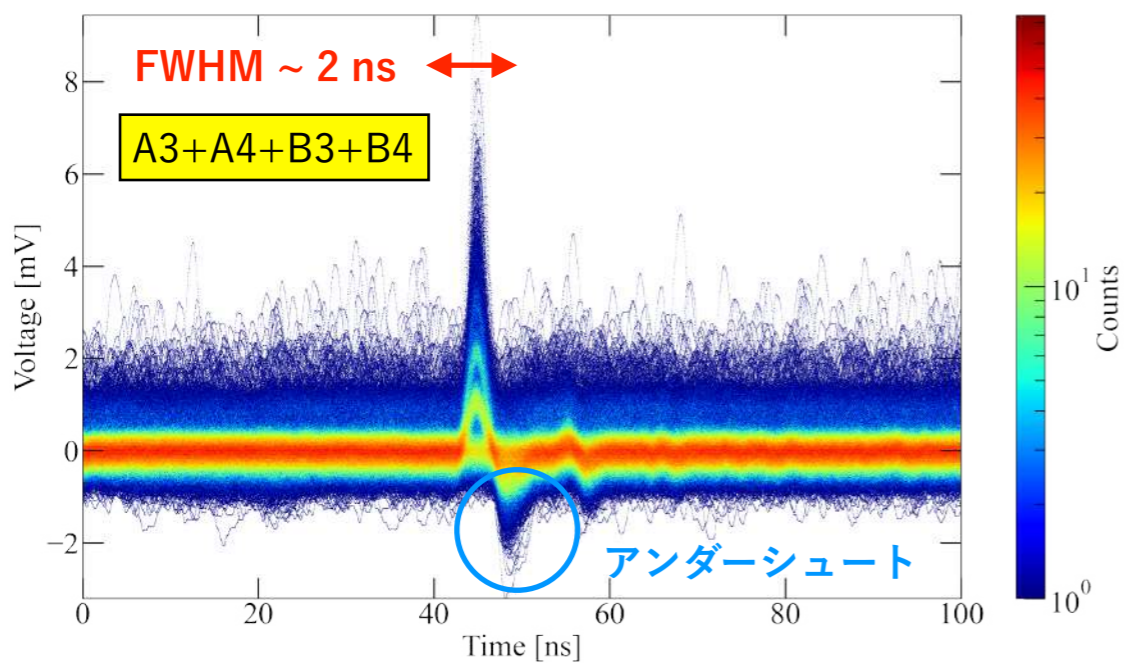
4チャンネル合成

- ✓ A3+A4+B3+B4: 0.40 ± 0.02 p.e. (+18%)
- ✓ C3+C4+D3+D4: 0.37 ± 0.02 p.e. (+9%)

4チャンネル合成での電荷分解能は最大で1チャンネル読み出しに
対して**18%落ちた**がPMTの平均値0.47 p.e.よりも**15%向上した**



$$F^2 = 1 + (\sigma/\mu)_{\text{PMT}}^2 < 1.22 \rightarrow (\sigma/\mu)_{\text{PMT}} < 0.47$$



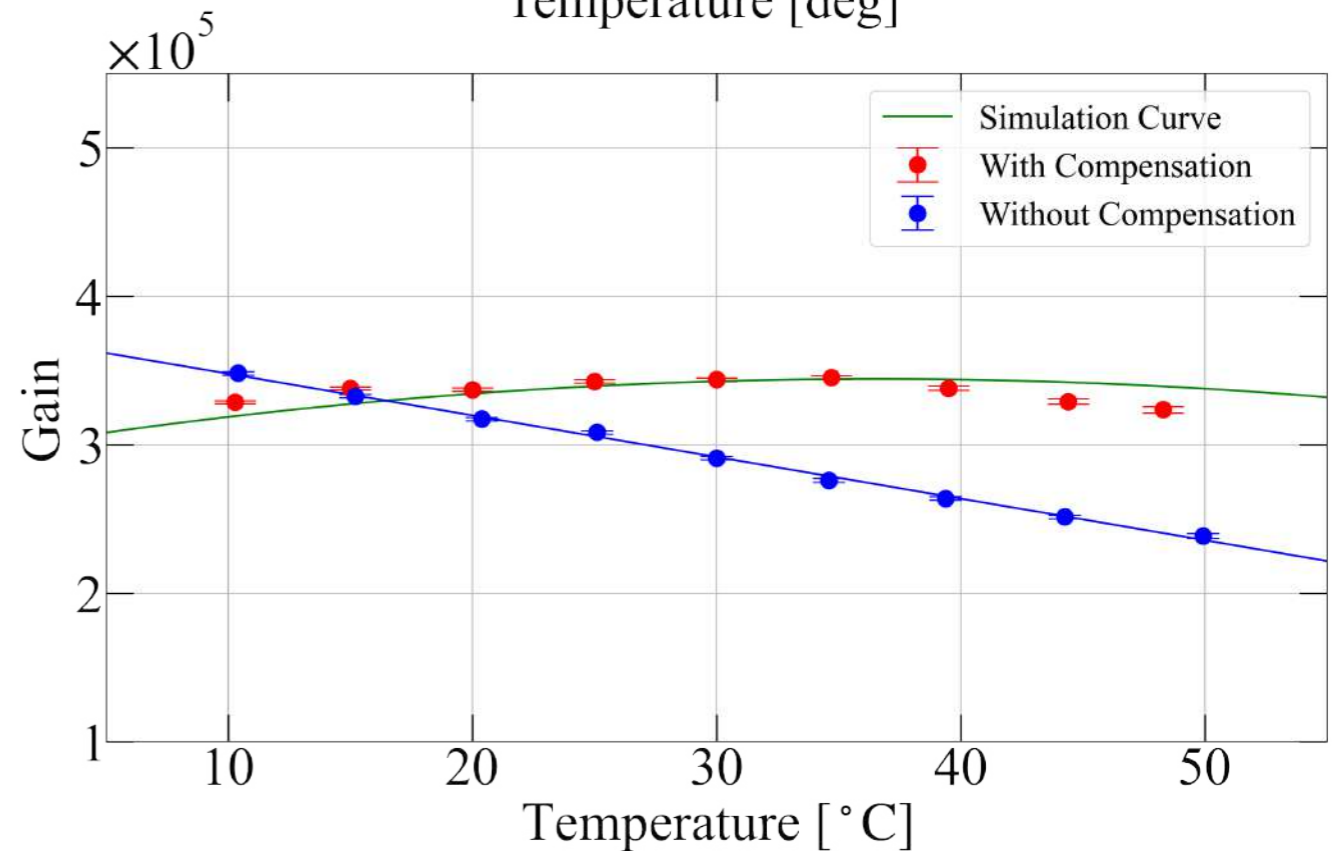
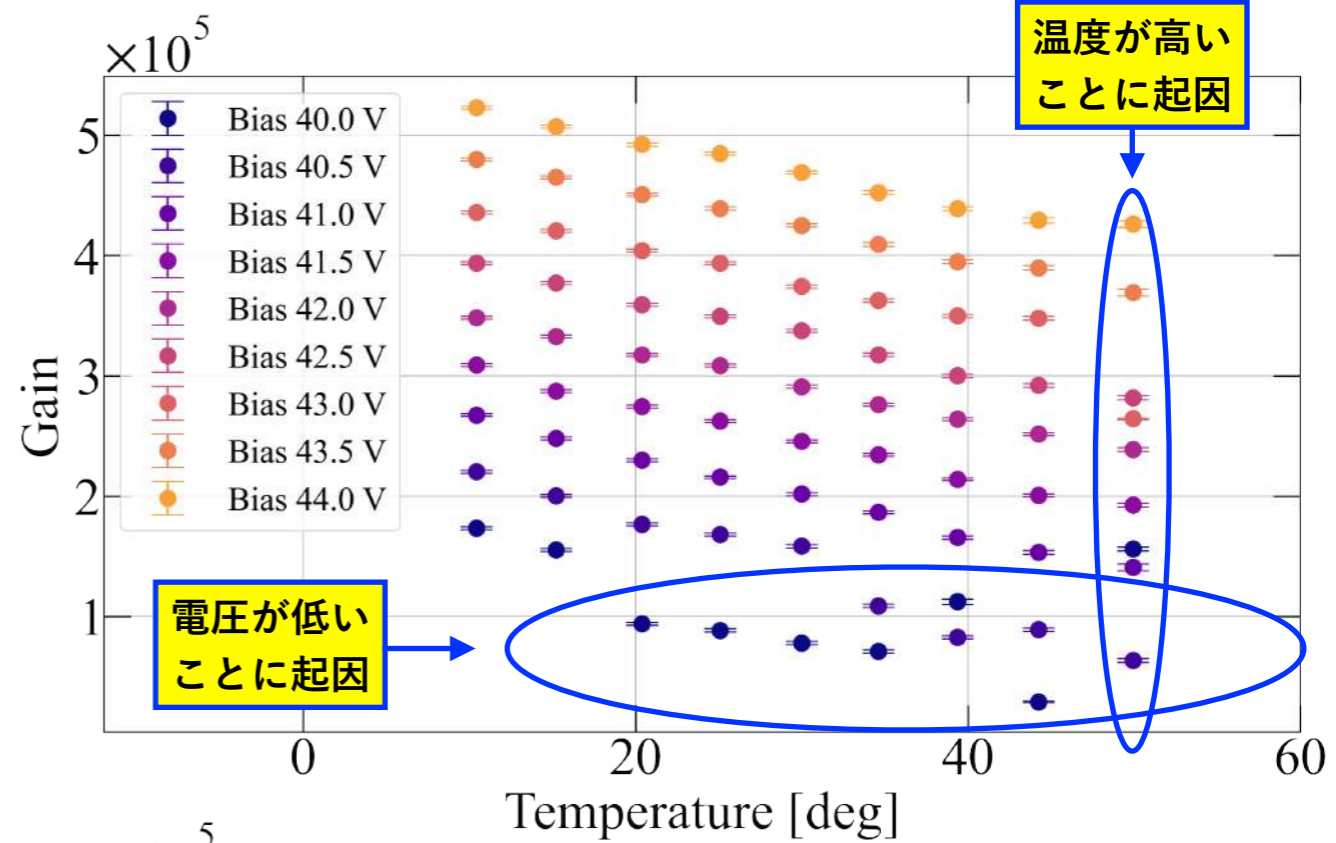
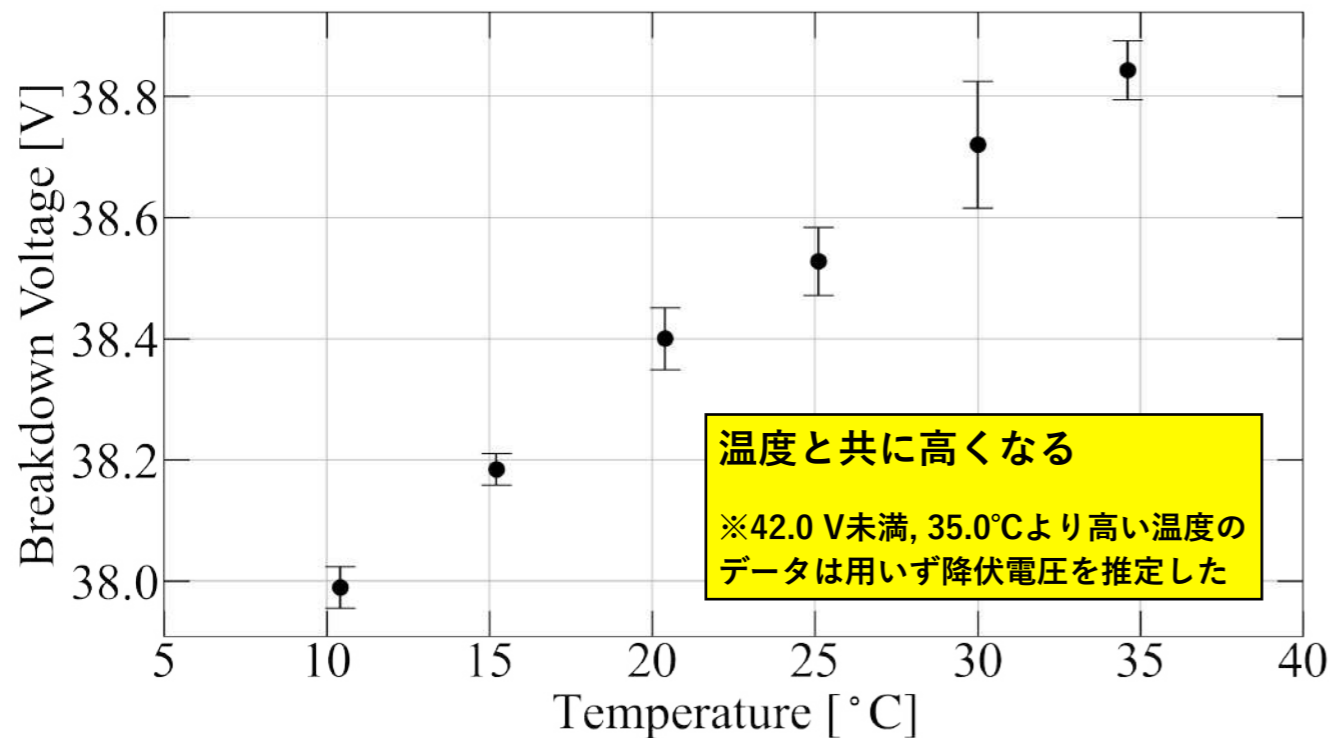
温度補償回路の設定

- 1°Cの温度変化で何V変化させれば良いか？
 - ✓ ゲインの温度依存性の測定より -0.90%/°C
 - ✓ ゲインの印加電圧依存性より +19.8%/V

$$\frac{0.90\% / ^\circ\text{C}}{19.8\% / \text{V}} \sim 0.045 \text{ V}/^\circ\text{C}$$

- 温度補償回路の外装で 25-35°Cにおけるゲインは+0.08%/°Cに抑えることができた
- モデリング: 測定結果におおよそ一致

$$G(V, T) = (g_0 T + g_1) \left\{ g_2 (V_0 T + T_1) + g_3 \right\}$$



基礎特性評価

- DCR

- ✓ 超過電圧に対して単調増加: 最大 **~10 MHz** @ 超過電圧5.5 V
- ✓ SiPMにおける夜光到来頻度 (~20 MHz) より2倍低い

- 温度依存性

- ✓ ゲインは温度上昇に対して単調減少
 - ➔ 1°Cの温度変化で **~0.92%減少**
 - ➔ **0.046 V/°C**の温度補償でゲインが一定に保てる

モジュール開発

- 信号合成

- ✓ 2チャンネル合成時: ~0.37 p.e. @超過電圧~4.7 V
- ✓ 4チャンネル合成時: **~0.40 p.e.** @超過電圧~4.5 V
- ★ LST-1のPMTでは $\sigma/\mu \sim 0.47$ p.e.

- 温度補償

- ✓ 25.0–35.0°Cの温度におけるゲインは **0.08%/°C**に抑えられた

LSTカメラのSiPM化の現状

	PMT	SiPM+PZC	
動作電圧	~1000 V	~38.5 V	○
ゲイン	4×10^4	2×10^4	○
パルス幅	~3 ns	~2 ns	○
OCT	—	$\leq 13\%$	○
電荷分解能	~0.47 p.e.	~0.30 p.e. (4ch sumで0.40 p.e.)	○
DCR/NSB	10 kHz/300 MHz	10 MHz/20 MHz	△
ゲインの温度補償	0.1–0.2%/°C	~0.08%/°C	○

- OCTへの対策

- ✓ 素子の改良 or 運用電圧の調整により **数%に抑えたい**

- DCRへの対策

- ✓ カメラの空冷/水冷による冷却強化で **数MHzに抑えたい**

今後の展望

- 線形性とダイナミックレンジ
 - ✓ 明るいチェレンコフ光を観測する際はGAPD 1つに複数光子が入射する確率が高くなる → 何p.e.が限界か?
- 系統誤差の評価