

CTA報告144：CTA 小口径望遠鏡用焦点面カメラの統合試験

中村 裕樹、奥村 暁、片桐 秀明^A、佐々井 義矩、Anatolii Zenin、Justus Zorn^B、
田島 宏康、Jim Hinton^B、Richard White^B、三浦 智佳^A、他 CTA Consortium

名大ISEE、茨城大理^A、マックス・プランク核物理^B

日本物理学会、信州大学、2018/09/16

Cherenkov Telescope Array (CTA)



大口径望遠鏡 (LST)

直径：23 m

エネルギー：20 GeV - 3 TeV

台数：4 (北) + 4 (南)

中口径望遠鏡 (MST)

直径：12 m or 9.6 m

エネルギー：80 GeV - 50 TeV

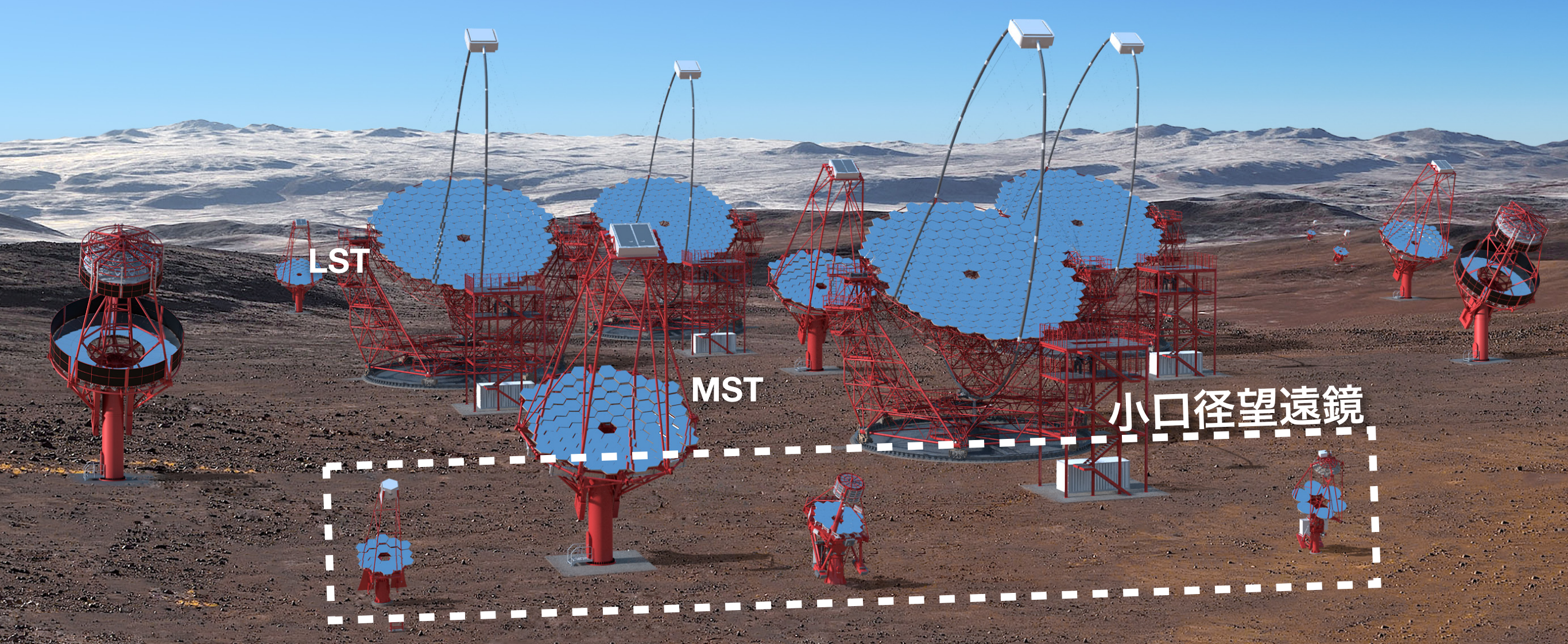
台数：15 (北) + 25 (南)

小口径望遠鏡 (SST)

直径：~ 4 m

エネルギー：1 - 300 TeV

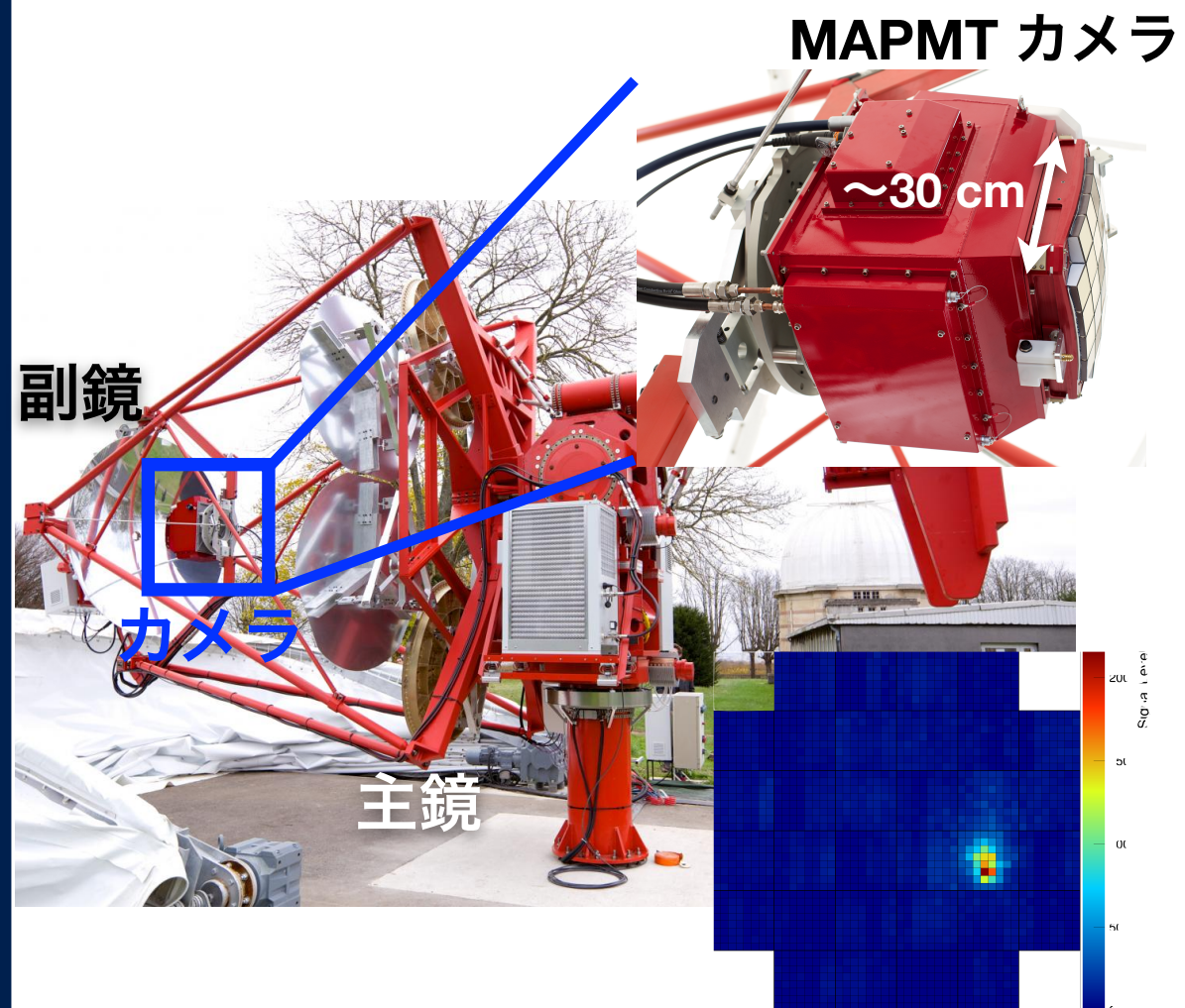
台数：70 (南)



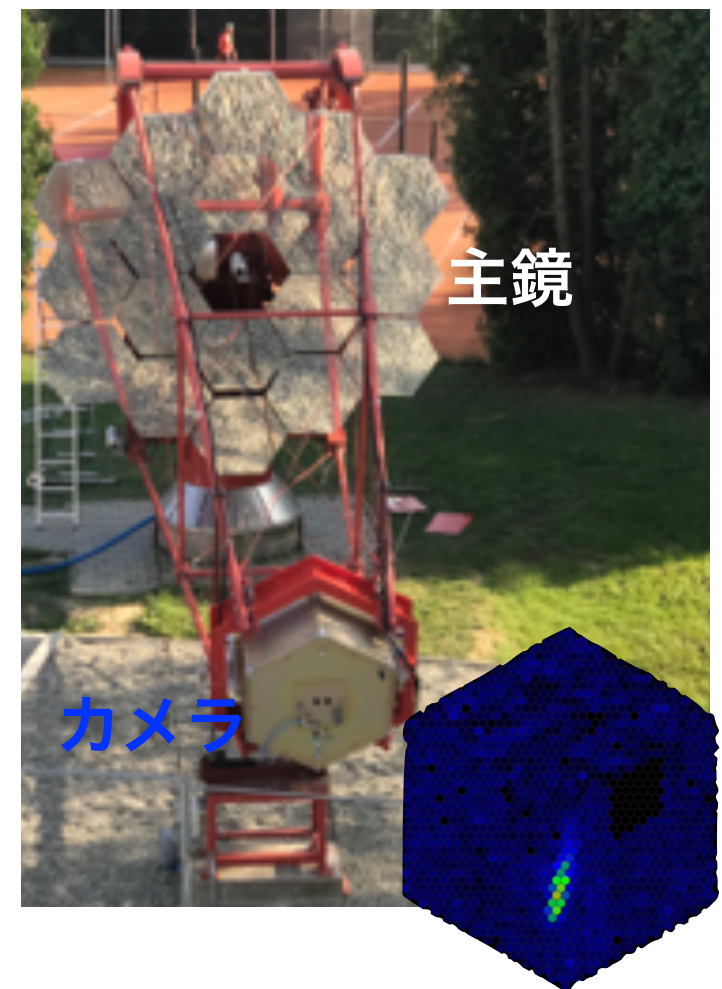
小口径望遠鏡

- » 3 種類の望遠鏡が提案され、それぞれの試作望遠鏡でチェレンコフ光の観測を成功させた
- » 小口径望遠鏡デザインの最終決定に向けて進めている

Schwarzschild-Couder (副鏡あり)

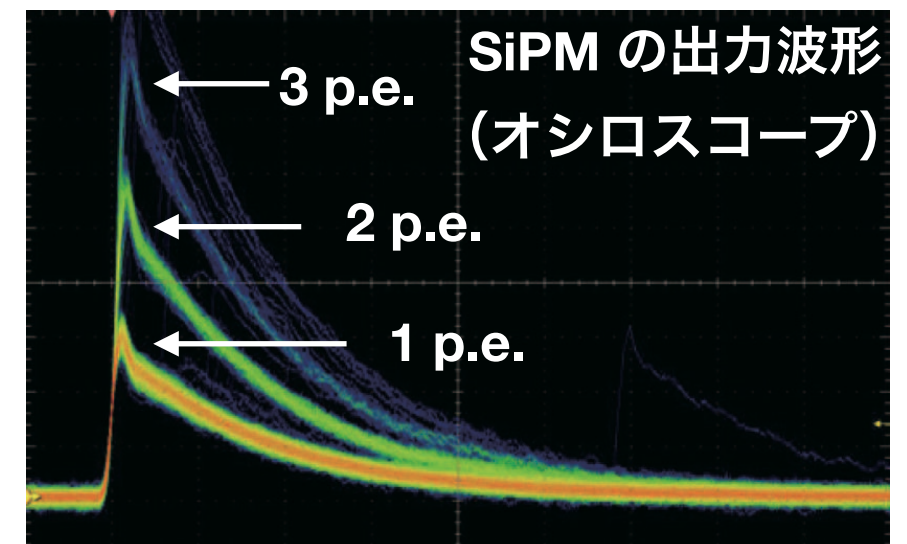
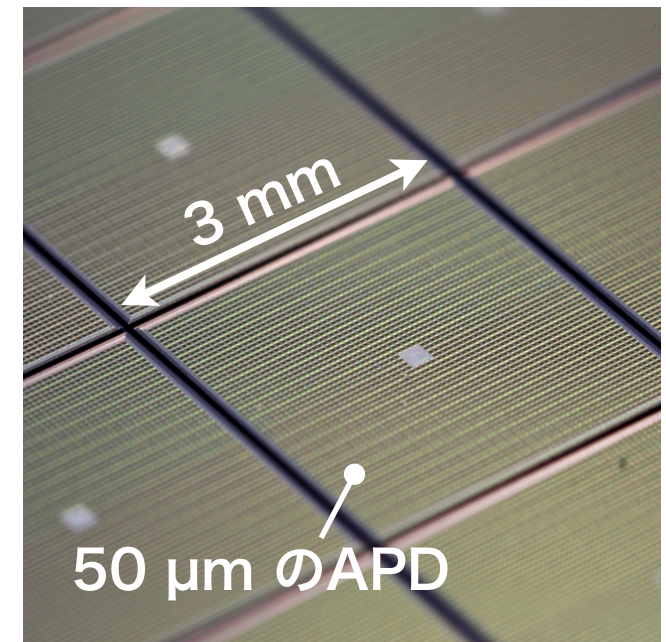


Davies-Cotton



半導体光電子増倍素子 (SiPM)

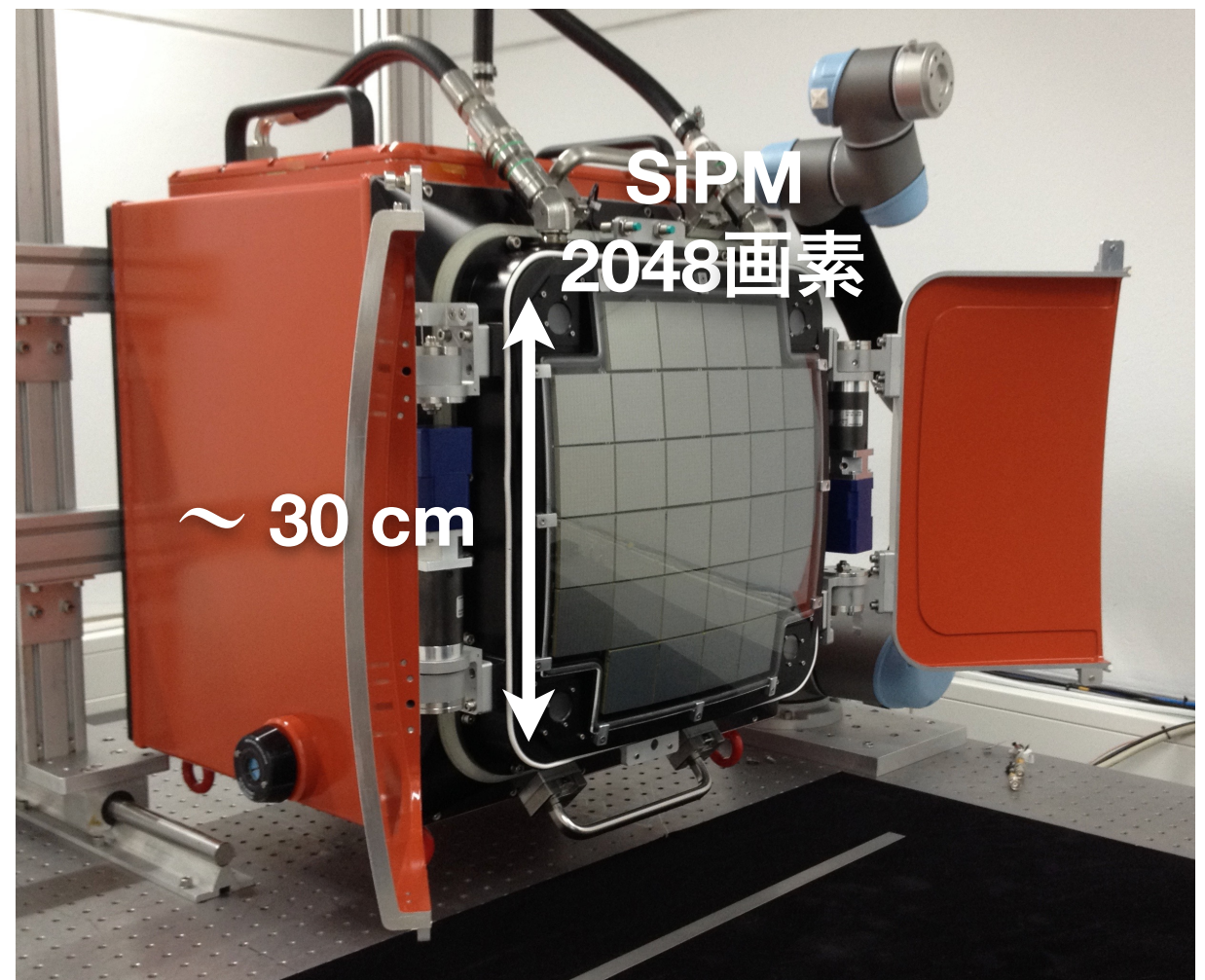
- » MAPMT を用いたカメラでのチェレンコフ光の観測を成功させた (J. Zorn et al. 2018)
- » カメラのアップグレードに向けて光検出器を半導体光電子増倍素子 (SiPM) に置き換えた
 - » 高い光検出効率：40% 以上
 - » 低い動作電圧：～50 V
 - » 夜光の多い状況でも観測可能
 - » オプティカルクロストークの発生
 - » 単一光電子を増幅し、複数光電子として検出してしまう現象
 - » トリガー閾値を下げられない
 - » 電荷分解能を悪化させる
 - » ゲインの温度依存性
 - » ダイナミックレンジ、トリガー閾値を変化させる
 - » 温度をモニターし、補正することが必要



» SiPM に置き換えた焦点面カメラを組み上げ統合試験を進めている

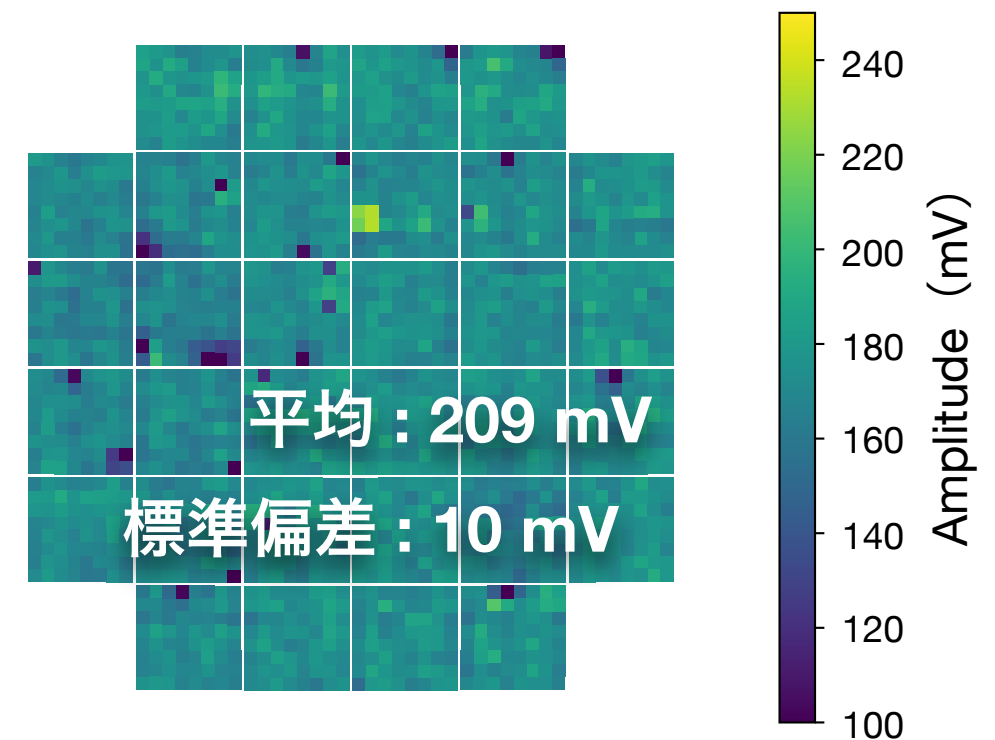
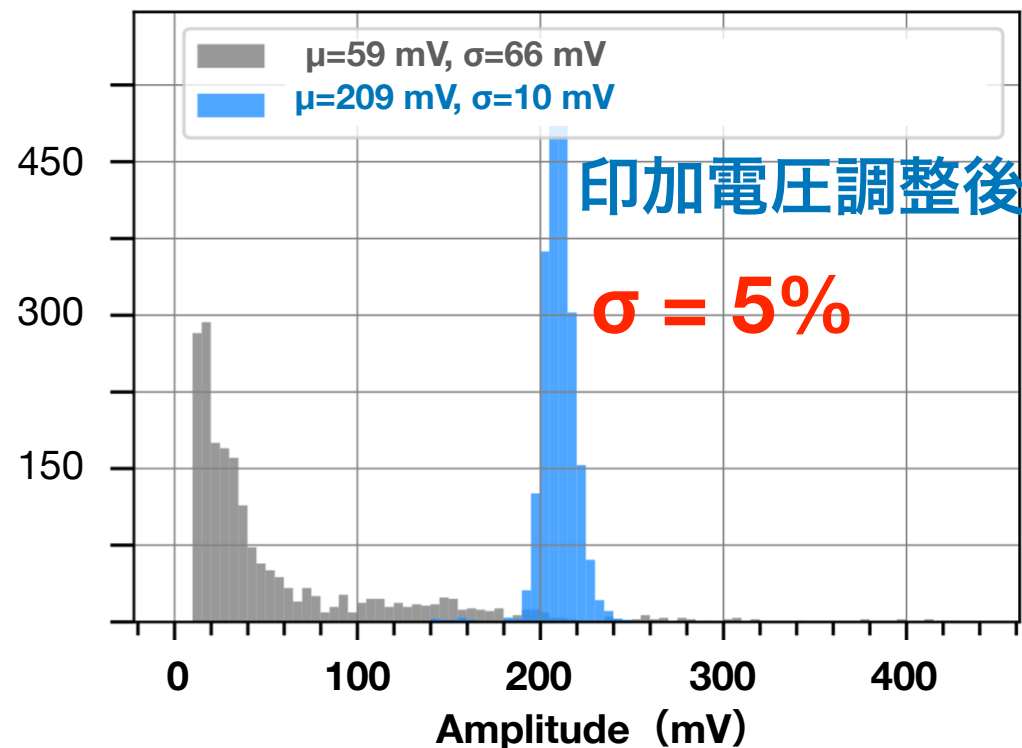
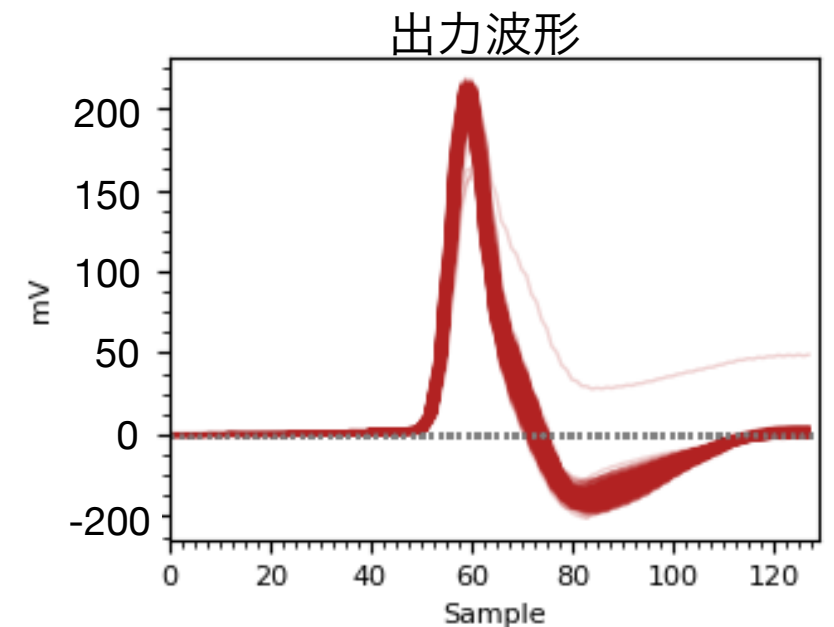
- » ゲインの調整
- » 波高積分値分布の作成と SiPM の特性評価
- » 波高積分値と検出光電子数の関係の決定
- » 電荷分解能
- » トリガー性能
- » 温度依存性
- » モニタリング
 - » 温度
 - SiPM
 - カメラモジュール
 - バックプレーンボード
 - » トリガーレート

» 望遠鏡に搭載しての試験観測を予定している



焦点面カメラの統合試験：ダイナミックレンジの調整

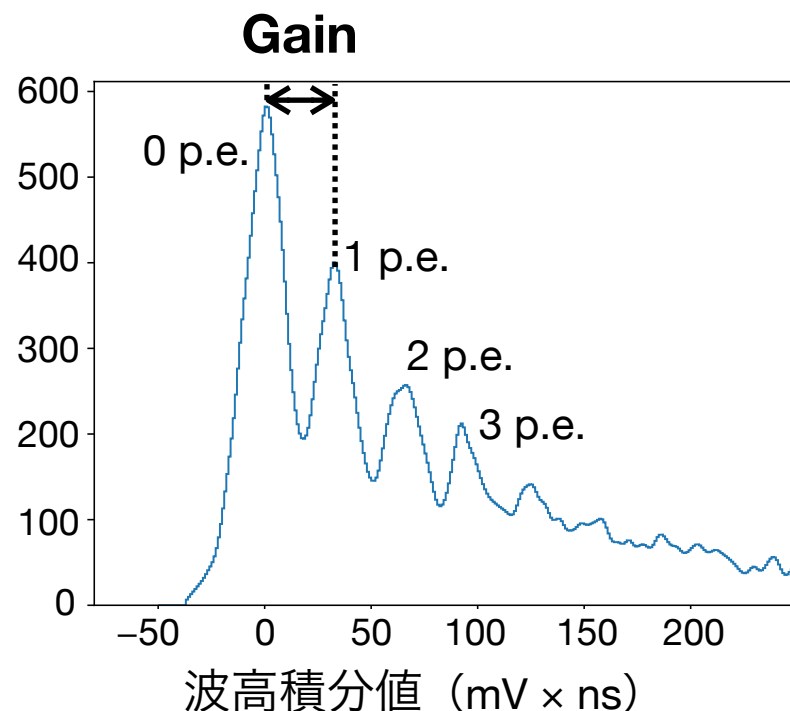
- » ダイナミックレンジを揃えるために各画素のゲインを一致させた
- » 50 p.e. 相当の光を照射し 1 p.e. の波高値を 4 mV に設定した (50 p.e. = 200 mV)
 - » ~500 p.e. まで飽和せず測定可能
 - » ノイズ ~1.3 mV より十分大きい
- » ~5% のばらつきで揃えられる (0.2 mV / 1 p.e.)
- » 1 p.e. でのばらつきは 0.2 mV で全ての画素でノイズより十分大きく 1 p.e. を検出できる



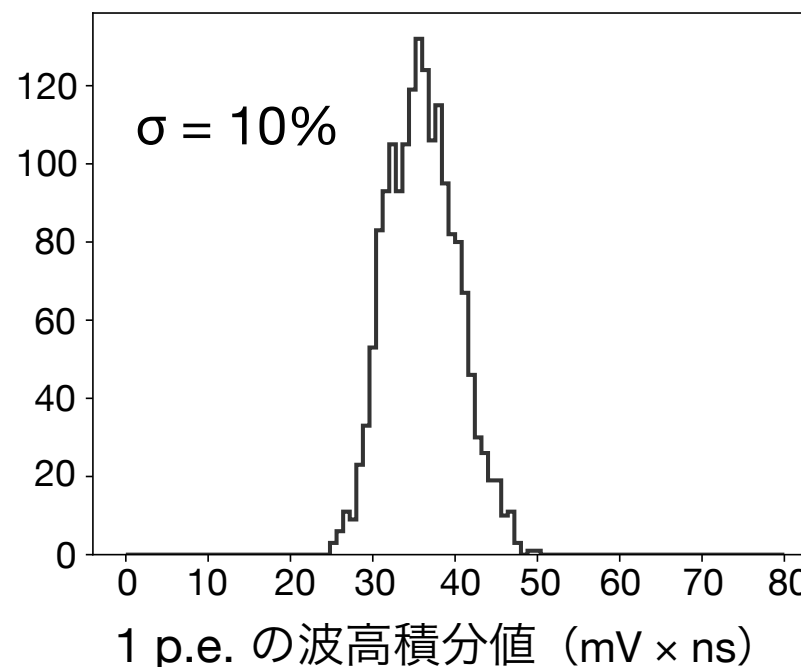
焦点面カメラの統合試験：ゲイン測定

- ≫ チェレンコフ光は数十 ns 程度の幅を持つため、波高の積分値から検出光電子数を決定する
- ≫ 波高積分値の分布に **1 p.e. ごとのピークが見えている**
- ≫ ゲインに比例する 1 光電子の波高積分値から推定した
- ≫ 1 p.e. の分解能は 60% 以下 (4 mV / p.e.)
 - ≫ 1 p.e. の分解能への要求は 200%以下 (ポアソン統計のばらつきを含む)
 - ≫ オプティカルクロストークレート～55% 以下で要求を満たす

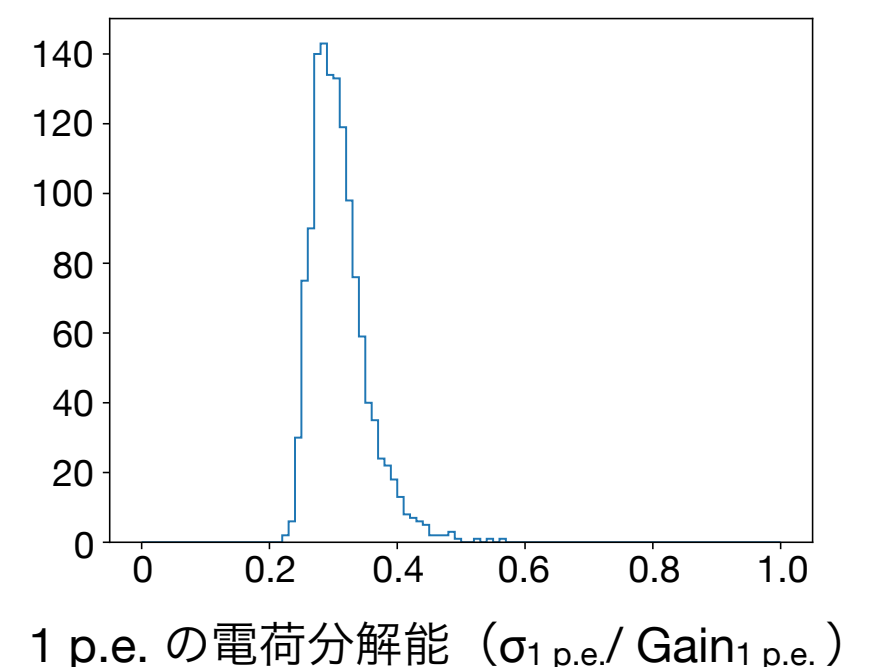
波高積分値の分布 (1 画素)



1 p.e. の波高積分値の分布

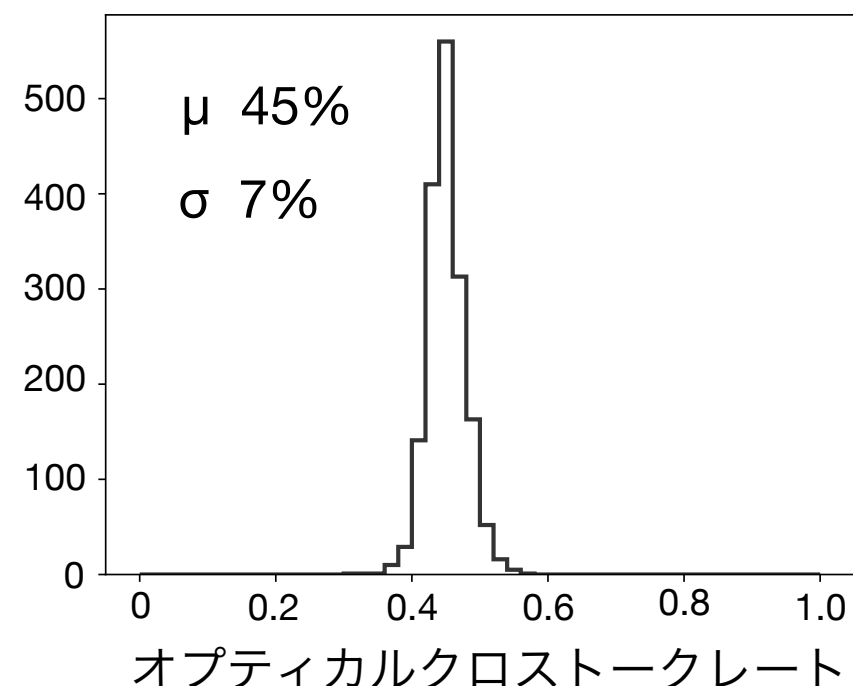
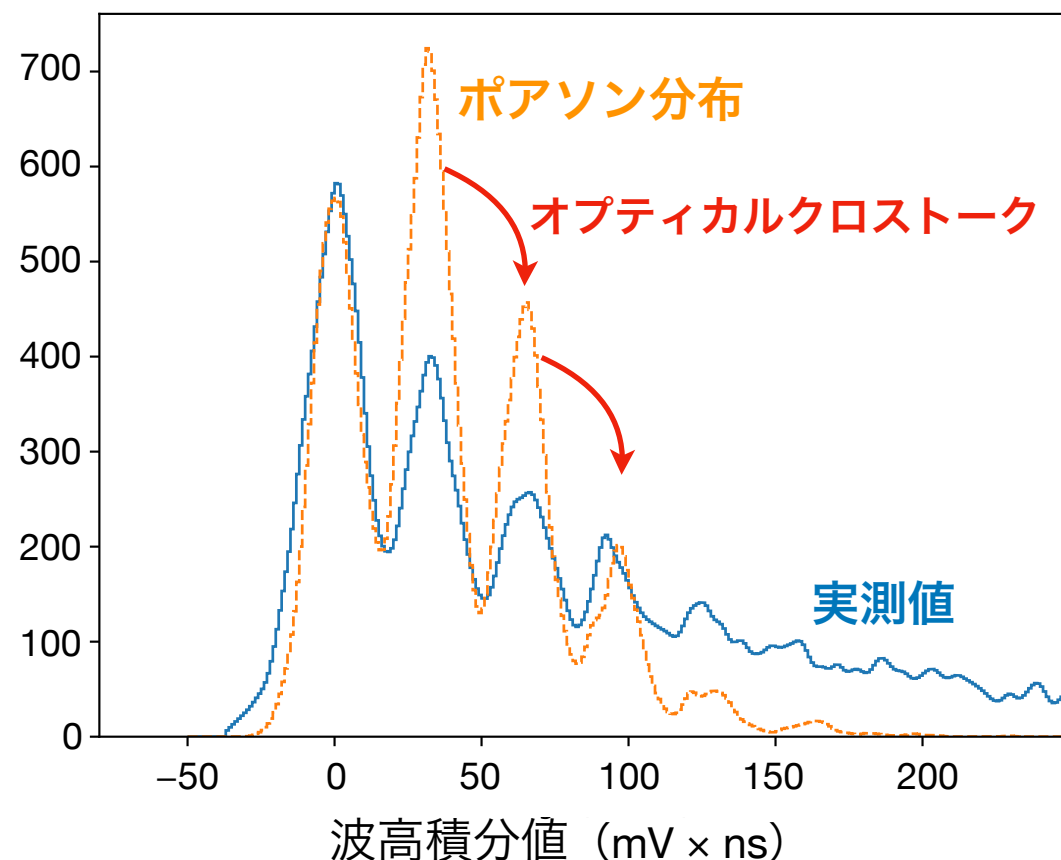


1 p.e. の電荷分解能の分布



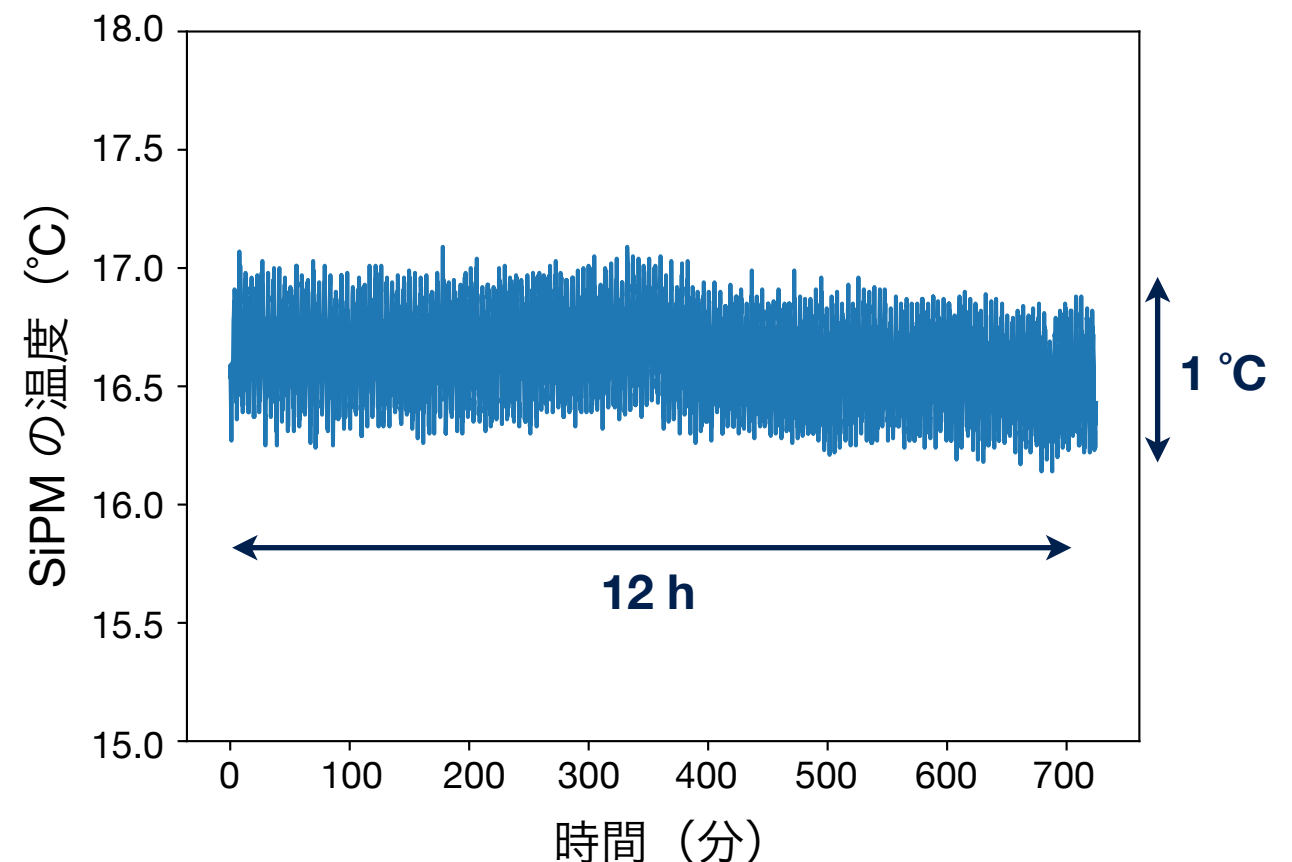
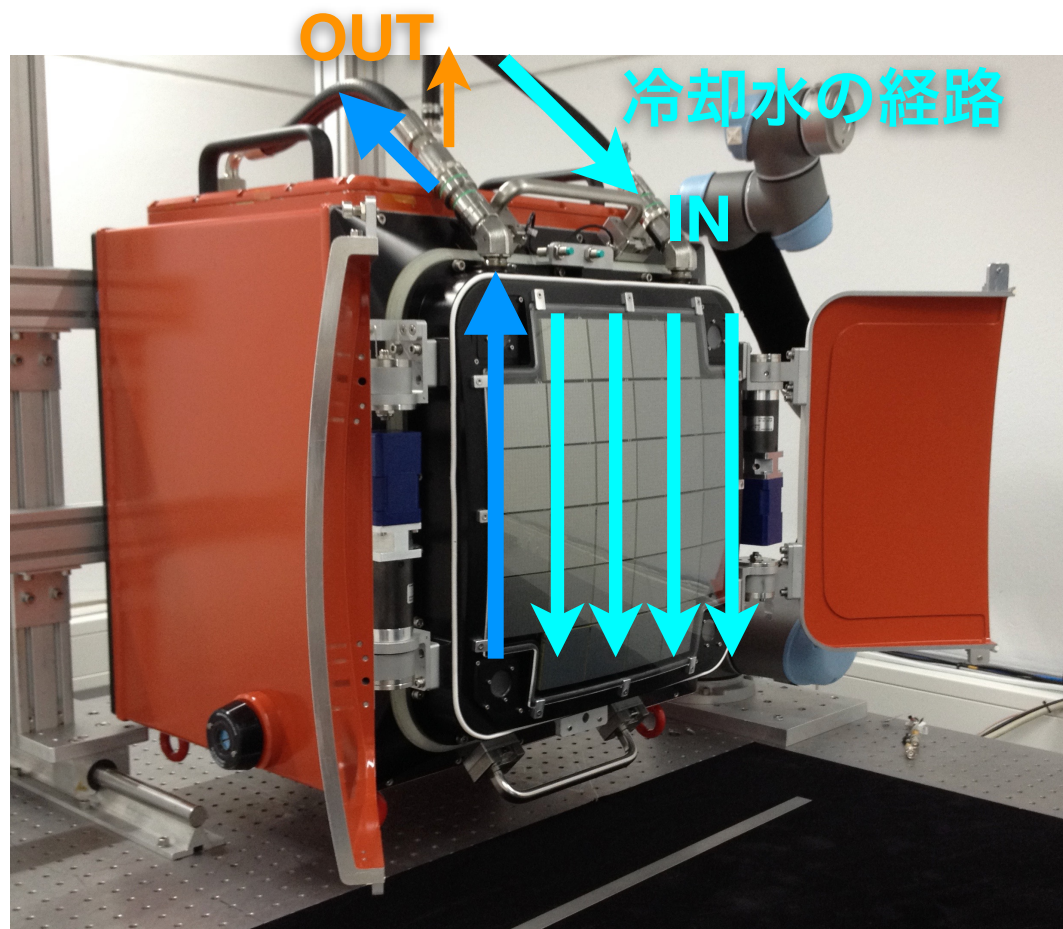
焦点面カメラの統合試験：オプティカルクロストークレート

- 検出光電子数を正しく推定するためにはオプティカルクロストークによる検出光電子数の増加に対する補正が必要
- 0 p.e. の事象数から予測されるポアソン分布とのずれから決定した
- **全画素の発生確率を測定できた** ← 検出光電子数の補正ができる
- 最新の SiPM では 10% 以下に抑えられる（超過電圧 ~ 3 V）



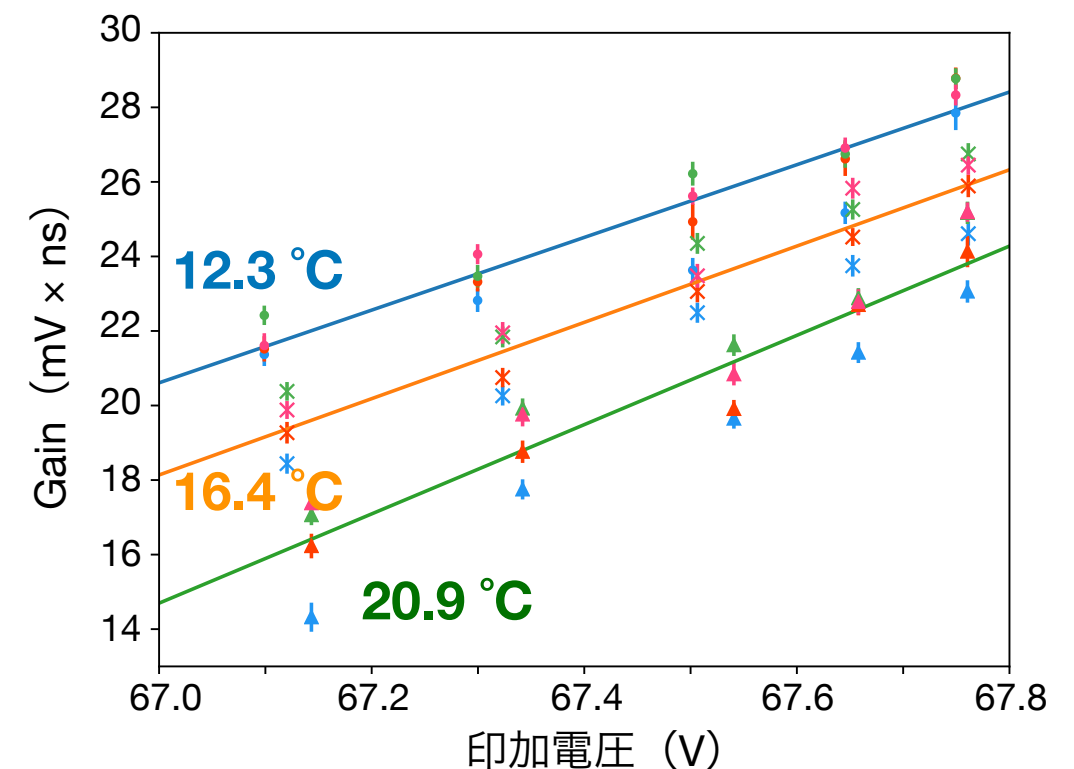
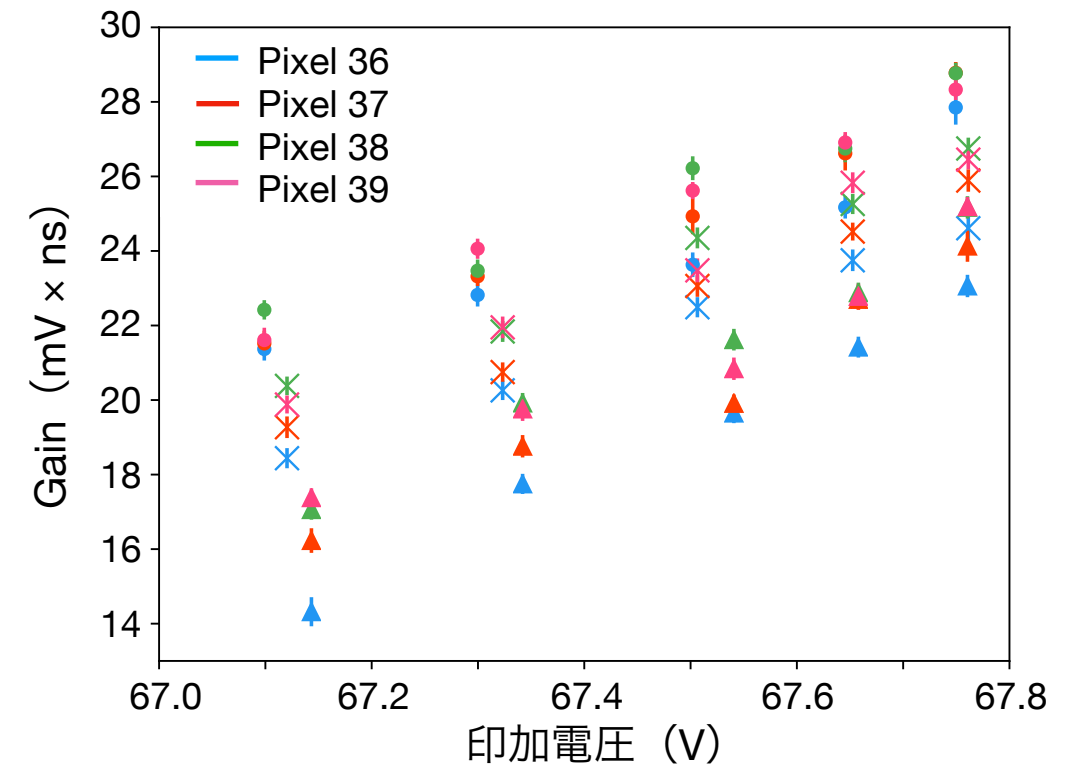
焦点面カメラの温度特性

- » SiPM の降伏電圧は温度依存性を持つ
 - » 温度によってゲイン、ダークカウント、光検出効率が変化する
 - » 温度の変化に応じて**印加電圧の調整が必要**である
- » 焦点面カメラは 400–500 W の熱が発生するため、水冷でカメラを冷却している
- » 室温での測定ではSiPM の温度を最大 1 °C 程度の変化で制御可能（温度変化 ~5 °C）



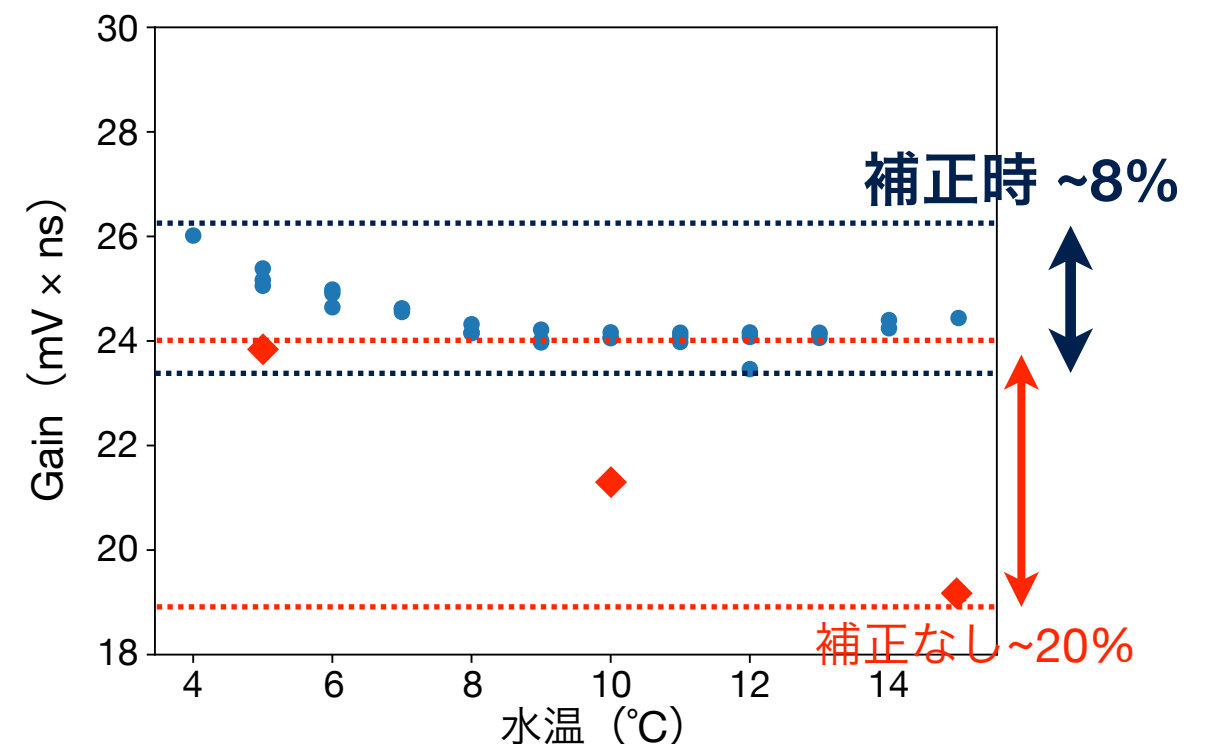
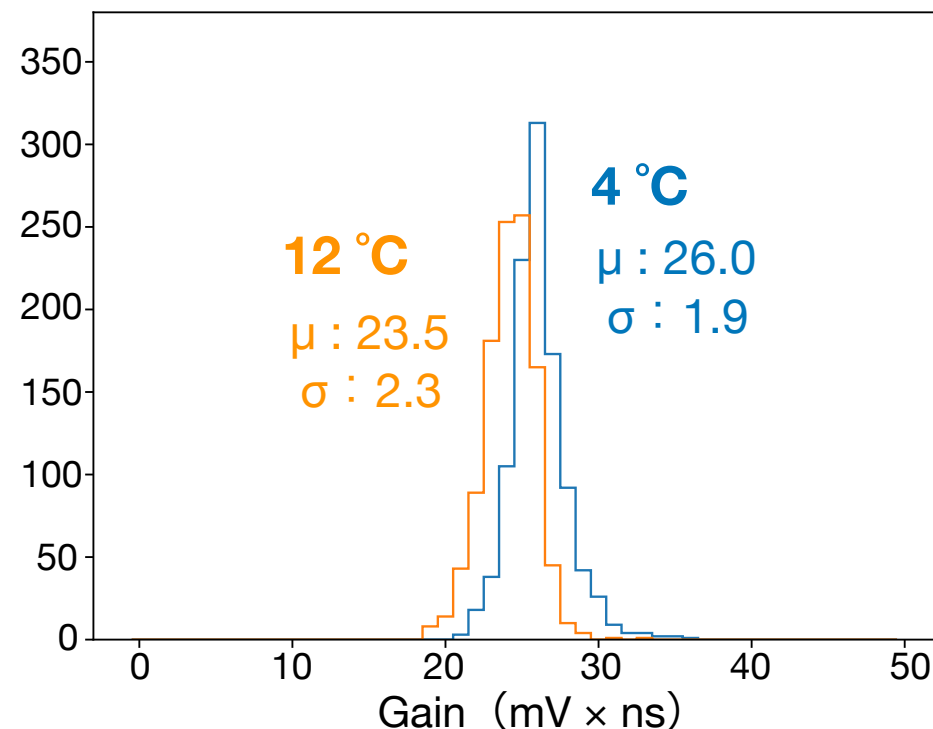
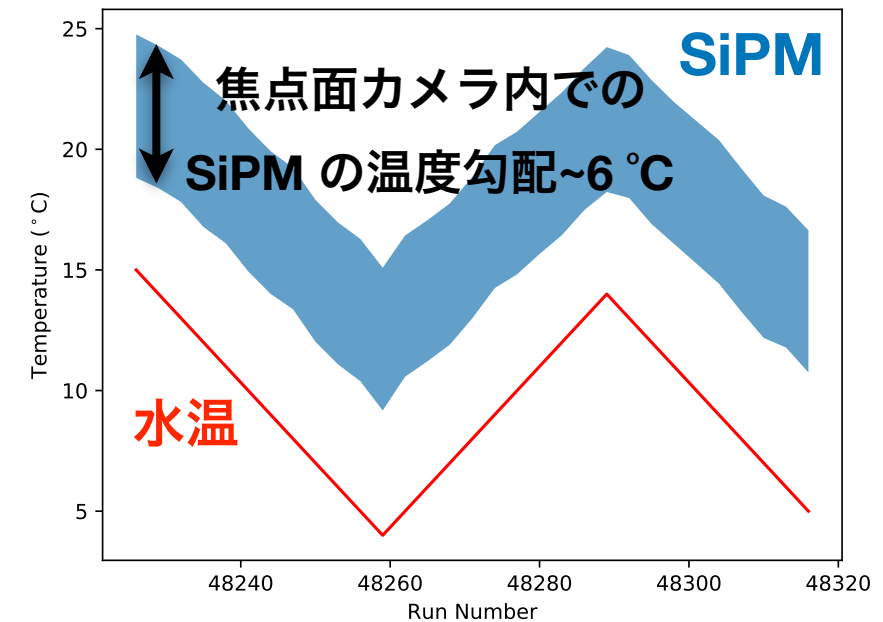
ゲインの温度依存性の測定

- » 冷却水の温度を変化させ意図的にカメラの温度を変化させることでゲインの温度依存性を測定した
- » 全画素の印加電圧に対するゲインを測定した
- » 観測中のトリガー閾値を安定にするために印加電圧を調整する
 - » 印加電圧は 4 画素ごとに設定するため、4 画素の平均を代表値とした
 - » フィット直線からのずれは 3% 程度であり 1 p.e. の波高値に対して十分小さい
 - » 傾きの変化は ASIC の温度依存性が含まれている
- » SiPM の温度から最適な印加電圧を計算する



温度補償によるゲインの安定性の検証

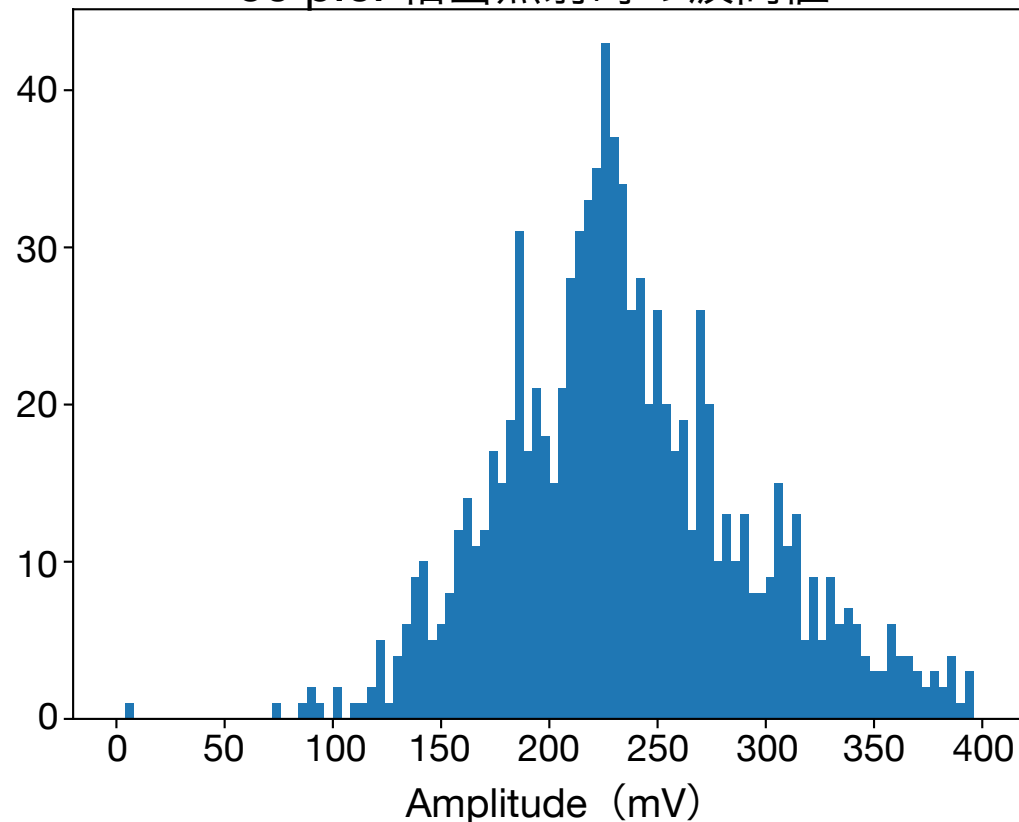
- » 冷却水を用いて SiPM の温度を変化させてゲインの安定性を検証した
 - » SiPM の温度から印加電圧を決定した
 - » 実際の観測時はカメラの温度が 15–25 °C で使用することを想定している
- » ゲインの平均値の変化
 - » 印加電圧補正時：～8%（補正なし：～20%）
 - » 閾値の設定に対して十分小さな変化



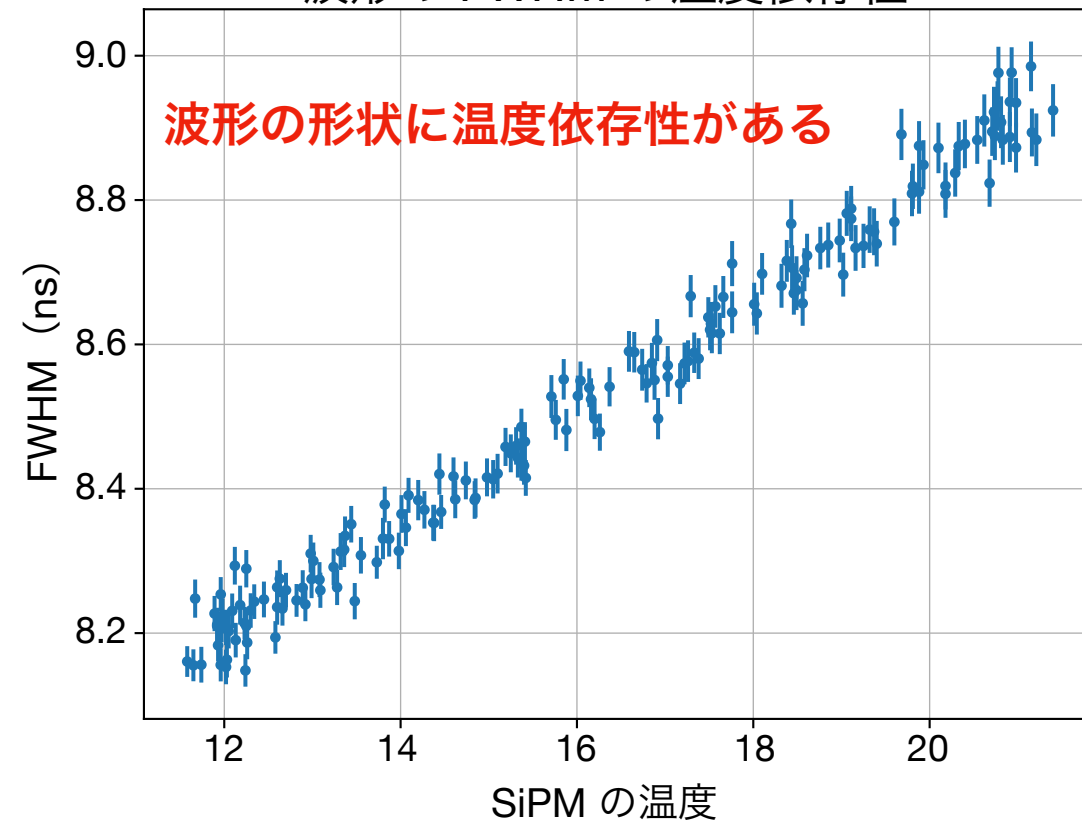
温度補償時の波高値の確認

- » 50 p.e. 相当照射時の波高値を確認した
- » 簡単のため波高積分値で温度依存性を測定したが、波高値が揃っていなかった
 - » トリガーを安定にするという観点から波高値を揃えないといけない
 - » ASIC の温度依存性が記録電圧値によって異なる
- » 波高値の分布からゲインを測定し補正值を決定する
- » ASIC 単体で温度依存性を測定する
- » 印加電圧は SiPM の超過電圧の調整のみ行う

50 p.e. 相当照射時の波高値



波形の FWHM の温度依存性



≫ SiPM を光検出器に置き換えた焦点面カメラの統合試験を進めている

- ≫ 50 p.e. 相当照射時の波高値を用いてゲインを揃えた
 - ≫ ～5% のばらつきで調整できる ← 全画素でノイズより十分大きく 1 p.e. を識別できる
 - ≫ 光量の非一様性を考慮する
- ≫ 波高積分値分布を作成し SiPM の特性を評価した
- ≫ 温度特性
 - ≫ 印加電圧の調整によってゲインの変化を 8% に抑えることができた
 - ≫ 波高値の分布から温度依存性を測定する
 - ≫ ASIC 単体での温度依存性を測定し補正する
 - ≫ SiPM の降伏電圧の変化のみ印加電圧を補正する

≫ 望遠鏡に搭載しての試験観測を予定している

- ≫ ガンマ線由来のチェレンコフ光を観測する
- ≫ μ 粒子から生じるチェレンコフ光を用いたエネルギー較正を実施する
- ≫ 複数の夜光条件で観測し、エネルギー分解能・トリガーへの影響を調査する