

# 次世代チェレンコフ望遠鏡CTA計画の 小口径望遠鏡カメラに用いる光検出 器の選定に向けたSiPMの特性評価

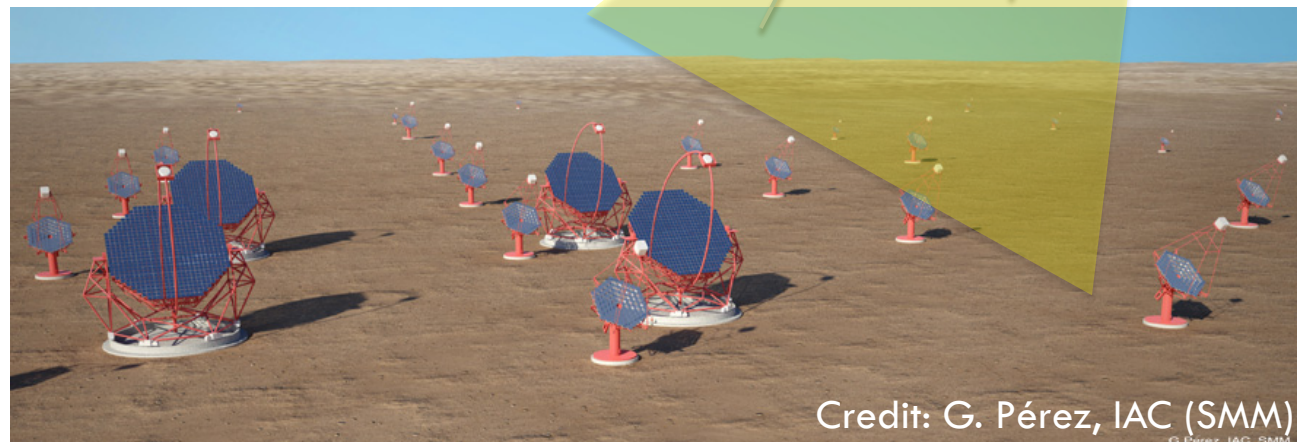
山根暢仁, 田島宏康, 奥村暁,  
日高直哉, 佐藤雄太, 朝野彰, 中村祐樹  
名大ISEE



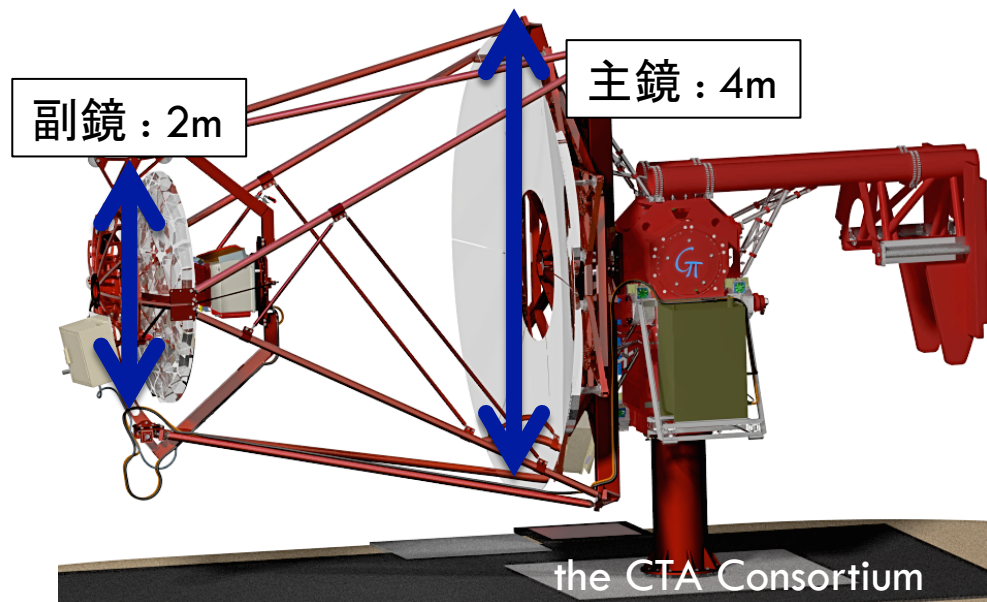
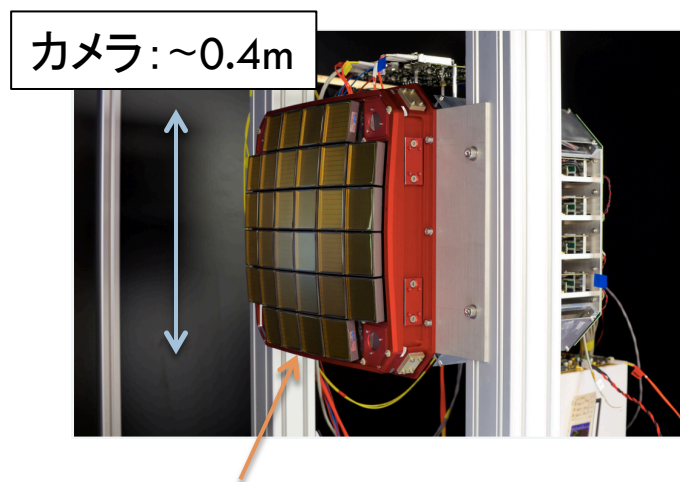
2016年秋季物理学会9月24日宮崎大学木花キャンパス

# Cherenkov Telescope Array ( CTA )

- ガンマ線観測を目的とした国際共同実験
- ガンマ線による大気チェレンコフ光を観測
  - エネルギーと到来方向を測定
- 2021年～に観測開始予定
- 大、中、小の口径を持った望遠鏡を設置
- 高エネルギー領域 (5TeV～300TeV) の観測
  - チェレンコフ光の光量が多いため、小口径の望遠鏡
  - 有効面積の確保のため、望遠鏡を多数設置



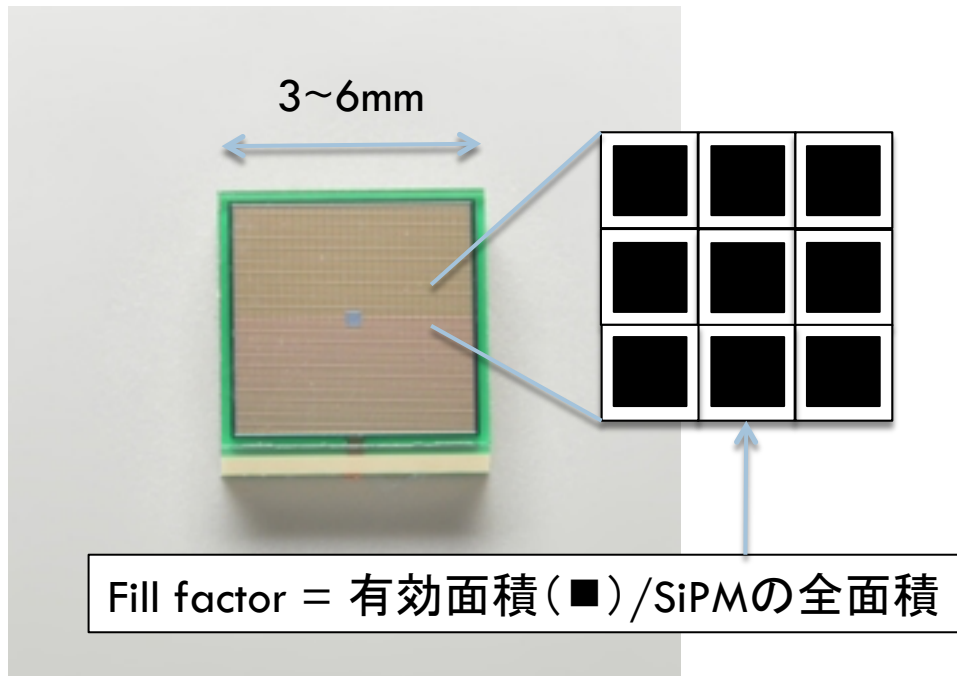
# 小口径望遠鏡カメラに採用予定の光検出器



32×64(2048)個の光検出器を搭載予定

- 銀河中心を主に観測するため、南半球のみに建設
- 副鏡を採用することでカメラが小型化
- カメラには半導体光電子増倍素子(SiPM)を採用

# SiPMの特性



<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4004/4113/S13360-3050VE/index.html>

## PMTと比較して

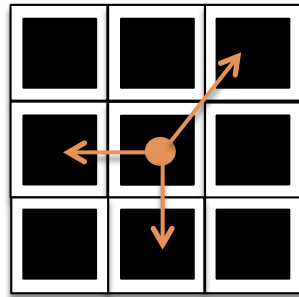
- 高い光検出効率 (PDE)
- 低い印加電圧 → 省電力
- 小型

## ノイズ特性

- オプティカルクロストーク  
(以下クロストークと呼ぶ)
- ダークカウント

PDEとクロストークは降伏電圧からの  
超過電圧 (overvoltage) に依存

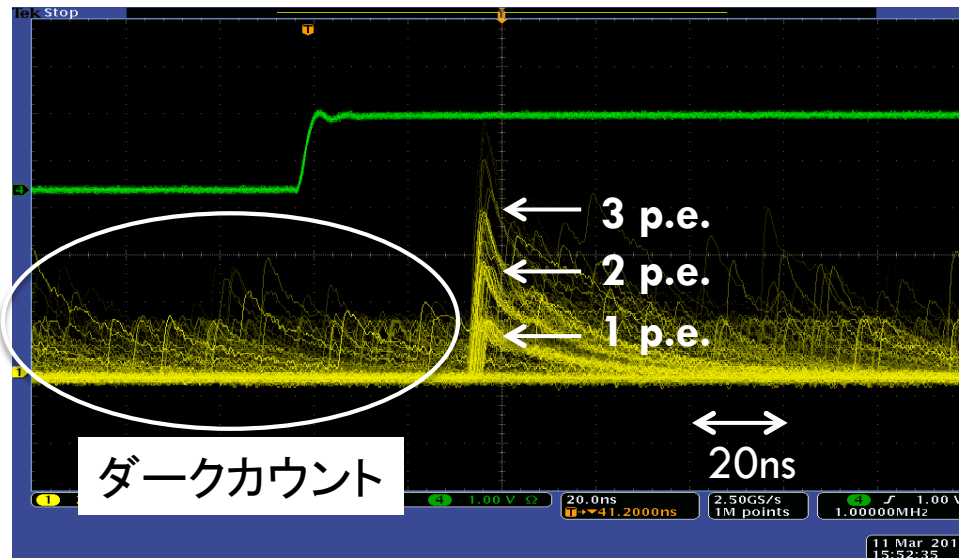
# ノイズ特性による影響



## □ クロストーク

電子雪崩で生じた二次光子が他のセルに移動して電子雪崩を起こす現象

クロストークで1光電子の信号が2光電子以上に増幅する



## □ ダークカウント

熱的光電子によってランダムに信号が出る現象

光子による信号と重なり、検出光電子数を見誤る可能性がある

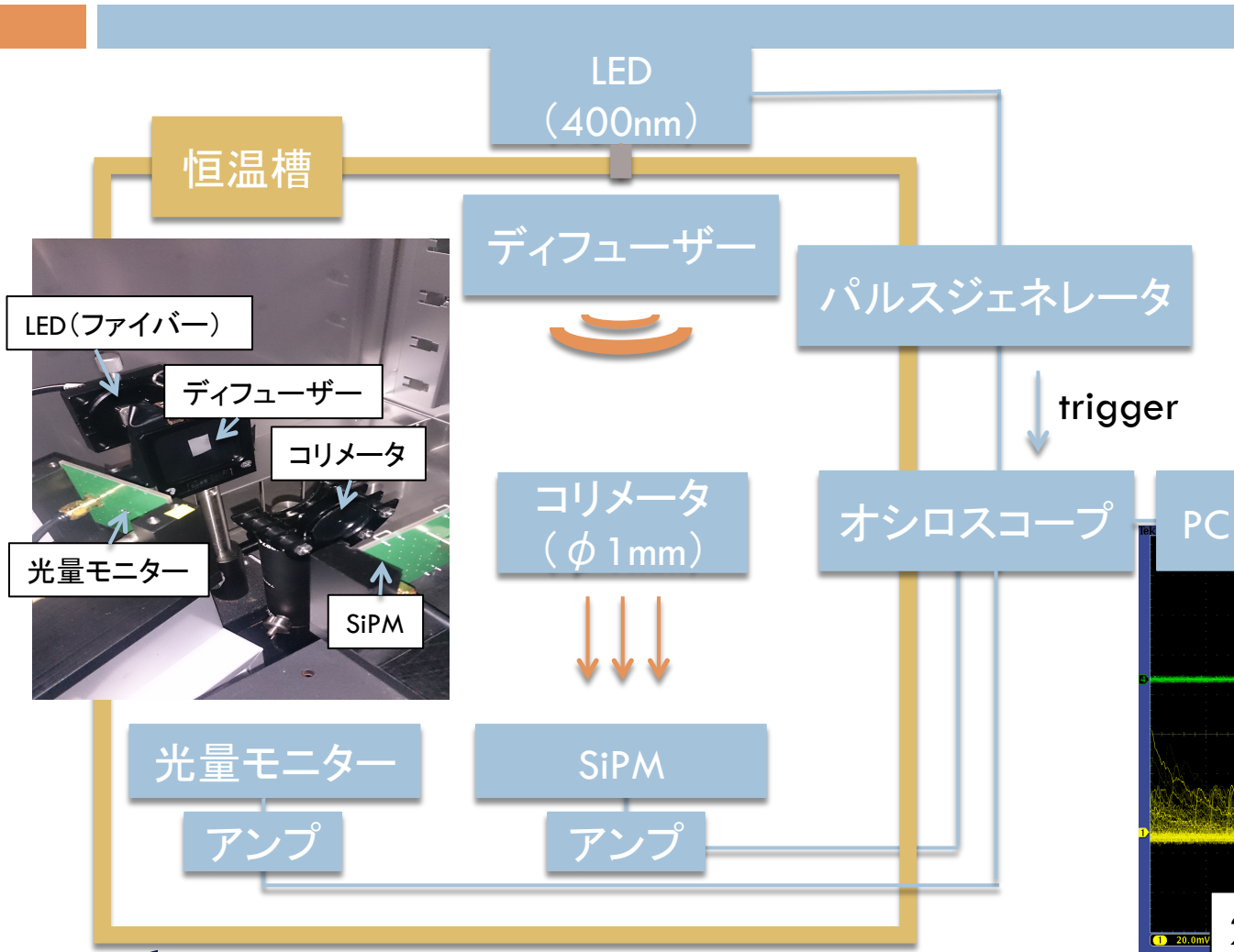
# 本研究の目的

- 小口径望遠鏡カメラに最適なSiPMの選定
- 動作電圧の決定
  
- 各候補製品の評価項目
  - PDEとクロストークの電圧依存性
  - PDEとクロストークの相関関係
  - PDEの波長依存性
  
- 候補製品の条件
  - カメラの大きさに適したピクセルサイズで、大量生産ができる
  - 浜松ホトニクス、SensL、FBK

# 測定したSiPM候補

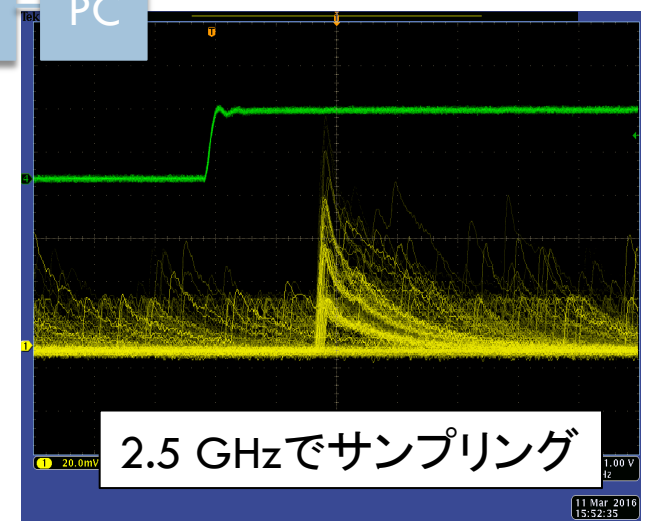
	Product ID	Short name	Pixel size	Cell size	Fill factor	Company
	S12572-050C	REF-50-3	3 mm	50 $\mu\text{m}$	62%	浜松
	S13360-3050CS	LCT5-50-3	3 mm	50 $\mu\text{m}$	74%	浜松
	S13360-6050CS	LCT5-50-6	6 mm	50 $\mu\text{m}$	74%	浜松
	S13360-3075CS	LCT5-75-3	3 mm	75 $\mu\text{m}$	82%	浜松
	S13360-6075CS	LCT5-75-6	6 mm	75 $\mu\text{m}$	82%	浜松
New	S13360-3050VE	LCT5V-50-3	3 mm	50 $\mu\text{m}$	74%	浜松
New	S14161-3050CS	LVR-50-3	3 mm	50 $\mu\text{m}$	74%	浜松
New	S14161-6050CS	LVR-50-6	6 mm	50 $\mu\text{m}$	74%	浜松
New	S14161-6075CS	LVR-75-6	6 mm	75 $\mu\text{m}$	82%	浜松
	MicroFJ-SMA-60035	FJ-35-6	6 mm	35 $\mu\text{m}$		SensL
New	NUV-HD	NUV-30-6	6 mm	30 $\mu\text{m}$		FBK

# 測定系



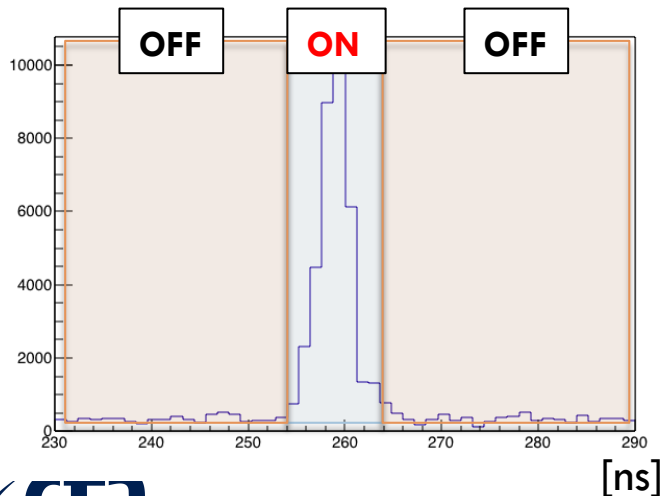
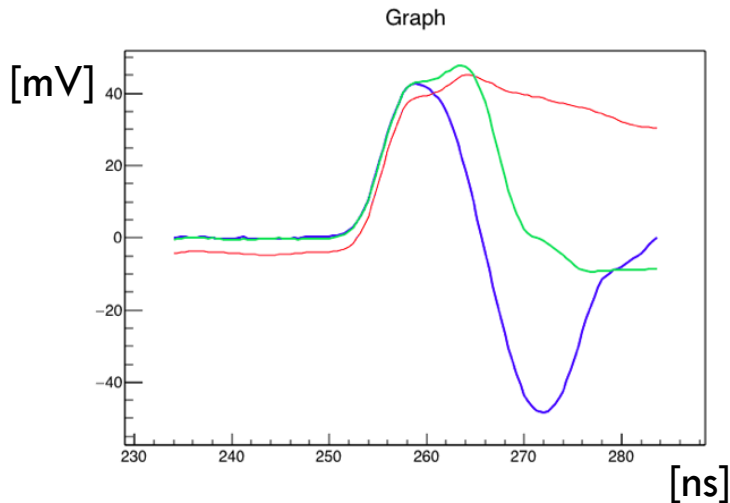
全てのSiPMで、光を当てる面積を同じにするため、**コリメータ**を使用

光量モニターとして**REF-50-3**を使用





# 取得波形の解析



## □ ノイズフィルタ

- 4nsで移動平均を取り、高周波ノイズをカット(赤)

## □ 微分フィルタ

- 12ns前の波形からの差分(緑)
  - 12ns周期のノイズの低減
- 8ns前の波形からの差分(青)
  - 波形の分離

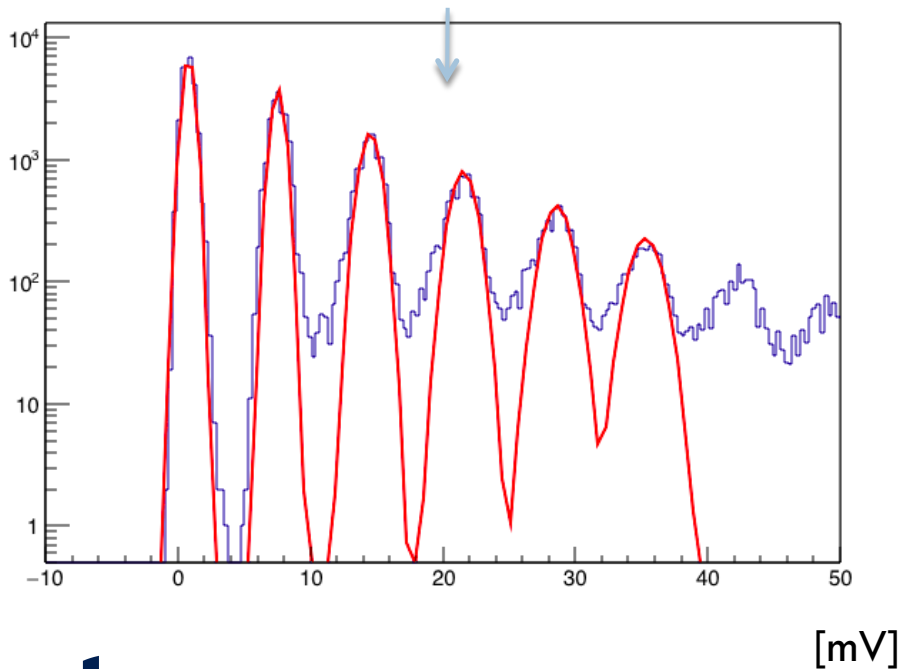
## □ 波高分布

- Peak Time分布から波高値を取得する時間を設定
- ONタイミング — LEDの発光タイミング
- OFFタイミング — ONタイミング以外

# PDEの評価

## □ ONタイミングの波高分布

クロストークによって1 p.e.以上のイベント数はポアソン分布に従わない



0 p.e.のイベント数から平均検出光電子数を決定

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

$$P(0) = e^{-\lambda} \quad \lambda = -\log P(0)$$

$$P_{ON}(0) = P_{True}(0)P_{OFF}(0)$$

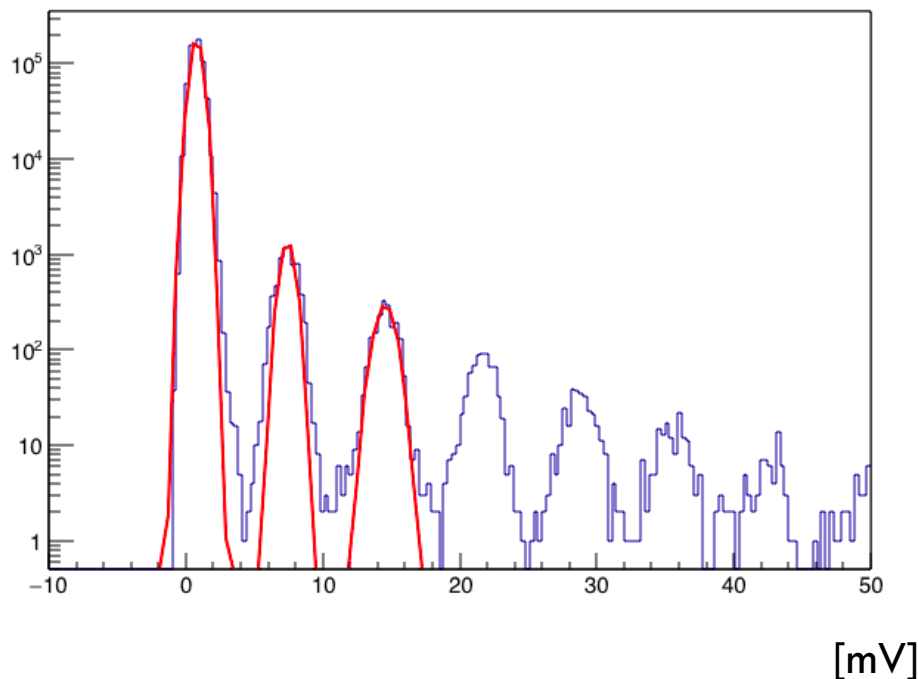
$$P_{True}(0) = \frac{P_{OFF}(0)}{P_{ON}(0)}$$

# クロストークの評価

## OFFタイミングの波高分布

ダークカウントがポアソン分布に従うと仮定

クロストークを考慮して、2 p.e. 以上になるイベント数を近似



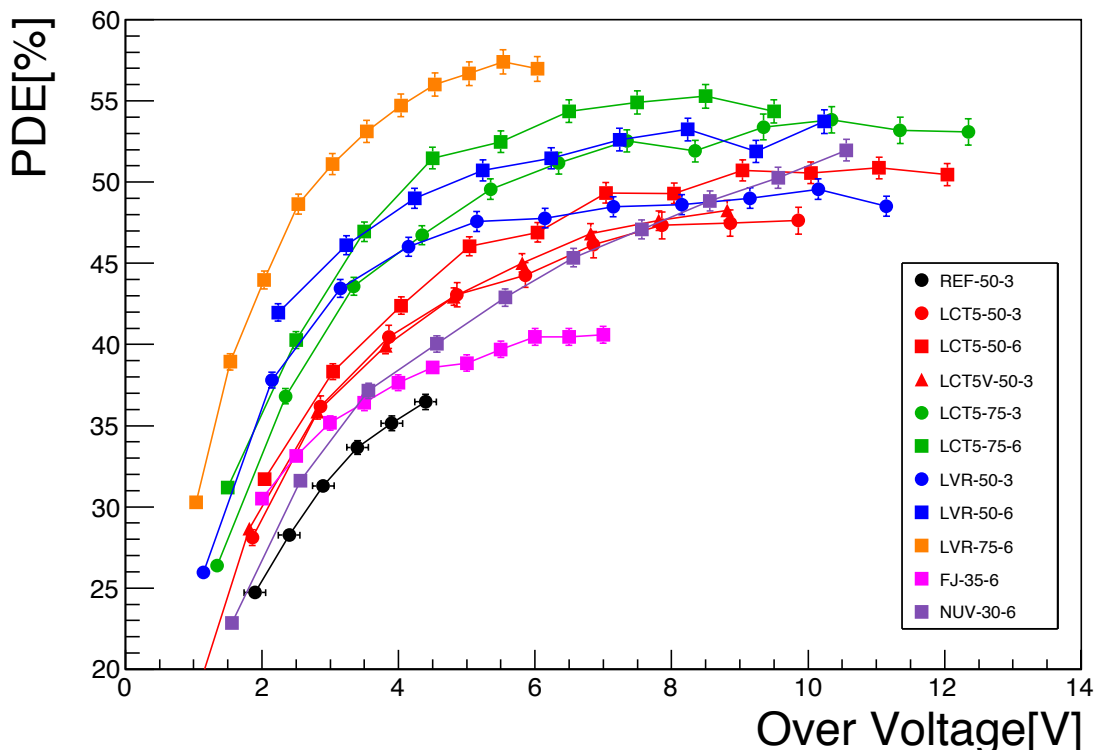
$$\frac{N(\geq 2 p.e.)}{N} = P(1)R + P(2) + P(3)$$

$$R = \frac{N(\geq 2 p.e.)}{\lambda P(0)N} - \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda^2}{6}$$

$$P(1) = \lambda P(0), P(2) = \frac{\lambda^2}{2} P(0), P(3) = \frac{\lambda^3}{6} P(0)$$

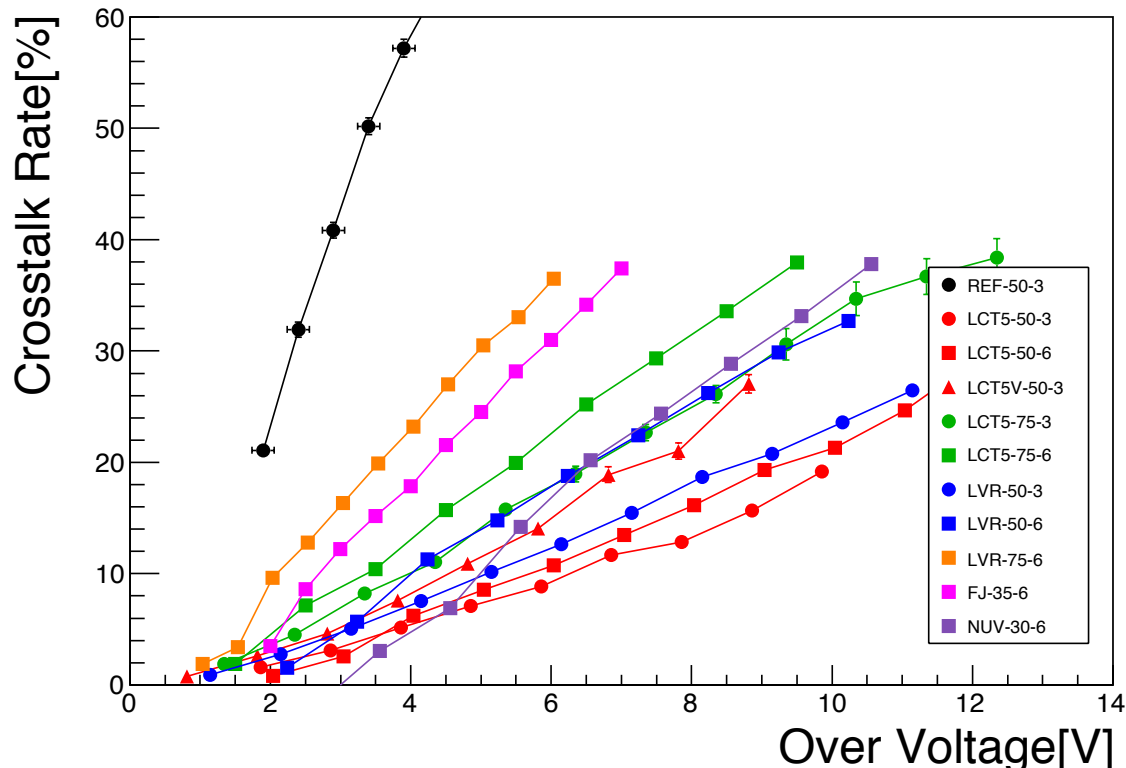
# PDEの電圧依存性

PDEは、REF-50-3との相対値を測定。UCSCでのREF-50-3の測定結果を利用して絶対値に変換 31.8% @REF-50-3(OV=3V)



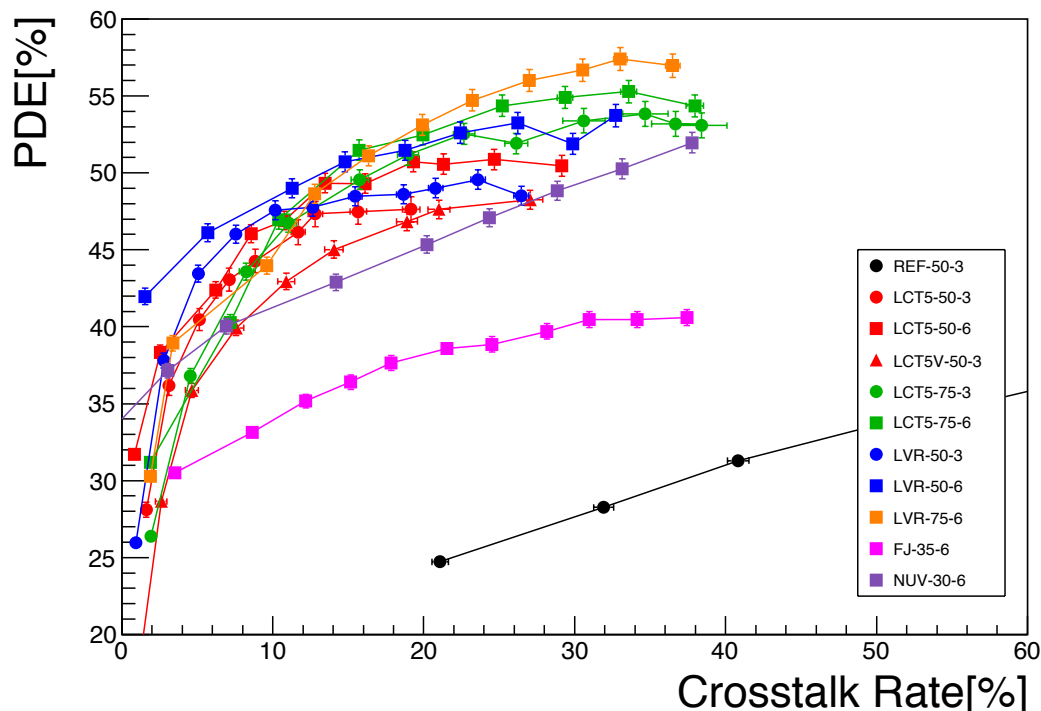
- LVR-75-6がovervoltageに対して最も高いPDE
- 6mmのデバイスは3mmのデバイスに比べてPDEが約4~8%高い
- 窓材がエポキシ(LCT5V-50-3)とシリコーン(LCT5-50-3)でのPDEは誤差の範囲で一致

# クロストークの電圧依存性



- **LCT5-50-3**がovervoltageに対して最も低いクロストーク
- 6mmのデバイスは3mmのデバイスに比べてクロストークが約19~33%高い
- 窓材がエポキシのSiPMはシリコンに比べて、クロストークが約69%高い

# PDEとクロストークの関係



- クロストークが15%以下では  
LVR-50-6、15%以上では  
LVR-75-6が最もPDEが高い
- クロストークに対するPDEは浜松  
のSiPMに比べるとSensLとFBKは  
低い

# まとめと今後

- CTAの小口径望遠鏡に採用するSiPMを選定するため、前回測定した素子に新たに浜松とFBKのSiPMを追加して計11個のSiPMを測定。
- ピクセルサイズによる光量依存をなくすため、 $\Phi 1\text{mm}$ のコリメータを利用。
- クロストークが約15%以下ではLVR-50-6、15%以上ではLVR-75-6のPDEが最大となった。

## 今後の予定

- PDEの波長依存性を測定