

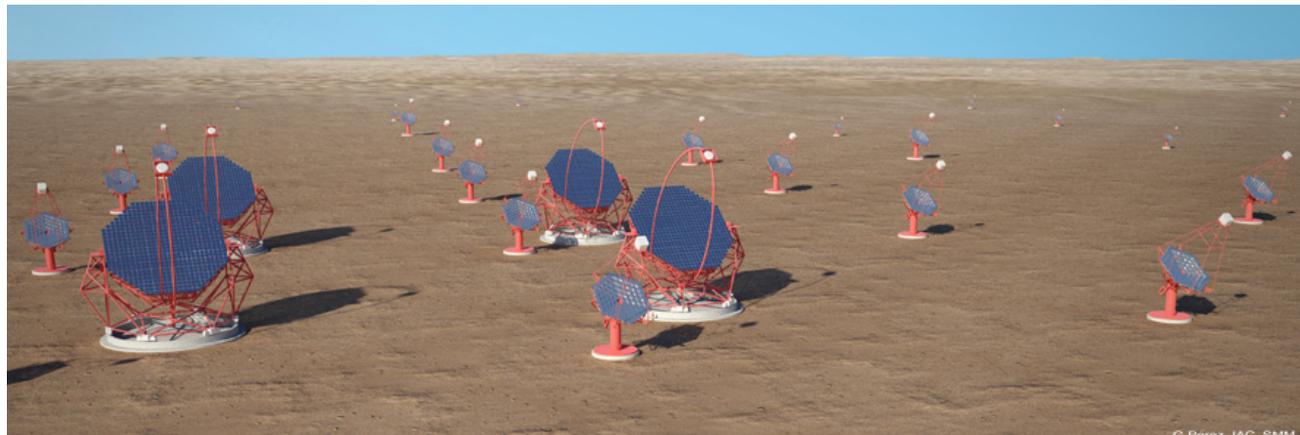
次世代チェレンコフ望遠鏡CTA計画の 小口径望遠鏡カメラに向けた 半導体光電子増倍素子の特性評価

名古屋大学宇宙地球環境研究所^A,
マックスプランク核物理^B

山根暢仁^A, 奥村暁^{A,B}, 佐藤雄太^A,
田島宏康^A, 日高直哉^A

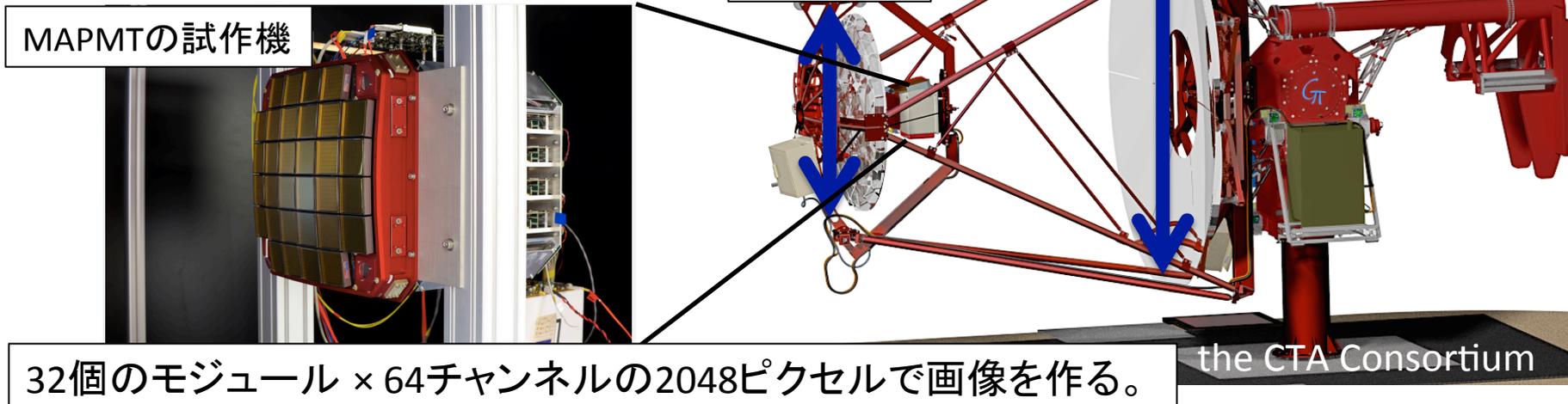
Cherenkov Telescope Array (CTA)

- 宇宙から来る超高エネルギーガンマ線観測を目的とした国際共同実験。
- ガンマ線によるシャワーのチェレンコフ光を観測することでエネルギーと方向が測定できる。
- 大中小の望遠鏡を 3–10km² の領域に多数配置することで、20 GeV–300 TeV の広いエネルギー帯で観測が可能。
- 従来の地上チェレンコフ望遠鏡より約10倍の感度の向上を目指す。
- この観測によって、新しいガンマ線天体やダークマターの発見が期待できる。



Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT)

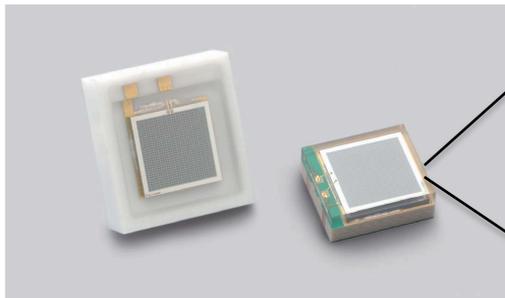
- 5–300 TeV の高エネルギーガンマ線観測を目的とした小口径望遠鏡のデザインの一つ。
- 副鏡によって焦点距離を短縮し、カメラの小型化が実現可能。
 - 小型化による費用の低減によって、望遠鏡を多く設置することができ、検出感度の向上が見込まれる。
- 光検出器には半導体光電子増倍素子 (SiPM) を採用予定。
 - 高い光検出効率
 - 小型
 - 信頼性



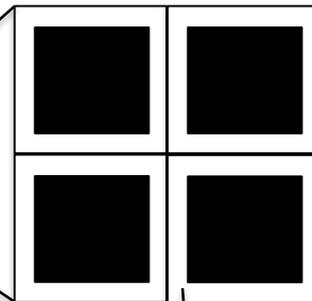
半導体光電子増倍素子 (SiPM)

多数のセルによって構成される半導体光検出器。

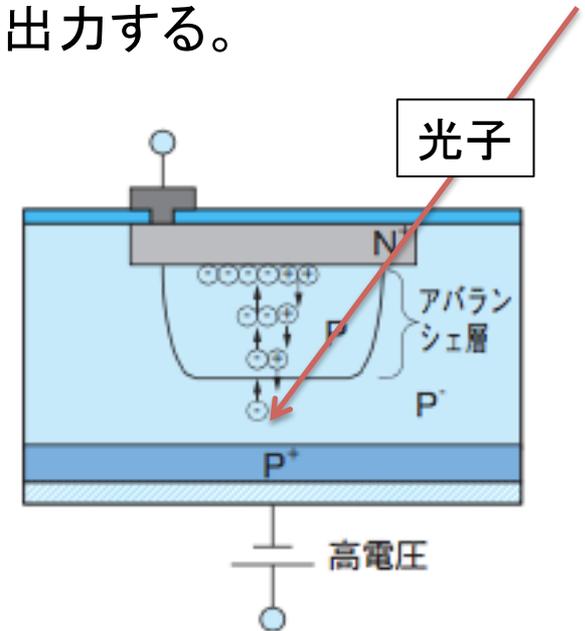
降伏電圧以上の超過電圧 (Overvoltage) をかけると、1個のセルに光子が入射した時に電子雪崩が起こり、1光子の信号として出力する。



https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd0004j.pdf



不感領域



https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/si_apd_kapd0001j.pdf

$$\text{フィルファクター} = \frac{\text{光を検出できる面積}}{\text{SiPMの全面積}}$$

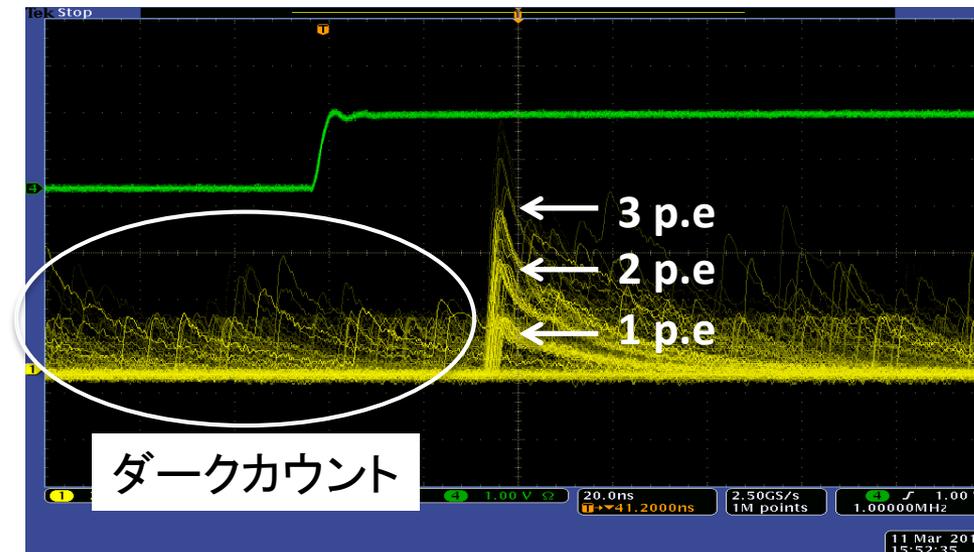
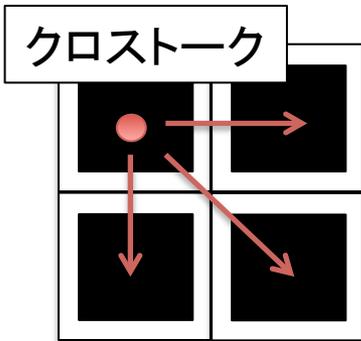
SiPMのノイズ特性

❖ ダークカウント

- 入射光子でなく**熱的光電子**によって電子雪崩が起き、1光子以上の信号を出力する現象。

❖ オプティカルクロストーク (本講演では**クロストーク**と呼ぶ)

- 電子雪崩で生じた二次光子が他のセルで電子雪崩を起こし、1光子の信号を2光子以上の信号として出力する現象。



本研究の目的

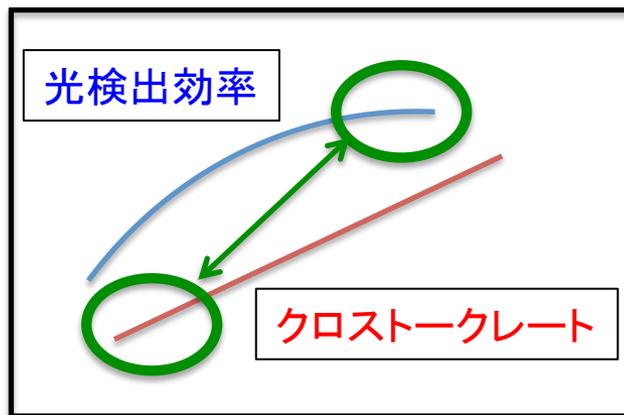
評価項目

❖ 光検出効率

光検出効率が**高い**と、少ないチェレンコフ光でもガンマ線イベントの検出が可能となるので、望遠鏡の間隔を広げることができ、有効面積の拡大が期待できる。

❖ クロストークレート

クロストークの発生によって、バックグラウンドとなる**夜光**の信号が増幅されてガンマ線イベントとしてトリガーされ、ガンマ線検出効率が落ちてしまうのでクロストークレートは**低い**方が望ましい。



光検出効率とクロストークレートは**相反関係**にあるため、最適な動作点を決める必要がある。

素子候補

Product ID	Pixel size	Cell size	Short name	Fill factor
S12572-050C	3 mm	50 μ m	REF-50	62%
S12652-050C	3 mm	50 μ m	LCT1-50	
LCT2	3 mm	50 μ m	LCT2-50	56%
LCT4	3 mm	50 μ m	LCT4-50	61%
S13360-6050CS	6 mm	50 μ m	LCT5-50	74%
S13360-6075CS	6 mm	75 μ m	LCT5-75	82%
MicroFJ-SMA-60035	6 mm	35 μ m	FJ-35	

浜松ホトニクス

SensL

ピクセルサイズは3mm x 3mm換算で補正する。
セルサイズが大きいほどフィルファクターが大きくなり、光検出効率が高くなる。

LCT1-50以降ではクロストークレートを小さくするため、**トレンチ**が設置してある。
REF-50はトレンチ無し。

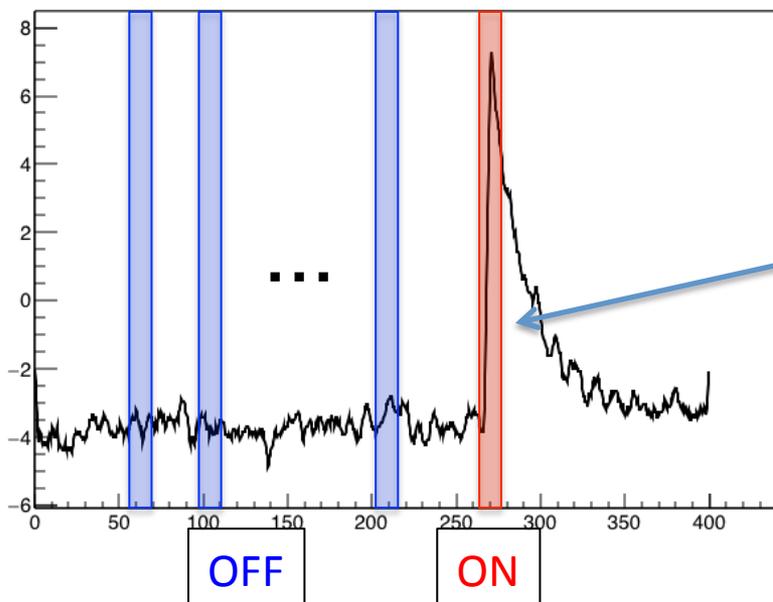
測定項目と解析方法

光検出効率の測定

発光している時間で波高値を取ることで、検出した光電子の分布を作ることができる。検出光電子数を求めることで光検出効率を相対的に評価できる。

クロストークレートの測定

発光していない時間で観測されるイベントはダークカウントのみなので、クロストークによってダークカウントの分布がどれほどずれているか見る事ができる。



❖ ON-timing

- LEDが発光している時間幅 (6ns) を波形解析に使う。

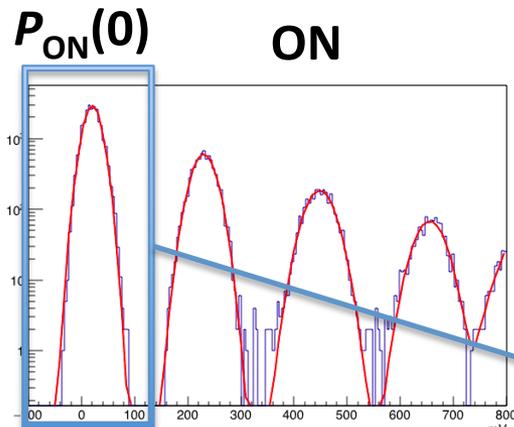
❖ OFF-timing

- LEDが発光していない時間でON-timingと同じ時間幅 (6ns) を設定。
- OFF-timingの位置はON-timingの前の任意の位置に複数設定して統計量を増やす。

検出光電子数

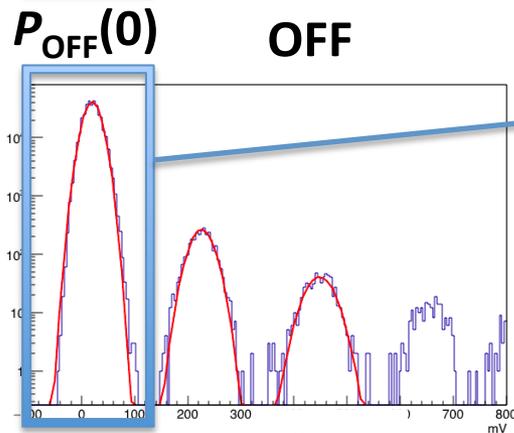
ON,OFF-timigで波高分布を作成。

クロストークによって1 p.e.以上の波高分布はポアソン分布に従わないため、0 p.e.のイベントを使って平均検出光電子数 λ を求める。



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

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



$$P(0) = \text{0 p.e. のイベント数} / \text{全イベント数}$$

ダークカウントも考慮すると、ONで得た $P_{ON}(0)$ とOFFで得た $P_{OFF}(0)$ を使い真の $P_{true}(0)$ を求める。

$$P_{ON}(0) = P_{true}(0) * P_{OFF}(0) \text{より、} P_{true}(0) = P_{ON}(0) / P_{OFF}(0)$$

クロストークレート

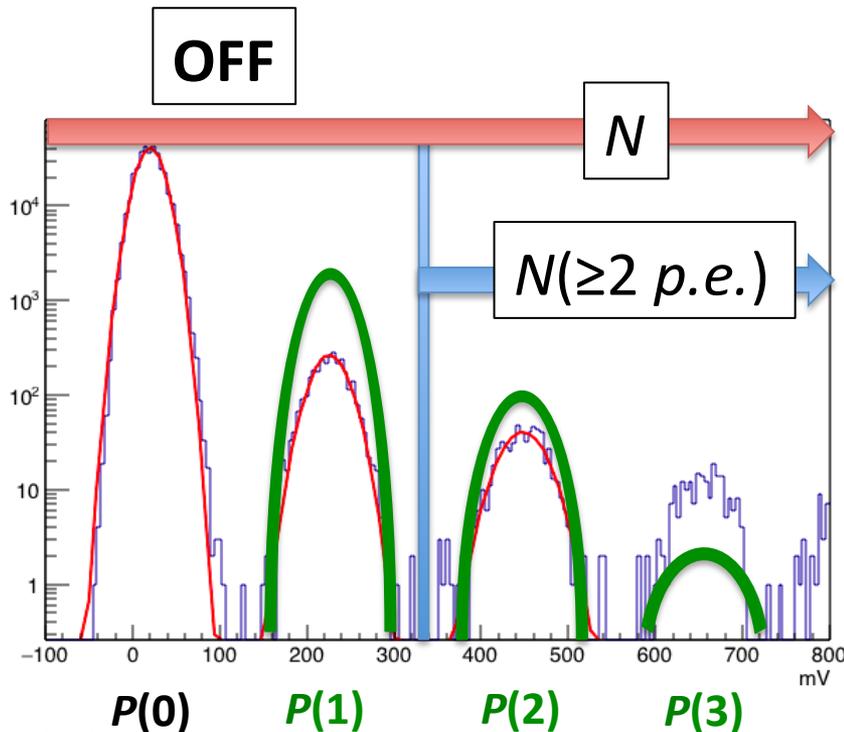
ダークカウントがポアソン分布に従うと仮定して、OFF-timingでの全イベント数で、2 p.e.以上のイベントの割合を以下の式で近似する。

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

$$P(1) = \lambda P(0),$$

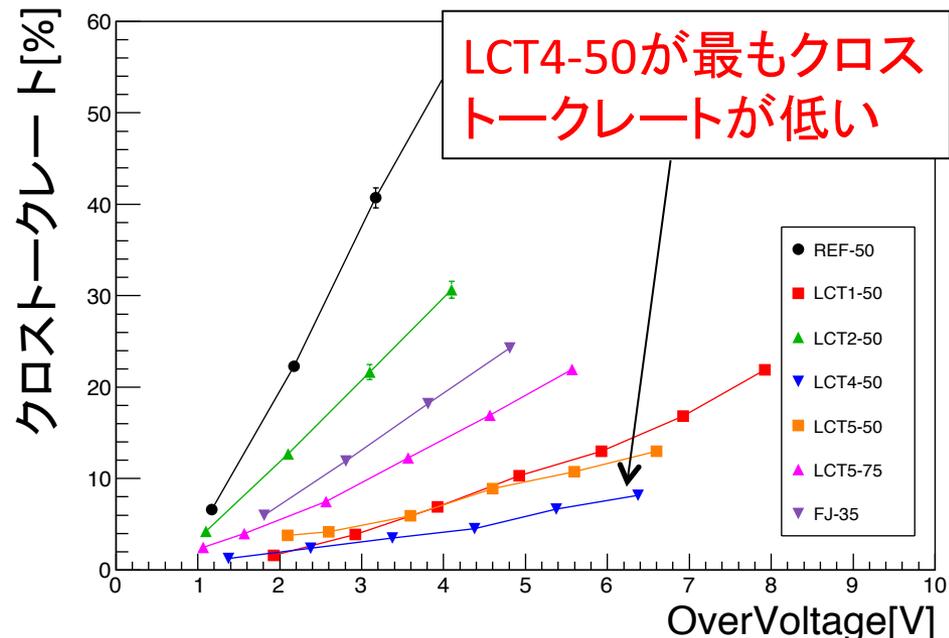
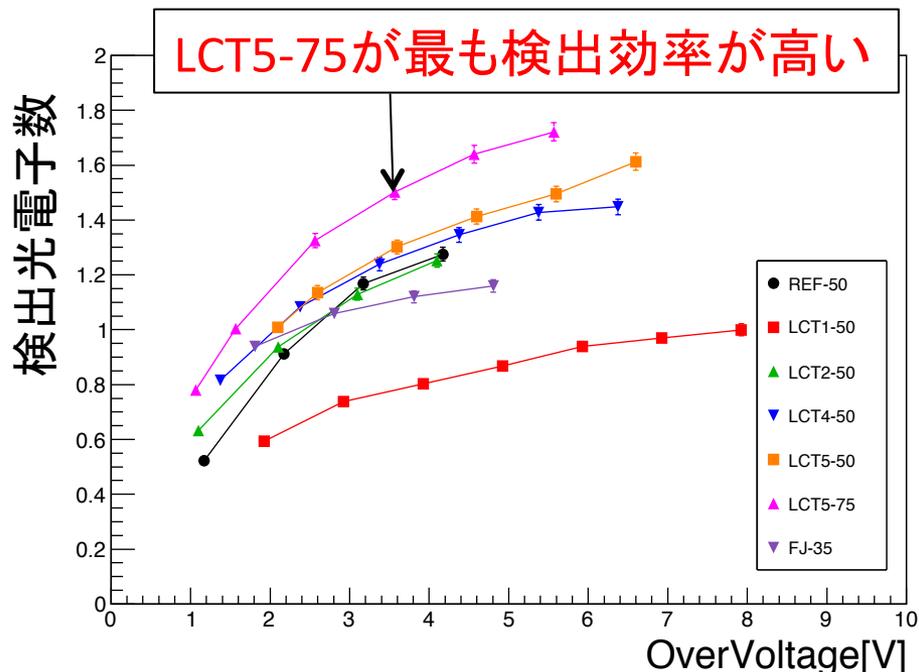
$$P(2) = \frac{\lambda^2}{2} P(0),$$

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



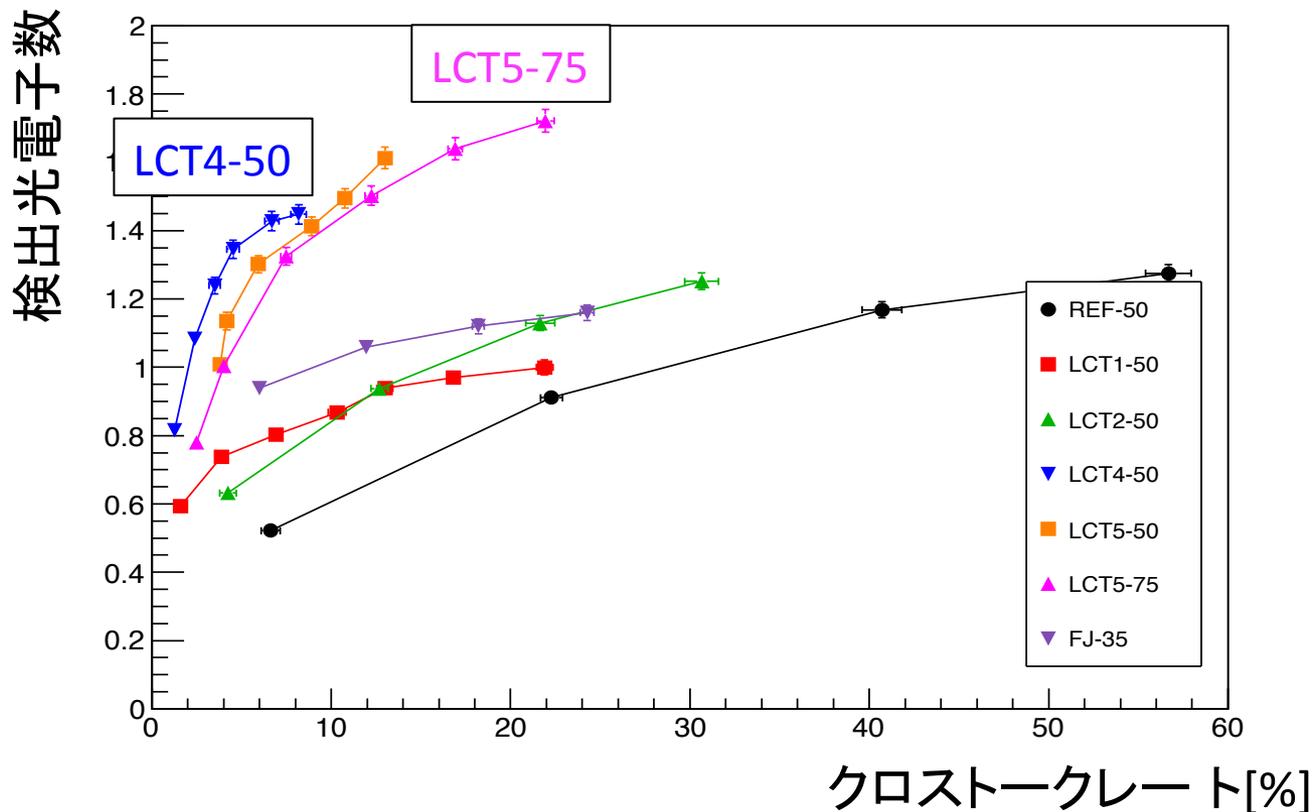
$$R = \frac{N(\geq 2 p.e.)}{\lambda P(0)N} - \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda^2}{6}$$

検出光電子数と クロストークレートの電圧依存性



LCT5のクロストークレートが高いのは、ピクセルサイズが大きいと考えられる。

検出光電子数と クロストークレートの相関関係



クロストークレートが10%以下ではLCT4-50、
10%以上ではLCT5-75が最も検出効率が高い。

まとめと展望

まとめ

- ❖ CTA計画のGCT用カメラに向けたSiPMの候補製品 (MPPC, SensL) を7個測定した。
- ❖ 各SiPMの特性を波形解析によって比較した結果、クロストークレートと光検出効率の相関関係が良かったSiPMはLCT4-50、LCT5-75となった。
- ❖ クロストークレートがどの程度まで許容できるかによって選定するSiPMが異なるので、CTAで実際に用いる望遠鏡群と夜光を考慮したシミュレーションによる結果が待たれる。(佐藤報告 22aAT-4)

今後の展望

- ❖ 本講演ではLEDの波長が375nmでの測定結果を報告したが、大気チェレンコフ光のスペクトルより各波長で検出光子数を正確に見積もるため、PDEの波長依存性を調べる必要がある。
- ❖ ピクセルサイズによってクロストークレートが大きくなる傾向があるのか確かめるため、LCT5の3mm角デバイスのクロストークレートを測定する。