CTA 報告105:

半導体光検出器を用いた CTA小口径望遠鏡焦点面カメラの シミュレーションによる性能評価

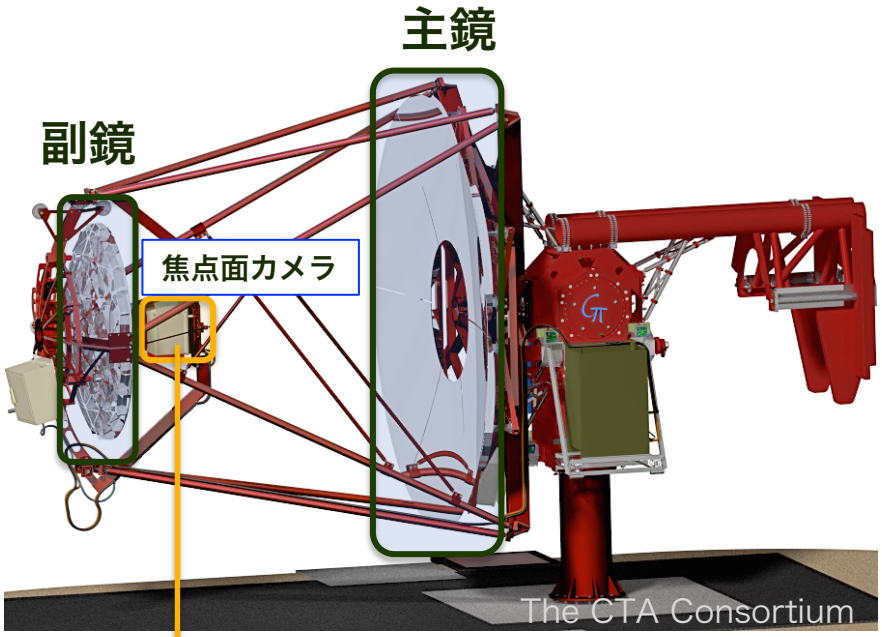
佐藤雄太[A], Jason Watson[B], 池野祐平[C], 稲田知大[D], 大石理子[D], 奥村曉[A,E], 片桐秀明[F], 櫛田淳子[C], 郡司修一[G], 齋藤隆之[H], 榊直人[I], 田島宏康[A], Dang Viet Tan[E], 永吉勤[J], 西嶋恭司[C], 日高直哉[A], 平井亘[C], 増田周[H], 松岡俊介[J], 山根暢仁[A], 吉越貴紀[D], 吉田龍生[F] , 他 CTA Consortium.

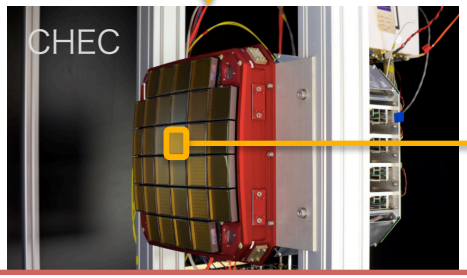
名古屋大学 宇宙地球環境研究所[A], オックスフォード[B], 東海大理[C], 東大宇宙線研[D], マックスプランク核物理[E], 茨城大理[F], 山形大理[G], 京大理[H], 阪市大理[I], 埼玉大理[J]

cta cherenkov telescope array

STEL → 改組 → ISEE 宇宙地球環境研究所 Institute for Space-Earth Environmental Research

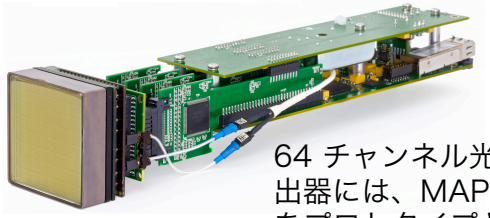
Gamma-ray Cherenkov Telescope（GCT）





焦点面カメラ試作機 (2048ピクセル、32個のモジュールで構成されている)

カメラモジュール



64 チャンネル光検出器には、MAPMTをプロトタイプとして使用中

- ✧ CTA計画の3つある小口径望遠鏡のデザインの１つ。(5 - 300 TeVを観測
- ✧ エネルギー分解能15%

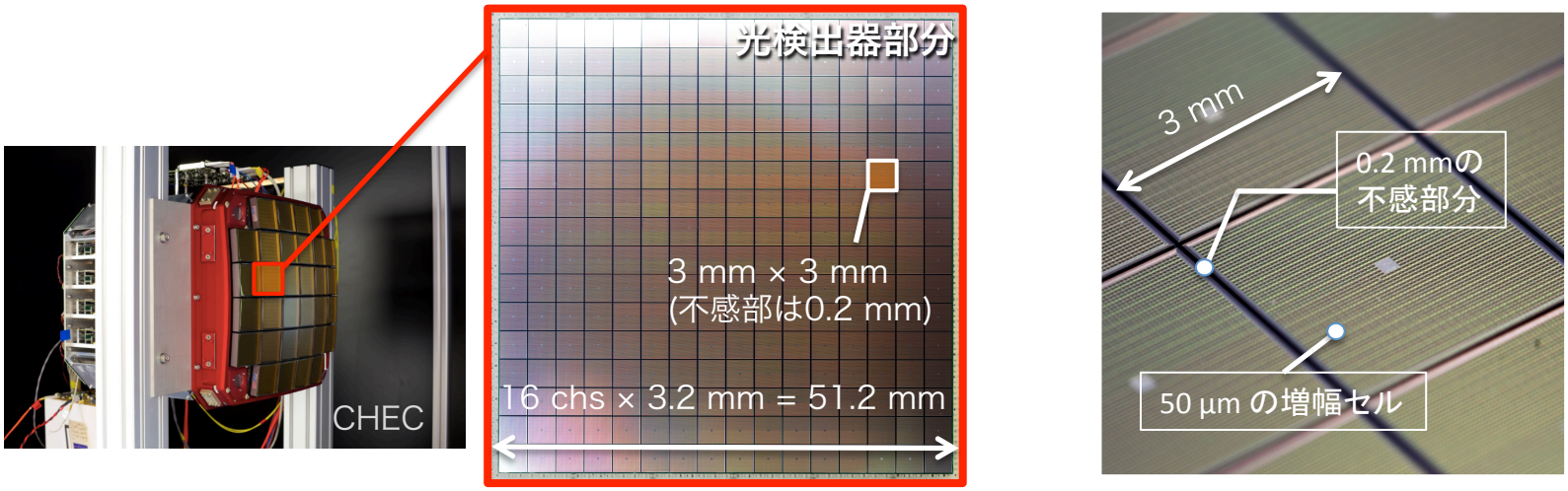
  科学目的：超新星残骸を始めとする宇宙線起源やその加速限界の解明など。
- ✧ 副鏡を利用して、結像性能を8°以上の視野で維持したまま、焦点距離を短縮。

↓

- ❖ 焦点面カメラが小型化
- ❖ 望遠鏡1台あたりの費用が低減
- ❖ 多数の望遠鏡設置が可能に

半導体光電子増倍素子(SiPM)

望遠鏡搭載素子をMAPMTから、SiPMへ変更予定



搭載候補品の１例

✧ 長所

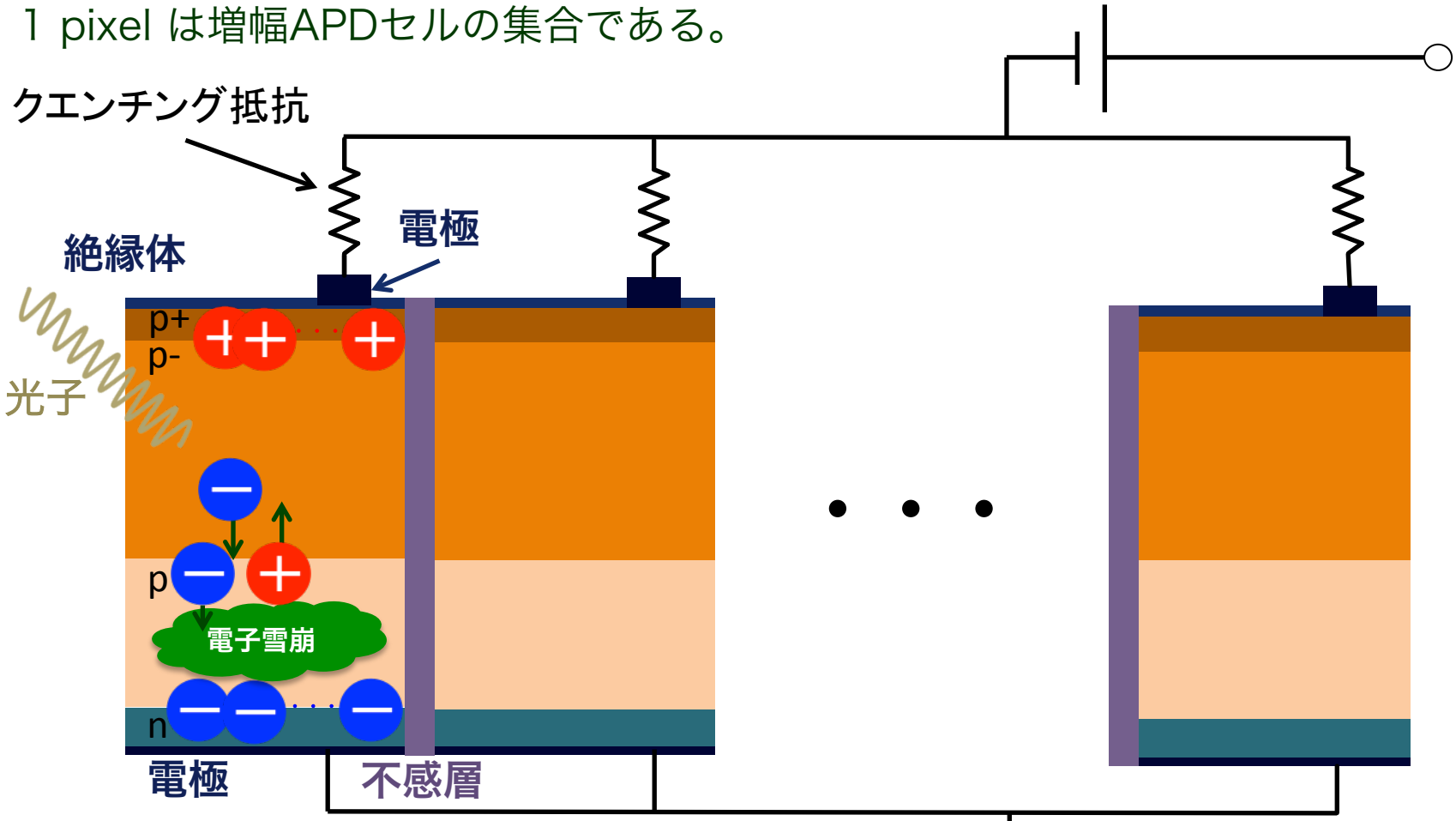
- 高い量子効率(<70%)をもつ。
- 耐久性が高い。
- 低い印加電圧でも光電子数を10^6 倍まで増幅できる。

✧ 短所

- １つの光子を複数の光子として認識するオプティカルクロストーク（以下、クロストークと呼称）が起きる。
- ノイズとゲインに強い温度依存性。
- アフターパルスが発生。

半導体光電子増倍素子(SiPM)

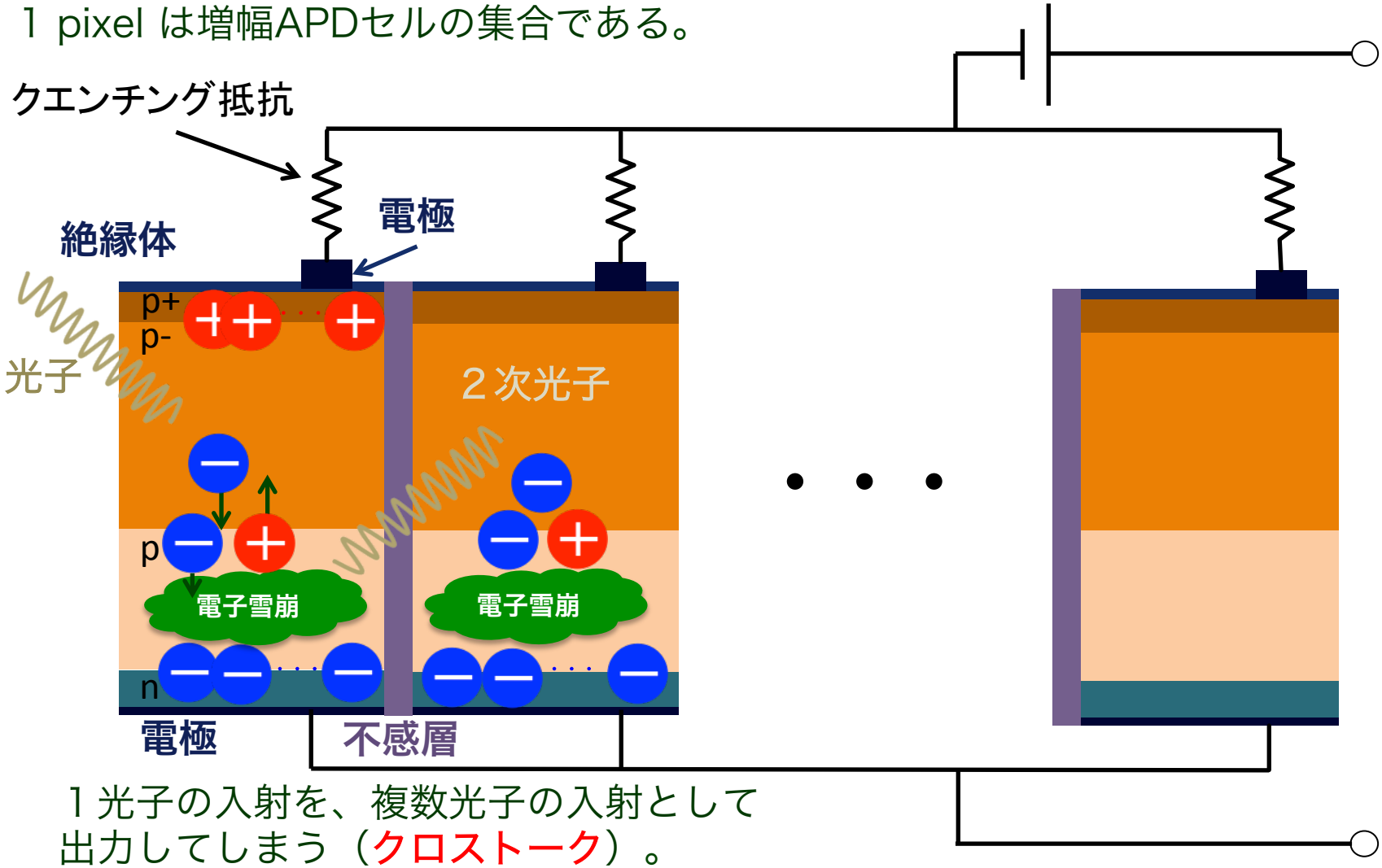
1 pixel は増幅APDセルの集合である。



クエンチング抵抗により、1 セル あたり
一定の出力値。

半導体光電子増倍素子(SiPM)

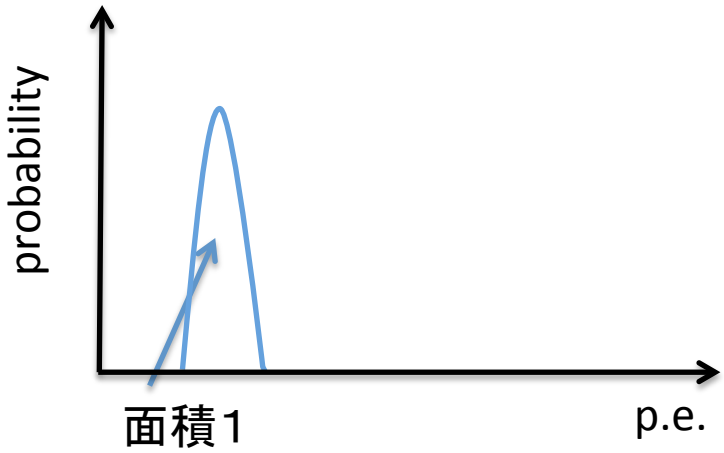
1 pixel は増幅APDセルの集合である。



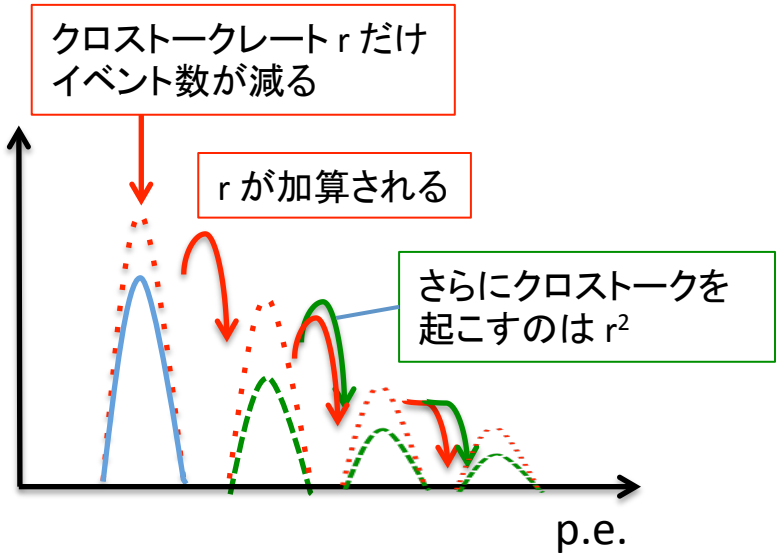
１光子の入射を、複数光子の入射として
出力してしまう（クロストーク）。

クロストークによる波高分布の変化

1p.e. がピクセル中で発生した場合の出力波高分布。



クロストークがない場合



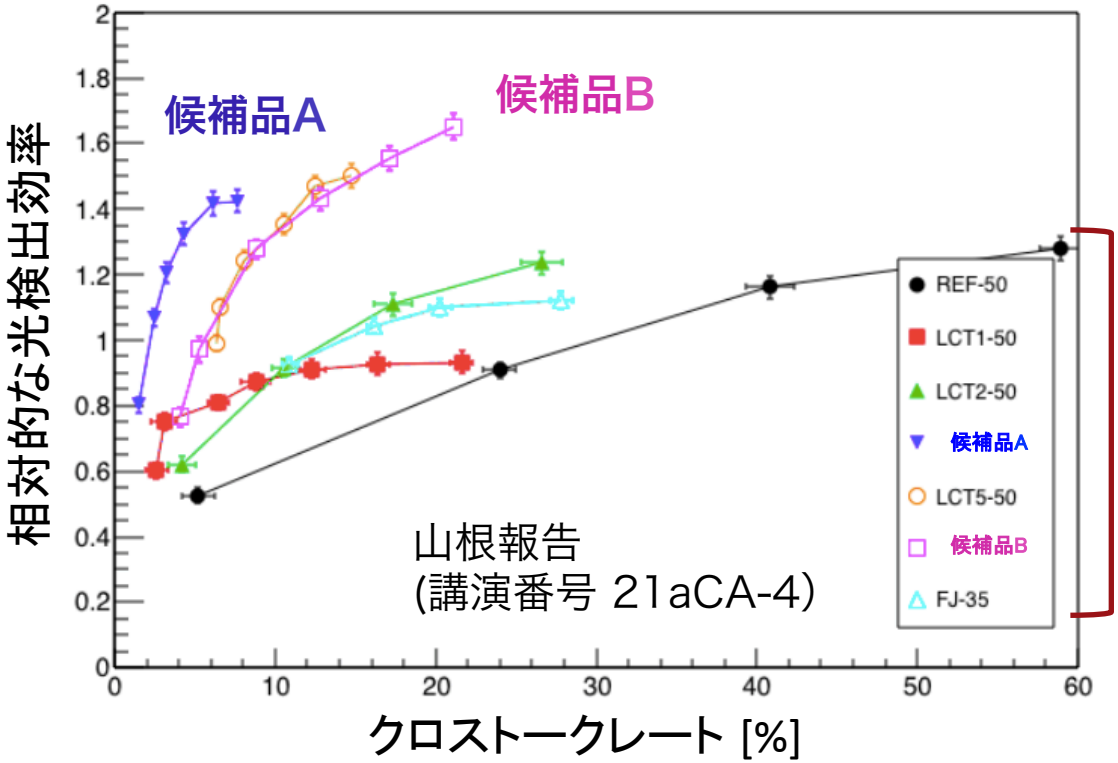
クロストークがある場合

このような影響を、

$$\text{電荷分解能} = \frac{\text{出力信号から求めた光電子数のばらつき}\,\delta Q}{\text{生成した真の光電子数}Q}$$

という指標で評価する。

製品ごとのクロストークレートの比較



採用候補の SiPM で異なる

- ピクセルサイズ
- 有効面積

- チェレンコフ光を捉えるために、光検出効率は高いほど良いが、光検出効率を上げるために電子雪崩を促す電圧を上げると、クロストークレートの上昇も伴う。
- 光検出効率とクロストークの関係に注目すると、クロストークレートが10%以下では候補品A、もし１０%以上が許容できるならば候補品Bを用いるのが良い。

GCTカメラのMCシミュレーションによる電荷分解能評価

空気シャワーシミュレーション
(CORSIKA)

5 – 300 TeV
天頂角０°

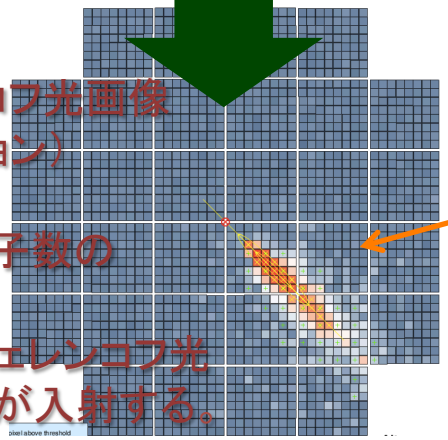
シャワーシミュレーションの結果を読み込ませる

装置応答シミュレーション
(sim_telarray)

GCT：4 台
夜光：41, 410 MHz/pixel
0, 10, 20%のクロストークレート

大気チェレンコフ光画像
（シミュレーション）

ガンマ線の光子数の推定を行う。
観測時にはチェレンコフ光以外にも夜光が入射する。



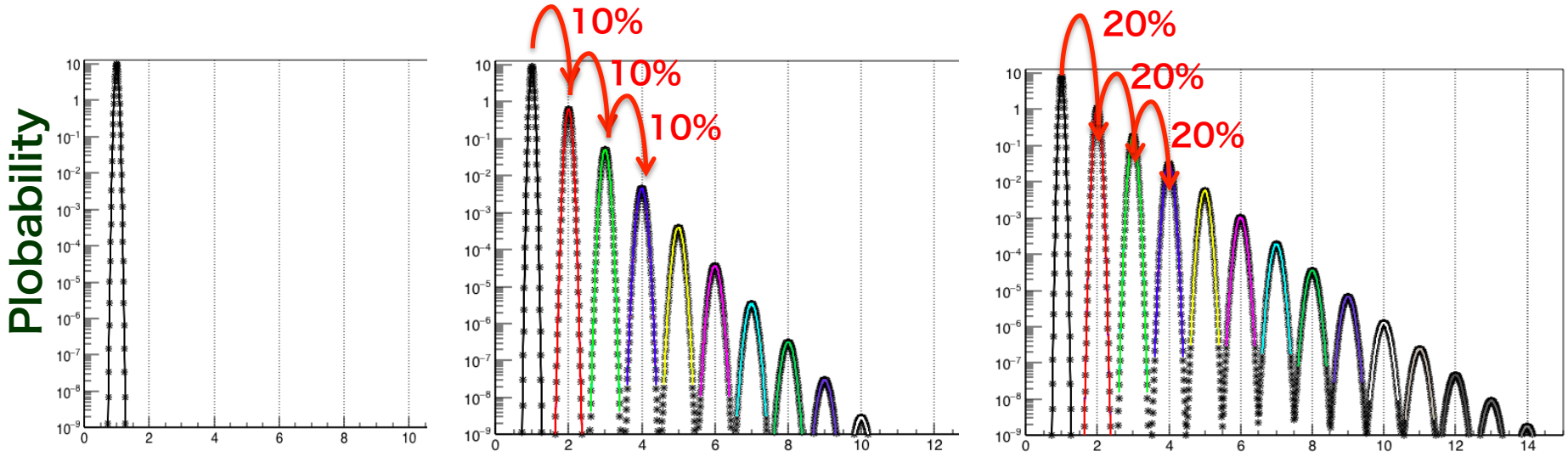
ここで、ピクセルごとに真の電子数、出力電圧値を取得。

電荷分解能導出

使用した波高分布

1 p.e. が入射した際の出力信号の波高分布。

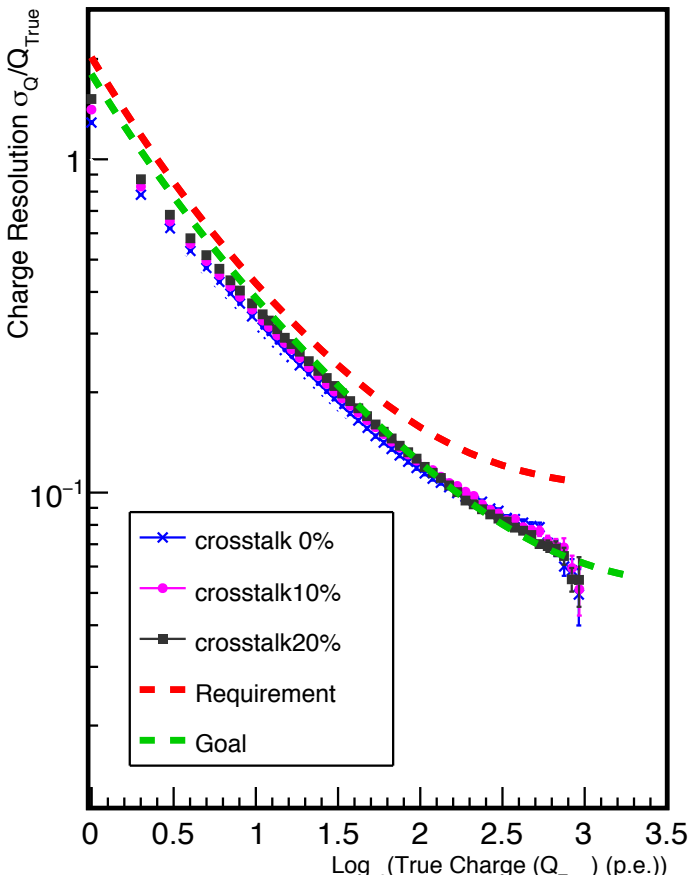
クロストークレート0%　　クロストークレート10%　　クロストークレート20%

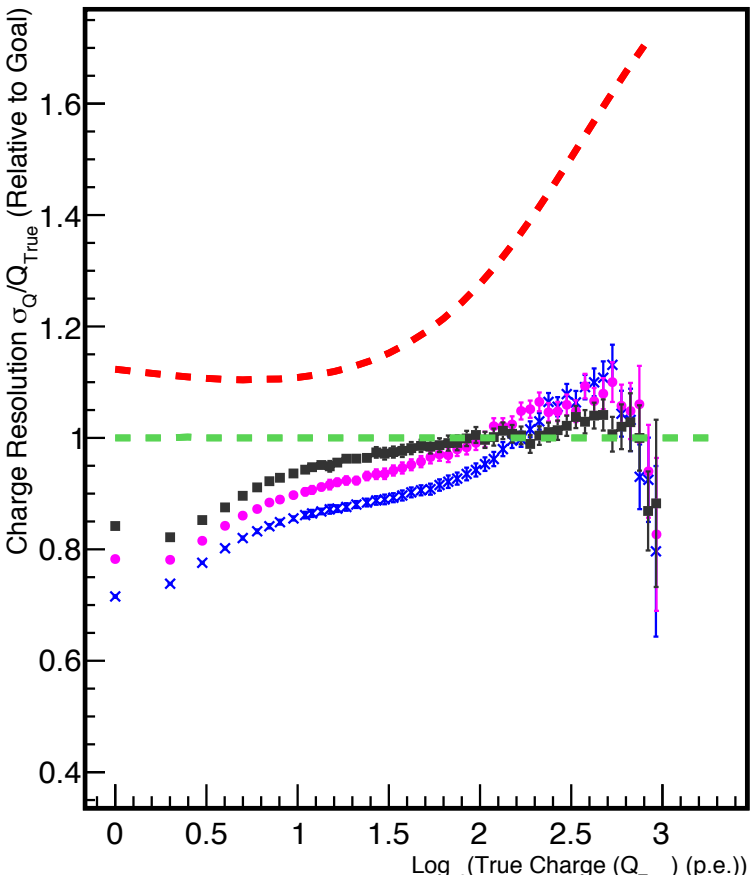


→素子の選定に関わる上記3つのクロストーク確率を夜光と共に組み込んでシミュレーションを行い、電荷分解能への影響を調べる。

夜光 41 MHz

$$\text{電荷分解能} = \frac{\text{出力信号から求めた光電子数のばらつき}\delta Q}{\text{生成した真の光電子数}Q}$$

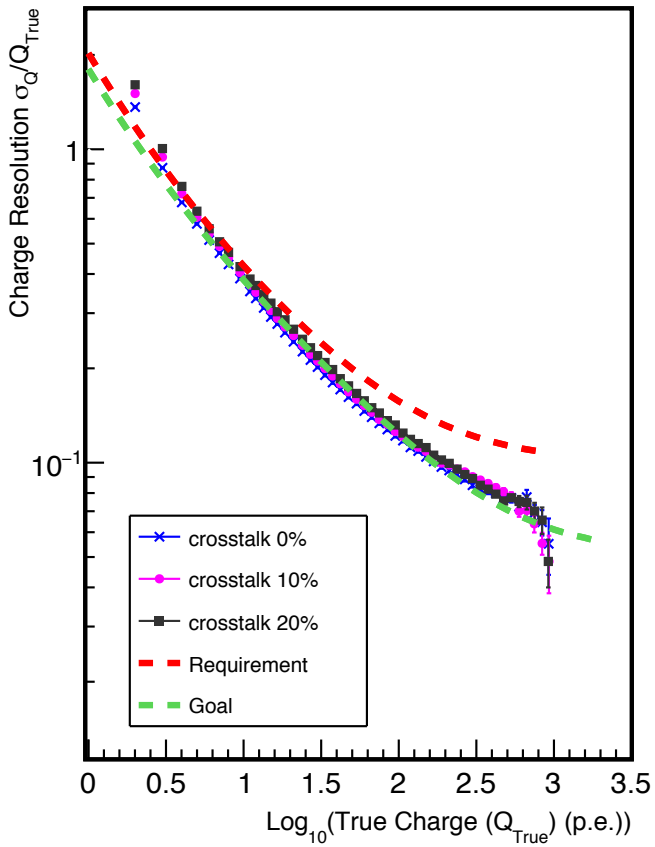


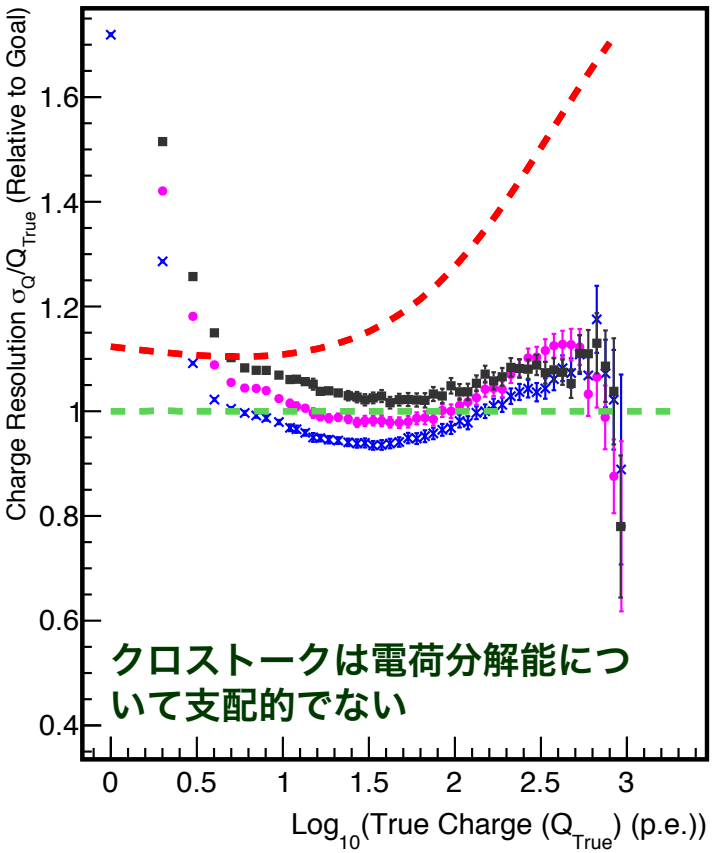


✧ 候補品Bを想定したクロストークレート２0%でもrequirement を満たしている。

夜光 410 MHz

$$\text{電荷分解能} = \frac{\text{出力信号から求めた光電子数のばらつき}\delta Q}{\text{生成した真の光電子数}Q}$$





✧ 低エネルギー側では夜光の影響を強く受けている。

結論

- ✧ 夜光が平常運転時に期待される 41 MHz/pixel 程度では、候補品Bを想定したクロストークレート２0%でも requirement を満たしている。
- ✧ クロストークレートは電荷分解能について支配的でない。
- ✧ 今後はエレクトロニクスのノイズにも注目して評価したい。
- ✧ 夜光がカメラに入射するとクロストークを起こし、感度の低下を招く。そのため、トリガー性能への影響を考えて搭載品を選定する必要がある。