

CTA 報告 210: CTA大口径望遠鏡のための SiPM モジュールの開発(2)

齋藤隆之 (東大宇宙線研)

岩崎啓 (京大理)

他CTA-Japan Consortium

2022 年度 修士論文

大気チェレンコフ望遠鏡の性能向上に向けた半導体光検出器
SiPM カメラの基礎開発

京都大学大学院理学研究科
物理学宇宙物理学専攻
宇宙線研究室

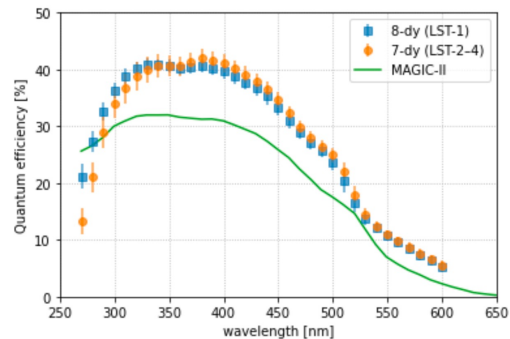
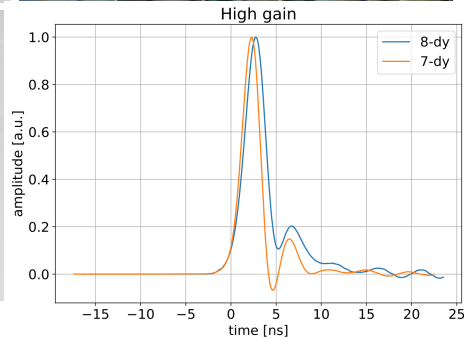
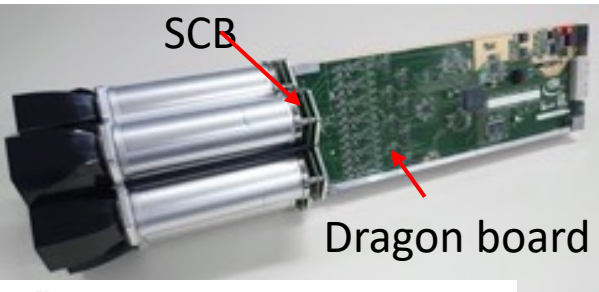
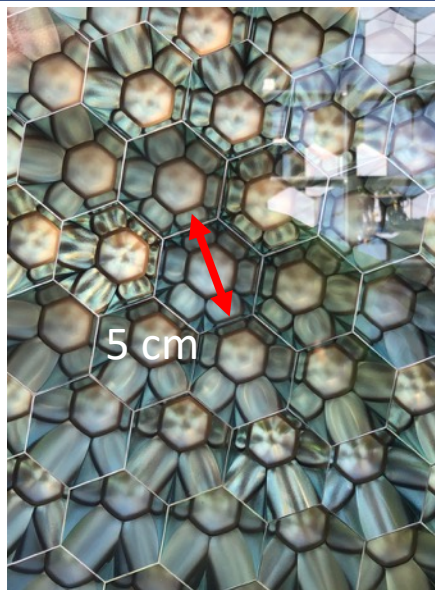
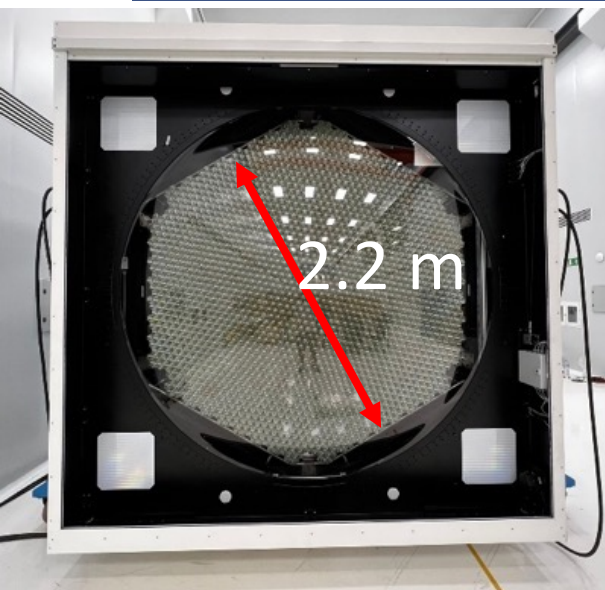
修士課程 2 年
学籍番号 0500331760

岩崎 啓

2023 年 2 月 6 日

2023年春季年会 3月22日 オンライン開催

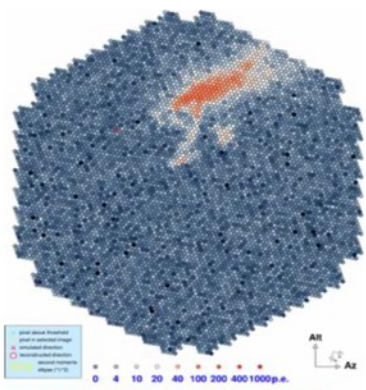
CTA 大口径望遠鏡 (LST)のカメラ



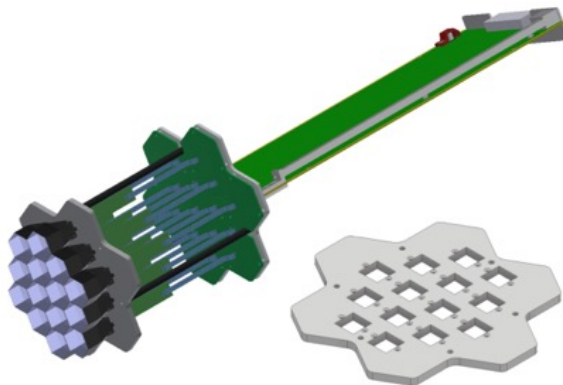
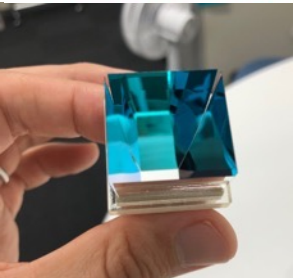
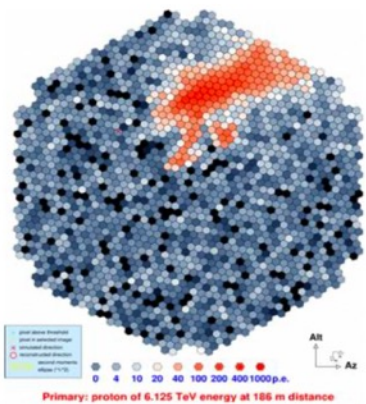
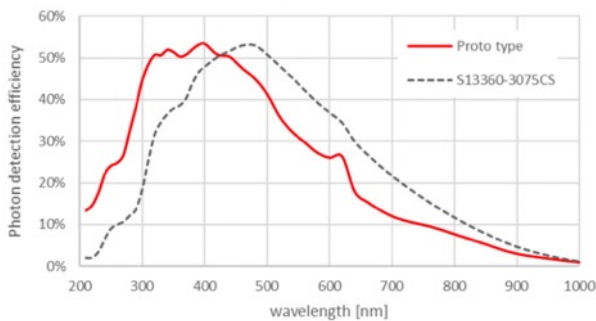
- 1855 PMTs
 - 265 x 7-pixel module
 - 2.2 m diameter
 - 4.5 deg FoV
 - 5 cm pixel
- PMT Hamamatsu R11920/R12992
 - QE ~ 40%
 - ~2.5 ns FWHM
 - Gain ~40000
 - 1000-1100 V
 - 0.2 – 3000 p.e.
 - High/low Gain readout

デザインされたのは10年以上前

SiPMカメラへのアップグレード



S13360-3075 type, w/o resin, Vover= 3V



• 高精細画像で感度を向上させる

- ガンマ線とハドロンのシャワー像には、細かい構造に違いがある
- 光学系の結像性能はすでに $D_{80} \approx 3$ cm (D_{80} = 結像した点源光量の80%が入る領域の直径)
- シャワー像の細かい構造を捉え、**深層学習**アルゴリズムを適用することでガンマ線/ハドロンの弁別能力を向上させる

• SiPMの採用

- 面積は小さい
- より高い量子効率
- より高い光電子分解能
- 月光下の運用でも劣化しない
- 高圧が必要ない
- (磁場の影響もない)

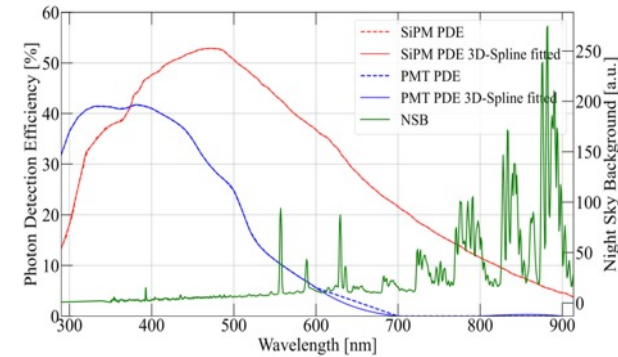
SiPM 採用における問題点

1. 有効面積が小さい

- 画素数をあげても、LSTのピクセルは大きい
- 複数の素子で、信号の合算で対処

2. 赤色への量子効率が高い

- 夜光は赤く、チェレンコフ光は青い
- 素子自体の改良
- ライトガイドによる赤色のカット



3. パルス幅が長い

- 数百MHzの夜光
- 数nsのCherenkov光
- 夜光とチェレンコフ光を切り分けるためにはパルス幅は3 ns程度がベスト

本講演のトピック

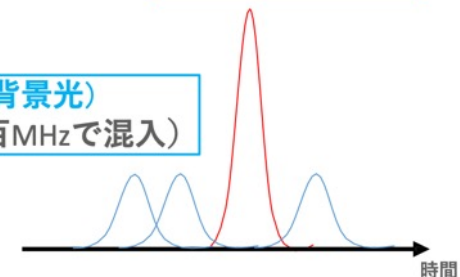


■ チェレンコフ光に背景光が混入した信号のイメージ



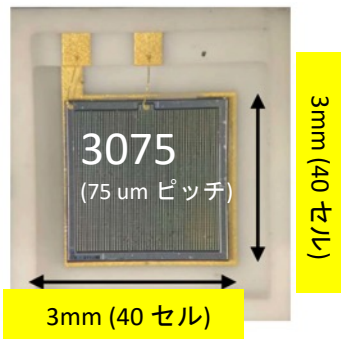
チェレンコフ光
(数nsの信号幅)

夜光(背景光)
(数百MHzで混入)



Hamamatsu MPPC: S13360-3075 CN-UVE

基礎特性



- パルス幅~3 ns
➤ 次のスライド

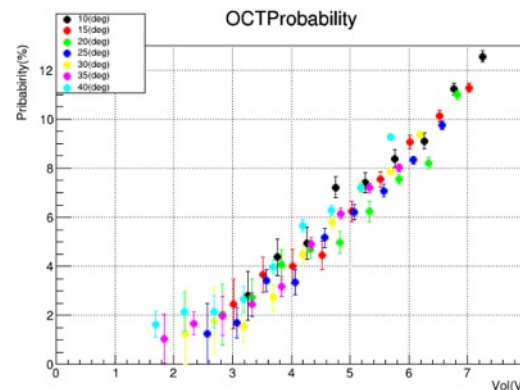
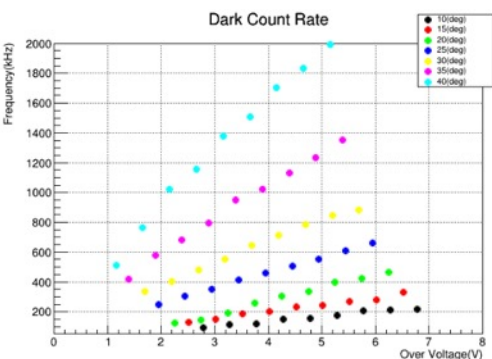
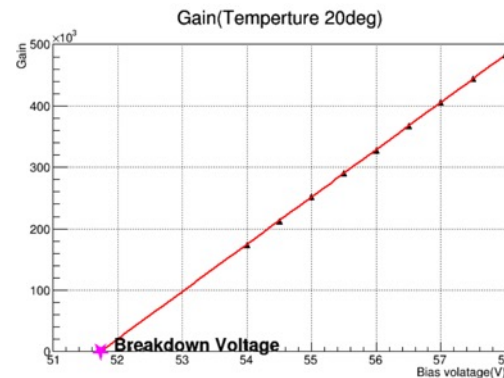
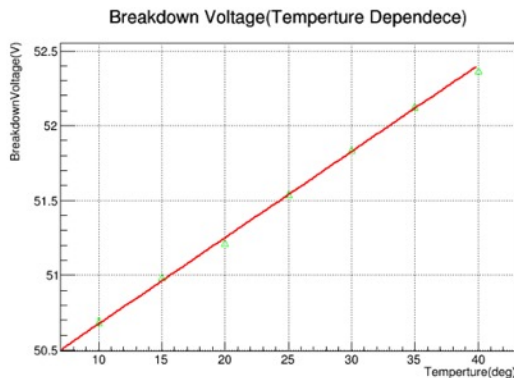
- 降伏電圧
➤ 51.2 V@20 deg,
➤ 52.1 V@35 deg

- ゲイン
➤ 2.3×10^5 @3 V_{ov} , 20 deg

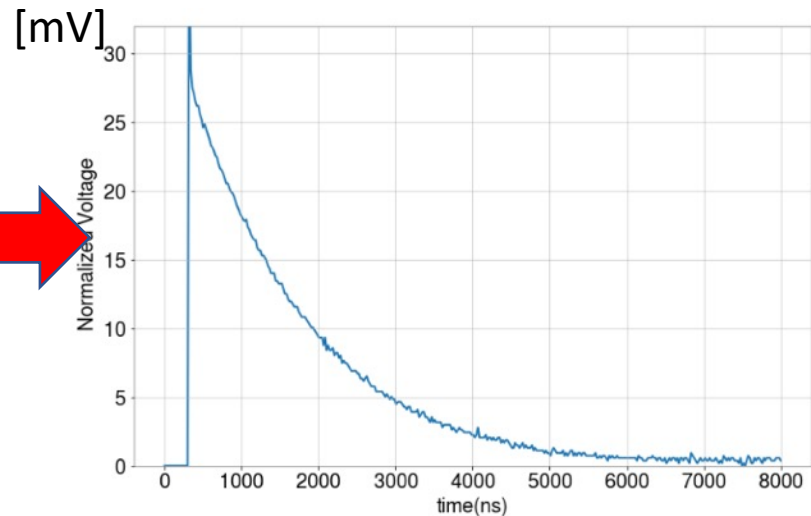
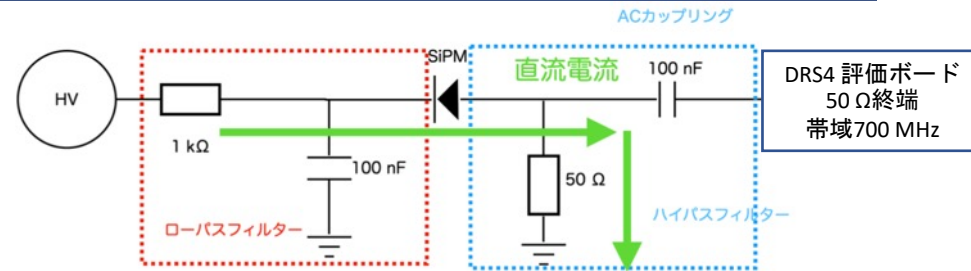
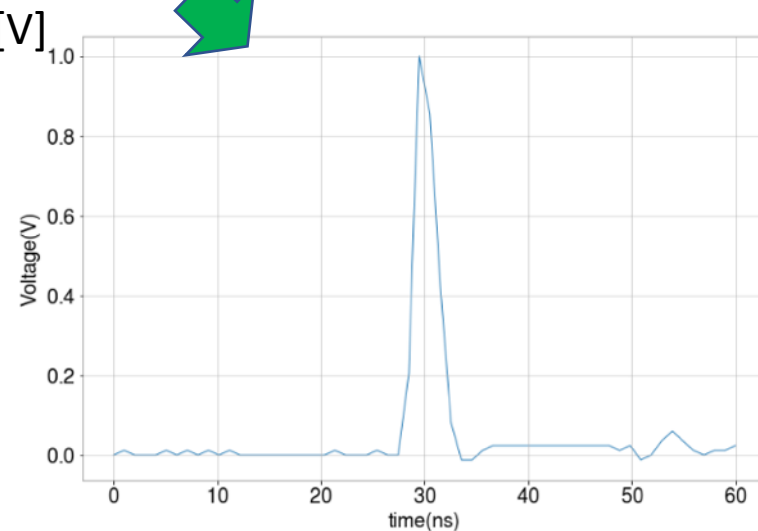
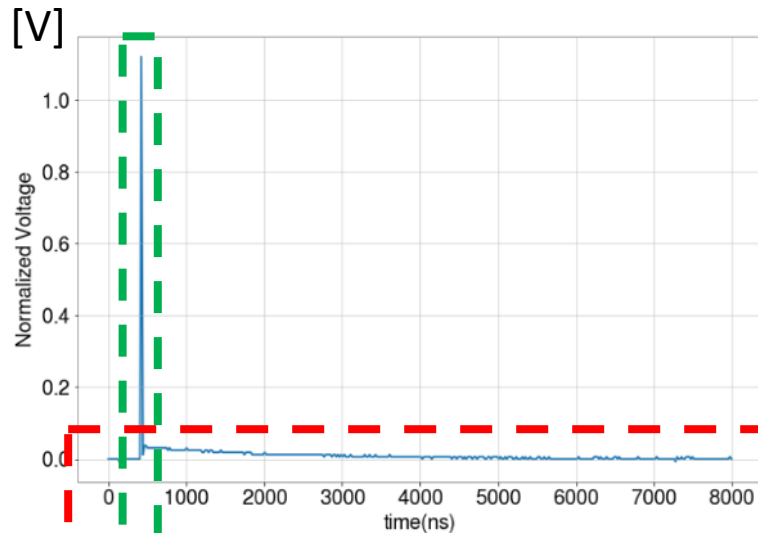
- Dark Count Rate (DCR)
➤ 2×10^5 Hz@3 V_{ov} , 20 deg
➤ 8×10^5 Hz@3 V_{ov} , 35 deg

- Optical Cross Talk (OCT)
➤ ~2% @3 V_{ov}

高速、低DCR、低OCT



波形



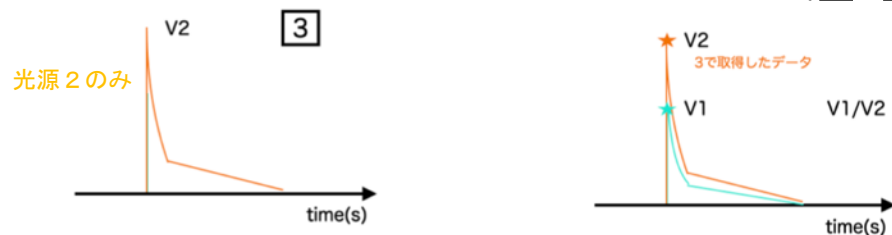
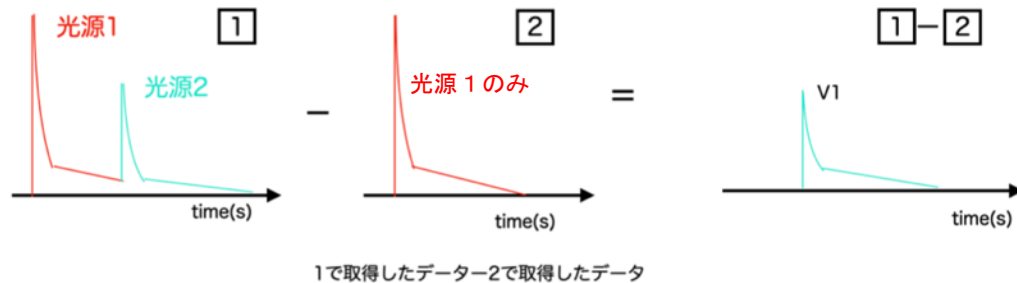
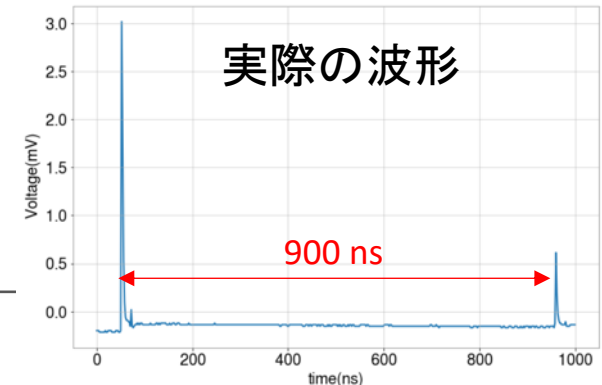
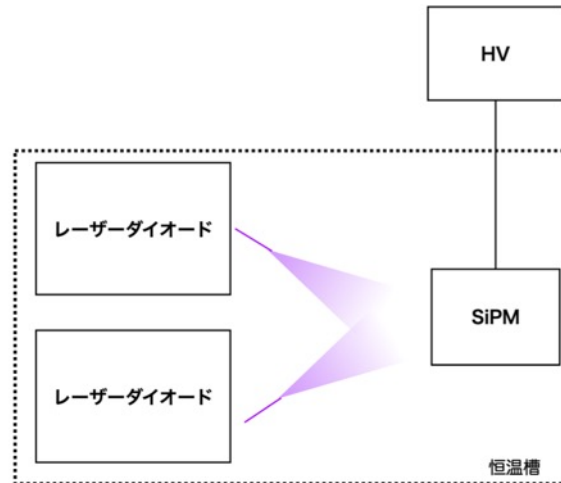
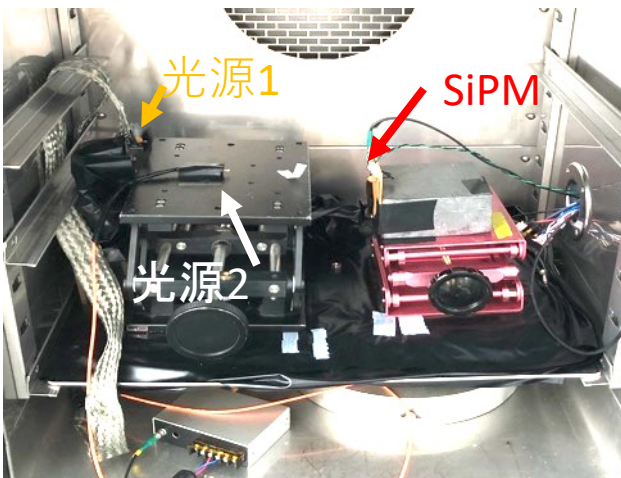
2成分存在する。

高速成分: 2.4 ns FWHM

低速成分: 指数関数的減衰

$$\tau = \sim 2000 \text{ ns (3075)}$$

回復時間測定



【出力波高値の計り方】

十分に明るい光源1で全てのcellを照射

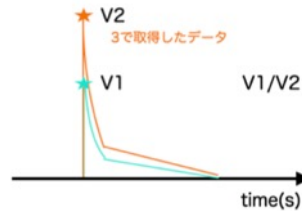
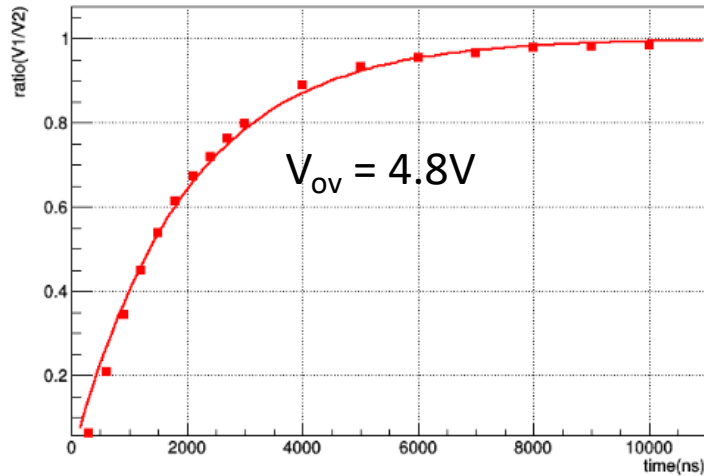
直後に光源2（十分明るい）を照射し出力波高値を測定する。

1000イベント取りその平均をとる

照射の時間間隔と出力波高値の関係を調べる。

回復時間測定結果

Recovery time(56V,20deg)

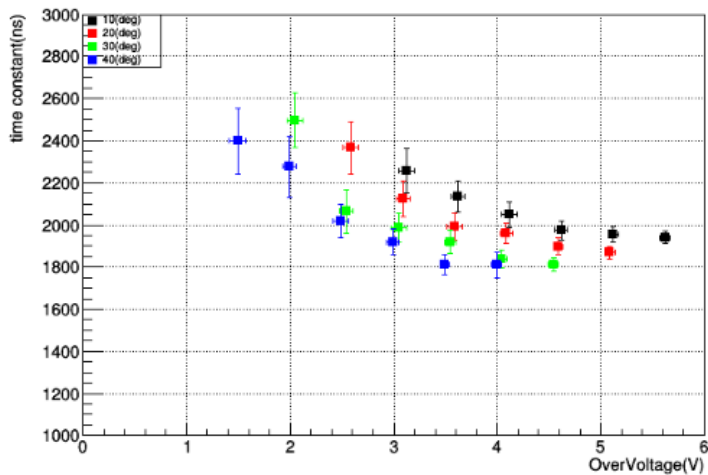


$$1 - \exp(-t/\tau)$$

でよくFit できる。

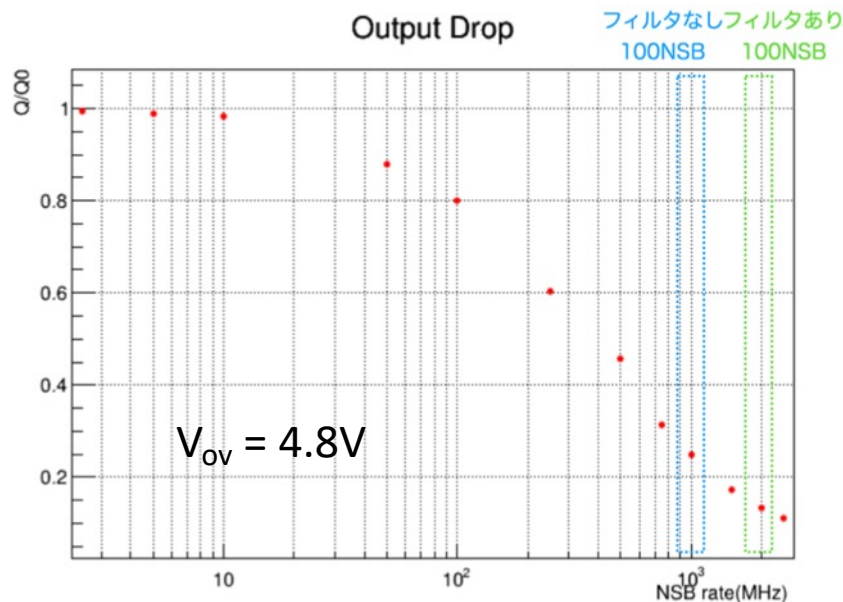
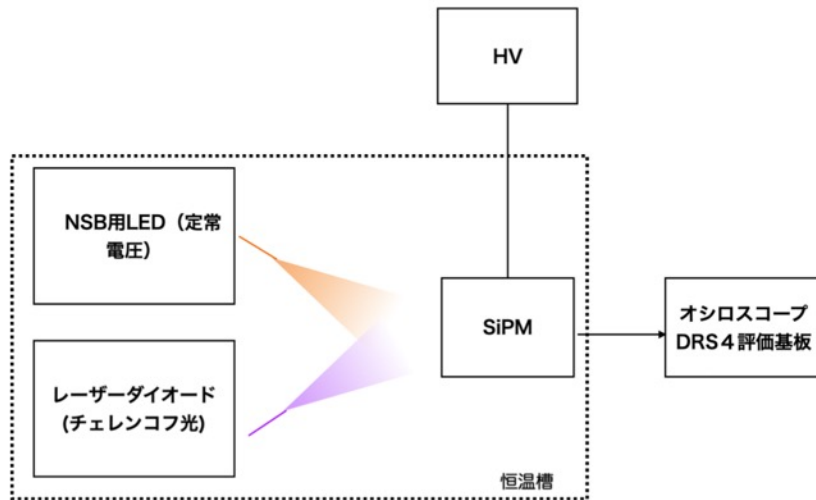
- 時定数 τ は2us程度。
 - V_{OV} 依存
 - 温度依存
- 低速成分の時定数と同程度

Recovery time



月光下観測への影響:実験

- LEDで夜光 (Night Sky Background, NSB)を再現
- 月のない夜のNSBの100倍まで調べる
- パルスを照射し、出力電荷を計測。NSBレベルと出力電荷の関係を調べる。
- 顕著な出力電荷 (波高値) の低下が見られた

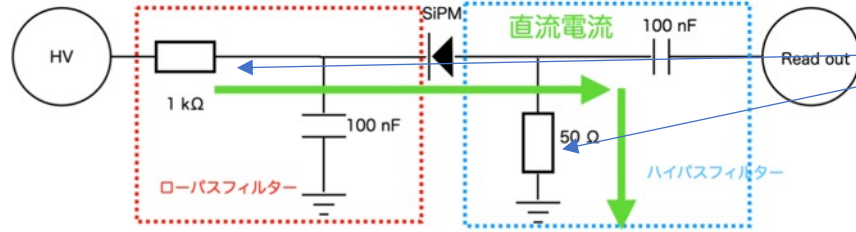


この低下の原因は3つ考えられる

- ① 定常電流 x 保護抵抗による電圧降下
- ② (定常電流による)温度上昇による降伏電圧の上昇
- ③ Cell の遅い回復時間による実効 V_{ov} の低下

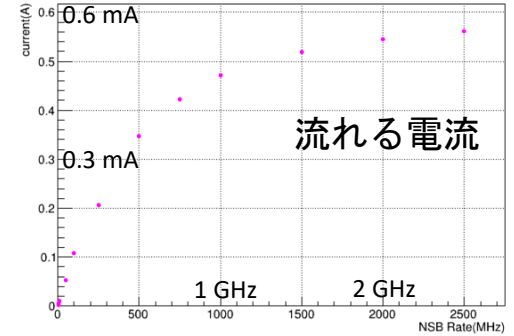
月光下観測への影響: シミュレーション

ACカップリング

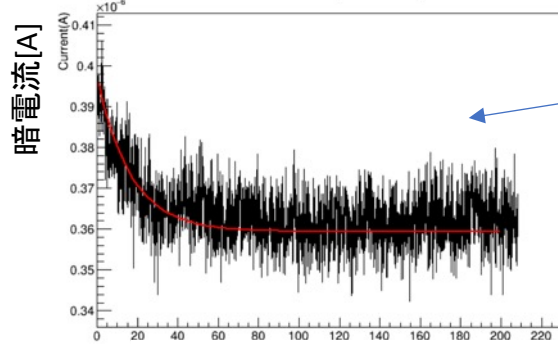


① 電圧効果はこの1050 Ωから計算

DC Current

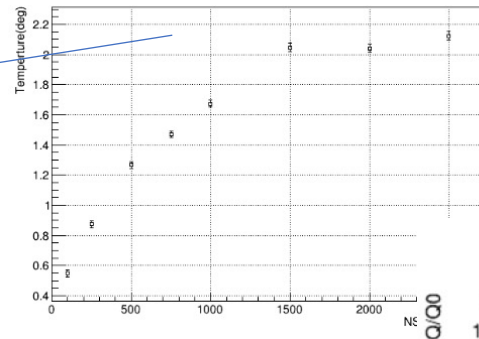


Dark current(2000MHz)



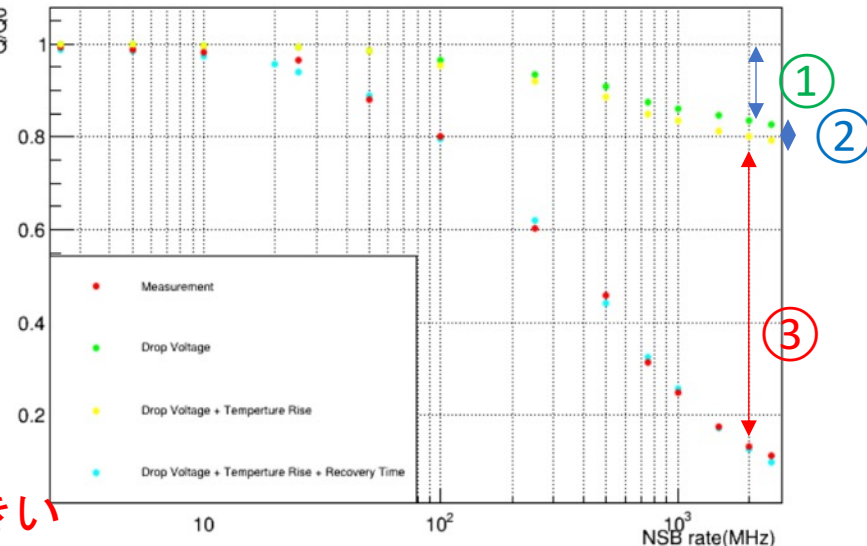
LED照射終了後からの時間[秒]

Temperature Rise

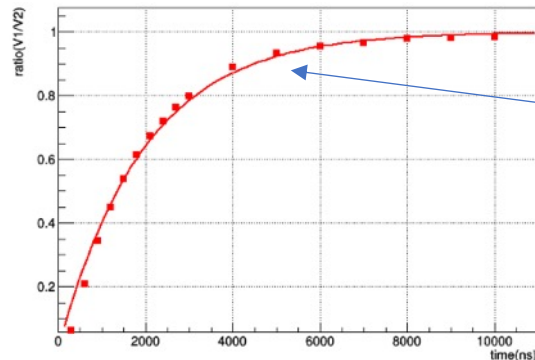


LED照射を止めると、時間をかけて暗電流が減少していく。温度が下がっていると解釈できる。この測定から②温度上昇とそれに伴う降伏電圧の上昇を見積もる

Output Drop (3075 case)



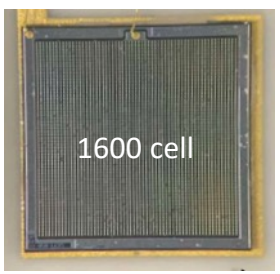
Recovery time(56V,20deg)



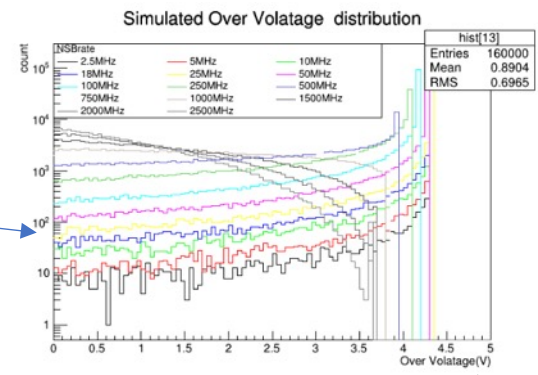
③ 回復時間の測定から、NSBを検出した各セルの V_{OV} が一時的に低下することをシミュレーション

③の影響が一番大きい

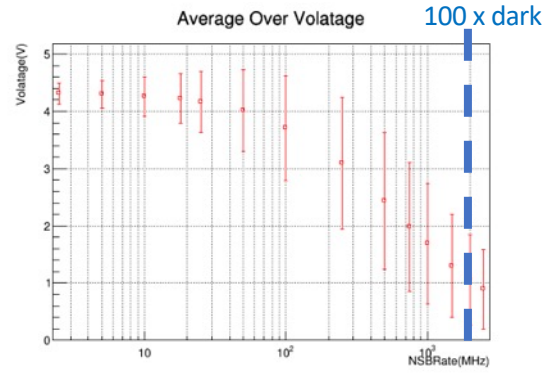
月光下観測への影響: 検出効率、分解能



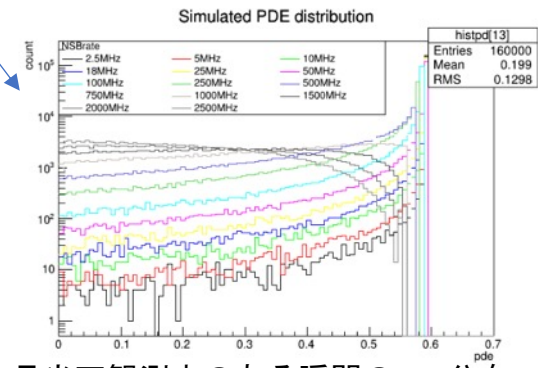
ある瞬間の1600 cellの
 V_{ov} , PDE分布
(シミュレーション)



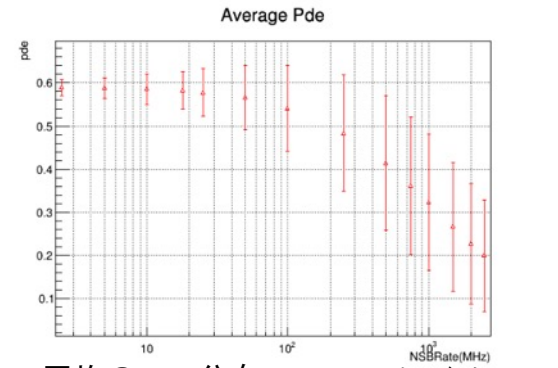
月光下観測中のある瞬間の V_{ov} 分布



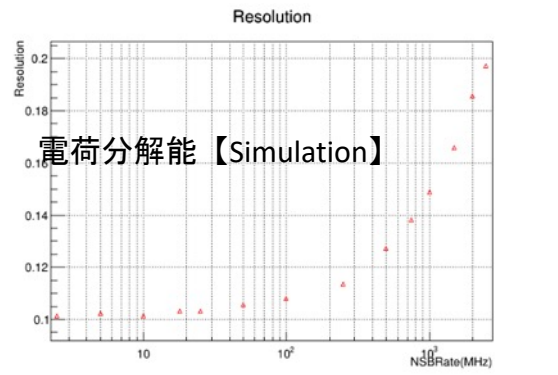
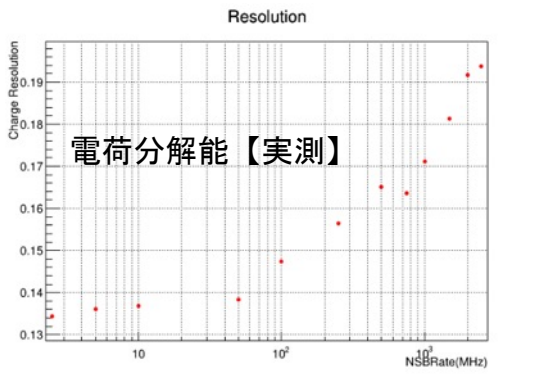
平均の V_{ov} vs NSB レベル



月光下観測中のある瞬間のPDE分布



平均のPDE 分布 vs NSB レベル

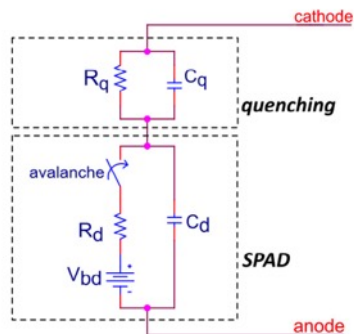


長い回復時間 x 高いNSB rate
= V_{ov} が非一様に

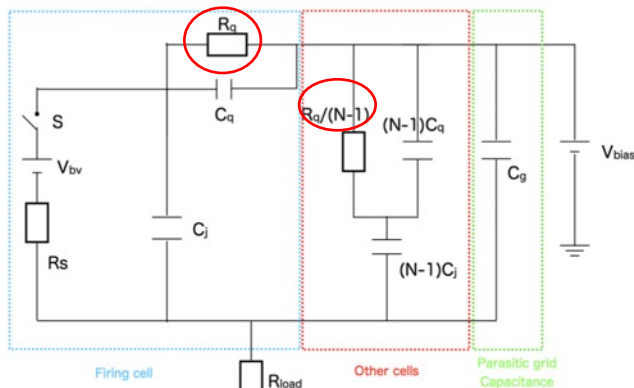
- 平均PDEは劣化
 - 10 x darkで20%減
 - 100 x darkで66%減
- ゲインの分布も広がる
 - 10 x darkで10%劣化
 - 100 x darkで80%劣化

dark: 月のない時の夜光

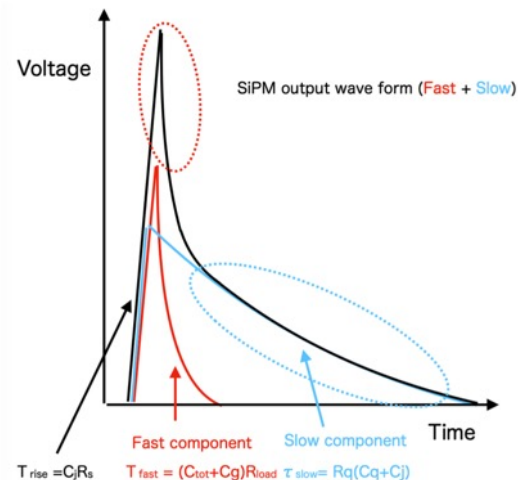
そもそも、なぜ高速なのか



G-APDの等価回路



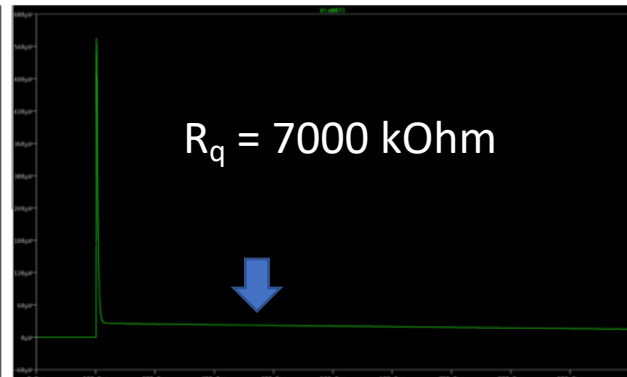
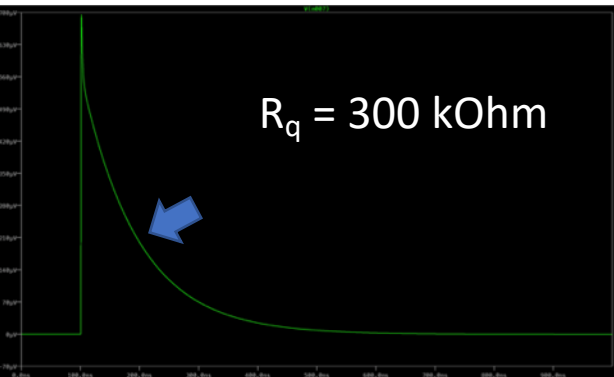
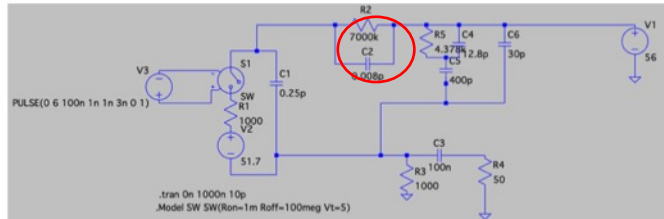
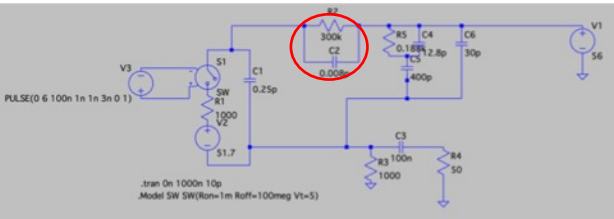
SiPMの等価回路



- 2成分出てくる
- クエンチング抵抗を大きくすることで、低速成分の時定数を非常に大きくして、高速成分を際立たせることができる

o

- つまり、“高速にする”ことで回復が遅くなる
- この素子がLSTにとってベストかどうかは、月光下の観測に対する戦略依存



まとめ

- CTA-LSTのカメラのアップグレードに向けてさまざまなSiPMの特性を研究している
- “高速”SiPM, S13360-3075 CN-UVE を試験
- 3ns程度の高速パルスには、2usの低速成分も付随する
- クエンチング抵抗が非常に大きいことによる。
- 回復時間が2 usであるため、月光下などの観測で、PDEや、電荷分解能が劣化する。

- この素子がLSTにとってベストかどうかは、月光下の観測に対する戦略に依存する。観測対象を考慮にいった研究、検討、議論を続けていく。