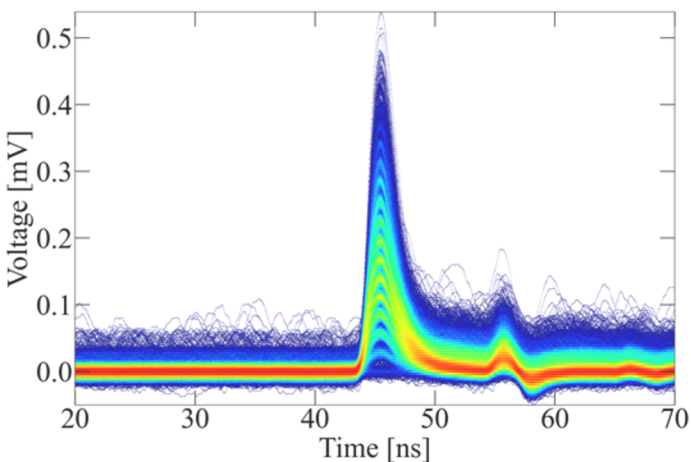


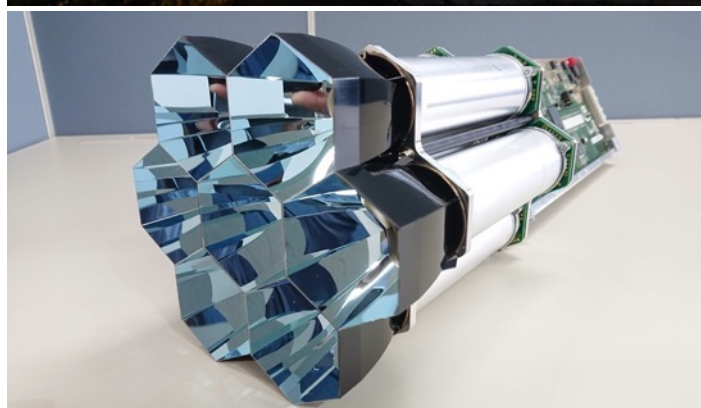
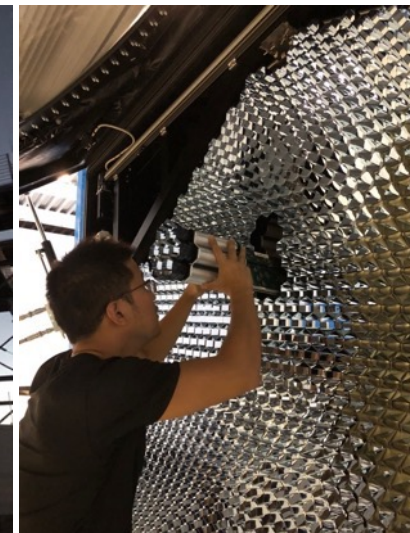
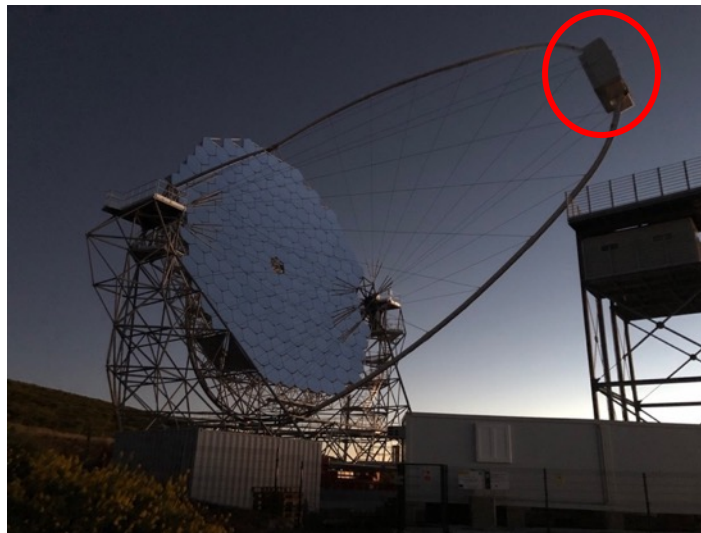
CTA大口径望遠鏡の高画素化に向けた SiPMモジュールの開発

齋藤隆之、橋山和明、大岡秀行 (東大宇宙線研)
他CTA-Japan Consortium



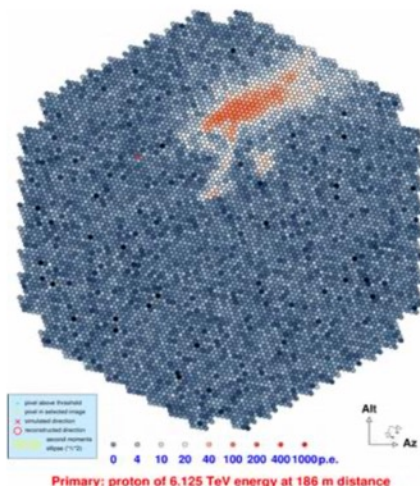
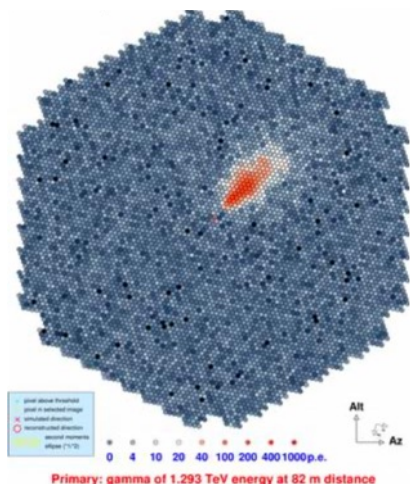
LSTカメラの仕様

- 視野 4.5 度
- 1855 ピクセル
- 1.5 インチPMT (視野0.1度)
 - 浜松R11920
- 夜光バックグラウンド
250 MHz/pixel
- 信号パルス幅 3 ns
- 消費電力11 kW (観測時)
- 水冷+空冷
- 内部の温度の安定性 23+-2度

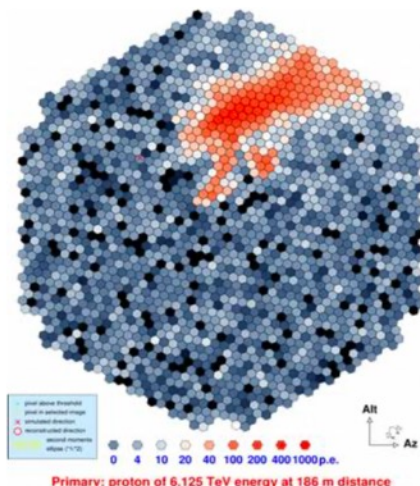
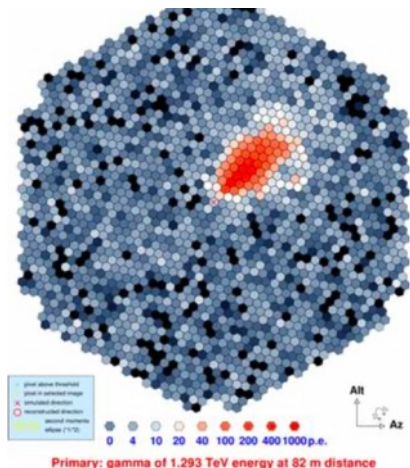


カメラの高画素化

7800 ピクセルカメラ



1855 ピクセルカメラ(現行)



1.3 TeV Gamma

6.1 TeV Proton

- 光学系のPSFは、分割鏡の高精度制御により、現在のピクセルサイズの半分までにまで改善可能
- 画素数を4倍に増やすことで、シャワー像をより詳細に撮像
- ガンマ/ハドロン弁別、角度分解能の向上が期待できる
 - CNN技術の採用でさらなる発展も？

• 画素が小さくなると Silicon Photomultiplier (SiPM) が採用可能？

- より高い検出効率 (ただし夜光も)
- 1000Vは必要ない
- ほとんど劣化しない

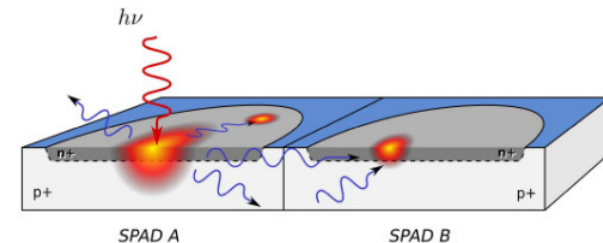
SiPMは本当に採用可能か？³

1) 夜光光子が数百MHzで到来する。**パルス幅を 3ns** 程度に抑えられるか？

2) **ダークカウント**がトリガーや解析に影響を与えないか？

3) **Optical Crosstalk** (OCT)がトリガーや解析に影響を与えないか？

OCT: あるセルでのアバランシェ増倍過程で光子が生成され、それが隣のセルでアバランシェを引き起こす



4) **ゲインの温度依存性**は問題ないか？

5) ピクセルが小さくなるといえど、1インチ（集光器出口で12 mm角程度）。4素子の**信号を合算**することは可能か？

浜松ホトニクス S14521-0742

■ Structure

Parameters	Value	Unit
Effective photosensitive area	6.0 x 6.0	mm ²
Number of channels	16 (4 x 4)	-
Pixel pitch	75	μm
Number of pixel / channel	6,312	-
Window	without resin	-
Window refractive index	-	-

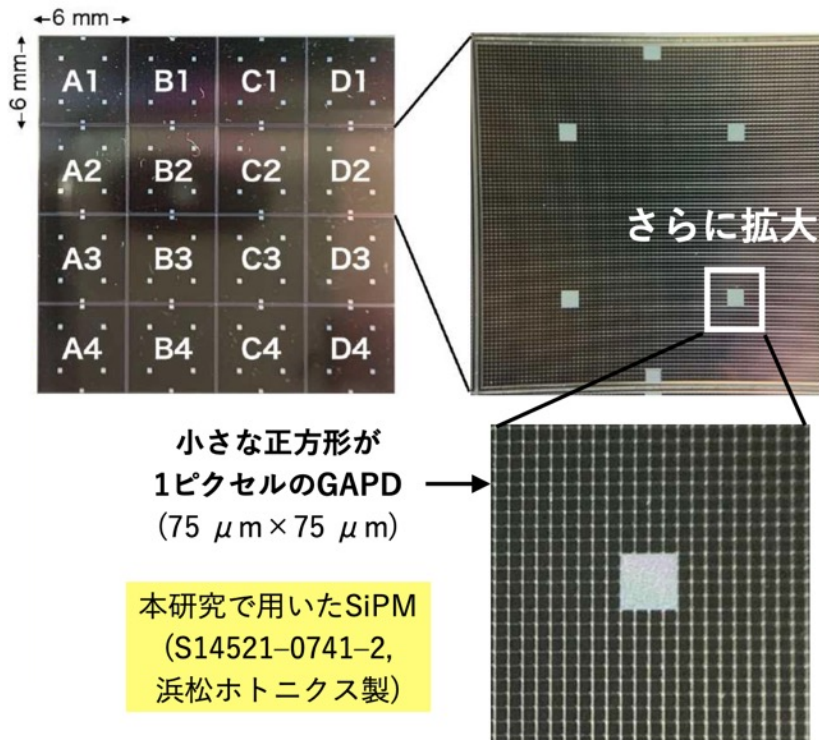
■ Electrical and optical characteristics

(Typ. T = 25 deg C, Vr = Vop unless otherwise noted)

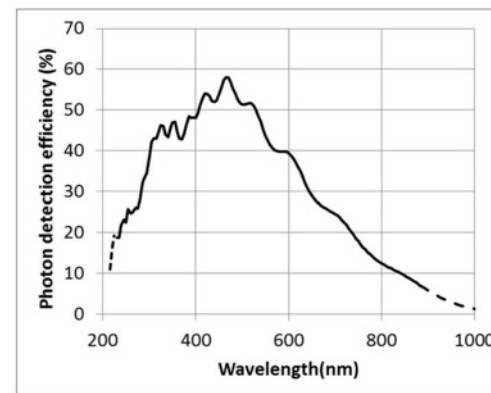
Parameters	Symbol	Value (typ.)	Unit
Spectral response range	λ	220 to 900	nm
Peak sensitivity wavelength	λp	465	nm
Photon detection efficiency at λp *3	PDE	55	%
Breakdown voltage	Vbr	38 +/- 3	V
Recommended operating voltage *4	Vop	Vbr + 3.0	V
Vop variation	ΔVop	0.15 (MAX: 0.3)	V
Dark count rate / channel	DCR	3.0 (MAX: 9.0)	Mcps
Crosstalk probability	Pct	3	%
Terminal capacitance at Vop / channel	Ct	2000	pF
Gain	M	6.0 x 10 ⁶	-
Temperature coefficient of reverse voltage	ΔTVop	34	mV/deg C

*3 : Photon detection efficiency does not include crosstalk and after pulse.

*4 : Refer to the data attached for each products.



■ Photon detection efficiency v.s. Wavelength (Vr = Vop = Vbr + 3.0V)



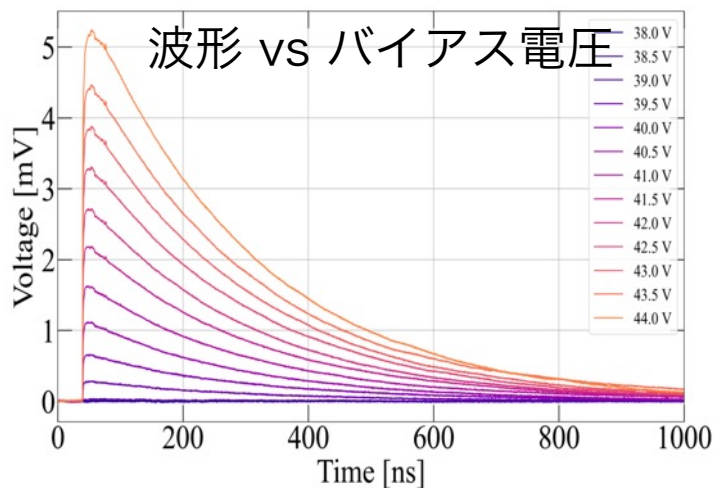
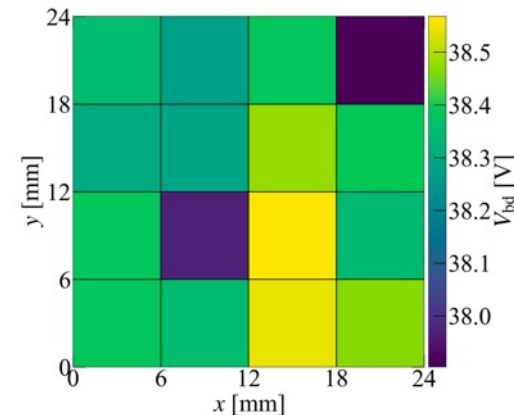


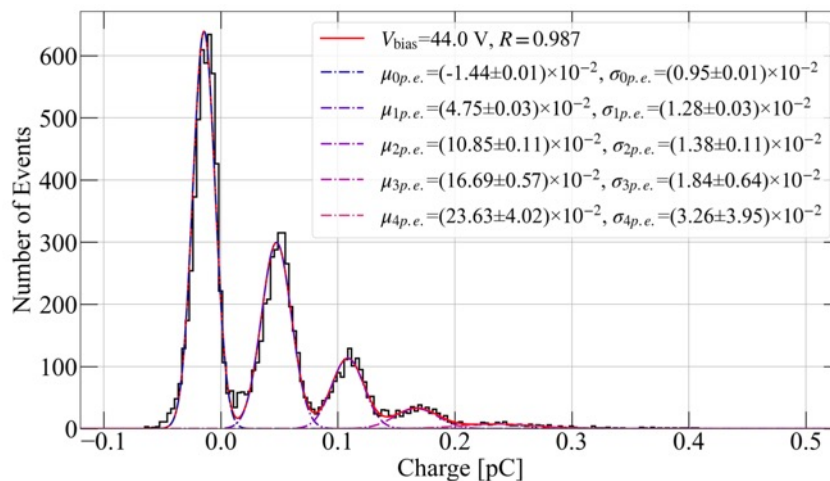
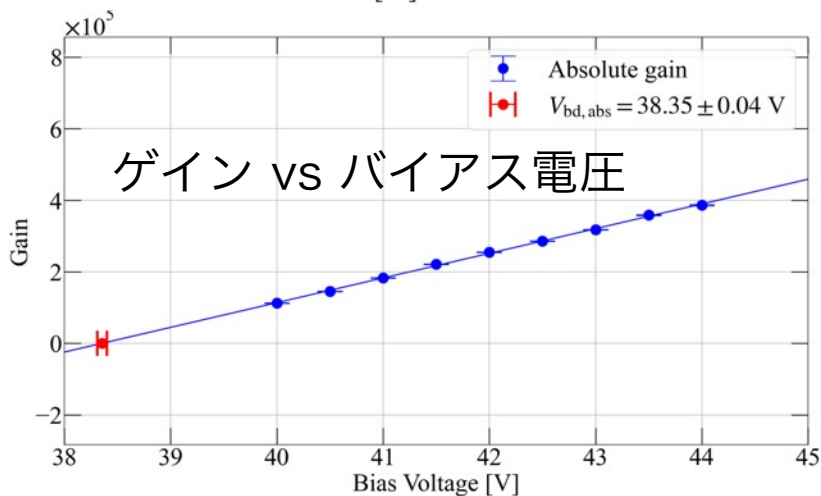
表 5.3: PZC 回路実装前における全 16 チャンネルでの平均波形の時定数

チャンネル	時定数 [ns]	チャンネル	時定数 [ns]
A1	261.18 ± 0.06	C1	260.65 ± 0.05
A2	268.32 ± 0.04	C2	261.68 ± 0.05
A3	296.37 ± 0.07	C3	257.87 ± 0.04
A4	287.88 ± 0.06	C4	298.15 ± 0.06
B1	261.01 ± 0.05	D1	265.81 ± 0.05
B2	251.99 ± 0.05	D2	262.13 ± 0.05
B3	254.75 ± 0.07	D3	261.49 ± 0.05
B4	268.38 ± 0.07	D4	271.01 ± 0.05



Fall Time 250-300 ns

V_{br} 37.9 – 38.6 V

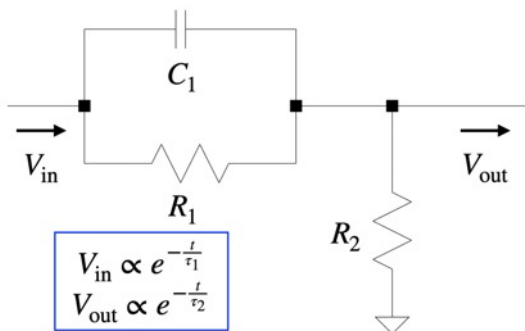


ペDESTALの標準偏差 ~0.2 p.e.

1 光子電荷の標準偏差 ~ 0.25 p.e.@44V

- 目的
夜光の影響を避けるため、パルス幅を3ns以下に整形する
- 方法

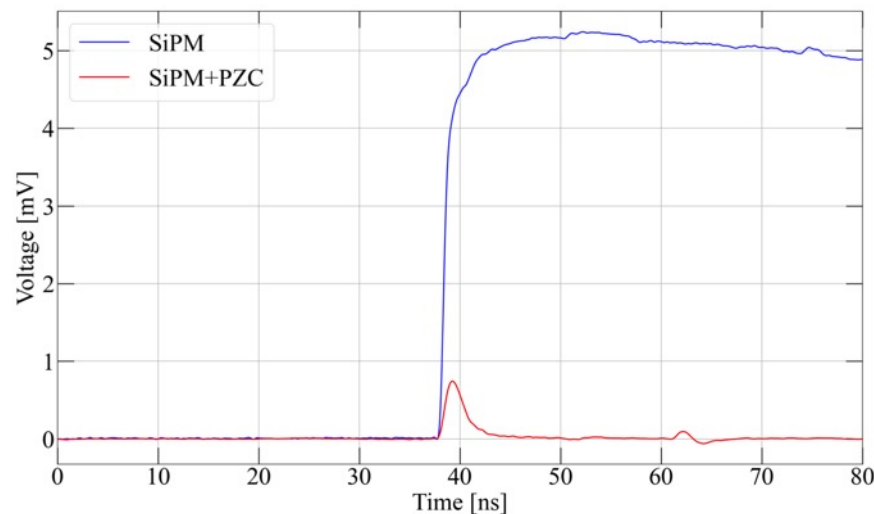
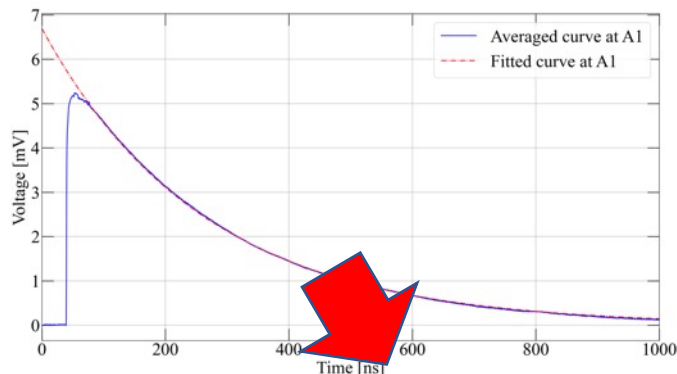
Pole Zero Canceller (PZC回路)



$$\tau_1 = R_1 C_1$$

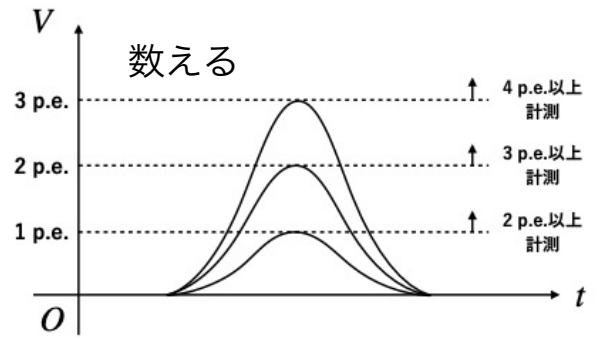
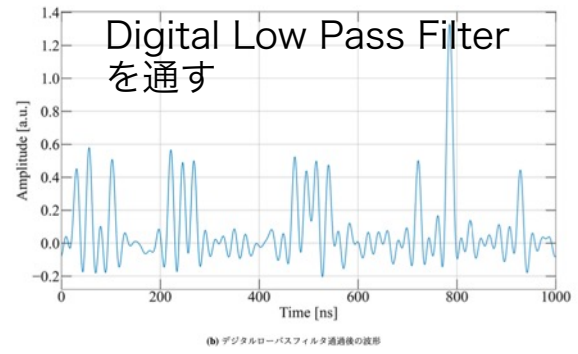
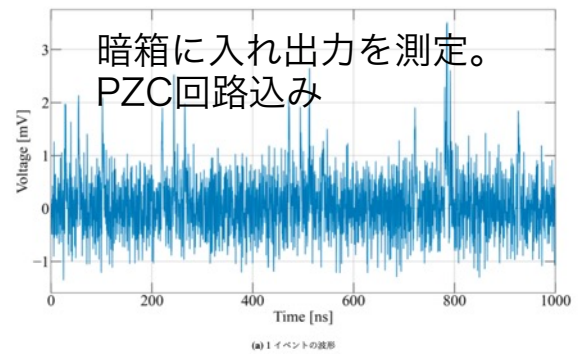
$$\tau_2 = \left\{ \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right\}^{-1}$$

$R_1=30 \text{ k}\Omega$
 $R_2=510 \text{ }\Omega$
 $C_1=10 \text{ pF}$ を採用

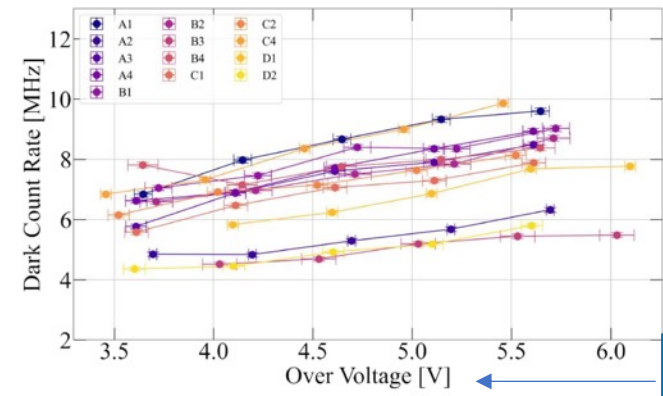


FWHM 1.7 nsに減少させることに成功
 ただし、**振幅も1/7に減少**
 アンプの調整で対応

- 測定方法

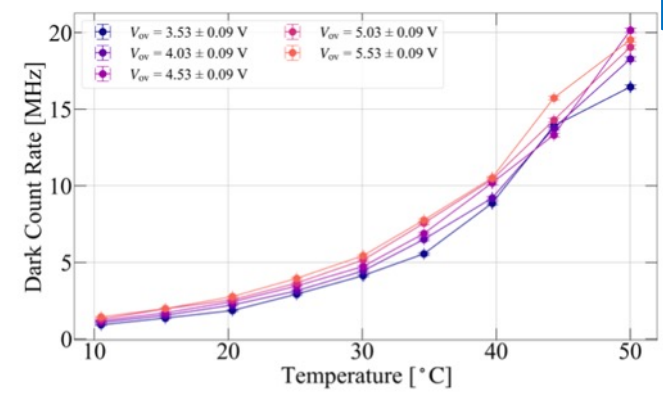


- 結果



チャンネルごとのばらつき大

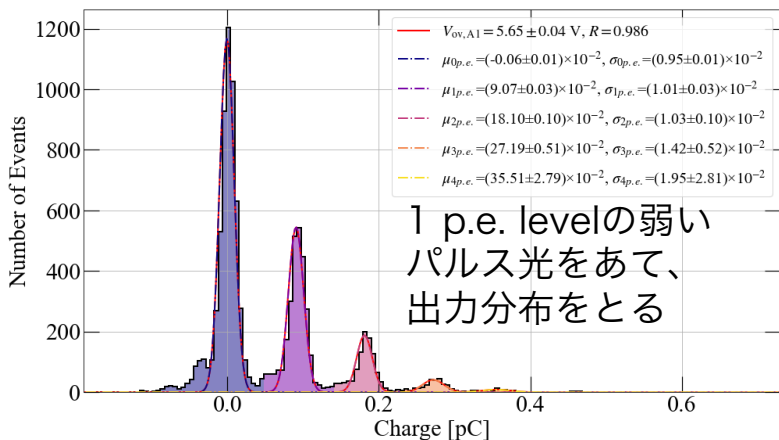
Over voltage
= バイアス電圧 - 降伏電圧



温度依存性大

25°Cで、Over Voltage 5.5Vで、**最大10 MHz / 素子**
夜光は ~20 MHz / 素子。
大問題ではないが、カメラの冷却の強化も視野にいれる。

測定方法

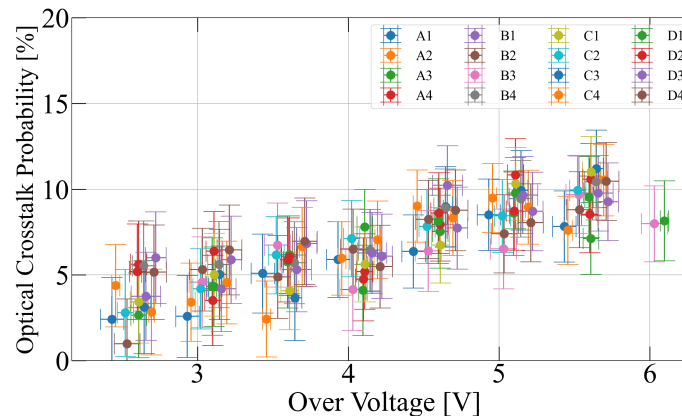


- 出力電荷分布から、0光子検出の確率(P_0)と1光子検出の確率(P_1)を求める
- 検出光子数がポアソン分布に従うと仮定し、 P_0 から平均の光電子数 λ を求める。
- λ から、ポアソン分布に従った場合の1光子の検出確率 P'_1 を求める。
- クロストークの分、 $P'_1 > P_1$ 。クロストークの確率は、 $(P'_1 - P_1) / P'_1$

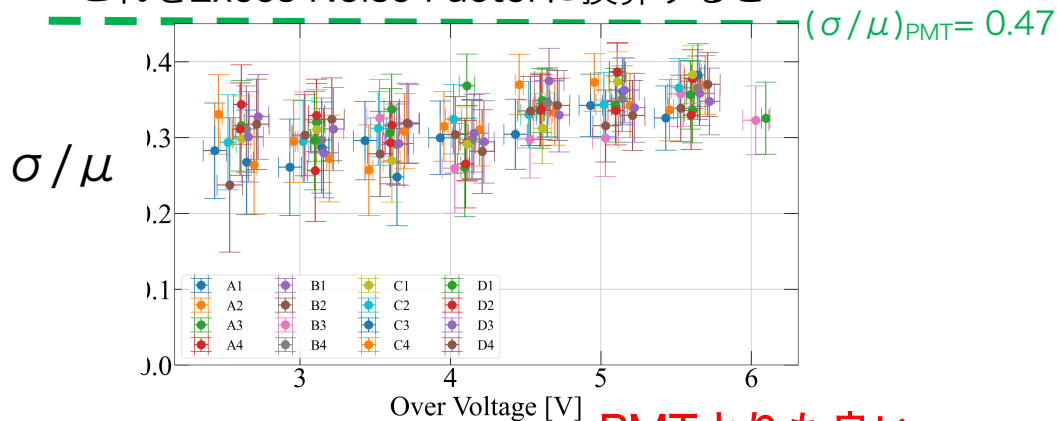
$$P(\lambda, k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

(参照: ポアソン分布)

結果



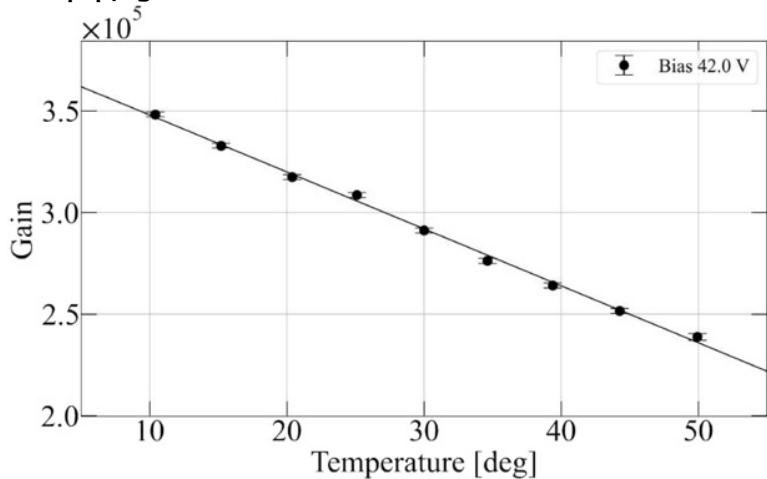
これをExces Noise Factorに換算すると



$$\begin{aligned} F^2 &= 1 + \sigma^2 / \mu^2 \\ &= 1 + (\sigma_{1pe}^2 + \sigma_{oct}^2) / \mu^2 \\ &= \sim 1.16 \end{aligned}$$

PMTよりも良い
($F^2_{PMT} = 1.22$)
ただし最終的な評価にはシミュレーションが必要。

目的

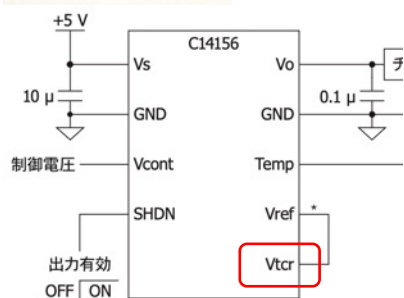
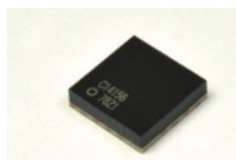


-0.92% / °Cの温度依存性。PMTは0.1%/°C
Passiveな補償回路でPMTレベルまで落としたい

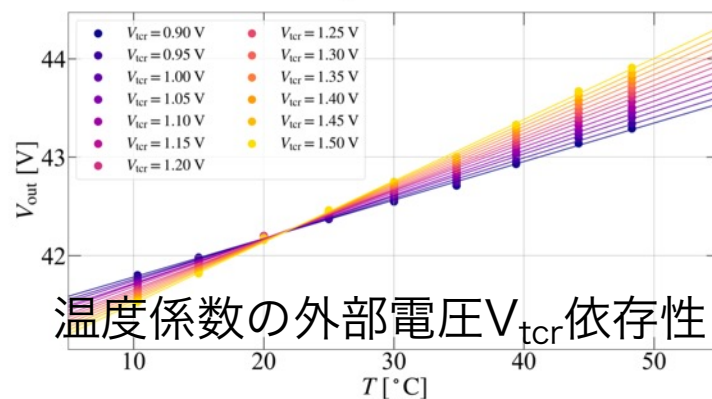
方法

電源回路C14156 +サーミスタで温度に依存したバイアス電圧をかける。

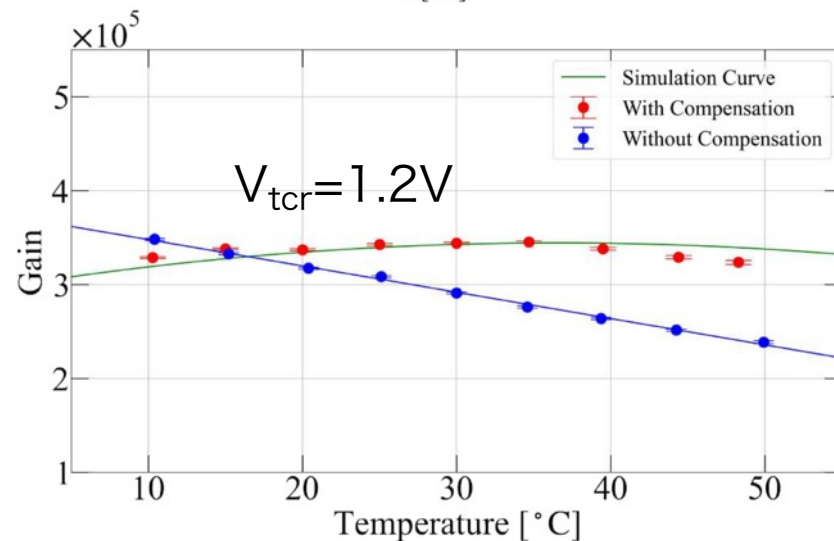
温度係数は外部電圧 V_{tcr} でチューニングする。



結果



温度係数の外部電圧 V_{tcr} 依存性



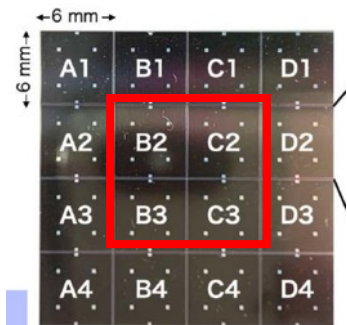
25-35 °C の範囲で、0.08 %/°Cまでに落とした

目的

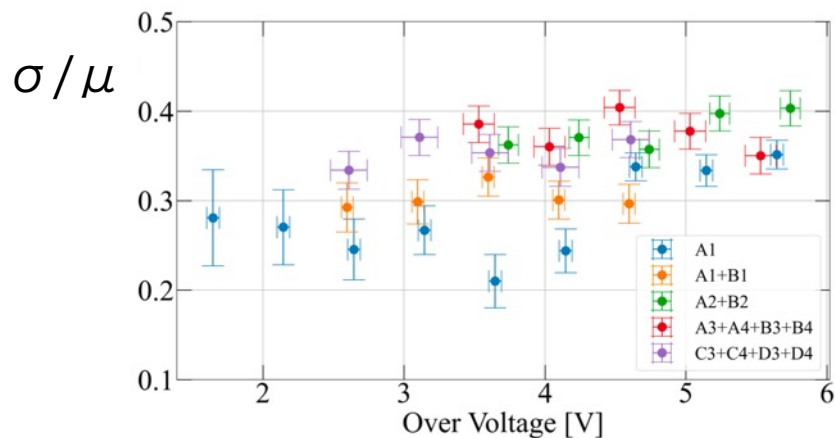
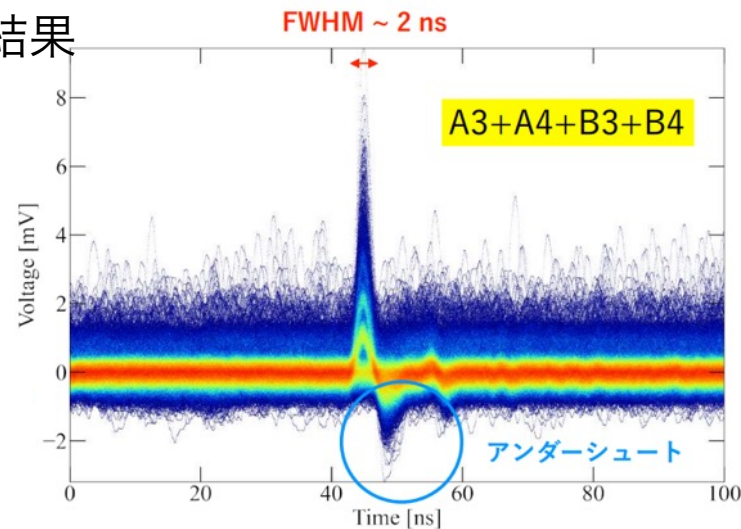
12 mm角のピクセルを6mm角のSiPMで実現するため4素子の信号を合算する。

波形やExcess Noise Factorは、劣化させたくない

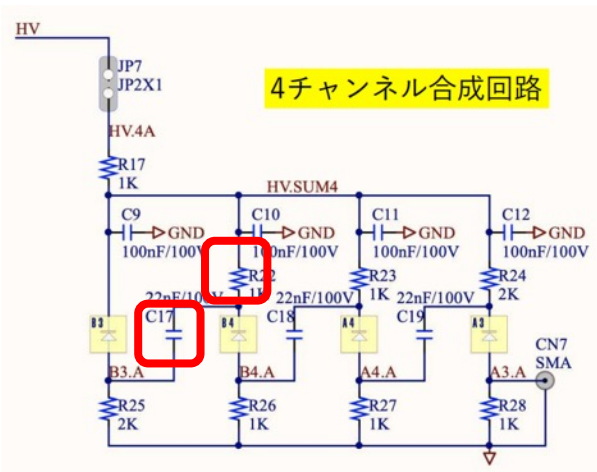
方法



結果



バイアス電圧は並列にかかるが
早い信号は合成容量の影響を受けない



MEG実験で開発された回路を参考

2 nsの幅を維持し、Excess Noise Factorも、1.2以下を維持

- CTA大口径望遠鏡の高画素化に向けて、SiPMの採用可能性についてスタディした
- 250 – 300 nsのパルス幅をPZC回路で2ns程度に縮めることに成功
- ダークカウント、オプティカルクロストークは大きな問題にならないことが示された（シミュレーションによる最終確認は必要）
- ゲインの温度依存性も、Passiveな補償回路により0.08%/°Cに低減させることができた
- 4素子の信号合成も可能であることが示された