

次世代大気チェレンコフ望遠鏡の ための新しいフォトン検出器の開発

東海大理・西嶋恭司，櫛田淳子，+院生

東大宇宙線研・福島正己，

KEK・吉村浩司，田中真伸，中村勇

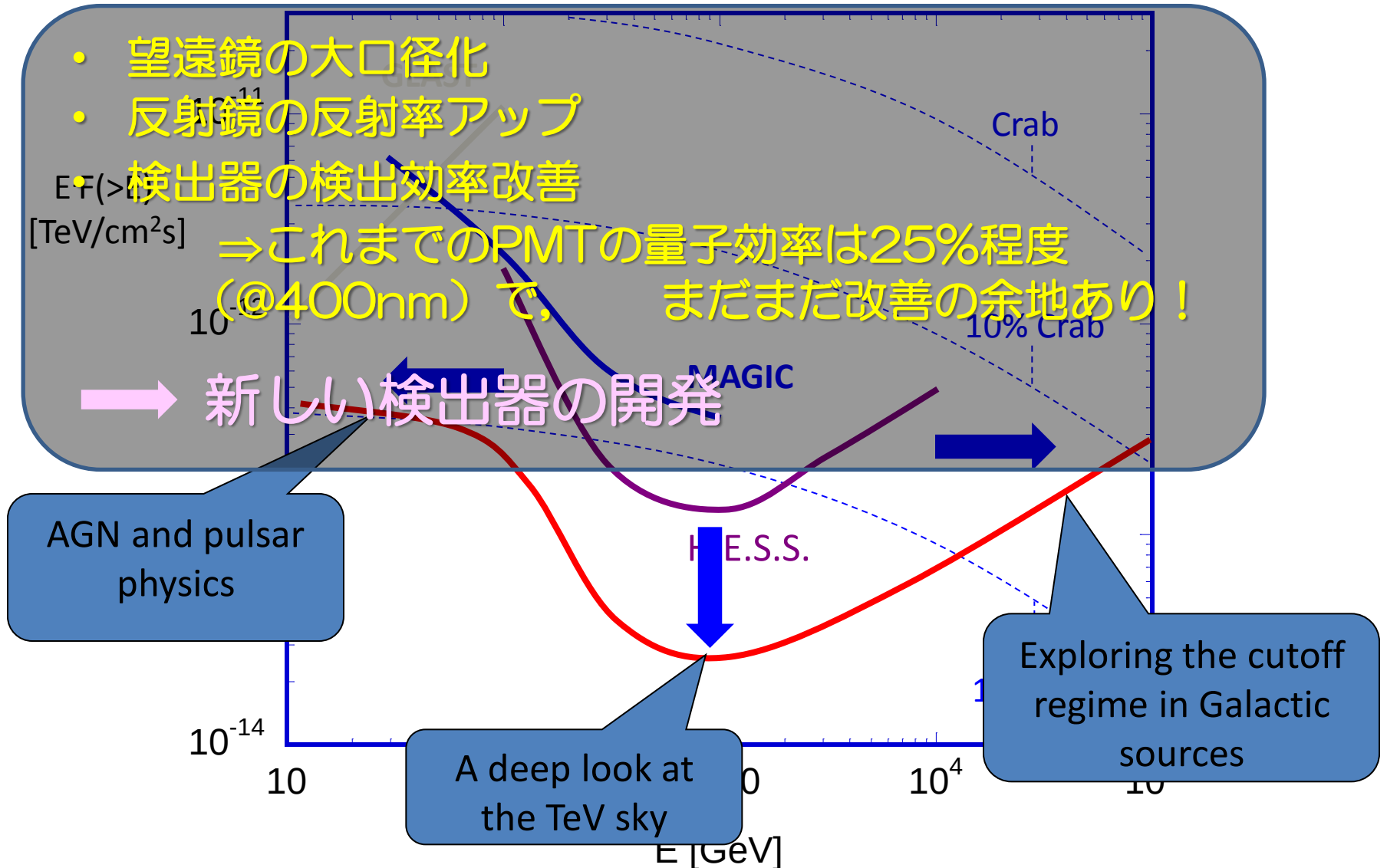
アウトライン

- Introduction : フォトン検出器開発の動機
- SiPMについて
- MPPC (HPK) の特性評価
- 高速読み出し回路
- 今後の課題とまとめ

宇宙線実験におけるフォトン検出器

- TeV-PeVガンマ線
 - 大気チェレンコフ望遠鏡：大気チェレンコフ
 - 地上アレイ：シンチレータ・水チェレンコフ
- UHE宇宙線
 - 地上アレイ：シンチレータ・水チェレンコフ
 - 大気蛍光望遠鏡：大気蛍光
- ニュートリノ
 - チェレンコフ望遠鏡：水（氷）チェレンコフ
- ダークマター
 - シンチレーション検出器：シンチレータ
- ほぼすべての実験が、フォトン検出に依っている：光電子増倍管（PMT）

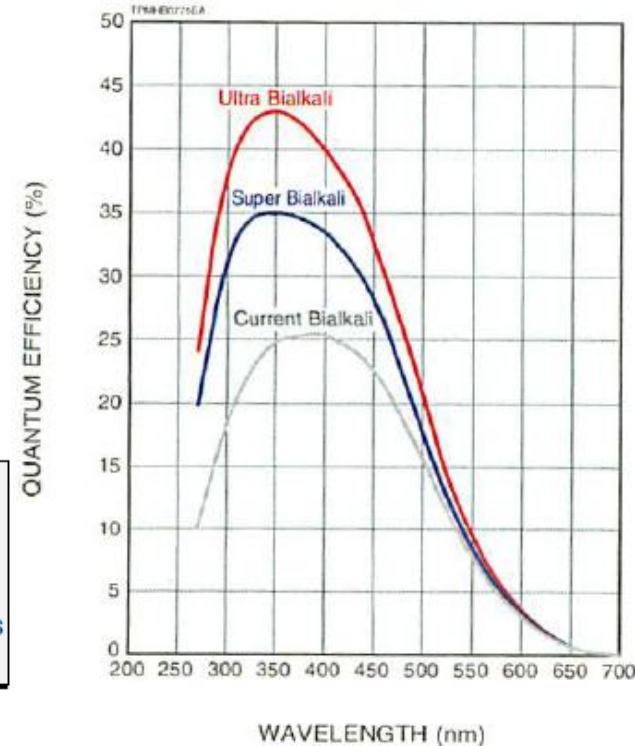
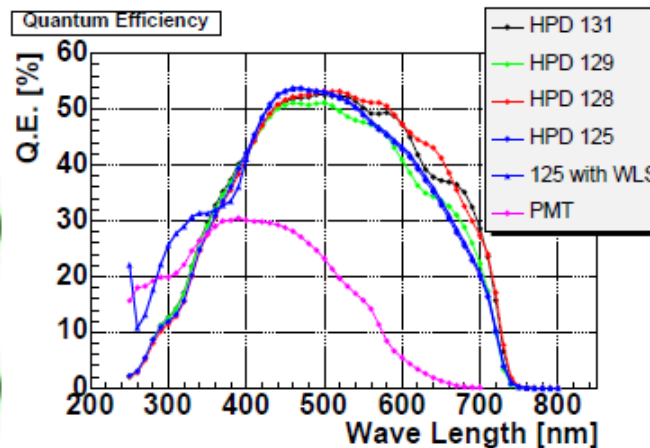
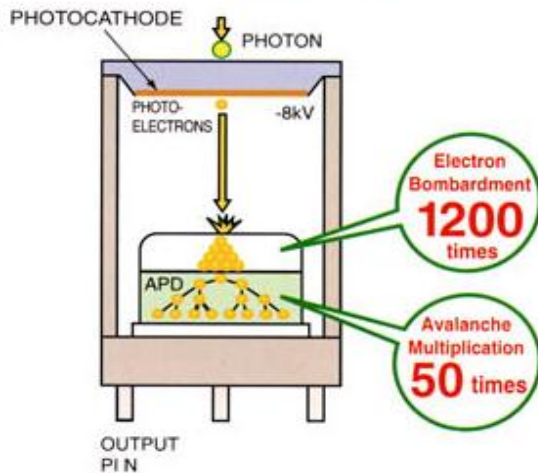
将来計画 (CTA)



新しい検出器

- SBA (Super Bialkali) PMT
- UBA (Ultra Bialkali) PMT
- HPD (Hybrid Photo Detector)

Compact HPD Operating Principle

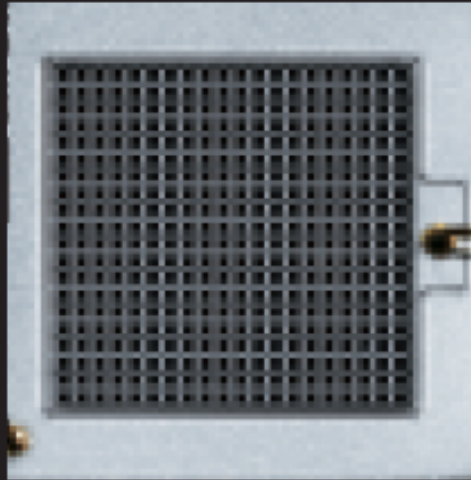


- SiPM (Silicon photomultipliers)

SiPM (MPPC/PPD) とは？

HPKの資料より

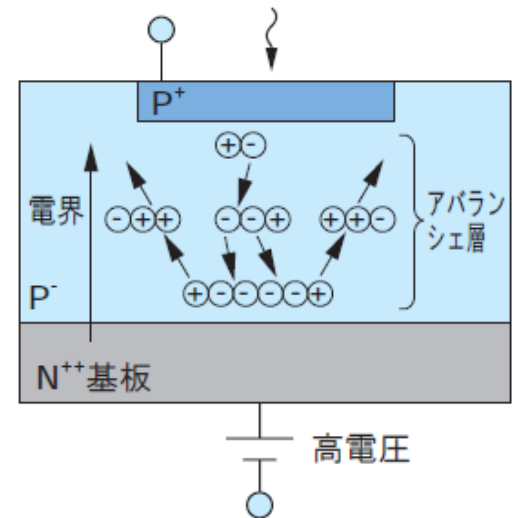
HPKの資料より



MPPCとは？

MPPCは、Si-PM (Silicon Photomultiplier)と呼ばれるデバイスの1種で、個別に動作する複数のガイガーモードAPDピクセルから成るフォトンカウンティング・デバイスです。MPPCのAPDピクセルは、フォトンを検出した場合にパルス信号を出力し、MPPCの信号出力は全APDピクセルの出力の総和になります。MPPCは、フォトンカウンティングにおいて必要とされる性能を高いレベルで実現しており、フォトンカウンティングレベルの微弱光を検出するさまざまな用途に利用することが可能です。

APDの動作原理例



発生したキャリアが、高電界で加速されて、新たに電子-正孔対を発生させる **イオン化**



発生したキャリアも加速されて、新たな電子-正孔対を発生させる連鎖が起こる **アバランシェ増倍**

印加バイアスに応じた増倍率を得ることができる

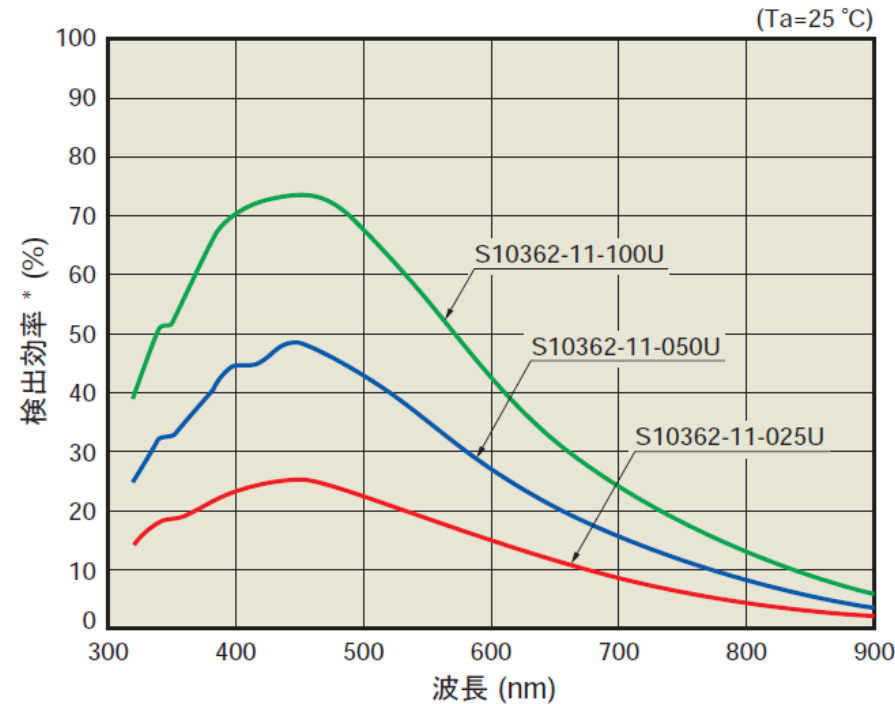
SiPM (MPPC/PPD)の特徴

• 長所

- 高いQ.E.
- 高い増倍率
- フォトンカウンティング可能
- 高い時間分解能
- 低バイアス電圧で動作
- 磁場の影響を受けない
- コンパクトで軽量，低コスト

• 短所

- ダークレート
- クロストーク & アフターパルス
- 温度依存性
- 低いfilling factor ($PDE = Trans \times FF(<80\%) \times QE \times GE$)
- 小さいサイズ



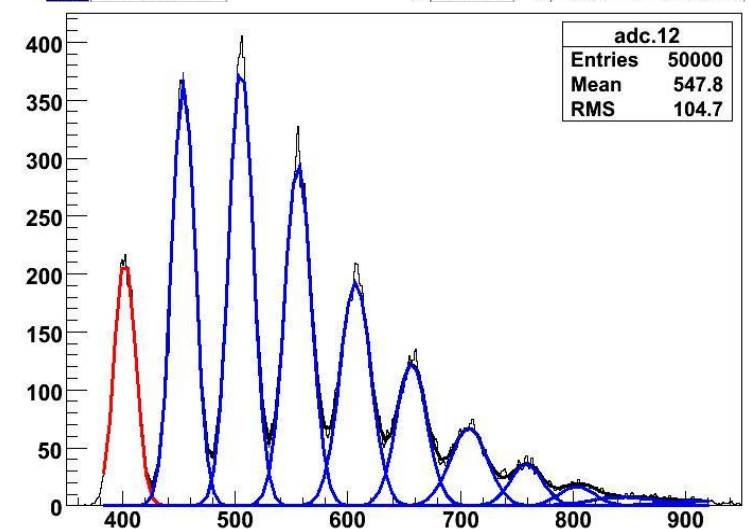
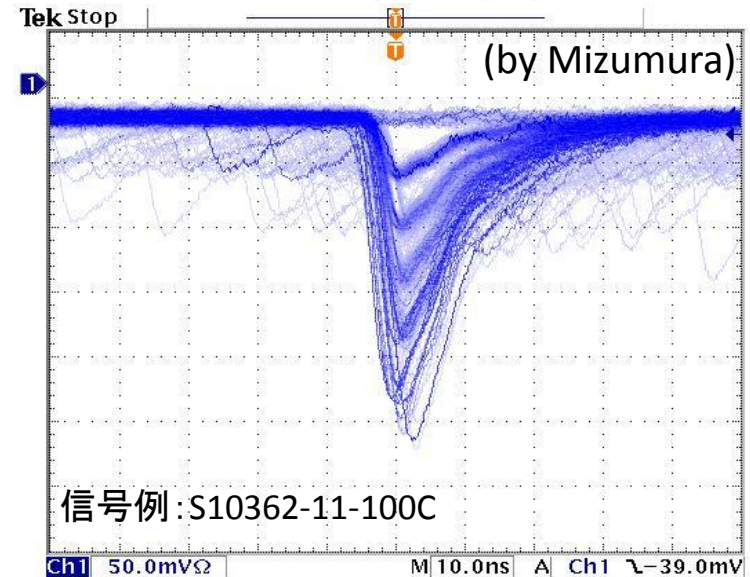
SiPM (MPPC/PPD)の特徴

• 長所

- 高いQ.E.
- 高い増倍率
- フォトンカウンティング可能
- 高い時間分解能
- 低バイアス電圧で動作
- 磁場の影響を受けない
- コンパクトで軽量, 低コスト

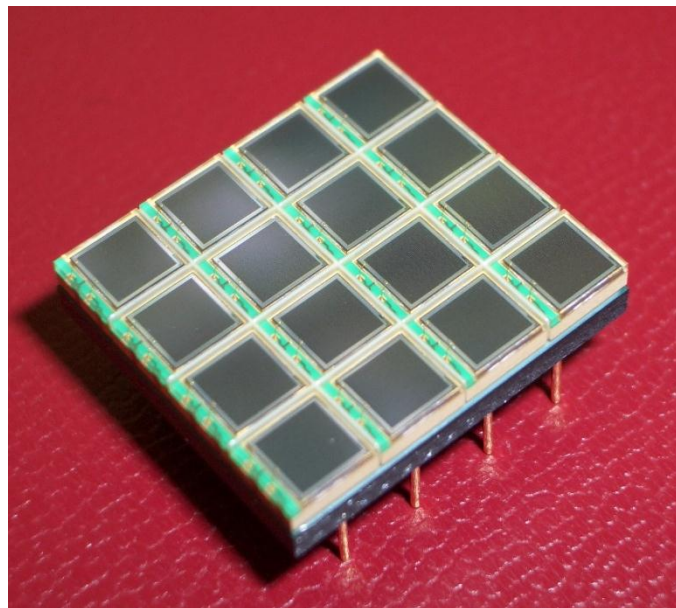
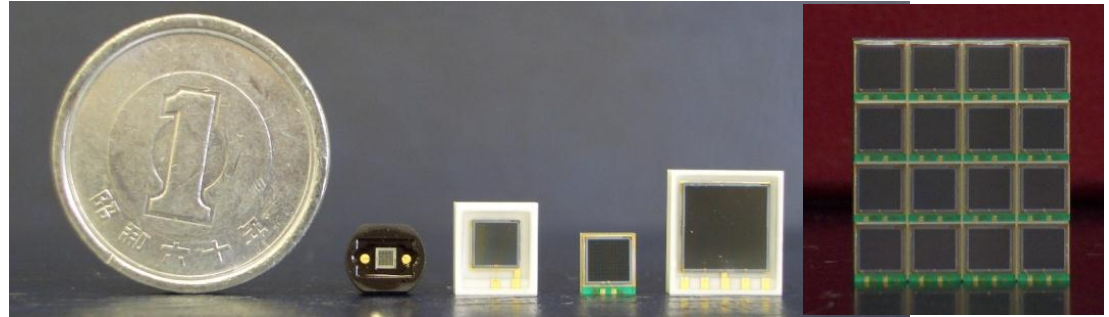
• 短所

- ダークレート
- クロストーク & アフターパルス
- 温度依存性
- 低いfilling factor ($PDE = Trans \times FF(<80\%) \times QE \times GE$)
- 小さいサイズ



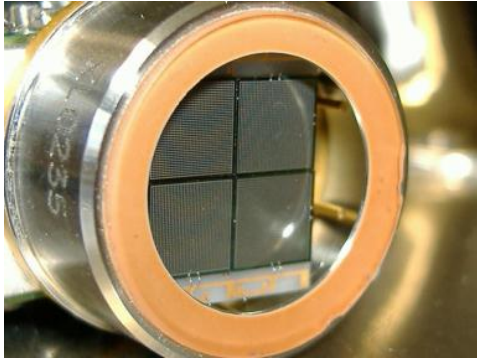
MPPC(HPK) commercial products

- 1mm×1mm
- 3mm×3mm
- 6mm × 6mm (2 × 2アレイ)
- 12mm × 12mm (4 × 4アレイ)

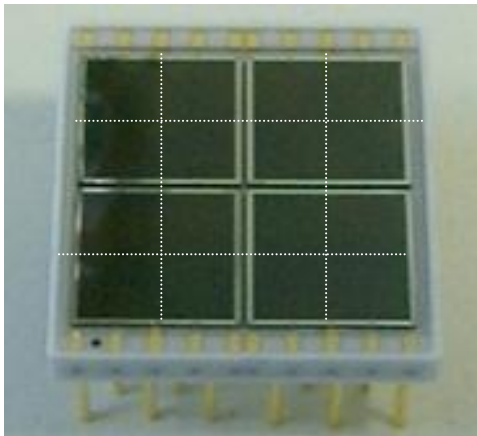


SiPM development by MPI

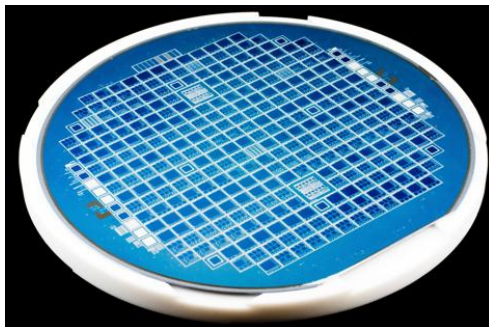
H. Miyamoto & M. Teshima, NIM A623 (2010)



With MEPhl
(Dolgoshein SiPM)
10x10mm
(4 pixels)



With Hamamatsu
12x12mm
(16 pixel)



With MPI-HLL
1x1mm $\rightarrow$ 6x6mm

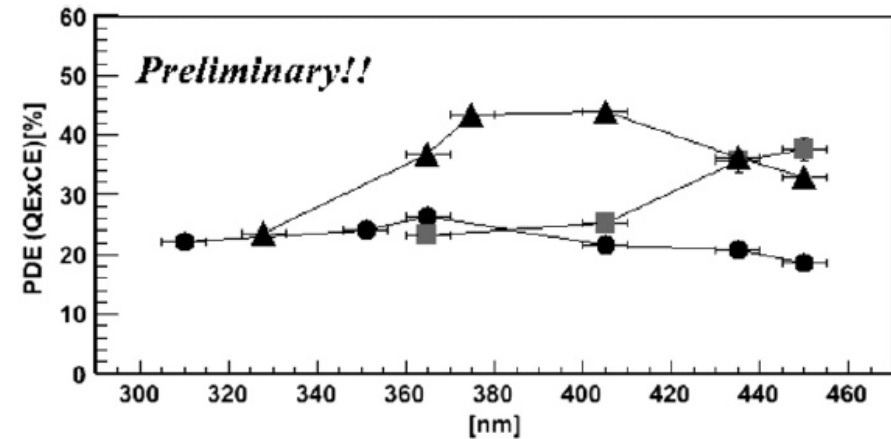


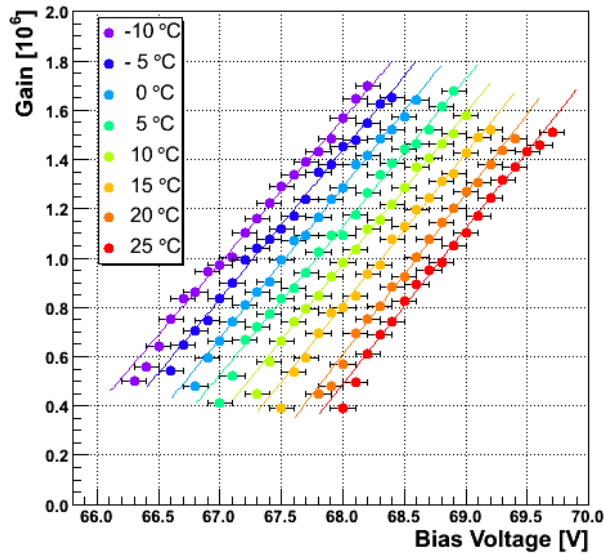
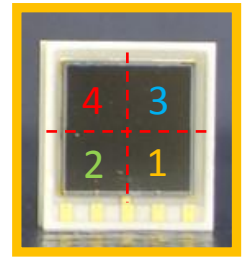
Fig. 4. Preliminary result of PDE measurements. The filled triangles, gray squares, and filled circles show the distribution of the Dolgoshein SiPM, the MPPC, and the MAPMT representatively. MPPC and D-SiPM are operated at overvoltage of 1.2 and 3.5V representatively. The PDE is calculated from the ratio of the normalized number of detected photoelectrons in the considered device and in a reference PMT, assuming Poisson distributions. Systematic uncertainties are not shown. Other factors to be considered include the SiPM overvoltage and temperature dependence.

研究の概要

- 3mm×3mmMPPCの2×2モノリシックアレイの基礎特性試験⇒**ほぼ終了**
⇒ 3mm×3mmMPPCの4×4アレイの特性試験中
- プロトタイプカメラの試作と夜光によるレスポンス評価⇒ 3mm×3mmMPPCの夜光暴露試験
⇒ 3mm×3mmMPPCの4×4アレイの夜光暴露試験準備中
- チェレンコフ光のテスト観測@明野観測所(またはWoomera)⇒ **まだ**
- 高速読み出し回路の開発⇒ **SPIROC-A評価ボード入手手続き中**
- 査定
 - 研究費: 448,000円, 旅費: 600,000円

2×2モノリシックアレイの基礎特性

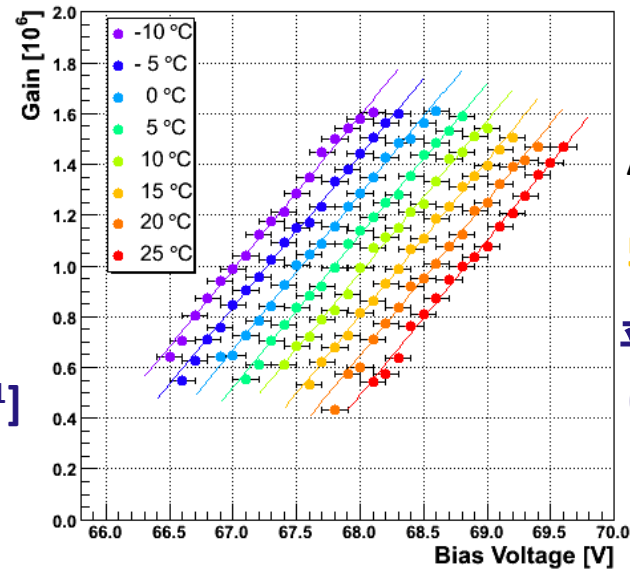
試験：ゲインvsバイアス電圧



Array 1ch

50 μ m

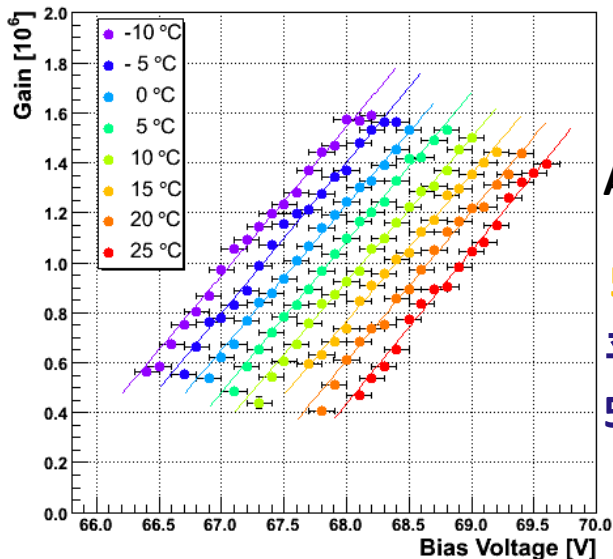
平均勾配
 $6.1 \times 10^5 \text{ [V}^{-1}\text{]}$



Array 2ch

50 μ m

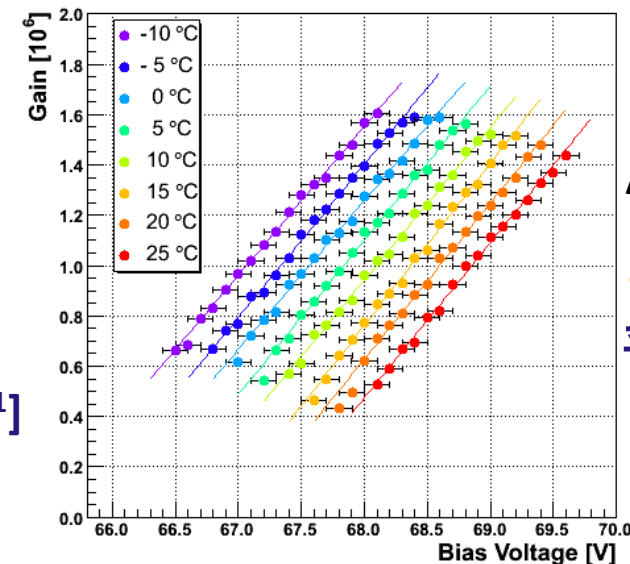
平均勾配
 $6.1 \times 10^5 \text{ [V}^{-1}\text{]}$



Array 3ch

50 μ m

平均勾配
 $5.9 \times 10^5 \text{ [V}^{-1}\text{]}$



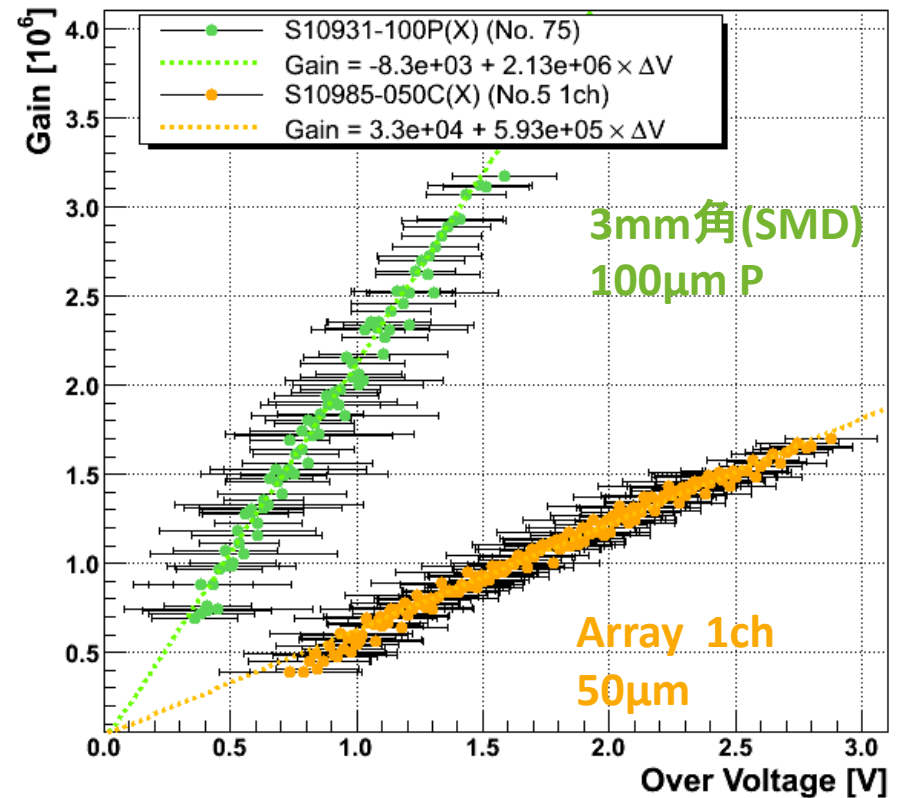
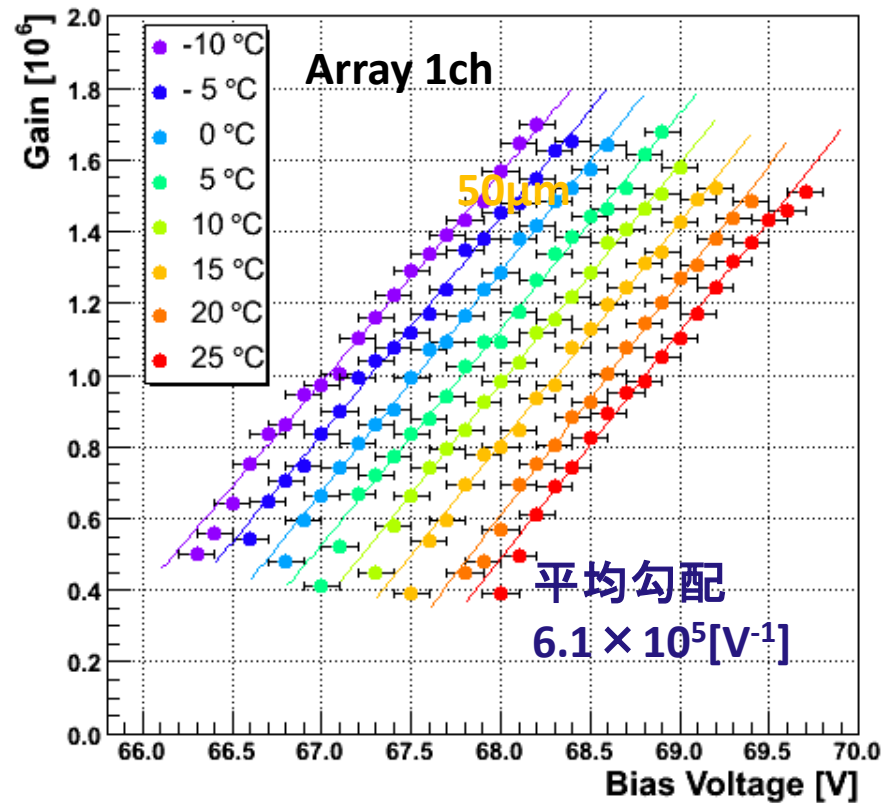
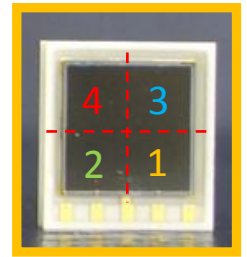
Array 4ch

50 μ m

平均勾配
 $6.1 \times 10^5 \text{ [V}^{-1}\text{]}$

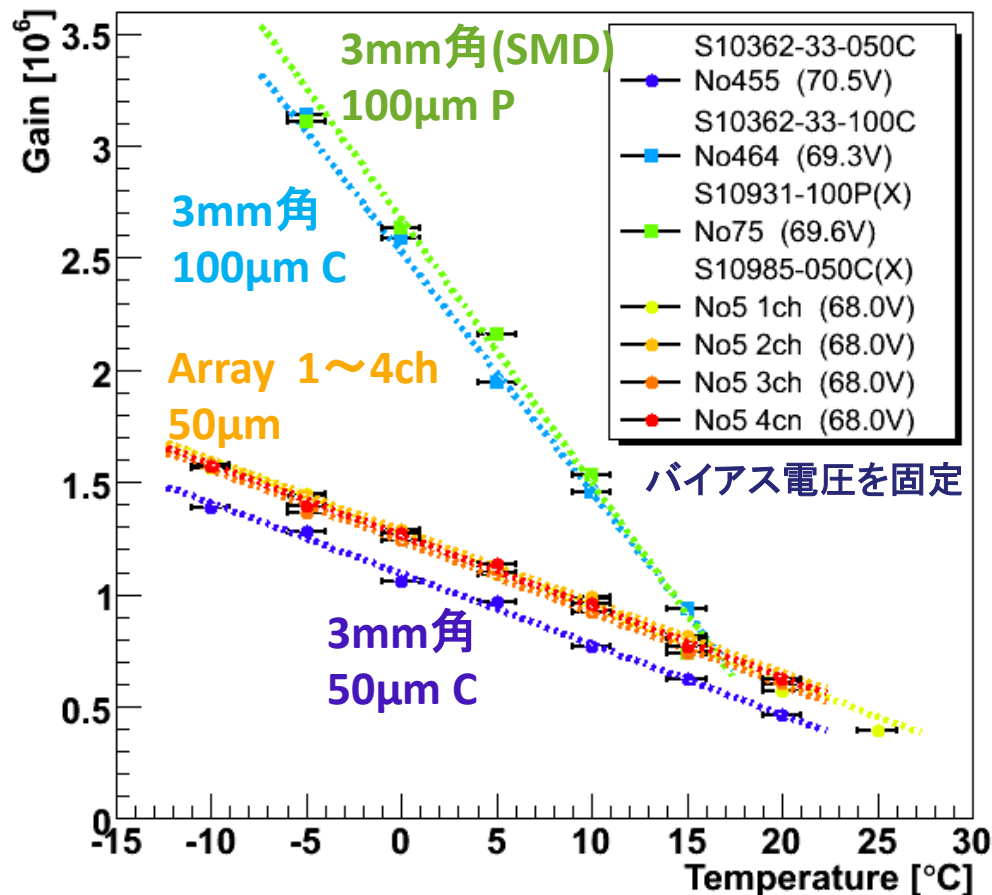
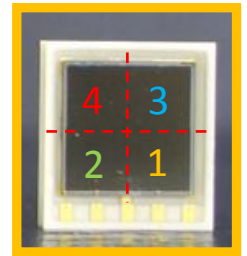
2×2モノリシックアレイの基礎特性

試験：ゲインvs過電圧



2×2モノリシックアレイの基礎特性

試験：ゲインvs過電圧



3mm角 100 μm C
— 1.1×10^5 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

3mm角 (SMD) 100 μm P
— 1.2×10^5 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

3mm角 50 μm C
— 3.1×10^4 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

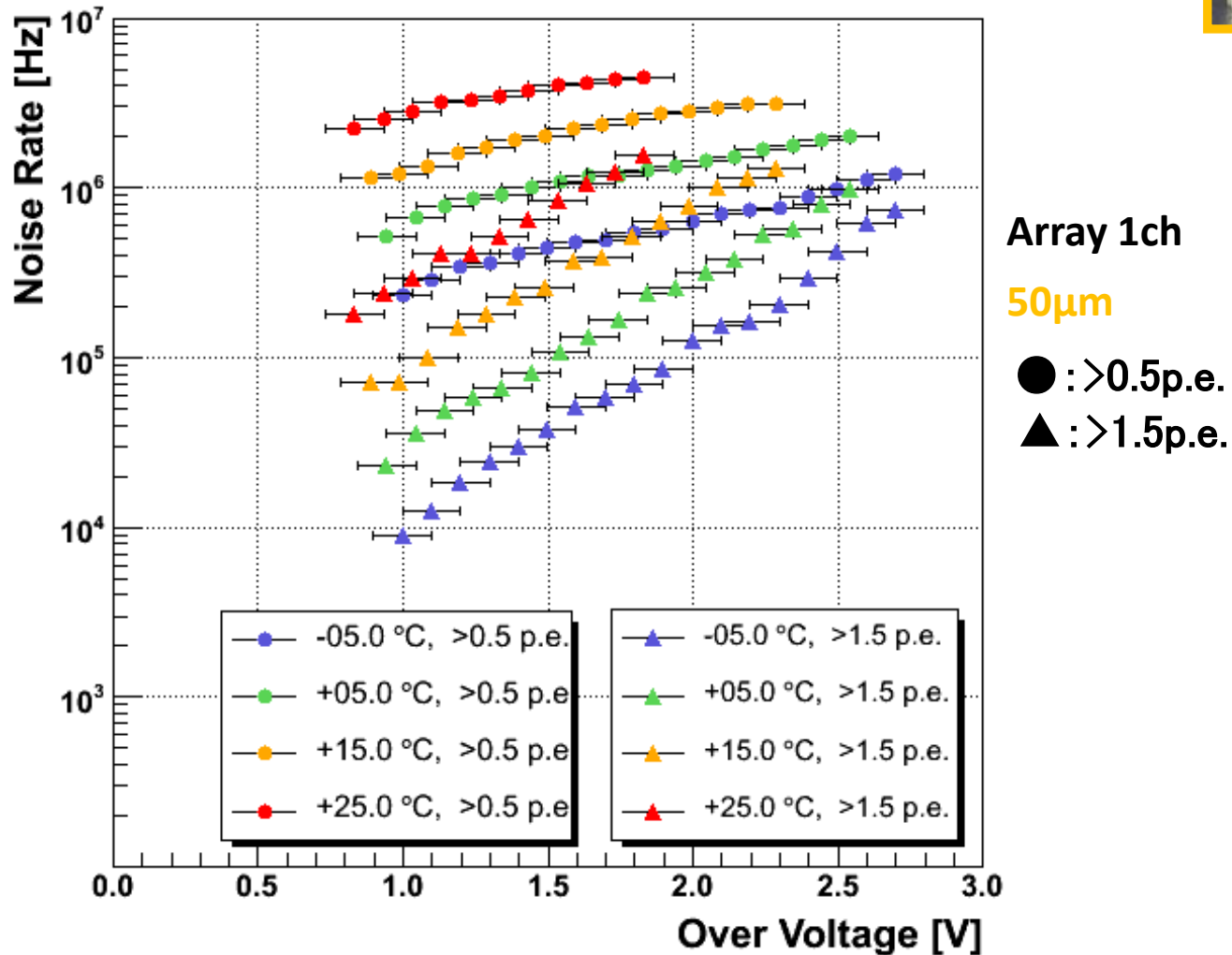
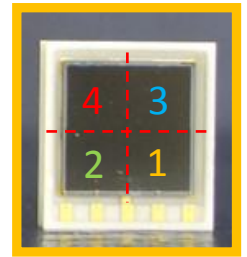
アレイ 50 μm (平均勾配)
— 3.2×10^4 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

1 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化で (10 6 ゲイン動作時)

100 μm : 11%, 50 μm : 3% ゲインが変動する

2×2モノリシックアレイの基礎特性

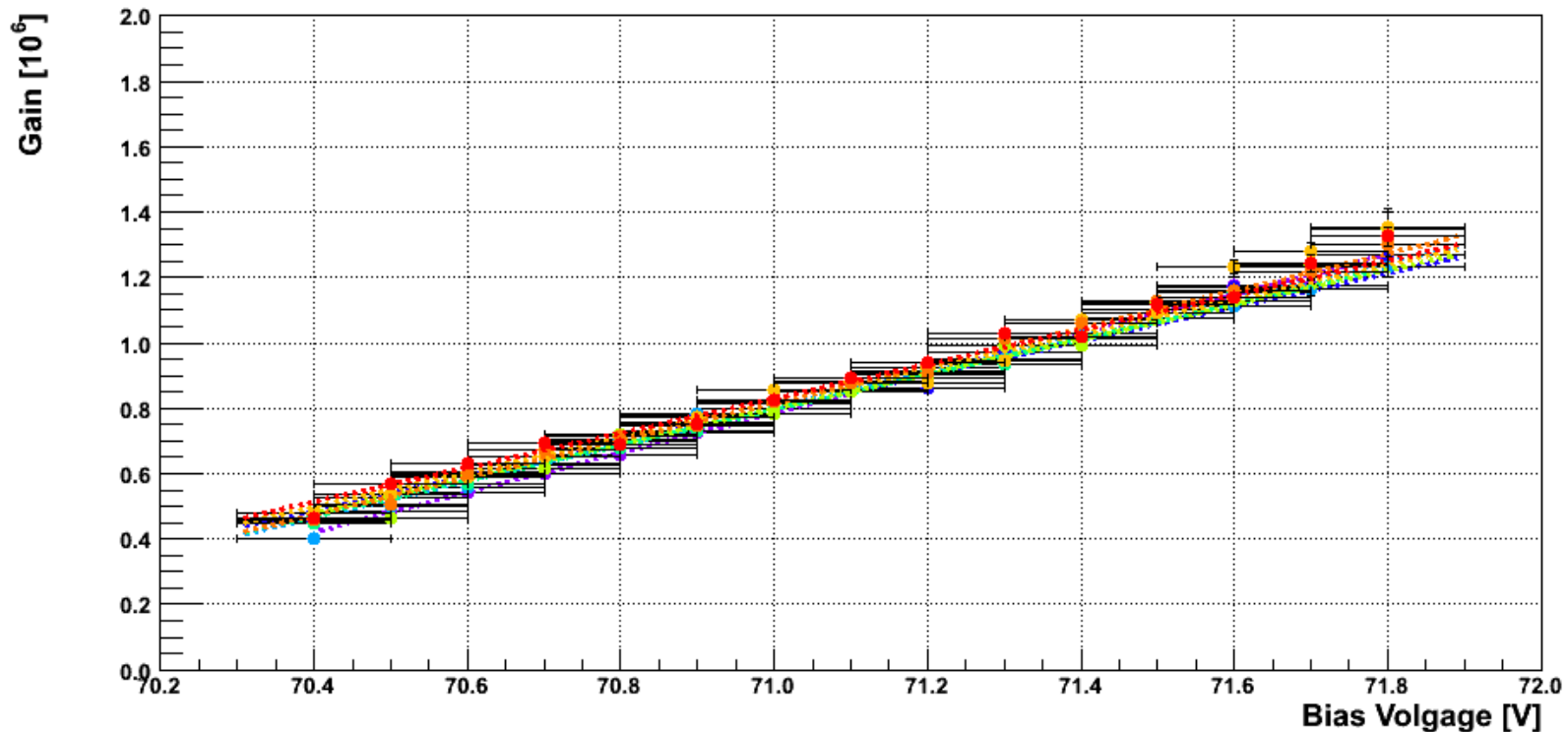
試験：ノイズレートvs過電圧



4×4アレイの基礎特性試験

ゲインvsバイアス電圧

No.5 1ch : Gain vs Bias Voltage

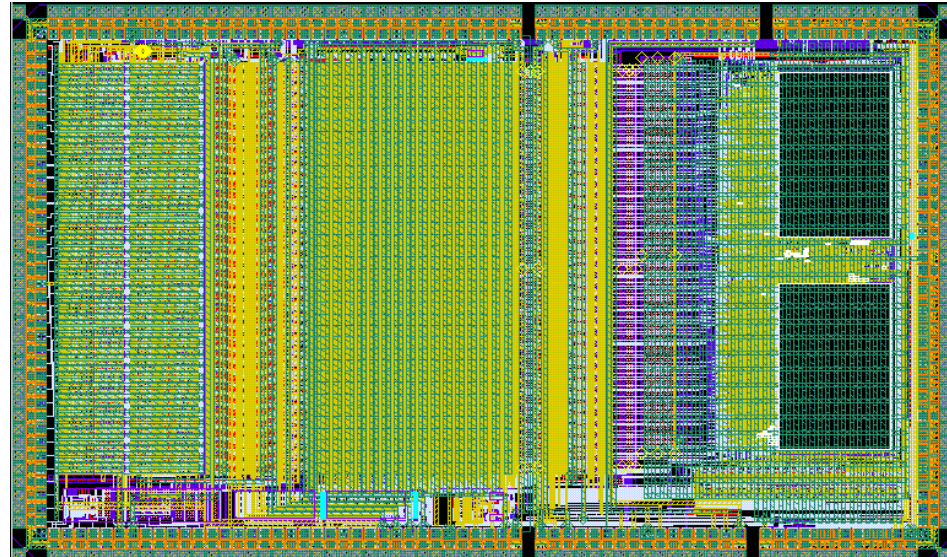


ch	1	2	3	4	5	6	7	8
傾き	6.05	5.23	5.58	5.41	5.38	5.28	5.73	5.28

×10⁵

高速読み出し回路

- SPIROC (SiPM Integrated Read-Out Chip) - A
 - 32ch input
 - threshold設定→自動的にhold→PHがanalog memoryにstoreされる→multiplexしてADCで読み出す
 - DAQ rate >kHz
 - discr out → trigger



今後の課題

- 今年度
 - 夜光exposure試験
 - 明野またはWomeraで集光鏡を用いたチェレンコフ光受光試験？
- 来年度以降
 - プロトタイプカメラ試作
 - ライトガイド設計
 - 温度コントロール／温度補償回路
 - DAQ：SPIROC-Aの評価

まとめ

- 3mm×3mmMPPCの2×2モノリシックアレイの基礎特性試験を行った
- 3mm×3mmMPPCの4×4アレイの特性試験中
- 3mm×3mmMPPCの夜光暴露試験を行った
- 3mm×3mmMPPCの4×4アレイの夜光暴露試験準備中
- 高速読み出し回路として, SPIROC-A評価ボードによる評価試験準備中