

カスタムMPPPCの デジタル読み出しシステムの開発

山形大理 中森健之

大内優雅 佐藤知宙 佐藤凜

KEK/Open-It 庄子正剛 上野一樹

田中真伸 宮原正也 内之八重広宣 本多良太郎

2021年10月26日
計測システム研究会

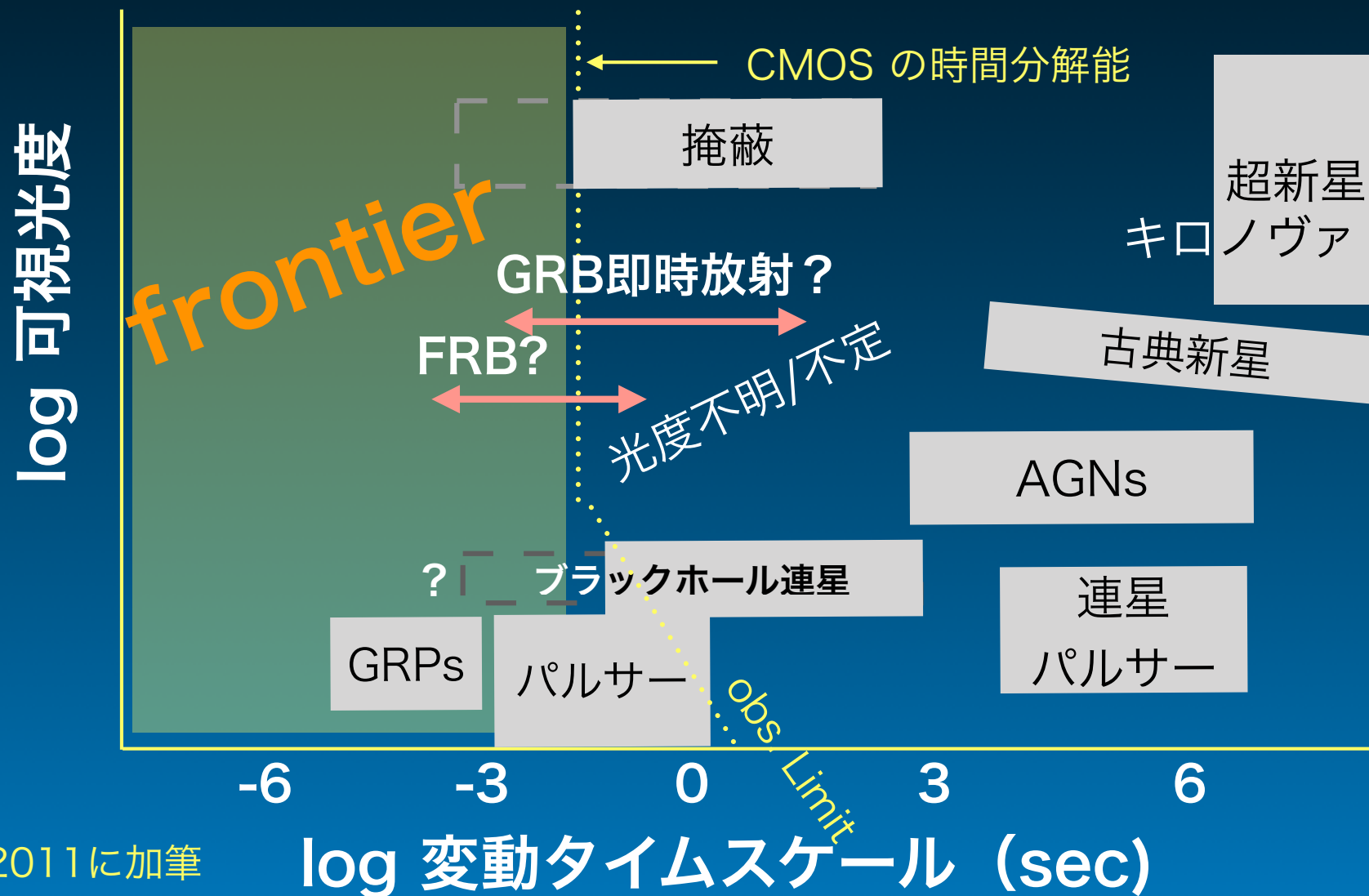


もくじ

- 科学目的（を手短に）
- カスタムMPPC
- システムへの要求
- 開発の経緯と課題
- 今後の展望

時間領域の最奥地へ

多波長「同時観測」は（本来）同レベルの時間分解能が求められる
 可視は電波・X・ガンマと比較すると、観測体制が弱い/分解能が悪い
 高速可視観測はコンパクト天体の理解を深める



やりたいこと

天体可視光の光度変化を $O(\mu\text{s})$ の分解能で測定。

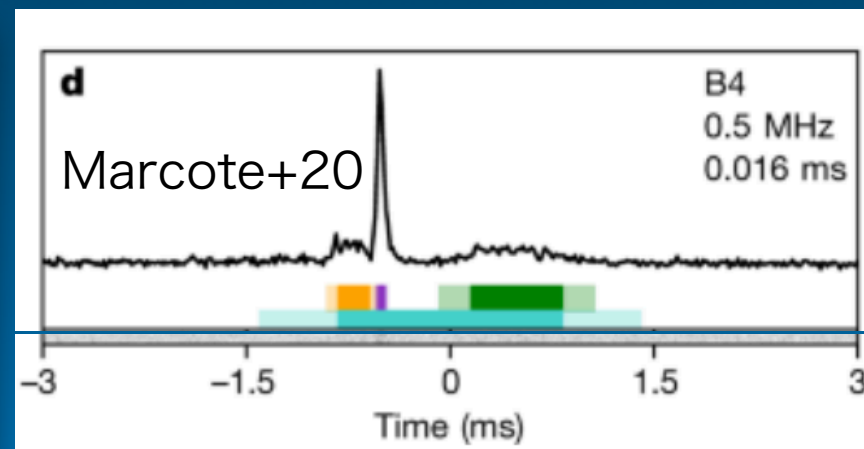
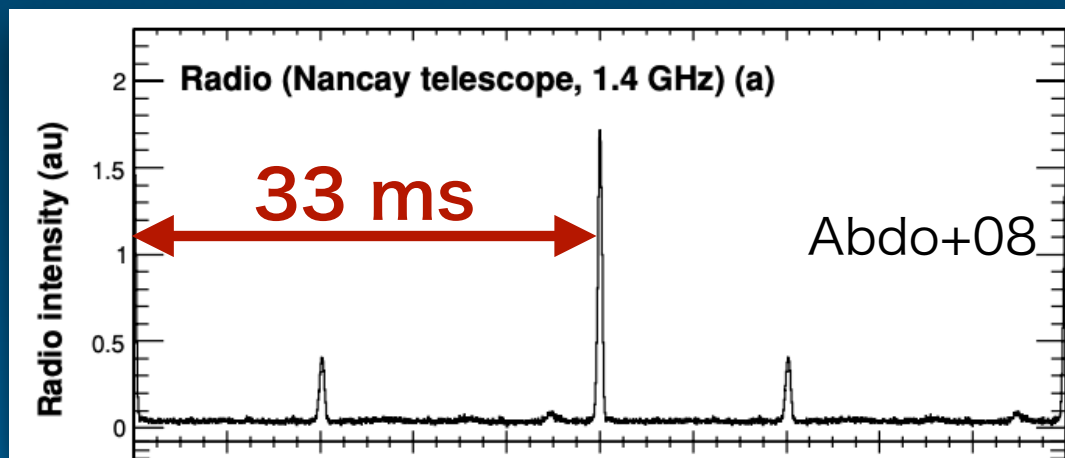
→**photon counting + time stamp**

絶対時刻もつける。

→**GNSSで時刻付**

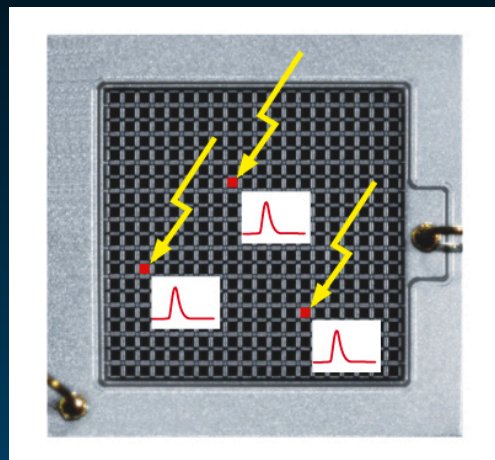
トリガーなく動画のように連続データ取得。

→**デッドタイムレスな構成**



例えばこういう天体現象を測りたい

MPPCは惜しい



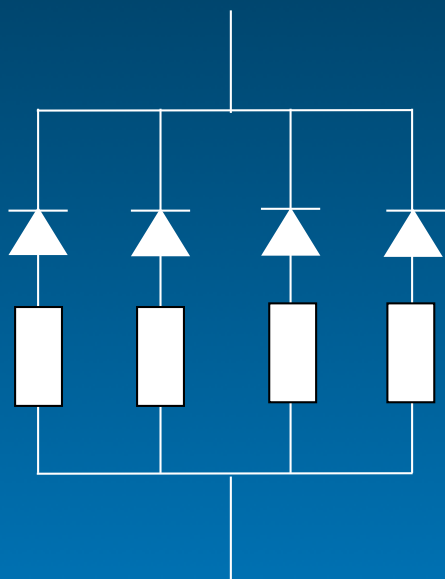
credit: HPK

- 単光子が検出できる
- 高速応答 0(ns)
- △ 合算されるためダークカウントが多い
- △ 合算されるため撮像ができない
- △ 「ピクセル」サイズが大きい

信号レートは天体と望遠鏡次第だが...

Crabパルサー@山形天文台の場合

~100 ph/s の周期信号



- 別の天体が混入する確率大
- 信号に対してダークが高すぎ
- 星の像に対して広すぎて空の雑音優勢

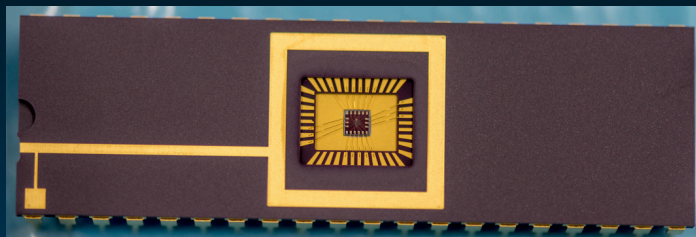
Typ. $\sim 10^5$ cnts/mm²



ガイガーAPDアレイ ver1

MPPCをカスタム、セルごとに信号読み出し

TN+21



w/ シリコン窓

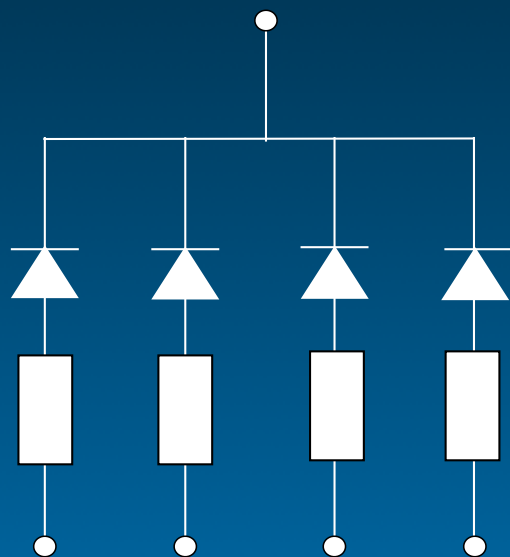
- ★ 単光子に感度、4x4画素
- ★ 0.1x0.1 mm²/pixel
- ★ 低ダークカウント

0(10) cps @0°C

高感度撮像

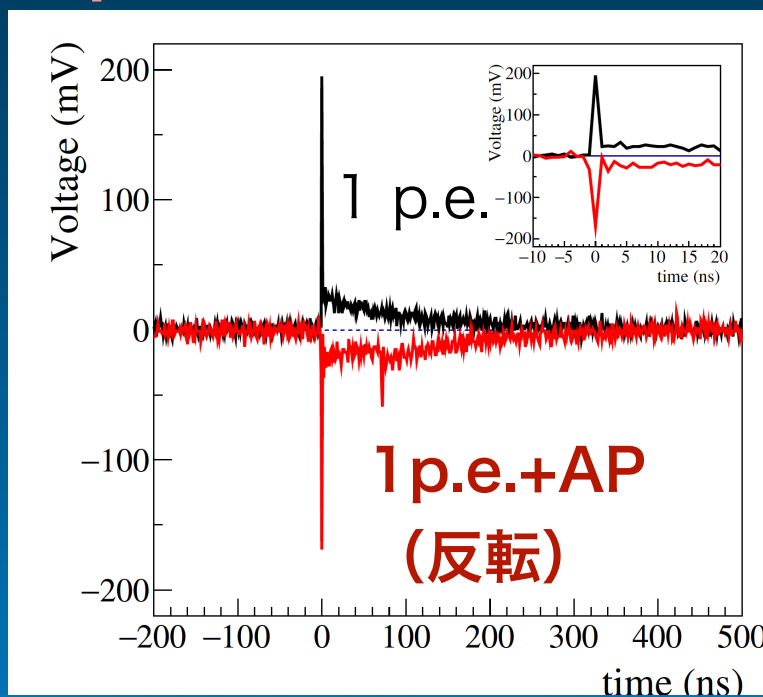
低雑音

冬季自然冷却

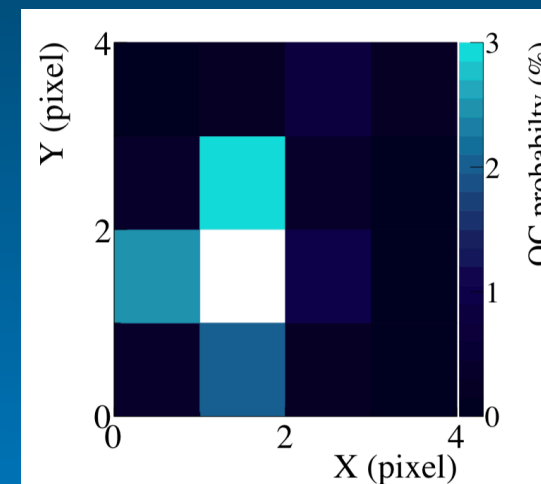


~0.5 pF/pix

「1 p.e.のパルスしか出ない」



OCTも直接測れる



ふつうのカメラとの画素比較

Ver1の
画素サイズ

星のモノクロ画像

目が荒いが...

多くの画素に像が広がってしまう

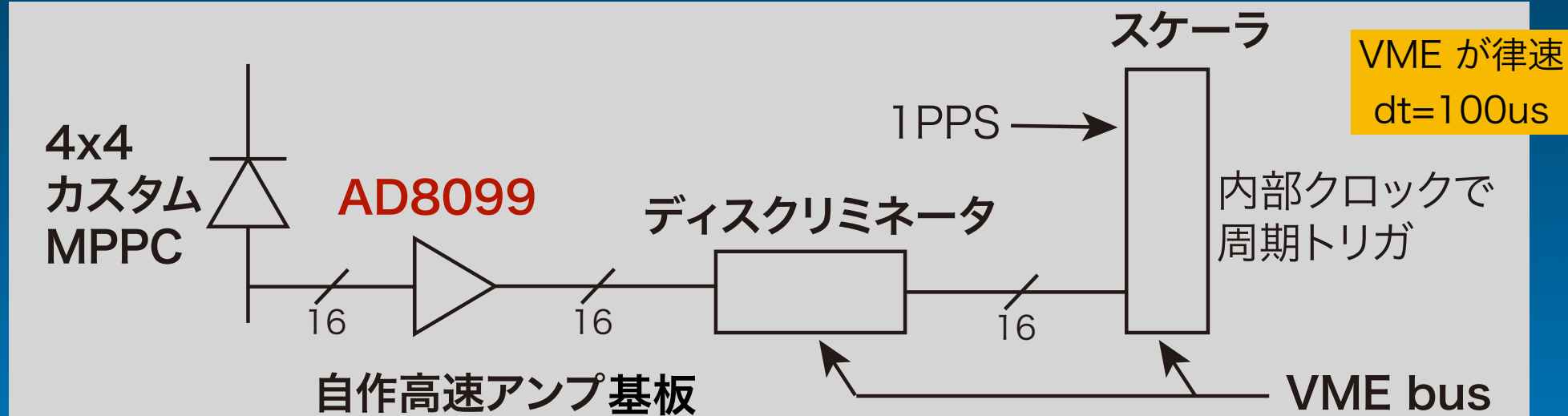
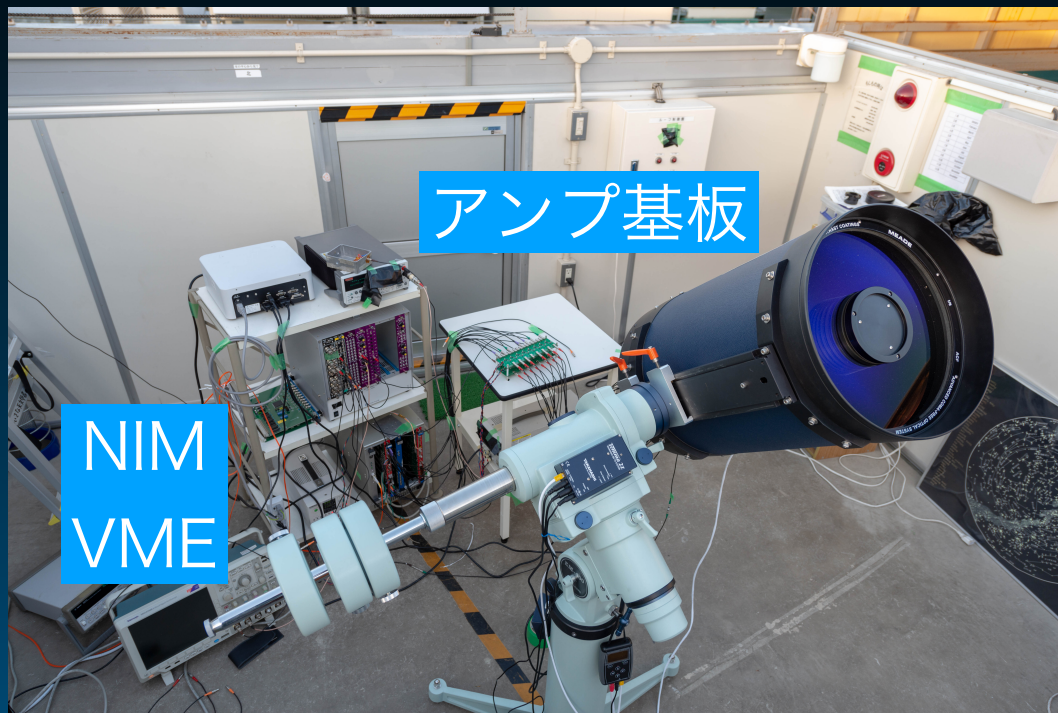


明るさの分析には結局全部足す

精細な絵は撮れないが、星の光を1画素に集められそう

最初は力技 → なんとかになった

TN+21



生データ

Photon hitの0/1デジタル情報+タイミングを記録する。

```
#####
# START TIME 1552129414 0.267516
# TIME BIN 0.0001sec
#####
# data format: trigger number, ch0 -- c
#####
0 0 0 0 1 0 0 0 2 1 0 1 1 1 0 0 1 0
1 0 0 1 0 0 0 0 2 2 3 1 0 0 0 1 0 0
2 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0
3 1 1 0 1 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0
4 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0
5 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 0
6 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0
7 0 0 1 1 0 0 2 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0
```

各light curve binに対して、
チャンネルごとに検出したパルス数

PPSが来たときに1が立つ

アスキーで直接吐き出している。

(バイナリ保存版も用意はしてある。)

NTPで時刻合わせしたPCでDAQ。

測定開始時の

tv_sec, tv_usec

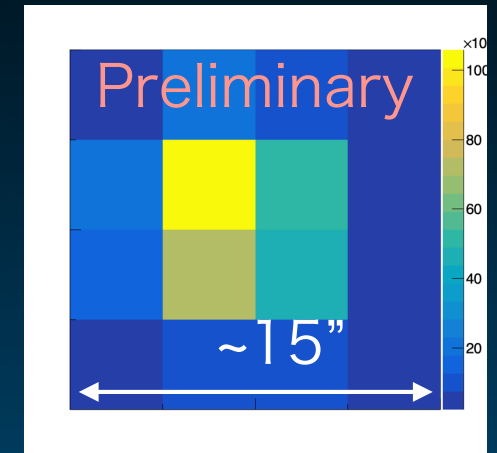
秒オーダーはこれを信用する。

開始時刻を逆算する。

1の立つビンが正0秒

出張先でもなんとか動いた

広島大学/東広島天文台へ
搬送→組み上げ→観測実験→撤収搬送

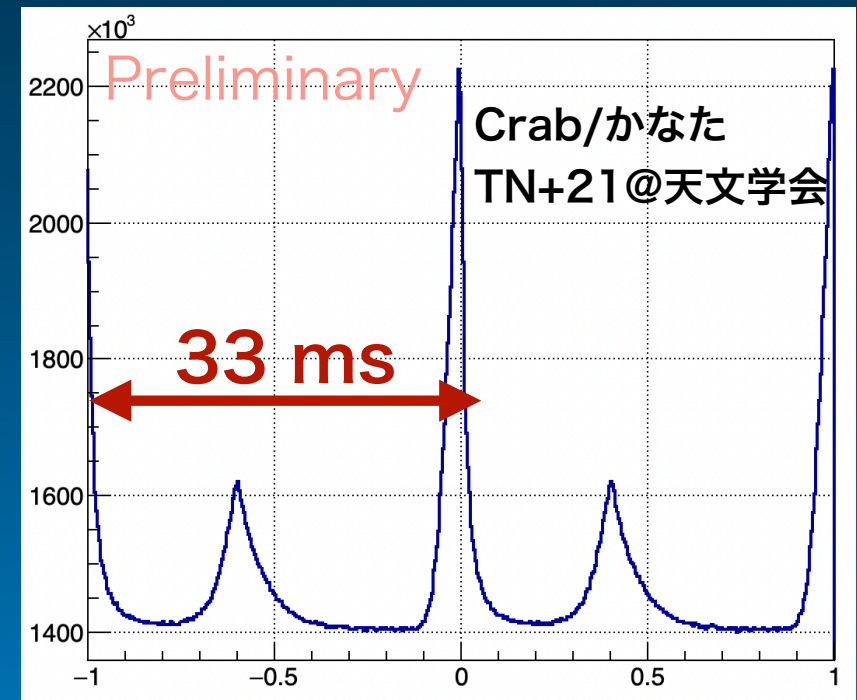


我々の観測システム

VME
NIM
電源

PC
HV
St.Con.

検出光子数/16 ch



位相

プロジェクト進行図

2020年度

2021年度



ver1
4x4

2019Mar
山形観測

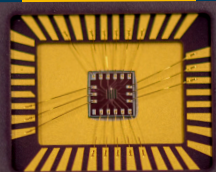


レフェリ対応実験

2020Jan

システムが嵩張りすぎる問題の解消

解析



回路系の
集積・小型化

FE基板評価 | FPGA開発・評価

再立ち上げ

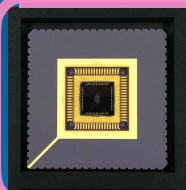
新システムで観測

やまがた天文台障害 **×**

かなた調整中

センサが小さすぎる問題の解消

ver2
8x8



素子開発

仕様策定

製作

評価基板製作 | 評価

回路開発

仕様策定

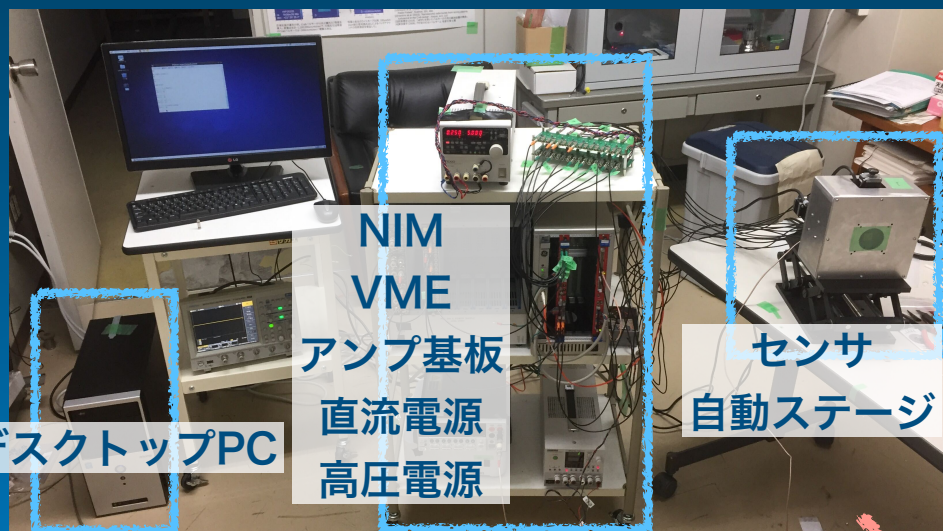
ダンボール10箱→1箱

大内21

旧

- ・ 電源・VME・NIM汎用モジュール
- ・ PCIバスが必要→デスクトップPC
- ・ VMEバスの速度がDAQを律速

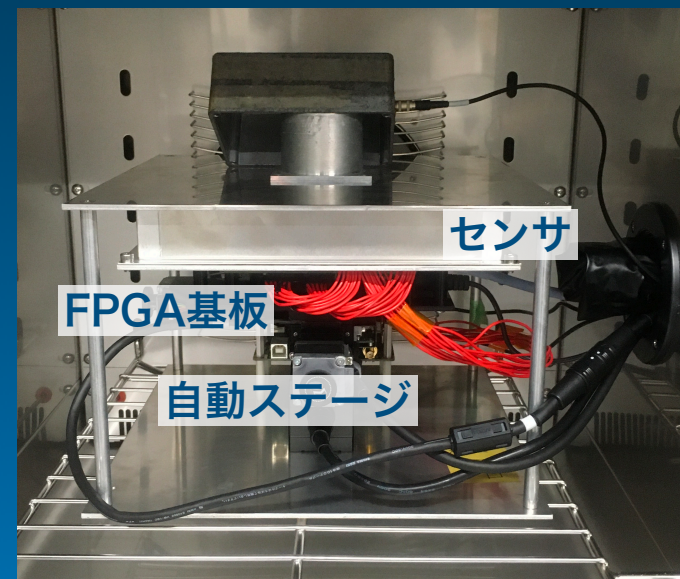
時間ビンが100 μ sに制限



シン

- ・ 専用フロントエンド基板を開発
- ・ FPGA評価ボード (ArtiX-7)
- ・ イーサネット転送 (SiTCP)
- ・ クロックの出せるGNSS受信機

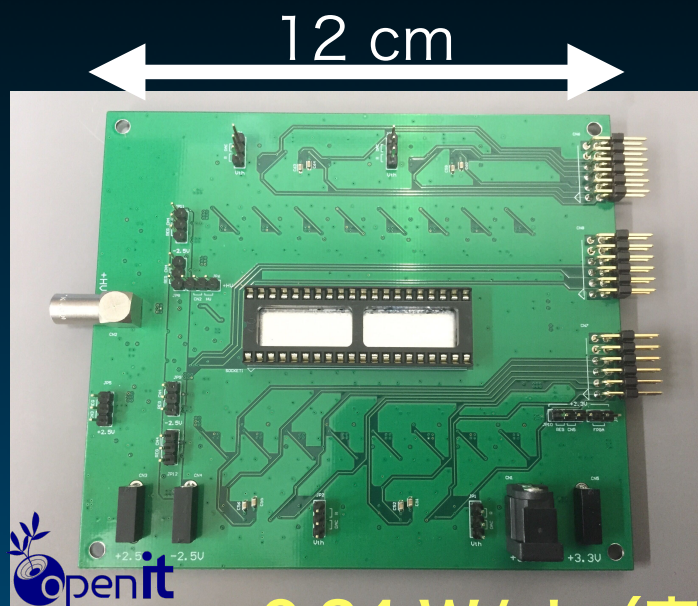
時間ビンが100 nsに



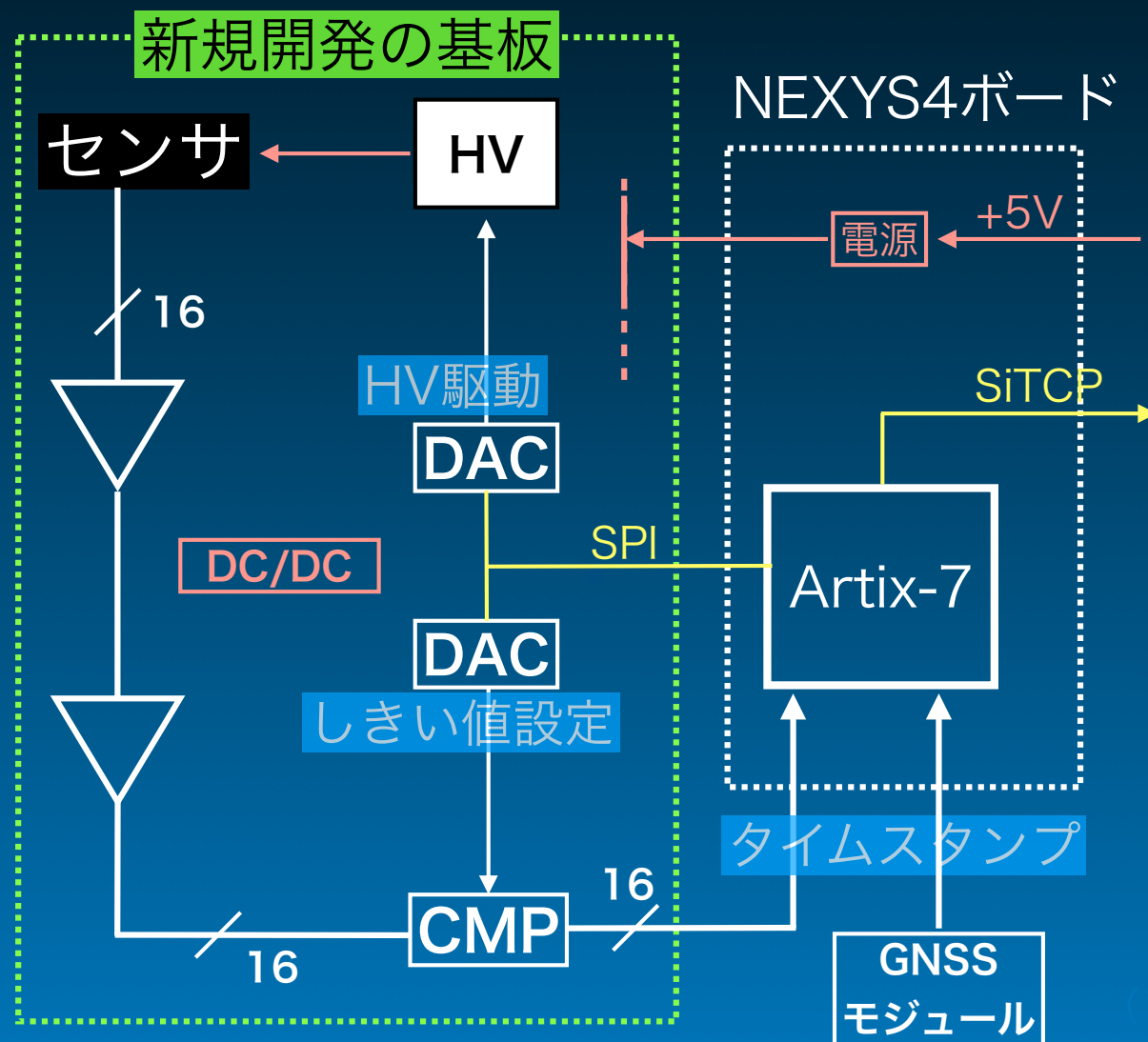
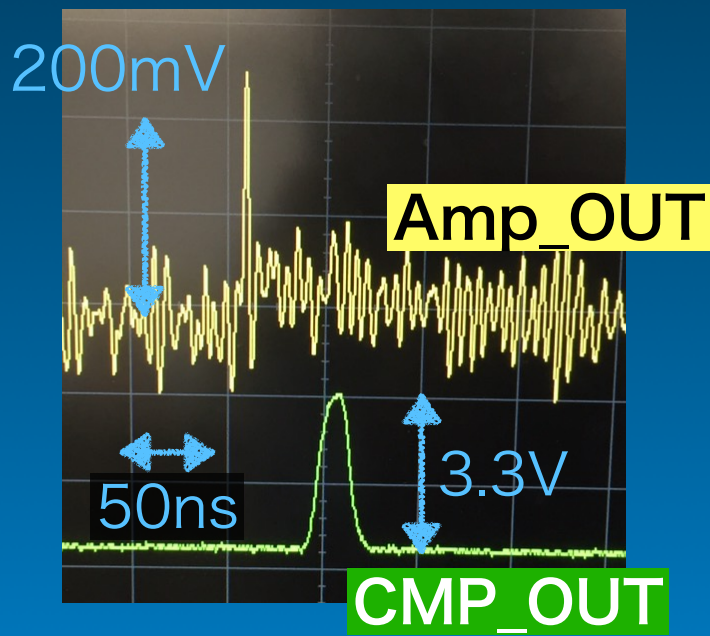
大幅に小型化。測定系が全部入った。

システム全体像

コスト減のため市販のFPGAボードを採用
全電源をFPGAボードから供給 (+3.3 V → +2.5 V)

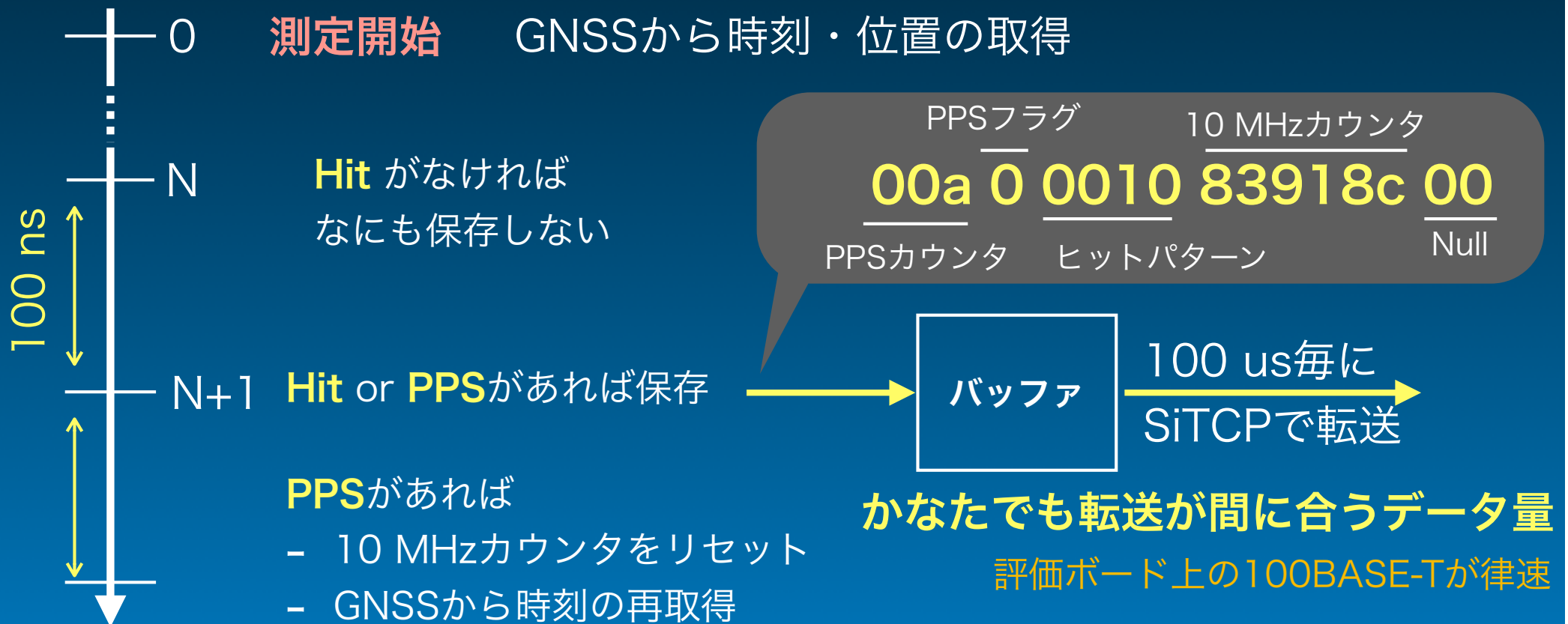
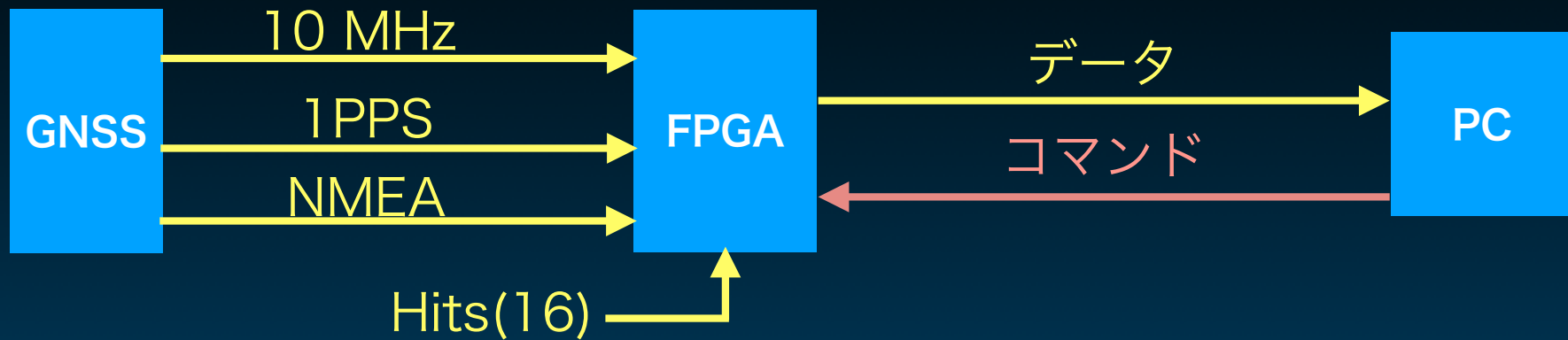


0.24 W/ch (実測)



DAQの流れ

大内21

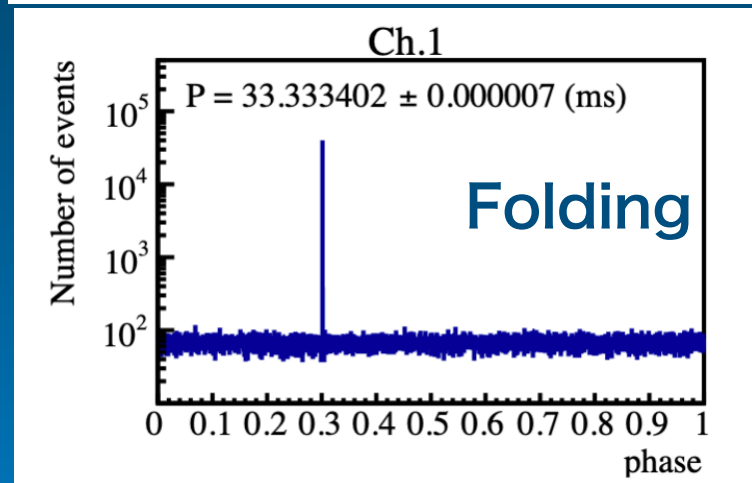
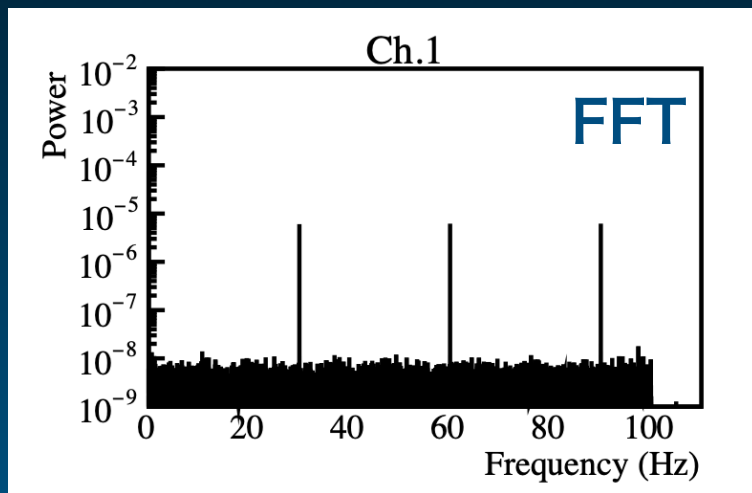


周期発光源の測定

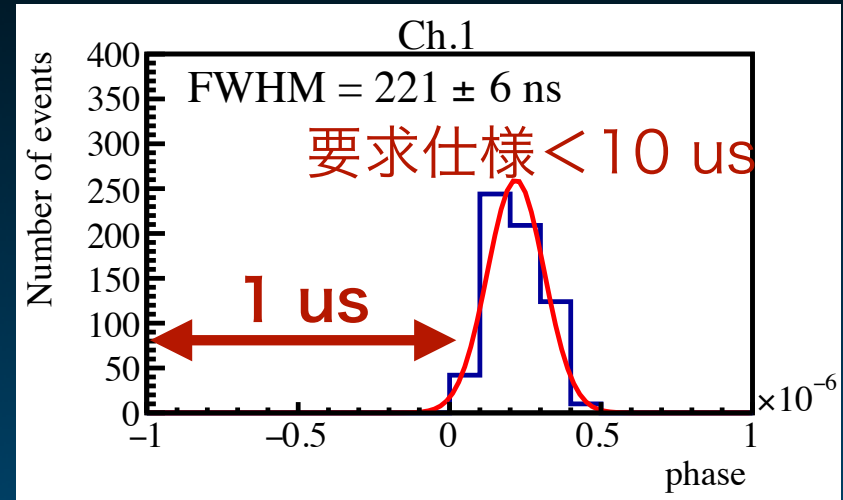
30 Hzの明滅LED

周期検出OK

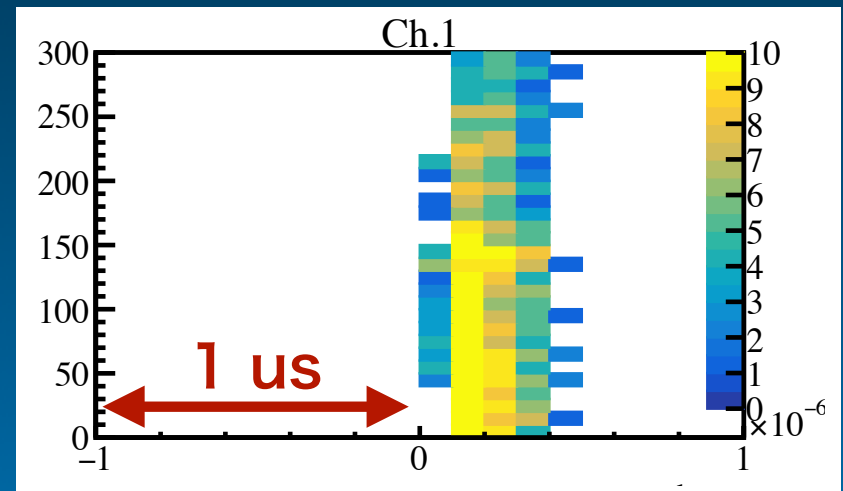
33.333 ms \pm 7 ns (5分測定)



(別の) PPSで明滅するLED



経過時間 (秒)

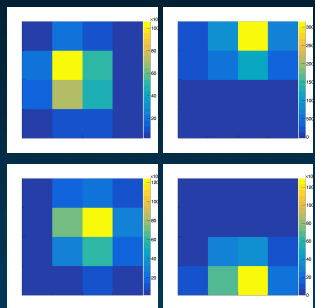


LEDの発光ばらつき？
システムの時刻づけ不定性？

実用上問題ないが
原因の調査中

大面積化へ一歩

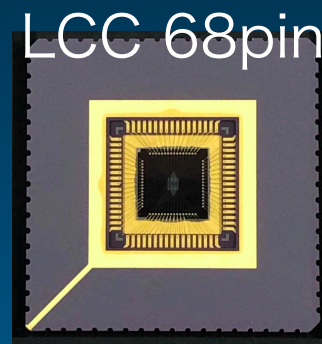
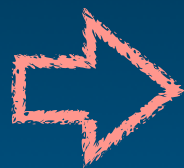
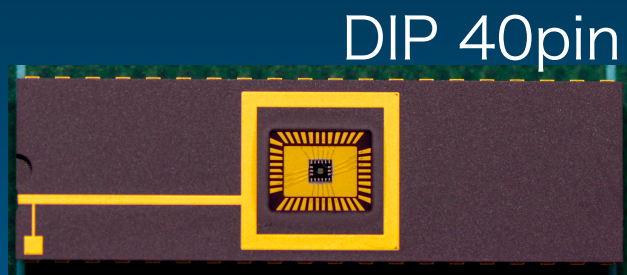
旧



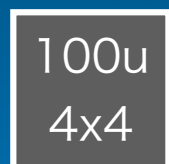
- かなたのPSFとコンパラ
- 大気・追尾で揺れる
- 時間変化する漏れ出し
- 測光の系統誤差に

シン

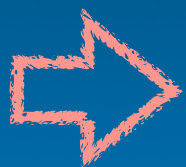
- 最適なピクセルサイズはF値依存
- 比較検討と柔軟な活用がしたい
- **8x8、複数のセルサイズを製作**



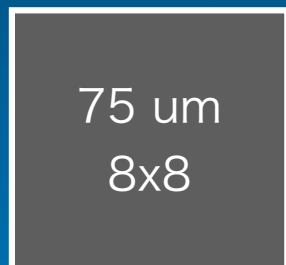
セル間ギャップ
20um



gap 7um



有感領域 740 um



充填率 82%



86%



90%

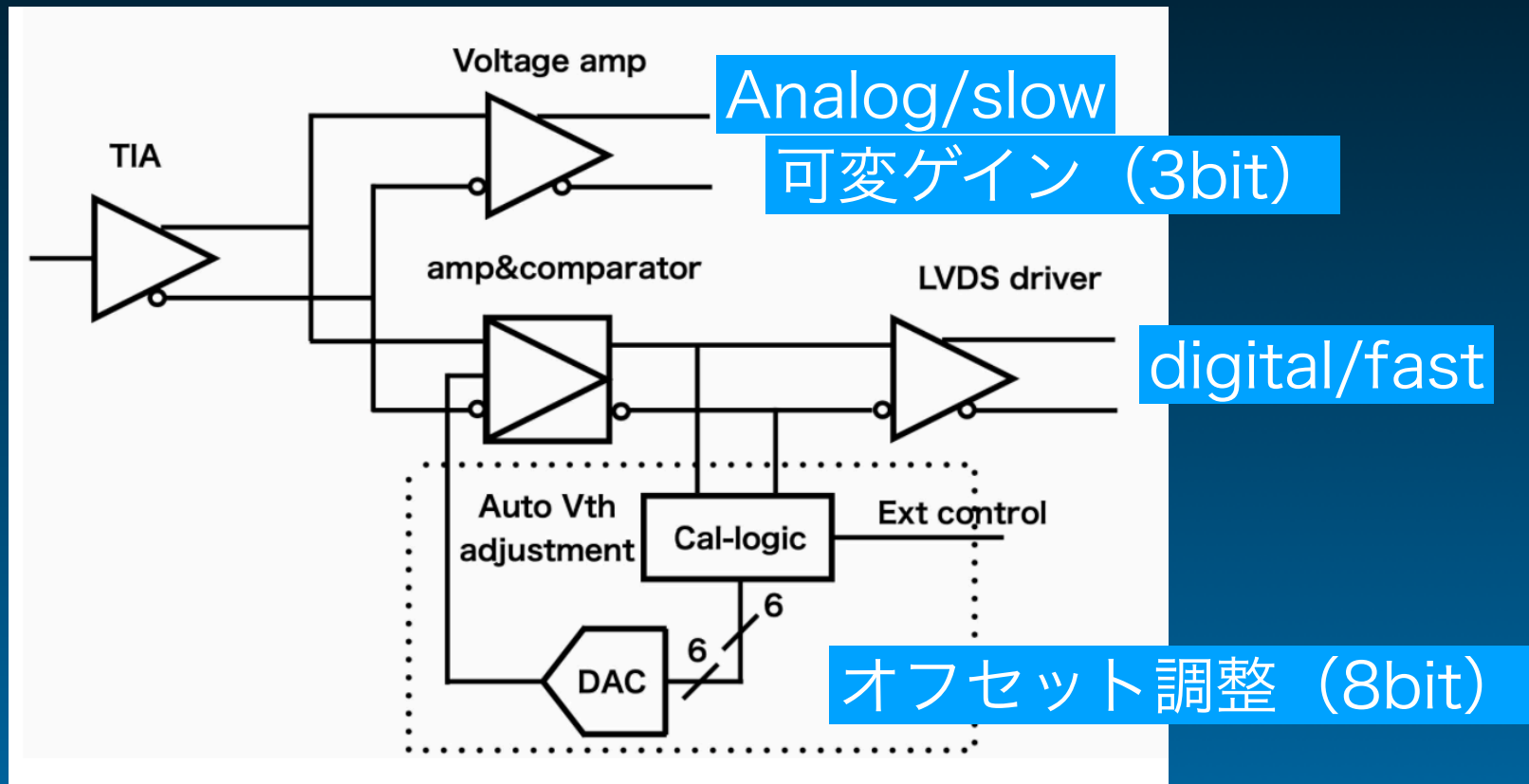


92%

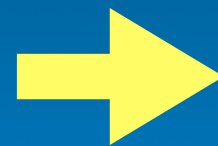
FGATIの採用検討

チャンネル数が増えた。アンプ・ディスクリの集積度を上げたい。

FGATI (ASIC) を流用できるか？ : **16チャンネル入力**



我々の用途ではアナログ出力が不要
入力波高が常に1 p.e.かつS/Nが良い

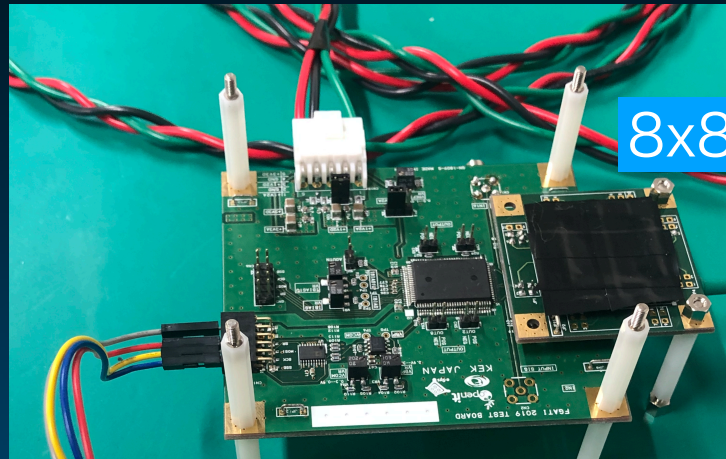


オーバースペック気味だが、
デジタル出力が出たら使える

FGATI動作テスト

佐藤知宙

アナログ系



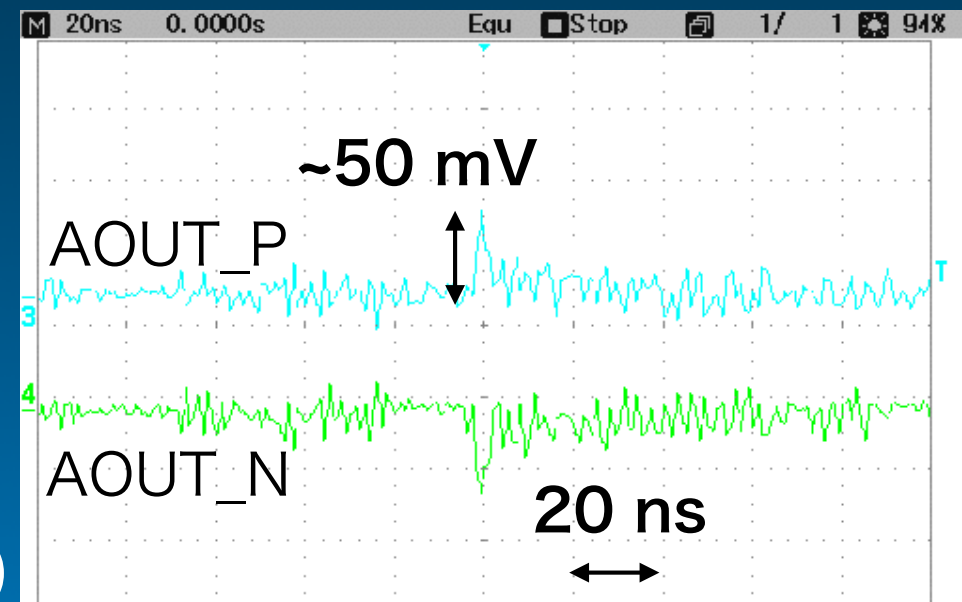
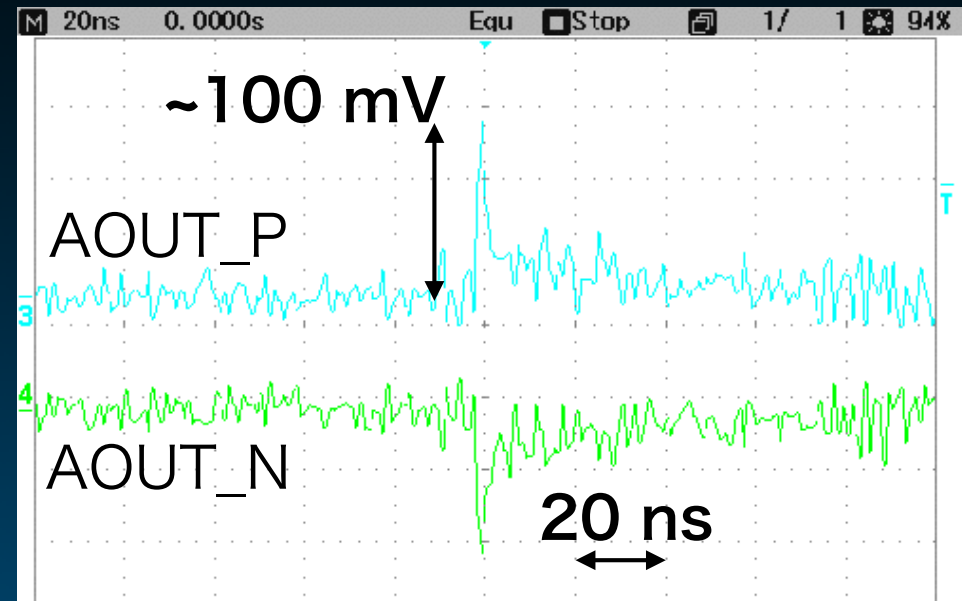
8x8 GAPD

FGATIテスト基板



SPI用ラズパイ

$V_{ov} \sim 5.5 \text{ V}$ ($G \sim 7e+6$)
(最初なので高めにしていた)



アナログ出力、ゲインの可変動作も確認

FGATI動作テスト

デジタル系

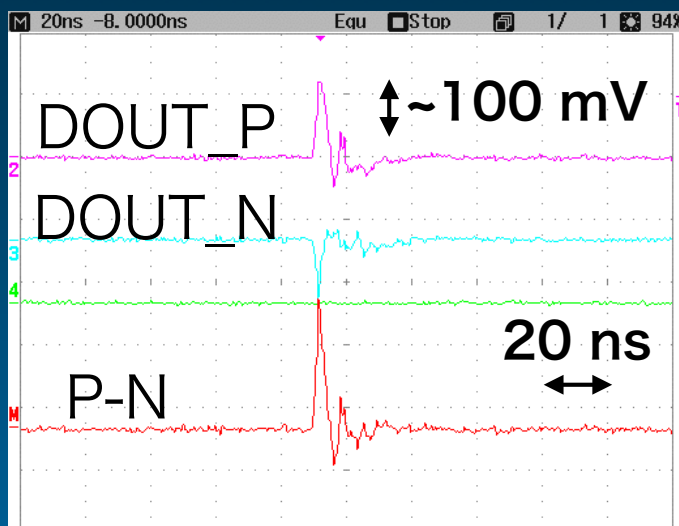
コンパレータのオフセットを調整すれば、
カスタムMPPCの1 p.e.パルスを拾い上げてデジタル出力が得られた。

→FGATIは我々のアプリケーションに使える

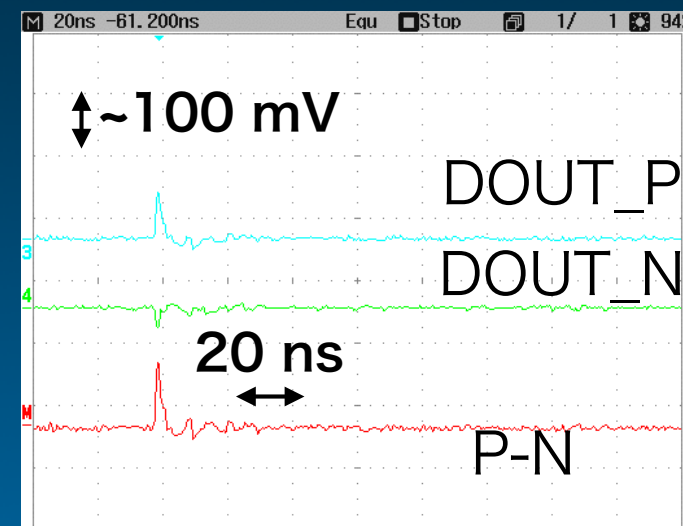
$V_{ov} \sim 2.5 \text{ V}$ ($G \sim 3e+6$)



オフセット低(0xAC)



オフセット中(0xBC)



オフセット高(0xDC)

入力が継続時間の短いパルスなので、しきい値を超える時間が短すぎると出力が低い
S/Nを最適にするオフセットを決めておくと良さそう

まとめと今後

- 単光子に感度を持つ**可視の高速動画撮像システム**を開発中。
- セル読み出しMPPC=GAPDアレイを制作
 - 1 p.e.のパルスしか出ないセンサ
 - 光子にタイムスタンプをつけるだけのDAQ
- **4x4画素系**
 - アンプ・ディスクリ・HV搭載フロントエンド基板を製作
 - FPGAとSiTCPによるライトカーブ取得
 - 課題はあるがなんとか動いている
- **8x8画素系**
 - FGATIを採用して処理系を開発する計画