



可視光子計数法による 高時間分解能のCrabパルサー観測



山形大理 中森健之

大内優雅、荻原理沙、加藤悠平、柴田晋平

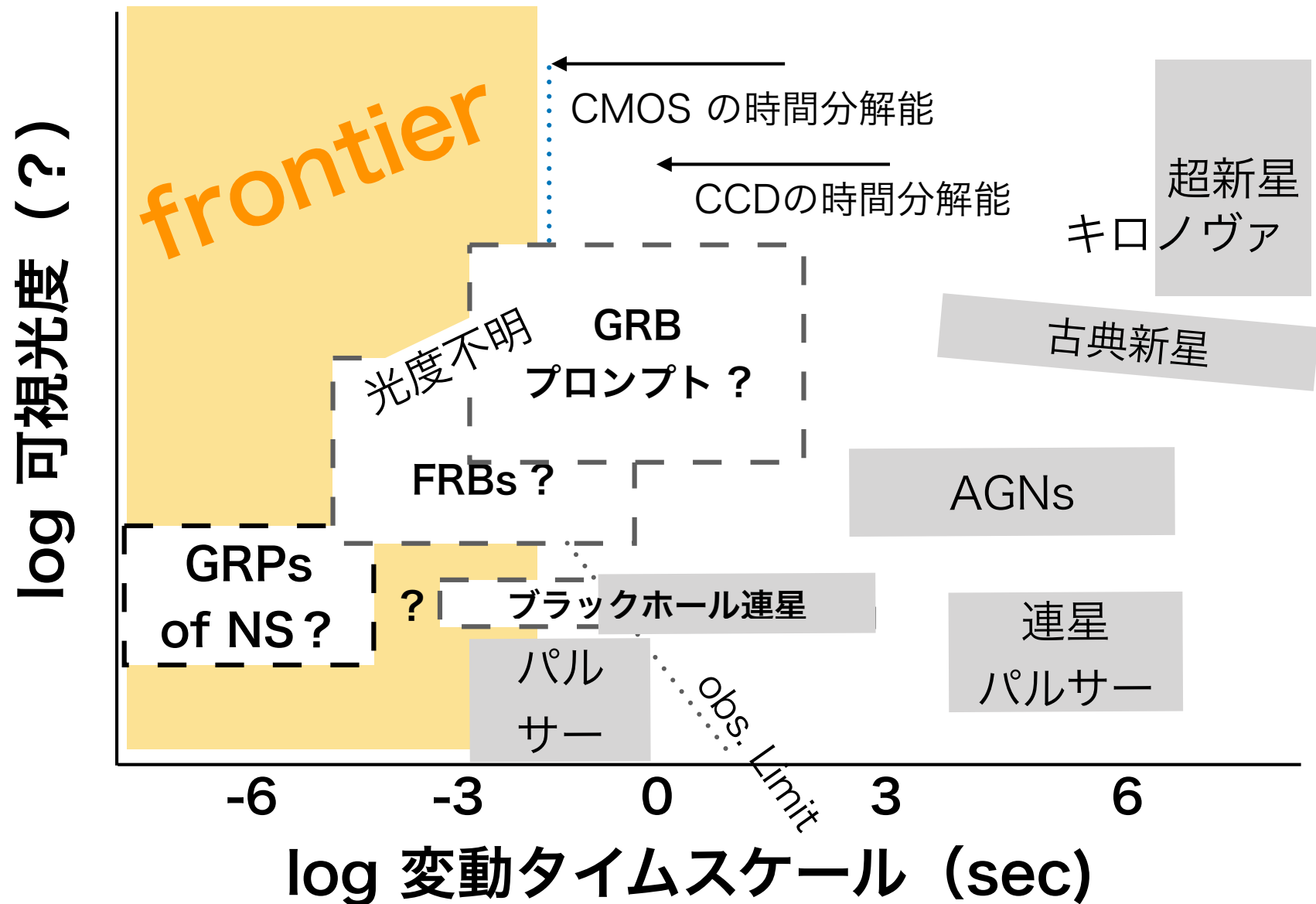
NAOJ 寺澤敏夫

2019年11月19日

高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論@ICRR

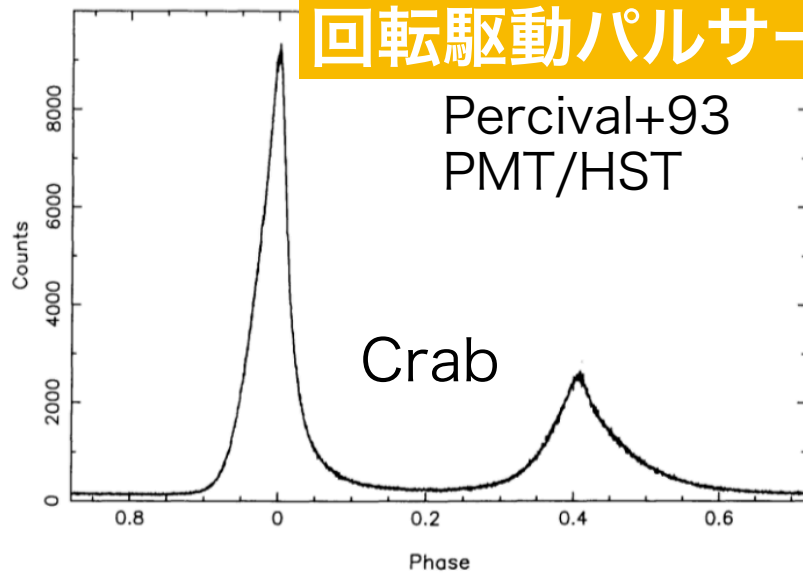
Optical transient studies

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



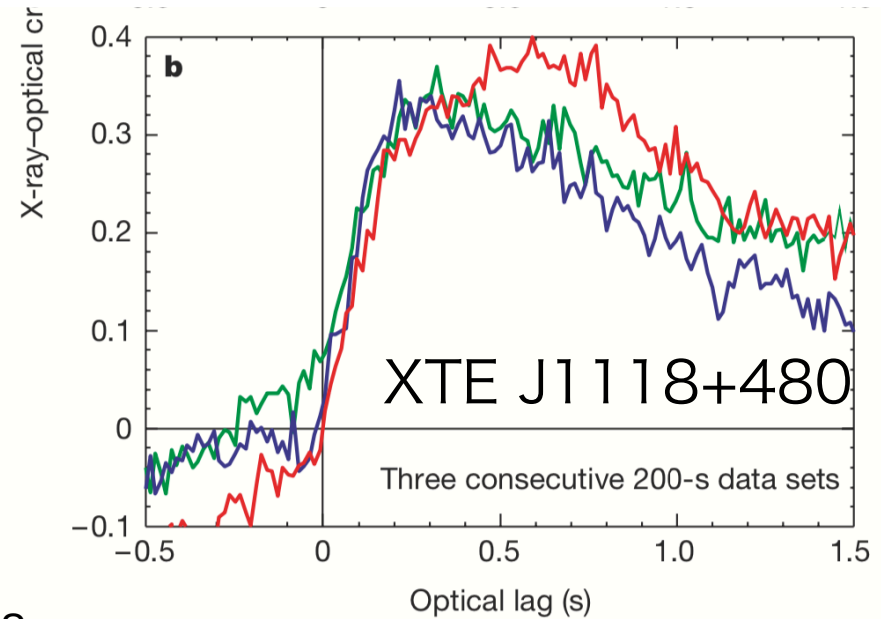
High Δt optical obs

回転駆動パルサー



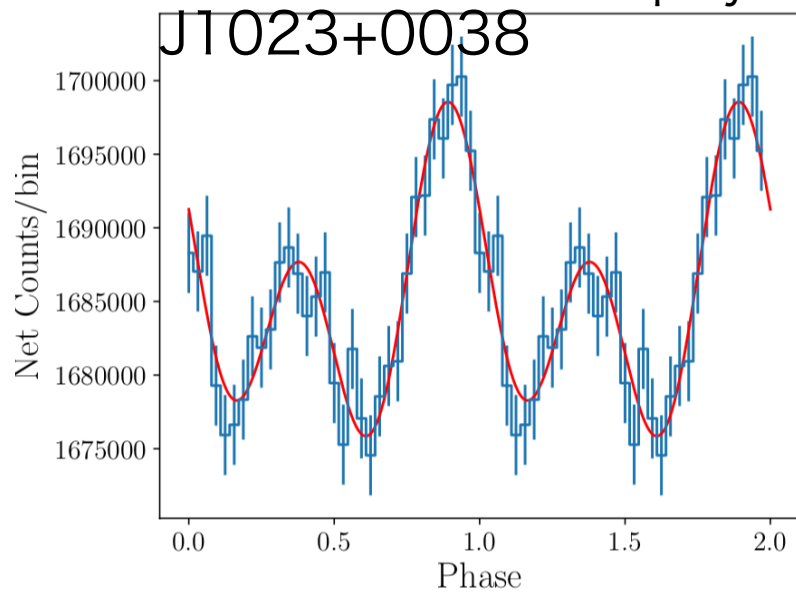
連星BH

Kanbach+01

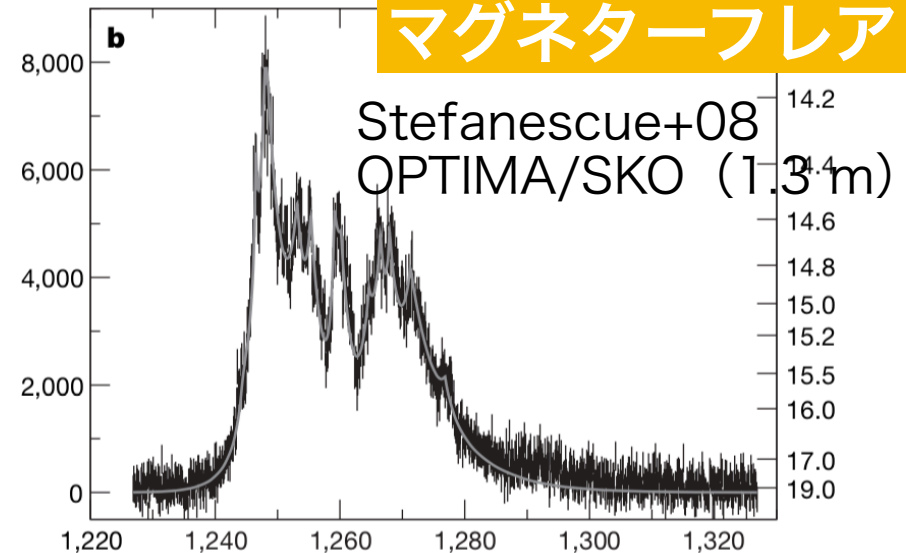


ミリ秒パルサー

Zampieri+19
Aqueye+/Copernicus



マグネターフレア



Δt -FOV

遠いゴール

時間分解能良い

(非撮像) PMT
S/N悪

この辺を狙う

SPAD
(非撮像)

CMOS

攻める方向

広視野

位置不定性の大きな天体向き
参照星を同時に取れる

狭視野

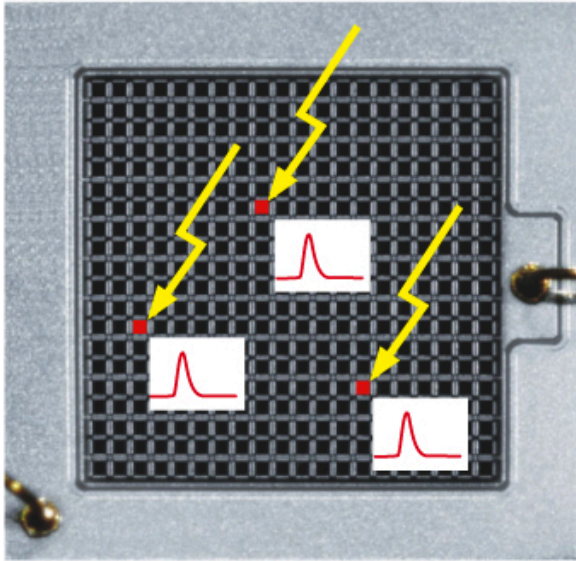
既知点源向き
Sky BGが必要

CCD

時間分解能悪い

MPPC/SiPM

1.3/3.0/6.0 mm
↔



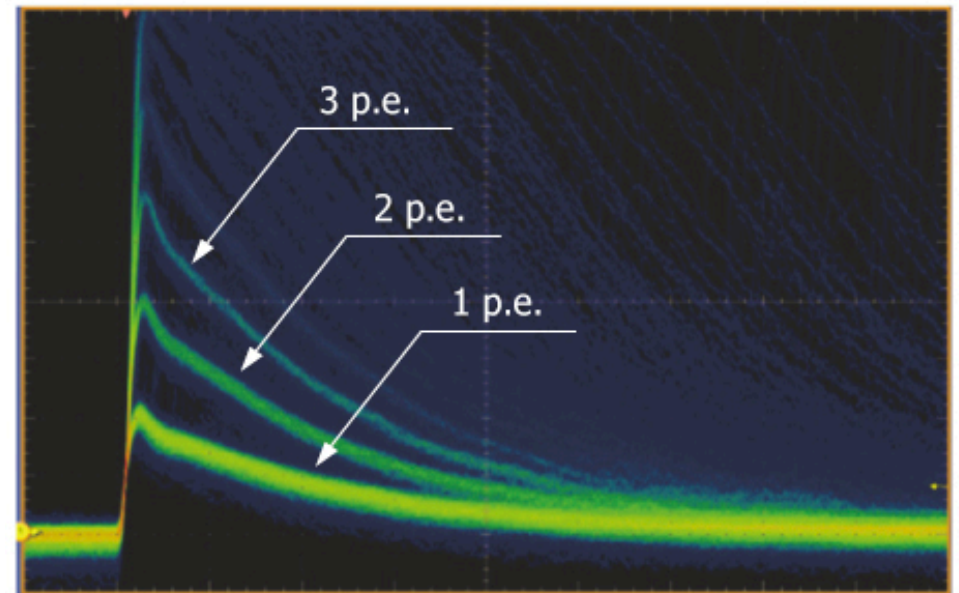
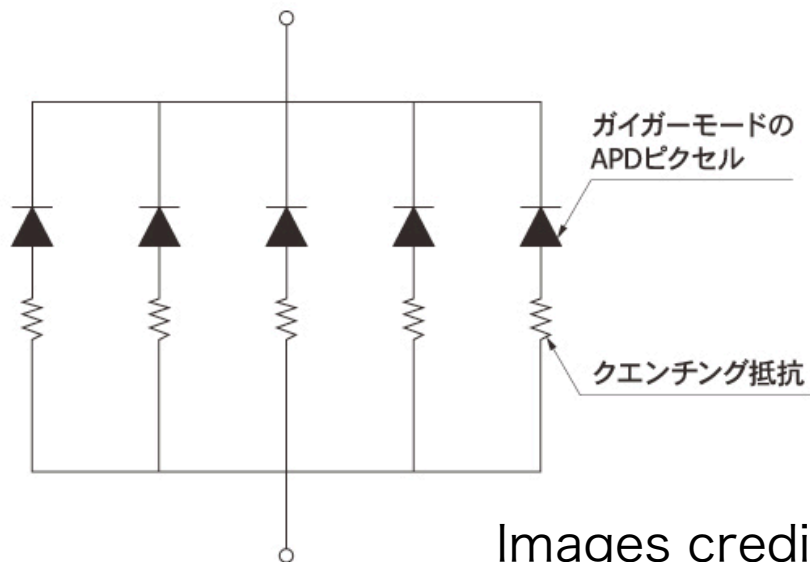
- 10-75 μm 角有感セルのアレイ
- 光子検出→ガイガー放電=ゲイン 10^6
- 全セルのアナログ和出力

○ 単光子が検出できる

○ 高速応答 $O(\text{ns})$

△ 合算されるため熱雑音が多い = ダークノイズ大

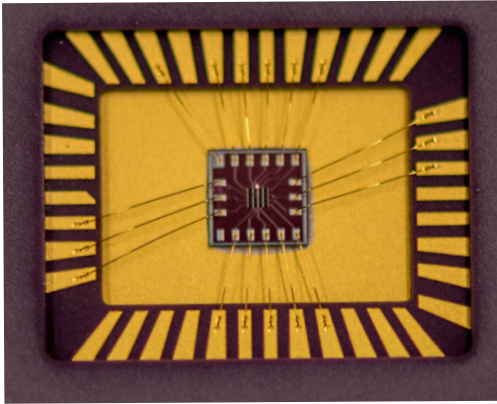
△ 「ピクセル」サイズが大きい = スカイBG大



Images credit: HPK

Geiger APDアレイ

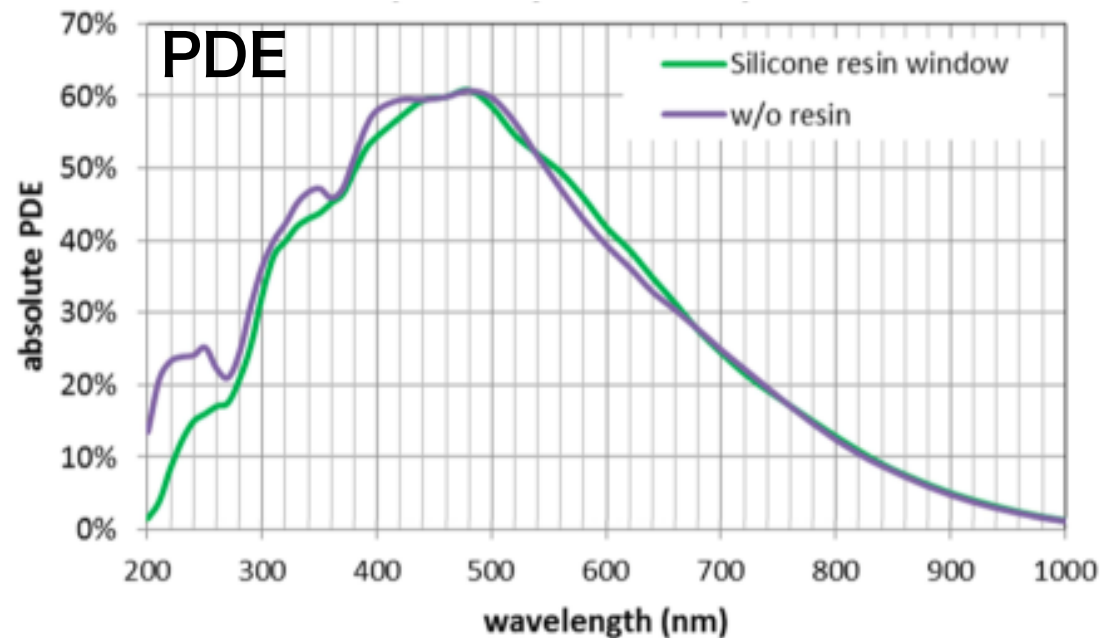
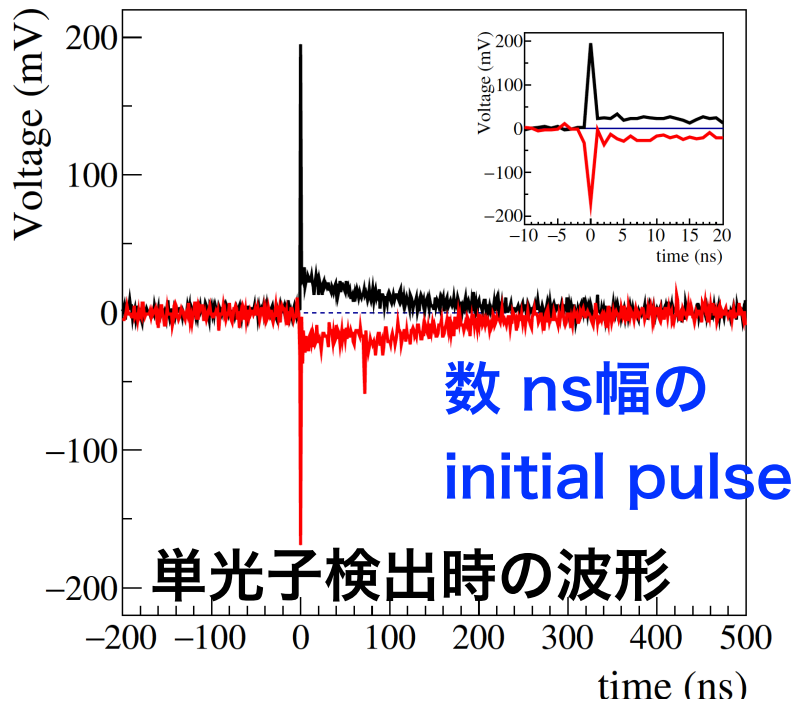
MPPCをカスタマイズ、セルごとに信号読み出し



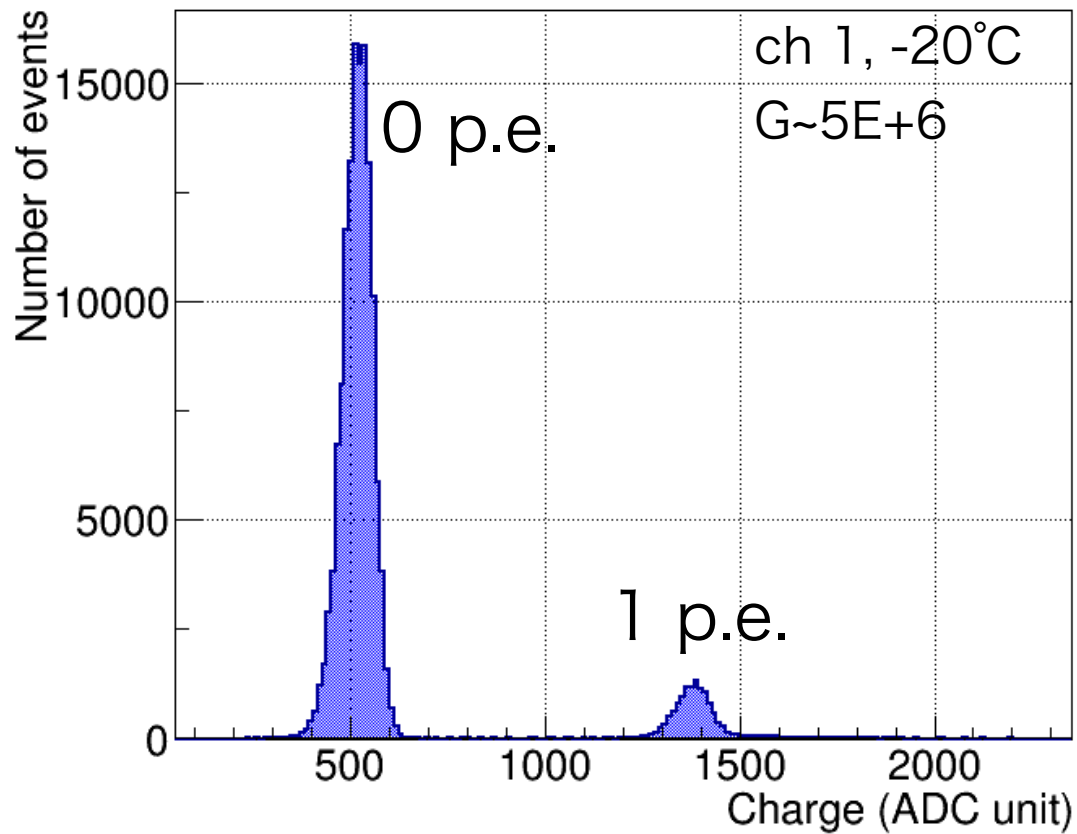
★ $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2/\text{pixel}$ 熱雑音・夜光雑音を1/100に

★ 4x4画素 荒い「撮像」が可能に。
光子計数の可視光天文学！

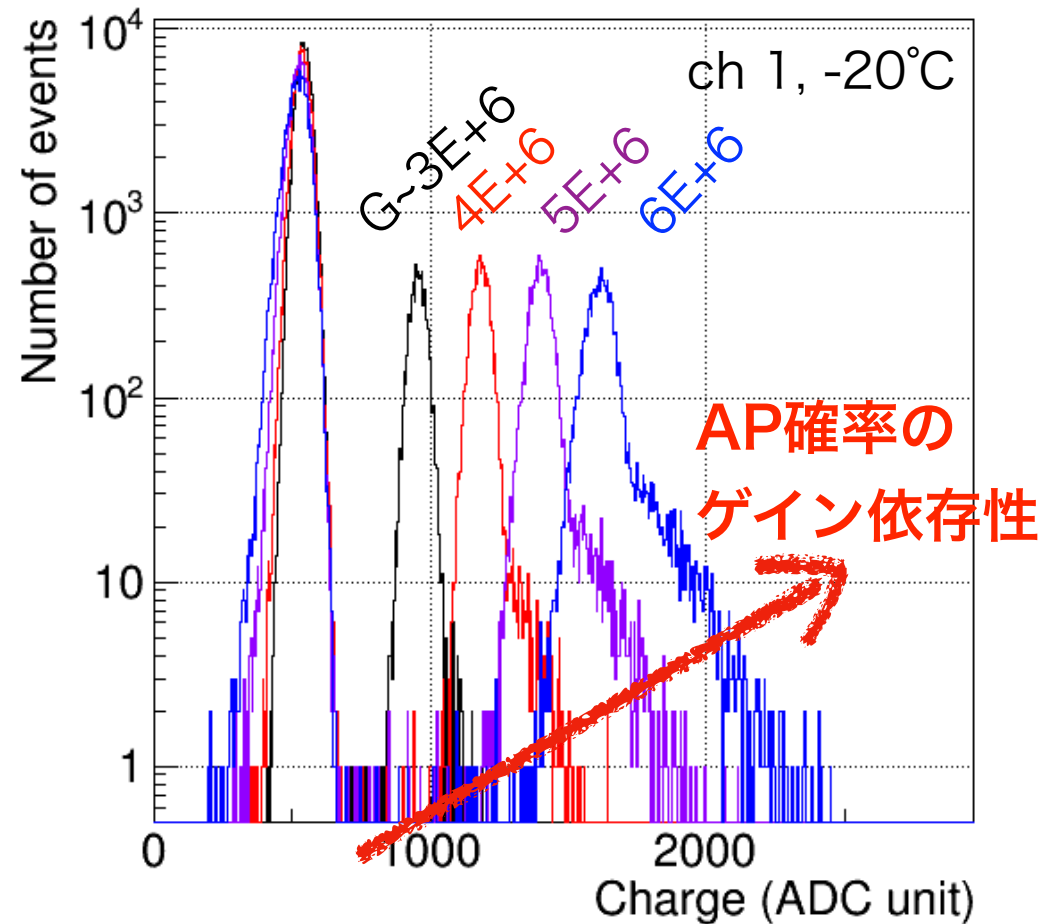
★ シリコン半導体＝可視に感度。赤外への展開も



LED照射スペクトル



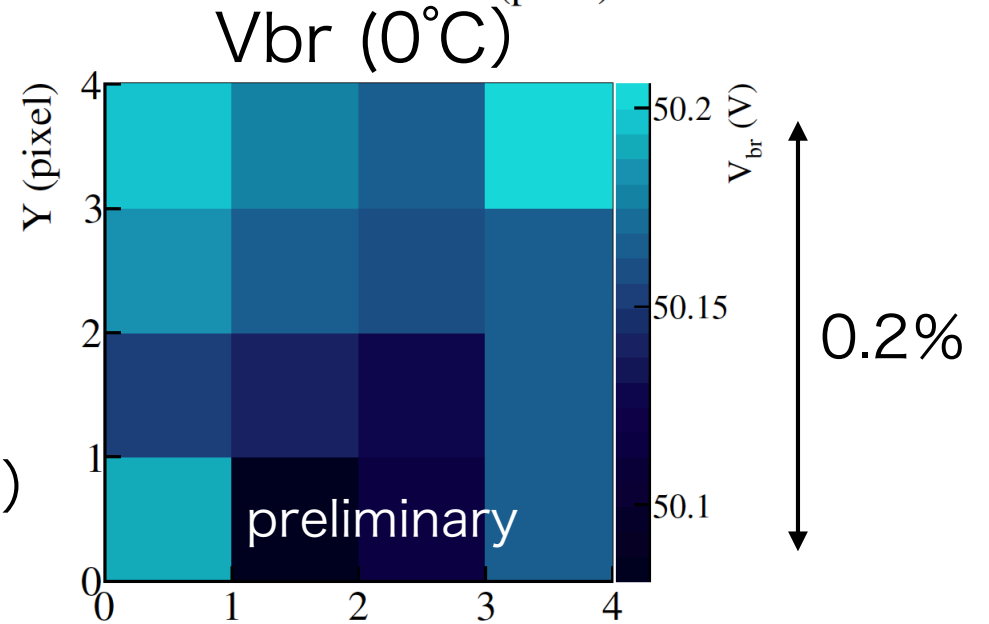
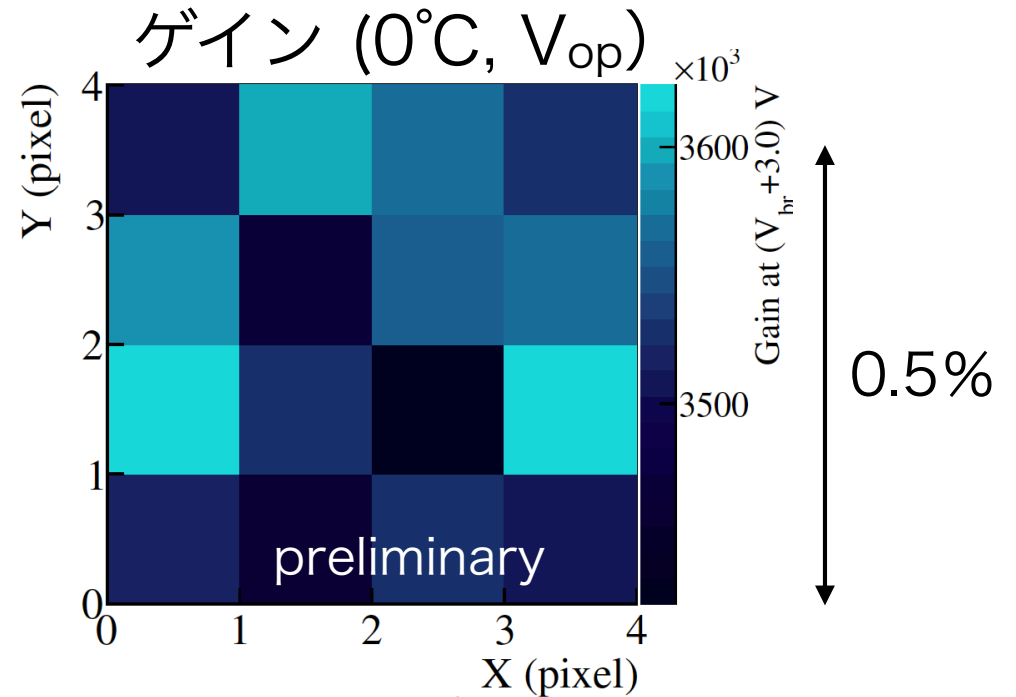
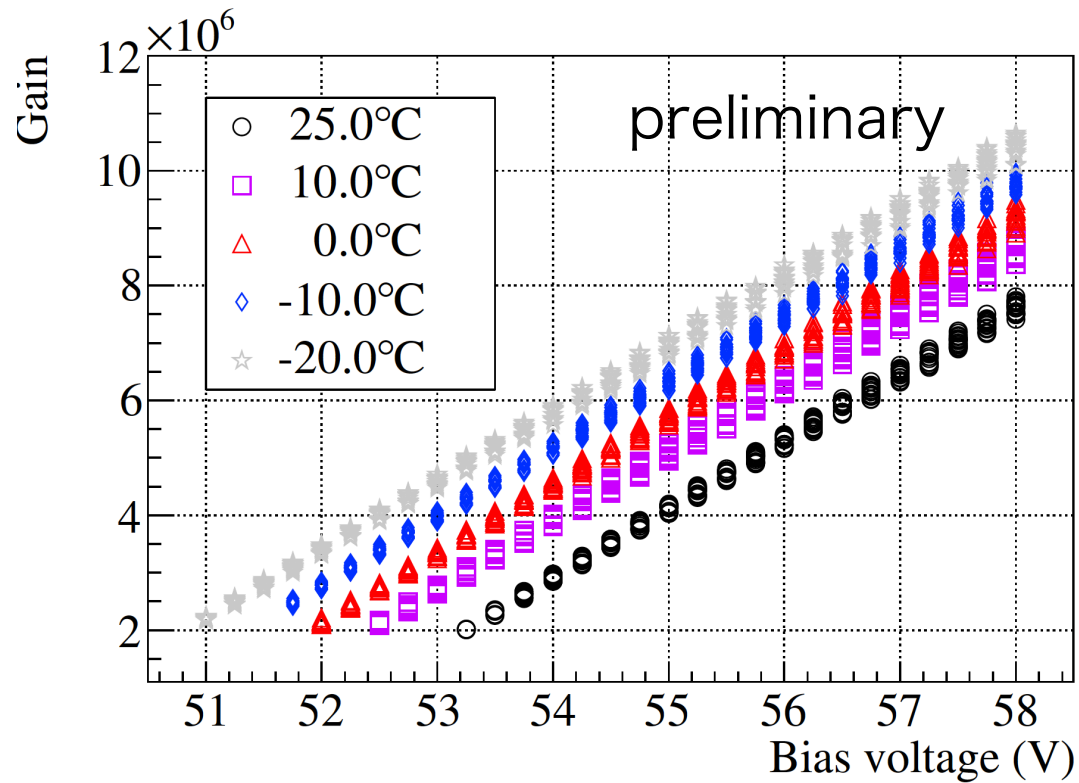
2 p.e.以上のピークがない。
→1セルのセンサとして予想通り



アフターパルスによるテール
2 p.e.には相当しない。

ノイズとの分離が良好、低いアフターパルスレート

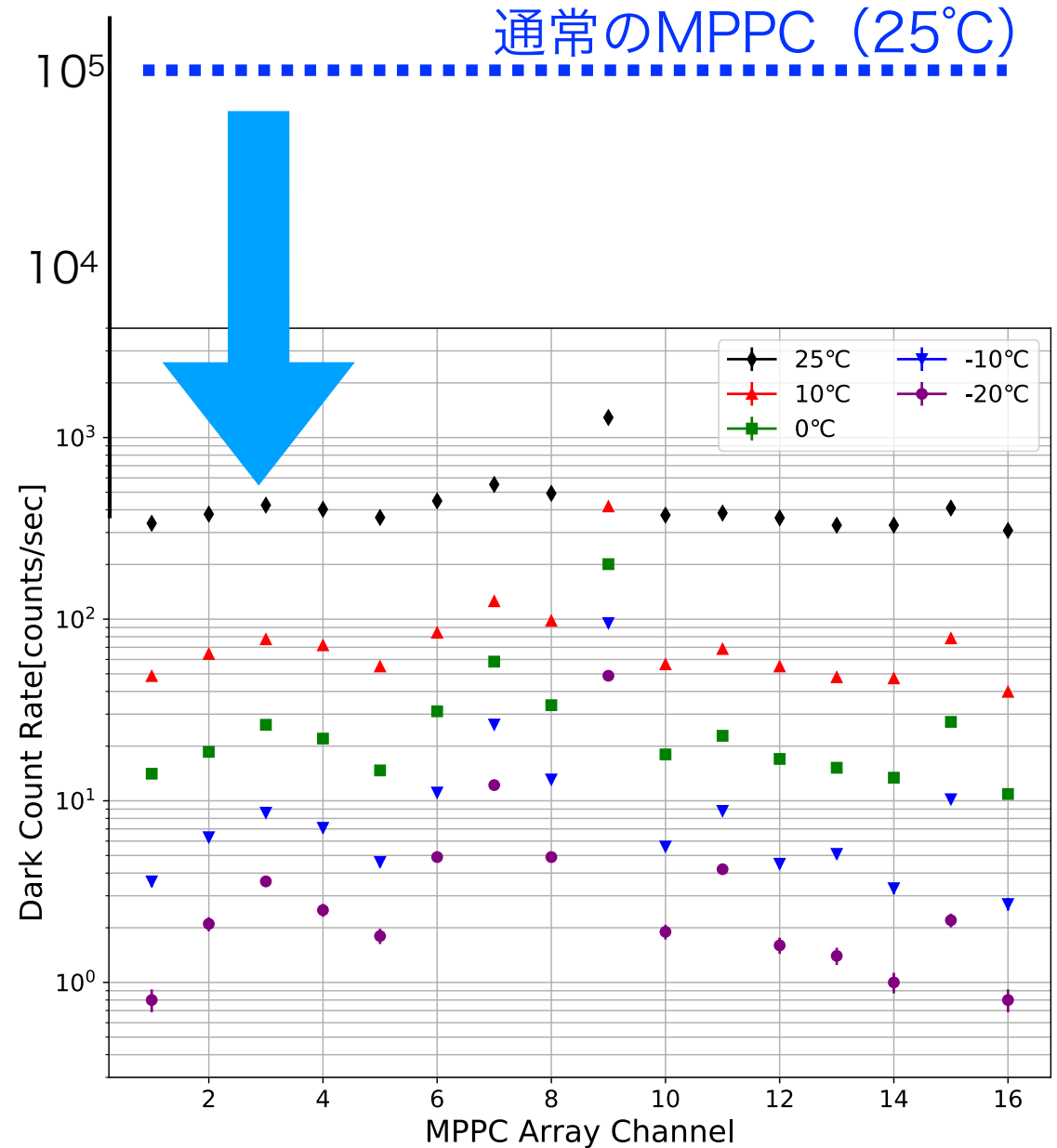
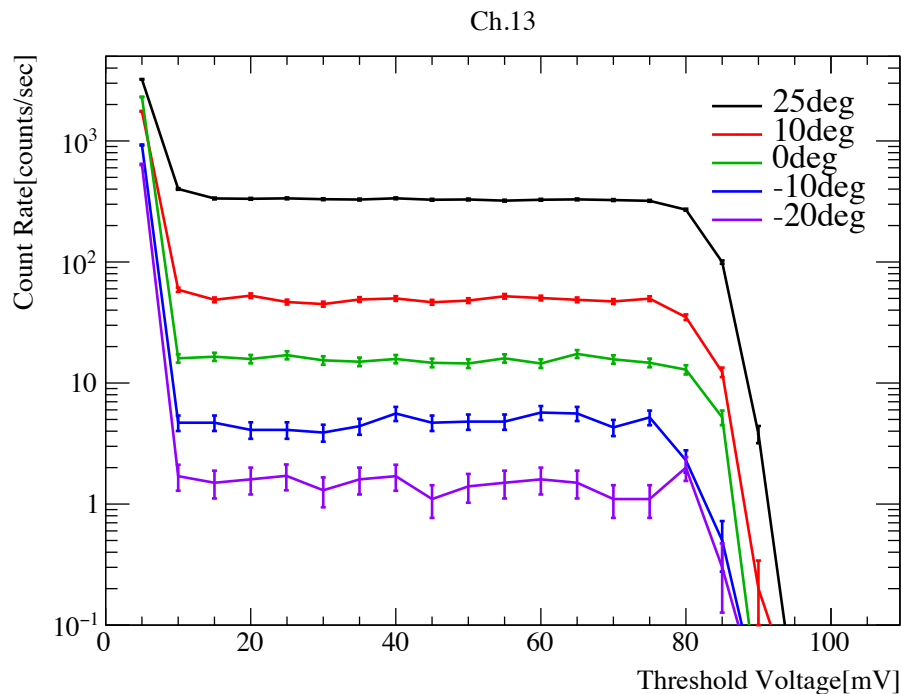
ゲインと均一性



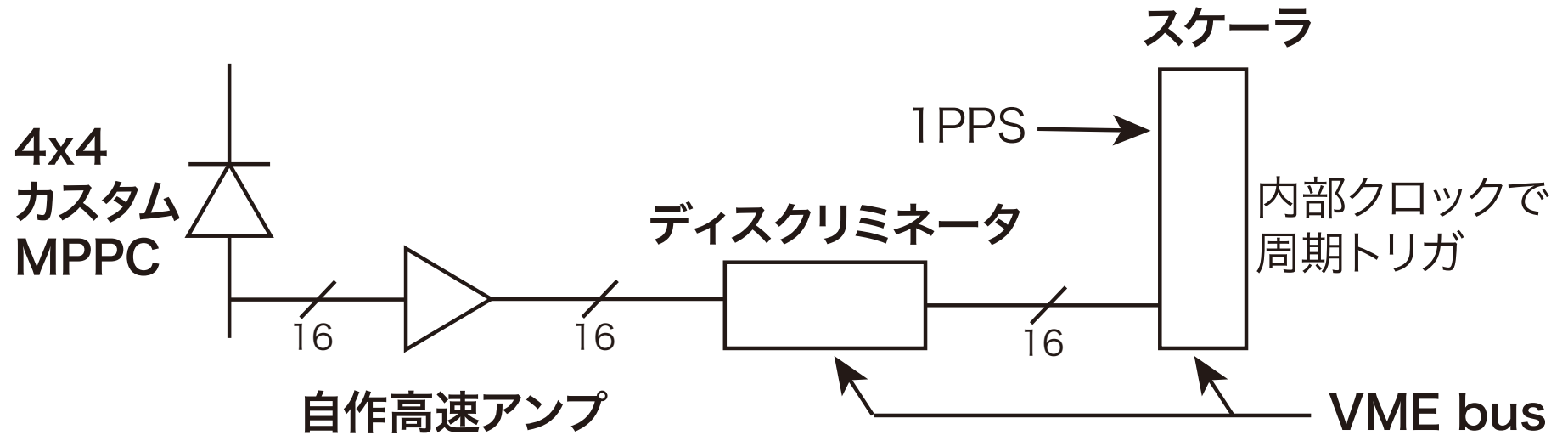
良好な線形性と一様性。
通常のMPPCと何ら遜色なし。
(本研究では悪くてもあまり影響がない)

低雑音を確認

- ・ 想定通り2桁下がった。
- ・ 冬季の気温で 0 (10 Hz)
- ・ 山形市の夜光～4 kHzに対して十分低い。



まにあわせのDAQ



- ★ VMEの16 chディスクリミネータで閾値設定
- ★ VMEの32 chスケーラでライトカーブを測定
 - ★ 内蔵のクロックによる周期トリガ (400 ns×整数)
 - ★ バッファにデータを格納、ある程度低速読み出しが可
- ★ 広帯域16 chアンプ基板を製作、NIMモジュールの撤廃

パルス毎の時刻付与はできないが、16 ch同時計測が可能

閾値設定・測定 of 効率化とリモート化

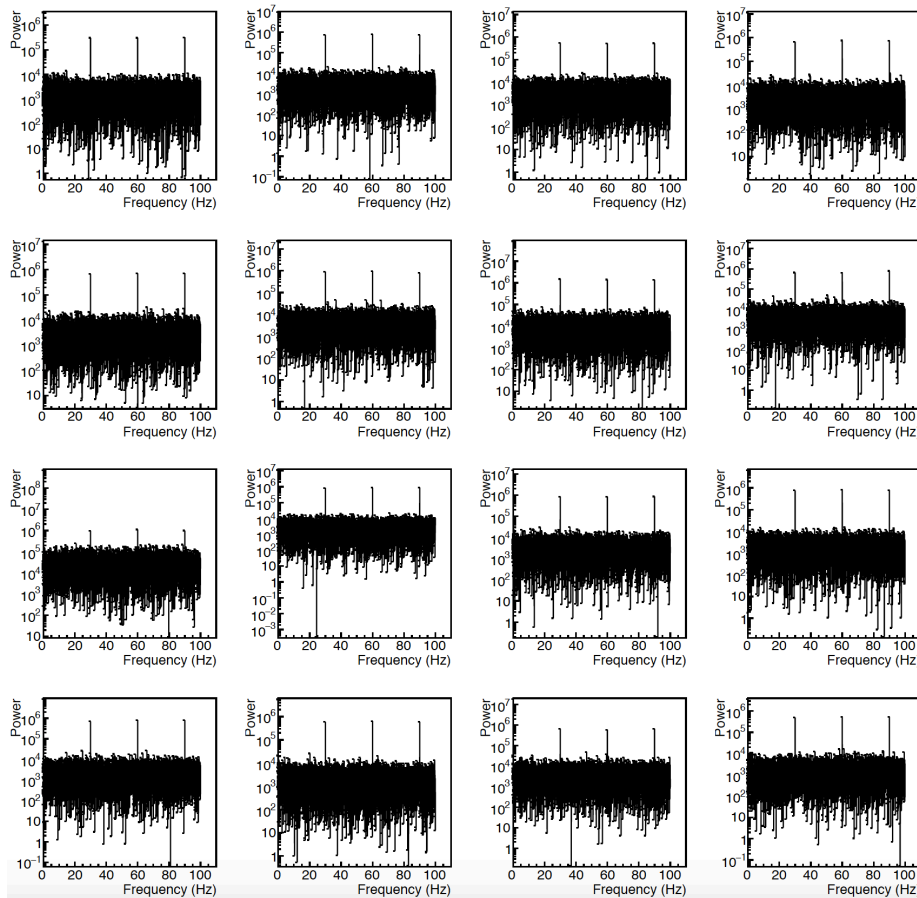
デッドタイムが完全に0になった

バッファがあふれないためには100 us程度の周期が現状の限界

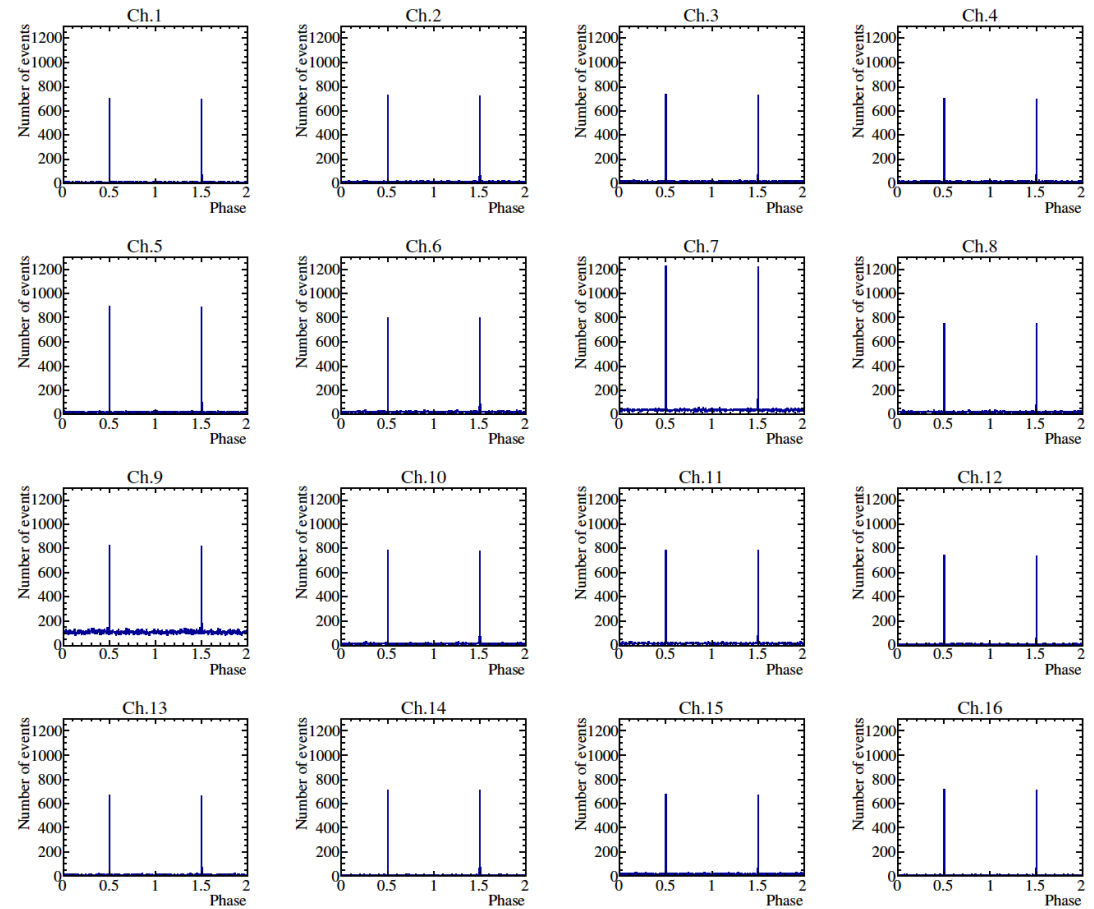
16チャンネル同時計測

30 Hzで点滅するLEDに暴露

FFTのpower spectra



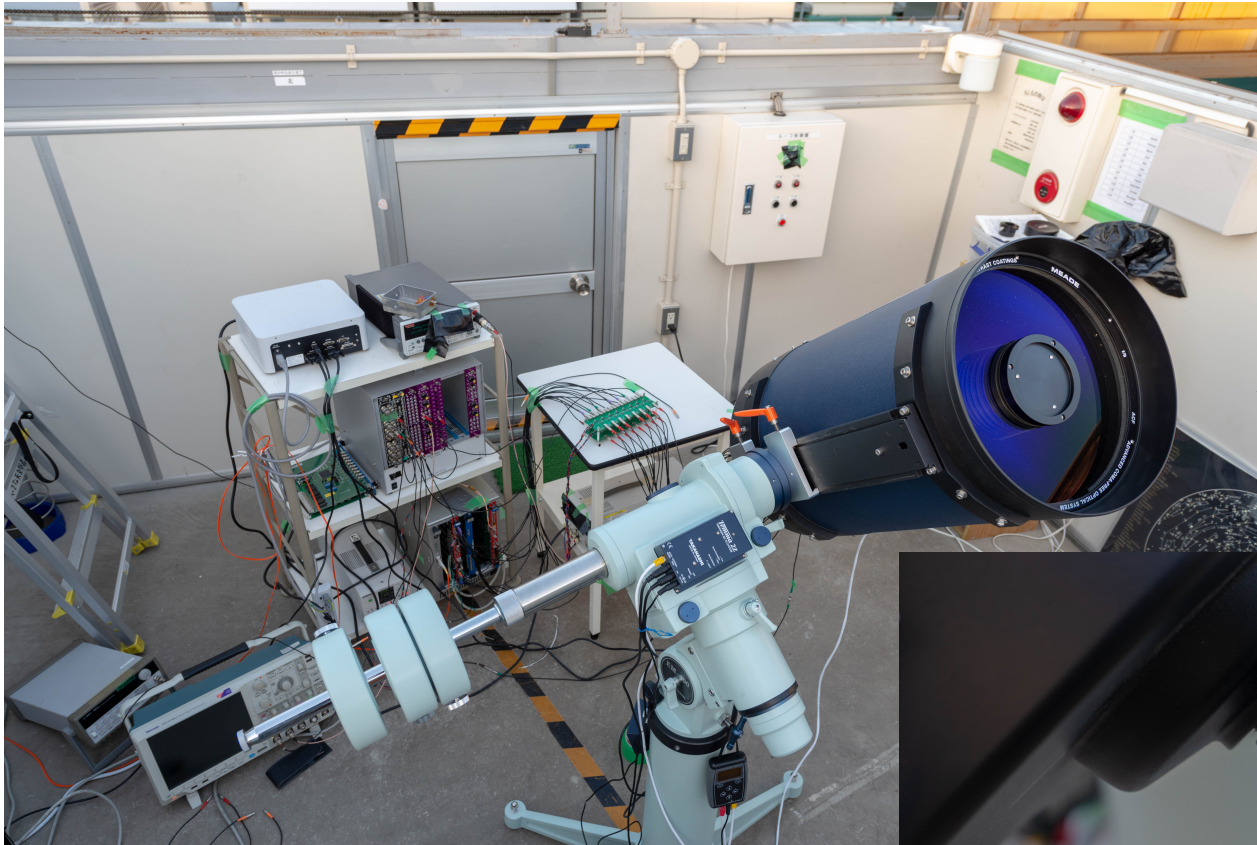
30 Hzのfolding LC



対応するピークが検出できた。

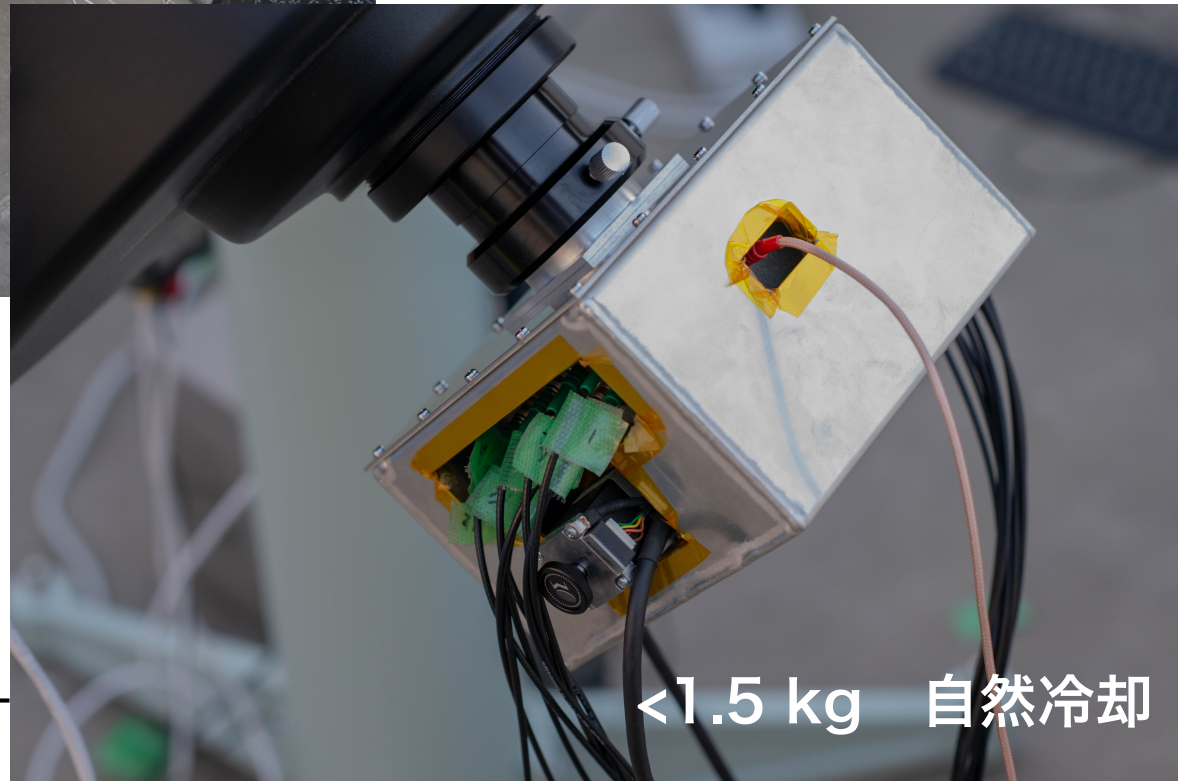
設計通りの時間分解能で測定・周期解析が可能なことを確認した。

まずCrabで動作実証を



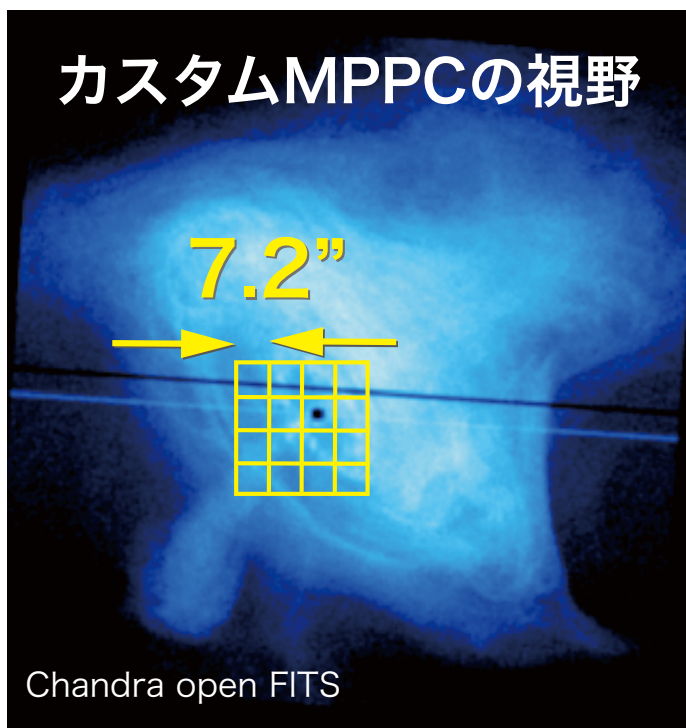
35cm望遠鏡と
システム全景

焦点面に取り付けた
検出器とXYステージ



<1.5 kg 自然冷却

視野と走査と合焦と



★視野がとても狭い

↓
目標天体の位置合わせが困難
ピント合わせが困難

★XYステージで走査、モザイク撮像

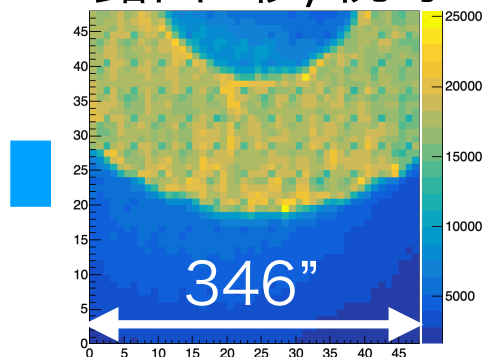
露出→移動→露出→移動→...

最大7分角程度の視野が使える

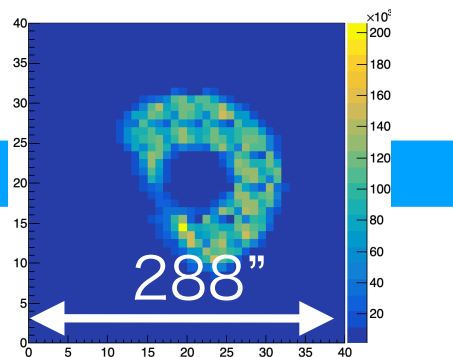
撮影を繰り返しながら手動ノブで合焦

手動なので再現性が悪い、鏡筒の向きでもずれる

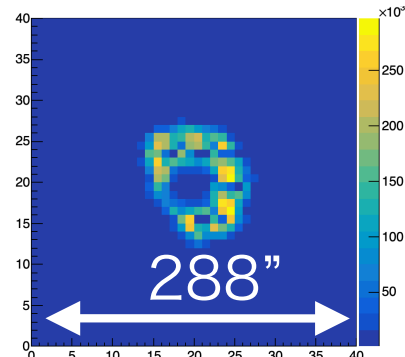
露出1秒/視野



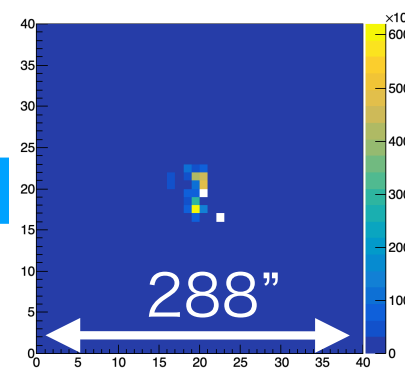
12x12視野



10x10視野



10x10視野



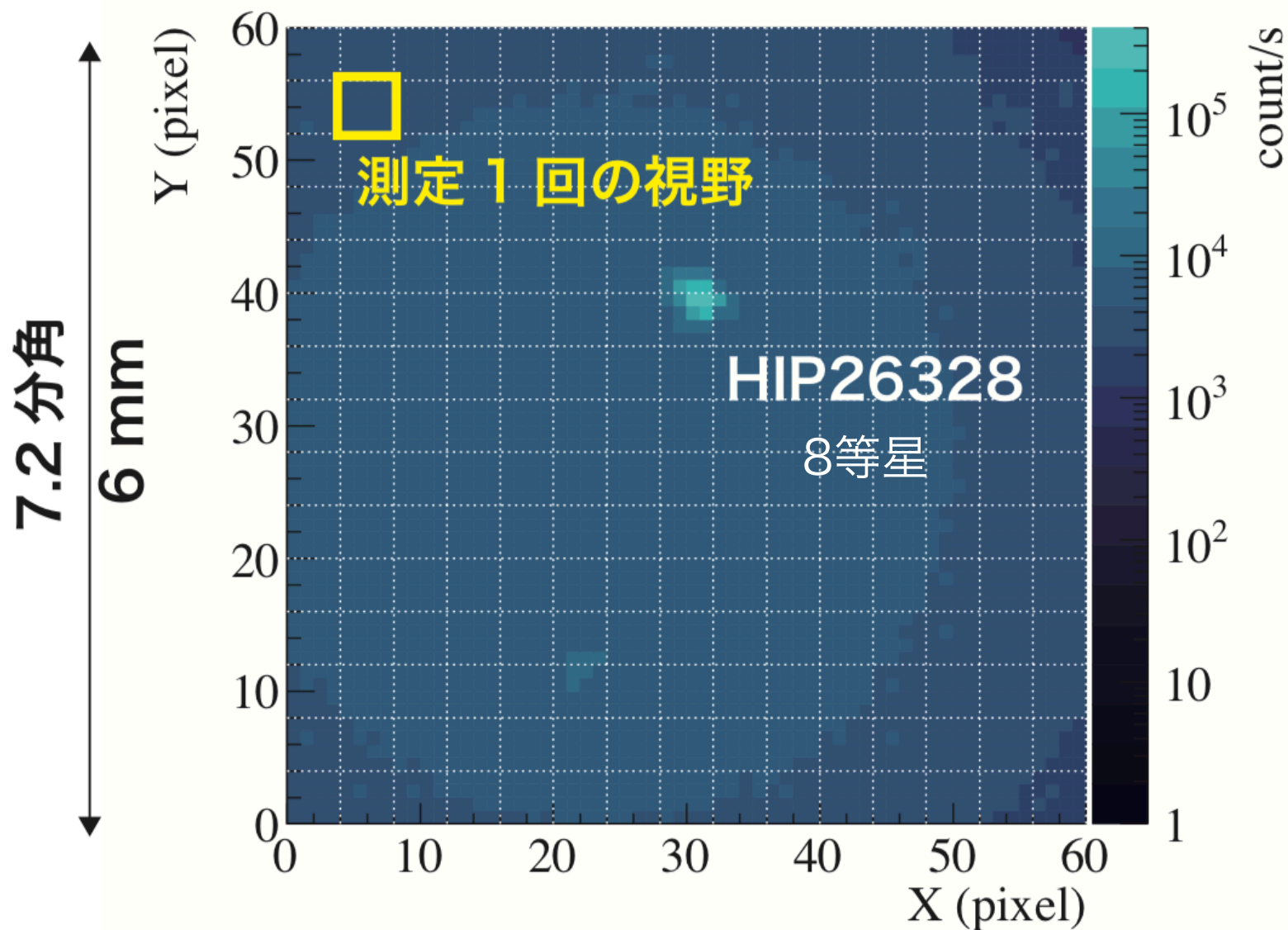
10x10視野



空の撮像

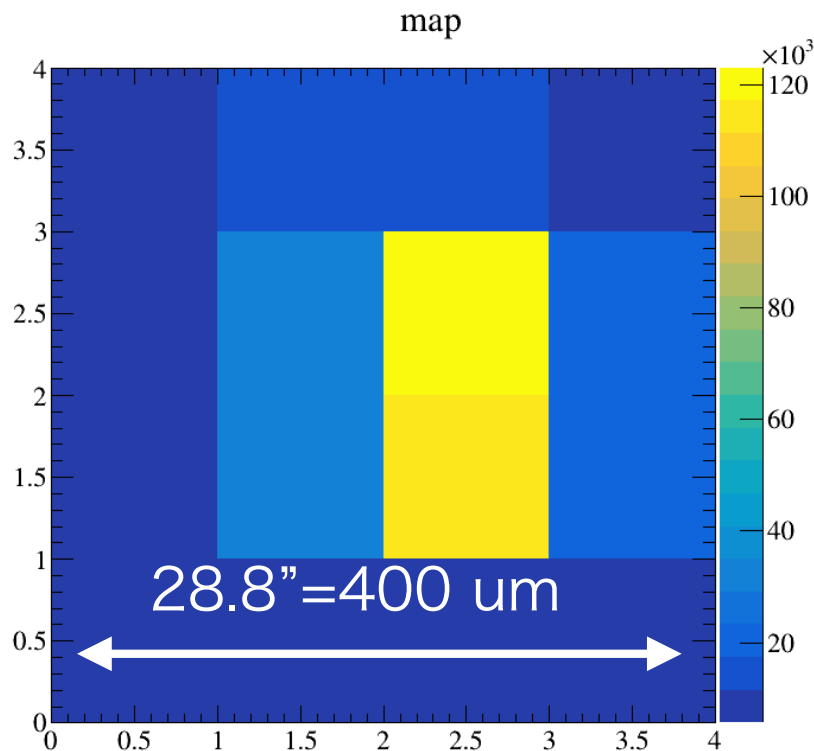
1秒露出 15×15視野

フラット補正済み



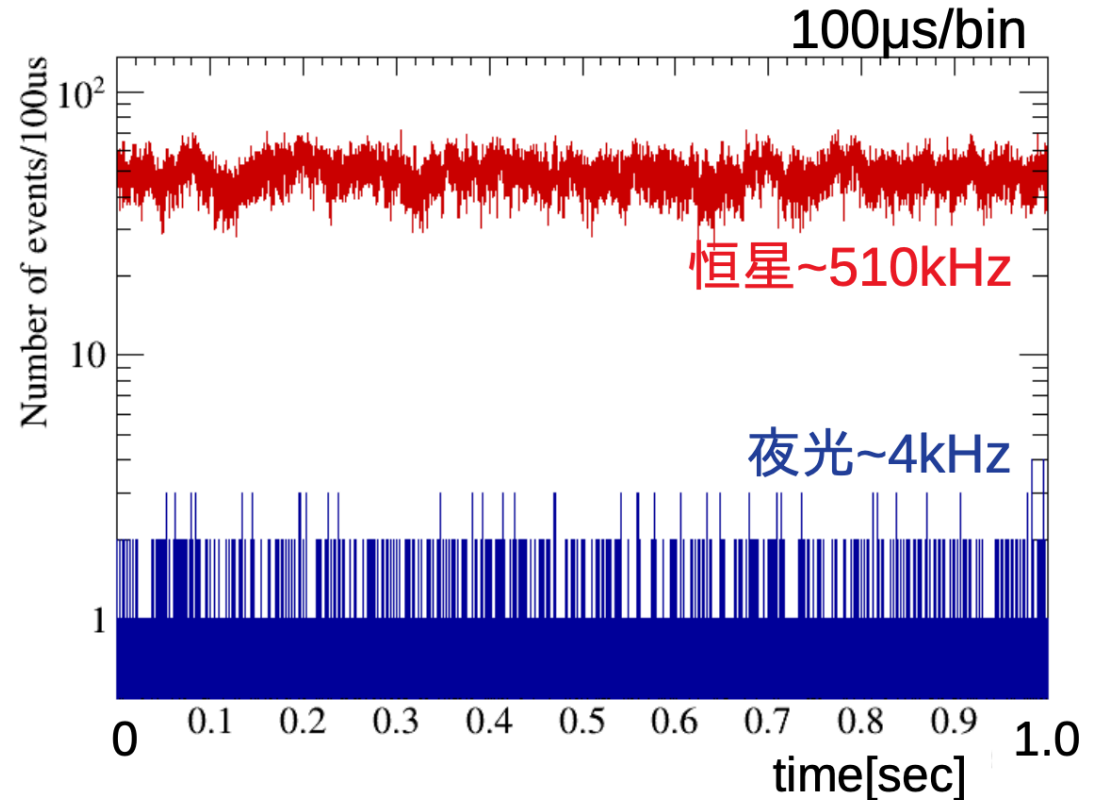
恒星の観測

★星像を1視野に収めた



8.7等星
1 frame/sec
1分間

★ライトカーブを計測



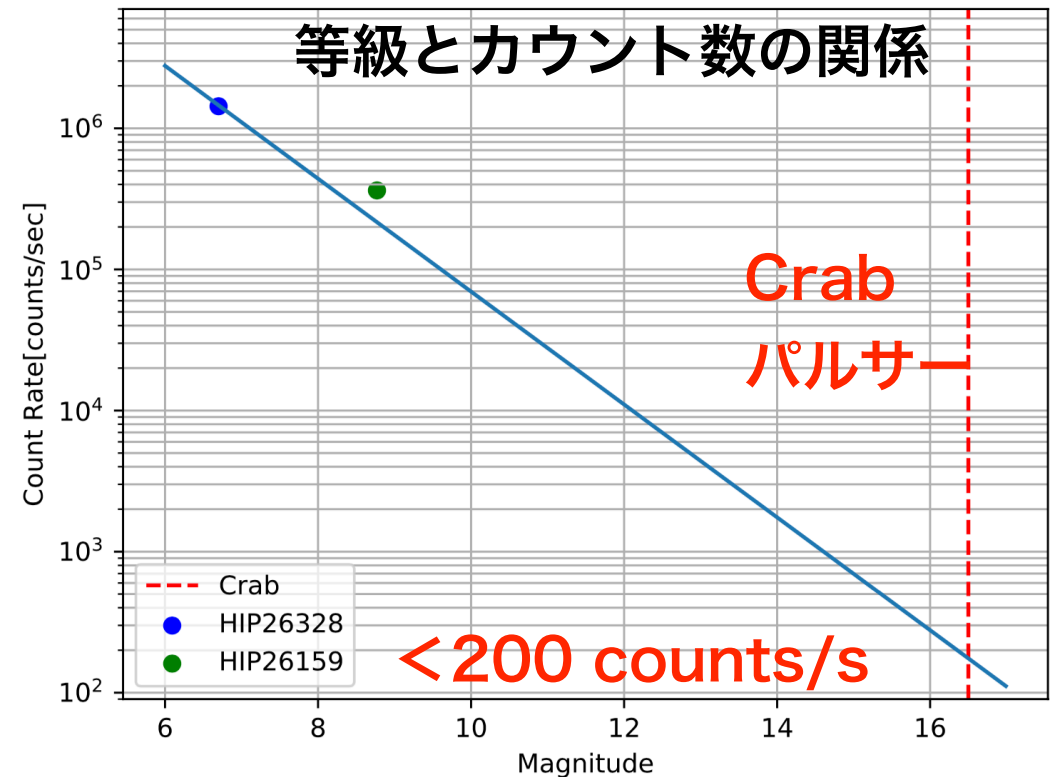
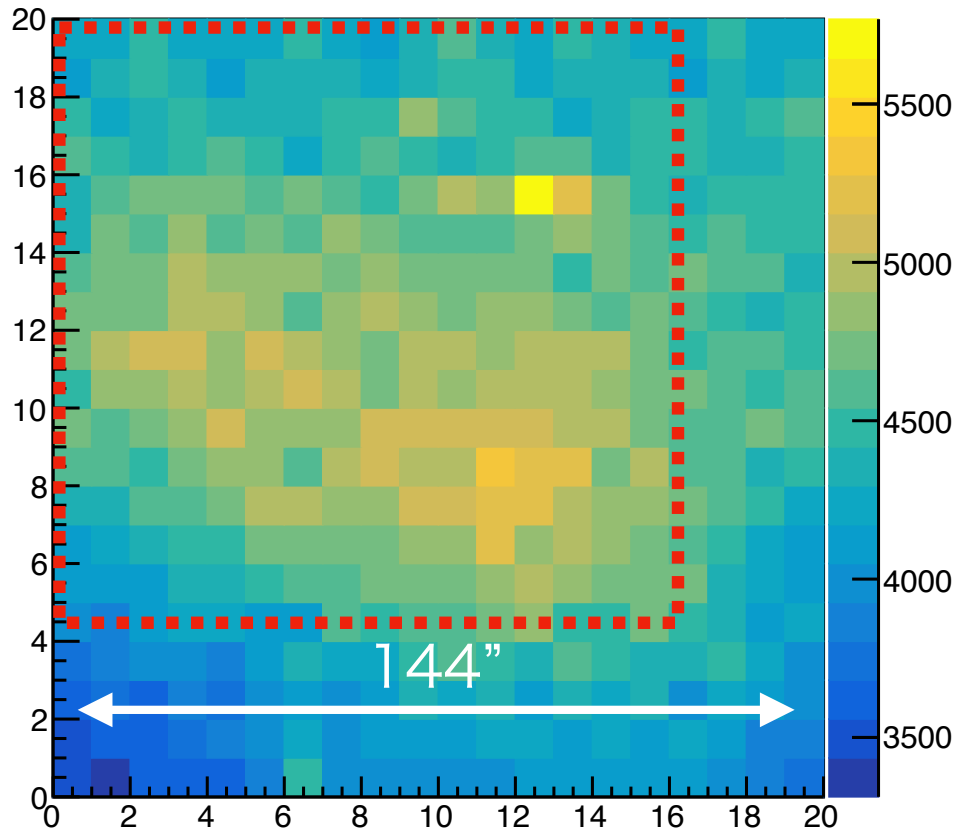
★星像は動いている

- 大気によるゆらぎ
- 赤道儀の追尾精度
- 赤道儀駆動系の機械的な周期振動

もう一回り大きなセンサが良い

かに星雲の撮像とパルサー探索

Crabパルサー周辺。X線の星雲程度の範囲



- ・ このカウントマップからはパルサーが同定できない。予想と矛盾しない。
- ・ 望遠鏡の操作からは中央付近にパルサーがあると予想。
- ・ 4x4視野分の1分間のライトカーブを繰り返しスキャン測定した。
- ・ UTCのToAをTDBに変換、JBO ephemerisで位相付与
- ・ 全測定ピクセルに対して周期探索

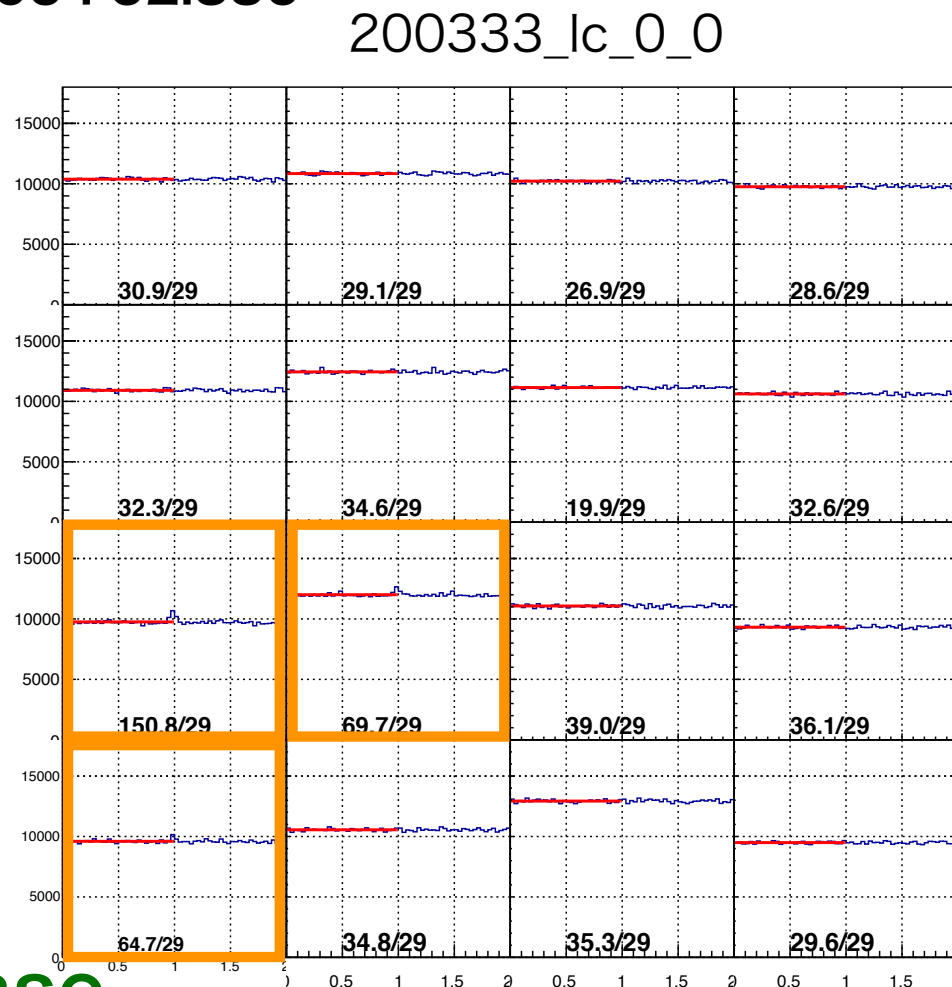
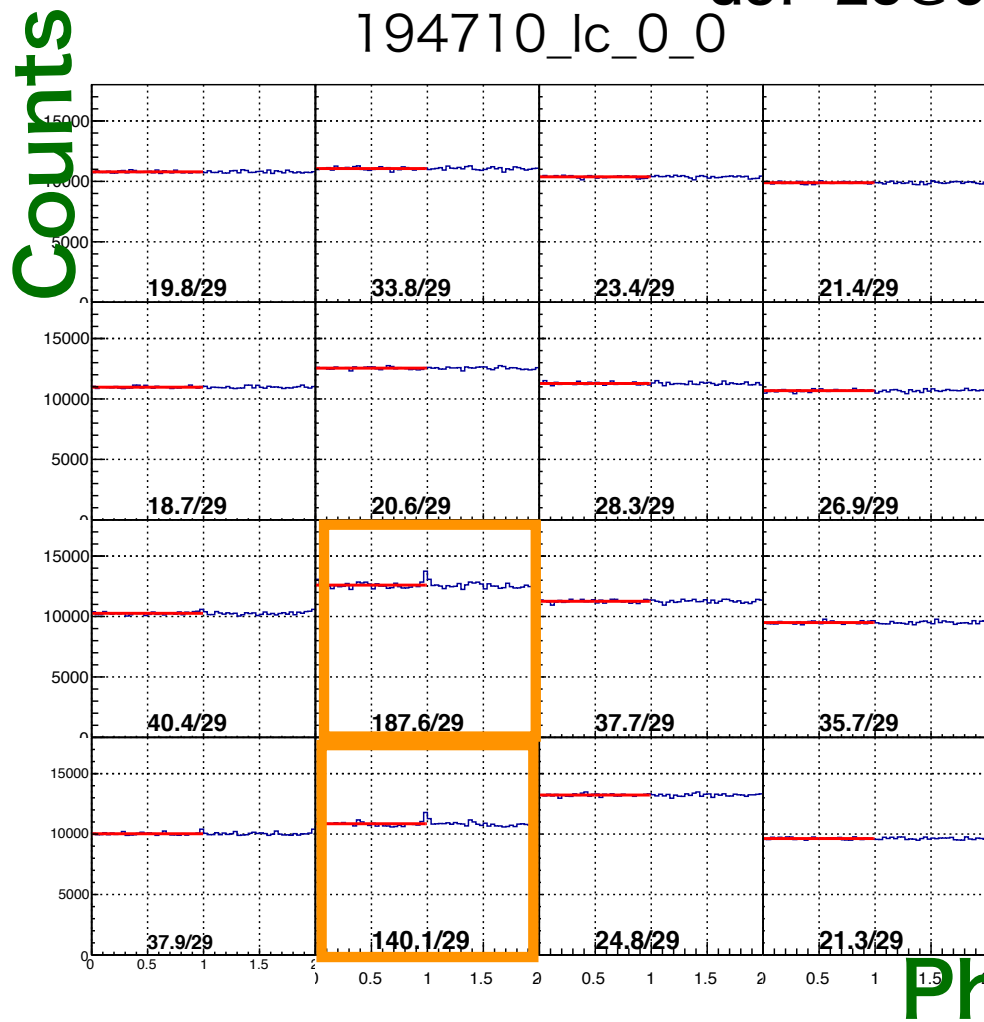
パルス検出チャネルの同定

統計負けしすぎないように1周期30ビンでライトカーブを作成。

カイ二乗が99.5%ラインより大きければ検出と定義。

dof=29@0.01 : 49.588

dof=29@0.005 : 52.336

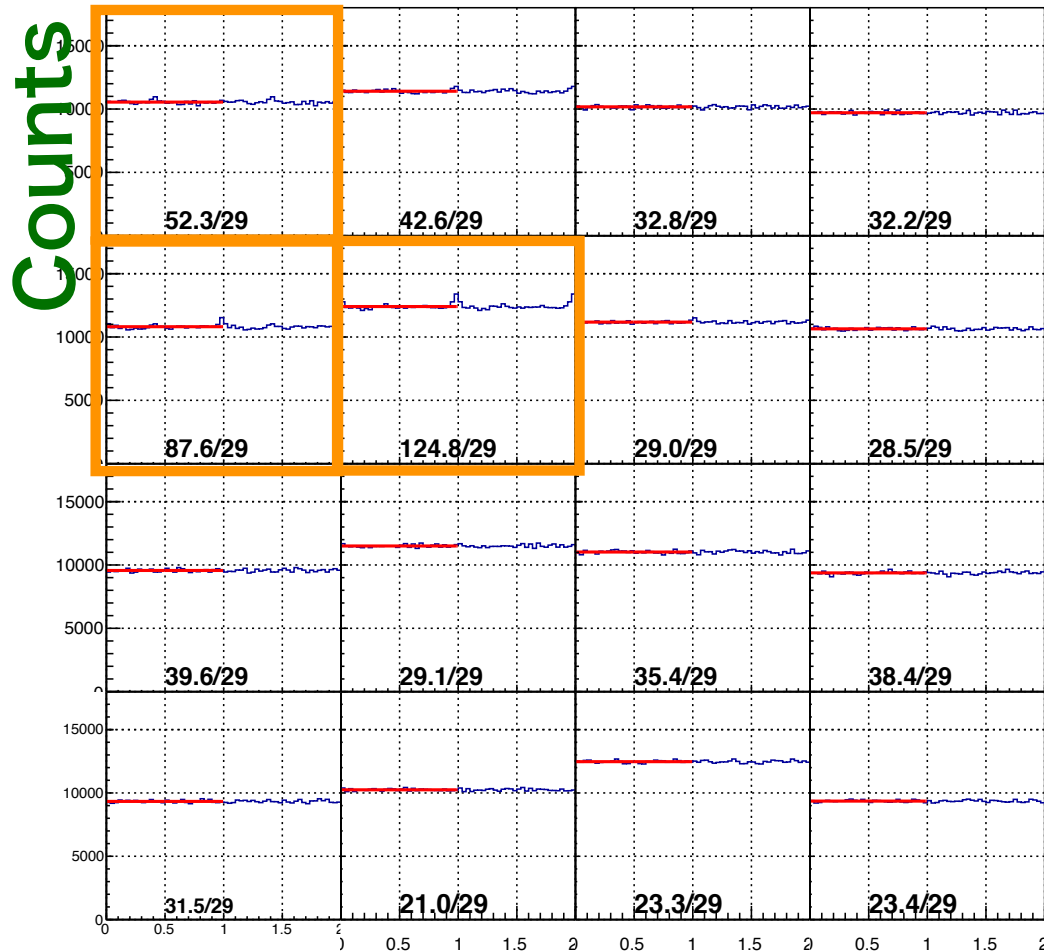


パルス検出チャネルの同定

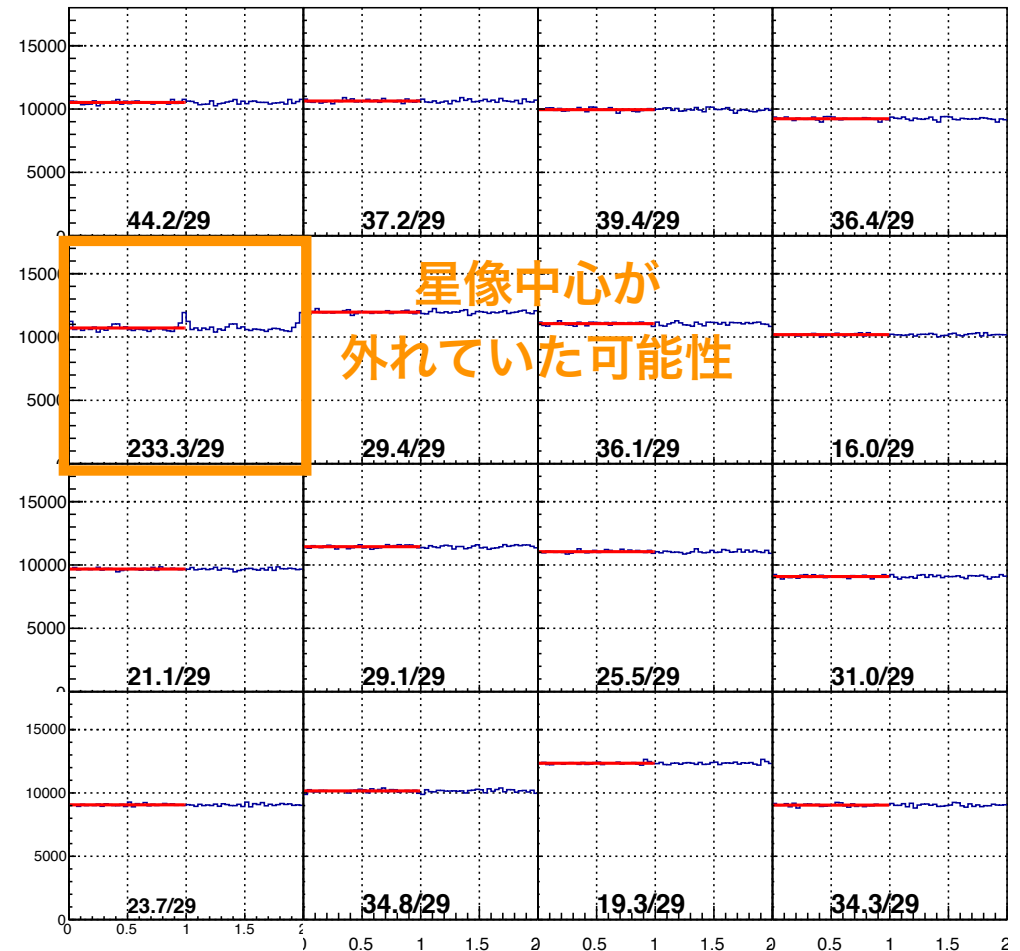
dof=29@0.01 : 49.588

dof=29@0.005 : 52.336

203000_lc_0_0



204926_lc_0_0

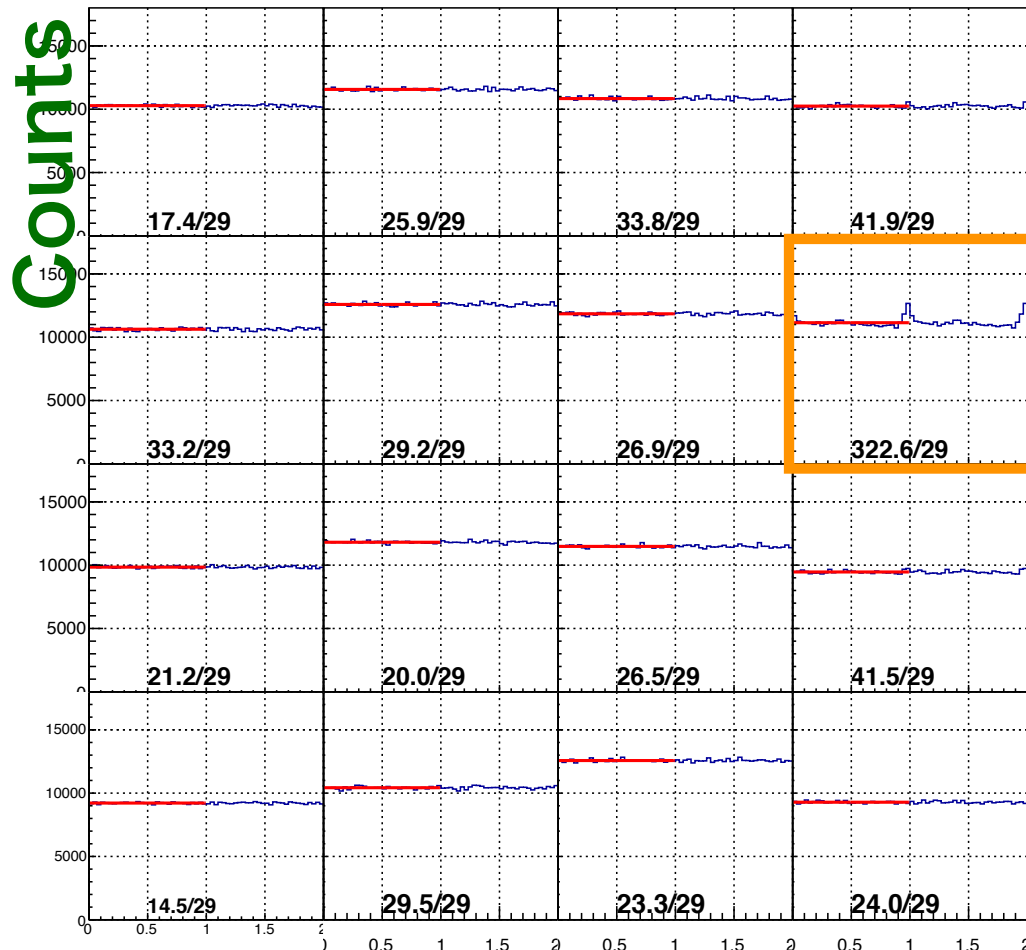


パルス検出チャネルの同定

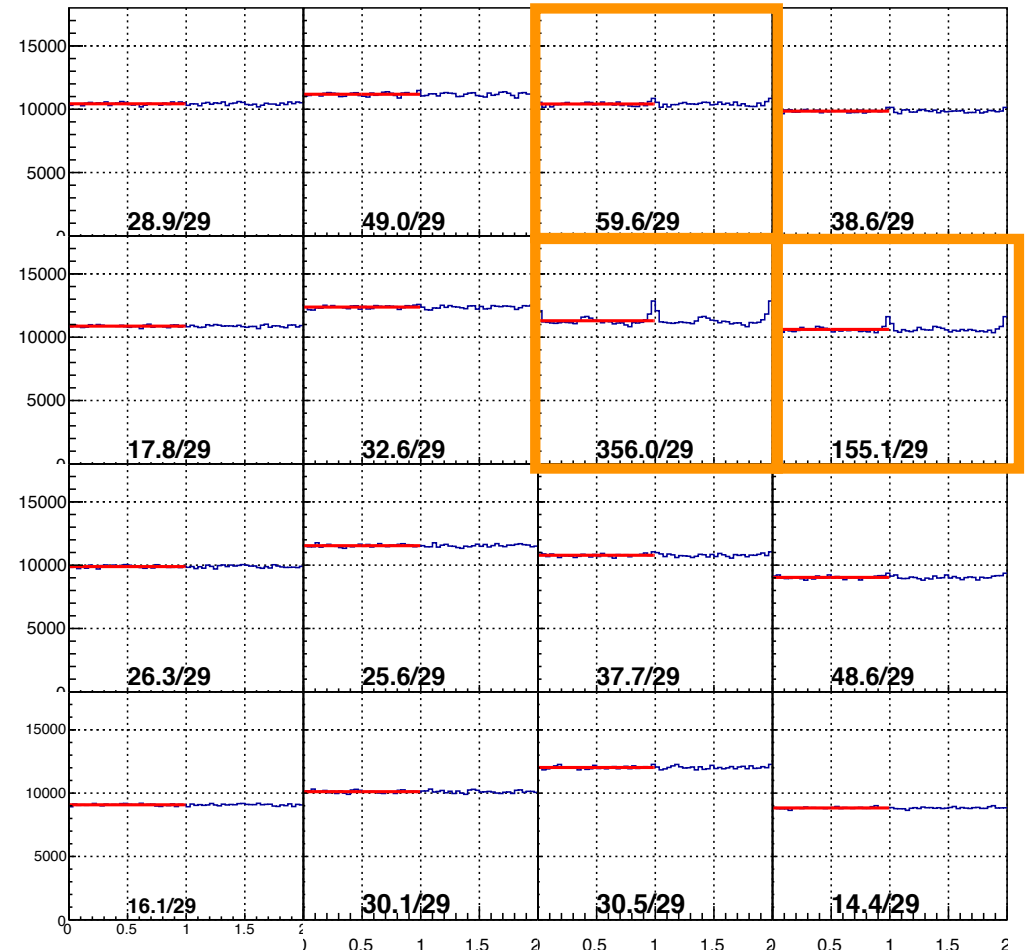
dof=29@0.01 : 49.588

dof=29@0.005 : 52.336

204926_lc_1_0



211033_lc_1_0

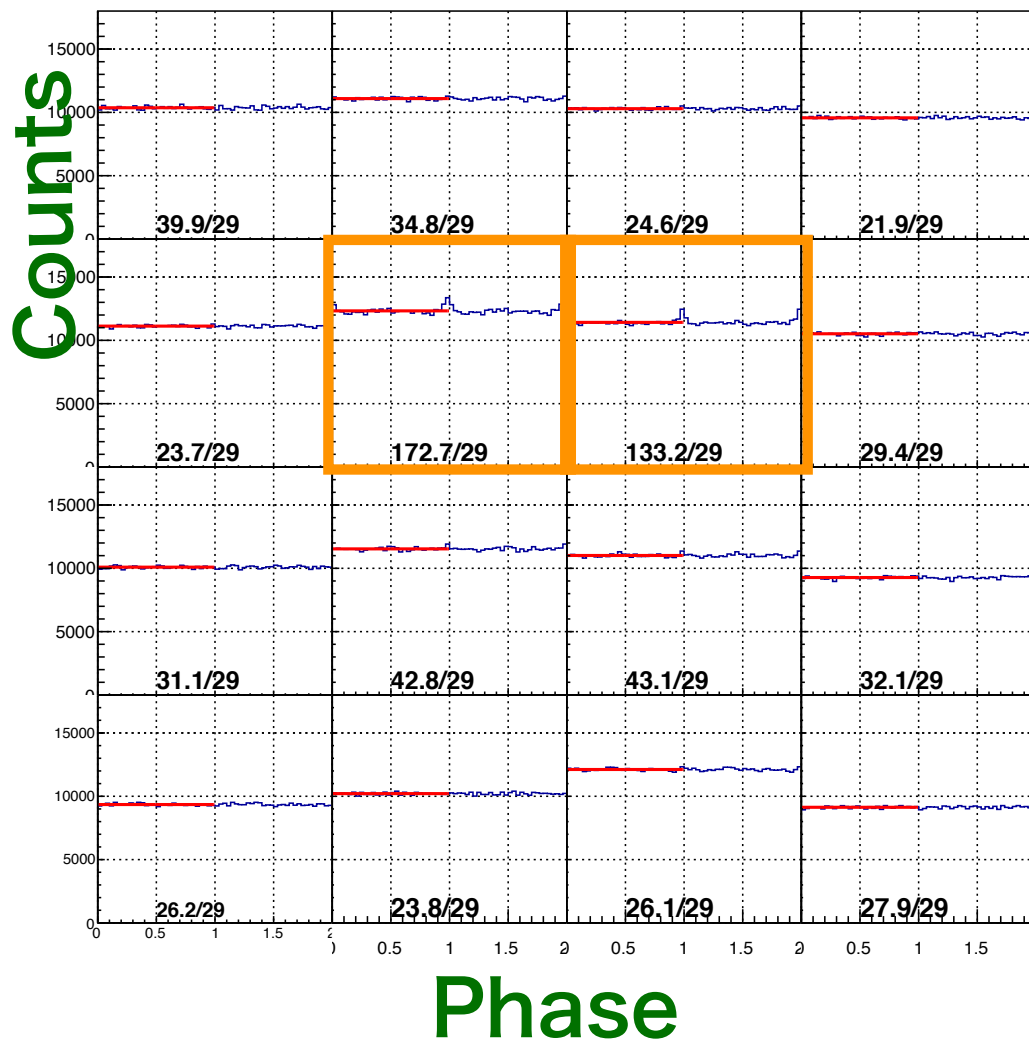


Phase

パルス検出チャネルの同定

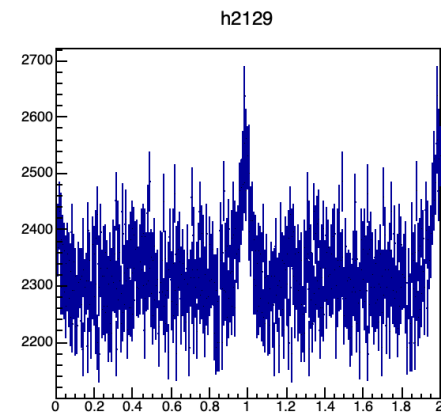
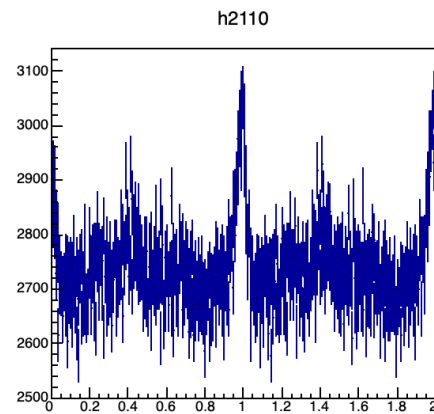
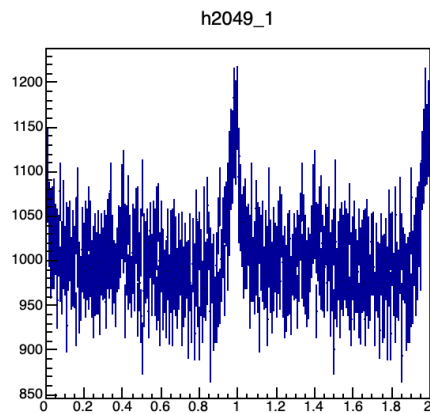
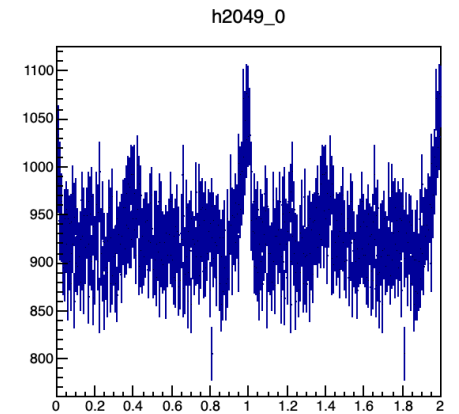
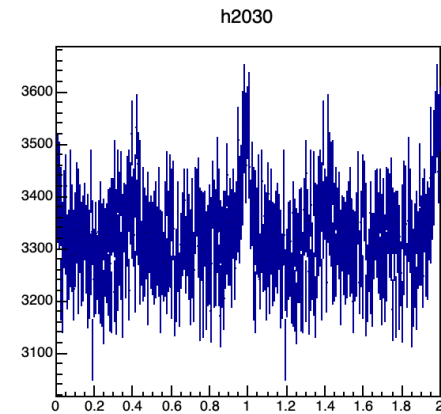
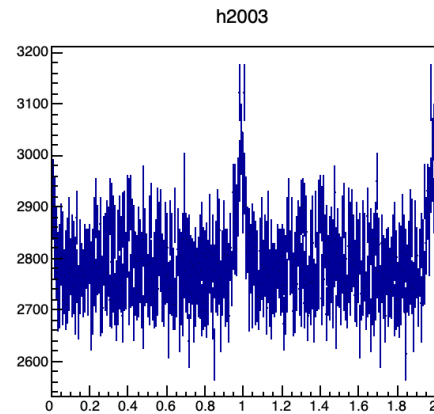
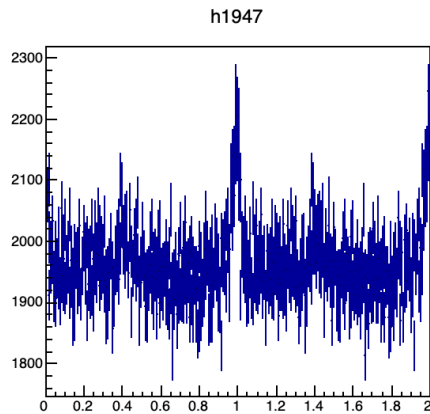
dof=29@0.01 : 49.588

dof=29@0.005 : 52.336



Run ID	カイ二乗
1947	187
	140
2003	64
	150
2030	69
	52
2049_0	87
	124
2049_1	233
2049_2	322
	59
2110	356
	155
2129	172
	133

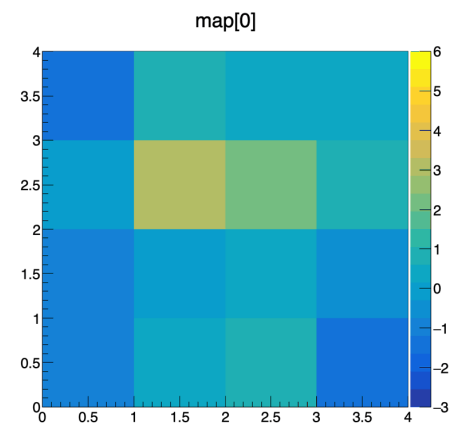
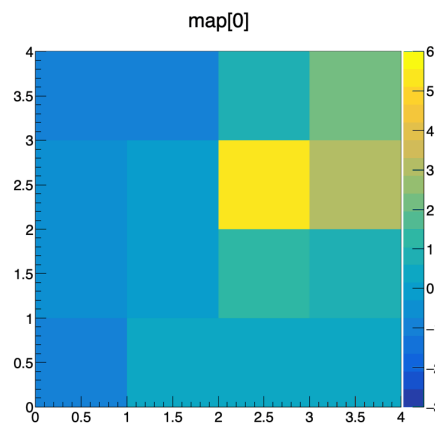
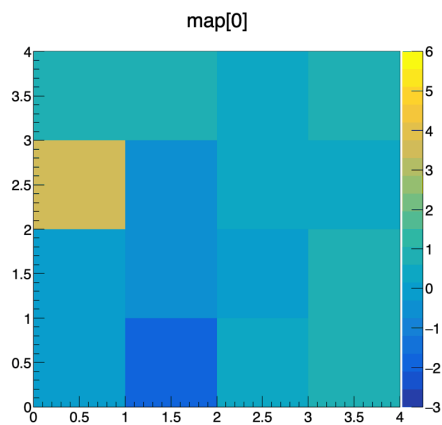
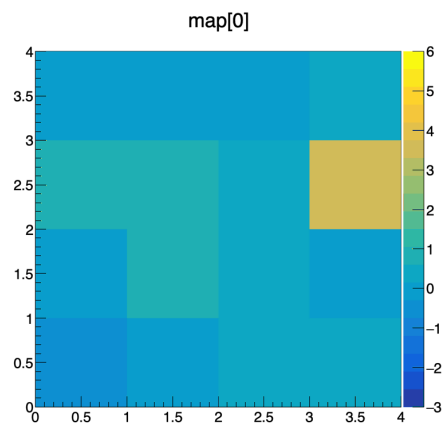
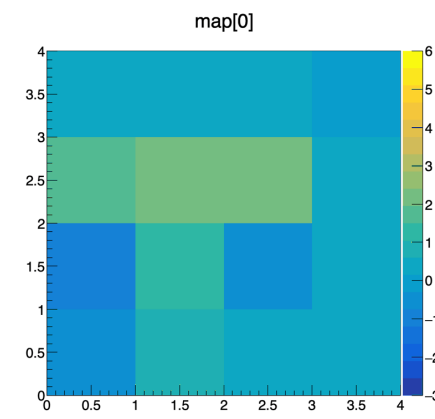
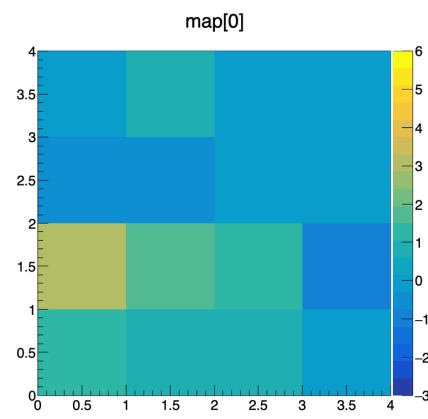
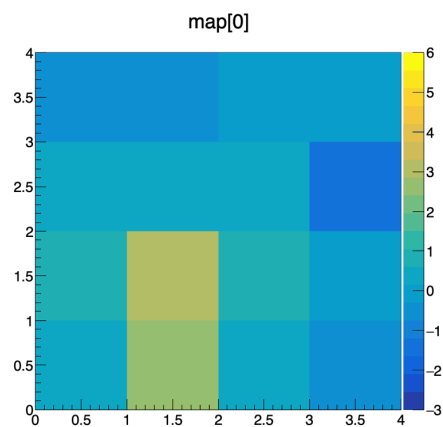
runごとのライトカーブ



run毎のアニメーション

位相を30ビン

z-scaleは σ

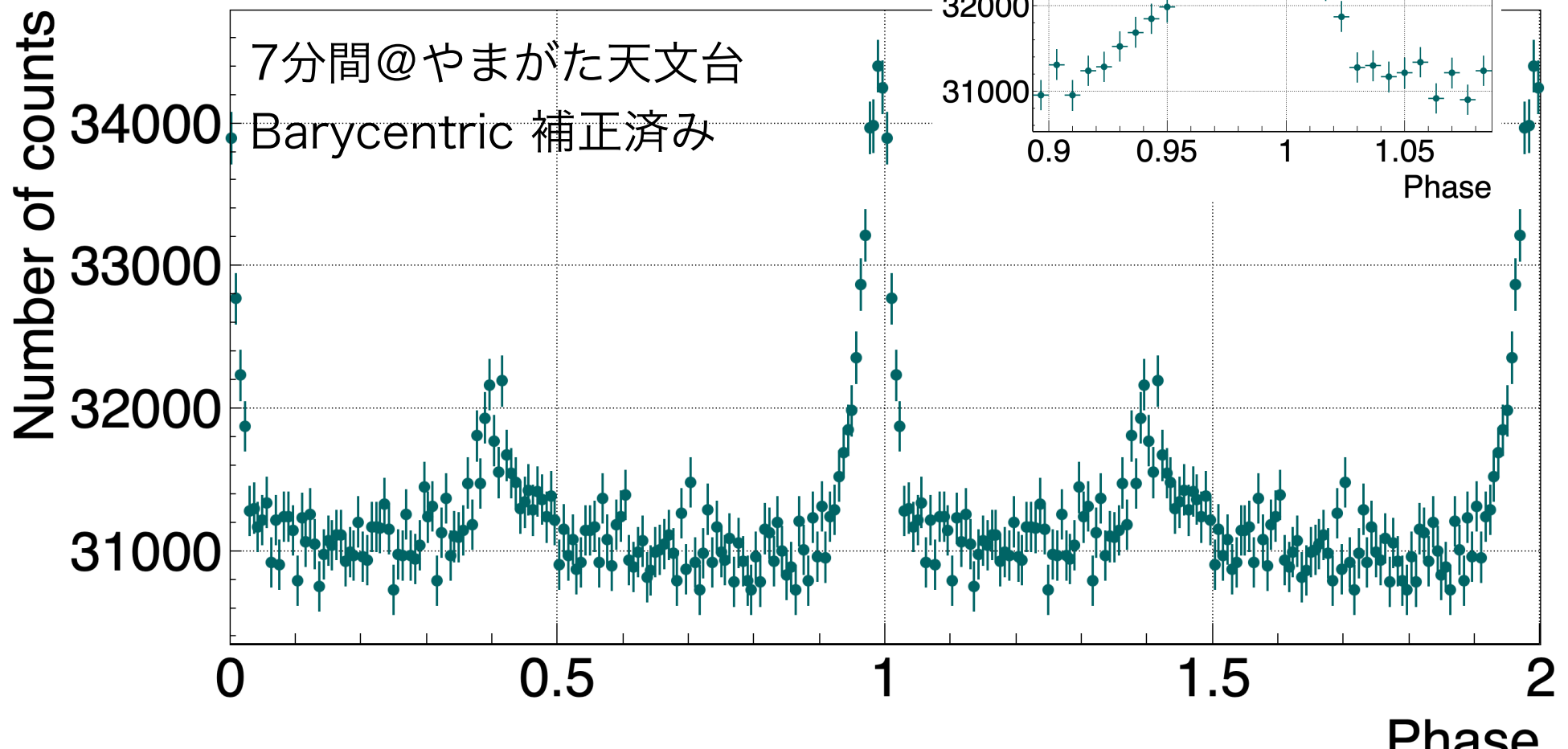


パルス波形

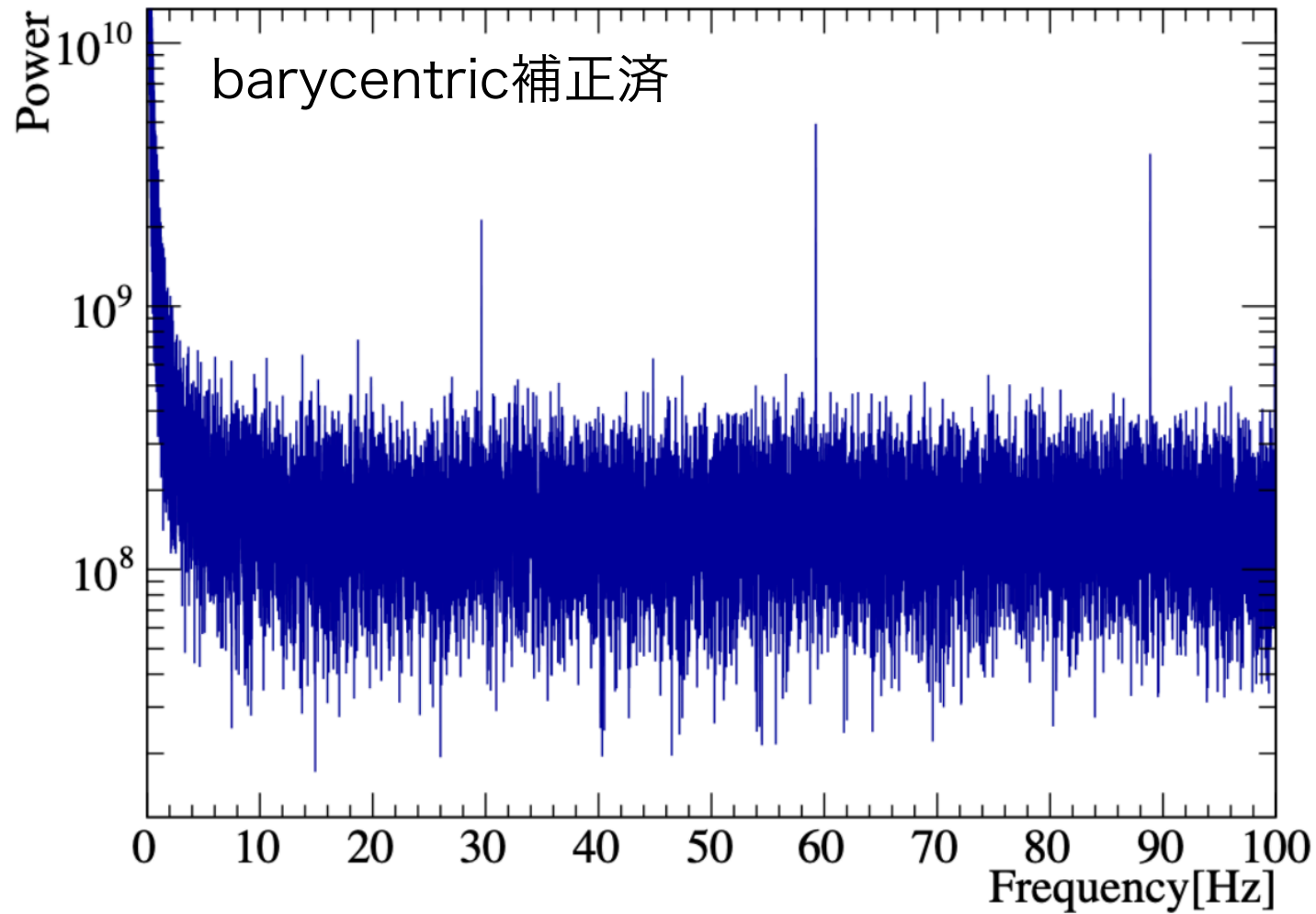
電波のメインパルスがphase=0

可視ピークが先、という先行研究を確認

パルス幅が若干太い？



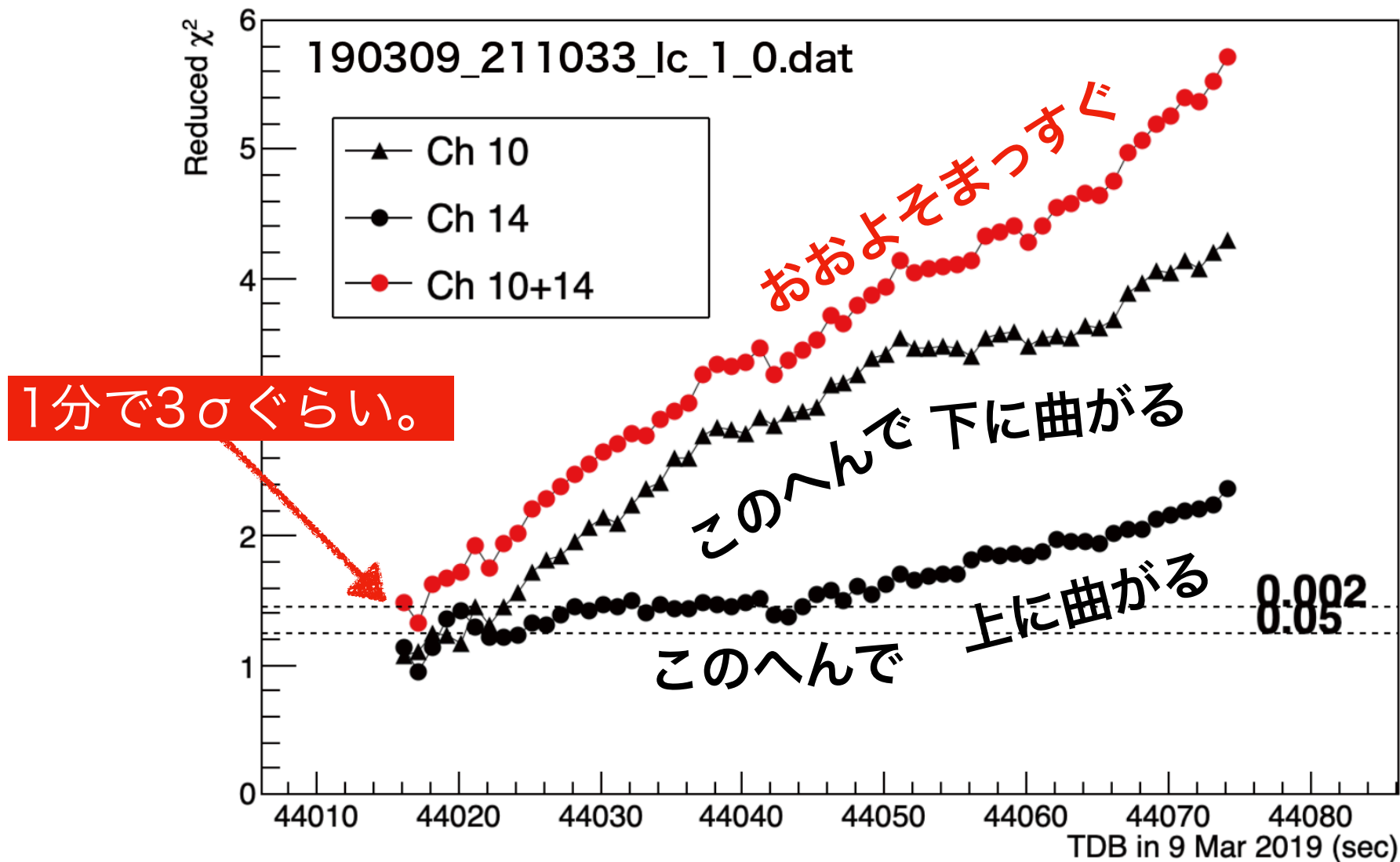
FFT



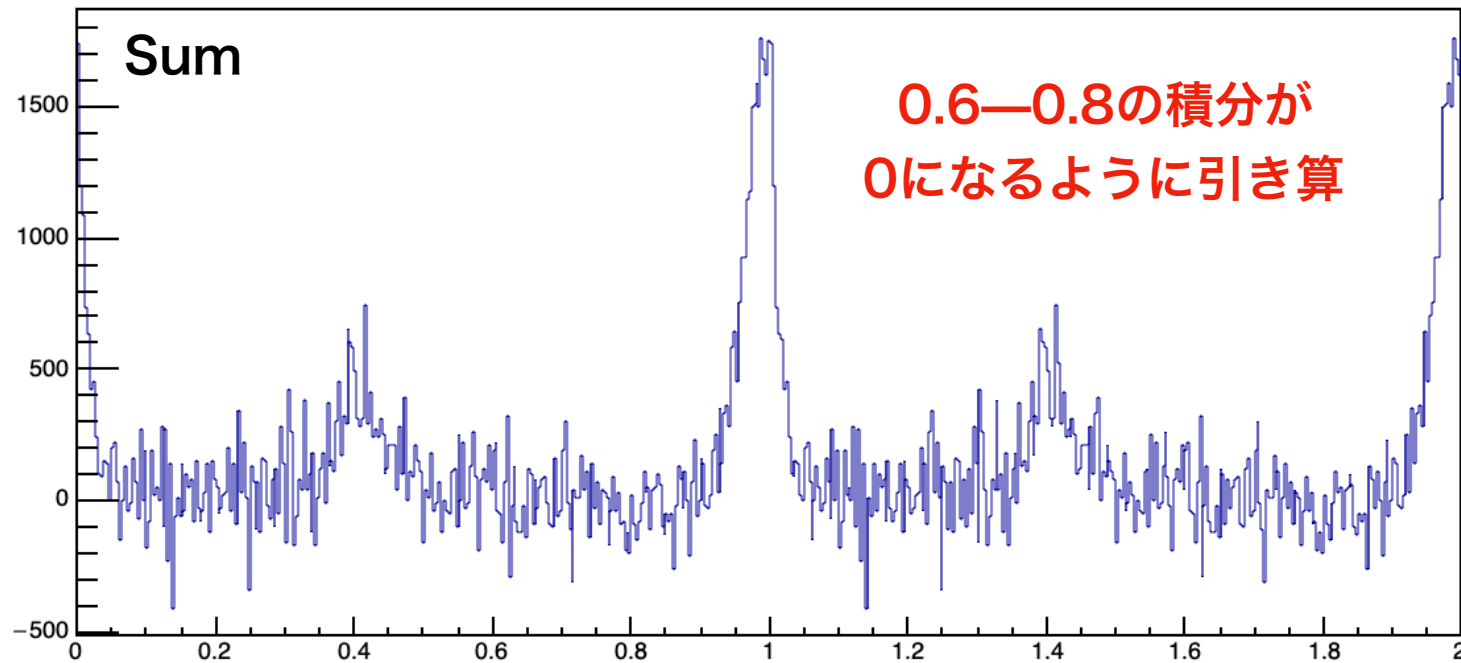
電波（Jodrellbank）と一致する周波数に基準モードを検出

パルス検出感度

1秒経過ごとに、100 bin/phaseのLCを χ^2/dof を算出した。
結像ピクセルが動いた様子がトレースできそう。



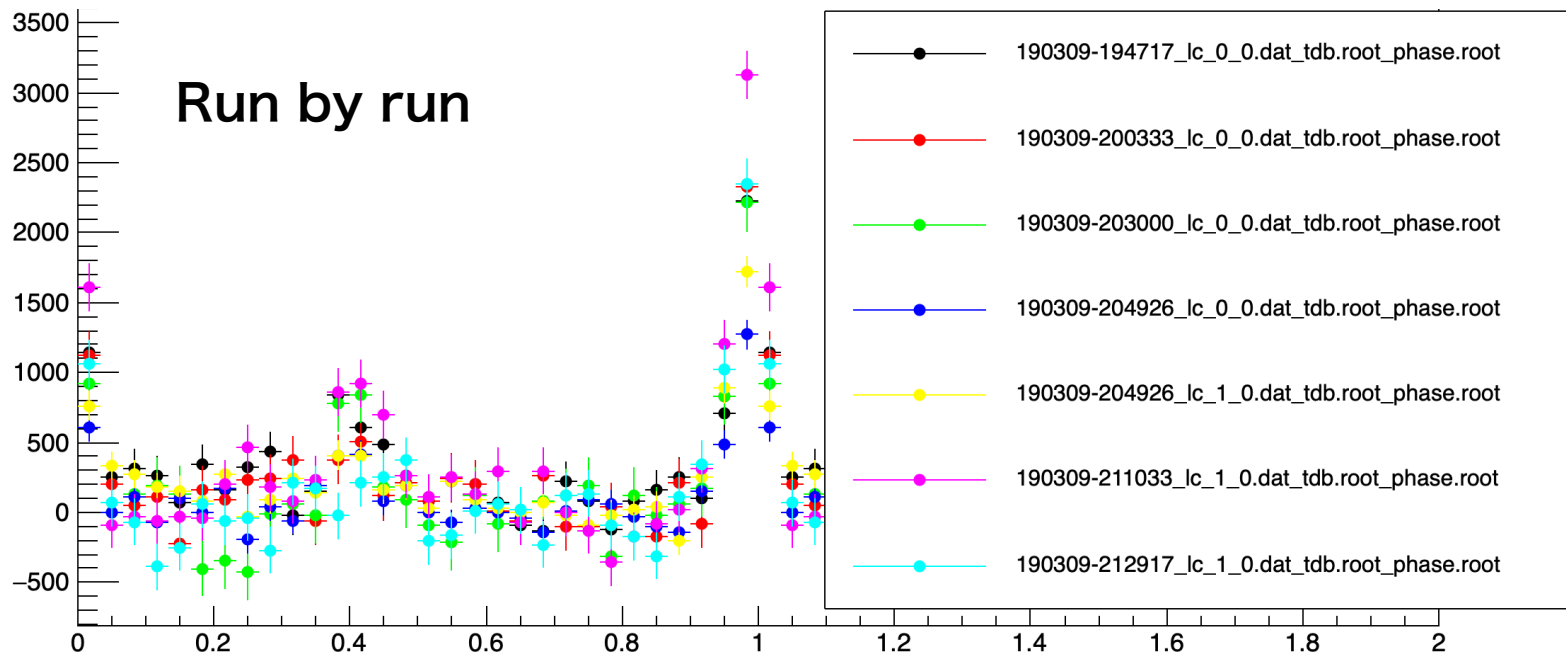
Pulse成分の取り出し



111.3 photons/s

cf .等級からの予想

<200 ph/s



161.484 ph/s

119.089

87.3374

59.173

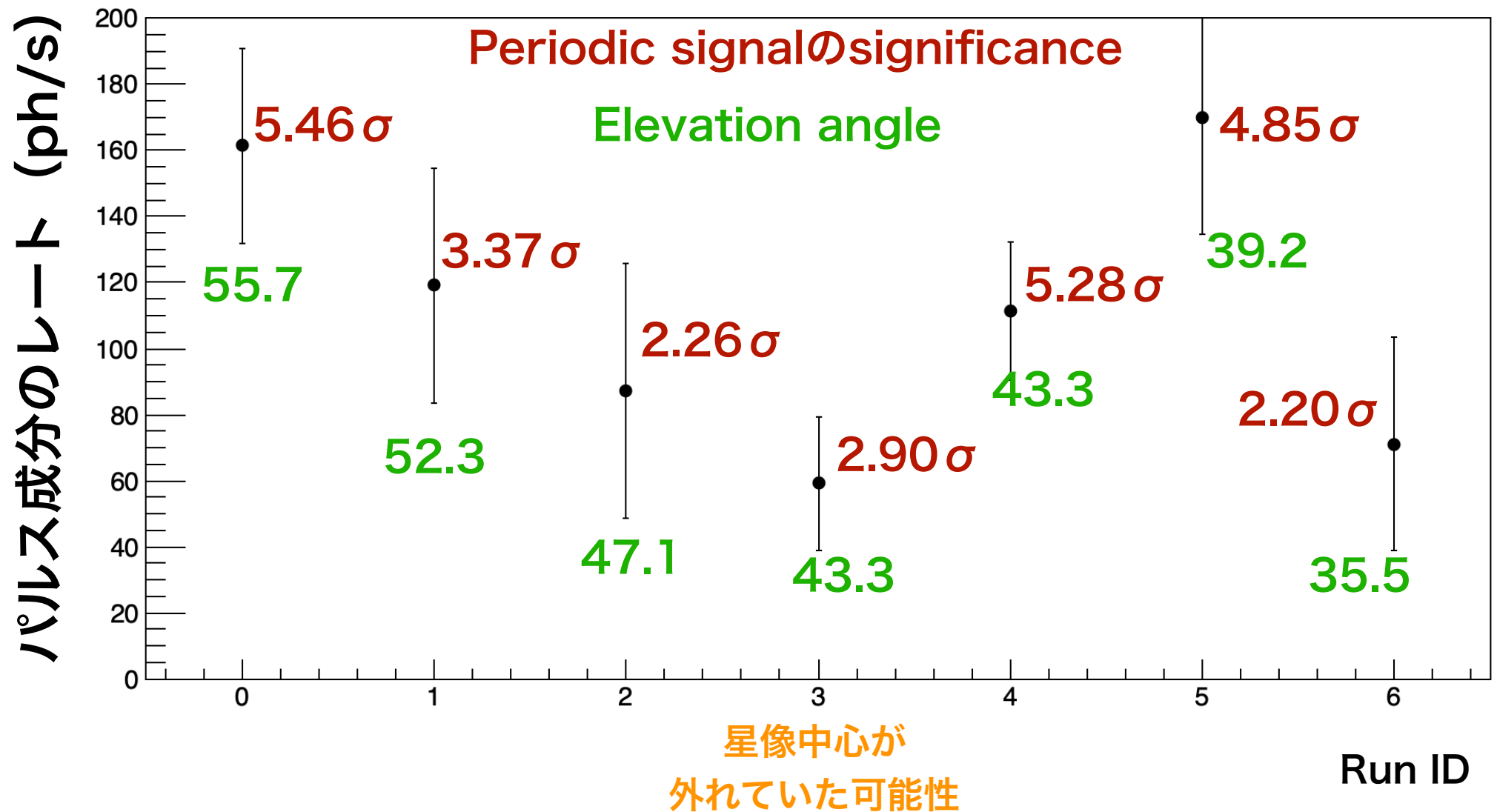
111.431

169.723

71.122

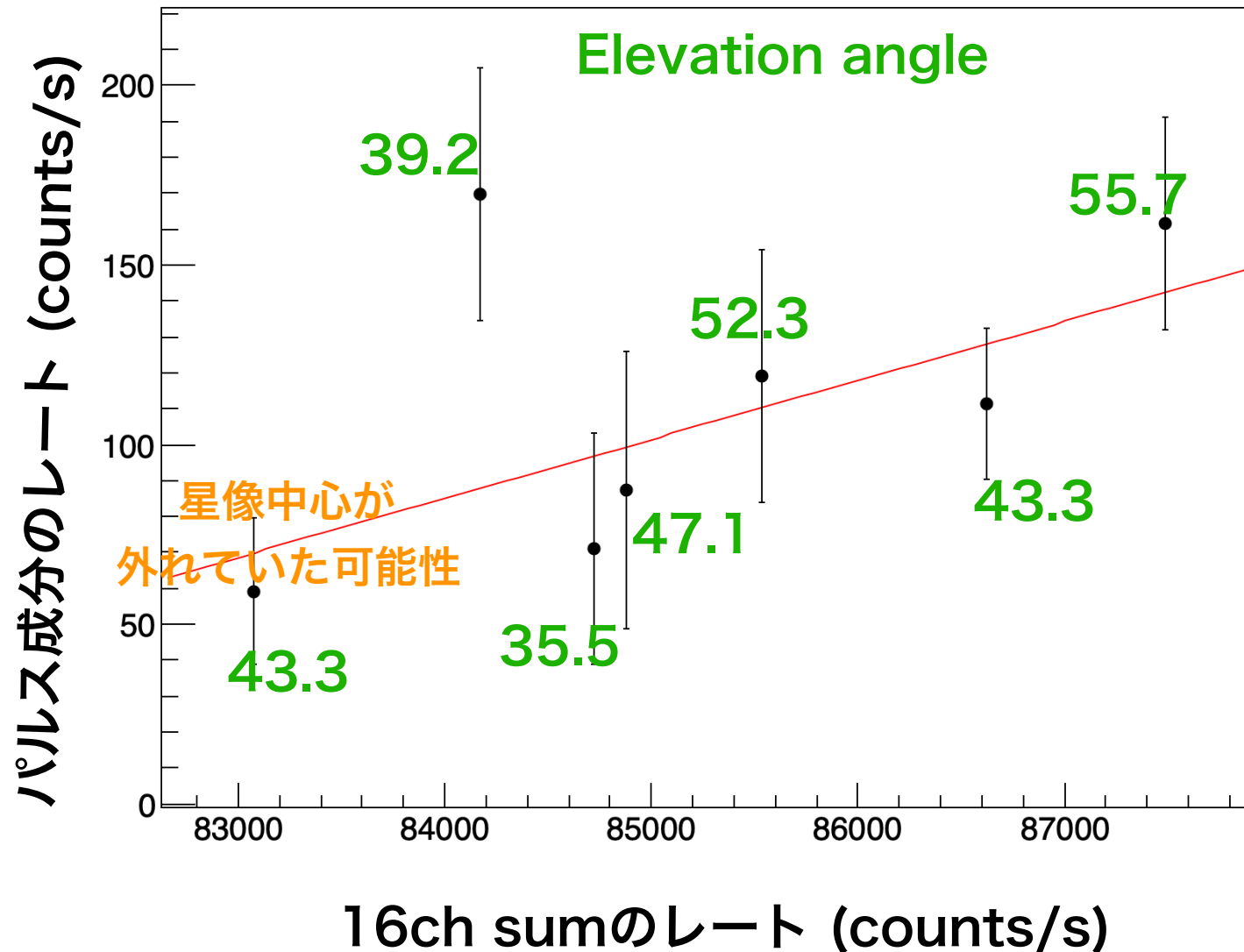
Run by run

天頂角依存性は見えていない。快晴でもなかった。



シーイング？

1分間のフラックス測定では、系統誤差より統計誤差が優勢か



まとめと今後 (1/2)

- セル読み出し型のカスタムMPPCで光子計数の可視光観測する。
- 時間分解能が飛躍的に向上する+1光子が見えるので高感度化。
- 100 usのライトカーブ計測と走査システムを開発。
- 恒星の撮像・時間分解観測が出来た。
- **Crabパルサーの周期信号をなんとか検出した。**
- かなた望遠鏡に搭載、upgradeした飯舘電波望遠鏡と同時観測
 - Giant Radio Pulseの可視増光を計測する。
- 将来的にNICERも同時観測したい
- 多色・偏光観測の体制構築

まとめと今後 (2/2)

- ・導入と追尾状況モニタのため、別の撮像系を立ち上げ中
- ・VMEのない可搬型システムへ。多チャンネルDAQ開発開始。
 - ・パルス毎に時刻付与→FPGAで。できたら量産可。
 - ・スタンドアロン化して多地点掩蔽観測網の展開。
 - ・惑星科学の人と相談開始した
- ・センサの広視野化→GRBとかFRBとかGWとか
 - ・メーカはまあOK、予算次第。
- ・他に何に使える？ Intensity Interferometryとか？
- ・光学設計のsupervisorが欲しい。。

