

Crabパルサーの 光学光子計数観測

山形大理 中森健之

大内優雅 荻原理沙 柴田晋平

NAOJ 寺澤敏夫 広島大 秋田谷洋 川端弘治

KEK/Open-It 庄子正剛 上野一樹

2020年11月12日
OISTER研究会



もくじ

「可視素人のガンマ線屋がなにやら始めてみた」

- 開発の動機
- センサの性能評価
- アマチュア望遠鏡での観測
- かなたでの観測
- [公開版で割愛]
- 今後の展望と課題



Wikipedia

借りている虎の威（御礼）

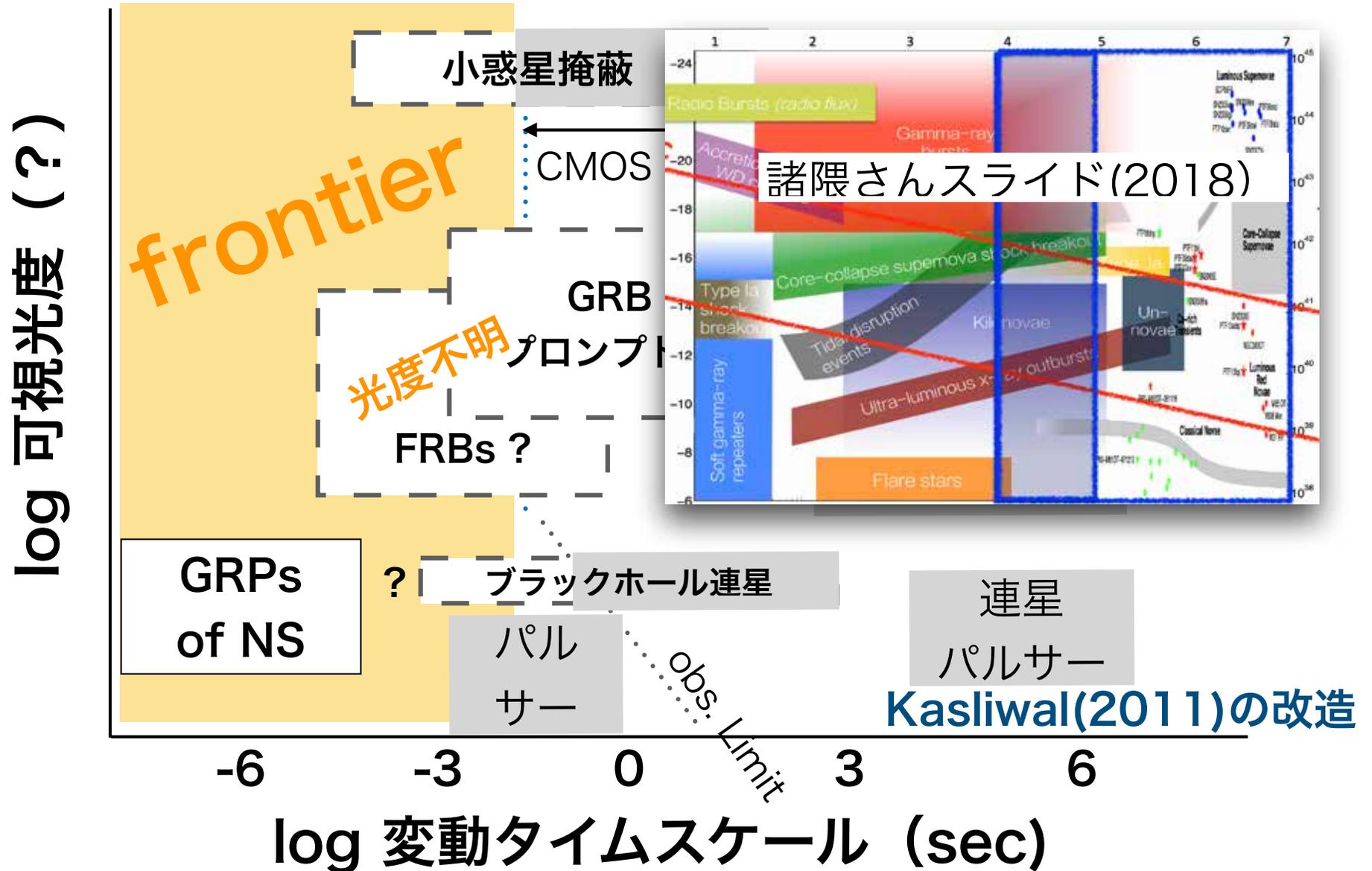
科研費 挑戦的萌芽(2014-15)

山田科学振興財団（天文学会推薦/2019-20）

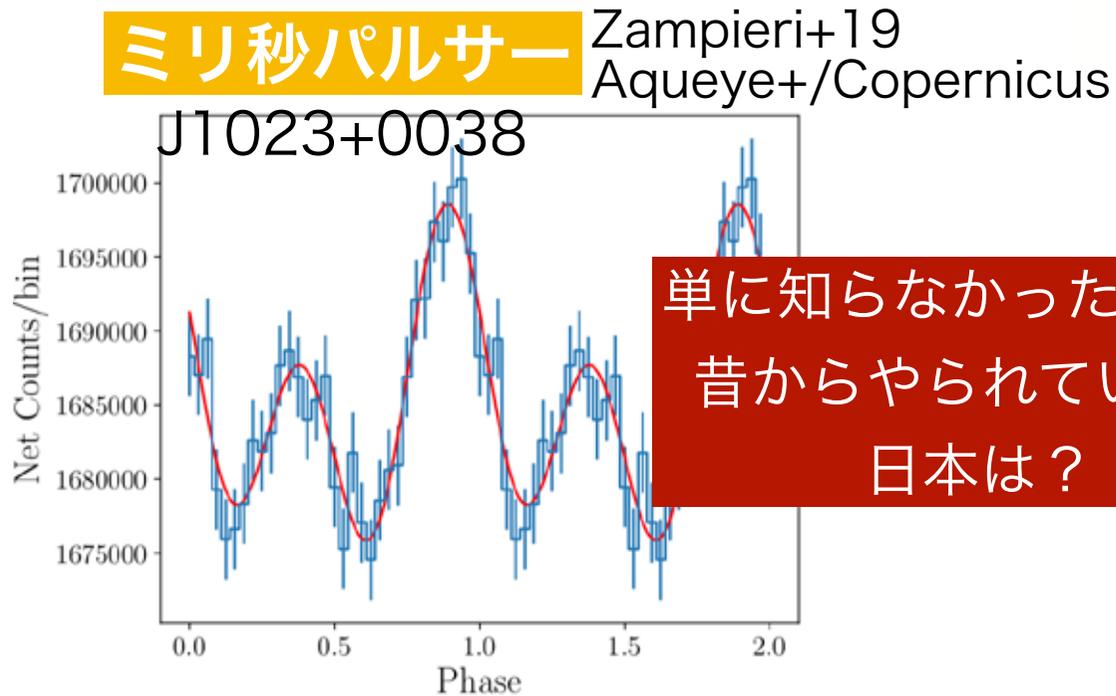
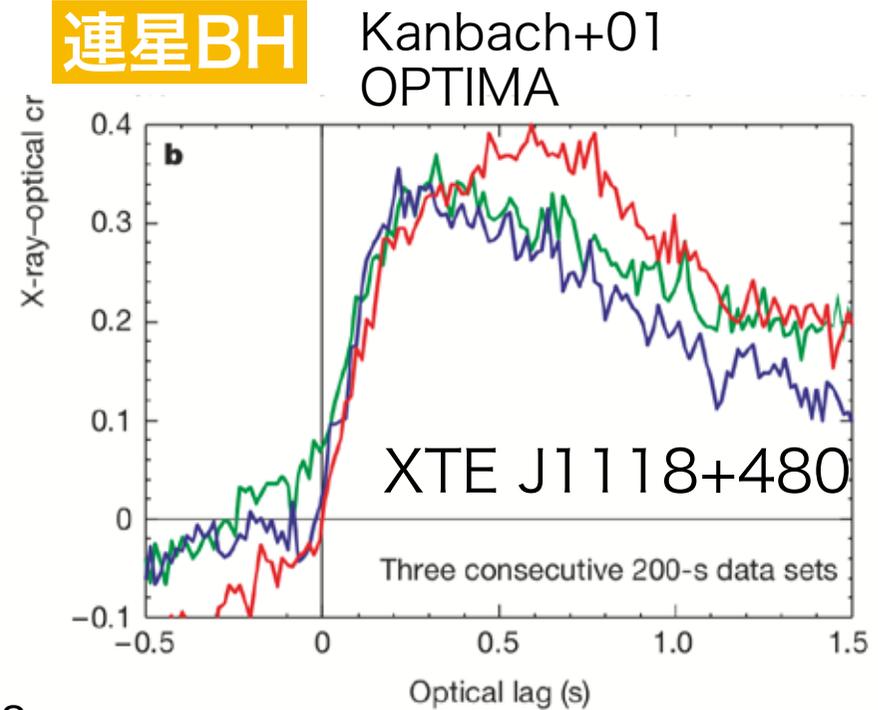
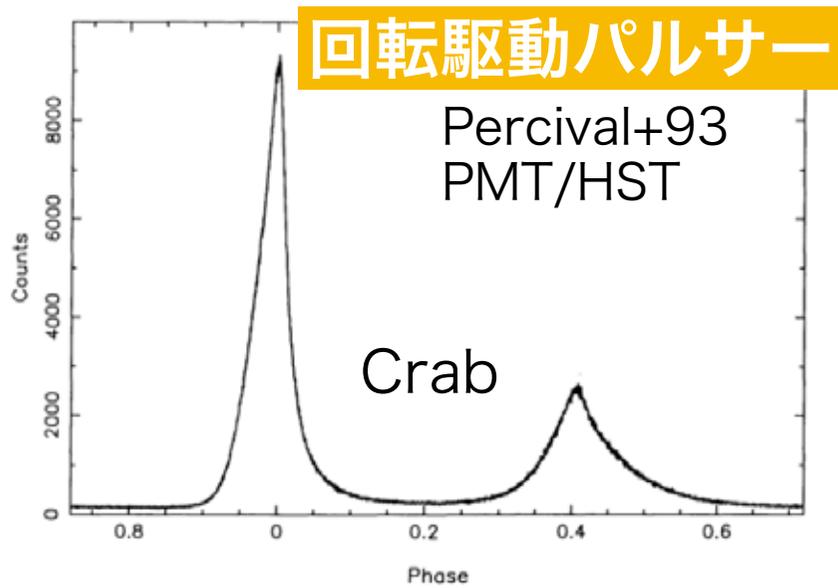
科研費 基盤B（2020-22）

3 Optical transient studies

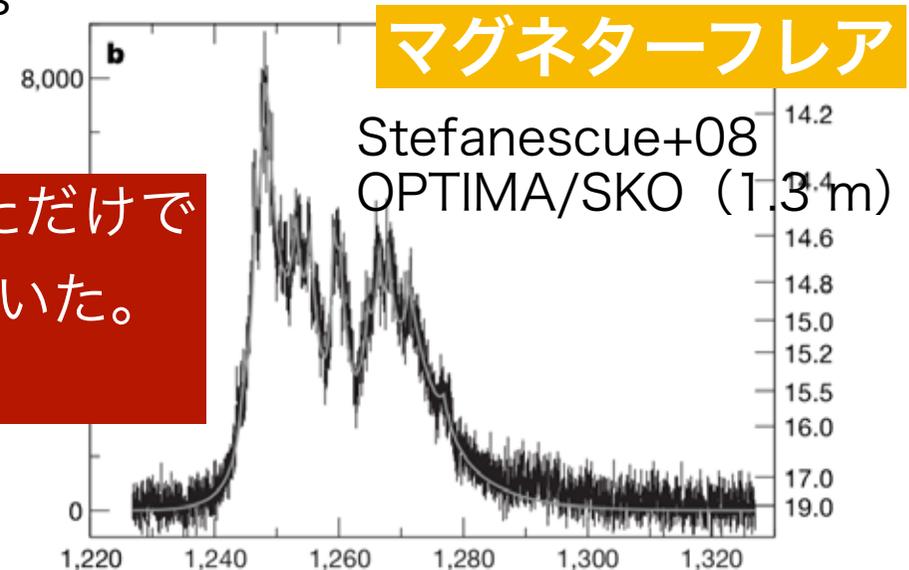
多波長「同時観測」は本来同レベルの時間分解能が求められる
 可視は電波・X・ガンマと比較すると、観測体制が弱い/分解能が悪い



Fast Δt optical obs



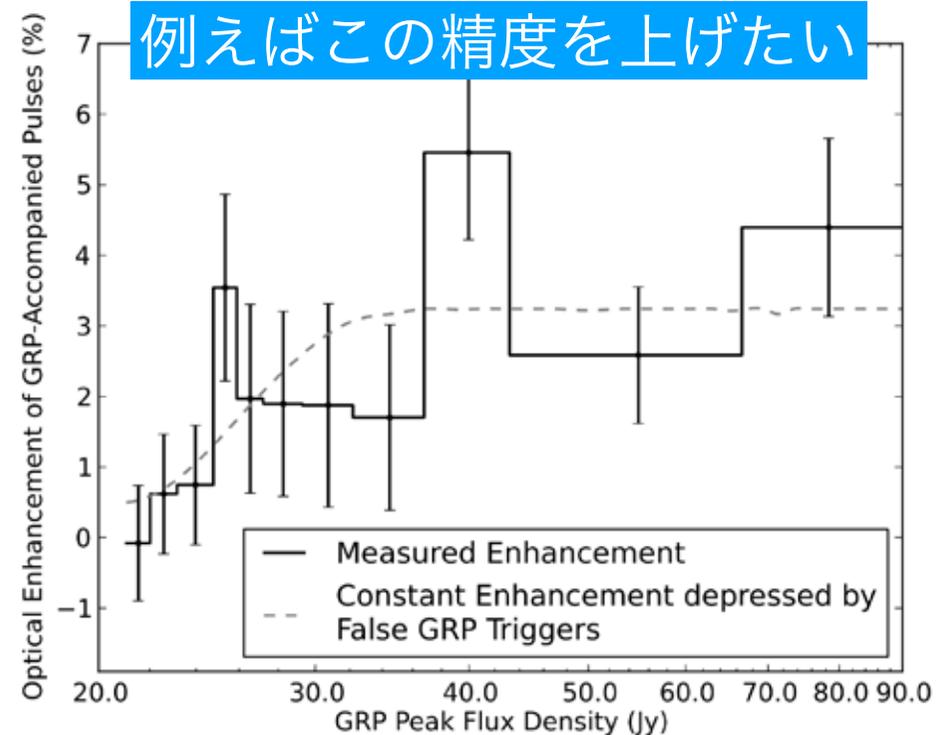
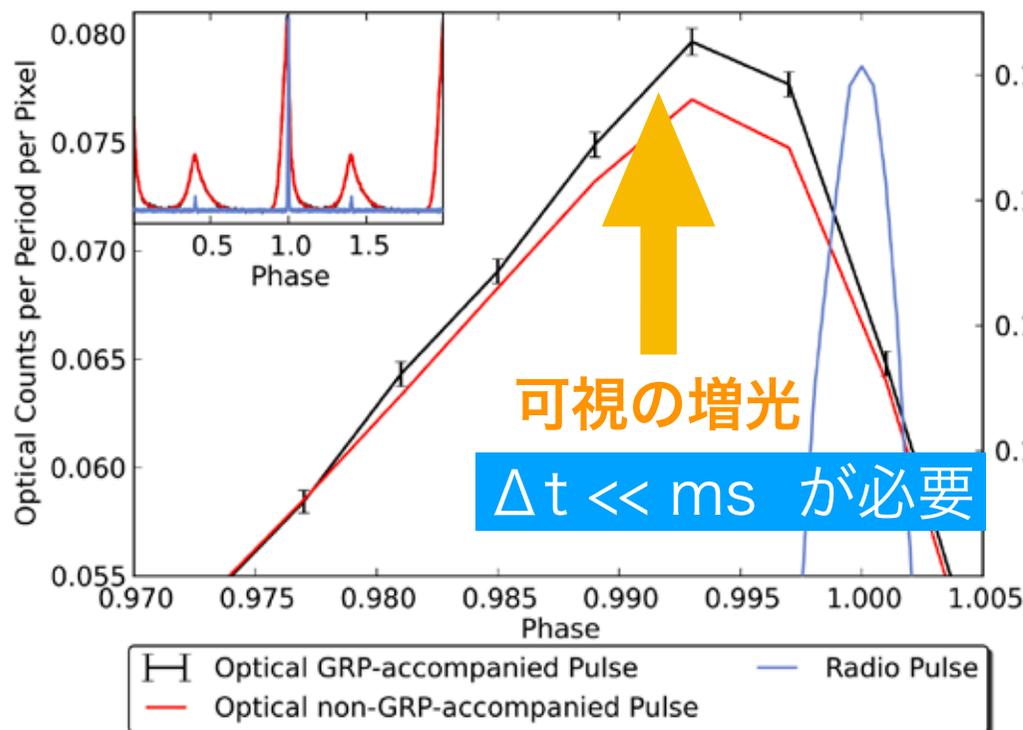
単に知らなかっただけで
昔からやられていた。
日本は？



最初の目標：Giant radio pulse

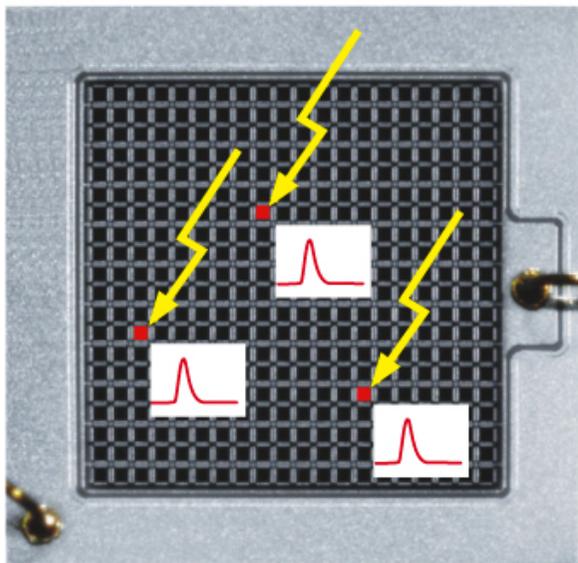
- ・ GRP：頻発する突発的な電波パルス放射、ns-usの継続時間。
- ・ Fast Radio Burstsとの関連も議論あり。
- ・ 放射機構の解明には多波長時間分解観測が必須。 $N_{\text{opt}} \gg N_X$
- ・ 可視の高速観測は海外が先行。3%程度の増光を確認 (7σ)。
- ・ GRP強度との相関 や 増光の詳細な位相依存性は**統計不足**。

Strader+13



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 \rightarrow ガイガー放電=ゲイン 10^6
- 全セルのアナログ和出力

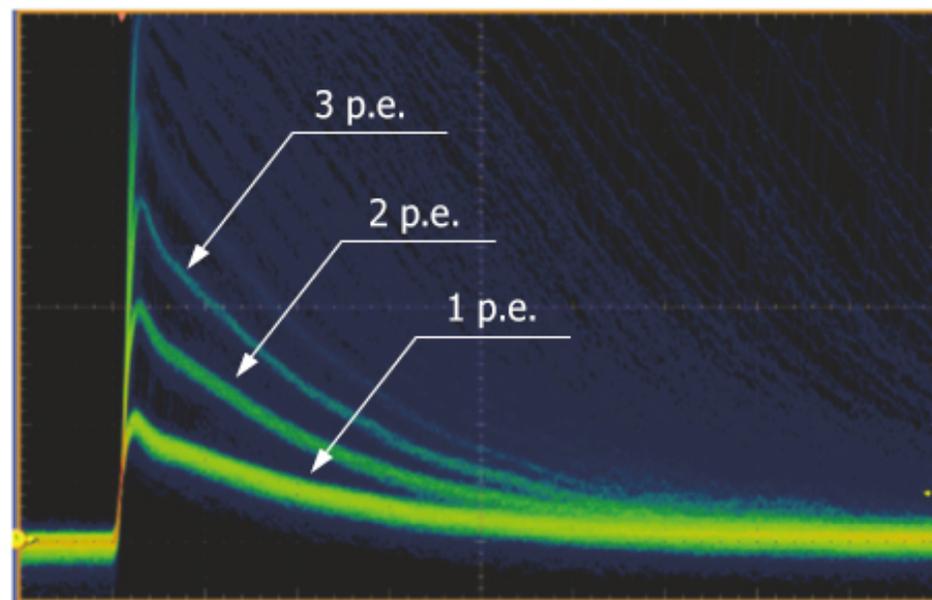
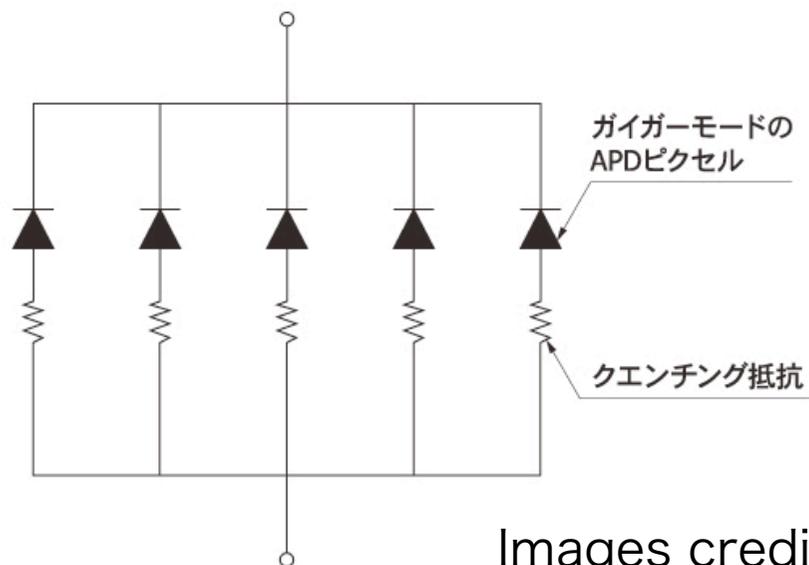
○ 単光子が検出できる

○ 高速応答 0(ns)

△ 合算されるため熱雑音が多い = ダークノイズ大

△ 合算されるため撮像ができない

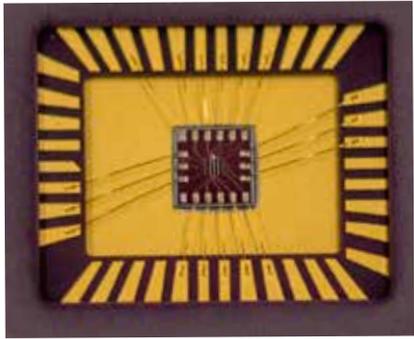
△ 「ピクセル」サイズが大きい = スカイBG大



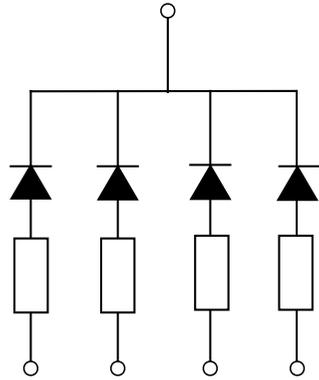
Images credit: HPK

Geiger APDアレイの試作

MPPCをカスタム、セルごとに信号読み出し



w/ シリコン窓



★ 単光子検出能

★ $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2/\text{pixel}$

★ 4×4 画素

★ 低ダークカウント

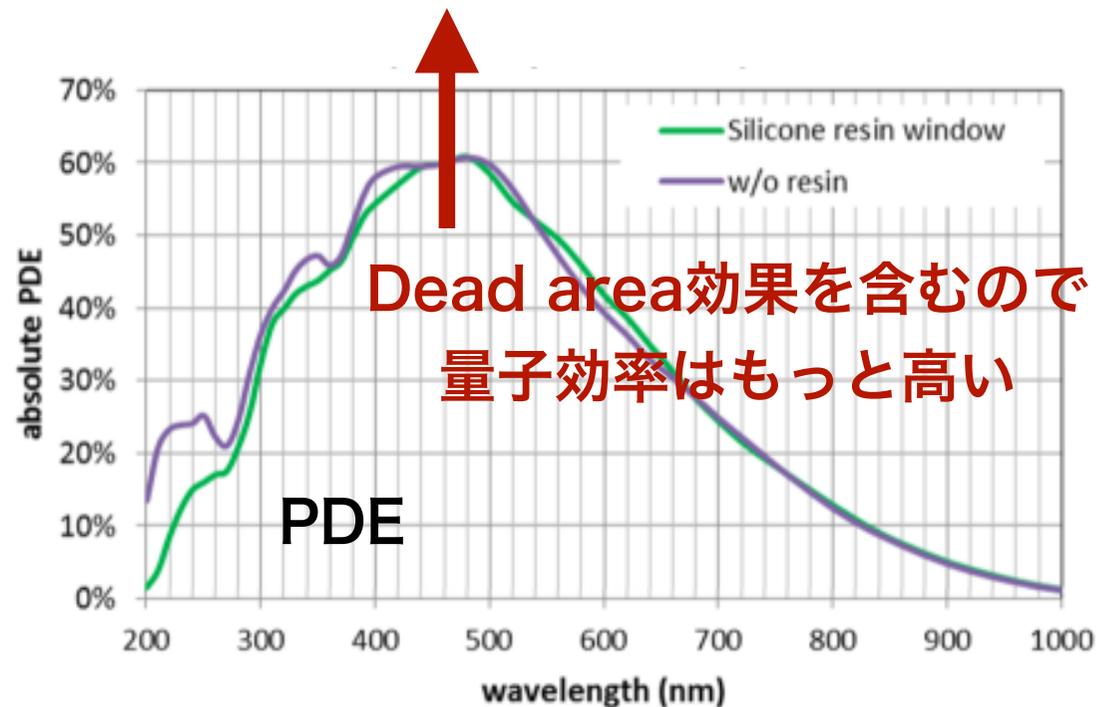
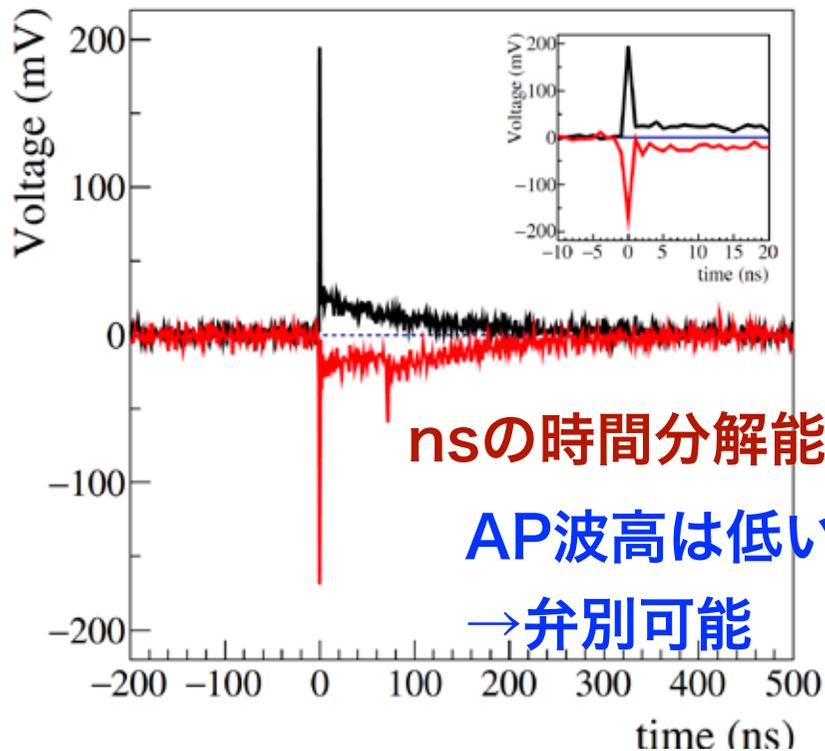
$O(10) \text{ counts/s}@0^\circ\text{C}$

高感度

低雑音

撮像可能

冬季自然冷却



可視光検出器チャート

遠いゴール

ARCONS
要クライオスタット

CMOS

時間分解能良い

PMT
(非撮像)

SiPM
(非撮像)

This work

SPAD
(非撮像)

Aqueye+
SiFAP
OPTIMA

攻める方向



広視野

位置不定天体に対応可

CCD

狭視野

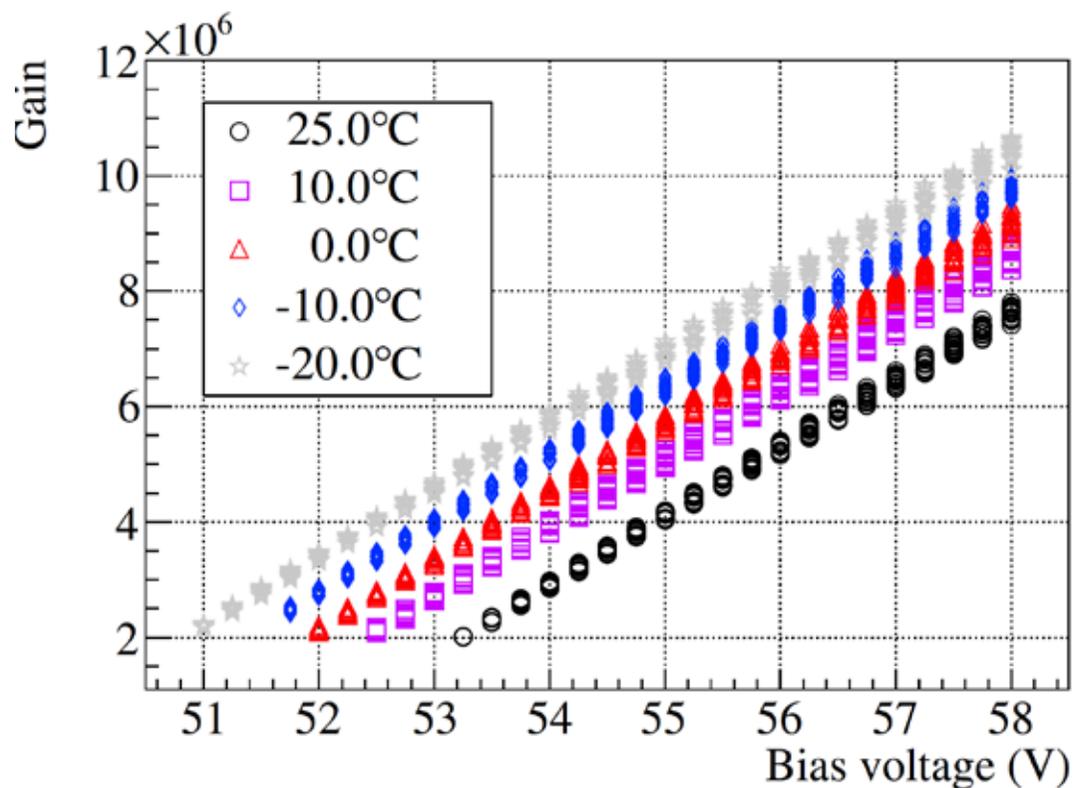
既知点源向き

扱いやすさ

時間分解能悪い

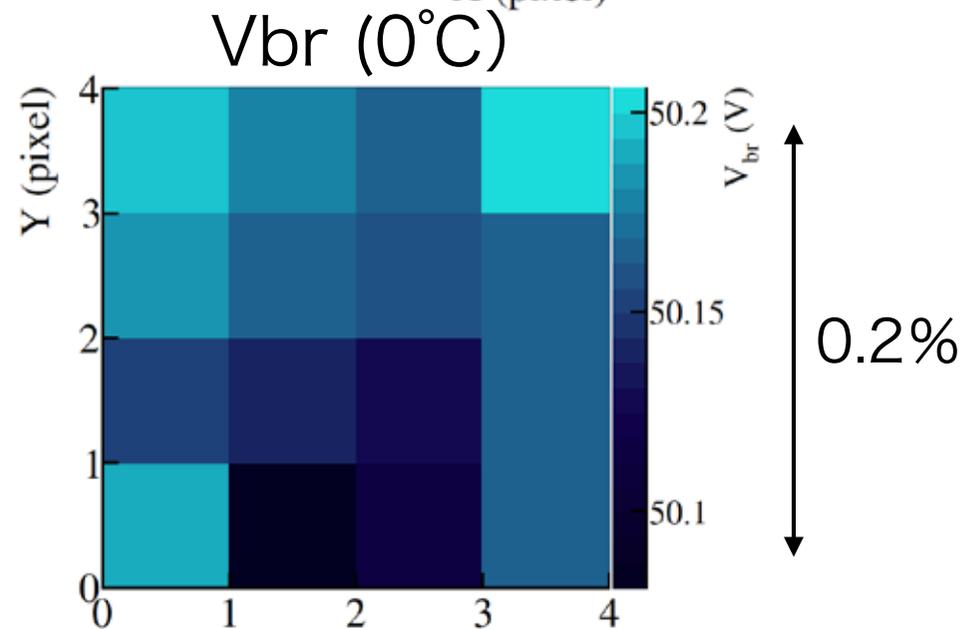
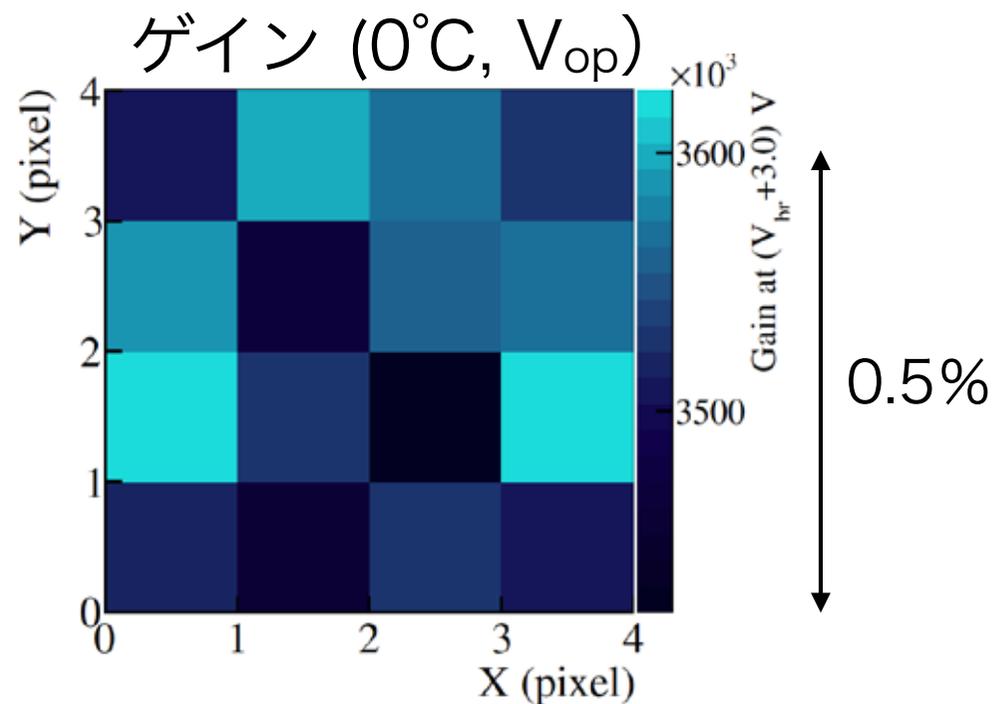
Mazin+13
Staubmeier+01
Ambrosino+17
Zampieri+19

ゲインと均一性



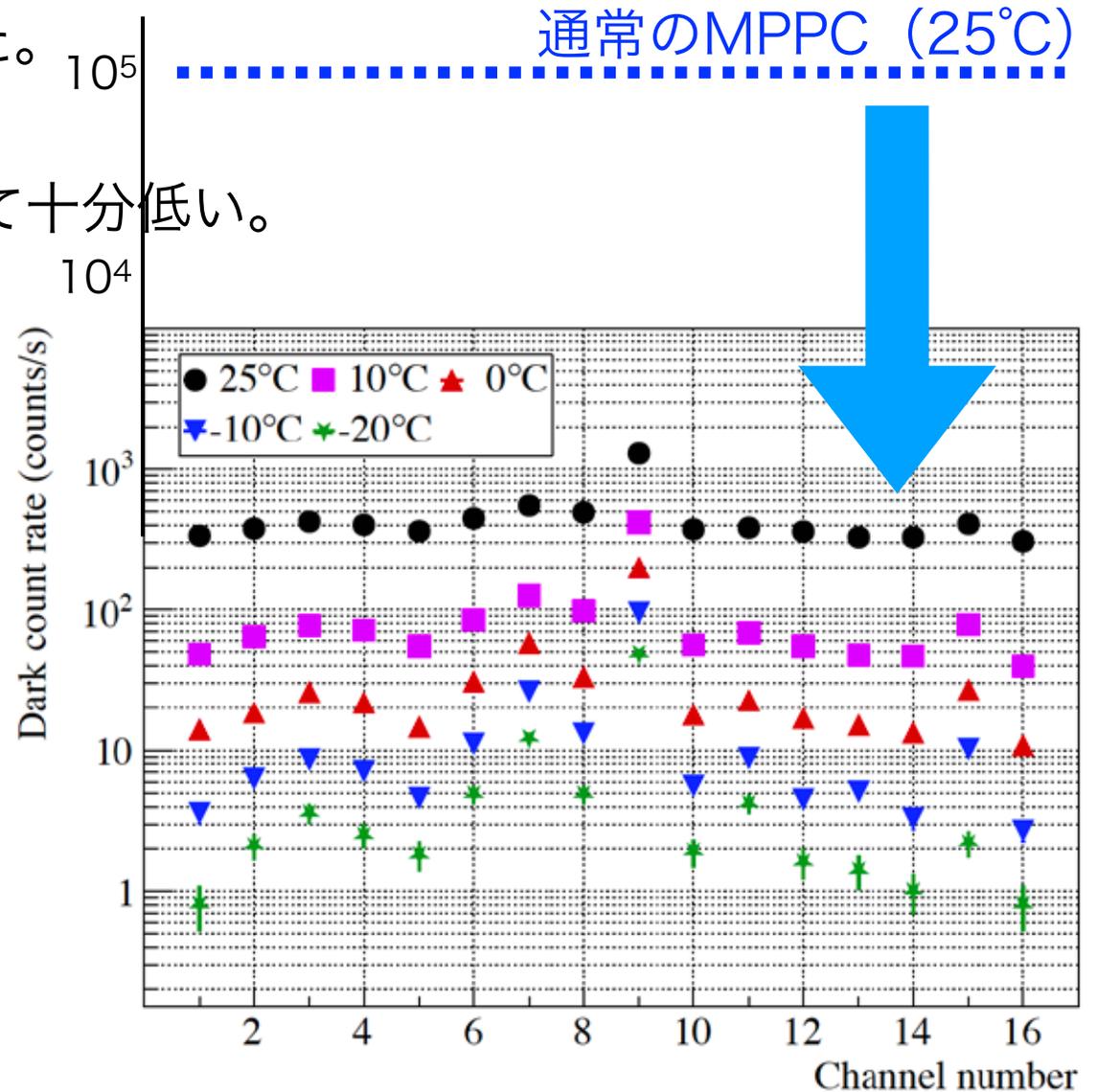
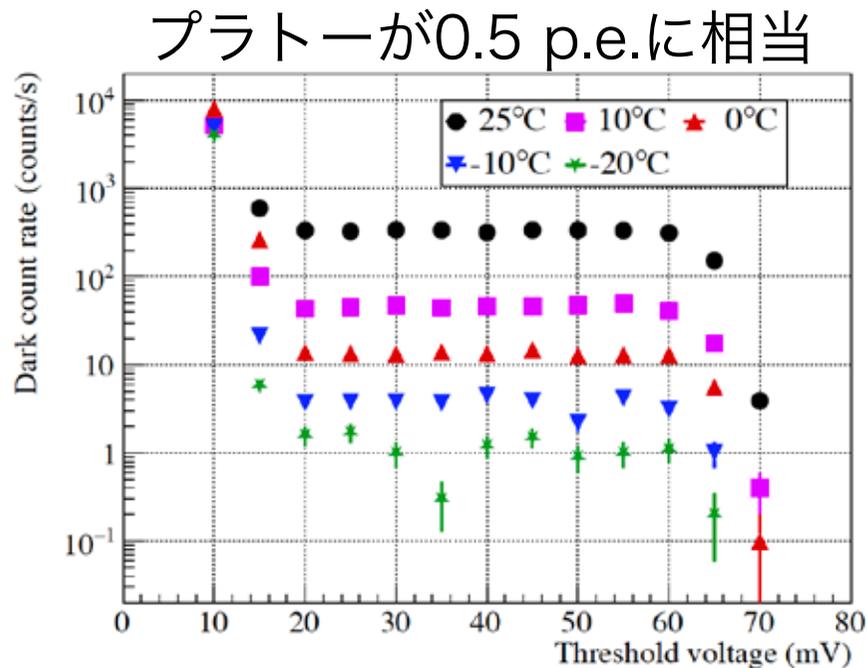
良好な線形性と一様性。
通常のMPPCと何ら遜色なし。

本研究では0/1しか見ないので、
多少悪くても実は影響がない

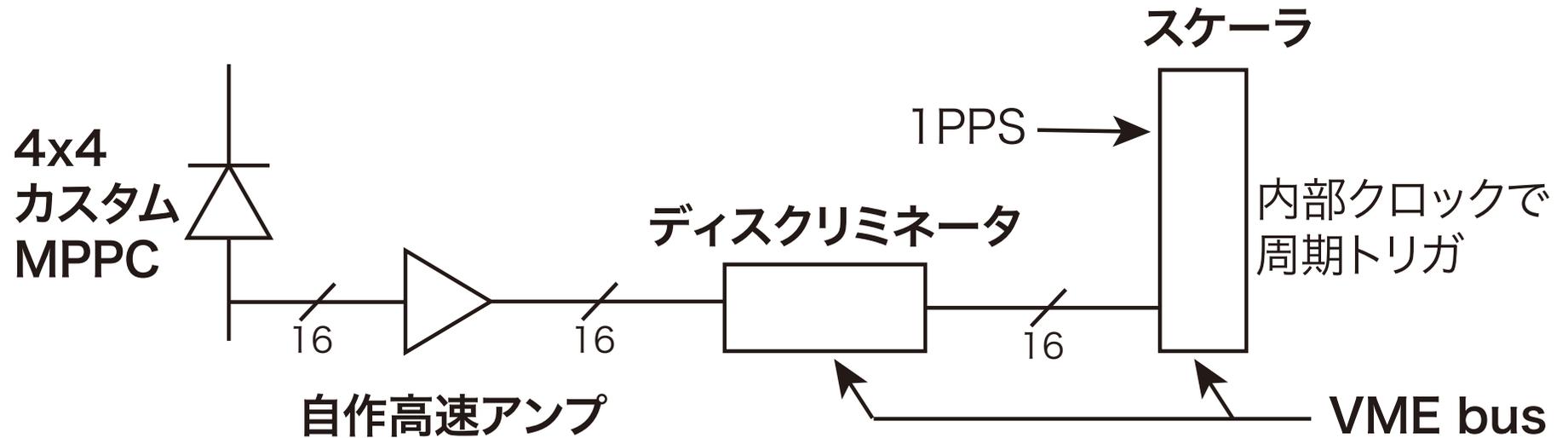


低ダークを確認

- ・ 想定通りダークは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 (未遂)
- ★ PPSのタイミングのみ取得。絶対時刻はDAQ PCのntpdに任せる。

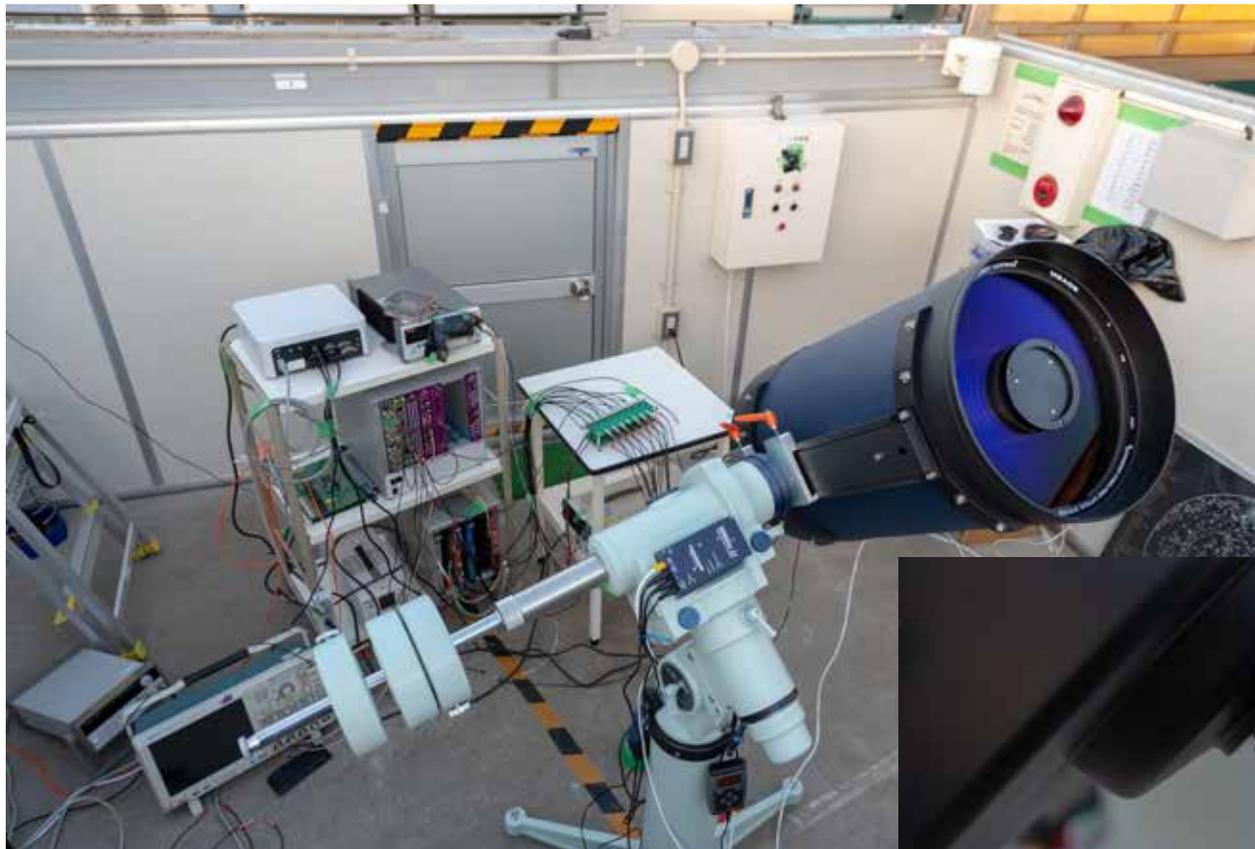
パルス毎の時刻付与はできないが、16 ch同時計測が可能

閾値設定・測定の効率化とリモート化

デッドタイムが完全に0になった

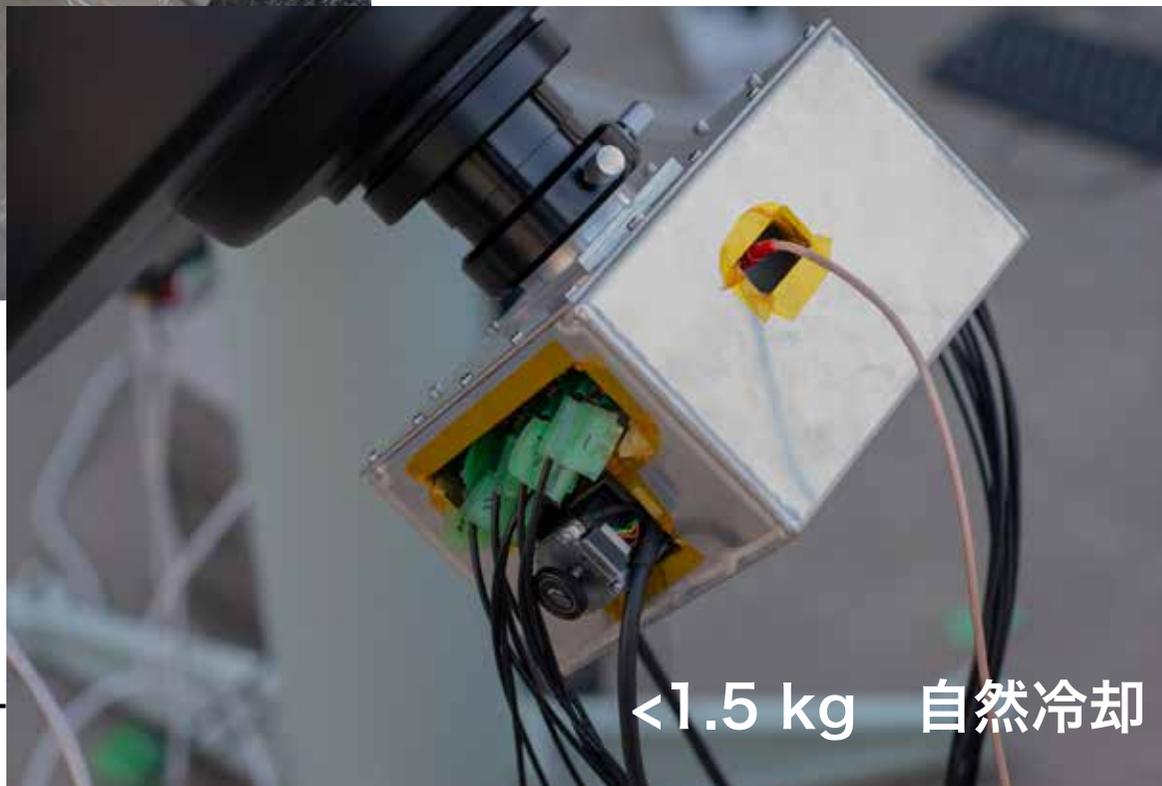
バッファがあふれないために100 us/binのライトカーブを取得

まずCrabで動作実証を



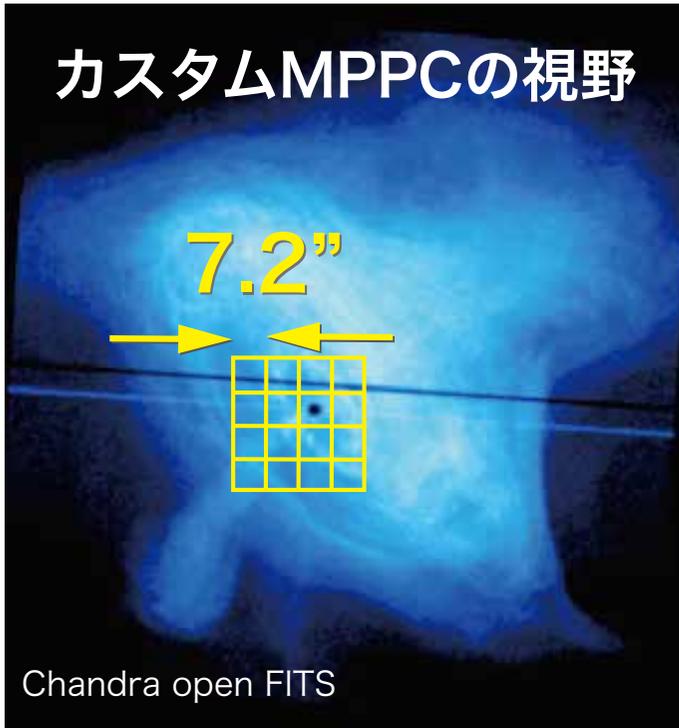
35cm望遠鏡と
システム全景

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

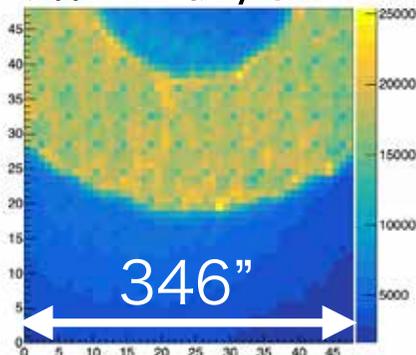
露出→移動→露出→移動→…

最大7分角程度の視野が使える

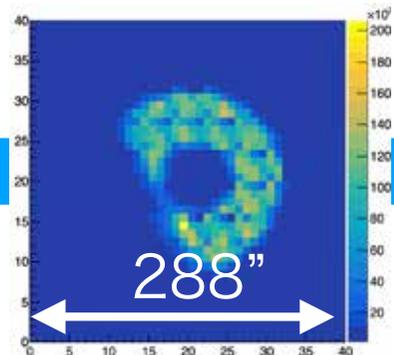
撮影を繰り返しながら手動ノブで合焦

手動なので再現性が悪い、鏡筒の向きでもずれる

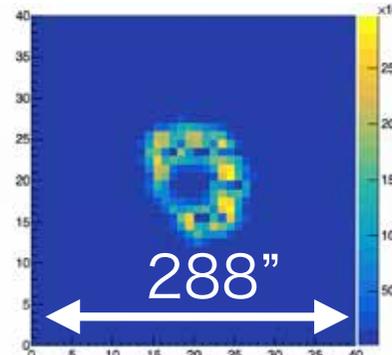
露出1秒/視野



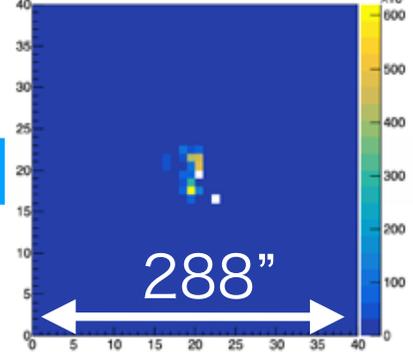
12x12視野



10x10視野



10x10視野

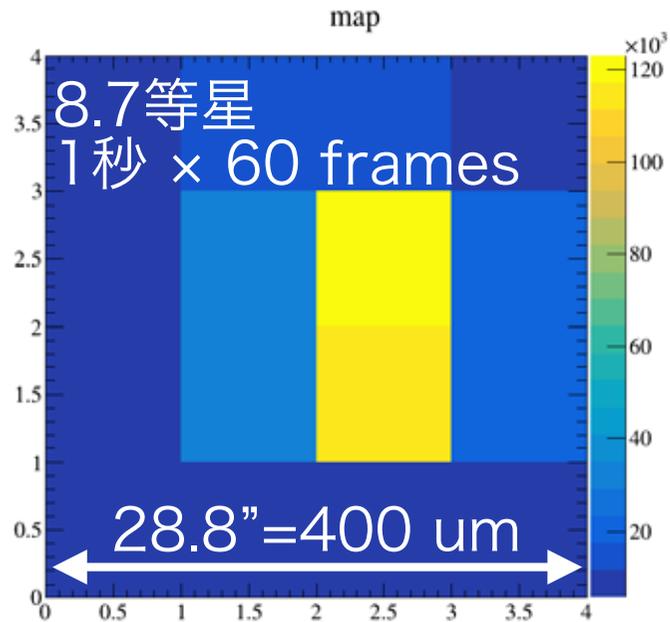


10x10視野

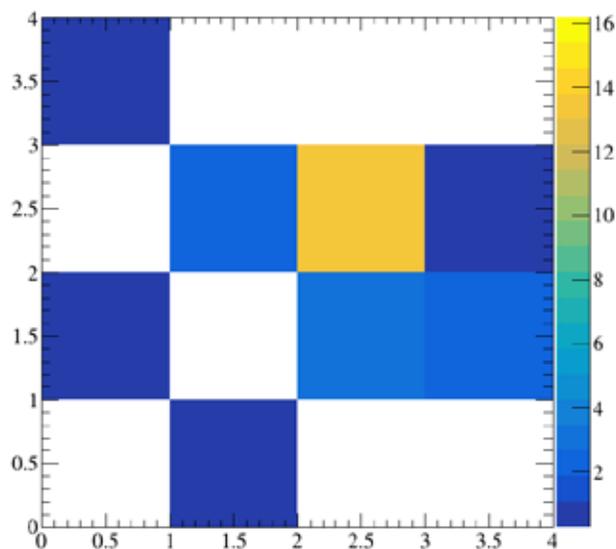


恒星の観測

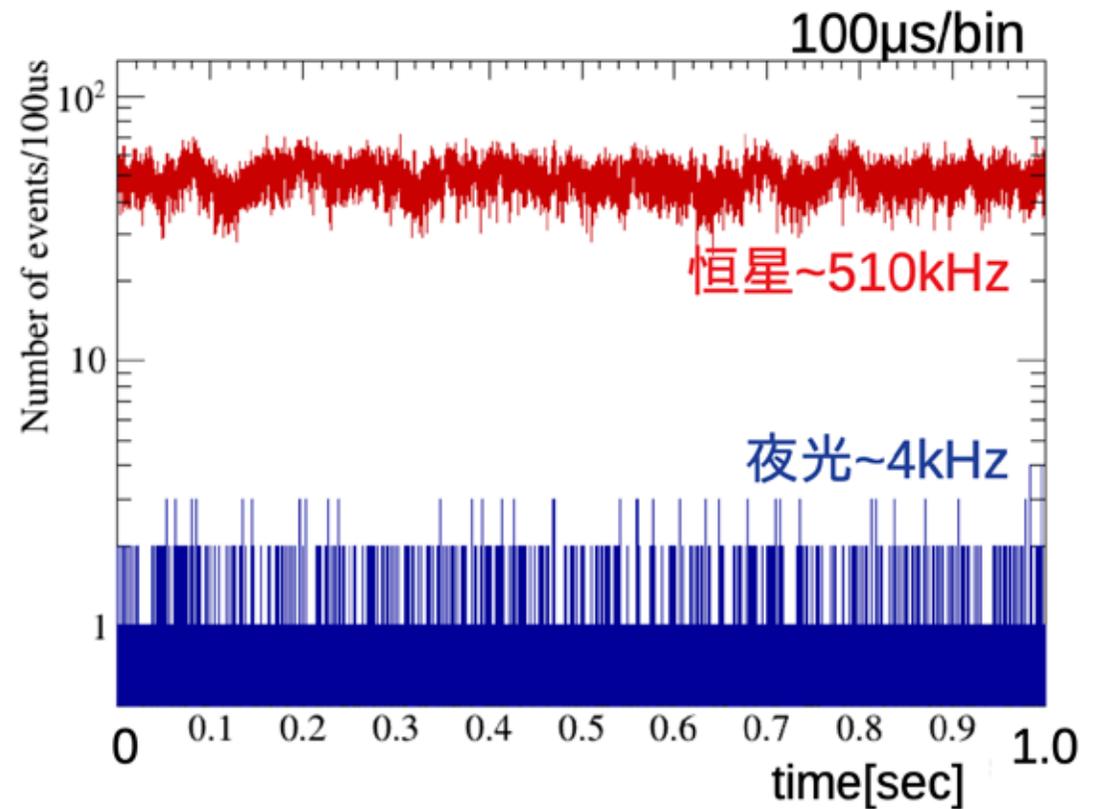
★星像を1視野に収めた



100 μs × 100 frames



★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

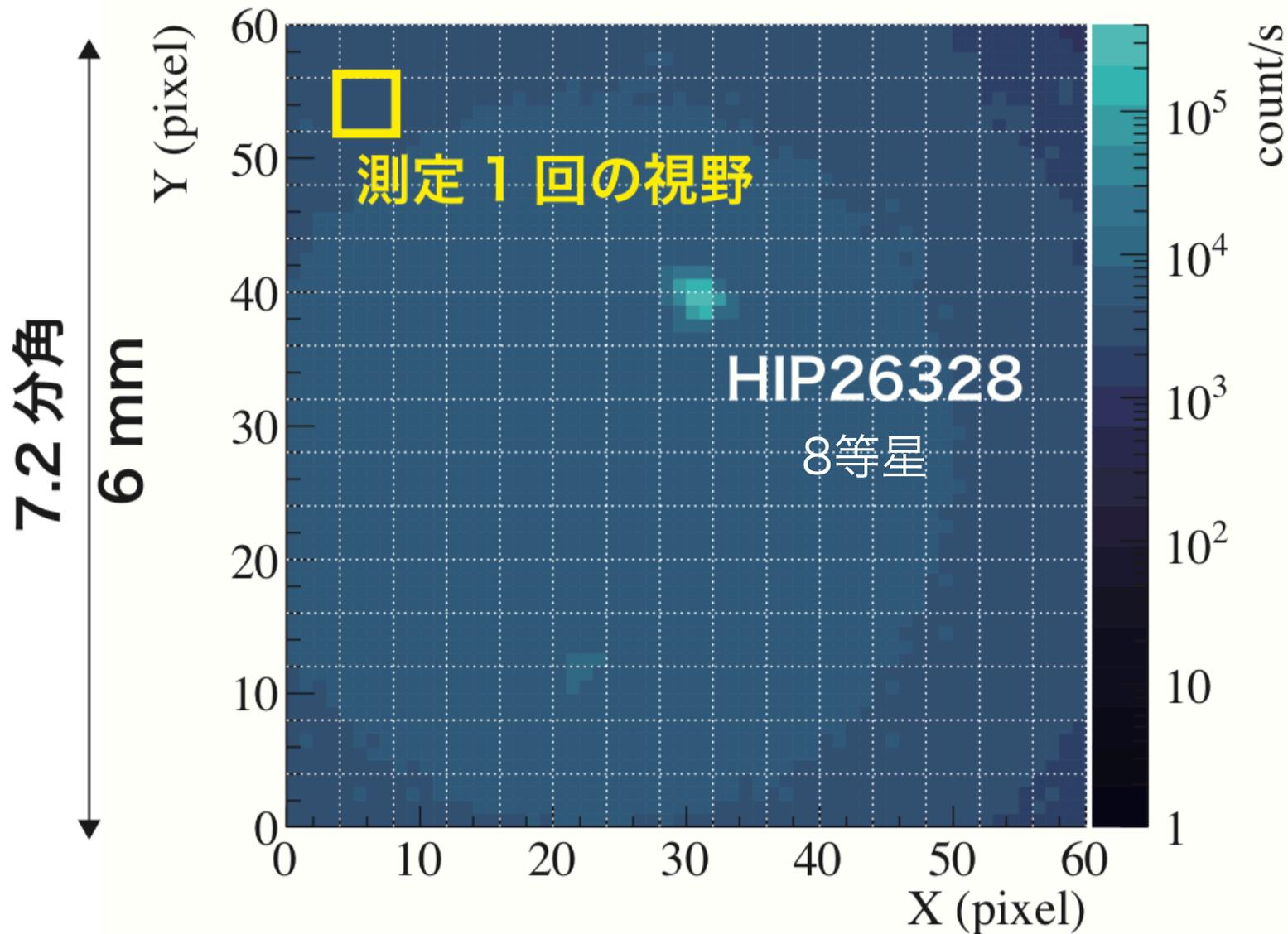
大内卒論(2019)

センサがもう一回り大きいと安心できそうだ。

空の撮像

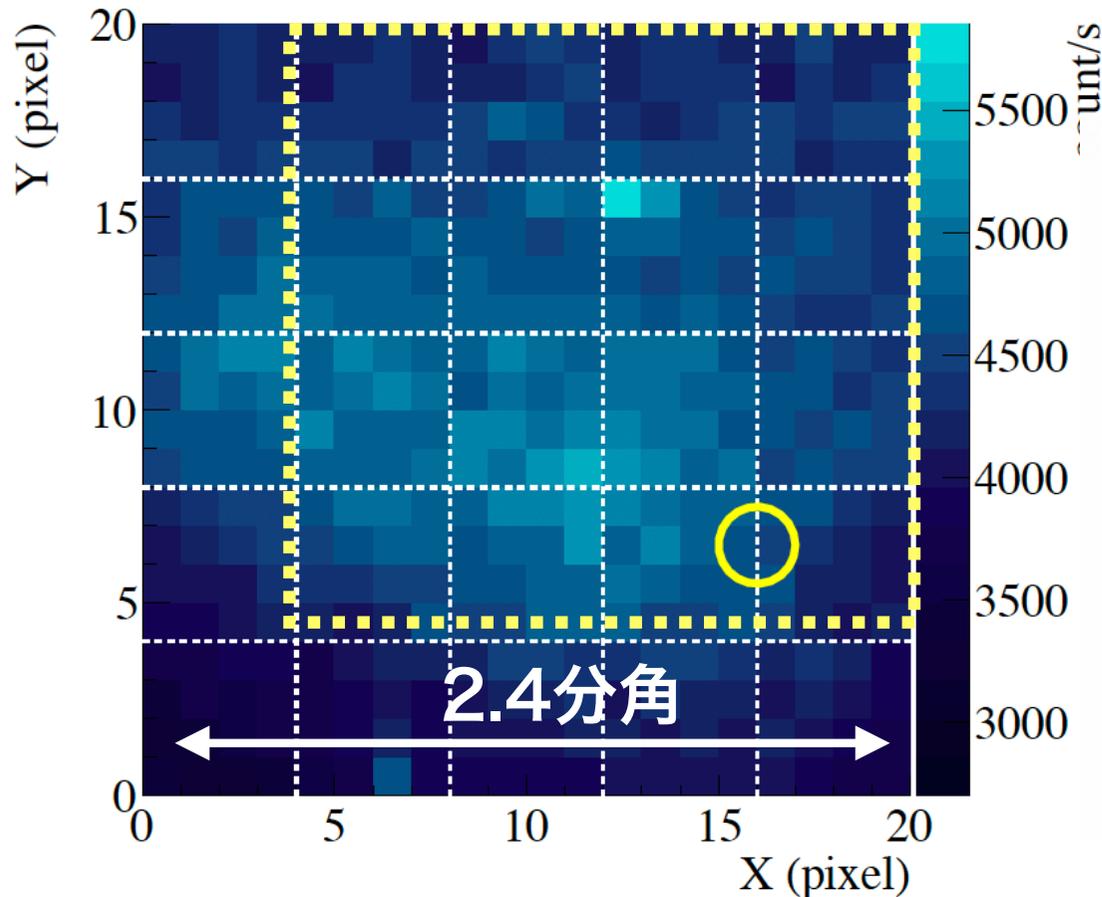
1秒露出 15×15視野

フラット補正済み

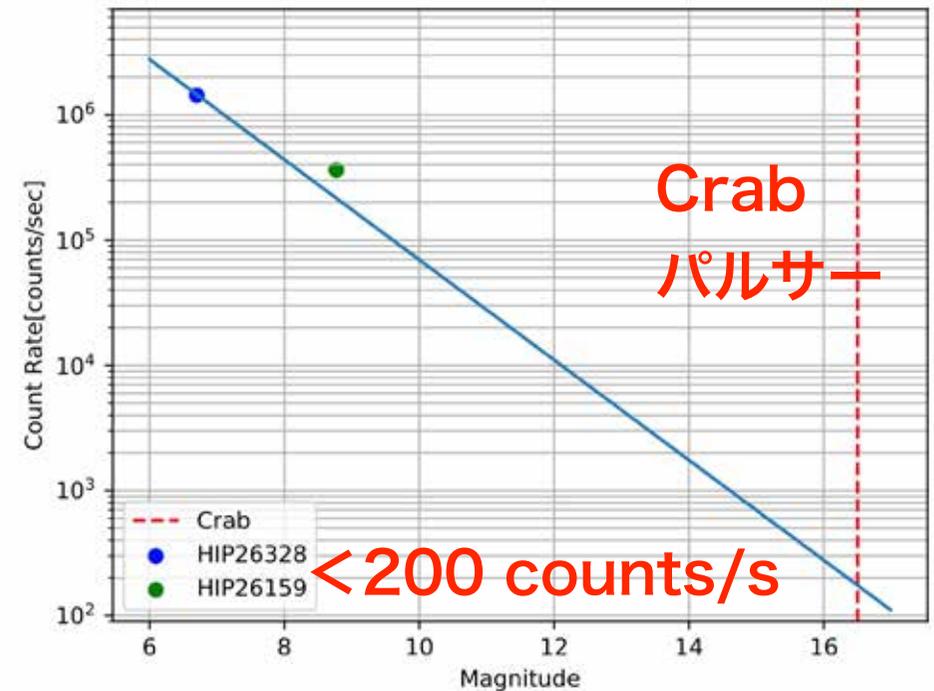


かに星雲の撮像とパルサー探索

Crabパルサー周辺（X線の星雲程度の範囲）を1秒モザイク



等級とカウント数の関係



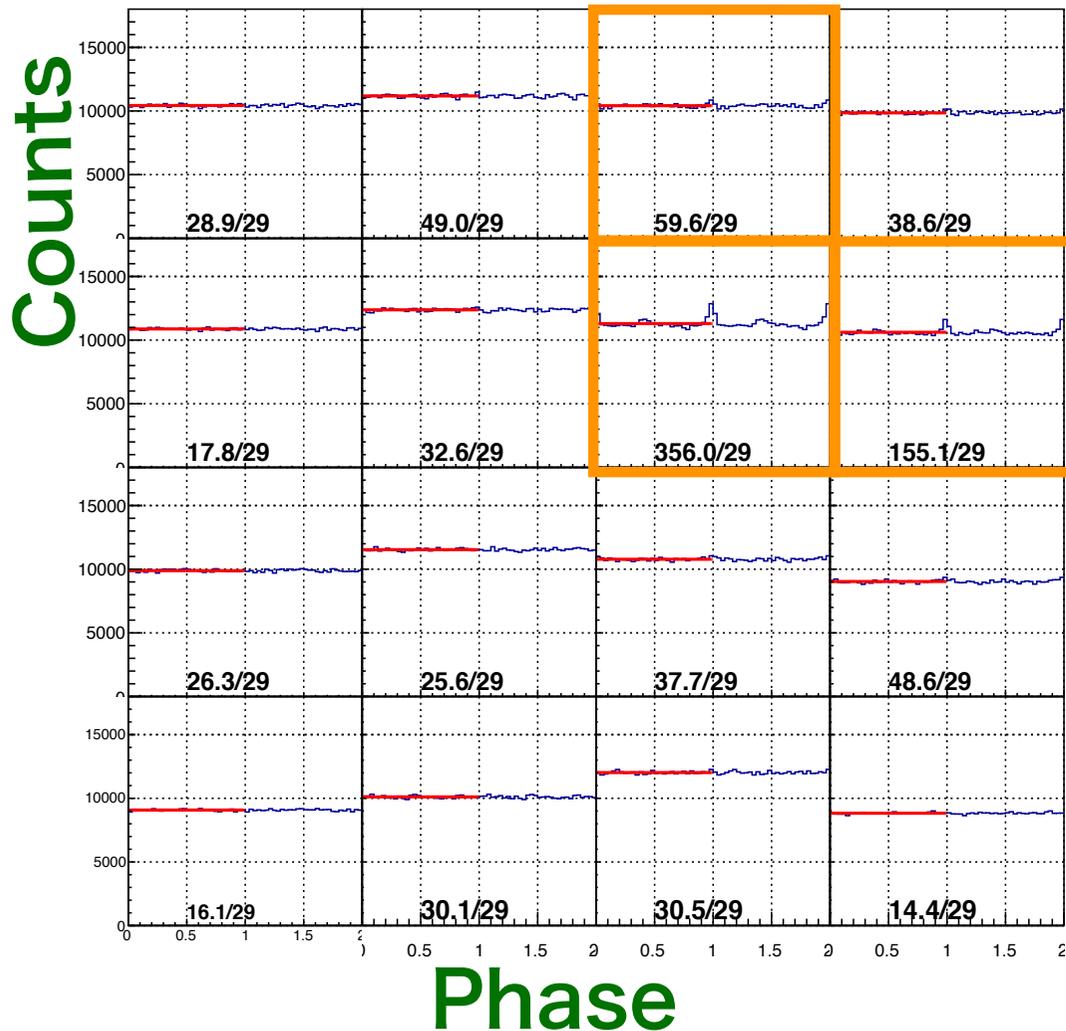
- このカウントマップからはパルサーが同定できない。予想と矛盾しない。
- 望遠鏡の操作からは中央付近にパルサーがあると予想。
- 4x4視野分の1分間のライトカーブを繰り返しスキャン測定した。
- UTCをToA (TDB) に変換、JBO ephemerisで位相付与
- 全測定ピクセルにCrabがいると思って周期探索

パルス検出チャンネルの同定

dof=29@0.01 : 49.588

dof=29@0.005 : 52.336

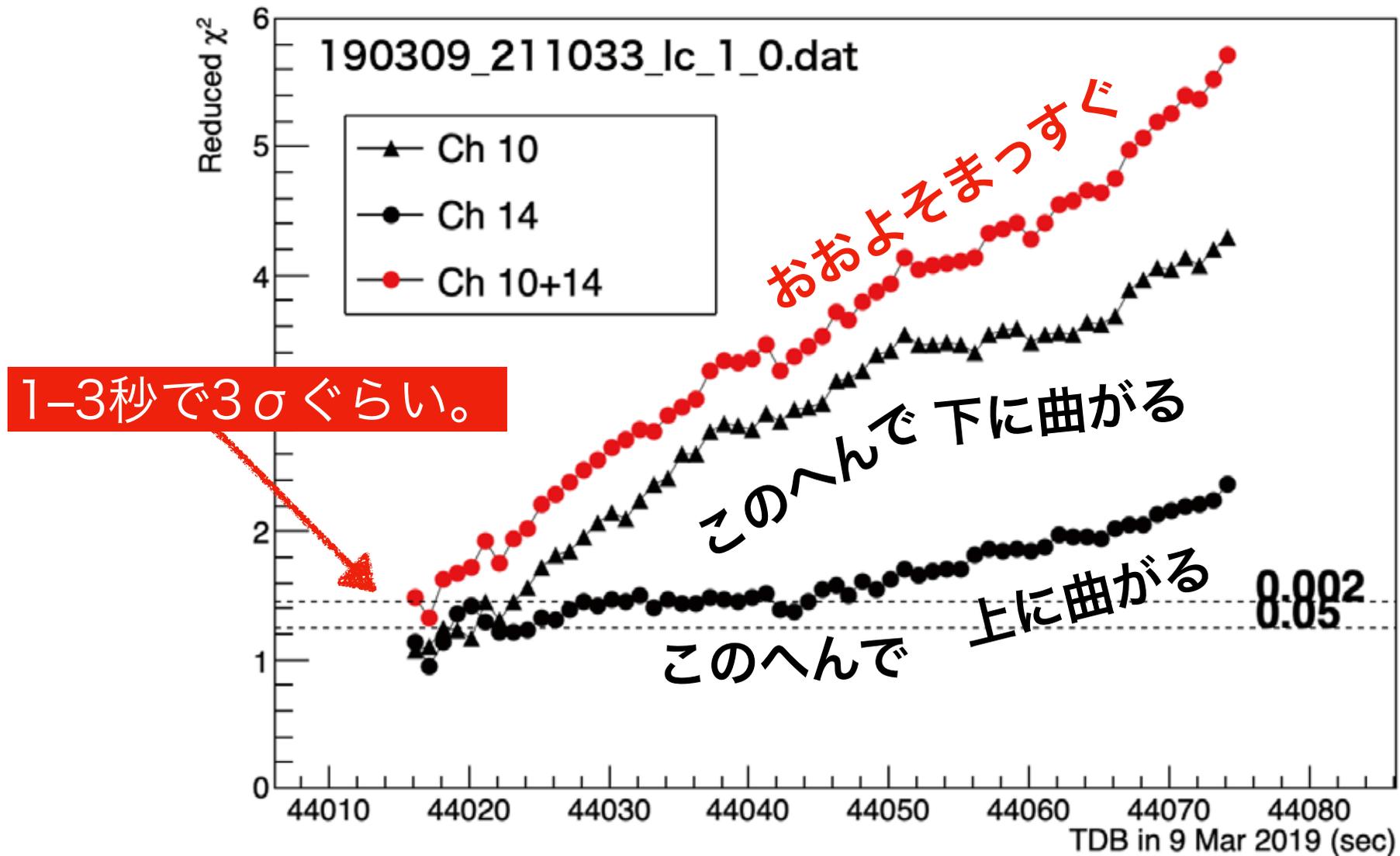
211033_lc_1_0



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

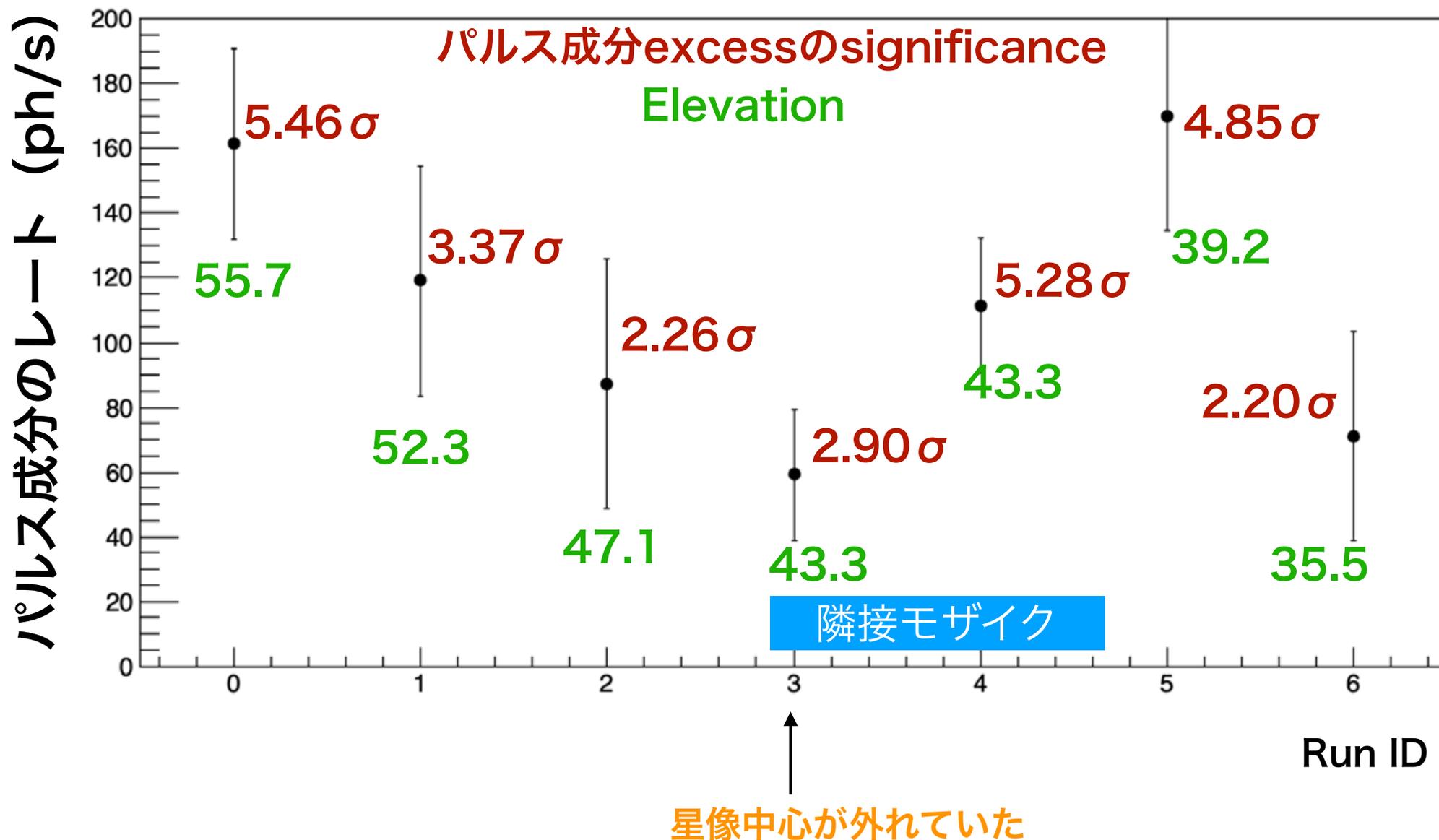
パルス検出感度

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。



Run by run

時間が短すぎて精密測光はできてないが、まさに原理実証はできた。



パルス波形

- 100 usのライトカーブを取得、GPSで絶対時刻をタグ
- 電波 (Jodrell Bank; 1.4 GHz) のメインパルスをphase=0に合わせた
- 可視ピークが~0.99位相、という先行研究と一致



数%変動の検出には光子統計が全く足りない
長時間観測には追尾精度に難あり

2010.11907

arXiv.org > astro-ph > arXiv:2010.11907

Search...

Help | Advanced

Astrophysics > Instrumentation and Methods for Astrophysics

[Submitted on 22 Oct 2020]

Development of an optical photon-counting imager with a monolithic Geiger APD array

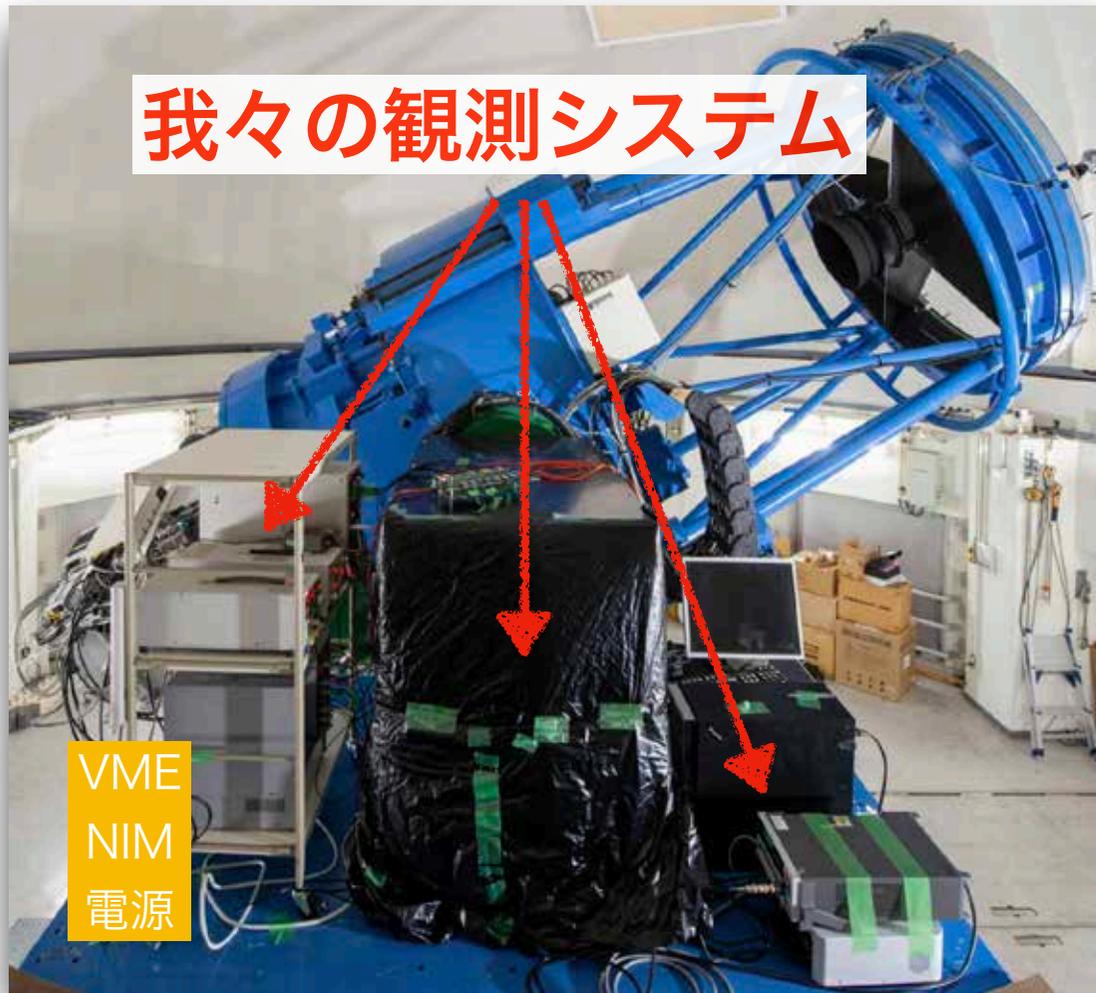
[Takeshi Nakamori](#), [Yuga Ouchi](#), [Risa Ogihara](#), [Toshio Terasawa](#), [Yuhei Kato](#), [Shinpei Shibata](#)

We have developed a sensor system based on an optical photon-counting imager with high timing resolution, aiming for highly time-variable astronomical phenomena. The detector is a monolithic Geiger-mode avalanche photodiode array customized in a Multi-Pixel Photon Counter with a response time on the order of nanoseconds. This paper evaluates the basic performance of the sensor and confirms the gain linearity, uniformity, and low dark count. We demonstrate the system's ability to detect the period of a flashing LED, using a data acquisition system developed to obtain the light curve with a time bin of 100 microseconds. The Crab pulsar was observed using a 35-cm telescope without cooling, and the equipment detected optical pulses with a period consistent with the data from the radio ephemeris. Although improvements to the system will be necessary for more reliability, the system has been proven to be a promising device for exploring the time-domain optical astronomy.

PASJに出ます。

やまがた天文台から出た初めての論文

かなた望遠鏡での観測



口径1.5 m, F/12.2

XYZ自動ステージで撮像と合焦



2020年1月19-21日

東北大・飯舘電波望遠鏡と同時観測 → GRPの観測, 発生時刻の同定

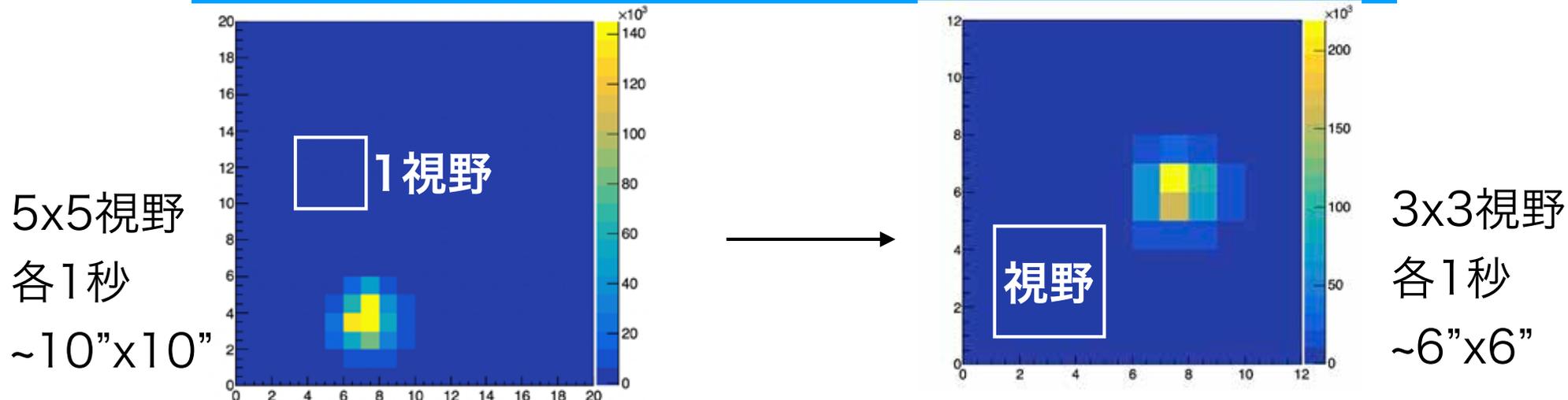
Tomo-e GOZENとも一部同時観測 → 可視の共同観測

導入と合焦

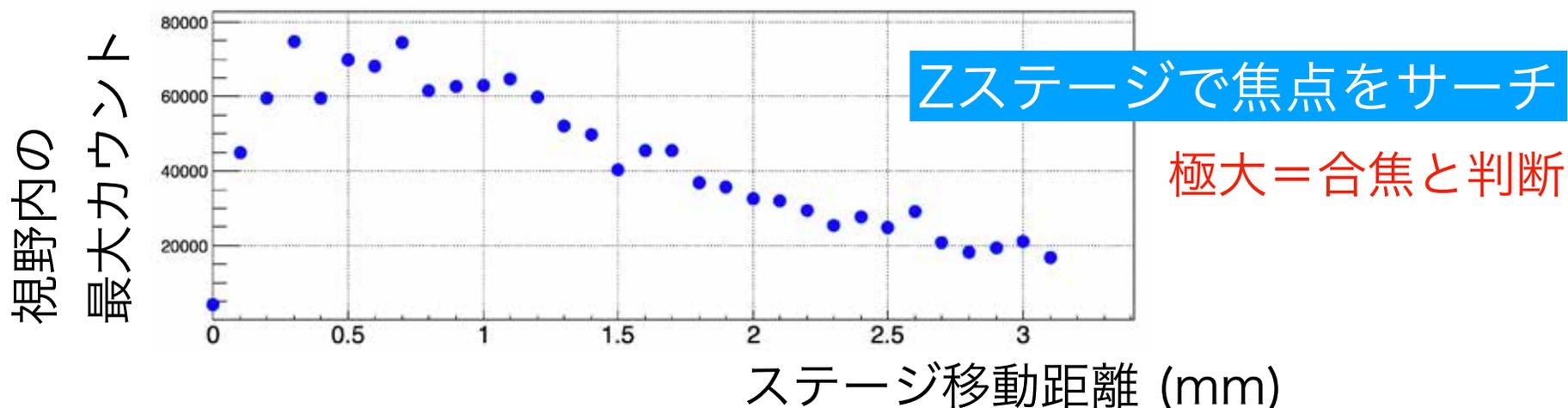
恒星へ向け、ステージで走査して探す。

Crabまで3つ程度の恒星を伝って導入した。

恒星に導入→XYステージでモザイク→恒星の位置合わせ

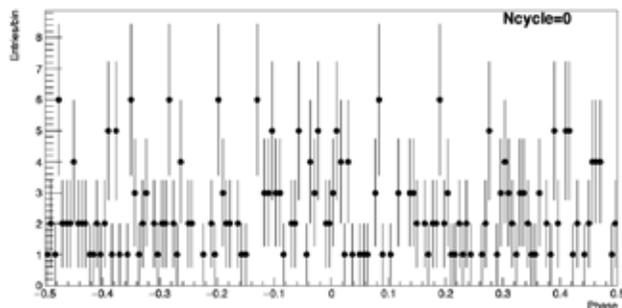
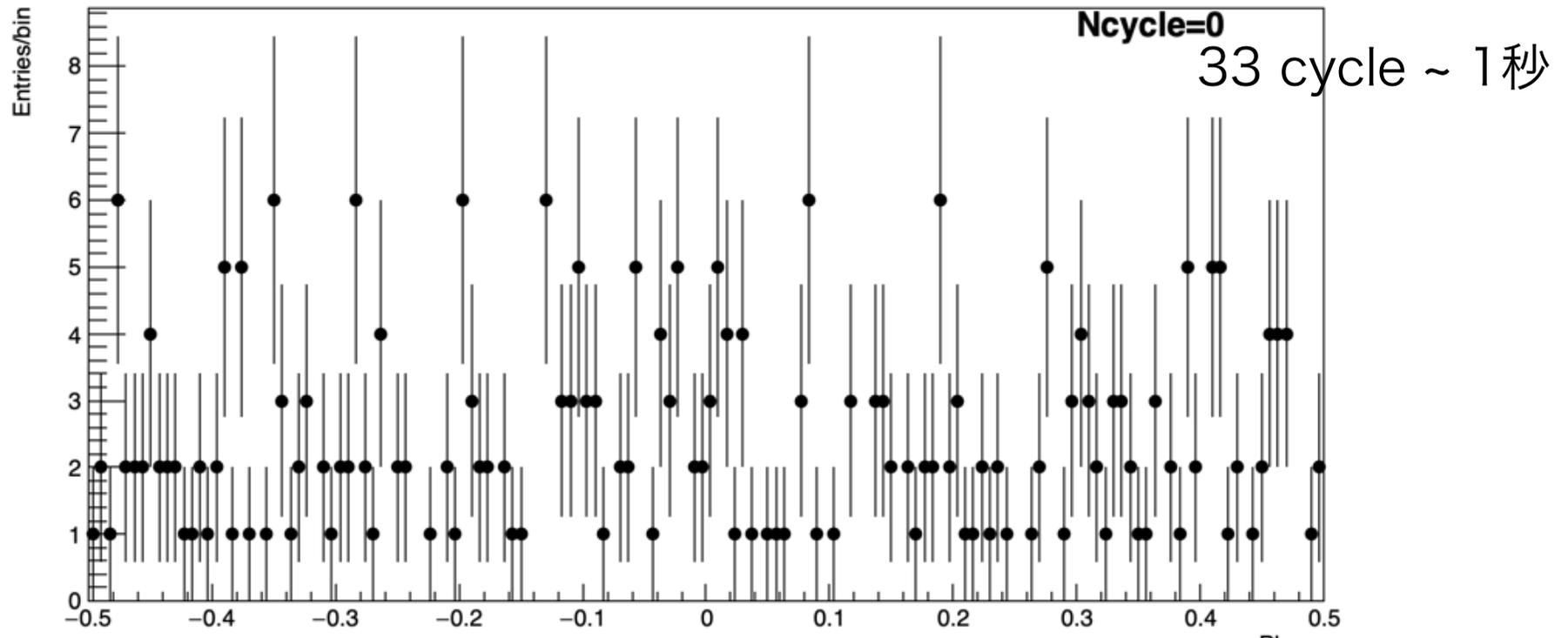


PA後はほぼ一発で視野に入る様になった。

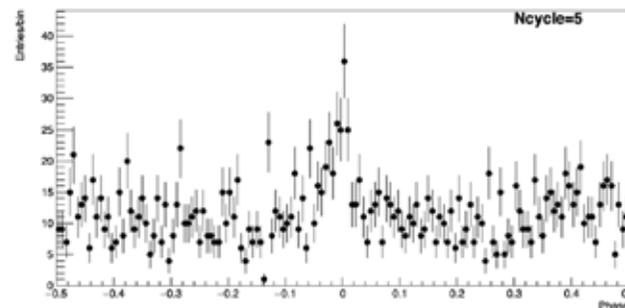


1周期毎の積算light curve

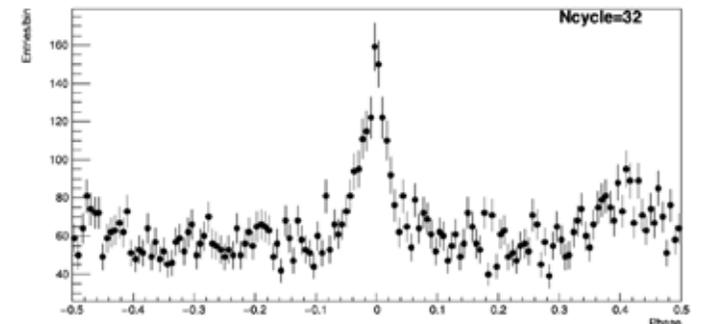
システムは安定に動作、Crab pulsarの検出に成功した。
山形とは比較にならない豊富な光子数。



1周期 ~33 ms



5周期 ~165 ms



33周期 ~1秒

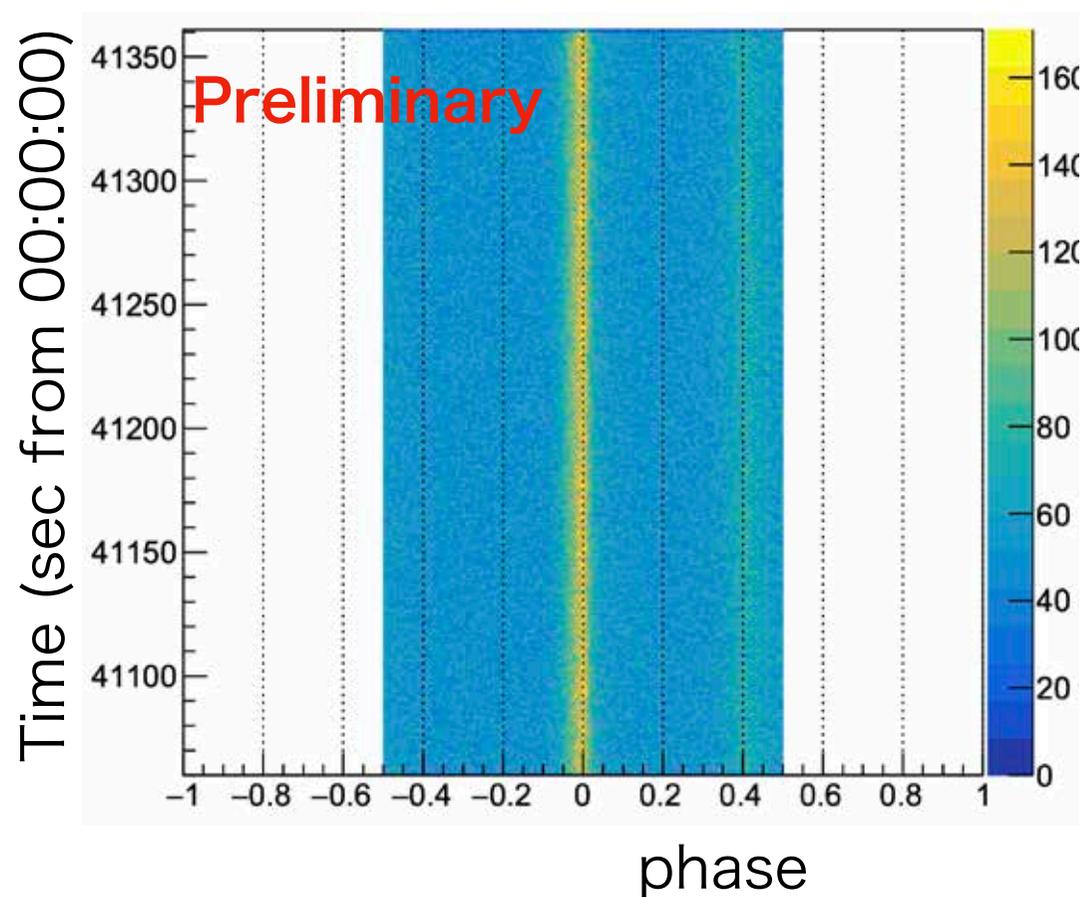
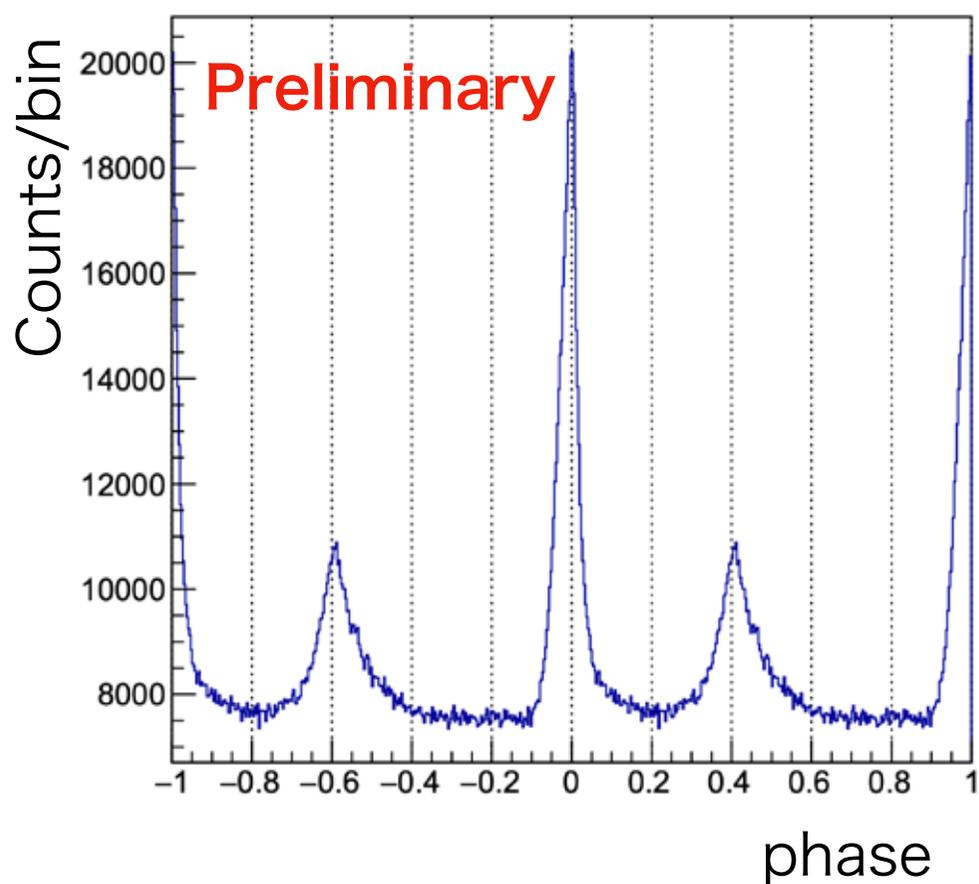
パルスの検出

2020年1月21日、5分間の観測データ例。

システムは安定に動作、Crab pulsarの検出に成功した。

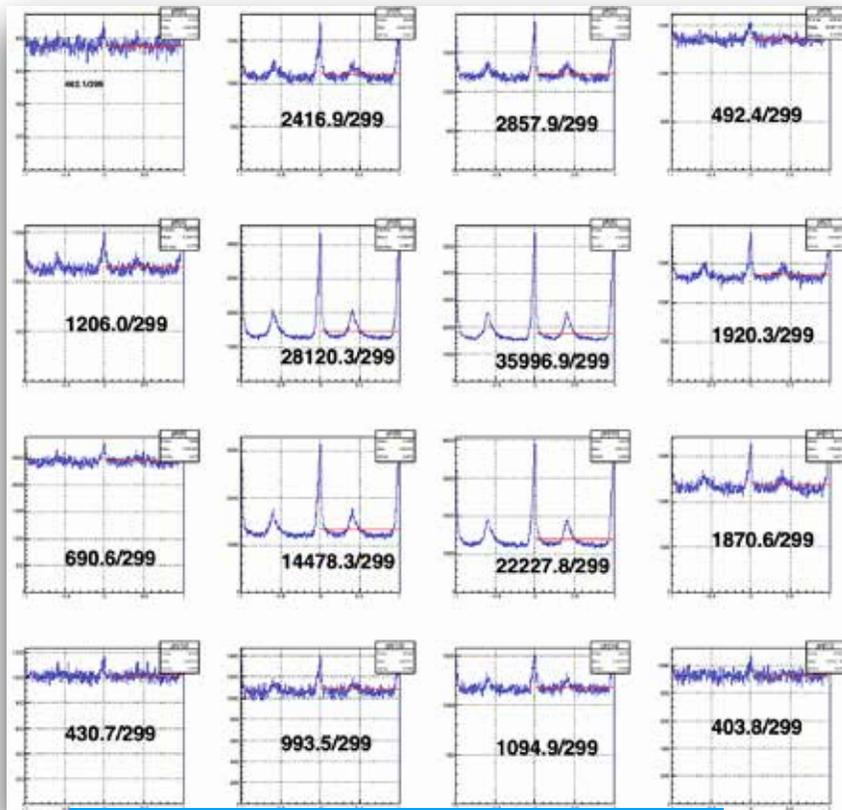
7時間程度の観測データを解析中。

課題：絶対時刻の校正＋追尾に伴う結像位置移動



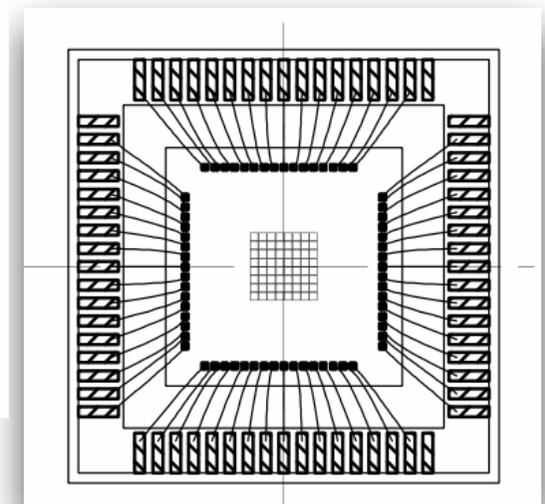
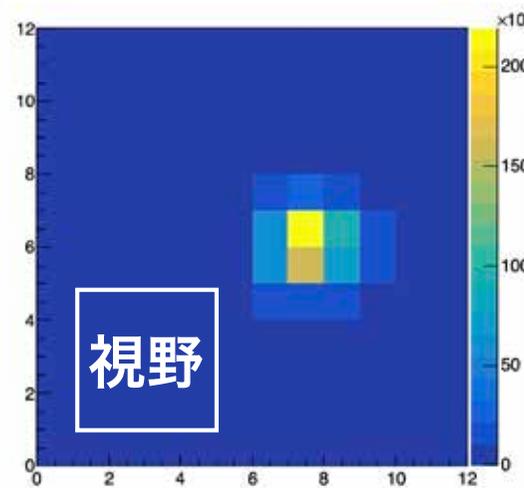
次の改良：大（？）面積化

全ピクセルでパルスが見える → PSFに対して十分な面積がない。



かなた望遠鏡・1視野
ピクセルごとのライトカーブ

恒星撮像時とconsistent



8x8 画素を製作中。
2月納品予定。
ガワは大きい。～2cm角

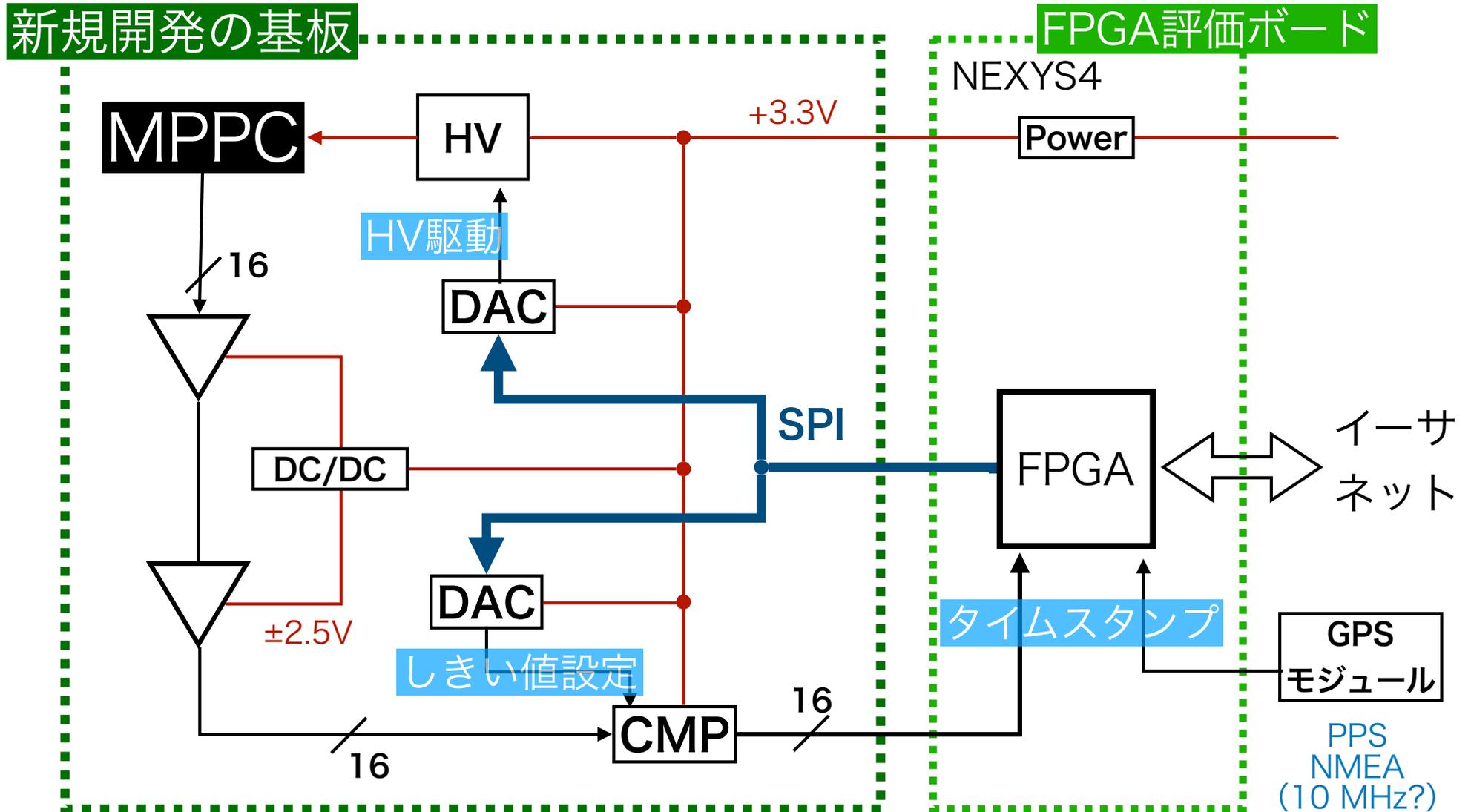
最適なピクセルサイズはF値依存。

比較検討と柔軟な活用のため、**複数のセルサイズを製作中。**

次の改良：回路の小型化



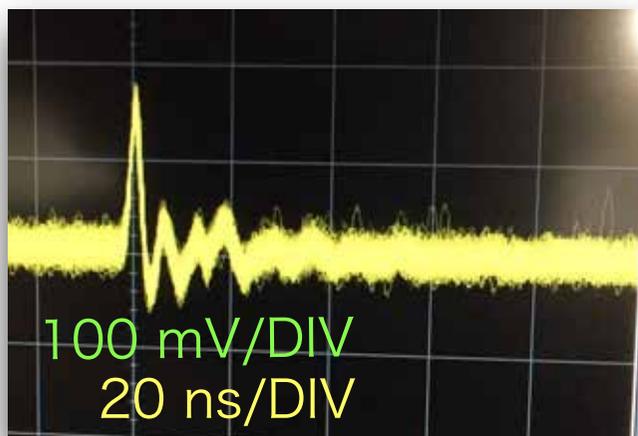
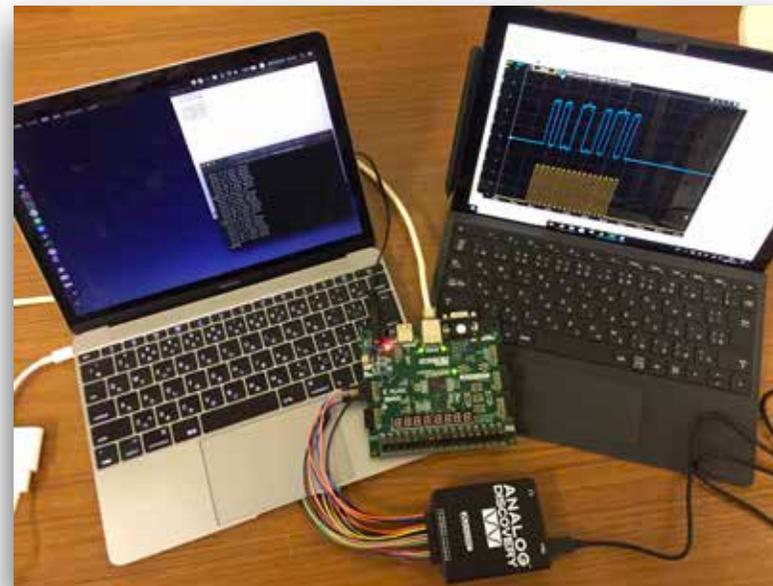
VMEやNIM一式→専用基板化・FPGA化する。 **移植性・可搬性向上へ**
 VMEの読み出しが制限していた100 usの時間分解能を向上できる。



基板v1の評価

大内修論 (予定・希望)

12 cm

OK

- ✓ HVの出力
- ✓ センサ信号の出力
- ✓ DACの制御
- ✓ イーサネット経由でSPI出力

電力 (実測)
0.24 W/ch

これから

(9月当時)

- ▶ 基板とFPGAの接続
- ▶ コンパレータ抵抗値の調整
- ▶ タイムスタンパの実装
- ▶ GPSとの連動

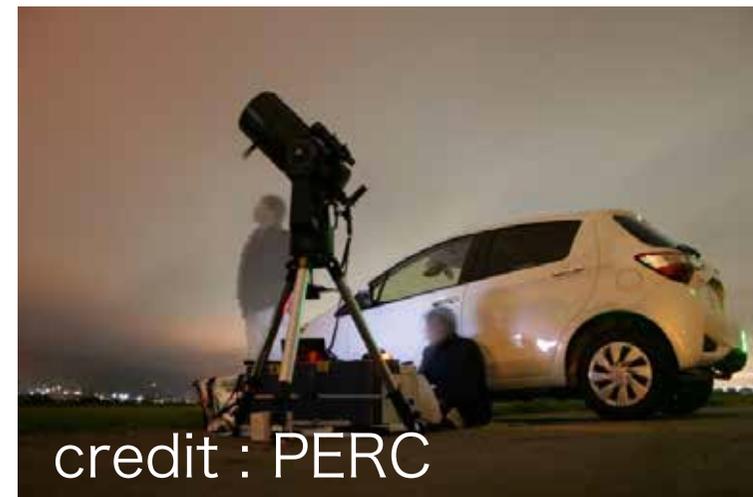
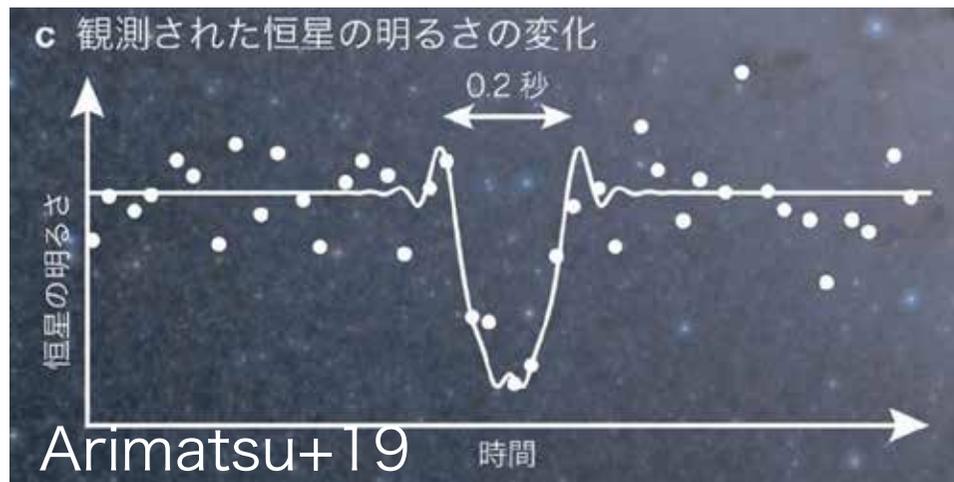
可搬性 → 出張掩蔽観測網？

アドバイザー：吉田二美さん

掩蔽予報 = **恒星位置精度** × **小惑星の軌道精度**
 Gaiaで時代が変わった × LSST等で時代が変わる

センサが小さいのでターゲットは予報に基づいた決め打ちしかできない。
 省電力と可搬性をもう一步詰めれば、超高速・高感度動画が撮れるのでは？
 量産できるので、多地点観測の実現可能性も高い。

↓ もっと測光点が増やせるはず。



ネタ探し

Observational Signatures of Sub-Relativistic Meteors

AMIR SIRAJ¹ AND ABRAHAM LOEB¹

¹*Department of Astronomy, Harvard University, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA*

ABSTRACT

It is currently unknown whether solid particles larger than dust from supernova ejecta rain down on Earth at high speeds. We develop a hydrodynamic and radiative model to explore the detectability of $\gtrsim 1$ mm sub-relativistic meteors. We find that a large fraction of the meteor energy during its passage through the Earth's upper atmosphere powers the adiabatic expansion of a hot plasma cylinder, giving rise to acoustic shocks detectable by infrasound microphones. Additionally, a global network of several hundred all-sky optical cameras with a time resolution of $\lesssim 10^{-4}$ s would be capable of detecting $\gtrsim 1$ mm sub-relativistic meteors.

マイクロメテオのフラッシュ
SNR由来の可能性も？

arXiv:2002.01476

Orbital Foregrounds for Ultra-Short Duration Transients

HANK CORBETT¹, NICHOLAS M. LAW¹, ALAN VASQUEZ SOTO¹, WARD S. HOWARD¹, AMY GLAZIER¹,
RAMSES GONZALEZ¹, JEFFREY K. RATZLOFF¹, NATHAN GALLIHER¹, OCTAVI FORS^{2,1} AND ROBERT QUIMBY^{3,4}

¹*University of North Carolina at Chapel Hill, 120 E. Cameron Ave., Chapel Hill, NC 27514, USA*

²*Institut de Ciències del Cosmos (ICCUB), Universitat de Barcelona, IEEC-UB, Martí i Franquès 1, E08028 Barcelona, Spain*

³*San Diego State University, 5500 Campanile Dr., San Diego, CA 92182, USA*

⁴*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo Institutes for Advanced Study, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan*

(Accepted October 6, 2020)

Submitted to ApJL

transient観測のじゃまになる、
人工衛星のフラッシュ測定

arXiv:2011.02495

A high-rate foreground of sub-second flares from geosynchronous satellites

Guy Nir,^{*} Eran O. Ofek, Sagi Ben-Ami, Noam Segev, David Polishook, Ilan Manulis

Department of Particle Physics and Astrophysics, Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ.

arXiv:2011.03497

どちらも広視野向きだろうか。

まとめ

- カスタムMPPCによる可視光子計数システムを開発している。
- 時間分解能が飛躍的に向上する＋単光子が見える。
- 「**超狭視野・超高速・超高感度動画カメラ**」。分光能力なし。
- Crabの定常パルスをアマチュア望遠鏡で観測できた。
- かなた望遠鏡に搭載、飯舘電波・Tomo-eとCrabを同時観測した。
 - Giant Radio Pulseの可視増光を計測する解析中。
- 素子の拡張と回路の小型化を進めている。

- **可搬性・移植の容易性**を1つの軸にして独自の立ち位置を見出したい。
 - 出張掩蔽観測システムは直近の実現目標

共同研究募集中。開発でも観測でも。