

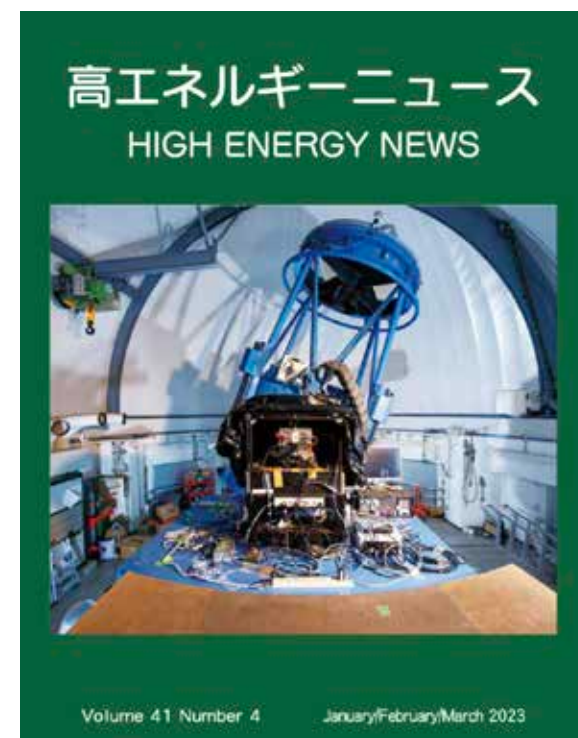
可視高速撮像システム IMONYの開発と 大学望遠鏡との連携

山形大学 中森健之

2024年12月11日 OISTER研究会

科研費基盤B (2020-2022) (2023-2025)

NAOJ共同開発研究 (2021)



あれから4年

2020年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
- ・ 解析の課題（トラブルは非公開に）
- ・ 今後の展望と課題



Wikipedia

借りている虎の威（御礼）

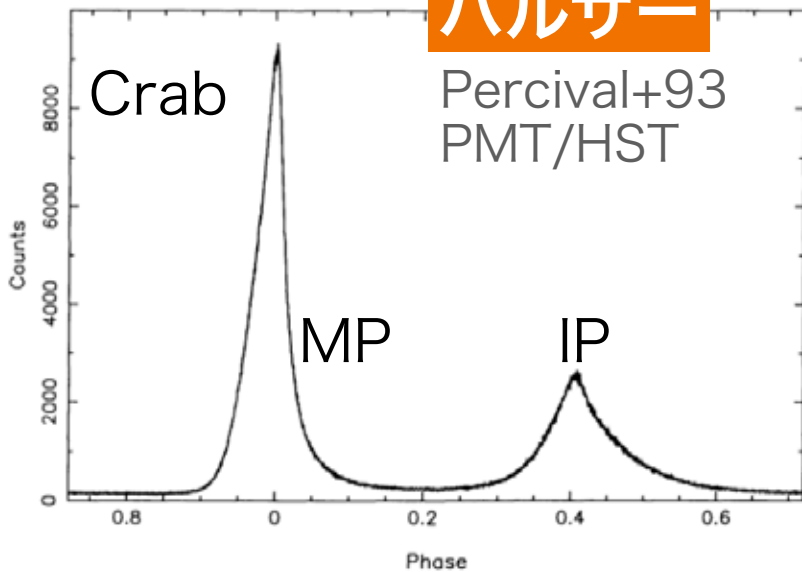
科研費 挑戦的萌芽(2014-15)
 山田科学振興財団（天文学会推薦/2019-20）
 科研費 基盤B（2020-22）

岩倉使節団（1871-73） $\xrightarrow{\text{4年後}}$ 西南戦争（1877）**!?!?!?**

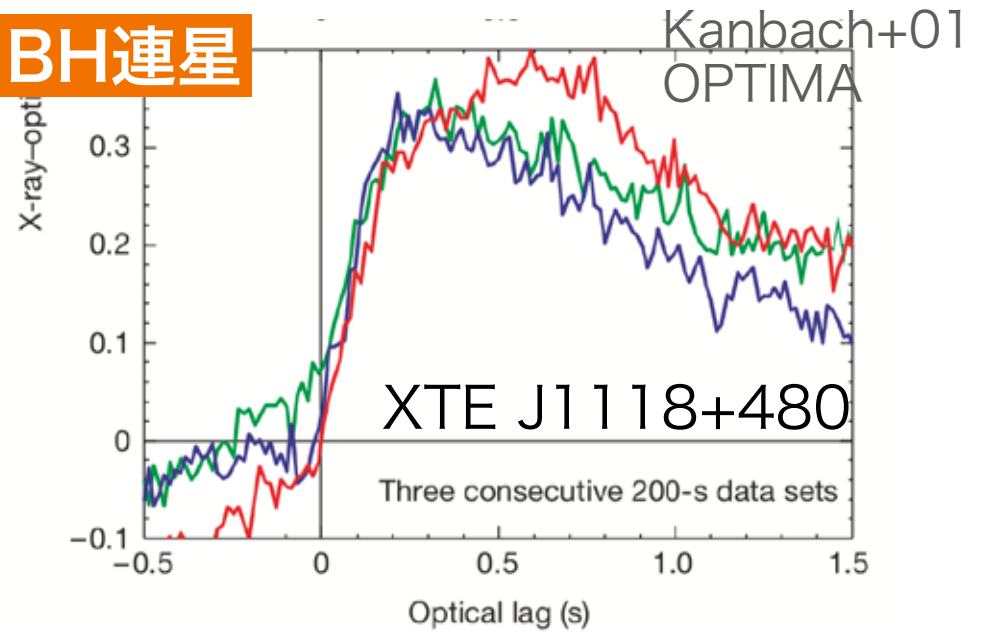
反乱の意思はありません…

高速可視測光のサイエンス

パルサー

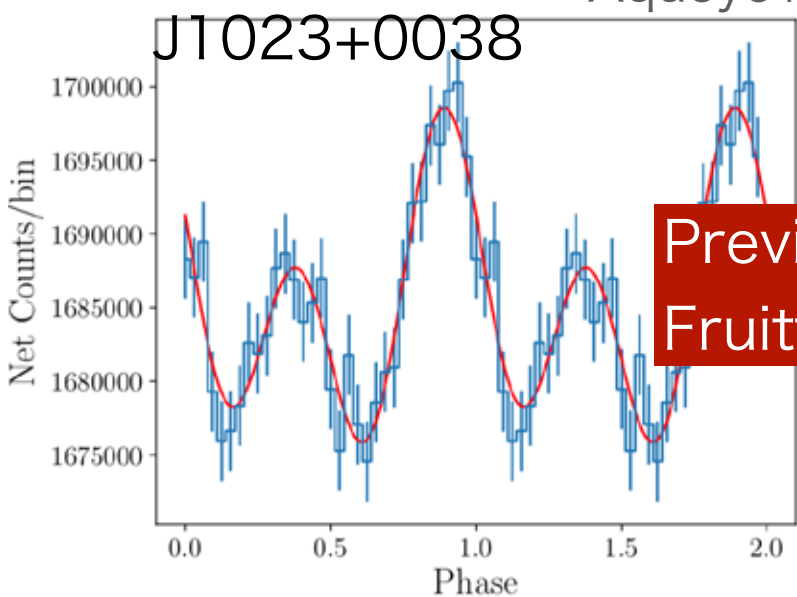


BH連星



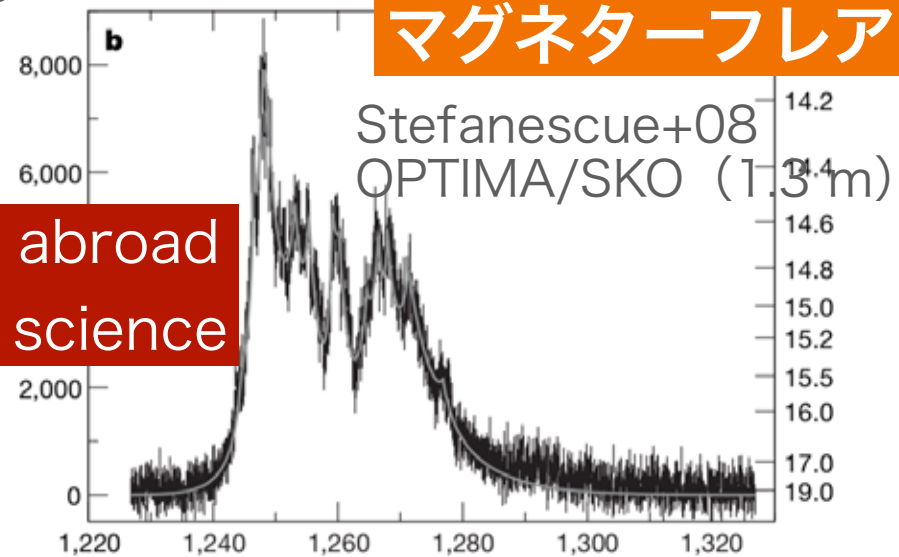
ミリ秒パルサー

Zampieri+19
Aqueye+/Copernicus



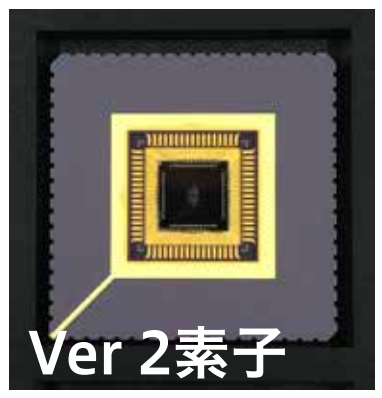
Previous works abroad
Fruitful area of science

マグネターフレア

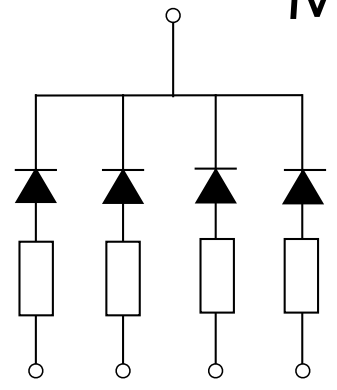


高速撮像システム IMONY

Imager of **M**PPC-based **O**ptical photo**N** counter from **Y**amagata



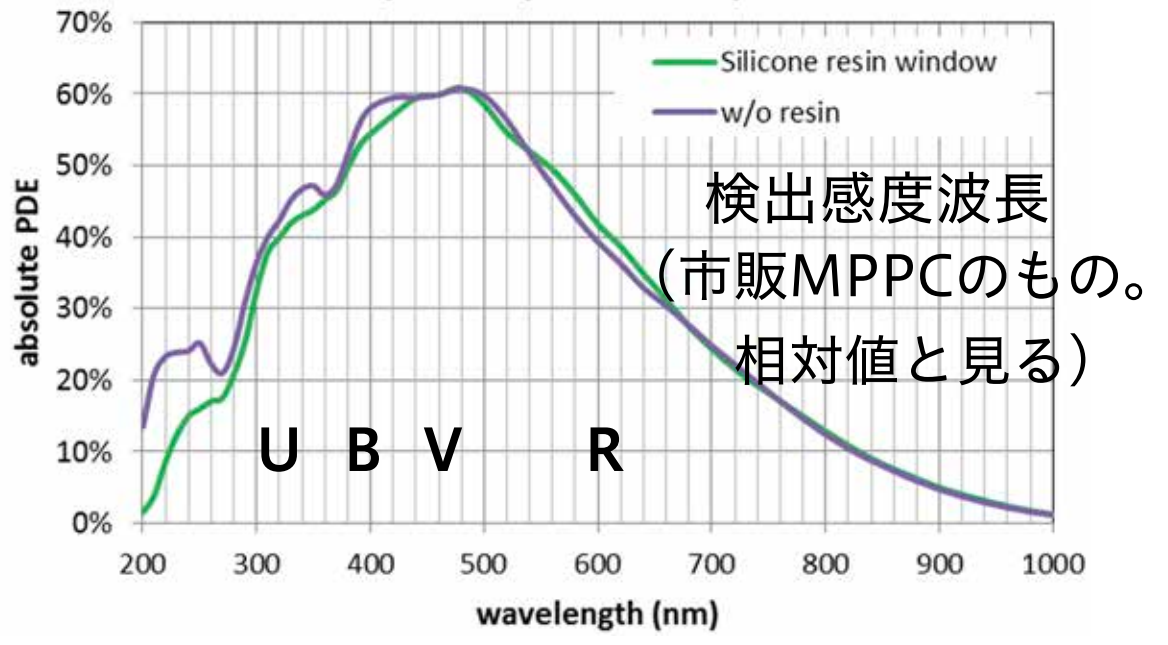
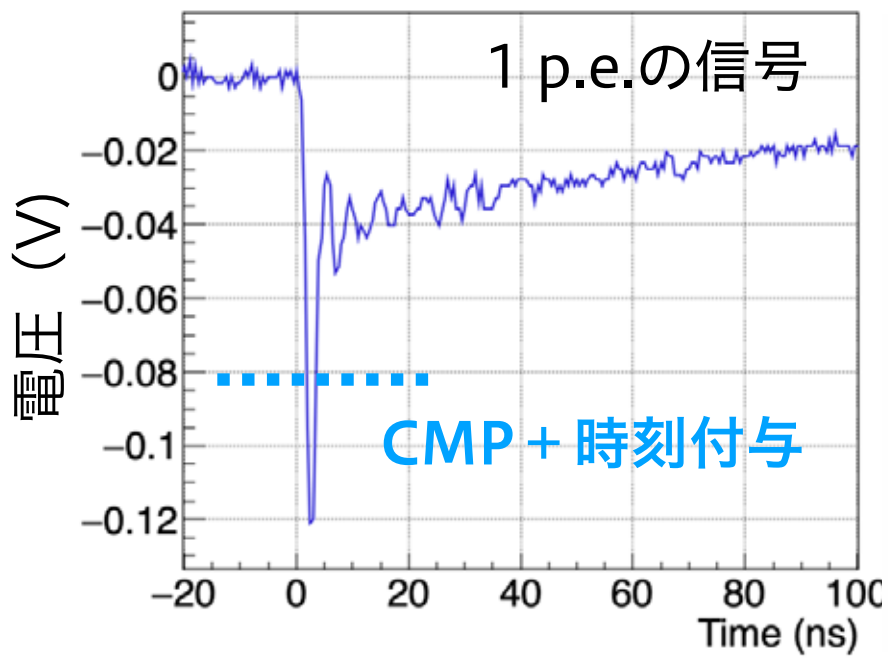
Ver 2素子



MPPCをカスタマイズ、セルごとに光子計数

- ★ 0.1/0.15/0.2 mm 角、8x8画素
- ★ 単光子に感度、高いS/N
- ★ 冬季自然冷却で低ダーク O(100 Hz)
- ★ 超狭視野だがシームレス高速「動画」

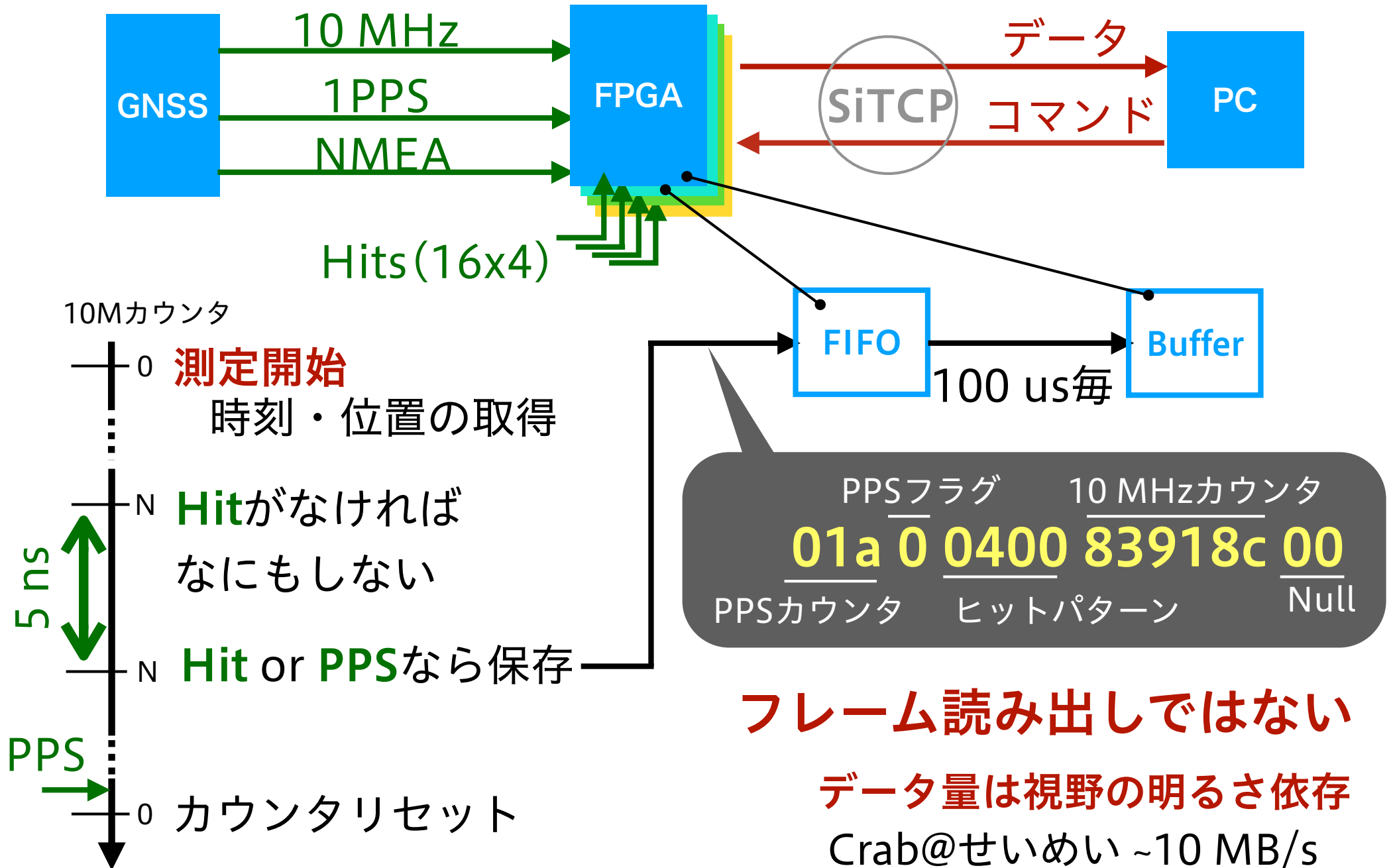
PSFより大きい面積が実現 = いよいよ測光へ



ご参考



「イベント」データ

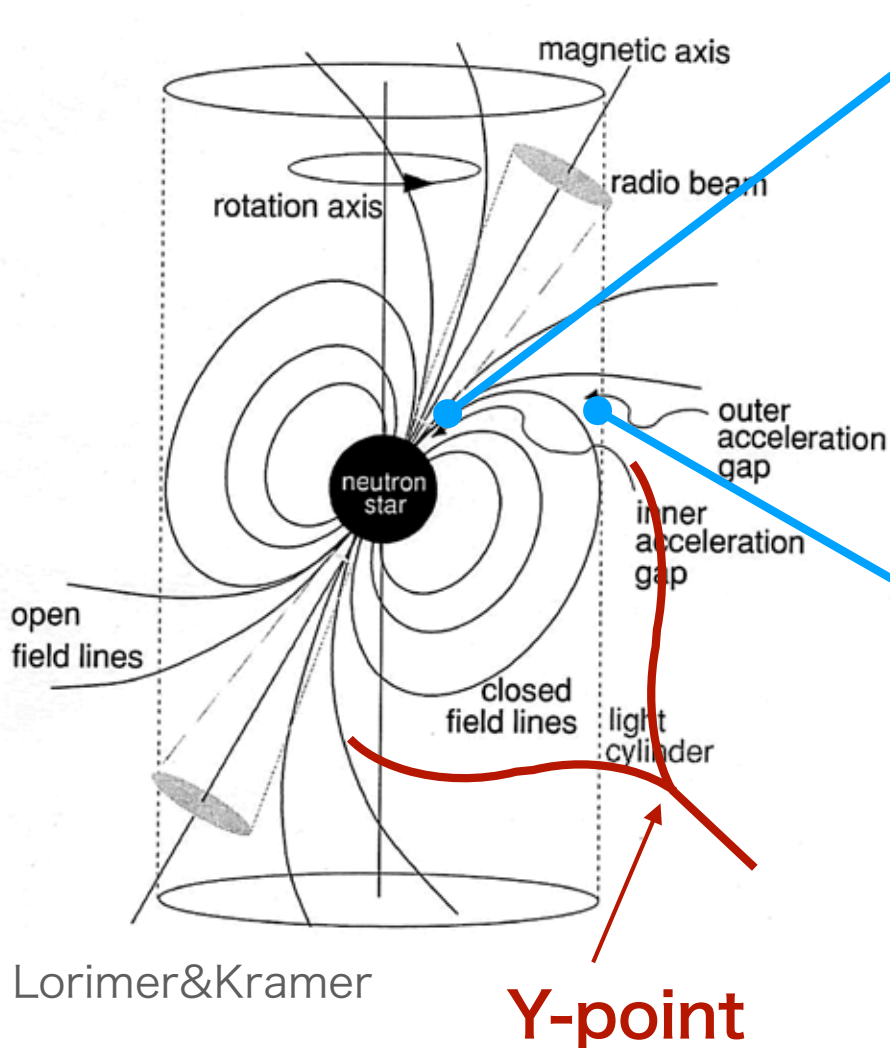


回転駆動パルサー

高速回転する磁化した中性子星

自転周期 (Typ. 0.1-1秒) とその変化率が基本観測量

$dE_{rot}/dt =$ 磁気双極子放射 \rightarrow 磁場 (10^{11-13} G)、年齢 (10^3-8 yr)

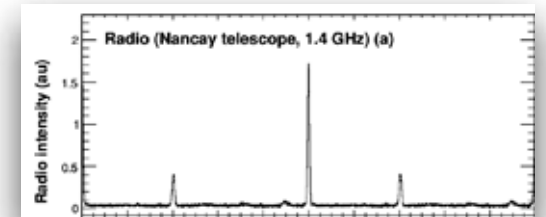


Polar cap

Coherent : 電波 sharp pulse

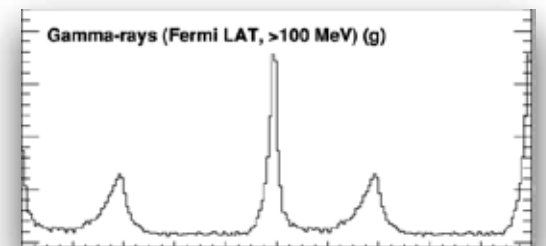


Abdo+10



Outer gap

Incoherent : γ / X / Op? broad pulse



Giant Radio Pulseと増光

★GRP: Crab等で頻発する突発的な電波パルス放射

10秒に1回ぐらい

★MP・IPに付随、ns—usの継続時間

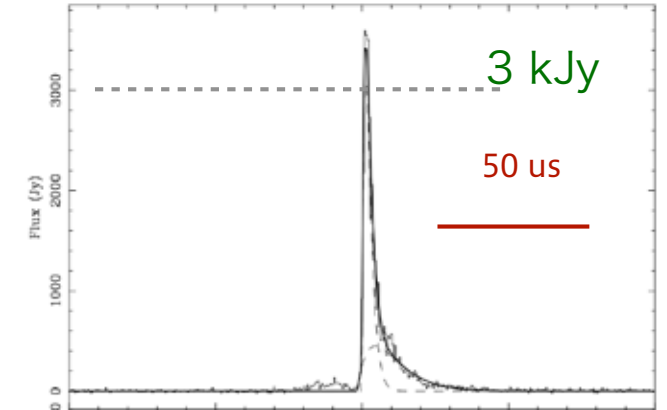
★放射機構の解明には**多波長時間分解観測**が必須

★Coherent/incoherent?

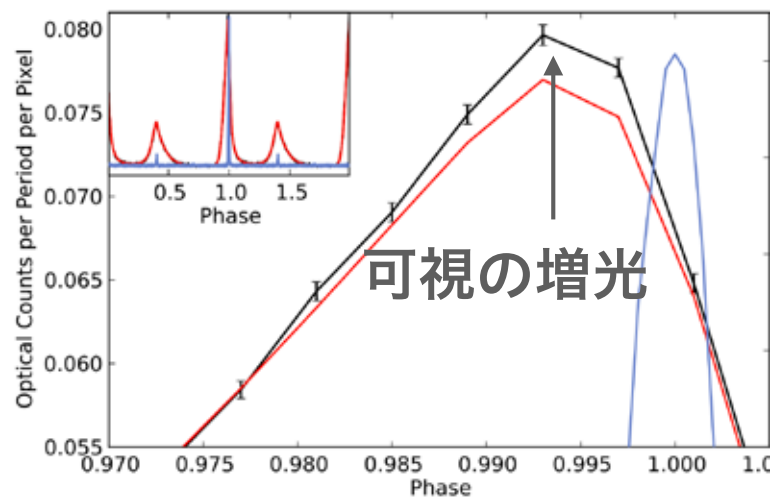
★マグネターやFRBとの関連?

★可視の高速観測は海外が先行。**~3%の増光**を確認 (7σ)

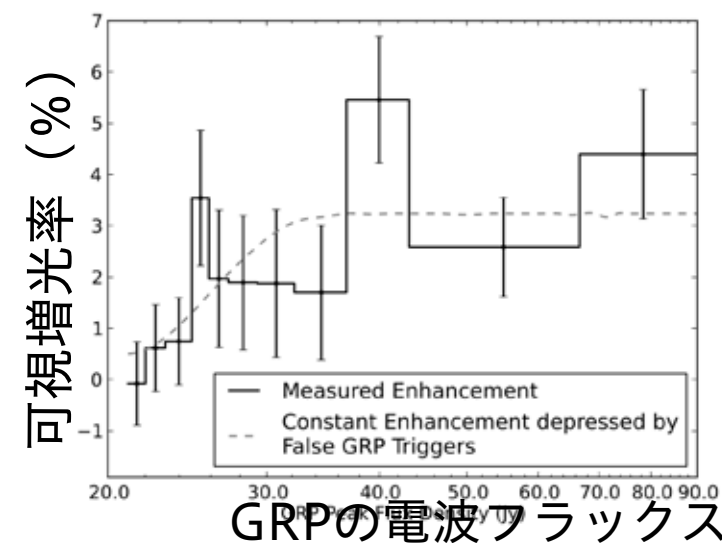
★GRP強度との相関 や 増光の詳細な位相依存性は**統計不足**



Sallmen+99



Strader+13

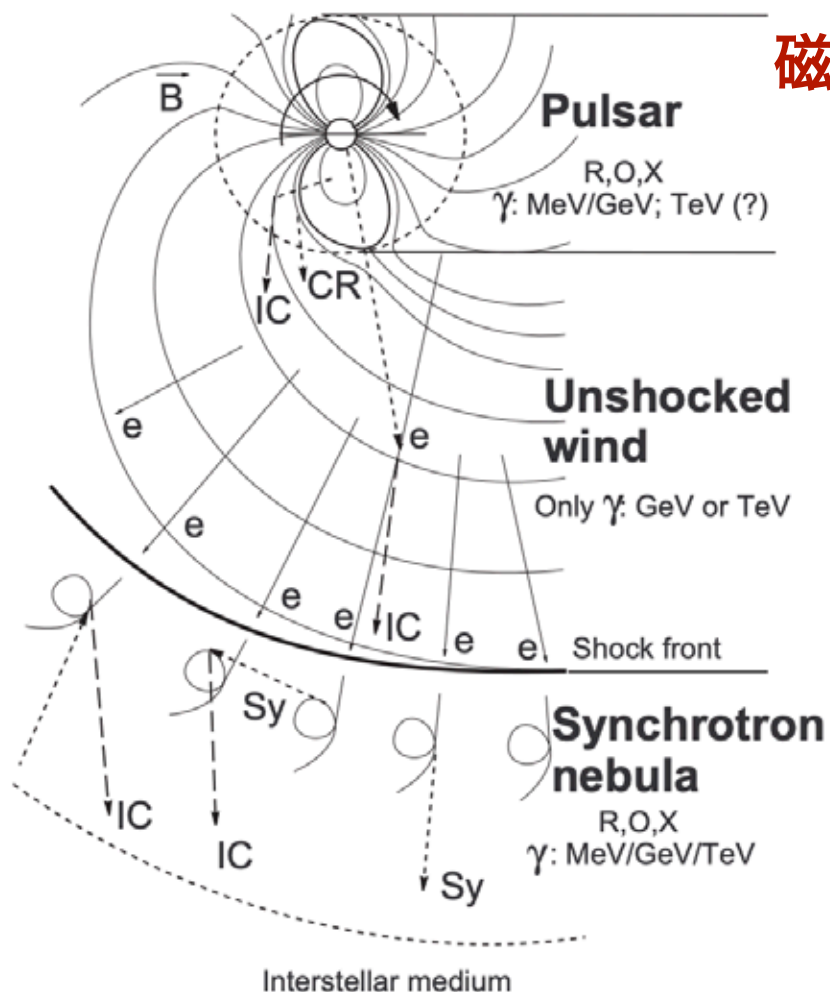


Strader+13

パルサー風とパルサー星雲



Radiation from a **Pulsar-wind-nebula** complex



磁気圏放射機構の謎

極付近表面から飛び出たeは
Open fieldに沿ってLCの外へ

エネルギー転換の謎 $\frac{B^2}{8\pi} \longrightarrow K_e$
(σ -problem)

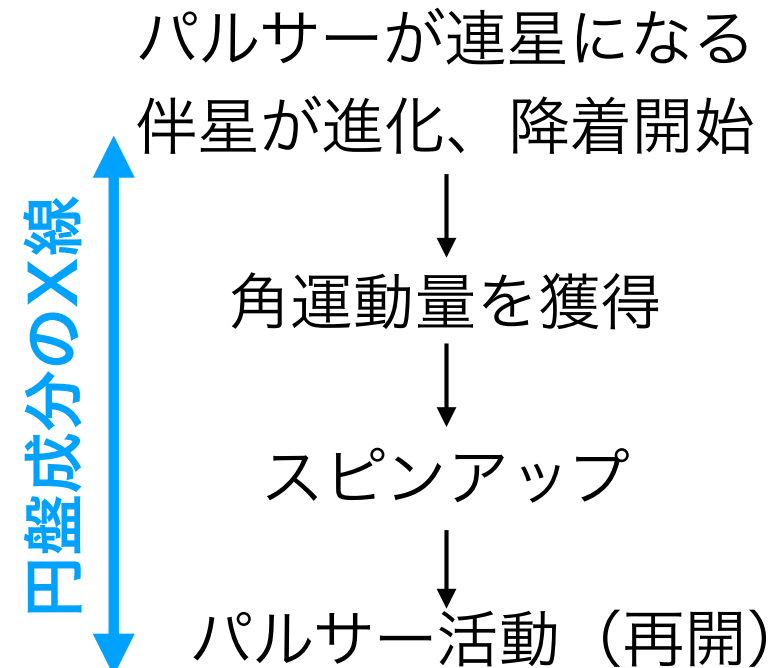
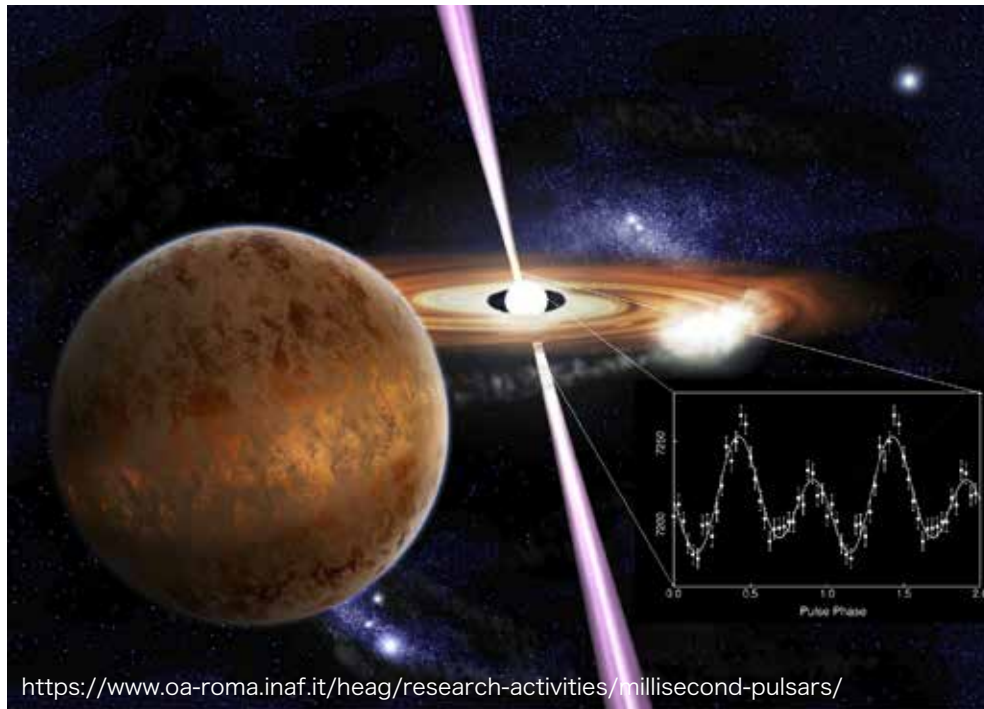
磁力線にfrozenなまま外へ

シンクロトロンが出ない・見えない

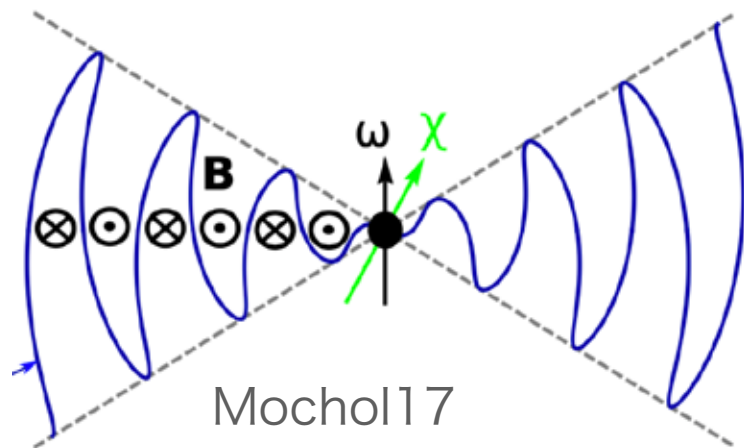
衝撃波の形成・加速・熱化

「パルサー風検出器」でもある

連星ミリ秒パルサーとパルサー風



パルサー風が降着円盤を
吹っ飛ばすと **円盤成分の消失**



パルサー風が伴星（可視）に直接当たる。
自転周期によるmodulationが期待される

「パルサー風検出器」になる

Spider pulsars

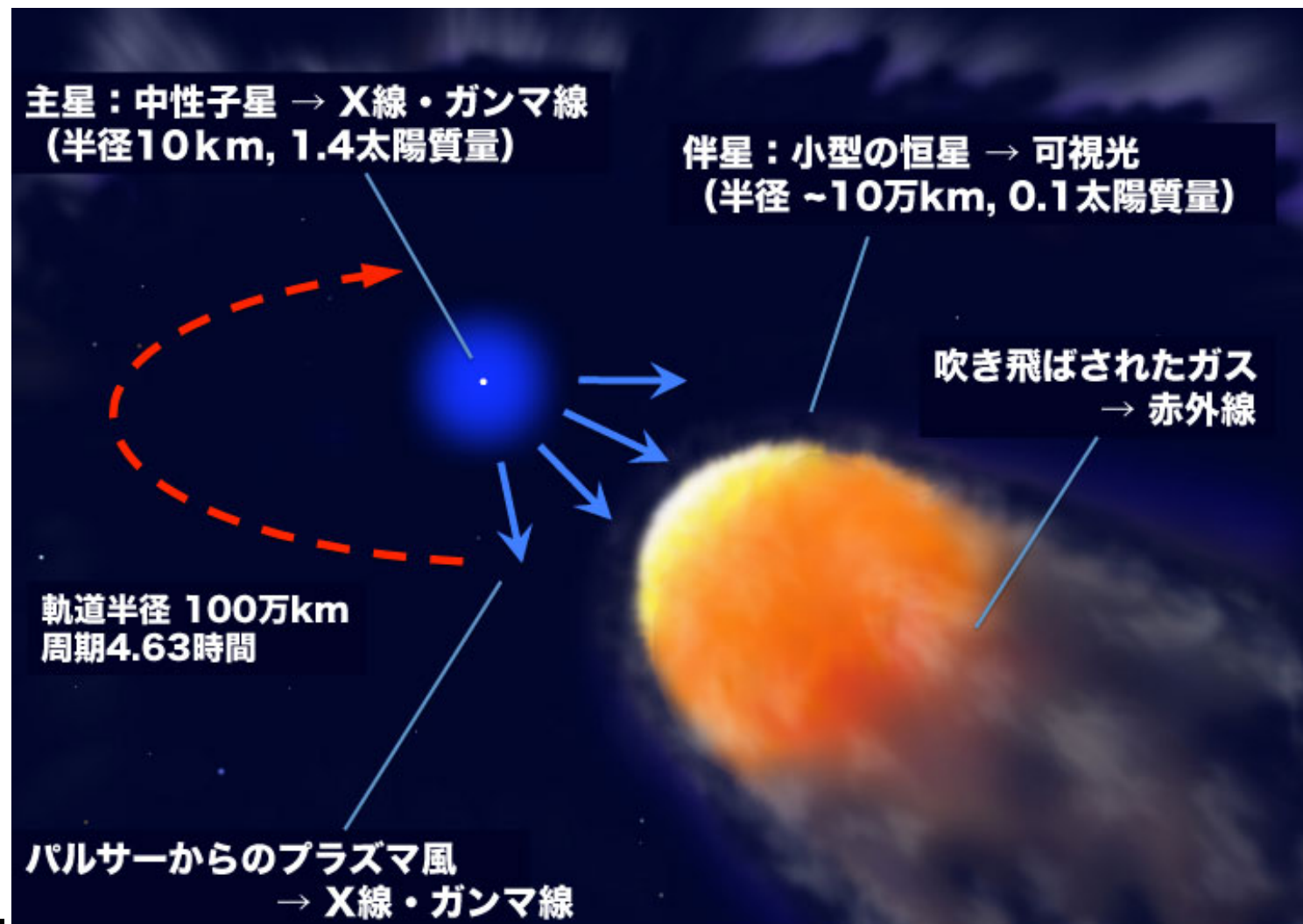
Black widow

Redback

どちらもクモの種類名。画像割愛

パルサー風が伴星を吹き飛ばし中

伴星の質量で呼びわけ



大学望遠鏡はととてもありがたい

芋煮は具だけじゃダメで鍋が必要

あやしい装置でもテストさせてもらった。人の縁に感謝

土居さん→川端さん、中岡さん、秋田谷さん、他かなた望遠鏡
前田さん→木野さん、他せいめい望遠鏡

開発→観測のサイクルが早くできた

零細プロジェクトのよさ。卒論・修論にも合いやすい
4-5年連続して学生に恵まれているのは大きい

他波長から参入した馬の骨にも手厚くサポートしてもらえた。

荷物の搬入出（初回は段ボール10箱）

観測（望遠鏡操作、PA、連日全夜）

滞在（送迎・メシ）

成果でお返ししたい

観測実績

Crab (試験+科学観測) と恒星 (試験) がメイン

2019

2020

2021

2022

2023

2024

2025



構成

4x4 VME

4x4 FPGA

8x8 FPGA

8x8

山形

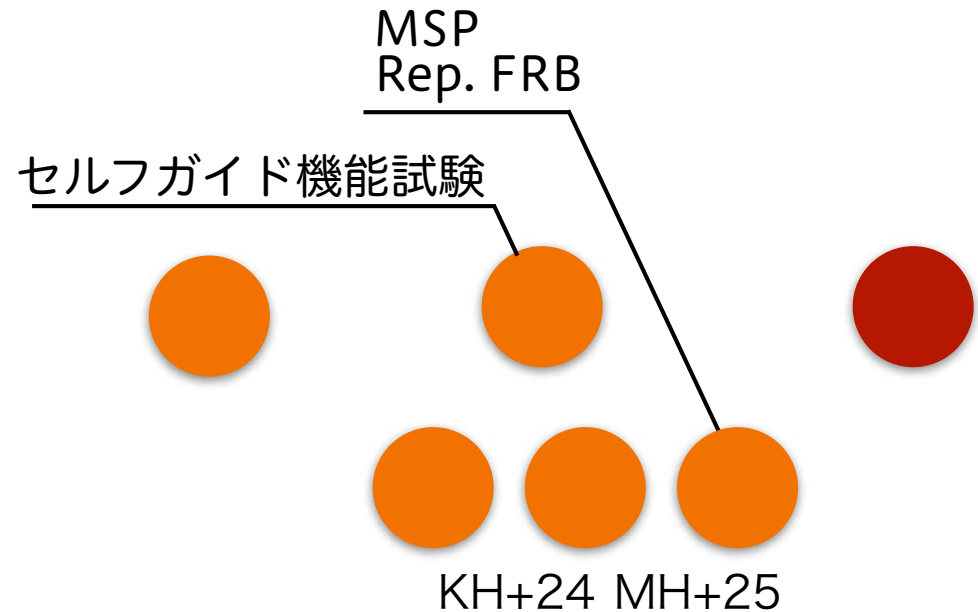
● TN+20, 21

かなた

●

●

TN, KH+
submitted



せいめい

電波同時観測



広島大学

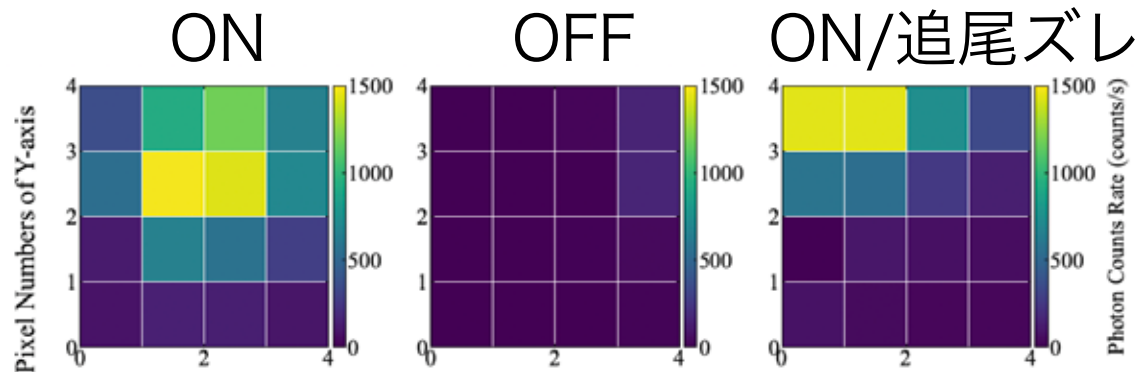
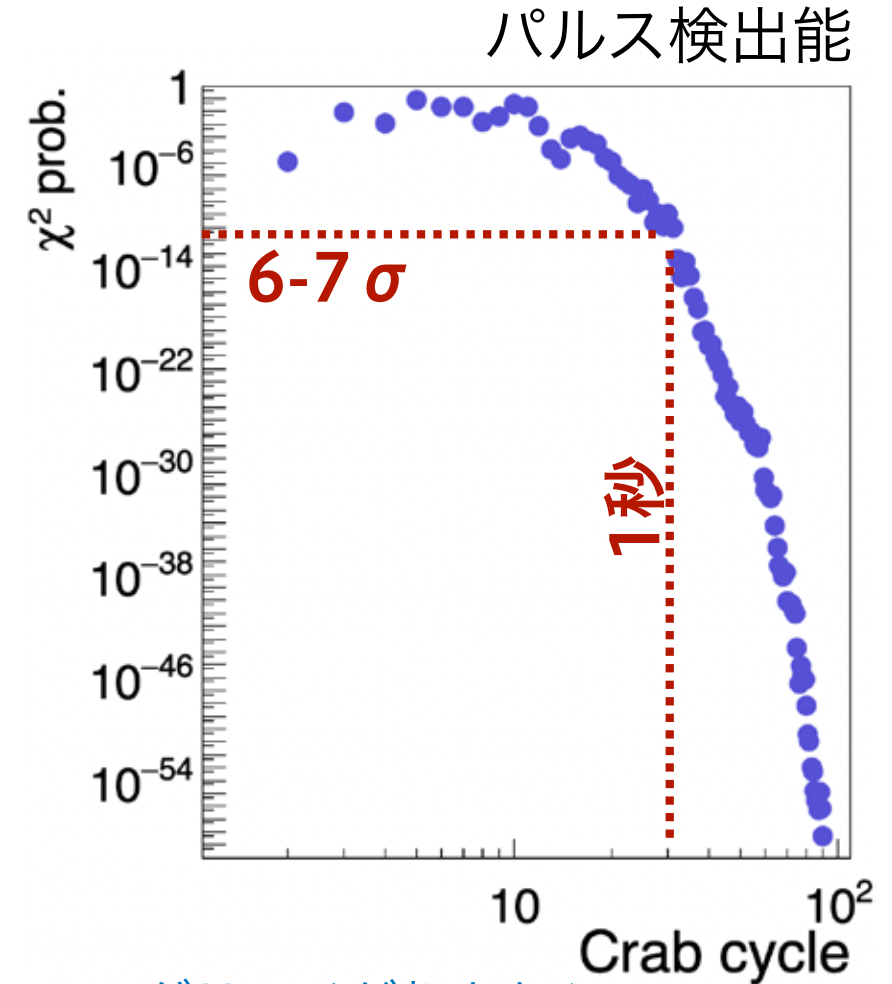
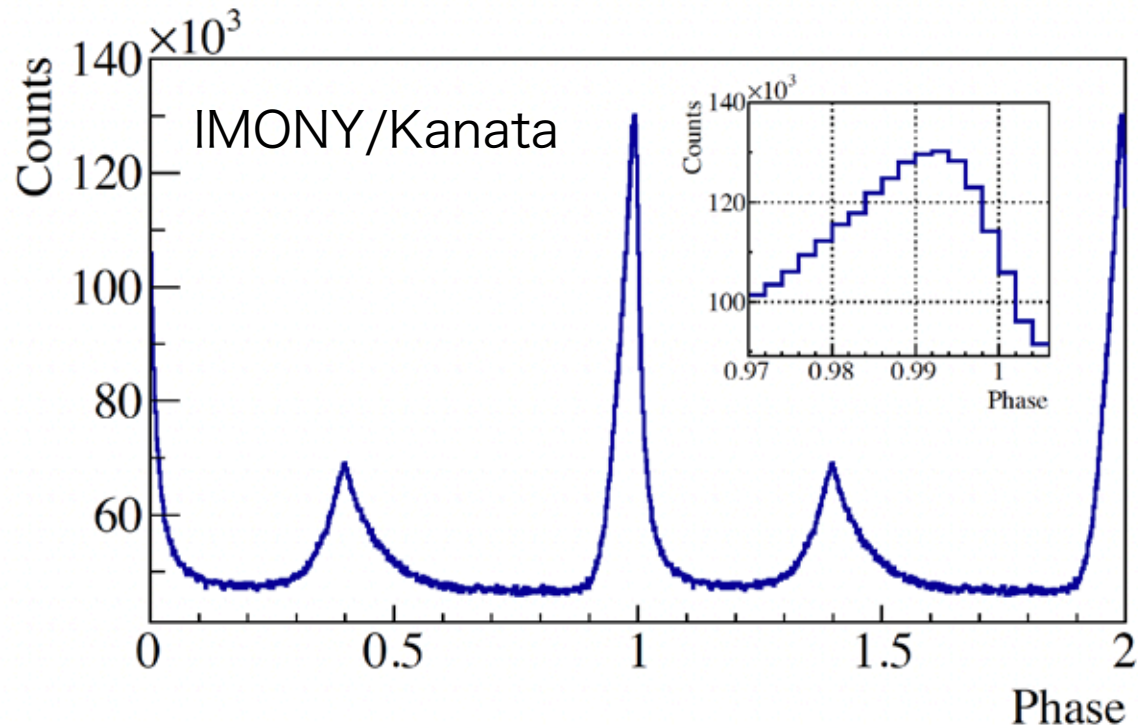
かなた望遠鏡

$D=1.5\text{ m}$



2021年の観測

このときは4x4画素センサ (旧型)



グリッチが起きたら
自力で気付けるはず

恒星撮像とリニアリティ

8x8画素センサにアップグレード後

PSF全体が視野に入るようになった。

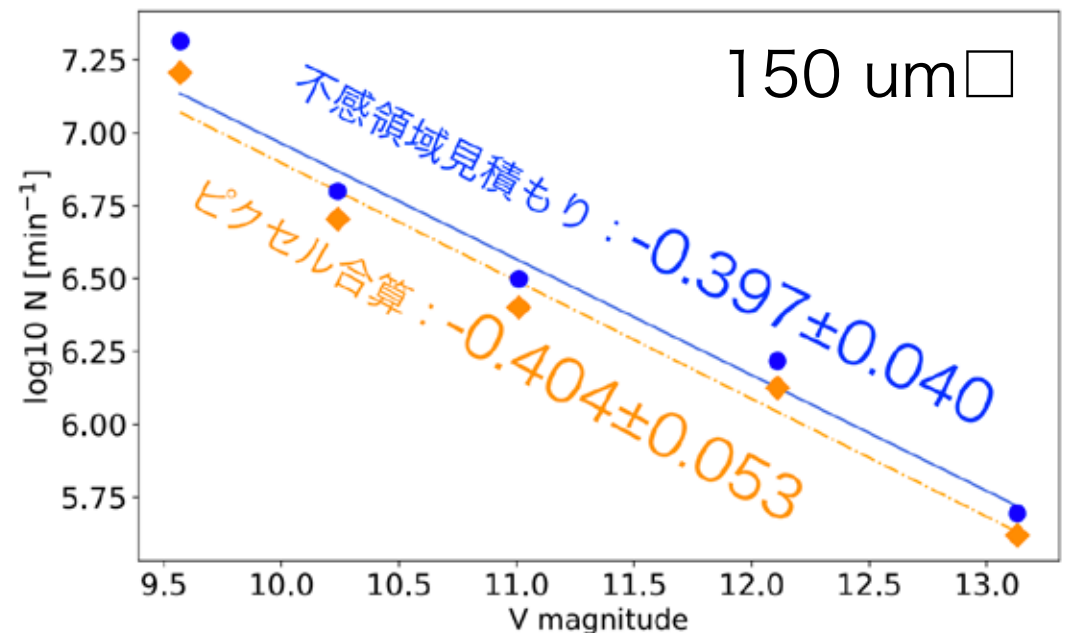
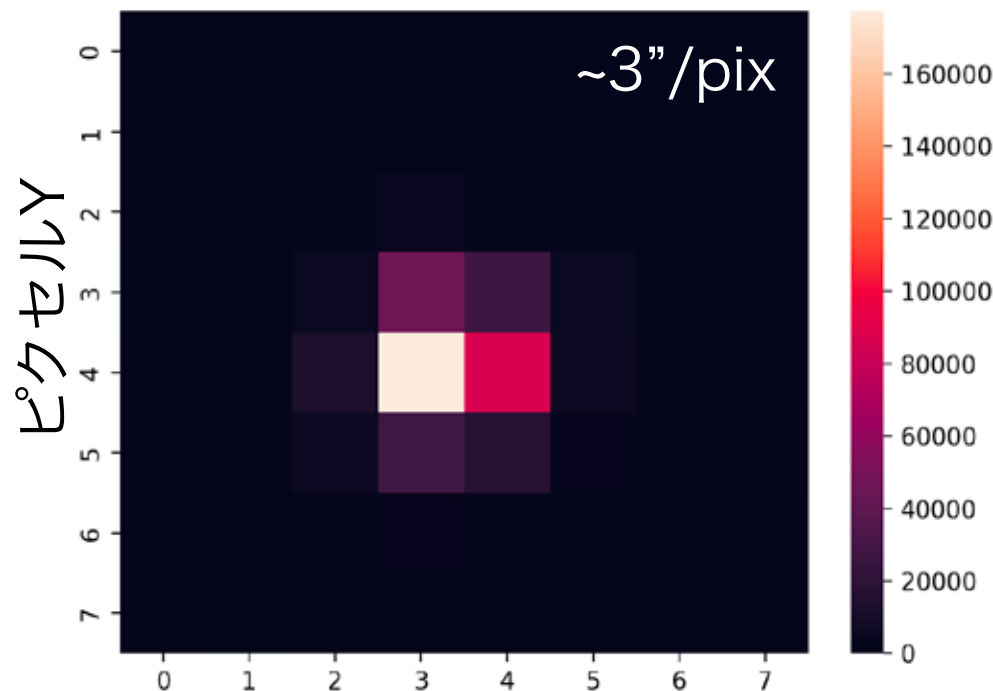
ピクセル合算法、2Dガウスフィットで矛盾しない結果

dark, flat処理

Sky BG subtraction

$\Delta(\log F) = -0.4\Delta M$ とconsistent

恒星のスペクトルは誤差の要因



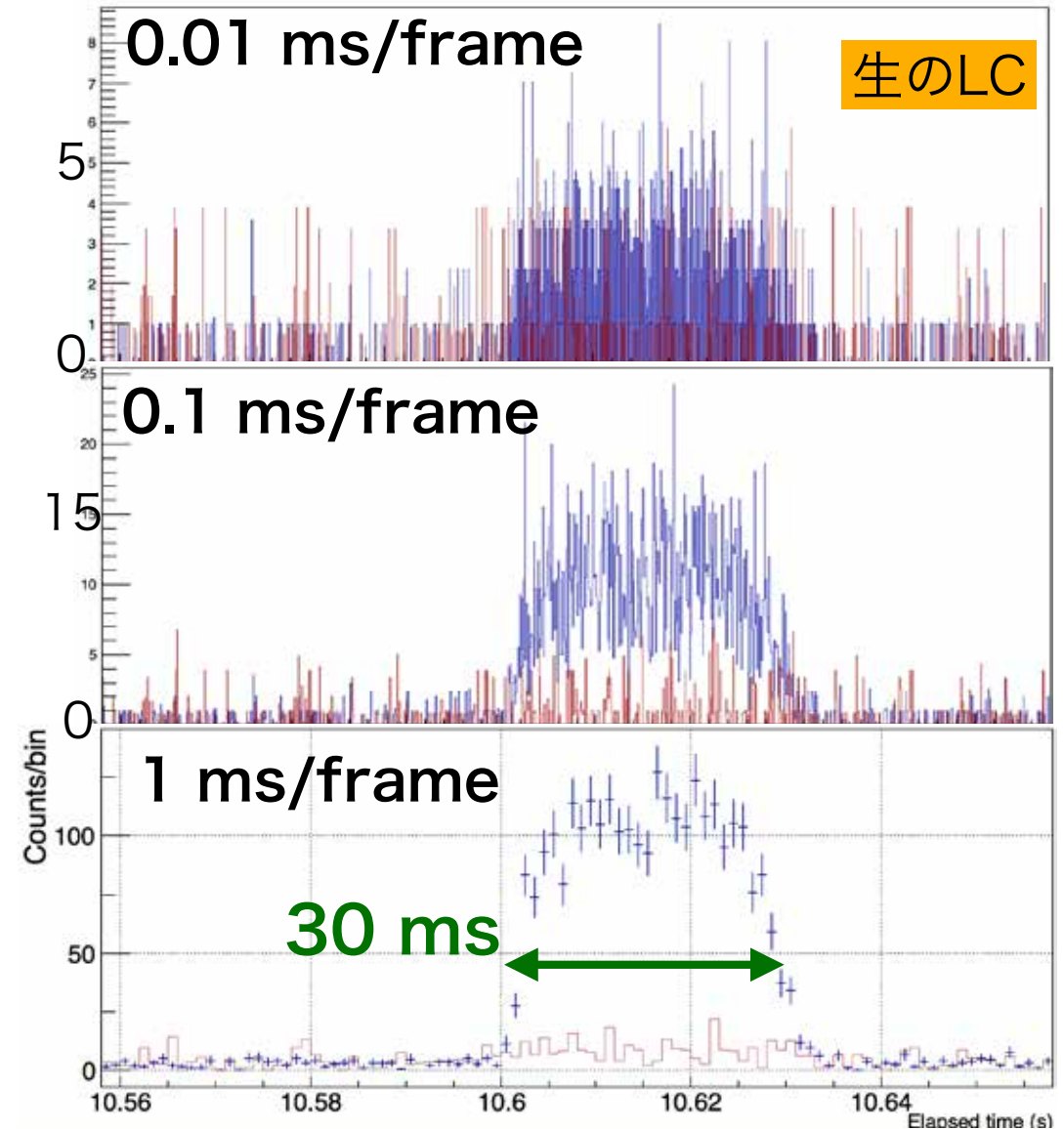
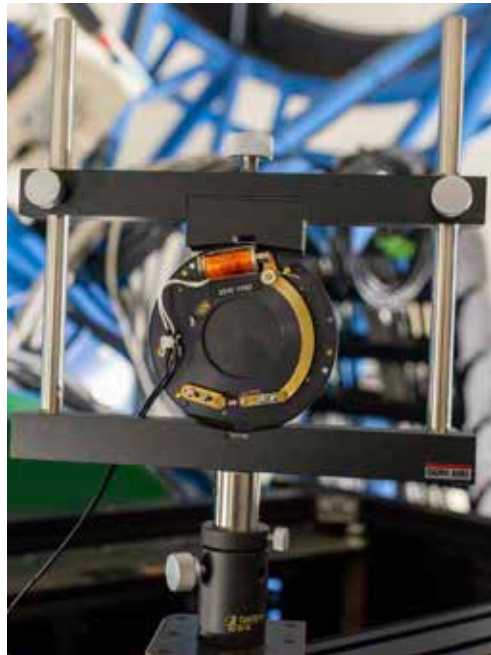
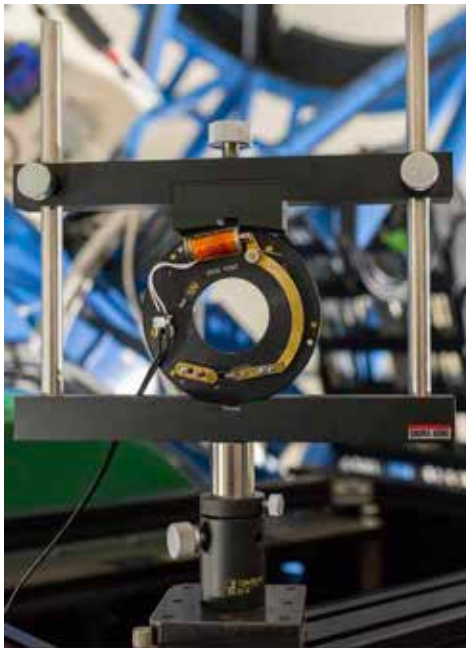
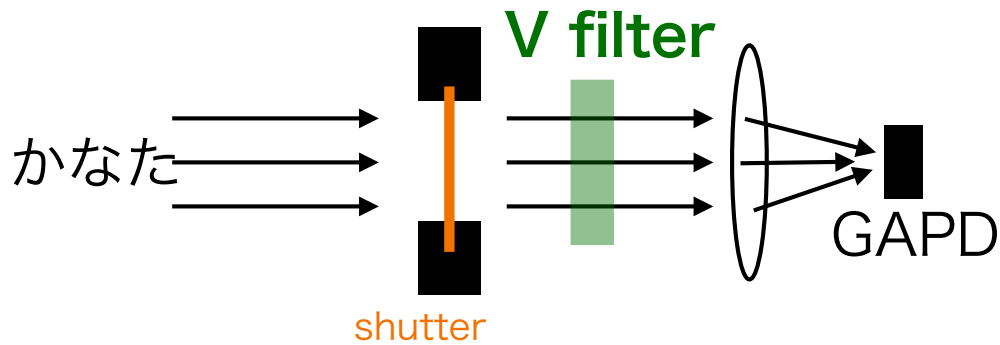
ピクセルX

突発現象の模擬実験

Vmag=10.28

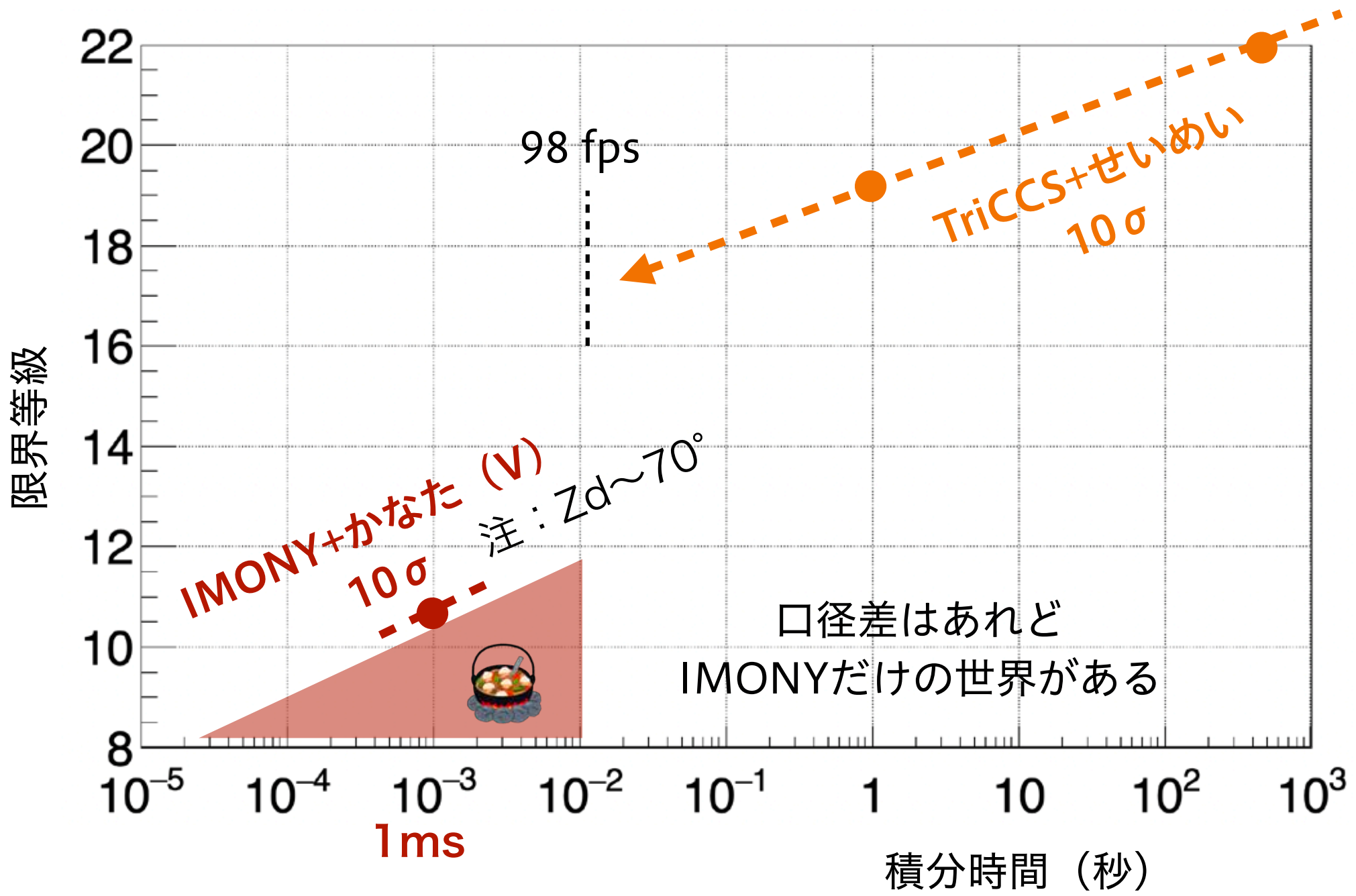
sky bg

Zd~70



Photonがあればサブミリ秒もいける

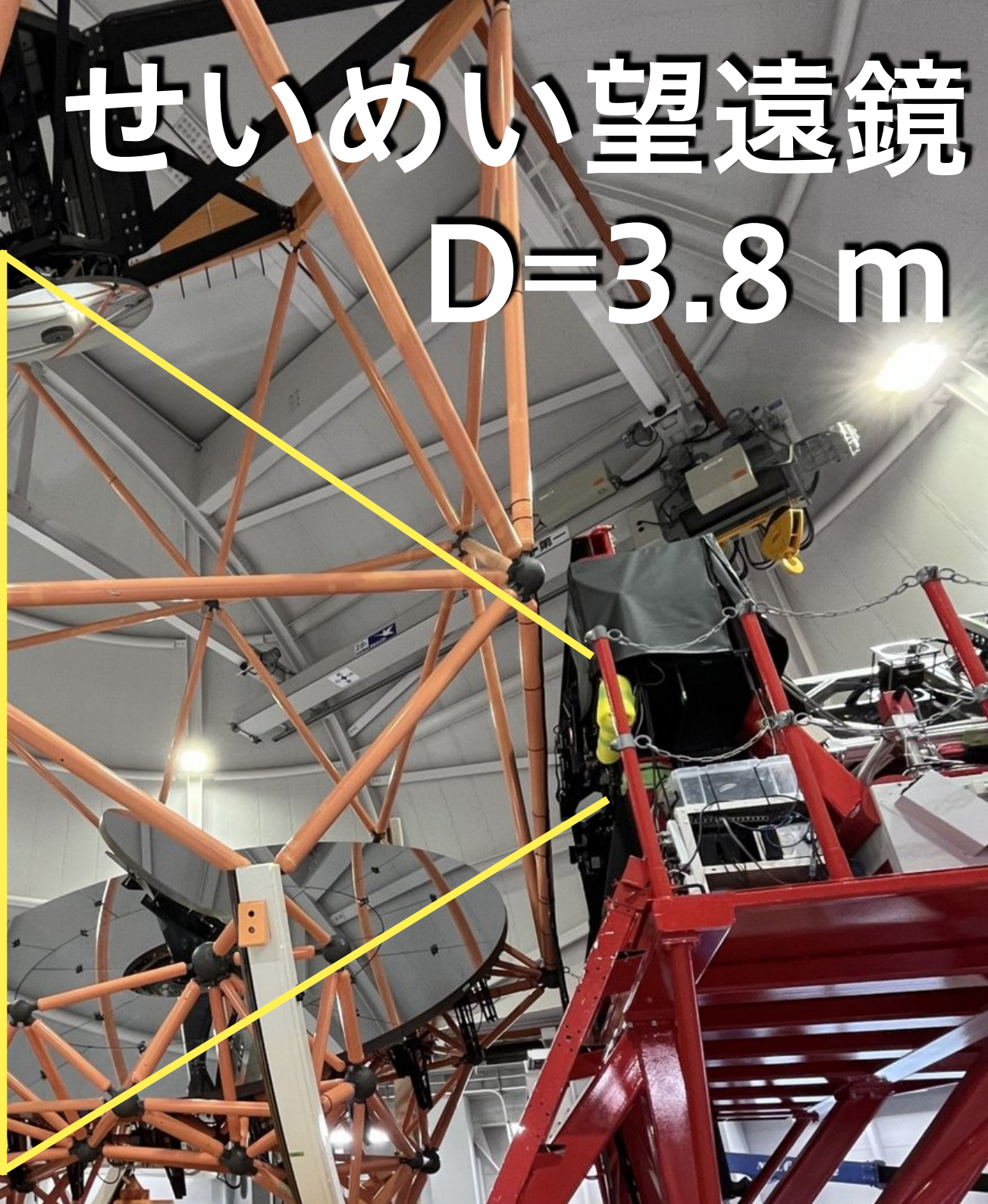
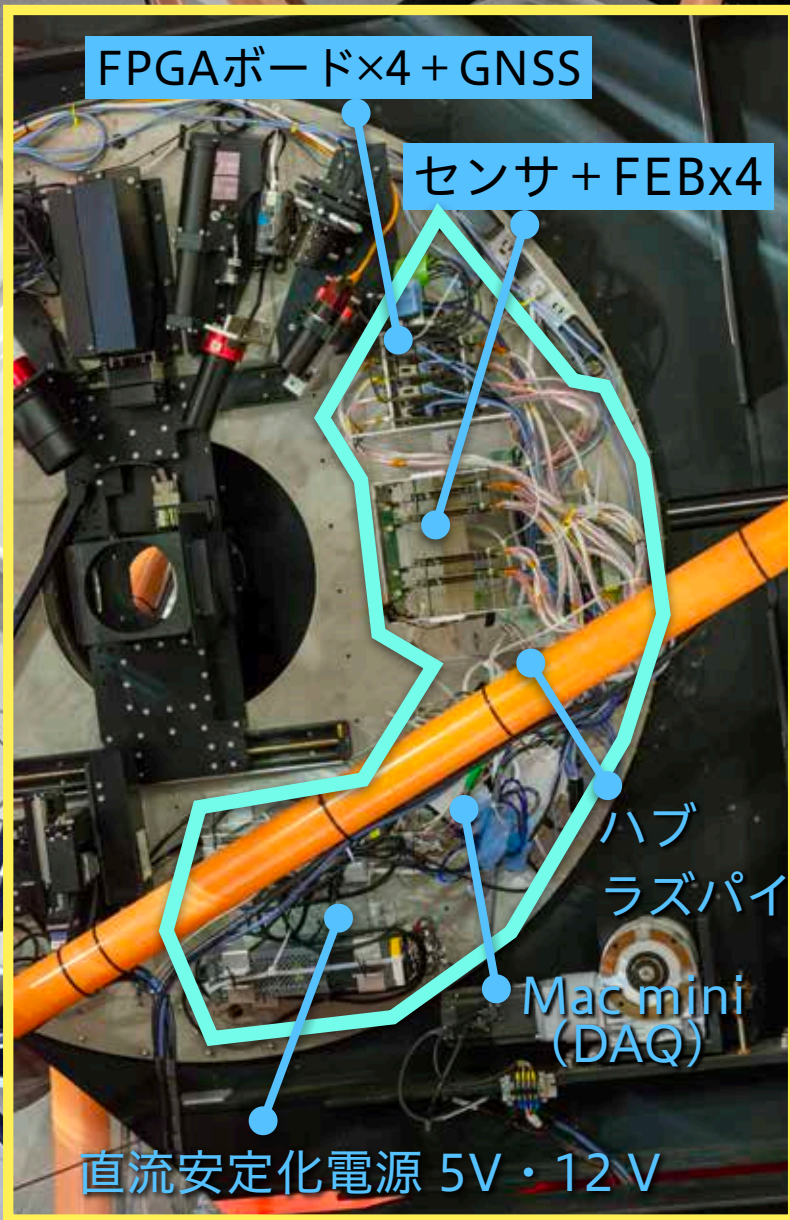
限界等級の見積もり 色フィルタ撮像測光



京都大学

せいめい望遠鏡

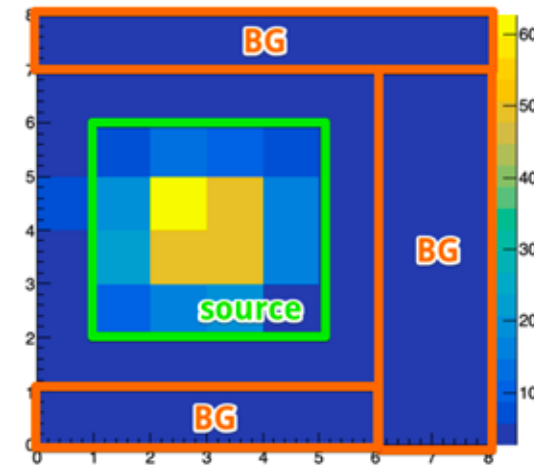
D=3.8 m



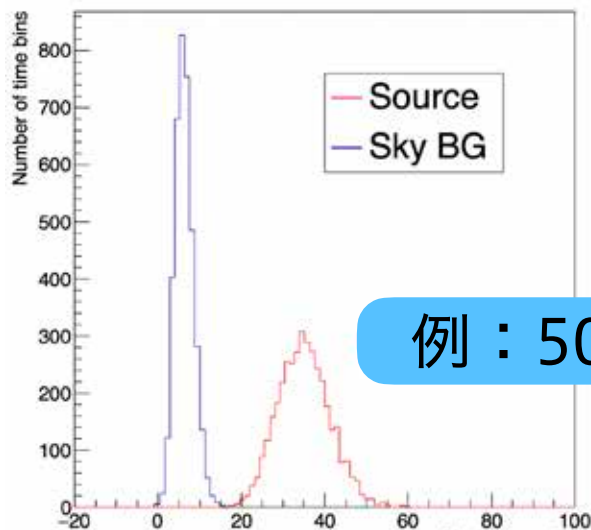
時間分解測光感度@せいめい

1. 恒星観測→連続フレーム画像化
2. 各フレーム画像ごとにソース・スカイ光子数を算出
3. 統計的有意度の計算
4. 多数のフレームから平均値を取得
5. 積分時間を変えて繰り返す

$$s = \frac{N_{\text{on}} - N_{\text{off}}}{\sqrt{N_{\text{on}} + \alpha N_{\text{off}}}}$$

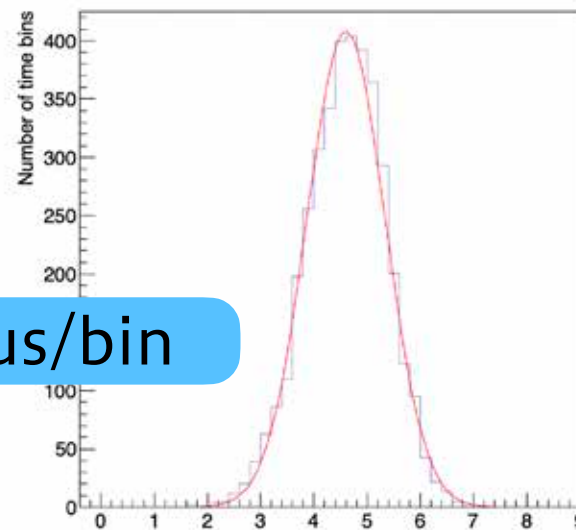


TYC 1309-1523-1
(Vmag=12.69)

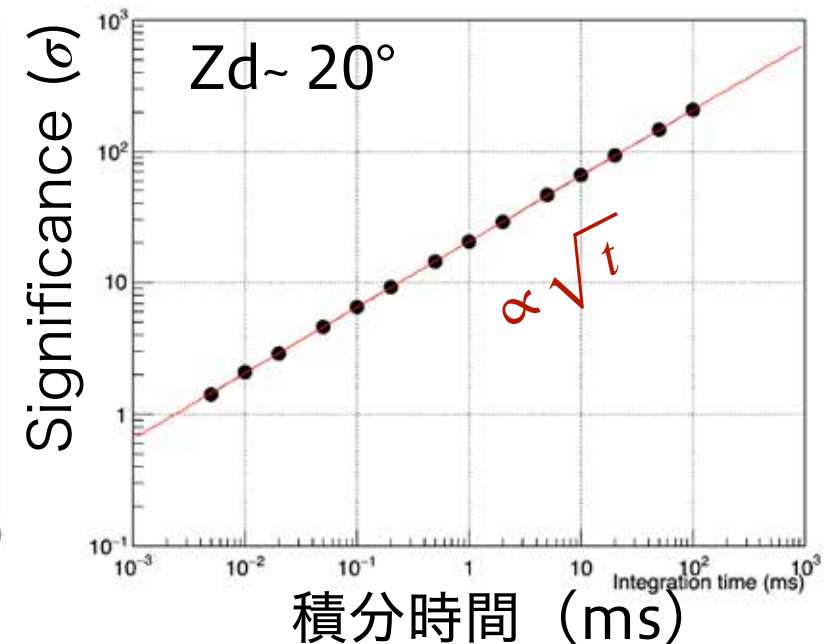


of photons

例：50 us/bin



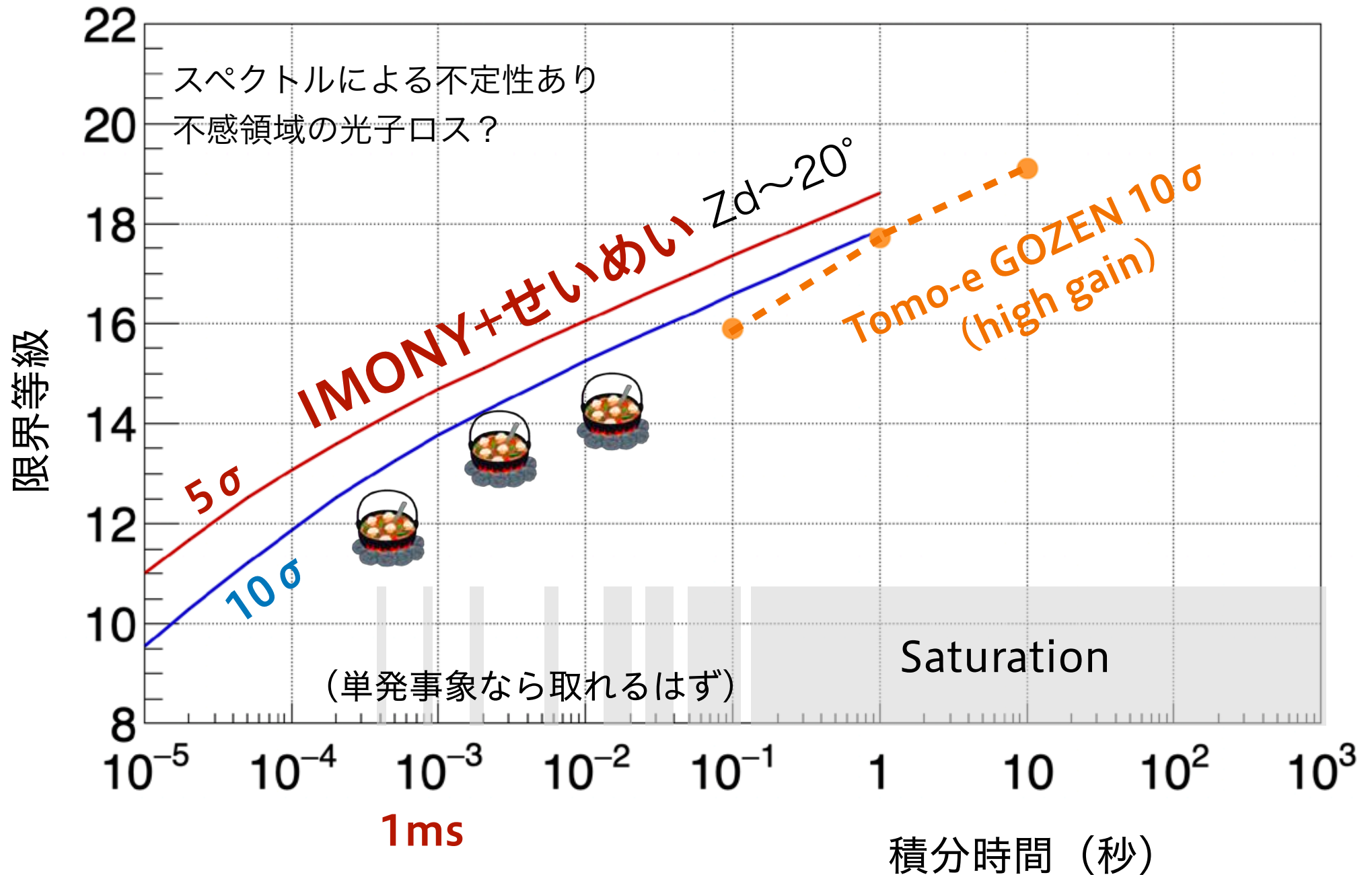
Significance (σ)



積分時間 (ms)

限界等級の見積もり

フィルタなし撮像測光



恒星によるリニアリティ

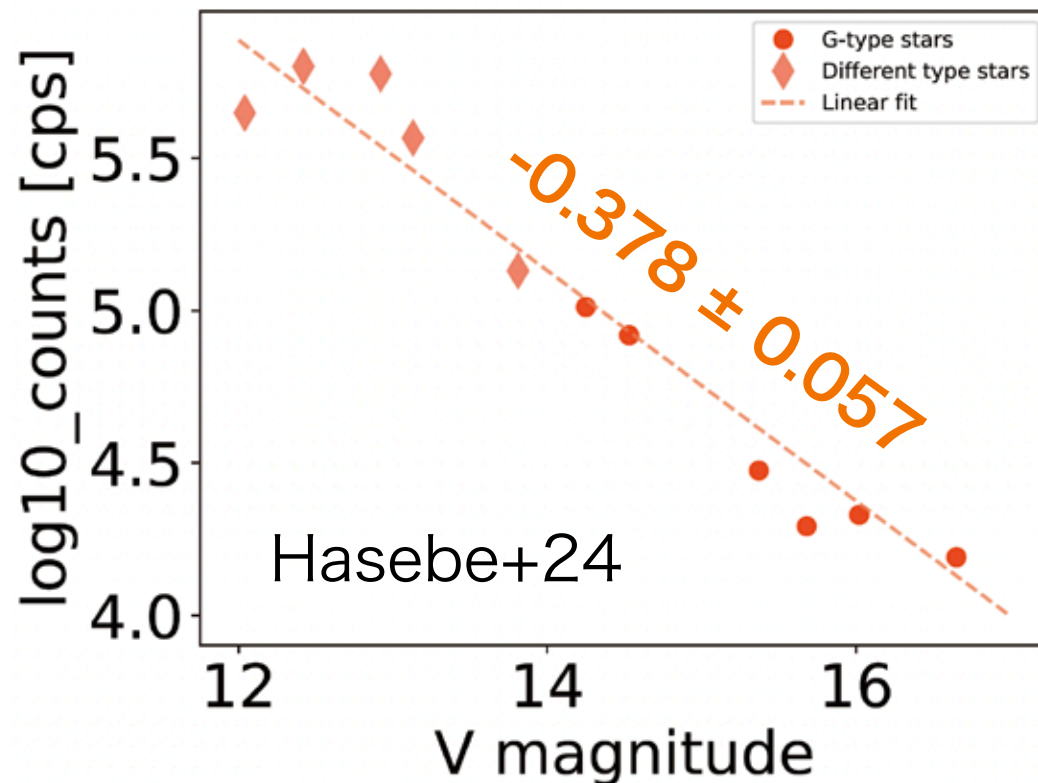
期待したよりばらついている

傾きもずれる兆候。

測光時に補正すれば良いが、原因は追求しておきたい

波形なまり・ヒットパルス幅 ~ 300 ns → 数え落としは効かない

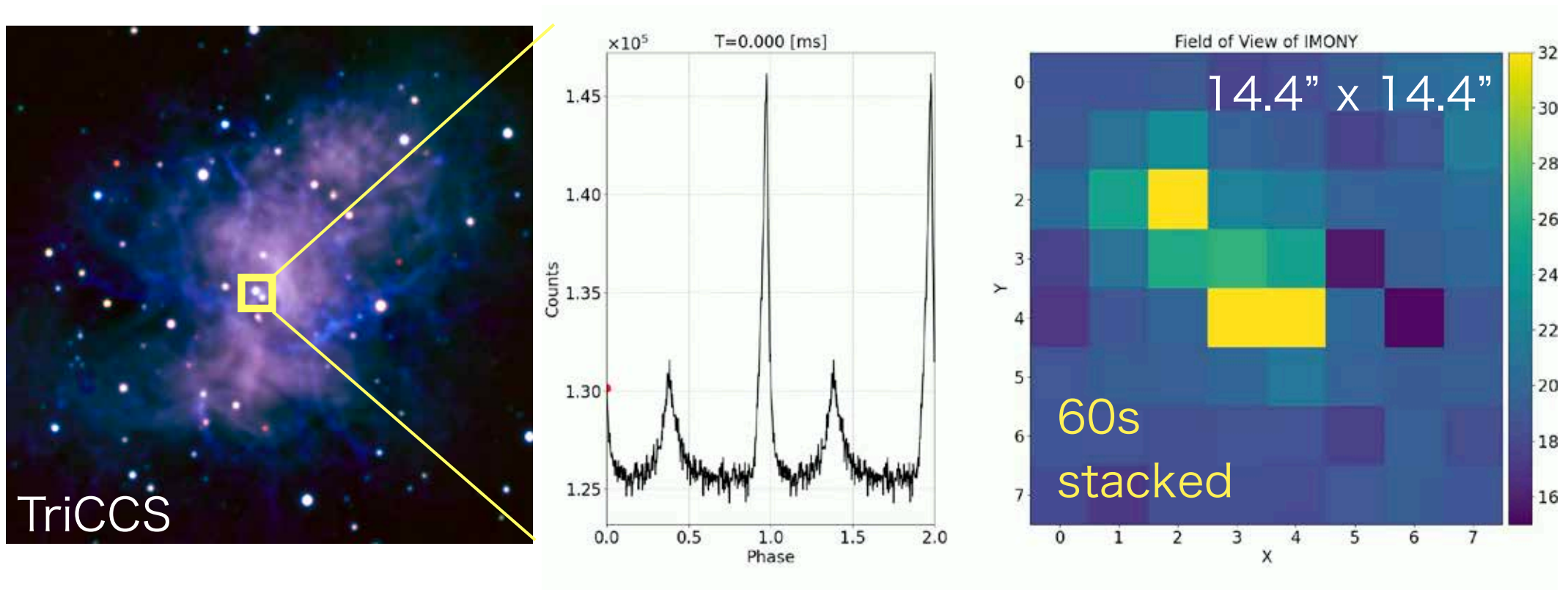
高光量でのバイアス電圧低下の可能性 → そこまでの光量ではない



実験室で検証したい。

校正光源等に詳しい方？

Crab pulsarの検出



- せいめい望遠鏡にIMONYシステムが搭載できた、動いた
- 動画として再構成できた。イメージングセンサとして期待通り
- スポットサイズもSHのシーイングとconsistent
- IMONYのrun前後にTriCCSも撮っている
- (もう一声視野が広いとより安定するかも)

Crabのシングルパルスが見たい

科学目的：Giant radio pulseの前兆の探索

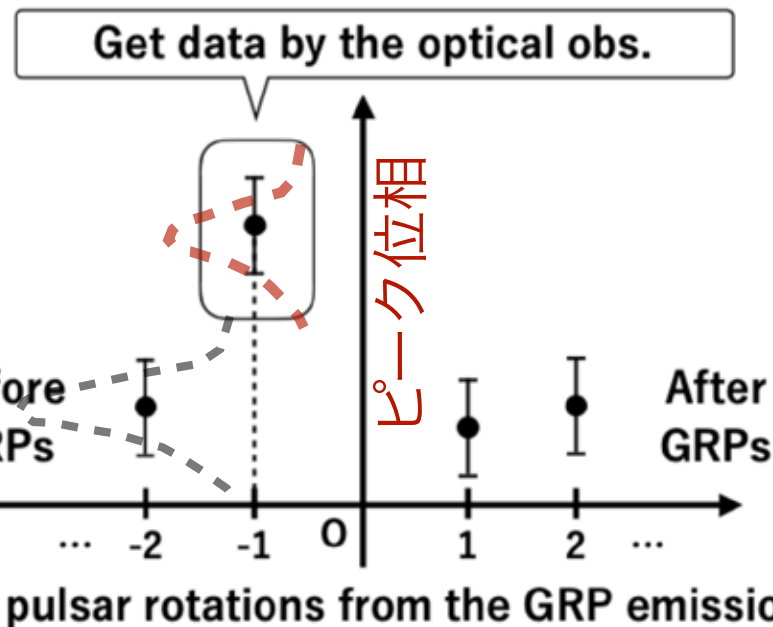
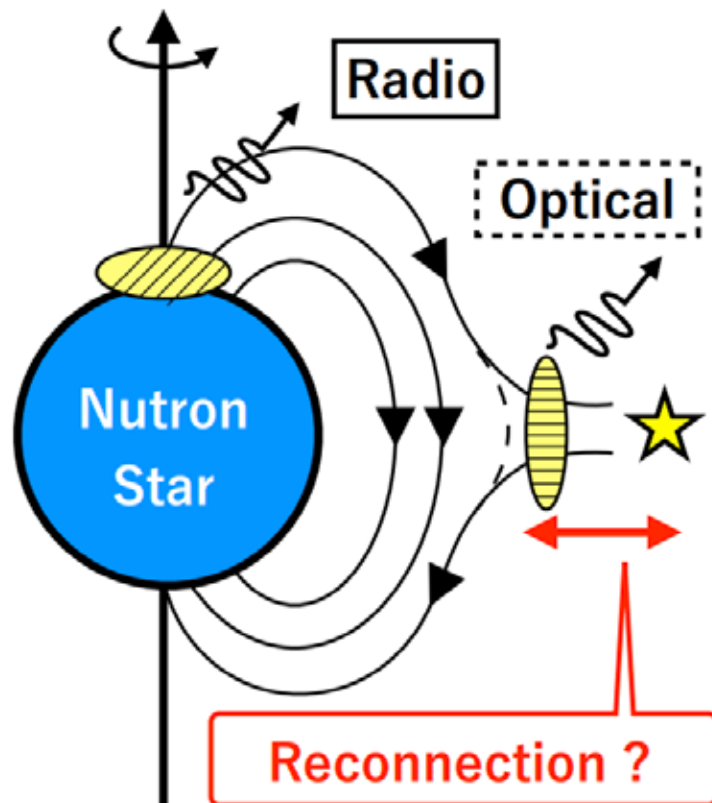
磁気リコネクションはGRP起源か？

GRP直前に位相変調はあるか？(Shibata+)

光子数が必要 = 大口径望遠鏡 + 可視。

電波/X/ γ では無理。

GRPをタグする電波と同時観測が必要



シングルパルスの検出

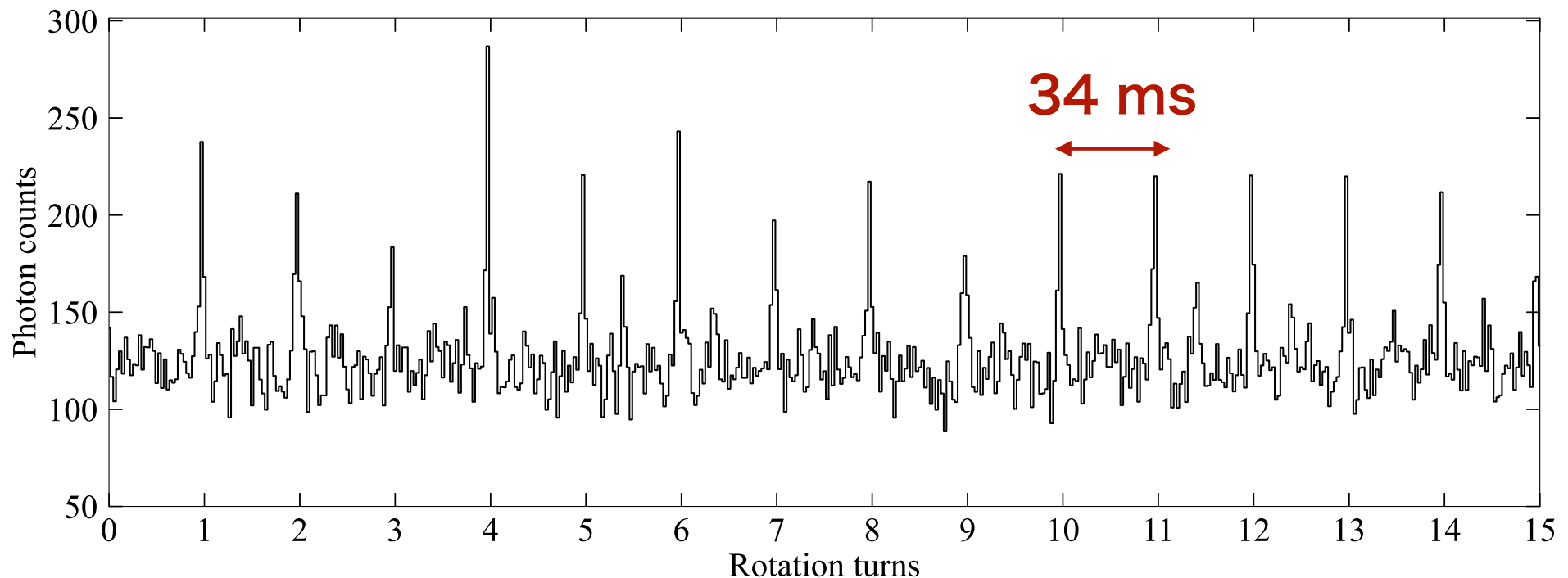
MPを平均 5σ 以上で検出、IPも $>3\sigma$

電波との同時観測が悪天候により20分 → GRPの研究は厳しい

可視だけの時間は1夜以上晴天がある。世界有数の連続観測データ

平均化した波形では見えない情報が見えるか？

→橋山他 天文学会で



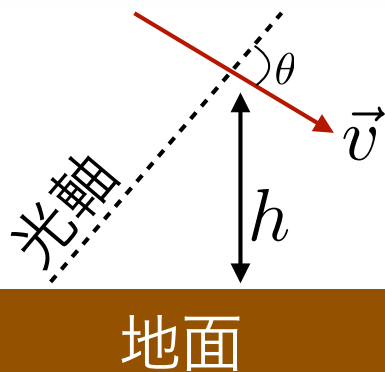
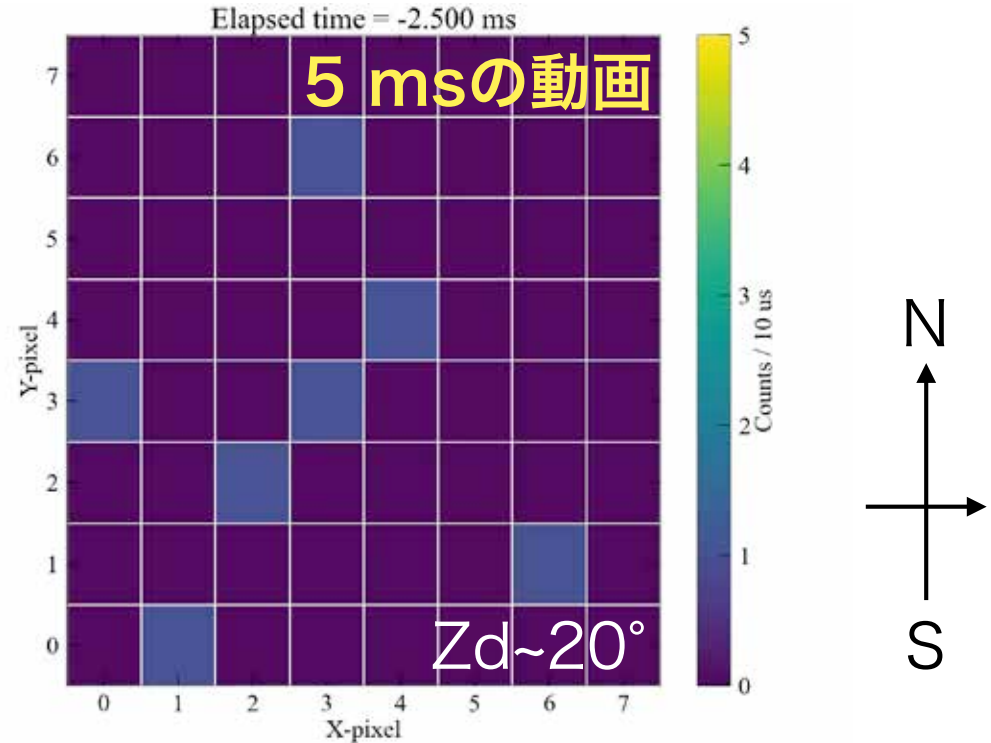
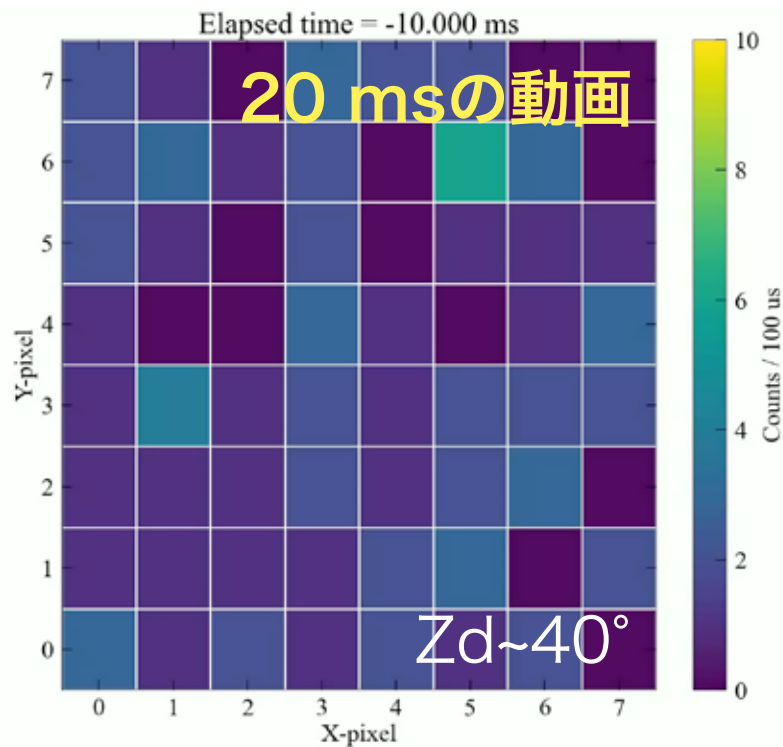
Serendipity !

Micro-meteors ??

視野 : 15" x 15"
6-7hに1回程度

2024Feb06-22:40:53JST

2024Feb09-19:53:40JST



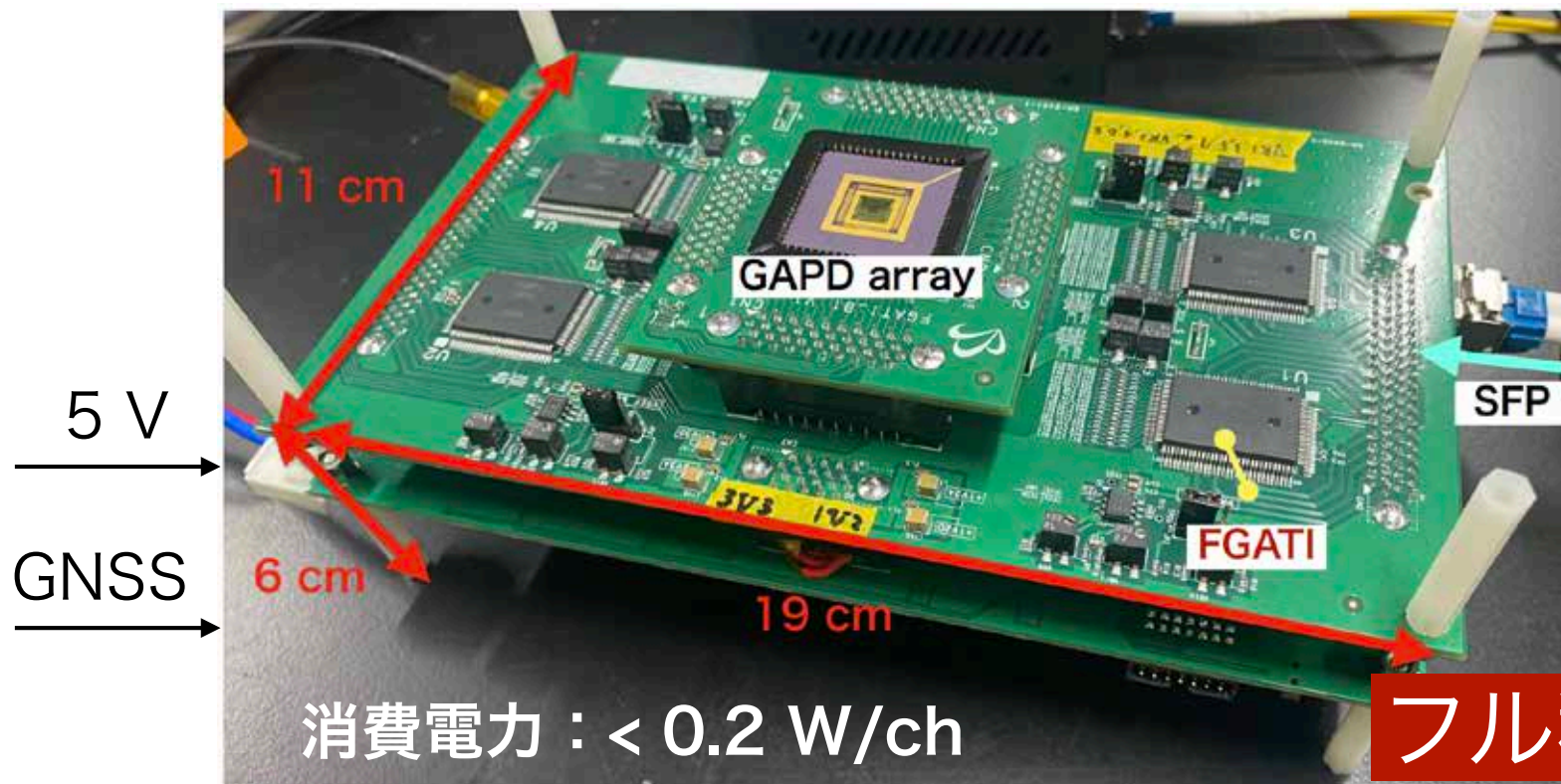
$$v \sim \frac{7 \times 10^3}{\sin \theta} \left(\frac{h}{100 \text{ km}} \right) \text{ m/s}$$

近傍SN (^{60}Fe が示唆) のダストが見えるかも?
みたいな話もある (Siraj+22)

ハードウェアの課題を解消する新基板

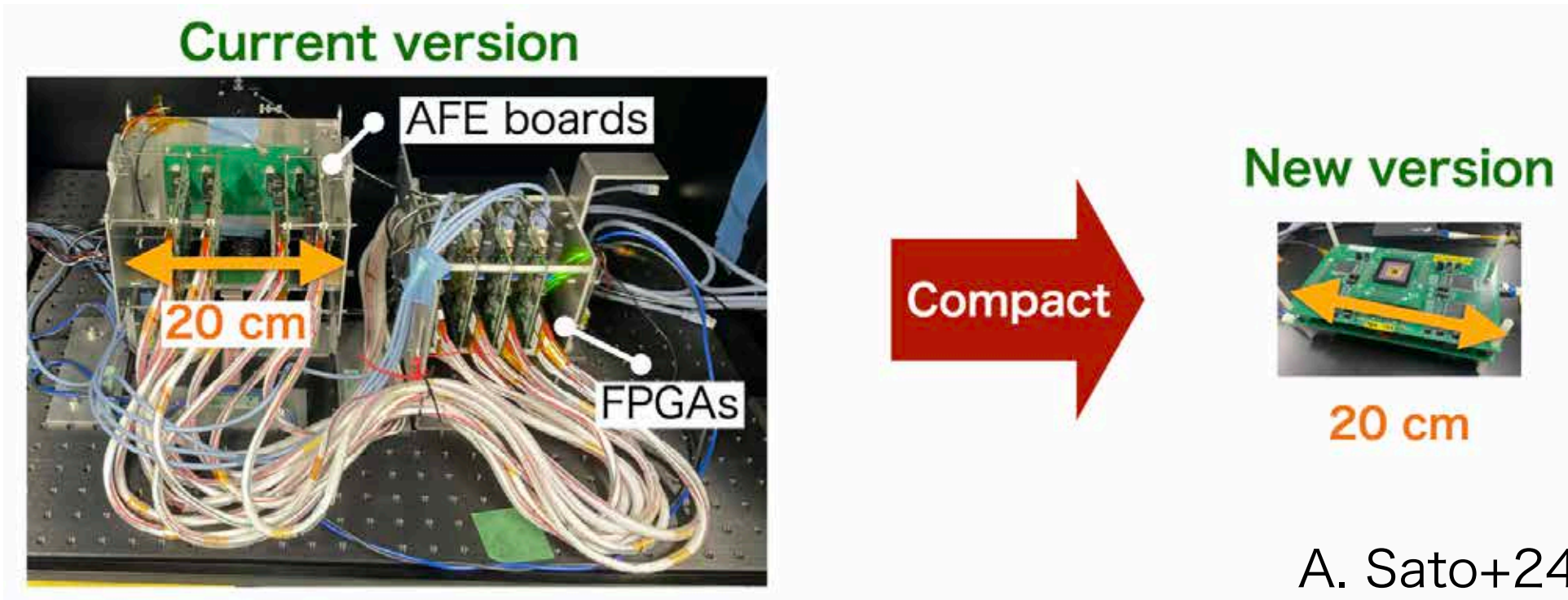
- ・ ケーブルリングが多く手製なのでコンタクト部が弱い、劣化も
- ・ 小型装置フランジの回転に対する安定性に難
- ・ 部品点数が多いのでつけ外しが大変
- ・ コンパレータしきい値が16チャンネル毎に共通
- ・ アナログ信号波形がなまっていた

**ASICの採用で集積化
すべて解消するはず**



A. Sato+24

ちっちゃくなくなった



複数ユニットの併用可能性 → **多色同時撮像カメラ化**

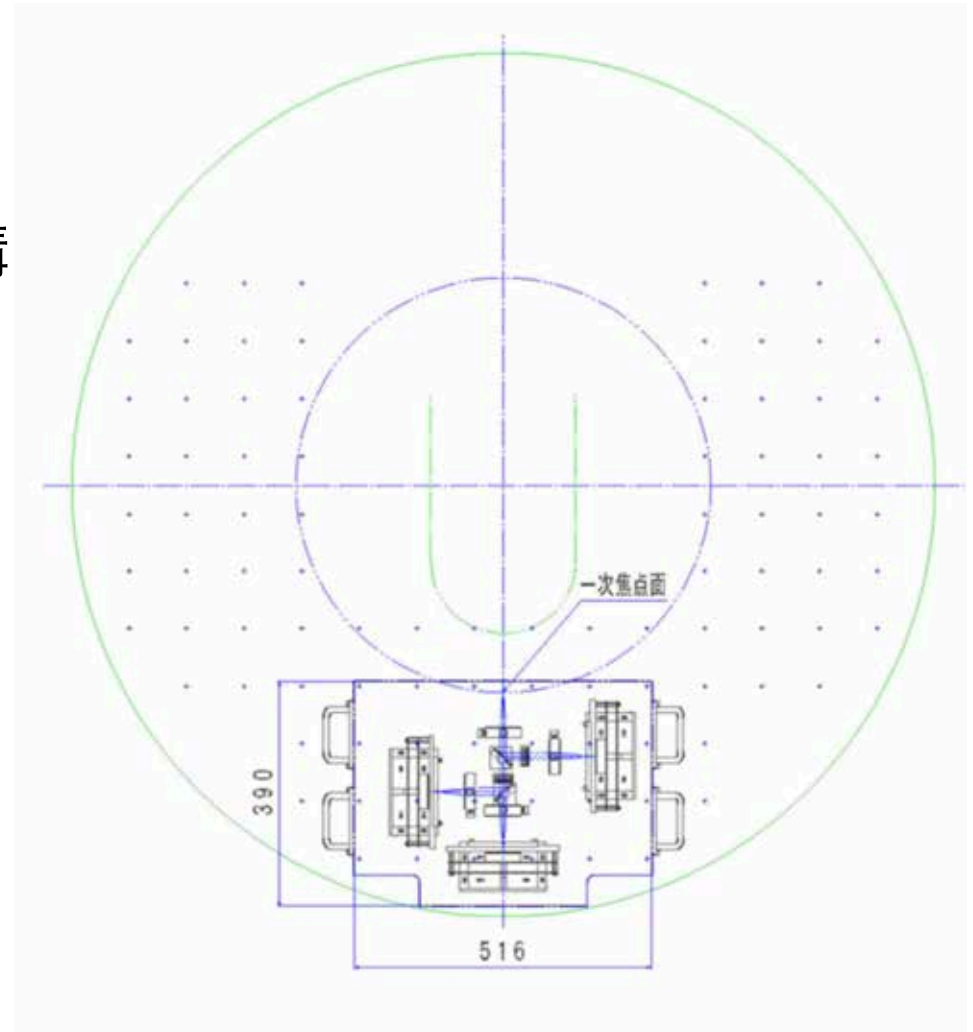
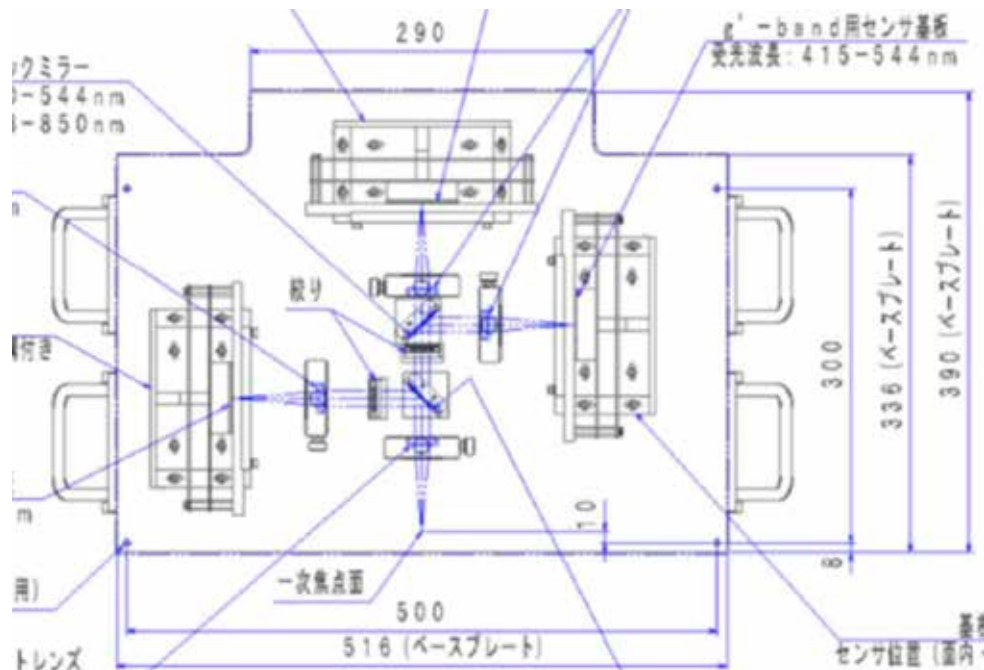
可搬性の飛躍的向上 → 小惑星の**掩蔽観測**へ応用

補償光学の**波面センサ**への応用を検証開始 (NAOJ・大屋さん)

3色カメラ化構想

概念検討中

既製品のダイクロイックミラー
 3系統のIMONY : u, g', r' を想定
 各カメラごとに焦点位置調整機構



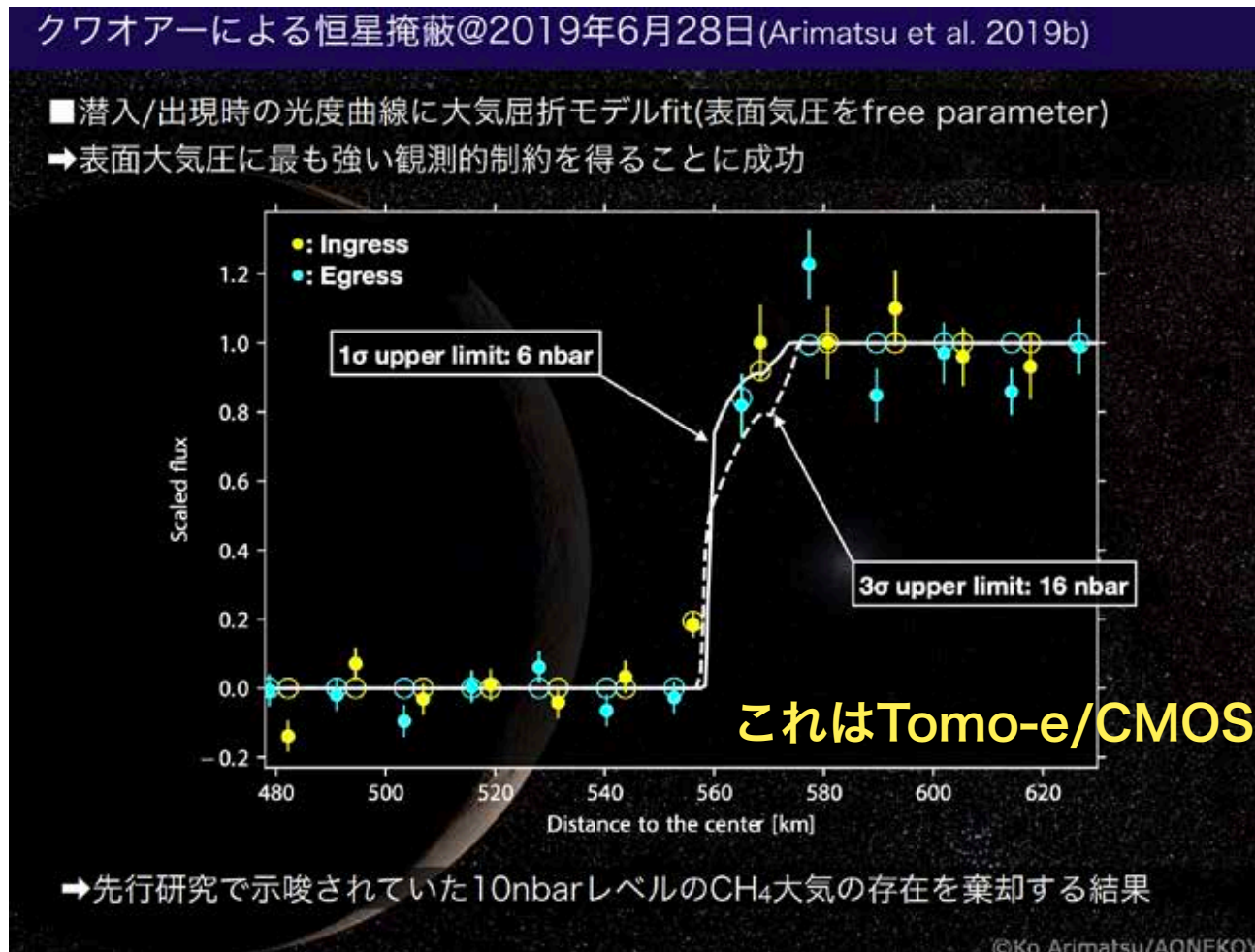
これでも現IMONYより省スペース

既知の太陽系外縁天体の観測

これは狭視野でもすぐできる

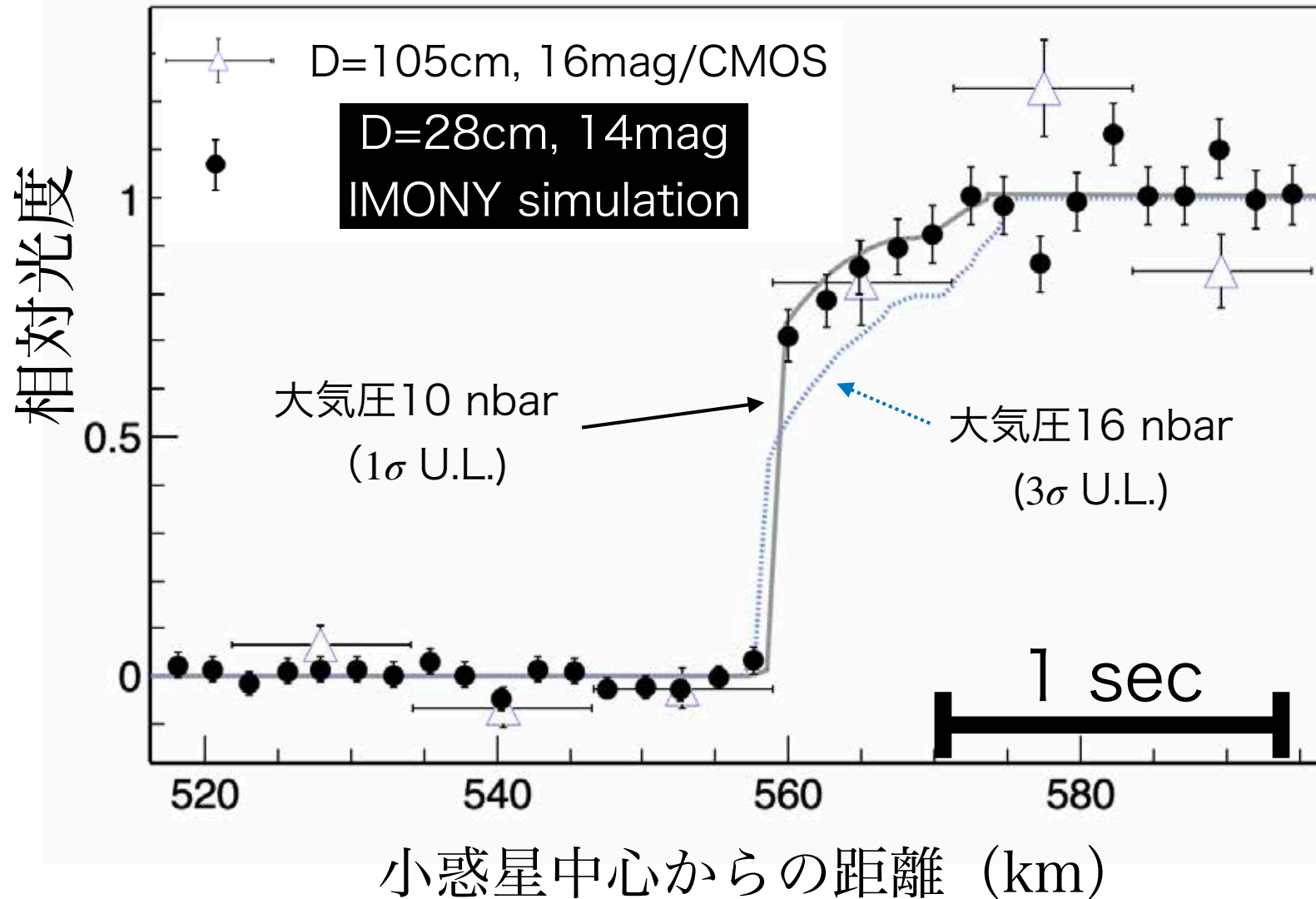
小惑星の大気・輪があれば掩蔽で見える (Braga-Ribas+14他)

エッジから小惑星の大気屈折モデルが推定できる。



これもIMONYなら
制限が強くなるはず

可搬望遠鏡での予想



まとめ

- **光子係数式撮像システムIMONY**を開発中
 - 狭視野だが高速動画が再構成できる。タイムスタンプは100 ns
 - イベントデータ生成によるデータ量削減
- **かなた、せいめい**で観測実績を積んでいる。
 - コンパクト天体の高速測光研究を進めている
 - Crabパルサー、ミリ秒パルサー、repeating FRB
- 新基板が立ち上がりつつある。
 - 多色カメラ、波面センサへの応用を目指す
 - 小惑星の掩蔽観測にも挑戦したい

大学望遠鏡のオープンな環境が続きますように
アイデア・共同研究募集中