



超低雑音イメージセンサーによる高速観測

東京大学 倉島啓斗 (M1)

酒向 重行, 瀧田 怜, 紅山 仁, 津々木 里咲, 和田 空大 (東京大学)

2023/5/30 木曾シュミットシンポジウム2023

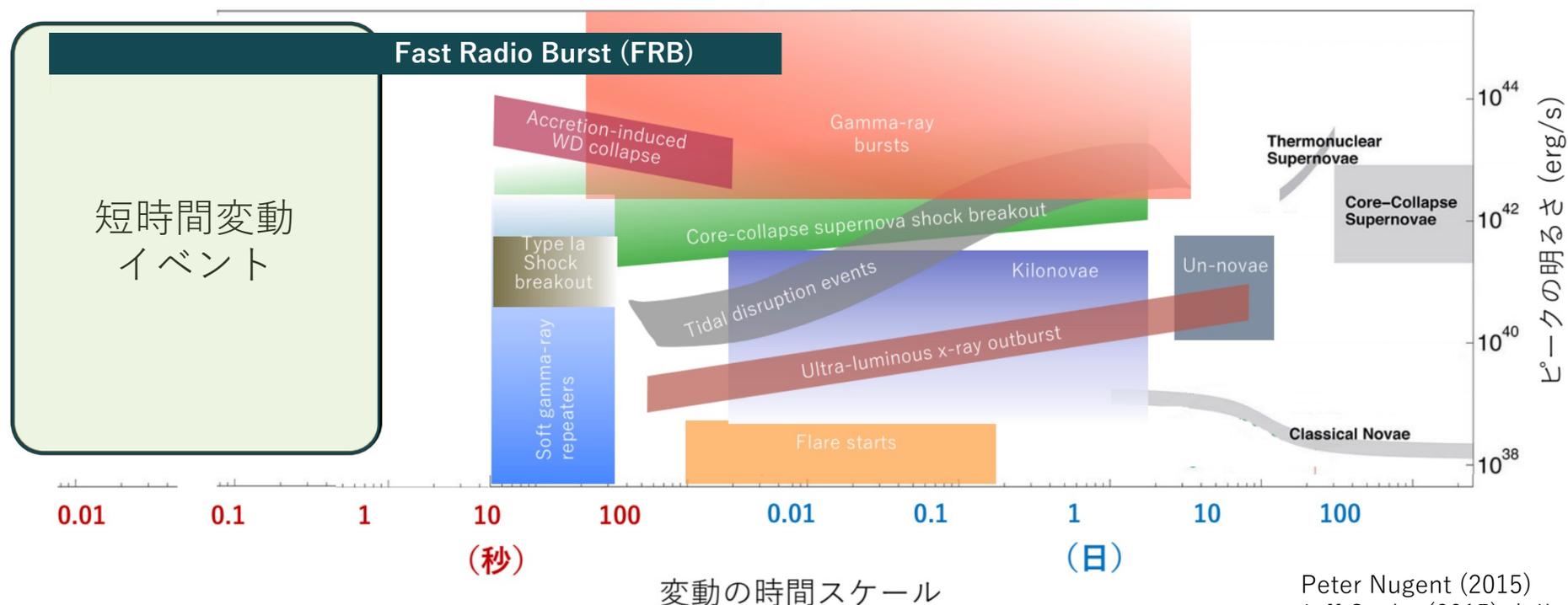


1. イントロダクション

1. イントロダクション
2. SPADイメージセンサー
3. SPADセンサーの感度計算
4. 撮像データのシミュレーション

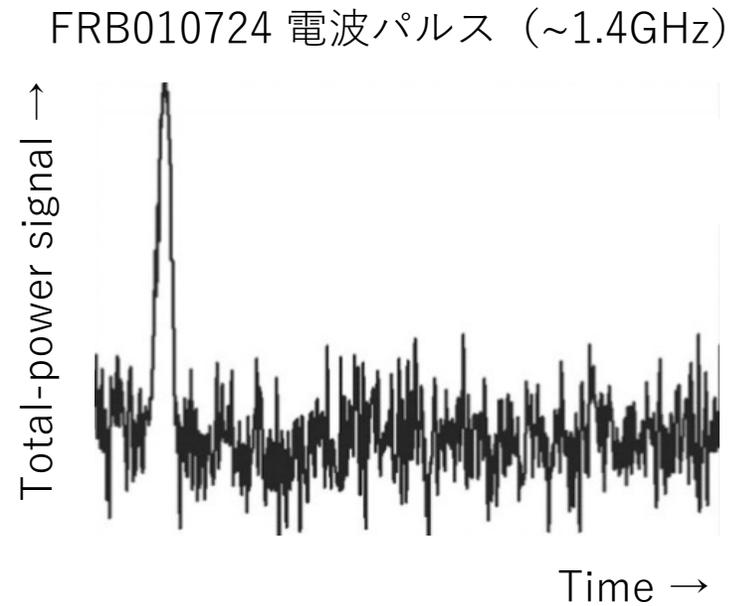
短時間変動スケールの未開拓領域

- 予言されている短時間変動イベント



高速電波バースト (FRB) とは

- **数ミリ秒 (1-10 msec) の短い時間スケールで電波**で輝く
- マグネターやGRBと同様の起源をもつ可能性が議論されているが、確かな証拠は観測されていない
- FRBの可視光カウンターパートは検出されていない
 - 電波と同時に**高速観測**することで、**FRBの可視光カウンターパートの検出を目指す**
 - 木曾Tomo-e Gozenと京大せいめいTriCCSを用いて探査を実施中 (新納ら)
- さらに可視領域で分光, 偏光観測を行い、FRBの解明を目指す
 - マグネターやGRBは強く偏光する



Lorimer et al. 2007 抜粋

高速観測における課題

- 高速観測を行うとき、露光時間が短くなりSignal自体が弱い
- S/Nをかせぐために、**検出器のNoiseの大きさが重要**
 - 短時間露光においては**Readout noiseが支配的**になる
 - Background noise, Dark current noiseは露光時間に比例するため、短時間露光では大きな影響にならない

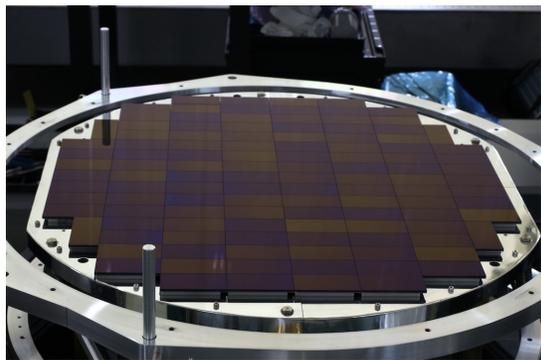
2. SPADイメージセンサー

1. イントロダクション
2. SPADイメージセンサー
3. SPADセンサーの感度計算
4. 撮像データのシミュレーション

可視光イメージセンサー

CCDセンサー

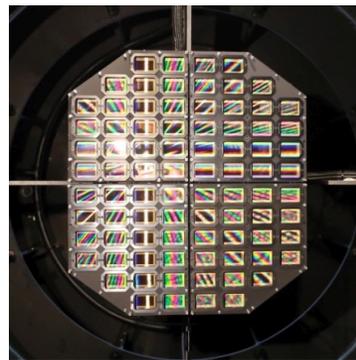
- 一般の撮像
- 読み出しノイズ ~ 10 [e-]



すばるHyper Suprime-Cam (国立天文台)

CMOSセンサー

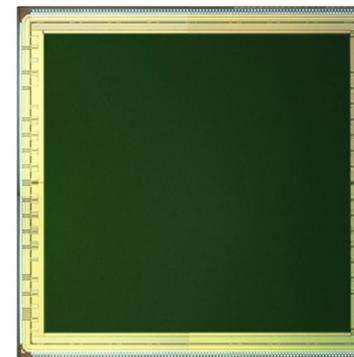
- 高速撮像
- 読み出しノイズ ~ 2 [e-]



木曾Tomo-e Gozen (東京大学)

SPADイメージセンサー

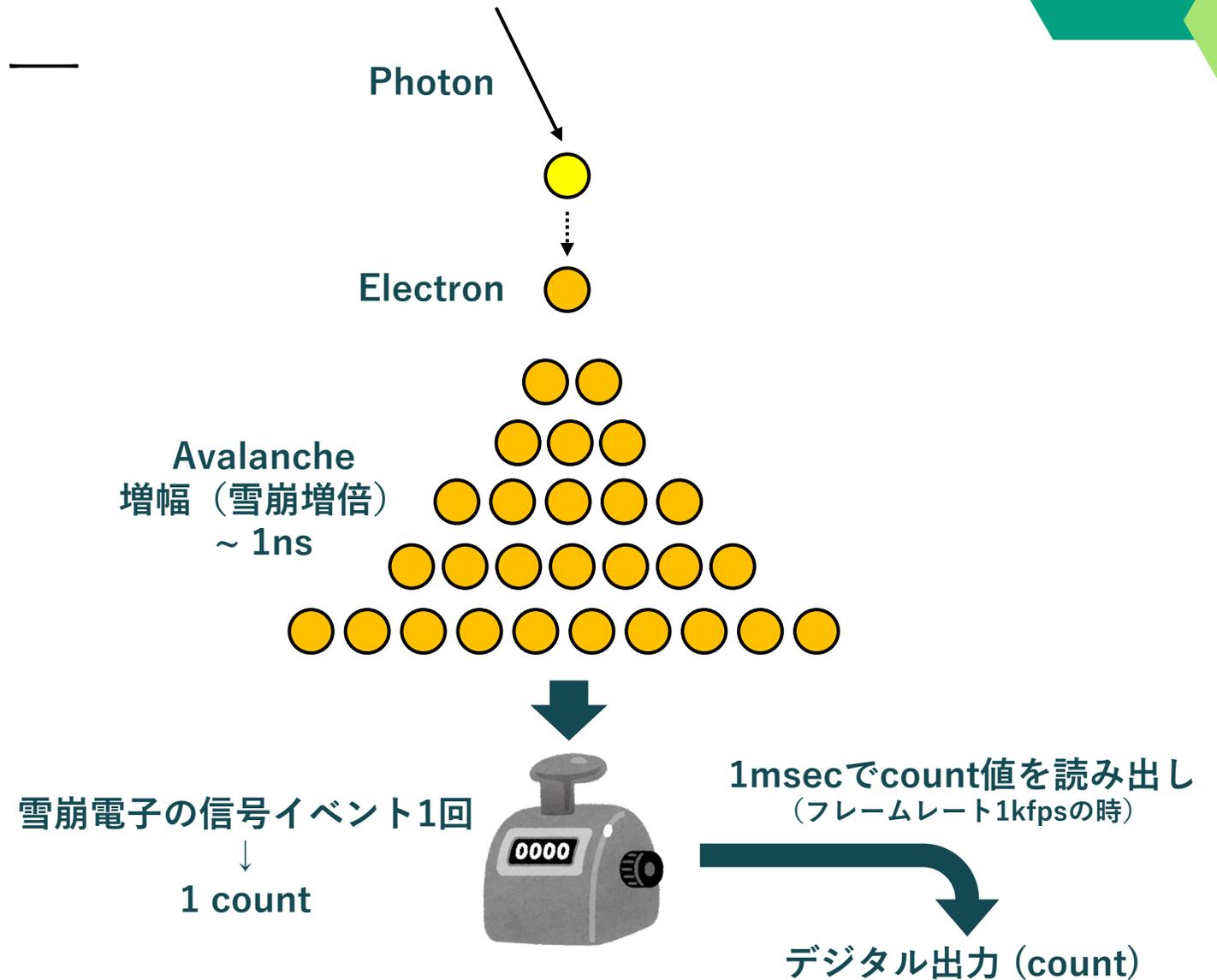
- 高速撮像
- 読み出しノイズ ~ 0 [e-]



<https://global.canon/ja/news/2020/20200624.html>

SPADイメージセンサー

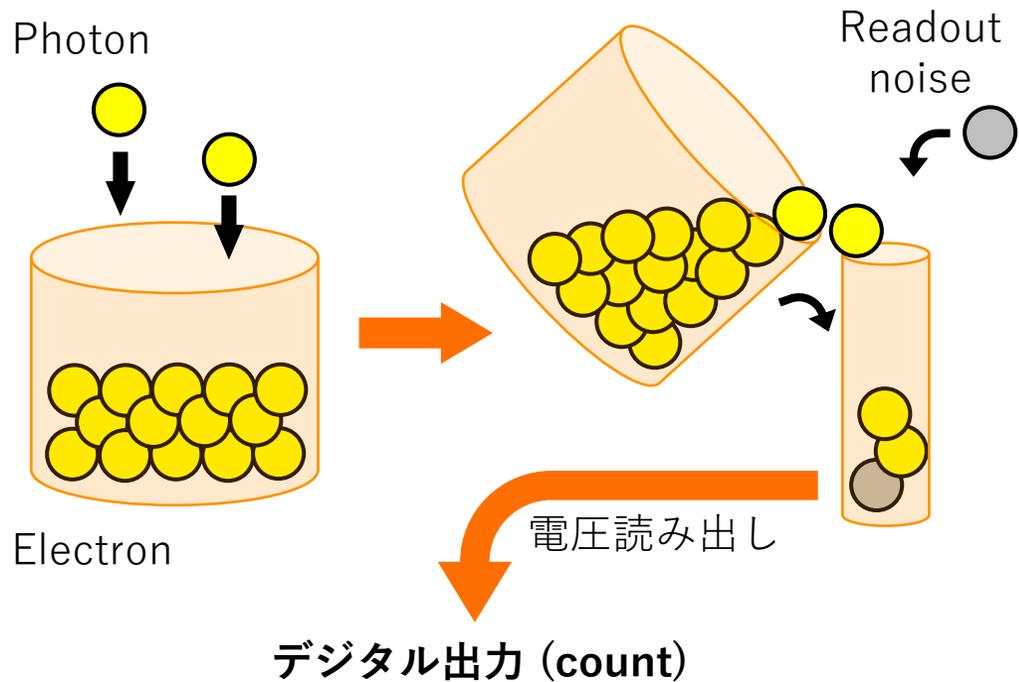
- 検出器に入ってきたphotonは電荷に変換され、electronが雪崩 (avalanche) のように増幅し、大きな信号イベントとなる
- 1 photonに対する光電子を起点として発生する**雪崩電子の信号イベントを検出**することで photonひとつひとつを数えるセンサー (photon counter)
- SPADイメージセンサーはこの素子をアレイ状に並べたもの



SPADイメージセンサー

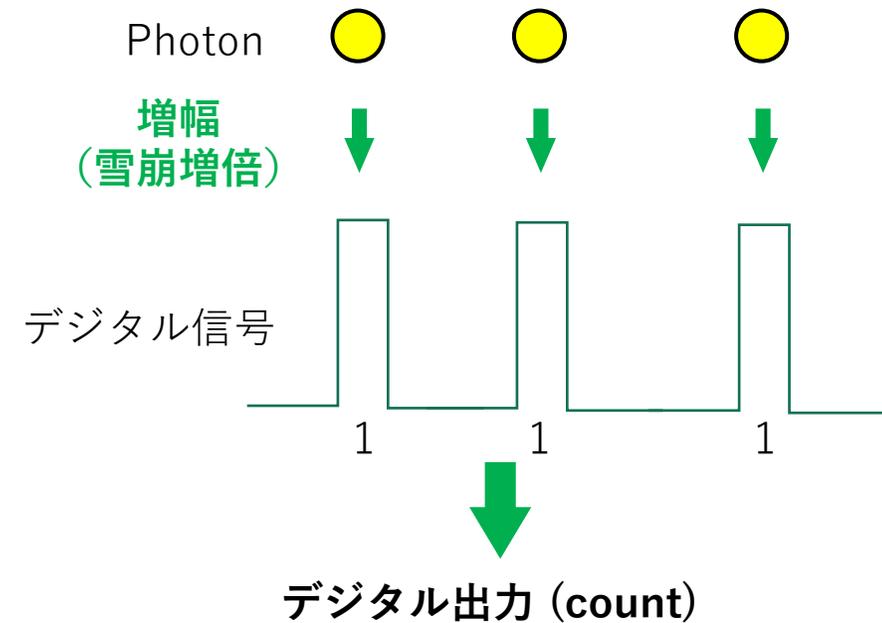
CMOSセンサー

光の量を測定（電荷蓄積） → 高ノイズ



SPAD イメージセンサー

光の数を数える（photon counting）
→ 低ノイズ



3. SPADセンサーの感度計算

1. イントロダクション
2. SPADイメージセンサー
3. SPADセンサーの感度計算
4. 撮像データのシミュレーション

感度計算の目的

木曾シュミット望遠鏡

- 広視野
- Tomo-e Gozen

東京大学アタカマ天文台(TAO)6.5m望遠鏡

- チリ アタカマ高地に建設中
- 標高 5,640m



検出器として
CCD, CMOS, SPADを
用いた場合の感度を
計算し比較する



東京大学 木曾観測所



東京大学

	木曾シュミット	TAO6.5m
Diameter	1.05m	6.5m
Background	21mag/arcsec ²	22mag/arcsec ²
Seeing	3 arcsec	0.5 arcsec
Platescale	6.32×10^{-2} arcsec/ μ m	1.59×10^{-2} arcsec/ μ m

感度計算 パラメータ

- 木曾シュミット望遠鏡とTAO6.5m望遠鏡それぞれにCCD、CMOS、SPADを組み合わせる
- 広帯域撮像観測における点源の観測感度を考える
 - $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, $\Delta \lambda = 0.2 \mu\text{m}$ 短形フィルターを仮定
- S/N=5での可視光カウンターパート検出の限界等級を計算する

$$SN = \frac{S_{\text{star}}}{\sqrt{R_{\text{sky}}^2 + R_{\text{dark}}^2 + R_{\text{readout}}^2}}$$

$$S_{\text{star}} = \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} R_{\text{sys}} \frac{\lambda F_{\lambda}}{hc} A t d\lambda$$

$$\sim R_{\text{sys}} \frac{\lambda F_{\lambda}}{hc} A t \Delta \lambda$$

$$R_{\text{sky}} = \sqrt{n S_{\text{sky}}}$$

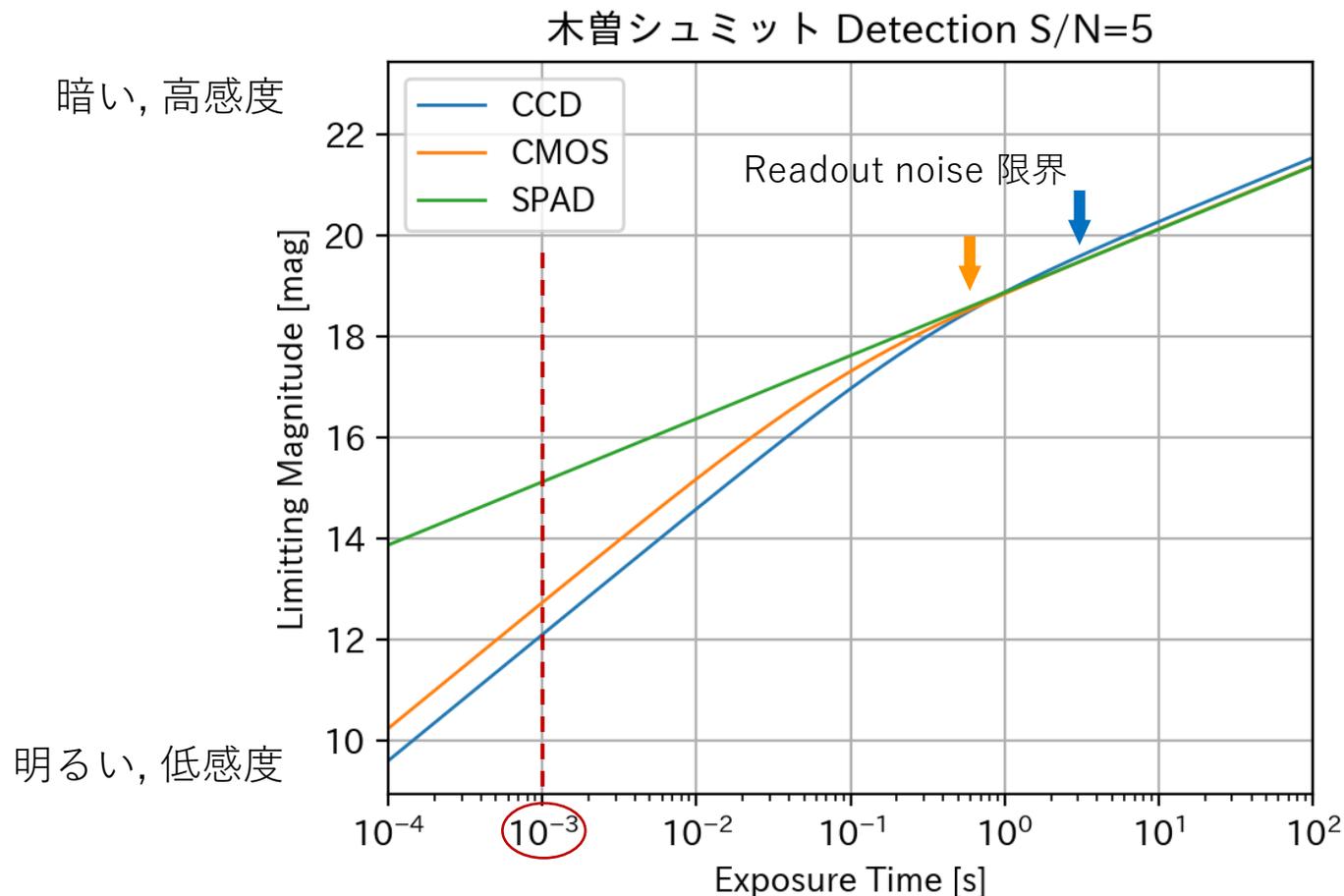
$$R_{\text{dark}} = \sqrt{n \sigma_{\text{dark}} t}$$

$$R_{\text{readout}} = \sqrt{n \sigma_{\text{readout}}}$$

	CCD [†]	CMOS ^{††}	SPAD
σ_{readout} [e-/pix]	10	2	0
σ_{dark} [e-/pix/sec]	0	0.5	0.5
pixsize [μm]	20	19	10
Efficiency_total	0.58	0.44	0.44

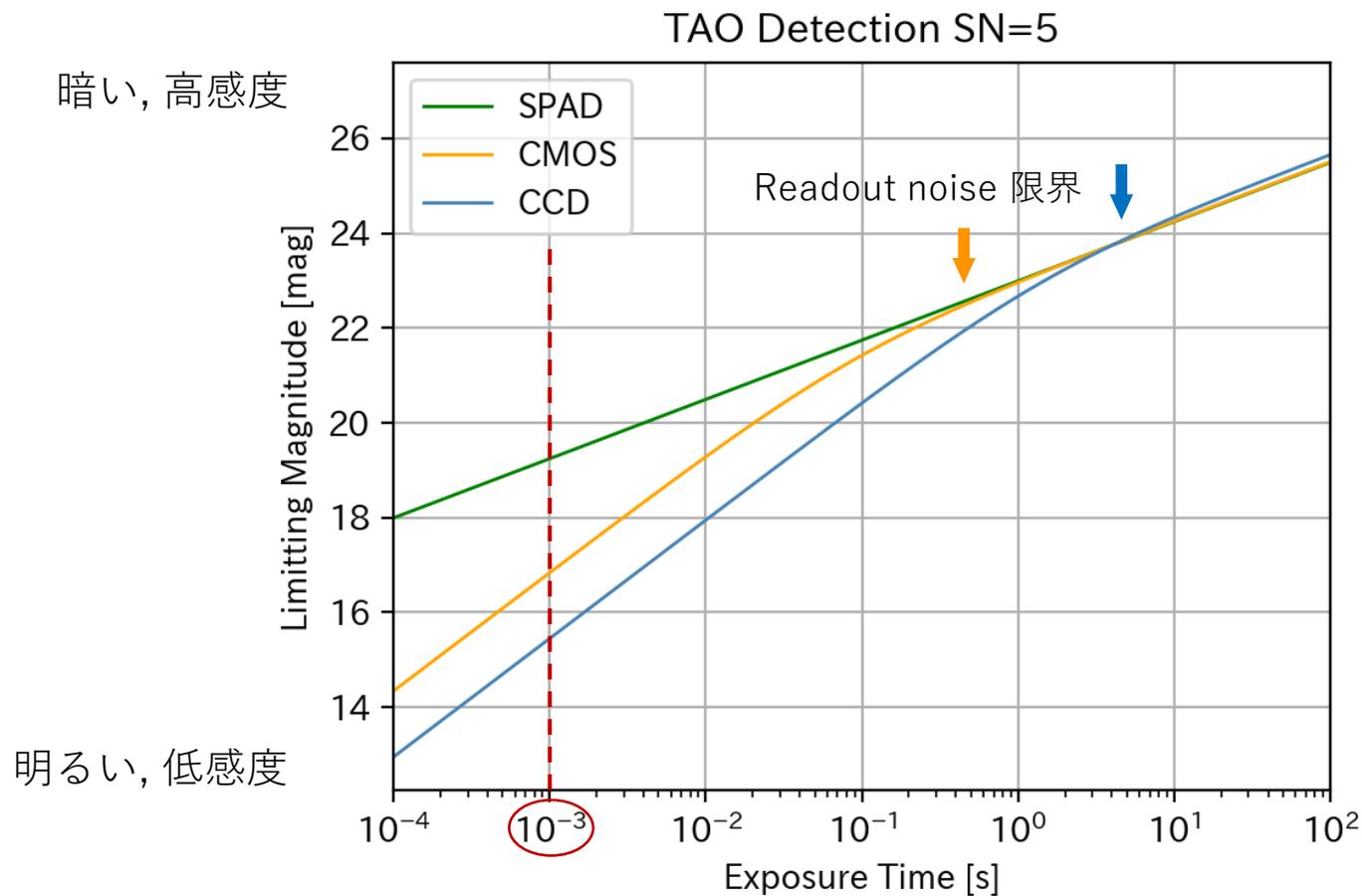
† KWFC †† Tomo-e Gozen

検出限界等級 木曾シュミット望遠鏡



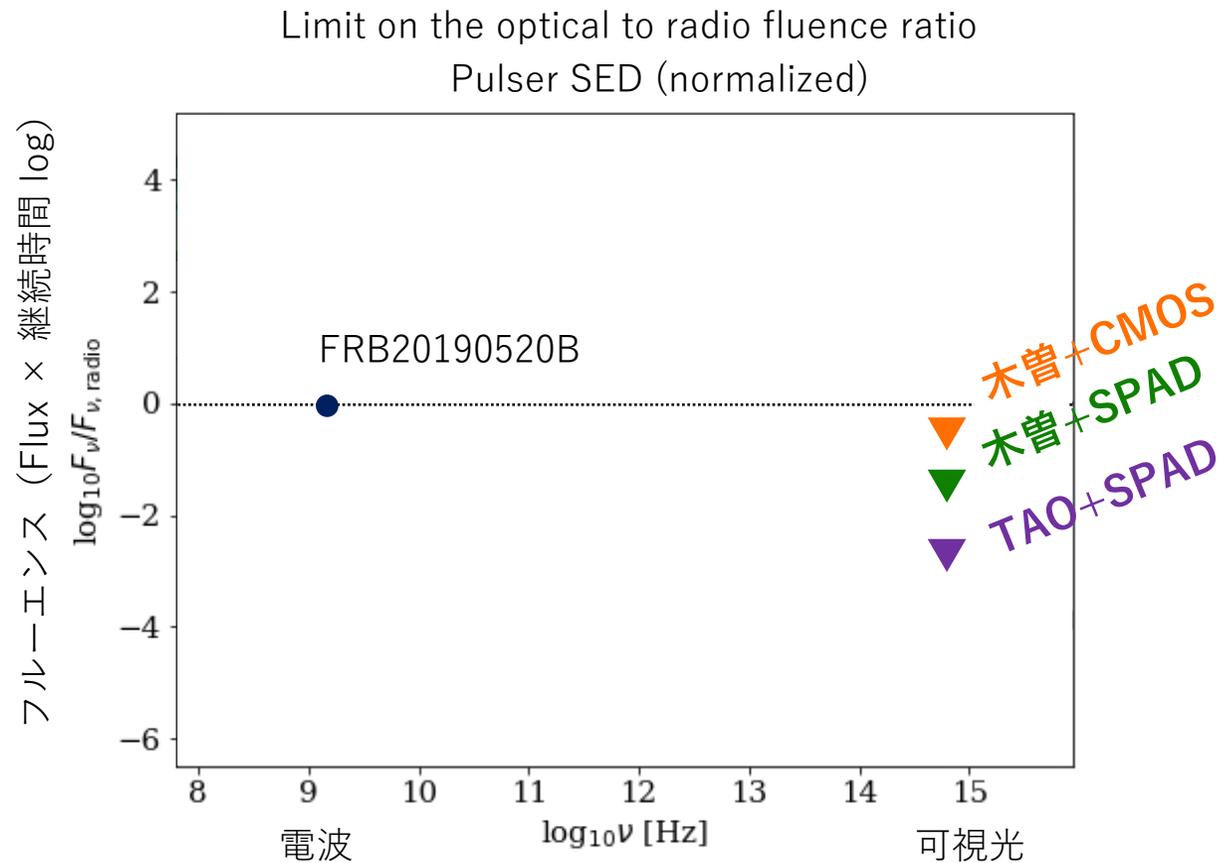
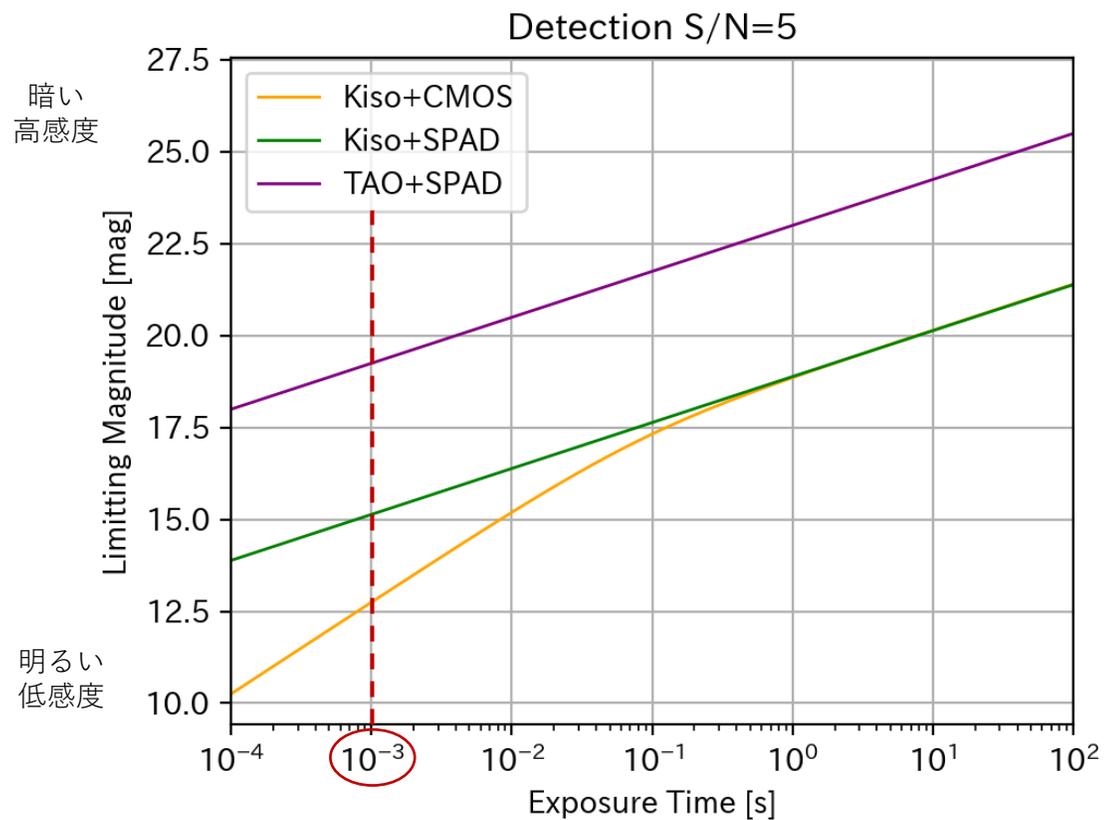
- **短時間露光 (~1msec) でCCD、CMOSよりも高い感度**
- 1msec露光において、SPADは**CCDの16倍、CMOSの9倍優位**
- 数msecの短時間変動イベントの可視光カウンタパートの「検出」において、SPADはCCD、CMOSに対して**大きく優位**

検出限界等級 TAO6.5m望遠鏡



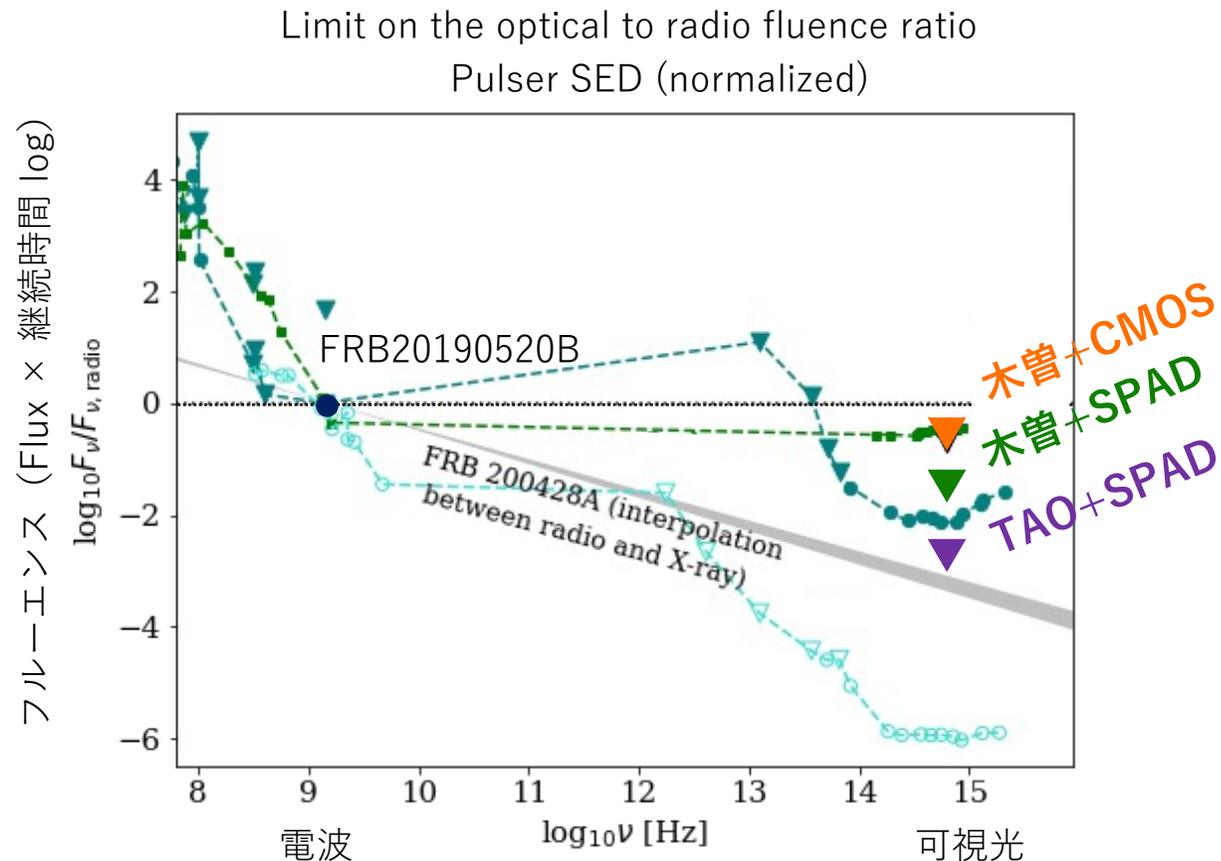
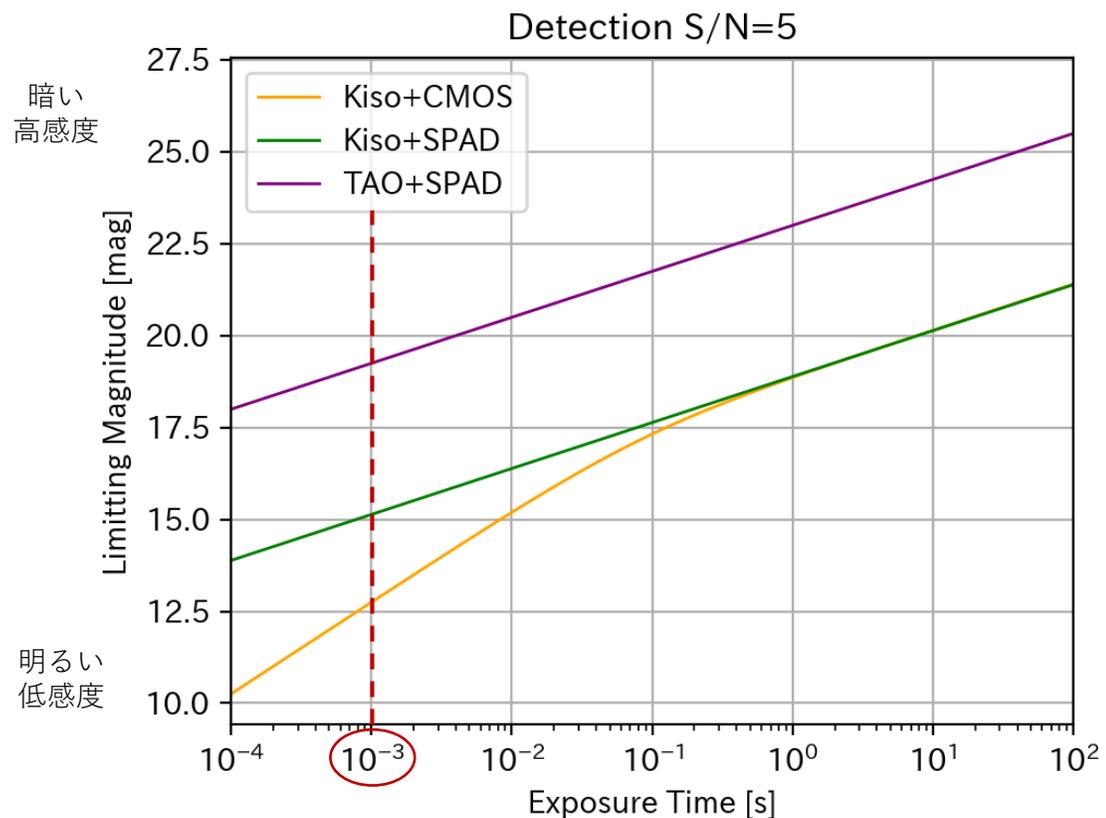
- **短時間露光 (~1msec) でCCD、CMOSよりも高い感度**
- 1msec露光において、SPADは**CCDの32倍、CMOSの9倍優位**
- 数msecの短時間変動イベントの可視光カウンターパートの「検出」において、SPADはCCD、CMOSに対して**大きく優位**

検出 限界等級



Niino et al. 2022

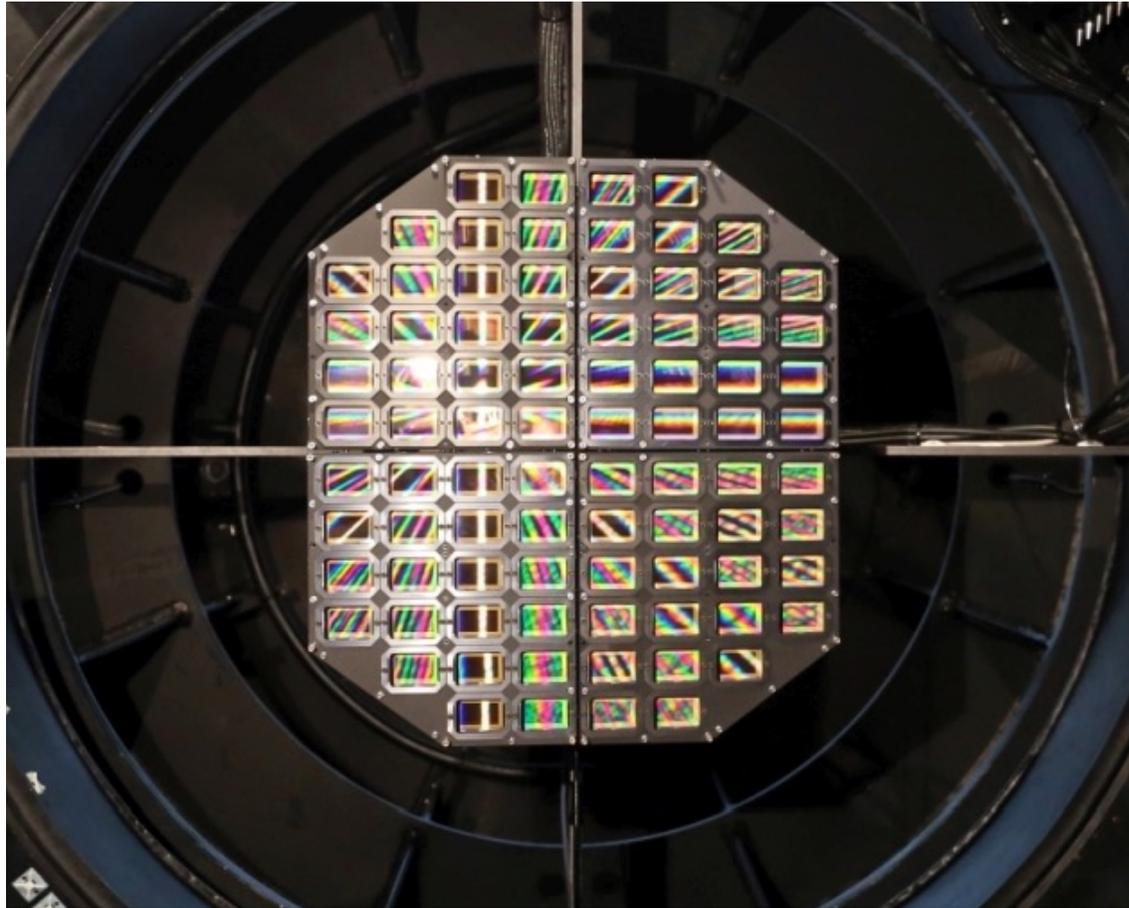
検出限界等級



Niino et al. 2022

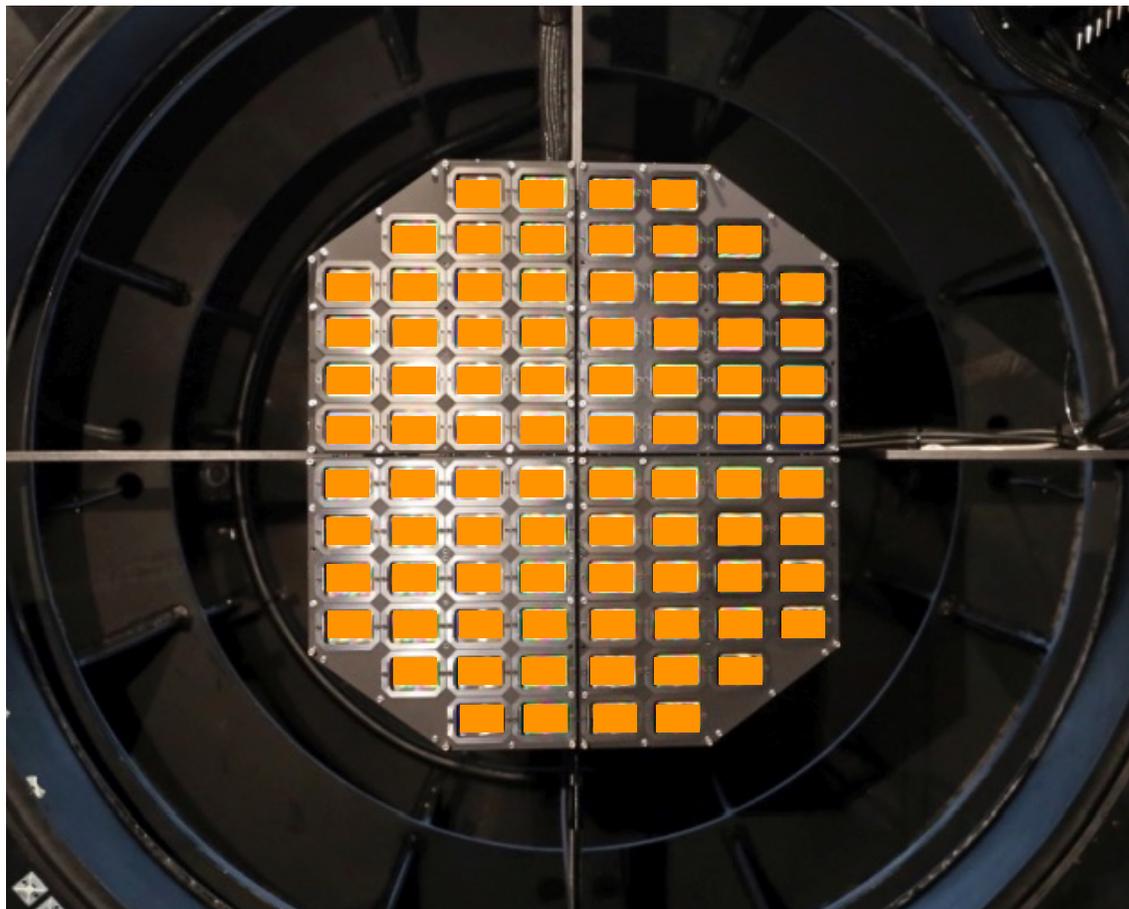
SPADを用いることで、木曾シュミット+Tomo-e Gozenよりも深い観測が可能

高時間分解能 + 広視野



Tomo-e Gozen

高時間分解能 + 広視野



Super Tomo-e Gozen

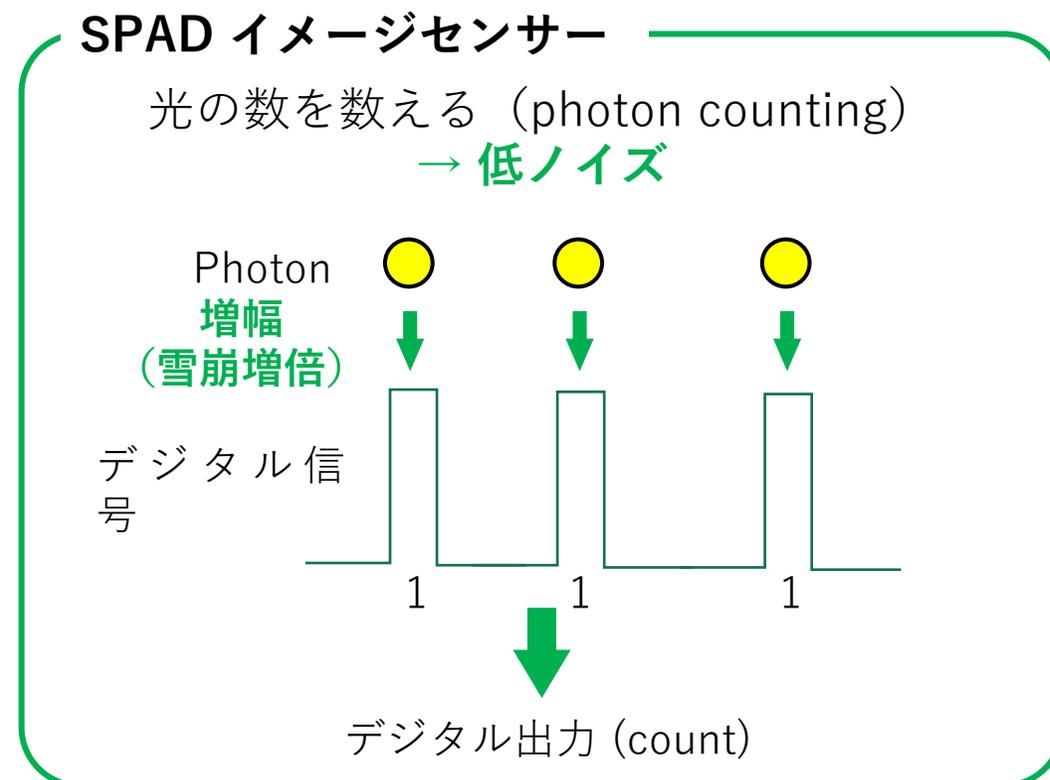
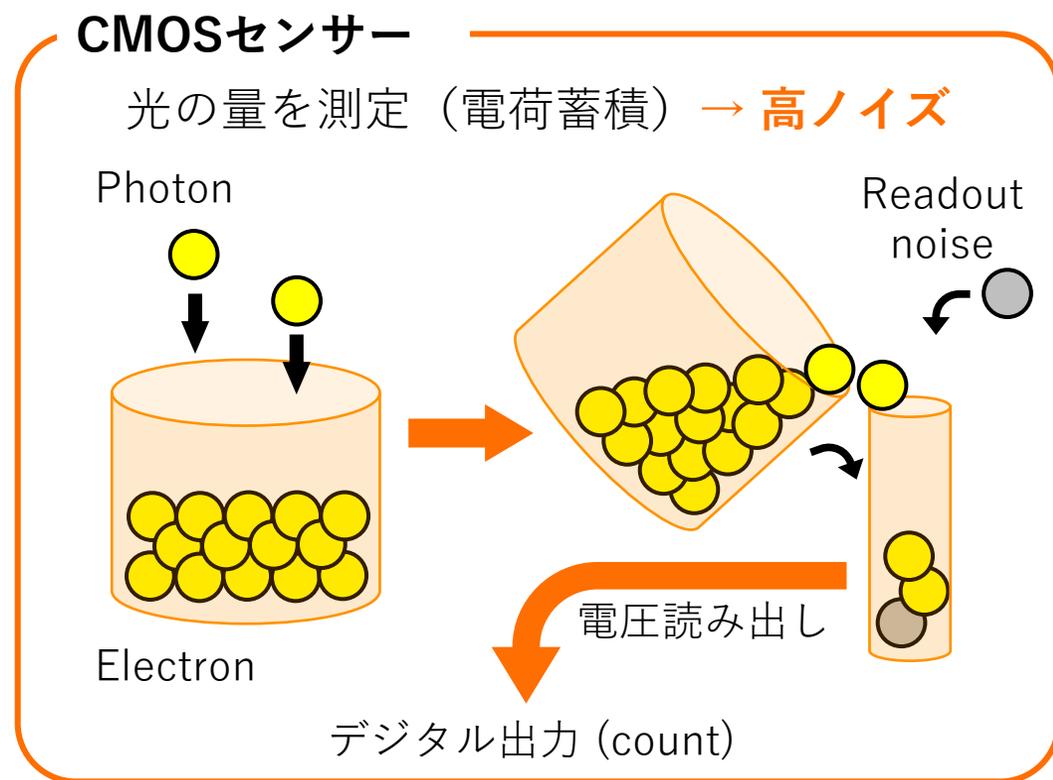
Tomo-e Gozenで用いられている
CMOSを**SPADイメージセンサー**に
置き換えることで

- 広視野
 - msecスケールでの高時間分解能
 - 低ノイズの観測
- を実現できる可能性

4. 撮像データのシミュレーション

1. イントロダクション
2. SPADイメージセンサー
3. SPADセンサーの感度計算
4. 撮像データのシミュレーション

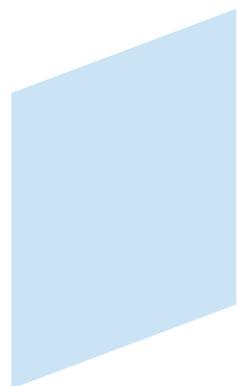
Noise Simulator 目的



読み出し方法の差, Readout noiseの有無が撮像データにどのように影響するか

Noise Simulator 概要

Sky background



21 mag

時間方向
→Poisson分布

Star

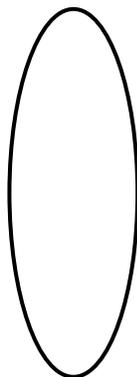
視野中央にひとつ配置



star mag
seeing 3 arcsec

時間方向
→Poisson分布
空間方向
→Gauss分布 (seeing)

Telescope
diameter



1.05m
Plate scale
0.0632 arcsec/um

Image sensor



Dark current
→Poisson分布
Readout noise
→Gauss分布

1k × 1k
pixel size 19μm



Noise Simulator パラメータ

- Photon_star (Sum_{photon_star}) /sec
 - 時間方向：Poisson分布
 - 空間方向：Gauss分布 (seeing 3 arcsec)
 - Seeing = 星像のFWHM
 - 星像が空間方向にガウス分布をしていると仮定する
 - $FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \times \sigma$
- Photon_sky (Sum_{photon_star}) /sec
 - 時間方向：Poisson分布
 - 空間方向：Gauss分布 (seeing 3 arcsec) → 等方なので省略

CMOSセンサー

- Dark current
 - count：Poisson分布
 - 露光時間に比例して発生
- Readout noise
 - count：Gauss分布
 - 電圧読み出しの際に正負に揺らぐ

SPADイメージセンサー

- Dark current
 - count：Poisson分布
 - 露光時間に比例して発生
- Readout noise なし

Noise Simulator パラメータ

- 木曾シュミット望遠鏡

- R_sys 0.44
- Telescope diameter 1.05 m
- Sky background 21 mag
- Seeing 3 arcsec
- Platescale 6.32×10^{-2} arcsec/ μm

- 観測条件

- $\lambda_{\text{observation}}$ 0.5 μm
- $\Delta\lambda$ (広帯域filter) 0.2 μm

- センサー共通条件

- Pixel数 1k*1k
- Pixel size 19 μm

- CMOSセンサー

- Dark current 0.5 e-/sec/pix
- Readout noise 2 e-/pix

- SPADセンサー

- Dark current 0.5 e-/sec/pix
- Readout noise 0 e-/pix

Simulation image

- 木曾シュミット+CMOS

Generator parameter

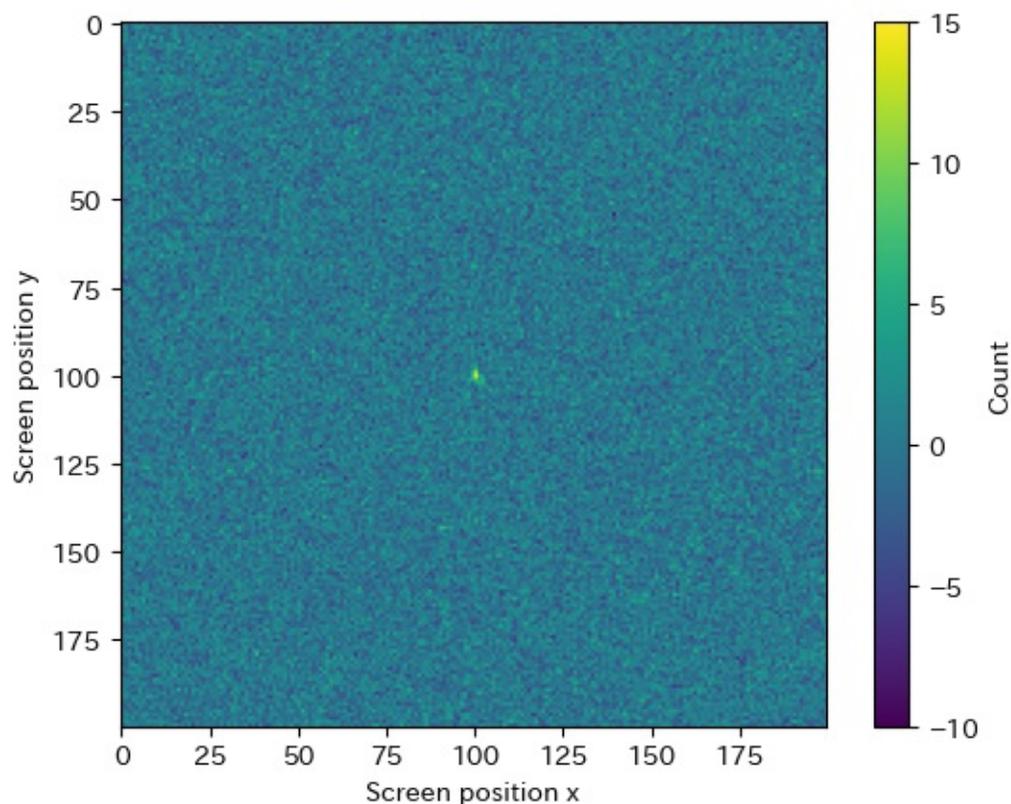
- Starmag : 12.5
- Dark current : 0.5 e-/sec
- Readout noise : 2 e-
- Exposure time : 1 msec



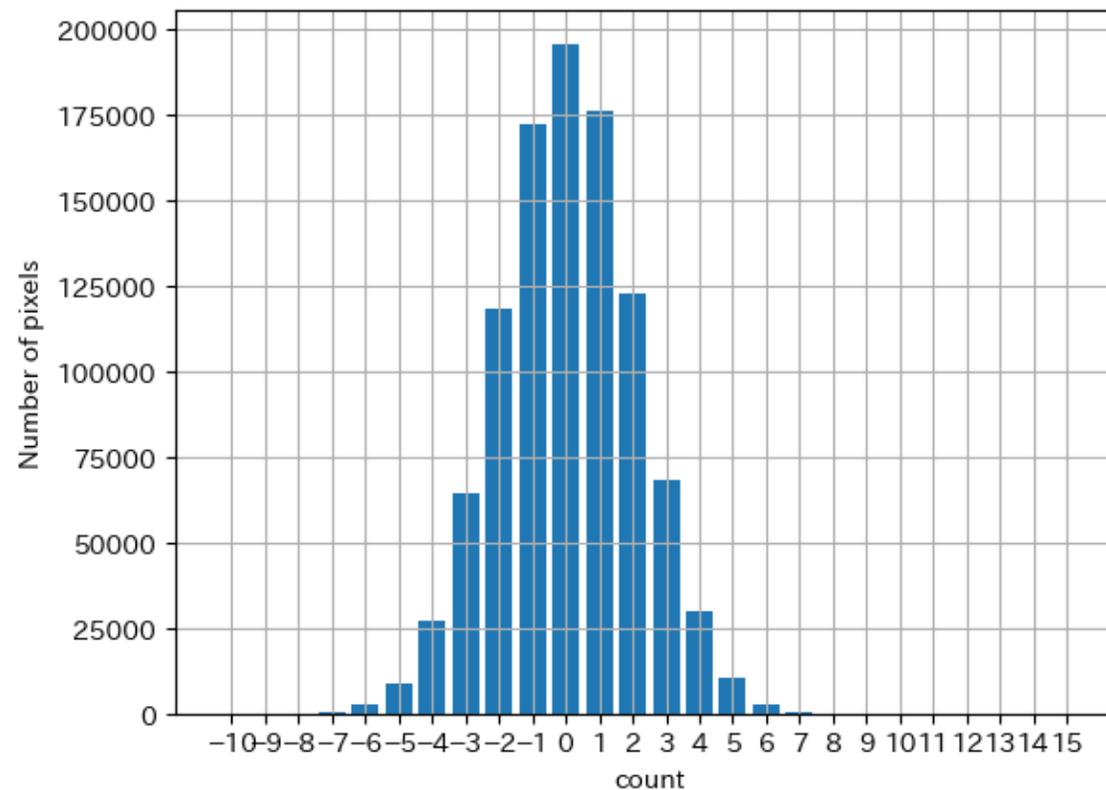
Image

- average count : 0.0458
- sigma count : 2.03

中央 200pix*200pix



空間方向ヒストグラム



Simulation image

- 木曾シュミット+SPAD

Generator parameter

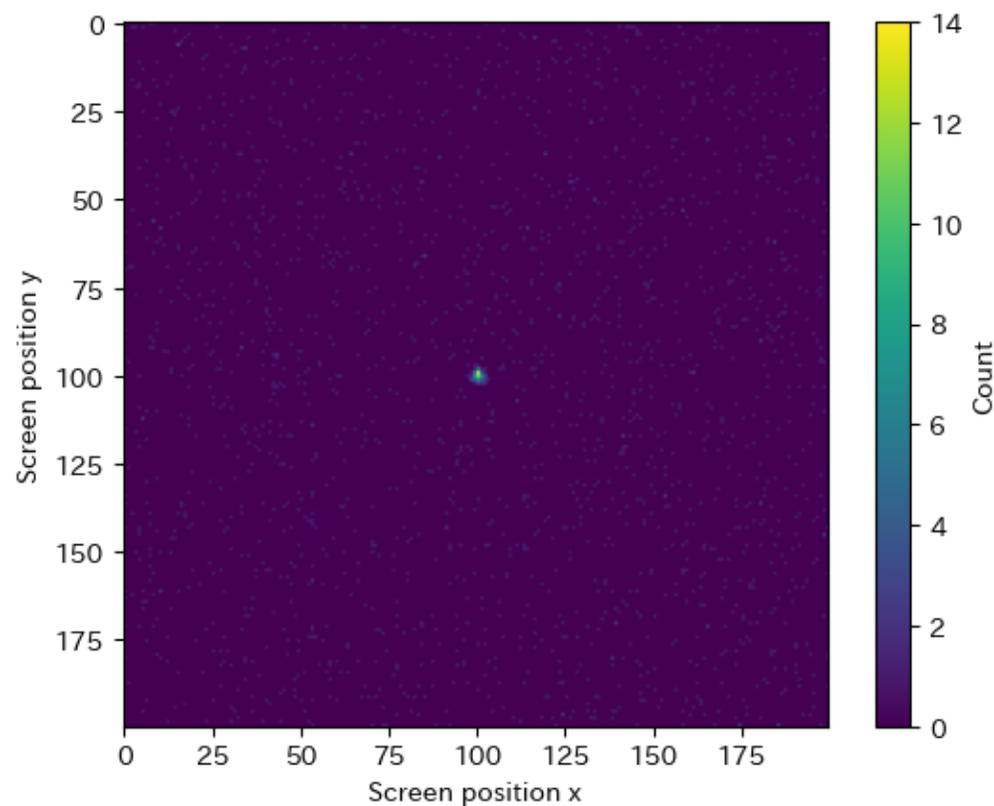
- Starmag : 12.5
- Dark current : 0.5 e-/sec
- Readout noise : 0 e-
- Exposure time : 1 msec



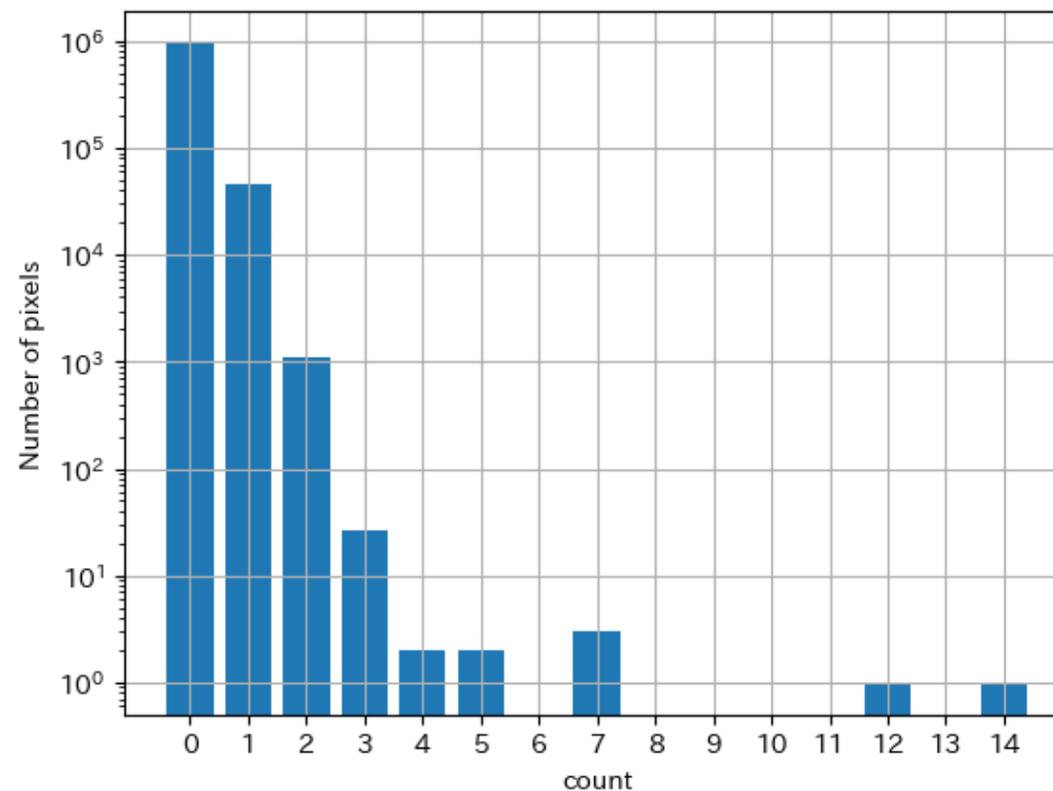
Image

- average count : 0.0487
- sigma count : 0.222

中央 200pix*200pix

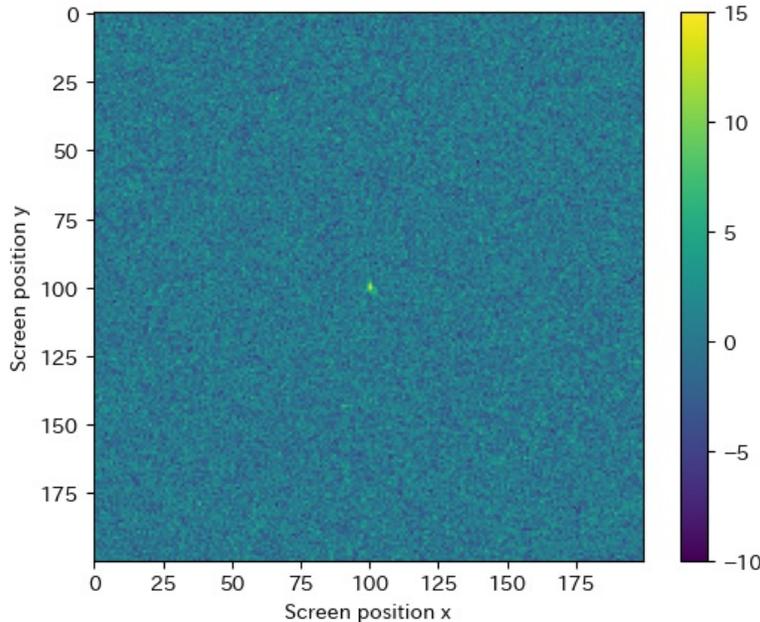


空間方向ヒストグラム

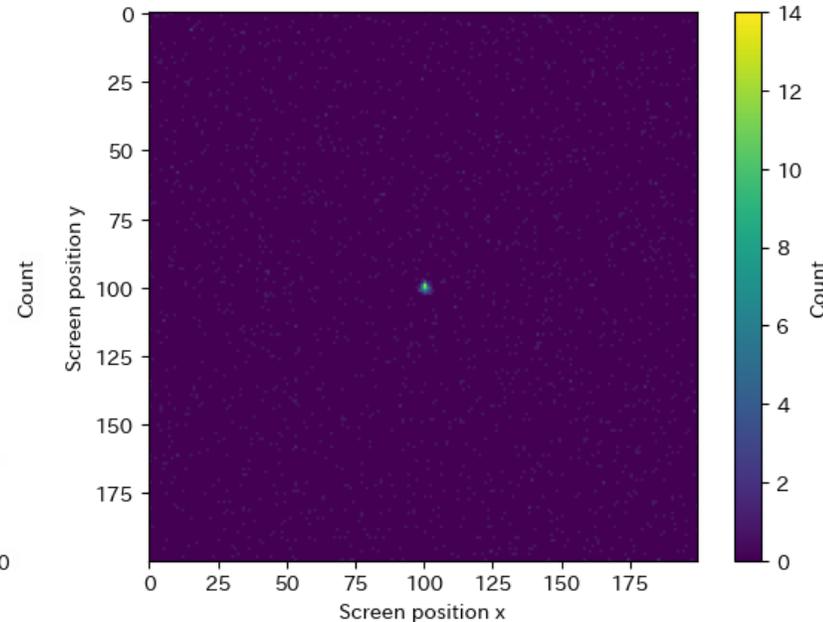


Simulation image

木曽シュミット + CMOS



木曽シュミット + SPAD



本シミュレーションの問題点

- 空間方向（pixel方向）の揺らぎを、seeingの幅に対応するガウス分布と仮定しているが、実際にはseeing danceの影響がある
- Pixelごとの特性に一切のムラがないと仮定しているが、実際にはpixelごとにnoiseの特性（パターン）がある

Readout noiseが支配的な短時間露光において
SPADイメージセンサーはCMOSセンサーに対して
ノイズが小さい

まとめと今後

- 電波と同時に高速観測し、FRBの可視光カウンターパートの検出を目指す
- 高速観測において高いS/Nをかせぐためには、検出器のNoiseの大きさ、特にReadout Noiseが重要である
- SPADイメージセンサーを用いた高速観測を検討した
- SPADイメージセンサーは、CCD・CMOSに比べて、数msecの短時間変動天体の高い検出感度がある
- SPADイメージセンサーで得られる撮像データのシミュレーションを行った
- 今後はSPADイメージセンサーの評価、シミュレーションとの比較を進める予定