

SPADイメージセンサの性能評価および 高速偏光撮像装置の試験機の開発

倉島 啓斗, 酒向 重行, 高橋 英則, 近藤 荘平 (東京大学)

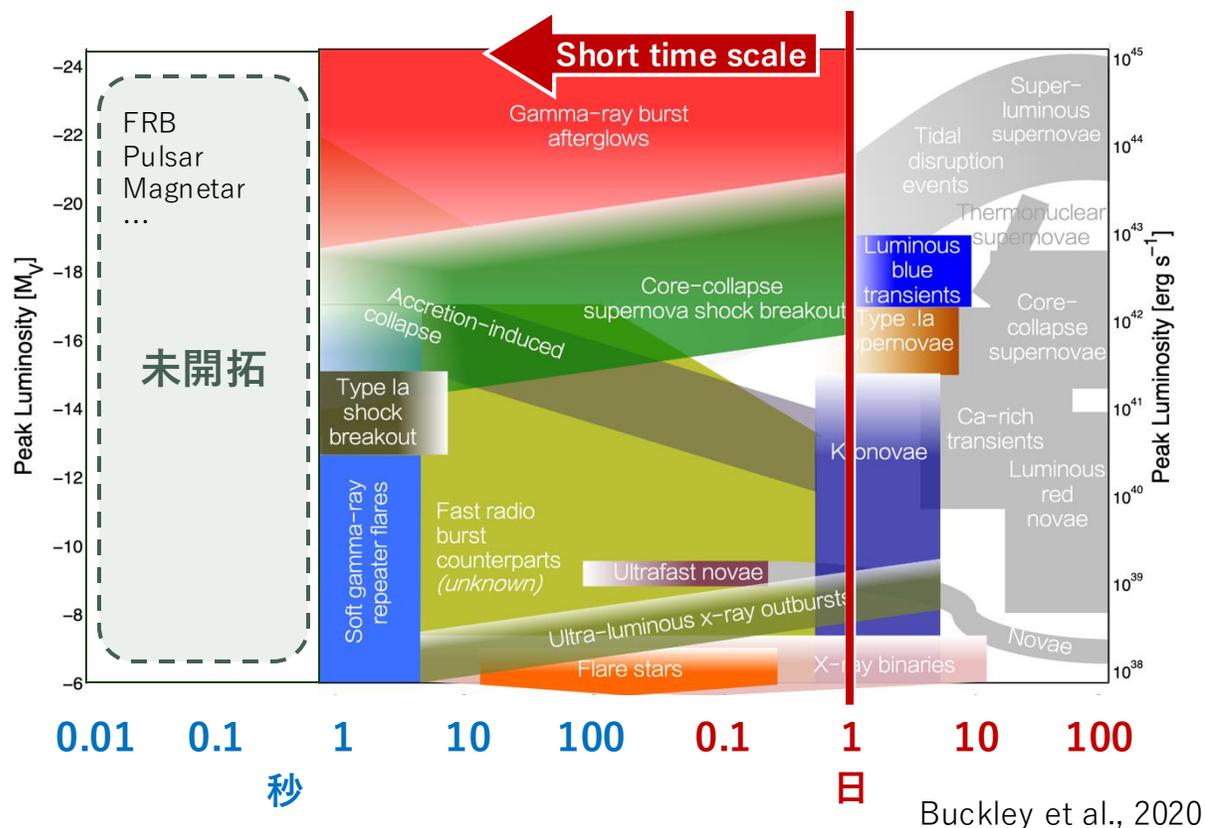
東京大学アタカマ天文台(TAO) グループ, 東京大学木曾観測所グループ

- 目次
1. 導入
 2. 開発と観測
 3. 結果
 4. 議論
 5. まとめと今後

秒スケール以下の変動天体と高速電波バースト

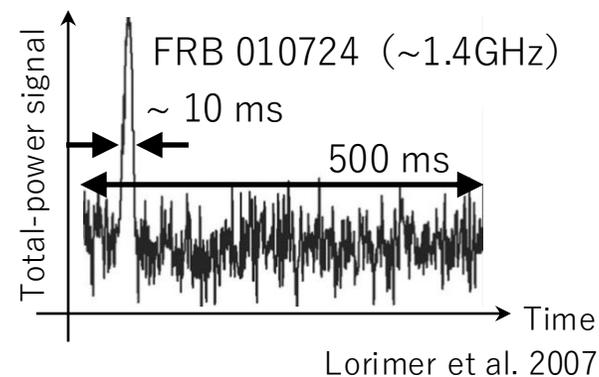
時間軸天文学

- 特に1秒を切る天体現象は未探査である



高速電波バースト(FRB)

- 数 10 msの短いタイムスケールの明るい電波パルス現象
- パルサーやマグネターを起源とする放射モデルが有力視されている
- FRB起源の**決定的な観測的証拠はない**
- Dispersion Measure が大きく、銀河系外に起源が位置すると考えられる
- ~800 FRBs** が見つかったている



Parkes observatory (CSIRO)

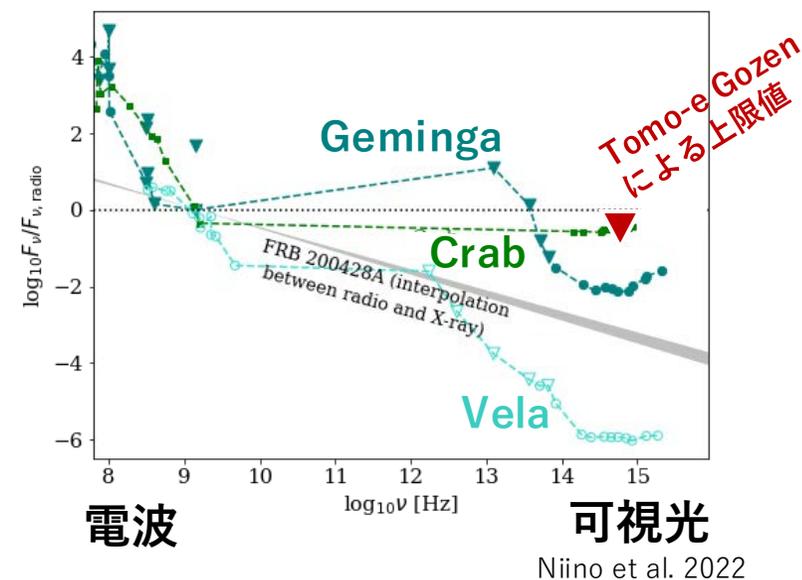
FRBの可視光カウンターパート

- FRBに対応する可視光バーストが予想されている
- FRBの可視光カウンターパートは**検出されていない**
- 可視光フラックス上限値と露光時間を掛け合わせた**可視光フルエンスの上限値**から FRB の放射モデルに制限をかけている (Niino et al. 2022, Kilpatrick et al. 2024)
- パルサーやマグネターと同様の放射機構を起源とする場合は**強い偏光**が予想される

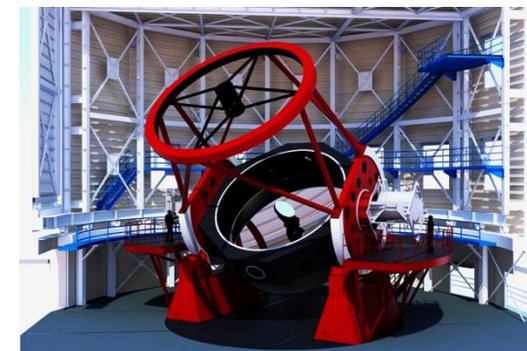
現在TAO 6.5m 望遠鏡に搭載する可視光高速偏光撮像装置を開発している

- FRB可視光カウンターパートの**検出**を目指す
- 検出した場合、その**偏光特性**を調査する

電波帯強度で規格化したパルサーと FRB のフラックス分布、およびTomo-eによるFRB 20190529Bの上限値



TAO 6.5m望遠鏡 (東京大学, チリ・アタカマ)



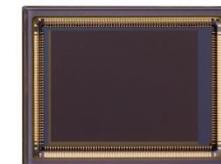
可視光高速観測, 偏光観測の課題

高速観測時の感度

- 短時間露光において読み出しノイズが支配的



ゼロ読み出しノイズの
SPADイメージセンサを使用する

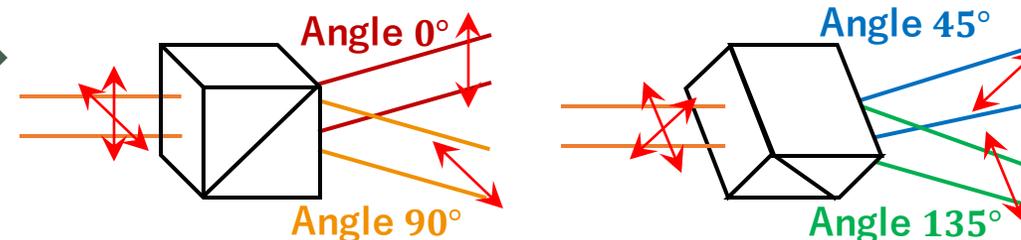


高速偏光観測

- 直線偏光の情報を得るために必要な4つの成分 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) すべてを1露光で同時に取得しなければならない



ダブルウォラストンプリズムを使用する



本研究の目的

1. TAO高速偏光撮像装置の試験機の開発

- ウォラストンプリズムを用いた1露光偏光撮像ユニットを組み込む

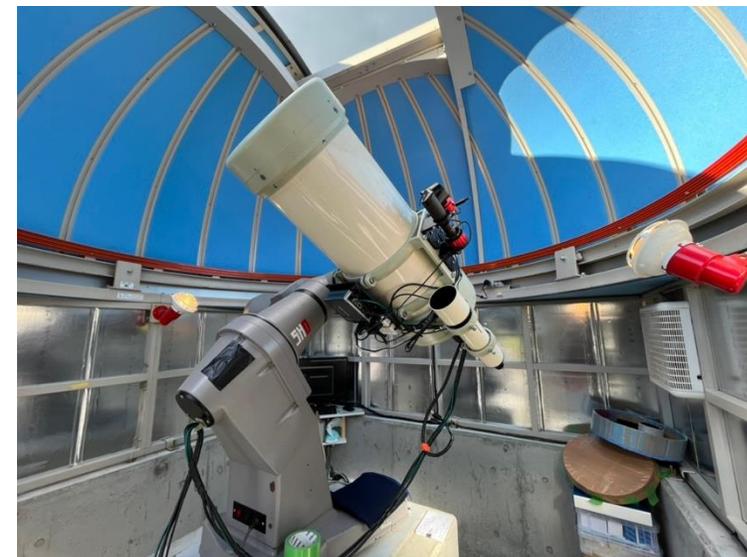
2. SPADイメージセンサと試験機による試験観測

- 木曾30cm望遠鏡にて実施



試験機の開発と試験観測を踏まえて
今後のTAO高速偏光撮像装置の開発に取り組む

木曾30cm望遠鏡



東京大学, 木曾観測所

天文観測用可視光イメージセンサの比較

化学反応型検出器

量子型検出器

写真乾板

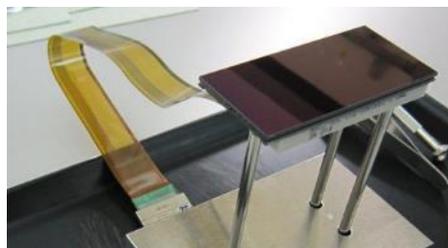


木曾/シュミット望遠鏡

1870年代に登場

大フォーマット
35cm角

CCD



すばる/Hyper Suprime Cam

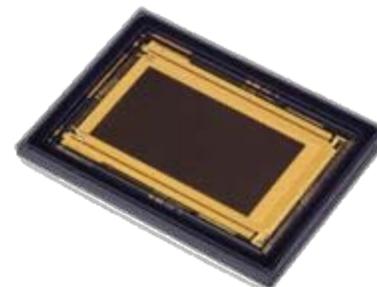
1990年代に登場

大フォーマット
> 8k x 8k

広帯域に高い量子効率

低温駆動 (-100°C)

CMOS



木曾/Tomo-e Gozen

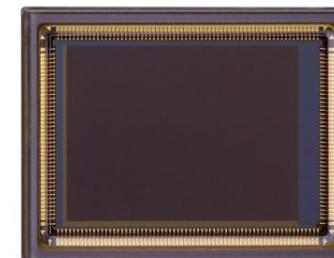
2010年代に登場

大フォーマット
> 8k x 8k

高速な読み出し < 10 msec

低い読み出しノイズ < 2e⁻

SPAD



Canon

新型センサ

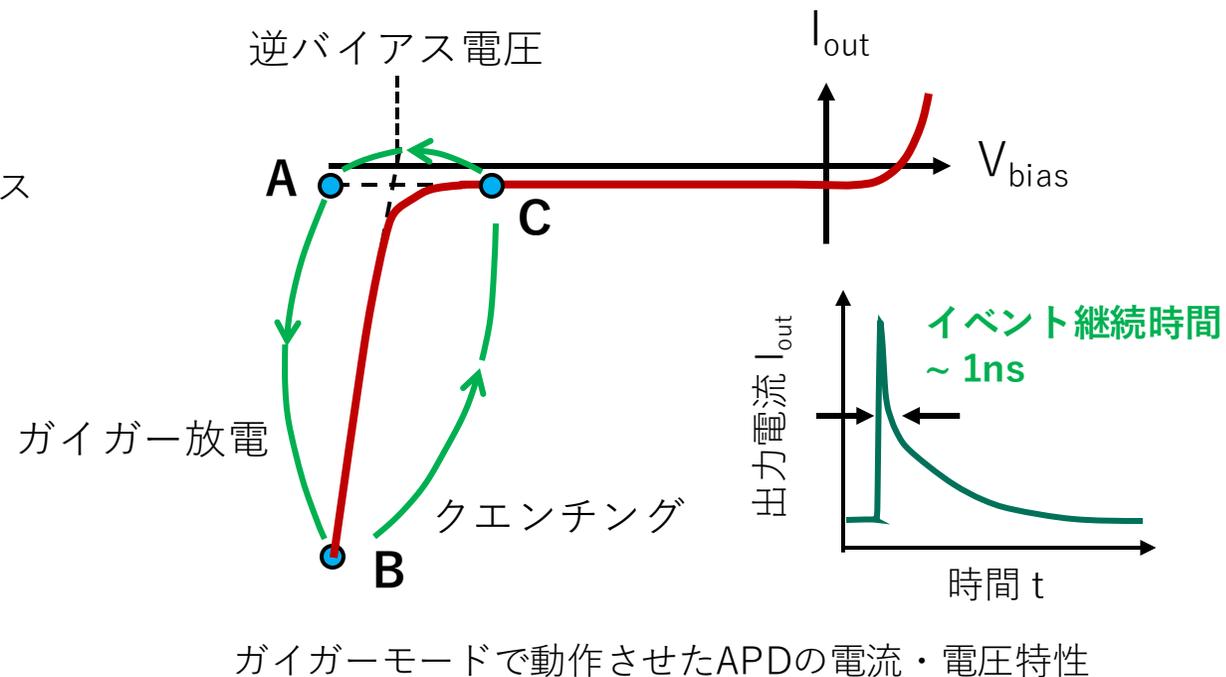
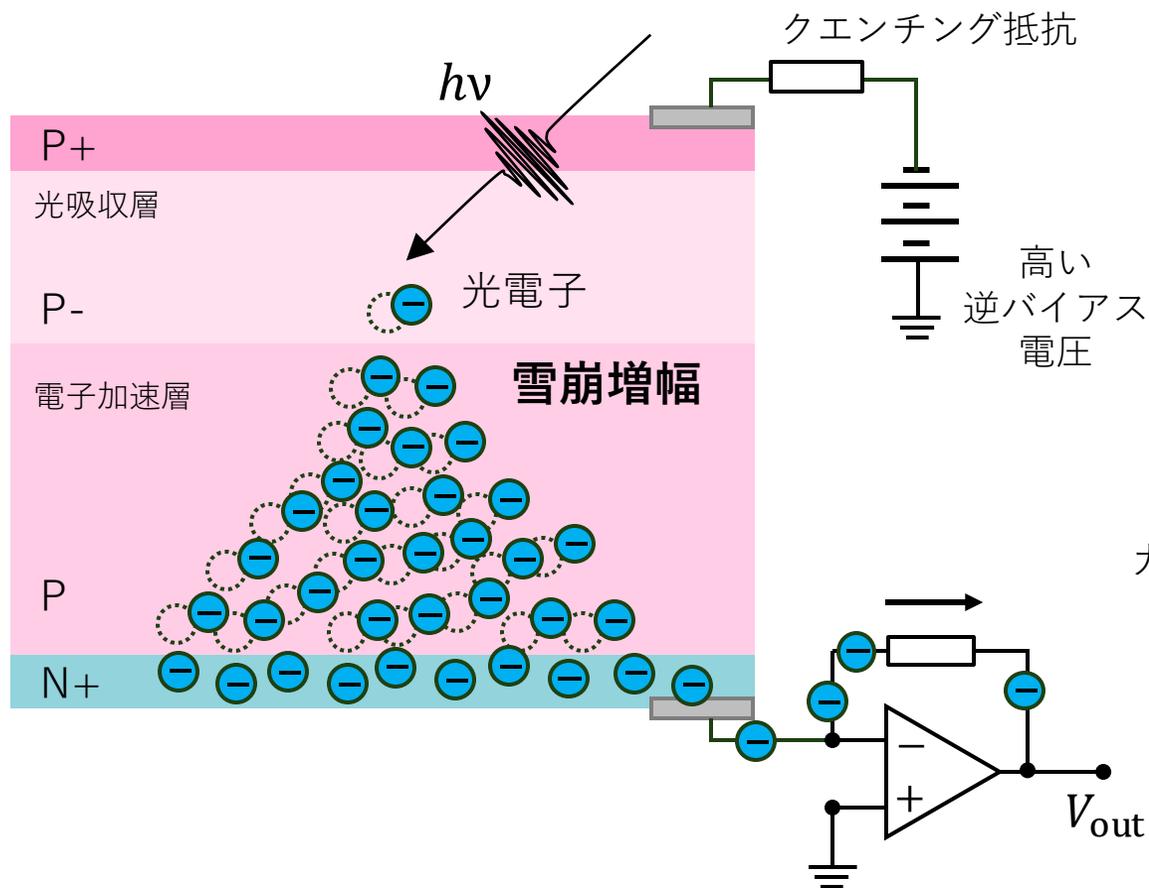
大フォーマット
> 1k x 1k

高速な読み出し < 10 msec

ゼロ読み出しノイズ 0 e⁻

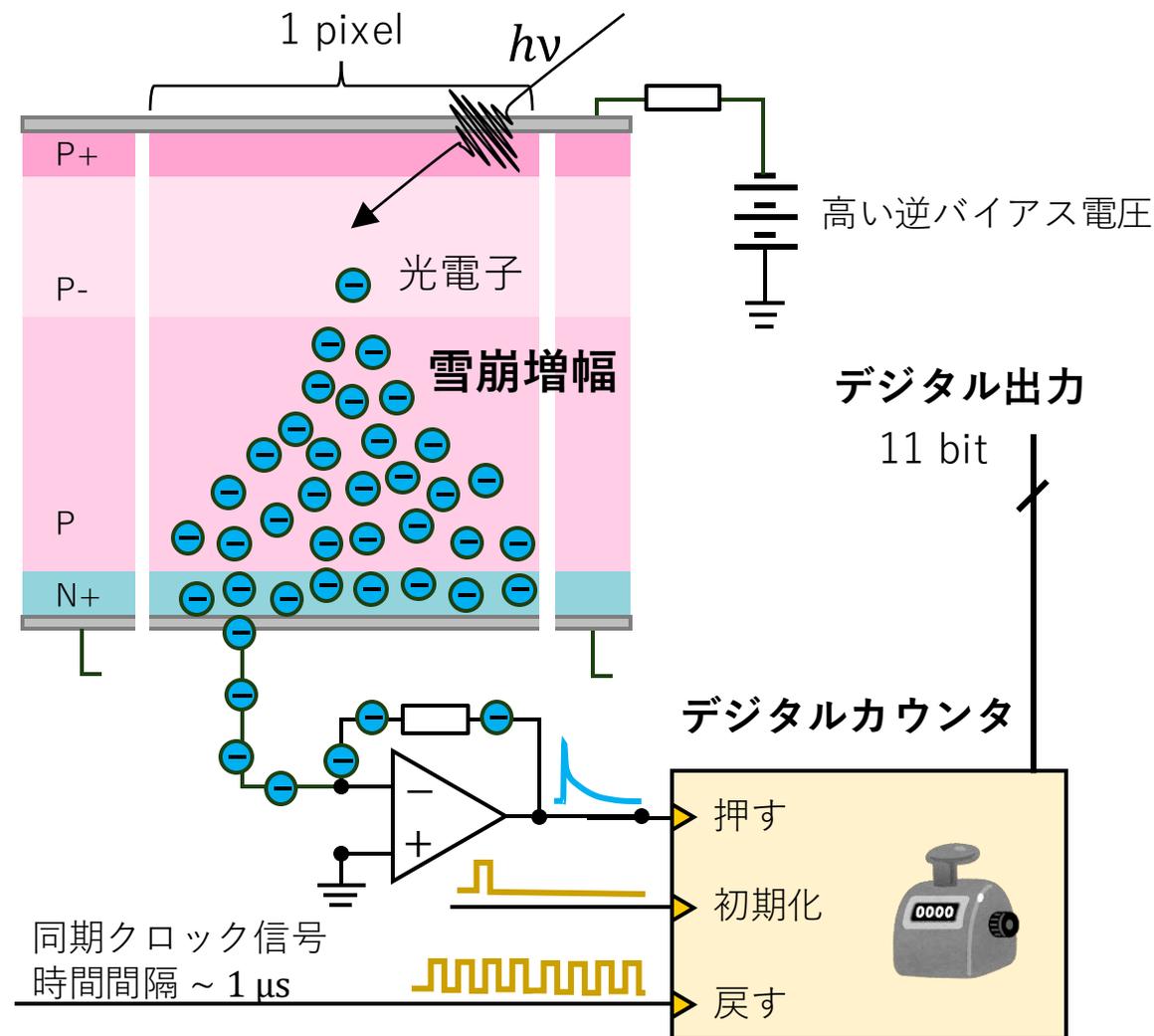
SPAD (Single Photon Avalanche Diode) センサ

- APD (Avalanche Photon Diode)を降伏電圧以上で動作させたデバイス。
- それぞれの光子に対して単パルス信号 ($\sim 1 \text{ ns}$) を出力する

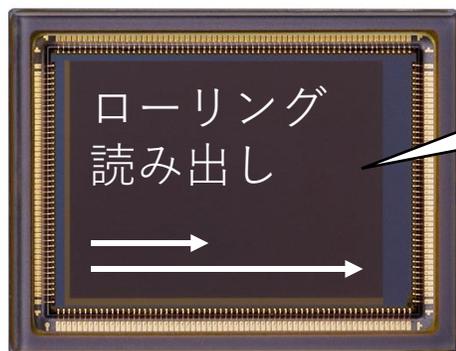


SPADイメージセンサ

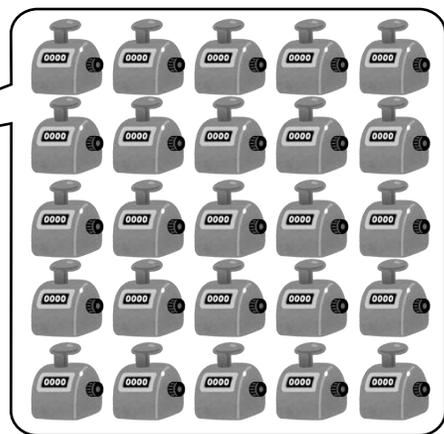
- 雪崩イベントの回数を数えるデジタルアレイセンサ
- ゼロ読み出しノイズと大フォーマット (2k × 1.5k) が特長



1 pixel = 1カウンタ



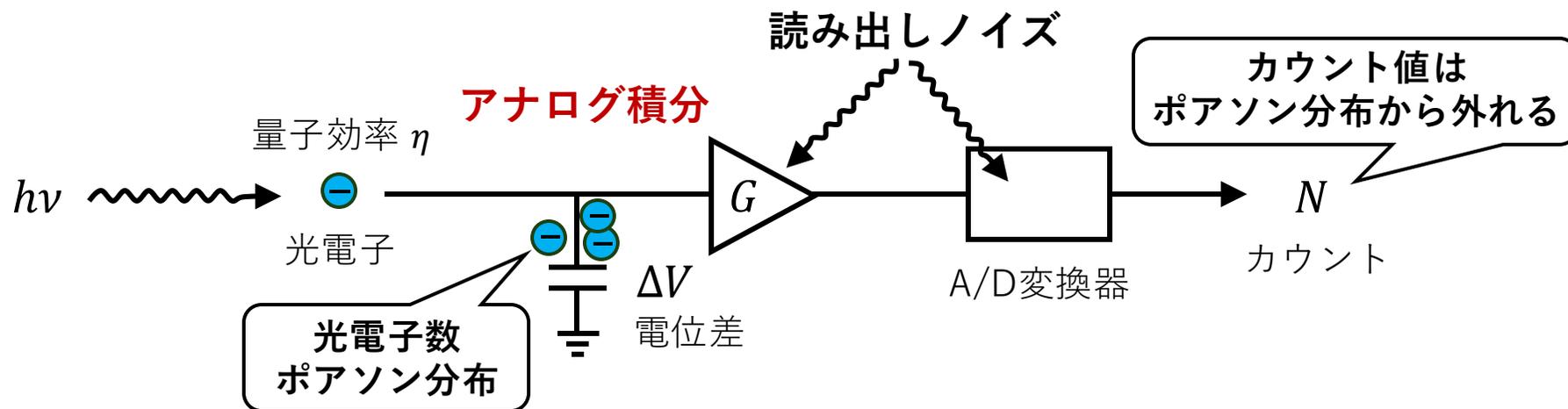
画素カウンタ値の読み出し
フレームレート 30 fps



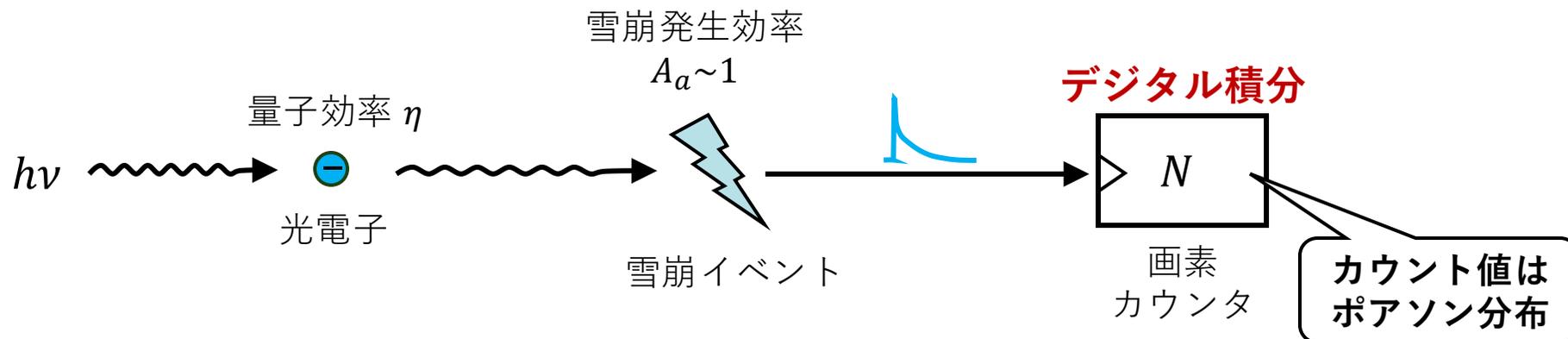
デジタルカウンタアレイ

光子検出とデジタル化の過程 (CCDとSPAD比較)

CCD, CMOS
イメージセンサ



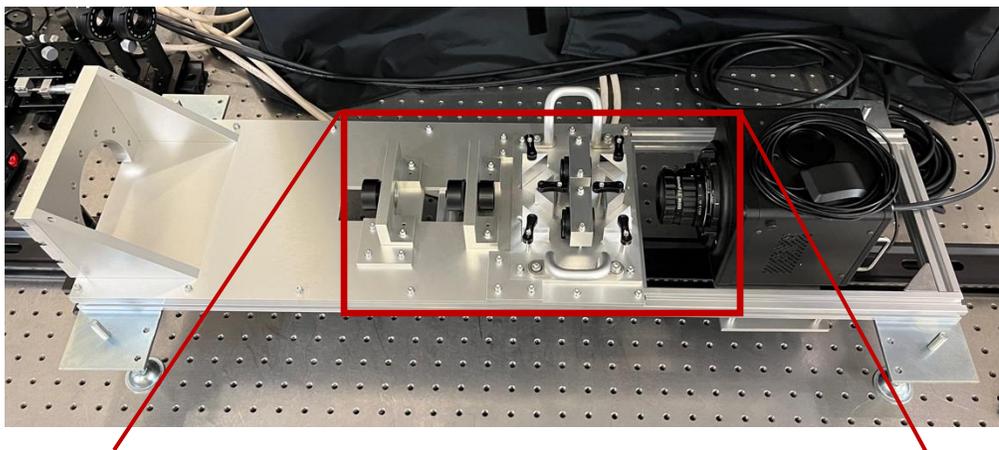
SPAD
イメージセンサ



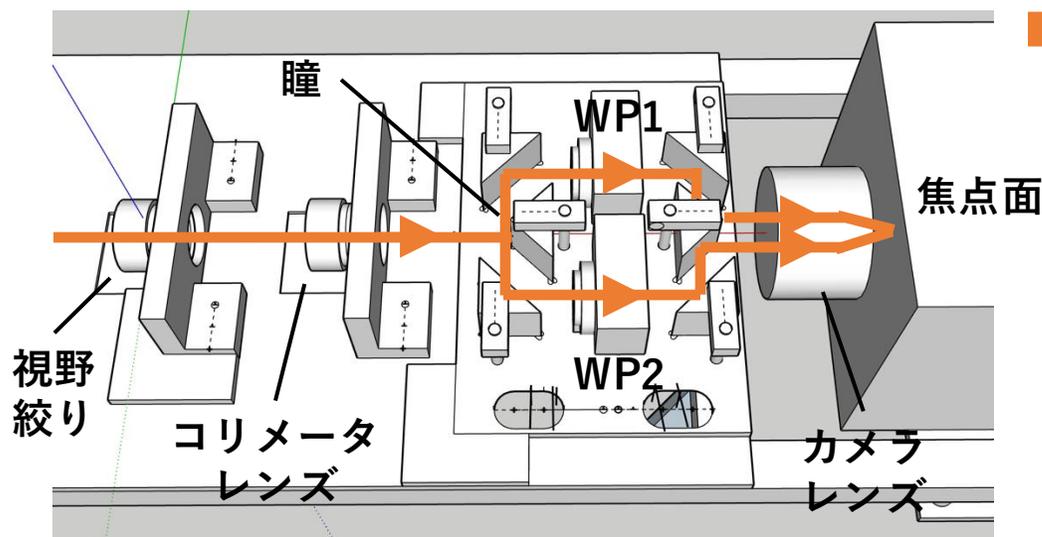
高い線形性と良質なポアソン統計が期待できる

高速偏光撮像装置の試験機の開発

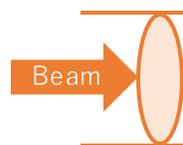
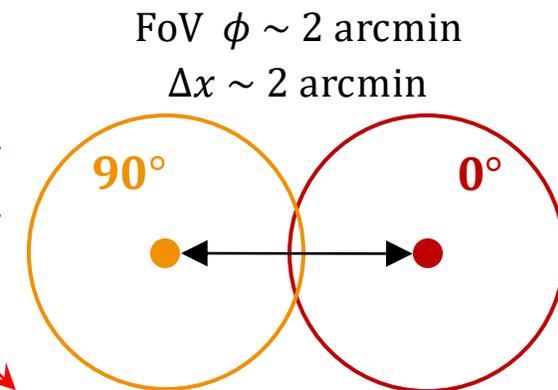
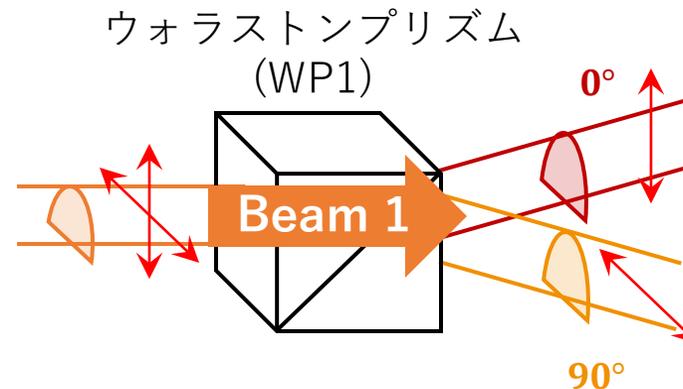
開発した試験機



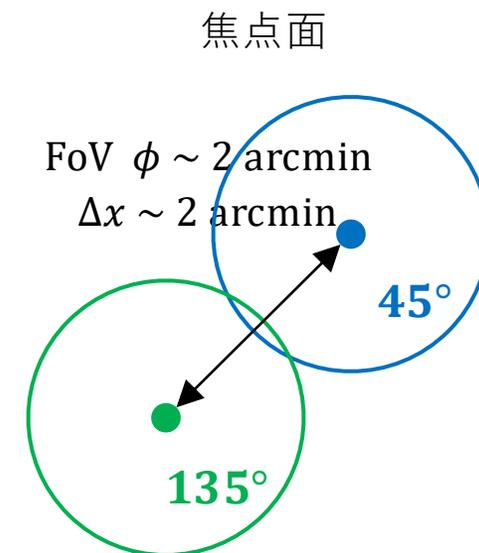
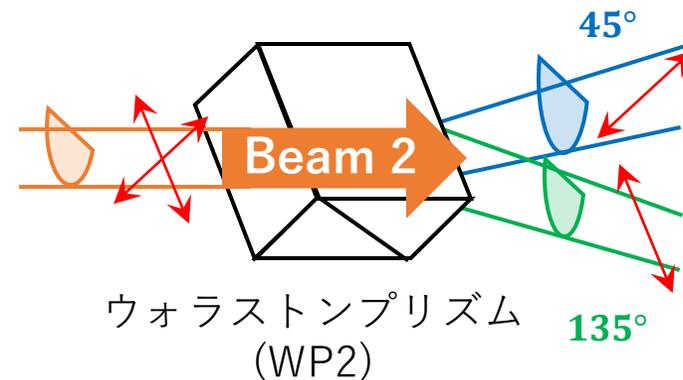
1露光偏光撮像ユニットの基本設計



瞳分割による1露光偏光撮像ユニットの設計



瞳位置で
ビーム分割



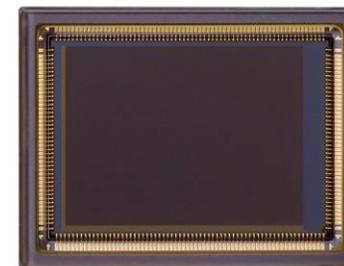
試験観測

試験機の設置

- SPADイメージセンサを試験機に設置
- 試験機を木曾30cm望遠鏡へ搭載



木曾30cm望遠鏡+試験機



SPADイメージセンサ
キヤノン社, 試作品
320万画素

試験観測

1. SPADイメージセンサによる撮像観測

- 2024年12月16日（月）-12月20日（金）4晩
- 30 fps, 冷却なし（センサ温度 ~ 0°C）
- 4等級から13等級の8天体の連続撮像データ(~30 sec)を取得
- 連続撮像中に素早く視野を移動したデータを取得
- ダーク画像, フラット画像で1次処理

2. CMOS+1露光偏光撮像ユニットによる偏光撮像観測

- 2025年4月7日（月）-4月9日（金）2晩
- 無偏光標準星, 偏光標準星, 10天体の連続撮像データを取得
- ダーク画像, フラット画像で1次処理
- 無偏光標準星解析結果から器械偏光を校正

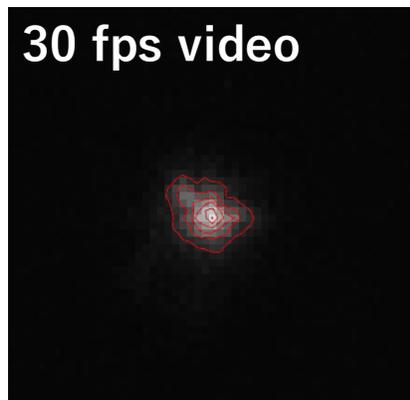
センサ種類	Siフォトダイオード モノクロセンサー 裏面照射型SPADアレイ
画素サイズ	6.4 μm
画素数	2072 x 1548
読み出しノイズ	0 e⁻
カウント用レジスタ	11 bit
フレームレート	30 fps
量子効率 (本実験では未計測)	320 – 900 nm Tomo-e Gozen搭載の CMOSセンサと同等

Canon プレスリリース (2023/10/16)
<https://global.canon/ja/technology/spad-sensor-2023.html>

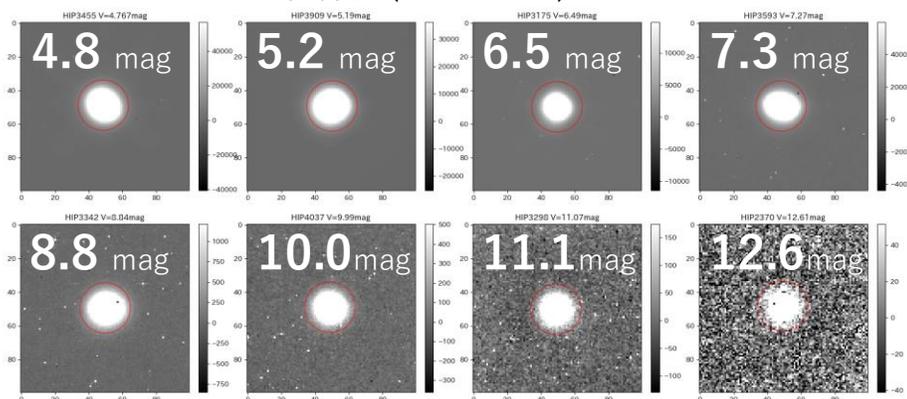
SPADイメージセンサによる測光結果

世界初のSPADイメージセンサによる天文観測を実施

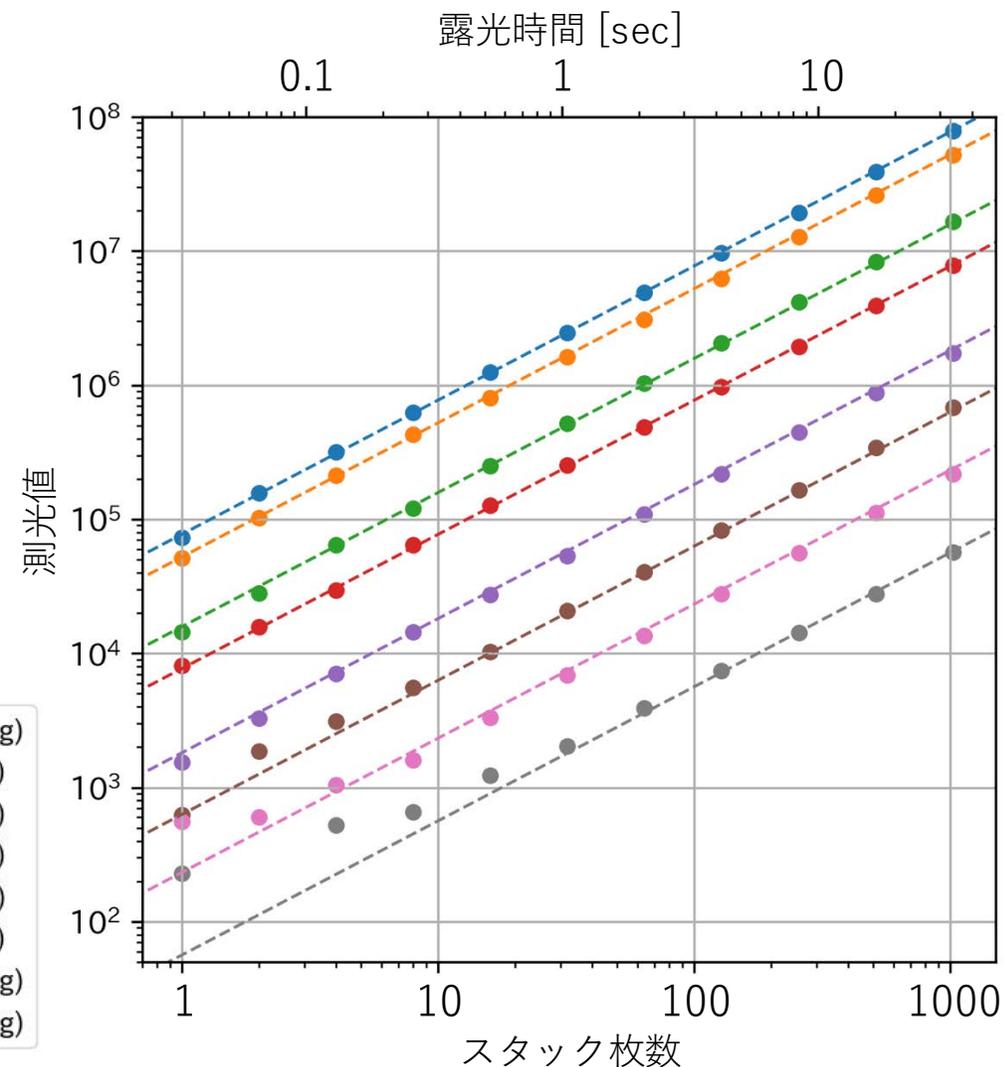
- センサパターンのないPSFを確認
- 測光値がスタック枚数に比例し、予想された値と一致した
- 全体のシステム効率が0.29だったため、SPAD量子効率 ~ 0.7 と推定



1000スタック画像 (~ 33 sec)

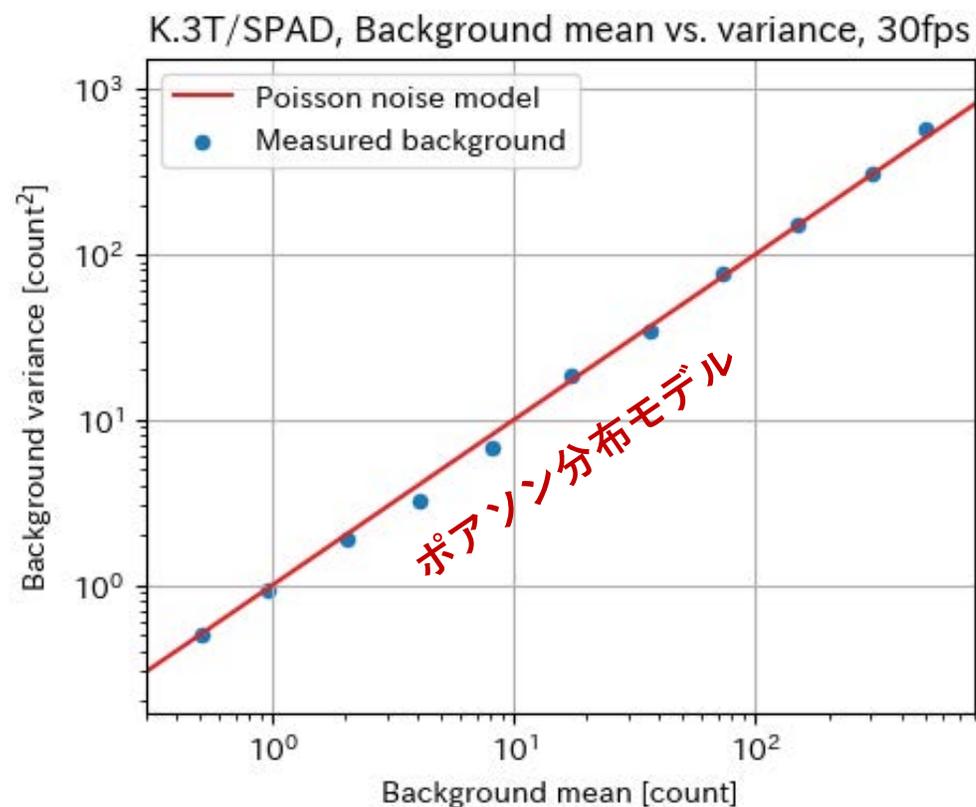


- HIP3455 (V=4.767mag)
- HIP3909 (V=5.19mag)
- HIP3175 (V=6.49mag)
- HIP3593 (V=7.27mag)
- HIP3342 (V=8.84mag)
- HIP4037 (V=9.99mag)
- HIP3298 (V=11.07mag)
- HIP2370 (V=12.61mag)



背景光のポアソン分布, ヒステリシス

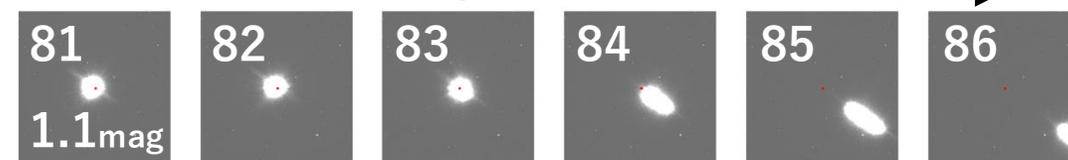
- $10 \times 10 \text{ pix}^2$ でのカウントの平均と分散
- 背景光とダークカウントの和のカウントがポアソン分布にしたがう



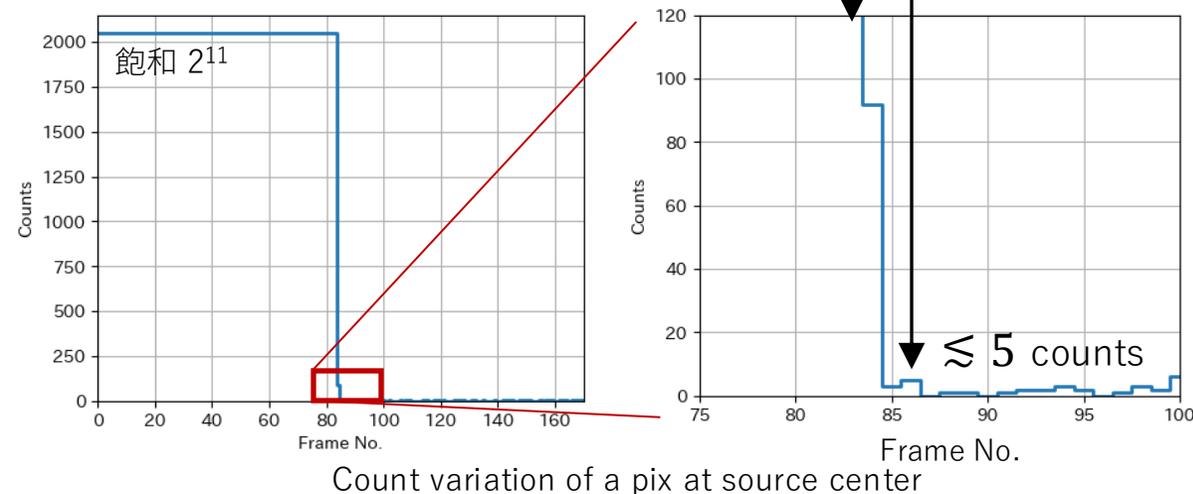
- 連続撮像中にイメージセンサ上で点光源を素早く移動させた
- 0.1秒後のヒステリシス $\leq 0.5\%$

移動中の6フレーム(30 fps)

0.1 秒

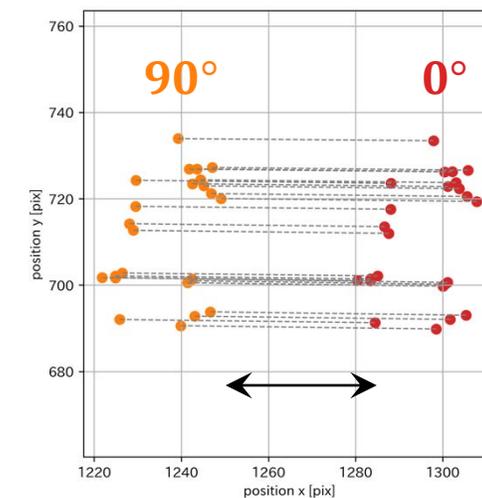
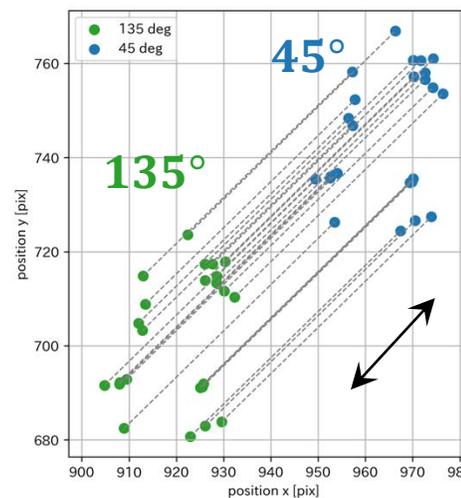
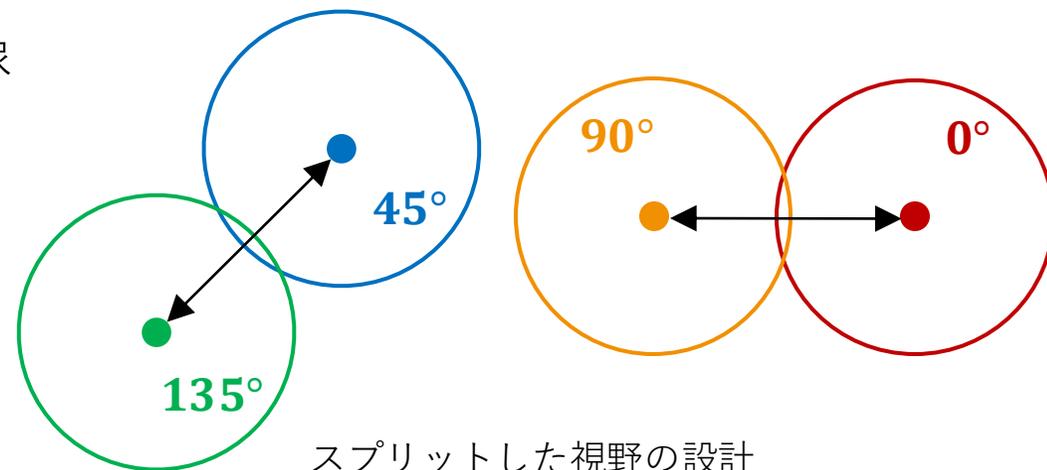
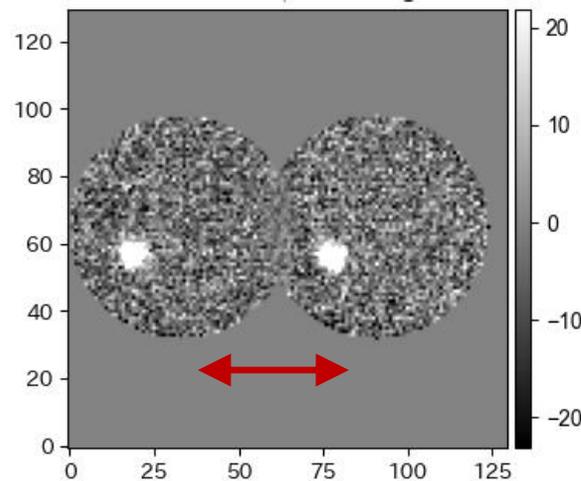
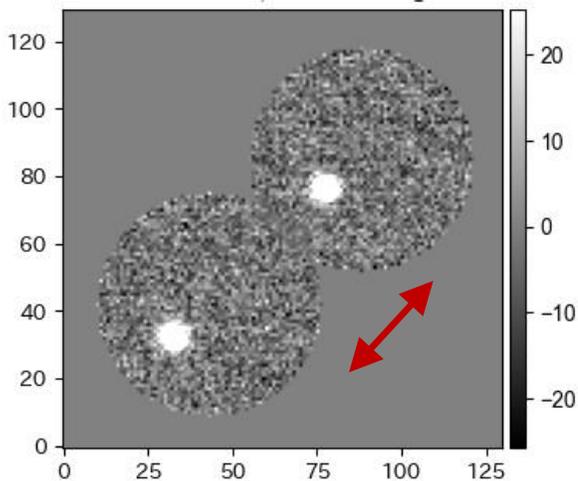
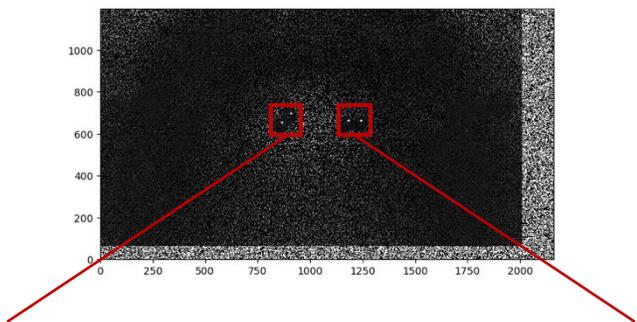


$\sim 10^4$ photons/pix at peak



偏光撮像の結果

- 設計通りのスプリット方向とスプリット距離で4つの像が得られた
- スプリット方向と距離は観測天体で変化なし



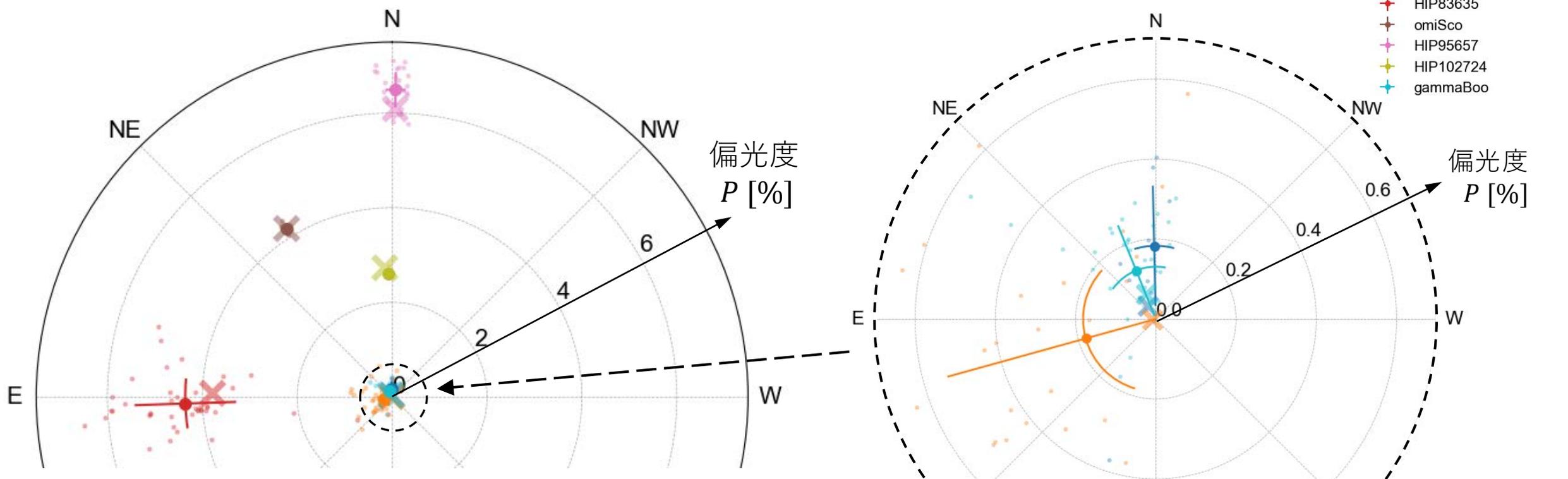
観測天体のスプリット方向およびスプリット距離

偏光標準星の観測結果

- スプリットした4つの像の測光値から偏光度 P , 偏光角 θ を導出

$$q = \frac{Q}{I_{0,90}} = \frac{I_0 - I_{90}}{I_0 + I_{90}}, \quad u = \frac{U}{I_{45,135}} = \frac{I_{45} - I_{135}}{I_{45} + I_{135}} \quad \Rightarrow \quad P = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{q}{u}\right)$$

- 観測結果の解析値と偏光標準星の文献値が一致



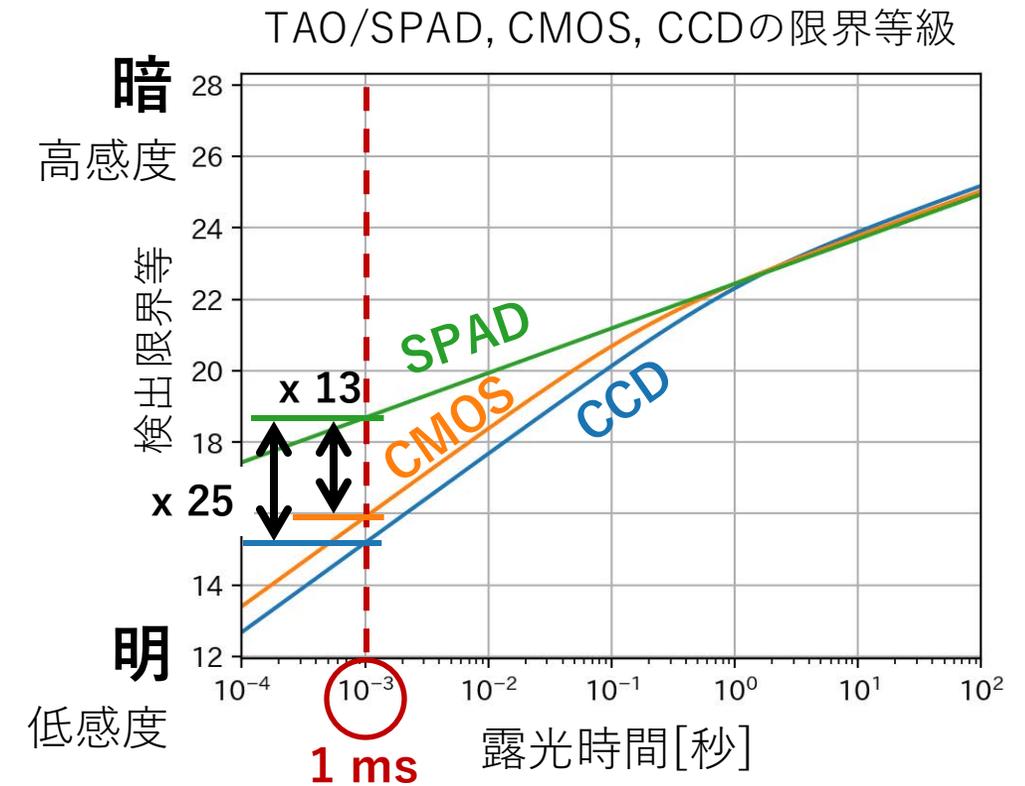
議論

SPADイメージセンサ

- 試験観測にて高い性能を確認
 - 線形性, ポアソン統計, ヒステリシスなど
- 高速観測における高い感度が期待される
 - 1ms 露光において、CMOS, CCDイメージセンサに対してそれぞれ 13倍, 25倍 の感度となる

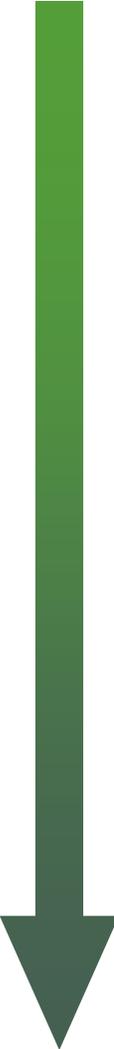
1露光偏光撮像ユニット

- 瞳位置のビーム断面積を分割する方法による偏光撮像ユニットを実証した
- 高精度な較正が必要である



本研究からこれらをTAO高速偏光撮像装置へ実装可能であることが確認された

今後の予定

- 
- 2024年度 木曾30cm望遠鏡+SPAD 試験観測
 - 撮像観測によるSPADイメージセンサの基本的な性能評価を実施
 - 偏光撮像観測による1露光偏光撮像ユニットの実証
 - 2025年度 せいめい望遠鏡 + SPAD 試験観測 (計画中)
 - SPADイメージセンサによるさらなる試験観測を計画中
 - SPADイメージセンサの強みを活かした観測対象を検討している
 - 30 fps ゼロ読み出しノイズを活かした高速撮像? パルサー, 連星系降着 ...
 - ゼロ読み出しノイズを活かした狭帯域撮像?
 - ゼロ読み出しノイズを活かした高分散分光?
 - TAO 6.5m 望遠鏡 可視光高速偏光撮像装置 (実機) の設計・開発

} 本発表

まとめ

- TAOの可視光観測装置として高速偏光撮像装置を開発し、FRBの可視光カウンターパートの検出とその偏光観測を目指している
- 本研究では、**TAO高速偏光撮像装置の試験機の開発**、木曾30cm望遠鏡でのSPADイメージセンサと試験機による**試験観測**を実施した
- 試験観測では、線形性、センサによるパターン、ポアソン統計、ヒステリシスなどを確認し、**SPADイメージセンサが天文学の科学観測に導入可能な性能を持つ**ことを確認した
- 1露光偏光撮像ユニットによって、設計通りの結像を得られることを確認した
- 偏光標準星の偏光観測結果から偏光パラメータを導出し、**文献値と一致する解析結果が得られた**
- 今後は試験機開発および試験観測を踏まえて、**TAO高速偏光撮像装置の実機開発を進める**