

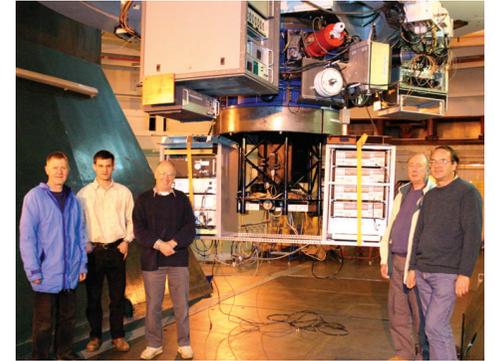
2023.03.01 OISTER-WS

精密偏光観測装置POPOの 開発状況

高橋 隼
(兵庫県立大学)

開発の背景と動機

- 海外では「高速位相変調」という技法を用いて、 10^{-6} (ppm) 台の偏光度検出精度を達成する装置が実用化されている (PlanetPol, HIPPI, POLISHなど)。
- 10 ppm以下の精度があれば、「月面地球照の観測による生命ホモキラリティ円偏光の検出」が可能となる。



▲ PlanetPol



▲ 月面地球照 (月に映る地球の光)

液晶位相変調器 (LCM)

- (ferro-electric) liquid crystal modulator: LCM
- 電圧の切り替えで液晶の配列を変化させることにより、直交する偏光2成分に与える位相差 (遅延) を切り替える。
- 典型的な変調速度 : 数10 Hz - 数100 Hz

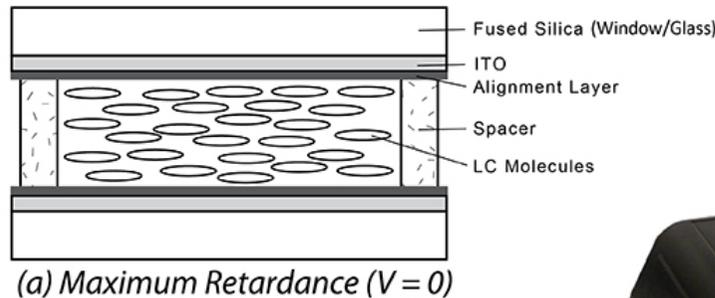
Liquid Crystal Variable Retarder (LCVR) Construction



LCVR Molecular Alignment
(a) without and (b) with applied voltage

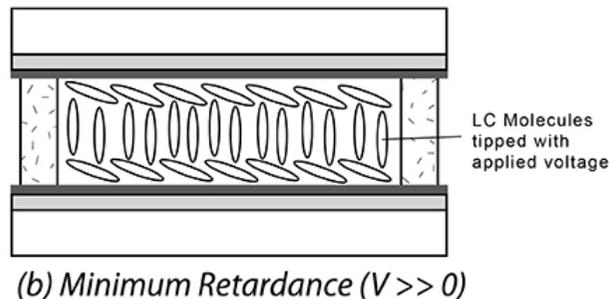
電圧 0
位相差 最大

≒半波長板あり



電圧 大
位相差 最小

≒半波長板なし



先行装置: HIPPI (Bailey+ 2015)

液晶位相変調器 (LCM)

- 直線偏光2成分に位相差を与える
- 「位相差なし」「半波長の位相差 (偏光方位回転)」を数100Hzで切り替え

Aperture

Filter Wheel

Collimating Lens

Wollaston Prism

Field Lens

Fabry Lenses

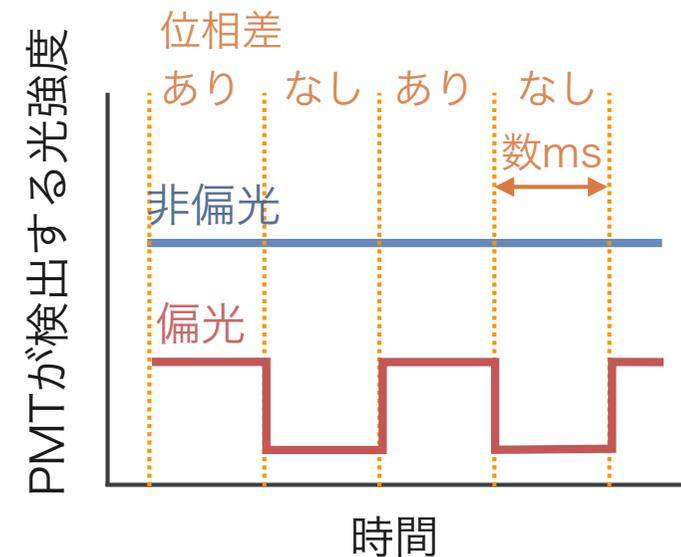
光電子増倍管(PMT)

※ 位相変調以上の光検出速度が必要なので、通常のCCDは不適

Rotating Section

PMT

PMT



光強度時系列の「段差」から偏光度を求める

(測定は1光路で完結)

POPO開発計画

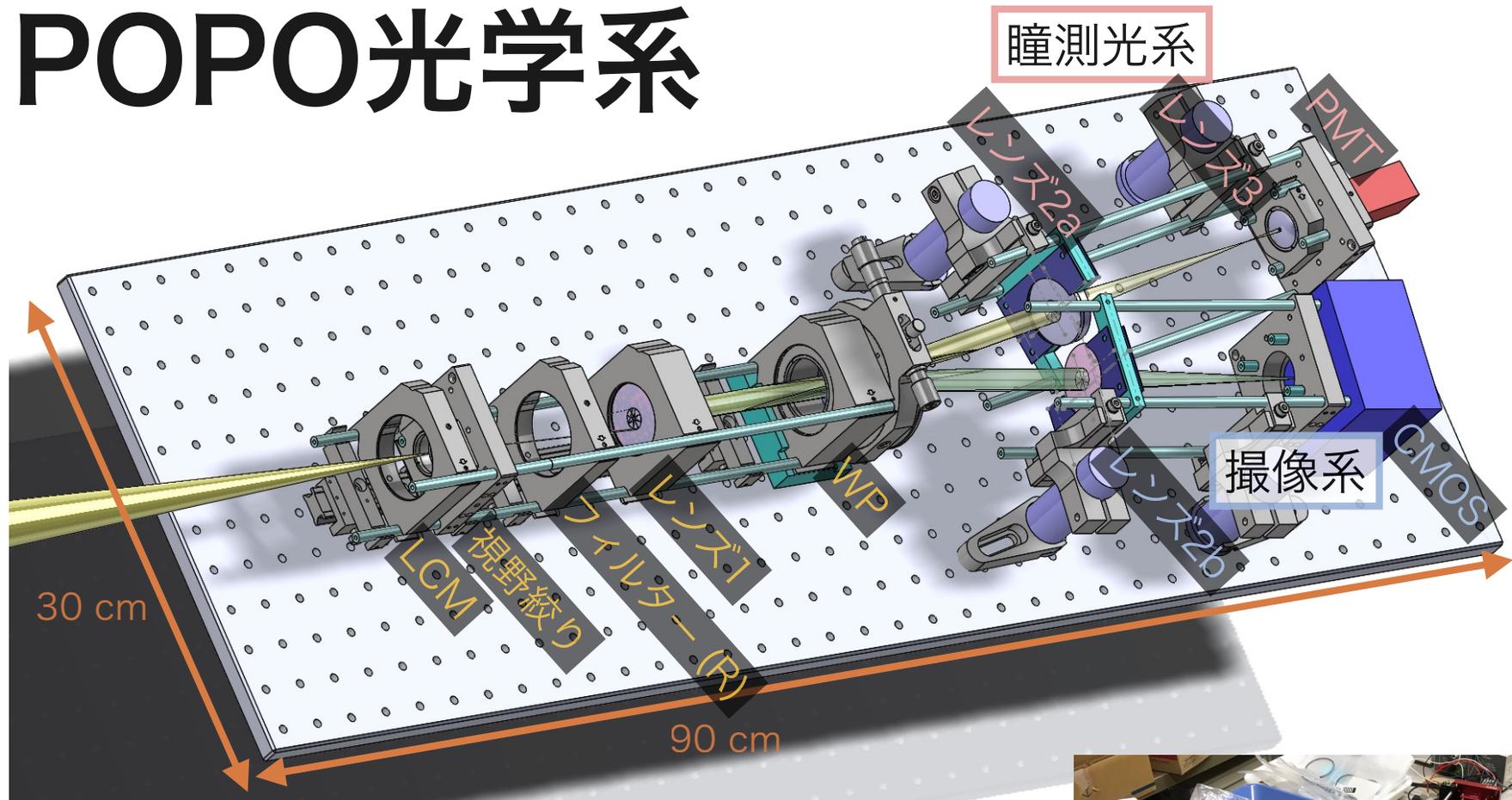
- HIPPI をモデルとして、高速位相変調型の装置 POPO (POLarimeter for Precise Observations) を開発する
 - 目標精密度は、直線偏光度で ppm台、円偏光度で~10 ppm
 - 高速「位相変調&光検出」→ 秒以下の時間分解能も達成可
- HIPPIで使われるPMTは空間分解能を持たないという欠点あり
- 近年、CMOSカメラ等の高速カメラの進化は著しい
- ➡ POPOでは、光検出器をPMTから高速カメラに置き換え、撮像機能を持たせることを目指す。

POPOは **(高い検出精度 or 高い時間分解能) and 撮像機能** を持つ特徴的な装置になる。

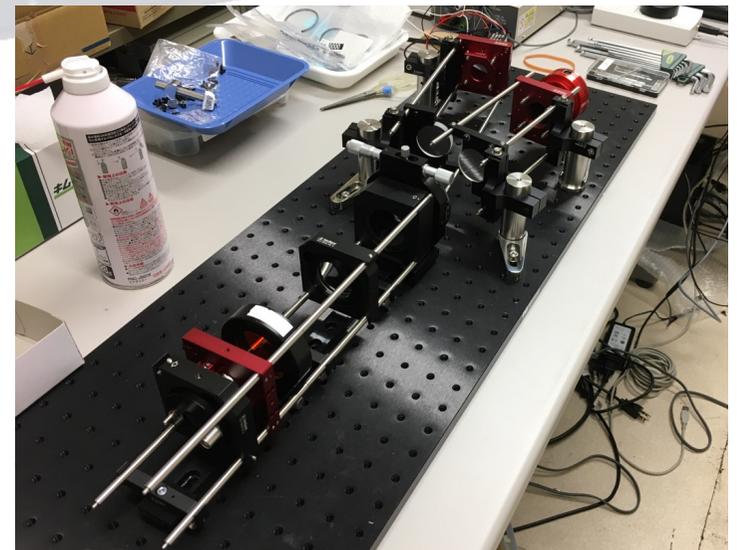
→ 地球照以外にも様々なサイエンス

- 年次計画
 - 21年度: 撮像機能なし/直線偏光のみで開発
 - 22年度: 円偏光測定機能の追加
 - 23年度: 撮像装置化

POPO光学系



- ウォラストンプリズム(WP)で瞳測光系と撮像系に分かれ、それぞれ独立に計測
- 当初、撮像系には仮のCMOSカメラ (ZWO製) を取り付けた
- 最終的には、2光路とも撮像系にする構想

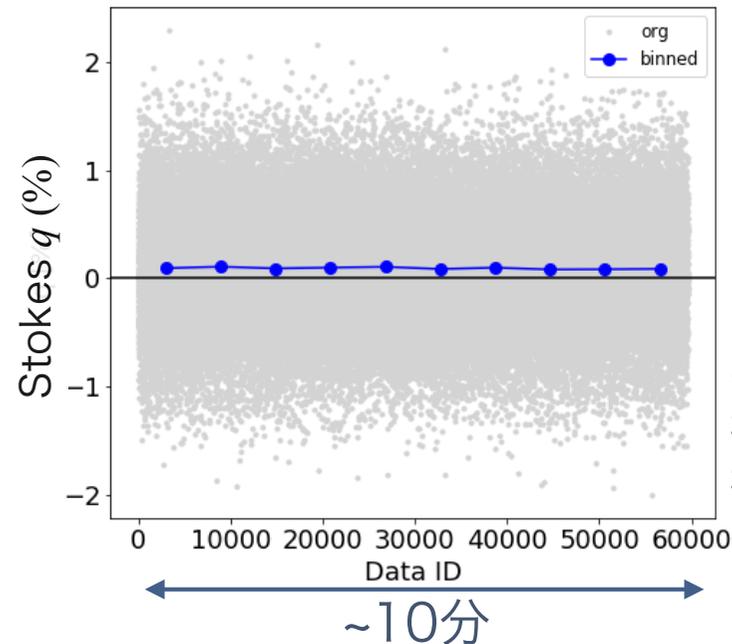


直線偏光・非撮像 試験観測

2021年9月になゆた望遠鏡に取り付け、ファーストライトを達成



▲ なゆた望遠鏡に取り付けられたPOPO



灰色: 個別測定点
青色: 10区間にビンニング

平均値: 9.4×10^{-4} (0.094%)
標準偏差: 5.2×10^{-3} (0.52%)
標準誤差: 2.1×10^{-5} (21ppm)

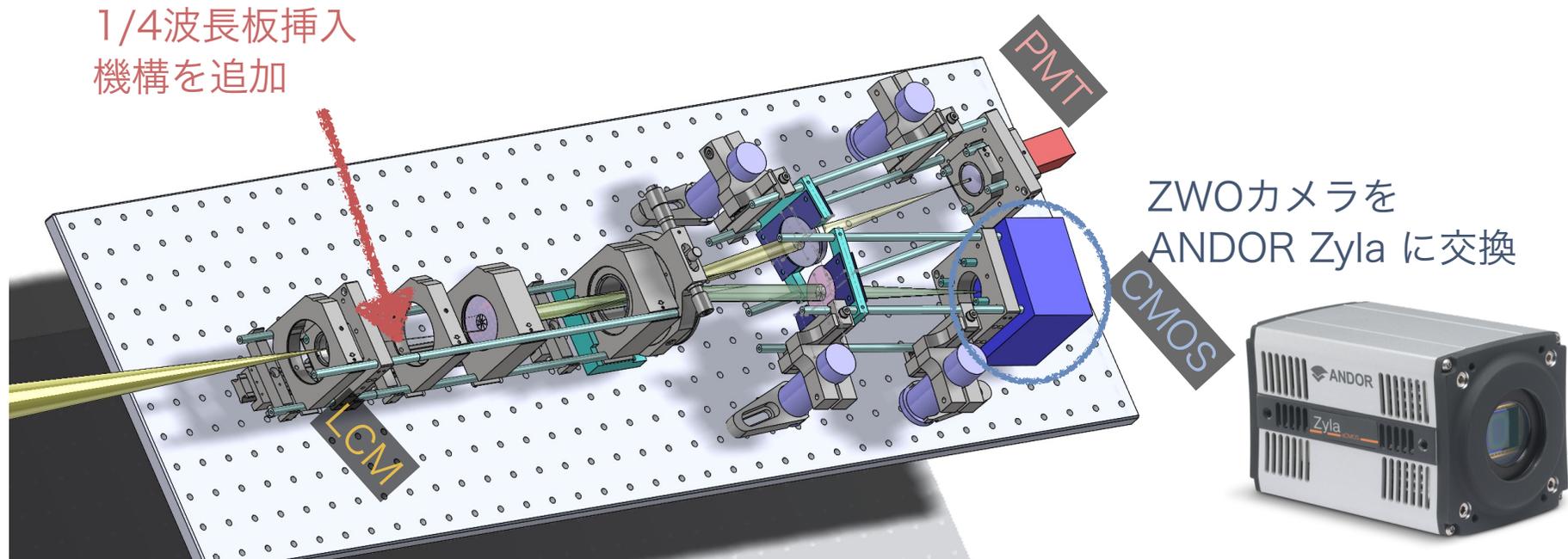
▲ 無偏光標準星 ξ 02 Cet ($R=4.3$ mag)
試験観測から得たストークス q

~10分の観測で標準誤差~20 ppm が得られた

2022年度の進捗

2022年度の目標・計画

- 目標1: 部分的な撮像装置化
 - 仮カメラをANDORのCMOSカメラ「Zyla 4.2 Plus」に交換し、1光路で偏光撮像観測ができるようにする。
- 目標2: 円偏光観測機能の追加
 - LCMの後方に 1/4波長板挿入機構を追加する。

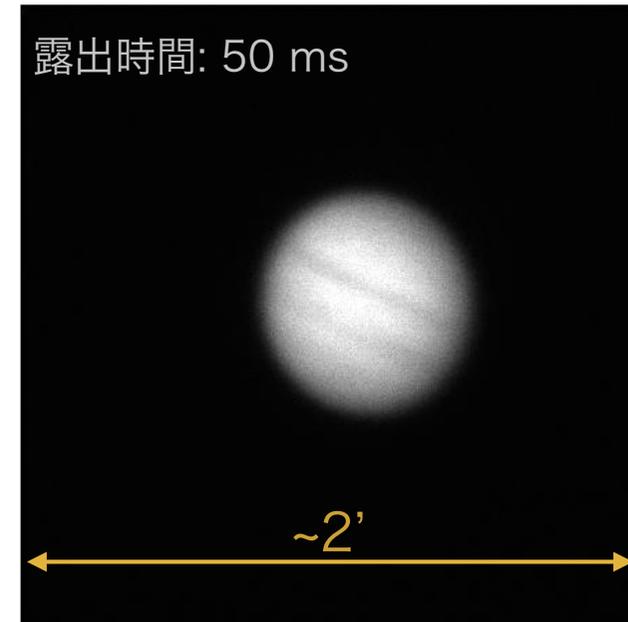


直線偏光撮像 試験観測

木星

- カメラの交換後、2022年7-8月に試験観測を実施

偏光観測ではない普通の撮影→
(フルサイズ 2k x 2k)

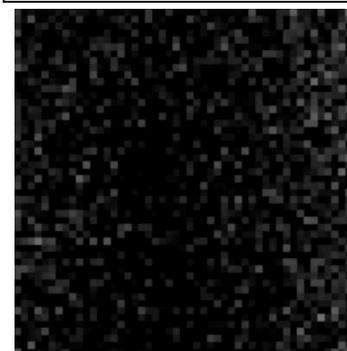


偏光撮像観測の設定例

- 位相変調: 200 Hz
 - 撮像速度: 200 fps (5 ms/枚)
 - 露出時間: 3.9 ms
 - 読出領域: 200 x 200 pix
 - ビンング: 4 x 4 pix (0.2"/binned-pix)
- } 同期

~0.05秒分 (~10枚) 動画

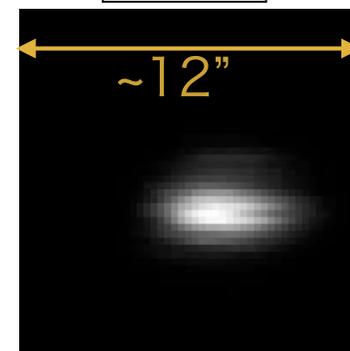
トワイライト



1枚毎に明暗が切り替わる → LCMとの同期がとれている

1秒分 (200枚) 動画

Vega



像が横に伸びるのは WP分離角の波長依存性による

偏光「撮像」のファーストライトを達成

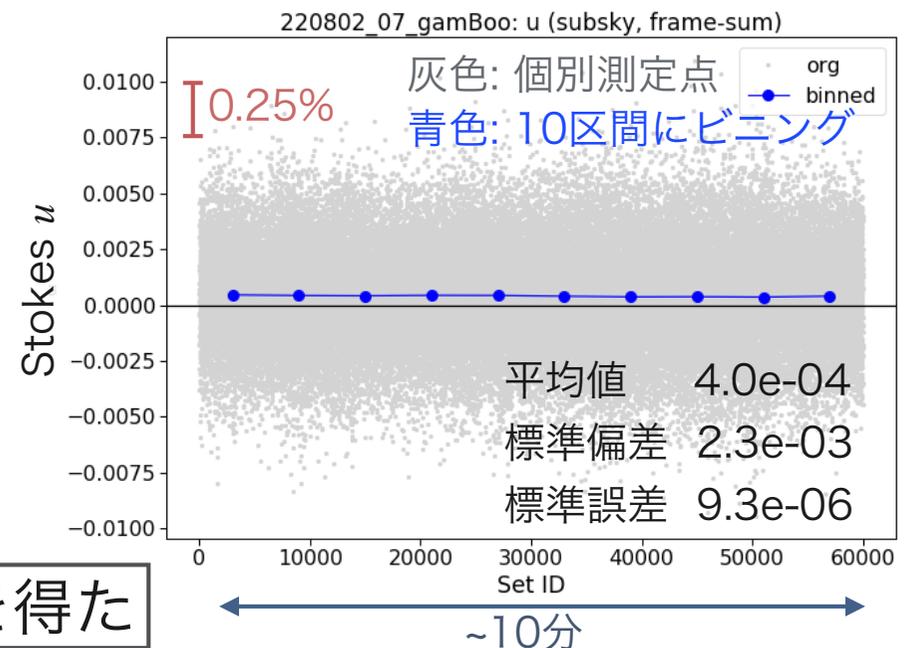
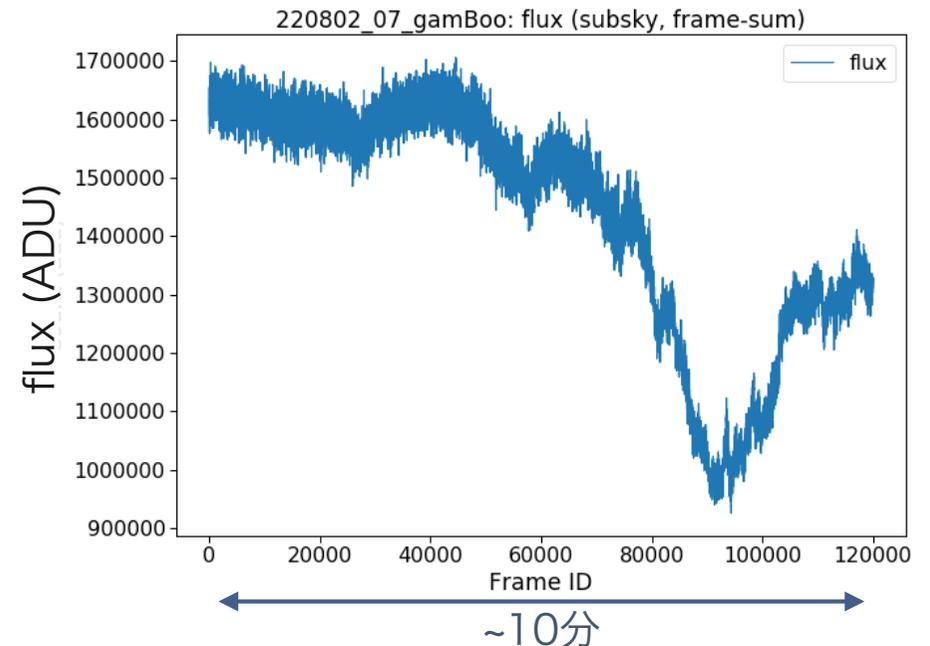
直線偏光撮像 試験観測

- 観測データ

- 天体: 無偏光標準星
 γ Boo (R=2.9 mag)
- 撮影速度: 200 fps
- 撮影枚数: 120,000枚 (~10分)
- 読出領域: 304 x 304 pix
- ビンング: 4 x 4 bin

- 解析

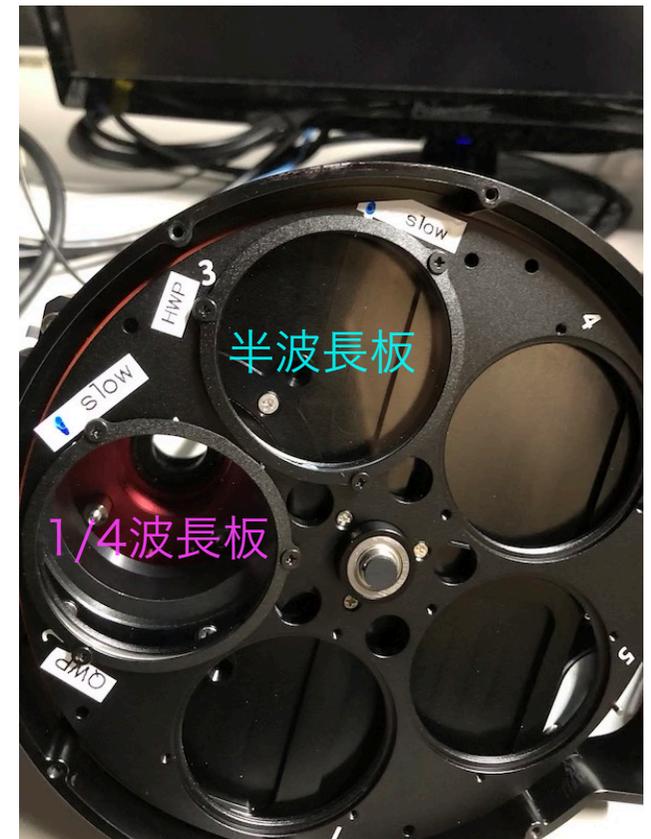
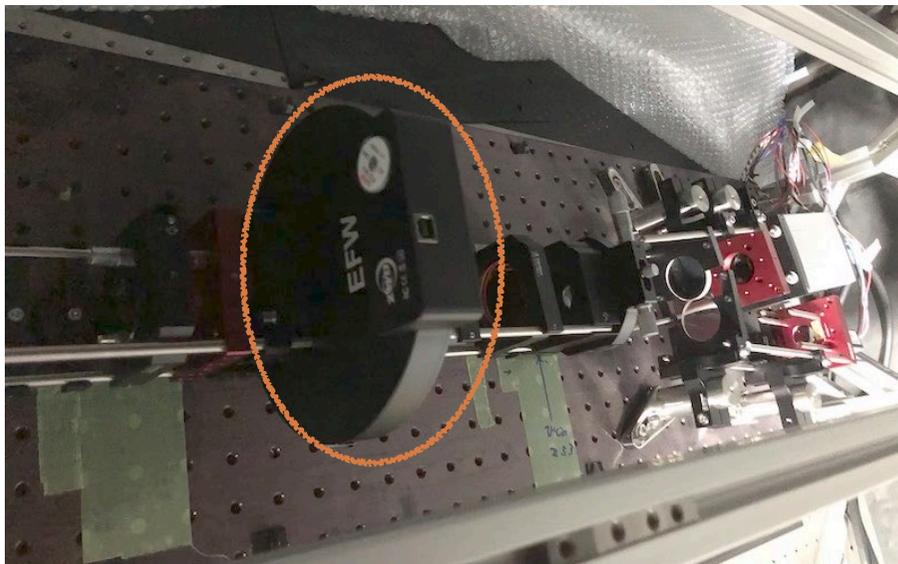
- 画像処理: 直近のスカイ画像を差し引く (だけ)
- 測光: 画像内の全ピクセルのカウン
トを単純加算



簡易解析だが、標準誤差 ~10 ppm を得た

1/4波長板挿入機構の実装

- 1/4波長板は円偏光を直線偏光に変換する
 - 電動フィルターホイールで挿入待避
 - 1/4波長板の遅軸方位は基準方位に対して 45°
 - ついでに、半波長板（遅軸方位= 22.5° ）も装填
 - 直線偏光方位を 45° 回転させる
- q 観測 と u 観測の切替時間を短縮



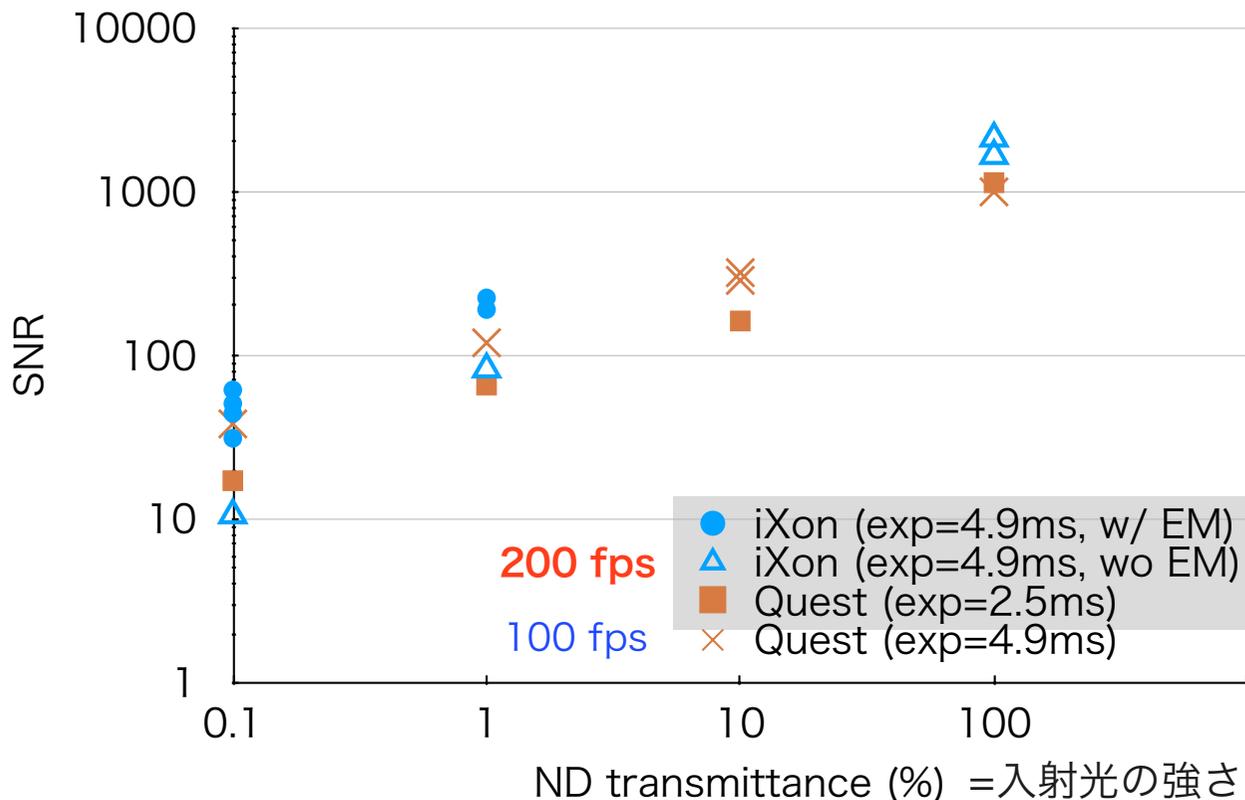
2023年春に円偏光試験観測を予定

2台目高速カメラの選定・入手

- 候補機種:
 - ANDORのEMCCDカメラ「**iXon Ultra 897**」
 - EM = electron-multiplying = 電子増倍
 - 浜松ホトニクス社のCMOSカメラ「**ORCA-Quest**」
- デモ機を室内実験で比較



iXon vs Quest



200 fpsで比べると **iXon** のほうが **Quest** よりも SNRが良い

(同じ撮影速度のとき、露出時間が iXonの方が長いから)



iXonを選定・入手した。

進捗まとめと今後

- 進捗

- 2光路のうちの1つに、ANDORのCMOSカメラ「Zyla 4.2 Plus」を取り付けた
- 2022年7月、直線偏光**撮像**観測を初実施
 - R=2.9等、~10分連続観測で、標準誤差 ~10 ppm
- 円偏光観測のため、1/4波長板挿入機構を実装した
- 2台目のカメラとして、ANDORのEMCCDカメラ「iXon Ultra 897」を選定・入手した

- 今後

- 2023年春: **円偏光**撮像観測を初実施
- 2023年末まで: 2台目カメラを取り付け、完全な撮像装置化
- 2023年度でハードウェアの開発に区切りをつけたい

謝辞

本研究は以下のご支援を受けております。
ご支援ありがとうございます。

- 兵庫県立大学 特別研究助成金
- 住友財団 基礎科学研究助成
- 国立天文台 共同開発研究
- ひょうご科学技術協会 学術研究助成
- 日本学術振興会 科研費基盤C