

# 国際大気球実験 SUNRISE-3/SCIP

川畑佑典<sup>1</sup>, 勝川 行雄<sup>1</sup>, 久保雅仁<sup>1</sup>, 大場崇義<sup>2</sup>, 松本琢磨<sup>3</sup>, 石川遼太郎<sup>4</sup>,  
清水敏文<sup>5</sup>, 原弘久<sup>1</sup>, 浦口史寛<sup>1</sup>, 都築俊宏<sup>1</sup>, 篠田一也<sup>1</sup>, 田村友範<sup>1</sup>, 末松芳法<sup>1</sup>,  
内藤由浩<sup>6</sup>, J. C. del Toro Iniesta<sup>7</sup>, D. Orozco Suarez<sup>7</sup>, M. Balaguer Jimenez<sup>7</sup>,  
C. Quintero Noda<sup>8</sup>, S. K. Solanki<sup>2</sup>, A. Korpi-Lagg<sup>2</sup>

1. 国立天文台, 2. マックスプランク太陽系研究所, 3. 名古屋大学, 4. 核融合研, 5. ISAS/JAXA, 6. 総研大,  
7. アンダルシア天体物理学研究所, 8. カナリア天体物理学研究所

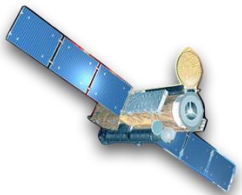
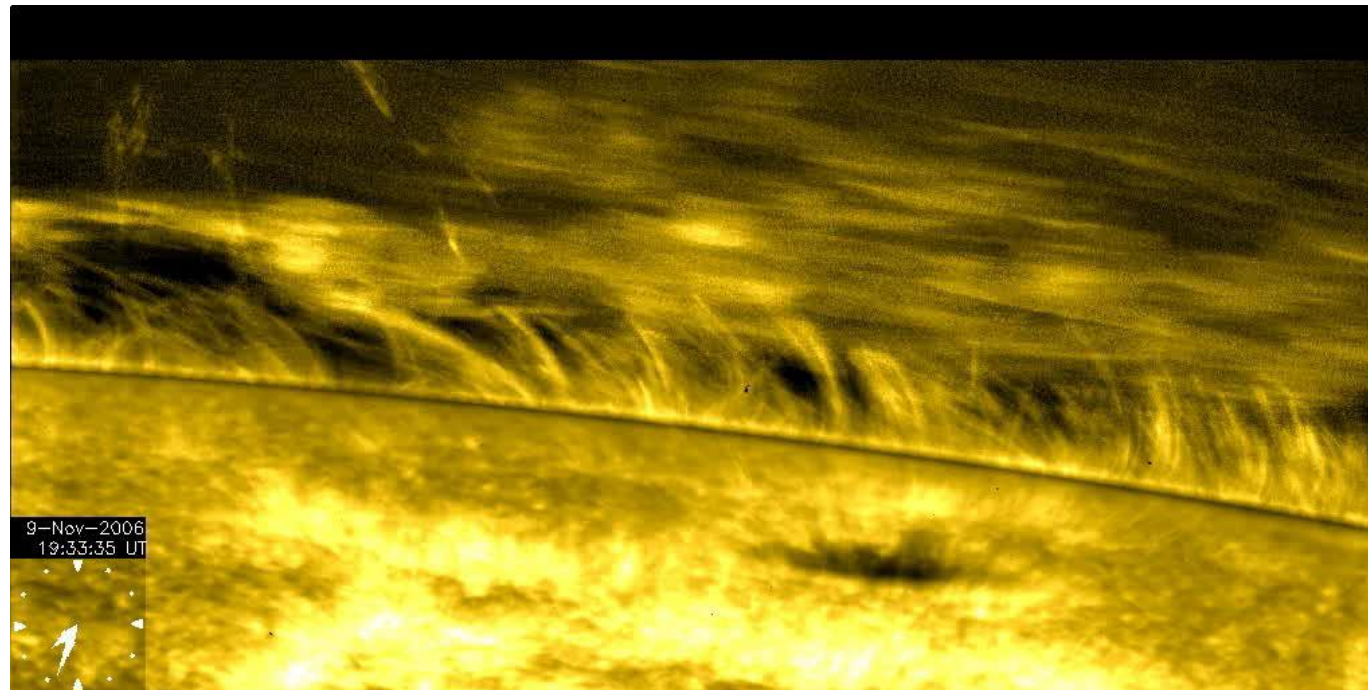
2024/11/25-26 可視赤外観測装置技術ワークショップ  
@東京大学天文学教育研究センター



# ダイナミックな彩層を探る

- 光球から彩層へのエネルギー輸送
  - 磁気流体波動やジェットの動的な現象
- <=光球から彩層に至るまでの太陽大気の物理量(温度、速度場、磁場)の3次元構造の取得

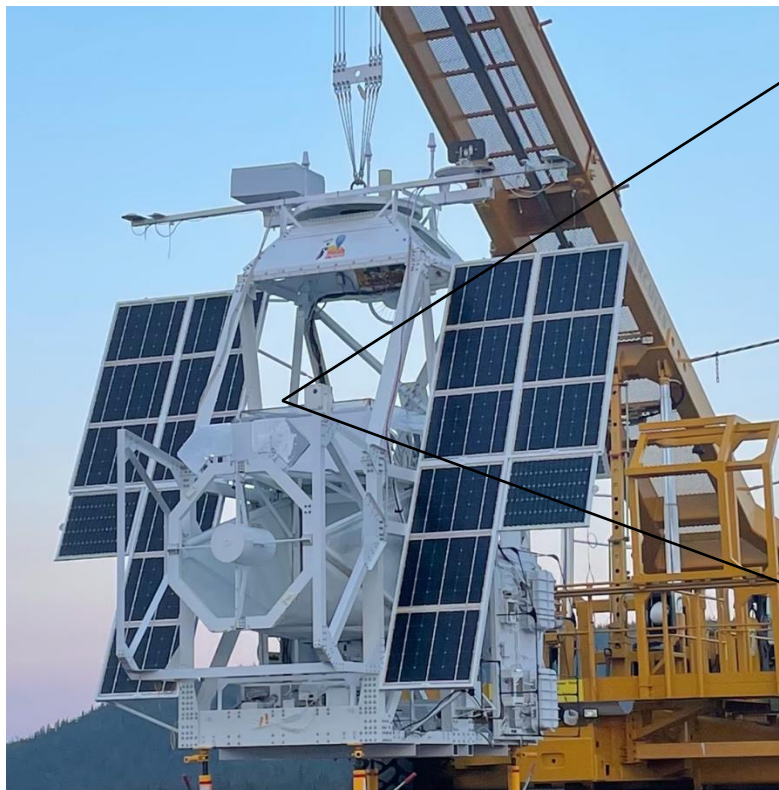
「ひので」で明らかになったダイナミックな彩層の様子





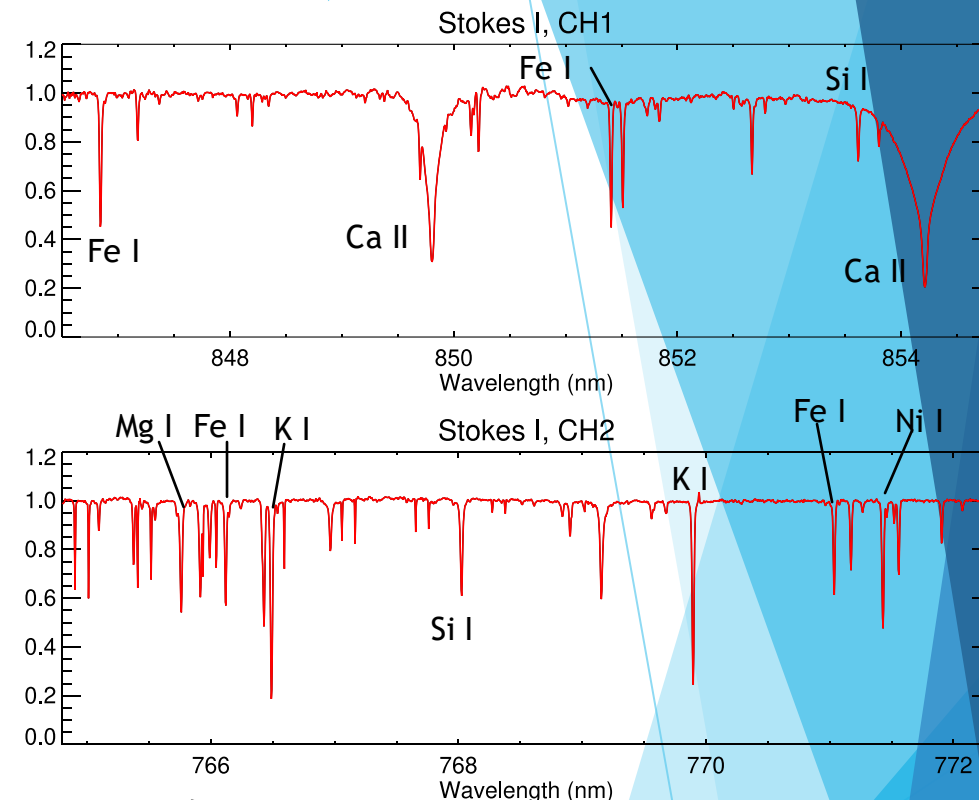
# SUNRISE気球実験

- ドイツ、スペイン、日本、アメリカによる国際共同実験
- シーイングフリーに近い環境と高精度な長時間観測
- これまでに2度の飛行実績(2009年, 2013年)
- 日本は3度目の飛行に初参加 (SUNRISE-3)
- 口径1 m (ひのでの2倍): 飛行体の太陽望遠鏡で世界最大  
大口径による高精度・高空間分解能観測
- 2024年7月に飛行・観測に成功！

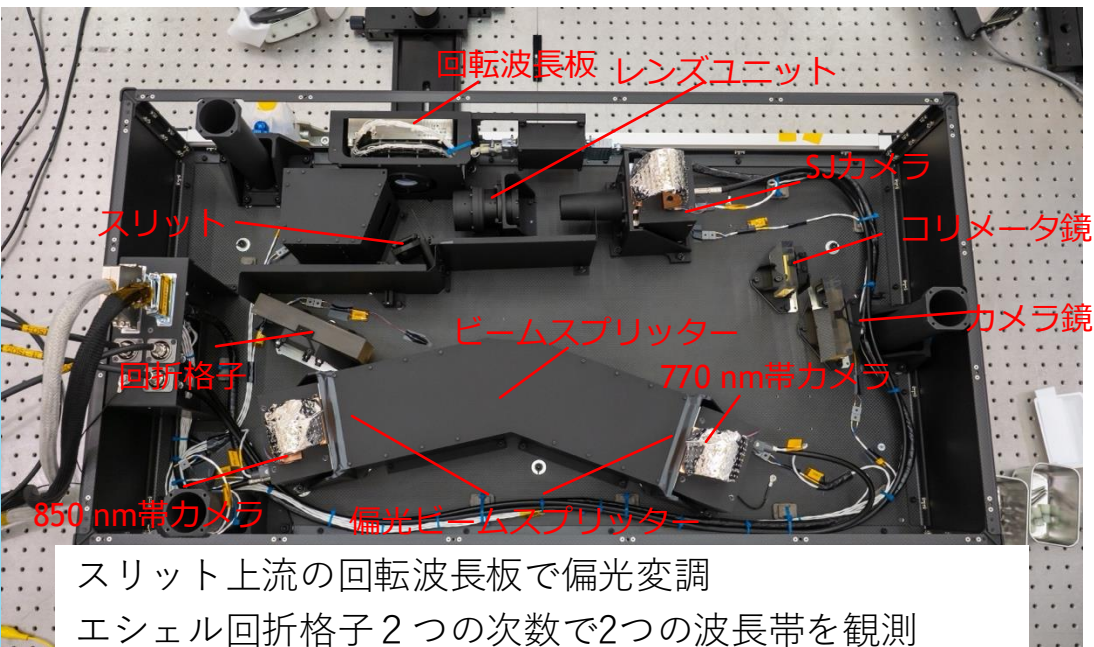
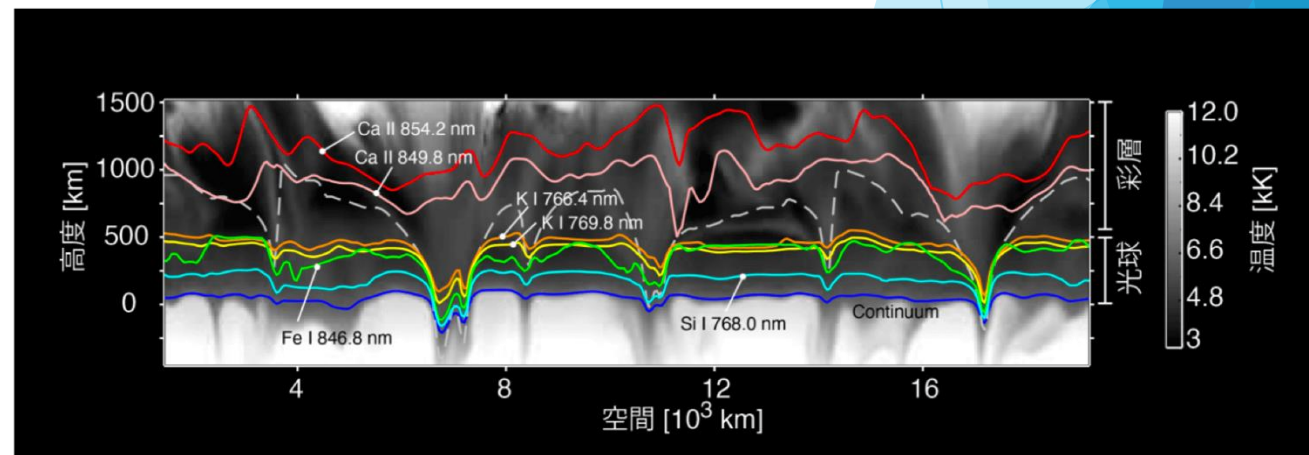


# SCIP(Sunrise Chromospheric Infrared spectropolarimeter)

- 近赤外領域(770 nm帯と850 nm帯の2 ch)の偏光分光観測
  - 高空間分解能: 0.21秒角( $\Phi 1\text{m}$ の回折限界)
  - 波長分解能  $\lambda/\Delta\lambda$ :  $2 \times 10^5$
  - 時間分解能: 1-10秒 (SP), 32 ms (スリットジョー)
  - 高精度偏光観測: Ca II 線で~5 Gの磁場を測定: 0.03%(1 $\sigma$ )の偏光度測定(10秒露光)
  - SCIP単体の開発、試験の大部分は国立天文台先端技術センターで実施
- 洗浄、ベーキング、組立調整、偏光試験、太陽光試験、熱真空試験



多スペクトル線観測で光球-彩層をシームレス観測





# SUNRISE-3のこれまで(2022-2024)

2022/7/10: SUNRISE-3 飛翔=>ゴンドラの不具合により観測できず

2022気球回収後-2024/4

- 望遠鏡の主鏡、副鏡の再コーティング
- 焦点面装置のアライメント
- 射場での飛翔前試験
- ドイツ マックスプランク太陽系研究所でのリモート運用体制の整備

2024/7/10-7/16: SUNRISE-3 再飛翔

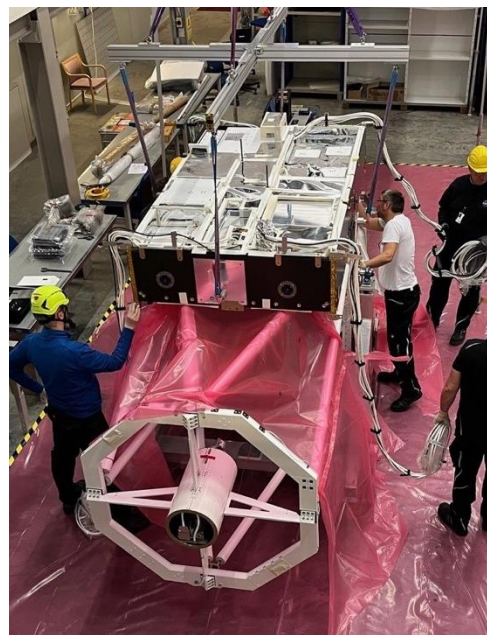
望遠鏡の主鏡、副鏡の再コーティング



再アライメント



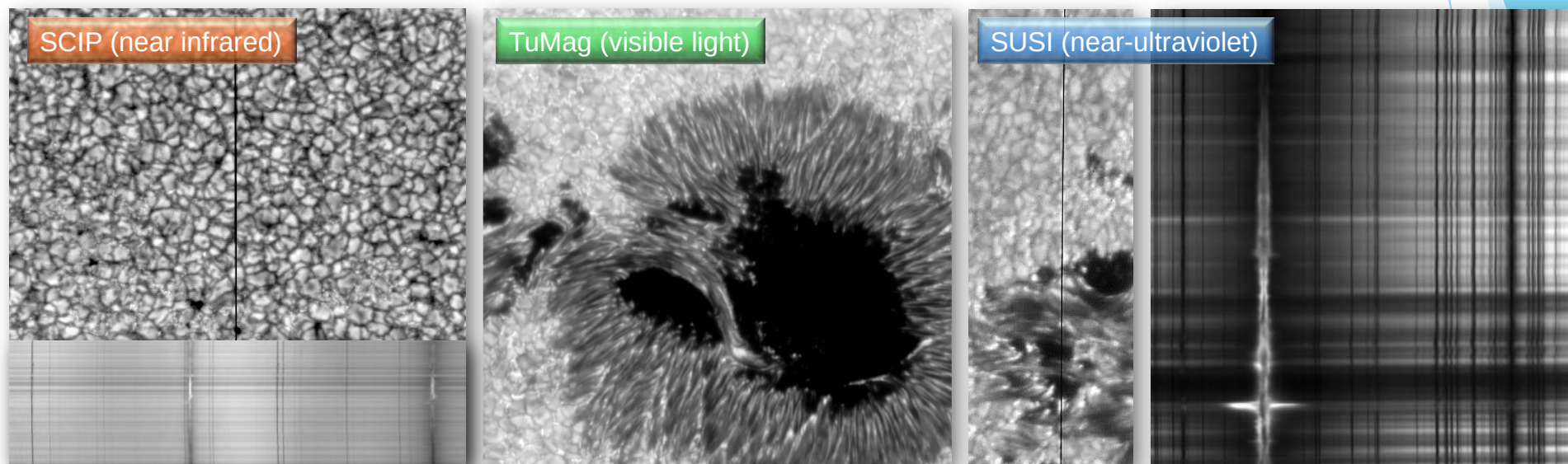
射場での再組み立て、試験@Kiruna



ドイツでの運用室



# SUNRISE-3 観測データ



**SUNRISE III “First Light”:** These raw images and spectrum are unprocessed, low-resolution ‘thumbnails’, directly transmitted via satellite communication during the flight. The high-resolution data will be available only after recovery, and will reveal even more spectacular details about the atmosphere of the Sun. Such high-quality images would not have been possible without the excellent optical quality of all subsystems, including the telescope and the excellent image stability provided by the combination of Gondola and Correlating Wavefront sensor.

3 機器合計で200 TBに及ぶデータを取得  
SCIPは約25 TB  
データは回収され、8月に日本に到着

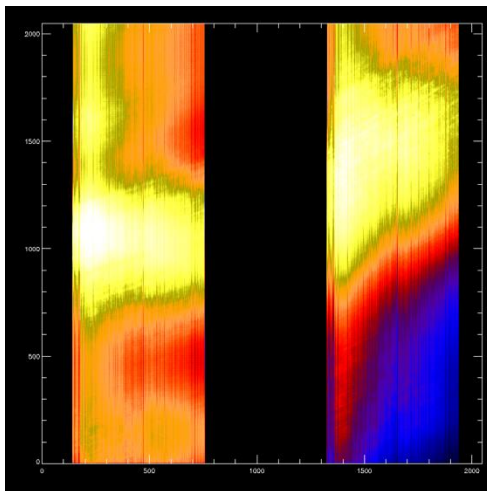
# データの校正(現在進行中)

- ダーク・バイアス補正
- フラット補正
- 波長校正  
(波長サンプリング補正、スペクトルの曲がり補正)
- 偏光校正

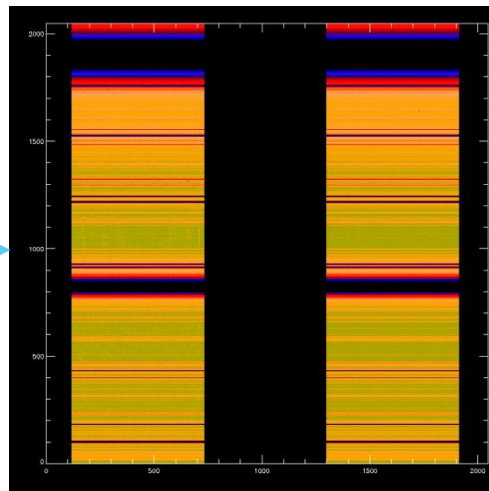


# フラット補正、波長校正

地上試験でLED光源を入射して得られたスペクトル

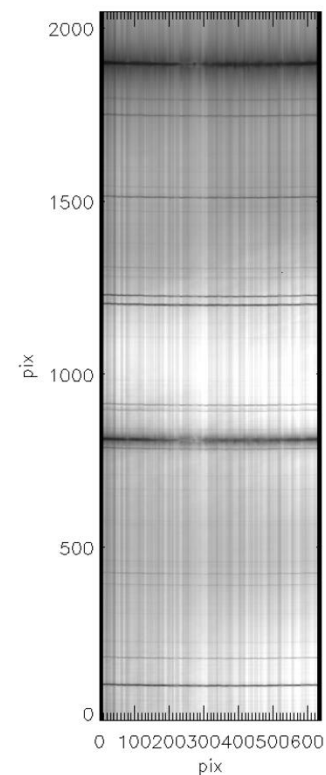


飛行中フラット用に取得したデータ(望遠鏡の指向を振りながら観測)に適用

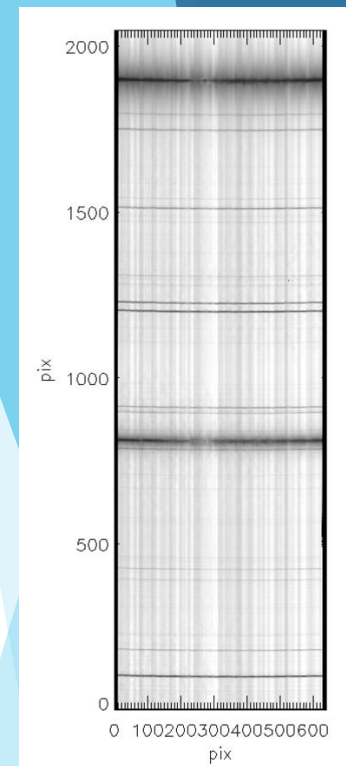


LEDフラット、アトラスとの比を科学観測データに適用

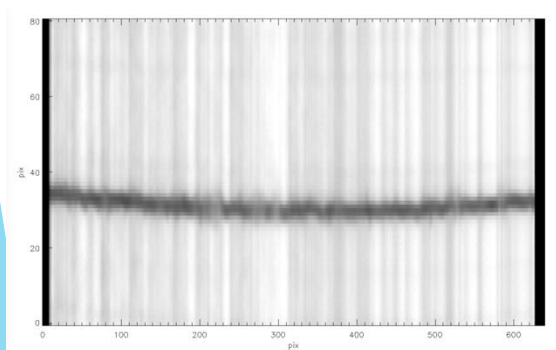
フラット補正前



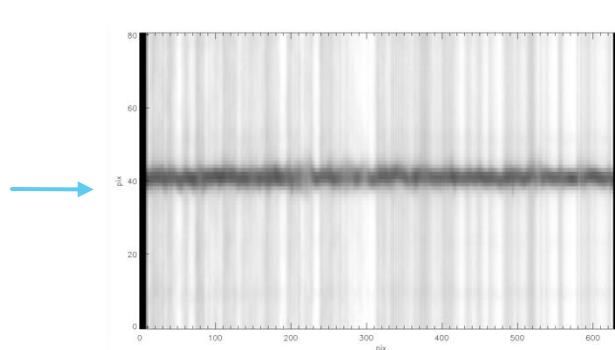
フラット補正後



波長校正前(拡大図)



波長校正後(拡大図)



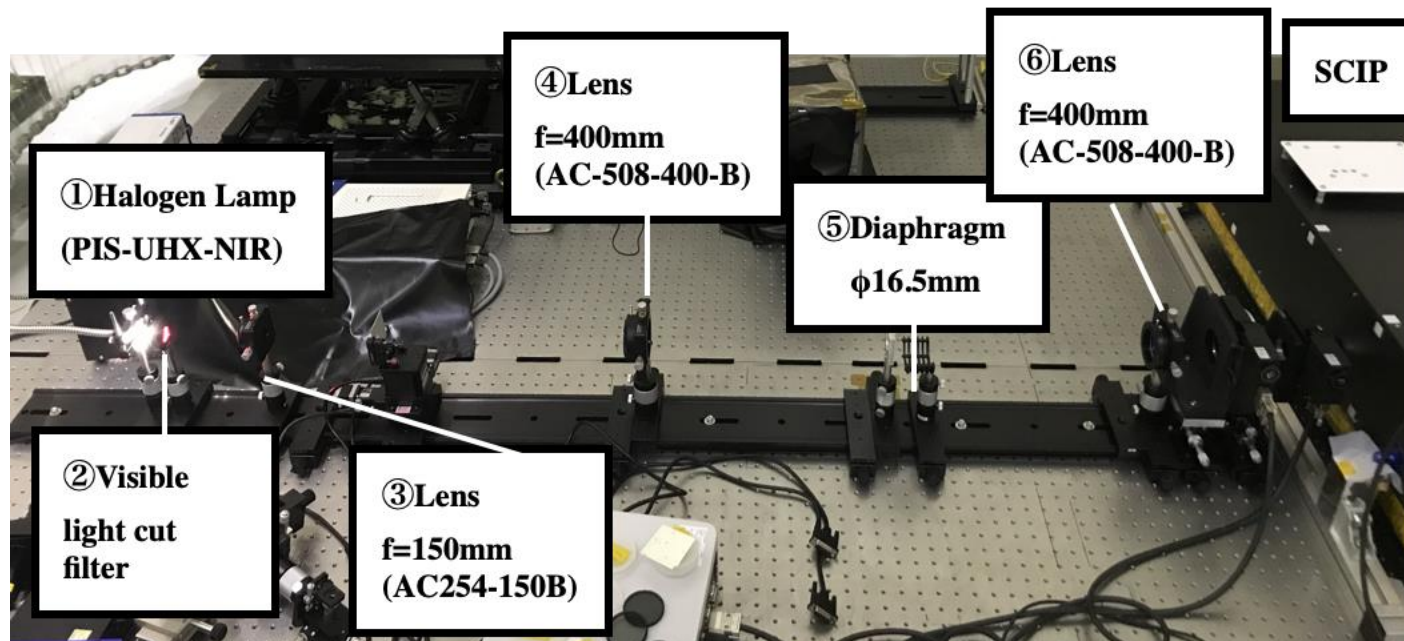
- フラット用に取得したデータに対し、各スリット位置で吸収線を検出。二次関数fitしAtlasと比較し、波長位置を決定。
- スペクトルの曲がり補正を科学観測に適用

波長

空間



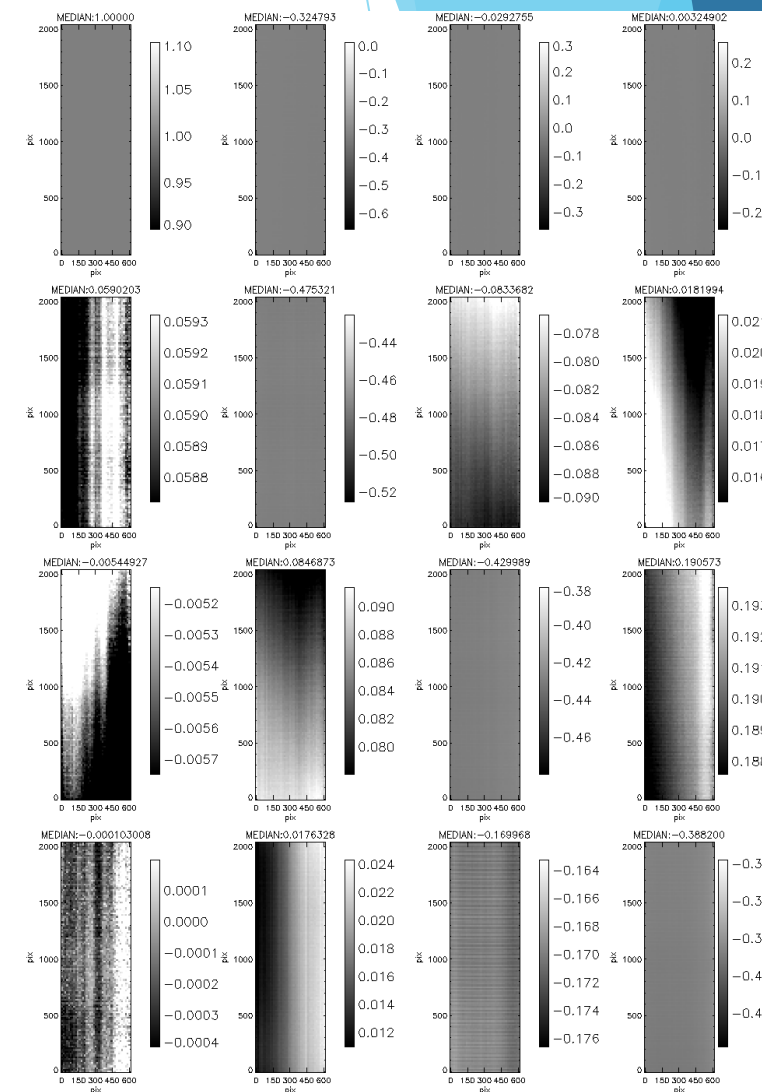
# 偏光校正:地上試験



$$S_{obs} = X S_{sun}$$

既知の偏光をSCIP入射し、測定データからResponse Matrix  $X$ を導出  
(Kawabata et al. 2022)  
SCIP単体での  
温度依存性  
測定の再現性を確認  
その後、PFIに搭載後、望遠鏡に搭載後にも偏光試験を行った。

地上試験(望遠鏡搭載後@射場)  
で取得したResponse Matrix



# 偏光校正:科学観測への適用

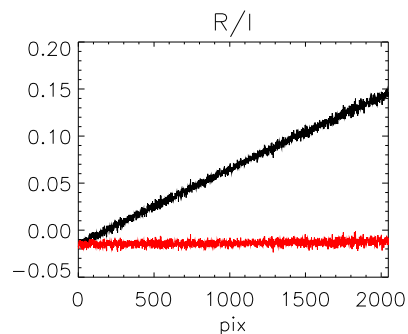
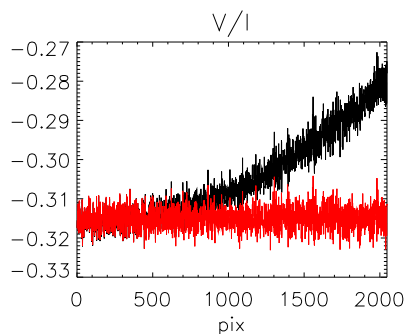
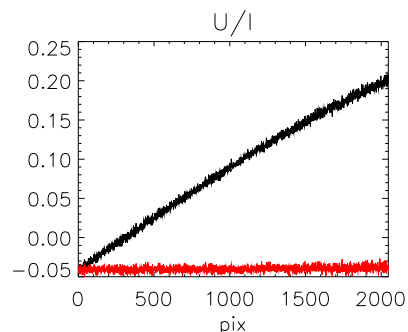
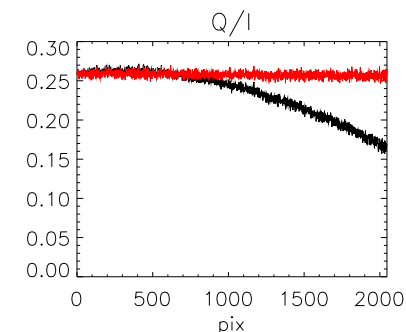
## Rolling shutter起源のクロストークの補正

$$Q'_d = Q_d \cos 4\Delta\psi - U_d \sin 4\Delta\psi,$$

$$U'_d = U_d \cos 4\Delta\psi + Q_d \sin 4\Delta\psi,$$

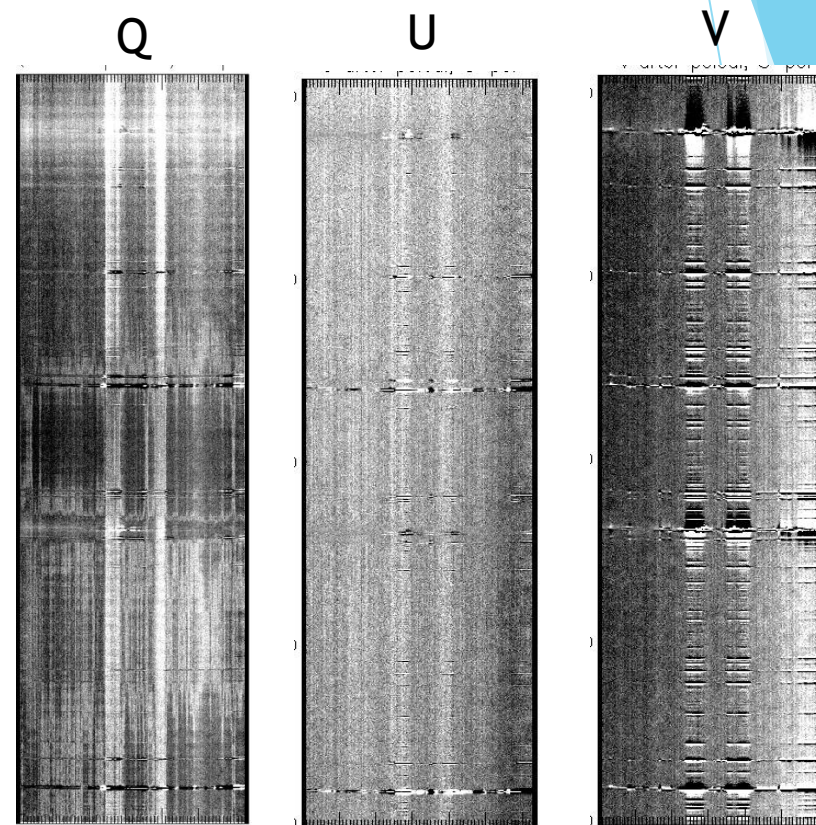
$$V'_d = V_d \cos 2\Delta\psi + R_d \sin 2\Delta\psi,$$

$\Delta\psi$ :露光タイミングの違いによる回転波長板の角度のずれ



補正前  
補正後

地上試験で取得したResponse Matrix  
を科学観測データに適用

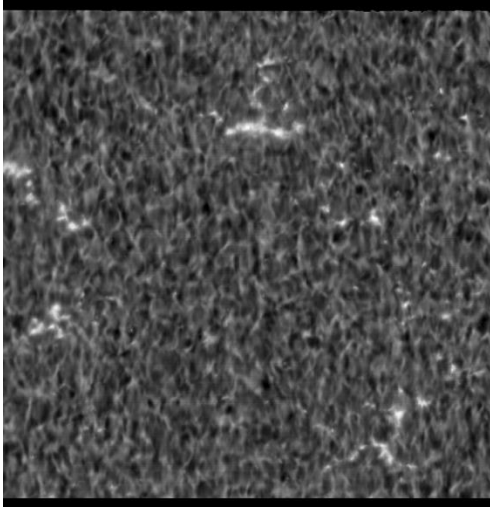


Stokes I 起源と思われるパターンが残存  
除去方法を試行錯誤中

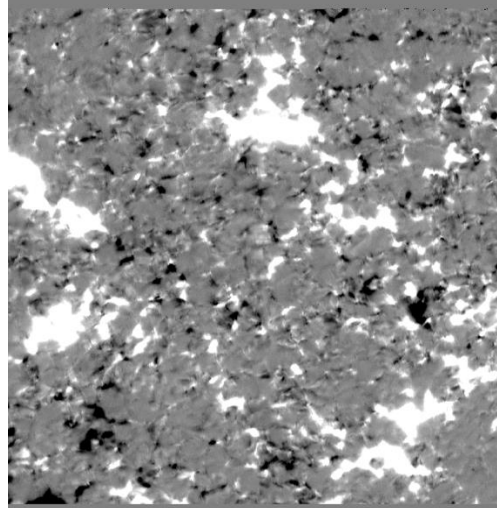


# SCIPの観測データ(静穏領域)

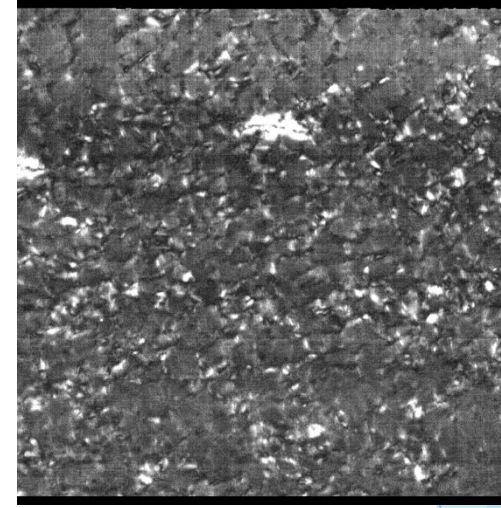
Fe I 846.8 nm line core(光球)



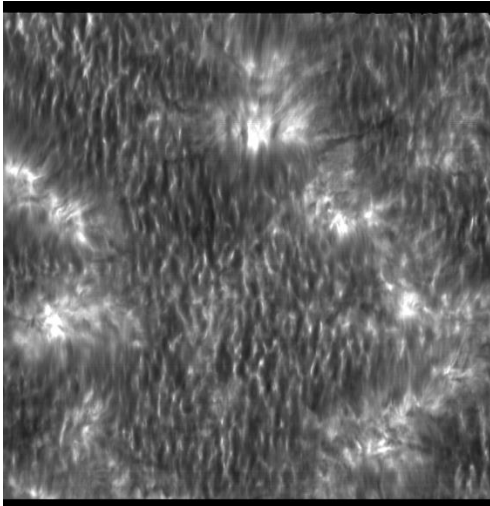
Fe I 846.8 nm 円偏光(光球)



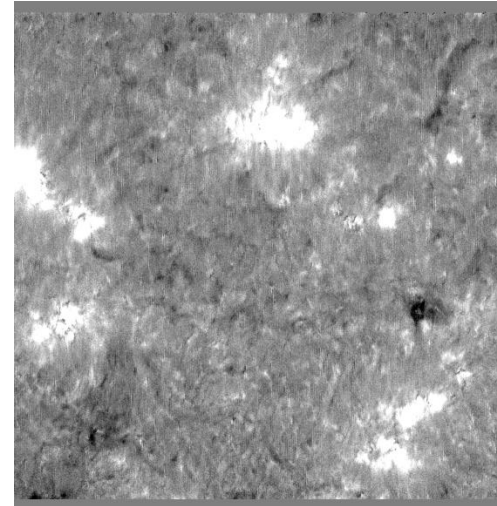
Fe I 846.8 nm 直線偏光(光球)



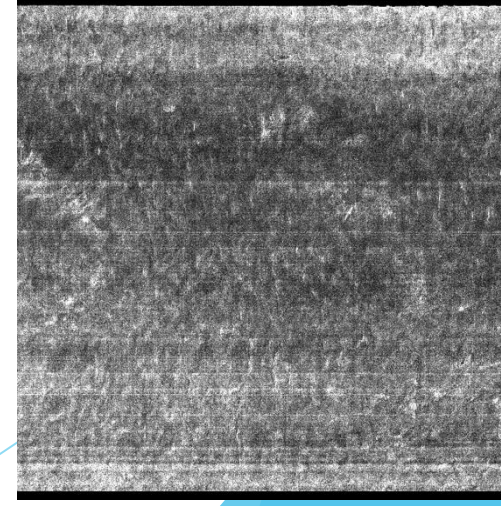
Ca II 854.2 nm line core(彩層)



Ca II 854.2 nm 円偏光(彩層)



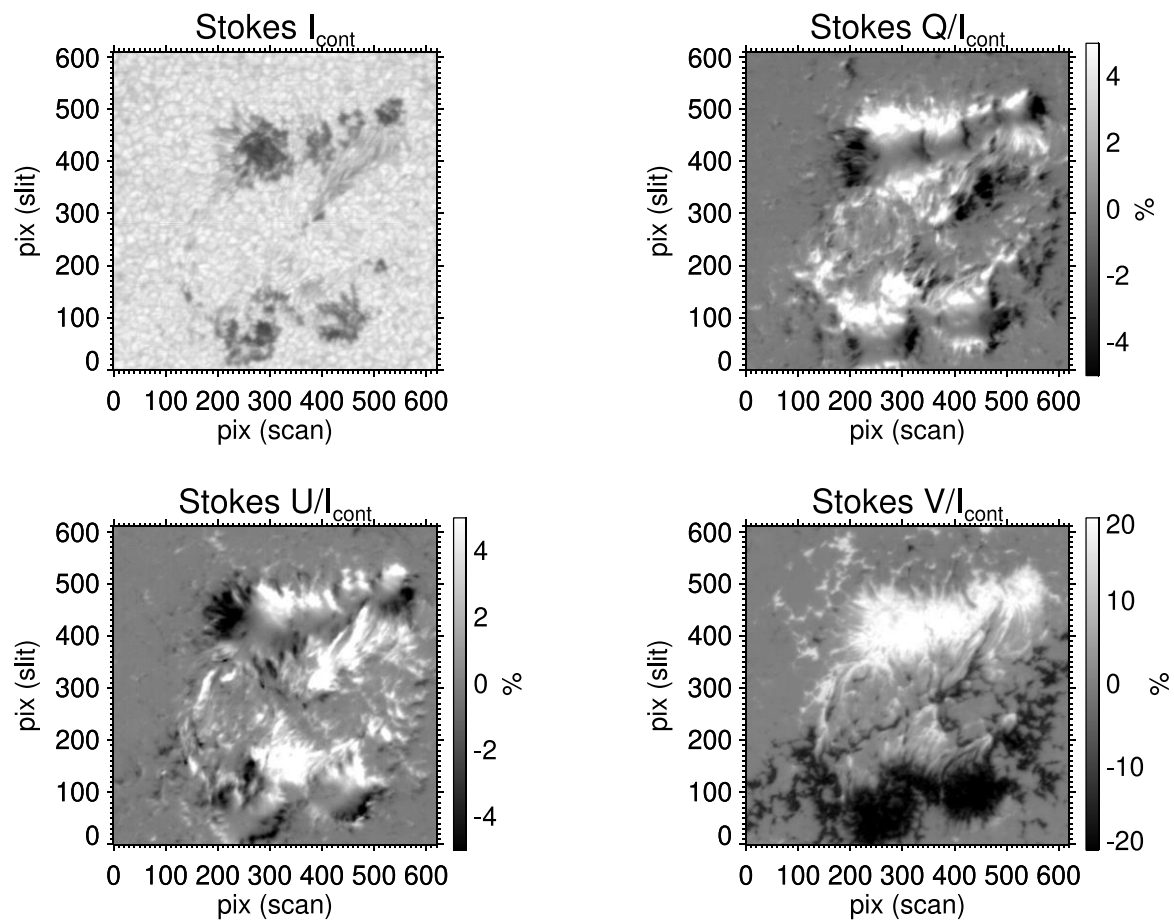
Ca II 854.2 nm 直線偏光(彩層)



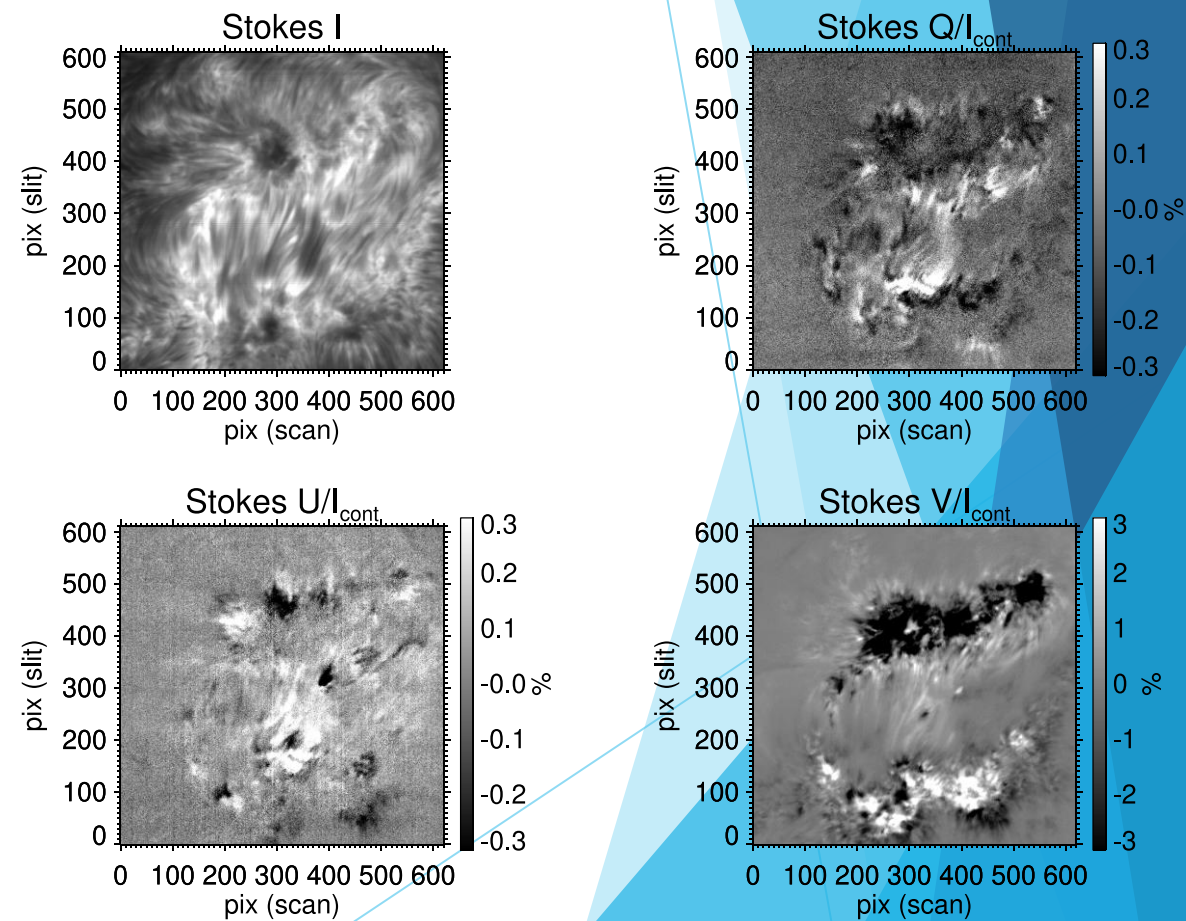


# SCIPの観測データ (活動領域)

光球 (Fe I 846.8 nm)



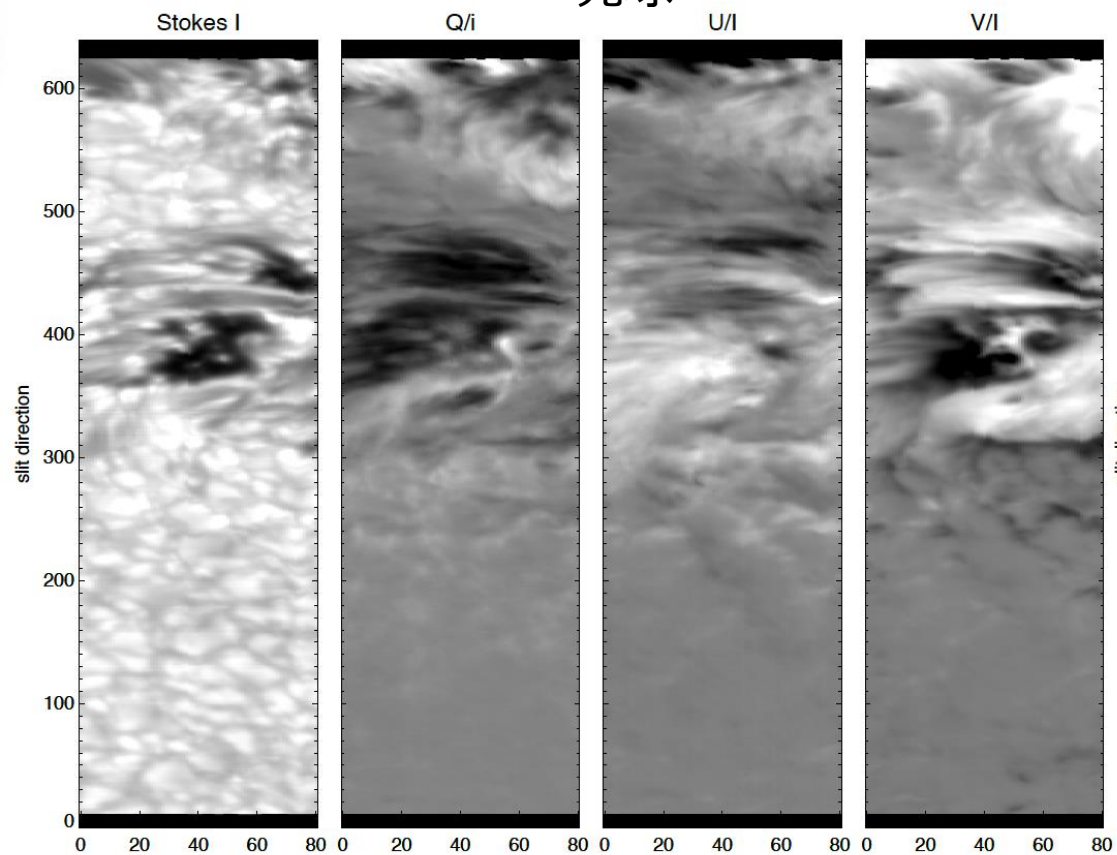
彩層 (Ca II 854.2 nm)



# SCIPの観測データ (フレア)

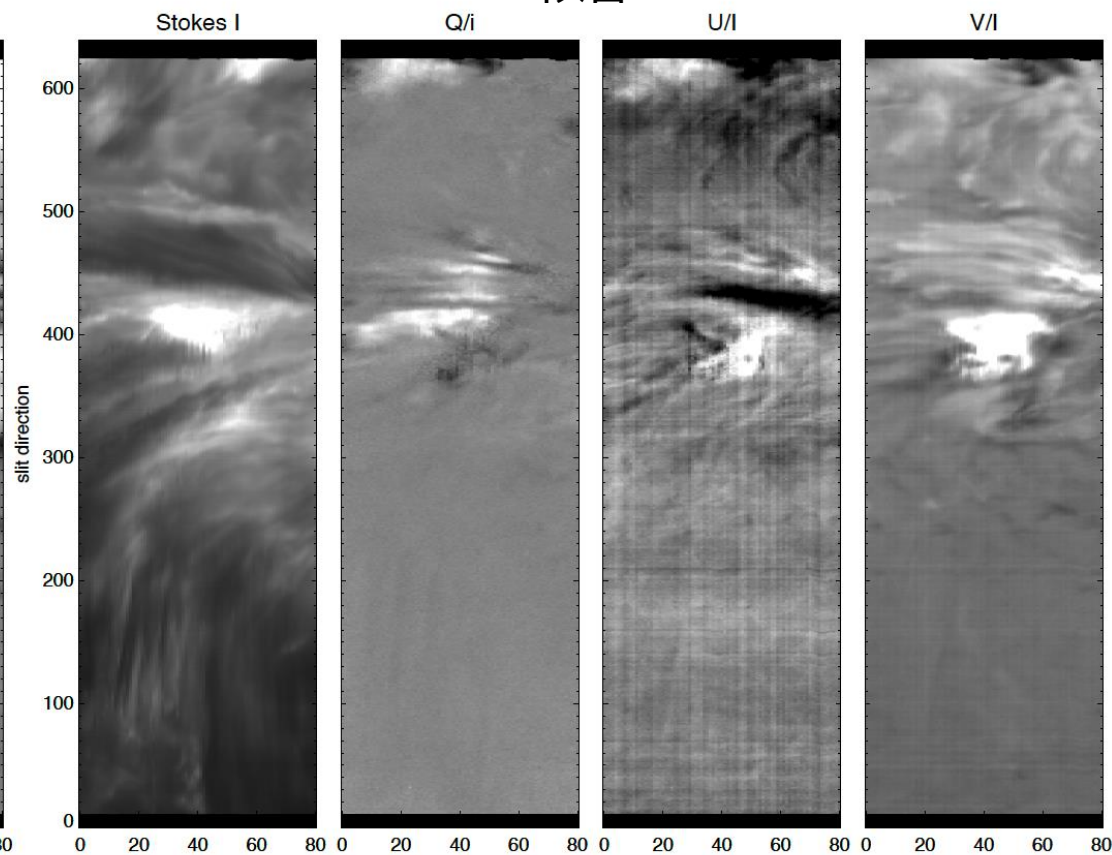
Fe I 8468

光球



Ca II 8542

彩層





# 論文成果

## ➤ 全体

Katsukawa et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 11447, 114470Y

## ➤ 光学設計

Tsuzuki et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 11447, 11447AJ

## ➤ 構造設計

Uraguchi et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 11447, 11447AB

## ➤ 回転波長板、カメラ同期、onboard処理

Kubo et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 11447, 11447A3

Kubo et al. 2023, JATIS, 9, 034003

## ➤ スキャンミラー

Oba et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 11445, 114454F

Oba et al. 2022, Solar Physics, 297, 9, 114

## ➤ 光学・偏光試験

Kawabata et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 12184, 1218427

Kawabata et al. 2022, Applied Optics, 61, 32, 9716-9735

## ➤ 科学検討

Quintero Noda et al. 2017, Monthly Notices, 464, 4, 4534-4543

Quintero Noda et al. 2017, Monthly Notices, 470, 2, 1453-1461

Quintero Noda et al. 2017, Monthly Notices, 472, 1, 727-737

Quintero Noda et al. 2018, A & A, 610, A79

Quintero Noda et al. 2019, Monthly Notices, 486, 3, 4203-4215

Matsumoto et al. 2023, Monthly Notices, 523, 1, 974-981

Kawabata et al. 2024, ApJ, 960, 26

# まとめ

- 2024/7にSUNRISE-3の飛翔に成功
- SCIPは25 TBのデータを無事取得・回収
- 1年後のデータ公開に向けてデータ校正は現在進行中
- 光球から彩層において高精度な偏光観測を実現
- 校正手法の改善と並行してデータ解析をすすめる予定

【苦労していること、これからやらなきゃいけないこと】

[フラット補正]

スリット幅の成分を取り除くのが難しい。現状0.1px単位で位置合わせをしているが、補正しきれていない。

CH1は波長方向端に幅の広い吸収線があるため、フラット補正に難しさがあるが、アトラスを使うことで克服できそう。むしろアトラスを使えないCH2の方が難しい。

数ヶ月かけてこれらの課題をある程度克服した成果として、時間変動するフラットが見えるようになってしまった。

[偏光校正]

- Response Matrix処理後の残存したクロストーク処理
- Stokes Qの正の向き決定(観測中に視野が回転)
- 回転波長板の回転誤差の補正