



SUNRISE-3気球望遠鏡 近赤外偏光分光装置の開発

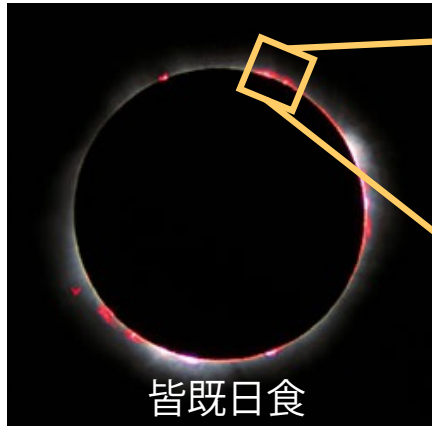
勝川行雄¹, J. C. del Toro Iniesta⁴, S. Solanki⁵

久保雅仁¹, 原弘久¹, 清水敏文², 大場崇義¹, 川畑佑典¹, 末松芳法¹, 浦口史寛¹

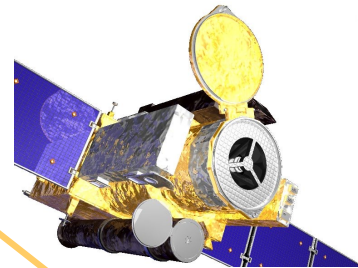
都築俊宏¹, 納富良文¹, 田村友範¹, 篠田一也¹, 松本琢磨¹, 石川遼子¹, 鹿野良平¹ C. Quintero
Noda⁶, 永田伸一³, 一本潔³

1: 国立天文台 2: ISAS/JAXA 3: 京都大 4: IAA-CSIC 5: MPS 6: IAC

活動的な「彩層」の理解を目指して



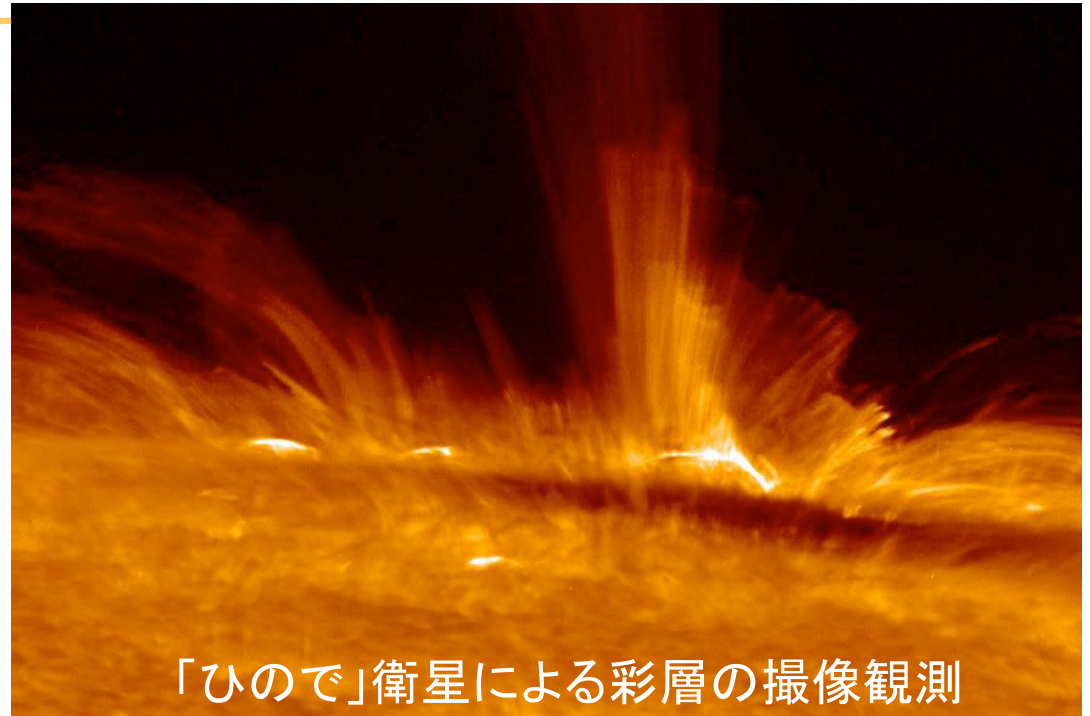
皆既日食



「ひので」衛星
(2006-)

動的現象が磁気エネルギー輸送・散逸を担っている

- 波動モード変換, 衝撃波, ジェット



「ひので」衛星による彩層の撮像観測

彩層の特徴

- 大きなダイナミックレンジ (密度が5-6桁変化)
- 弱電離プラズマ

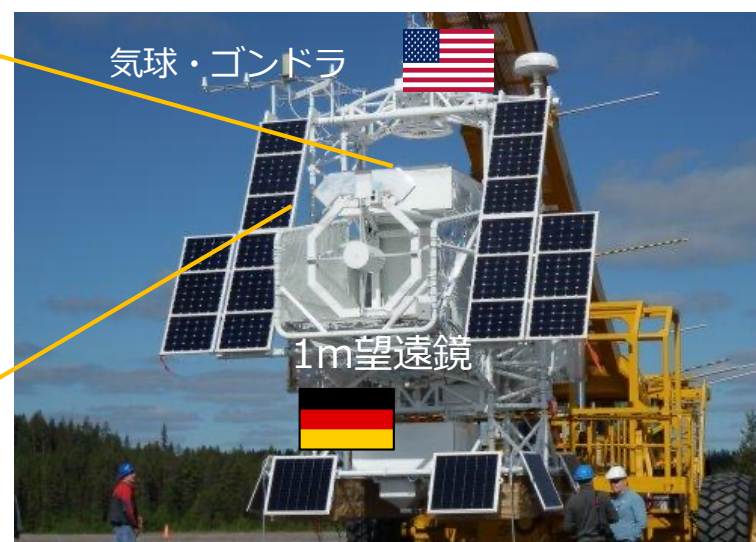
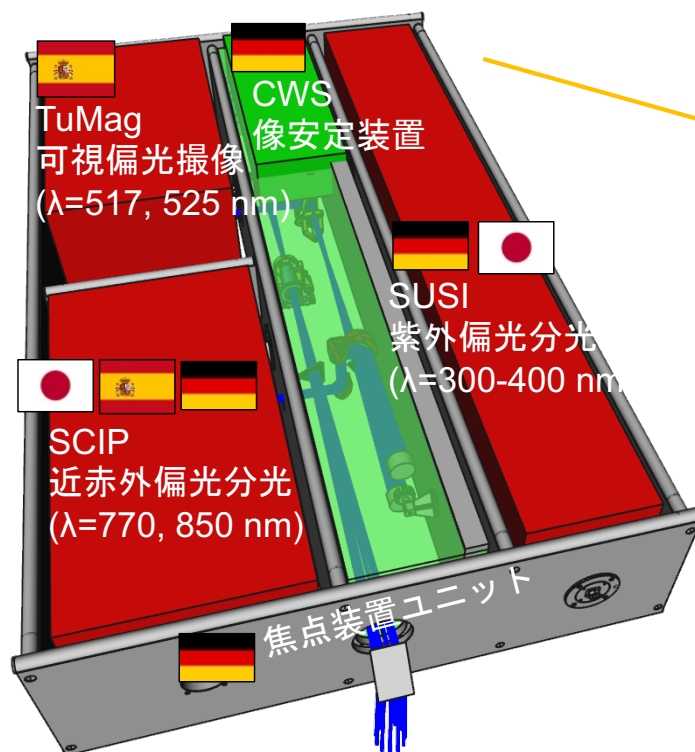
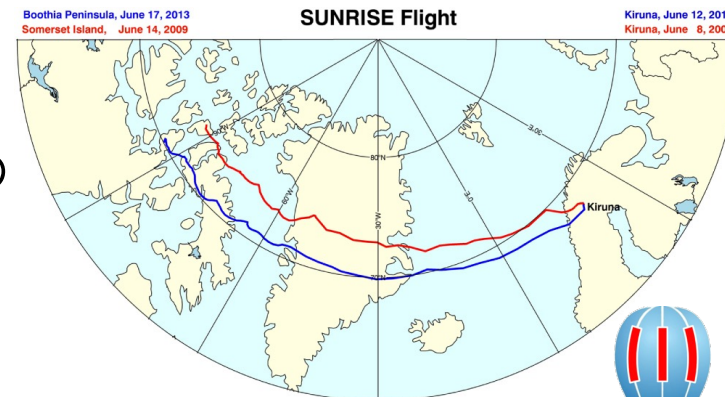
太陽・恒星研究のフロンティア

現場の物理量(磁場・温度・速度など)を
偏光分光観測で得ること

SUNRISE-3気球実験



- 口径1m (ひのでの2倍) の光学太陽望遠鏡
 - 2009年と2013年に飛翔実績、今回3回目
- スウェーデン・キルナからカナダまで大西洋上空の高度約35kmを1週間飛翔
 - 紫外線域 (波長 200 - 400 nm)の観測
 - シーイングの無い高精度偏光観測
- フライト2022年6月



SUNRISE-3 SCIP (スキップ)

Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter



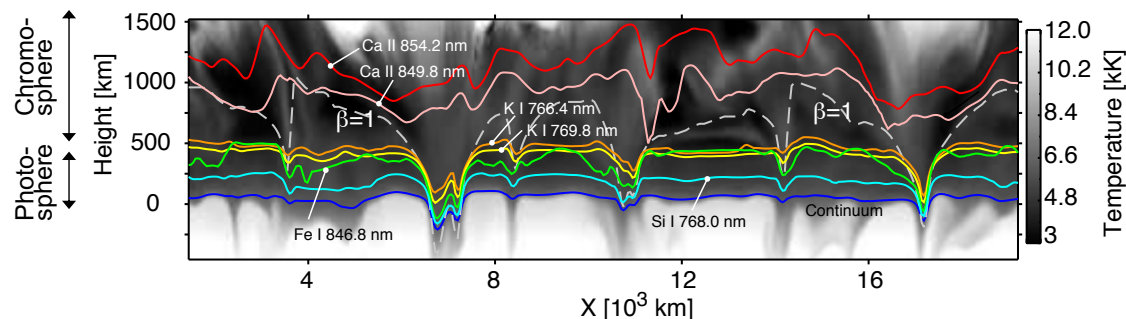
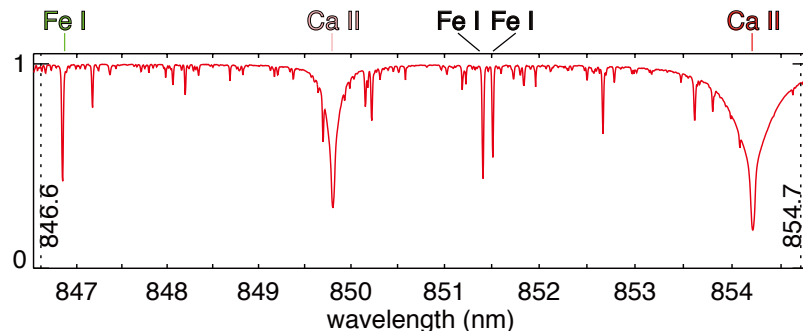
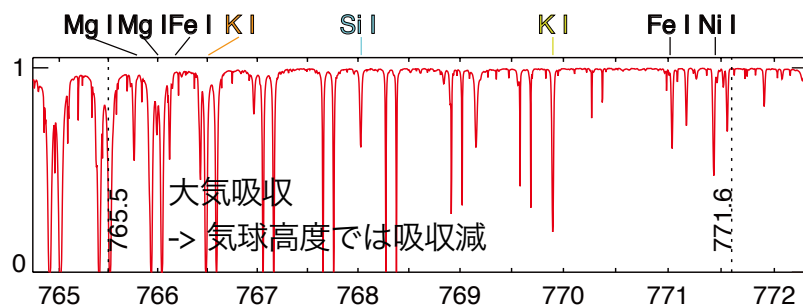
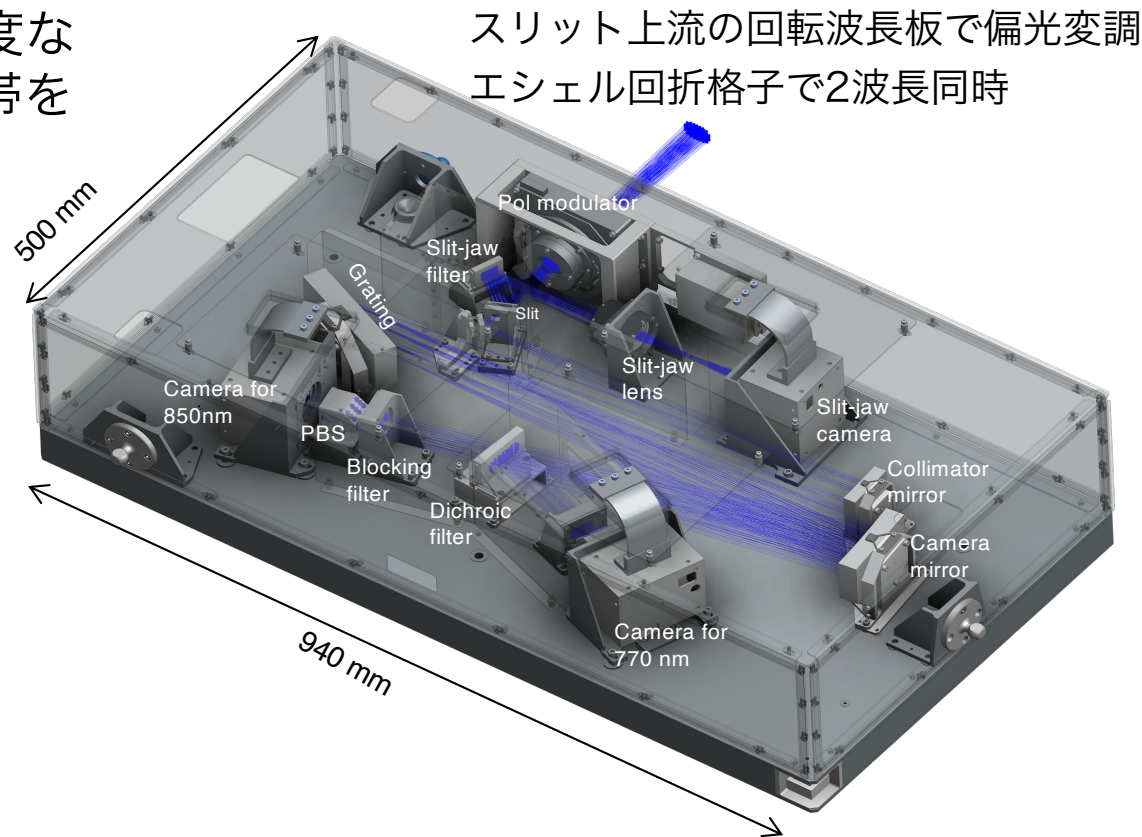
ゼーマン効果 (+ハンレ効果) に高感度なスペクトル線がある近赤外線2波長帯を同時に偏光分光

■ 高空間・時間分解能

- 「ひので」と同じ解像度: **0.21秒角** ($\Phi 1\text{m}$ の回折限界)
- $\lambda/\Delta\lambda$: 2×10^5
- 時間分解能: **10秒**

■ 高精度偏光観測

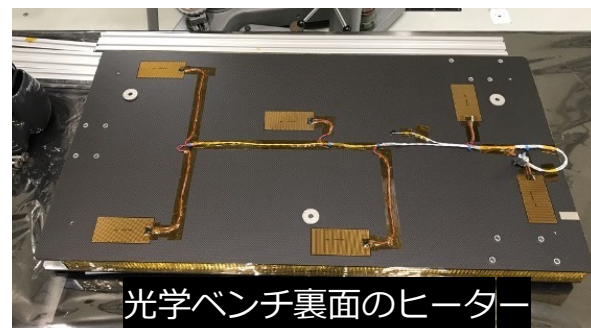
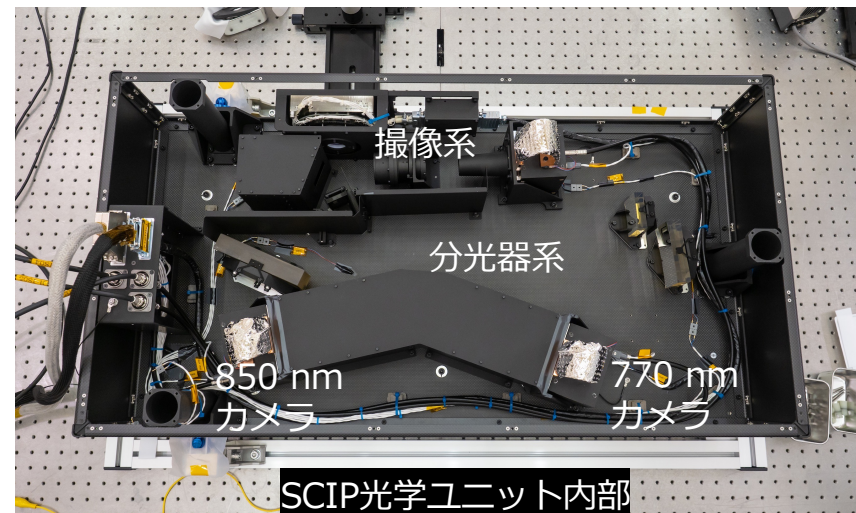
- Ca II 線で~5 Gの磁場を測定: **0.03%** (1σ)の偏光度測定



SCIP光学ユニットの熱構造設計



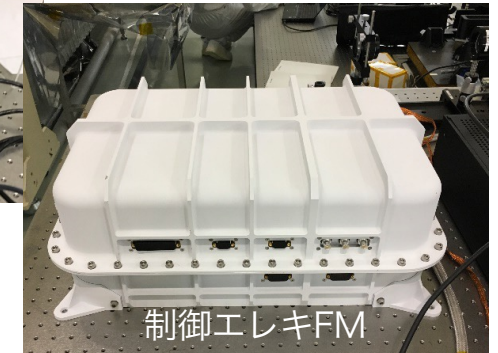
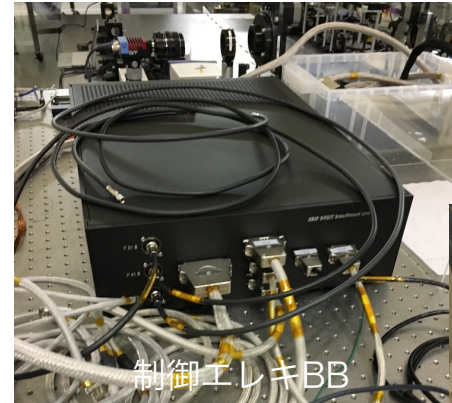
- CFRPスキン+アルミハニカムコアの軽量・低熱膨張・高剛性光学ベンチ上に光学素子を配置 (原、浦口)
 - 上部カバーにもCFRP板を採用
- 観測中は運用ヒーター(On/Off制御)で温度維持
 - ノミナル: $20 \pm <1^{\circ}\text{C}$
 - 設定温度を10-30°Cで変更可能
- 限られたヒーター容量 (25 W)で内部の温度を一様に維持するため、断熱シートSLI(single layer insulation)で覆う
- カメラ発熱 (3.6 W x 3台)によるカメラセンサの温度上昇を防ぐため、ラジエータから放熱させる
 - ヒーターでCMOSセンサ温度を一定に維持



偏光計測のための同期制御



- 回転波長板: 512msec/rotで変調
- 回転波長板からの同期信号で撮像:
16回/rot → 32 msecおき
- 視野スキャンミラーを撮像と同期駆動:
最短64 msecおき
- カメラ取得データを機上復変調して
Stokes IQUV画像を生成



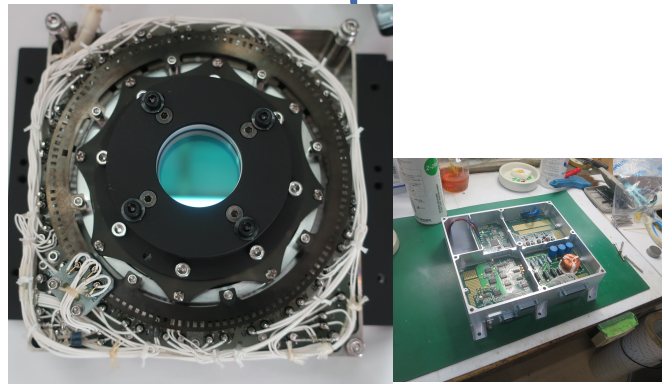
SCIP制御エレキ(スペイン担当)

撮像同期信号

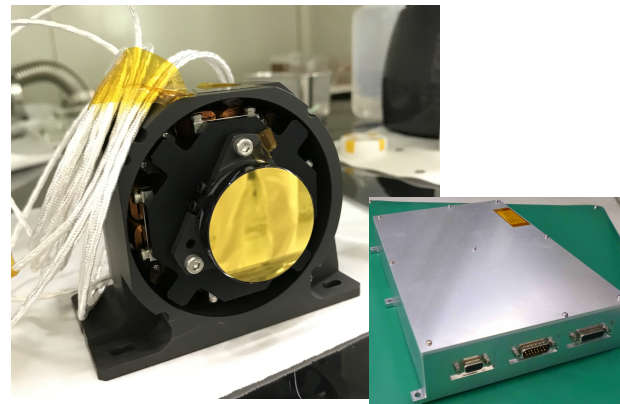
駆動信号

画像

撮像信号



偏光変調装置 (久保, 川畑, 篠田)



スキャンミラー機構 (大場, 清水)



カメラ
2kx2k
BSI-CMOS
48fps

スペイン担当

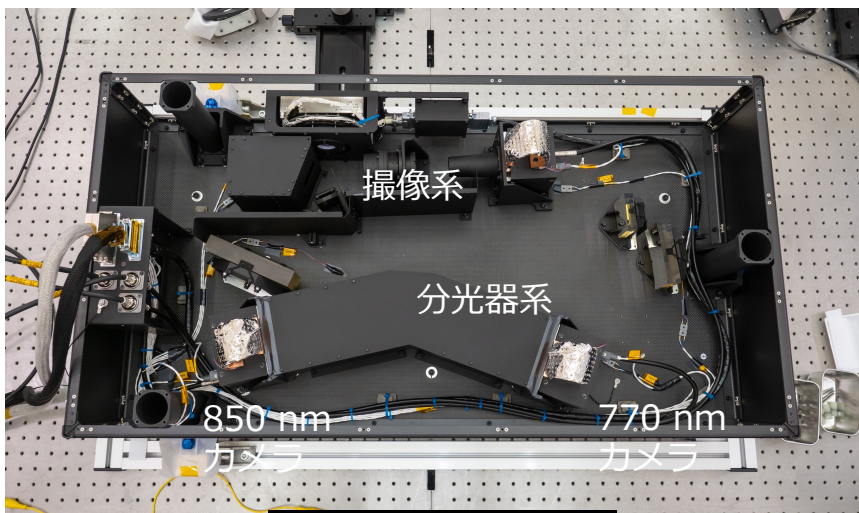
日本担当

SCIPの光学性能評価

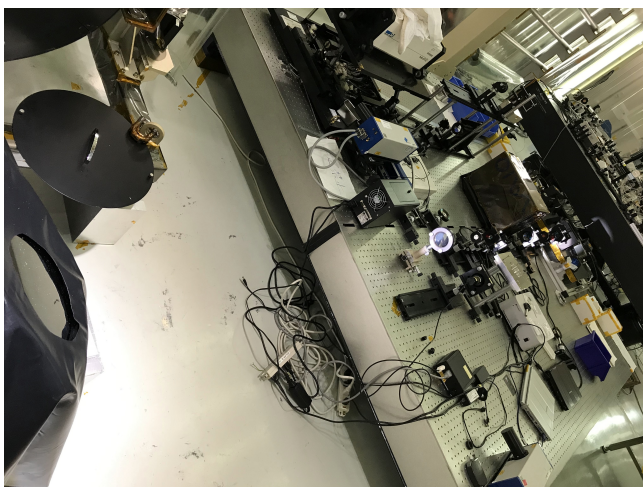
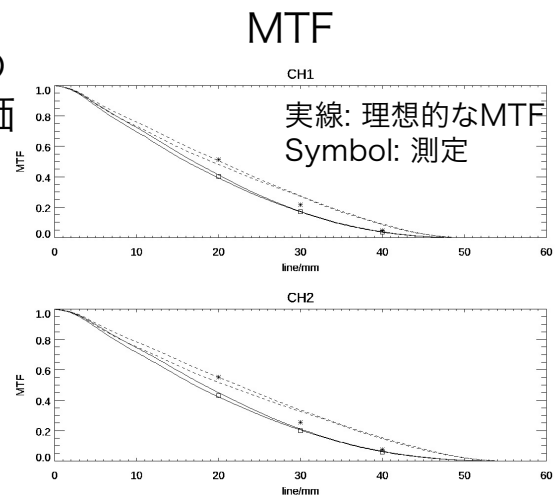
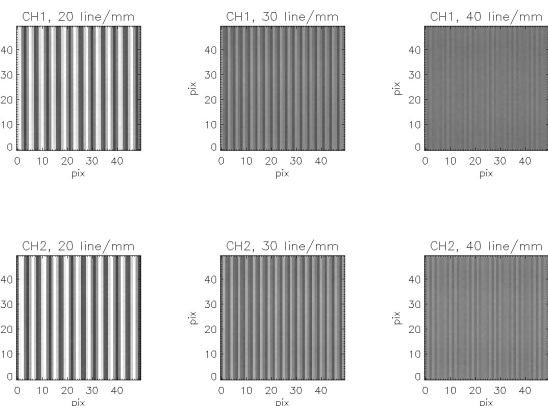


(川畑, 都築)

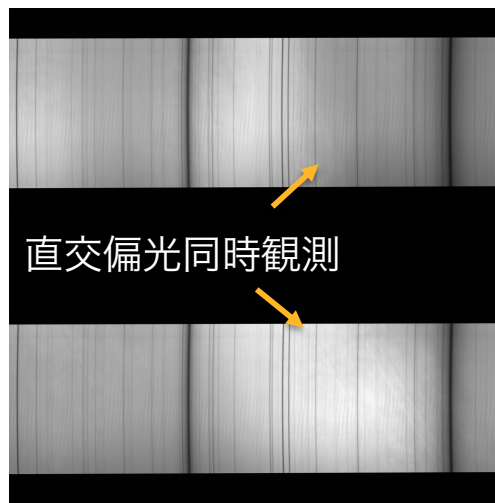
ロンキールーリング(縞模様)の
コントラストで性能(MTF)評価



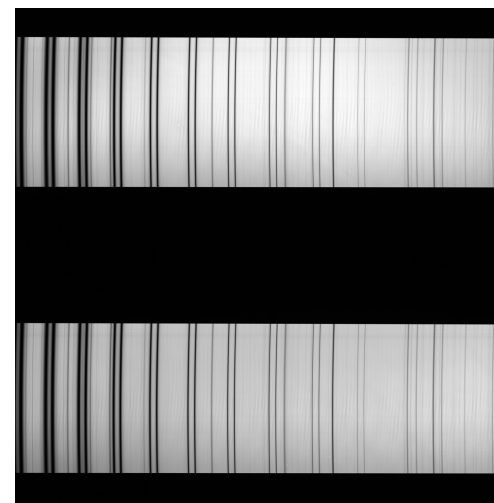
SCIP光学ユニット内部



SCIPに太陽光導入



850 nm帯太陽スペクトル



770 nm帯太陽スペクトル

偏光測定性能実証

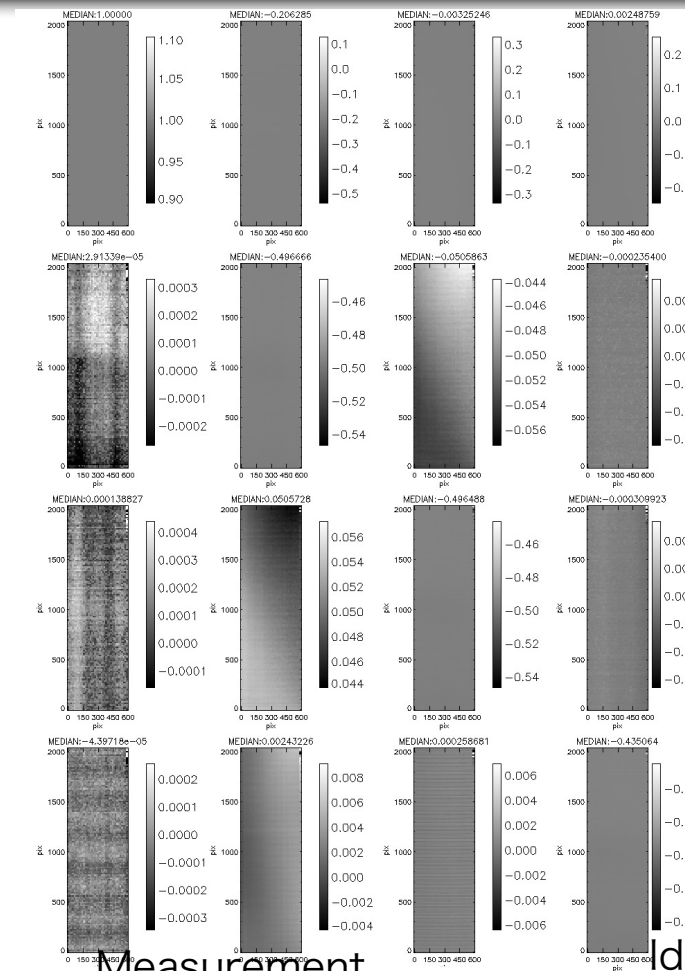
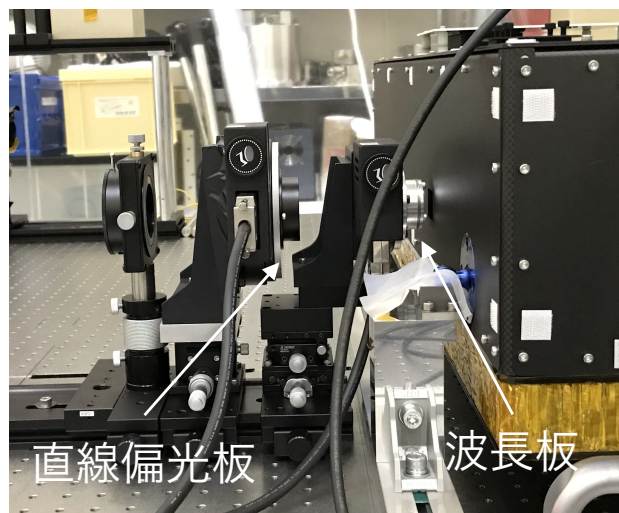


SCIP光学ユニットの箱を閉じた状態
白い部分はカメラ
(3台)の放熱板



偏光較正ユニットを
SCIPの開口部に設置

既知偏光を入射
(ただし、波長板遅延量/角度オフセットは
フリーパラメータ)



偏光応答
行列
(4x4)

このデータを使
って観測
データを較正
する

(川畑, 久保)

Measurement

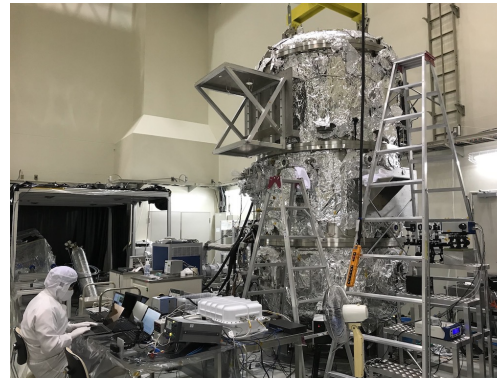
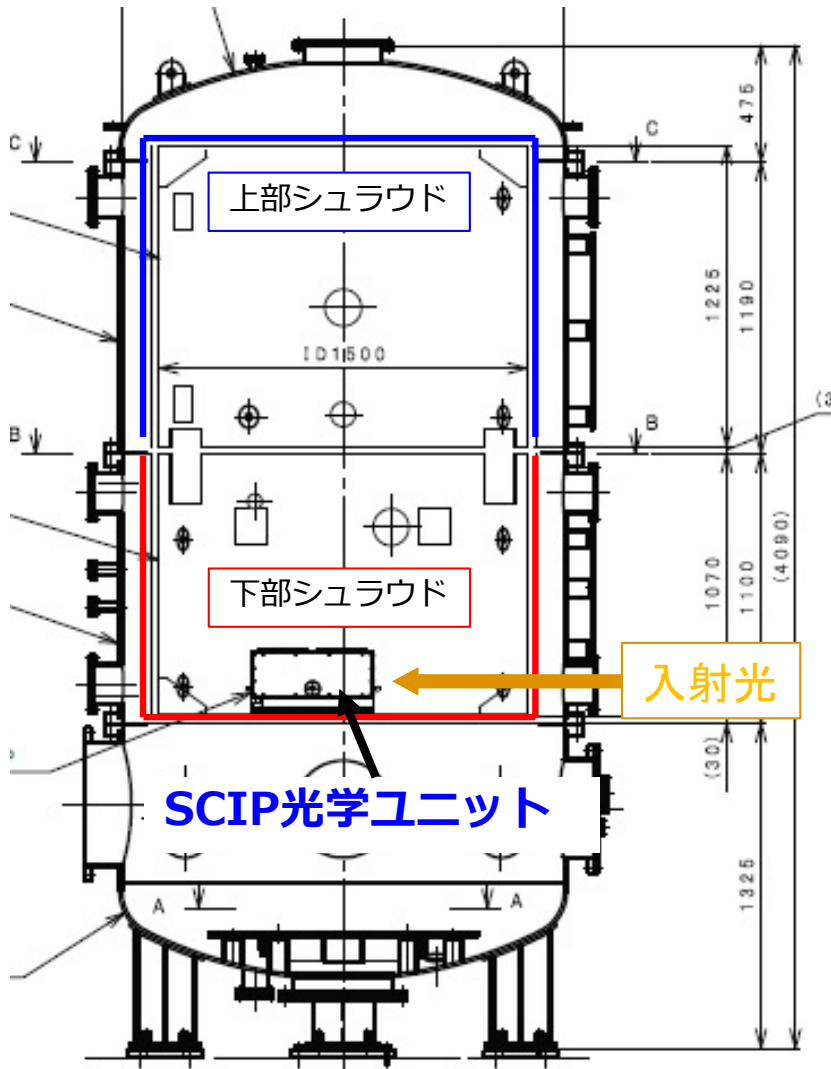
1.0000	-0.2063	-0.0033	0.0025
0.0000	-0.4967	-0.0506	-0.0002
0.0001	0.0506	-0.4965	-0.0003
-0.0000	0.0024	0.0003	-0.4351

Ideal

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.2132 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5009 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5009 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4451 \end{pmatrix}$$

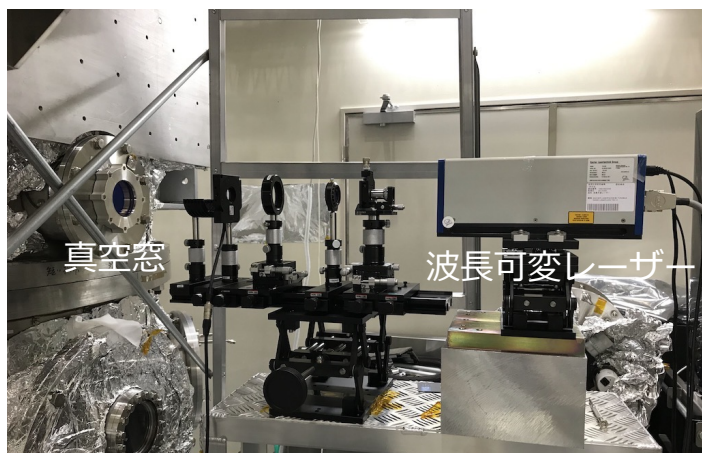
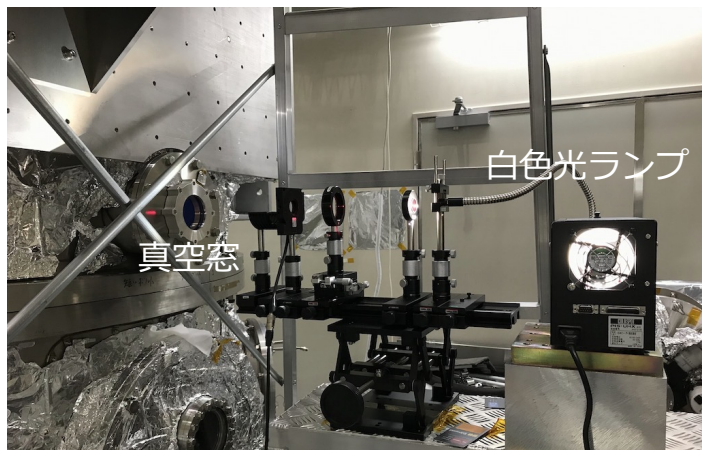
熱真空試験前後でも変化していないことを確認
(望遠鏡部と結合させて4x4行列を求める必要)

光学ユニットの熱真空試験

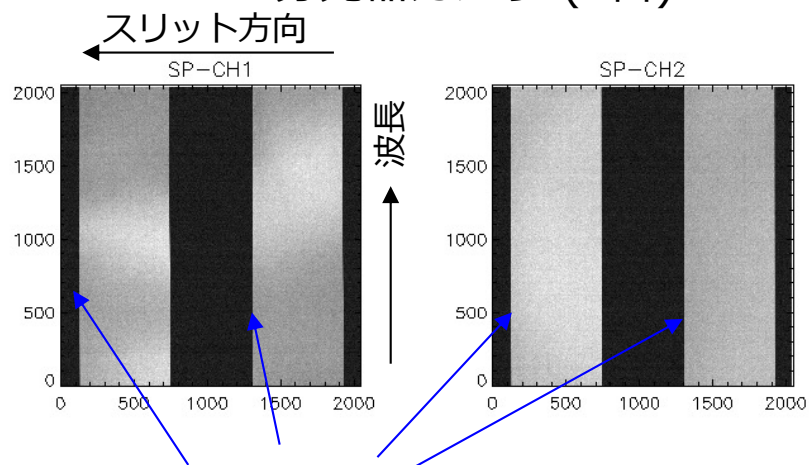


- NAOJ先端技術技術センターの大型真空チャンバー(φ1.5m)を使用 (田村らATC支援)
- 下部シュラウド: 観測装置が設置される焦点装置箱の温度環境を模擬
 - 高温モード: 10°C / 低温モード: 0°C
- 上部シュラウド: 上面とカメララジエータが対向する空(宇宙)を模擬: -35°C
- 真空度: ~1 torr
- 真空層窓から装置に光を入射し、観測装置の光学性能を測定

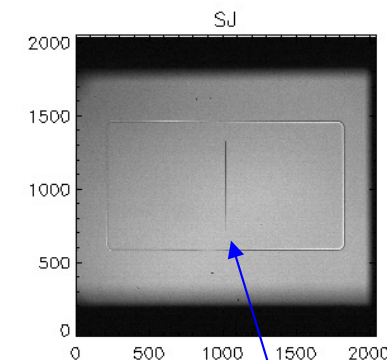
熱真空試験における光学性能評価



分光器カメラ (2台)

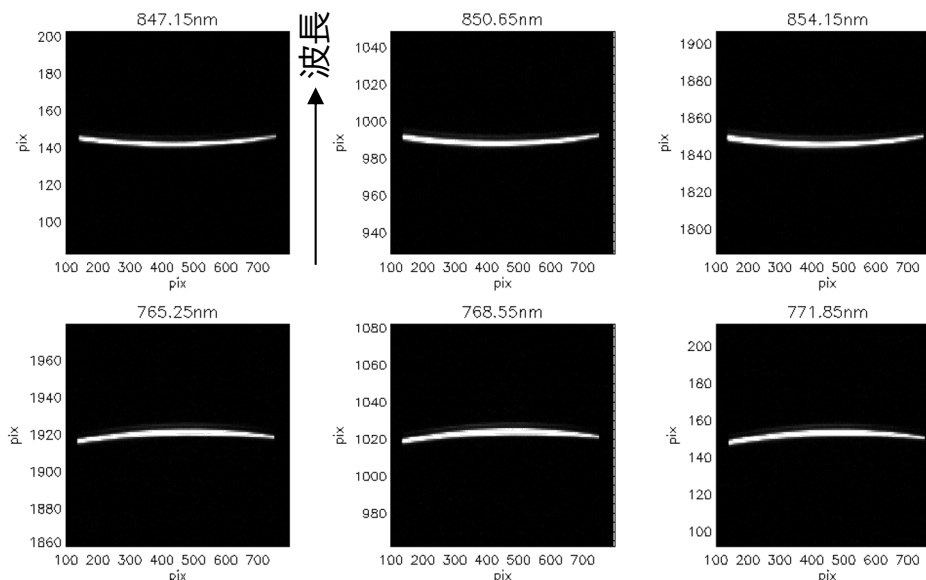


スリット撮像カメラ



スペクトルの空間方向位置

スリット幅
→ 撮像系の
空間分解能



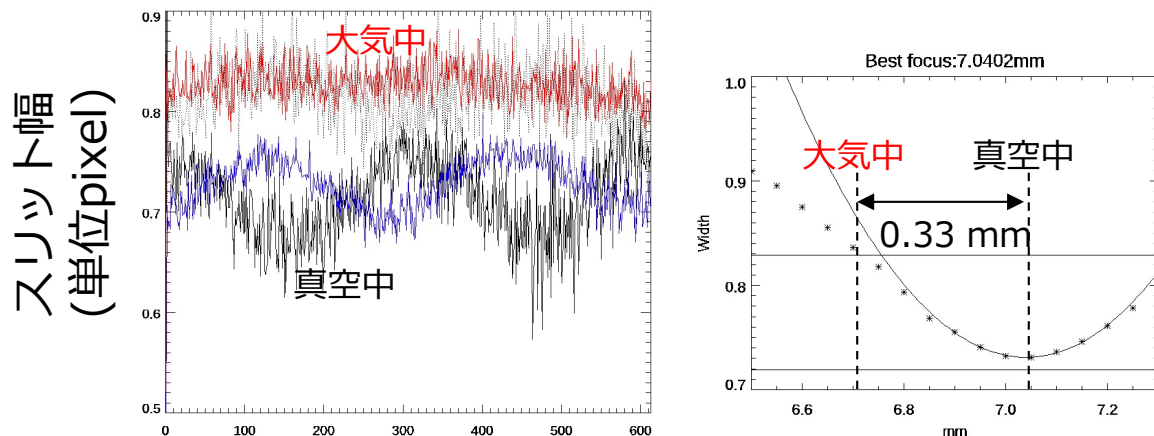
レーザー光の位置

レーザーの波長幅
→ 分光器の分解能

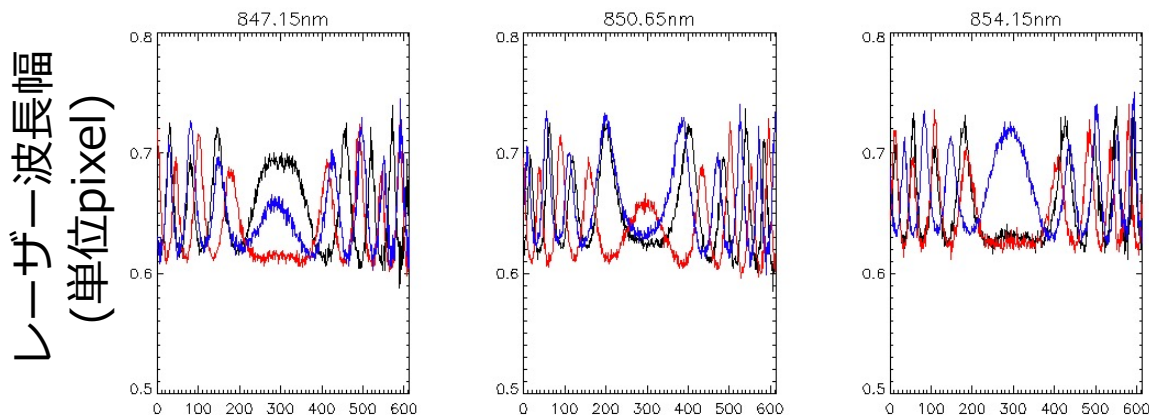
熱真空試験における光学性能評価



SJ撮像系の焦点位置をスリット幅で評価
(レンズ結像系の真空-大気差検証)



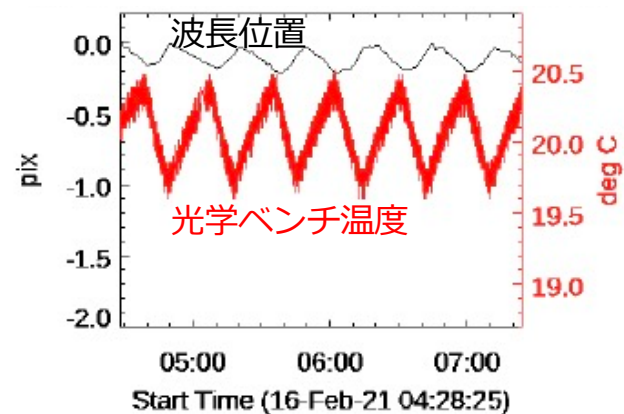
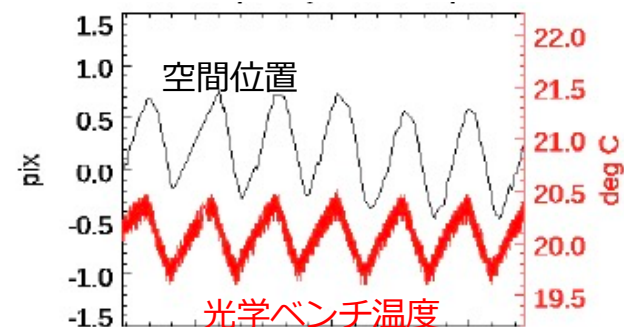
波長分解能: 波長可変レーザーで
波長位置(真空-大気差)と幅



分光器結像位置

ヒーターOn/Offに伴う温度リップルにより

- 空間方向: ~1pix振動
- 波長方向: = 0.1pix振動



ヒーター制御パラメータの調整による
温度リップルの低減とデータの後処理
で対応

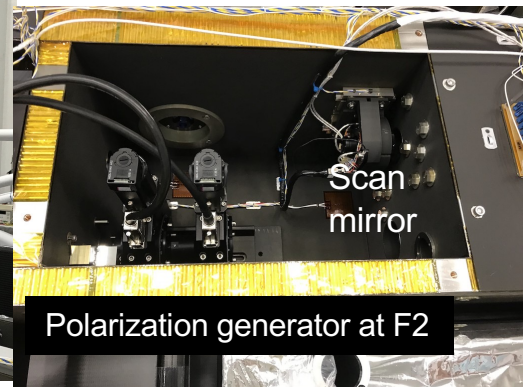
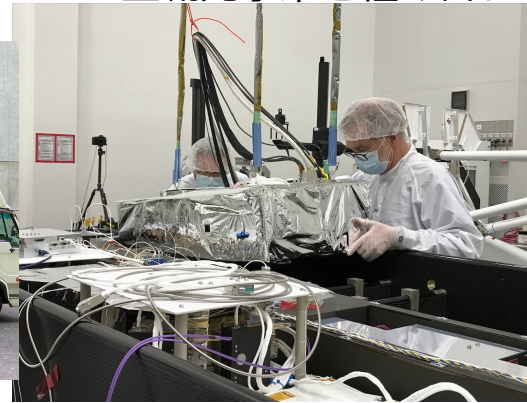
SCIPの出荷、組み込み、太陽光試験



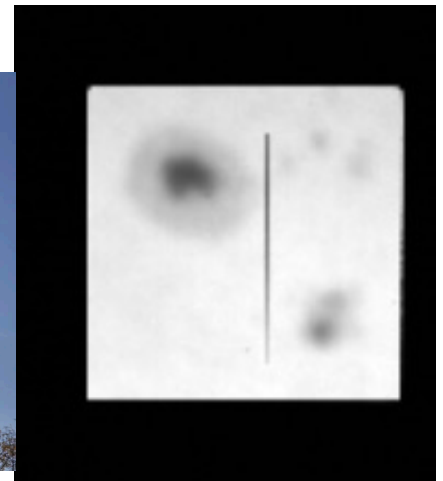
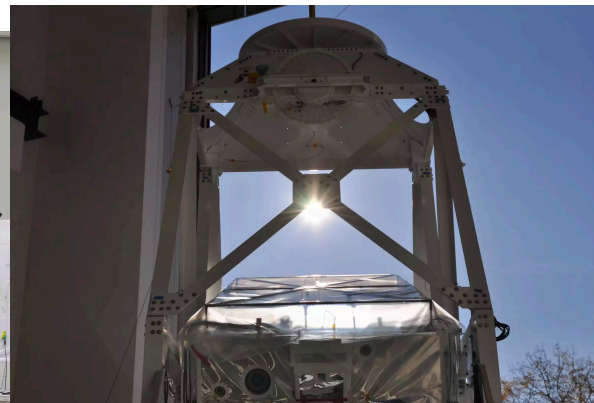
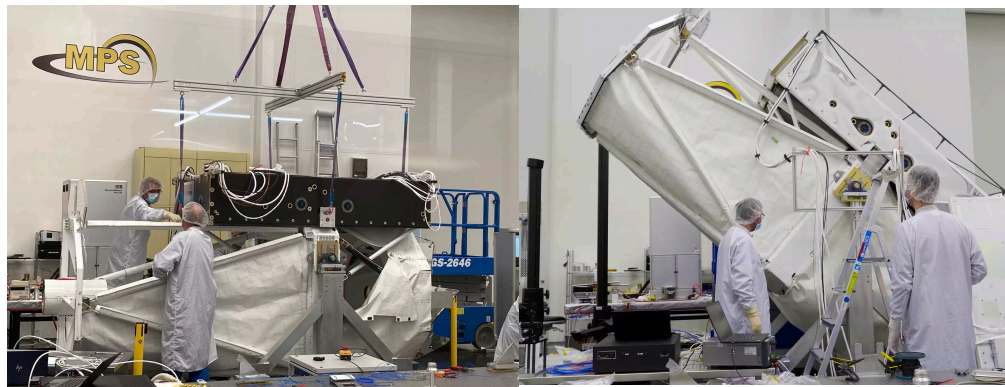
2021年8月
国立天文台から出荷



9月 マックス・プランク太陽系研究所にて組み込み
上流光学系と組み合わせた偏光校正



10月-11月焦点面装置と望遠鏡、 Gondola結合
太陽指向試験、実太陽光でスルー putt 確認、
スペクトル偏光取得



今後の予定

- 2022/3: ドイツで試験(FW/SW修正、熱真空試験など)
- 2022/4-: キルナで射場試験
- 2022/6: フライト

よかったところ

- 光学構造設計
 - 重要なところはATCで設計、解析、開発してもらった
 - サイエンスと難易度のバランスのよい設計、リスク低減、スケジュール維持、ドイツ・スペインの装置と比較しても完成度の高い装置に仕上がっている
- 試験系構築 -> かなりさぼれた
 - ひので衛星、CLASPロケット、SOLAR-C等の飛翔体装置開発の資産を最大限活用。国立天文台ATCのクリーンルームをほぼ専有させてもらう

しんどいところ: 国際共同開発

- I/F取り決め
 - 対ドイツ: 光学・構造・熱 IF
 - 対スペイン: カメラ、制御エレキ開発、ソフトウェア開発 (必要な機能を盛り込んでもらう)、日本側機器の制御 (エミュレータを提供)
- 海外装置とのかみ合わせでいくつか問題
 - 日本担当機構のIn-rush電流大で電源ONできない→しきい値変更
 - スペイン提供カメラに不具合→ばらして修理・再組立、ほか色々
- COVID-19
 - zoomなどのおかげでリモート試験(一部は現地立会)できたが、それなりの労力