

# 太陽観測小規模プログラム CLASP2 & SUNRISE-3

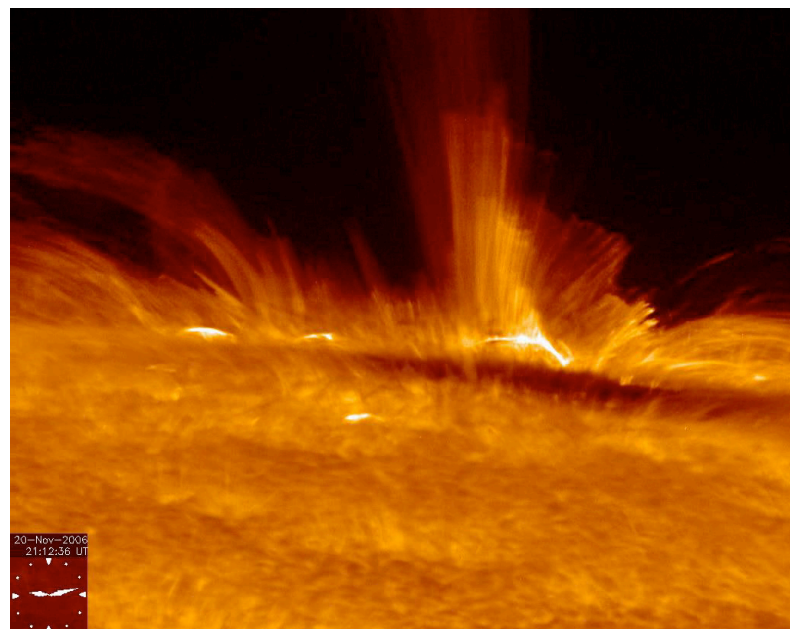
勝川行雄 (国立天文台)

石川遼子<sup>1</sup>, 原弘久<sup>1</sup>, 清水敏文<sup>2</sup>, 阿南徹<sup>7</sup>, 石川真之介<sup>2</sup>, 一本潔<sup>1,3</sup>, 浦口史寛<sup>1</sup>  
大場崇義<sup>2,4</sup>, 岡本文典<sup>1</sup>, 鹿野良平<sup>1</sup>, 川畑佑典<sup>2,5</sup>, C. Quintero Noda<sup>2</sup>, 久保雅仁<sup>1</sup>,  
後藤基志<sup>6</sup>, 篠田一也<sup>1</sup>, 坂尾太郎<sup>2</sup>, 末松芳法<sup>1</sup>, Song Donguk<sup>1</sup>, 田村友範<sup>1</sup>  
都築俊宏<sup>1</sup>, 永田伸一<sup>3</sup>, 成影典之<sup>1</sup>, 吉田正樹<sup>1,4</sup>

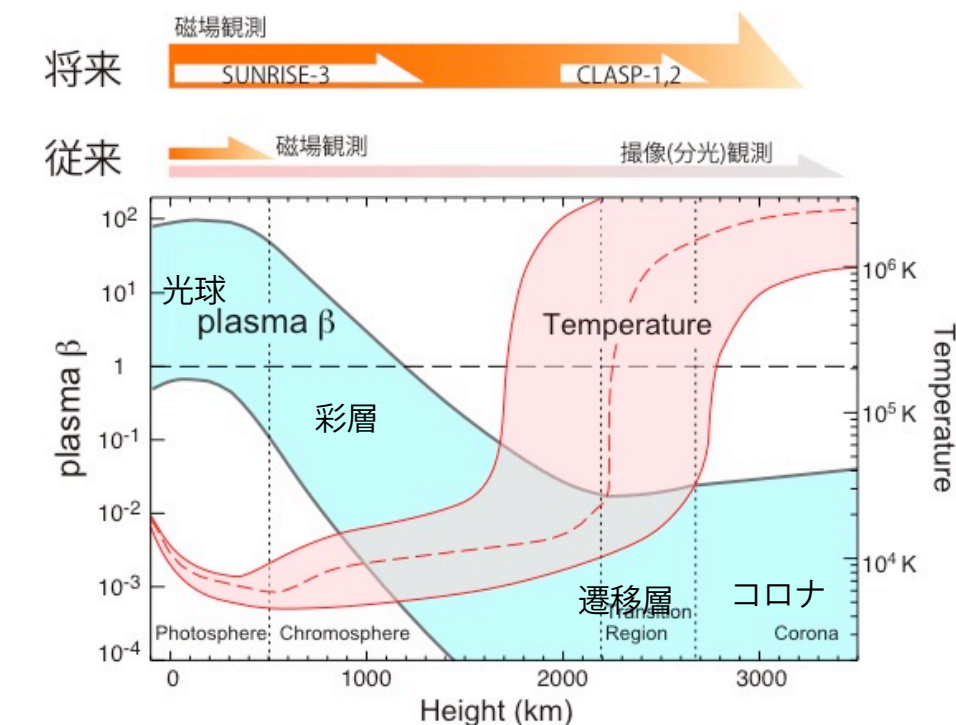
1: 国立天文台   2: 宇宙科学研究所   3: 京都大   4: 総研大  
5: 東京大   6: 核融合研   7: NSO

# 磁気活動の現場の磁場を調べたい

磁気エネルギーの輸送・散逸プロセス → 外層大気の加熱・加速の本質



これまでの彩層・コロナ観測  
撮像観測による定性的研究  
(光球では偏光分光観測がなされた)



これからの彩層・コロナ観測  
偏光分光観測から得られる物理量  
(温度、速度、磁場)に基づく定量的研究

- 光球-彩層-コロナの3次元的なつながり
- 彩層・遷移層を経由したコロナへのエネルギー輸送と散逸

# 磁気活動の現場の磁場を調べたい

- 従来は、太陽表面(光球)の磁場観測のみ
  - 光球はガス優勢(プラズマ  $\beta > 1$ )。その磁場が直接プラズマを加速・加熱することはできない
- 例えば、彩層ジェットを生み出す磁気エネルギー

$$\begin{aligned} E &\approx 10^{25} \text{ erg} \\ &= \frac{1}{8\pi} \Delta B^2 V \\ &= \frac{1}{8\pi} (\sim 100 \text{ G})^2 (\sim 300 \text{ km})^3 \end{aligned}$$

磁場の時間変化

ジェットの幅



- プラズマ  $\beta < 1$  の領域で、 $< 0.3$  秒角の解像度、 $\sim 100 \text{ G}$  の磁場感度があれば、エネルギー解放の現場をとらえられる



# 太陽観測小規模プログラムで目指す 2つのフロンティア

太陽物理の新しい扉をひらく！

## CLASP1&2 (観測ロケット)

手段

- 世界初となる紫外線の高精度偏光分光観測
- ハンレ効果を用い、彩層上部～遷移層の磁場を得る

彩層活動の現場に迫る！

## SUNRISE-3 (大気球)

手段

- スペースで高解像度、高精度な近赤外偏光分光観測
- ゼーマン効果で光球と彩層の磁場を同時に観測



# 若手にとって小規模計画は 千載一遇のチャンス！



ひので(SOLAR-B) 2006-

## SUNRISE-3気球実験 (2021)

可視・近赤外域で高解像度・  
高感度偏光観測。ゼーマン効  
果で光球・彩層磁場診断によ  
り磁気エネルギーの輸送・散  
逸を明らかにする



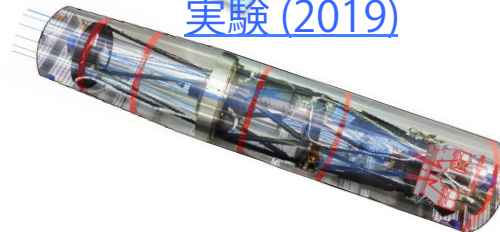
## CLASP1ロケット実験 (2015)



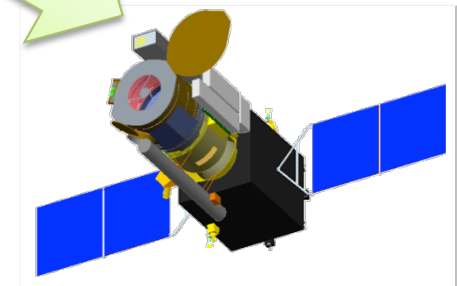
2015.9.3 初飛翔

紫外線高精度偏光観測と  
いう新しい窓を開拓。  
ハンレ効果を使った彩層  
上部～遷移層の磁場診断  
とその手法確立を目指す。

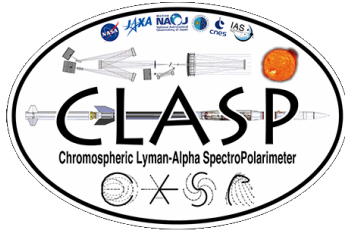
## CLASP2ロケット 実験 (2019)



## 次世代太陽観測衛星 2020's -



次世代の国際衛星プロジェクト推進の  
核となる若手（助教・PD・学生）が、  
飛翔体装置開発の**技術**を身につける



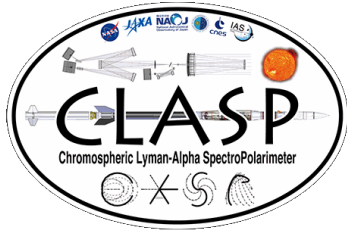
# NASA観測ロケットによるロケット実験 (2015)

## Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter

### 目的

1. ライマン  $\alpha$  輝線 (波長 121.6 nm) で高精度偏光分光観測の実現
2. ライマン  $\alpha$  輝線に散乱偏光が発生することの確認
3. 磁場によって生じるハンレ効果の検出
4. ハンレ効果を用いて彩層上部・遷移層のベクトル磁場情報の獲得





# CLASP関連の査読付き科学論文

## 出版済:7 & 準備中:6

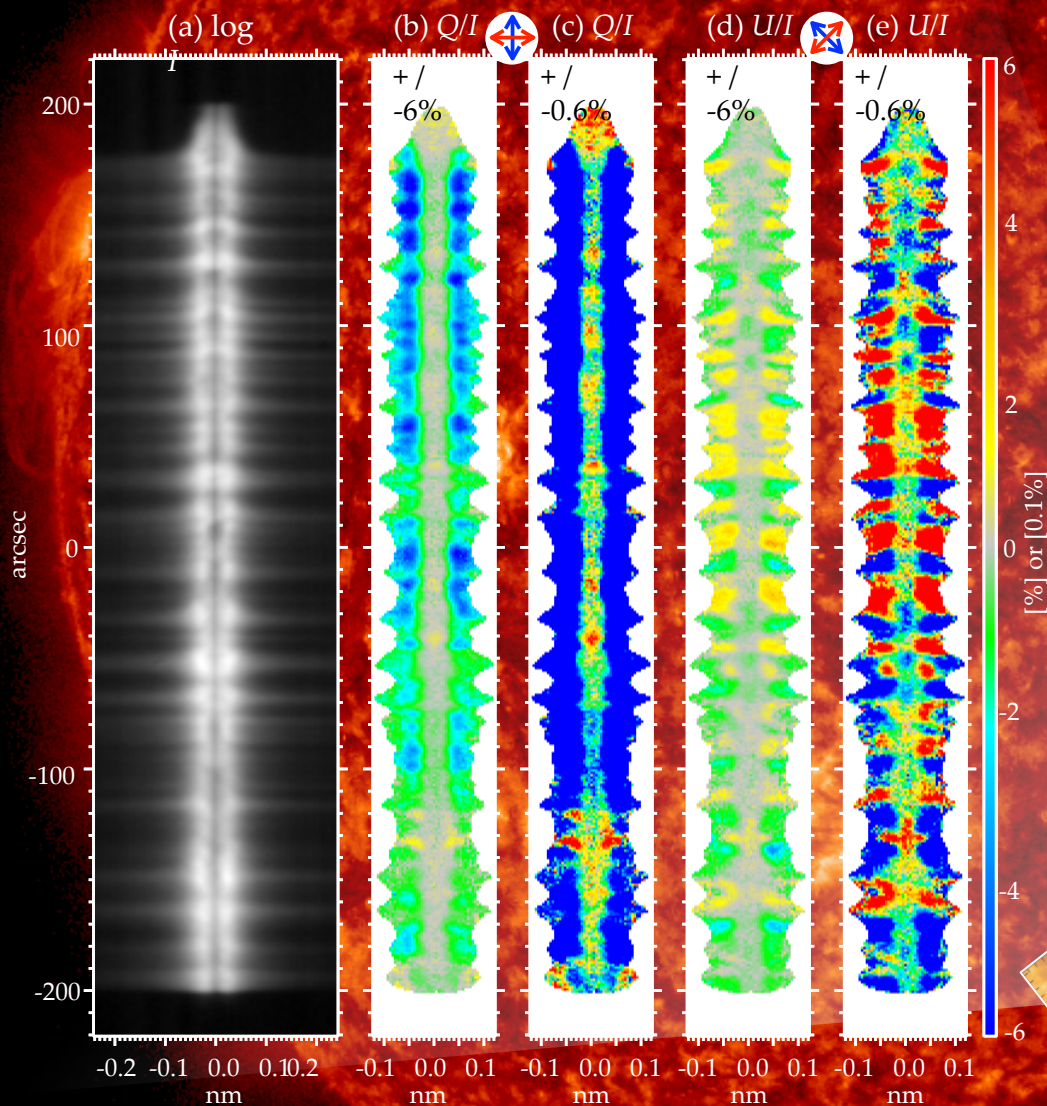
- **高精度紫外線偏光分光観測の成果**
  - Kano et al. (2017, ApJL) : Discovery of **scattering polarization** in the **Ly  $\alpha$**  line.
  - Ishikawa, R. et al. (2017, ApJ) : Scattering polarization in **Si III 120.6nm** line and indication of **Hanle effect** by comparing with **Ly  $\alpha$** .
  - Narukage et al. : **Temporal variations** of the polarization in the **Ly  $\alpha$**  line.
  - Katsukawa et al. : On the possibility of scattering polarizations in the **O-V line**
  - Štěpán et al. } : Interpretation by comparing with model calculations.
  - Trujillo Bueno et al. }
- **高頻度(<1 sec)ライマン  $\alpha$  線撮像観測の成果**
  - Kubo et al. (2016, ApJ) : **Fast-Propagating Intensity Disturbances**
  - Ishikawa, S. et al. (2017, ApJ) : Activities at **Coronal-Loop Footpoints**
  - Yoshida, Suematsu et al. : Spicules
- **ライマン  $\alpha$  線分光観測の成果**
  - Schmidt et al. (2017, ApJ) : Comparison of **Ly  $\alpha$**  and **Mg II h**.
  - Winebarger et al. : Spectral analysis of **Ly  $\alpha$**  intensity profiles
- **紫外線偏光校正試験の成果**
  - Giono et al. (2016, SP) : Pre-flight polarization calibration
  - Giono et al. (2017, SP) : In-flight polarization calibration

その他、査読論文(出版済)

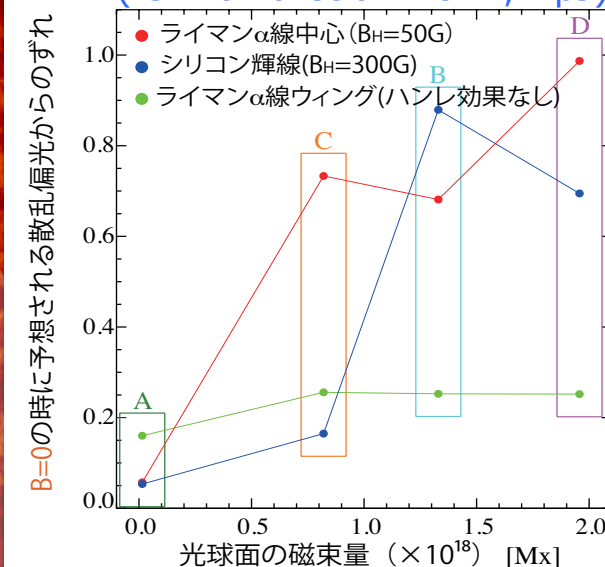
- 装置開発 : 6
- 博士論文 : 1



# ひらかれた太陽物理の新しい扉 ～真空紫外線による偏光分光観測～



彩層上部～遷移層に磁場（ハンレ効果）  
が存在することを直接確認  
(Ishikawa et al. 2017, ApJ)



世界で初めて観測されたライマン $\alpha$ 線 (122 nm, 真空紫外線)の偏光スペクトル (Kano et al. 2017, ApJL)

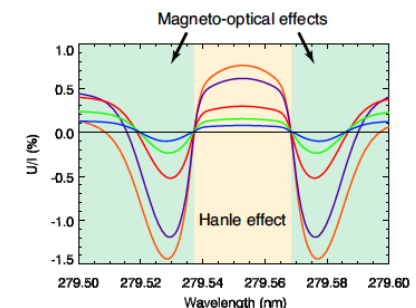
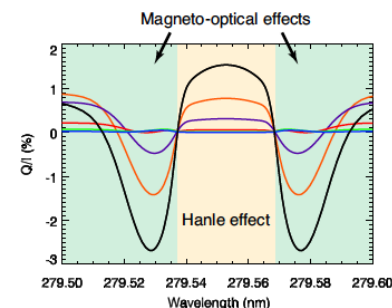
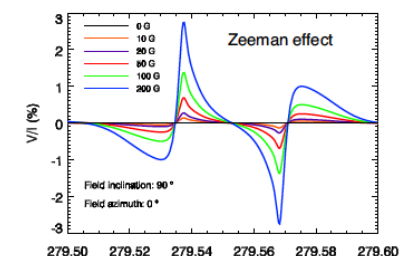
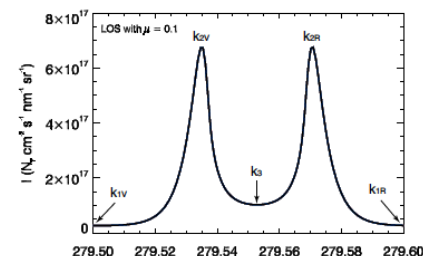
# CLASP2 (CLASP再飛翔計画)

## Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter 2

- 電離マグネシウム線 (波長280 nm) の高精度偏光分光観測でハンレ効果とゼーマン効果を検出し、彩層上部の磁場計測を行う。
  - CLASP & CLASP2の実現で、紫外線での高精度偏光観測による彩層上部～遷移層の磁場測定手法の確立を目指す。
- 現在、CLASP観測装置を改修中。
  - ～2018夏: 観測装置完成@NAOJ
  - 2018秋～: 噛合せ試験@NASA/MSFC
  - 2019春: 打上げ@ ホワイトサンズ



予想される電離マグネシウム線の偏光スペクトル



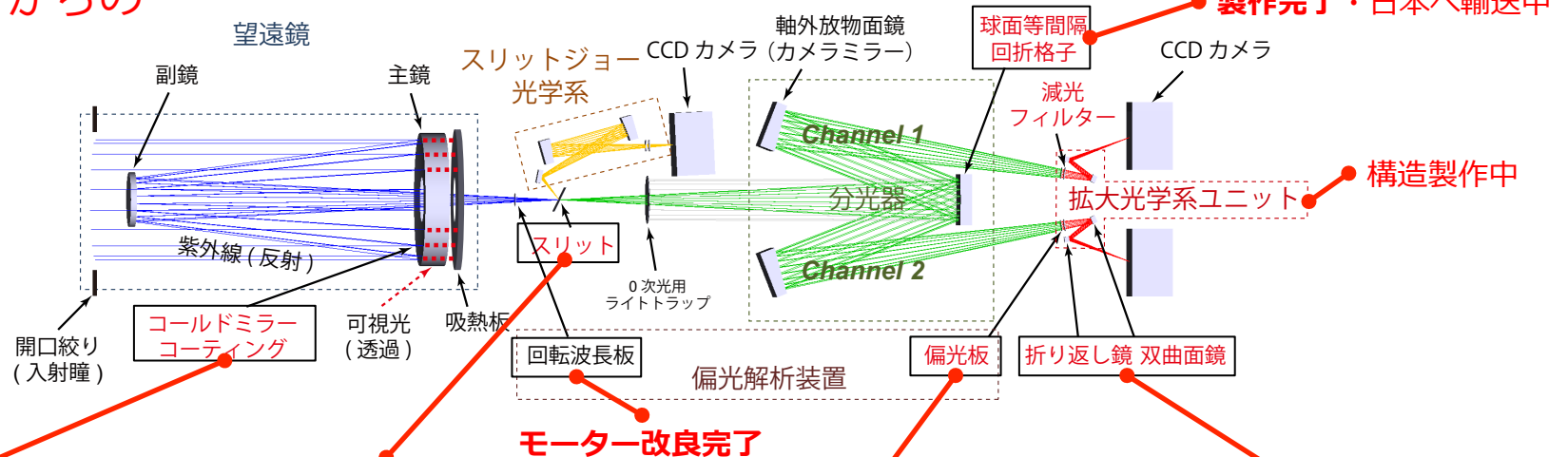
NASAへ提出した提案書より



# CLASP2観測装置と開発進捗 (1/2)

(ポスター P-156 Song et al.も参照)

赤字: CLASPからの  
改良箇所

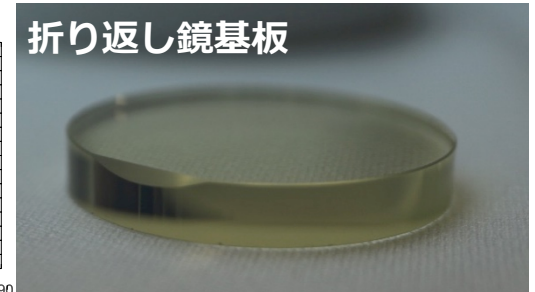
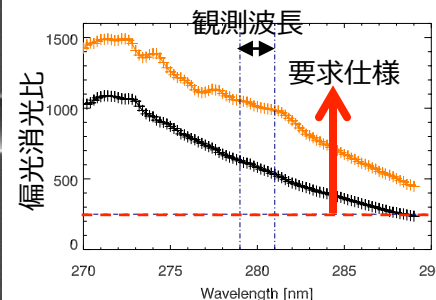
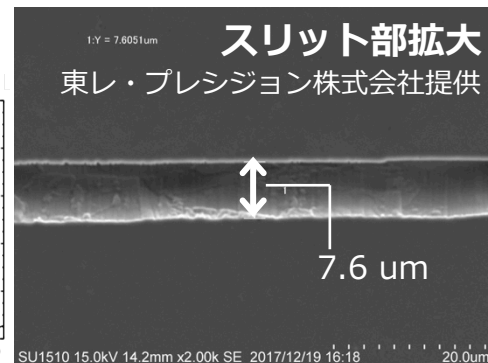
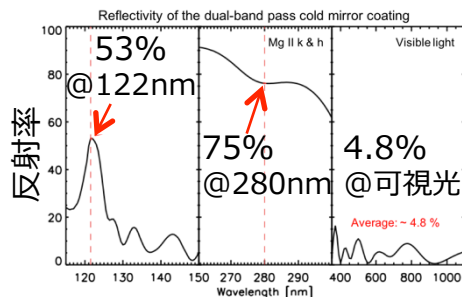
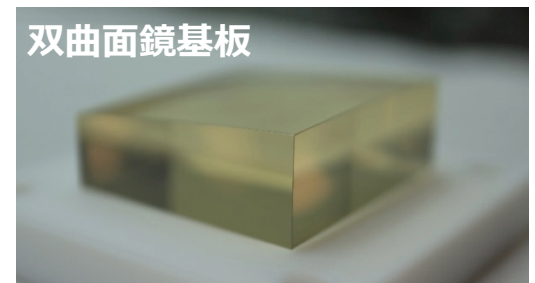
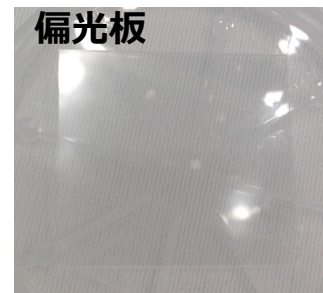
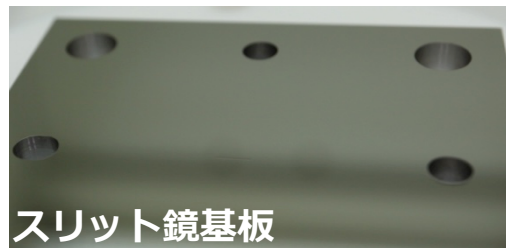
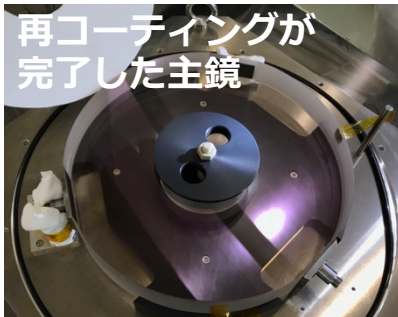


製作完了・性能評価完了

基板完成・コーティング中

製作・性能評価完了

基板完成・コーティング中

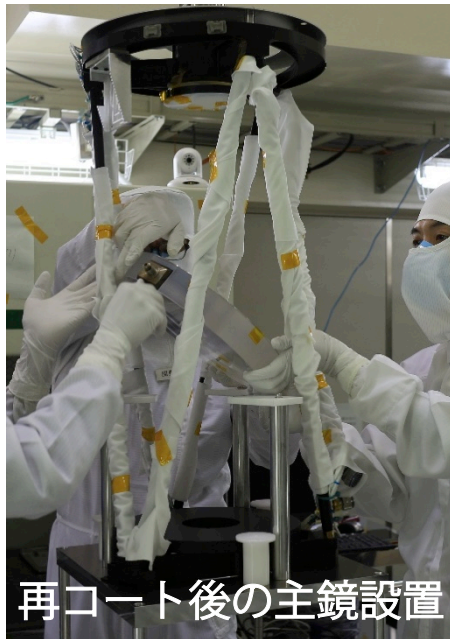




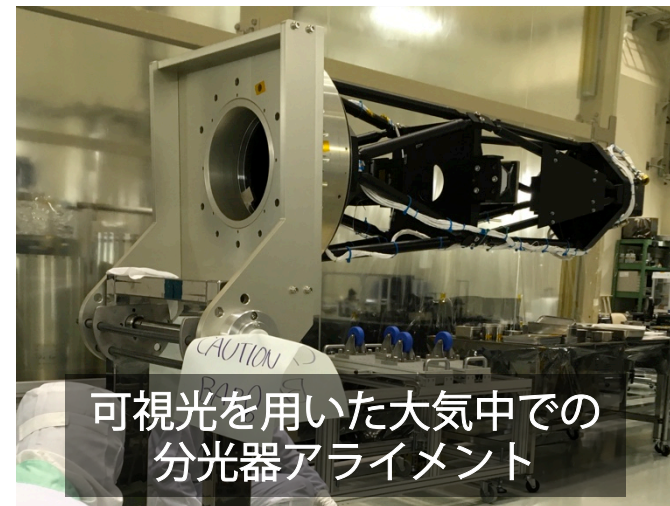
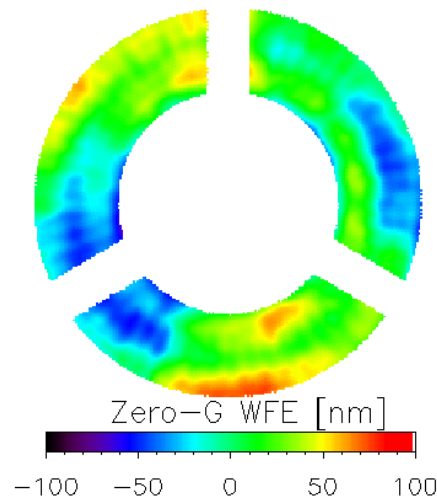
# CLASP2観測装置と開発進捗 (2/2)

(ポスター P-156 Song et al.も参照)

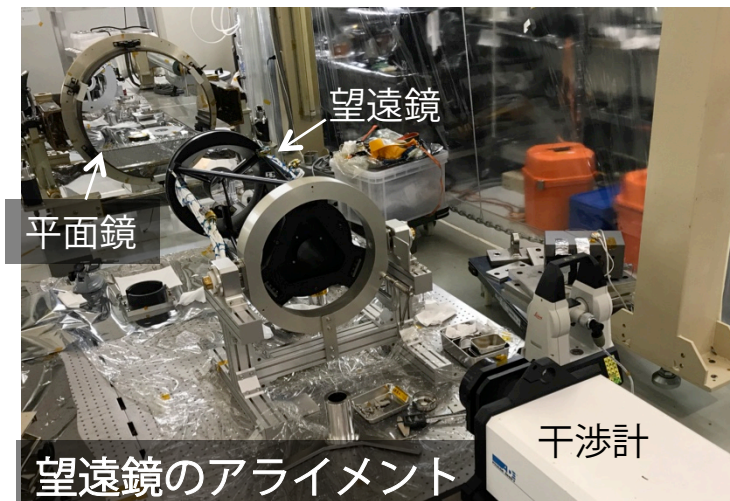
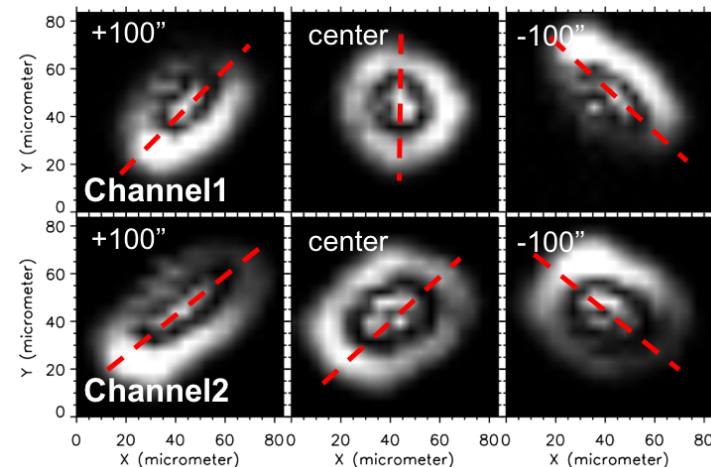
2017年秋から組み立て・性能評価試験を開始



望遠鏡の波面誤差マップ



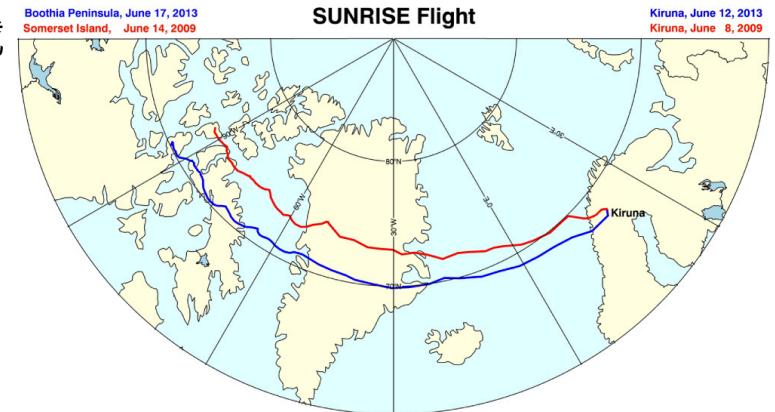
分光器のスポット(デフォーカス)





# 国際大気球太陽観測実験 SUNRISE-3

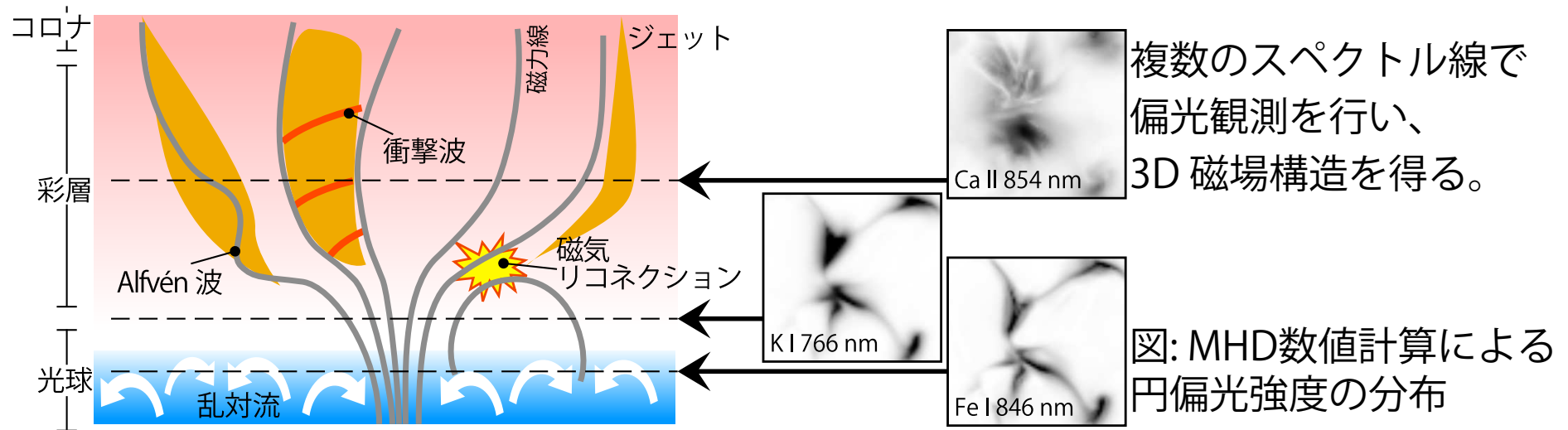
- 口径1m (ひのでの2倍) の光学太陽望遠鏡
- スウェーデン・キルナからカナダまで大西洋上空の高度約35kmを1週間飛翔
  - 紫外線域 (波長 200 – 400 nm) の観測
  - シーイングの無い高精度偏光観測
- 2009年と2013年に2度観測を実施
  - ドイツ・スペインの光球撮像装置(UV・可視)を搭載
  - 50編以上の論文
- 2021年に3度目の飛翔SUNRISE-3を提案
  - 近赤外線偏光分光装置SCIP(スキップ)を日本主導で開発



光球・彩層の高解像度・高精度偏光分光データを  
手にする絶好のチャンス



# 3D磁場観測が切り拓くサイエンス



## 磁気エネルギーの輸送と散逸プロセスを明らかにする

### 1. 彩層ジェットの駆動メカニズム

磁場の不連続構造を彩層で検出し、ジェットとの関係を明らかにする

### 2. 磁気流体波動の非線形伝播と彩層・コロナ加熱への寄与

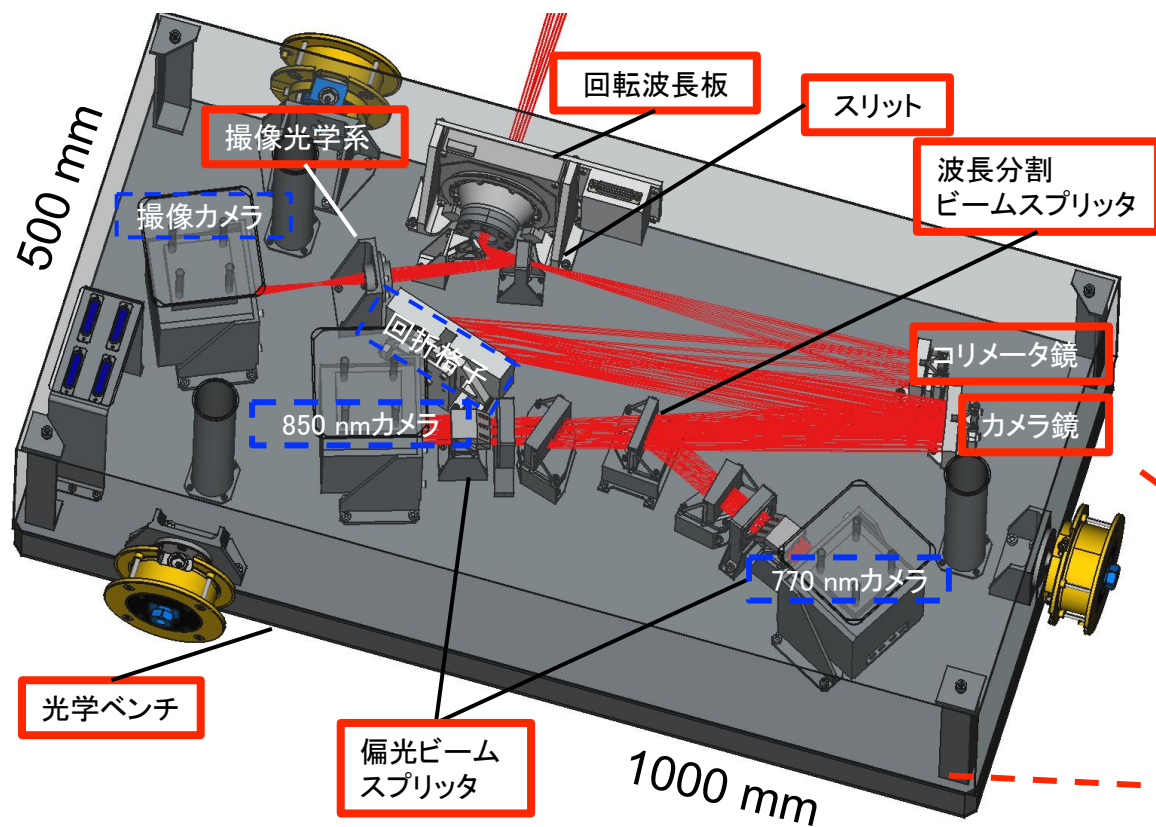
波動を高さと時間の関数として測定し、3D磁場形状が波動伝播に与える影響を明らかにする





# SCIP (スキップ)

Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter

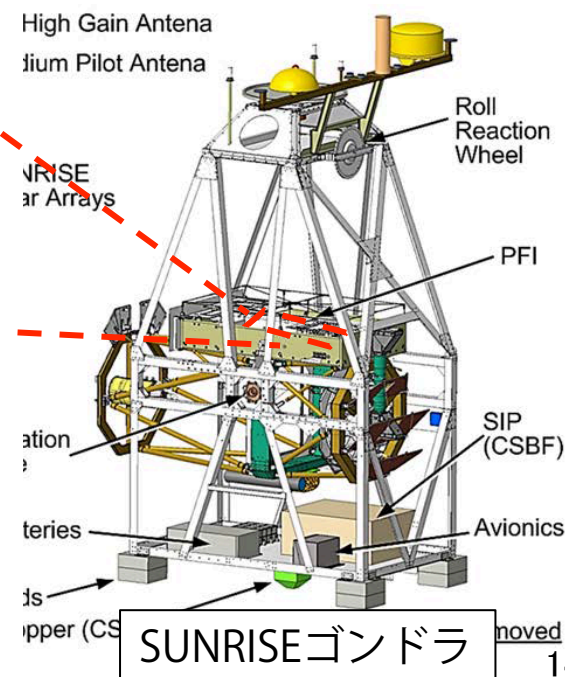


## ・高空間・時間分解能

- 「ひので」と同じ解像度: 0.2秒角
- 0.2秒角を音波が通過する時間: 15秒

## ・高精度偏光観測

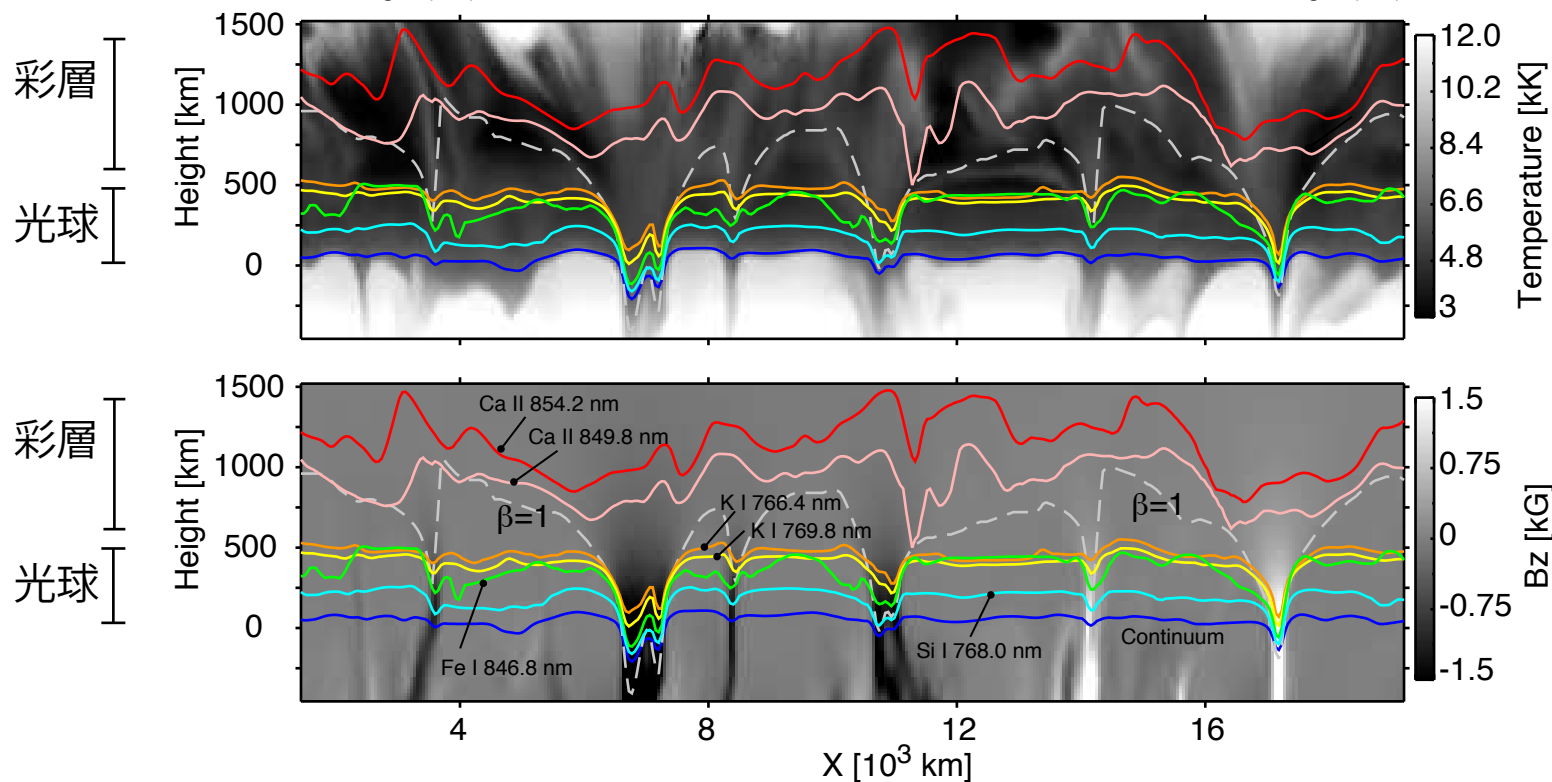
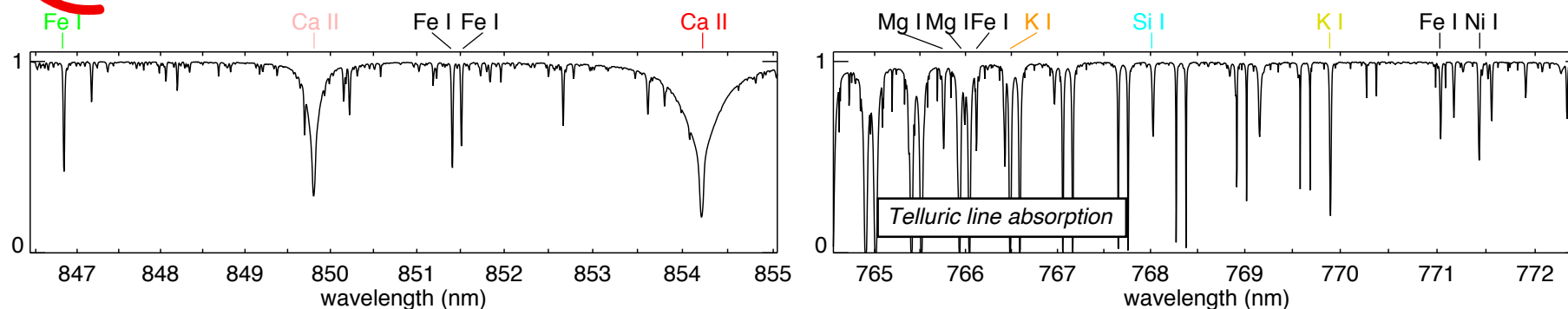
- Ca II 線で ~5 Gの磁場を測定: 0.03%の偏光度測定



ゼーマン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



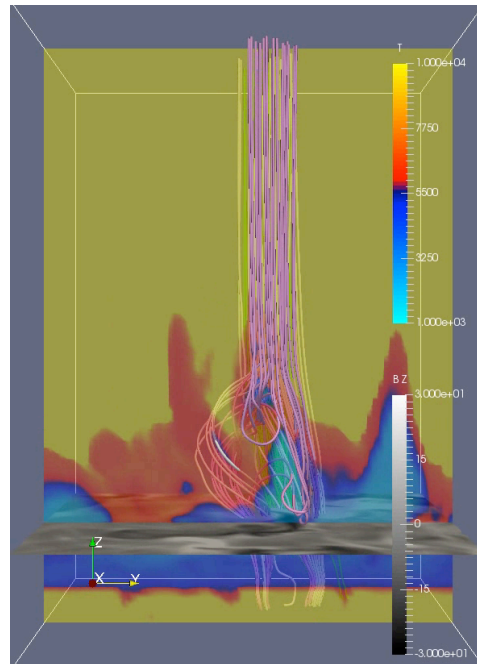
# マルチライン観測による3D磁場測定



Quintero Nodaらのポスター (P-054)を参照



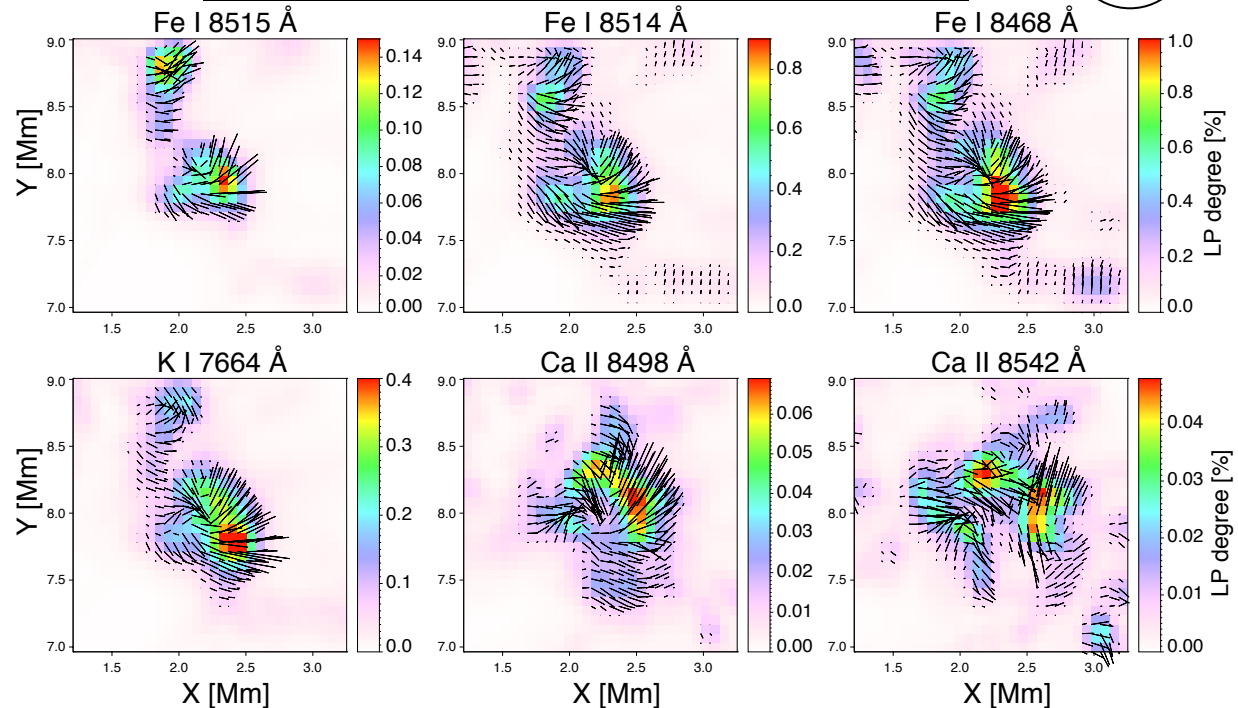
# SCIPで得られる偏光信号



Iijima et al. (2017)

## SCIPスペクトル線で見える直線偏光

1秒角



- MHD数値計算とnon-LTE輻射輸送計算で、3D磁場観測ができること、彩層活動現象にともなう有意な偏光信号を検出できることを示した。

– SCIPスペクトル線の検討: Quintero Noda et al. (2016, 2017a, b, c, 2018)



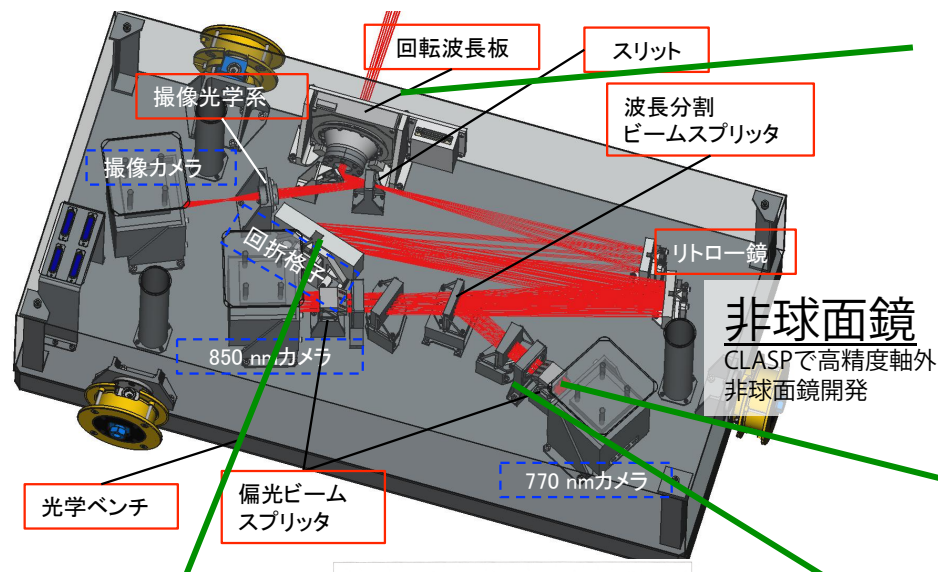


# これまでの設計・開発状況

SOLAR-CとCLASPに向けて開発した技術を最大限活用

## SCIP光学・構造設計

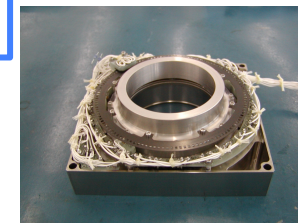
都築ら (P-053)、浦口ら(P-055)を参照



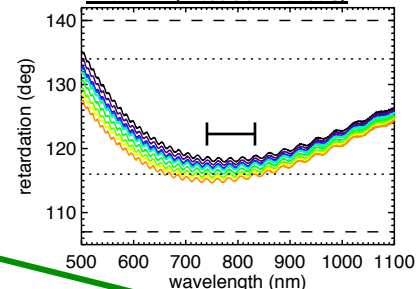
## 回転波長板

川畑らのポスター (P-052)を参照

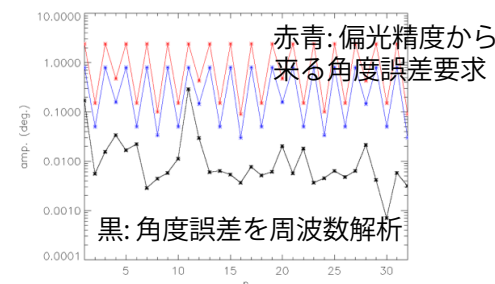
- ・偏光精度要求を満たす回転一様性
- CLASPより高速回転(4.8s→0.5s)の場合の技術課題とその解決策を同定
- ・波長・温度依存性の小さい水晶・サファイア波長板



水晶+サファイア波長板  
遅延量 (試作品の実測)

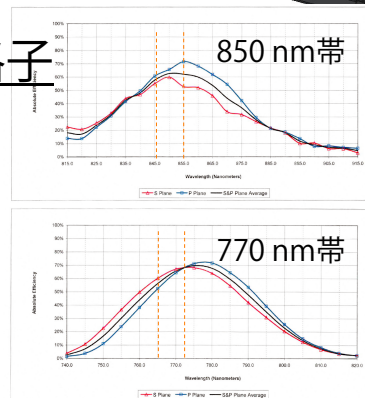


波長板の回転一様性



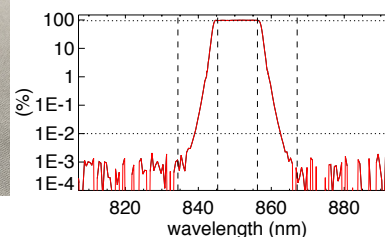
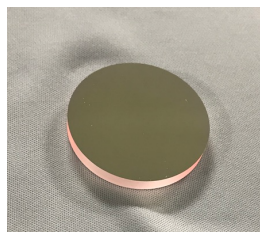
## エッセル回折格子

高効率・偏光依存の無い回折格子をドイツと共同開発



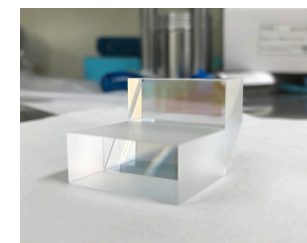
## 狭帯域フィルター

帯域内高効率>95%  
帯域外高阻止率<0.01%



## 偏光ビームスプリッタ

高消光比 1:400、高効率>98%  
高波面精度、直交成分を同一検出器に



課題：国際共同開発におけるドイツ・スペインとのI/F確立

# まとめ: 太陽観測小規模プログラム

- 天体プラズマの加熱・加速のメカニズムを、太陽における詳細な観測から理解することを目指す。
- 特に、磁気活動の現場である彩層・遷移層の磁場を測定する
- ロケット実験CLASP2
  - 紫外線偏光分光観測でコロナ直下の磁場を得る新たな手段を獲得する
  - 2019年のフライトを目指し、装置の改修を実施中
- 気球実験SUNRISE-3
  - 近赤外線偏光分光観測で光球～彩層の3次元磁場構造を得る
  - 2021年フライトを目指し、設計を固め、フライト品の製作に着手
- 「ひので」で世界のトップに立ったスペース偏光観測技術を継承・発展し、将来の衛星計画とつなげる。