

Sunrise気球実験による太陽彩層大気の高解像度・高感度偏光分光観測

勝川行雄, 久保雅仁, 石川遼子, 原弘久, 末松芳法, 鹿野良平 (国立天文台) 阿南徹, 永田伸一, 一本潔 (京都大学)
 Carlos Quintero Noda, 石川真之介, 清水敏文, 大場崇義 (ISAS/JAXA)

Sunrise気球実験

Sunrise気球実験は口径1mの気球搭載光学太陽望遠鏡で、これまで欧州(ドイツ・スペイン)を中心に進められてきた。高度35km以上の高度から地上ではできない波長200-300nmの紫外線観測や大気ゆらぎの影響のない安定した可視・近赤外線観測を行うことができる。

- NASA Long Duration Balloon (LDB)
- 望遠鏡口径: 1 m
- ペイロード重量: 約2 t
- 寸法: 5.5 m x 5.5 m x 6.4 m
- 高度: 35 - 37 km
- キルナ・ESRANGEから放球されカナダまで飛行、連続5日間以上観測可能
- 飛行実績: 2度 (2009年, 2013年)

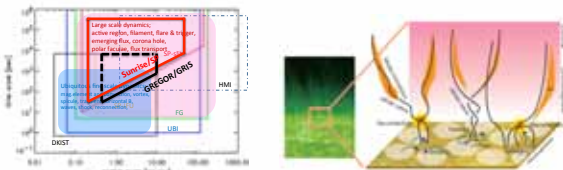


3回目の飛行実験を2019-2020年に実施することを目指し、日本が新たに参加し可視・近赤外の偏光分光観測装置を新規に開発・搭載することで光球・彩層の高解像度・高感度偏光分光観測を行う検討を開始した。

Sunrise気球実験で狙うサイエンス

口径50cmの「ひので」はスペースからの高解像度・高精度な光球偏光観測の優位性を示した。一方、彩層で発生する活発な電磁流体現象の理解が、太陽プラズマにおける磁気エネルギー散逸やエネルギー輸送の鍵を握っているという認識が強くなっており、彩層の偏光分光観測に基づく速度・磁場の観測がますます重要になっている。口径1m超の地上望遠鏡も彩層偏光分光観測を狙っており、それに伍する成果を目指す。

- 彩層を構成する微細ジェット(スピキュール)の駆動メカニズム
 - 電磁流体波動が光球から彩層にどう伝播しているかをとらえる
 - 磁気リコネクションを示す磁場の時間変化をとらえ超音速流の発生を同定する
- 地球気候に影響を与える可能性のある紫外域(200-300 nm)の放射スペクトル変化
 - 磁気要素の彩層磁場観測と対応させて紫外線変動量を精度よく測定する



Sunriseの焦点面装置

1m光学望遠鏡で集光された光は、望遠鏡側面に取り付けられたCFRP箱内に配置された焦点面装置に送られ、様々な観測が行われる。これまでの2度の飛行実験では主に光球の撮像観測が行われた。



- Sunrise Filter Imager (SuFI)
 - 可視光(<400 nm)とUV域の撮像観測
- Imaging Magnetograph Experiment (IMaX):
 - 可視光(Fe I線@525 nm)における撮像偏光観測によるベクトル磁場画像

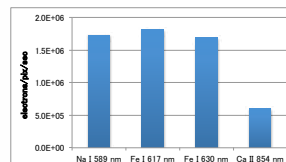


新規に開発する偏光分光装置もCFRP箱の中の専用スペースに設置する。

Sunriseの彩層磁場診断能力

彩層磁場診断のための偏光測定感度要求として以下を設定した。

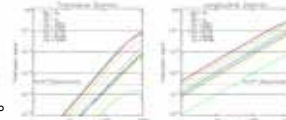
- 要求: 5×10^{-4}
- Ca II 854.2 nmで10 Gの視線磁場を測定
- 目標: 3×10^{-4}
- Ca II 854.2 nmで5 Gの視線磁場を測定



3×10^{-4} の偏光測定感度を達成するためには $10^7 e$ 以上の光電子検出が必要。装置のスループット見積りや偏光変調効率に基づく、

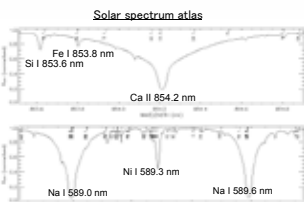
- Na I 589 nm:
 - 5 secの積算 + 2 pixel summing (0.16" pix)で到達可能
- Ca II 854 nm:
 - 15 secの積算 + 2 pixel summing (0.16" pix)で到達可能

典型的な太陽大気モデルでゼーマン効果による磁場感度を示したのが右図。Na I D線とCa II線と 3×10^{-4} の偏光測定感度があれば、~5 Gの視線磁場、100~200 Gの接線磁場の感度がある。

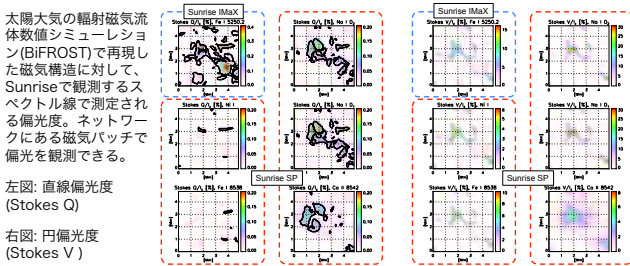
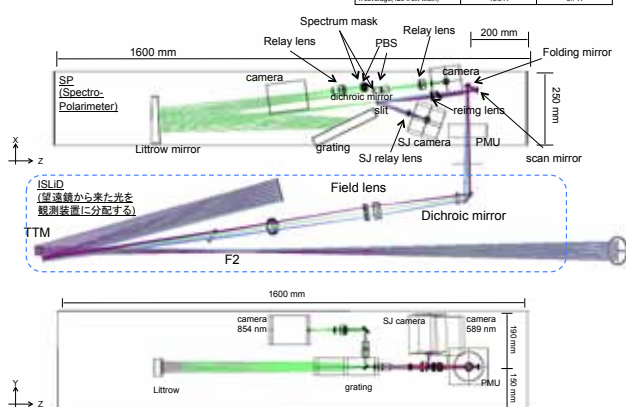


Sunriseの偏光分光装置

偏光分光装置はリトロ式分光器と偏光回折装置からなるものを検討しており、光球から彩層中部までを連続的にカバーできるNa I D線(589 nm)とCa II線(854 nm)の2波長域を同時に観測する。SOLAR-C光学磁場診断望遠鏡(SUVIT)の偏光分光装置とできる限り共通の構成とすることで、SOLAR-CやCLASPロケット実験のために開発してきた要素技術の実証を行う方針である。偏光分光装置の製作は日本が主担当となるが、コンポーネントの一部はスペイン・ドイツとの国際協力で開発していく予定である。



Focal optics	
Entrance pupil	40.8 mm (150mm away from the reim lens)
Effective focal length	25760 mm (F25.8)
Focal scale	0.08" / 10 μm @ the slit
FOV	27.6" x 51.4"
Spectrograph	
Slit width and length	10 μm x 7.2 mm
Focal length	730 mm
Slit angle	60°
Groove density	67 / mm
Dispersion	3.0 Å / 2.7 x 10 ³ μm @ slit / spectrum mask
Spectrum resolution	~1.8 x 10 ⁴ @ 854.2 nm ~2.3 x 10 ⁴ @ 589.3 nm
Wavelength bands	
	854.2 nm 589.3 nm
Spectrum lines	Ca II 854.2 nm Na I 589.0 nm Fe I 853.8 nm Ni I 589.3 nm Si I 853.6 nm Na I 589.6 nm
Order	24 35
A sampling (10 μm @ sp. mask)	31.6 mA 20.7 mA
A coverage(420 x slit width)	13.3 A 8.7 A

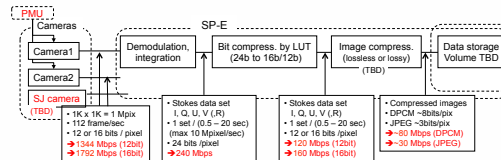


左図: 直線偏光度 (Stokes Q)
 右図: 円偏光度 (Stokes V)

技術課題

偏光分光装置開発

- 熱構造設計: 温度変動に対して光学性能保障するため、CFRPベース板上に光学系を配置する構成とする予定。ヒーター温度制御や地上熟真空試験も必要
- 偏光解析装置・可動機構: SOLAR-C・CLASPロケット実験での高精度偏光観測のために開発されてきた回転波長板による偏光変調。1回転1秒程度のときの回転一様性の検証
- 高速カメラと偏光復調: 高精度偏光観測のために太陽から来る光を逃さず検出し偏光変調器の位相と同期させて積算する。高速読出し(1kx1k素子を毎秒50フレーム以上)カメラと、その画像を高速に復調(demodulation)演算処理する装置が必要



Sunrise気球実験の課題

- 長時間(数時間以上)安定観測できるゴンドラ: これまでのフライトでは30分程度しか連続観測を行えなかった。可動鏡による像安定化装置のリミットに達してしまう
- 長波長側で回折限界性能を達成すること: 撮像観測装置では後処理による画像回復で回折限界を出すことができる。スリット分光観測では後処理を行うことが困難