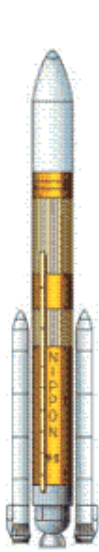








# 小さな飛翔体で 尖がった太陽観測を行う - CLASP, SUNRISE, FOXSI -

久保雅仁  
(国立天文台・助教)

## 小さな飛翔体観測＝観測ロケット、気球、超小型衛星

一般の方が思い浮かべる(TVニュースになる)ような「衛星」観測ではない。

	●H-II	●H-IIA	●H-IIB	●M-3S	●M-3SII	●M-V	●イプシロン
60m							
40m							
20m							
0m							
全長(m)	50m	53m	57m	23.8m	27.8m	30.7m	24.4m
直径	4m	4m	5.2m	1.41m	1.41m	2.5m	2.5m
全重量	260t	285t	531t	48.7t	61t	139t	91t
打ち上げ能力	10t	10t	16.5t	300kg	770kg	1800kg	1200kg(※)

液体ロケット

固体ロケット

(JAXA)

## なぜ小型の観測ロケットや気球？

大きな衛星に搭載する観測装置を開発するコスト・期間・国際協力がどんどん大規模になっている。

- 短時間・低コストで開発できる(小型の)観測装置で研究成果を出し続ける。
- 観測装置の宇宙での実績を作る。
- 人材育成(プロジェクトマネジメント、装置開発、国際協力)。
- 比較的好き勝手できる(尖ったサイエンス・挑戦的な装置)。

## 例えばより細かく太陽を見たいと思ったら。。。

どこまで細かく見えるか～ $\frac{\text{観測波長}(\lambda)}{\text{望遠鏡の口径}(D)}$

- 望遠鏡の口径を大きくする。  
→ 小さな飛行体では限界がある。
- 観測波長を短くする。

小さな飛行体でこのパラメータで勝負するのはなかなか難しい状況



# 米国主導の地上超大型太陽望遠鏡(DKIST)

建設中の様子@ハワイ(2016年7月)



光学架台



2019年頃に口径4mの地上望遠鏡が観測開始(現状では1.5mが最大)。

- 今後しばらく、太陽物理研究はDKIST中心に進む(私見)。
- 地上・宇宙を問わず、DKISTと競えるor別の方向性の観測装置が必要とされる。

## 小さな飛翔体観測で活かそうなパラメータ

- 地上では観測できない波長(紫外線、X線、ガンマ線)で観測
- 大気揺らぎの影響を受けない観測
  - ✓ 太陽像の劣化の影響を受けない動画観測
  - ✓ 安定した(高精度な)物理量診断
- その場観測(地球惑星的な観点)

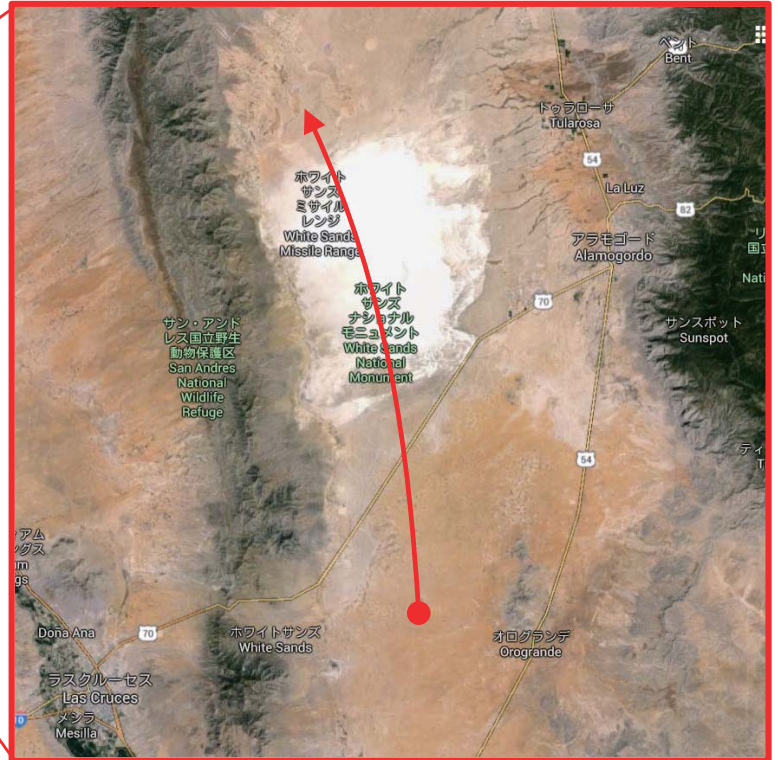
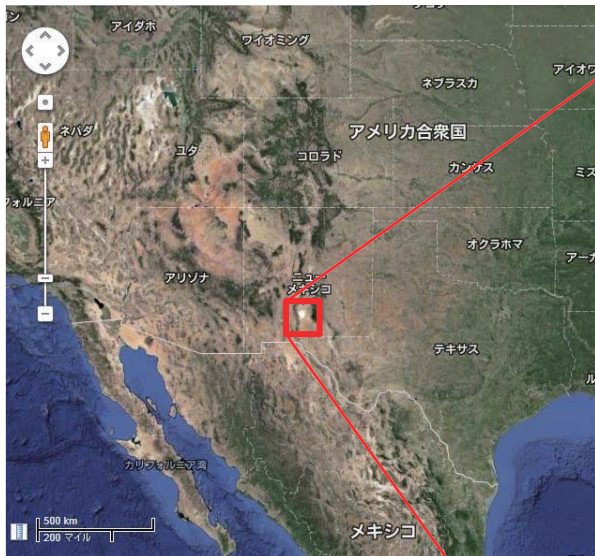
# 観測ロケット実験CLASPの場合

## CLASP初飛翔(2015年9月3日)





# 白い砂漠からの打ち上げ



## 弾道飛行

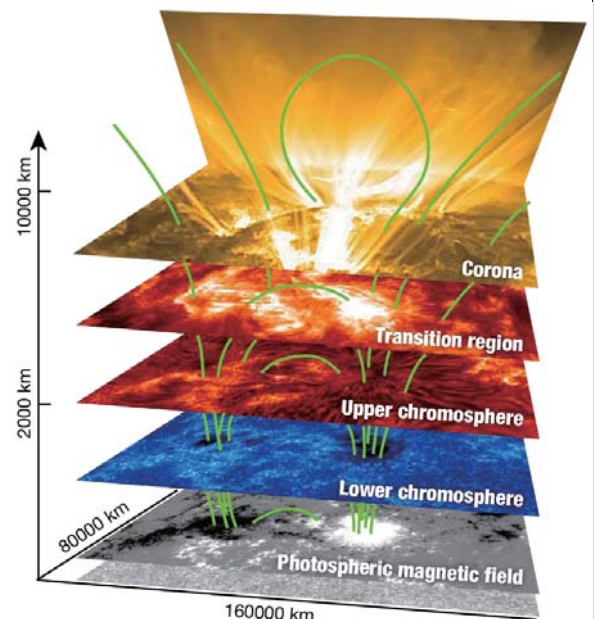
- 最大高度～278km
- **観測時間約300秒**
- 無事砂漠に帰還。

# Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter

可能な限りコロナに近い高さの大気層の(弱い)磁場を測定したい。

黒点の外(静穏領域)も測定したい。

真空紫外線(大気で吸収)の偏光分光観測なら上記の磁場情報を得られるかもしれないが、難しくて誰もやっていない。



偏光の講義は一本さん@飛騨天文台

やってみよう!

## 7年の道も一歩から

日本とスペインの偉い先生がどこかの会合で、真空紫外線(Ly $\alpha$ 線)を用いた磁場観測の話で盛り上がる。



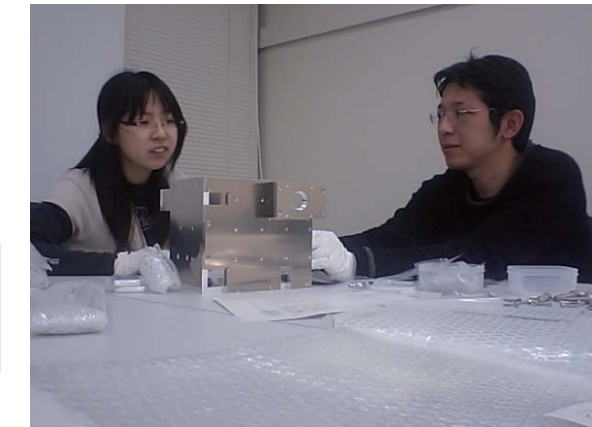
色々声をかけたら、右の二人が興味があると手をあげる。



学生を中心に光学素子のLy $\alpha$ 線での光学定数(偏光特性)の測定を始める。



どんどん話が大きくなって、人が集まり、国際協力体制も決まっていく。



NASAの観測ロケットにプロポーザル提出。

## 国際協力: 5か国12機関が参加

**日本:** 鹿野良平 (PI, 国立天文台)



- すべてのCLASP観測装置 (但し、CCDカメラシステムと球面回折格子を除く)
- ハンレ効果による磁場計測手法の確立

**米国:** A. Winebarger (PI, NASA/MSFC)



- CCDカメラシステム, 搭載エレキ
- 観測ロケット, フライト運用

**フランス:** F. Auchère (PI, IAS)

- 球面回折格子



**ノルウェー:** M. Carlsson (Oslo U.)

- 彩層・遷移層の3次元大気モデル



**スペイン:** J. Trujillo Bueno (PI, IAC)

- ハンレ効果を含む偏光線輪郭形成モデル

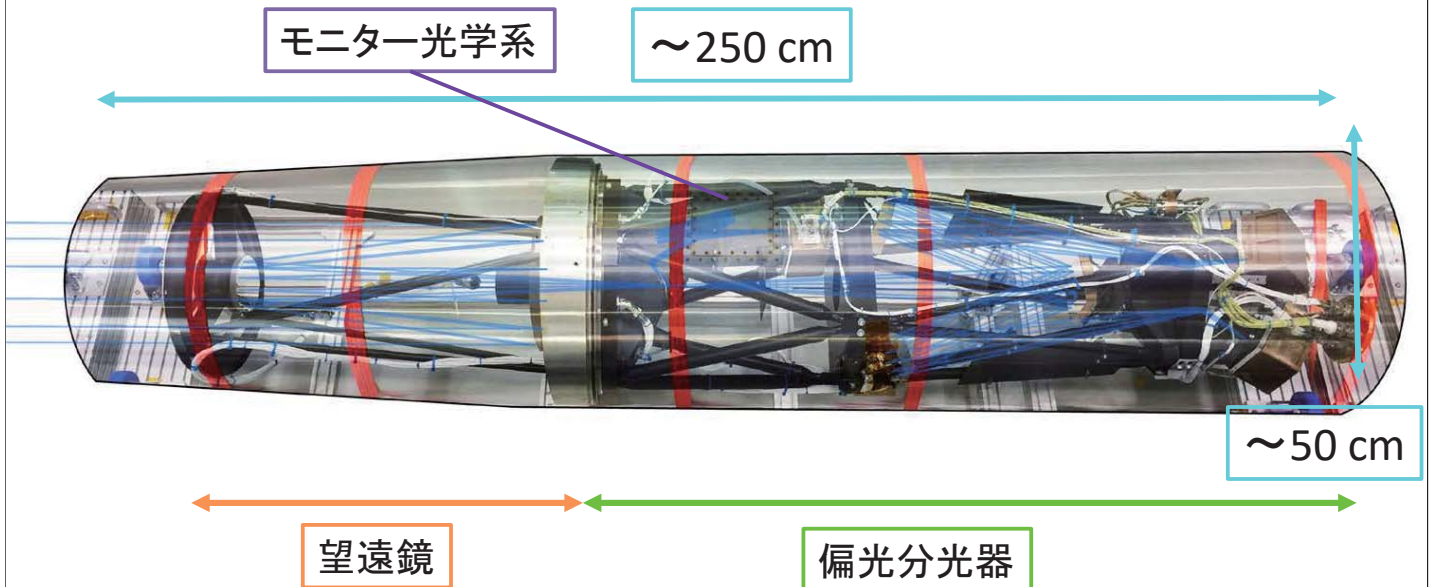


連携

日本の太陽グループは良い人達と組める土壤がある。



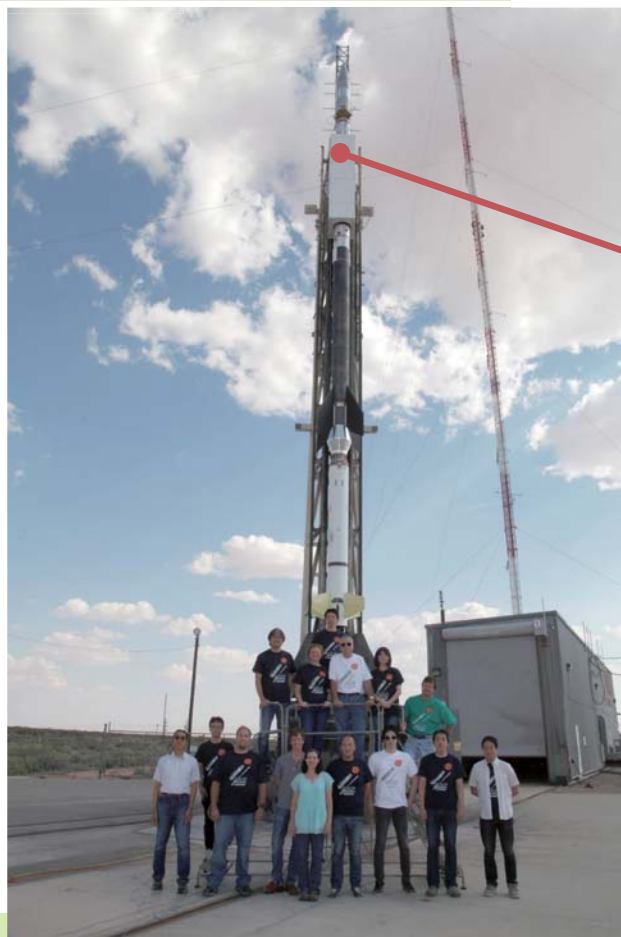
## 完成したCLASP(観測装置部)



国立天文台大クリーンルームで組立・試験を実施。

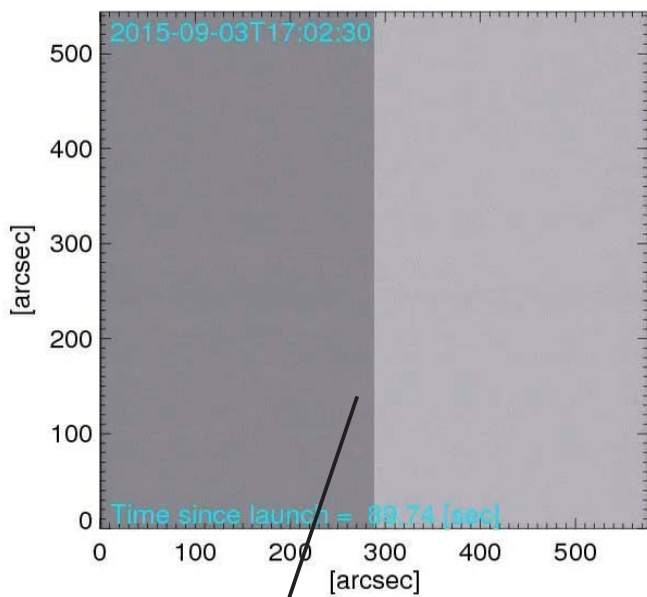
## CLASP@打ち上げ場

打ち上げ前日に  
ロケットの前で記念  
撮影

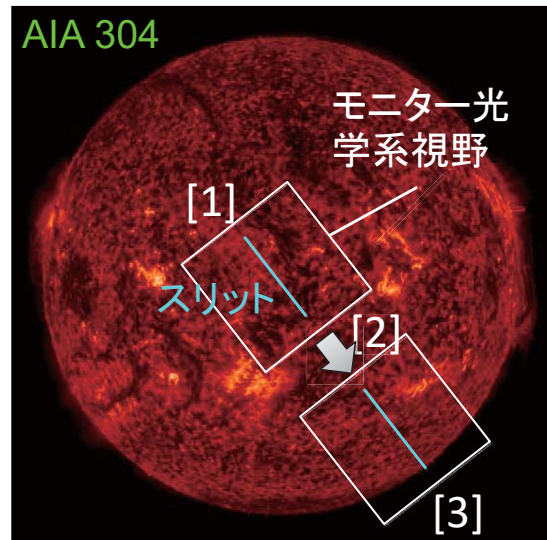


# 人生で一番緊張した(?)5分間の開始

モニター光学系

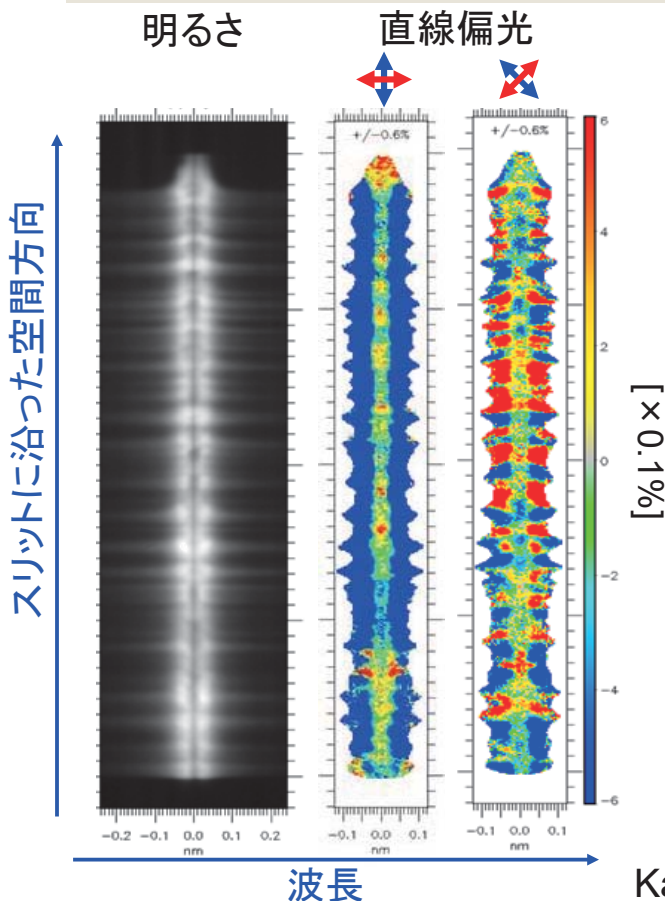


望遠鏡のフタが閉じた状態

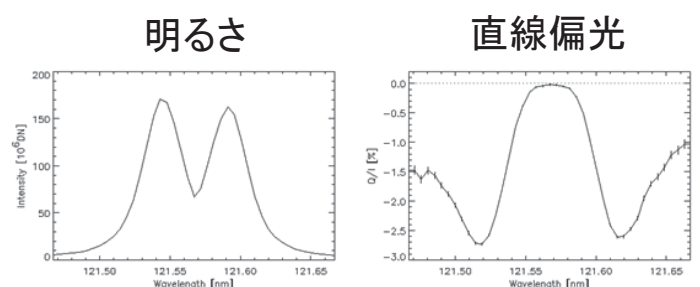


太陽中心付近の観測: ~10秒  
太陽縁付近の観測: ~4分半

## 世界初の太陽起因のLy $\alpha$ 線(122nm)の偏光の検出



- 紫外線観測で0.1%という高い偏光測定精度を達成。
- 水素ライマン $\alpha$ 輝線(波長121.6 nm)での偏光分光観測に成功。
- 磁場起因の偏光も検出。

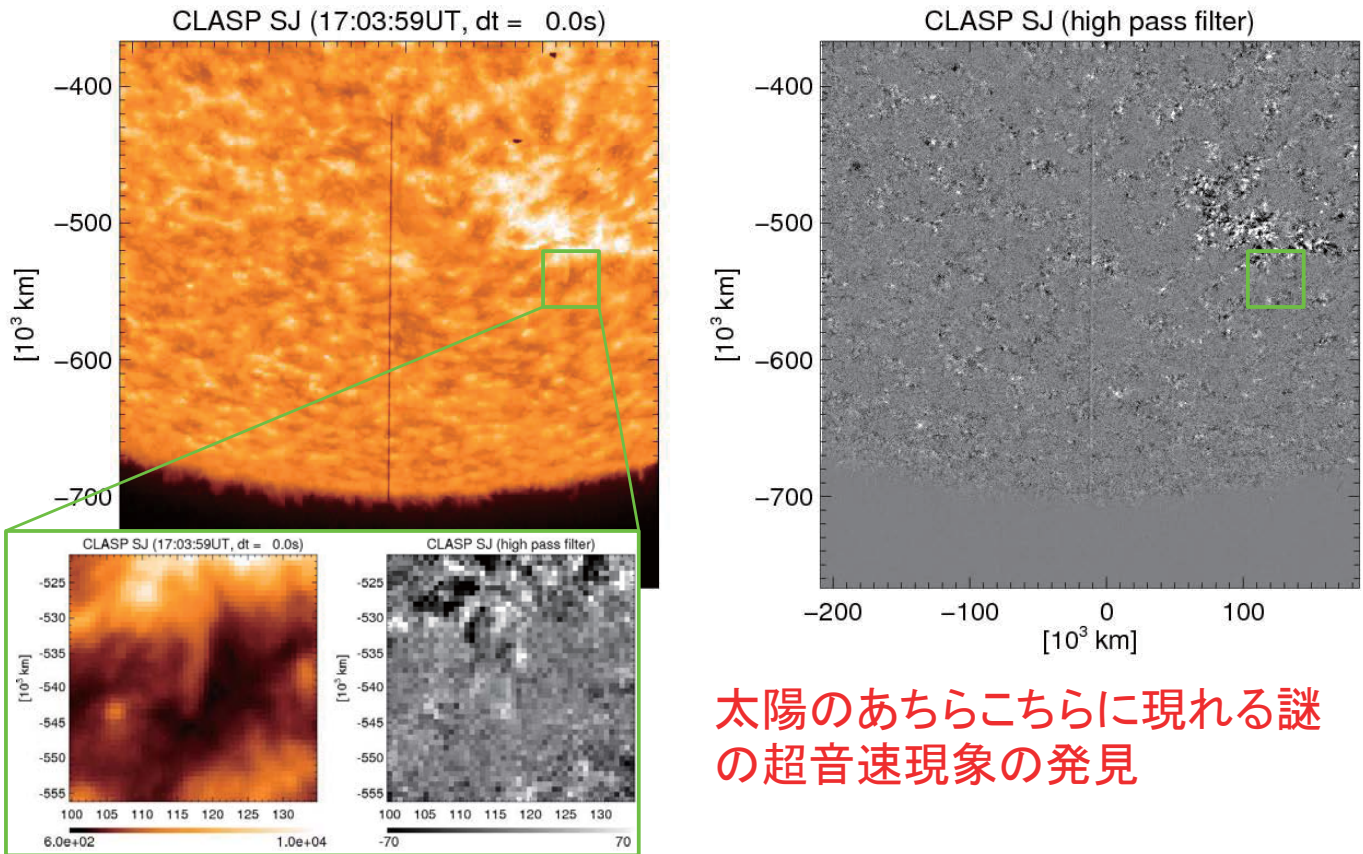


平均的なプロファイル

Kano et al. (2017)



# 安定した(高速)観測の恩恵



太陽のあちこちに現れる謎の超音速現象の発見

Kubo et al. (2016)

# CLASPから更なる発展

CLASP-1  
日本側代表

FOXSI-3搭載光子計測型X線撮像装置  
日本側代表

CLASP2  
日本側代表

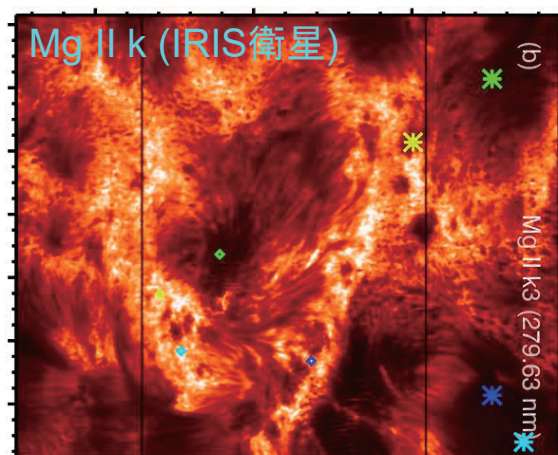
国際大気球実験  
SUNRISE-3搭載  
赤外線偏光分光装置  
日本側代表



# これからの小型飛翔体観測装置

## Chromospheric **L**ayer **S**pectro**P**olarimeter 2

- 2016年12月NASAに採択され本格始動!
- 最小の光学・構造変更を施し、Mg II h & k線(280nm)の偏光分光観測を実施。
- 先週水曜日に観測装置が日本に帰還。改修へ
  - ✓ 打ち上げ後の損傷無し
  - ✓ 基礎開発は完了。
  - ✓ フライト品開発へ。





# CLASP2のまとめ

2019年春の再飛行を計画中！

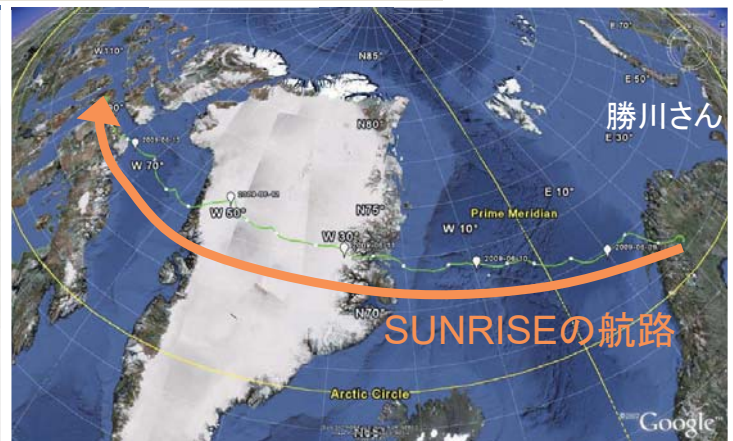
	CLASP1	CLASP2
観測量	直線偏光	直線偏光 + 円偏光
波長	Lya (122 nm) & Si III (121 nm)	Mg II h & k at 280 nm
分解能	0.01 nm (波長), 2-3" (空間)	0.01 nm (波長), 1-2" (空間)
分光器の視野 (スリット長)	400"	200"
観測太陽大気層	彩層上部～コロナ底部	彩層上部
観測ターゲット※	静穏領域 (太陽中心 & 縁)	静穏領域 (太陽中心 & 縁) & プラージュ

※CLASP2の方が、必要な光子数を集める時間が短い

CLASP1&2で真空紫外線の偏光分光観測の将来が決まる。

## 国際大型気球実験SUNRISE-3

放球の様子

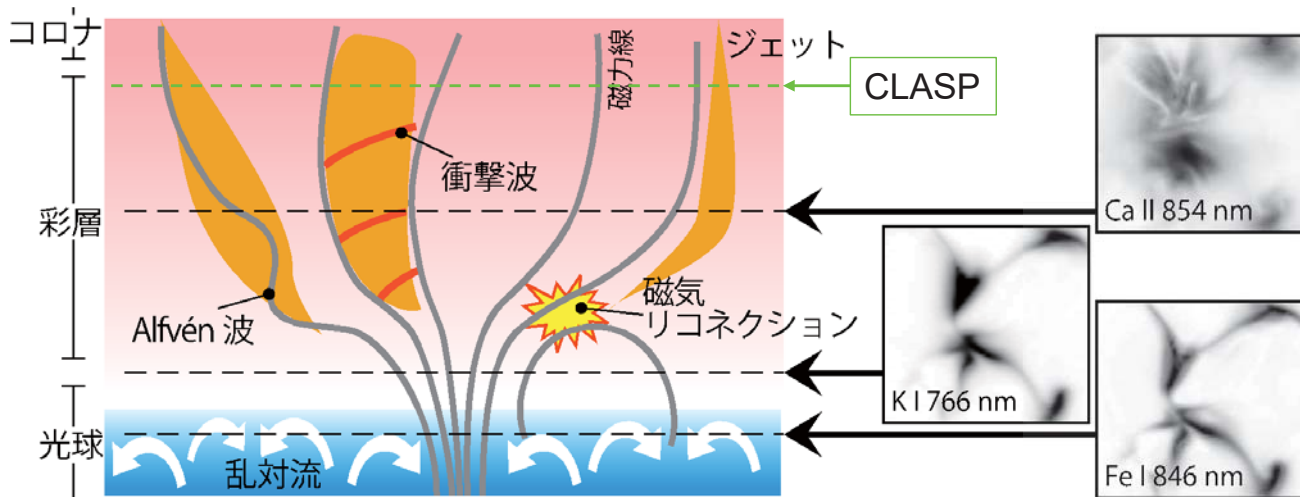


欧州の太陽グループが口径1m(「ひので」の2倍)の望遠鏡を気球にのせて、2009年と2012年に観測。2020年夏の3回目の飛行を目指す。

- 彩層磁場の高解像度・高感度観測をする装置(近赤外線偏光分光装置: SCIP)を供給するべく、2015年9月から検討をスタート。
- 高度35kmで、1週間弱の連続・安定(大気の影響のぼぼない)観測。観測装置は回収され、再利用可能。

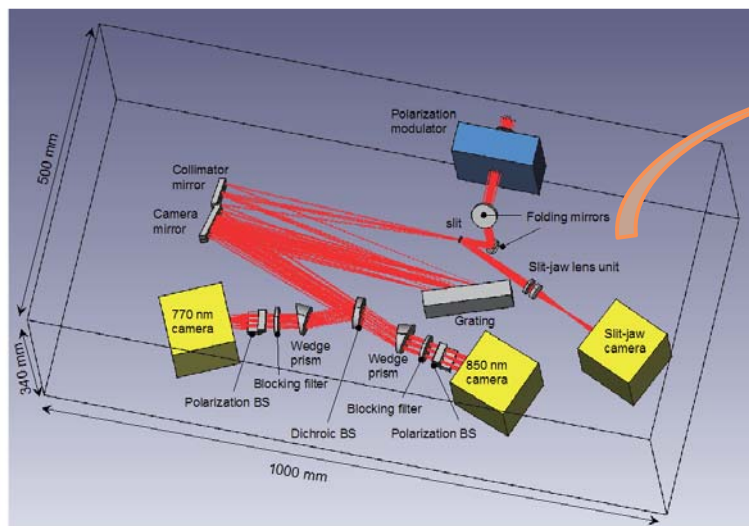


# SUNRISE-3/SCIPが狙う科学課題



- 光球から彩層につながる**3次元磁場構造**を測定
- 彩層で**磁気リコネクション**(磁場構造の不連続)の現場を検出。
- 磁場形状が**MHD波動伝播**に与える影響を明らかにする。

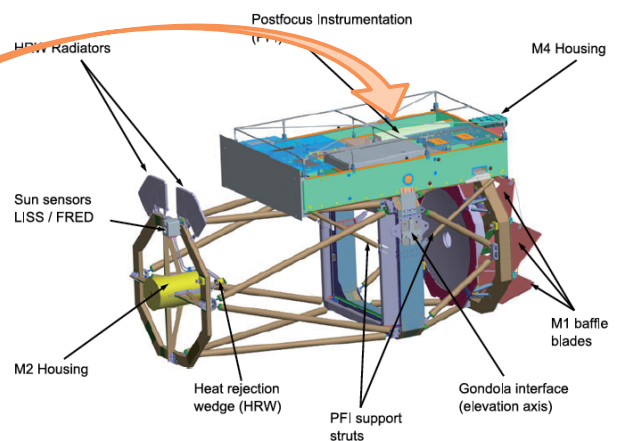
# SUNRISE-3及びSCIP



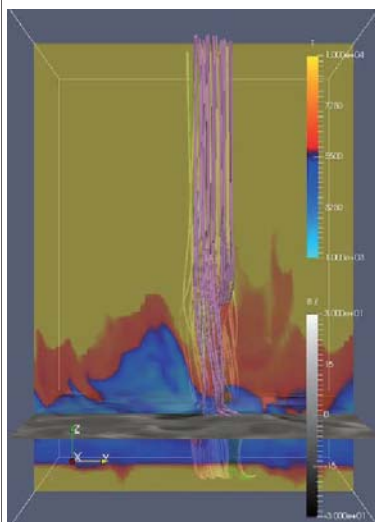
SCIPの光学デザイン

日本国内で組み立てた観測装置をドイツで観測装置箱に入れる。

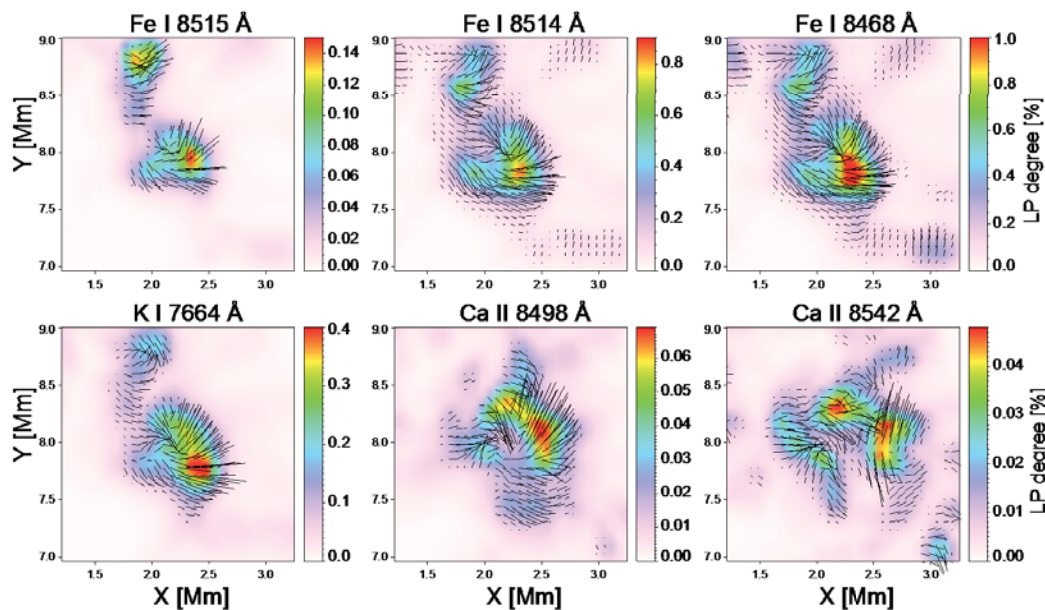
SUNRISE全体像



# 観測と数値計算の融合



Iijima (2016)

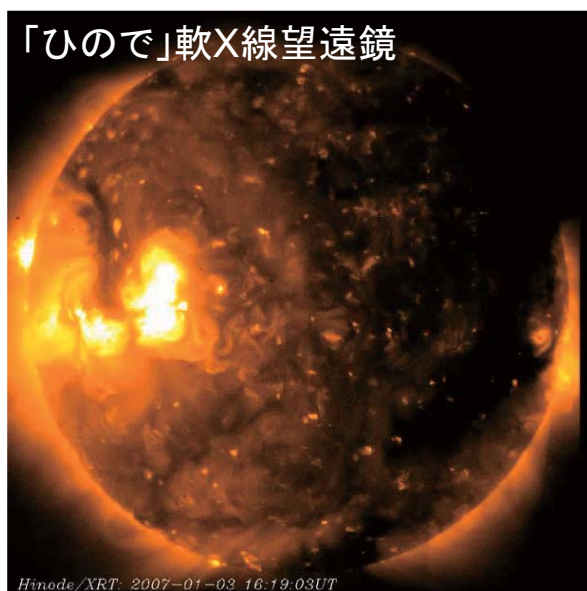


Quintero Noda et al. (2017)

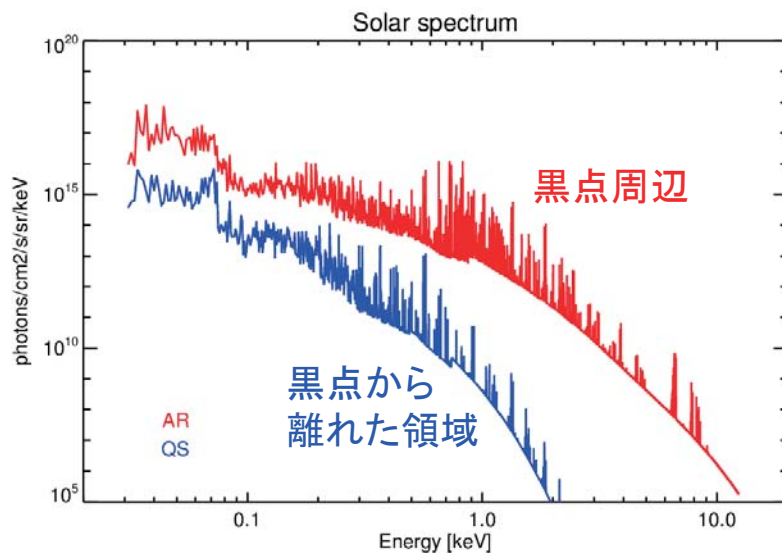
数値計算で見られる光球-彩層下部のねじれた磁場構造を SCIPの偏光観測でとらえることができる(見込み)。

# 光子計測型X線撮像装置

太陽コロナから放出される個々の光子のエネルギーを測定することで、X線スペクトルの2次元分布の時間発展を測定する。  
→太陽コロナの加熱・加速機構を定量的に調べる。



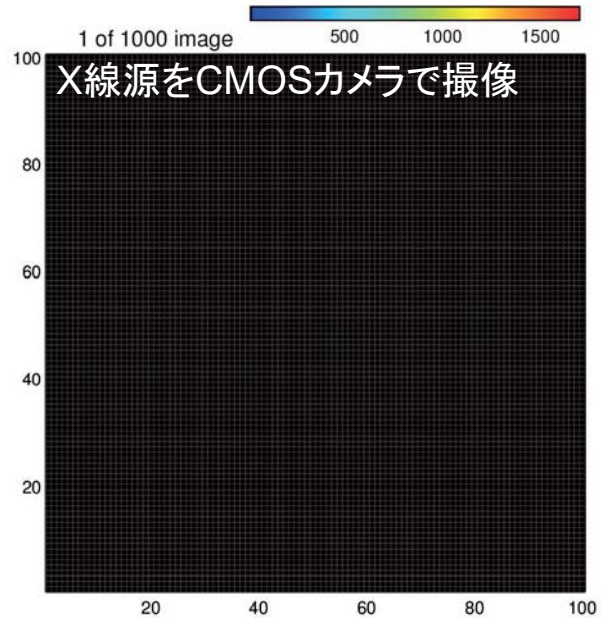
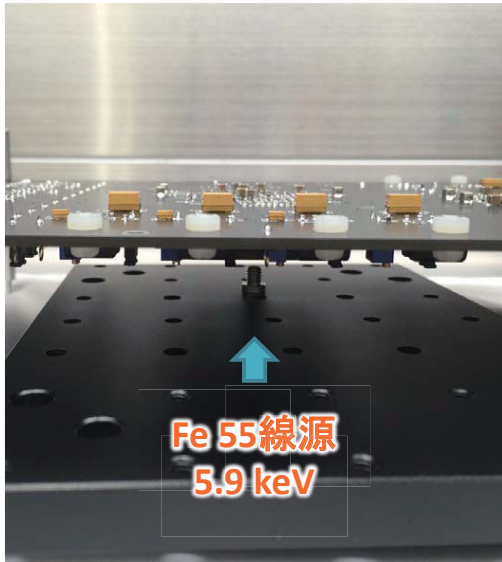
Hinode/XRT: 2007-01-03 16:19:03UT



# 光子計測型X線撮像装置

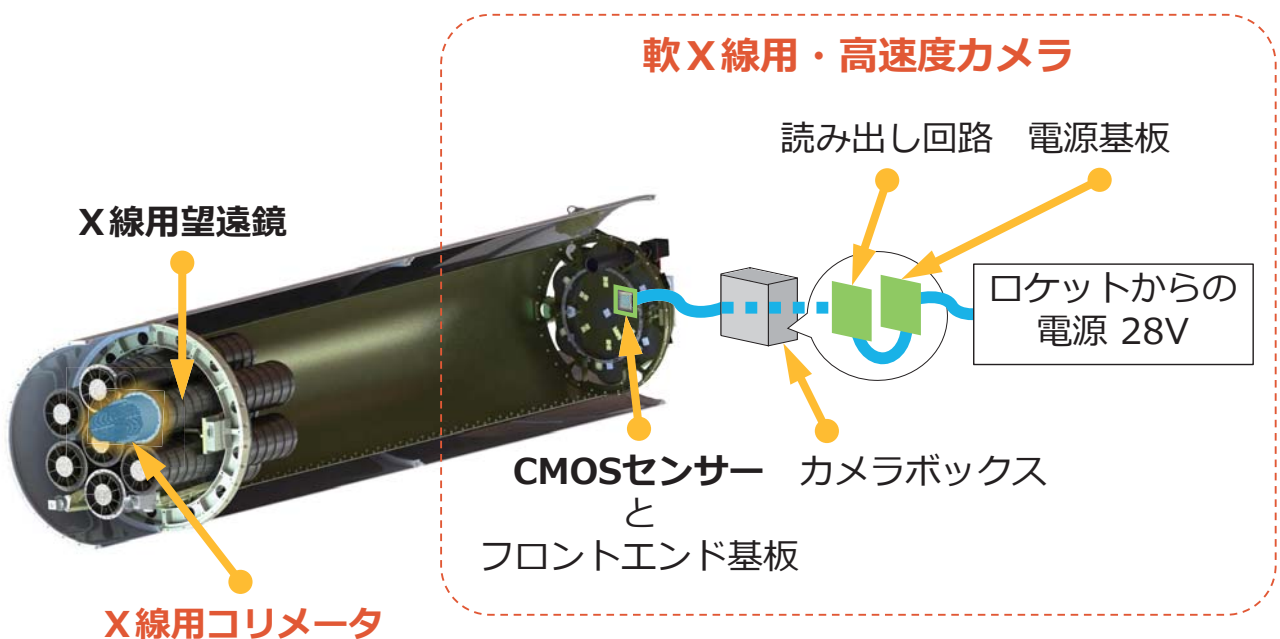
光子計測とは、光子の持つエネルギーに比例した信号を出す検出器を用い、光子が持つエネルギーを光子1個毎に計測すること。

- 夜の天文学では普通に行われているが、太陽は現象のタイムスケールが数十秒～数分と非常に短いため、これまで実現できなかった。
- 太陽でこれを行うには、1秒間に連続1,000回程度の露光が必要。



# FOXSI-3への参入

- FOXSI は、鏡を使って集光する太陽用・硬X線撮像分光望遠鏡
- 2018年夏のフライト(3度目)がNASAに承認されている。
- 7本の望遠鏡のうちの1本に光子計測用のカメラを日本から供給。





# 小さな飛翔体の将来展望(夢の段階)

FOXSI-3ロケット実験



CLASPロケット実験



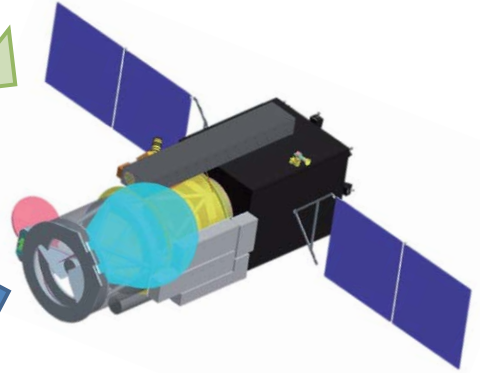
SUNRISE-3気球実験



小型衛星

?

次期太陽観測衛星「SOLAR-C」



大型地上望遠鏡の観測装置

?

色々な小さな飛翔体観測が提案されている良い時期です。興味があったらぜひご参加を。

