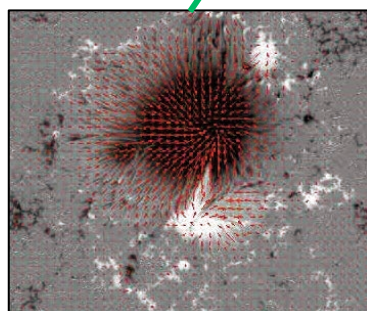
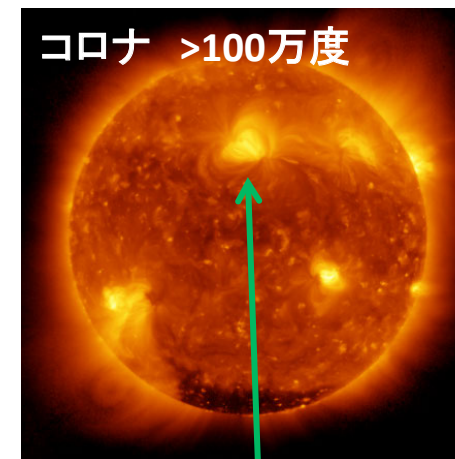
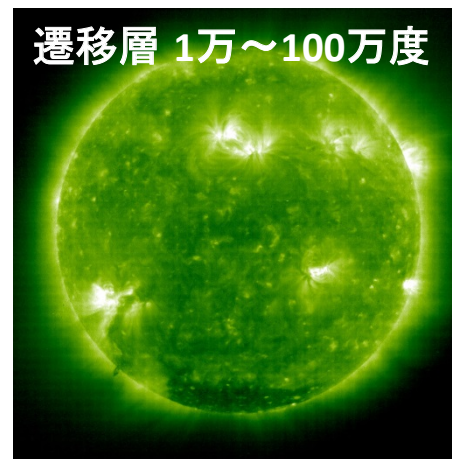
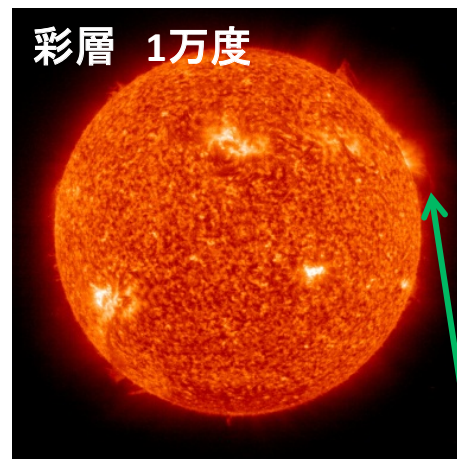
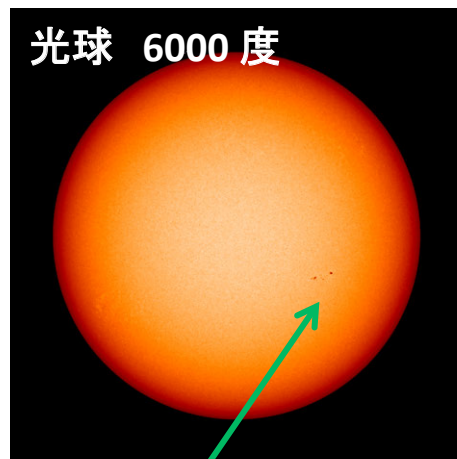


太陽ライマン α 線偏光分光観測ロケット実験 Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter (CLASP) の概要と開発状況

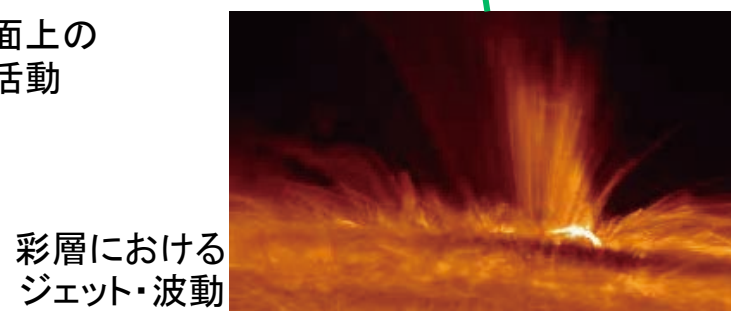
- 成影 典之, 鹿野 良平, 坂東 貴政, 石川 遼子, 久保 雅仁, 勝川 行雄, 石川 真之介, 末松 芳法, 原 弘久, 木挽 俊彦 (国立天文台), 常田 佐久, 坂尾 太郎 (ISAS/JAXA), 宮川 健太 (東京大学), Gabriel Giono (総研大), 一本 潔 (京都大学), 他CLASPチーム

彩層加熱・コロナ加熱の謎

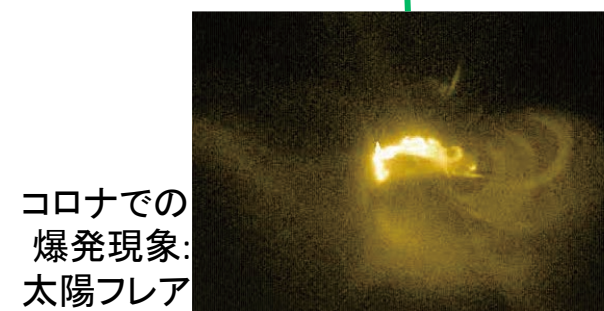
太陽表面(=光球)の上空に、高温大気(彩層・遷移層・コロナ)が広がるが、その加熱機構の解明は、太陽物理学での永年の課題である。



光球面上の
磁場活動



彩層における
ジェット・波動

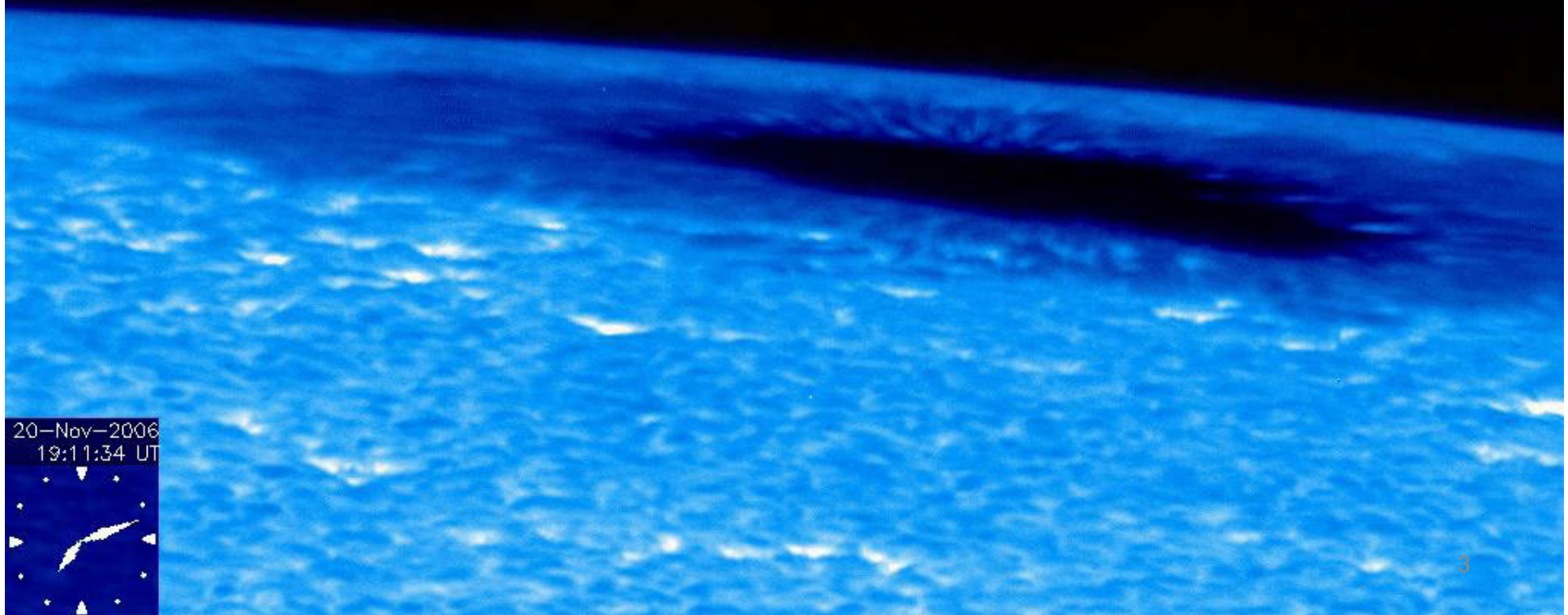


コロナでの
爆発現象:
太陽フレア

太陽大気の加熱や多様な活動現象には、磁場が関与しているに違いないが、光球面以外では、ほとんど磁場が測られてはいない。

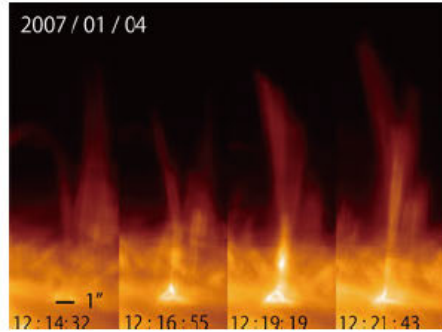
→ 彩層・遷移層を含む、光球~コロナまでの磁場の精密・高分解能観測が不可欠。

日本の太陽観測衛星「ひので」が観測した
光球(太陽表面) → 彩層(太陽大気)

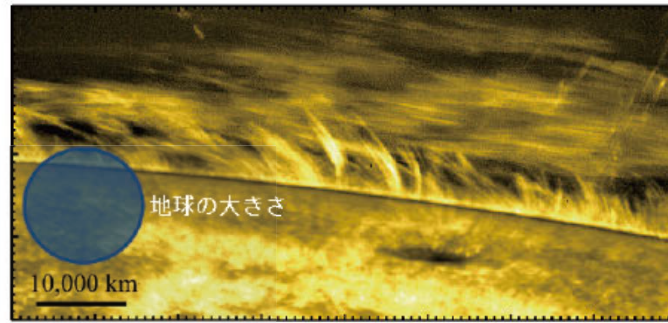


20-Nov-2006
19:11:34 UT

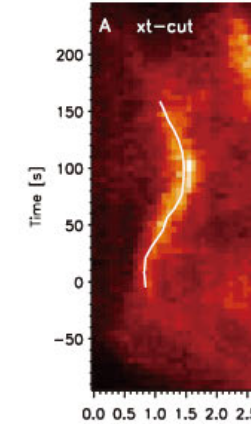
彩層・コロナの加熱源候補を発見



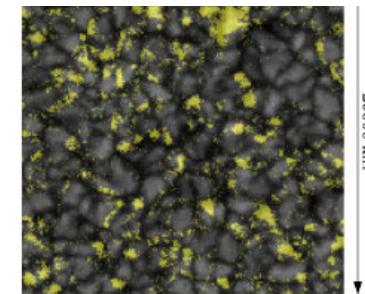
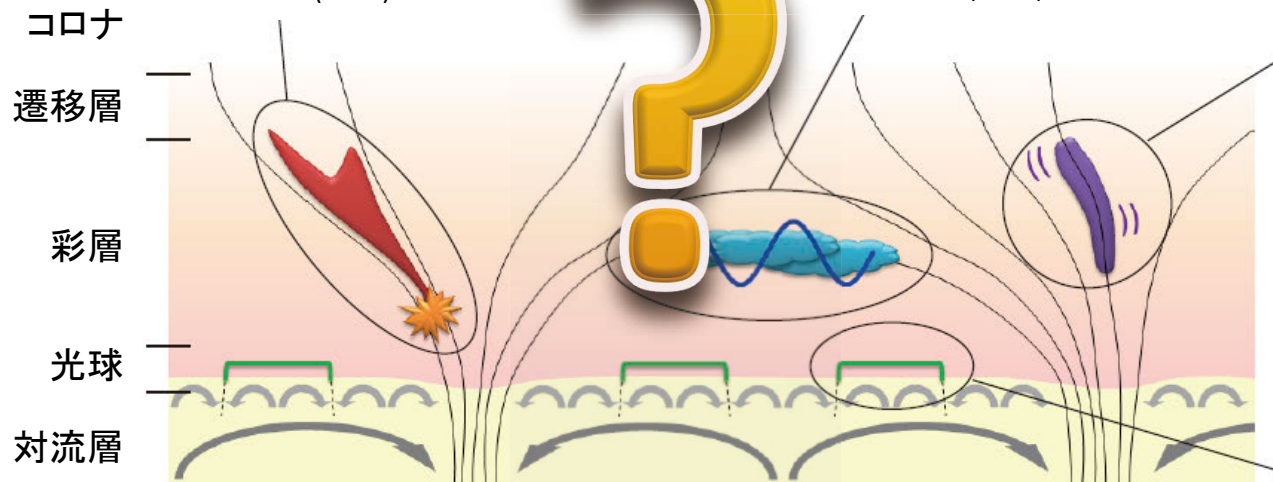
(A) 彩層ジェット
Shibata et al. (2007)



彩層中を伝搬する波動
Okamoto et al. (2007)

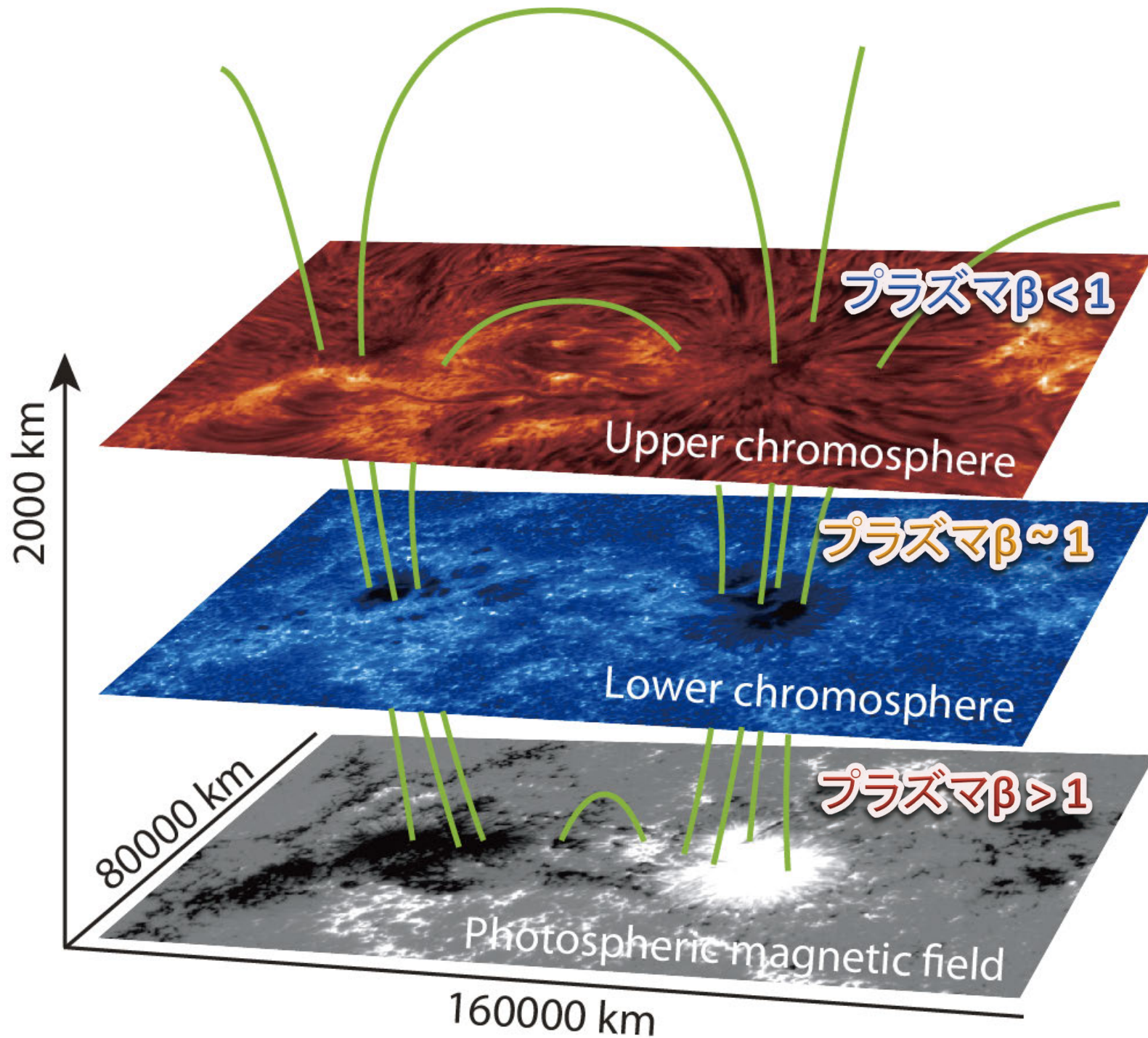


(C) スピキュールの振動
De Pontieu et al. (2007)

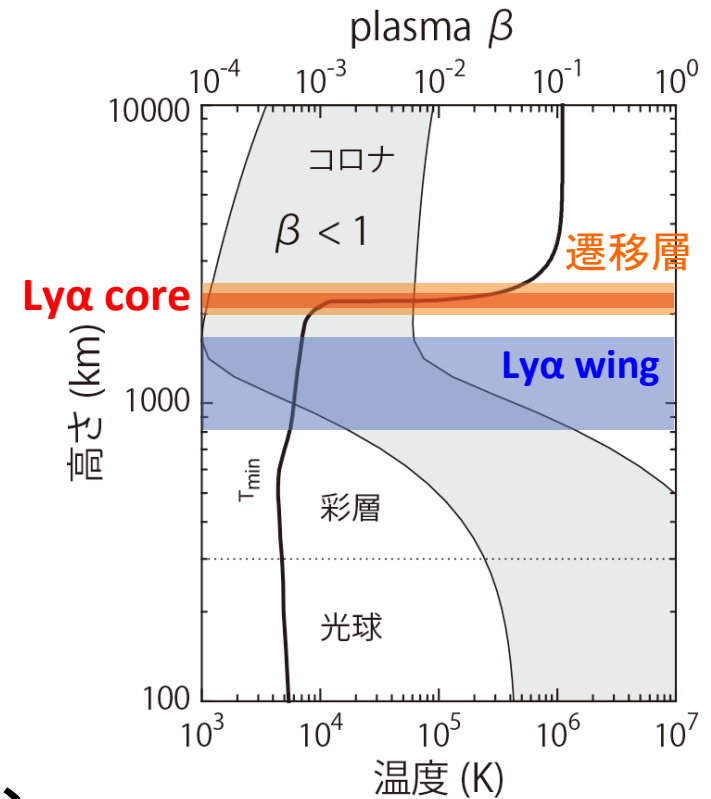
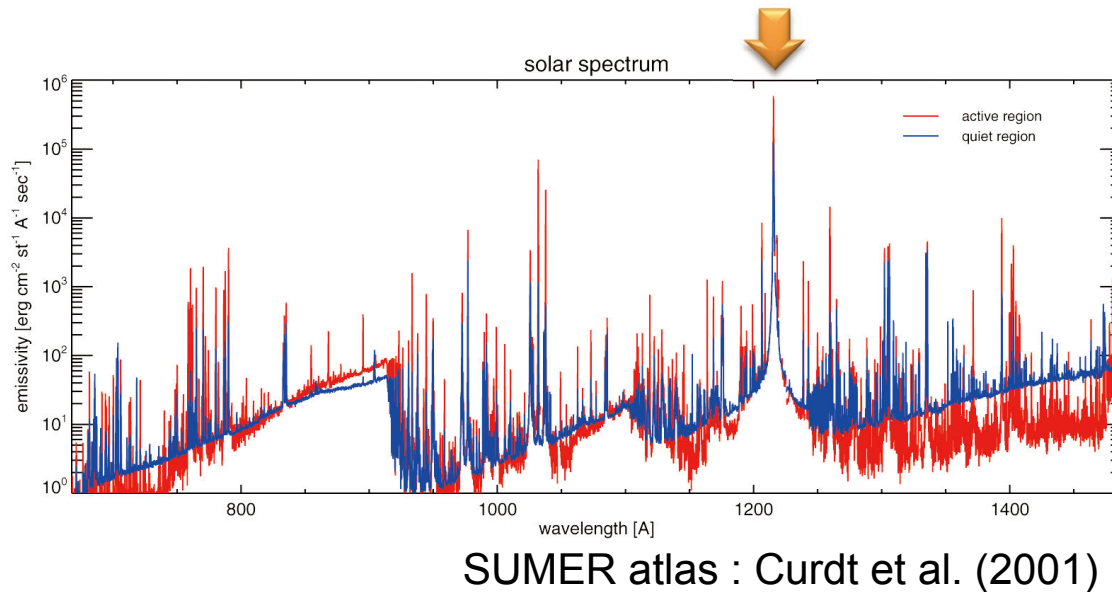


(D) 短寿命水平磁場
Ishikawa & Tsuneta (2009)

「ひので」の撮像観測により彩層のダイナミックな現象が次々と発見され、彩層現象の理解が極めて重要なことが分かった。しかし、彩層磁場の直接計測は殆ど行われていない。



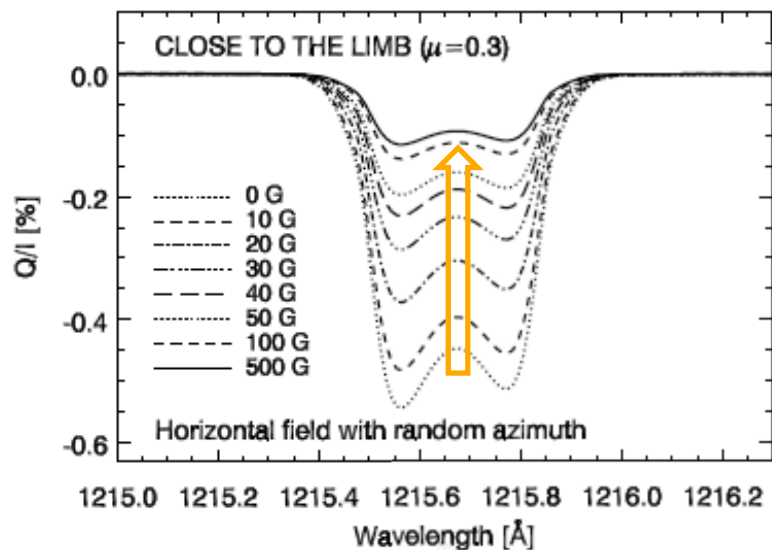
遷移層～彩層上部の磁場測定の可能性を秘める ライマン α 線 (波長121.6 nm)



プラズマ β : Gary (2001)
輝線: Vernazza et al. (1981)

- 真空紫外線域で最も明るい輝線。
 - 太陽では彩層上部から遷移層で輝き、光学的に厚い。
- Ly α 線を偏光分光することで、最もコロナに近い $\beta < 1$ の領域の磁場測定を行うことが出来る。

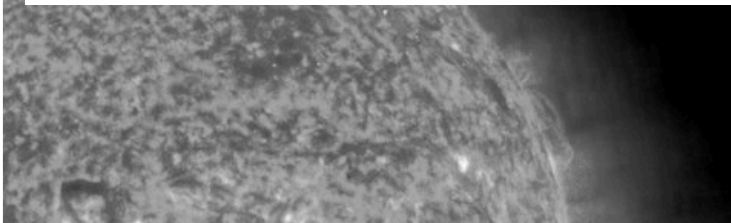
ハンレ効果のモデル計算から予測される ライマン α 線における偏光信号 = 0.1%レベル



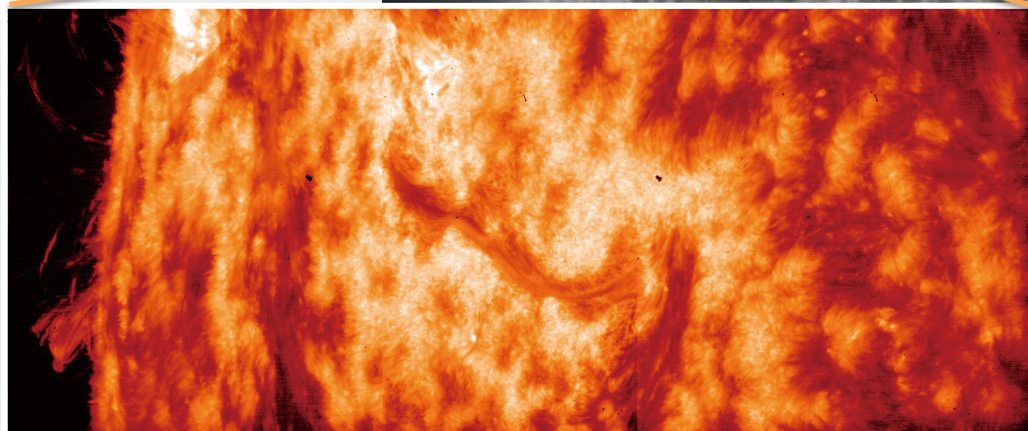
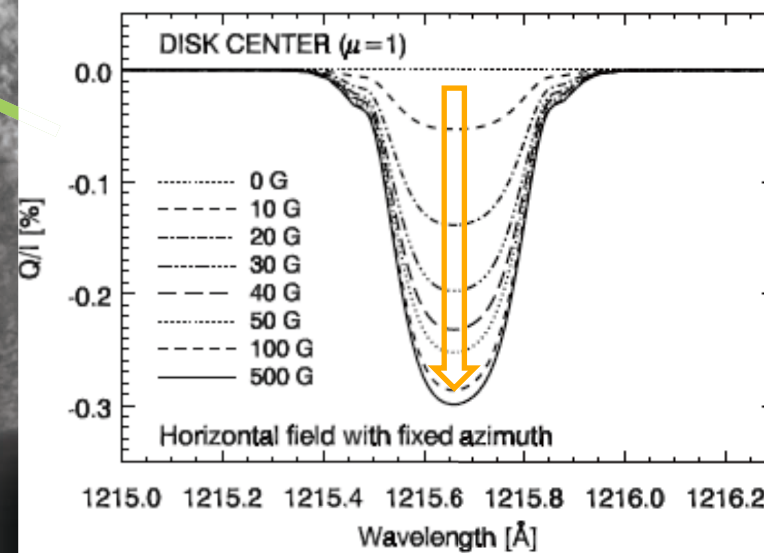
Trujillo Bueno et al. 2011

ハンレ効果

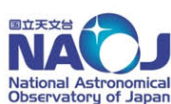
散乱偏光によって作られた直線偏光度が磁場によって変化する効果。



Trujillo Bueno et al. 2011



VAULTロケット実験で観測されたライマン α 線画像



UAHuntsville
THE UNIVERSITY OF ALABAMA IN HUNTSVILLE



LOCKHEED MARTIN



Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter

NASAの観測ロケットを用いた日米共同ミッション。

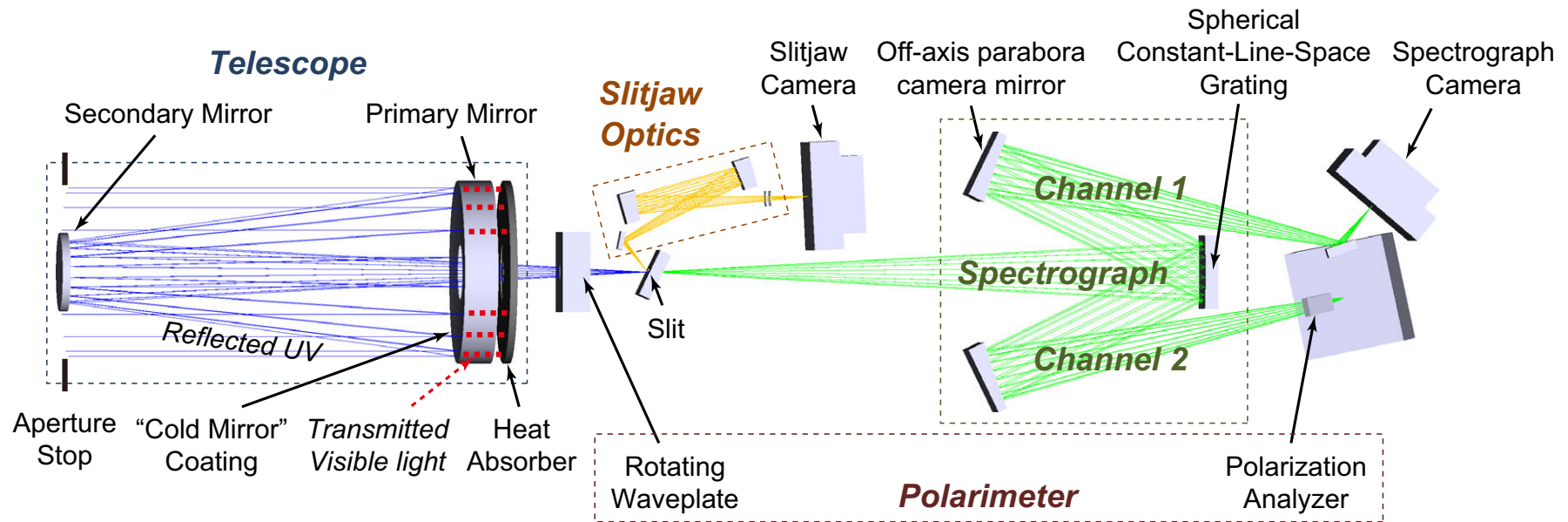
日本・米国・スペイン・ノルウェー・フランスの国際共同研究。

目的:

太陽の遷移層～彩層上部から放たれるライマン α 線を
世界で初めて偏光分光観測し、

1. ライマン α 線における Atomic polarization (散乱偏光)を初めて検出する。
2. ライマン α 線における Hanle effect (ハンレ効果)を初めて検出する。
3. 太陽の遷移層～彩層上部の磁場を直接測定する。

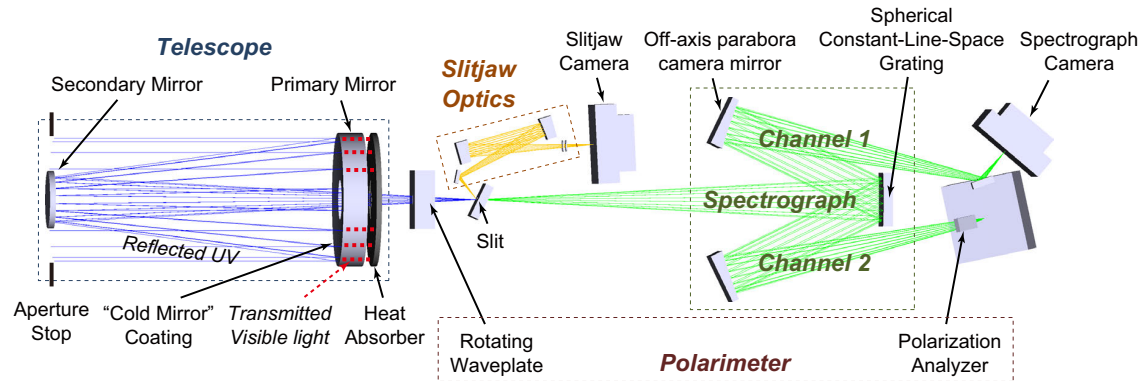
CLASP = 世界初のライマン α 線用・偏光分光装置 + モニタ光学系



- 回転1/2波長板と反射型偏光板による Stokes-I, Q, U の測定。
- 分光された+1次光と-1次光の両方を使い、
直交2成分の直線偏光を同時測定。

➔ 偏光測定精度: 0.1 %; 波長分解能: 0.01 nm; 空間分解能: 1.45" (スリット幅)

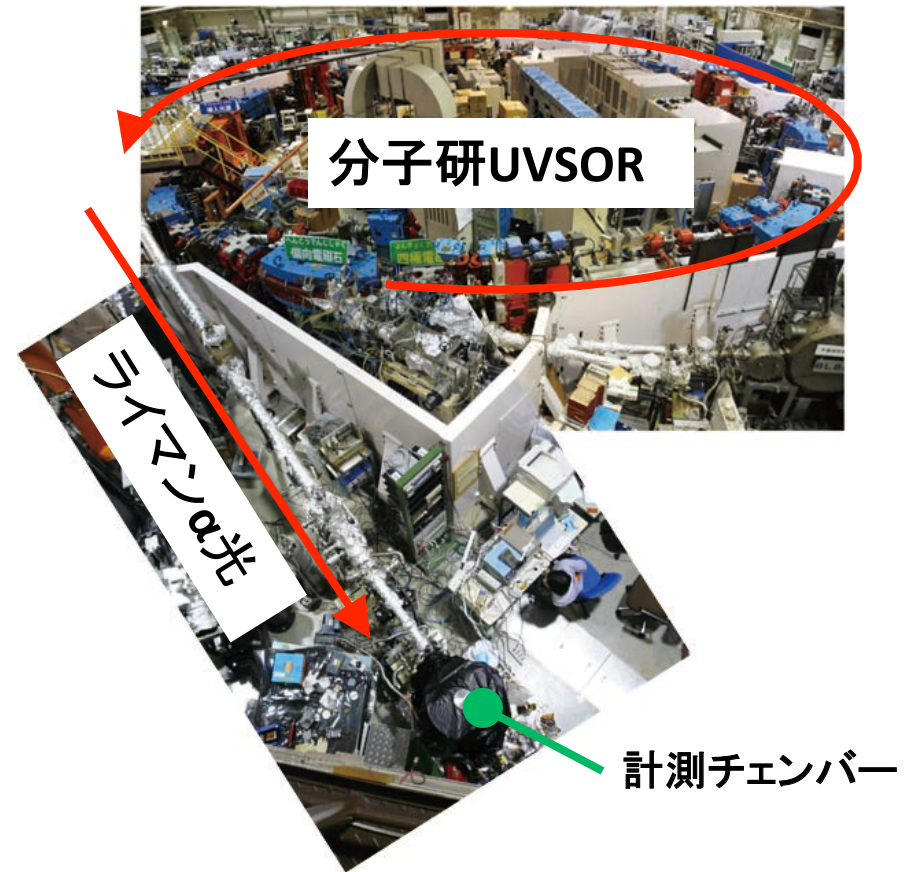
0.1%の偏光測定精度達成のための工夫

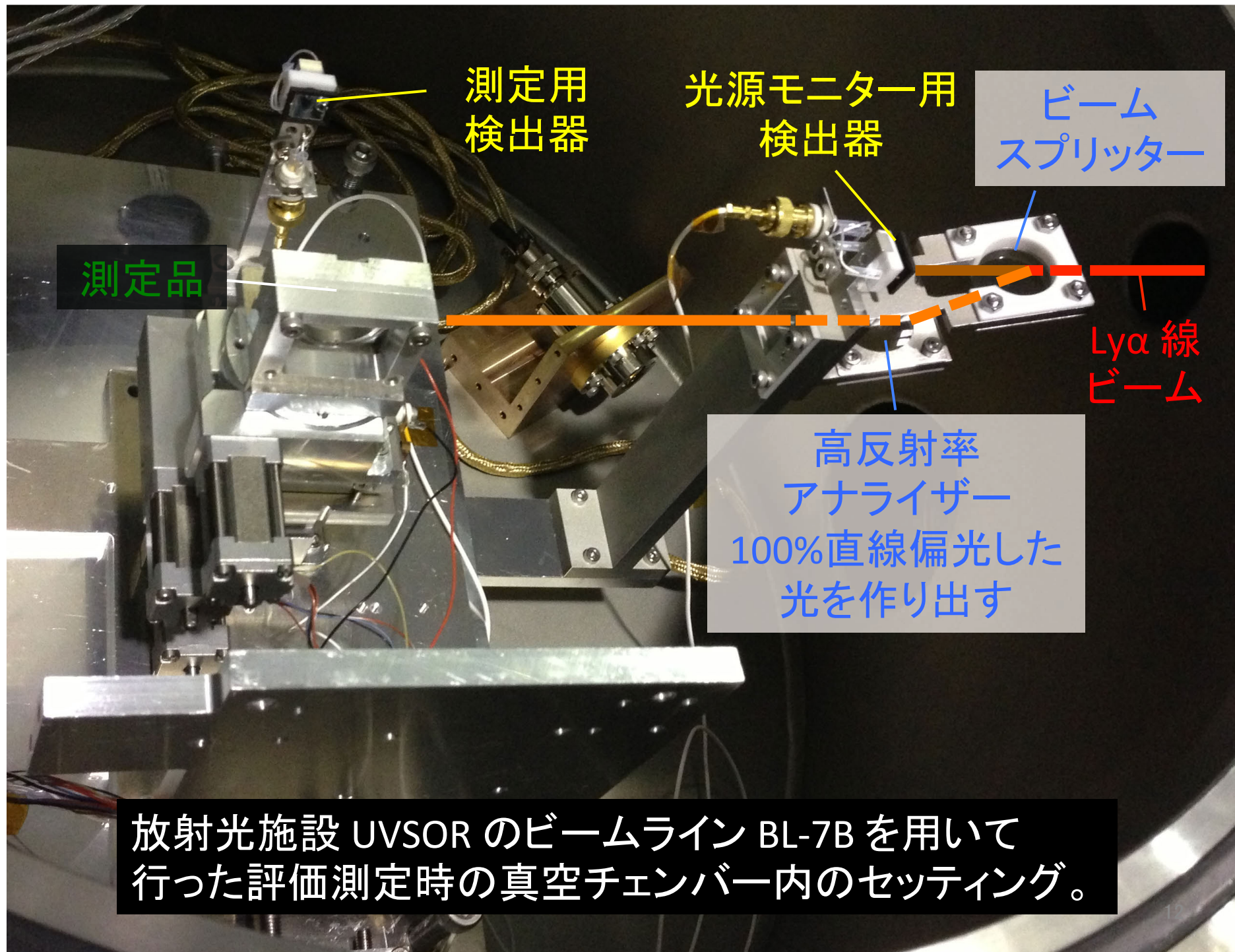


- 1. フォトンノイズ起因の擬似偏光の抑制:**
高いスループットの為に、**反射型の光学素子**を用い(波長板は除く)、各素子の役目に特化した**高効率コーティング**を施した。
- 2. ライマンα光以外の光による擬似偏光の抑制:**
太陽からの強烈な可視光を主鏡に施した**反射型狭帯域フィルターコーティング**で除去。
- 3. 装置起因の擬似偏光の抑制:**
スリットよりも上流は、**対称な光学系**(**コーティングの一様性**も含む)とした。
- 4. 太陽の強度変動による擬似偏の抑制:**
光学的に対称な2つのチャンネルを用いて**直交2成分の直線偏光を同時測定**する。
また、**1/2回転波長板**を用いて解析する偏光状態を入れ替える。

UVSOR BL-7B を用いた光学素子の開発と評価

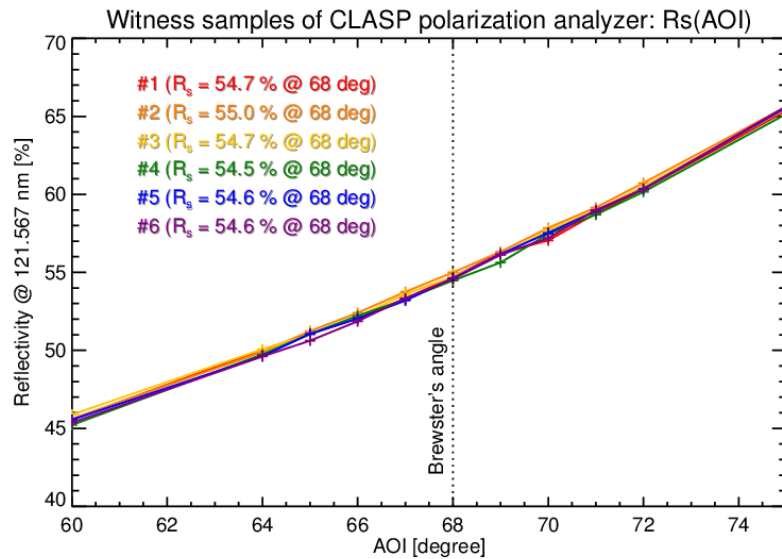
- 0.1%よりも高い精度で光学素子を評価するために、**強い強度、高い安定性、強い偏光度、高い単色性**をもつ光源が必要。
→平成21年度から、年4週の割合でUVSOR BL-7B を用いて開発を行ってきた。これまでに延べ約20週。



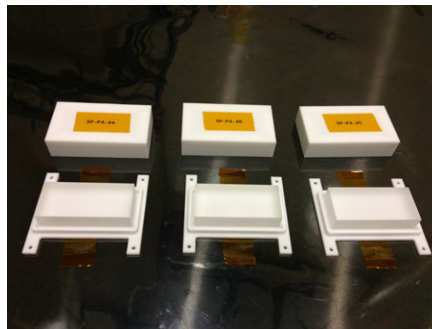
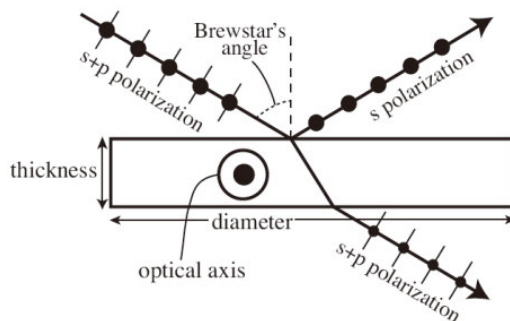
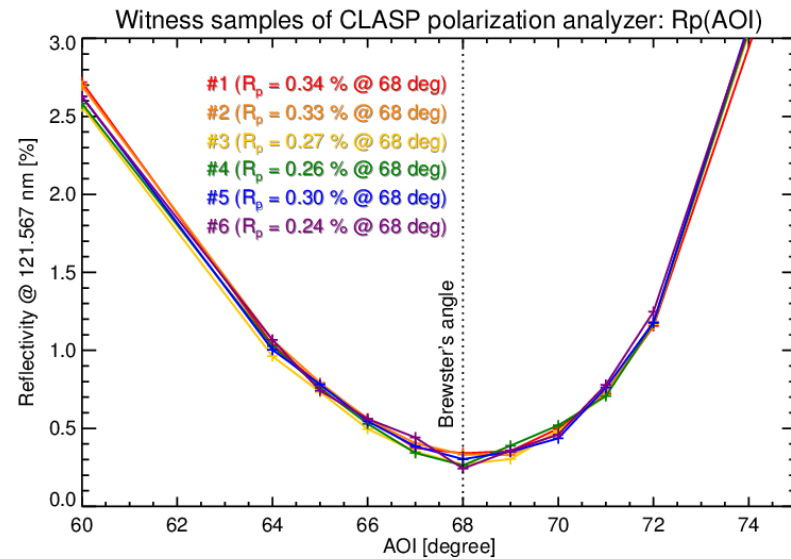


高効率反射型偏光コーティング (Bridou et al., 2011)

s偏光の反射率



p偏光の反射率

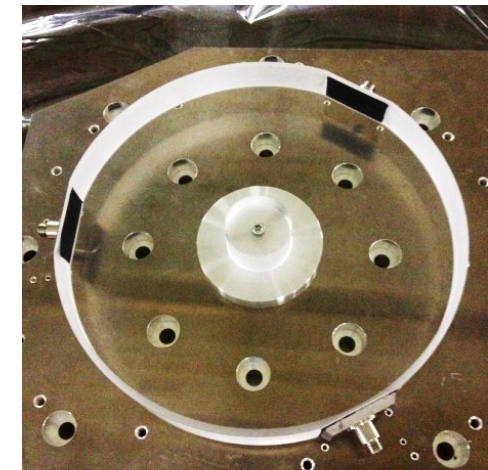
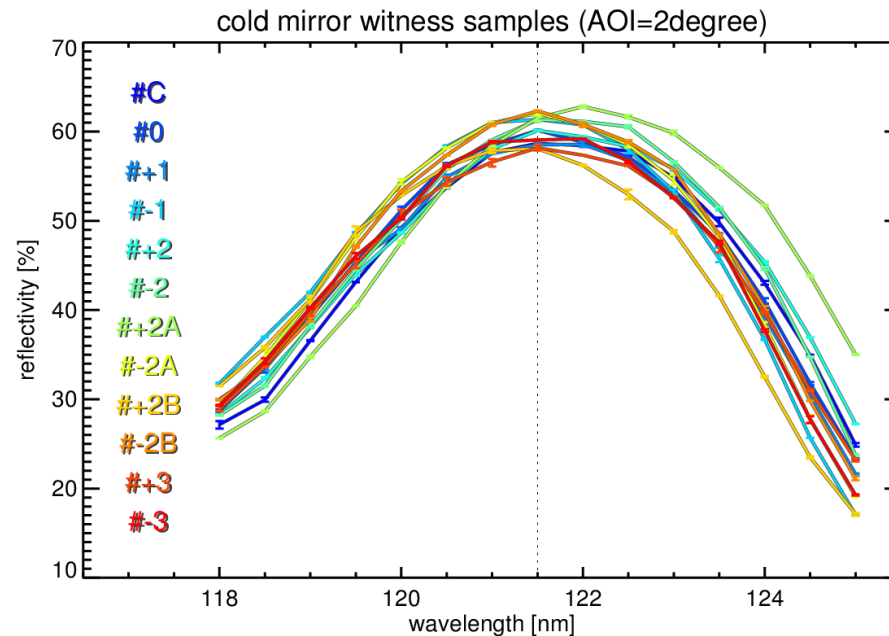
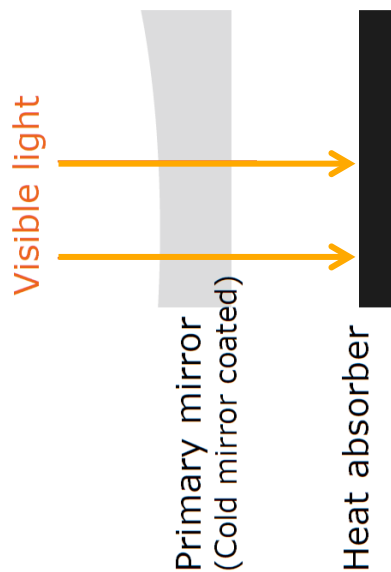


反射率は、MgF₂の約2.5倍を達成

Polarizing Power $(R_s - R_p) / (R_s + R_p)$ は、99%を達成。

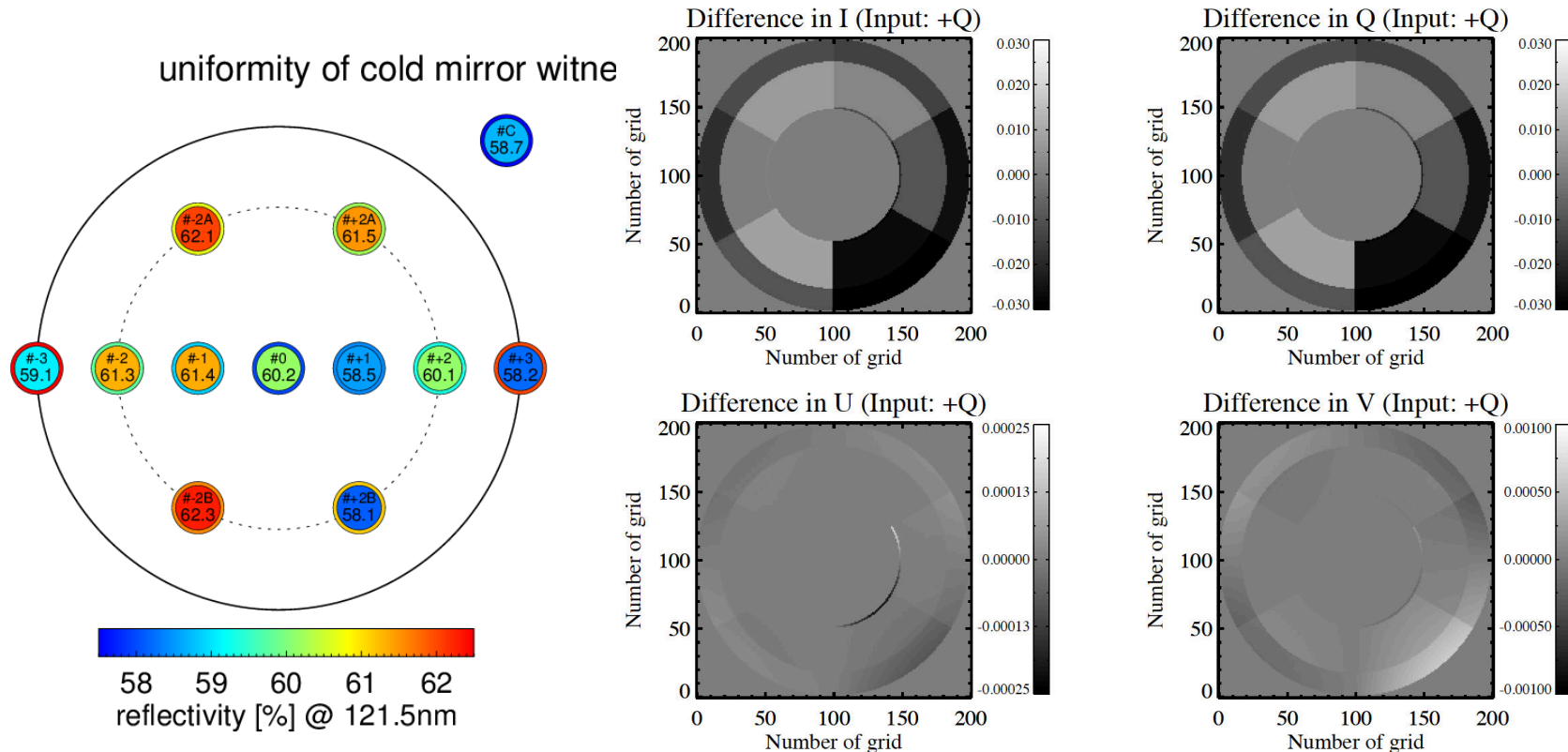
30cmφ主鏡に施す 反射型狭帯域フィルターコーティング

- ライマンα光は約60%を反射するが、可視光の反射率は4%程度しか無く、**擬似偏光の要因となる可視光の装置内への進入防止**を可能とした。



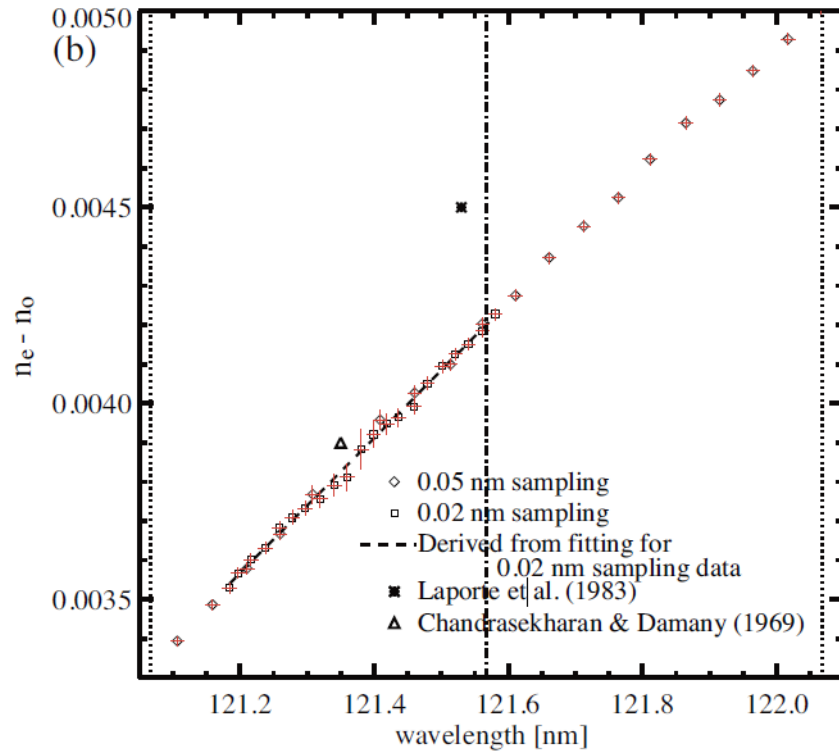
主鏡に施すコーティングの一様性

- 主鏡は回転波長板上流にあるため、主鏡で擬似偏光が生じた場合、太陽起因の偏光なのか、装置起因の偏光なのか区別がつかない。
そこで、反射率ムラ起因の擬似偏光を十分に小さく抑える必要がある
→ 擬似偏光が偏光測定精度と比べ2桁小さい、一様なコーティングが施せた。



1/2 波長板の開発

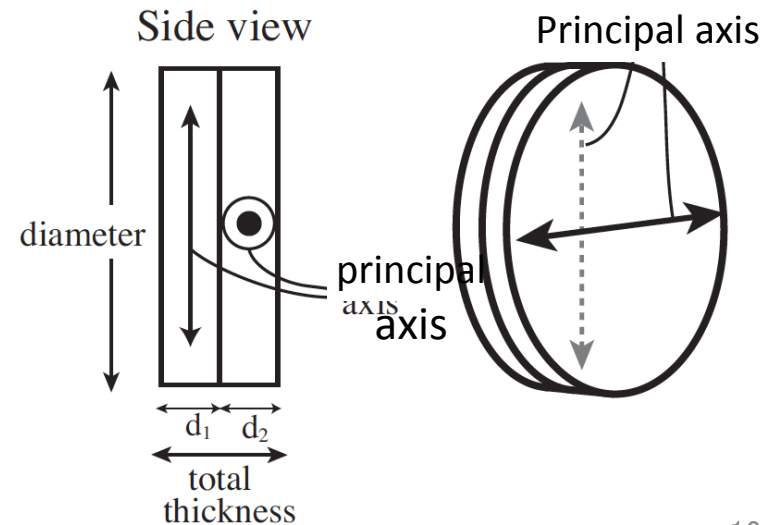
- 厚みの異なる2枚のMgF2板を、遅延軸を直交するように張り合わせたもの。**厚み差が遅延量を決める。**



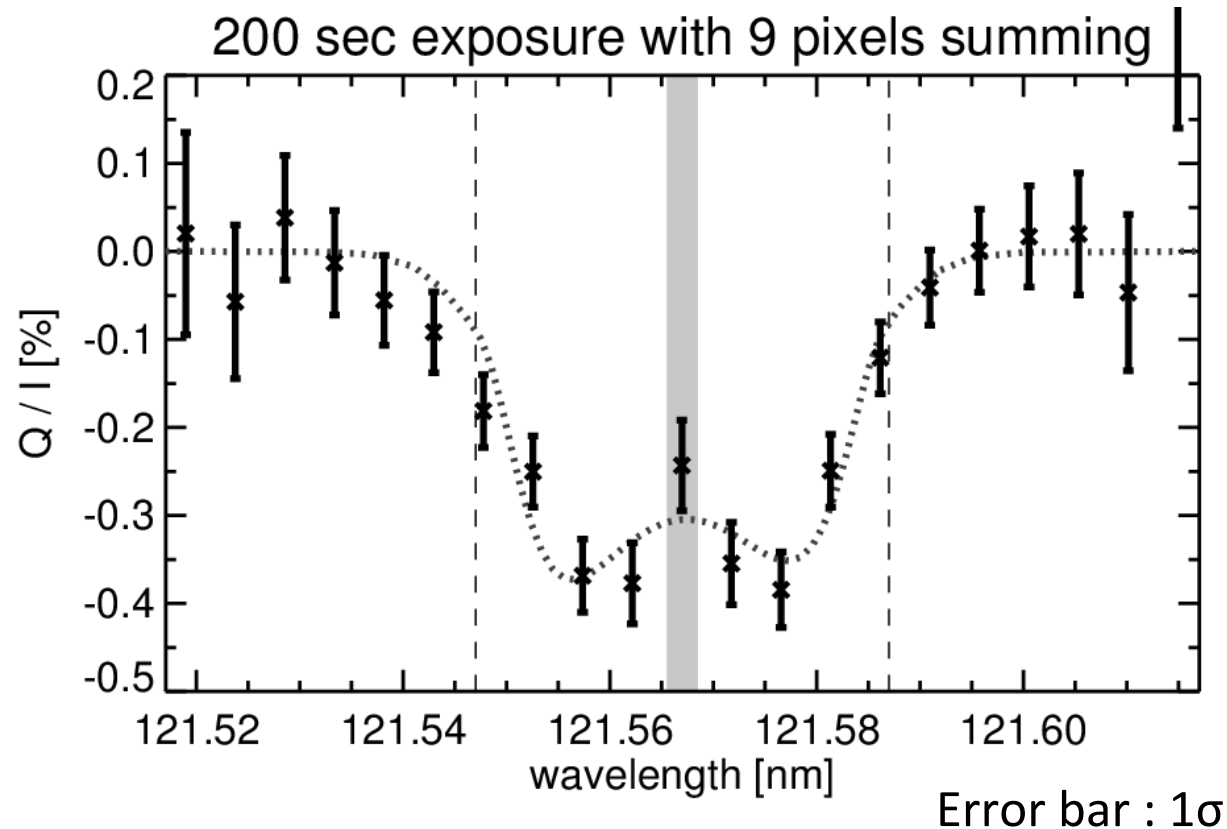
$n_e - n_o = 0.004189 \pm 0.000039$ at 121.57 nm
(Ishikawa et al. 2013, Applied Optics)

遅延量 $\delta = \frac{2\pi(n_e - n_o)(d_1 - d_2)}{\lambda}$

UVSORを用いた測定で決定した。
これにより、**厚み差を 14.51 μm とすることで、1/2波長板となる。**



CLASPの偏光測定能力

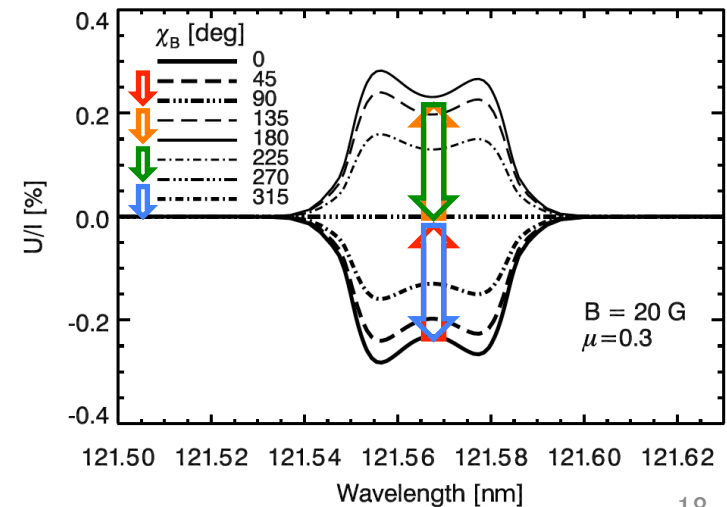
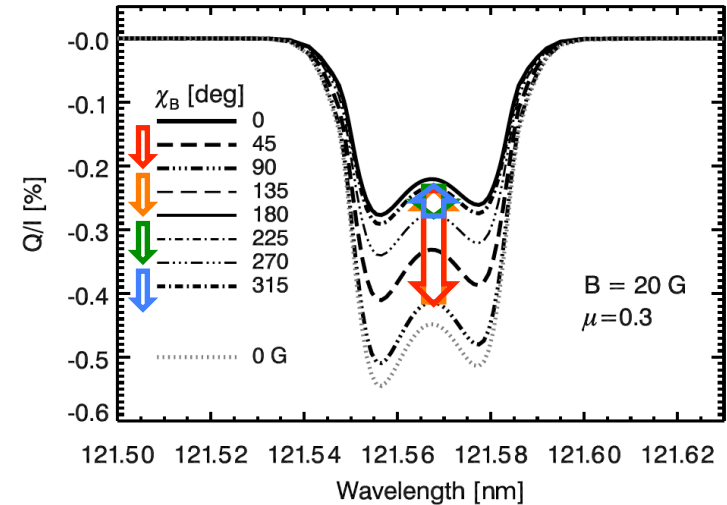
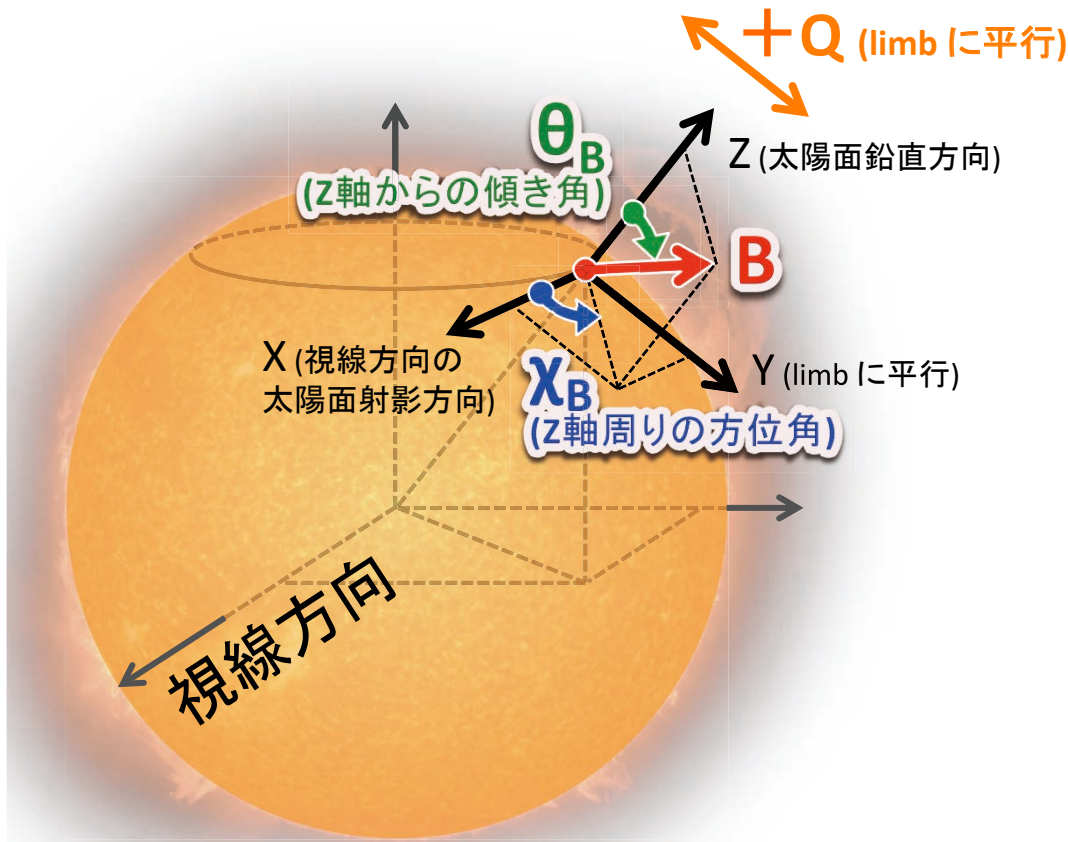


- 5分間のフライトで得られる全データを用いることで、 **$2\sigma = 0.1\%$** の偏光測定精度を達成することが出来る。

CLASPの測定データ(Q/I, U/I)から得られる磁場情報

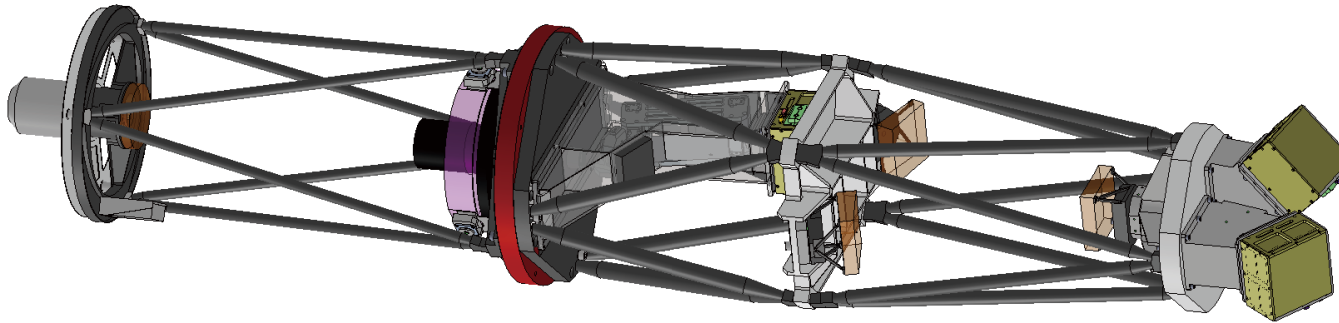
- Forward modelingと比較することで **磁場強度(|B|)**、**傾き角(θ_B)**、**方位角(χ_B)**を見積もることが出来る。

- 太陽面に水平($\theta_B = 90^\circ$)で $|B| = 20\text{G}$ の場合

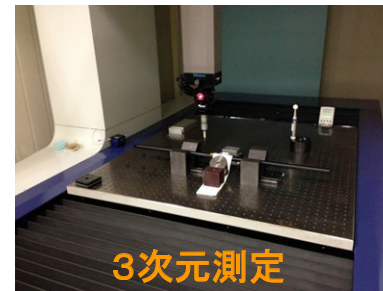
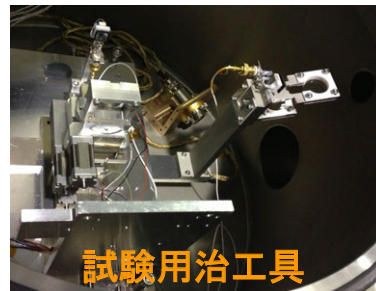
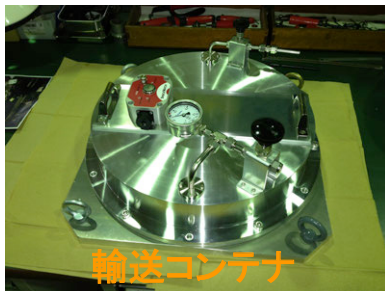


CLASPの開発スケジュール

国立天文台 先端技術センター



	FY25						FY26											
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
インバーホルダーの製作	■																	
光学部品の輸送コンテナの製作	■	■		■	■													
UVSOR等の試験治工具の製作	■	■	■	■			■		■		■							
フライト構造の3次元計測	■																	
フライト構造の組立て・光学アライメントに用いる ドーリー等の設計・製作支援		■	■	■			■	■	■									
フライト構造の修正加工 (必要に応じて)				■	■	■	■	■	■	■	■							
光学アライメント結果に基づくシムプレートの製作							■	■	■	■	■	■	■					
CLASP装置全体の米国輸送に用いるコンテナ類 設計・製作支援													■	■	■	■		

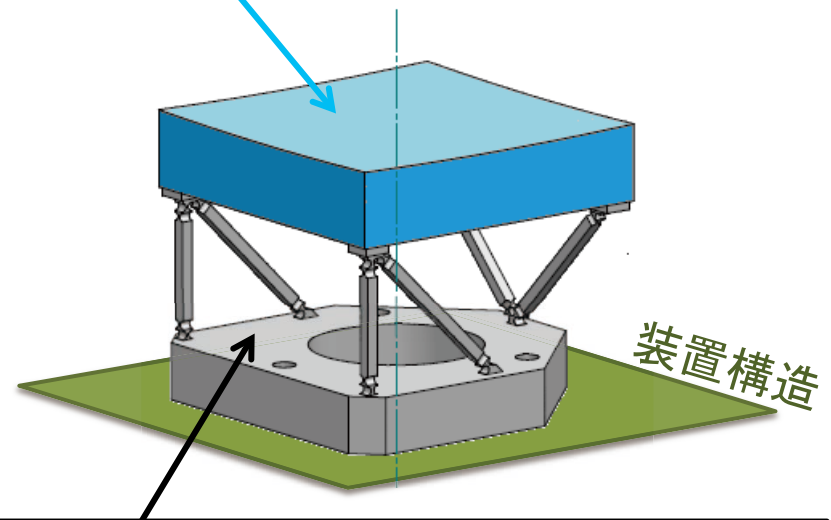


▲ CLASP米国出荷

CLASP 軸外し放物面鏡システム

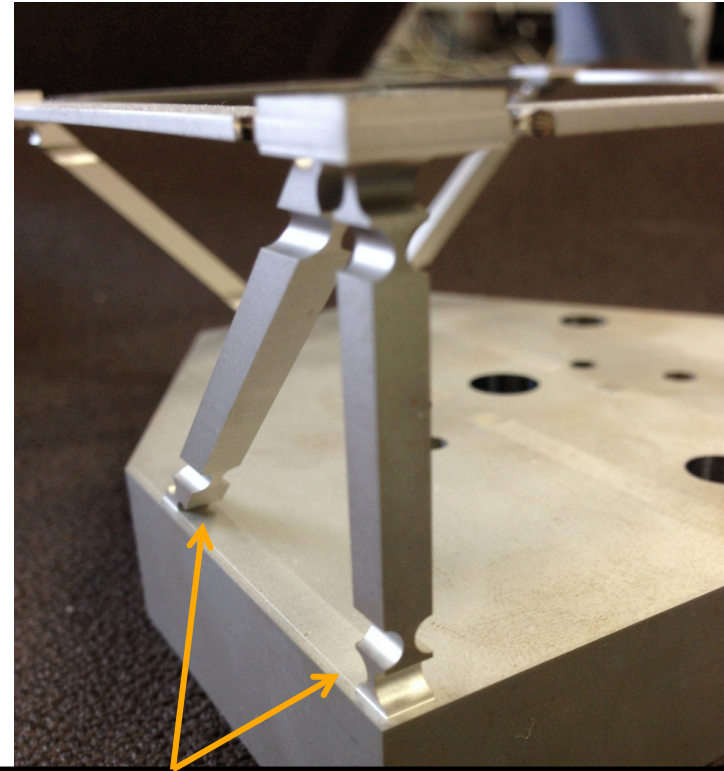
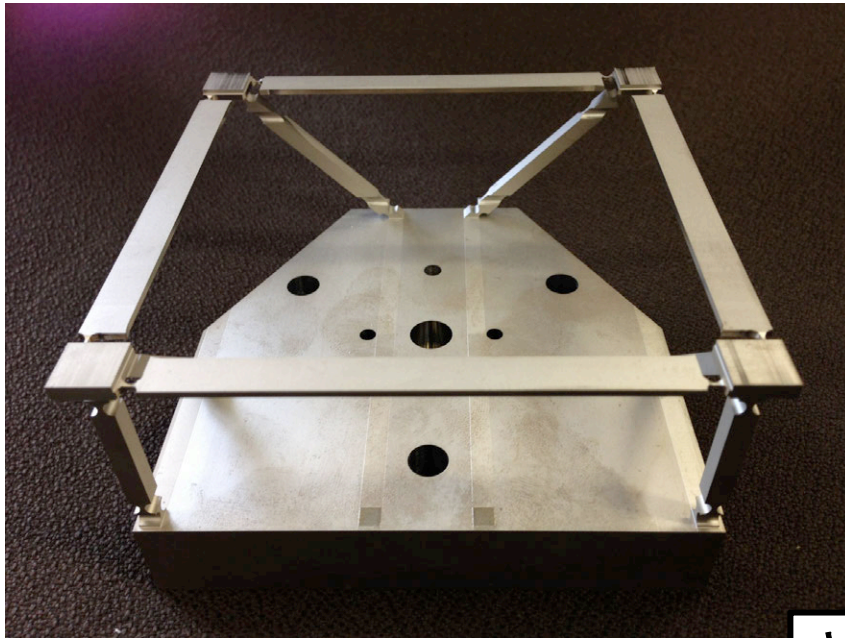
- 非軸対称系ゆえに設置の自由度が多い(オフセット位置等)。
- 原理的には**設置するだけで光学性能の**でるシステムとする。光学検査で調整すべき自由度も、その数と調整量は限定する。
- 小型飛翔体ミッションにも適応できる、耐・打上げ環境性を持つ、小型軽量なマウントシステム。
- **自在な調整機構を排除し、**必要な調整は構造への固定部に挟むシム厚で行う。

軸外し放物面鏡: 低膨張クリアセラム
鏡面と機械的基準面との位置を
高精度($<100\mu\text{m}$)で管理して製作。



キネマティックマウント: 低膨張インバー
底板とロッドは一体物で、鏡とは接着固定。
ロッド両端のストレスリリーフも板バネ状で、
機械的遊びの全くない静定支持構造。

CLASP 軸外し放物面鏡 インバーホルダーの試作品



キネマティックマウント: 低膨張インバー
底板とロッドは一体物で、鏡とは接着固定。
ロッド両端のストレスリリーフも板バネ状で、
機械的遊びの全くない静定支持構造。

まとめ

- CLASPは、**世界で初めてライマン α 線の偏光分光観測**を行う。
- CLASPでは、取得した直線偏光データ (Q/I, U/I) とハンレ効果理論を用い、**遷移層～彩層上部 (プラズマ $\beta < 1$ 領域) の磁場を直接計測**することを目指している。
- CLASP は、2015年春の打ち上げを予定。
- CLASP によって彩層磁場の直接測定が成功すれば、その磁場診断手法・装置開発技術を活かし定常的な観測が可能な**衛星搭載観測装置への発展**も考えている。



CLASP is a pathfinder for *SOLAR-C* in the progress of chromospheric observations.

Magnetic field
measurement



Pathfinder

No magnetic field
measurement

(although Hinode has discovered
many dynamic features)

