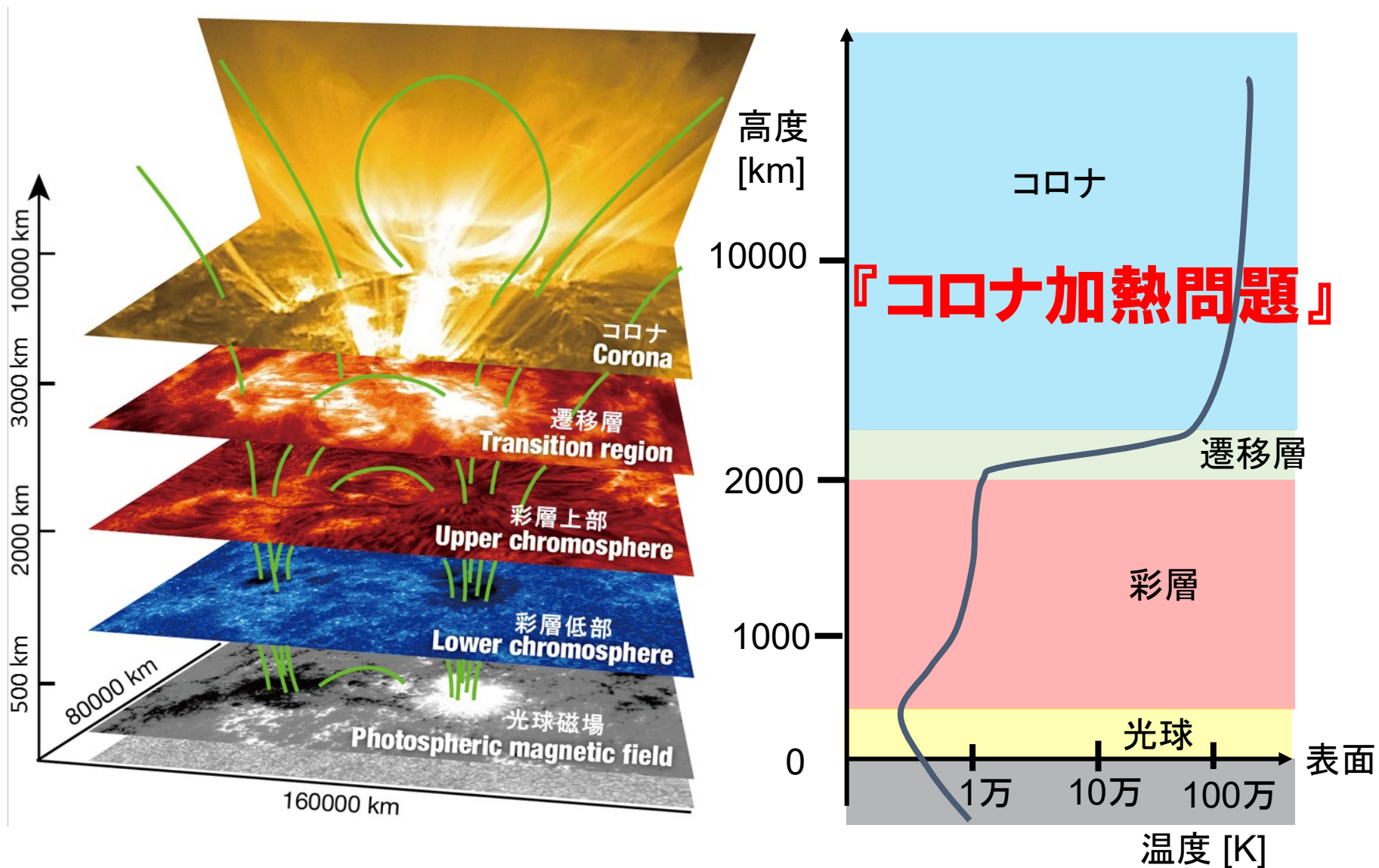


X線-EUV偏光の現状 と将来への展望

鹿野良平（国立天文台）

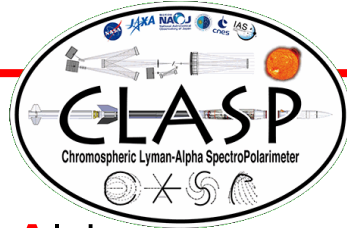
太陽大気の構造：光球・彩層・コロナ



紫外線太陽観測ロケット実験プロジェクト

CLASP

Chromospheric Lyman-Alpha
Spectro-Polarimeter



CLASP2

Chromospheric LAyer
Spectro-Polarimeter



Sep. 3, 2015

Ly α

121.6 nm

Mg II *k&h*

280 nm

April 11, 2019

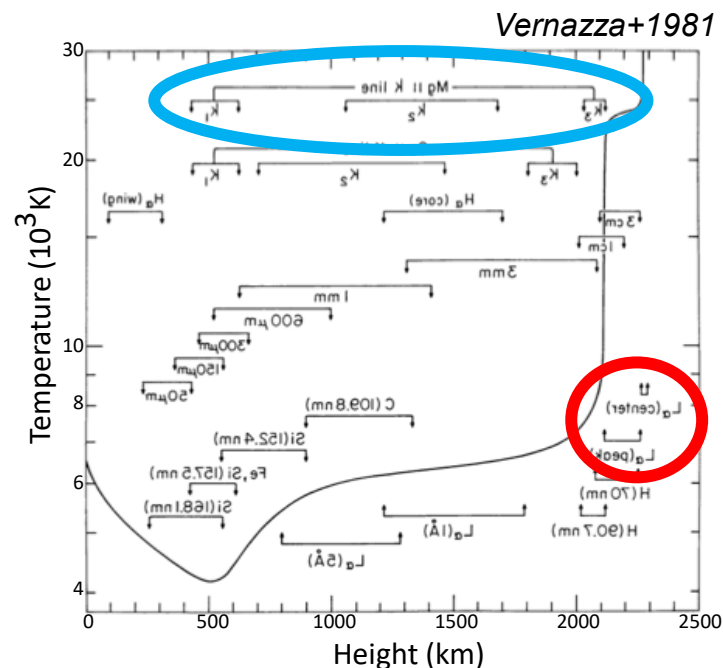
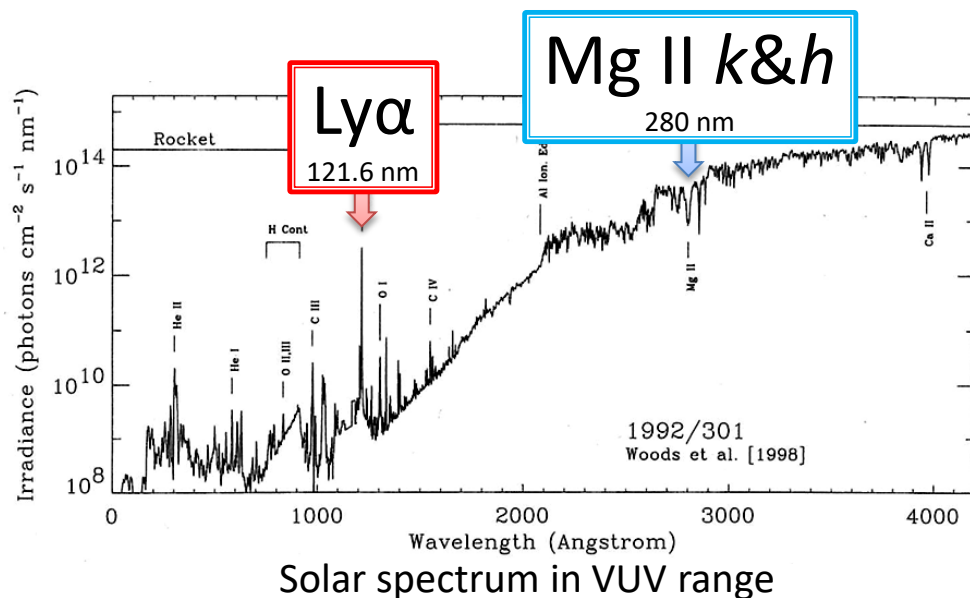
どちらも、NASA観測ロケットを用いた
日米欧共同実験プロジェクト

- 太陽の **彩層** & **遷移層** を観測.
- 紫外スペクトル線による
高精度 (<0.1%) **偏光分光観測**.
- 上層太陽大気における
磁場情報獲得を手法を確立する.

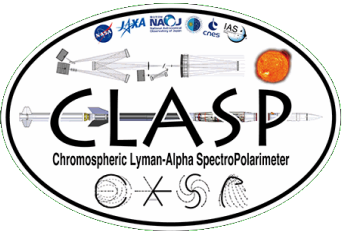
NIFS-NAOJ



なぜ、UVスペクトル線?

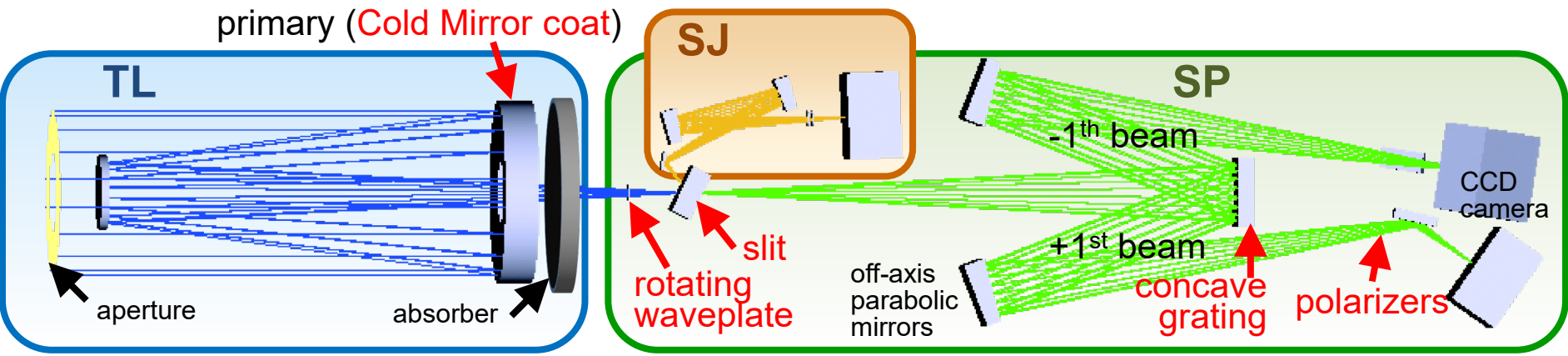


- プラズマ診断に適した**多くの彩層輝線の宝庫**.
- **Lyα輝線**と**Mg II輝線**は**太陽面の全面で明るい**.
- コロナ直下の情報が得られる:
遷移層(TR) by Lyα輝線 & **彩層上部 by Mg II輝線**.
- ハンレ効果による適度な磁場感度: **10–100 G**.



CLASP Instrument

Narukage et al. (2015, Applied Optics)



TL: Cassegrain Telescope

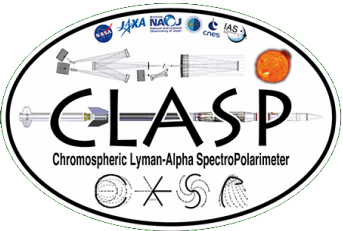
Aperture	φ270.0 mm
Focal Length	2614 mm (F/9.68)
Visible light rejection	“Cold Mirror” coating on primary mirror

SJ: Slitjaw Imager

Wavelength	121.567 nm (NB filter)
Plate scale	1.03"/pixel
FoV	527" × 527"

SP: Spectro-Polarimeter

Optics	Inverse Wadsworth mounting	
Wavelength	121.567 ± 0.61 nm	
Slit	1.45" (width), 400" (length)	
Grating	Spherical constant-line-spacing, 3000/mm	
CCD camera	512 × 512 pixel	13μm/pixel
Plate scale	0.0048 nm/pixel	1.11"/pixel
Resolution	0.01nm	3"
Sensitivity	0.1%	

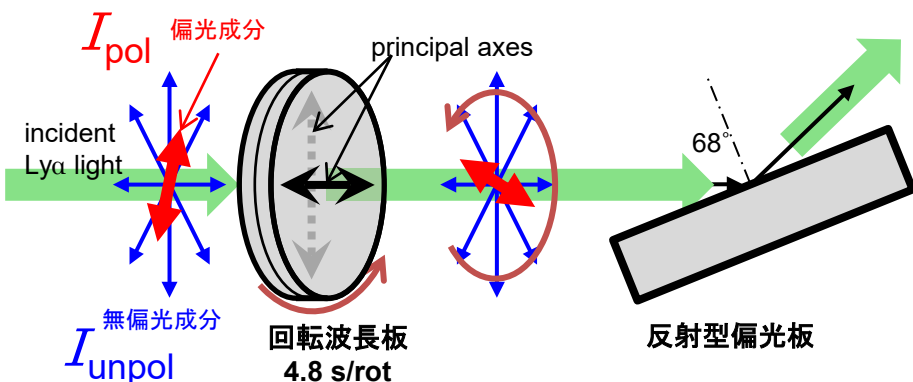


CLASPの偏光測定の実理

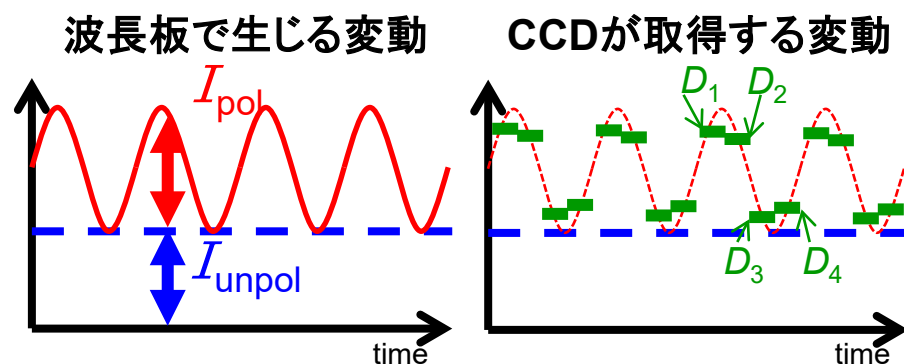
Ishikawa, S. et al. (2014, Sol. Phys.)

- CLASPは直線偏光測定に特化した観測装置。
- Ly α 線ではゼーマン効果による円偏光が極めて小さいと予想(~0.005% @10G).

偏光測定的光学系



測定する強度変動

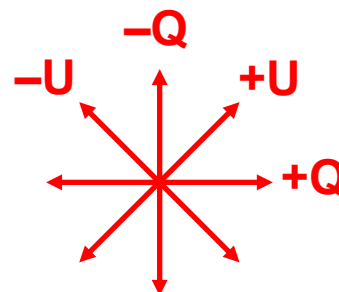


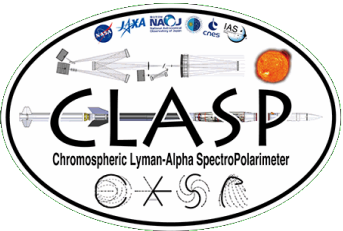
Stokes成分の算出 a: modulation coefficient
K: throughput value

$$Q = aK\{(D_1 - D_2 - D_3 + D_4) + \dots\}$$

$$U = aK\{(D_2 - D_3 - D_4 + D_5) + \dots\}$$

$$I = K\{(D_1 + D_2 + D_3 + D_4) + \dots\}$$

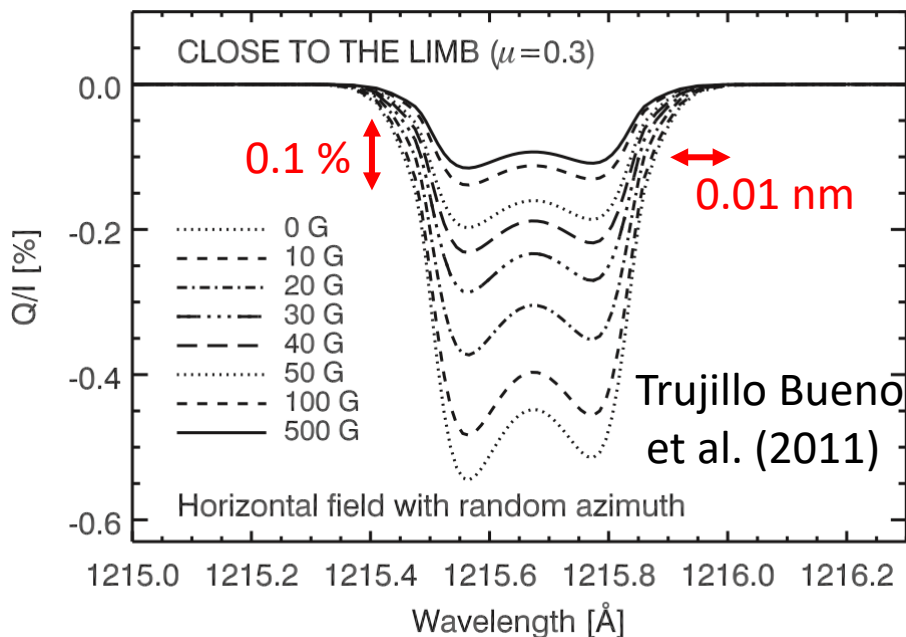




Ly α 線の偏光スペクトル (モデル計算値)

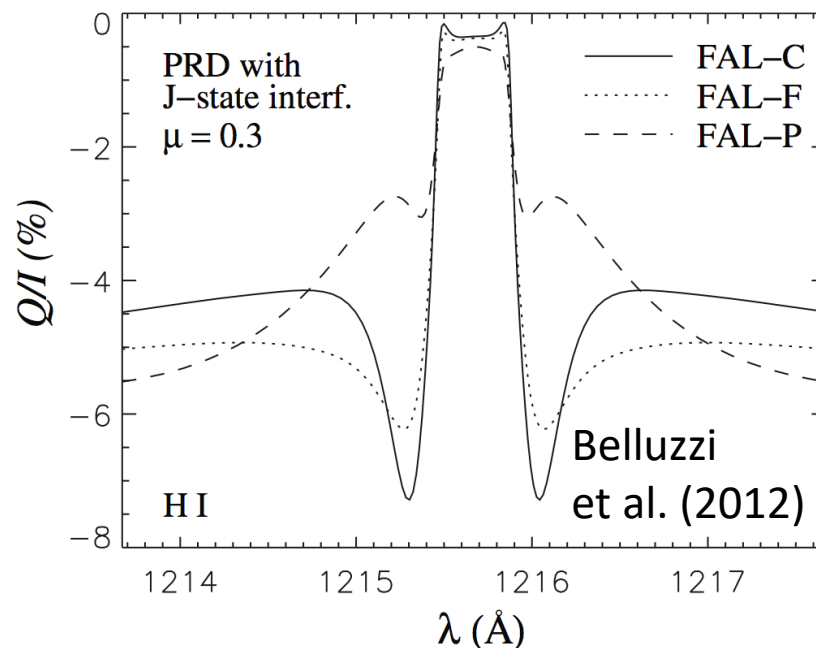
輝線Core:

- 散乱偏光
+ ハンレ効果 (感度 5 ~ 100 G)



輝線Wing:

- 散乱偏光のみ.
(i.e. 大気温度密度構造の影響)



原子物理過程

ハンレ効果, J-state 干渉, ...

散乱過程

CRD vs. PRD, ...

太陽大気モデル

FAL-C, FAL-F, FAL-P, ...

NINS・若手研究者による 分野間連携プロジェクト

観測ロケット実験CLASPの推進

- 2010年度： 520万円
「量子力学的ハンレ効果を用いた太陽彩層磁場測定と
その日米共同・国際観測ロケット実験の推進」
**鹿野(NAOJ,代表); 後藤(NIFS); 成影(NAOJ); 小林(UAH);
Trujillo Bueno(IAC)**
- 2012年度： 600万円
「量子力学的ハンレ効果による太陽彩層磁場測定手法の確立」
**鹿野(NAOJ,代表); 後藤(NIFS); 木村(分子研); 福井(福井大);
成影(ISAS); 石川, 加藤(NAOJ); Trujillo Bueno(IAC); 小林(UAH)**

2010年度分野間連携 枠組み

装置開発

理論構築

Javier
Trujillo-Bueno
(カナリア諸島
天体物理学研究所)

国立天文台
鹿野良平・成影典之
Instrument Scientist

小林 研
(アラバマ大学)

高精度偏光測定
の
観測装置開発

核融合研究所
後藤基志

偏光線輪郭形成の
理論的モデルの構築

分子科学研究所
観測装置の性能評価

(分子研のシンクロトン放射光施設
UVSORは高輝度・高偏光のLy α 光源
として、CLASP装置性能評価に最適)

2012年度分野間連携 枠組み

太陽物理学

国立天文台・JAXA宇宙研ほか

「ハンレ効果による太陽彩層磁場測定」

非等方場での
励起と偏光

高精度(0.1%)
偏光測定

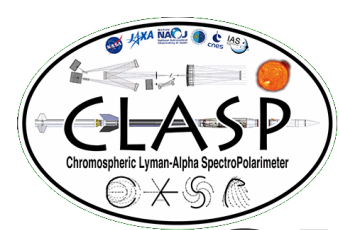
核融合研究所

「衝突による偏光緩和の
素過程の同定」

分子科学研究所

木村真一・福井一俊

「真空紫外での
エリプソメータ開発」



観測ロケット実験

CLASP (2015年9月実施)

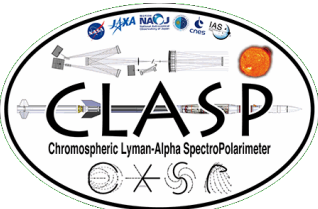
Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter

目的

紫外線

1. **ライマン α 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 α 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





観測ロケット実験

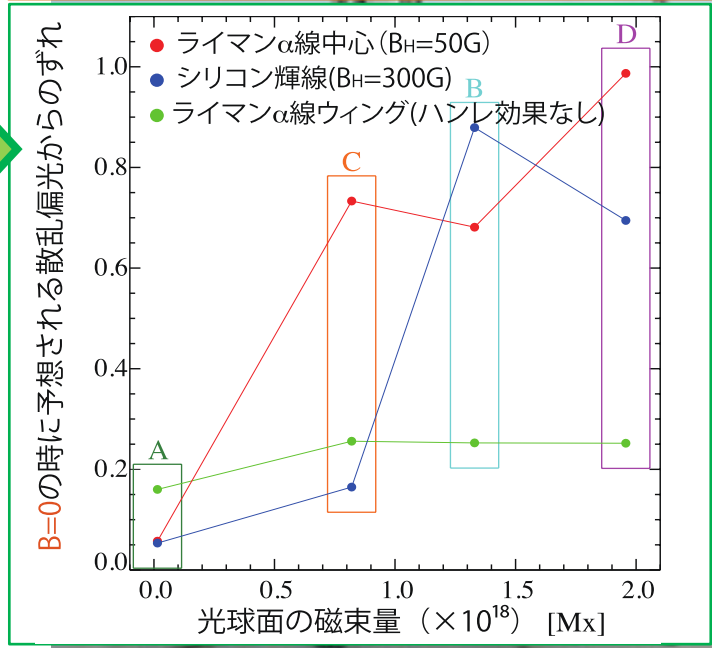
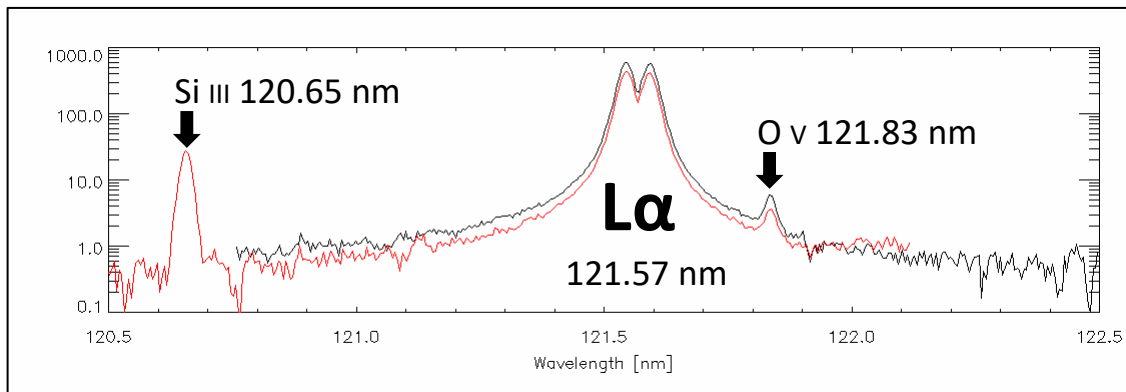
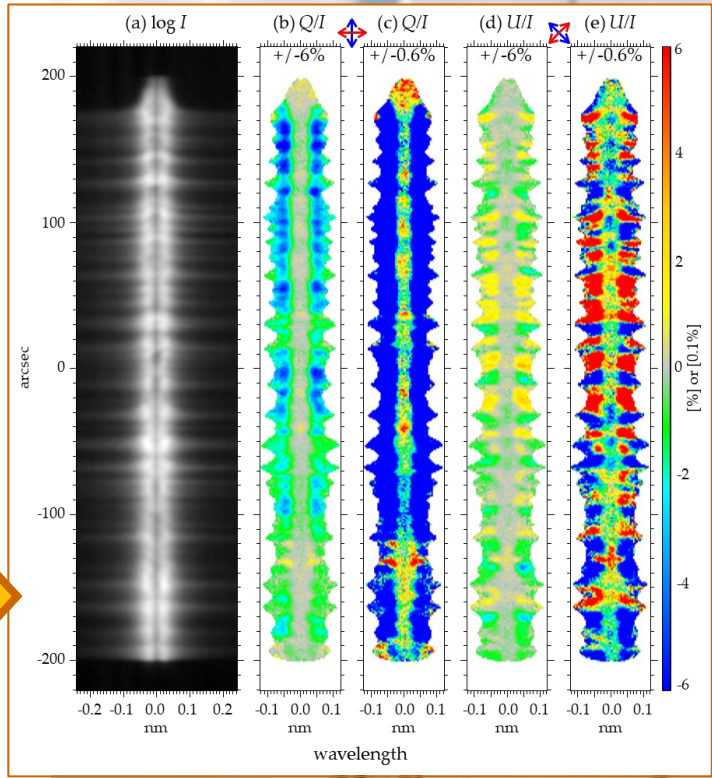
CLASP (2015年9月実施)

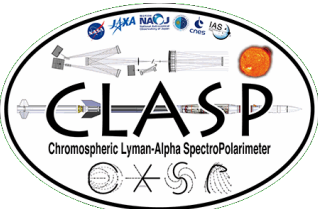
Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter

目的

紫外線

1. **ライマンα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α輝線に散乱偏光が発生することの確認 **Kano et al. (2017)**
3. 磁場によって生じる**ハンレ効果**の検出 **Ishikawa, R. et al. (2017)**





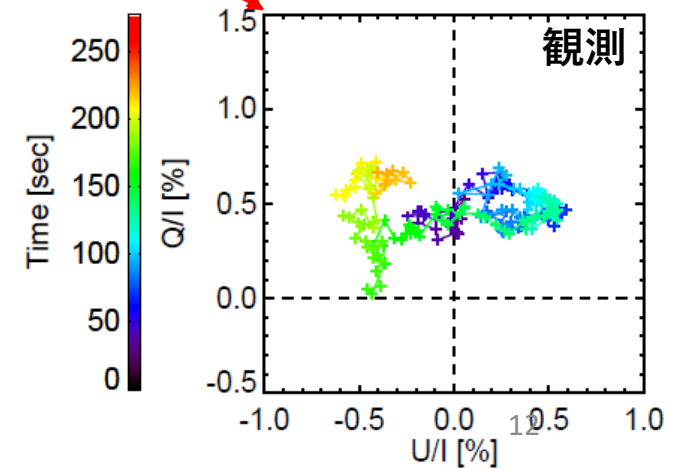
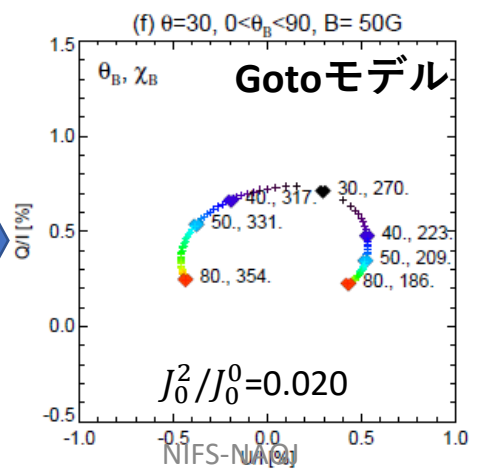
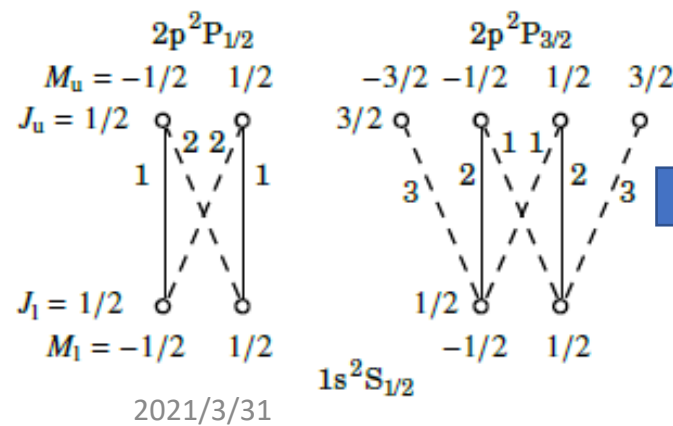
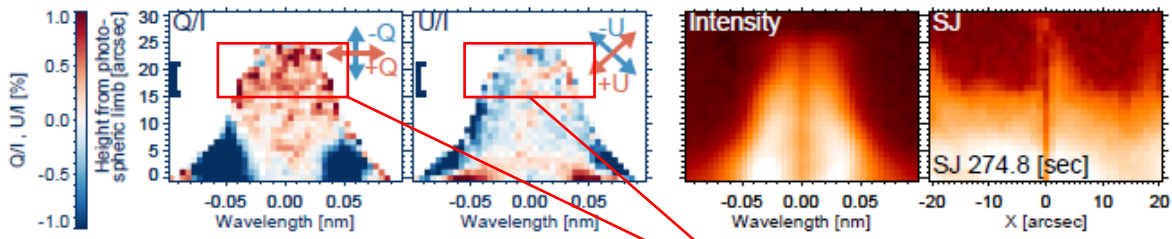
ハンレ効果による磁場推定の試み

簡易モデル化 Goto et al. (2019)

スピキュールへの適用 Yoshida (2020, 総研大D論)

- 散乱過程
→ CRD適用可のline centerのみ.
- 太陽大気モデル
→ 軸対称放射の非等方度
 J_0^2/J_0^0 をパラメータ化.
- 原子物理過程
→ 下図のLy α 遷移について計算.

- Hanle図上での変動域を比較し, 磁場の影響を示唆.
- 輻射場の非軸対称性の可能性もあり断定ならず.



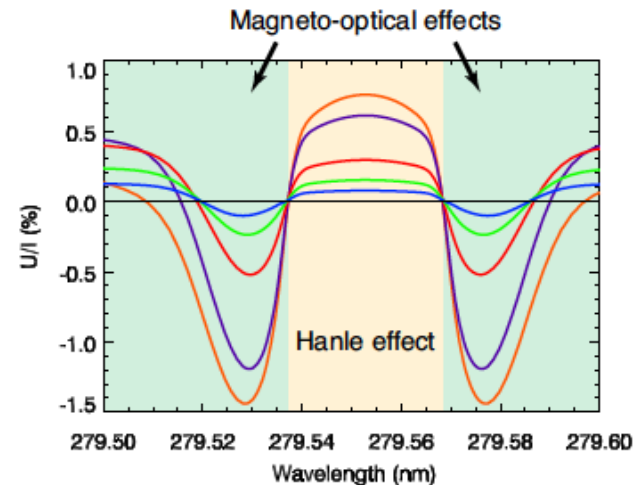
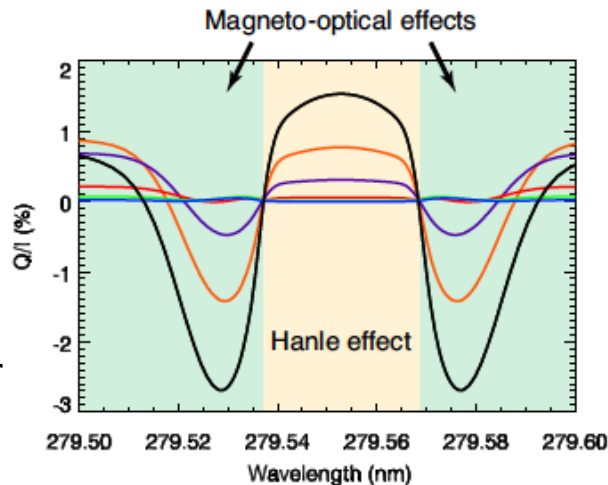
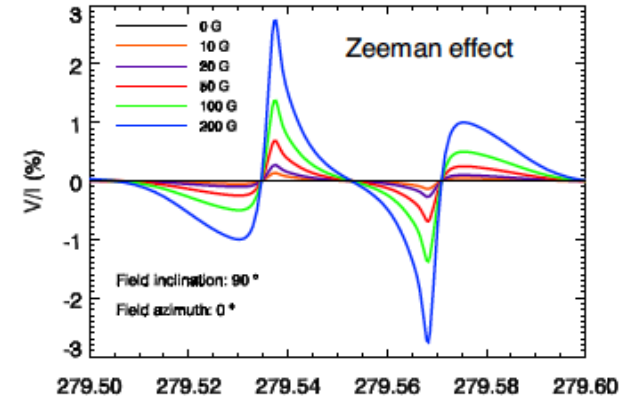
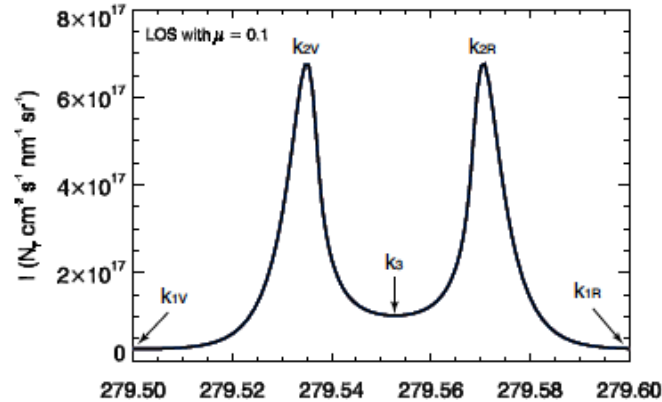
電離マグネシウム線(Mg II k)の 偏光スペクトル(モデル計算値)

Mg II k:

- U: $2p^63p \ ^2P^o$ ($J=3/2$)
- L: $2p^63s \ ^2S$ ($J=1/2$)

Mg II h:

- U: $2p^63p \ ^2P^o$ ($J=1/2$)
- L: $2p^63s \ ^2S$ ($J=1/2$)



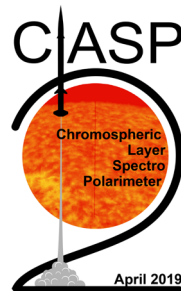
Alsina Ballester
 et al. (2016)



CLASP2: Exploring the magnetic chromosphere

観測ロケット実験

CLASP2



Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter

目的

紫外線

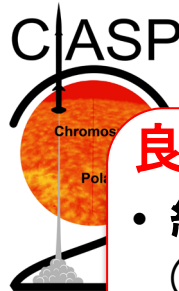
1. 電離マグネシウム線(波長 280 nm)で高精度偏光分光観測の実現
 2. 電離マグネシウム線に散乱偏光が発生することの確認
 3. 磁場によって生じる
ハンレ効果とゼーマン効果の検出
 4. ハンレ効果とゼーマン効果を用いて
彩層上部の
ベクトル磁場情報の獲得
- CLASPとCLASP2の成果から、
紫外線偏光観測で彩層上部～遷移層の
磁場を測定する手法の確立を目指す。

2021/3/31



観測ロケット実験 CLASP2

Chromospheric LAYer Spectro-Polarimeter



目的

紫外線

1. 電離マグネシウム線(波長 280 nm)で高精度偏光分光観測の実現
2. 電離マグネシウム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とゼーマン効果の検出
4. ハンレ効果とゼーマン効果を用いて彩層上部のベクトル磁場情報の獲得

→ **CLASP**と**CLASP2**の成果から、紫外線偏光観測で彩層上部～遷移層の磁場を測定する手法の確立を目指す。

良好な装置性能を検証。

- 結像性能: CLASPと同等(一部はそれ以上)。
- 偏光特性: ほぼ理想通り。波長依存性確認はこれから。

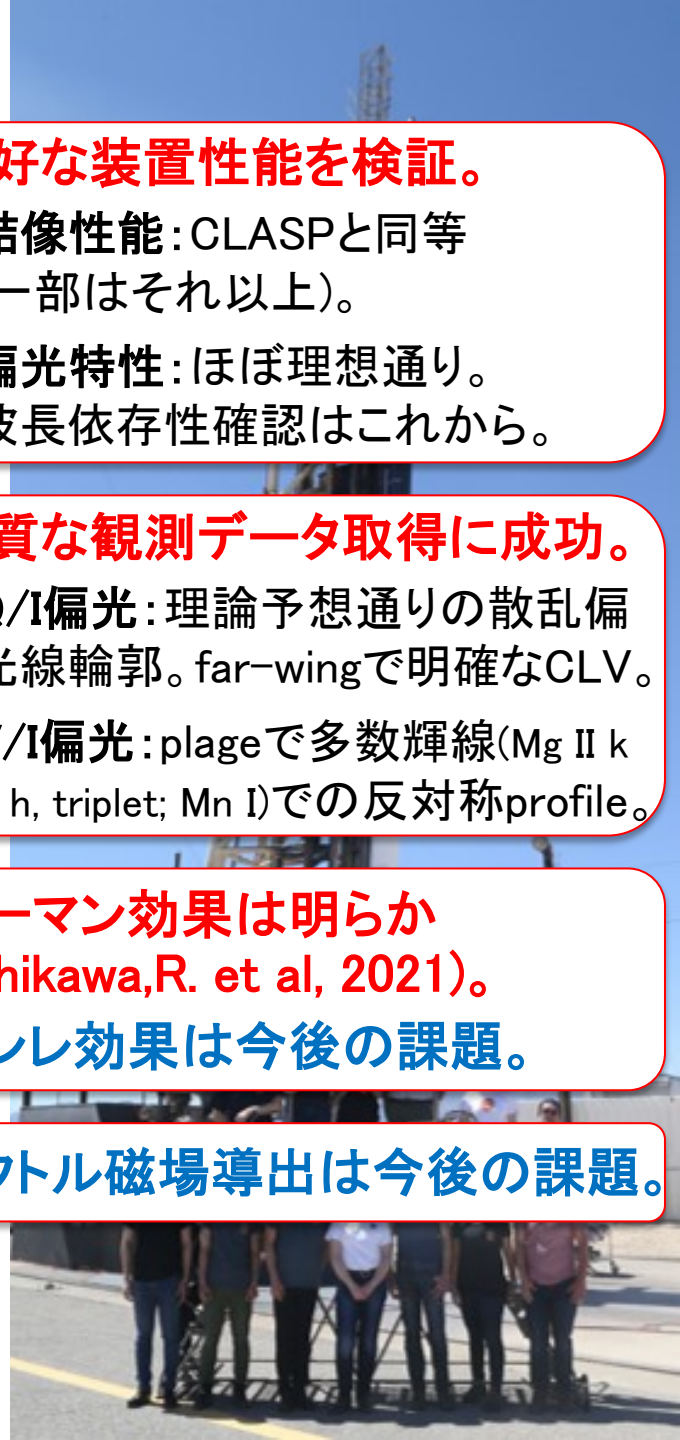
良質な観測データ取得に成功。

- Q/I偏光: 理論予想通りの散乱偏光線輪郭。far-wingで明確なCLV。
- V/I偏光: plageで多数輝線(Mg II k & h, triplet; Mn I)での反対称profile。

ゼーマン効果は明らか (Ishikawa, R. et al, 2021)。

ハンレ効果は今後の課題。

ベクトル磁場導出は今後の課題。



CLASP技術の LHDプラズマ計測への応用

- **CIV 154.9nm偏光計測用素子の検証@UVSOR**
 - 反射型偏光板&高反射鏡の偏光反射率測定@2016/11
後藤, 牧野, 大石, Nimavat(NIFS); 鹿野(NAOJ)
 - 1/2波長板の遅延量測定@2017/06
後藤, 牧野, Nimavat(NIFS); 鹿野(NAOJ)
- **NINS・若手研究者による分野間連携プロジェクト**
 - 2017年度： 100万円
「太陽大気に対する偏光スペクトル観測技術を応用した
核融合プラズマ中粒子の非等方的速度分布の研究」
大石(NIFS, 代表); 鹿野(NAOJ); 後藤, 森田(NIFS); Tolstikhina(LPI)
- **Ly α 121.6nm偏光計測による
電子の非等方速度分布の研究@LHD**
 - Nimavat (2019, 総研大PhD)
“Polarization spectroscopy of Lyman- α for the study of anisotropic electron velocity distribution function in fusion plasma”

実験室プラズマとの連携の種： 2020年度“素過程シンポ”から

“二電子性再結合X線の偏光度測定” 中村信行(電通大)

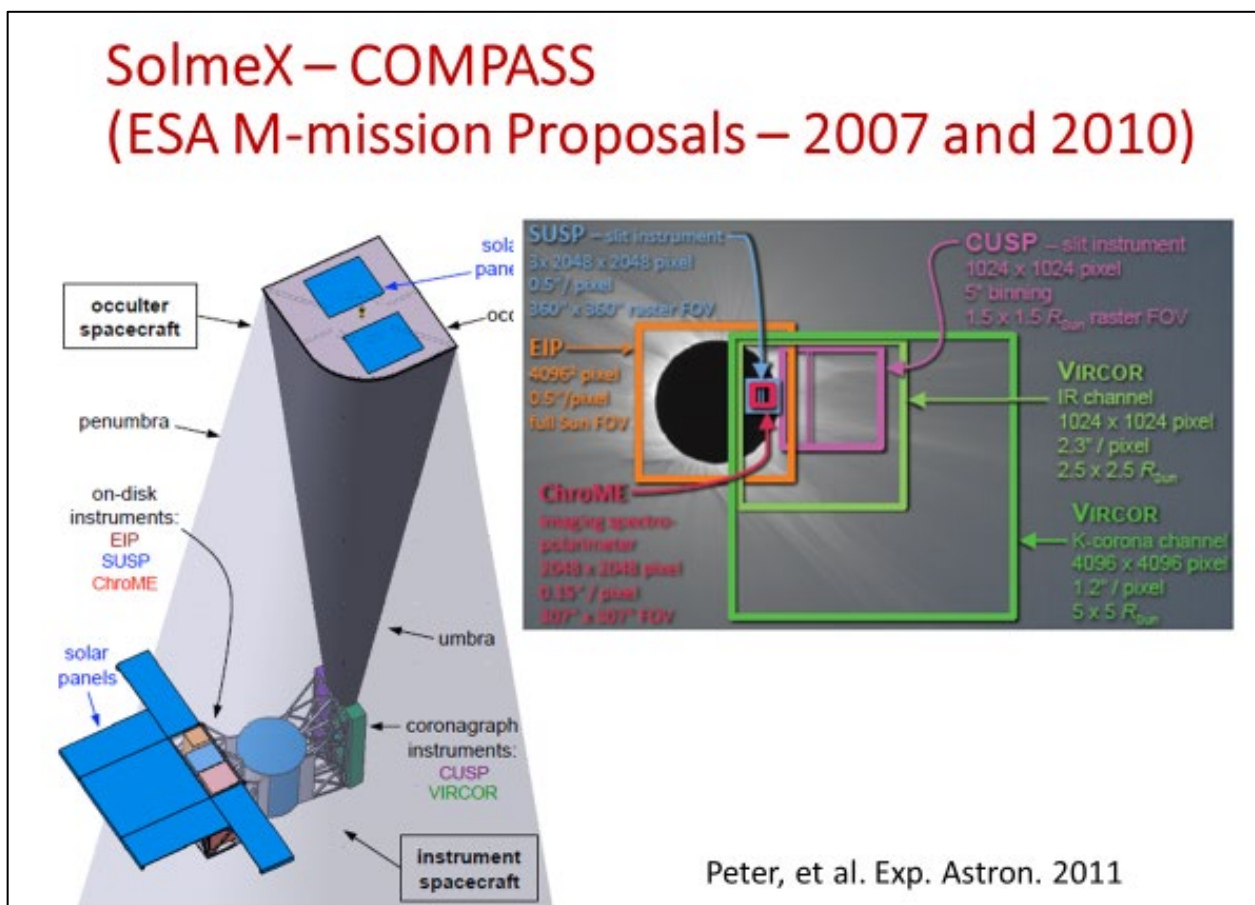
- Biの多価イオンの $J=1/2-1/2$ 遷移で偏光観測。
核スピンによる超微細構造でも合わないようで解釈に困っていた。
→ CIV(155nm)の $J=1/2-1/2$ 遷移も偏光あって解釈を保留(by後藤)
 - 存在比98%の ^{12}C の核スピンは0.
- CLASPへの影響は?
 - Hは核スピンをもつが、 $J=1/2-1/2$ 遷移は分離できてないので不明.
 - ^{25}Mg (存在比10%)は核スピンあるが、観測のMg II h($J=1/2-1/2$ 遷移)に偏光はみえない.

“トロイダルプラズマの近赤外輝線を利用したゼーマン効果高感度計測の試み” 四竈泰一(京都大)

- 赤外の偏光分光測定によるゼーマン分離のスペクトルから、
磁場を指標としてトカマクプラズマの視線内の温度密度分布の把握。
← 太陽大気の高高度分布を考慮した磁場大気診断SIRGAUSと関連するかも.

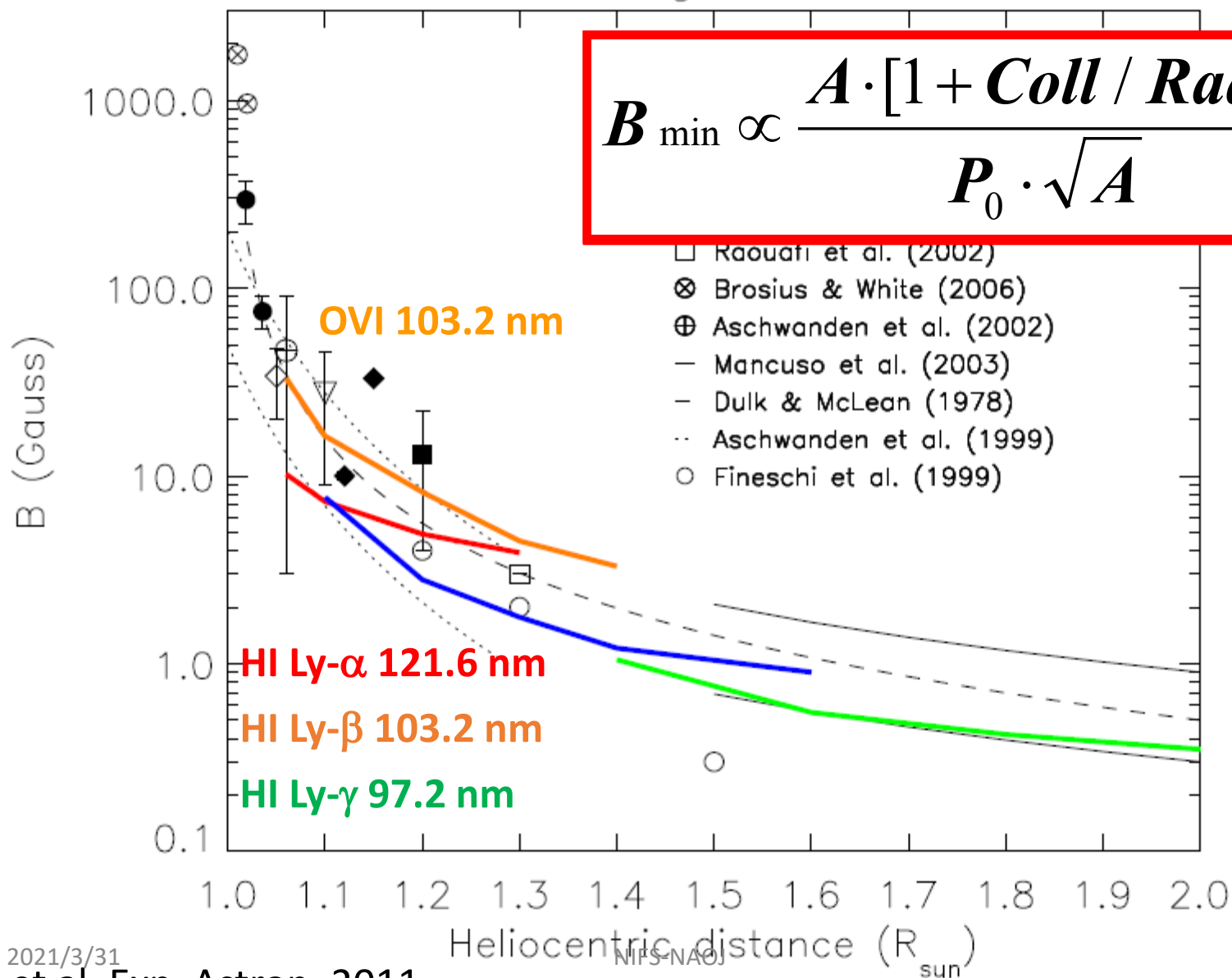
太陽分野でのUV偏光の可能性

- リム外のUV偏光： SolmeX CUSP

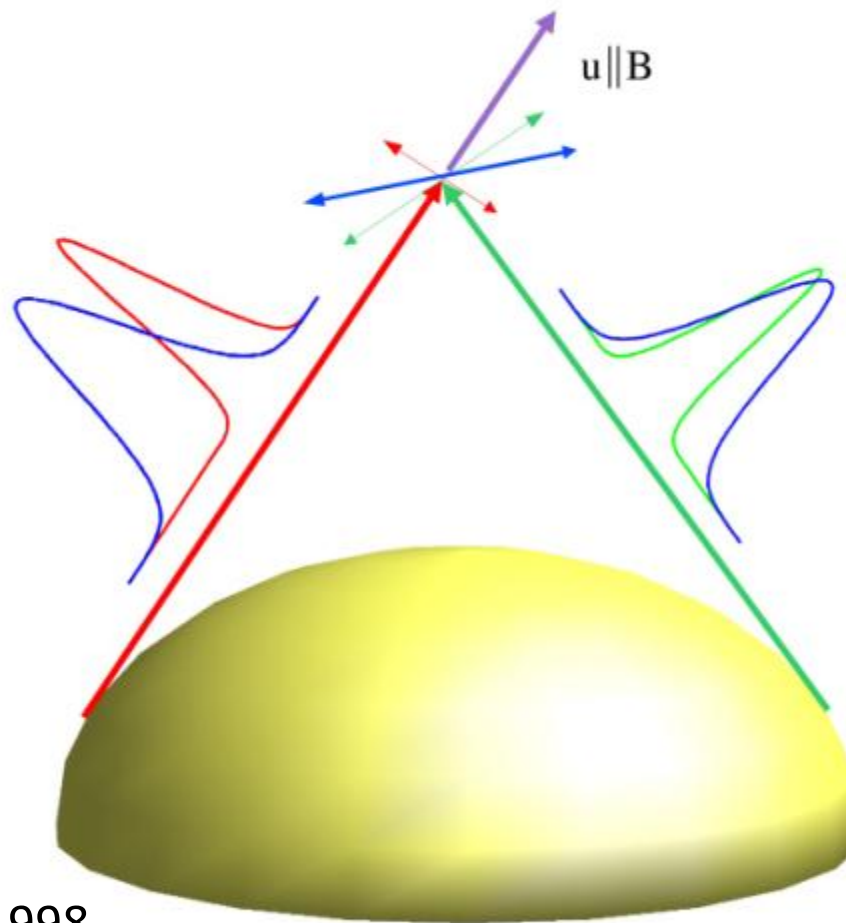


Coronal UV Lines Sensitivities to B

Solar Magnetic Fields



Super-radial Doppler-dimming Effect on Resonance Polarization



Sahal-Brechot, 1992, 1998
Fineschi 2001