

ハレアカラにおける可視分光観測 イオ火山噴火に伴う磁気圏の応答 - 極端紫外宇宙望遠鏡ひさきと地上望遠鏡の協調観測 -

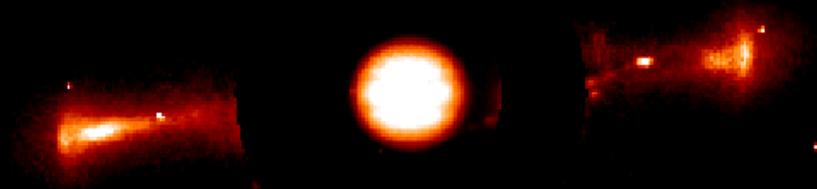
鍵谷将人¹, 米田瑞希², 古賀亮一¹, EXCEED mission team

¹東北大, ²IfA/Univ. Hawaii



Jovian Magnetosphere and Io Plasma Torus

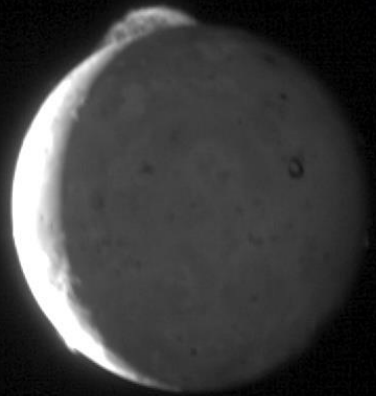
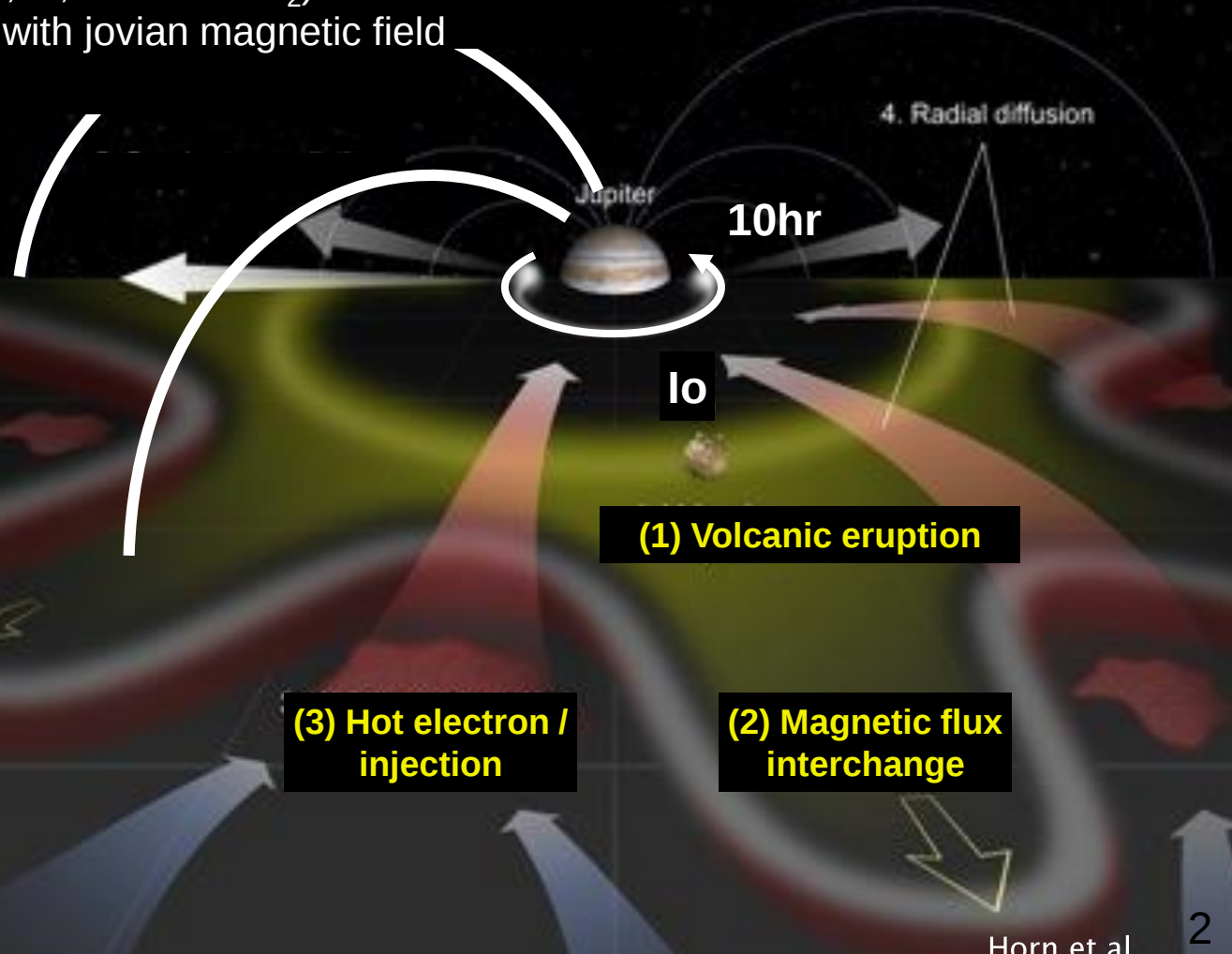
← 6RJ →



Plasma torus [SII] emission by electron impact

Io plasma torus (IPT)

- has dense plasma region, $n_e \sim 1000-3000/\text{cm}^3$
- consists of volcanic gases (S, O, SO and SO_2) originated from Io corotating with jovian magnetic field
- emits photon in EUV to NIR.



Volcanic eruption on Io



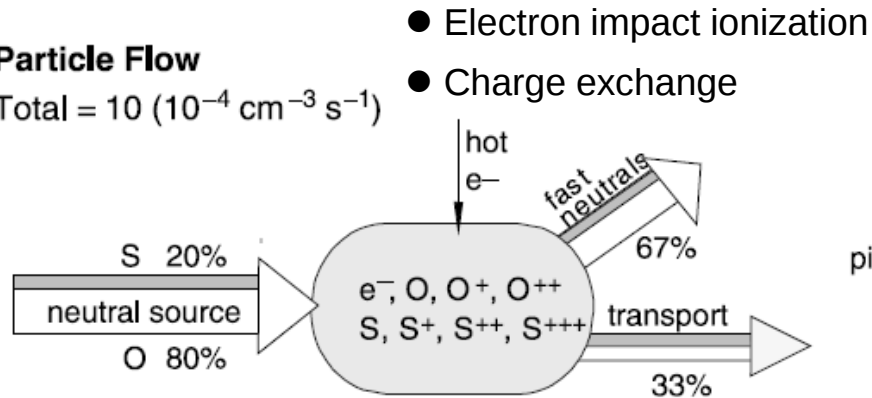
H3+ auroral emission

内部磁気圏でのプラズマ輸送とエネルギー収支のダイナミクス

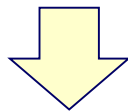
<プラズマの質量収支>

Particle Flow

Total = $10 (10^{-4} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$



- イオン・中性の化学反応を含んだモデル計算では、とある中性ガス供給率 (= 火山活動) のとき、1/3のプラズマ・エネルギーにして10%が外側磁気圏に輸送される。
- 中性供給が変動したとき、エネルギー収支が如何に変動するか、観測が欠如

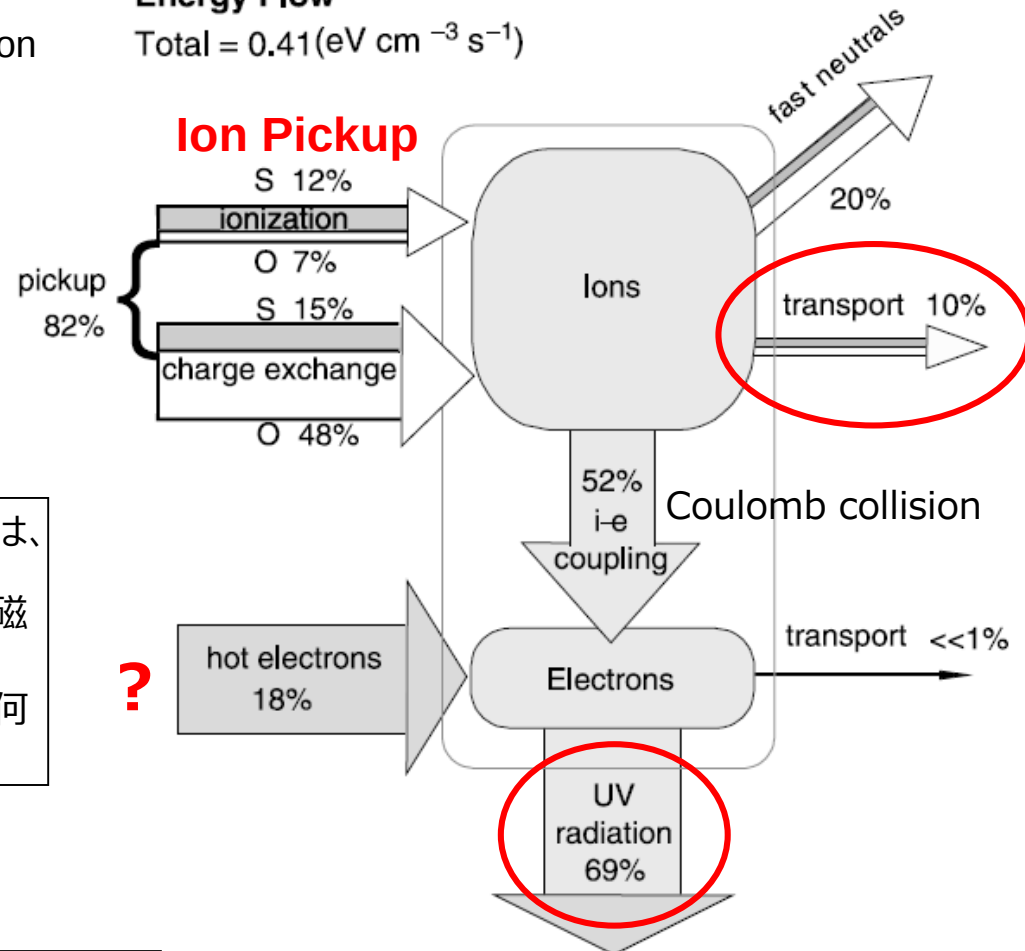


物質・エネルギー輸送 (内部 $\rightleftharpoons$ 中間磁気圏) の解明

<エネルギー収支>

Energy Flow

Total = $0.41 (\text{eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$



(Delamere and Bagenal 2003)

衛星・地上協調観測



イオ火山起源中性Naのモニタ

- ・火山ガスに微量(<3%)含まれる。共鳴散乱効率が高く、明るい
- ・中性供給率変動の指標
- ・ハレアカラ、地上連続観測
- ・狭帯域分光イメージング (589nm)

イオ周辺酸素原子

- ・主要な火山性ガスの解離生成物。中性供給率変動の指標
- ・1304Åの共鳴散乱・電子衝突励起。



プラズマトーラス主要イオン発光スペクトル

- ・衝突励起によるエネルギー放射（冷却）をモニター
- ・スペクトル診断により、励起させている電子の分布関数（高温電子温度）を導出

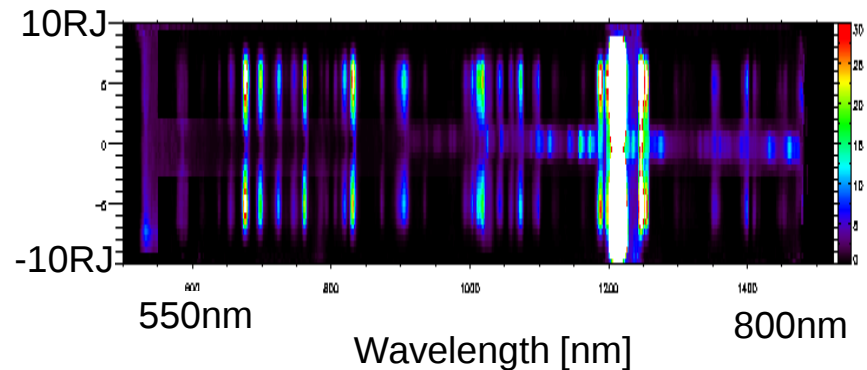
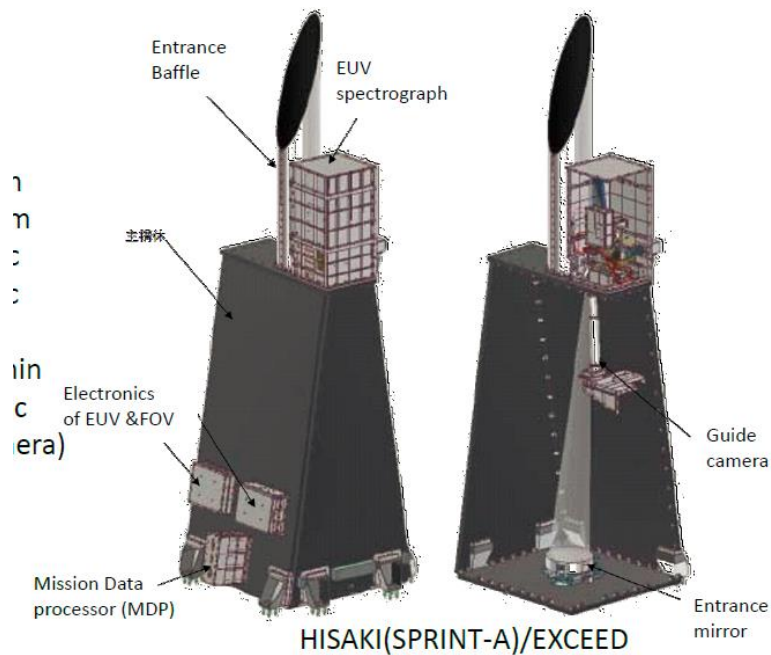


プラズマトーラスS+イオン温度

- ・[SII]6716,6731Åの電子衝突励起
- ・輝線のドップラー幅やイオンの南北広がりから、イオン温度を導出。
- ・ハレアカラ、T60+コロナグラフィメージャ（狭帯域イメージング）

HISAKI/EXCEED

- 口径20cm望遠鏡 + EUV分光器 (550-1450Å, $d\lambda=0.1-0.5\text{nm}$ 、視野6')
- Nov2013よりのミナル観測を開始
- 惑星(水・金・火・木・土)、彗星を主な観測対象



- FOV: 360x140" slit, spatial resolution is 10"~0.5R
- 55-145 nm, $d\lambda\sim0.5\text{nm}$
- DEC2014 – MAY 2015
- 100min/orbit

Hisaki/Exceed Observation

D:\data\exceed\fits\euvi\l1im.v3.6.rev\exeuvi20140101T010100_00.jup.dis.im.fits
 2014-01-01T01:01:00 REV#14010100 35/37

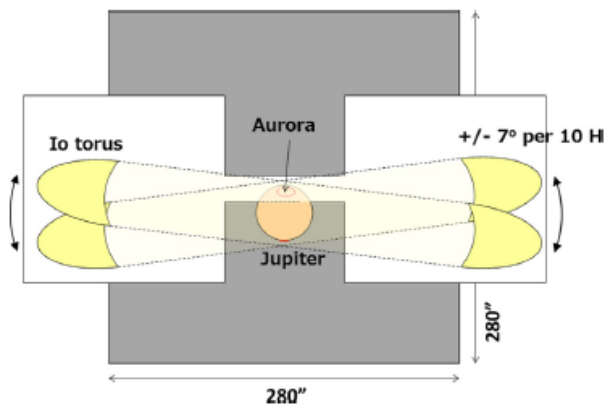
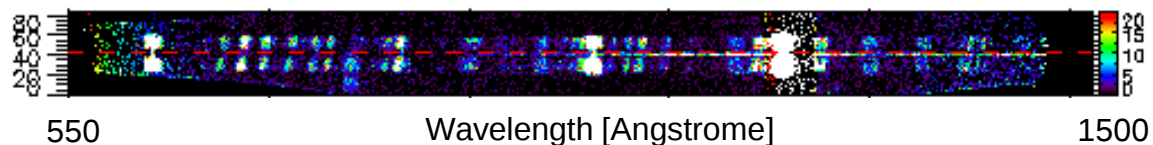
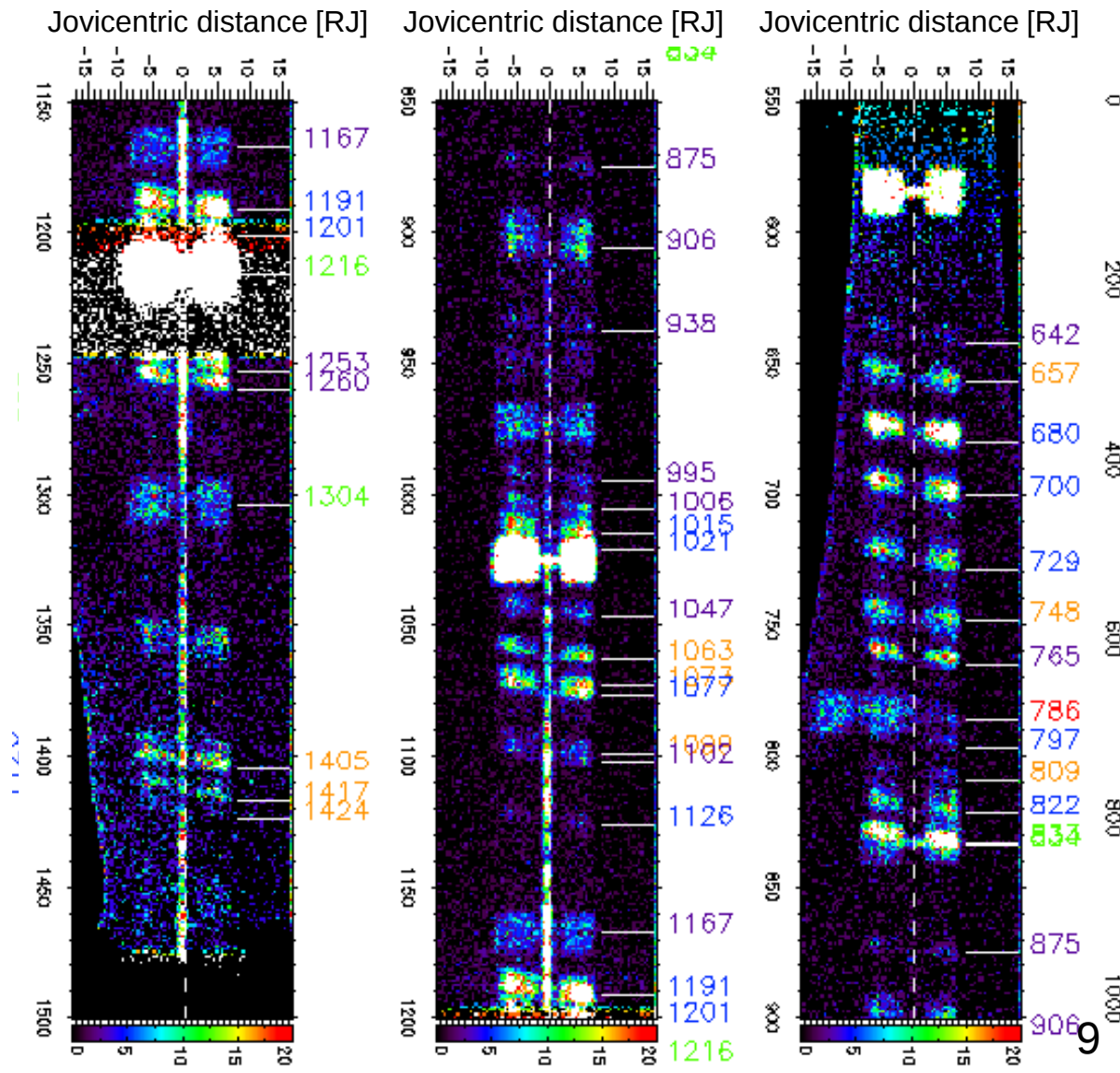


Fig. 8. Schematic of the dumbbell slits observation setup. Aurora from the north or south pole passes through the narrow center slit whereas photons from the Io plasma torus pass through the wide ends.

Yoshioka et al., 2013



Observation with Haleakala/T60



Fig. Tohoku 60 cm telescope at Haleakala Observatory

- From Feb. through Apr. 2016
- Tohoku 60-cm telescope (T60) at Haleakala obs. + Visible Imager and Spectrograph with Coronagraph (VISP)
- Wavelength: [SII] 671.6+673.1nm
- Platescale: 1.09"/bin or ~**0.05RJ/bin**
- Integration: 20min/frame
- # of data: 864 (dawn:564, dusk:545)

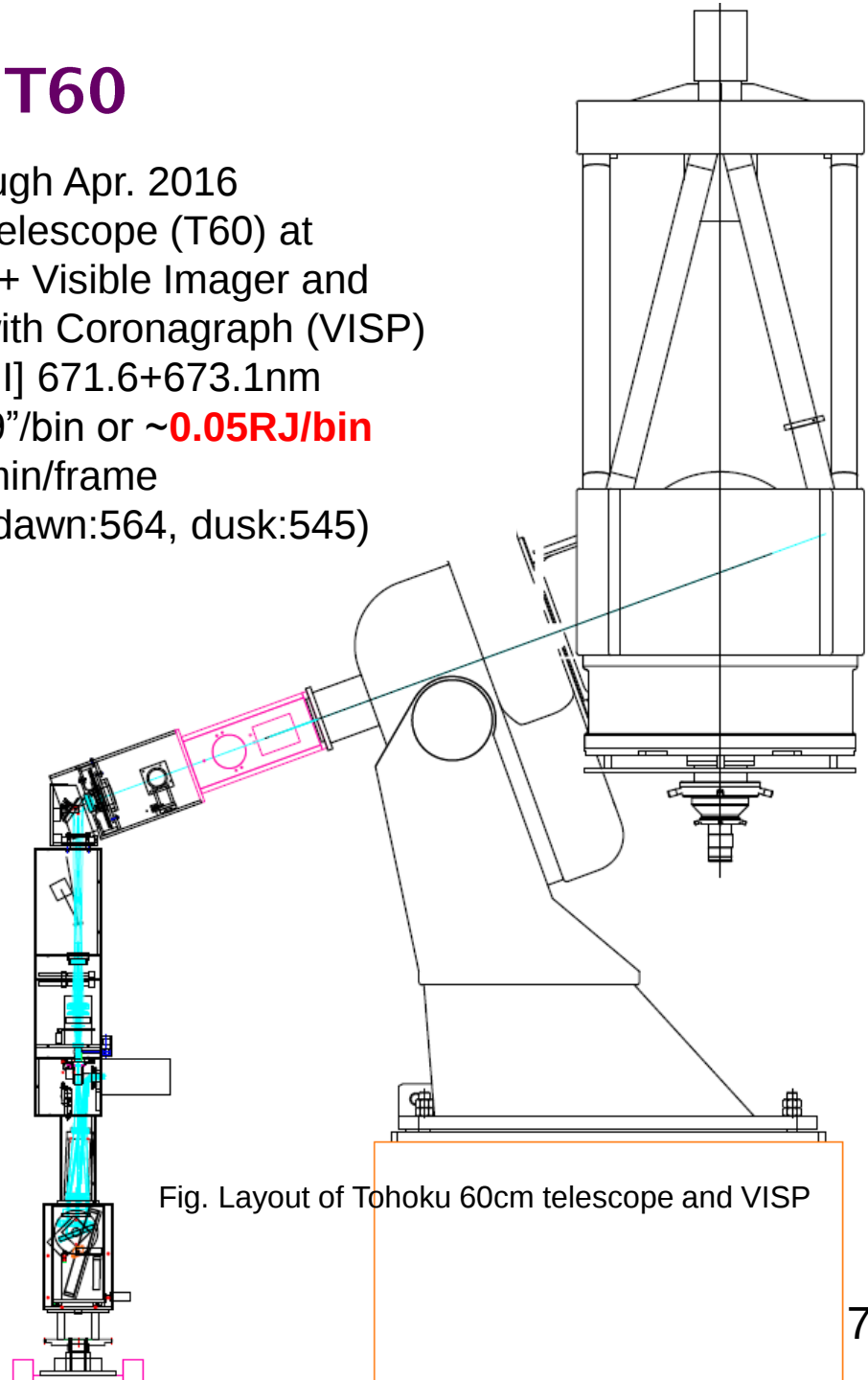
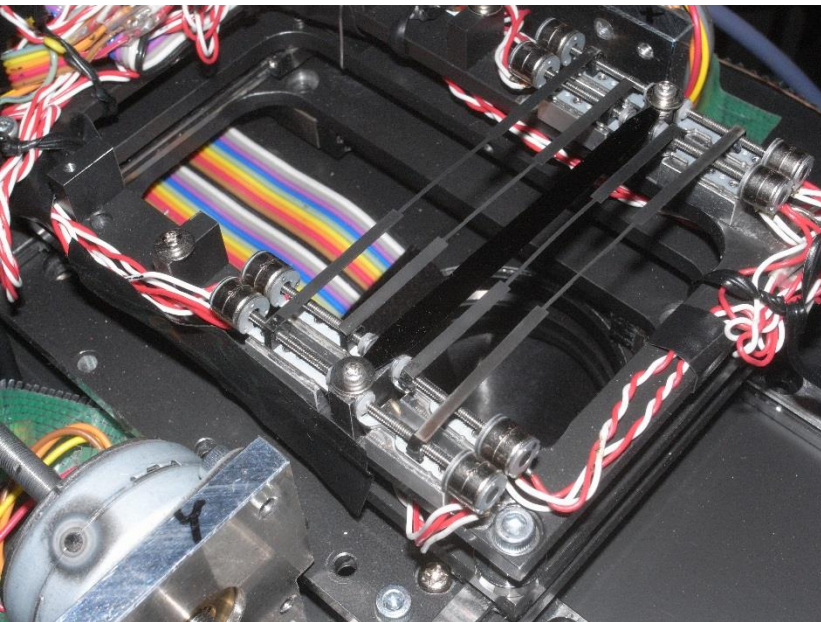
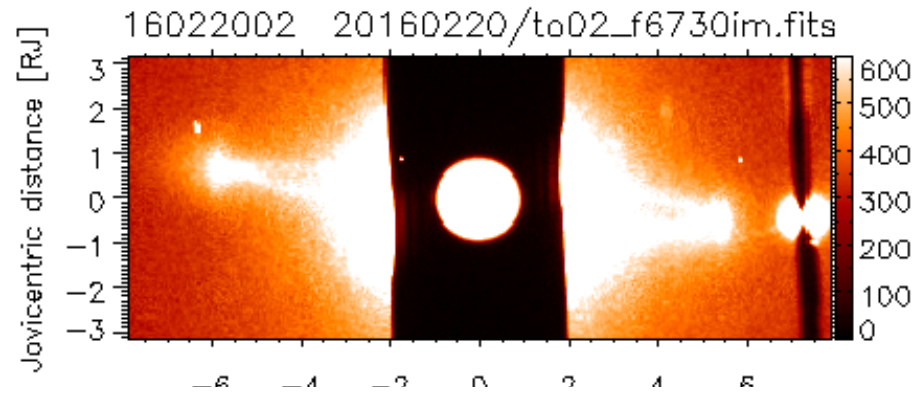
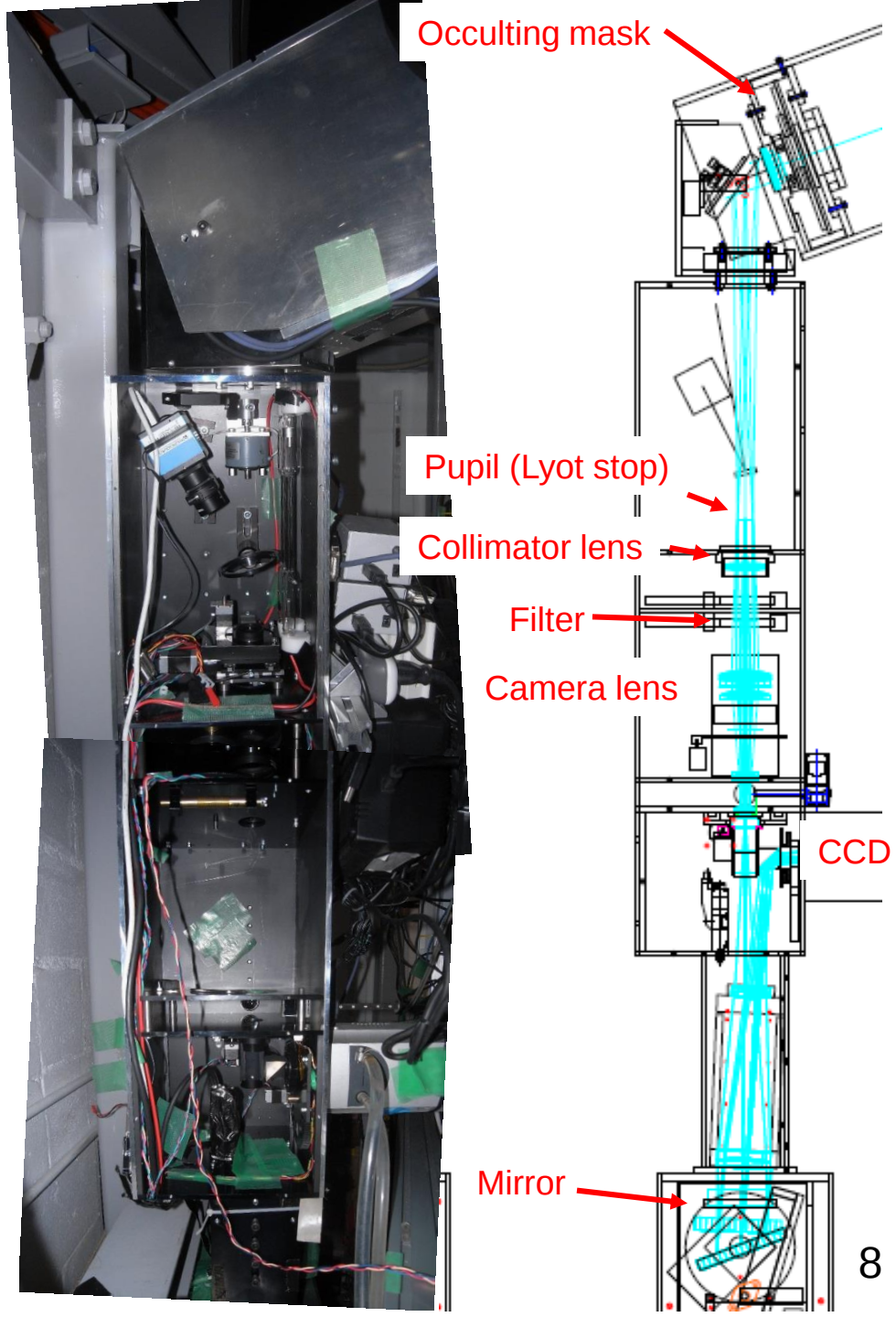


Fig. Layout of Tohoku 60cm telescope and VISP

Occulting Masks

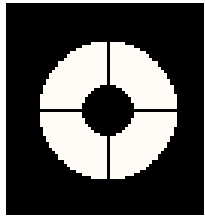


Field lens (f200mm achromatic lens)



Reducing contamination by diffraction using Lyot stop

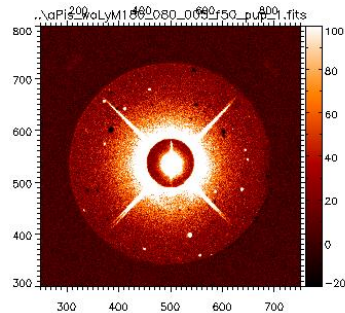
Entrance pupil



Secondary support structure (spider)

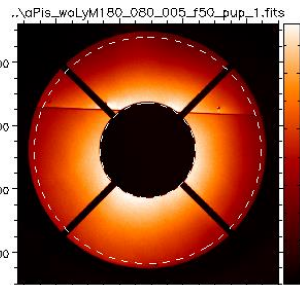
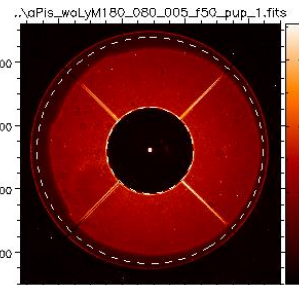
produces cross-shaped diffraction pattern which is the brightest contamination source for detecting faint emission spreading around the bright body.

Point-source Image after occulting mask



IFT

Pupil image
before / after Lyot stop



Final image at CCD

FT

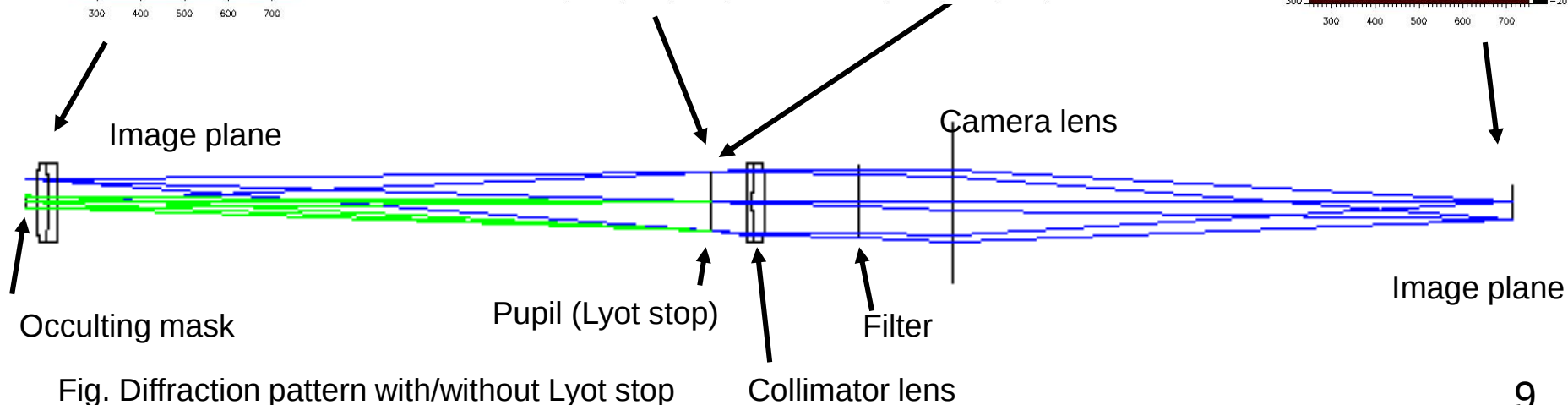
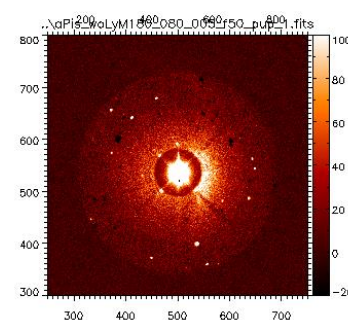
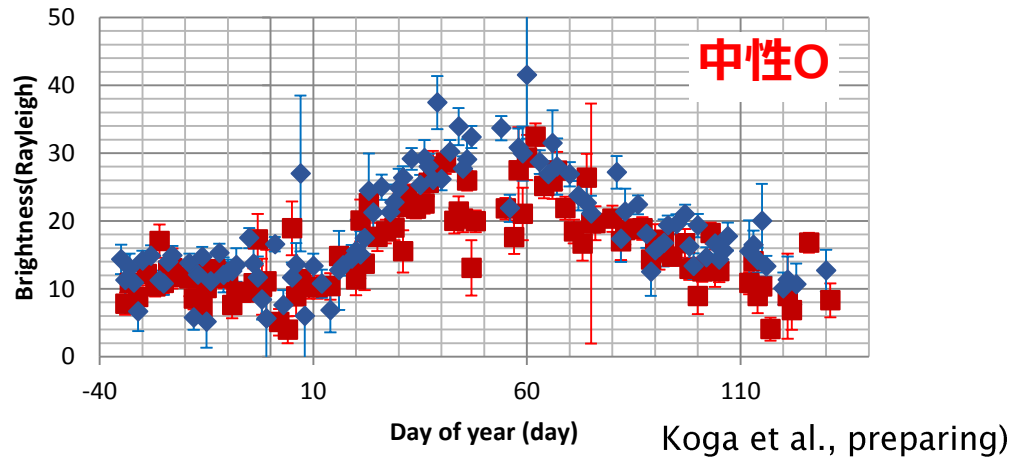


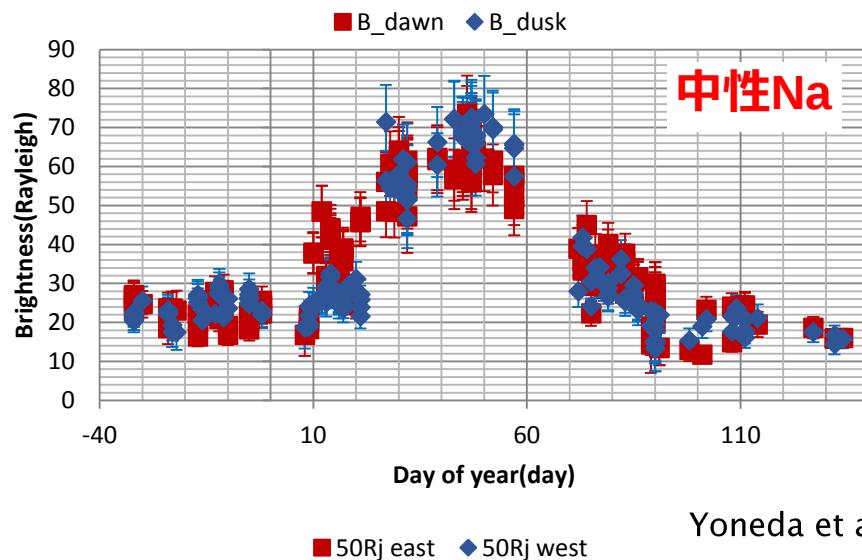
Fig. Diffraction pattern with/without Lyot stop

2015年の火山噴火時の、 中性酸素・ナトリウムの変動



O, Na両者とも、

- DOY=10付近から増加、
 - DOY=50付近をピーク
 - 増加振幅は2.5-3倍
-
- Oの方が減少のタイムスケールが長い。イオ大気にバッファされる影響か？
 - Naは主要な火山性ガス解離物の変動をよく反映すると言える。



Hisaki/EXCEEDによるEUVスペクトル診断

Volume emission rate

$$I = A_j f_j (T_e, n_e) n_{ion} \quad (\text{ph cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$$

$\underbrace{i \text{ S}^+, \text{ S}^{++}, \text{ S}^{+++}, \text{ O}^+, \text{ O}^{++}}_{\text{ions}}$

A_j : Einstein coefficient for spontaneous emission (s^{-1})

f_j : fraction of ion in state j (population)

n_i : ion density

T_e : ion Temperature

n_e : electron density

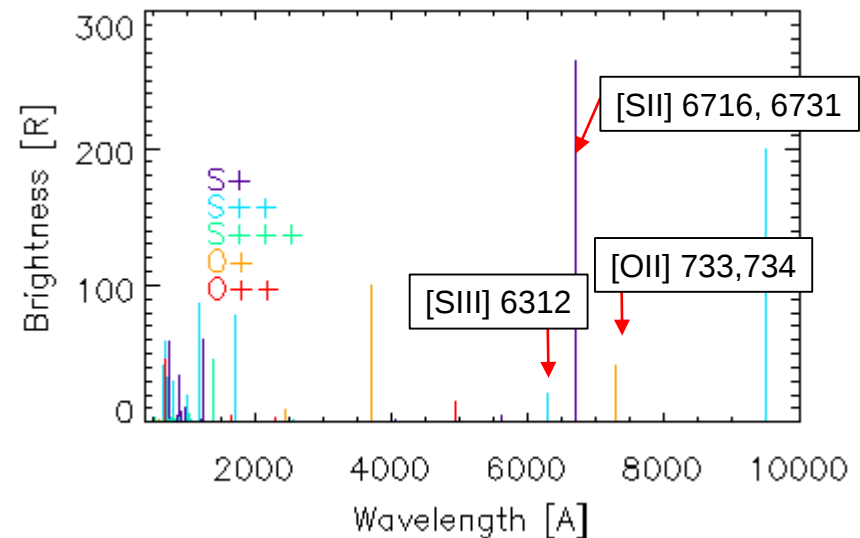
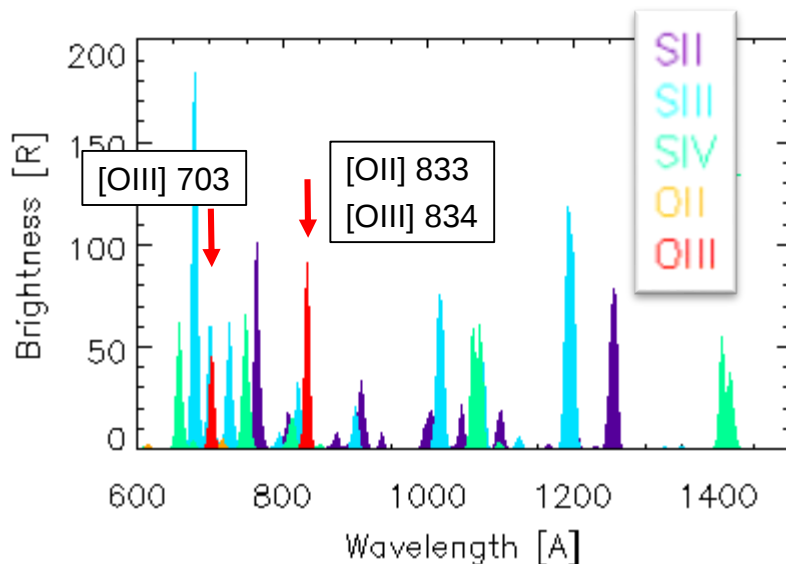


Fig. Brightness of typical ions in the plasma torus ($n_e=3000/\text{cc}$, $T_e=4.6+100\text{eV}$), convolved with an instrumental function of $\text{FWHM}=5\text{nm}$, (CHIANTI Ver 8.0)

プラズマトーラス南北分布から導出するイオン温度

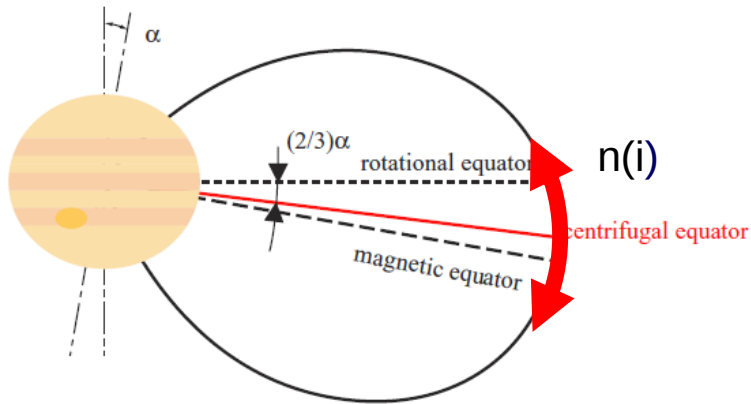


Fig. A schematic diagram of rotational, magnetic and centrifugal equator.

Assuming a dipole field, density distribution of ion (n_i) is approaches a scale height distribution,

$$n_i \sim n_0 \exp \left(-\frac{z^2}{H_i^2} \right),$$

$$H_i = \sqrt{\frac{2k(T_{i\parallel} + ZiT_{e\parallel})}{3M_i\Omega^2}},$$

M_i : mass of ion

Ω : angular velocity

Zi : average charge state

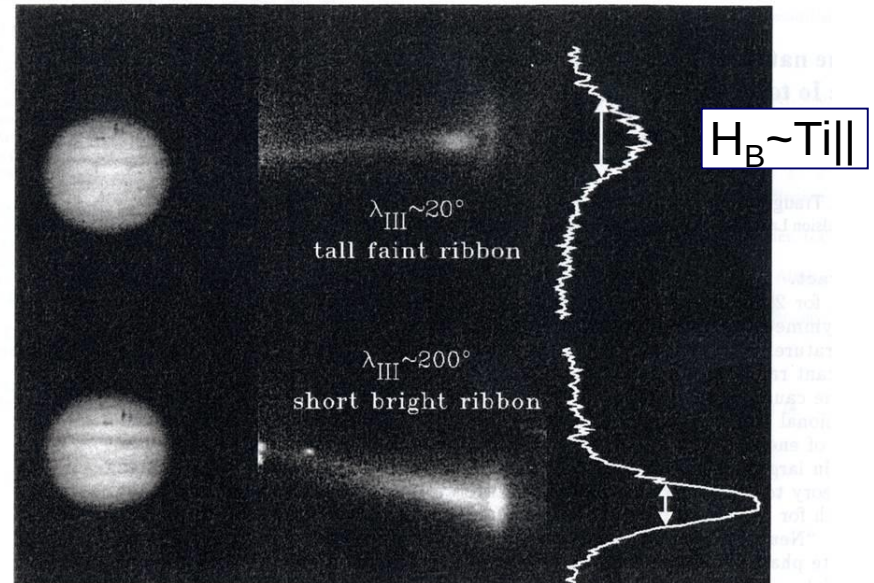
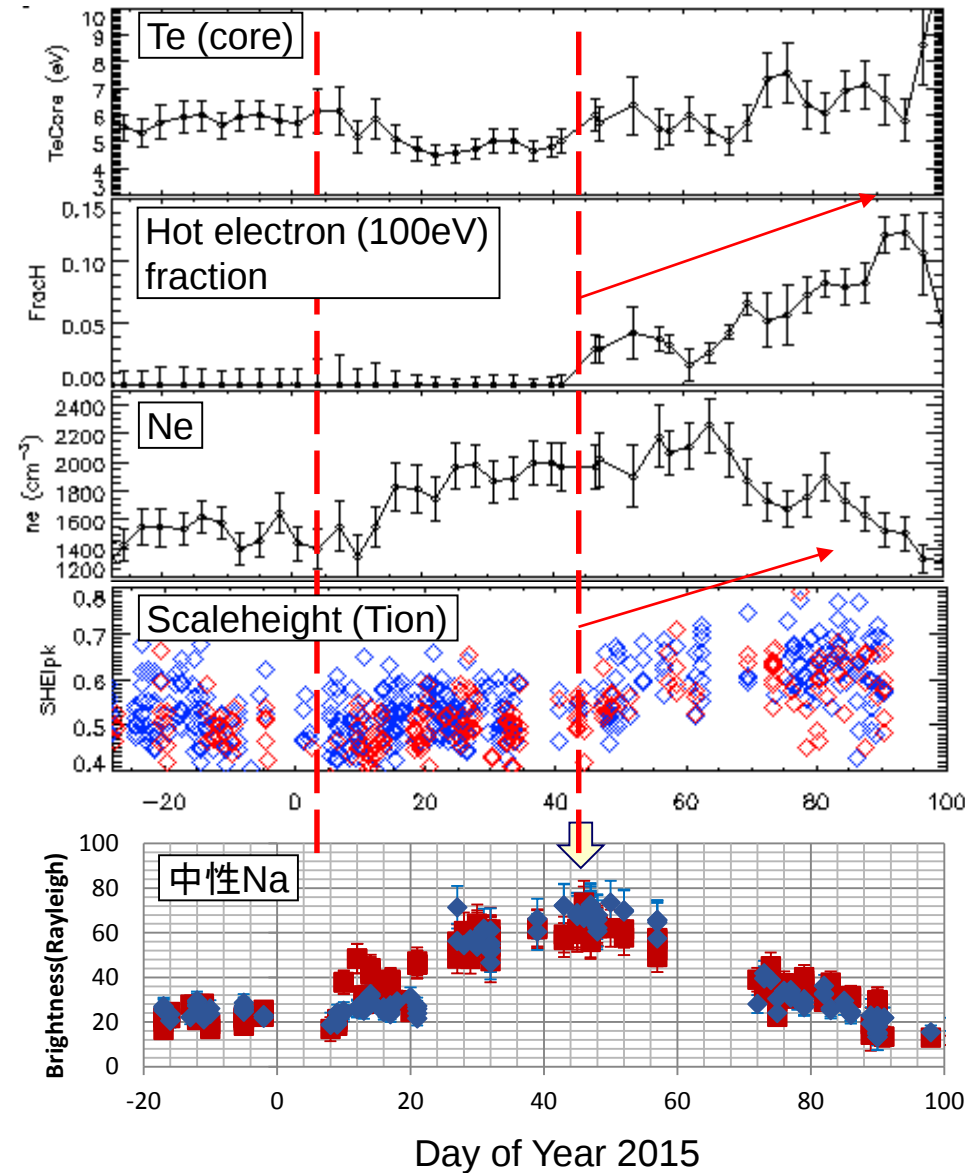


Figure 1. (left) Ground-based images of 6731Å S⁺ emission. The ansa longitudes are (top) $\lambda_{III} \sim 20^\circ$ and (bottom) $\sim 200^\circ$. Intensity traces through the ribbon show that the top ribbon is taller and fainter than the bottom ribbon. The intensity plots are on the same scale. Arrows indicate the full-width-at-half-maximum of the intensity trace, which may be converted to ion scale height and $T_{i\parallel}$. (Images 91s1418 and 91s1441 from ST95.)

Schneider and Trauger 1995.

電子密度、電子温度、イオン温度の変動



<背景低温電子温度>

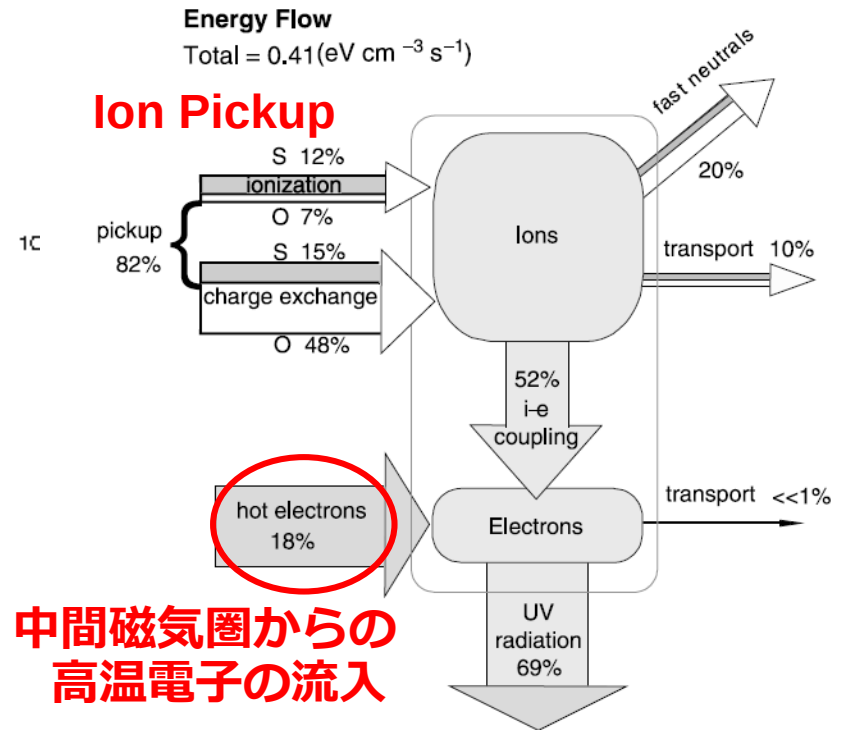
期間中ほぼ変わらず。DOY=50以降でやや上昇

<高温電子の量・イオン温度>

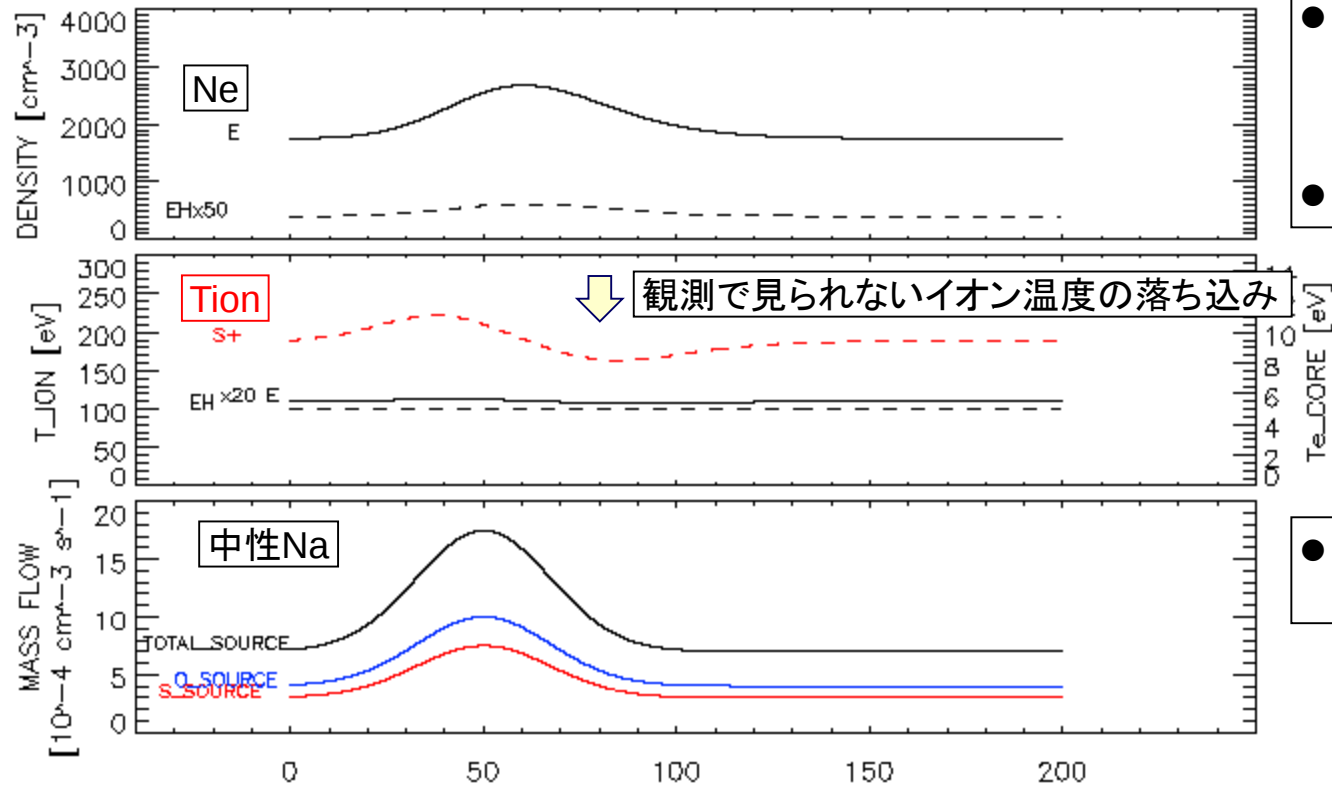
電子密度増大から20日を経て継続して上昇

<電子密度>

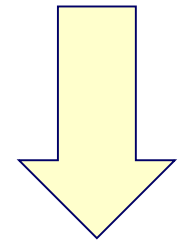
中性供給増減とほぼ呼応。



従来のモデル計算

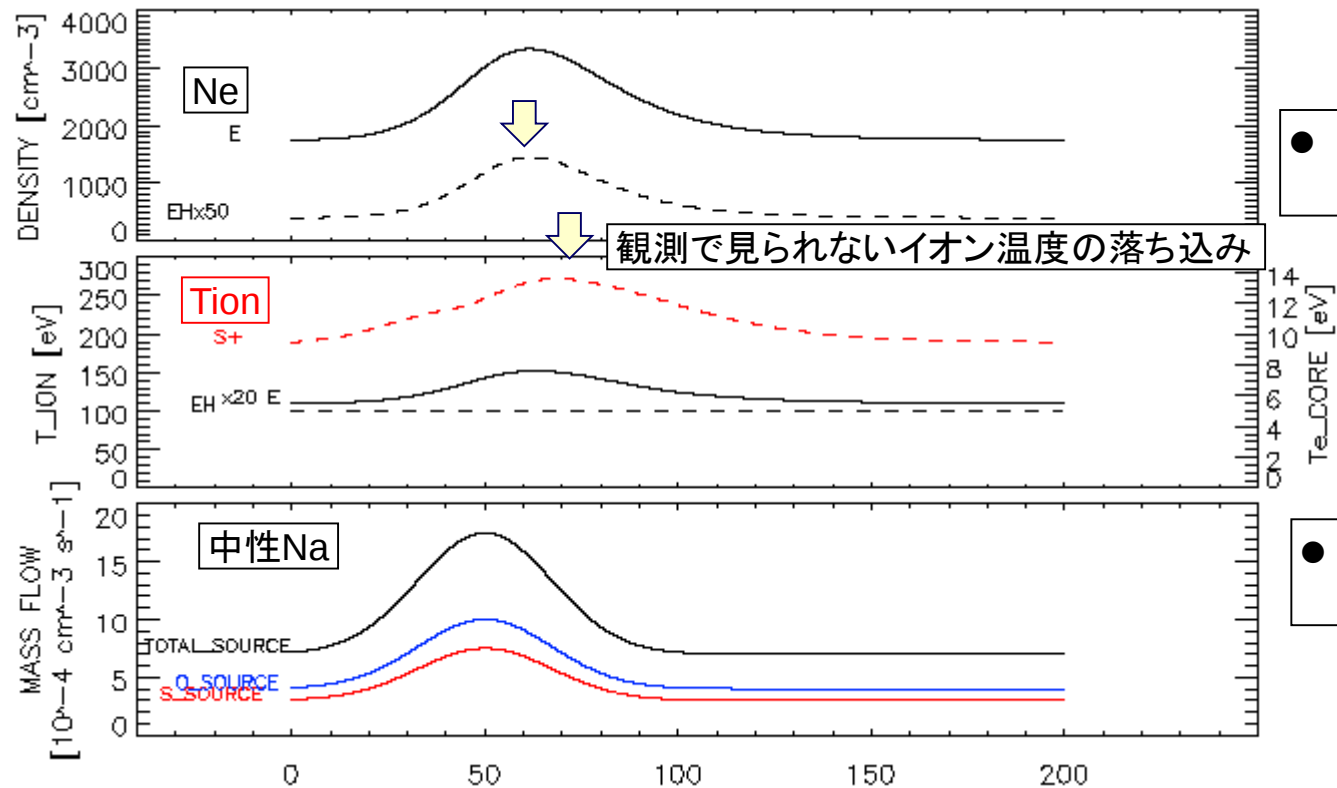


- 観測された中性増大の振幅、タイムスケールで中性密度を変化
- 化学反応を考慮し、エネルギーバランス、マスバランスを解きながら、時間発展
- 一定の高温電子ソースを仮定



- 観測で見られないイオン温度の落ち込み

高温電子量に変動を与えたモデル計算



● 観測された高温電子の増大を含める

観測で見られないイオン温度の落ち込み

● 観測でされたイオン温度ピークが再現される

1. 内部磁気圏でプラズマ供給が増加
2. たまったプラズマが外部に輸送、代わりに中間磁気圏の熱い(温まった)プラズマが流入 (磁力線交換) => エネルギーにして3-6割

まとめ

- 2014年12月から2015年5月の間に
 - ✓ Hisaki/EXCEED のEUV観測：イオ起源Oガス、主要イオン発光によるスペクトル診断
 - ✓ 地上望遠鏡による分光・イメージング：イオ起源Naガス、イオン温度を連続観測
- DOY=50に通常時の約2.5倍の中性供給(O,Na)の増加、電子密度増大をとらえる。
- 中性の供給開始から40日を経過して、高温電子量とイオン温度の上昇がはじまる。
- プラズマの動径輸送の時定数を考慮すると、一連の電子・イオンの温度上昇は磁力線交換による中間磁気圏からのプラズマ流入が担うと考えられる。