

# 衛星イオの火山活動と 磁気圏へのガス散逸

土屋史紀(東北大・理)

米田瑞生(キーペンハウアー太陽物理研究所)

古賀亮一(東北大・理)

ひさきサイエンスチーム

# 外惑星衛星大気



イオ	ガニメデ	タイタン
二酸化硫黄 表面温度>昇華温度 火山活動 非一様な大気 赤道域: collosionally thick	水(氷) 外圏大気	メタン・窒素 発達した大気

# イオの大気と火山活動

イオ大気: カラム密度:  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$  (0.6nbar)

非一様・希薄だが、衝突効果が重要な濃い大気(電離圏の形成)

## 大気形成メカニズム

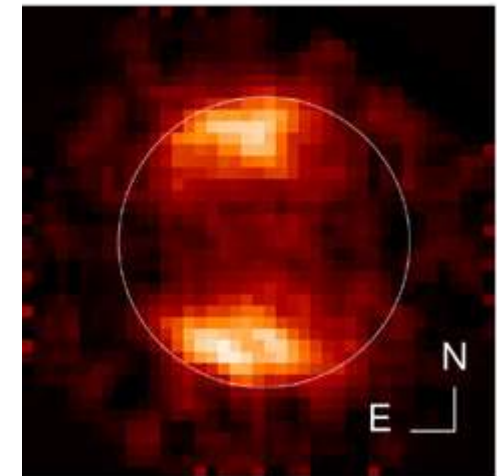
(1) Ion sputtering with Io's surface (Moon & Mercury)

(2) SO<sub>2</sub> sublimation, (3) Volcanic support

## 散逸メカニズム

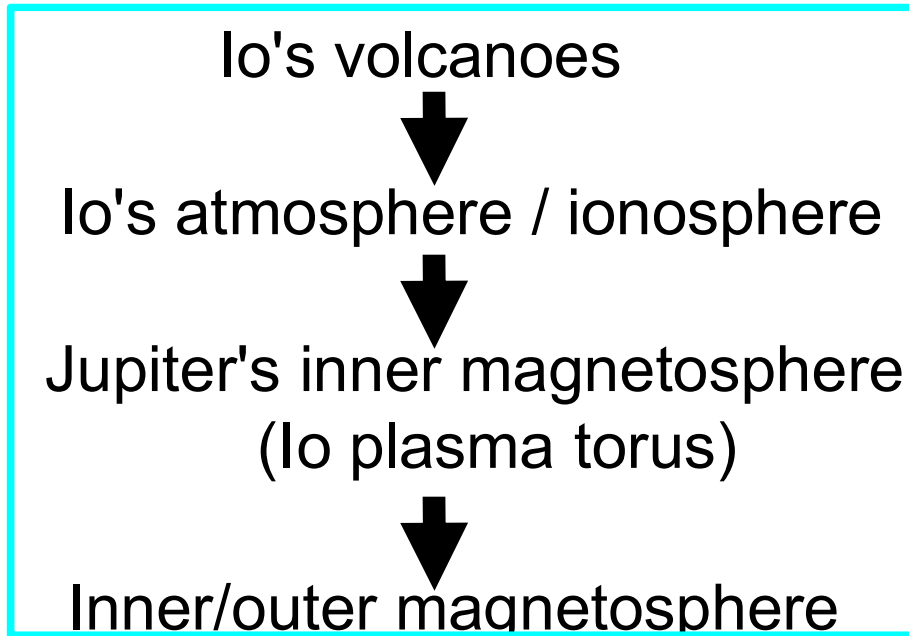
- 火山からの噴出ガスは大気にバッファされる
  - 火山噴出による原子・分子の初速  $v < 1 \text{km/sec}$
  - イオ重力圏からの脱出速度  $v_{esc} = 2.6 \text{km/sec}$
- 非熱的な散逸過程が必要 (atmospheric sputtering)
- 火山の変化は大気散逸量にどのように影響するか？

1998 West

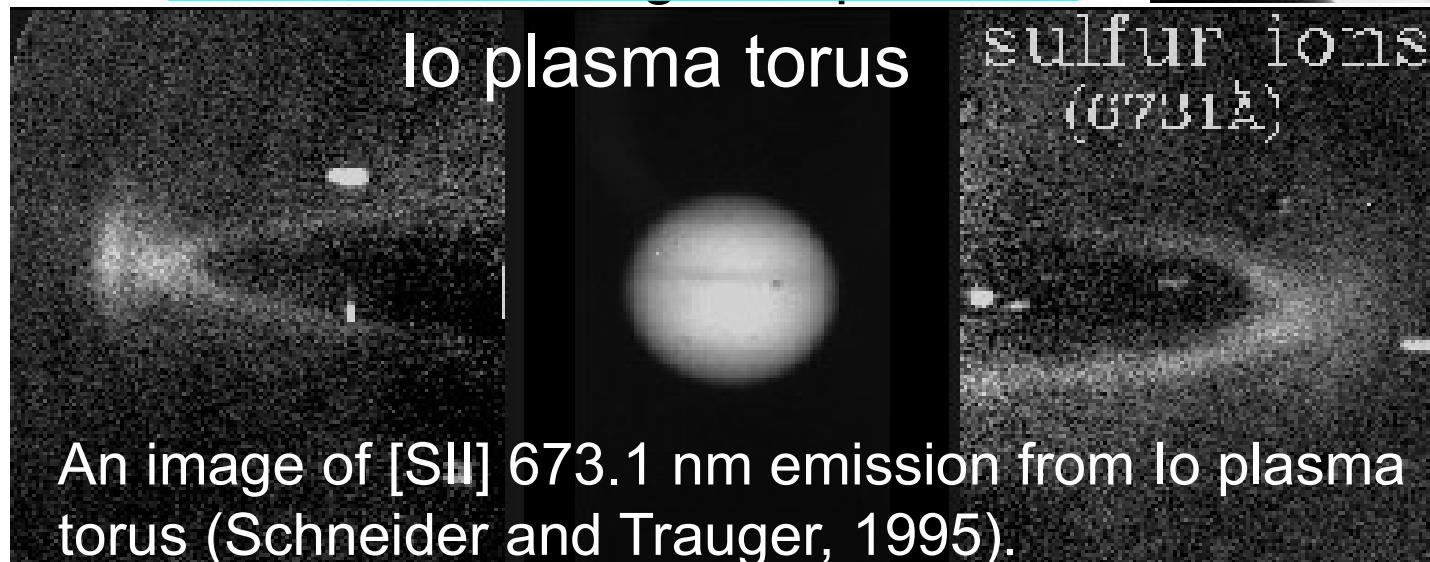
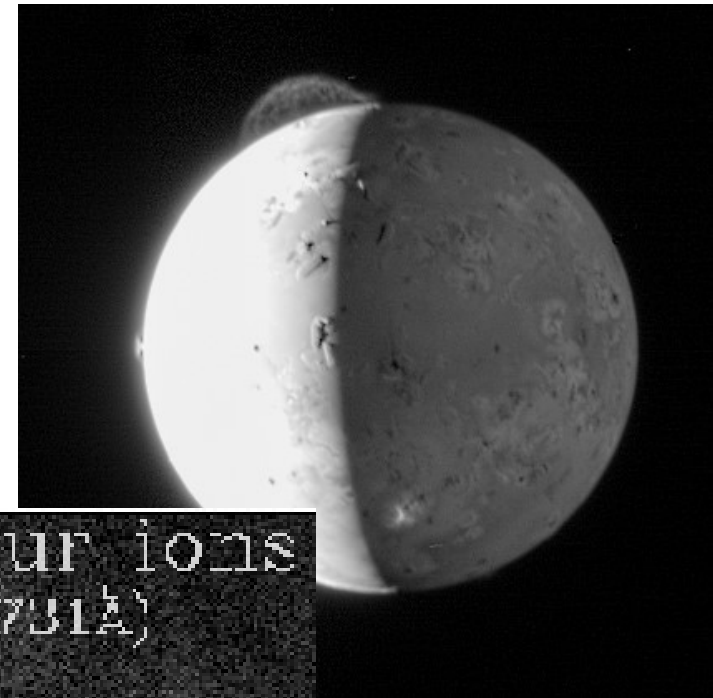


H Ly- $\alpha$  absorption(HST)

# イオ大気散逸と磁気圏への影響



Io's volcanic plumes obtained by the New Horizons spacecraft.



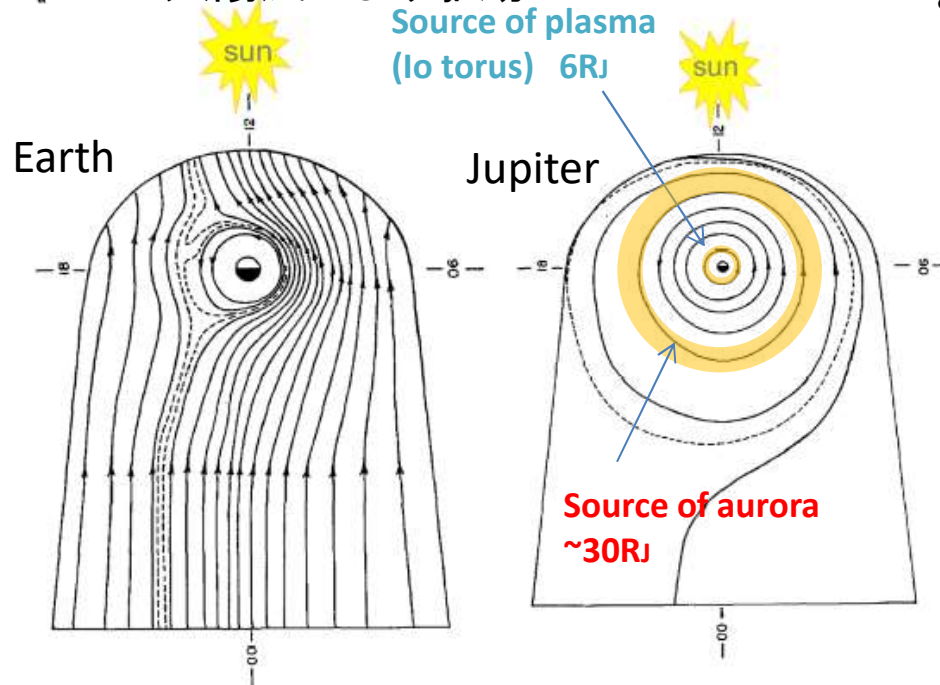
# イオ大気散逸と磁気圏への影響

木星：共回転が卓越

・・・惑星自転により駆動

地球：太陽風方向のプラズマ流が卓越

・・・太陽風により駆動

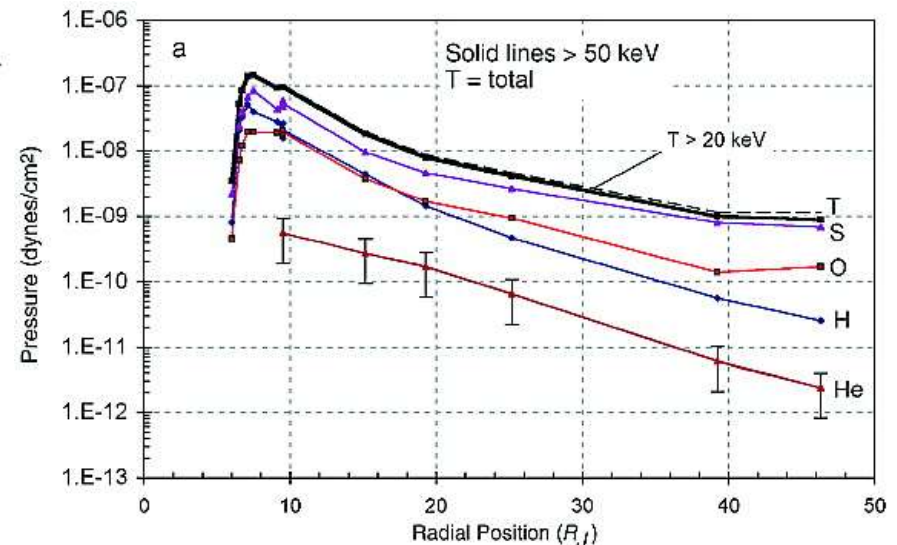


Global plasma convection :  
Earth & Jupiter (Kivelson 2005)

回転系の磁気圏で、内部のプラズマ源が変化した時、磁気圏にどのような影響を及ぼすか？

プラズマトーラスからプラズマが外向き輸送

- 磁気圏の「磁気ディスク構造」を支えるプラズマ圧を供給
- 木星の自転運動量を磁気圏プラズマに供給



Radial distribution of plasma pressure in the Jovian magnetosphere observed by Galileo (Mauk et al. 2004)

# 目的

大気の成因: 昇華 or 火山

火山活動の変動 vs. 磁気圏への散逸と影響

イオ赤外放射観測  
・火山活動の同定

Katherine de Kleer  
(UC Berkerey)

HISAKI衛星(極端紫外)  
・酸素原子・プラズマ  
・オーロラ(磁気圏)

地上光学観測(可視)  
・中性Na雲観測

米田  
(キーペンハウアー太陽物理研究所)

# 観測

## 1. HISAKI衛星(極端紫外)

古賀(東北大)

- ・酸素原子
- ・プラズマ
- ・オーロラ(磁気圏)

## 2. 地上光学観測(可視)

- ・中性Na雲観測

## 3. イオ赤外放射観測

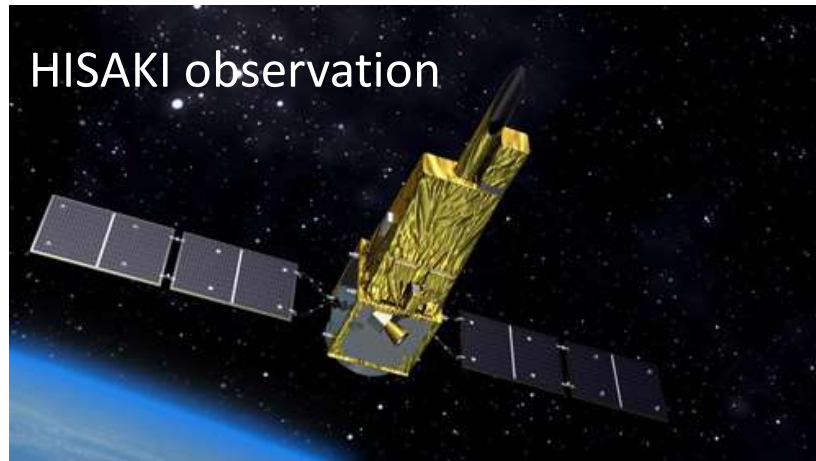
- ・火山活動の同定

米田(キーペンハウアー太陽物理研究所)

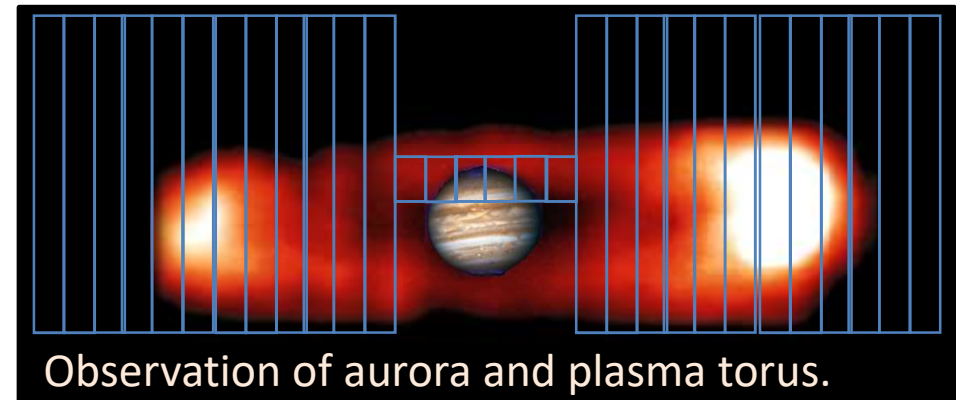
Katherine de Kleer (UC Barkerey)



# [1] HISAKI衛星

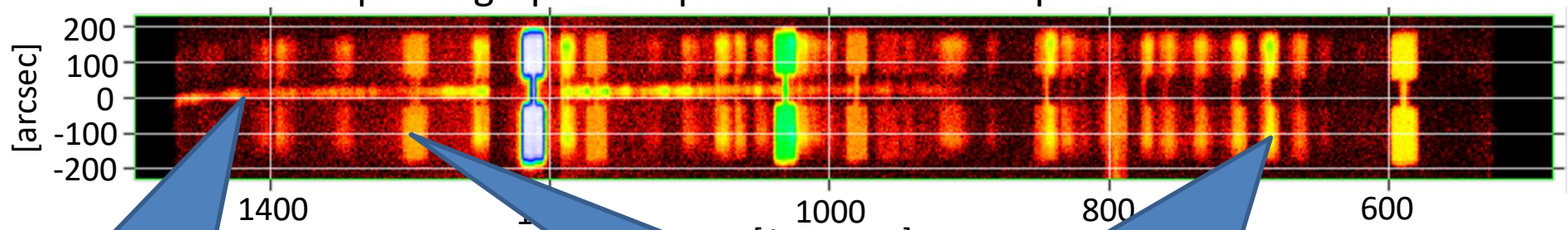


- Launch : Sep 14, 2013
- Orbit : 950km × 1150km (LEO)
- EUV spectroscope (EXCEED)



- Wavelength range: 55-145nm ( $\Delta=0.4-1.0$ nm)
- Field of view (along slit) : 360 arc-sec
- **Spatial resolution : 17 arc-sec**
- Electron temperature/density ( $T \sim 5\text{eV} + 100\text{eV}$ )
- Ion composition (S, O ions)

Spectrograph of Io plasma torus and Jupiter's aurora



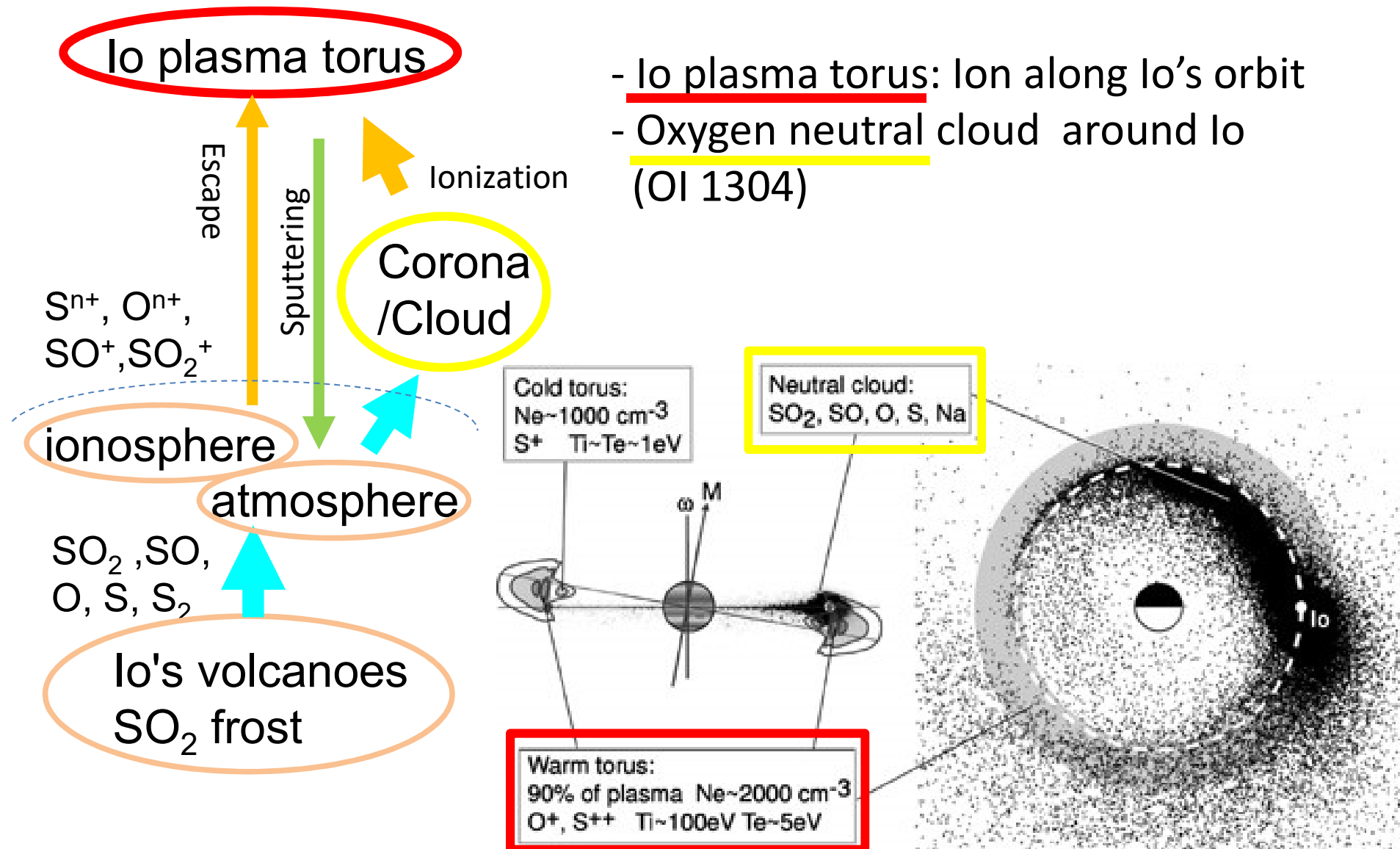
オーロラ:磁気圏活動

OI1304:イオ酸素原子雲

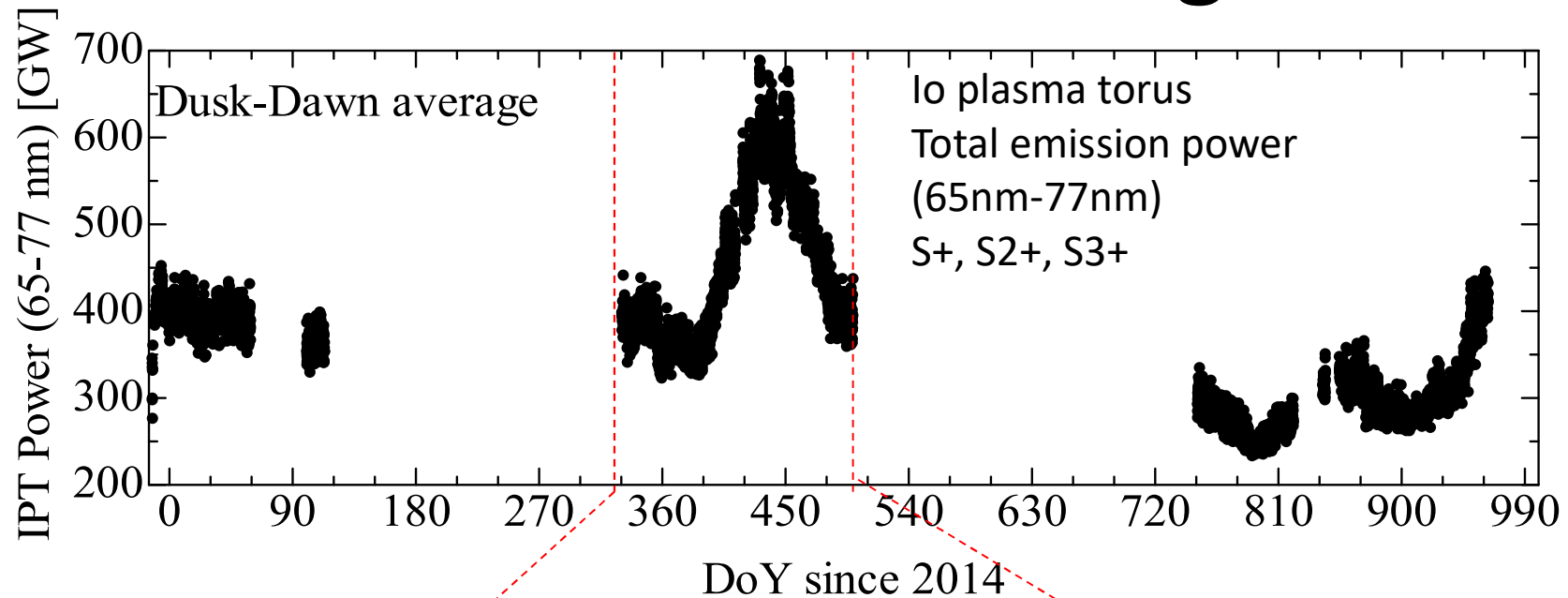
硫黄イオン:プラズマトーラス



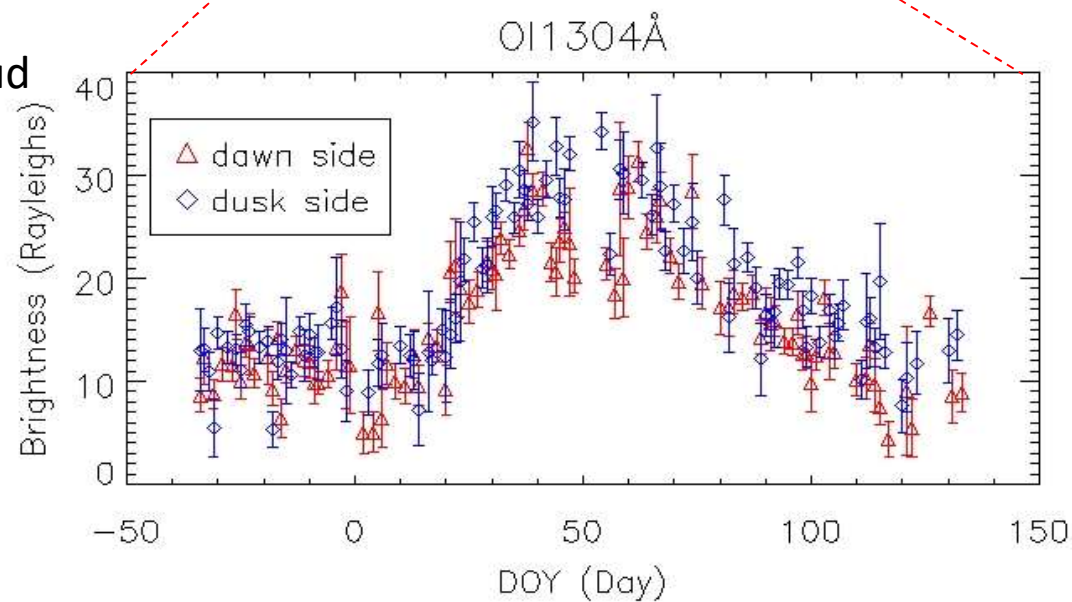
# HISAKI: Io plasma torus & Oxygen cloud



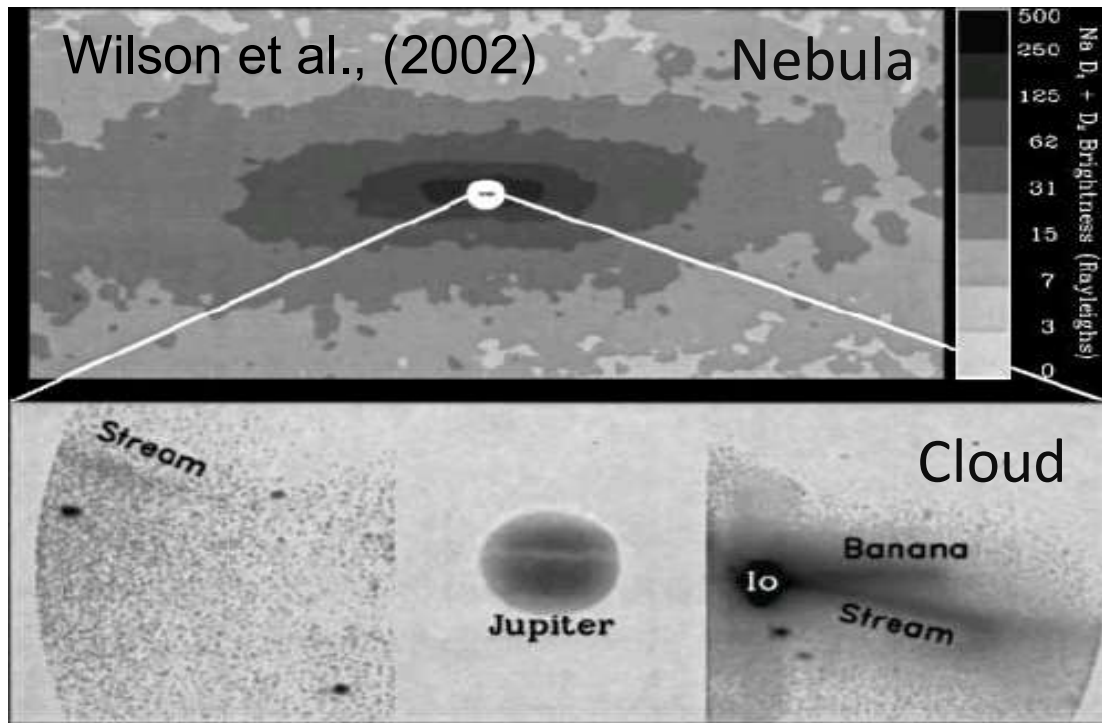
# HISAKI衛星: Dec. 2013-Aug. 2016



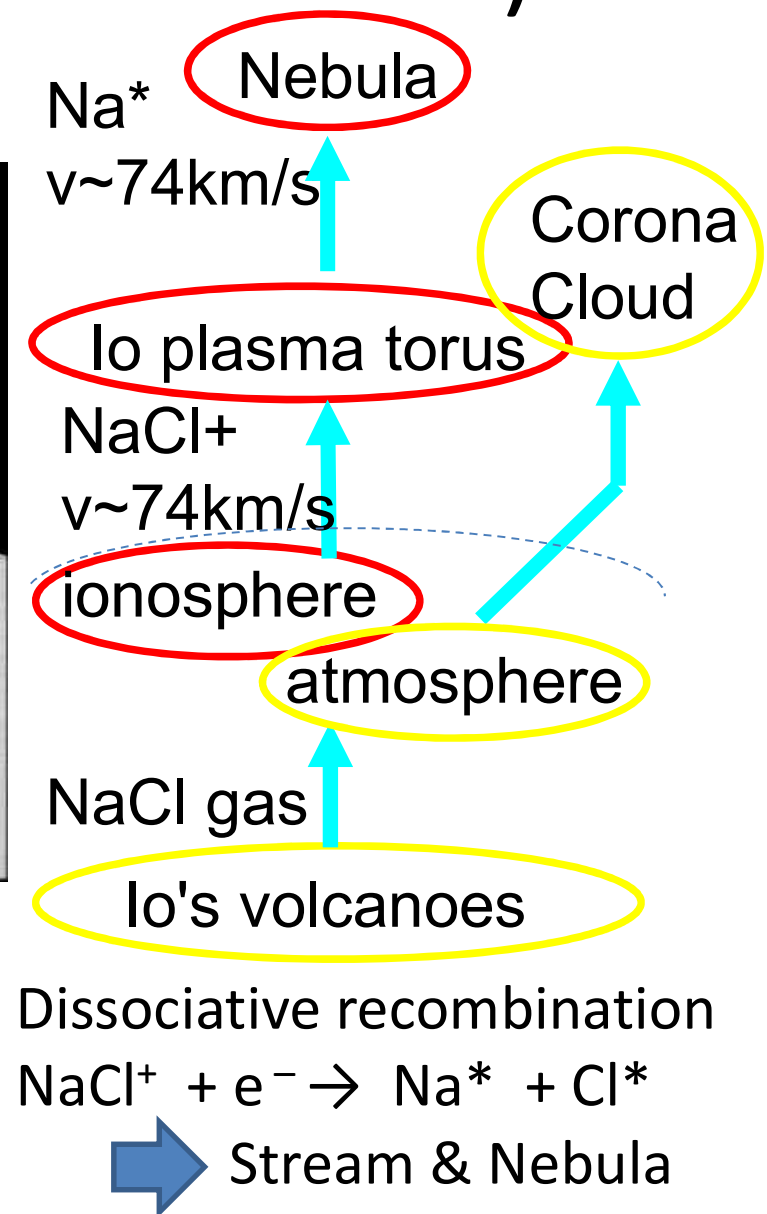
Neutral oxygen cloud  
(130.4nm)  
(Koga et al. 2017)



# [2] 中性Na雲(Sodium Nebula)



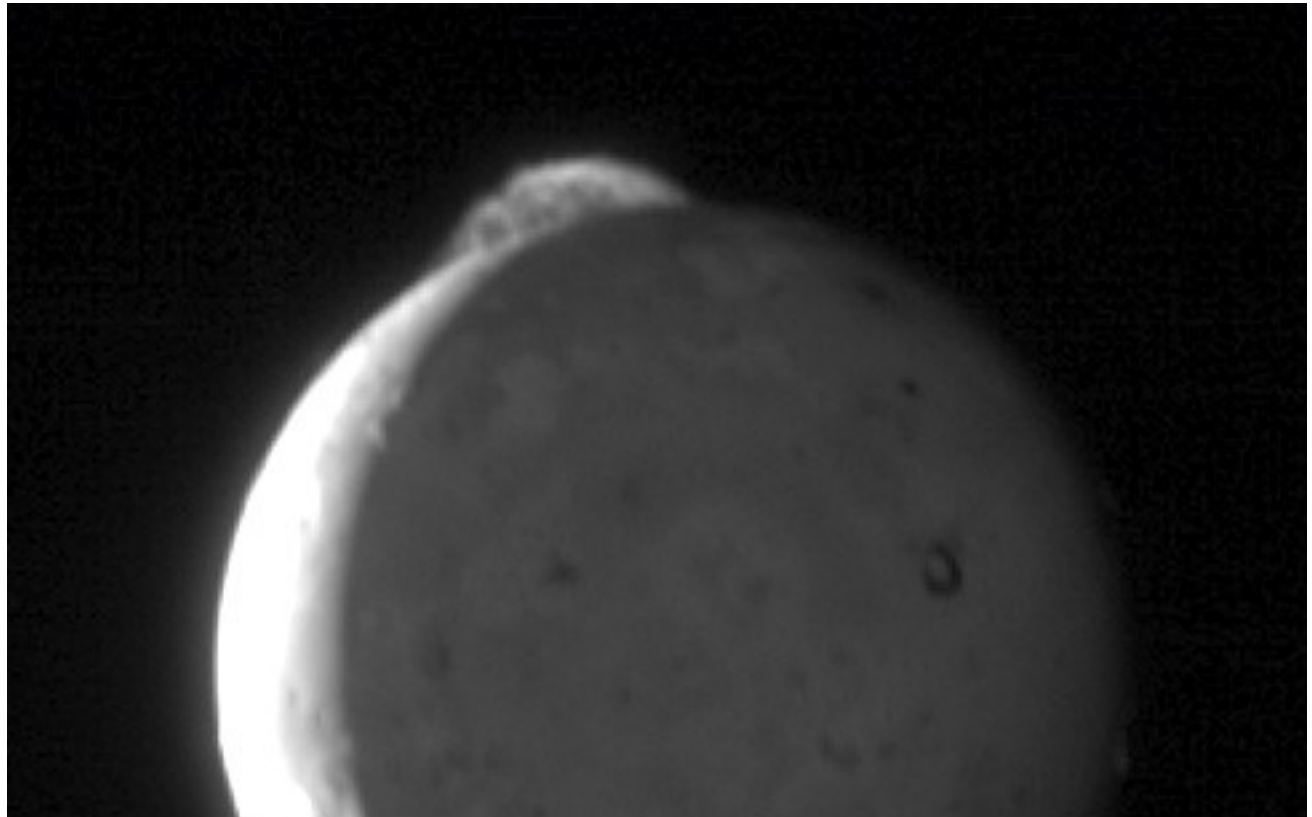
D-line emissions of sodium cloud/nebula with a wide FOV (TOP) and small FOV (Bottom) (Wilson et al., 2002).



NaCl on Io is observed only around active volcanic plumes.  
(Lellouche et al. 2003, Moses et al. 2003)

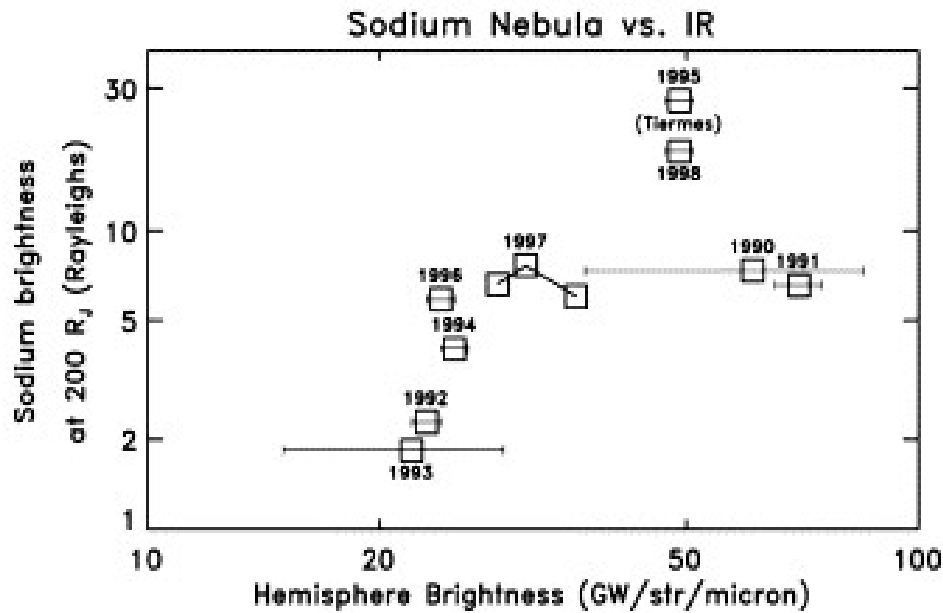
- ➔ Sublimation temperature of NaCl is  $\sim 1,500$  K.
- ➔ Increase in sodium emissions indicates event accompanied with volcanic plumes on Io.

Volcanic plume on Io captured by the New Horizons spacecraft (JPL/NASA).

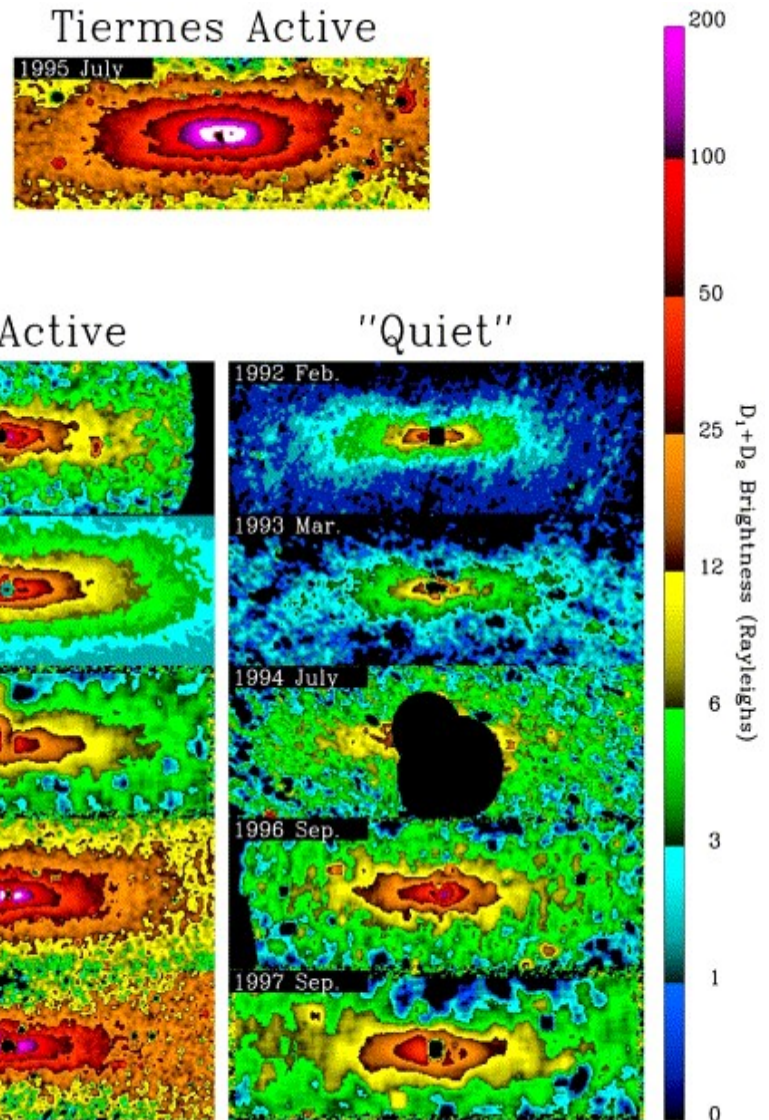


# Volcanism v.s. Sodium brightness

Mendillo et al. (2004) found a positive correlation between brightness of the sodium nebula and Io's volcanic activity.



D-line brightness in the sodium nebula v.s. infrared brightness of Io ( Mendillo et al., 2004 ).



Summary of Jupiter's sodium nebula and Io's volcanic activity analysis for the period 1990-1998. ( Mendillo et al., 2004 )



# Observations

Period: Oct 2013 – Apr 2016  
(covering the whole HISAKI  
observation campaign.)

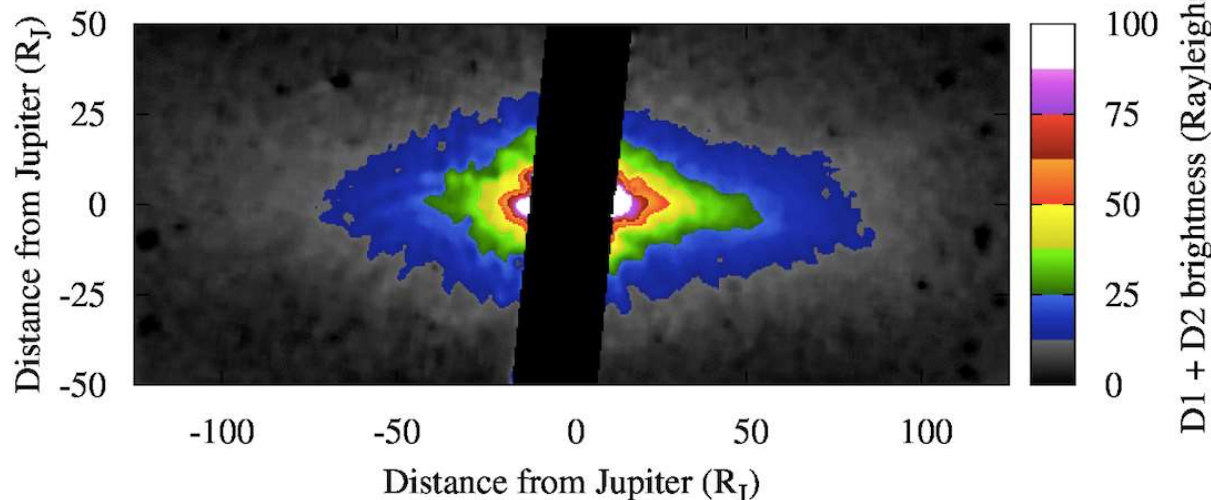
Site: Haleakala High Altitude Observatory  
Maui, Hawaii

Instrument: A 10-cm refractor.  
with narrow band filters



A filter imager used for observations  
of Jupiter's sodium nebula.

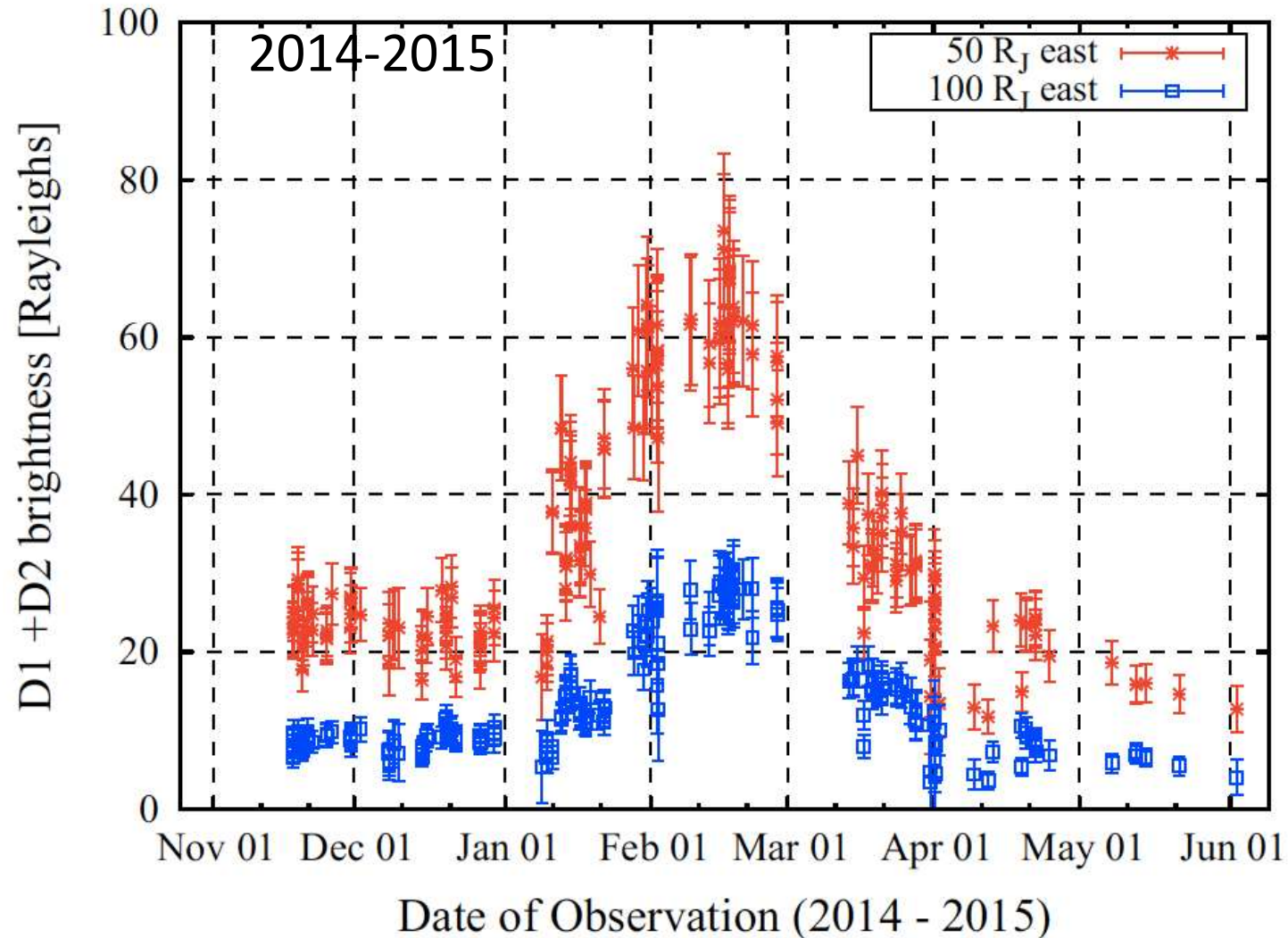
12<sup>h</sup>38<sup>m</sup>UT November 24, 2013



An image of sodium  
nebula taken in 2013.

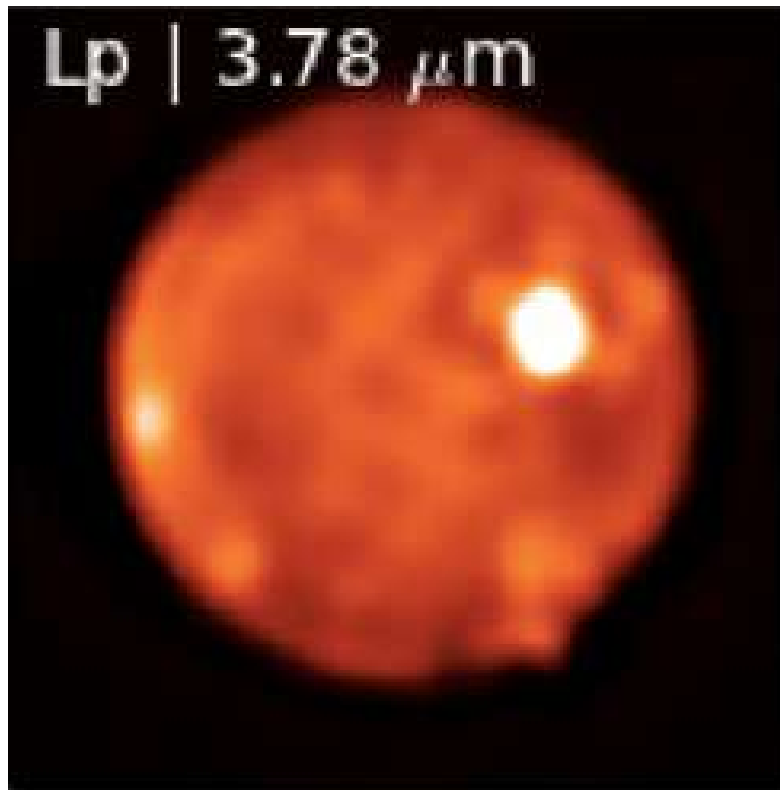


# Observation results



2015年に観測された木星ナトリウム雲の増光 (Yoneda + 2015)。  
ひさき衛星サポート期間(2013年～)の最大のイベント、  
→ 2015年のイベント (Yoneda et al., 2015, ICARUS)

## [3]イオ：赤外線観測



イオの画像(Keck II, 3.8  $\mu\text{m}$ )  
De Kleer & De Peter (2016)

de Kleer et al. (2015)  
de Peter et al. (2016)  
de Kleer & de Peter (2016)

3.8  $\mu\text{m}$  でのイオ観測

Keck-II, Gemini-N

イオの木星蝕(衝前後は困難)

薄明時間帯の観測(モニタ)



火山(火山タイプ)の同定

火山活動の時間変化

温度の計測(複数波長観測)

# 3つの観測の比較

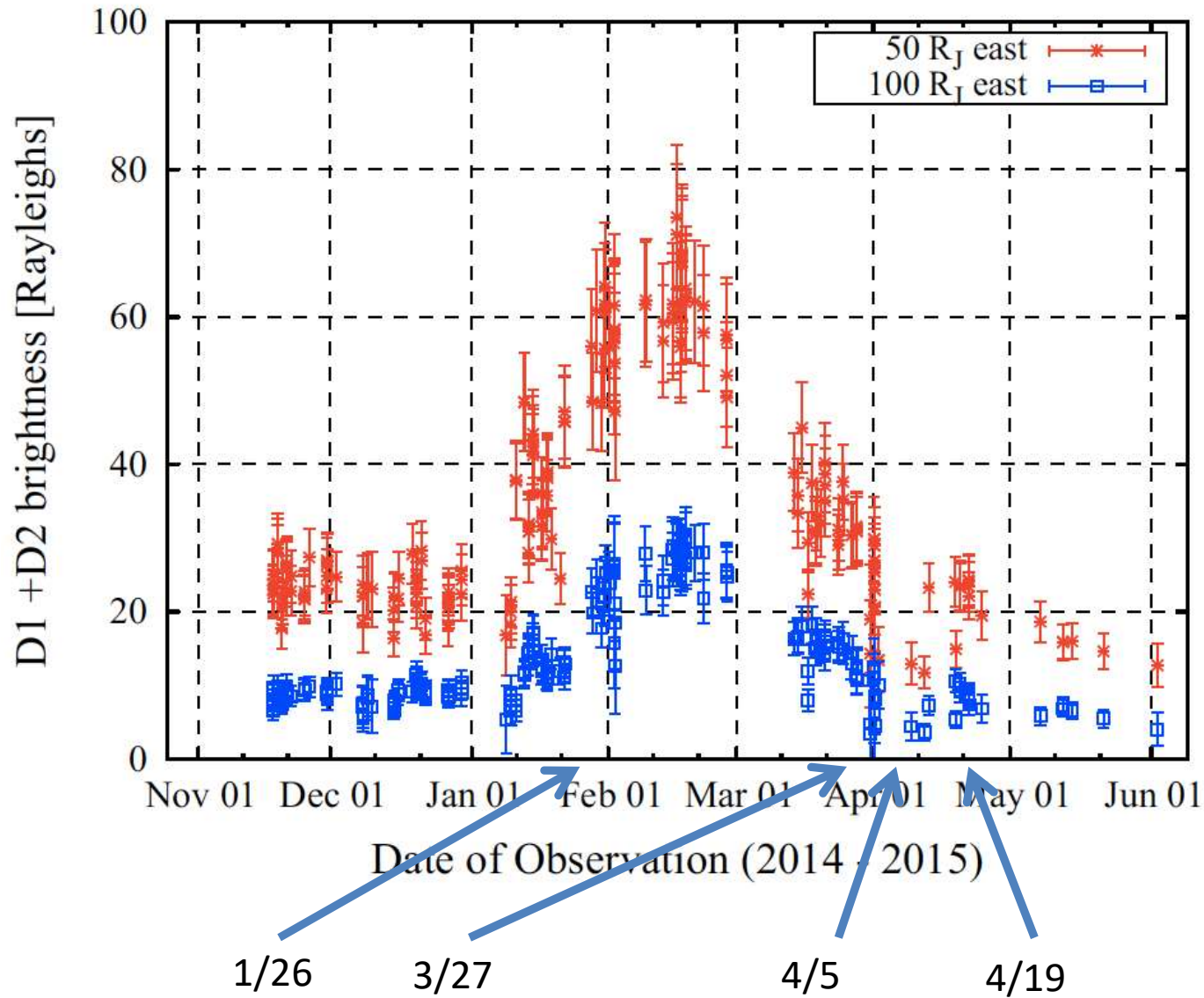
大気の成因: 昇華 or 火山

火山活動の変動 vs. 磁気圏への散逸

イオ赤外放射観測  
・火山活動の同定

HISAKI衛星(極端紫外)  
・酸素原子・プラズマ  
・オーロラ(磁気圏)

地上光学観測(可視)  
・中性Na雲観測



Naで最大の増光があった、2月中の赤外線観測データに欠ける。

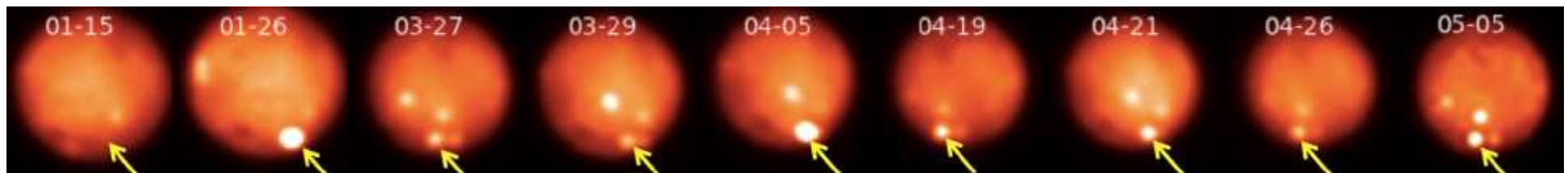
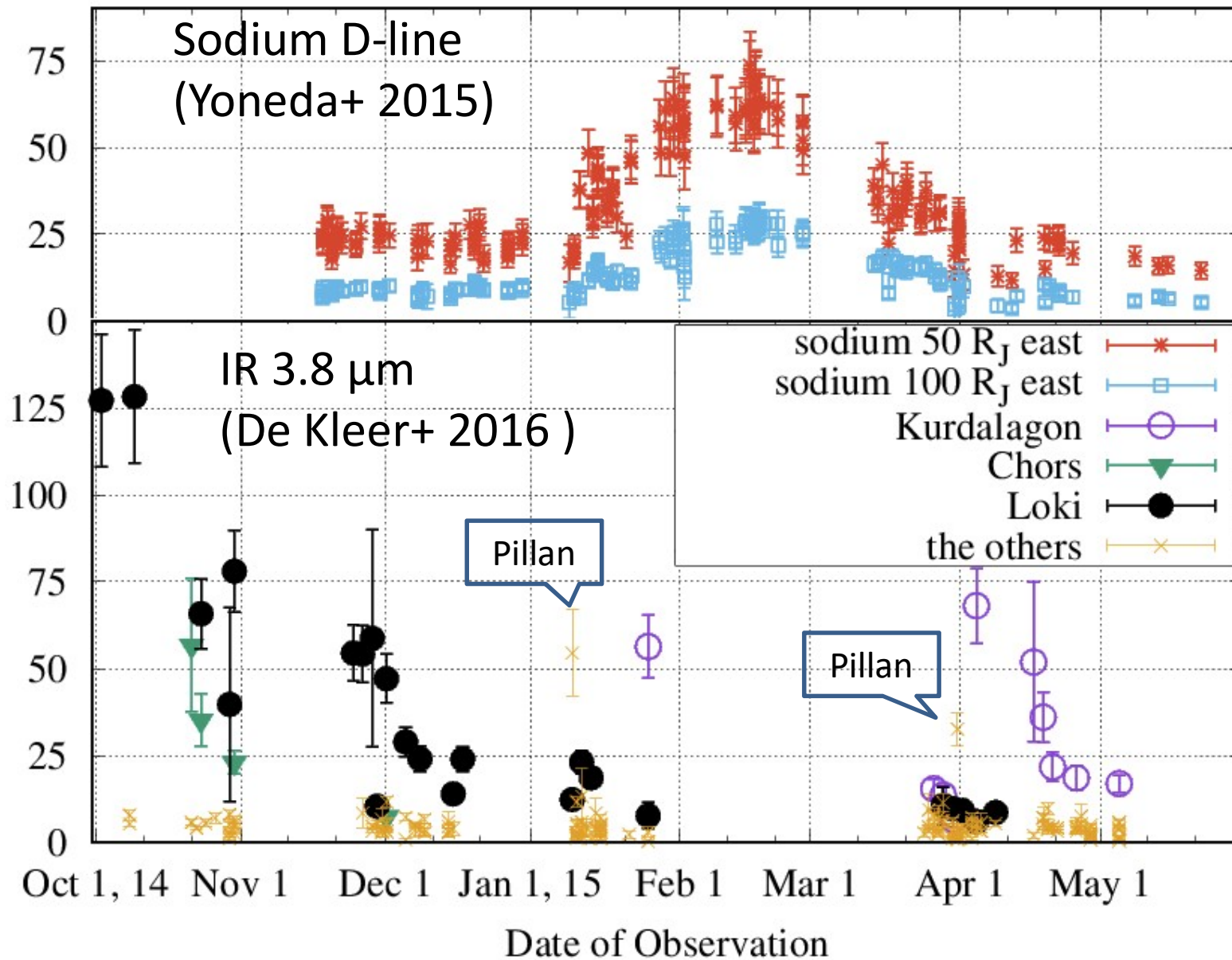


Fig. 12. IR 3.8  $\mu\text{m}$  images of Io by de Kleer + 2016.

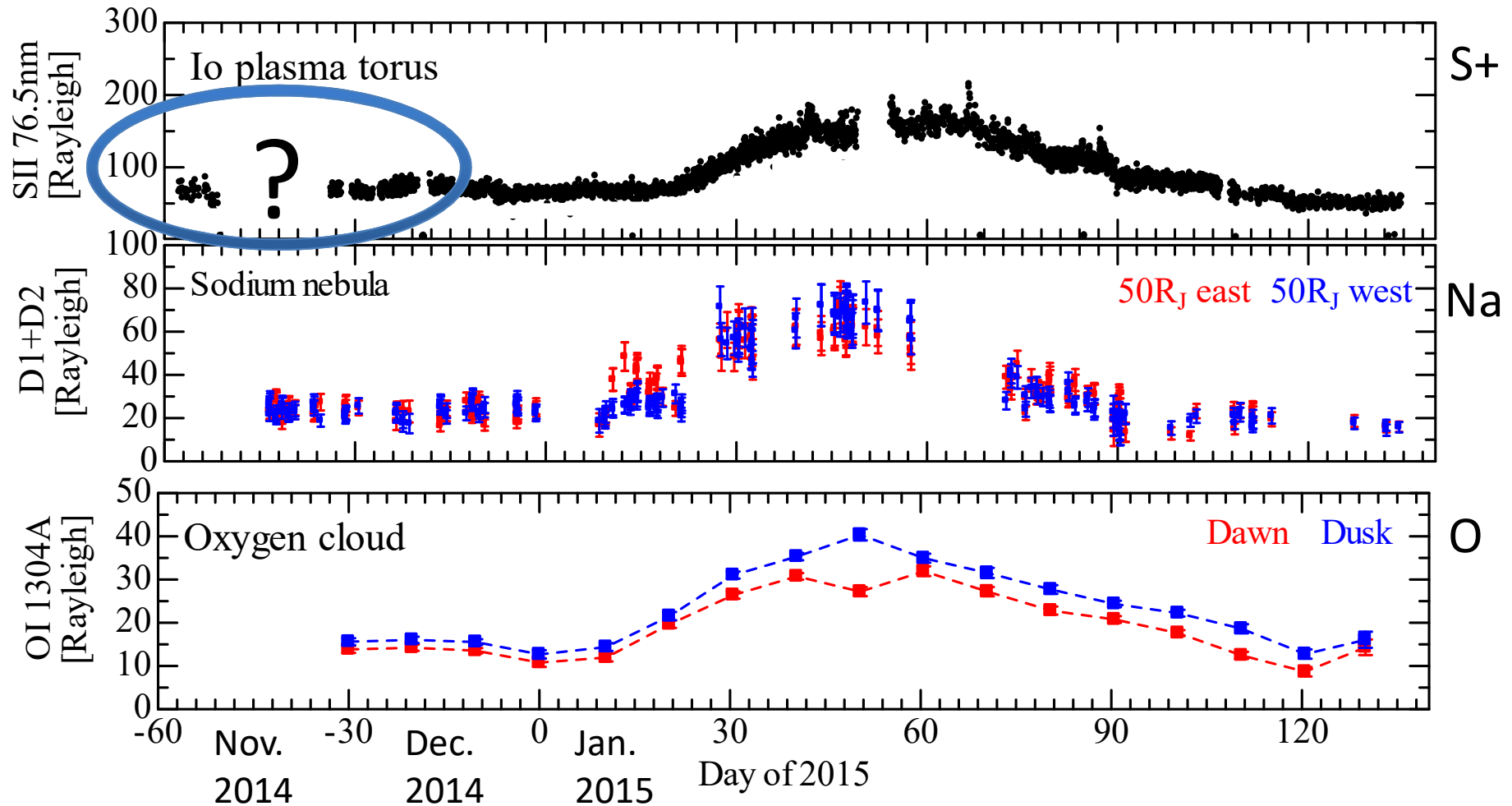
Radiance (GW/ $\mu\text{m}/\text{str}$ ) D1 + D2 brightness (Rayleighs)



2015年に観測された木星ナトリウム雲の増光とKeck-II・Gemini-Nで得られたイオ火山の赤外線観測データ。



Hisaki データ: 昇華点の低いSO<sub>2</sub>起源のIo plasma torus S<sup>+</sup> イオンの発光にもIR観測対応する増光がない。



2015年に観測された木星ナトリウム雲の発光強度と、ひさき衛星で観測された硫黄一価イオン、酸素原子発光強度



100-200 K 程度の温度上昇で、SO<sub>2</sub>は昇華するにも関わらず、2014年の Loki のイベントに対して、トーラスのS<sup>+</sup>イオンの発光は反応していない。なぜ？

Na にも反応がないため、plume型では無かったのだろう。

Plume 型以外にはどんな火山が？

(1) Lava lake : 溶岩湖

(2) Lava flow : 溶岩流

Geological features created by volcanism captured by the Galileo spacecraft.  
(Milazzo et al., 2005).

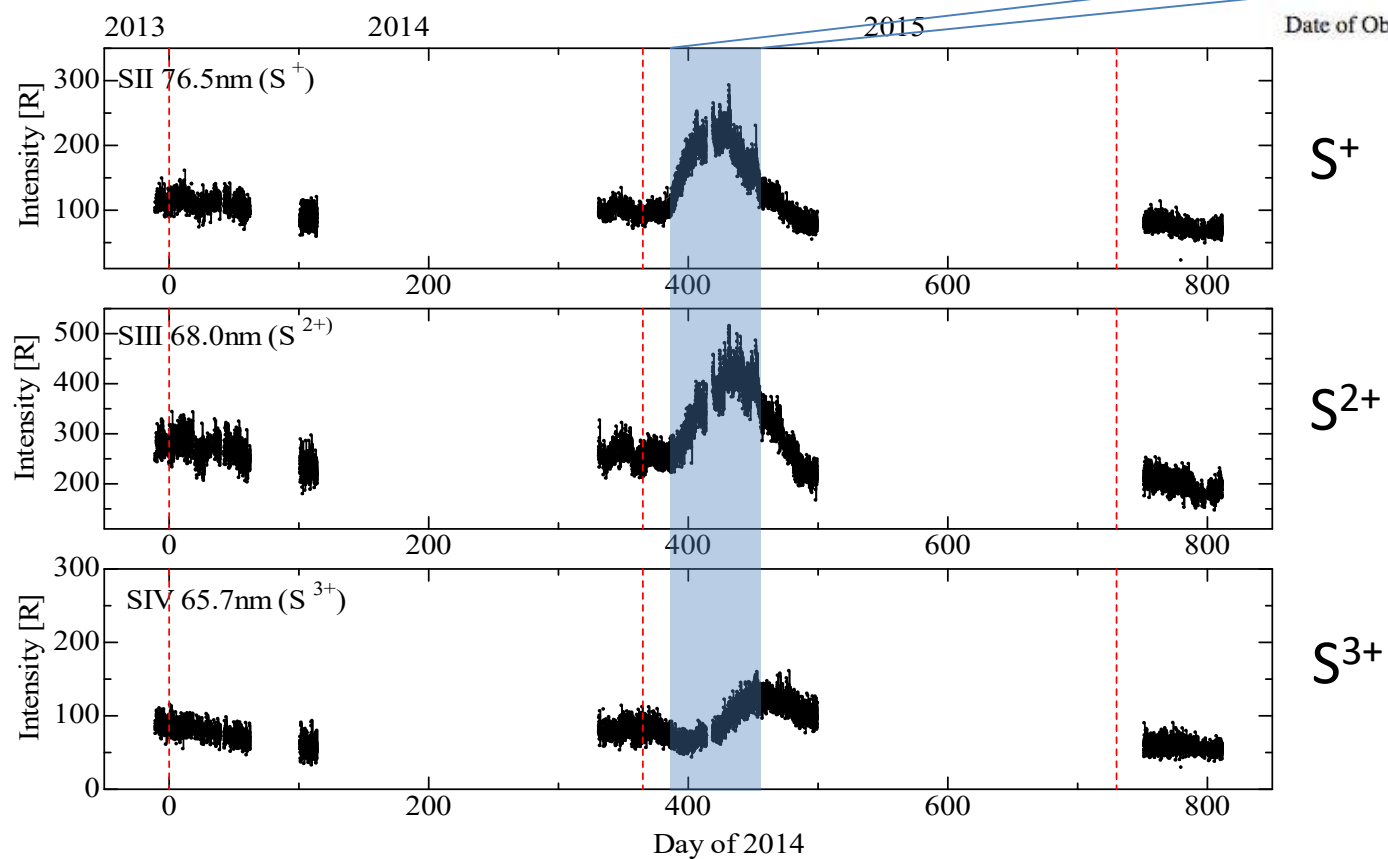
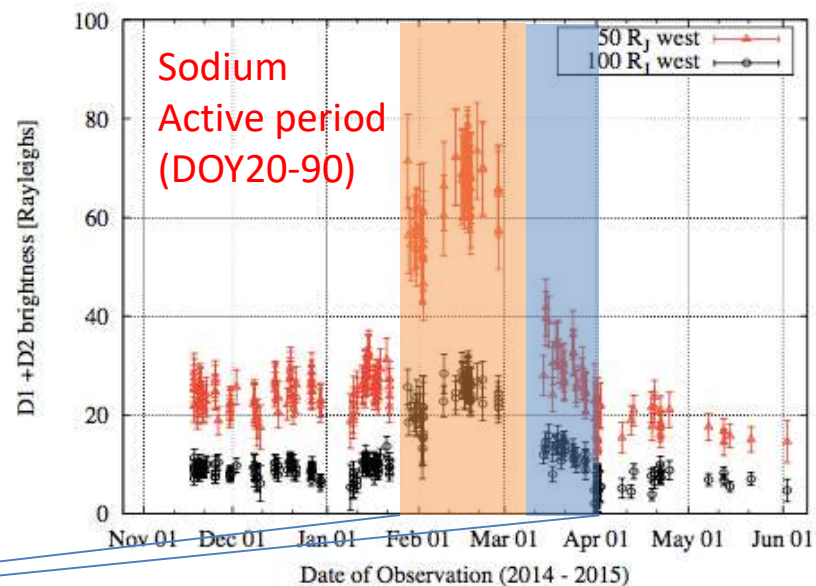


# 解釈

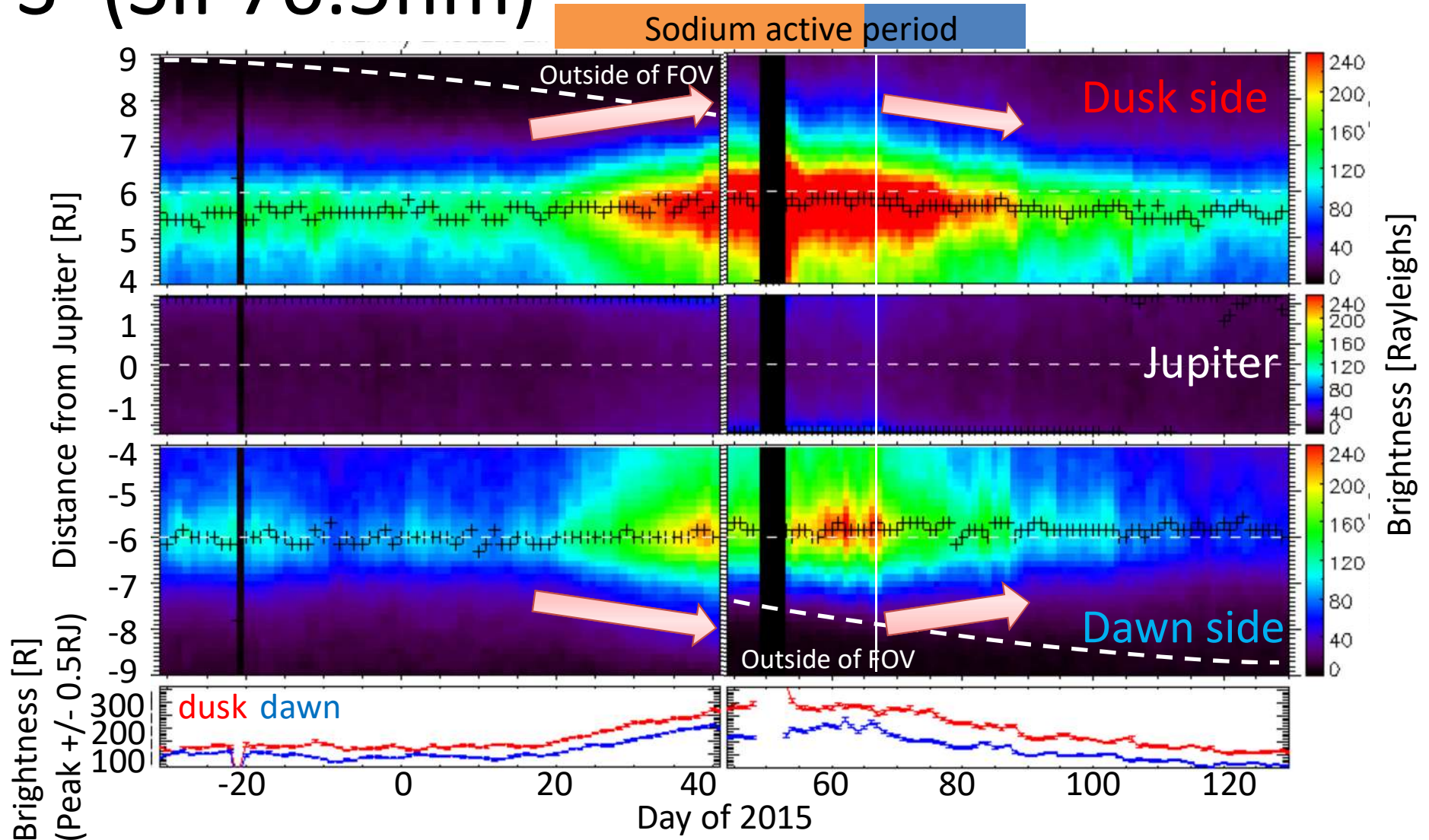
- 大気散逸にはPlumeタイプの火山である必要がある？
  - イオの重力圏外にガスを効率よく散逸するためには、大気の高高度に効率よくガスを供給する必要があるのではないか？
  - LokiはLava-Lakeタイプ (Oct.-Nov. 2014)
  - Kurdaragon, PillanはPlumeタイプ (Jan.-Mar. 2015)
- 2014年秋の火山活動はLava lakeだったのではないか？
  - 赤外線観測: Lokiは2014年10月以前に活動を開始
  - 活動期間中にLava lake溶岩中のSO<sub>2</sub>が枯渇、或いは溶岩がSO<sub>2</sub>を含んでいなかった？
  - 一方、Lava flowだと、表層の堆積したSO<sub>2</sub>を昇華させるため、SO<sub>2</sub>の供給が止みづらいのではないか？
- 課題
  - 観測データの蓄積と、火山タイプとの対応
  - 大気鉛直方向の輸送と大気散逸過程の具体的検討

# 磁気圏への影響

Io plasma torus total brightness  
(Plasma content in the inner magnetosphere)



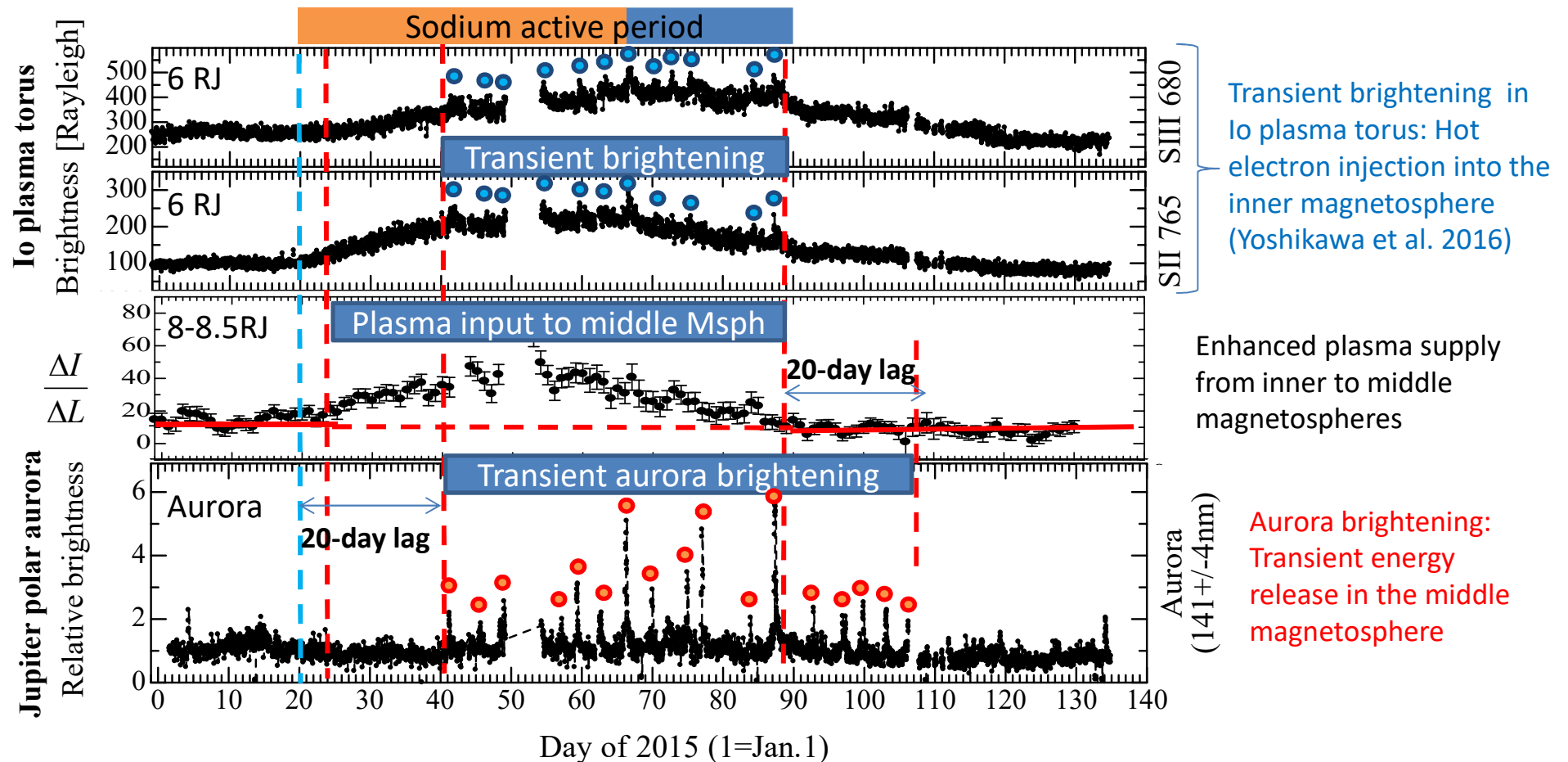
# S<sup>+</sup> (SII 76.5nm)



Primary Source :  $S \rightarrow S^+ + e$   
 (electron impact ionization)  
 Loss : Transport

- S<sup>+</sup> behavior is consistent with the neutral one.
- Systematic displacement of emission peak: no evidence (Contrary to Brown and Boushez [1997])

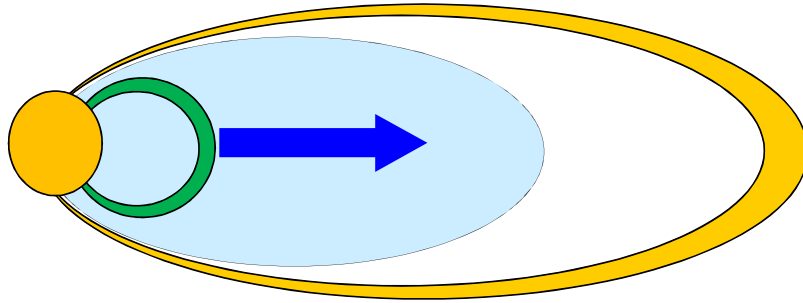
- Io's volcanic active period ~ increasing plasma supply
- DOY 25-90 : Enhanced plasma transport from inner to middle magnetosphere (8.0-8.5RJ)
  - (1) DOY 25-40 : No short-lived brightening aurora and the plasma torus
  - (2) DOY 40-90 : Series of short-lived aurora brightening + plasma torus brightening
 (Yoshikawa et al. 2016)
- DOY 90-110 : No plasma torus brightening + Short-lived aurora brightening





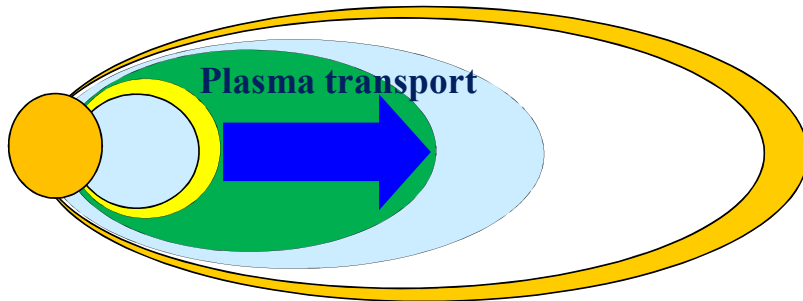
# Interpretation

## (1) Before DOY 20



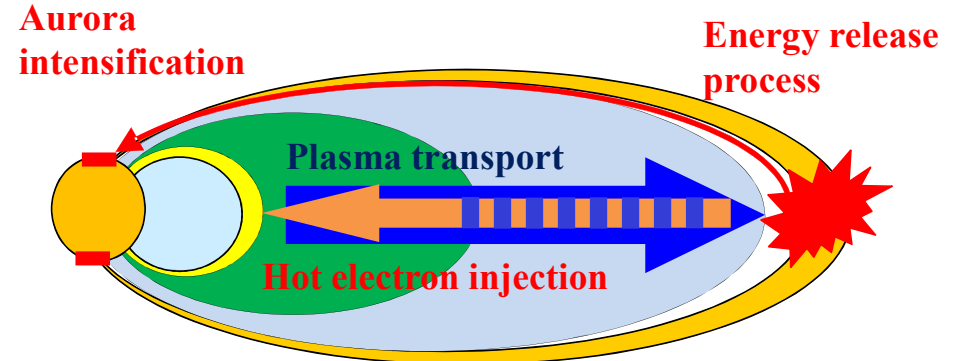
Steady state plasma supply from inner to middle magnetosphere

## (2) DOY 20-40 (Sodium active period)



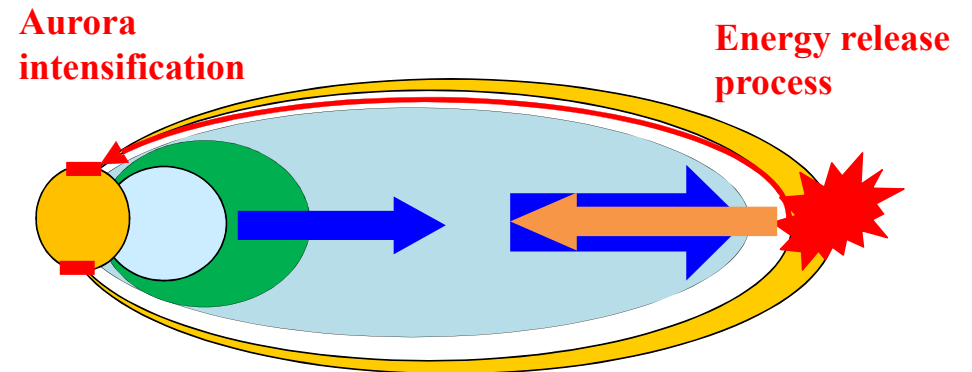
Increased outward plasma transport

## (3) DOY 40-90 (Sodium active period)



Increased outward plasma transport, transient energy release in the middle/outer magnetosphere, and subsequent energy injection into the inner magnetosphere.

## (4) DOY 90-110



Termination of the enhanced plasma transport. Transient energy release still active for ~20 days



# Summary

- ナトリウム観測：イオ大気から木星磁気圏へガス散逸（プラズマ供給）のよい指標
- ナトリウムのみでの観測では、検出できない火山活動がある (Mendillo+, 2004 を否定？)。赤外線・ナトリウムの観測を組み合わせ、イオの火山型(Plume or not)をある程度特定できるのではないか。
- 火山活動による大気散逸量の変動を検出  
大気の状態が火山活動により変化している。
- イオからのプラズマ供給の変化は、木星磁気圏内のエネルギー開放過程に大きな影響を及ぼしている。