

## 木星衛星イオからの大気・内部物質散逸

名古屋大学環境学研究科(学振 PD) 古賀亮一

SO<sub>2</sub>を主成分としたイオの希薄な大気( $(1-10)\times 10^{-9}$  bar)は、高温火口から直接噴出と、表面に堆積したSO<sub>2</sub>の霜が太陽光の加熱による昇華によって生成する。SO<sub>2</sub>は電子衝突や太陽光によってO, S原子に解離し、イオ重力圏から脱出し、最終的に磁気圏でイオン化する。このイオンはイオや他の衛星の地表や大気と衝突し、化学反応を起こす。従って、イオの地表面や大気、イオ軌道周辺の原子・イオンを多波長で観測することは、イオ大気の生成・散逸過程、衛星の表層環境や火山活動、及び木星磁気圏への物質供給への理解につながる。

私たちはこれまでにALMAのアーカイブデータを解析し、木星の陰にイオが入る(木星蝕)前と後のSO<sub>2</sub>大気の空間分布や速度分布を明らかにした(Koga et al., 2020, ApJL)。SO<sub>2</sub>のSpectral mapからイオの北半球高緯度の西側と赤道周辺の東側で発光強度が大きいことがわかった。これらの領域では異なる火山ガスの噴火形態を見ることができた。木星蝕前の北半球高緯度の西側のスペクトル形状は、Main componentとRed-shifted componentの二つのガウス関数の重ね合わせで説明できた。それらの成分の速度差は $\sim 0.6$  km/sで、プルームによって放出されているガス速度の視線方向成分と地表付近からの昇華成分との差を反映していると解釈できる。また、LTE状態の仮定の下、大気回転励起温度を計4本のSO<sub>2</sub>の遷移(Eu/k = 31, 164, 168, 220 K)の積分強度からPopulation diagram (Goldsmith & Langer, 1999)を用いて評価した。北半球高緯度の西側では、木星蝕前と中の観測点に対するフィッティングの精度は悪く、Eu/k = 220 Kの点に熱的に非平衡である成分が見られた。この原因は磁気圏のイオンが外気圏に衝突することによる上層大気の加熱が関係していると考えられる。赤道周辺東側では木星蝕前の大気回転温度は $151 \pm 70$  Kに対し、木星蝕中は $311 \pm 41$  Kに上昇した。また、木星蝕中はすべての遷移の積分強度がフィッティングの信頼区間の範囲に収まり、単一の温度成分で構成されていることがわかった。このことからイオが陰に入った後、昇華大気は消失し、溶岩起源ガスのみが残されたと考えられる。ALMAの観測が行われた日時的前後に、ひさき衛星によるイオプラズマトーラスの紫外線観測(Kita et al., 2019, private communication)、及びナトリウム雲の可視光域の地上観測(Morgenthaler et al., 2019)が行われ、両者の発光強度の増大が確認された。これらの結果は、イオの火山噴火とイオプラズマ・中性トーラスの変動が対応している可能性を示唆している。

この観測では遷移の数が少ないため、詳細な大気鉛直分布を得ることができなかった。イオの表層物質・大気の一連の生成・消失過程の理解を進めるために、ALMAの新規観測プロポーザル提案、及び中間赤外観測と実験室実験を構想中である。

# 木星衛星イオからの大気・ 内部物質散逸

R. Koga, T. Suzuki, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, Y. Hirahara  
ALMA observation of SO<sub>2</sub> gas originating from Io's  
volcanic plume and lava area, ApJL, 2020

まとめ

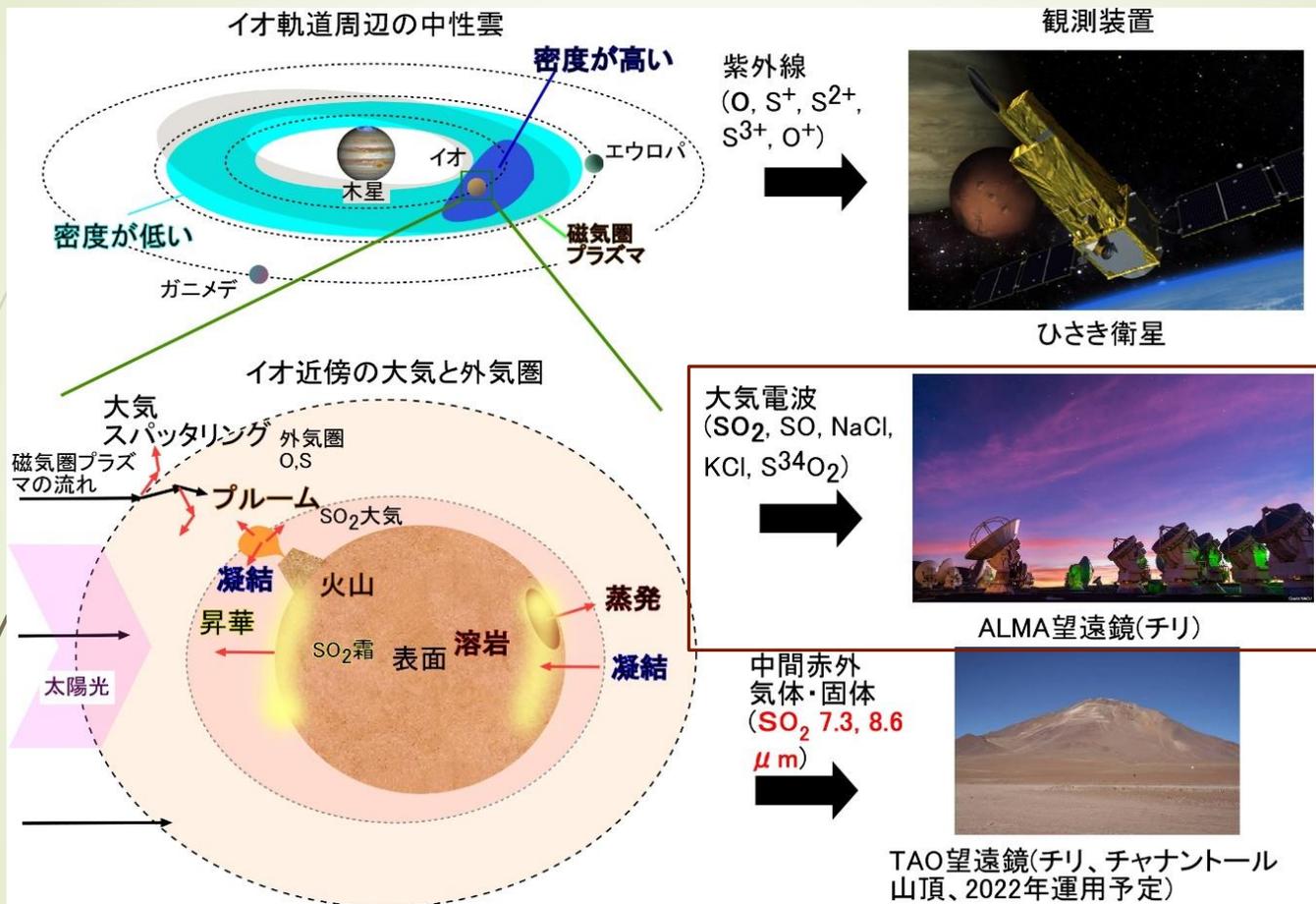
- ▶ イオのSO<sub>2</sub>大気の分布の電波観測
- ▶ 火山プルームによる速度を持った成分を検出できた
- ▶ 溶岩起源の高温のガスを検出した

1

古賀亮一

名古屋大学環境学研究科

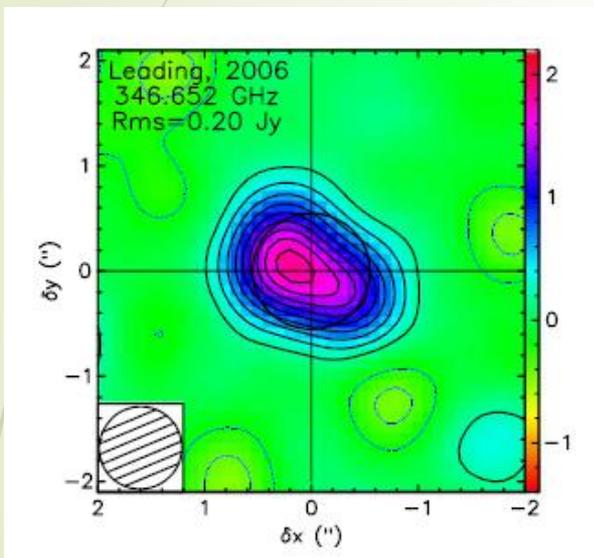
# 木星衛星イオ大気の生成・散逸



イオから散逸した原子・イオンがほかの衛星大気や表面に影響を及ぼしている

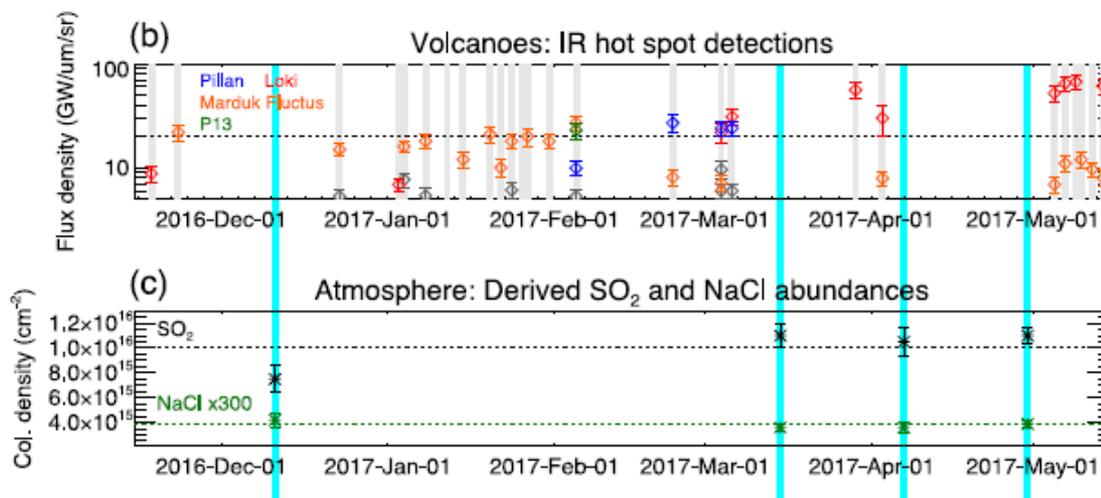
# 過去のイオSO<sub>2</sub>大気のサブミリ波観測

SMA observation  
(Moulet et al., 2010)



Map of SO<sub>2</sub> line emission

IRAM/NOEMA observation  
(Roth et al., 2020)



SO<sub>2</sub>, NaClの長期変動

- これらの観測のビームサイズはイオの視直径程度
- SO<sub>2</sub>の火山噴火ガスの直接検出は困難

## 4

ALMAを用いたイオSO<sub>2</sub>大気観測

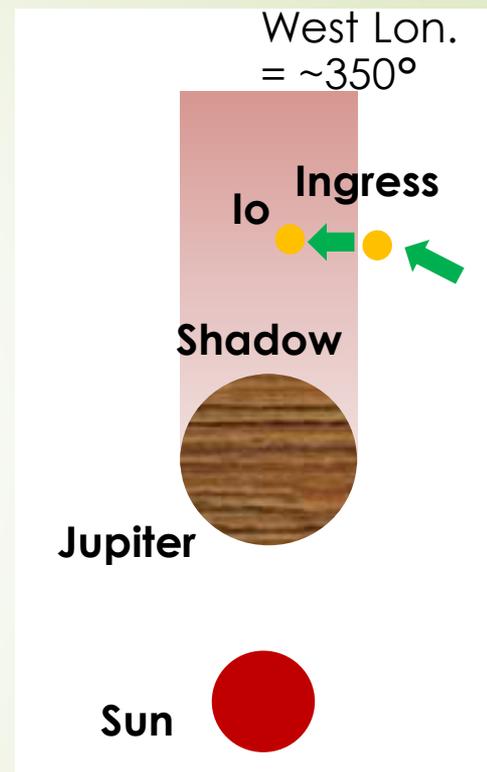
Archive data

- project code: 2017.1.00670.S (PI: Patricio Rojo)

- 観測日 – 2018/3/20
- SO<sub>2</sub>の火山噴火ガスの直接検出
- 表面温度低下に伴うSO<sub>2</sub>の凝縮による大気の変化をみる

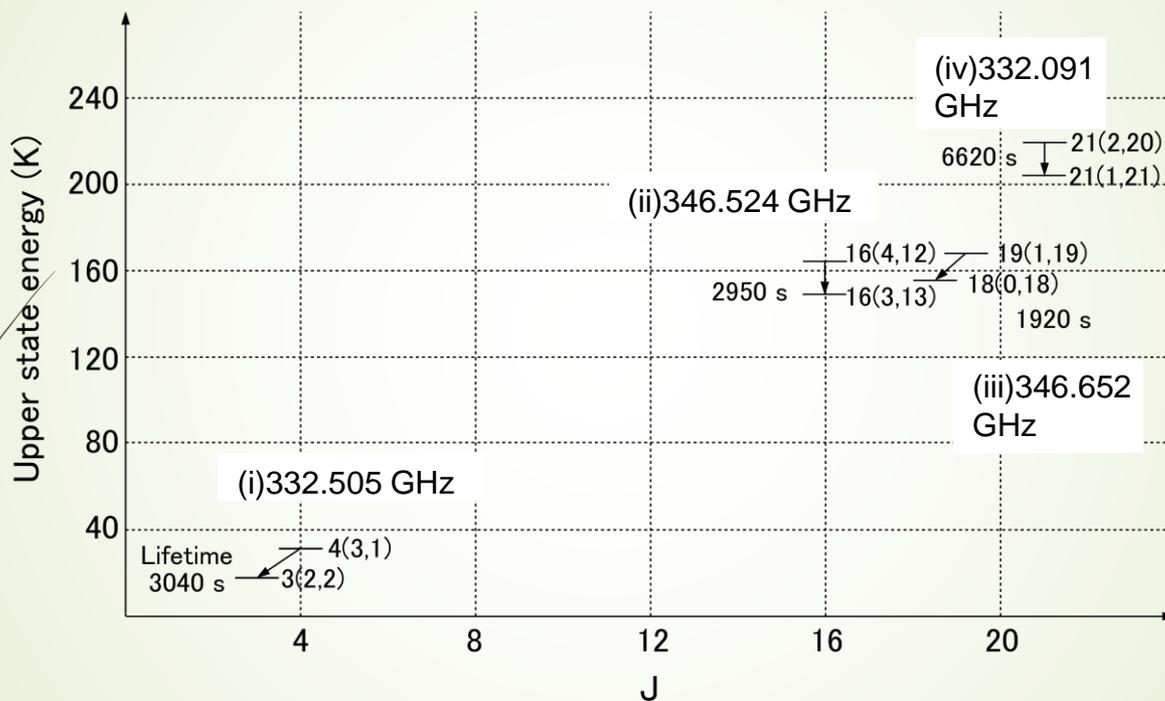
表；観測に用いたデータの期間 (イオ視直径 = ~1")

Period	Time	West longitude	Beam size
Before Ingress	10:02 – 10:09	~349°	0.36" × 0.28"
After Ingress	10:54 – 11:01	~355°	0.41" × 0.28"



図；観測時のイオと木星の位置関係

# 観測されたSO<sub>2</sub>遷移のenergy level diagram



- 様々なupper state energyを持つ遷移が観測された
- これらの遷移の確率(lifetime)は比較的近い値であるため、全ての輝線が検出された
- SO<sub>2</sub>ガスの温度の推定が可能となった

# SO<sub>2</sub>輝線強度の分布

6

Integrated Intensity ( $M_0$ )

$$M_0 = \Delta v \sum I_i$$

$\Delta v$ ; width of the pixel along the moment axis  
 $I_i, v_i$ ; Intensity and velocity at each channel

ビームサイズ  
 (~0.3", 白い楕円)  
 がイオディスク  
 (~1.0")より小さい  
 ➤ イオ大気を空間  
 分解できた

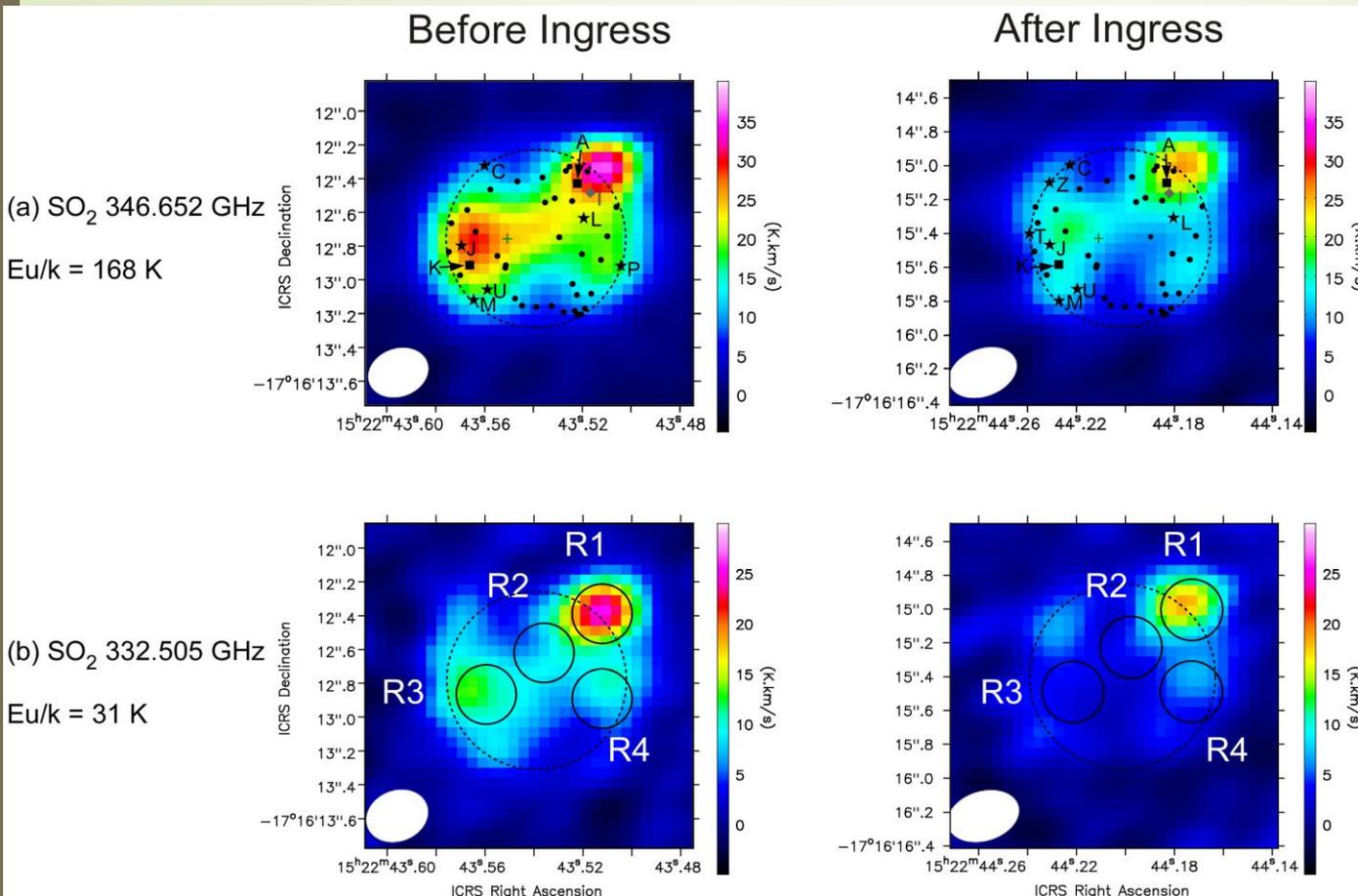


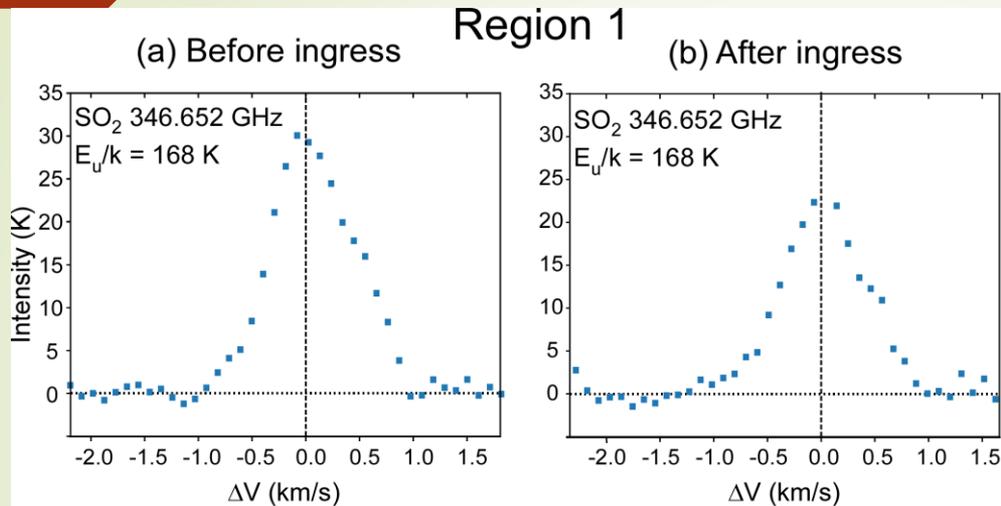
Fig. Integrated intensity maps of Io (Positions of volcanoes are referred from Cantrall et al., 2018)

- 火山が密集しているRegion 1とRegion 3に注目して、スペクトルプロファイルや温度の評価を出す

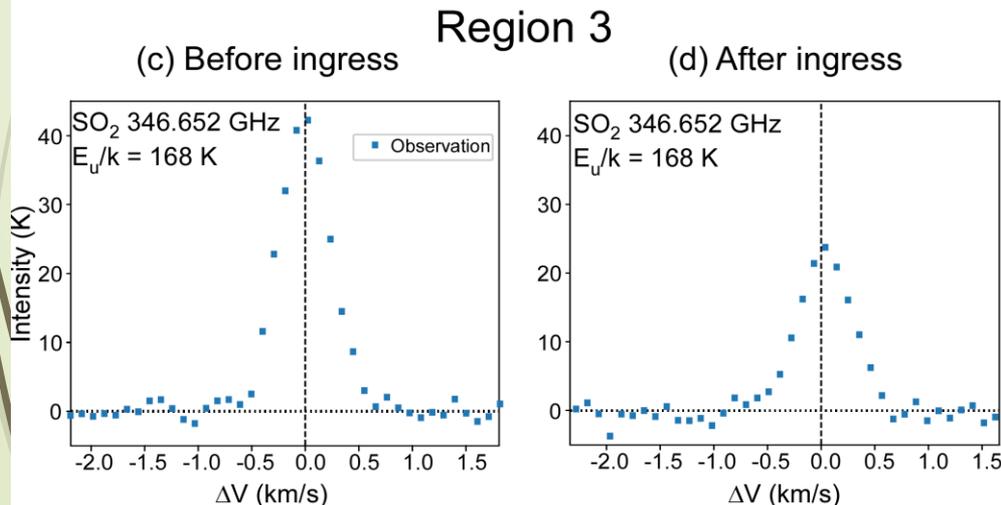
# スペクトルプロファイル

7

- 4本の輝線の内、一番発光強度が大きい



- Region 1のspectral lineshapeは左右非対称である
- 二つのガウス関数の重ね合わせでフィッティングできないか？

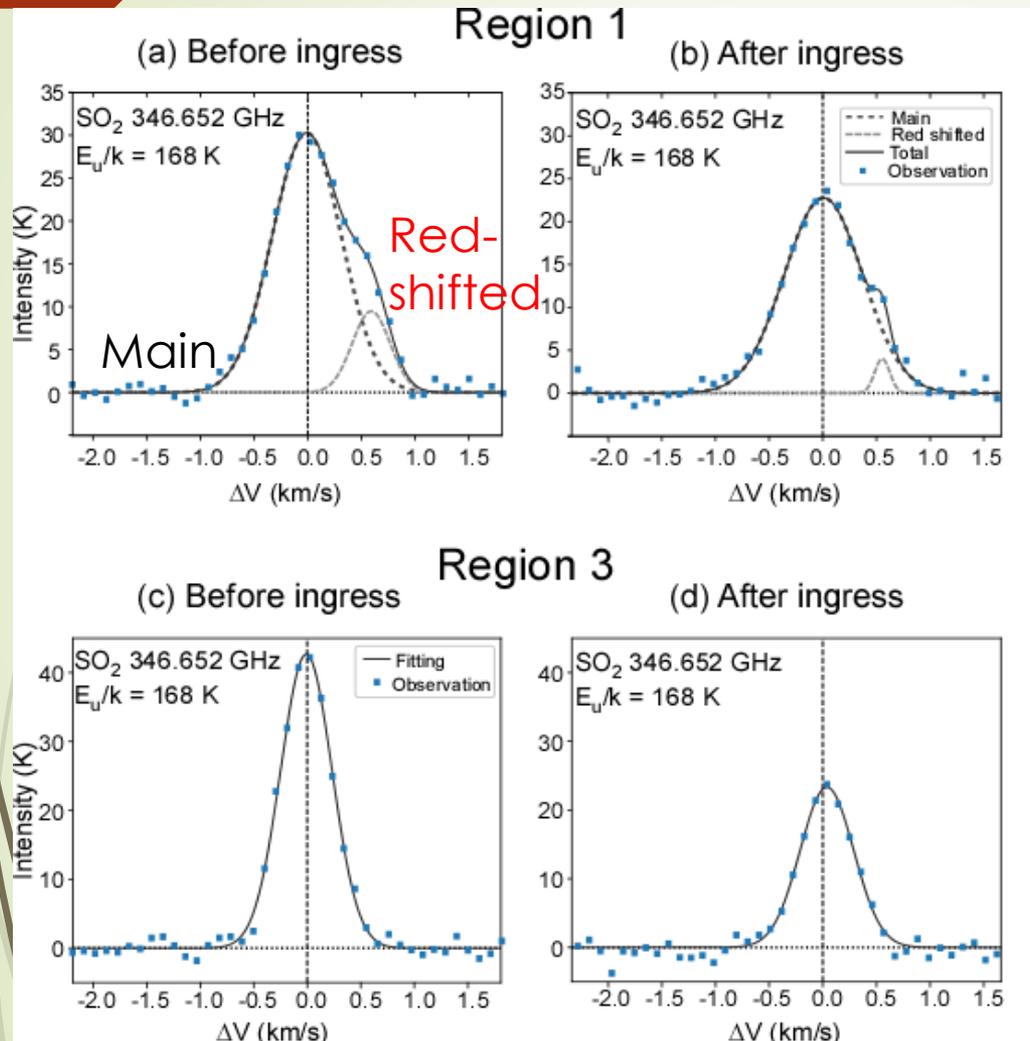


- Region 3のspectral lineshapeは左右対称に近い
- ガウスフィットできそう

Horizontal axis; the offset ( $\Delta V$ ) from the line of sight velocity of Io relative to the observation site

# スペクトルプロファイル

8



- 二つのガウス関数の重ね合わせできれいにフィッティングできた
- ほかの三つの遷移のスペクトルプロファイルも同様にフィッティングできた

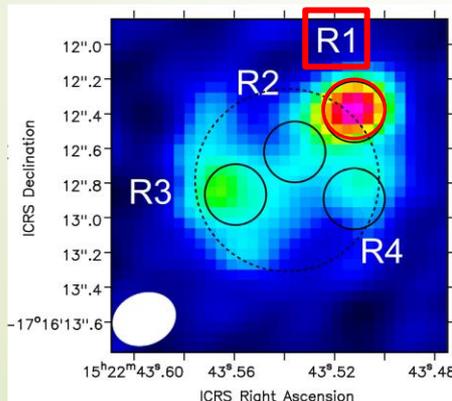
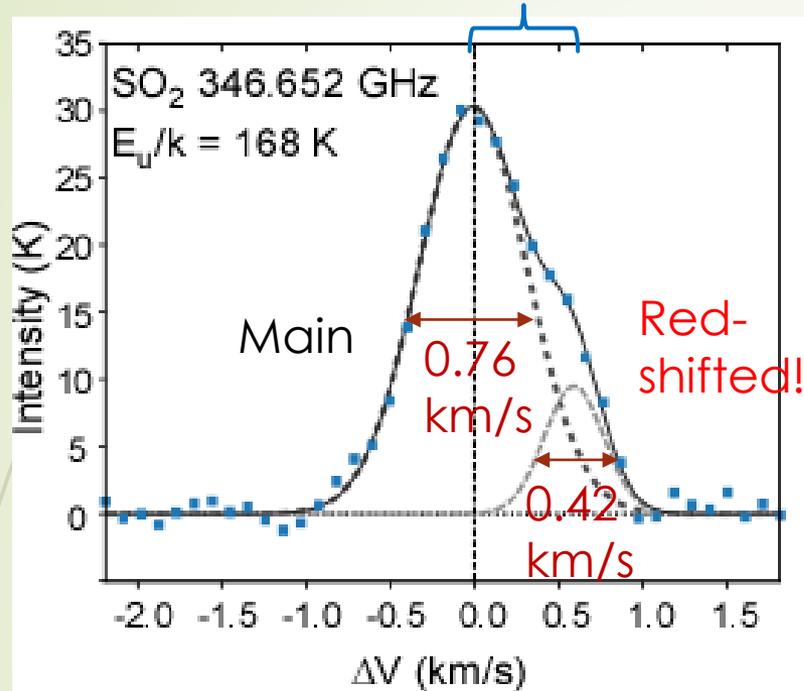
Horizontal axis; the offset ( $\Delta V$ ) from the line of sight velocity of Io relative to the observation site

# スペクトルプロファイルの成因

9

Region 1 Before ingress

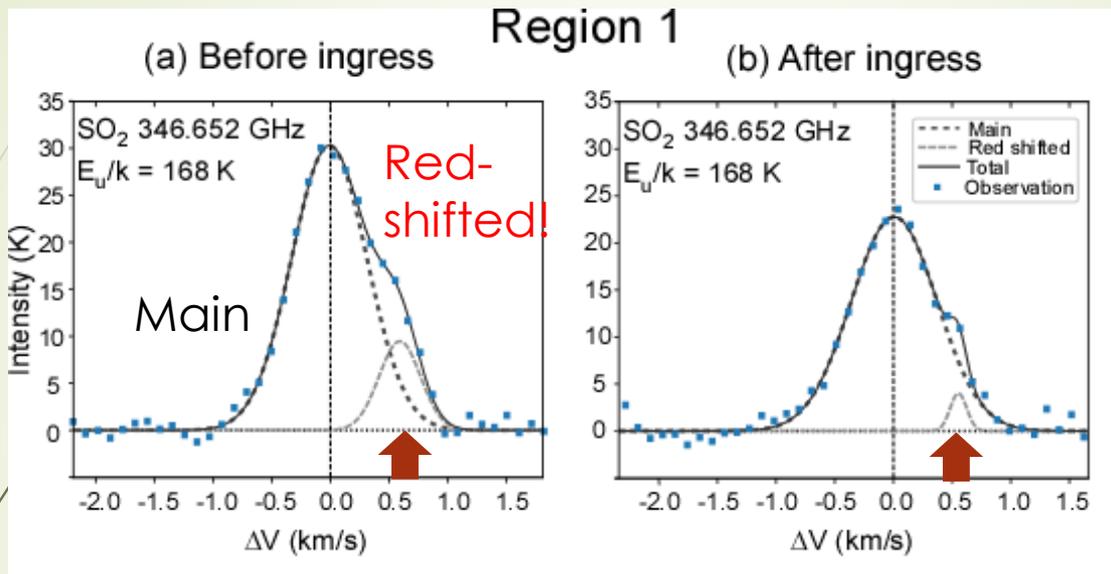
$\Delta V$  difference = 0.60 km/s



- 熱運動が線幅を決めていると仮定すると、 $T=600$  K (main成分),  $190$  K (red-shifted成分)と異常に大きい温度が出てしまう
  - イオ大気は非常に希薄(=10 nbar)
  - ガウスフィットの線幅は大気温度だけでなく、**乱流を含む運動の情報も含んでいる**
- 観測された $\Delta V$  difference は先行研究のダストプルームの飛行速度(0.4-0.7 km/s, Spencer et al., 2007)の範囲内
  - Region 1のred-shifted成分の成因は**プルームによる視線方向のSO<sub>2</sub>ガスの流れ**である

# スペクトルプロファイルの成因

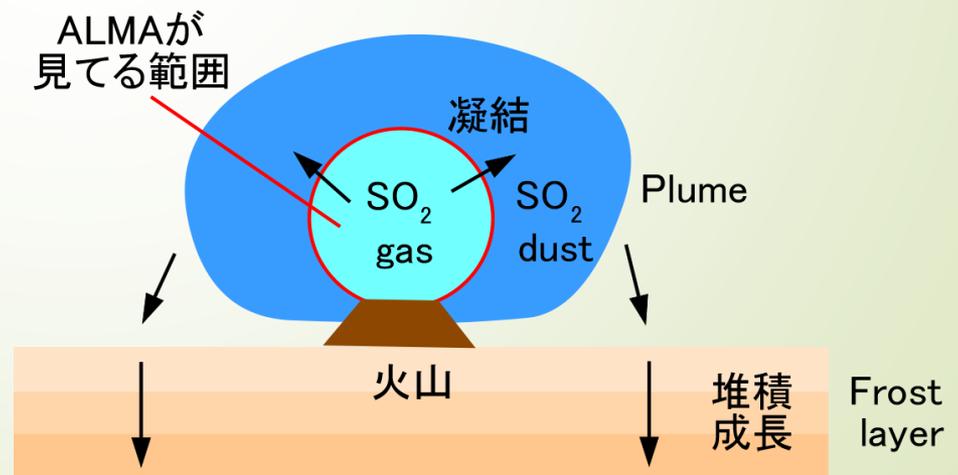
10



SO<sub>2</sub> gas (気体)のみしか反映されていない

Red-shifted componentの著しい減少

- 気温低下に伴いプルームガスの凝結のタイムスケールが早まった??
- この仮説の検証には赤外による吸収の観測が必要



# Population diagramによる温度の評価

11

If SO<sub>2</sub> gas is under LTE condition, the upper state column density per statistical weight ( $N_u/g_u$ ) can be represented as

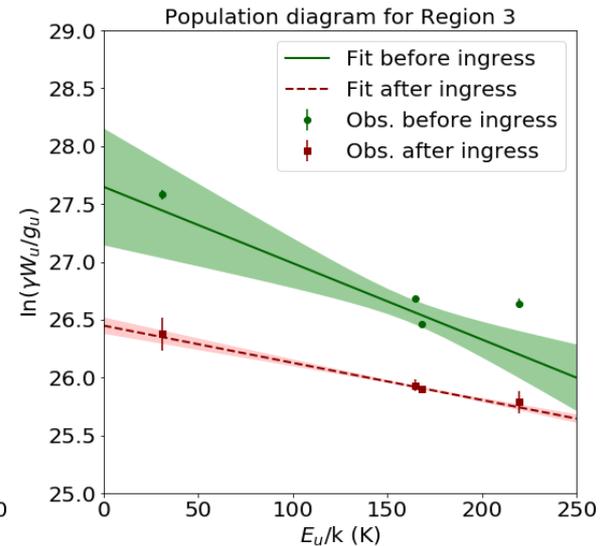
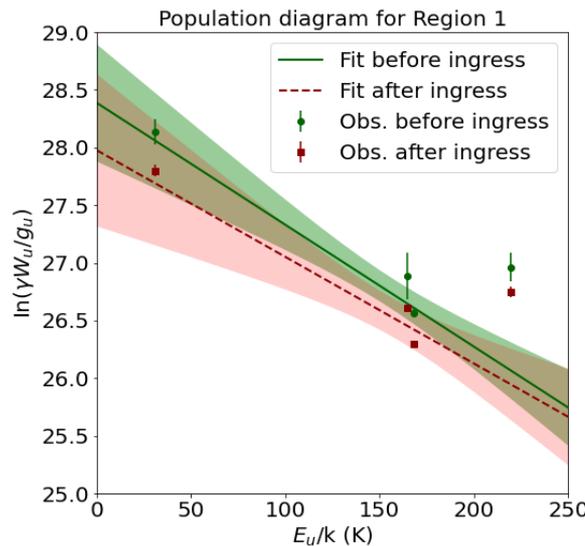
$$\ln \frac{N_u}{g_u} = \ln \frac{\gamma_u W}{g_u} = \ln \frac{N}{Z} - \frac{E_u}{kT}$$

$$y = b - ax$$

LTEを仮定した場合の  
 $N$ ; Column density  
 $T$ ; Rotational temperature  
 が計算できる

y-axis; logarithm of  
 $N_{\text{upper}}$  per statistical  
 weight

$$\ln \frac{N_u}{g_u}$$

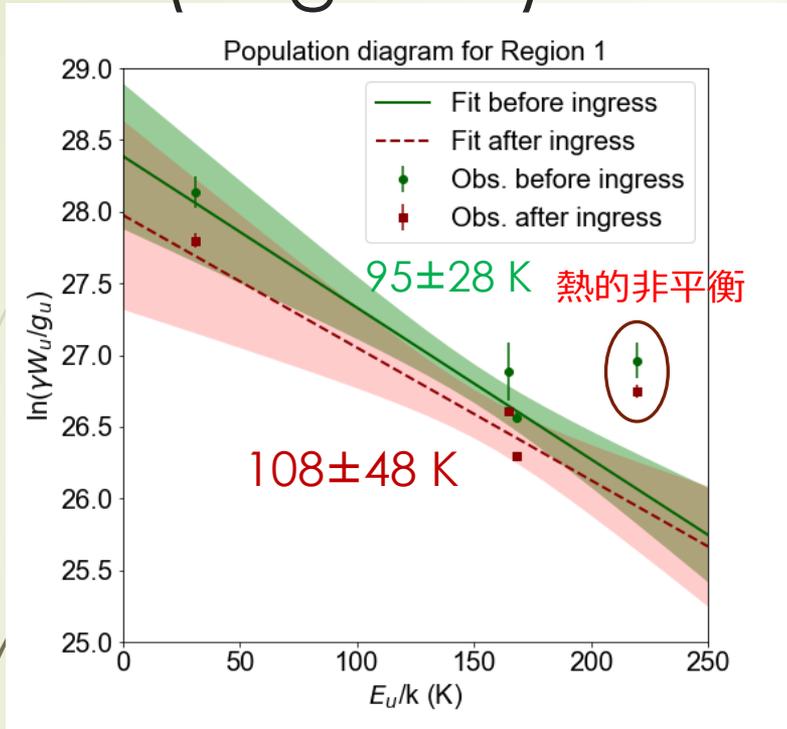


x-axis; upper state energy (K)

$$\frac{E_u}{k}$$

# ブルームによる上層大気への供給 (Region 1)

12



- 大気圏外からのプラズマの衝突によって、熱的に非平衡なガスが上層大気中存在

Fig. Model calculation of the vertical temperature (Wong and Smyth, 2000)

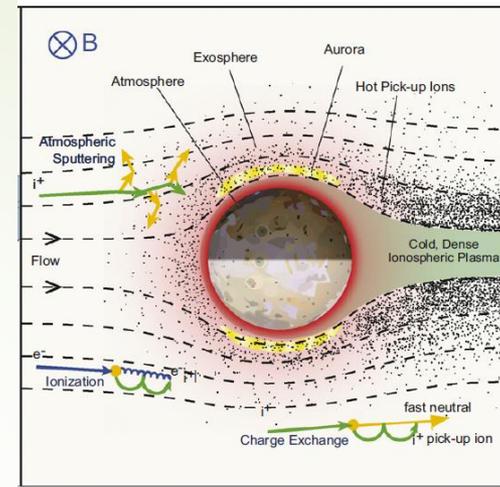
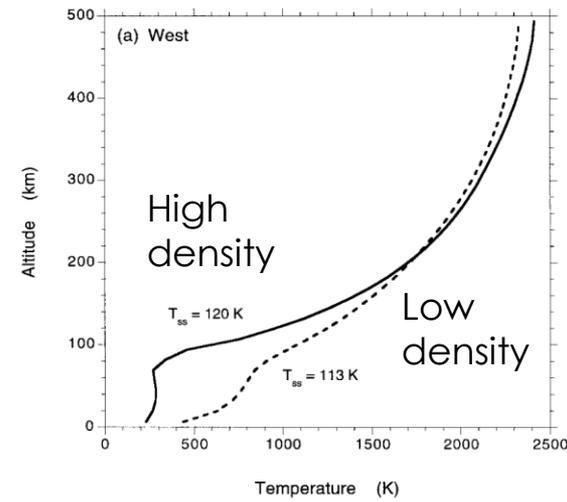
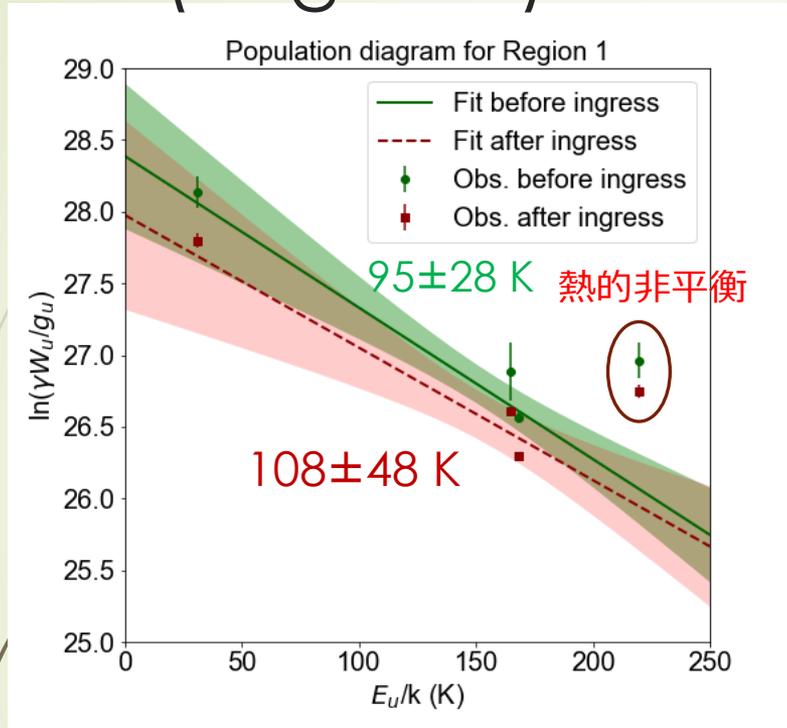


Fig. The interaction of magnetospheric plasma with Io's atmosphere (Bagenal, 2007)

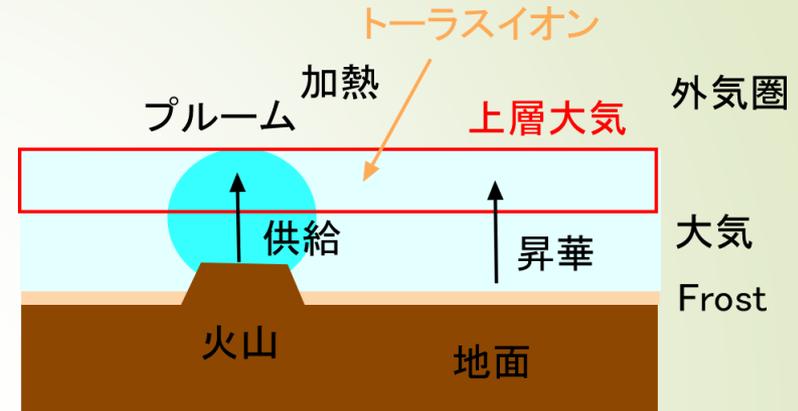


# プルームによる上層大気への供給 (Region 1)

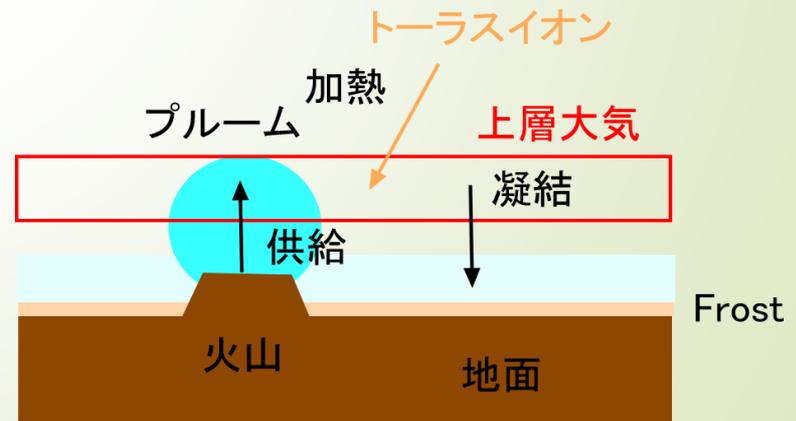


- 木星蝕後は昇華大気が崩壊するが、プルームによる直接供給によって上層大気が維持されていると考えられる

## 木星蝕前



## 木星蝕後



# Region 3のガスの起源

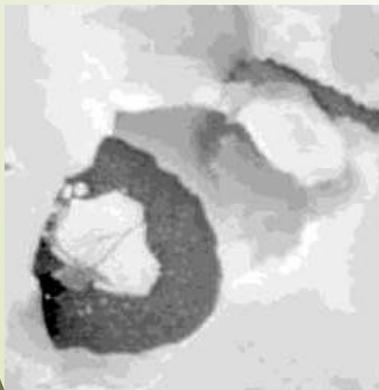
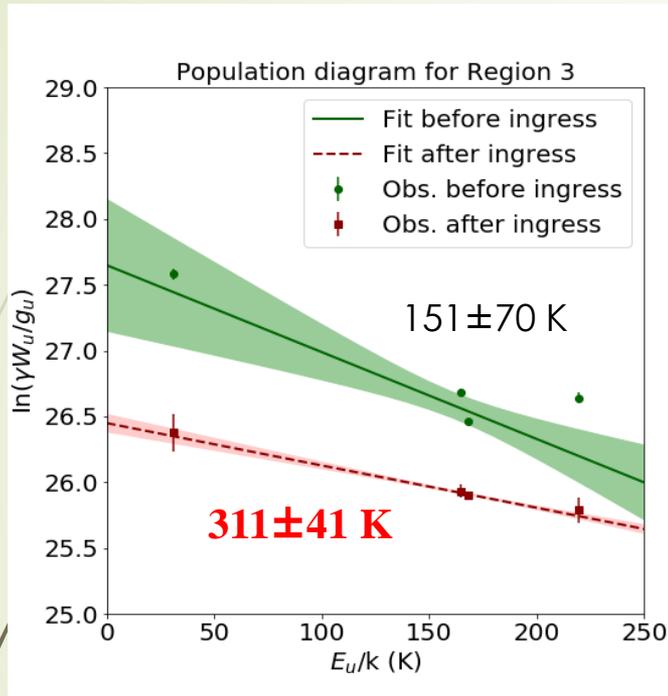


Fig. Voyager observation of Io lava lake

- 観測されたすべての輝線の誤差範囲内にフィッティングラインが収まった
- 木星蝕後、Region 3では**地表付近の単一温度成分**が取り出せた
- 木星蝕後の回転温度  $T_{rot} = 311 \pm 41$  Kは先行研究のサブミリ波大気観測結果 (130-180 K, Moullet et al., 2008)より明らかに大きい
- この温度はイオの溶岩の温度 (ex.  $\sim 260 \pm 95$  K, Williams et al., 2004) に近い
- 溶岩の噴出に伴って発生したガスであると思われる

# ALMA観測時期周辺のIPTとNa雲の変動

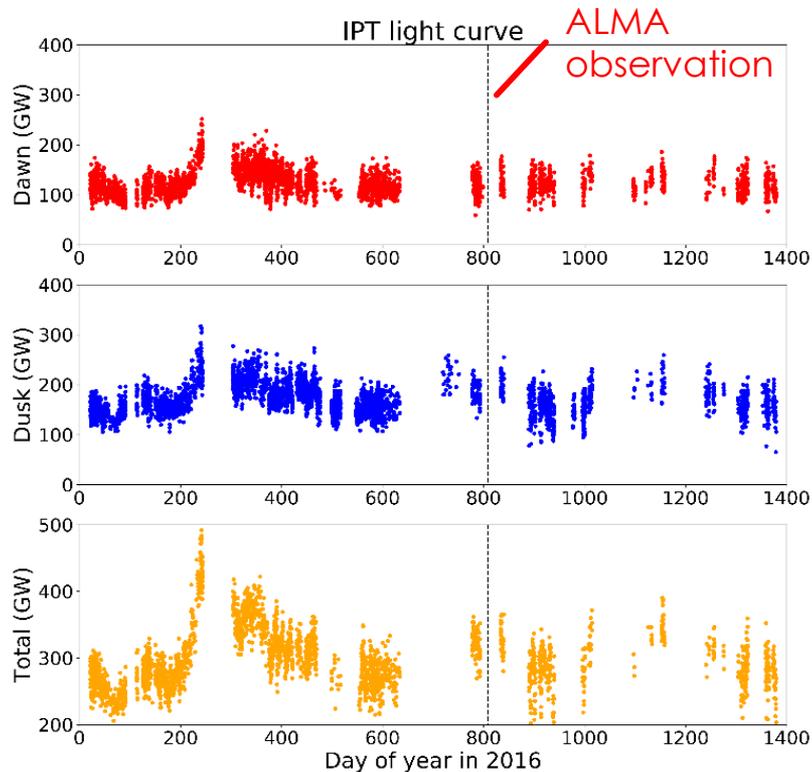


Figure. IPT light curve on the dawn and dusk sides in 2017-2018 (Kita et al., 2019, private communication)

- イオプラズマ・中性トーラスと火山噴火が対応しているのではないか？

同時期中性酸素トーラスは観測できなかった

## Na

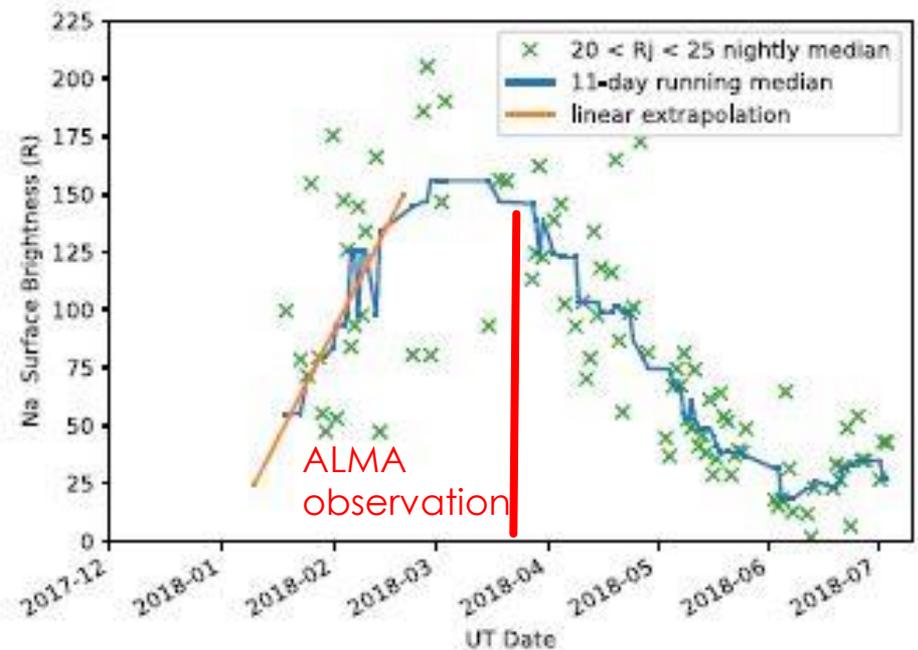
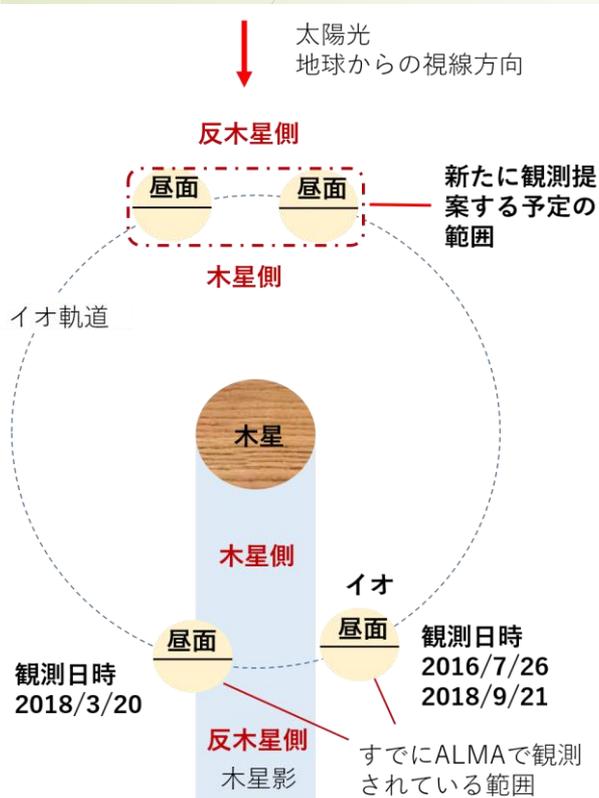


Figure. Time variations of sodium nebula emission at 20-25  $R_J$  from Jupiter (Morgenthaler et al., 2019)

# イオ大気の生成・散逸に関する将来計画

イオは潮汐固定されている



ALMA観測提案予定のイオ反木星側の面

- ▶ イオの気相と固相の両方のSO<sub>2</sub>のTAO望遠鏡を用いた中間赤外観測と実験室実験を構想中
- ▶ ALMA新規観測プロポーザルを2021年4月下旬に提出予定
  - ▶ イオ大気の鉛直分布と火山の有無の関係性を理解する
- ▶ ひさき中性トーラスの観測とモデルの比較
  - ▶ イオ散逸量・場所と火山噴火の関係性(火口周辺で散逸が卓越している?)

# まとめ

- ▶ ALMA観測によって、火山活動が活発と思われる、イオの東側北半球の中緯度と西側赤道周辺で電波強度が強い領域が見つかった
- ▶ 前者では、二つの速度成分を検出され、Red-shiftedな成分は火山のプルームからの噴出ガスの内視線方向に流れているものと考えられる
- ▶ 後者では、木星蝕後の $\text{SO}_2$ の回転励起温度が通常(100-150 K)より高く(311 K)、溶岩起源のガスがあると考えられる
- ▶ 表層物質・大気・散逸ガスの一連の生成・消失過程、および火山活動に伴うそれらの変動を理解するには、赤外、サブミリ波、紫外線等の多波長観測が必要である