

The 21st Symposium on Planetary Sciences (SPS 2020) in Tohoku University, Sendai

発表タイトル: Evolution of planetary water -From the viewpoint of ion outflow from the ionosphere to the magnetosphere- 太陽系探査における水進化研究(電磁圏・大気散逸視点)

発表者(所属): Yasunobu Ogawa 小川泰信(国立極地研究所)

要旨: 惑星大気の散逸プロセスは、磁化惑星と非磁化惑星で大きく異なる。地球のような磁化惑星では、磁気圏の存在により、広範囲の太陽風エネルギーを極域超高層大気に供給し、加熱された電離大気の流出を引き起こすことが推定されている。水進化に関係して、地球超高層大気内の水素については、地表の水蒸気、水素分子、メタンから供給される。上部電離圏高度で生じる水素原子と酸素イオンとの電荷交換反応を経て、水素イオンが宇宙空間に定常的に流出する。一方、地球超高層大気内の酸素イオンは、主に酸素分子から供給される。極風(低温での流出)の他に、電離圏カusp/オーロラ帯内での加熱や加速、下部磁気圏でのプラズマ波動による加熱や加速、磁気圏カusp/マントル領域での遠心力による加速を受けて、最終的に宇宙空間に流出する。この酸素イオンの流出量については、これまでの人工衛星観測結果等から、太陽活動度や地磁気活動度による影響が大きいと言える。

$H^+, He^+, O^+, O^{2+}, N_2^+, NO^+, O_2^+$

Evolution of planetary water -From the viewpoint of ion outflow from the ionosphere to the magnetosphere-

# 太陽系探査における水進化研究 (電磁圏・大気散逸視点)



Yasunobu Ogawa  
小川泰信  
(国立極地研究所)

The 21st Symposium on Planetary Sciences (SPS 2020)  
in Tohoku University, Sendai

# 目次

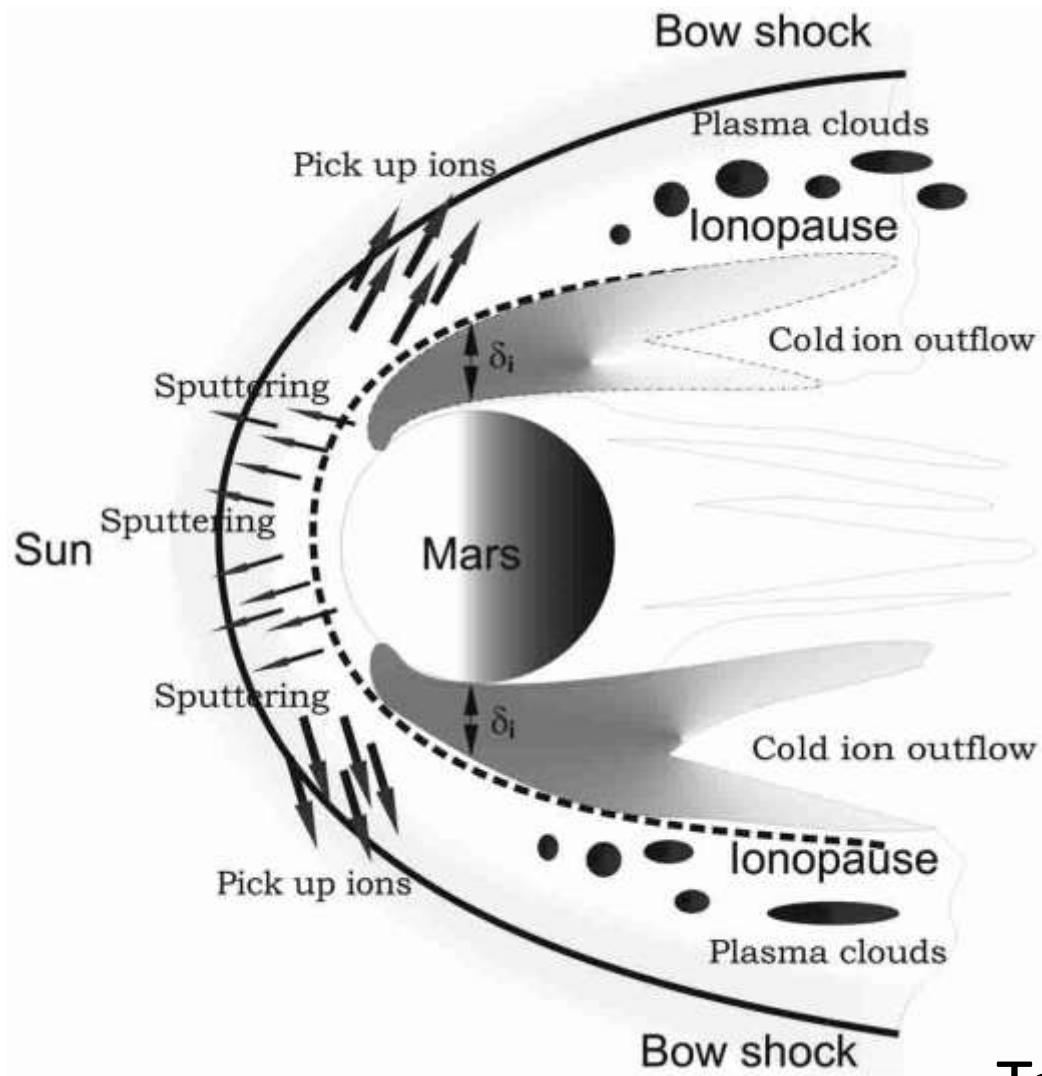
1. 磁化惑星と非磁化惑星の大気散逸
2. 地球電磁圏における水素の散逸
3. 地球電磁圏における酸素の散逸
4. まとめ

# 現在の惑星大気散逸

	地球	金星	火星
重力脱出速度	11.4 km/s	10.2 km/s	4.8 km/s
大気主成分	$N_2, O_2, O$	$CO_2$	$CO_2$
電離圏イオンの主成分	$O^+, NO^+, O_2^+$	$O^+, O_2^+, CO_2^+$	$O^+, O_2^+, CO_2^+$
流出する主なイオン種	$H^+, He^+, O^+, \dots$	$H^+, O^+, O_2^+, CO_2^+$	$H^+, O^+, O_2^+, CO_2^+$
推定される流出総量	$\sim 10^{25-26} \text{ s}^{-1}$	$\sim 10^{25-26} \text{ s}^{-1}$	$\sim 10^{23-25} \text{ s}^{-1}$

流出量については、太陽活動・太陽擾乱への依存性が組成によって大きく異なる。

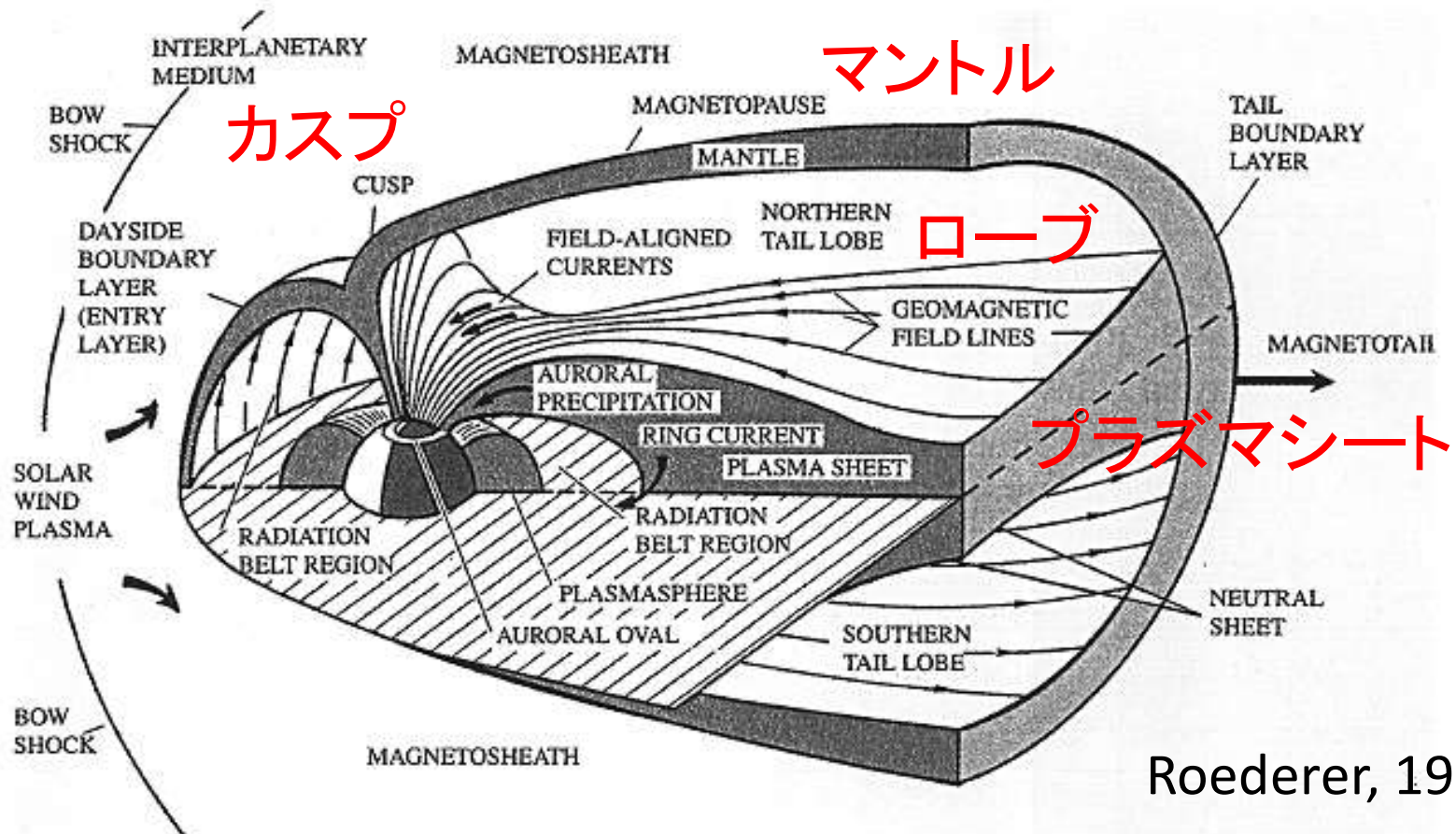
# 火星の場合



太陽風が上層大気  
と直接相互作用

Terada et al., 2009

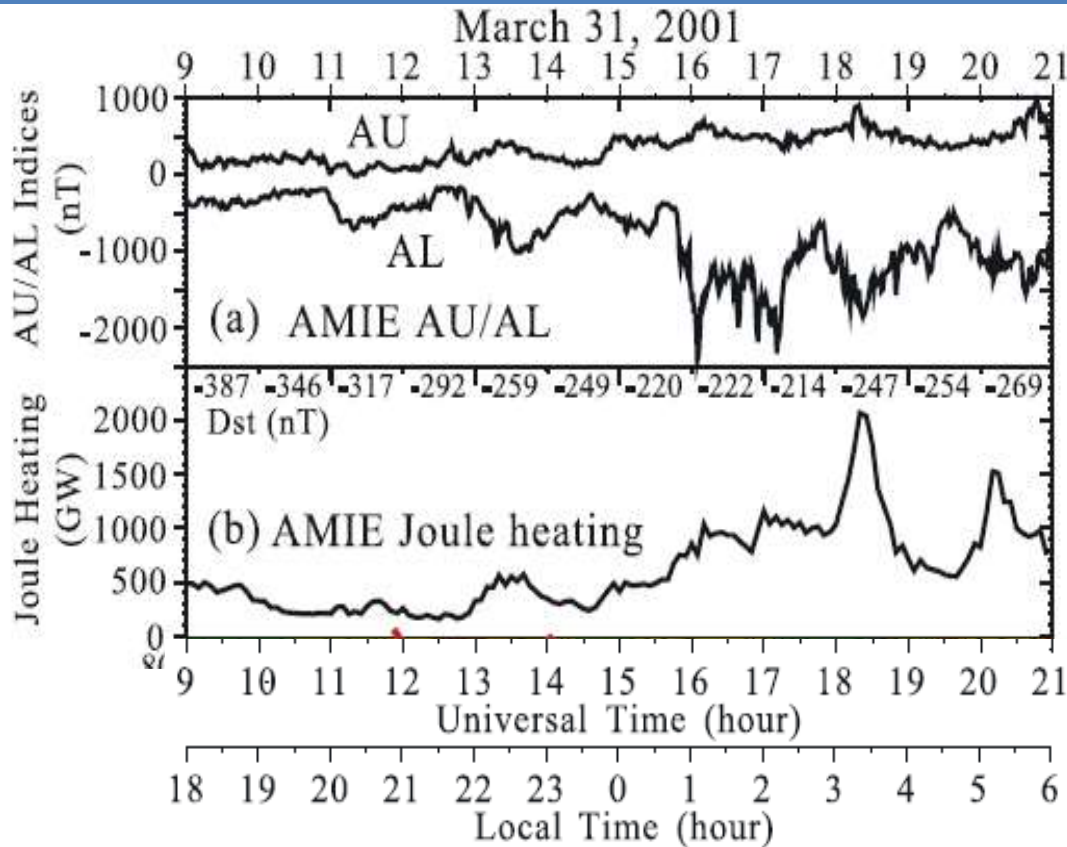
# 地球の場合



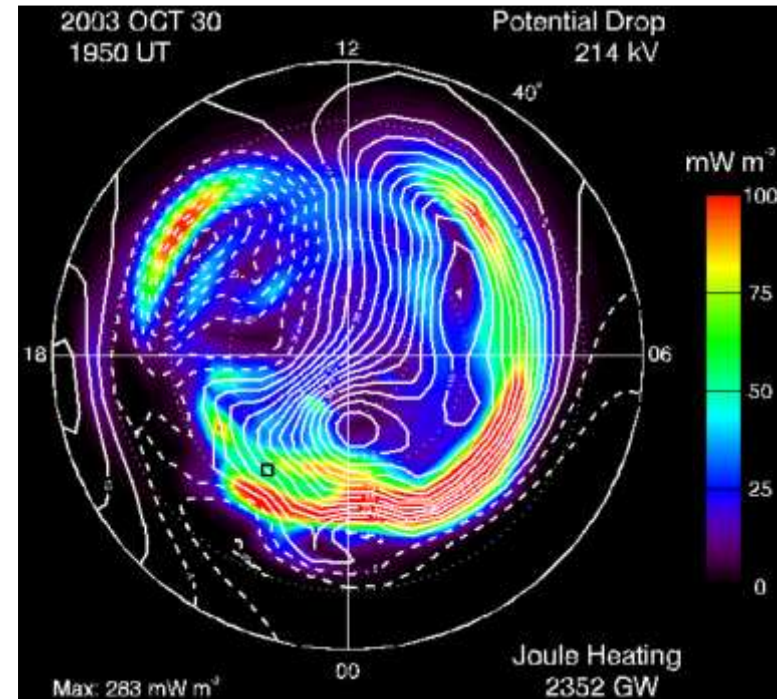
- 大気は地球固有磁場によって守られている？
- 磁気圏 (~10 Re@地球前面) の存在により、広範囲の太陽風エネルギーを極域超高層大気に供給し、加熱された電離大気の流出を引き起こす？



# 磁気嵐時の磁気圏から極域電離圏へのエネルギーインプット



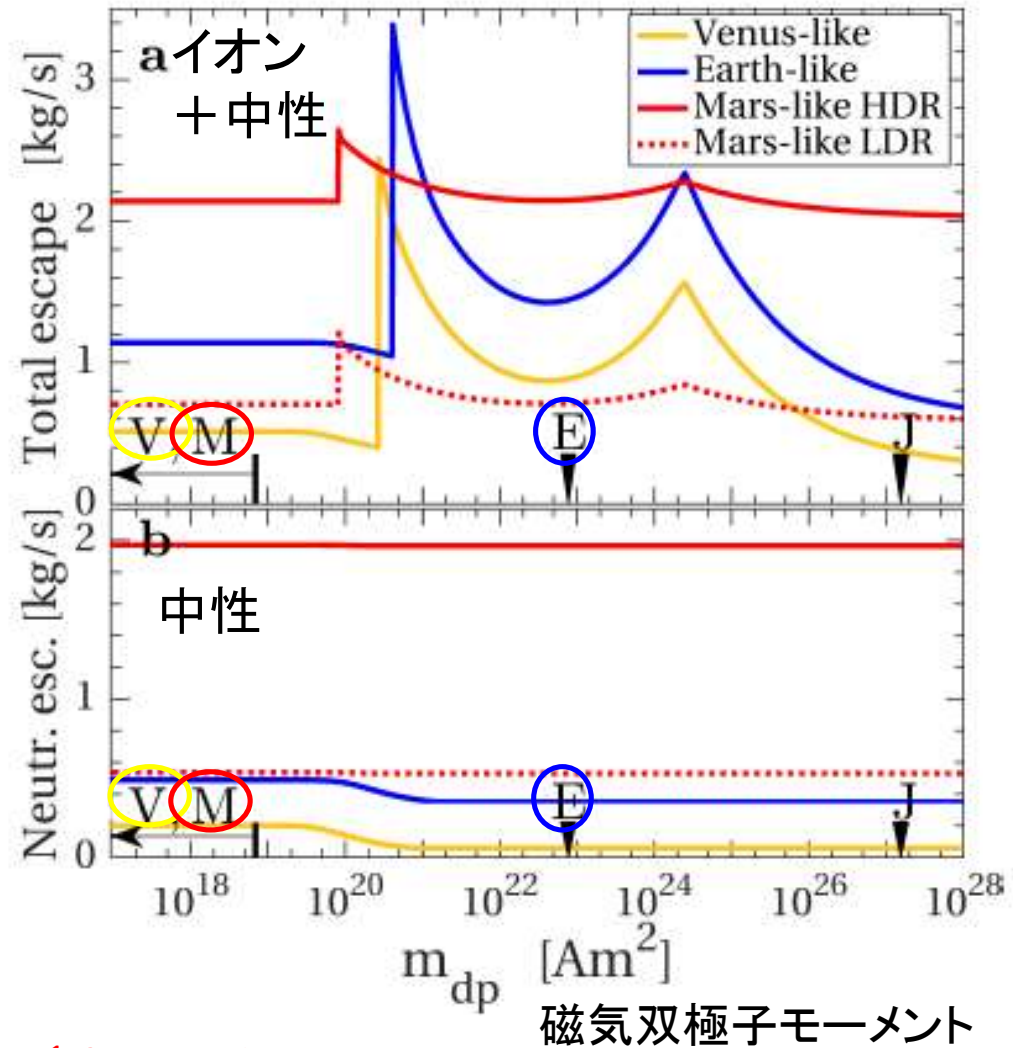
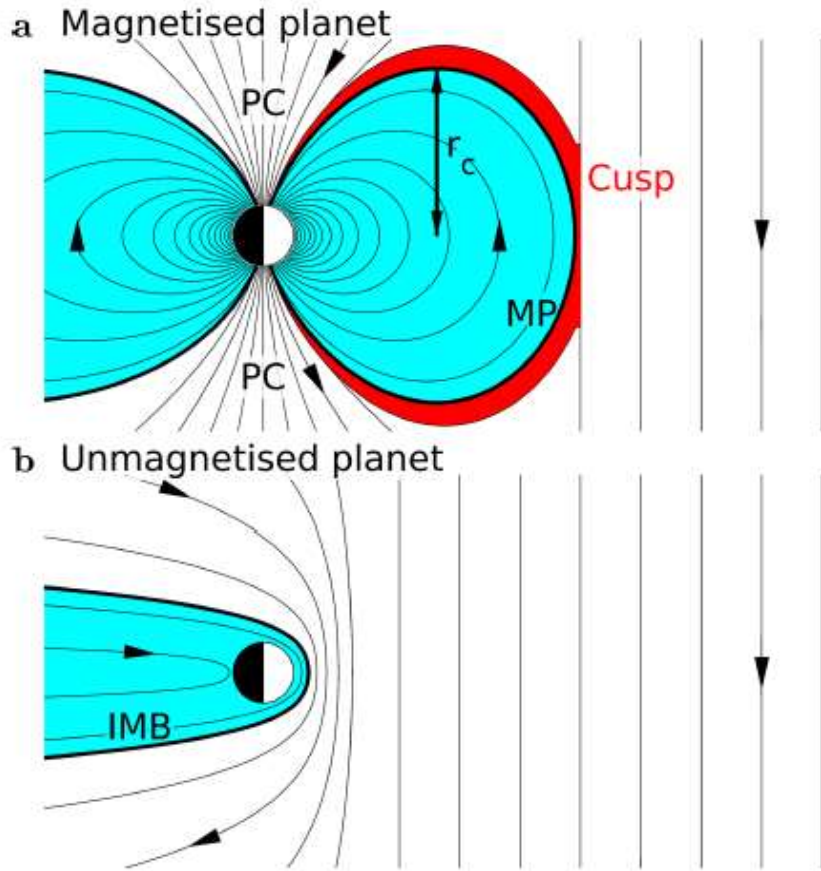
Shiokawa et al., 2007



Rosenqvist et al., 2006

極域におけるジュール加熱(計~2000GW)の他に、粒子加熱や各種プラズマ波動生成を引き起こす。

# 磁化惑星と非磁化惑星の大気流出量の推定

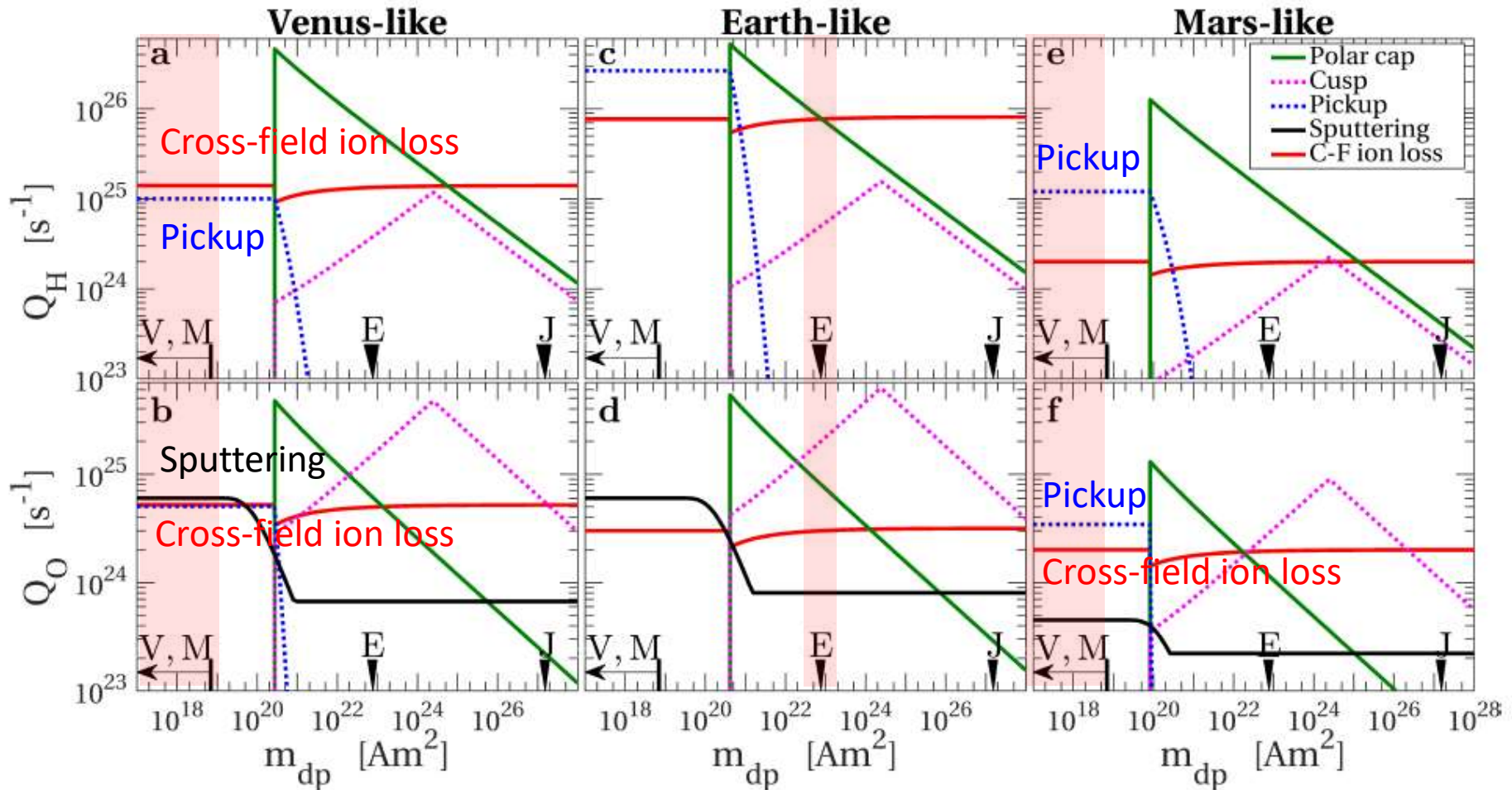


- パラメータ化されたモデルを使用。
- 流出率:  $\sim 0.5 \text{ kg s}^{-1}$  for Venus,  $1.4 \text{ kg s}^{-1}$  for Earth, and between  $0.7 \text{ kg s}^{-1}$  and  $2.1 \text{ kg s}^{-1}$  for Mars.

Gunell et al., A&A, 2018



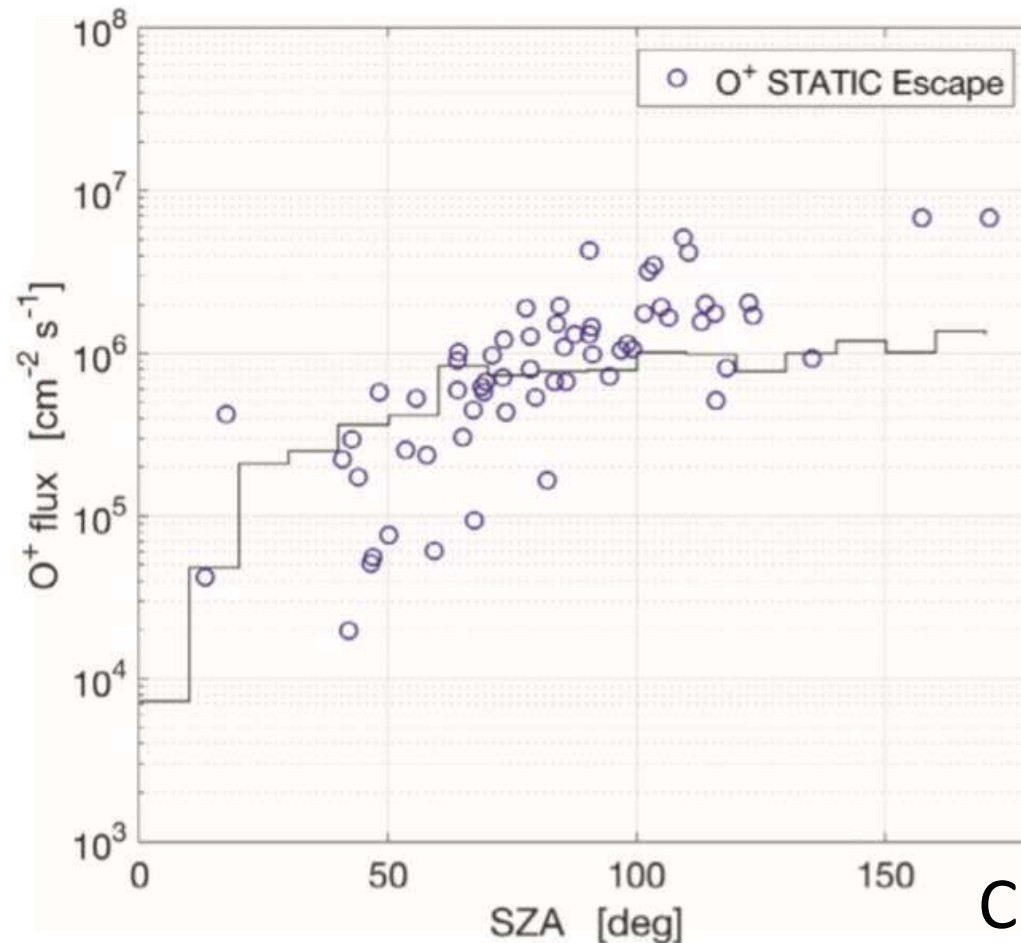
# 各径路/プロセスによる流出量の違い



Gunell et al., A&A, 2018

- 地球の水素は、Polar cap での流出と Cross-field ion loss が多い。
- 地球の酸素は、Polar cap と Cusp での流出が多い。

# 太陽風擾乱時の火星酸素イオンの流出量

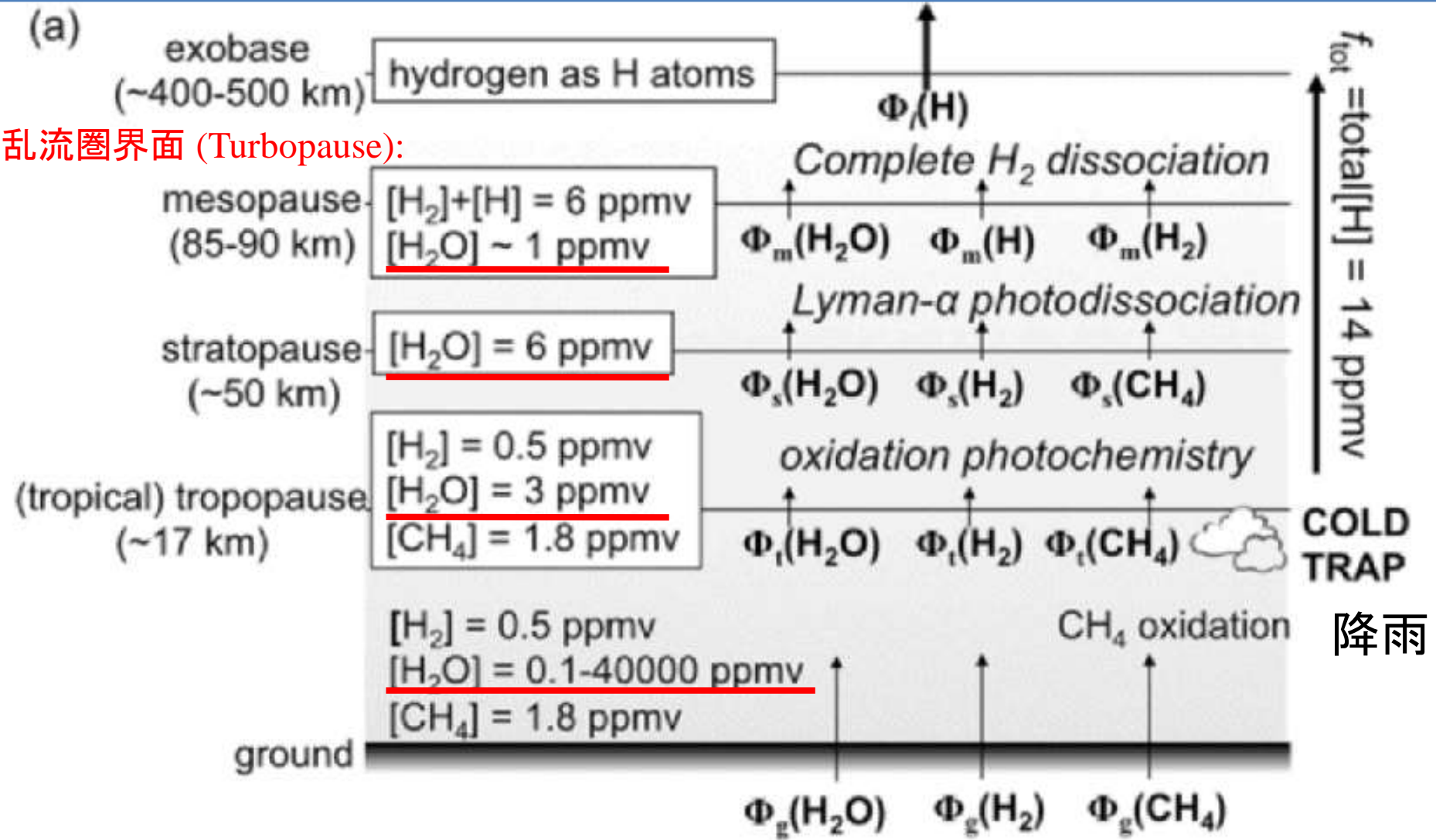


Curry et al., 2018

- ICME発生時の酸素イオンフラックスの分布。
- 平常時に比べ、高SZA (>~90度) で流出量が数倍に増加

1. 磁化惑星と非磁化惑星の大気散逸
2. 地球電磁圏における水素の散逸
3. 地球電磁圏における酸素の散逸
4. まとめ

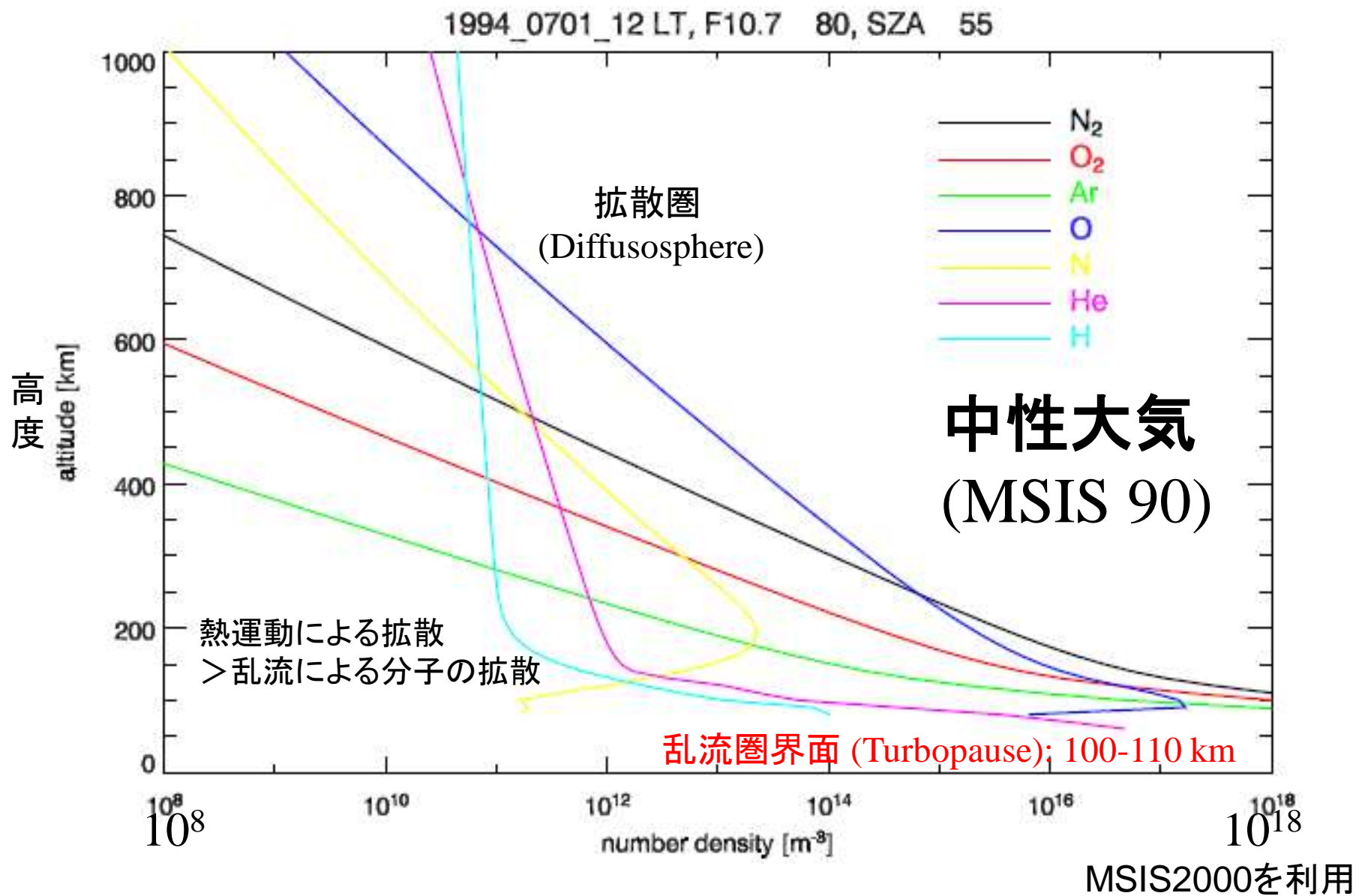
# 水素の流出



Catling and Kasting, 2017

- Exobase以上の高度領域での流出は効率的に起きる。
- Homopause/Turbopause からの分子・原子の拡散が散逸率をコントロールする。

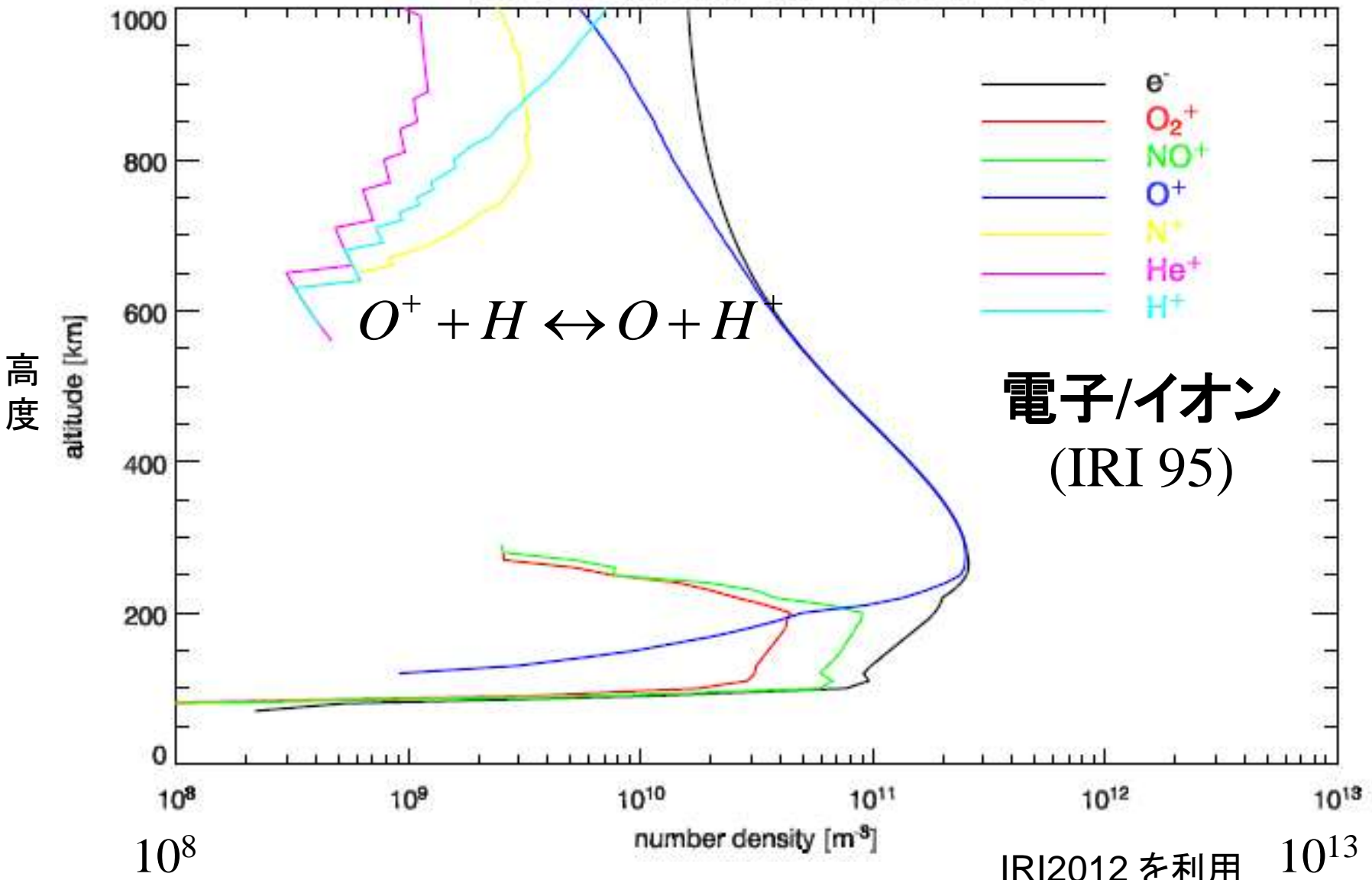
# 中性大気の高度分布(地球)





# 電離大気の高度分布(地球)

1994\_0701\_12 LT, F10.7 80, SZA 55



# 上部電離圏での水素イオン流出

上部電離圏では、水素イオンの生成率と酸素イオンの消滅率が、ほぼ等しくなる。極域では上昇イオンのフラックスが一定に。

$$O^+ + H \leftrightarrow O + H^+$$

$$\sum_{i=H^+, O^+} \frac{1}{A} \frac{\partial (N_i V_i A)}{\partial r} = Q_{H^+} - L_{O^+} \approx 0$$

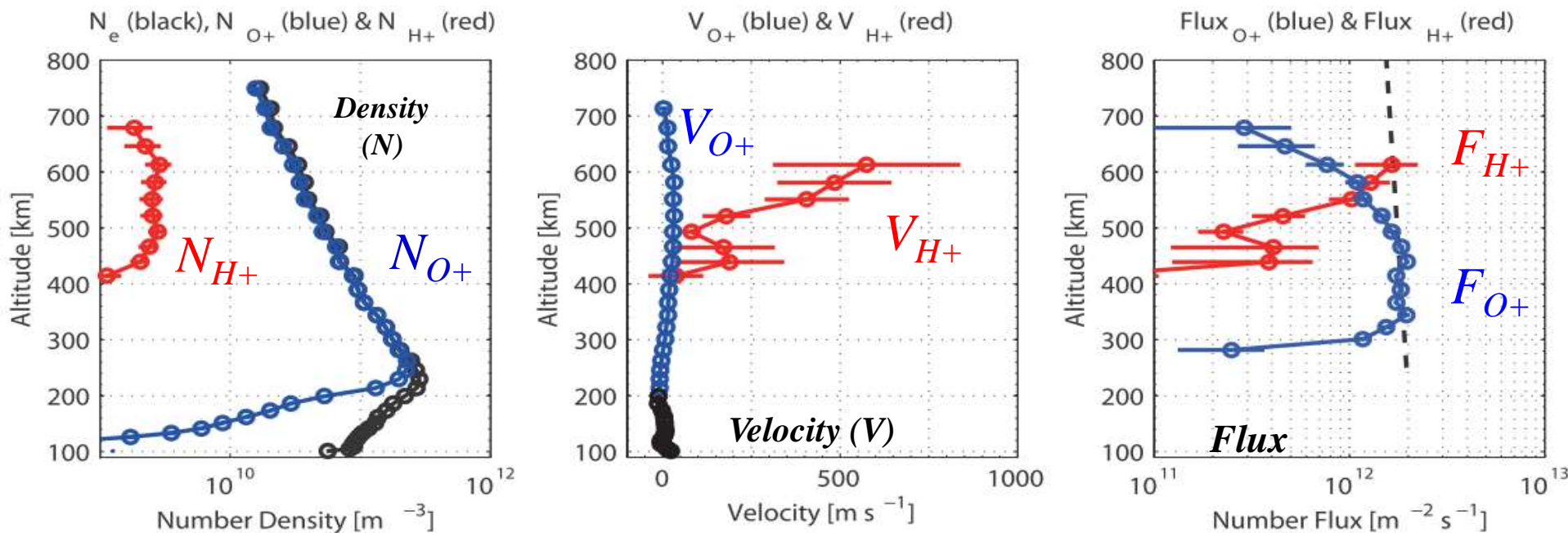
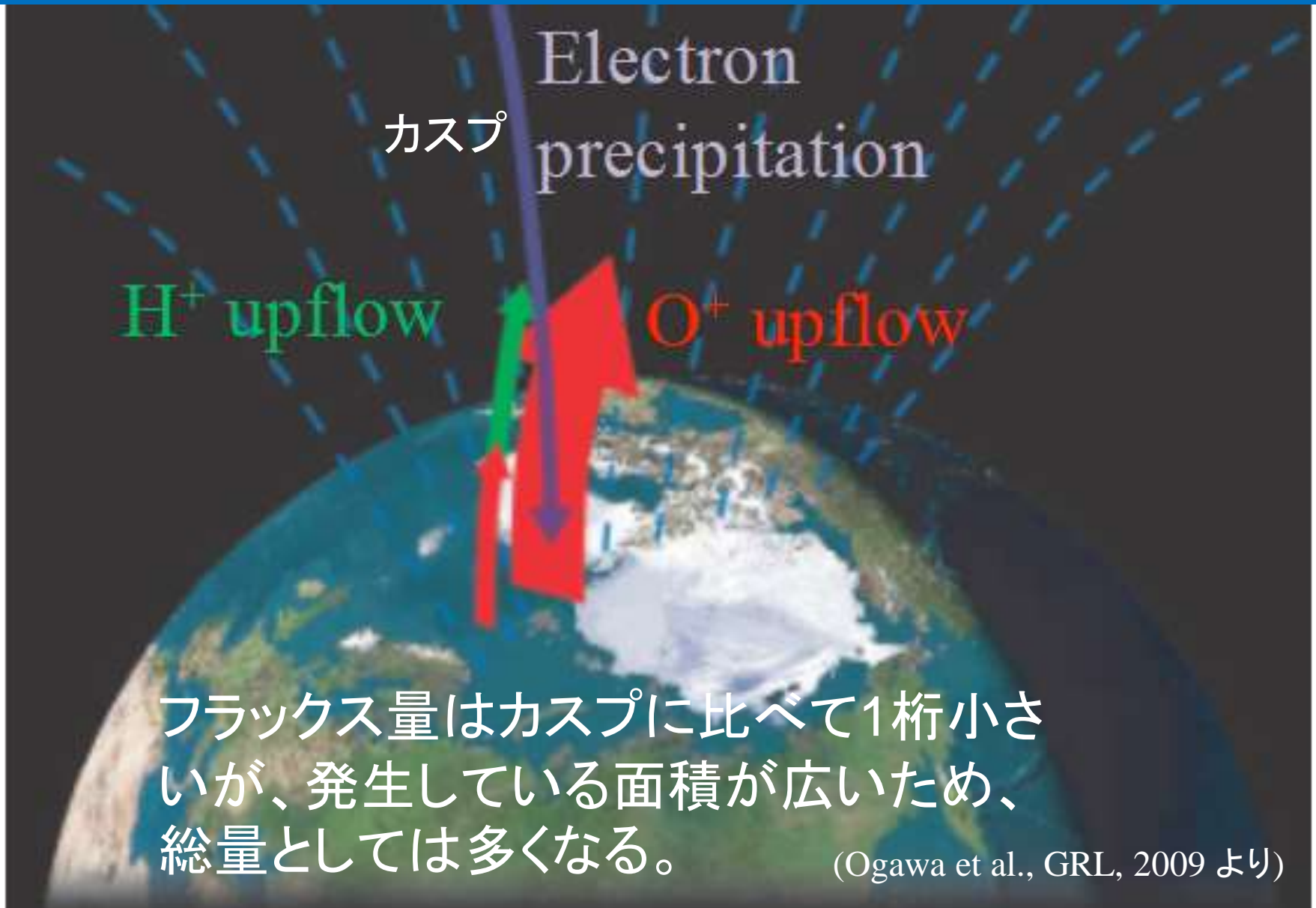


図:カस्पより低緯度側における酸素イオンと水素イオンの密度( $N$ )、速度( $V$ )、上向きフラックス分布( $F = N V$ )

Ogawa et al., GRL, 2009

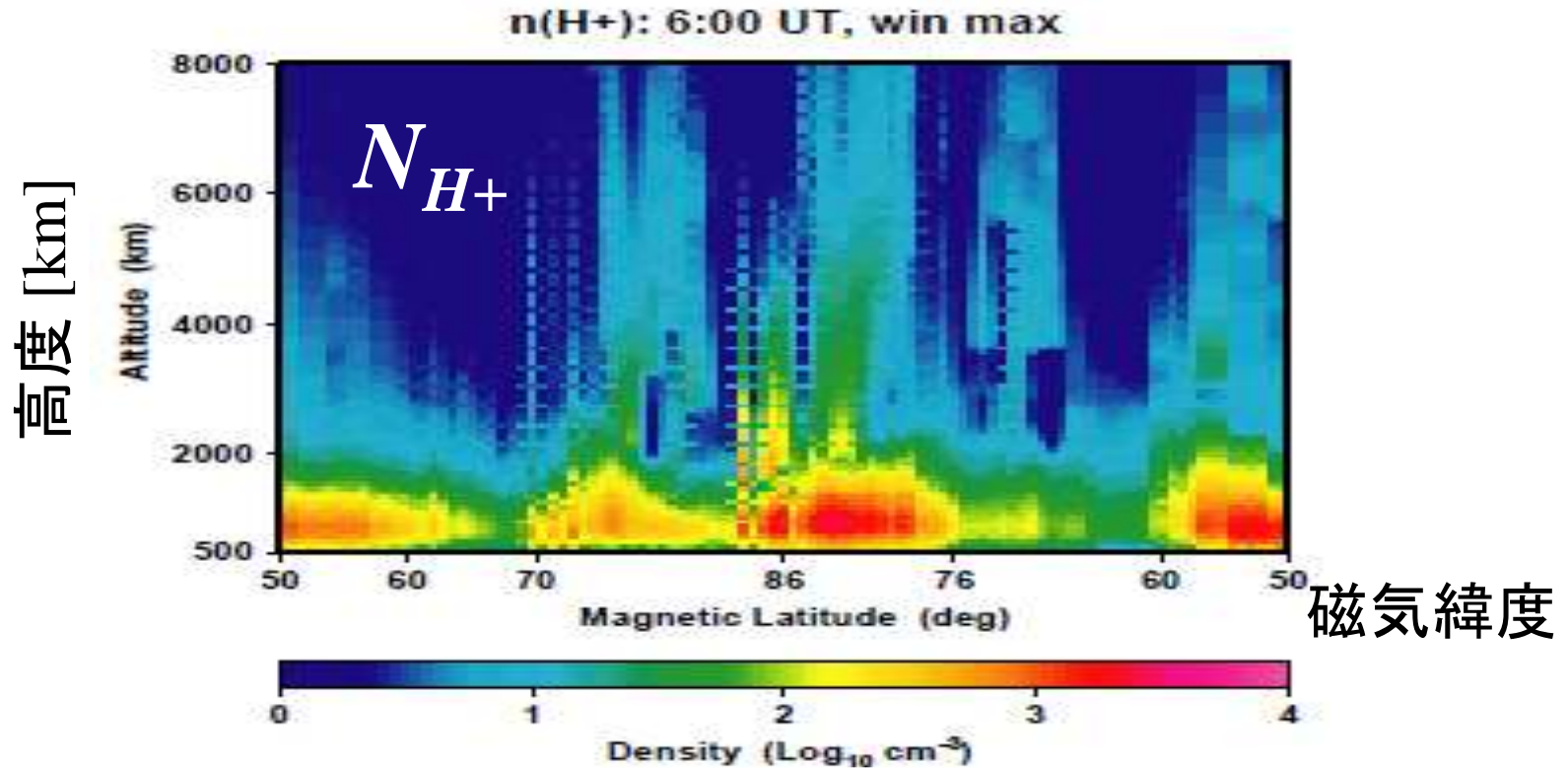
# 上部電離圏での水素イオン流出



フラックス量はカスプに比べて1桁小さいが、発生している面積が広いいため、総量としては多くなる。

(Ogawa et al., GRL, 2009 より)

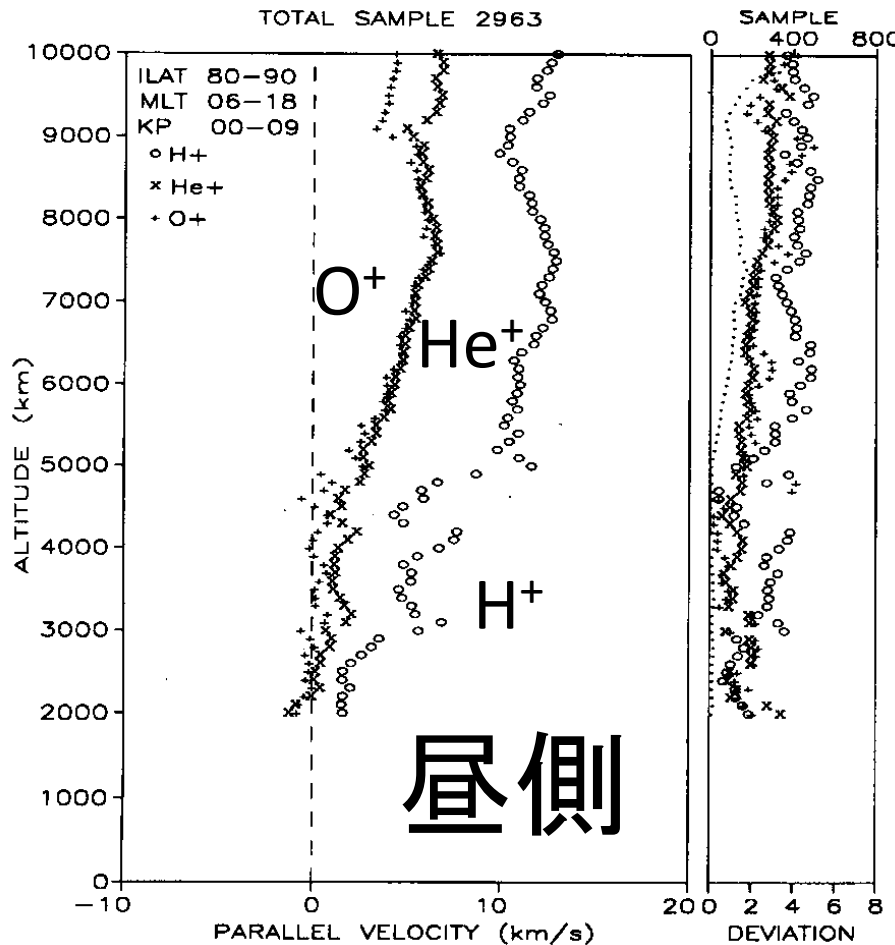
# 極風 (Polar Wind) による水素イオン密度分布



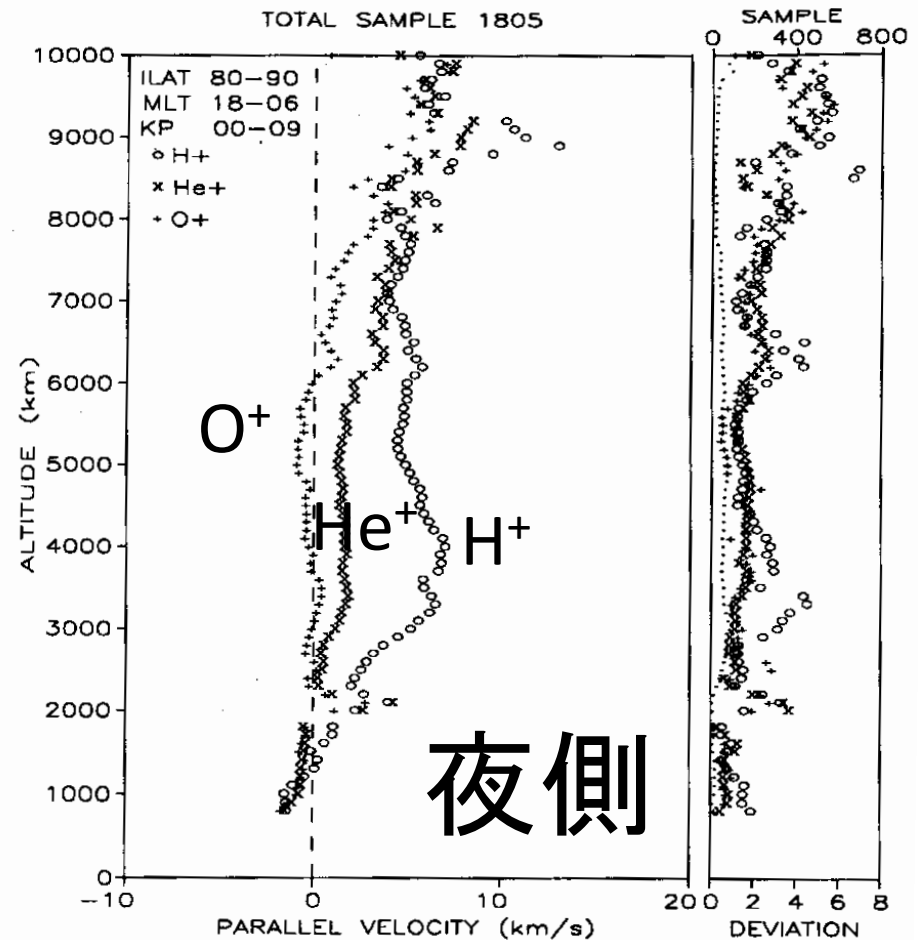
3次元シミュレーション研究による水素イオン  
上向きジェットの緯度分布 (Schunk et al., 2005)

- 極冠域ポーラーパッチ中の水素イオンの上向きジェットの可能性を指摘。

# 磁気圏高度でのイオン流出



10km/s



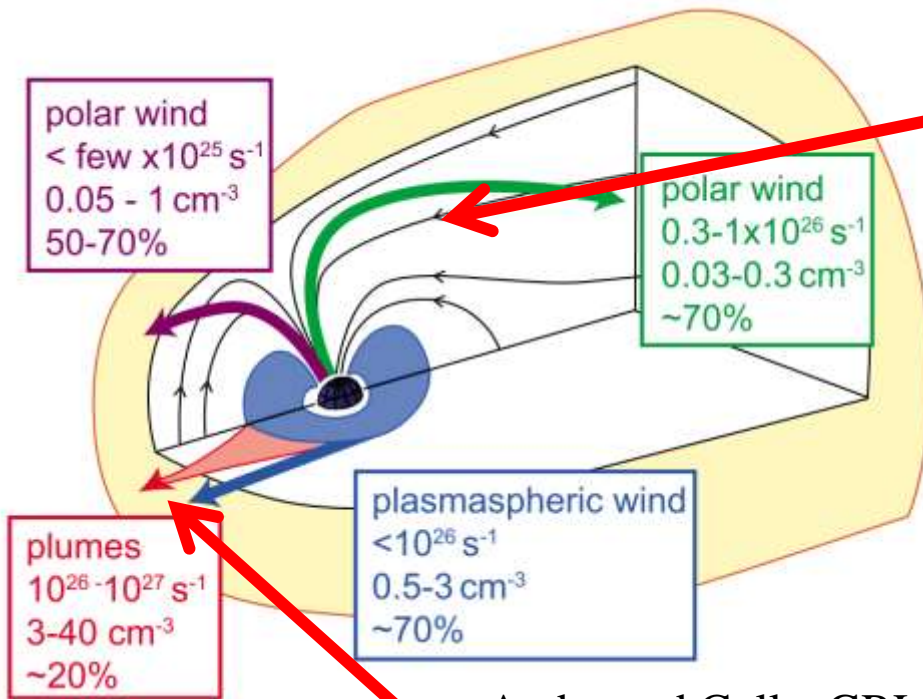
10km/s

Akebono衛星の観測結果 Abe et al. 1993

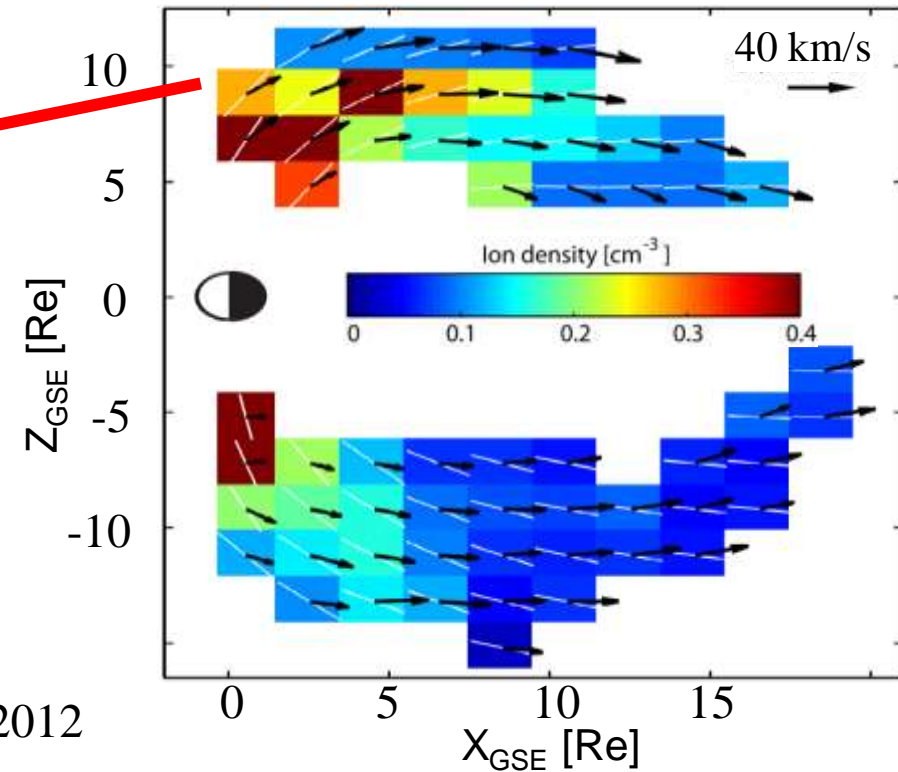
- ・高度が高くなると共に、流出速度が早くなる。
- ・昼側の方が流出する速度が早く、フラックス量も多い(極風の場合)



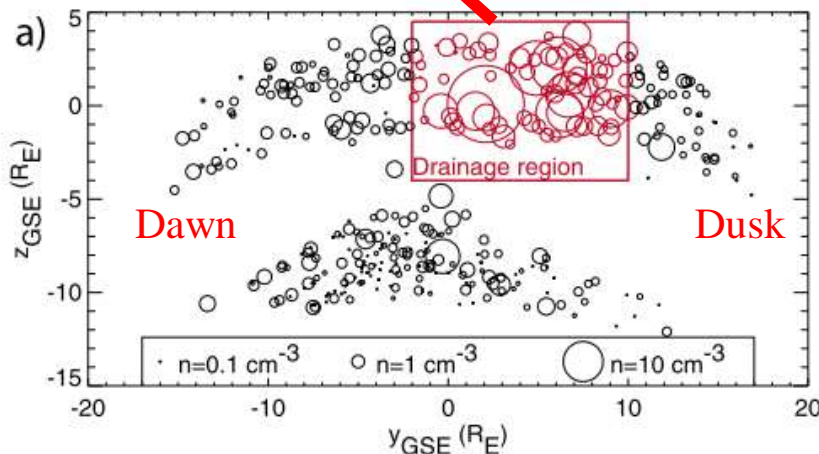
# 磁気圏内の低エネルギーイオンの分布



Andre and Cully, GRL, 2012



Engwall et al, Ann. Geophys., 2009



- 低エネルギーイオン ( $< 10 \text{ eV}$ ) が様々な領域で支配的に。多くは水素イオンを想定。
- コールドな酸素イオンビームも存在 (Seki et al., 1998)

1. 磁化惑星と非磁化惑星の大気散逸
2. 地球電磁圏における水素の散逸
3. 地球電磁圏における酸素の散逸
4. まとめ

# 磁気圏への粒子(イオン)の流れ

イオン上昇流  
(Ion upflow)

Transversely accelerated ions (TAIs),  
イオンコニクス、イオンビーム

極風  
(Polar Wind)

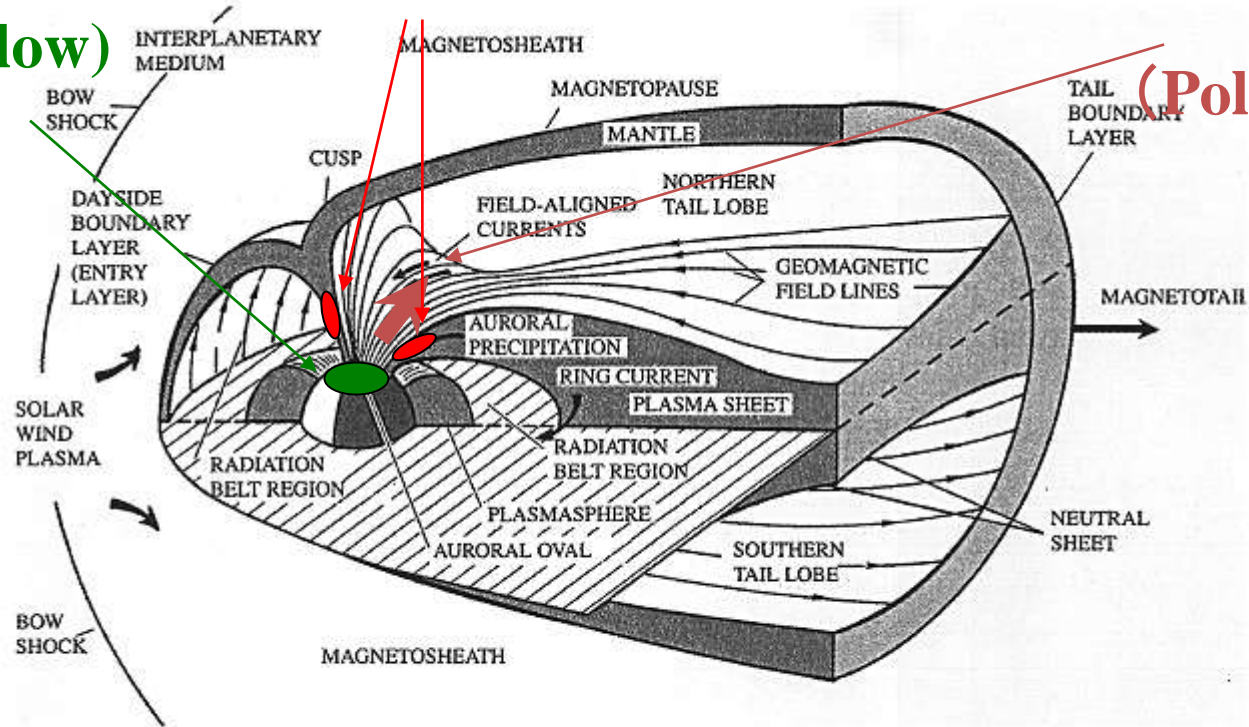


Figure 1.1: Schematic diagram of the Earth's magnetosphere showing the various regions and boundaries [After Roederer, 1981].

高度や速度分布関数の特徴により、様々に分類。

# イオン上昇流と極風の違い

	イオン上昇流 (Ion upflow)	極風 (Polar wind)
発生領域	カस्प域 オーロラ帯	極冠域
イオン種	$O^+$ , $NO^+$ , $N_2^+$ , ...	$H^+$ , $He^+$ , $O^+$
加速機構	双極性電場の増大、 摩擦加熱の増大、 波動-粒子相互作用	双極性拡散
温度異方性	あり ( $T_{i\perp} > T_{i\parallel}$ )	無し
エネルギー源	降下粒子、熱流、 対流電場の増大、 プラズマ波動	電離、光電子の寄与？
典型的な時間幅	数分-数10分間 (時間変化が激しい)	定常的

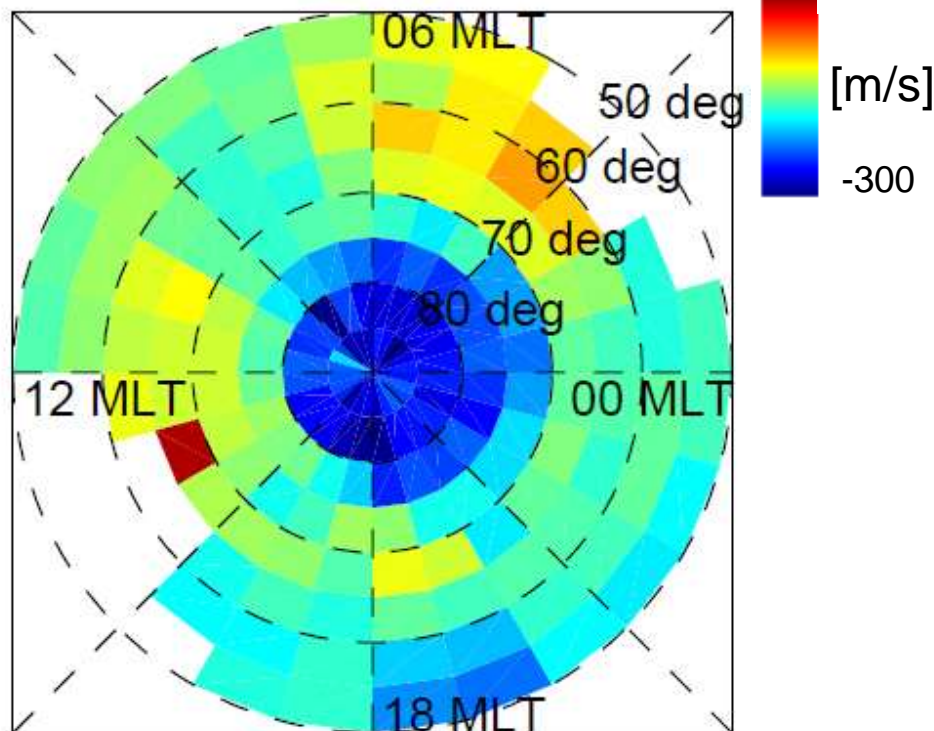
イオンコニクス、イオンビームには、酸素イオンも水素イオンも共に含まれる。



# 電離圏での酸素イオン上昇流分布

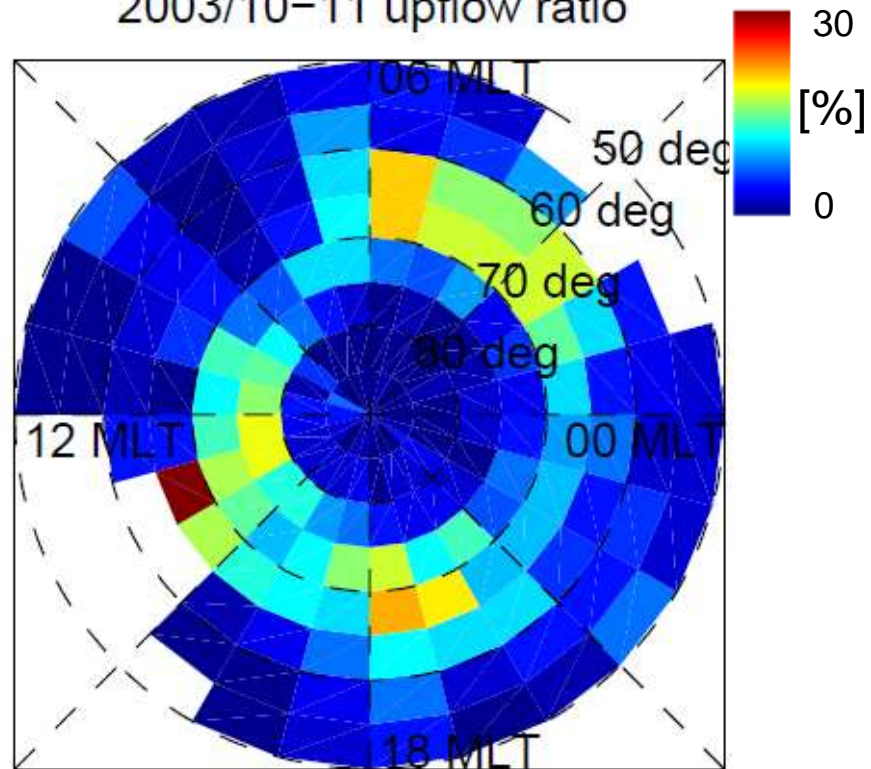
電離圏を飛行する人工衛星。  
例: DMSP (高度 840 km)

2003/10-11 vi(FA) average



沿磁力線イオン速度 > 200 m/s  
の発生割合

2003/10-11 upflow ratio

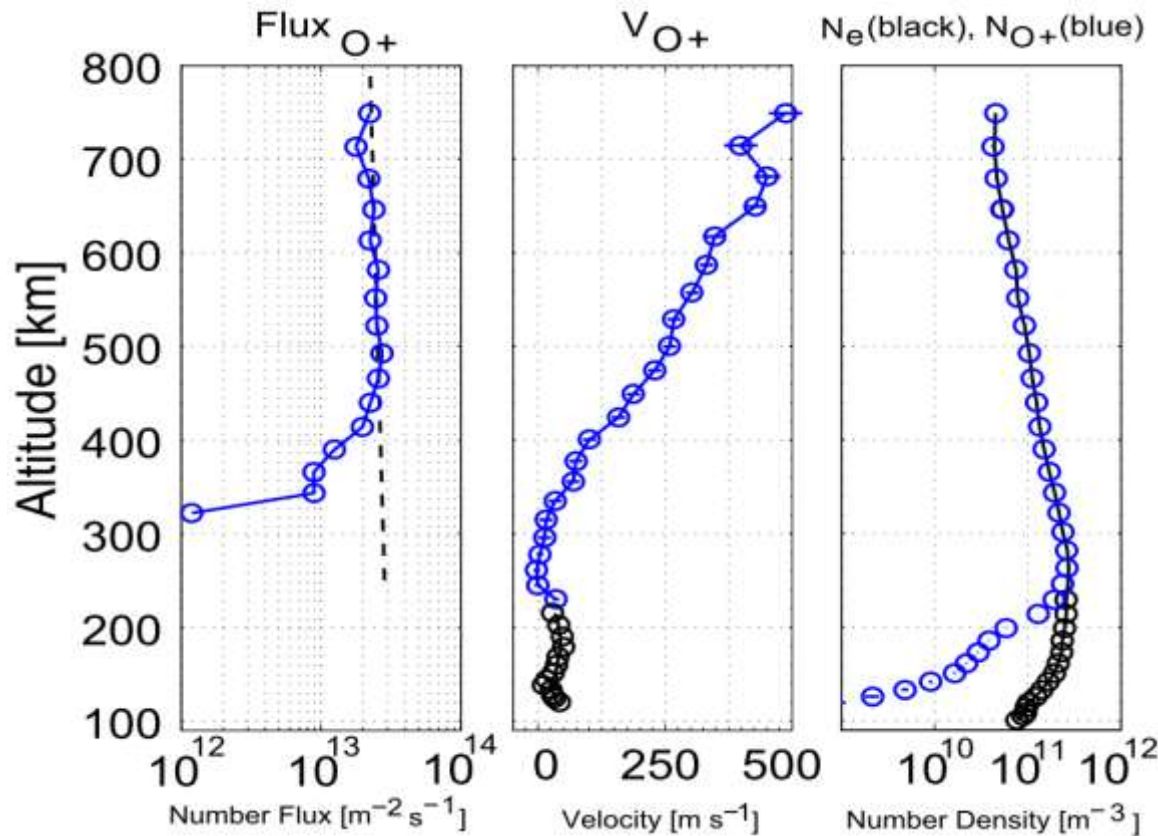


イオン上昇流の発生領域がリング状に分布している。  
イオン下降流の発生領域は、極冠域に集中。



# 極域で上昇する酸素イオンの高度分布

## Polar ionosphere



電離圏カusp領域での観測結果

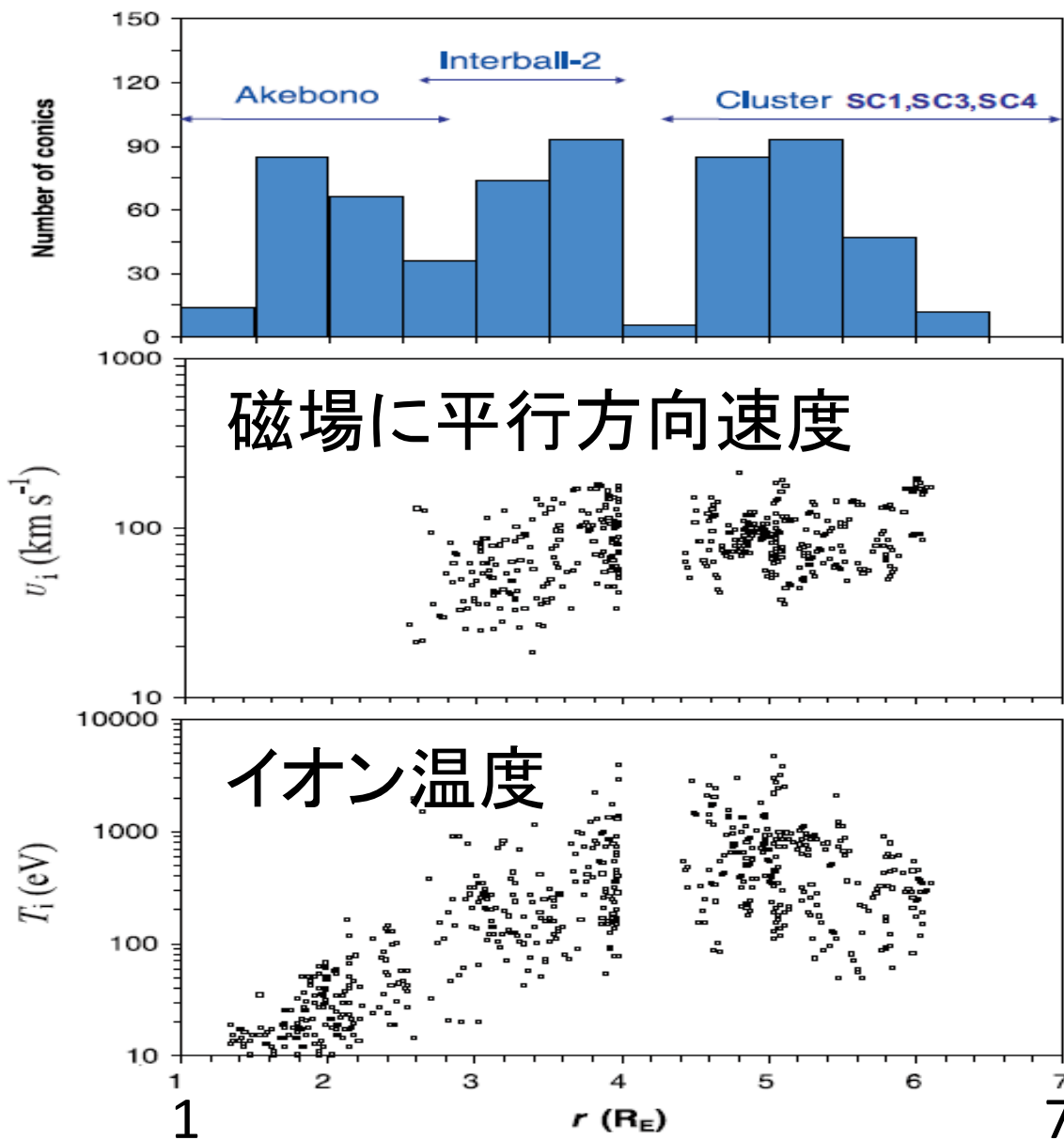
フラックスチューブ内のフラックスを保存しながら加速・上昇

ESR results at 0855-0920 UT on July 4, 2007

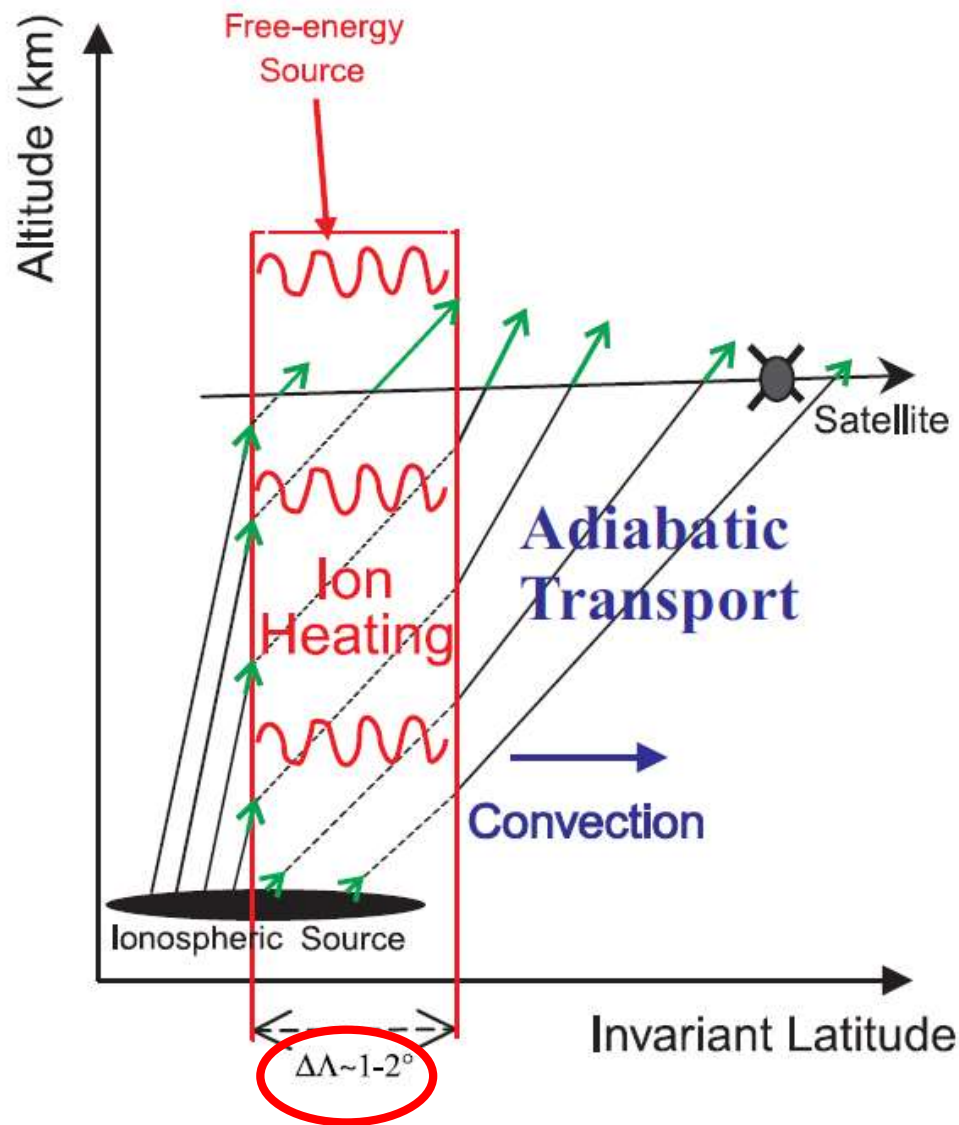
(Ogawa et al., *GRL*, 2009)

Bulk ion upflows: Transient ( $\sim 10$ - $20\%$ ), low speed (a few 100 m/s), flux conserved, and  $O^+$  dominant.

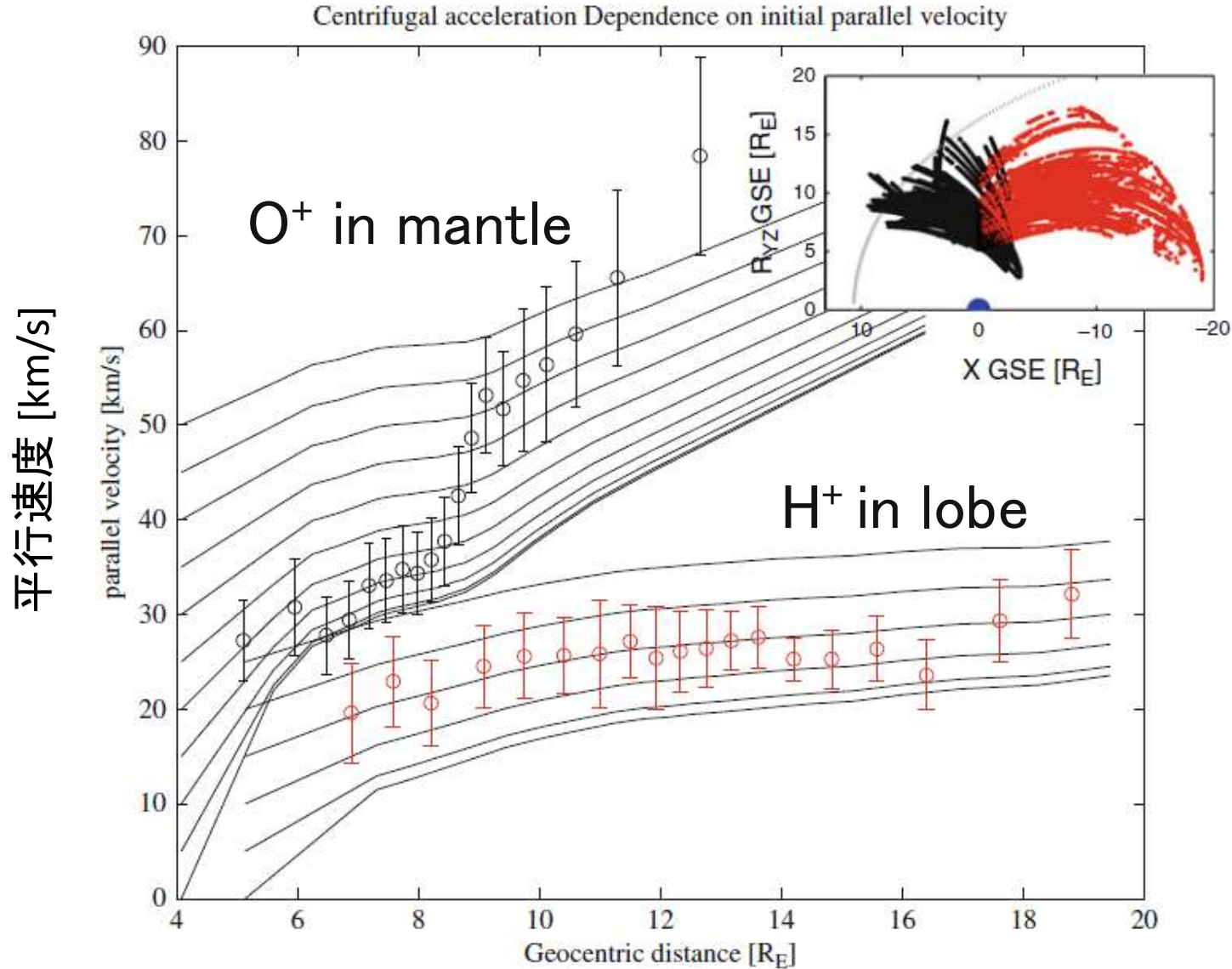
# 磁気圏カスプ領域における酸素イオン加速の高度分布



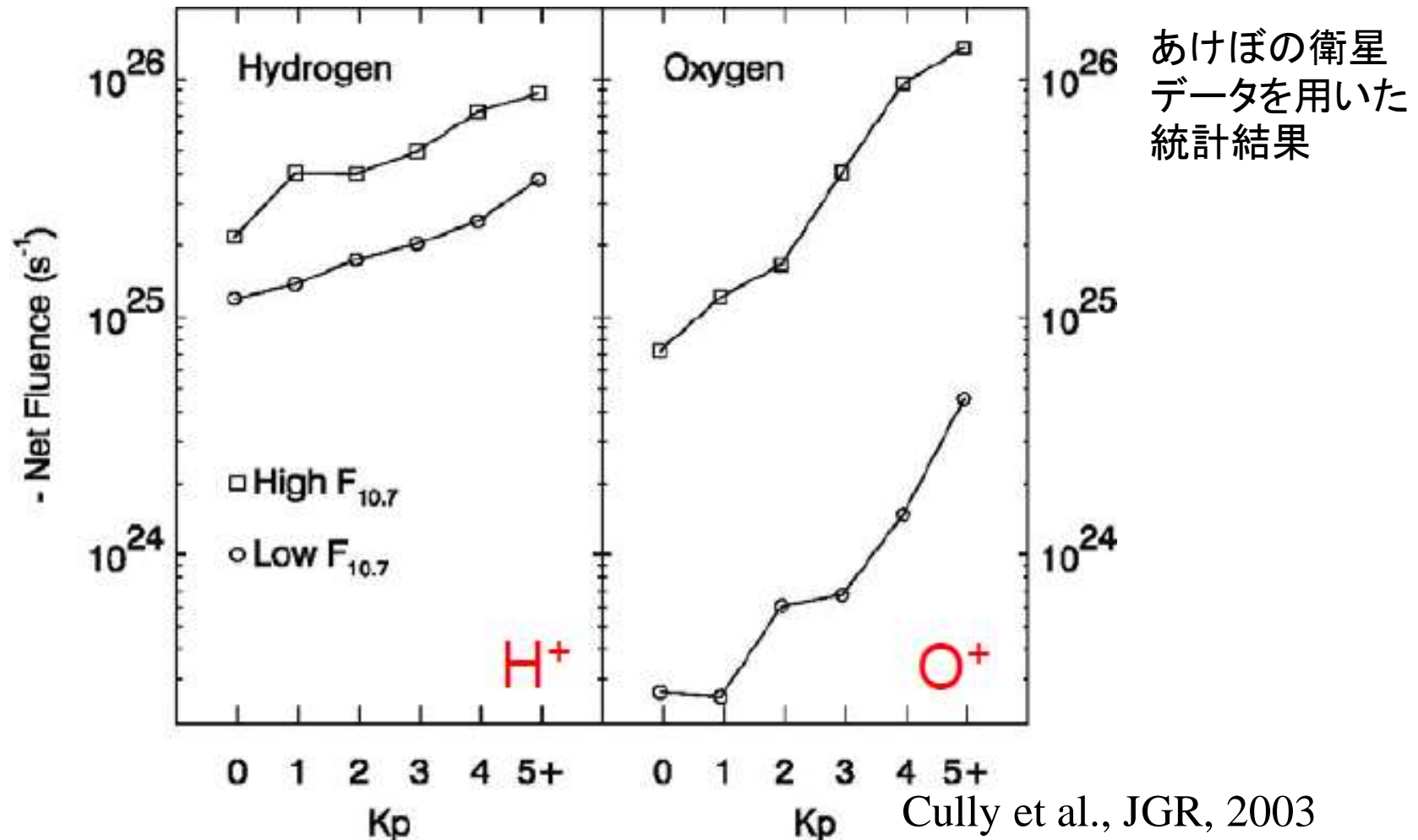
# 磁気圏カスプ領域における酸素イオン加速の高度分布



# 磁気圏での遠心力による酸素イオン加速



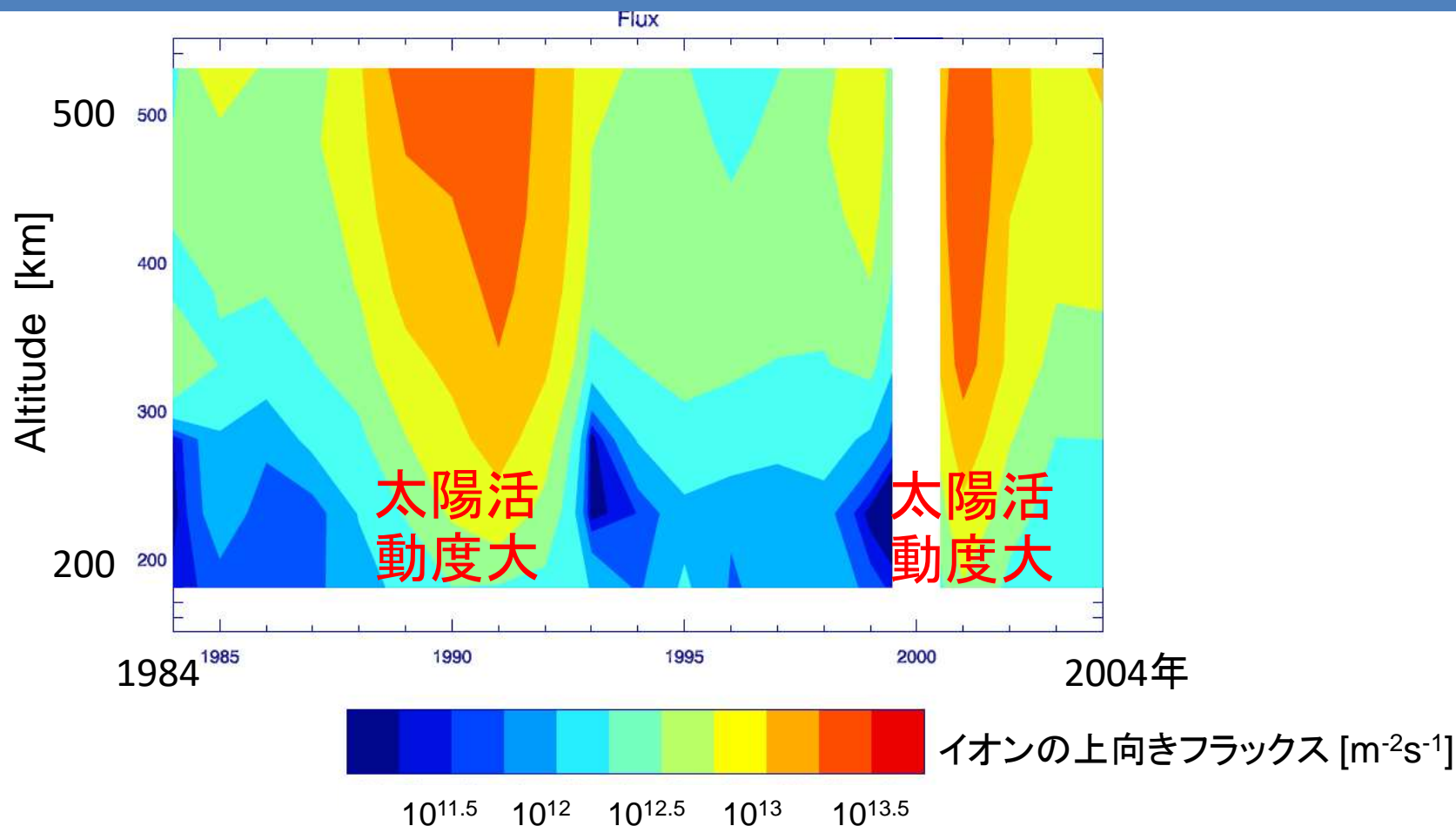
# イオン流出量の太陽活動度・地磁気活動度依存性



- 地磁気活動度が高くなると、酸素イオンの流出量が特に増加。
- 太陽活動度が高くなると、酸素イオンの流出量が特に増加。

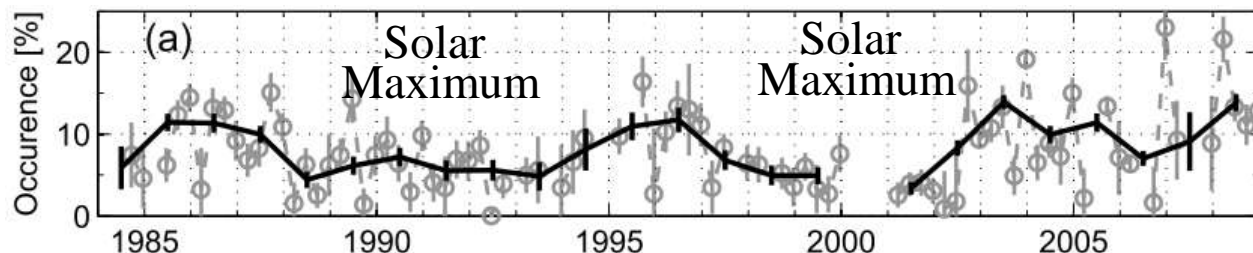


# 極域電離圏イオン上昇流の太陽活動度依存性



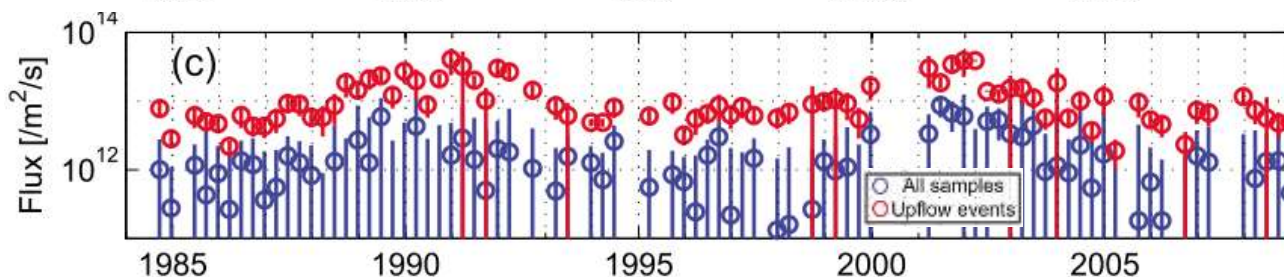
- 過去20年間のEISCATトロンソUHFデータを用いて調べた上昇イオンフラックスと太陽活動度との関係。
- 太陽活動度が高かった1989年や2001年付近では電離圏からのイオンの上向きフラックスが大きく、太陽活動度が低いとき(1985年や1996年付近)に比べ1桁ほど大きくなる。

# 極域電離圏イオン上昇流の太陽活動度依存性

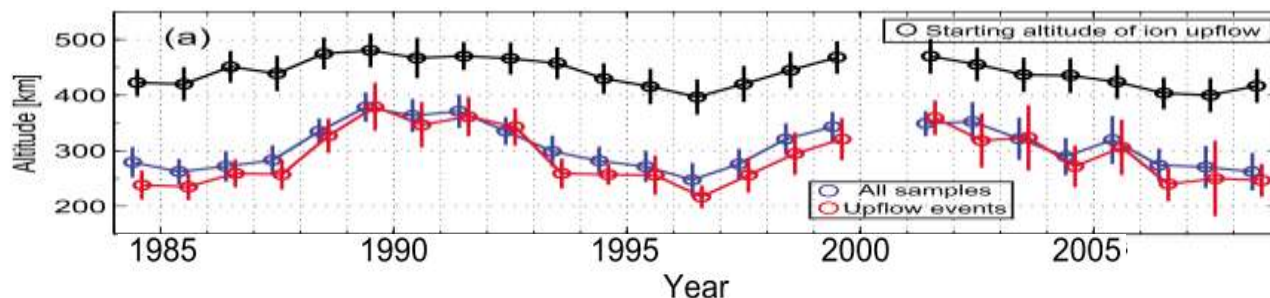


高度250-600 km

イオン上昇流の発生頻度は極小期に大。



上向きフラックスは、極大期に大(約1桁)。



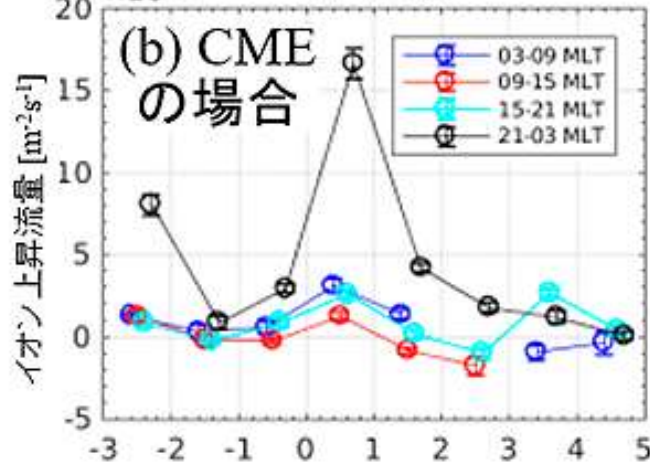
イオン上昇流の発生高度(黒線)は電子密度ピーク高度(赤線)に合わせて変化。

Ogawa et al., *JGR*, 2010

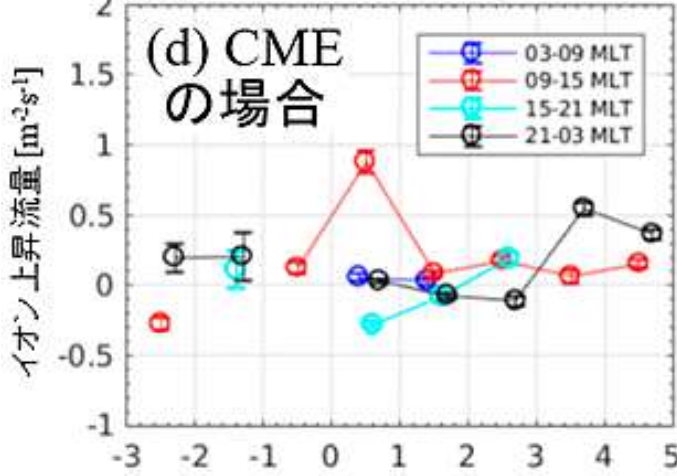
- 太陽活動の変化は、超高層大気の中性大気密度や電子密度ピーク高度、イオン-中性粒子間の衝突周波数を変化させることで、酸素イオン上昇流に影響を与える。(例: 太陽活動度の低下 → 中性大気密度の減少 → イオン-中性粒子間の衝突周波数の低下 → 酸素イオンが頻繁に上昇可能に)

# 太陽風擾乱が極域イオン上昇流に与える影響

トロムソ (磁気緯度66度)



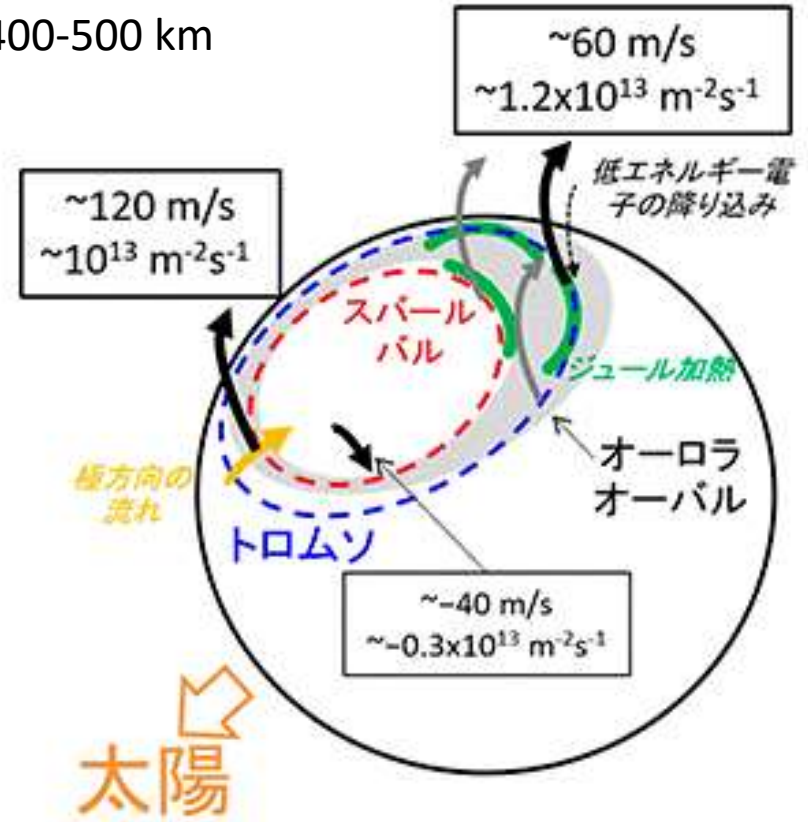
スバルバル (磁気緯度75度)



磁気嵐からの日数

## CME起源の磁気嵐の場合

高度400-500 km

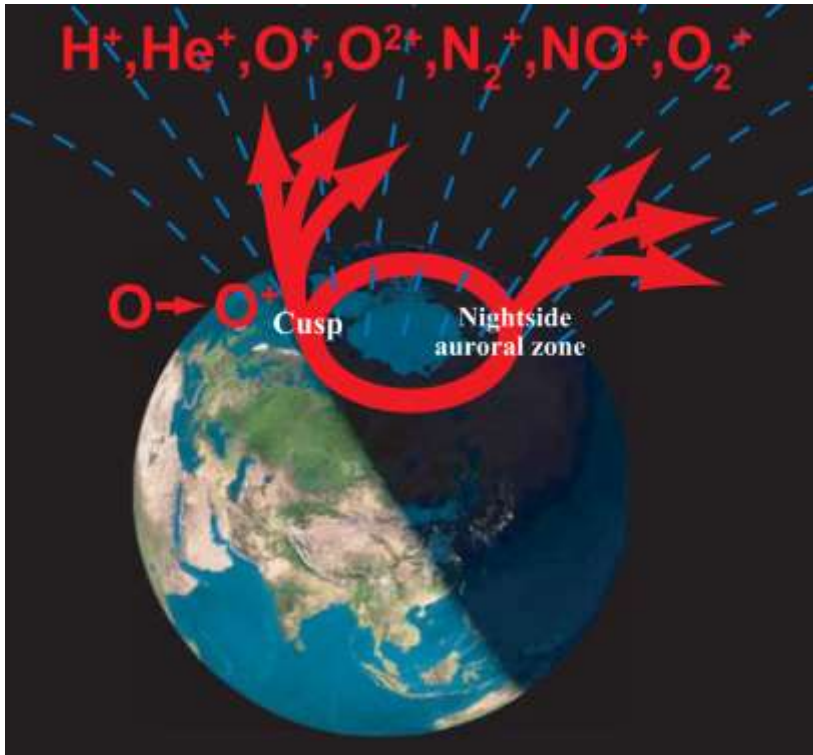


Ogawa et al., JGR, 2019

過去20年間(1996-2015年)に磁気嵐が起きていたときのEISCATデータ(2地点)を利用

**平常時の  $10^{11-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  から  $\sim 10^{13} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  への急激な変化**

# 酸素の流出量



大気中の酸素分子が超高層大気では原子化→イオン化

極域電離圏での上昇フラックス:

$$10^{12} \sim 10^{14} [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

[Coley et al., 2003; Ogawa et al., 2010]

磁気圏での上昇フラックス:

$$\sim 10^9 [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

(高度1000 km に投影すると、

$$\sim 10^{12} [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}])$$

1日の流出量:

$$\sim 10^{31} [\text{ions/day}]$$

地球電離圏内の全イオン量:

$$\sim 5 \times 10^{31} [\text{ions}]$$

全イオン流出量:

$$\sim 10^{26} [\text{ions s}^{-1}]$$

[Cully et al., 2003; Engwall et al., 2009]



# まとめ

- 惑星大気の散逸プロセスは、磁化惑星と非磁化惑星で大きく異なる。
- 地球のような磁化惑星では、磁気圏の存在により、広範囲の太陽風エネルギーを極域超高層大気に供給し、加熱された電離大気の流出を引き起こしていると推定される。
- 地球超高層大気内の水素は、地表の水蒸気、水素分子、メタンから供給。電荷交換反応により、定常的な流出が起きている。
- 地球超高層大気内の酸素イオンは、主に酸素分子から供給。極風（低温での流出）の他に、電離圏カスプ/オーロラ帯内での加熱や加速、下部磁気圏でのプラズマ波動による加熱や加速、カスプ/マントル領域での遠心力による加速を受けて、最終的には宇宙空間に流出。太陽活動度や地磁気活動度による影響大。