

論文紹介

Three-dimensional study of Mars upper thermosphere/ionosphere and hot oxygen corona:

1. General description and results at equinox for solar low conditions
[Valeille et al. 2009 (a)]
2. Solar cycle, seasonal variations, and evolution over history
[Valeille et al. 2009 (b)]

Neutral Upper Atmosphere and Ionosphere Modeling (5章の一部)
[Bougher et al. 2008]

東北大学 博士課程2年 星野直哉

1. Introduction

Hot Oの散逸過程

- ・ 解離再結合
- ・ 電荷交換
- ・ スパッタリング
- ・ イオンピックアップ

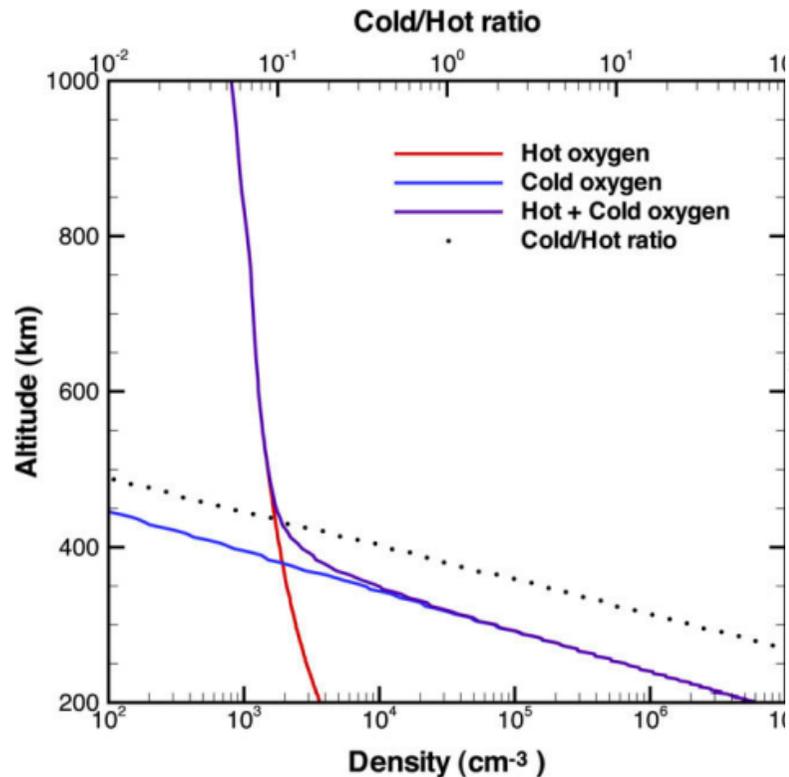
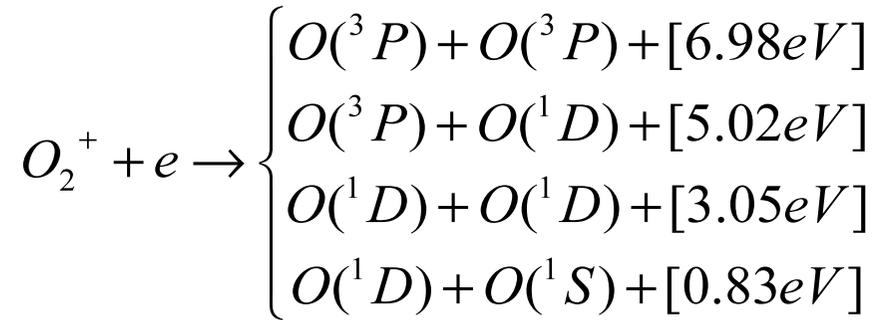


Fig. Hot/Cold O分布 [Vaille et al. 2010]

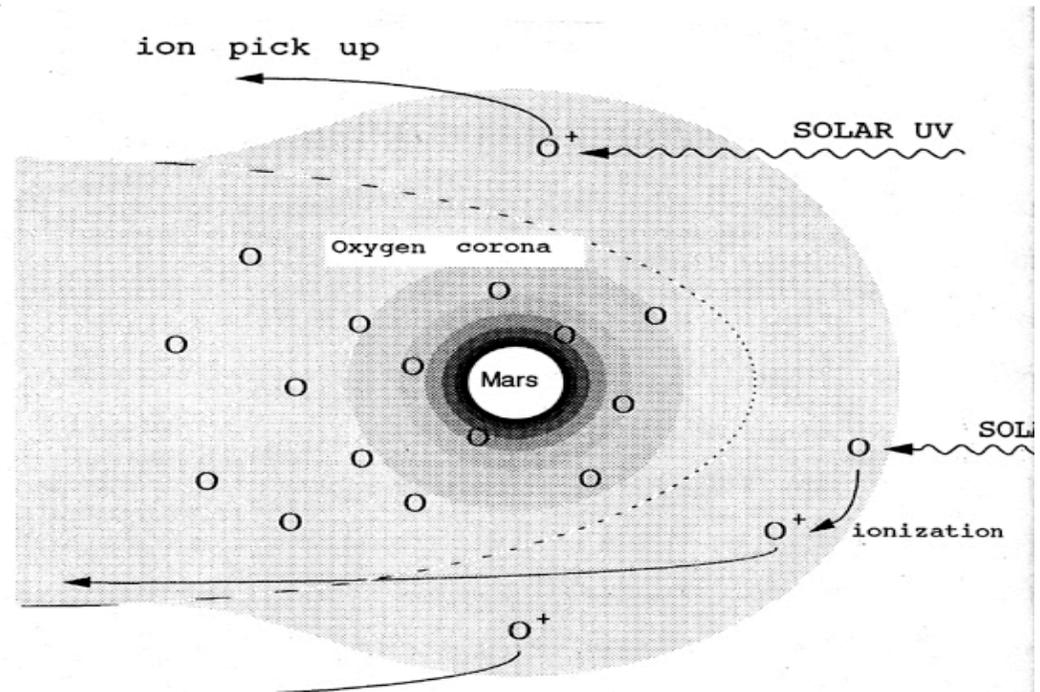


Fig. O散逸プロセス

1.Introduction

■酸素コロナ分布・散逸のシミュレーション

・1次元外気圏モデル(e.g., Cipriani et al., 2007)

・3次元外気圏モデル (Chaufray et al., 2007)

(熱圏/電離圏部分の情報は1次元モデルと観測の補間から)

- 太陽活動極大期/極小期
- 各散逸プロセスの寄与度

解離再結合が支配的

Table. Hot Oの散逸率 (s^{-1}) [Chaufray et al. 2007]

	太陽活動極小	太陽活動極大
解離再結合	1×10^{25}	4×10^{25}
イオンピックアップ	2×10^{23}	3×10^{24}
電荷交換	4×10^{22}	4×10^{23}
スパッタリング	2×10^{23}	7×10^{23}

1.Introduction

- ・熱圏/電離圏環境の3次元構造の考慮 (Valeille et al. 2010)
 - 3次元熱圏/電離圏モデル[Bougher et al. 2006]を使用
 - 太陽天頂角依存性をpolar cut/equatorial cutで比較

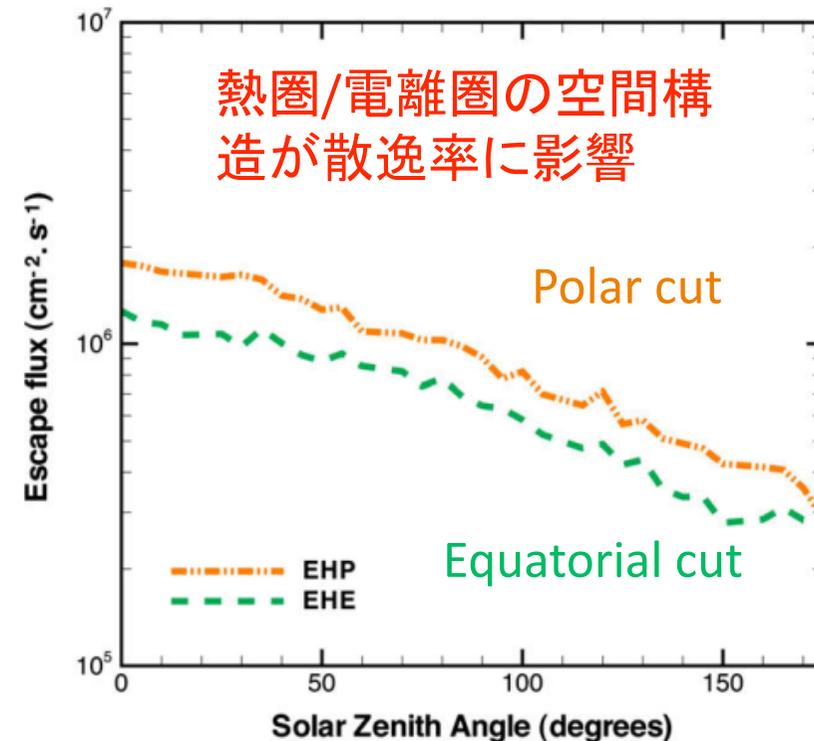
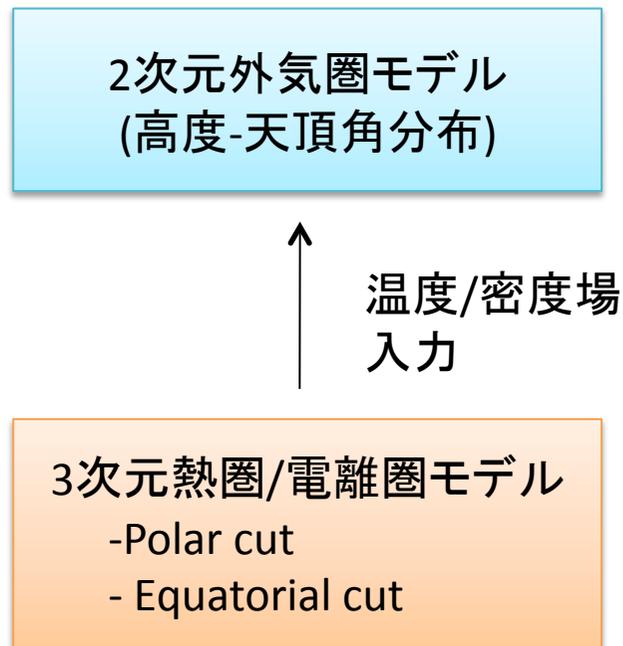


Fig. Hot O散逸率の太陽天頂角依存性[Valeille et al. 2010]

1.Introduction

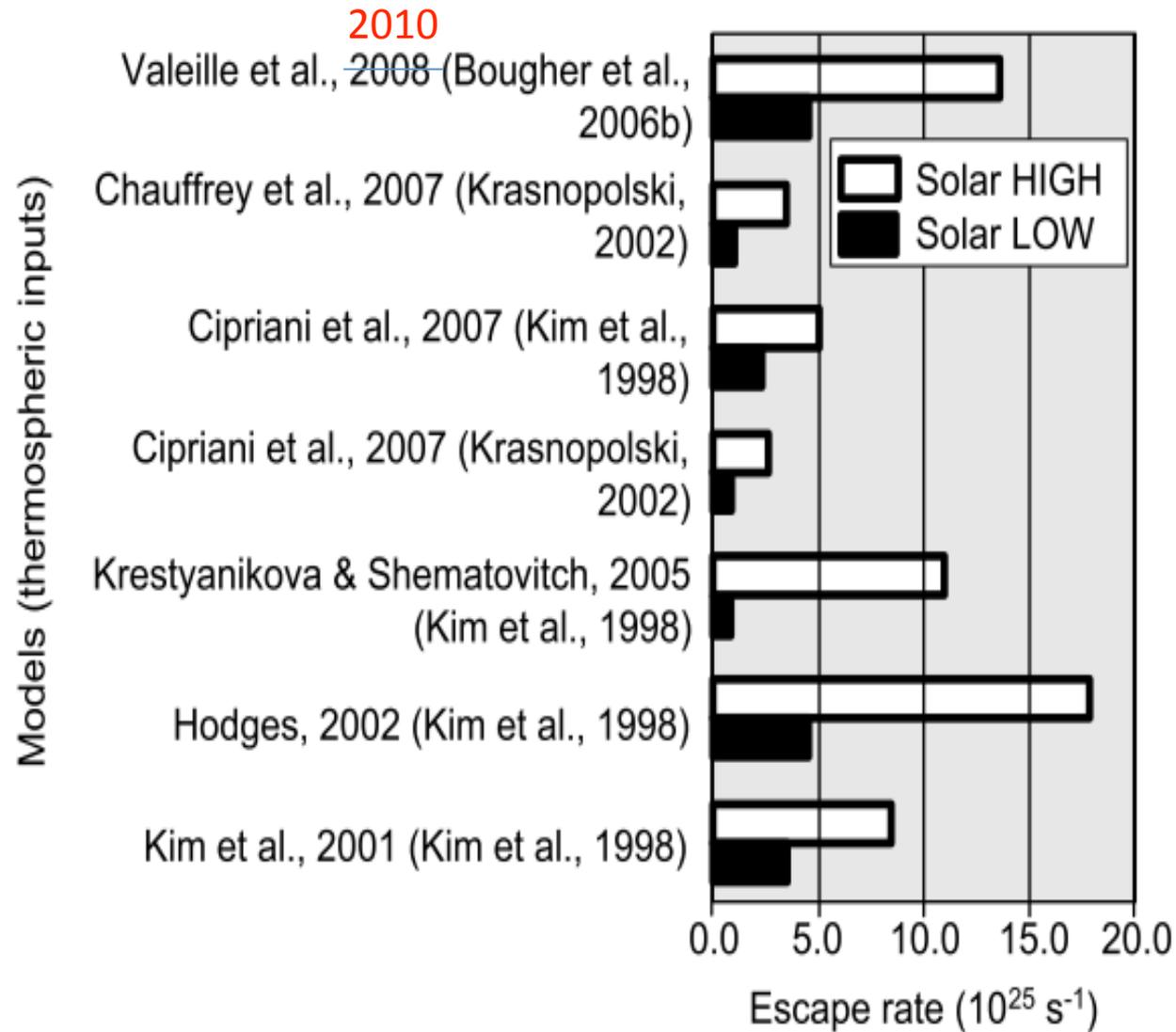
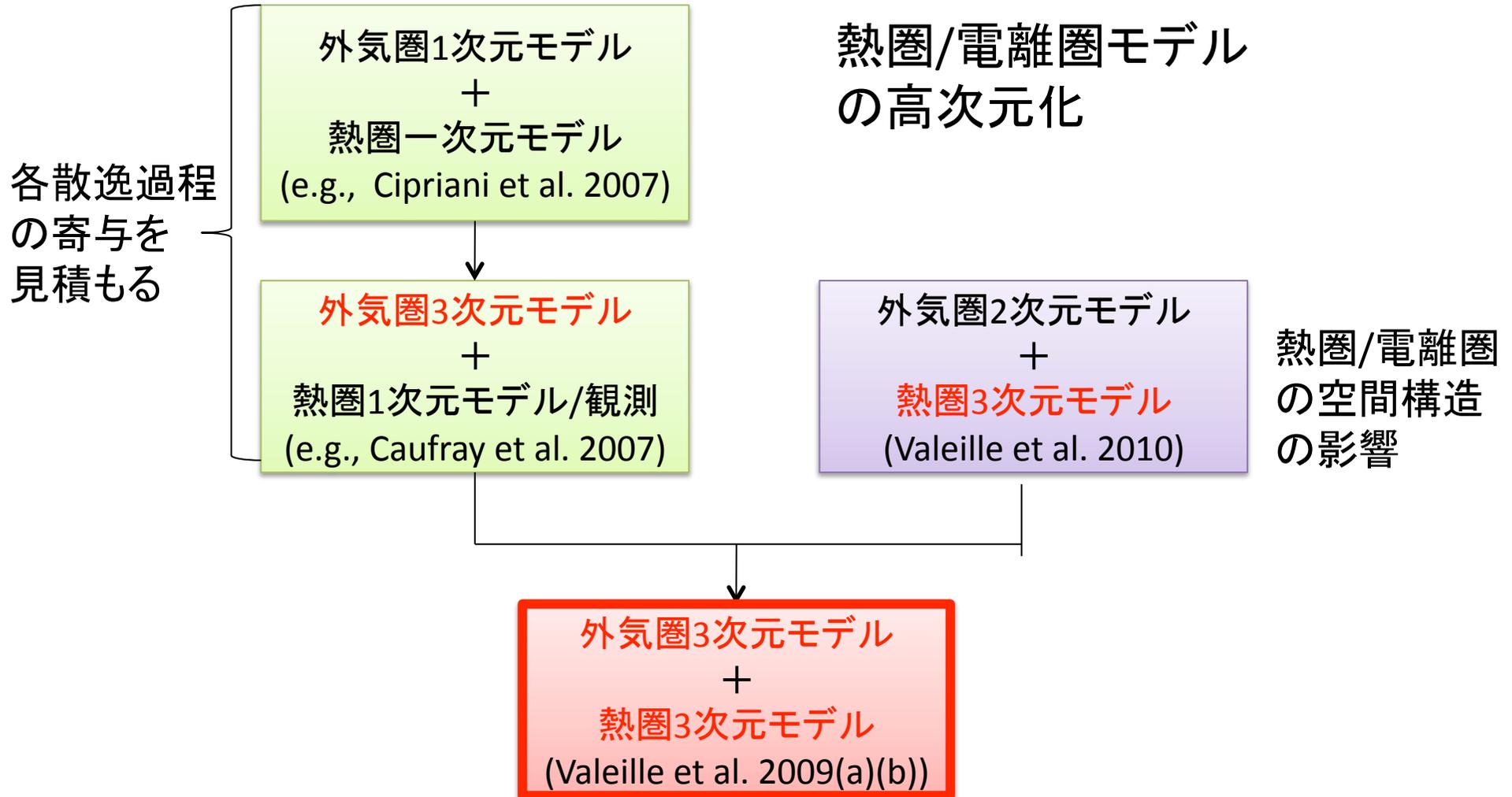


Fig. 先行研究におけるHot O散逸量比較[Bougher et al. 2008]

1.Introduction

外気圏モデルの高次元化



1.Introduction

目的

熱圏・電離圏の3次元環境を考慮して

- ・酸素コロナ/散逸量の空間分布を理解する

[Vaille et al. 2009 (a)]

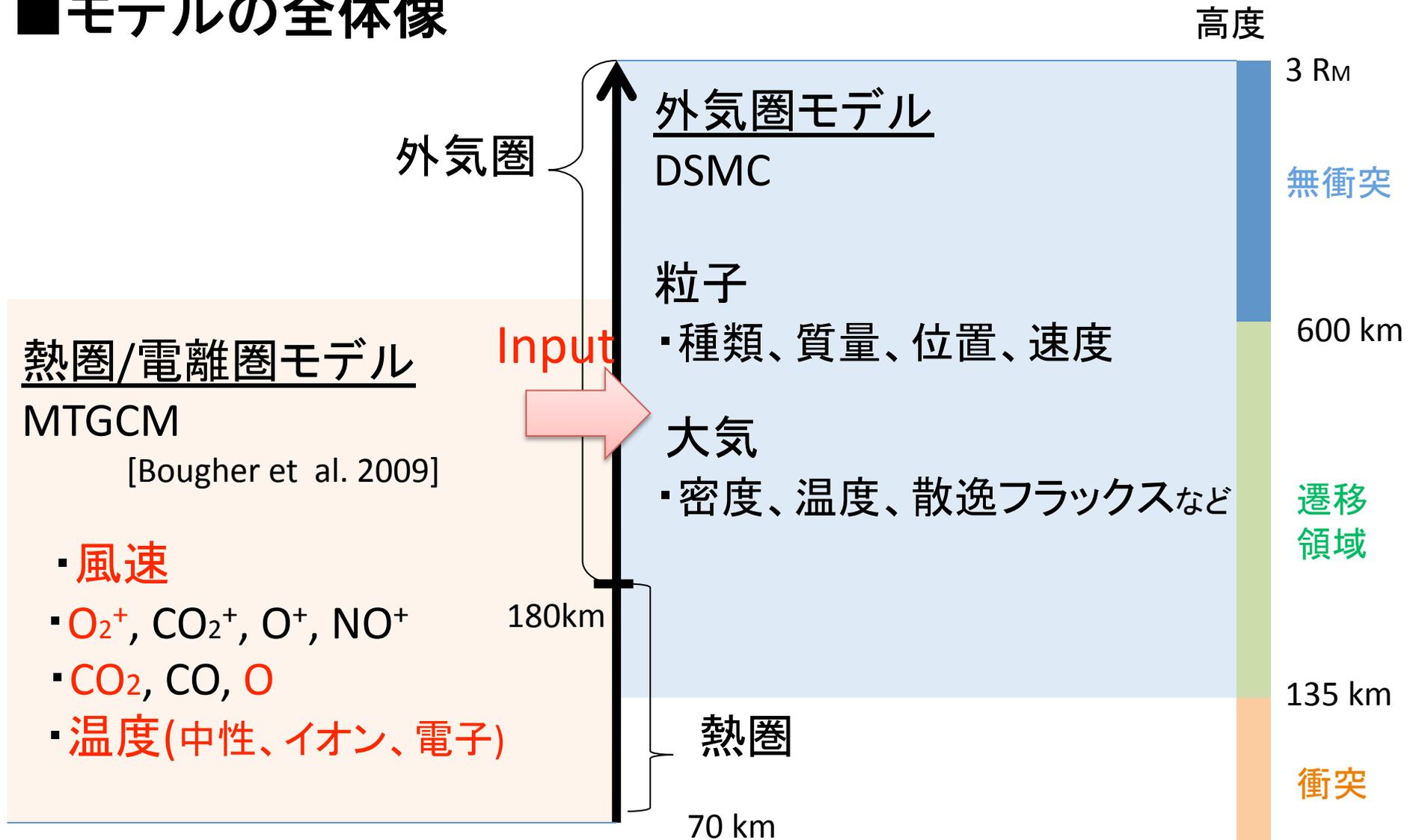
- ・酸素コロナ/散逸量の長期変動を理解する

- 太陽活動極小/極大
- 季節変動
- 過去のEUVflux変化

[Vaille et al. 2009 (b)]

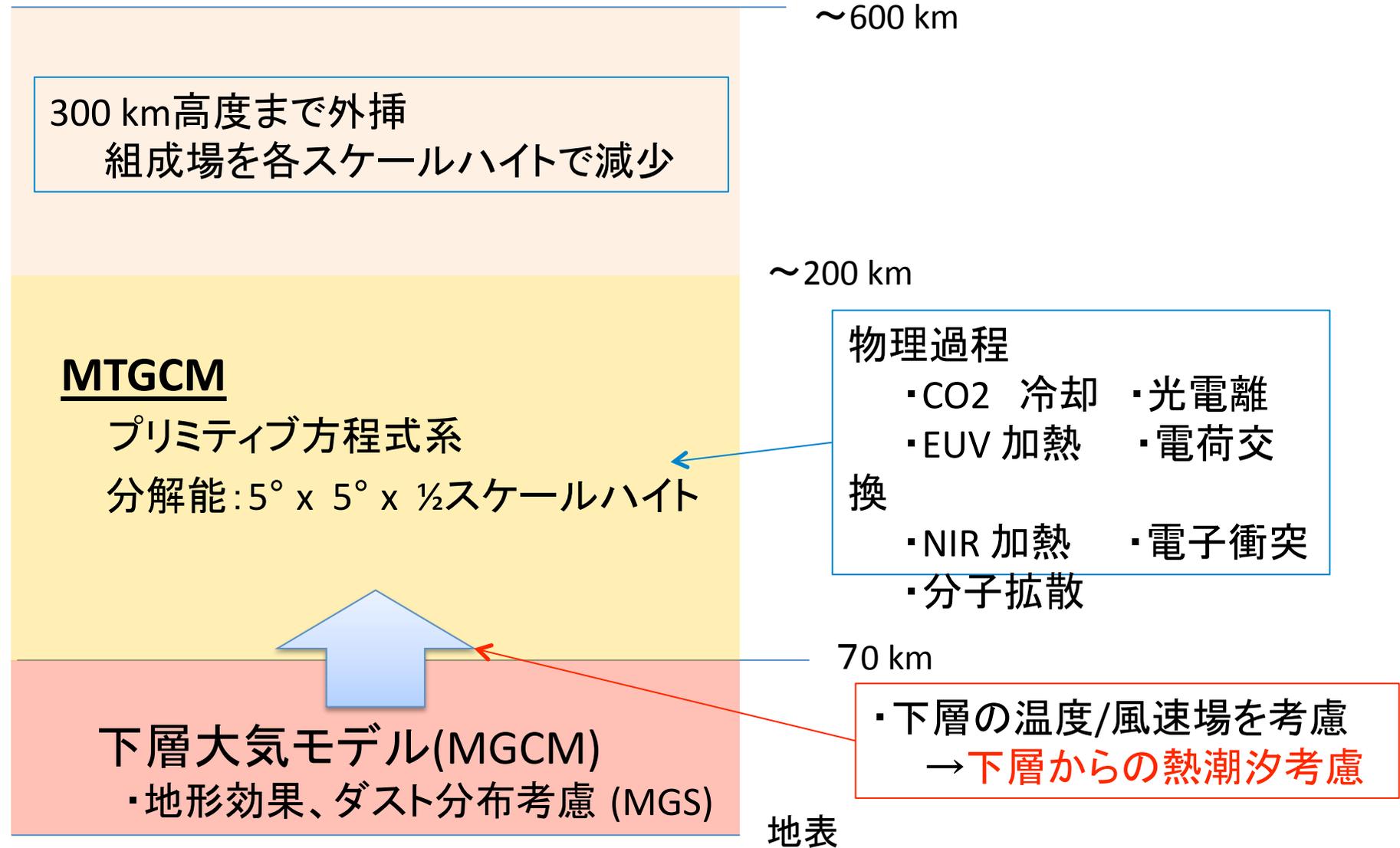
2. Model

■モデルの全体像



2.Model

■熱圏/電離圏モデル(MTGCM)



2.Model

■外気圏モデル(DSMC)

3 R_M

仮定

- Hot Oの生成反応
→ **解離再結合**
(O⁺を介しての散逸はVTGCM
からのO⁺生成率から議論)
- 散逸の基準
3 R_Mまで到達
- Hot / Cold Oの基準
熱速度の2倍

DSMC

モンテカルロシミュレーション

Unstructured Mesh

分解能: 5°×5°× 1/3 SH

200 km

Structured Mesh

分解能: 5°×5°×4 km (高さ)

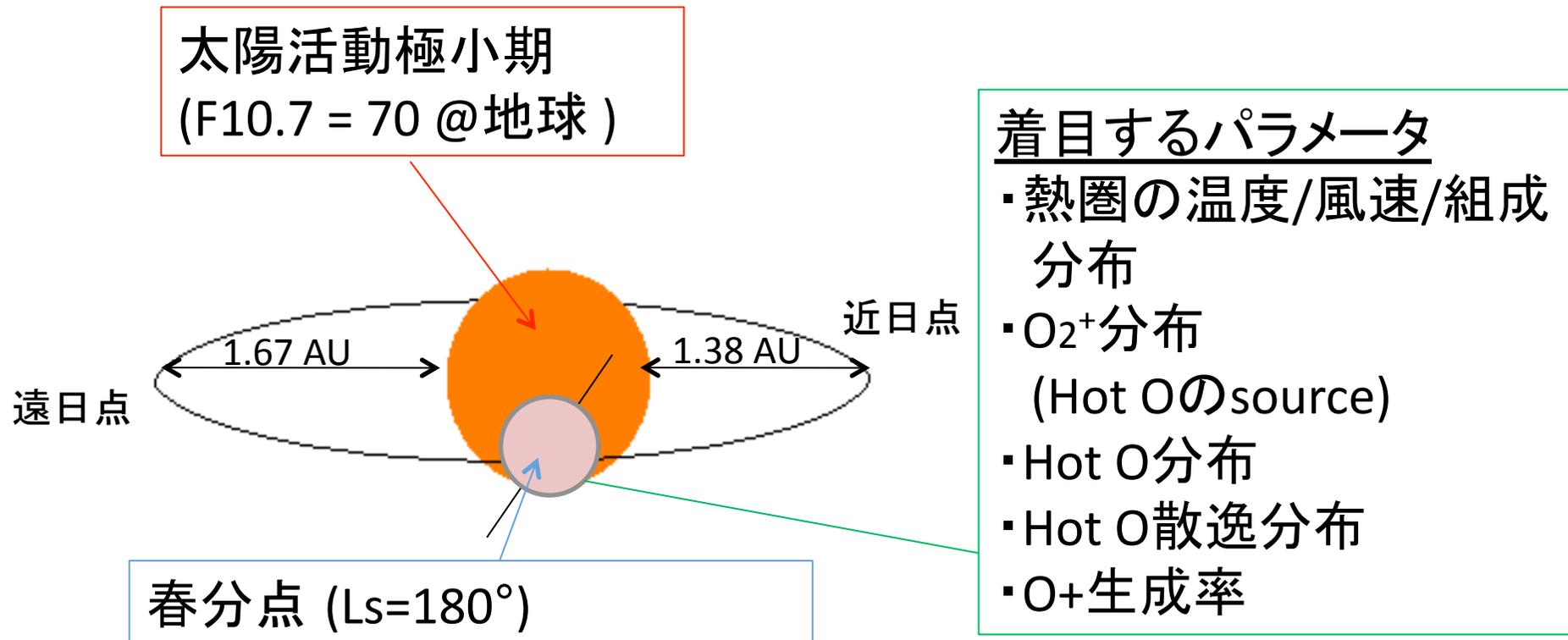
135 km

3. Spatial variation

[Valeille et al. 2009 (a)]

3.Spatial variation

■計算条件



3.Spatial variation

熱圏環境の変化

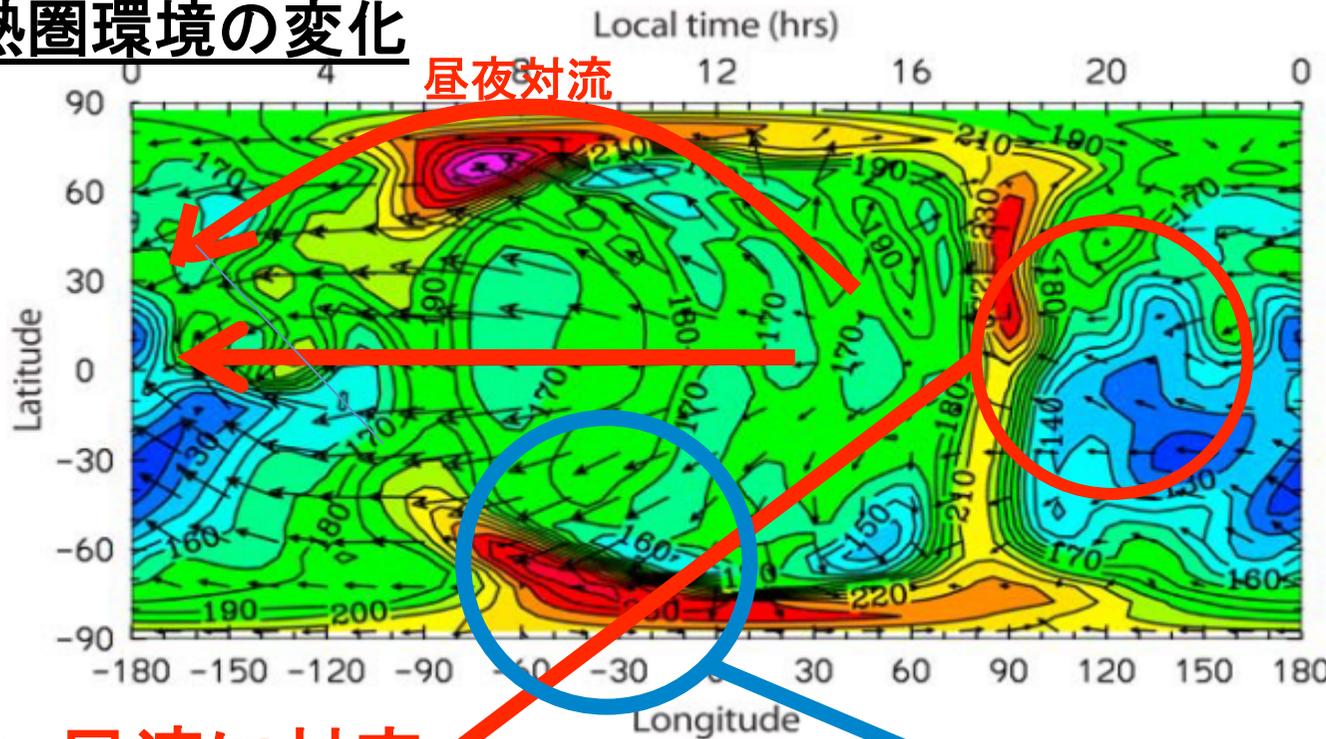


Fig. 温度/風速分布
(@約190 klm)
[Vaille et al. 2009(a)]

O: 風速に対応

CO₂: 温度に対応

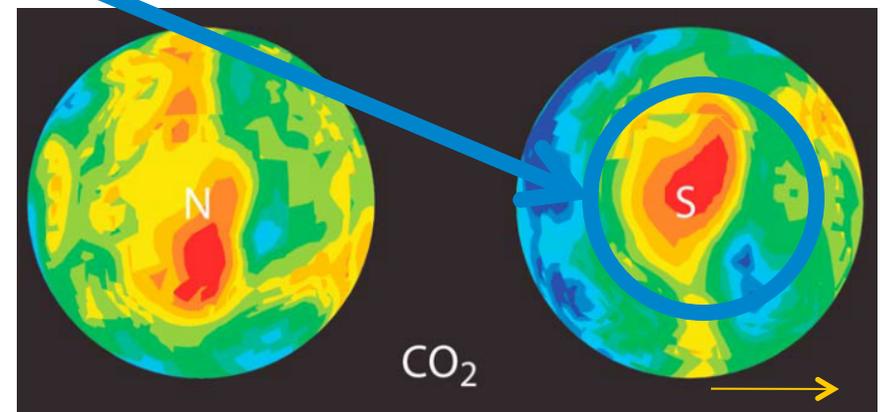
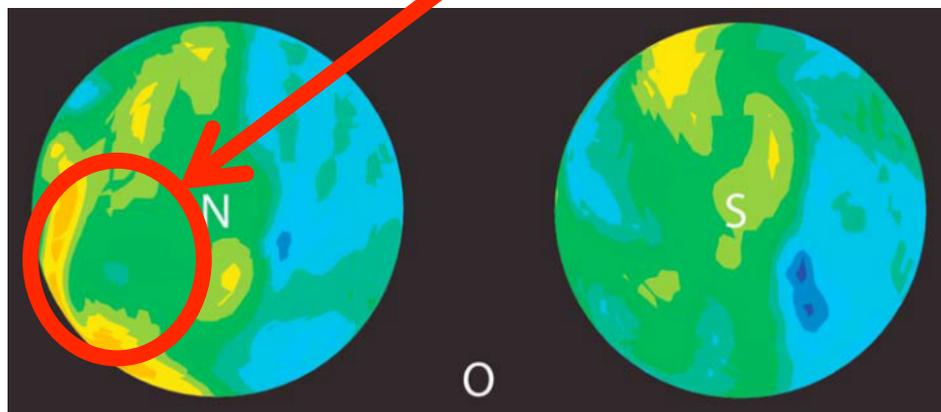
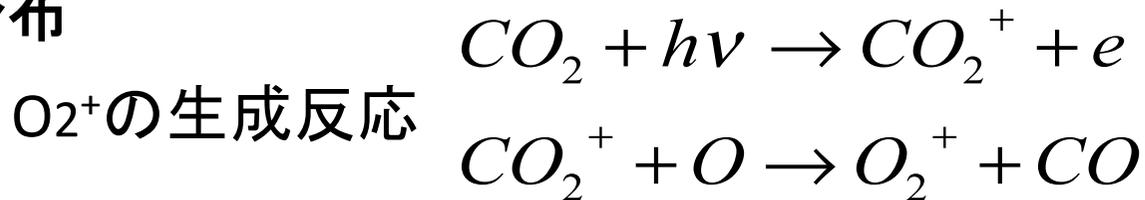


Fig. O(左), CO₂(右) 数密度分布 (@約190 klm) [Vaille et al. 2009(a)]

Sunward

3.Spatial variation

■ O₂⁺分布



極において密度最大(CO₂と同じ傾向)

→ CO₂の分布に強く依存している

昼側で
密度大

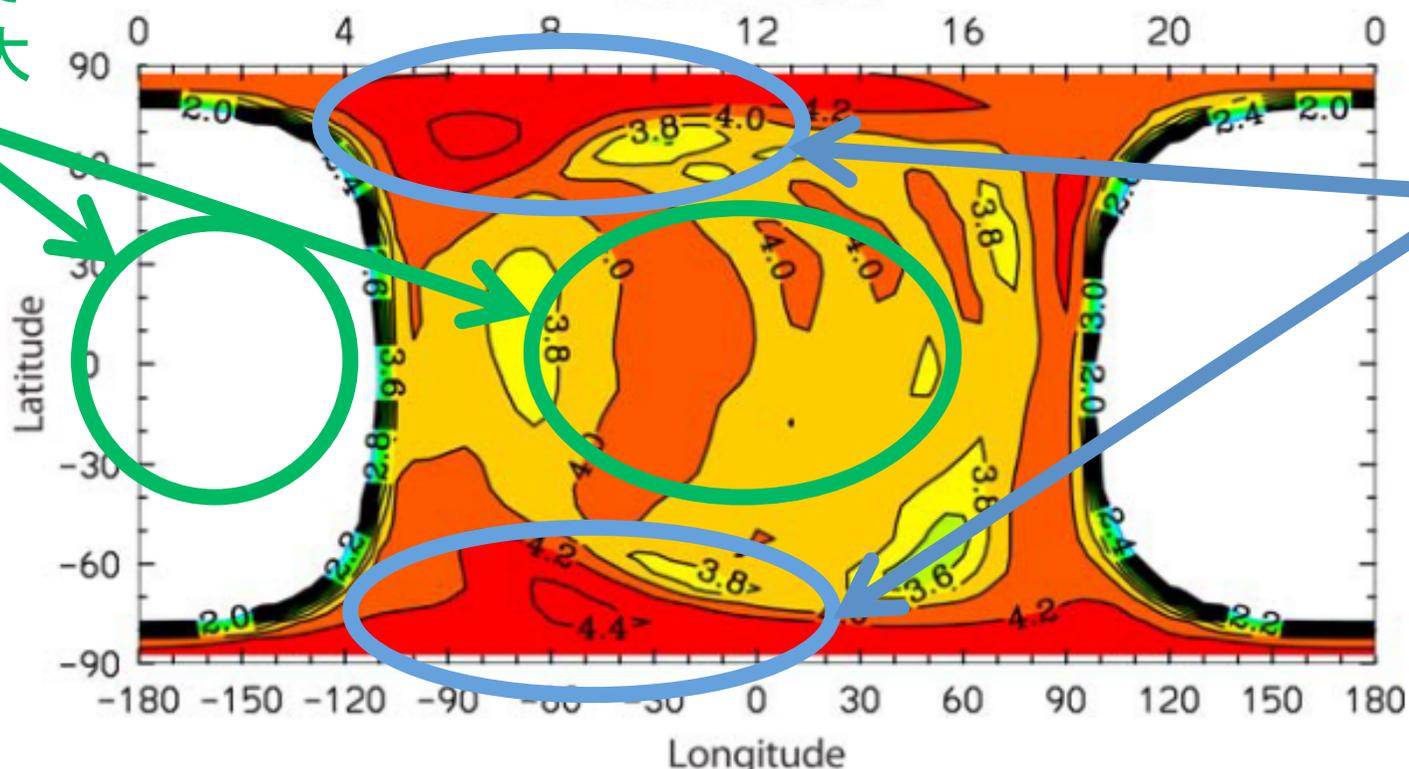
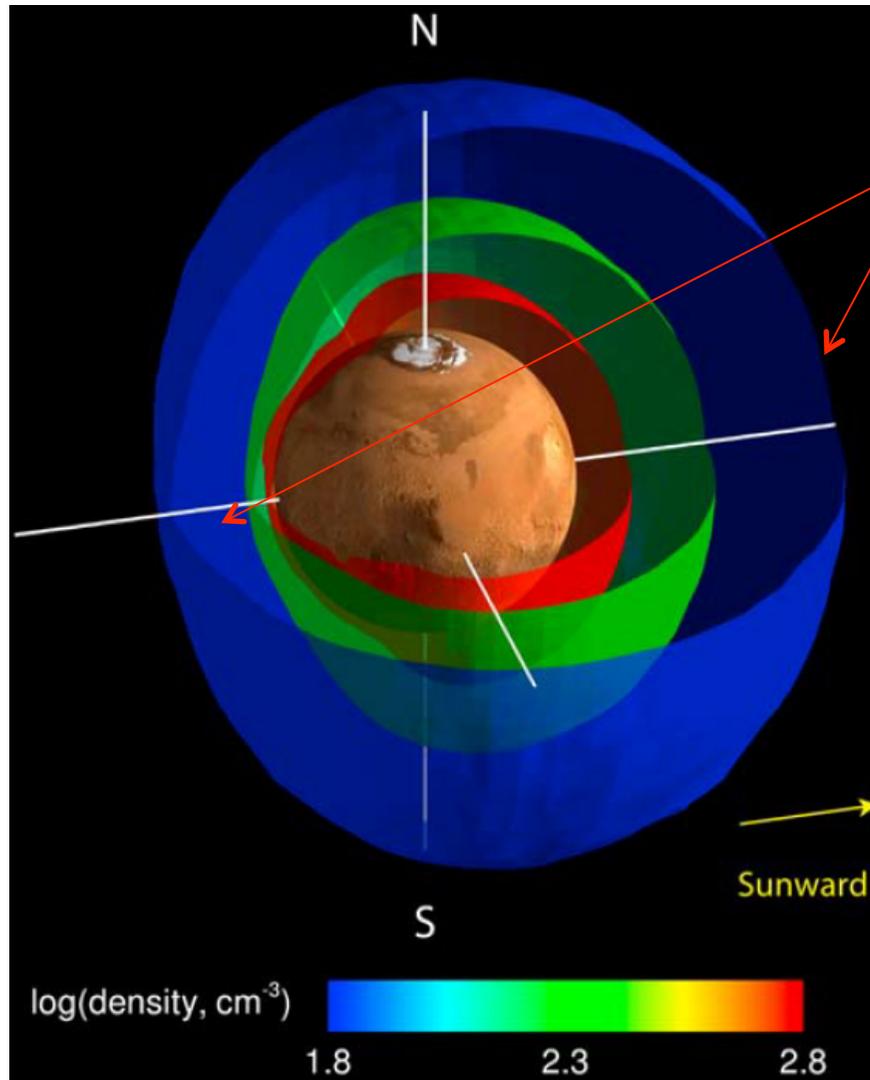


Fig. O₂⁺数密度分布 (@約190 klm) [Valeille et al. 2009(a)]

3.Spatial variation

Hot O分布



- Hot O 密度 (@7000 km)
Minimum: 約 12 cm^{-3}
(antisolar pointの南)
Max: 約 60 cm^{-3}
(subsolar point)
→ 昼に膨らんだ構造

- 昼夜間密度差の高度変化
Exobase: 30倍
7000 km: 5倍

昼夜対流による側輸送の影響
→ 熱圏風速場の影響

Fig. Hot Oの600, 200, 60 cm^{-3} の等密度面 [Vaille et al. 2009(a)]

3.Spatial variation

熱圏/電離圏構造のO散逸量への影響

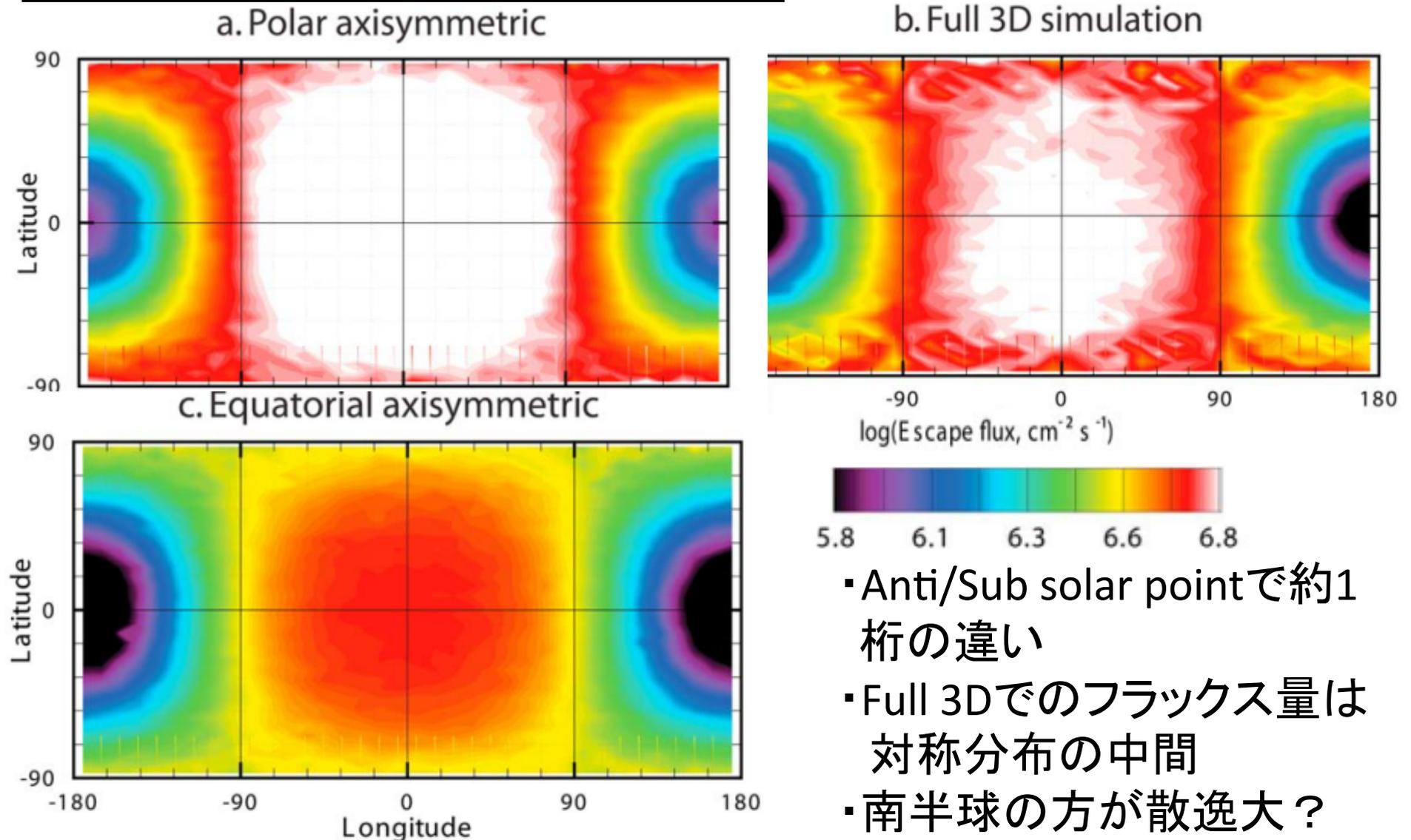


Fig. O散逸フラックス分布[Valeille et al. 2009(a)]

3.Spatial variation

O⁺生成率

総イオン化率(全球)

$$2.2 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$$

(先行研究 $1.5 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$
[Chaufray et al. 2007])



生成されたO⁺がすべて散逸しても、
解離再結合による散逸量
($6.0 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$)より一桁以上小さい

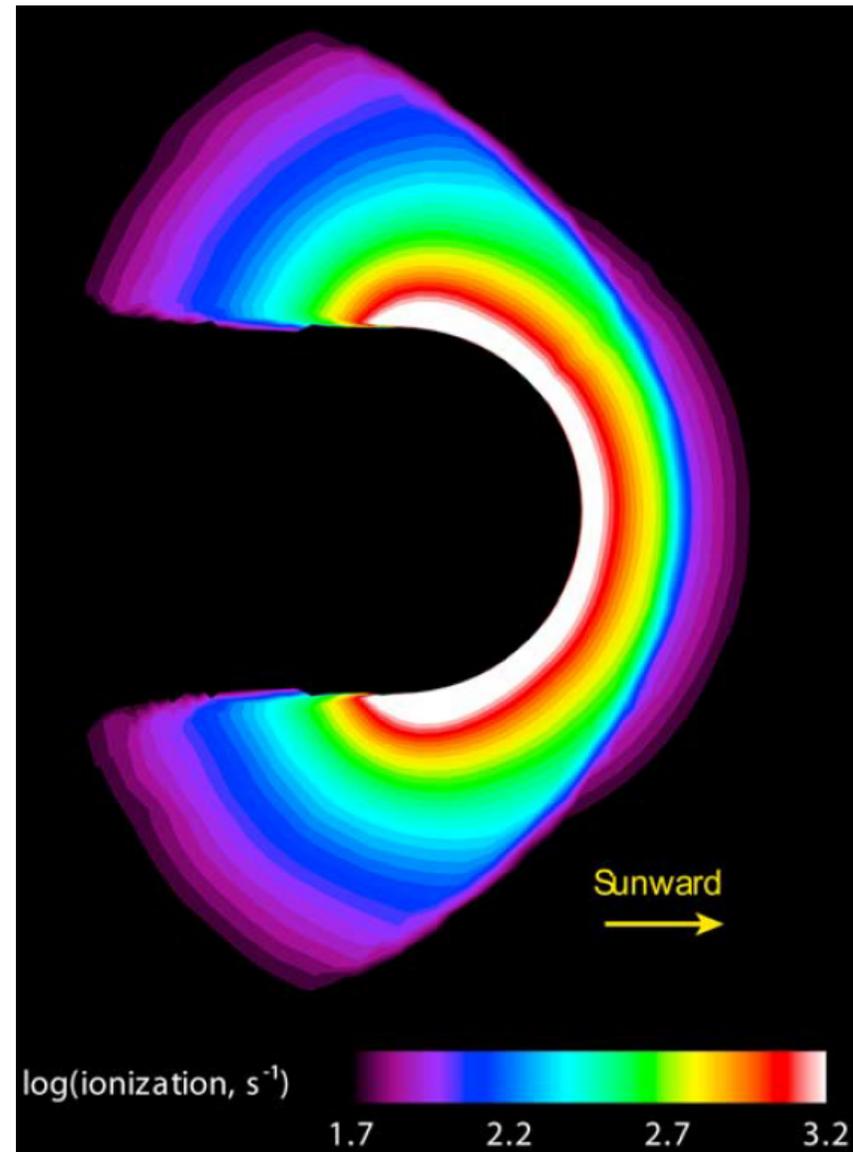


Fig. 赤道のO⁺生成率(s⁻¹)分布[Vaille et al. 2009(a)]

3.Spatial variation

■結論

- ・Hot O密度分布は昼側に膨らんだ構造
- ・Hot O分布はexobase付近では、熱圏の温度・組成場に依存
高度が高くなると熱圏起源の昼夜対流の影響が大きくなる
- ・解離再結合によるO散逸量: $6.0 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$
一方、 O^+ 生成率: $2.2 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$
→解離再結合がHot O散逸に支配的

4. Temporal Variation

- 太陽活動度(11年)/季節変動(2年)
- 過去の太陽光Flux変動 (3.5 Gyr)

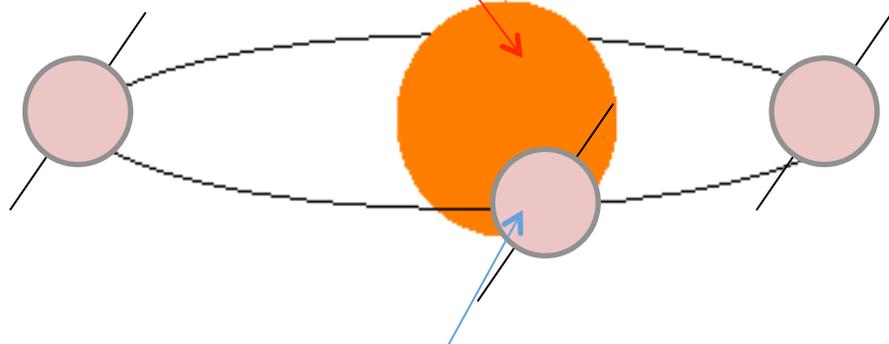
[Valeille et al. 2009 (b)]

4. Temporal variation

■ 計算条件

1. Solar cycle, 季節変動

EUV Fluxに**太陽活動**
極大/極小のものを使用
[Tobiska et al. 1991]



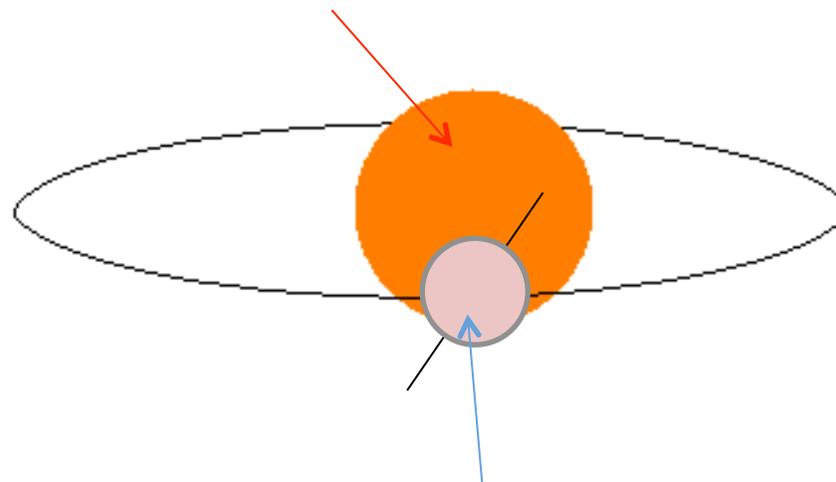
火星位置を変える
遠日点、分点、近日点
ダストの季節変化

2. 過去の太陽フラックス変動

EUV, IRフラックス定数倍 (太陽極小)

- **現在** (×1 EUV, ×1 IR)
- **2.7 Gyr前** (×3 EUV, ×0.79 IR)
- **3.6 Gyr前** (×6 EUV, ×0.79 IR)

[Ribas et al., 2005, Guinan and Ribas, 2002]



火星位置: 分点

4. Temporal variation

■ 下層大気環境の変化

O₂⁺分布

- ・ 太陽活動極大・極小(分点)
 - ピーク高度共に約122 kmで変化なし
 - 最大密度
 - $2.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (極小時)
 - $3.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (極大時)
- ・ 季節変動
 - ピーク高度差(近日点 - 遠日点)
+12 - 15 km

- ・ IR加熱がピーク高度変動に寄与
- ・ EUVによる光解離反応が密度に寄与

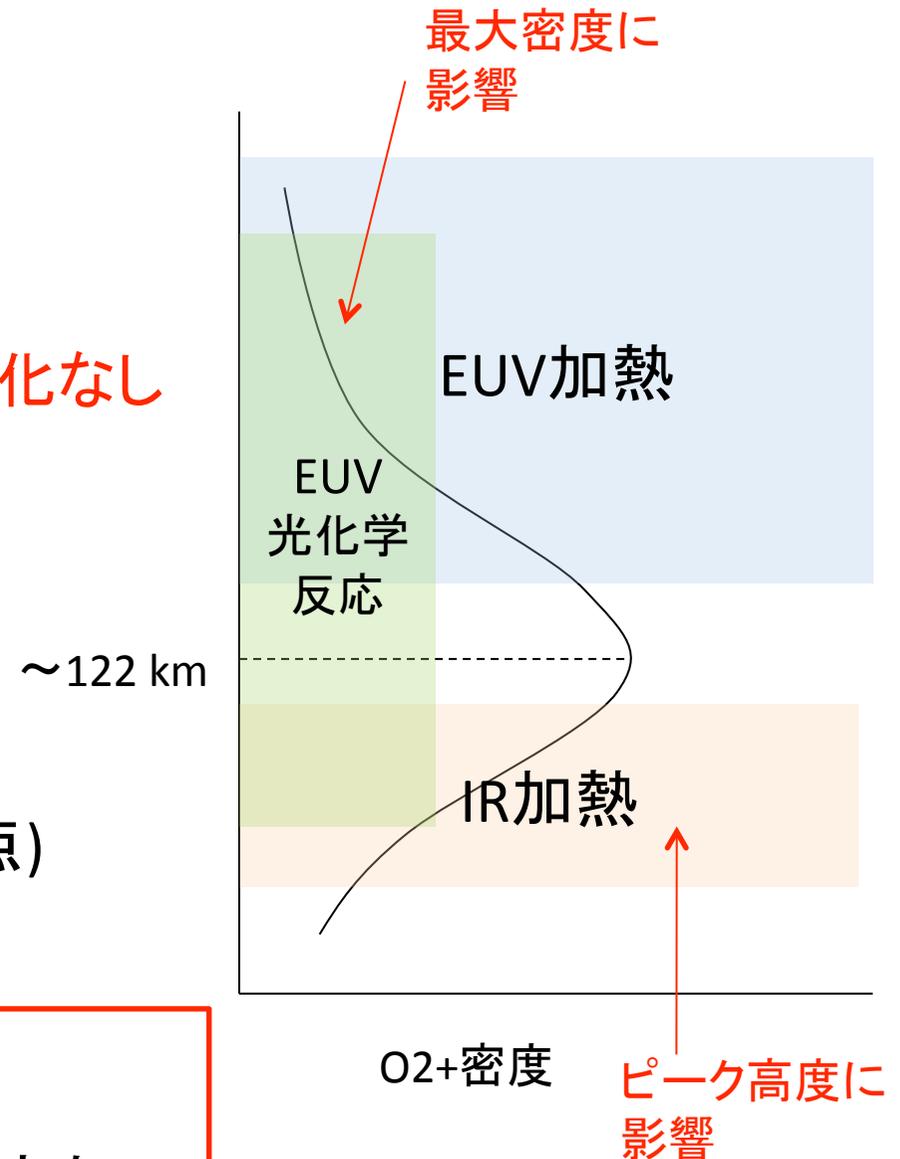


Fig. EUV/IRフラックスのO₂⁺への影響

4. Temporal variation

■ Hot O散逸量の太陽活動度/季節依存性

太陽活動：3 – 4倍 (@分点)

季節：1.6倍 (太陽活動極小)

現在の火星の最も極端なケースの比較：5.7倍

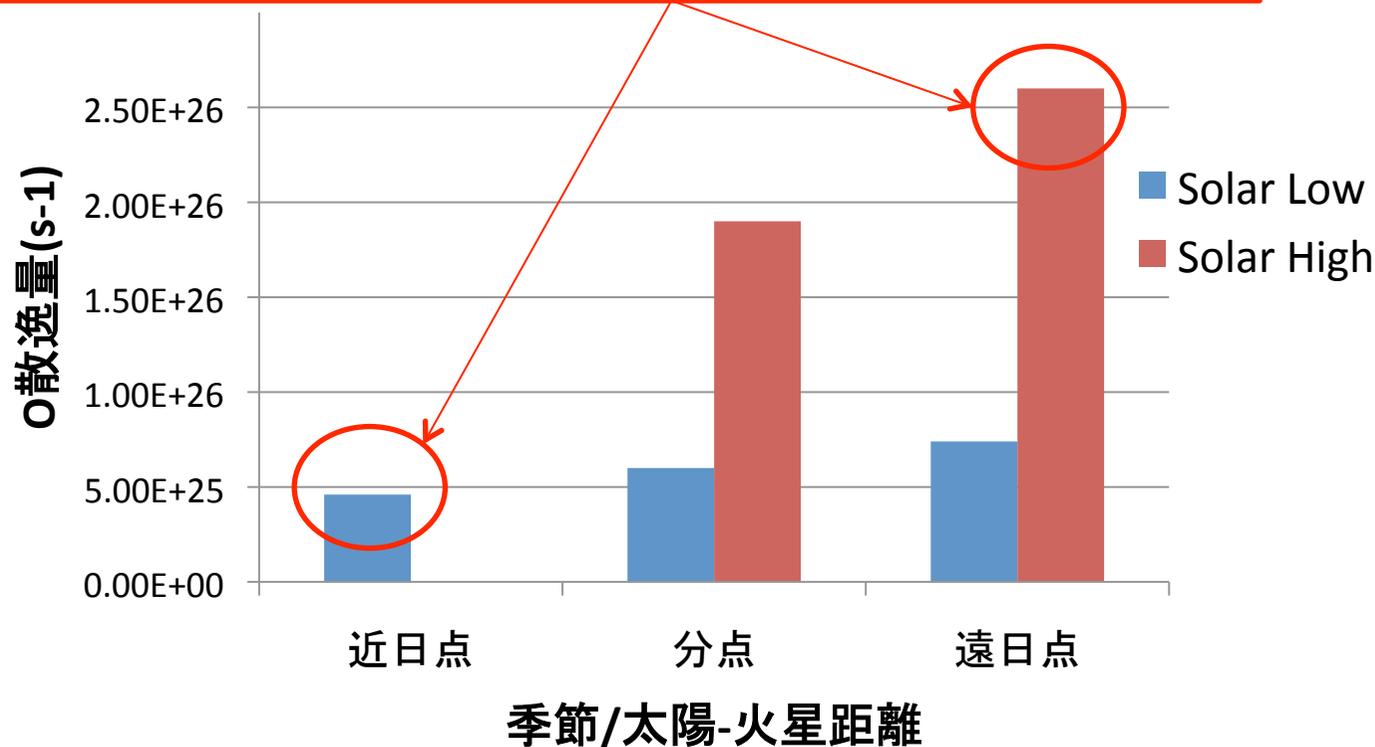


Fig. Hot O散逸量の太陽活動度/季節依存性 [Vaille et al. 2009(b)より作成]

4. Temporal variation

○散逸量の将来予測

方法

- Solar Low/Highに伴う散逸量変化をcosine fit
- 楕円軌道によるmodulationを考慮

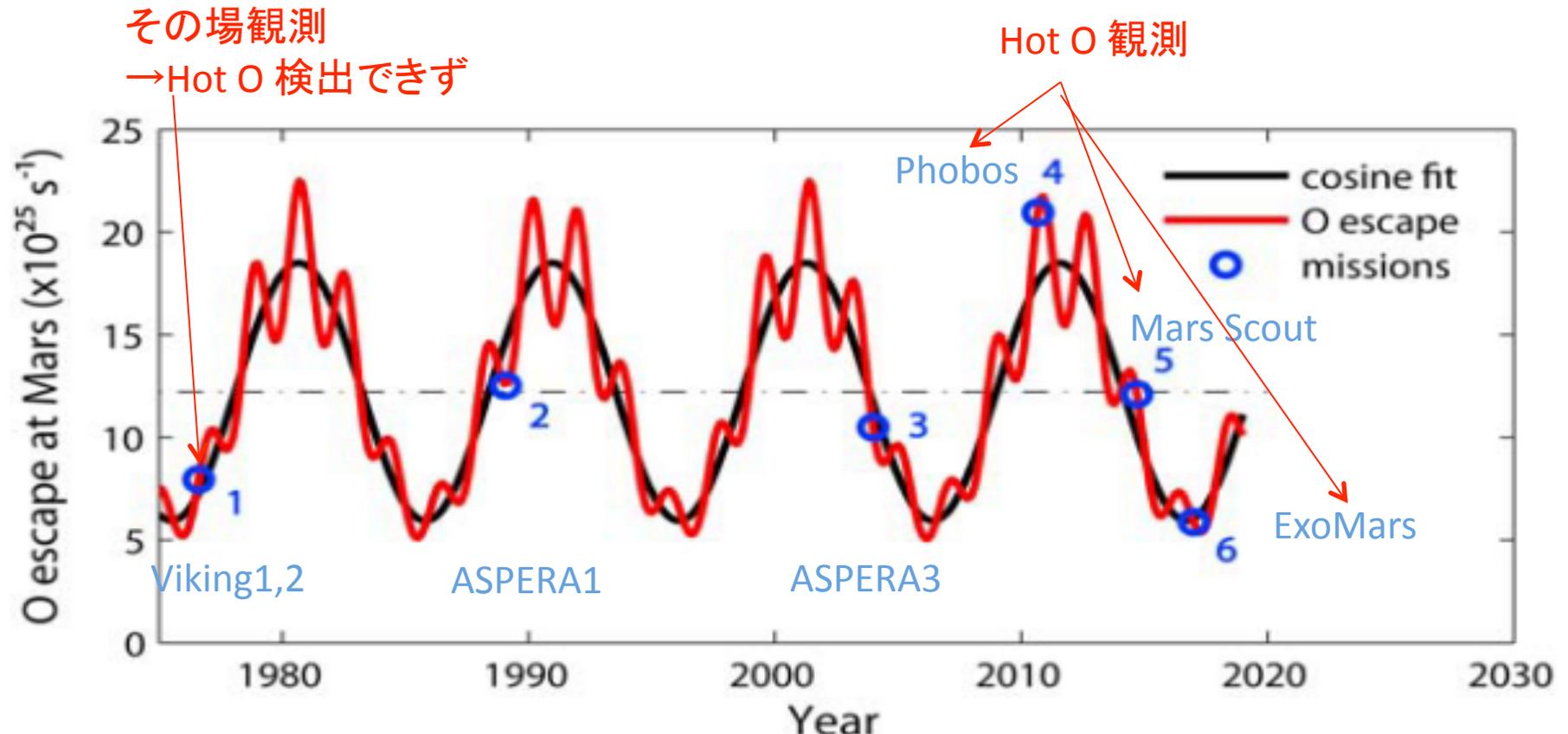


Fig. Hot O散逸量時間変動 [Vaille et al. 2009(b)]

4. Temporal variation

Hot O, O散逸量空間分布

過去の状態の方が
酸素コロナ密度, O
散逸量ともに大

酸素コロナ量
14倍増加

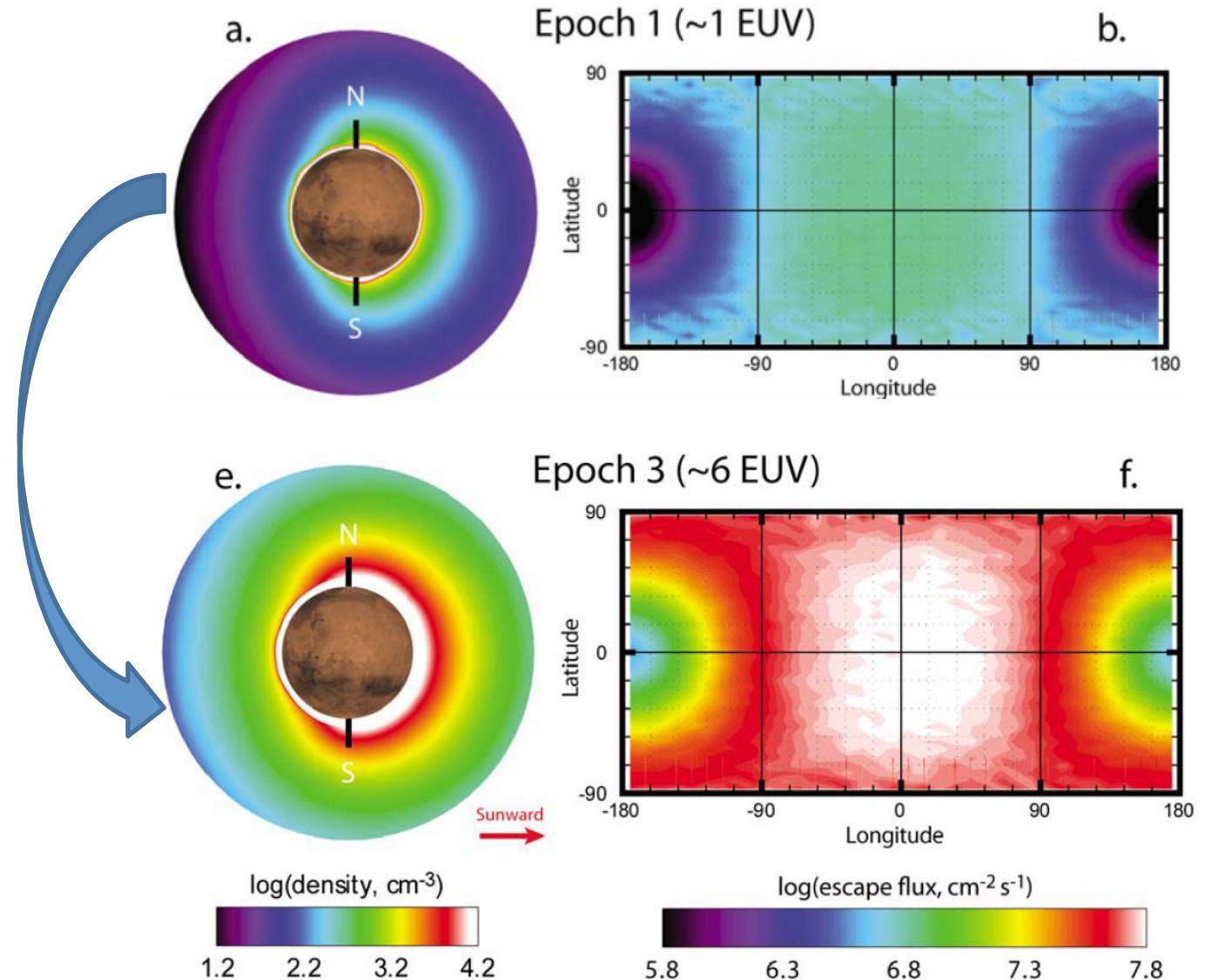
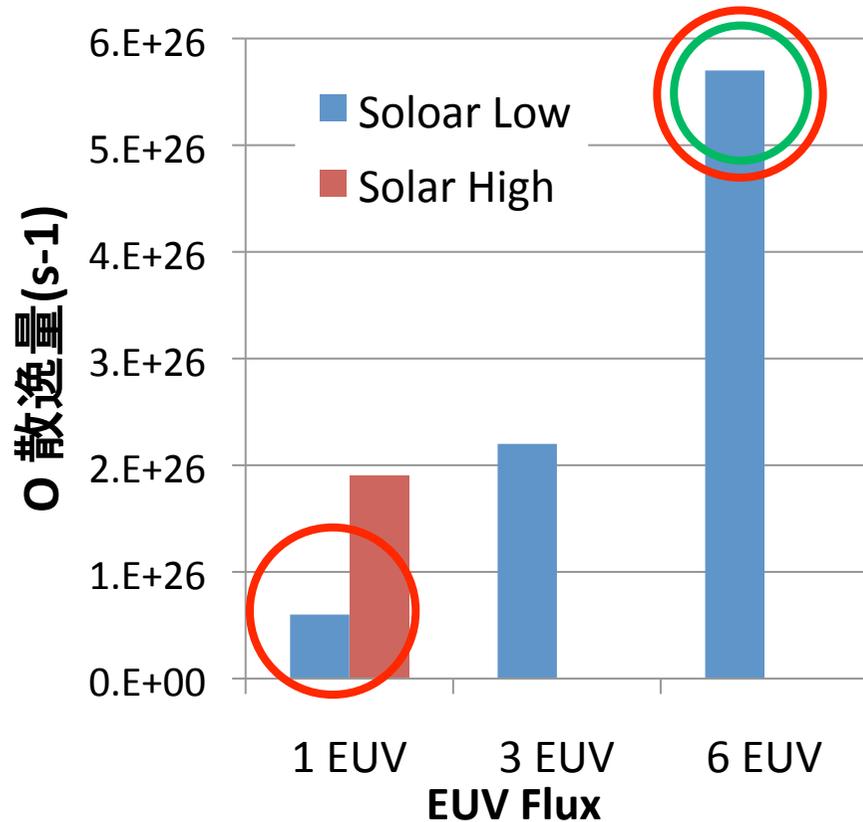


Fig. Hot O密度(左)、散逸フラックス(右)([Vaille et al. 2009(b)]

4. Temporal variation

■ O散逸量



O+生成率

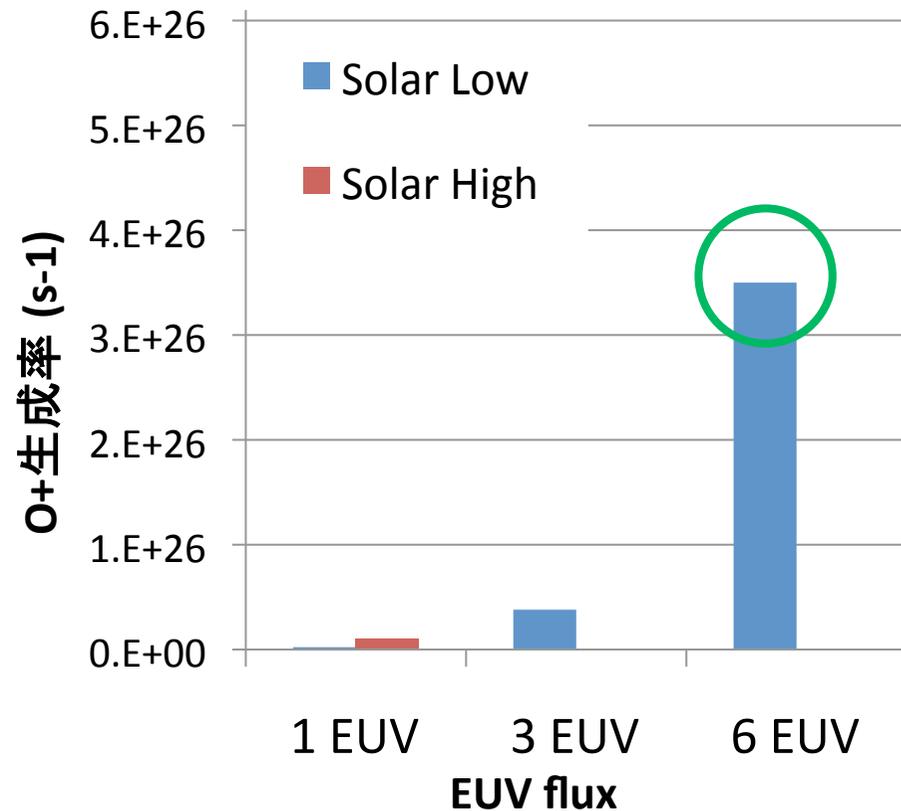


Fig. Hot O散逸量(左)とO+生成率(右)([Vaille et al. 2009(b)より作成]

- ・過去の散逸量(DR)は**現在の約9倍**
 - ・過去の方がO⁺による散逸の影響が強いことを示唆
- しかし支配的なプロセスは解離再結合

現在の火星環境での散逸量変化→2倍程度

4. Temporal variation

■ 結論

- ・現在の火星環境におけるO散逸量変化
季節変動: 約2倍
太陽活動: 約6倍
- ・過去の太陽光FluxによるO散逸量変化: 約9倍
- ・現在-過去の大気散逸量変化に対して、太陽活動度/季節依存性が無視できない
→過去の大気散逸の理解にも太陽活動/季節の考慮が必要
- ・3.5 Gyr前の散逸量は約 $5.7 \times 10^{26} \text{s}^{-1}$
→水のlossに換算して10 m程度

Appendix

Table 4. Variations in Magnitude and Spatial Distribution for Thermospheric/Ionospheric and Exospheric Parameters due to Seasons, Solar Cycle, and History^a

	Season (~2 yr)	Solar Cycle (~11 yr)	History (~3.5 Gyr)
<i>Variations in the Thermosphere</i>			
Temperatures ^b (ΔT)	small (20 K)	moderate (100 K)	important (190 K)
Spatial distribution ^c	important	none	small
Exobase height (Δz)	moderate (15 km)	moderate (15 km)	important (50 km)
Spatial distribution ^c	important	none	none
O density ^d (n/n_0)	moderate ($\times 1.7-1.8$)	moderate ($\times 1.8-2.0$)	important ($\times 13$)
Spatial distribution ^c	important	none	none
Ion peak height (Δz)	moderate (12 km)	none	none
Spatial distribution ^c	important	none	none
Electron density ^e (n/n_0)	small ($\times 1.2$)	moderate ($\times 1.5-1.6$)	important ($\times 2.4$)
Spatial distribution ^c	important	none	none
<i>Variations in the Exosphere</i>			
O density (n/n_0)	small ($\times \sim 1.2$)	moderate ($\times 3$)	important ($\times 14$)
Spatial distribution ^c	small	none	small
O escape (ϕ/ϕ_0)	small ($\times 1.6$)	moderate ($\times 3-4$)	important ($\times 6-9$)
Spatial distribution ^c	small	none	none
O ⁺ production (χ/χ_0)		moderate ($\times 4-5$)	important ($\times \sim 160$)
Spatial distribution ^c	small	none	none

^aSeasons, comparing aphelion to perihelion; solar cycle, comparing solar low to solar high; history, comparing epoch 1 to 3.

^bResults for neutral temperature could be extended to electron and ion temperature if they are assumed tied *Fox et al.* [1995, also private communication, 2008].

^cSpatial distribution refers to the angular distribution around the planet in the frame associated with the Sun.

^dCO₂ density and O mixing ratio can be inferred from the results for O density.

^eAt the ion peak rather than at the exobase altitude.