

火星勉強会

HELIOSARES Projectの紹介

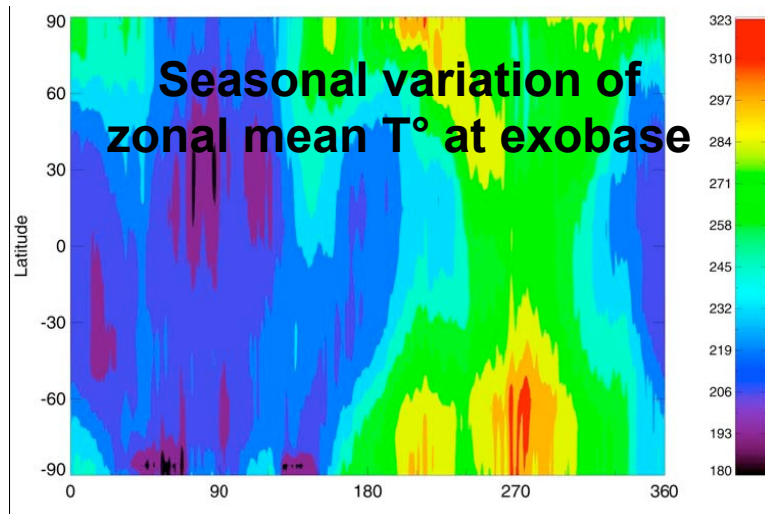
担当・八木

LATMOS / IPSL, CNRS, France

HELIOSARES Project とは

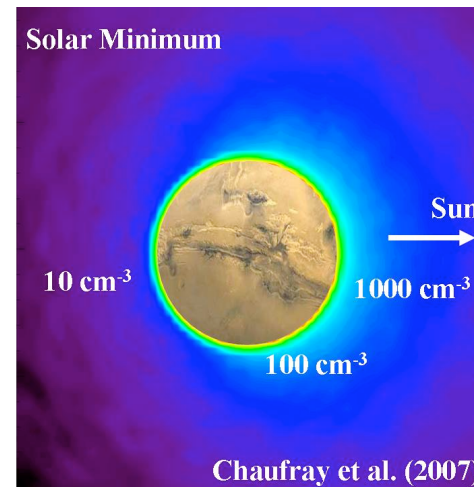
火星における磁気圏・外圏・電離圏結合モデルの構築を目的とするプロジェクト

Thermosphere/Ionosphere

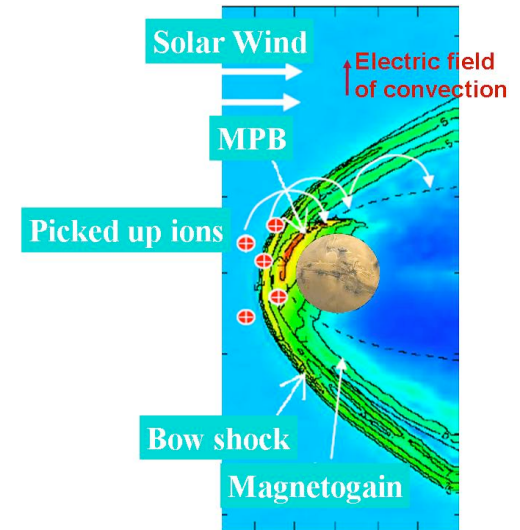


Gonzalez-Galindo et al. (2009)

Exosphere



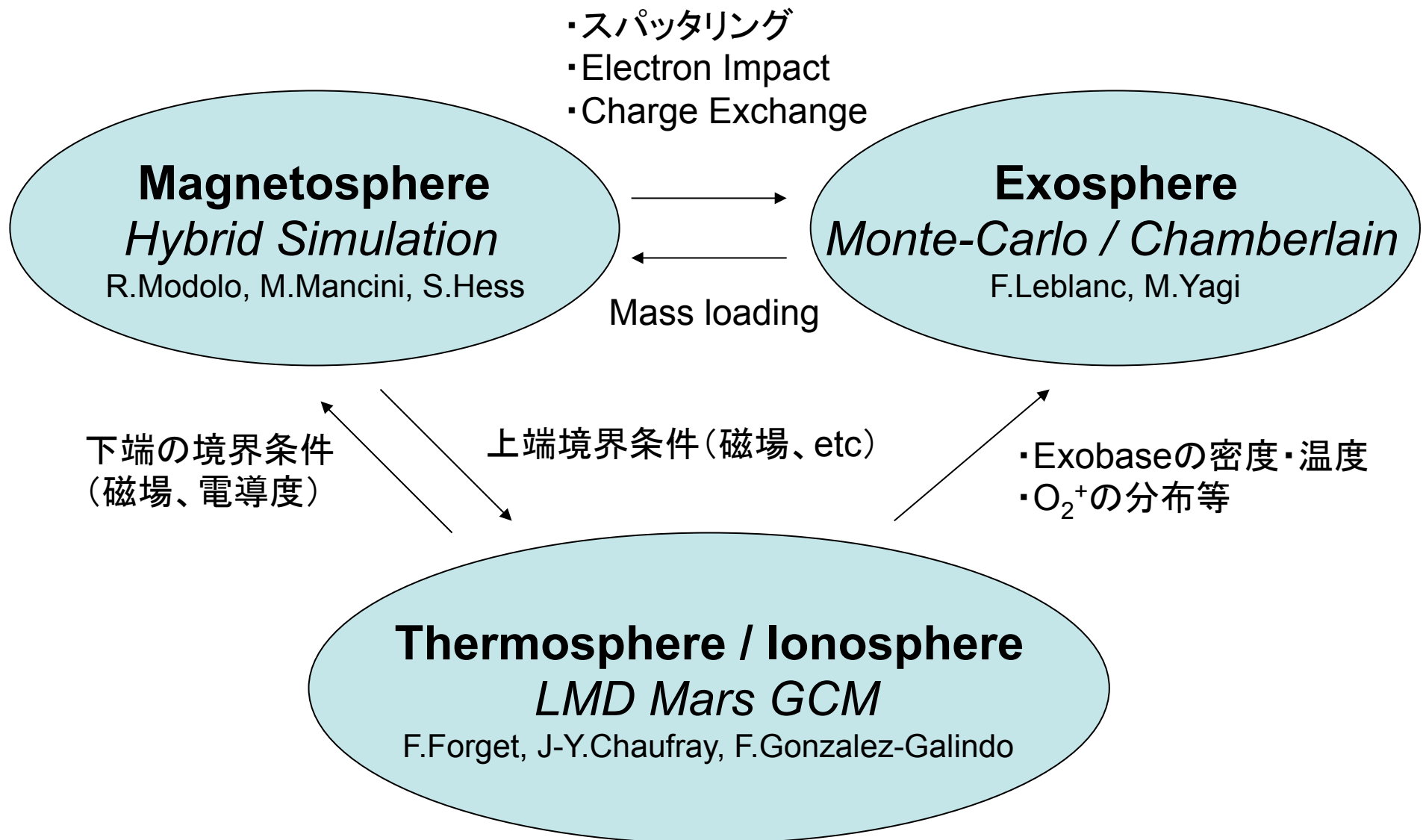
Magnetosphere



Modolo et al. (2005)

- ・大気流出量の評価 → 大気進化
- ・Maven観測との比較

火星大気の相互作用系





The MAVEN Science Instruments



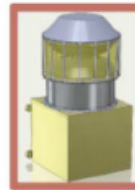
Mass Spectrometry Instrument



NGIMS

*Neutral Gas and Ion
Mass Spectrometer;*
Paul Mahaffy, GSFC

Particles and Fields Package



STATIC



SEP

*SupraThermal And Thermal Ion
Composition;* Jim McFadden, SSL

Solar Energetic Particles; Davin
Larson, SSL

Remote-Sensing Package



IUVS

*Imaging Ultraviolet
Spectrometer;* Nick
Schneider, LASP



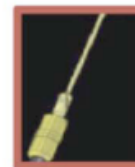
SWEA



SWIA

Solar Wind Electron Analyzer;
David Mitchell, SSL
Christian Mazelle, IRAP

Solar Wind Ion Analyzer; Jasper
Halekas, SSL



LPW



MAG

Langmuir Probe and Waves, - EUV;
Bob Ergun, LASP

Magnetometer; Jack Connerney,
GSFC

The MAVEN instruments are all closely based on similar instruments that have flown on previous missions.

I. Magnetosphere

Magnetosphere Model

ベースとなるモデル:

イオンを粒子として扱い、電子を流体的に解くハイブリッドシミュレーション[Modolo et al., 2005; 2006]

ハイブリッドシミュレーションから得られるアウトプット

物理量：電磁場、電流 (イオン・電子)、密度、速度、温度、エネルギー (各イオン)、圧力 (動圧、磁気圧、静圧)、イオンの流出量

空間：2次元面、1次元プロット (高度、SZA、仮想軌道上)

時間：スナップショット、平均値、ある一点における時間変動

解像度：観測の解像度以下に落とし込む

Magnetosphere Model

本プロジェクトにおける改良点(テクニカル)

- ・空間解像度の向上 ($\Delta x: 130\text{km} \rightarrow \Delta x: 30\sim 40\text{km}$)
→ 電離圏との結合・磁気異常帯のinclude
- ・Fortran77 $\rightarrow$ Fortran2003
- ・MPIによるコードの並列化 (32CPU、64GB、3サーバー)
- ・その他、最適化等

	Grid	Δx [km]	# particles	CPU time [h]	Restitut. time[h]
sequential	130x250x250	130	60 millions	168	168
Tested	185x350x350	80	300 millions	2400	72
Expected	400x1000x1000	45	7 billions	32000	300

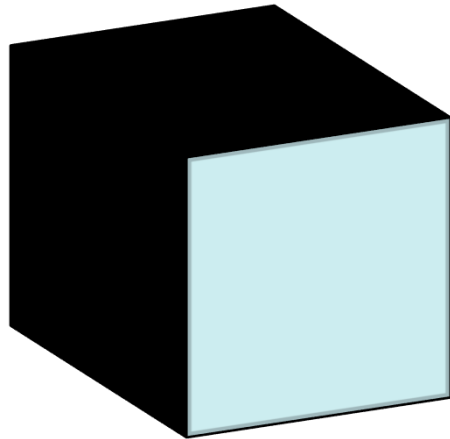
Magnetosphere Model

本プロジェクトにおける改良点(物理)

- ・太陽風プラズマ(H^+ , He^{++})
- ・中性大気コロナ(Krasnopol'sky (2003) → LMD-MGCM / Exosphere Model)
- ・中性大気コロナのイオン化(H , O , O_2 , CO_2)
 - ◇光電離
 - ◇電荷交換反応
 - ◇電子衝突
- ・電離圏の光化学反応
- ・磁気異常帯のInclude

コードの並列化

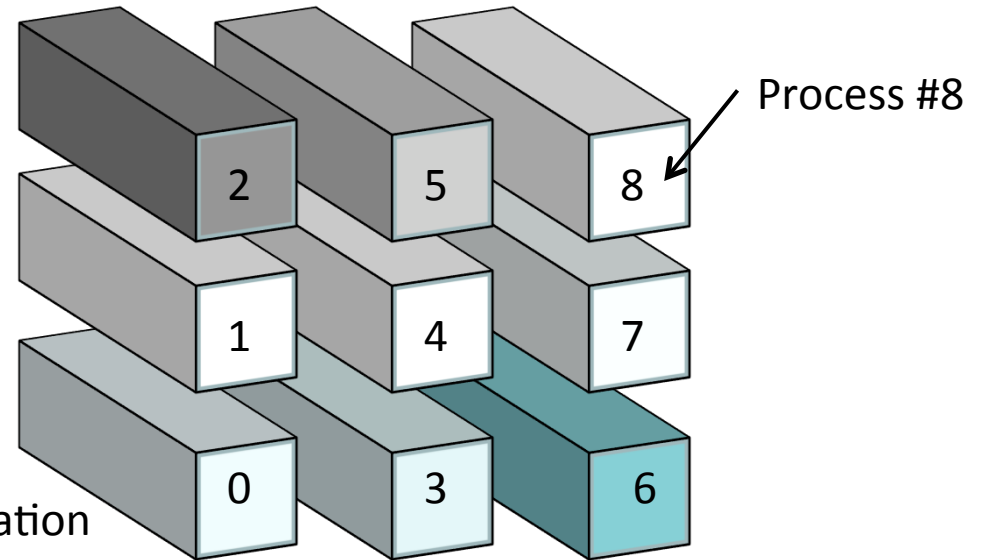
Global simulation domain



Split in sub-domains



When simulation
Ends, processes
information
are gathered

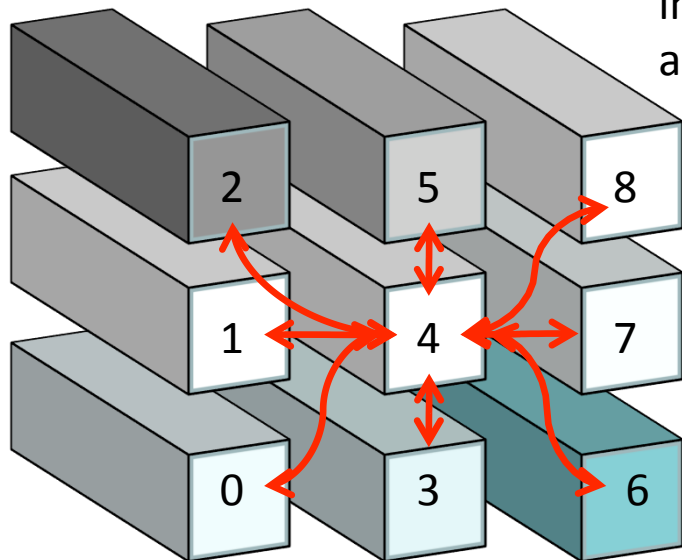


Temporal evolution of the simulation



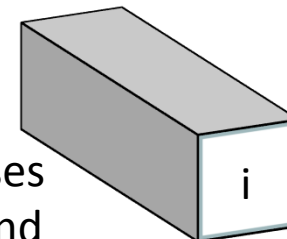
Process « i » is responsible for a sub-domain
(mini-simulation)

For $t=0$ to end  X simulations are computed
in parallel ☺ !



Example for process #4

At each time step, processes
exchange particles, field and
moments with neighbours' processes

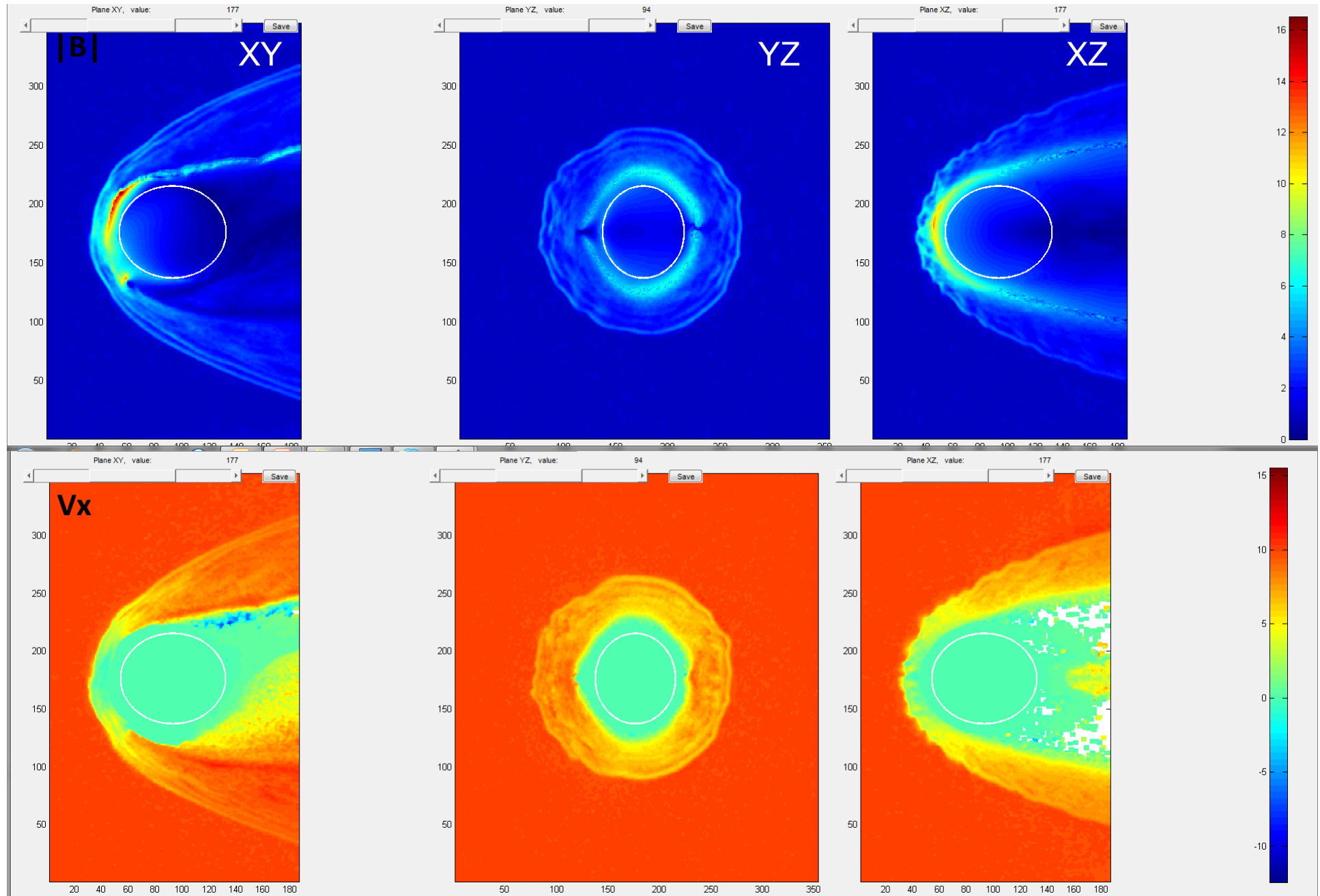


Ionospheric model

主な光化学反応テーブル

	Reactions	Rate coefficients	Column rate
1	$\text{CO}_2 + h\nu \longrightarrow \text{CO}_2^+ + e$	$\lambda < 902 \text{ \AA}$	1.24e^{+10}
2	$\text{CO}_2 + h\nu \longrightarrow \text{O}^+ + \text{CO} + e$	$\lambda < 650 \text{ \AA}$	1.09e^{+9}
3	$\text{O} + h\nu \longrightarrow \text{O}^+ + e$	$\lambda < 911 \text{ \AA}$	1.20e^{+8}
4	$\text{H} + h\nu \longrightarrow \text{H}^+ + e$	$\lambda < 911 \text{ \AA}$	1.00e^{+5}
5	$\text{CO}_2^+ + \text{O} \longrightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$	1.64e^{-10}	8.07e^{+9}
6	$\text{CO}_2^+ + \text{O} \longrightarrow \text{O}^+ + \text{CO}_2$	9.6e^{-11}	4.72e^{+9}
7	$\text{O}^+ + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$	1.1e^{-9}	6.28e^{+9}
8	$\text{O}_2^+ + e \longrightarrow \text{O} + \text{O}$	7.38e^{-8}	1.36e^{+10}
9	$\text{CO}_2^+ + e \longrightarrow \text{CO} + \text{O}$	$3.88\text{e}^{-7}(300/T_e)^{0.5}$	7.52e^{+9}

Some results...



II. Exosphere

Exosphere Model

ベースとなるモデル: Chaufray et al. (2007)

Cold(熱的)な粒子: Chamberlain model

Hot(非熱的)な粒子: Test Particle Monte-Carlo

本プロジェクトにおける改良点

- Full 3D model

 - LMD-MGCMを使用、火星の自転の考慮等

- Multi-Species (H, O, CO, CO₂)

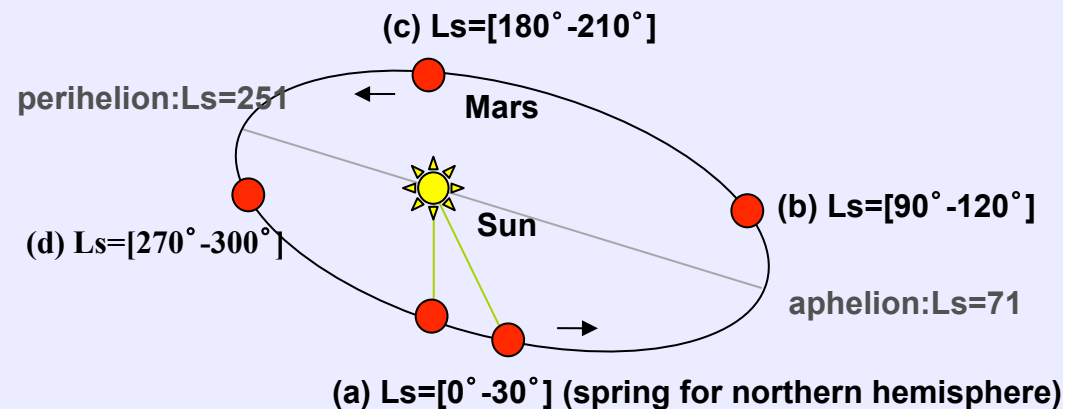
- 衝突項の改良

 - 大気流出に影響?

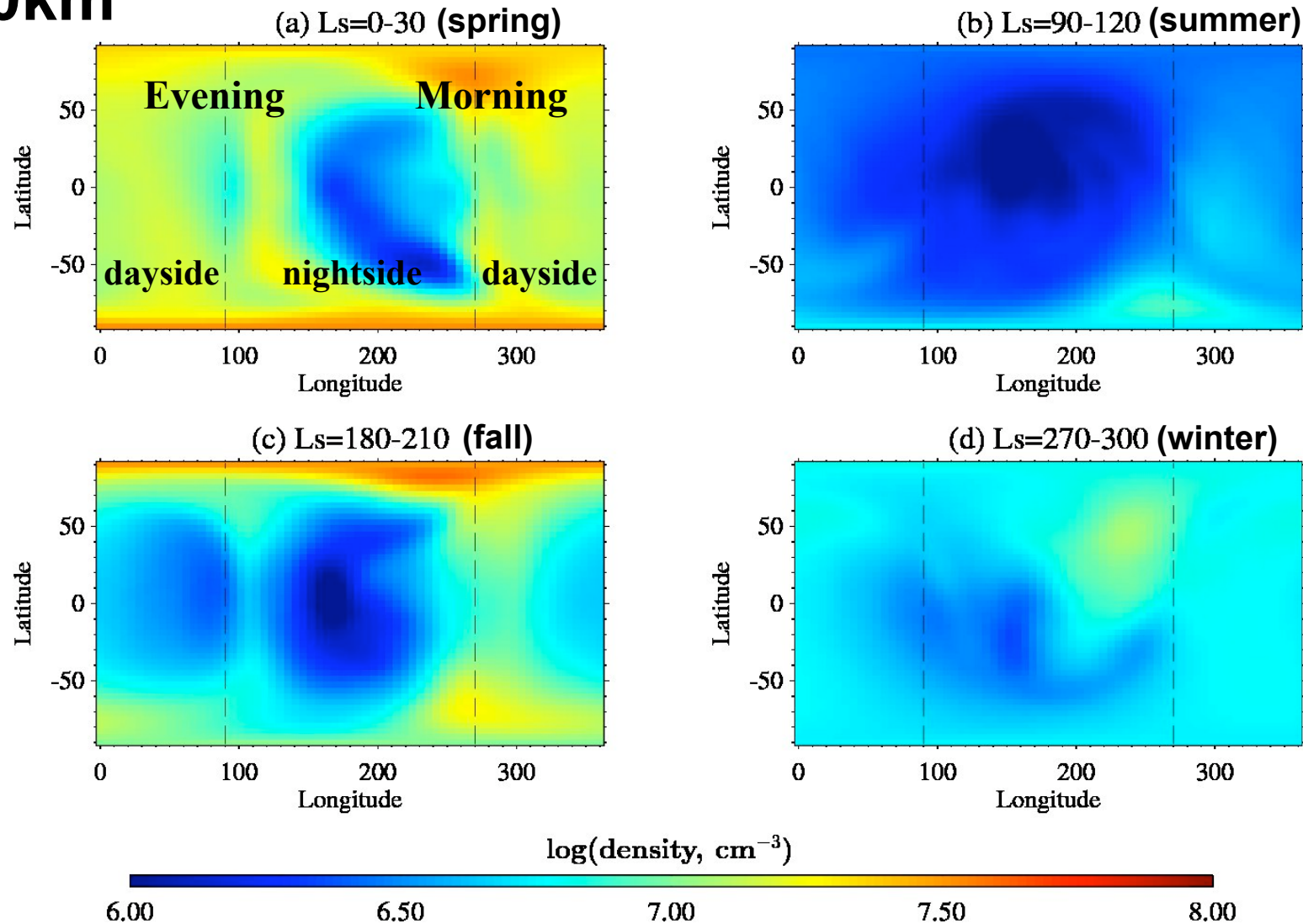
Thermal component : Chamberlain model

Assumption

- ある高度 (Critical Altitude) より上層 : 完全無衝突
- ある高度 (Critical Altitude) より下層 : 完全衝突 (速度分布はMaxwellian)
 - 位相空間密度が粒子の軌道に沿って保存
 - ⇒ 外圏の密度分布はCritical Altitudeの速度分布を積分することで導出
- Critical Altitude : 本研究では200kmに設定
- 密度、温度分布はLMD-MGCM(Gonzalez-Galindo, 2009)を使用
- 粒子 : H, O, CO, CO₂

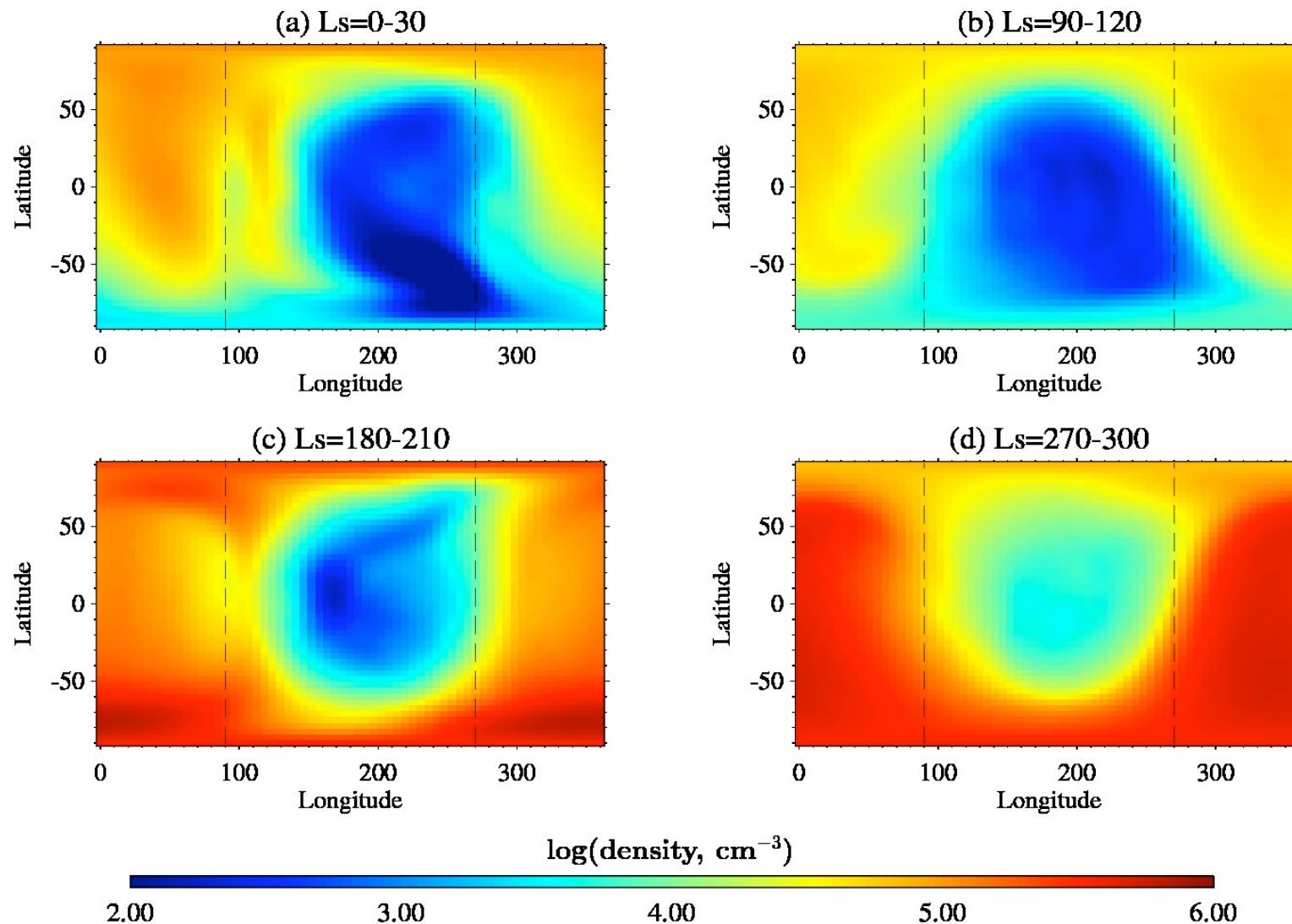


Seasonal variation of O density at 300km



- ・細かい構造が多く、特に朝方のTerminator付近の密度が高い
- ・平均密度は1年を通して1桁程度の変動

Seasonal variation of CO₂ at 300km



- ・Oに比べ細かい構造が少なく、分布はSZAに依存する形になっている

Non-thermal model : Monte-Carlo simulation

主なO (non-thermal) のソース:

- 解離性再結合 (O_2^+) $O_2^+ + e^- \Rightarrow O^* + O^*$
- スパッタリング
- 電荷交換反応

O_2^+ の分布: LMD-MGCM [Gonzalez-Galindo et al., 2009]:

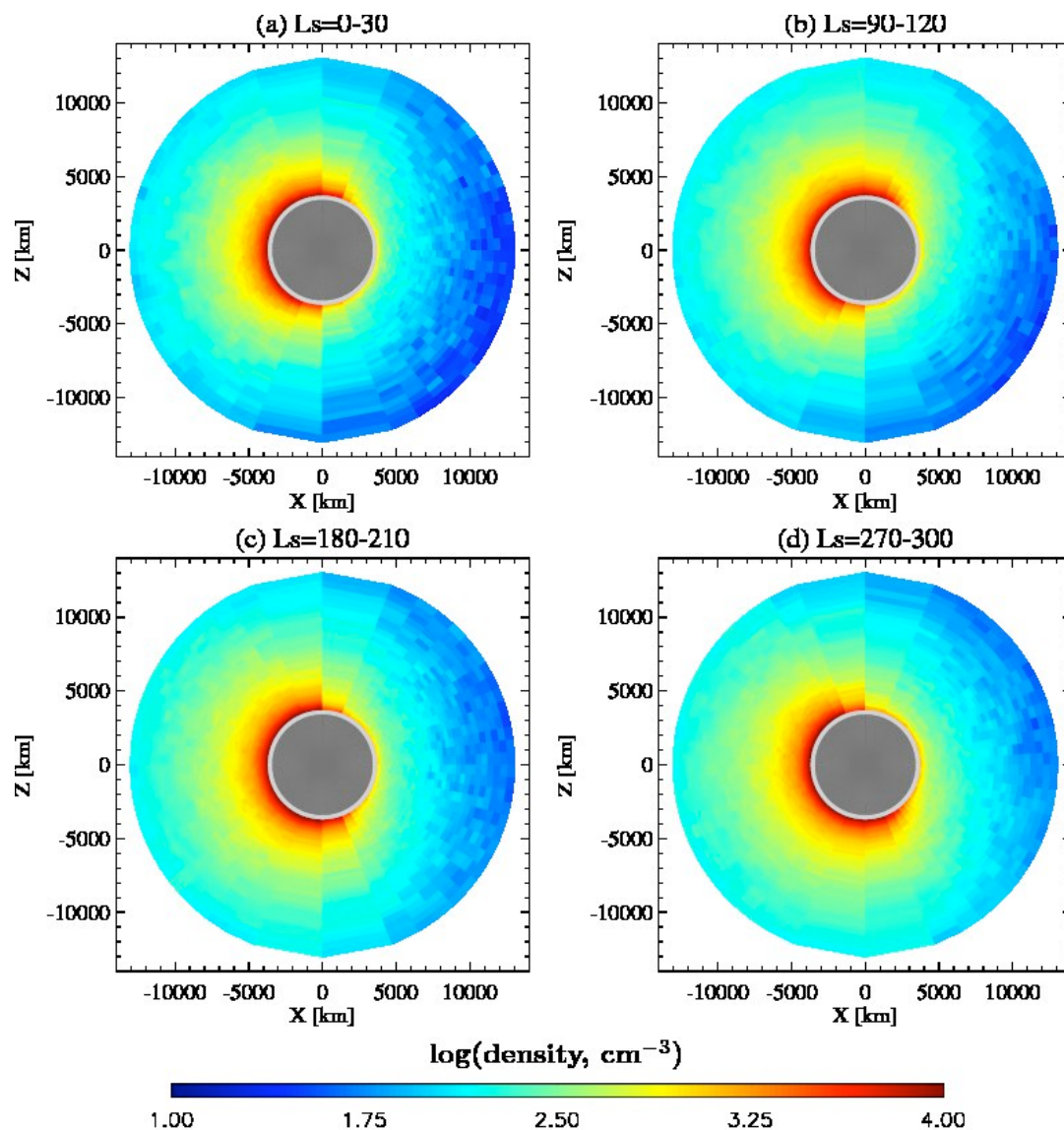
- 光化学平衡を仮定*
 $CO_2^+ + O \Rightarrow CO + O_2^+$,
 $CO_2 + O^+ \Rightarrow CO + O_2^+$

衝突の評価:

120–300km
>300km

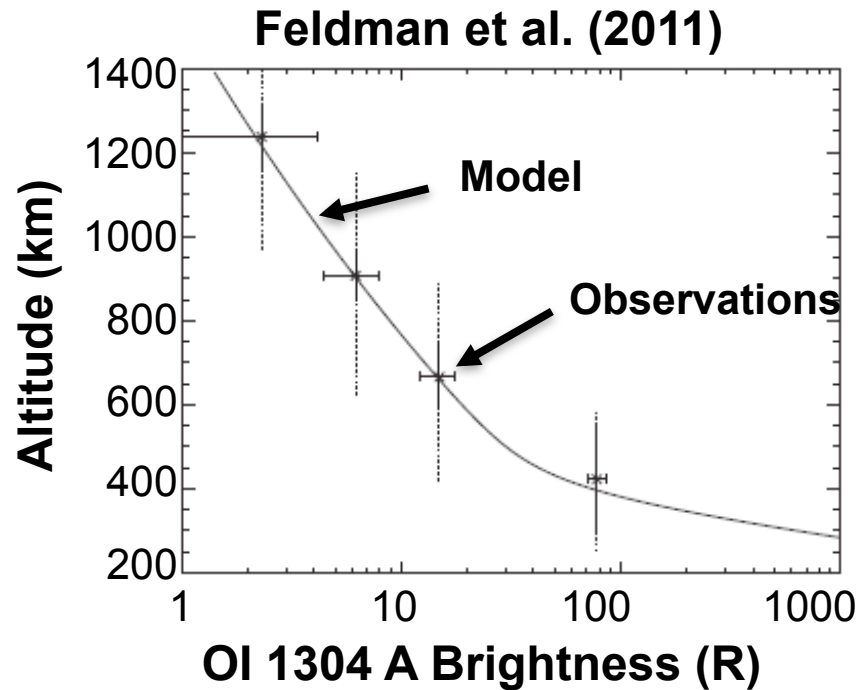
背景大気 (O、 CO_2) と衝突
無衝突 (Ballistic or escaping)

Hot O density (子午面)

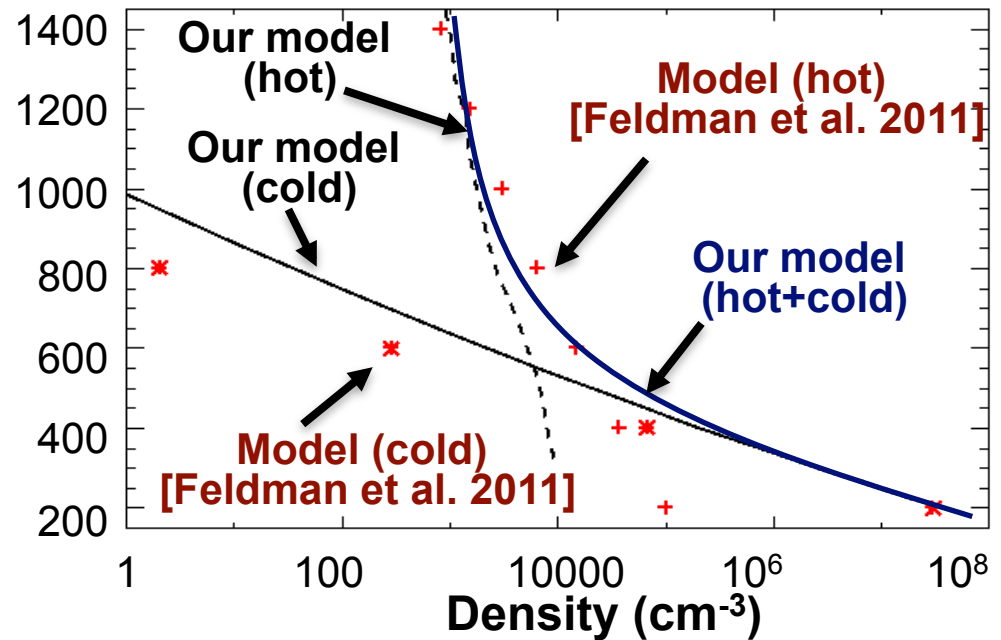


- ・細かい構造が少なく、密度は単純にSZAに依存
- ・季節変動／昼夜非対称
- ・高いスケールハイト
～400km-500km
- ・ $4R_M$ においても 100cm^{-3} 程度の酸素原子が存在(昼側)

Rosetta-Aliceとの比較



Ls=190°, SZA=68°, evening side



Ls=180-210°, SZA=68°, evening side

- ➔ 値は概ね一致
- ➔ スケールハイトはFeldmanモデルの方が低い

スケールハイト (hot O) : 4-500km(our model), 2-300km(Feldman, 2011)

Thermosphere/Ionosphere

Ionosphere/Thermosphere Model

ベースとなるモデル:

LMD-Martian Global Circulation Model [Forget et al., 1999;
Gonzalez-Galindo et al., 2009]

- ・流体力学、化学／光化学反応、加熱(太陽放射等)、冷却(輻射、衝突等)

本プロジェクトにおける改良点

- ・水素原子の正確な記述(diffusion等)
- ・イオンを光化学平衡ではなく独立して解く(transport)
 - 低高度では影響なし、170km以上に影響?
- ・電磁場項の導入、磁気異常帯のInclude

Ionosphere/Thermosphere Model

基礎方程式：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho_k}{\partial t} &= -\nabla_{\mathbf{H}} \cdot (\rho_k \mathbf{V}_k) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho_k w_k) + S_k \\
 \frac{\partial \mathbf{V}_k}{\partial t} + w_k \frac{\partial \mathbf{V}_k}{\partial z} + \left(\zeta_k + \frac{qB_z}{m_k} + 2\Omega \right) \mathbf{z} \times \mathbf{V}_k + \nabla_{\mathbf{H}} (V_k^2) + v_{kn} (\mathbf{V}_k - \mathbf{V}_n) + \frac{1}{\rho_k} \nabla_{\mathbf{H}} P_k - \frac{q}{m_k} (\mathbf{E}_{\mathbf{H}} + \mathbf{B}_{\mathbf{H}} \times w_k \mathbf{z}) &= \mathbf{0} \\
 \frac{\partial w_k}{\partial t} + v_{kn} (w_k - w_n) + g + \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P_k}{\partial z} - \frac{q}{m_k} (E_z + [\mathbf{B}_{\mathbf{H}} \times \mathbf{V}_k] \cdot \mathbf{z}) &= 0 \\
 \frac{\partial T_k}{\partial t} &= -\nabla_{\mathbf{H}} \cdot (T_k \mathbf{V}_k) - \frac{\partial}{\partial z} (T_k w_k) + \frac{1}{3} T_k [\nabla_{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{V}_k + \frac{\partial w_k}{\partial z}] + \Sigma_k \\
 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E}
 \end{aligned}$$

$$\rho_e = \frac{m_e}{m_k} \rho_k$$

$$\mathbf{U}_e = \mathbf{U}_k - \frac{m_e}{\mu_0 q} \frac{\nabla \times \mathbf{B}}{\rho_e}$$

$$\mathbf{E}_{\mathbf{H}} = \frac{m_e}{q} \left[v_{en} (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_n) + \frac{1}{\rho_e} \nabla_{\mathbf{H}} P_e \right] + \mathbf{B}_{\mathbf{H}} \times w_k \mathbf{z}$$

$$E_z = \frac{m_e}{q} \left[v_{en} (w_e - w_n) + \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial P_e}{\partial z} + g \right] + [\mathbf{B}_{\mathbf{H}} \times \mathbf{V}_k] \cdot \mathbf{z}$$

Numerical Model

Different time scales

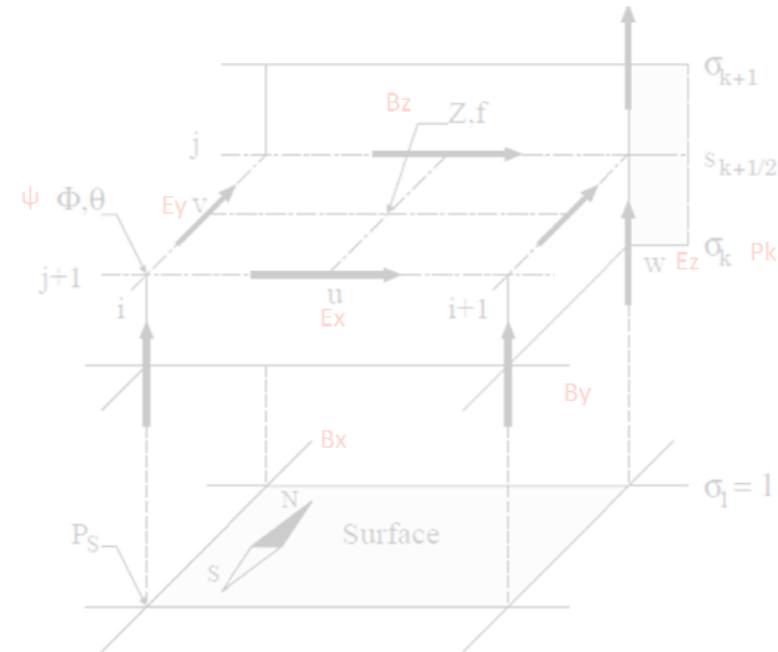
$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_k \times \vec{V}_n) - \nabla \cdot (\rho_k \times (V_k - V_n)) - \nabla \cdot (\rho_k \times (w_k - w_n)) + S_k - L_k$$

Transport by atmospheric movement ~ 45 s

Transport due to plasma movement (in atmospheric frame) ~ 5 s

Sources terms ~ 30 min

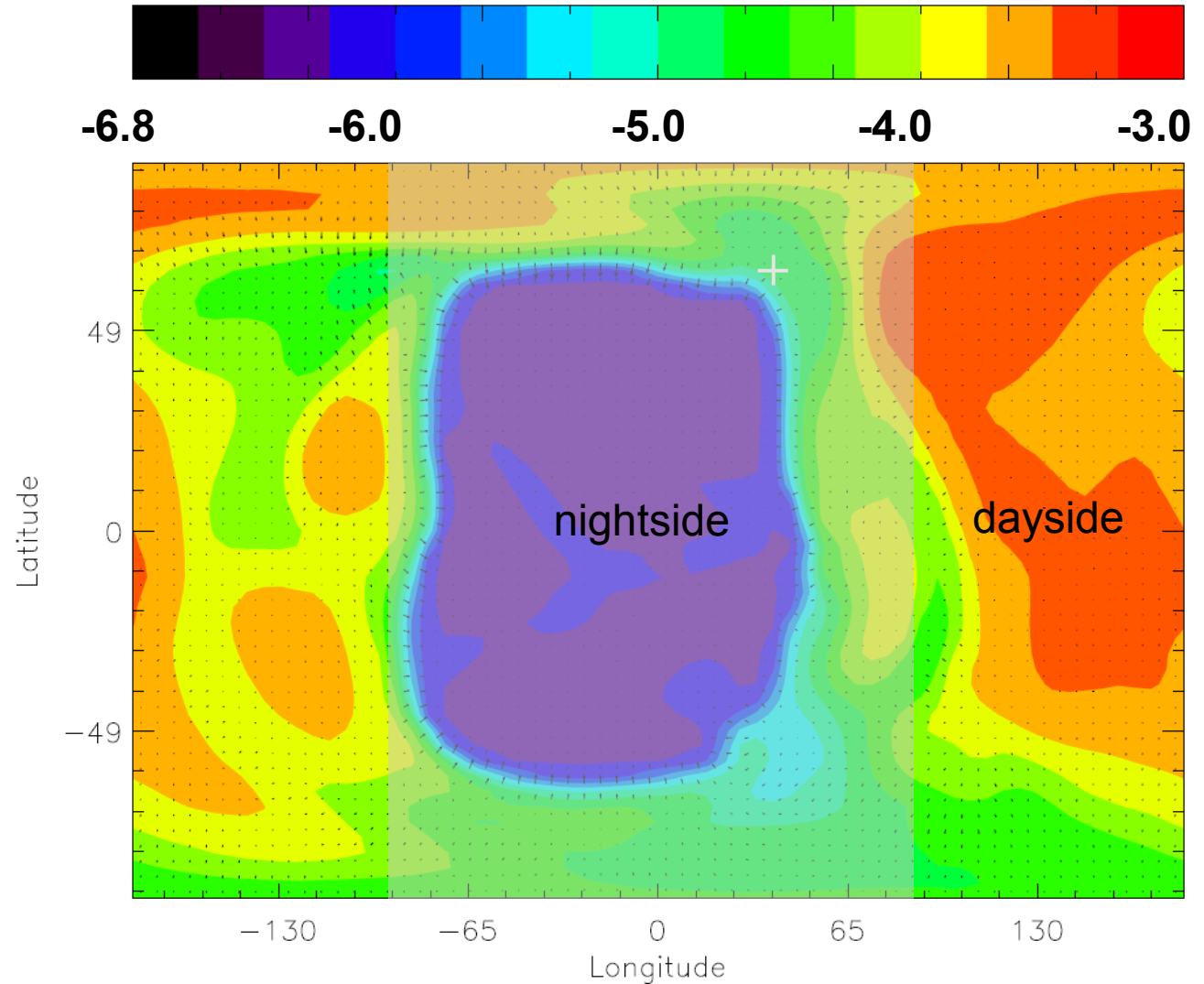
- ・各プロセスのタイムスケールに合わせて解くタイミングを変える
- ・水平方向／垂直方向の分離
- ・高度方向は実距離ではなく圧力で定義



Spatial grid for ions and neutral variables in the GCM-Ionosphere code

Snapshot of O_2^+ mass mixing ratio

- 強い昼夜非対称
- 水平方向の速度場に関しては、密度勾配の強いTerminator付近で大きくなる
- ただし細かい構造の物理的意味に関しては、複雑すぎて全てを説明することは難しい



Pressure level of 10^{-7} Pa, $L_s = 0$