

第30回火星勉強会 論文紹介

Three-dimensional, multifluid, high spatial
resolution MHD model studies of the solar
wind interaction with Mars
[Najib et al. 2011 JGR]

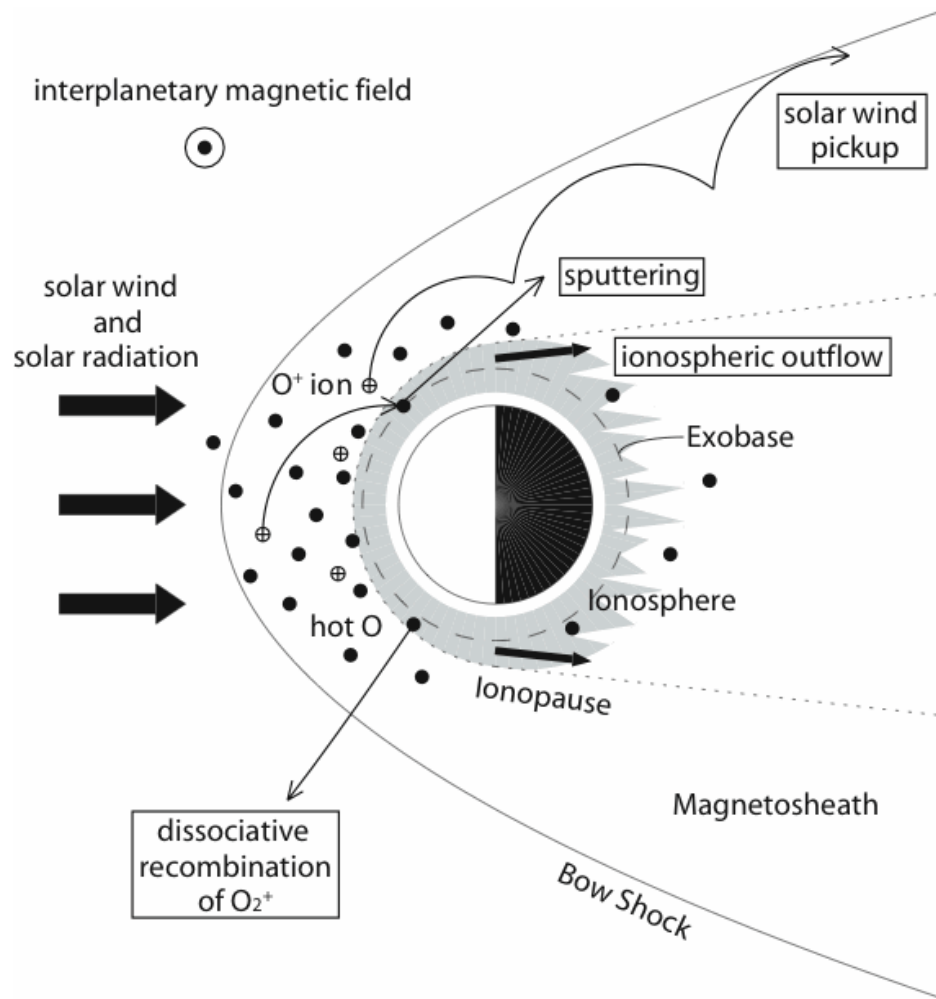
2013.2.26

名古屋大学STE研 M1小山響平

本論文について

- 非磁化惑星からの大気散逸を数値的に再現
- VikingやMars Expressによる観測結果と比較
- まずは研究背景から.....

非磁化惑星からの大気散逸メカニズム

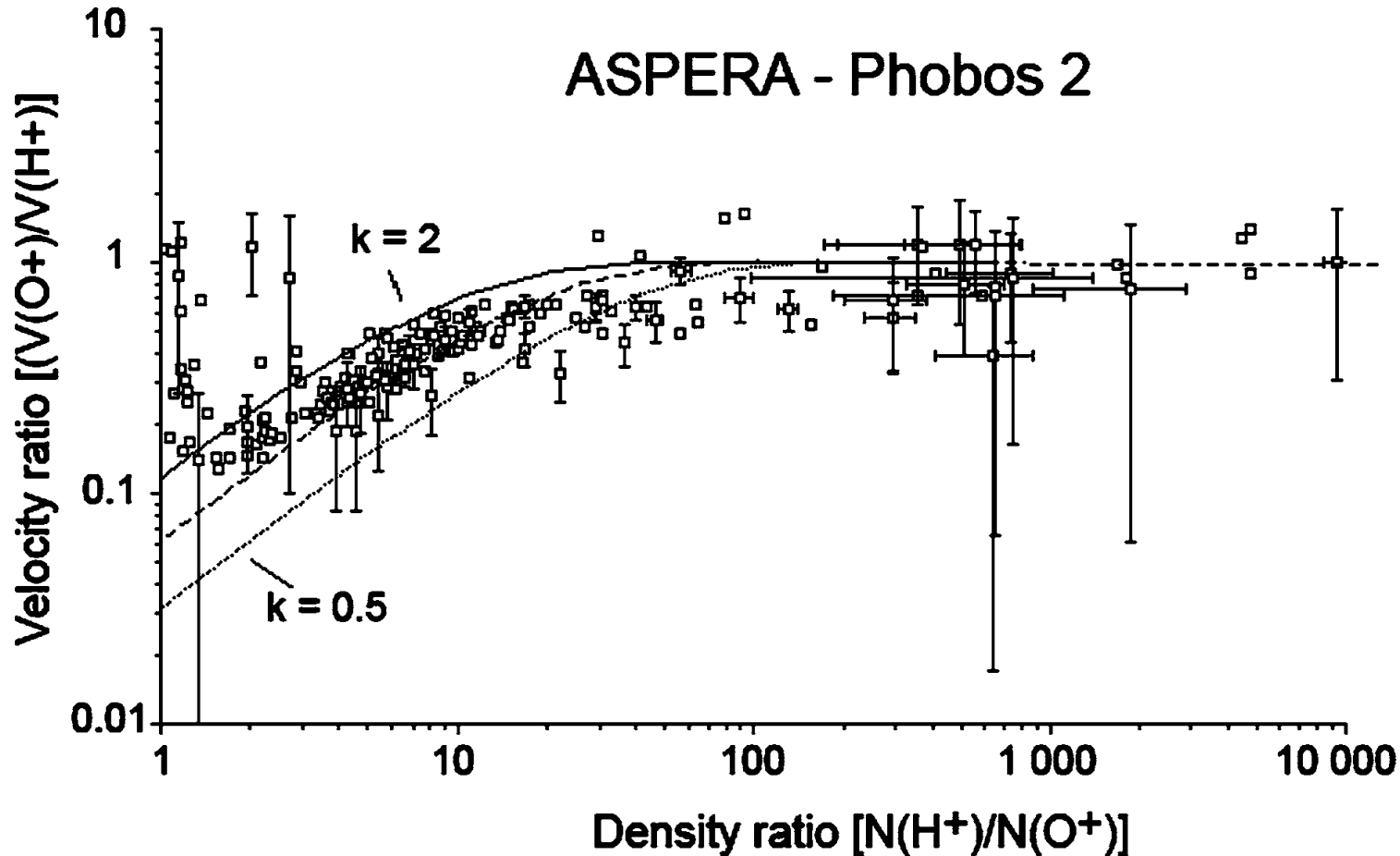


- 熱的散逸 (ジーンズ流出)
- 非熱的散逸
 - 光化学反応による散逸
 - 太陽風誘導による散逸
 - イオンのピックアップ
 - スパッタリング
 - 電離圏イオン流出

[Kaneda et al. 2009]

先行研究: O^+ と H^+ の速度差の観測

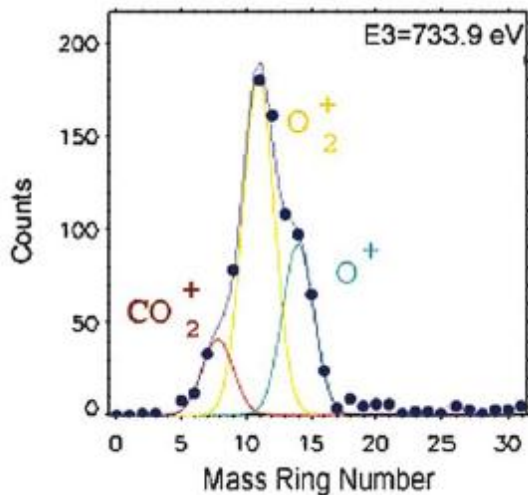
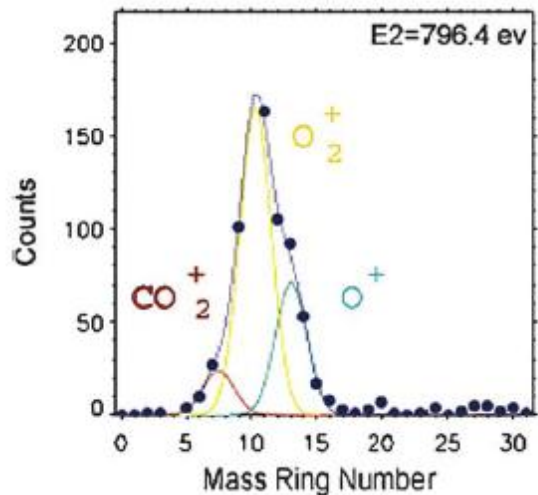
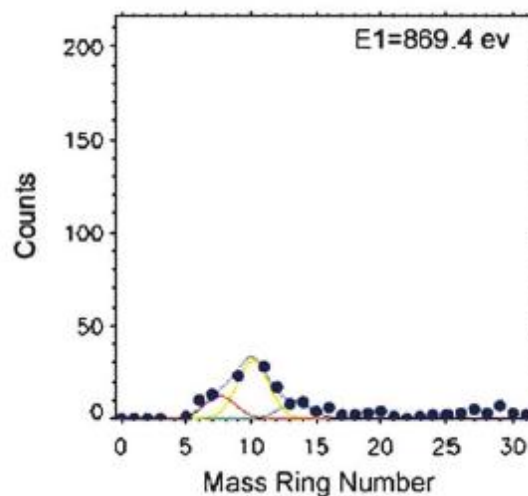
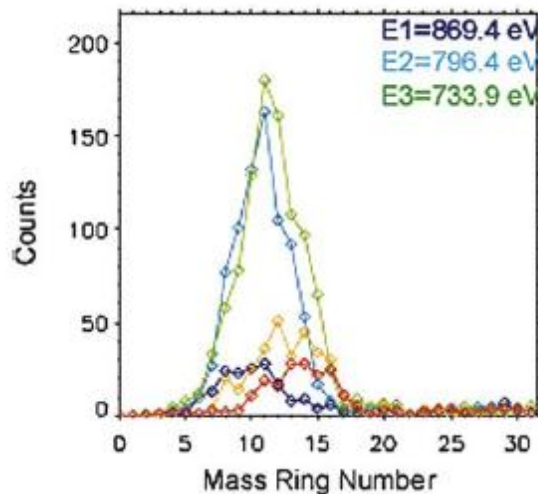
[Lundin and Dubinin 1992]



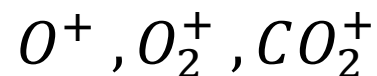
太陽風起源の H^+ と惑星起源の O^+ に速度差が観測された。

先行研究：分子イオンの流出の観測

[Carlsson 2006]



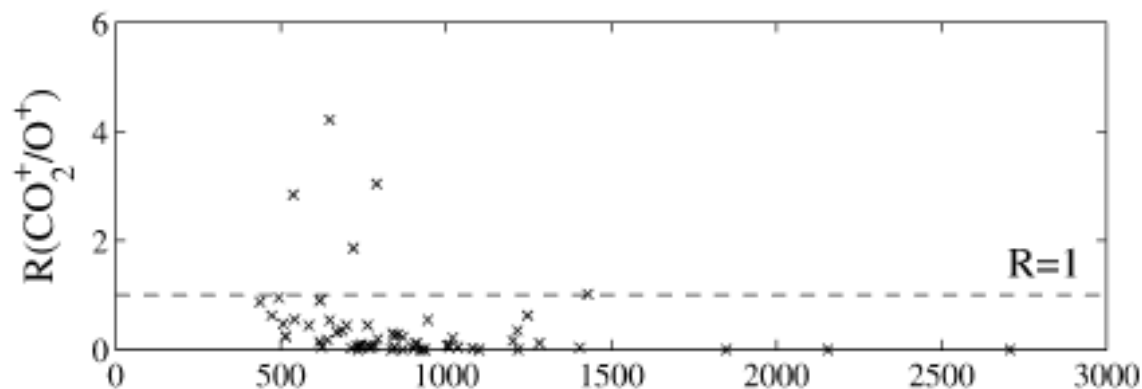
Mars Express,
ASPERA-3のIon
Mass Analyzer(IMA)
による、イオンの観
測結果



2004年6月、77回
のイオンビームイ
ベントの統計解析
結果

先行研究：分子イオンの流出の観測

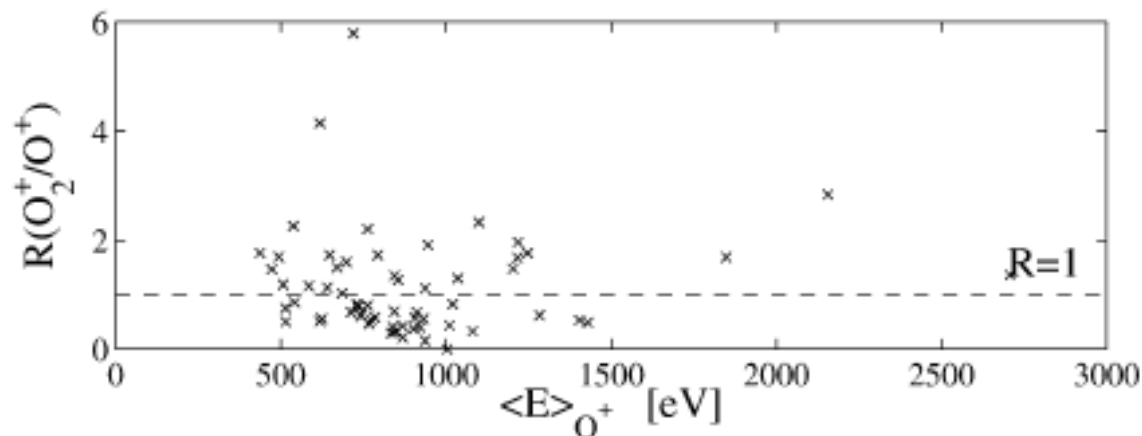
[Carlsson 2006]



O_2^+ , CO_2^+ と O^+ の比は

$$R(\text{O}_2^+/\text{O}^+) \approx 0.9$$

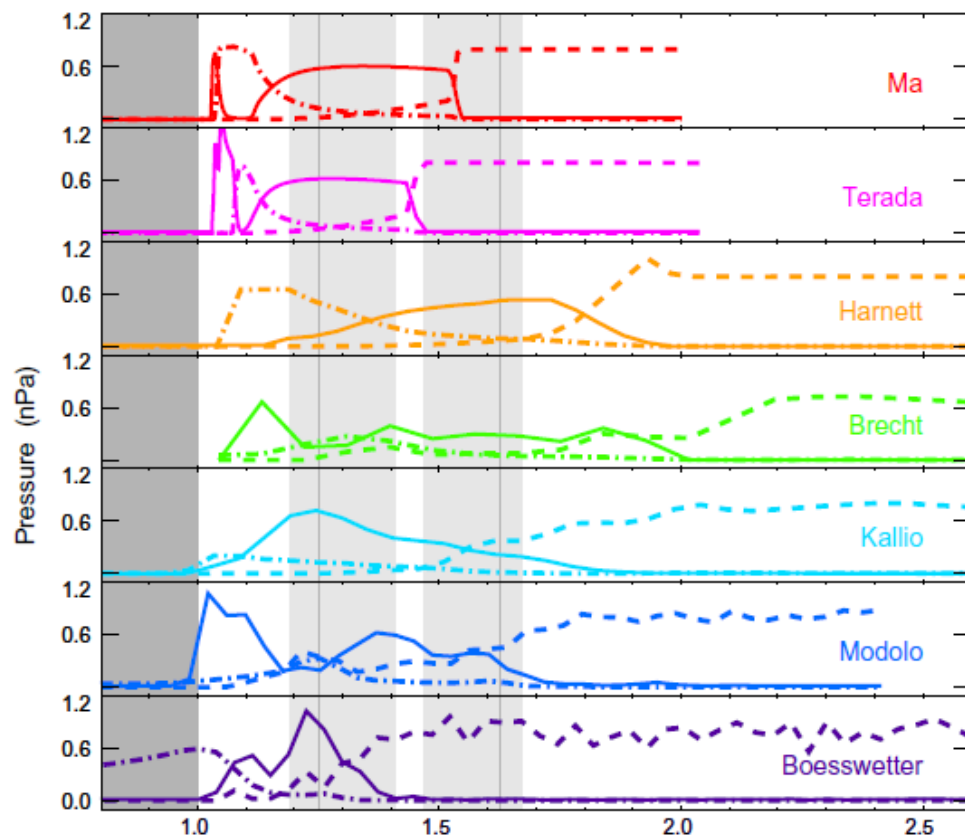
$$R(\text{CO}_2^+/\text{O}^+) \approx 0.2$$



散逸する CO_2^+ 粒子は
 $4.0 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$
と推定される。

先行研究：シミュレーション比較

[Brain et al. 2010]



Ma : MHD (O^+, O_2^+, CO_2^+, H^+)

Terada : MHD ($O^+, O_2^+, CO_2^+, NO^+, CO^+, N_2^+, N^+, C^+, He^+, H^+$)

Harnett : multi-fluid (太陽風起源の H^+ , 惑星起源の H^+, O_2^+)

Brecht : hybrid

Kallio : hybrid

Modolo : hybrid

Boesswetter : hybrid

↑
地表

↑
MPB

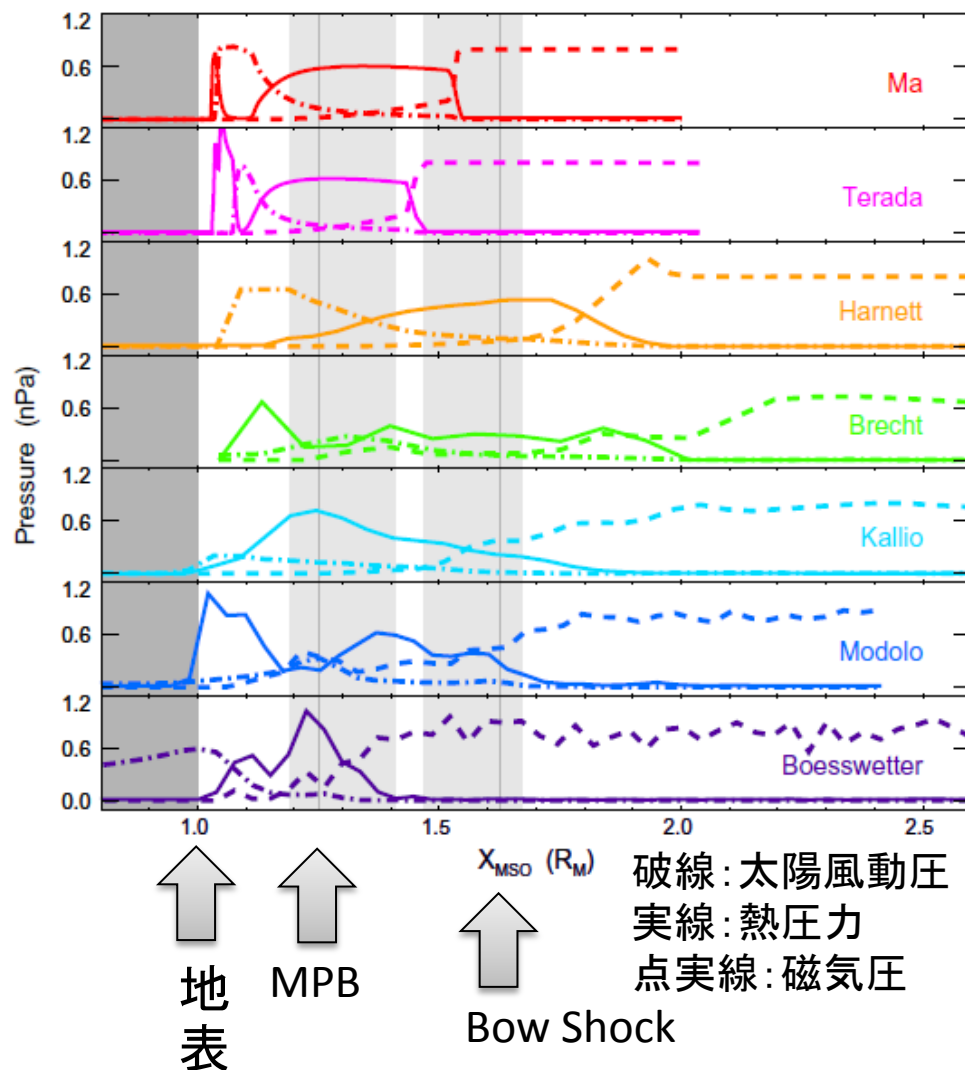
↑
 $X_{MSO} (R_M)$

Bow Shock

破線：太陽風動圧
実線：熱圧力
点実線：磁気圧

先行研究：シミュレーション比較

[Brain et al. 2010]

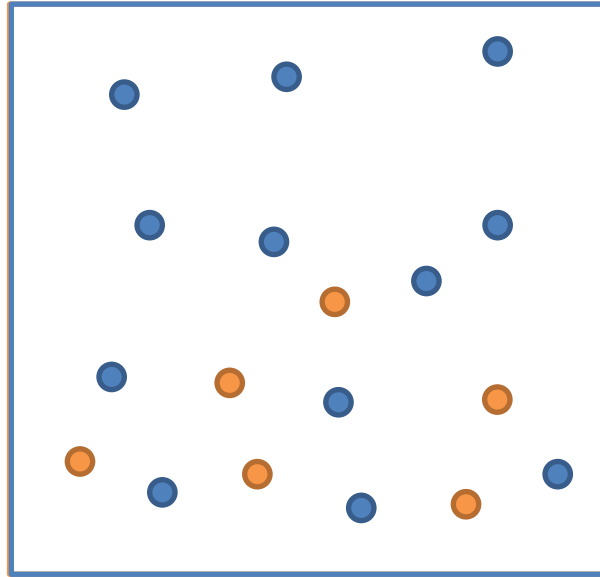


Maと**Terada**のモデルはそれぞれ非磁化惑星周辺の磁場と太陽風構造よく再現している。多種のイオンを用いているが、異なるイオンの**速度差**を再現できない。

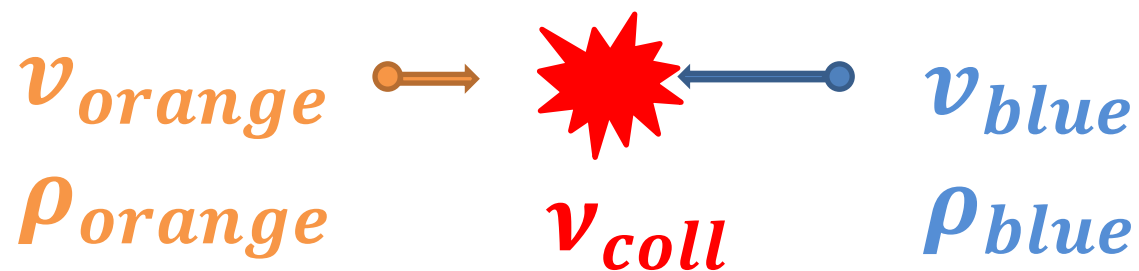
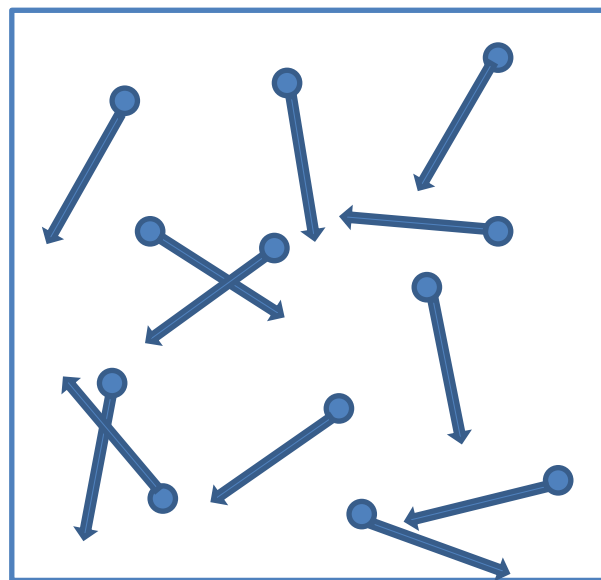
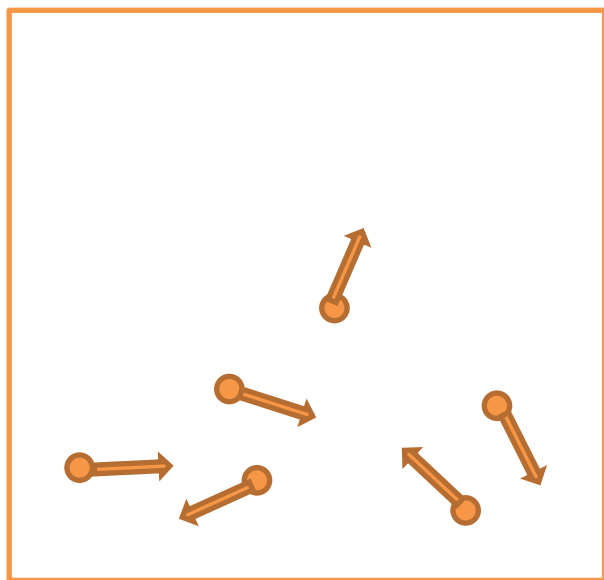
Harnettのモデルはイオン種ごとの速度差を考慮できるが、化学反応が入っておらず、電離圏を解くことはできていない。

Hybrid+コード結合もあるが、 太陽風から電離圏までをシームレスに解きたい

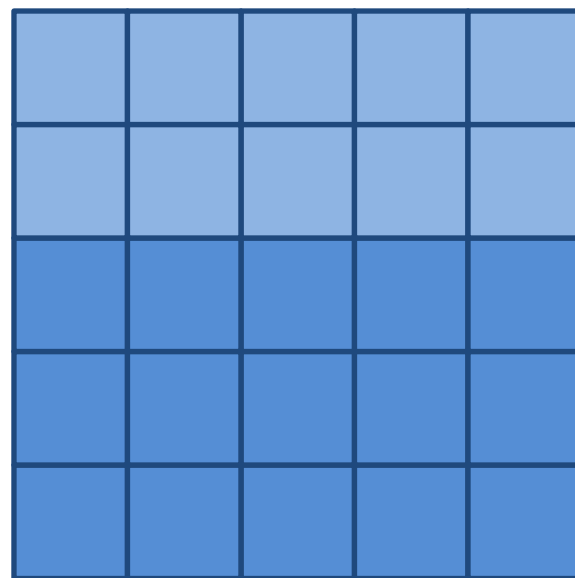
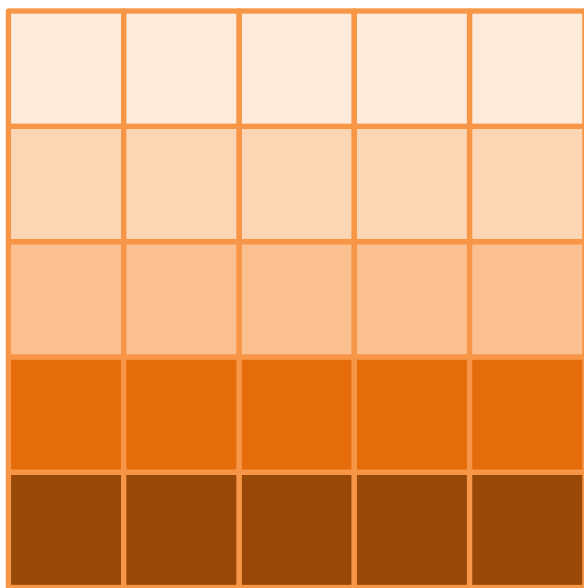
多流体シミュレーション



多流体シミュレーション



多流体シミュレーション



v_{orange}
 ρ_{orange}



v_{blue}
 ρ_{blue}

先行研究:[Najib et al. 2011]

- 多種のイオンを用いたMulti-Fluid MHD

- Multi-Fluid MHD

プラズマ流中の各イオン種ごとに流体を仮定する。

イオン種ごとの速度差が表せる。

ion-ion衝突はこの論文では入っておらず、

イオン同士の運動量の交換は中性との衝突を介している。

- イオンは4種 (H^+ , O_2^+ , O^+ , CO_2^+ .)

- 化学反応は10種類 光電離、電化交換、解離性再結合含む

方程式

連続の式

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{u}_s) = S_{\rho_s}, \quad (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_s \mathbf{u}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s + I p_s) = n_s q_s (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_+) \times \mathbf{B} \\ + \frac{n_s q_s}{n_e e} (\mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla p_e) + S_{\rho_s} \mathbf{u}_s, \quad (2) \end{aligned}$$

速度差

$$S_{\rho_s} \mathbf{u}_s = \rho_s \mathbf{g} - \rho_s \sum_{t=\text{neutrals}} \nu_{st} (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_s) + S_s \mathbf{u}_n - L_s \mathbf{u}_s,$$

衝突周波数

方程式

エネルギー方程式

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \nabla \cdot (p_s \mathbf{u}_s) = -(\gamma - 1)p_s(\nabla \cdot \mathbf{u}_s) + S_{p_s}, \quad (3)$$

衝突周波数

$$S_{p_s} = 2 \sum_{t=\text{neutrals}} \nu_{st} \frac{m_s}{m_s + m_t} n_s k (T_n - T_s) + 2$$

$$\times \sum_{t=\text{ions}} \nu_{st} \frac{m_s}{m_s + m_t} n_s k (T_t - T_s)$$

$$+ \frac{2}{3} \sum_{t=\text{neutrals}} \nu_{st} \frac{m_s m_t}{m_s + m_t} n_s \boxed{(u_n - u_s)^2} \leftarrow k \frac{S_n T_n - L_s T_s}{m_s}$$

$$+ \frac{1}{3} S_s \boxed{(u_n - u_s)^2} \leftarrow \frac{n_s k}{n_e} \frac{S_n T_n - L_e T_e}{m_e},$$

速度差

シミュレーション条件

- BATS-R-USコードを使用
- Hall項をコードに含む
- 座標は3次元極座標
- 以下の4つの条件について計算

Table 2. Simulation Cases Used in This Study

Simulation Cases	Solar Condition	Upstream B Field	Subsolar Position
Case 1	Solar minimum (test case)	symmetric B field (0, 3 nT, 0)	no crustal field
Case 2	Solar minimum	3nT Parker spiral	no crustal field
Case 3	Solar minimum	3nT Parker spiral	99.4° W 25.3° N
Case 4	Solar maximum	3nT Parker spiral	180° W 0° N

化学反応

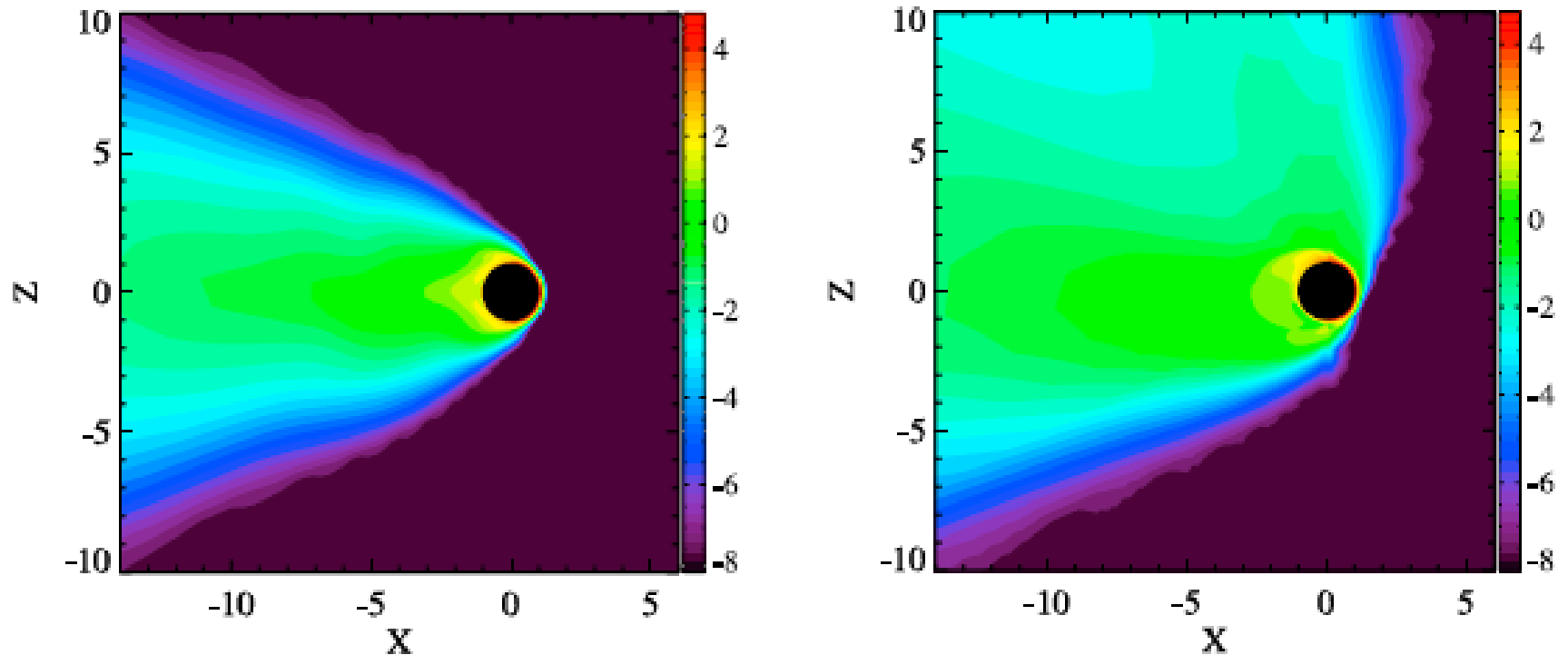
使用するイオンは $(H^+, O^+, O_2^+, CO_2^+)$

Reactions	Ionization Frequency and Rate Coefficient	References
$CO_2 + h\nu \rightarrow CO_2^+ + e$	$7.30 \times 10^{-7} s^{-1}$ (<i>solarmax</i>)	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]
$O + h\nu \rightarrow O^+ + e$	$2.47 \times 10^{-7} s^{-1}$ (<i>solarmin</i>) $2.73 \times 10^{-7} s^{-1}$ (<i>solarmax</i>)	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]
$H + h\nu \rightarrow H^+ + e$	$8.89 \times 10^{-8} s^{-1}$ (<i>solarmin</i>) $8.59 \times 10^{-8} s^{-1}$ (<i>solarmax</i>) $5.58 \times 10^{-8} s^{-1}$ (<i>solarmin</i>)	<i>Ma et al.</i> [2004]
$CO_2^+ + O \rightarrow O_2^+ + CO$	$1.64 \times 10^{-10} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]
$CO_2^+ + O \rightarrow O^+ + CO_2$	$9.60 \times 10^{-11} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]
$O^+ + CO_2 \rightarrow O_2^+ + CO$	$1.1 \times 10^{-9} (\frac{800}{T_i})^{(0.39)} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Fox and Sung</i> [2001]
$O^+ + H \rightarrow H^+ + O$	$6.4 \times 10^{-10} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]
$H^+ + O \rightarrow O^+ + H$	$5.08 \times 10^{-10} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Fox and Sung</i> [2001]
$O_2^+ + e \rightarrow O + O$	$7.38 \times 10^{-8} (\frac{1200}{T_e})^{(0.56)} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]
$CO_2^+ + e \rightarrow CO + O$	$3.10 \times 10^{-7} (\frac{300}{T_e})^{(0.5)} cm^{-3} s^{-1}$	<i>Schunk and Nagy</i> [2009]

[Najib et al. 2011]

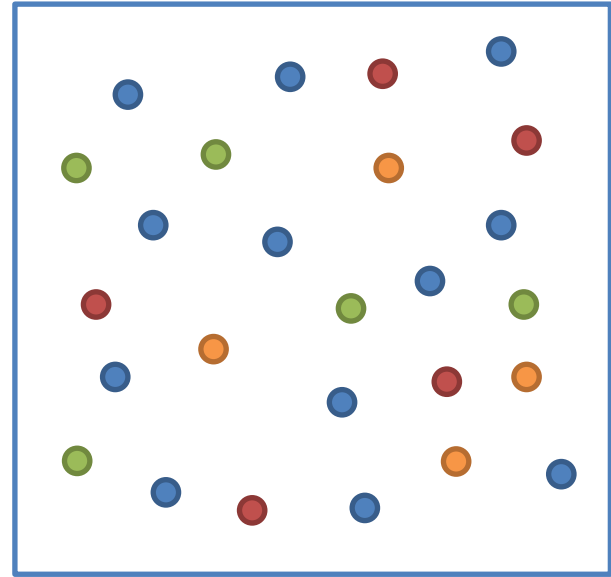
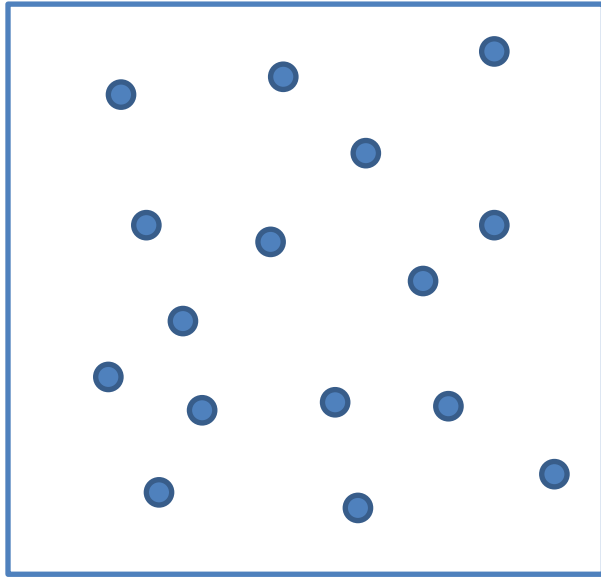
結果

O_2^+ の分布



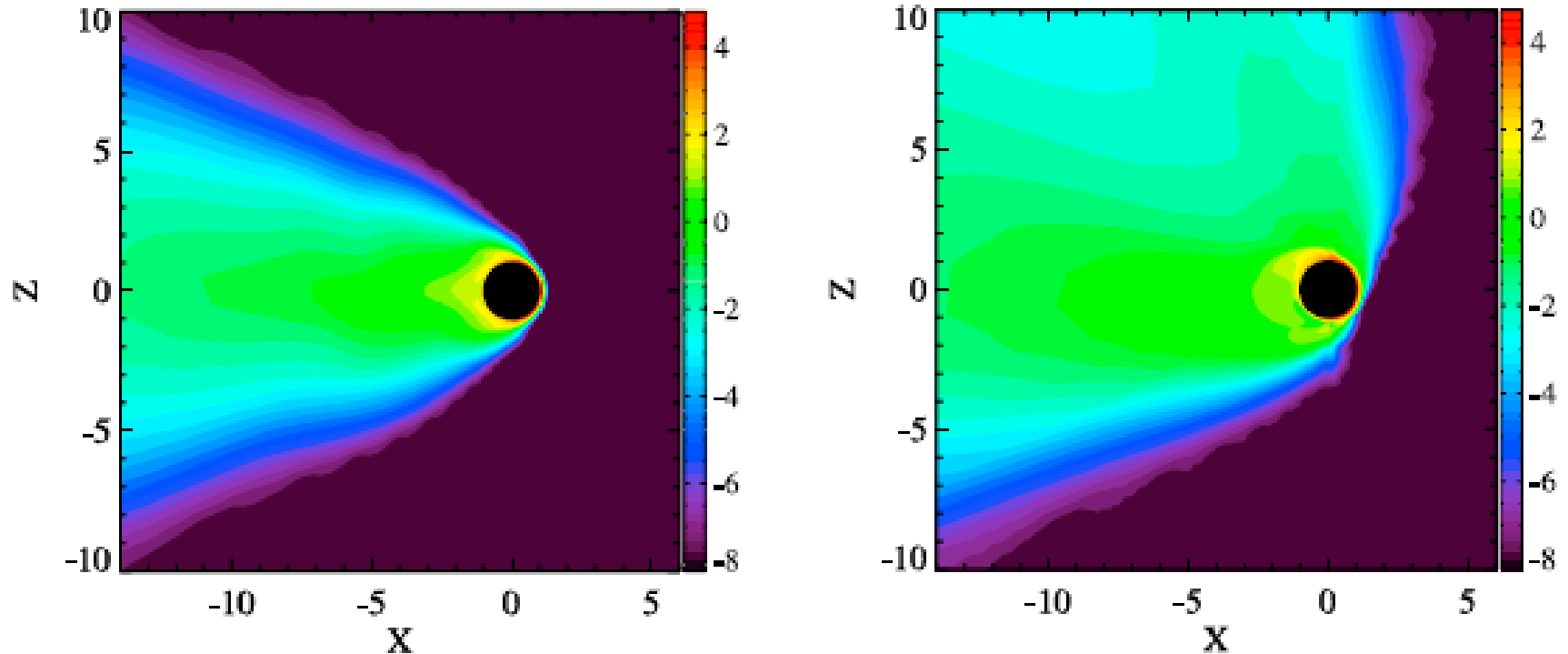
O_2^+ の数密度分布 左: 単独流体のMHD 右: multifluid MHD

O_2^+ の分布



O_2^+ の数密度分布 左: 単独流体のMHD 右: multifluid MHD

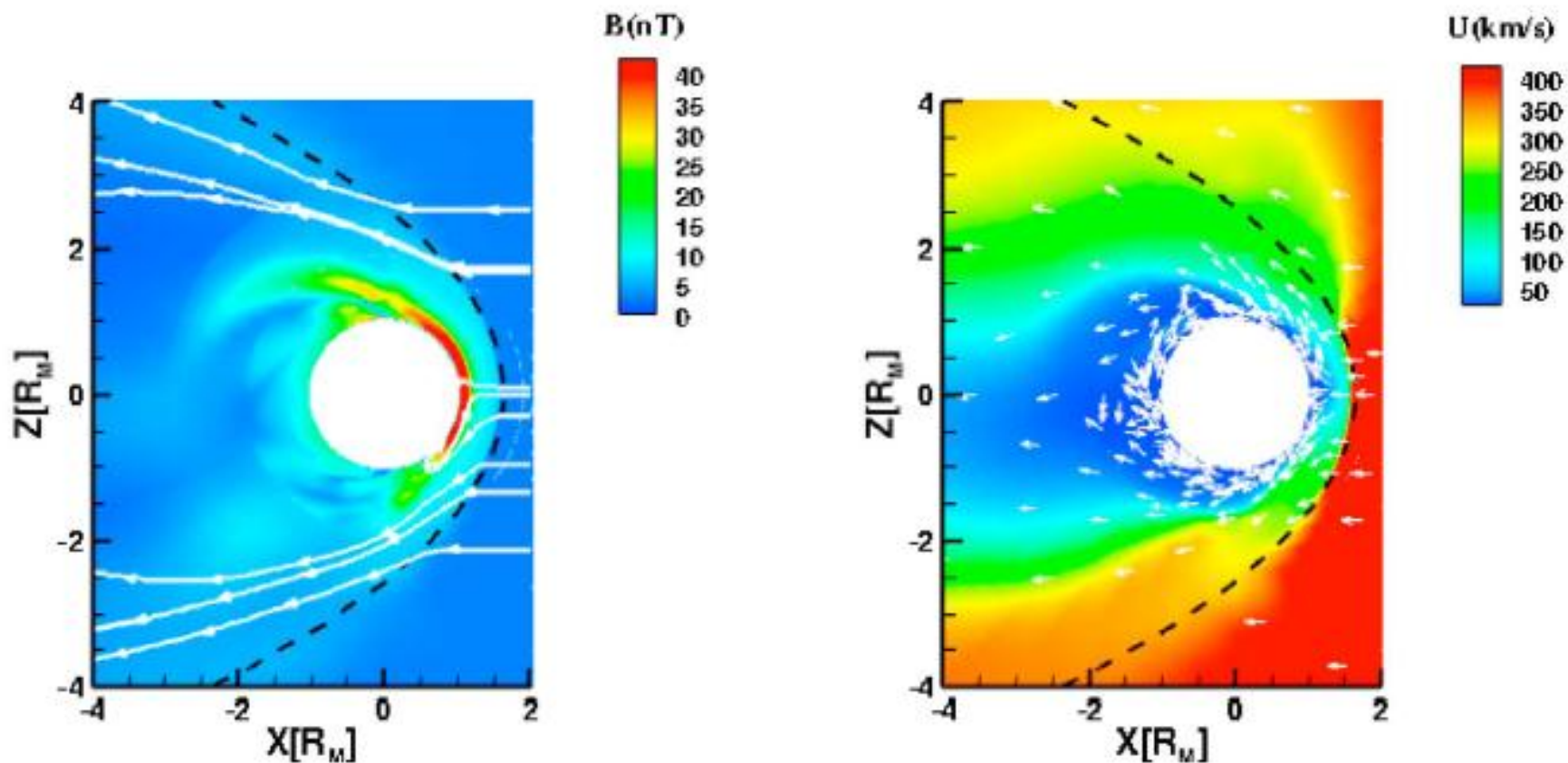
O_2^+ の分布



O_2^+ の数密度分布 左:単独流体のMHD 右:multifluid MHD

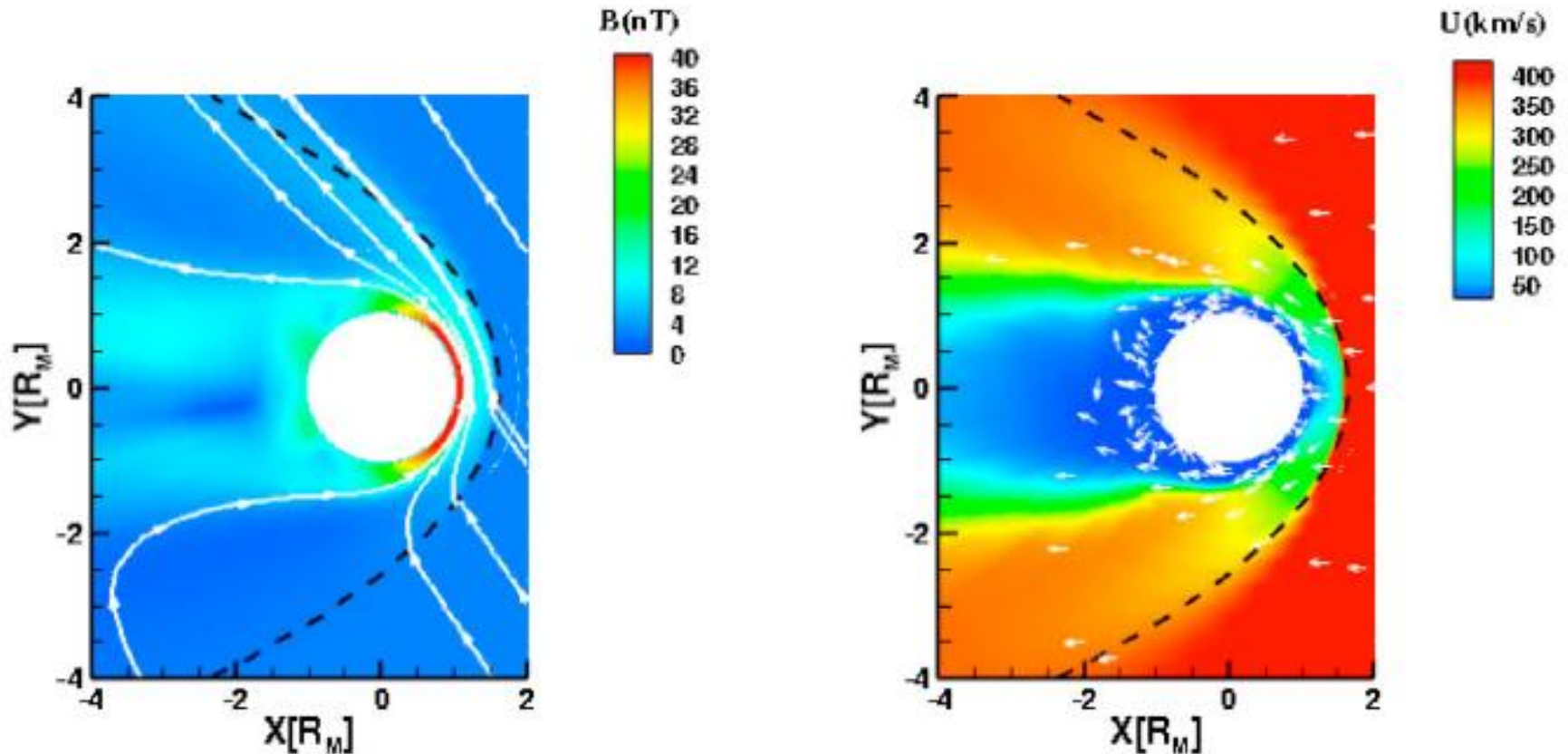
multifluid MHDには非対称性が見られ、北向きの対流電場、イオンと中性粒子の速度差の効果だとしている。

X-Z平面の磁場とイオンの平均速度



左: 磁場 右: イオンの平均速度
Z方向の非対称性が見られる

X-Y平面の磁場とイオンの平均速度

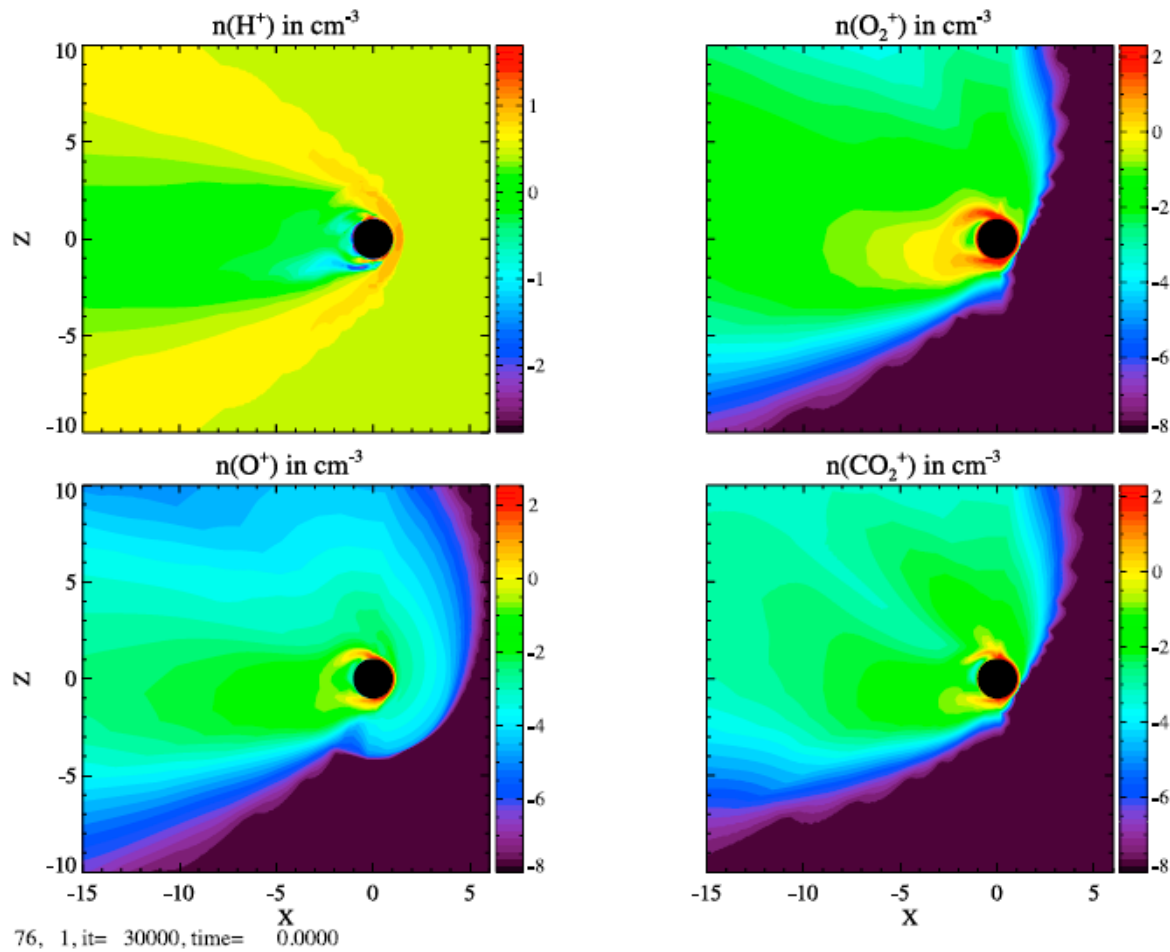


左: 磁場 右: イオンの平均速度

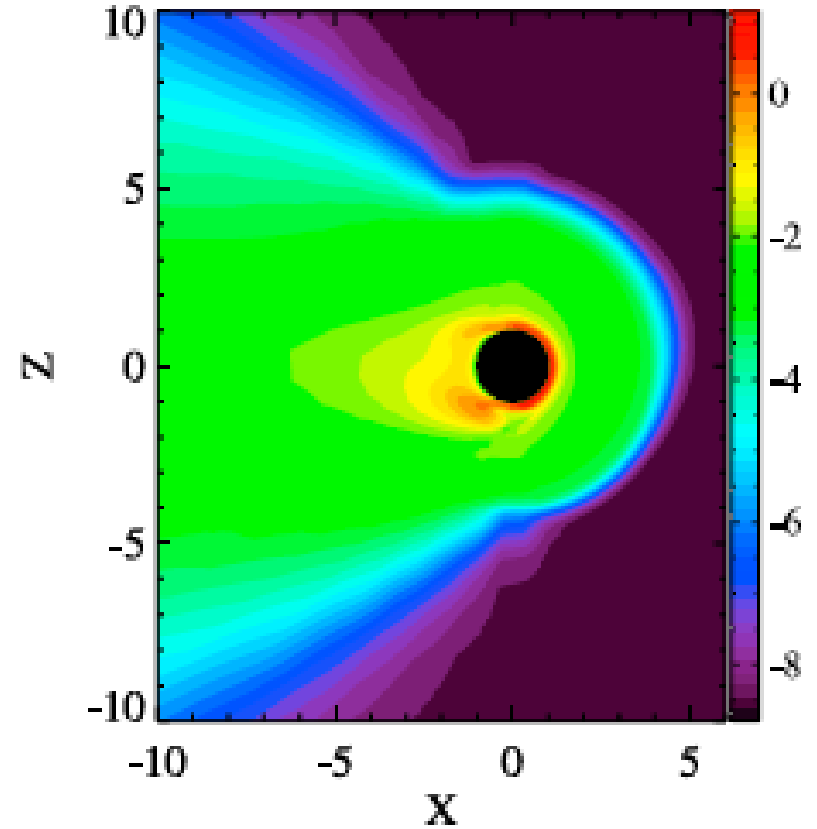
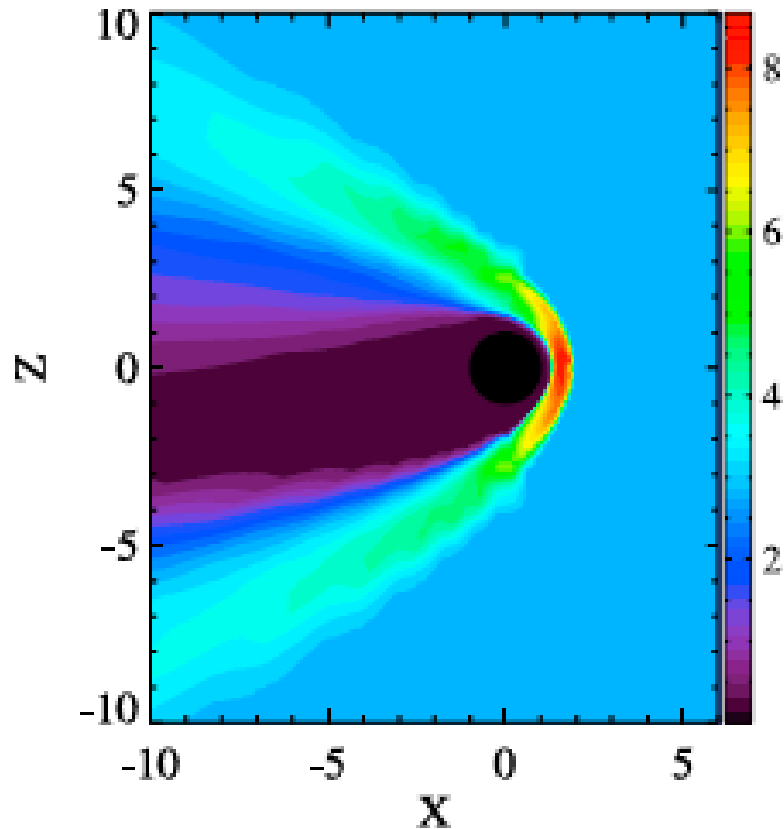
Y方向には(Parker spiralがあるが)対称的である
この非対称性はmultifluidMHDでなければ見られない

各種イオンの密度分布

各イオンの数密度分布

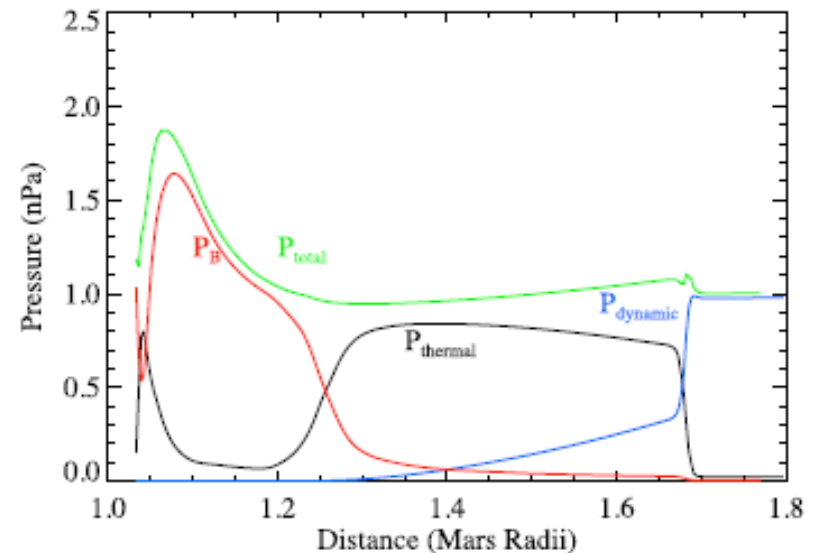
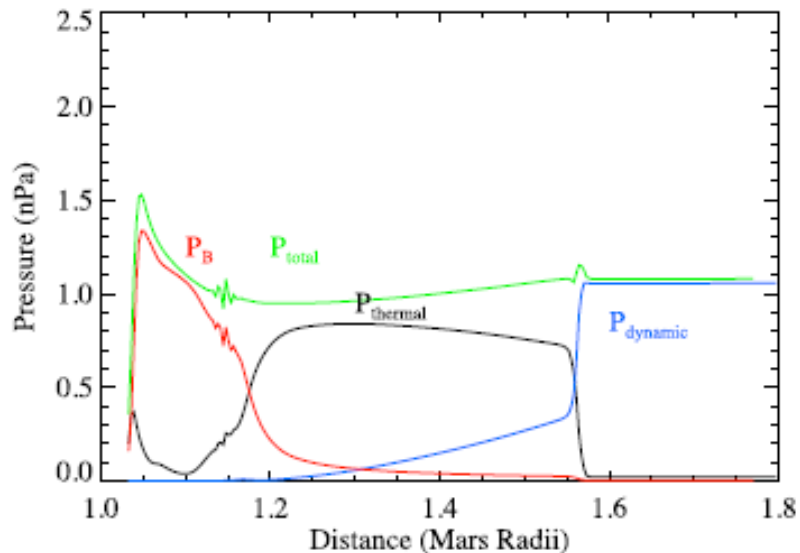


H^+ の分布 左: 太陽風起源 右: 惑星起源



太陽風起源の H^+ が非常に多いので、先の結果には惑星起源 H^+ の分布は見えていない

压力

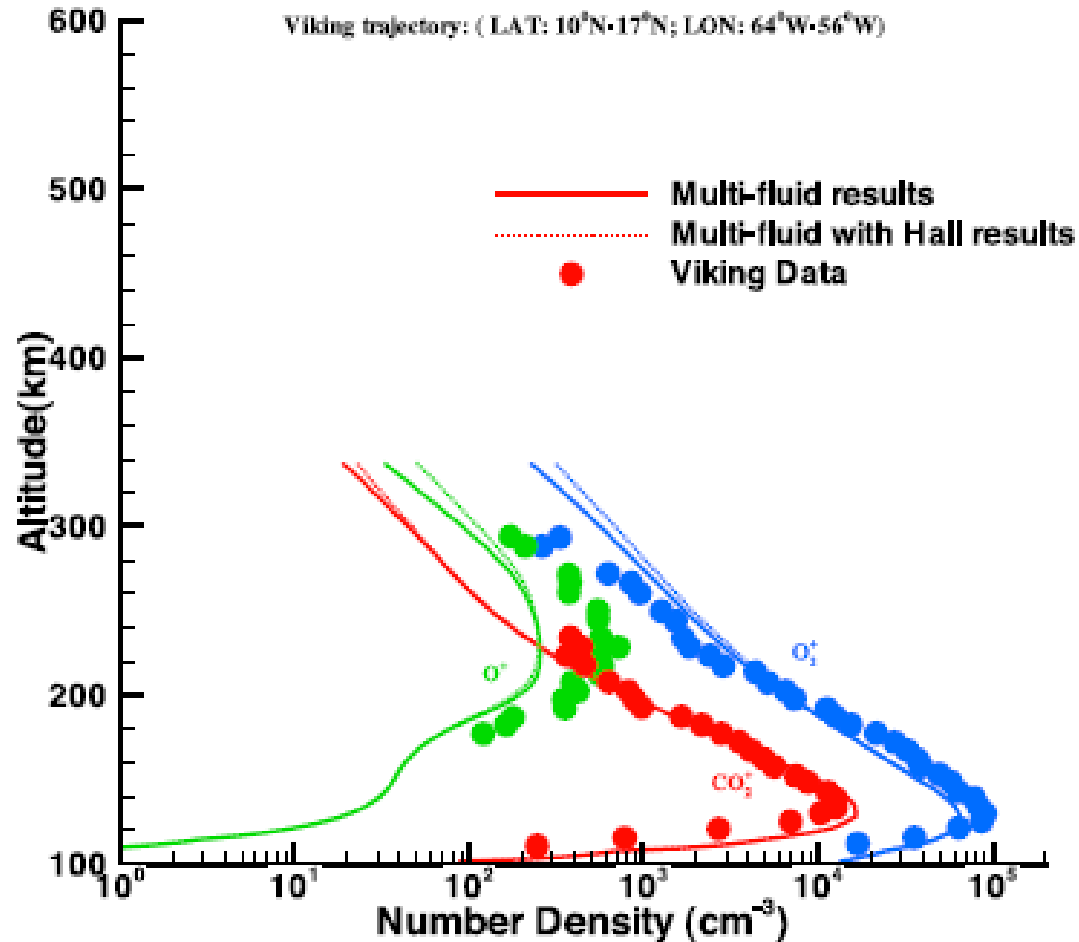


$P_{thermal}$: 熱圧力 P_B : 磁気圧 $P_{dynamic}$: 動圧 P_{total} :
圧力の総和

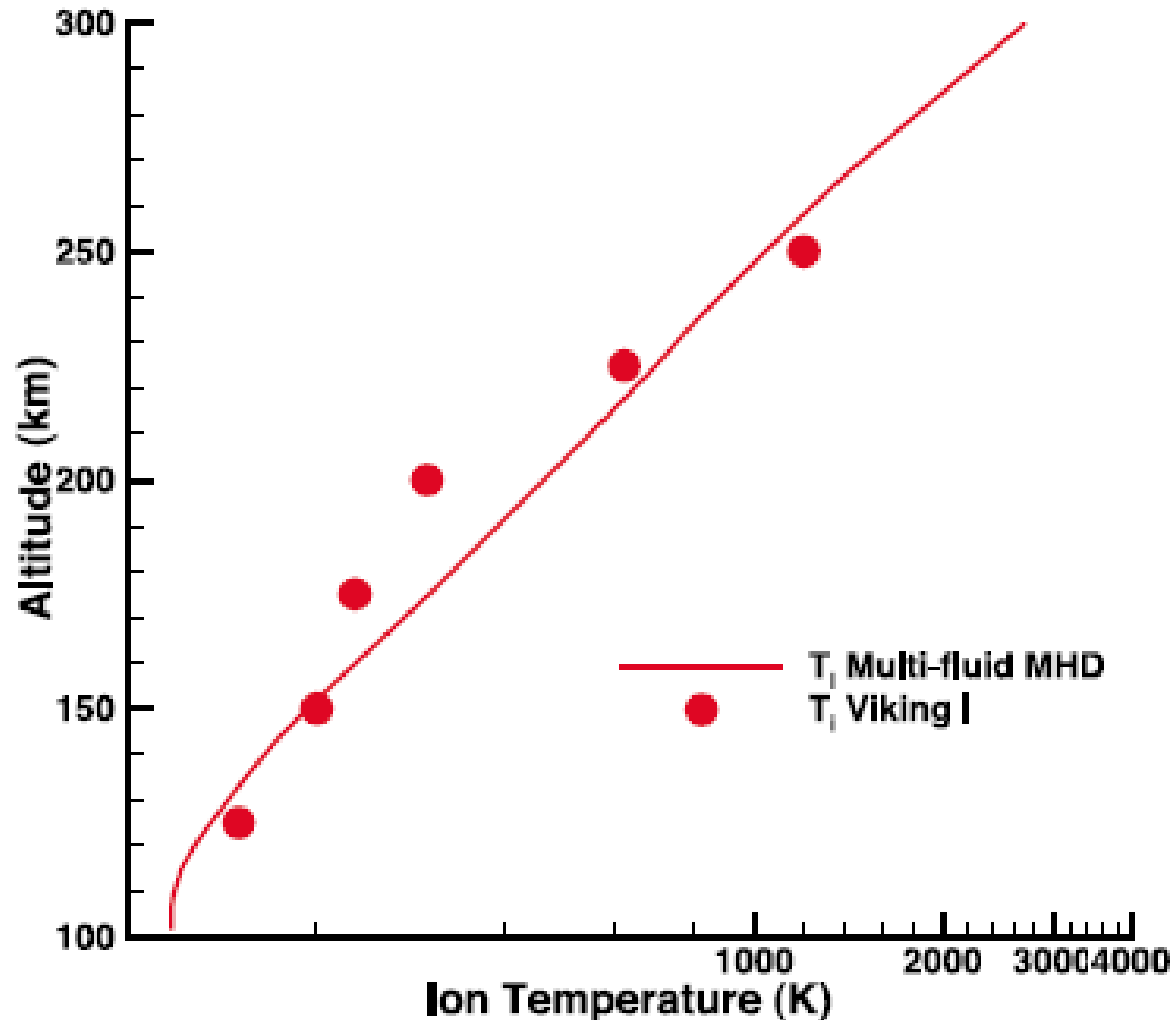
太陽風が弱いコンディションならば、バウショックは
1.56 R_M 程度、太陽風が強いコンディションでは1.67 R_M

Viking観測結果との比較

イオンの高度分布の比較



Hall項の有無は、結果に影響しない



Summary

Table 3. Calculated Subsolar MPB and Bow Shock Positions for Solar Minimum and Solar Maximum With and Without Hall^a

Solar Condition	Hall	MPB Location in R_M	Bow Shock Location in R_M
Solar minimum (case 3)	No	1.17	1.56
Solar minimum (case 3)	Yes	1.17	1.58
Solar maximum (case 4)	No	1.26	1.67
Solar maximum (case 4)	Yes	1.27	1.7

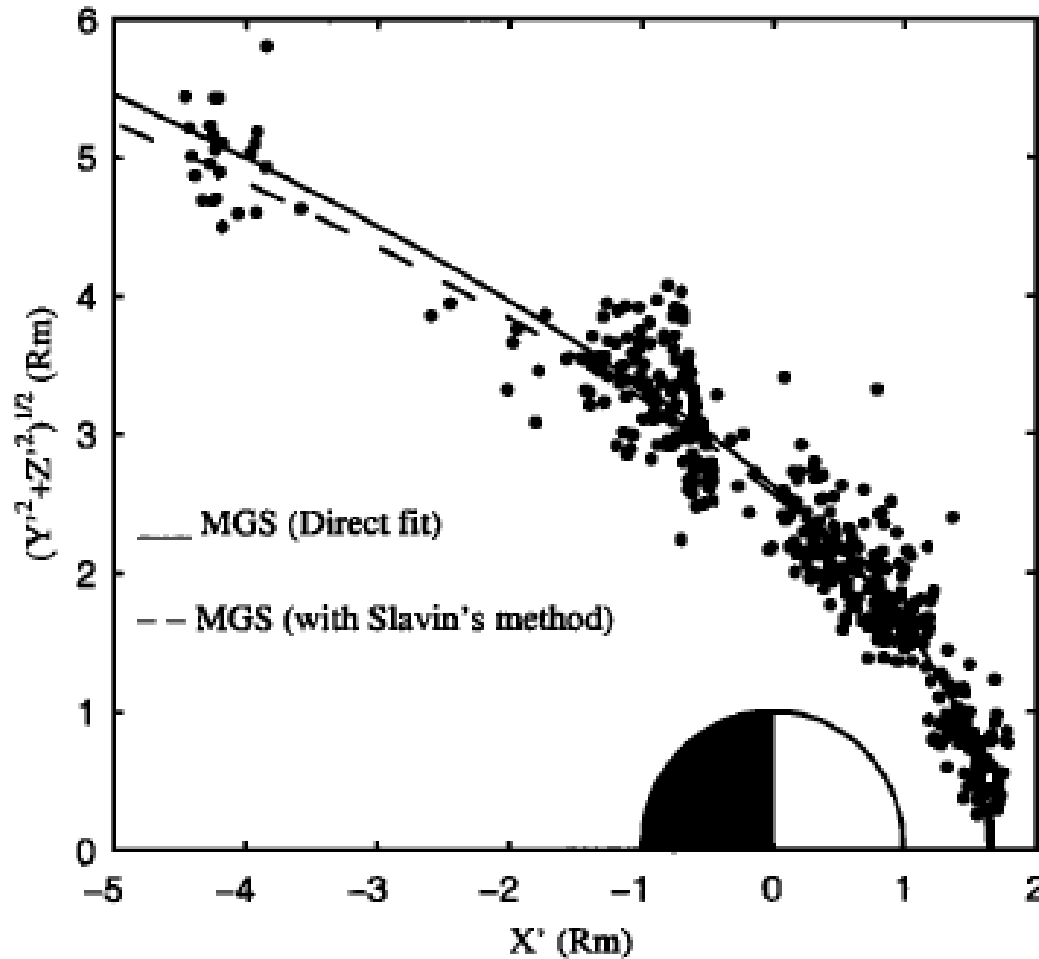
Table 4. Calculated Escape Fluxes (in s^{-1}) From the Multifluid Model

	O^+	O_2^+	CO_2^+	Total
Case 3	1.6×10^{23}	1.4×10^{24}	2.1×10^{23}	1.77×10^{24}
Case 4	7.7×10^{23}	9.0×10^{23}	1.7×10^{23}	1.84×10^{24}

Hall項の有無で、結果に明確な変化は見られなかった。
散逸fluxの値は、先行研究と一致する。

火星のbow shock

[Vignes, D., et al. 2000]



火星のbow shock

[Vignes, D., et al. 2000]

	$X_0 (R_M)$	ε	$L (R_M)$	$R_{SD} (R_M)$	$R_{TD} (R_M)$	α^a	N^b
This study (Direct fit method)	0.64 ± 0.02	1.03 ± 0.01	2.04 ± 0.02	1.64 ± 0.08	2.62 ± 0.09	4°	450
This study (Slavin's method)	0.72	1.02 ± 0.02	1.93 ± 0.01	1.67 ± 0.03	2.56 ± 0.06	4°	450
Slavin et al. (Phobos 2, 1991)	0.55	1.01	2.07	1.58	2.57	3.2°	94
Trotignon et al. (Phobos 2, 1993)	0.50	1.02	2.17	1.57 ± 0.03	2.63	4°	126

Phobos2のときは太陽風が比較的静穏で、太陽方向に $1.57 R_M$ 程度。MGSでは太陽風は比較的活発で、 $1.65 R_M$ 程度。