

# 地球型惑星外気圏における酸素原子の密度分布

Density distribution of oxygen atom in the  
exospheres of terrestrial planets

北海道大学理学部地球科学科（地球物理）

地球惑星大気物理学研究室

井上 佳紀

Yoshinori Inoue

2002年1月31日

## 概要

地球、金星、火星の外気圏中には非熱的酸素原子 (hot oxygen atom) が存在する。非熱的酸素原子は、外圏底 (exobase) 付近に存在する  $\text{O}_2^+$  イオンの解離再結合 (dissociative recombination) によって主に生成される。解離再結合過程によって運動エネルギーを得た非熱的酸素原子の運動を計算することによって、外気圏における非熱的酸素原子の密度分布を見積もった。各惑星における酸素原子の密度分布を比較した結果、重力の大きい金星・地球では昼側外気圏で高度 4500km 付近まで酸素原子が広がって分布し、重力の小さい火星では全球的に高度 11000km 以上にまで広範囲に分布する。この数値計算から、金星・地球と火星では酸素原子の散逸量が大きく異なることが明らかとなった。金星・地球では昼側、夜側外気圏を比較すると密度分布に大きな相違が見られるが、火星では酸素原子は昼夜を問わず外気圏中に広く分布している。また、火星大気圏から飛び出した酸素原子の溜る場所が夜側外気圏中に存在することも明らかにした。

目次	3
<b>目次</b>	
1 序論	4
2 外気圏と酸素分子イオンの解離再結合	6
2.1 外気圏	6
2.2 解離再結合	8
3 計算方法	11
3.1 軌跡の計算方法	11
3.2 密度の計算方法	11
4 結果と考察	13
4.1 軌跡の計算結果	13
4.2 密度分布の計算結果と考察	16
5 まとめ	22
謝辞	23
参考文献	23
A Appendix	25
A.1 大気の散逸	25
A.2 粒子軌跡の計算結果、捕捉	29
A.3 Paxton の Branching ratio を用いた計算結果	38
A.4 火星探査衛星「のぞみ」	40
A.5 プログラム	44

## 1 序論

惑星に存在する大気は宇宙空間に大気の一部を放出し続けている。この放出現象を大気の散逸といい、散逸過程と散逸量は惑星により異なっている。

大気の散逸過程を研究することは、それぞれの惑星大気の進化をたどる手がかりとなる。また、火星、金星の酸素の散逸過程は、過去、現在における水の存在・消失を示す手がかりとなり注目されている [Shizgal et al.,1996]。

水星、金星、地球、火星は、その構造が比較的似ているため地球型惑星と呼ばれる。金星大気の主成分は、CO<sub>2</sub>(96.4%)、N<sub>2</sub>(3.41%)、地球の主成分はN<sub>2</sub>(78.1%)、O<sub>2</sub>(20.9%)であり、火星の主成分は、CO<sub>2</sub>(95.32%)、N<sub>2</sub>(2.7%)である [小倉,1999]。主成分の違いは、惑星の質量、半径、太陽からの距離、惑星固有磁場等の違いにより惑星進化の過程で大気散逸過程の量が異なるためだと考えられている。

大気の散逸には熱的散逸と非熱的散逸がある。熱運動する気体粒子で、重力エネルギーよりも大きい熱運動エネルギーを持つ粒子が散逸する過程を熱的散逸、それ以外の過程で散逸するものを非熱的散逸という。熱的散逸は、ジーンズエスケープ (Jeans escape) として理解されている。熱的散逸過程では主に水素、ヘリウム等の軽い気体粒子が散逸する。非熱的散逸には、ハイドロダイナミックエスケープ (hydrodynamic escape)、電荷交換 (charge exchange)、解離再結合 (Dissociative recombination)、衝突解離 (Impact dissociation)、スパッタリング (sputtering)、ノックオン (knock-on) など様々な過程が考えられている。非熱的散逸では軽い粒子だけでなく、酸素、窒素、炭素等の重い中性粒子も散逸することができる (Appendix 参照) [阿部,1997 ; Shizgal et al.,1996]。金星外気圏中の酸素原子はPVO(Pioneer Venus Orbiter) の ultraviolet spectrometer による 130.4nm 放射として観測されている (表 1、図 1 参照)[Nagy et al.,1981 ; Paxton,1983]。

表 1: 放射 [Shizgal et al.,1996]

水素原子	Lyman $\alpha$	121.6nm
	Lyman $\beta$	102.6nm
ヘリウム原子		58.4nm
酸素原子		130.4nm

外気圏中の酸素原子は外圏底 (exobase) 付近で O<sub>2</sub><sup>+</sup> イオンと電子の解離再結合によって生成されると考えられている [Shizgal et al.,1996 ; Nagy et al.,1981 ; McElroy et al.,1982 ; Rodriguez et al.,1984]。本論文では、外気圏の主要な構成要素である酸素原子の分布と散逸に注目する。解離再結合によって生成された粒子の運動を計算し、外気圏中の密度の 3 次元的な分布を求め、地球、金星、火星でその分布を比較した。Nagy and Cravans[1988] は外気圏中の酸素原子の密度分布を 1 次元モデルで計算したが、本研究では 3 次元モデルを用いて昼側、夜側の密度分布の相違を見積もった。3 次元モデルは、主に火星外気圏中の酸素原子の密度分布を調べるときに重要になる。なぜなら、火星の重力は地球、金星に比べて小さいため、酸素原子はより高高度まで分布するからである。

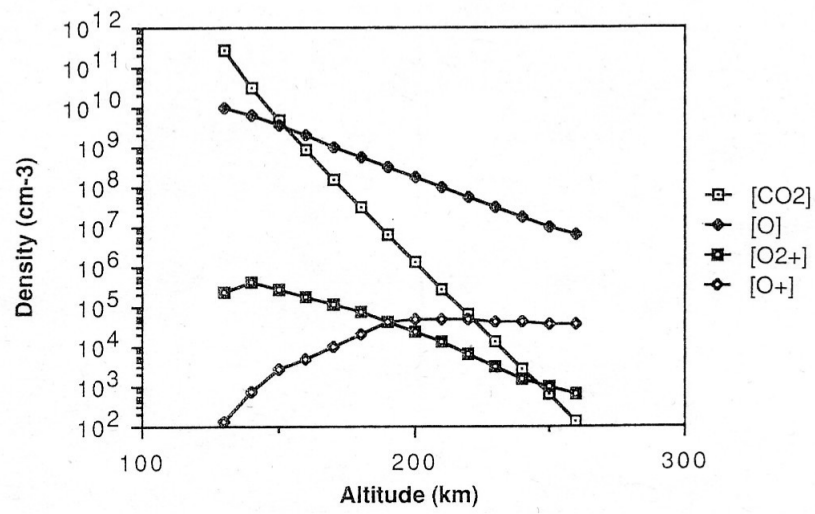


図 1: 金星外気圏の主要な成分 [Nagy and Cravans, 1988]。

2章では、外気圏の定義と酸素原子の主な散逸過程である解離再結合について、3章では外気圏における酸素原子密度分布の計算方法について、4章ではその計算結果と考察について、最後に5章でまとめを記述する。

## 2 外気圏と酸素分子イオンの解離再結合

### 2.1 外気圏

気体粒子が、一度も他の粒子に衝突せずに運動している領域を外気圏と呼ぶ。外気圏の下端(熱圏の上端)、外圏底(exobase)の高度 $r_e$ は次式で定義される。

$$\sigma \int_{r_e}^{\infty} n(r) dr = 1 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ は気体分子の衝突断面積( $3 \times 10^{-19} \text{m}^2$ 程度)、 $r$ は地上からの高度、 $n(r)$ は高度 $r$ での粒子全体の密度である。この式は、外圏底高度がスケールハイト $H$ (scale height)と平均自由行程 $l$ (mean free path)の等しい場所、

$$\frac{H}{l} = 1 \quad (2)$$

であることを意味している。スケールハイトとは、大気の厚さの尺度であり、次式で定義される。

$$H = \frac{r^2 k T(r)}{GMm(r)} \quad (3)$$

平均自由行程とは、ある衝突から次の衝突までの飛行距離の平均値であり、

$$l = \frac{1}{n(r)\sigma} \quad (4)$$

で定義される。ここで、 $G$ は万有引力定数、 $k$ はボルツマン定数、 $M$ は惑星の質量、 $T(r)$ 、 $n(r)$ 、 $m(r)$ は高度 $r$ での温度、粒子全体の密度、大気分子の平均質量である。[阿部,1997; Shizgal et al.,1996; 永田 and 等松,1973]

外圏底より下の領域は熱圏と呼ばれる。熱圏では

$$H > l \quad (5)$$

であり、外気圏では

$$H < l \quad (6)$$

である。地球、金星、火星の外圏底高度は大気の温度や太陽の活動状態にもよるが、それぞれおよそ500km、200km、250kmである[阿部,1997; Shizgal et al.,1996; Chamberlain,1963]。

## 2. 外気圏と酸素分子イオンの解離再結合

7

地球、金星、火星の質量、半径、外圏底高度、外圏底高度における脱出速度を表2に示した。脱出速度は、物体が惑星の重力圏から脱出するために必要な速度である。外圏底高度における脱出速度は、

$$V_{ex} = \sqrt{\frac{2GM_i}{r_i + r_{ex}}} \quad (7)$$

で与えられる。ここで  $G$  は万有引力定数 ( $6.668 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ )、 $M_i$ 、 $R_i$ 、 $r_{ex}$  は惑星の質量、半径、外圏底高度である [小倉,1999 ; Shizgal et al.,1996]。

地球、金星、火星の外圏底高度における脱出速度はそれぞれ 10.8km/s、10.2km/s、4.8km/s である。また酸素原子の場合の脱出速度に対応する運動エネルギーは、地球、金星、火星でそれぞれ、9.69eV、8.64eV、1.91eV である。

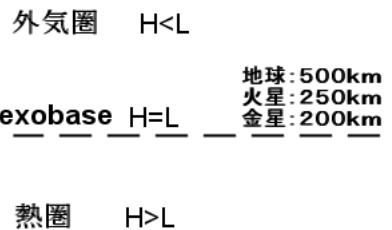


図 2: 外圏底 (exobase) 高度。地球、火星、金星でそれぞれ約 500km、250km、200km である。

表 2: 地球、金星、火星の諸量

惑星	質量 $M_i$ <sup>a</sup>	半径 $r_i$ <sup>a</sup>	外圏底高度 $r_{ex}$ <sup>b</sup>	脱出速度 $V_{ex}$
地球	$5.974 \times 10^{24} \text{ kg}$	6378km	500km	10.8km/s (9.69eV)
金星	$4.869 \times 10^{24} \text{ kg}$	6052km	200km	10.2km/s (8.64eV)
火星	$6.416 \times 10^{23} \text{ kg}$	3397km	250km	4.8km/s (1.91eV)

<sup>a</sup>. [国立天文台,2001]、<sup>b</sup>. [Shizgal et al.,1996]

## 2.2 解離再結合

外気圏中に存在する酸素原子は主に、外圏底付近で  $O_2^+$  の解離再結合によって生成したものである [Nagy et al.,1981 ; Shizgal et al.,1996]。



この反応式で生成される酸素原子 ( $O^*$ ) は、大きな運動エネルギーを持っているため hot oxygen atom または、非熱的酸素原子 (nonthermal oxygen atom) と呼ばれる。

表 3:  $O_2^+$  の解離再結合による Branching ratio

生成物	Excess Energy	O の運動エネルギー (速度)	R.& N. B.R. <sup>1</sup>	Paxton B.R. <sup>2</sup>
$O(^3P)+O(^3P)$	6.96eV	3.48eV (6.46km/s)	0.325	0.22
$O(^3P)+O(^1D)$	5.00eV	2.50eV (5.47km/s)	0.30	0.55
$O(^3P)+O(^1S)$	2.78eV	1.39eV (4.08km/s)	0.05	0.00
$O(^1D)+O(^1D)$	3.02eV	1.51eV (4.25km/s)	0.275	0.13
$O(^1D)+O(^1S)$	0.80eV	0.40eV (2.19km/s)	0.05	0.10

1.[Rohrbaugh and Nisbet,1973]、2.[Paxton,1983]

解離再結合 (Dissociative recombination) により、電離のエネルギーと解離のエネルギーの差が運動エネルギーとなり高速の中性粒子が発生する [阿部,1997]。  $O_2^+$  の解離再結合によって生成される O は、3種類の電子励起状態 (P,D,S) に落ち着く。よって生成される O は表 3 のような 5 通りが重要である。 Excess Energy とは、解離再結合が起こるときに放出されるエネルギーであり、  $O_2^+$  と電子の持つエネルギーから、生成されるそれぞれの酸素原子のエネルギーを引いたものである。

$$\text{Excess Energy} = \text{Eng}[O_2^+ + e] - \text{Eng}[O(^3P \text{ or } ^1D \text{ or } ^1S)] - \text{Eng}[O(^3P \text{ or } ^1D \text{ or } ^1S)] \quad (9)$$

Excess Energy は運動エネルギーとして、生成された O に等分配される。  $O_2^+$  の解離再結合により 5 種類の組合せができるが、その発生確率を Branching ratio という。本論文で用いた Branching ratio は Rohrbaugh and Nisbet[1973] によって見積もられたものと Paxton[1983] によって見積もられたものを使用した。それぞれの Branching ratio を表 3 に示す。

外圏底付近でエネルギーを与えられた酸素原子は、その運動エネルギーに応じた初速をもち、外気圏中に放出される。



$O_2^+$  の解離再結合によって生成される酸素原子の生成量  $X$  は次式で与えられる。

$$X = 2 \times K \cdot N[O_2^+] \cdot N[e] \quad (\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}) \quad (10)$$

ここで、 $O_2^+$  解離再結合の反応係数  $K$  は

$$K = 2.2 \times 10^{-7} \left( \frac{300}{T} \right) \quad (\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}) \quad (11)$$

であり、 $N[O_2^+]$  は  $O_2^+$  密度、 $N[e]$  は電子密度、 $T$  は温度である。

それぞれの惑星外圏底高度での、温度  $T_{ex}$ 、 $O_2^+$  解離再結合の反応係数  $K_{ex}$ 、 $O_2^+$  密度  $N[O_2^+]_{ex}$ 、電子密度  $N[e]_{ex}$ 、酸素の生成量  $X_{ex}$  は表 4 に示した ( $O_2^+$  密度、電子密度は図 1,3,4 参照)。外圏底高度での  $O_2^+$  解離再結合による酸素の生成量は金星で一番多く、地球・火星ではそれに比べてかなり少ない。

表 4:  $O_2^+$  解離再結合による酸素の生成量

惑星	$T_{ex}^a$ (K)	$K_{ex}$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ )	$N[O_2^+]_{ex}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N[e]_{ex}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$X_{ex}$ ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}$ )
地球	1000	$6.6 \times 10^{-8}$	1 <sup>b</sup>	$5 \times 10^5$ <sup>b</sup>	$6.6 \times 10^{-3}$
金星	275	$2.4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^4$ <sup>c</sup>	$3 \times 10^6$ <sup>c</sup>	$5.8 \times 10^4$
火星	300	$2.2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^3$ <sup>d</sup>	$2 \times 10^3$ <sup>d</sup>	$8.8 \times 10^{-1}$

*a.*[Shizgal et al.,1996]、*b.*[飯田,2001]、*c.*[Nagy and Cravans,1988]、*d.*[Hanson et al.,1977]

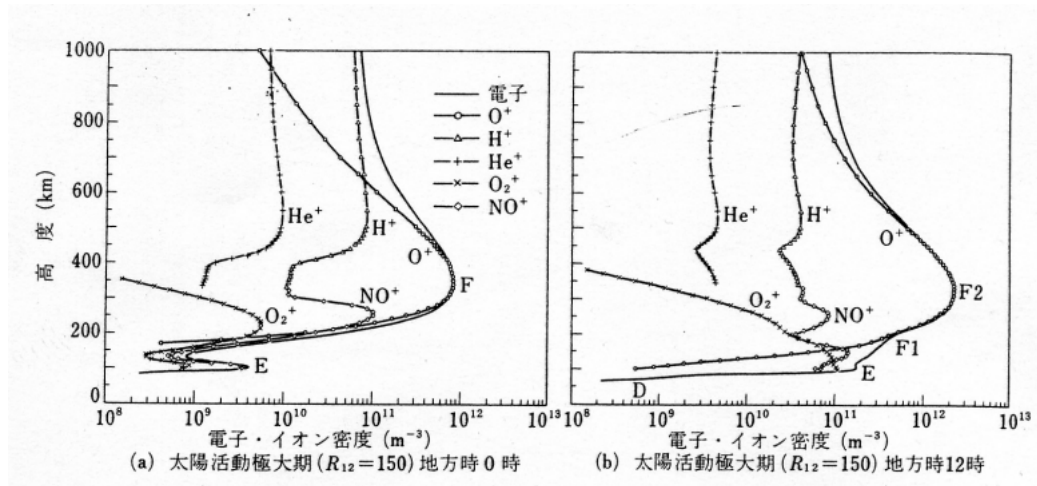


図 3: 地球外気圏中の主要なイオン密度。[飯田,2001]

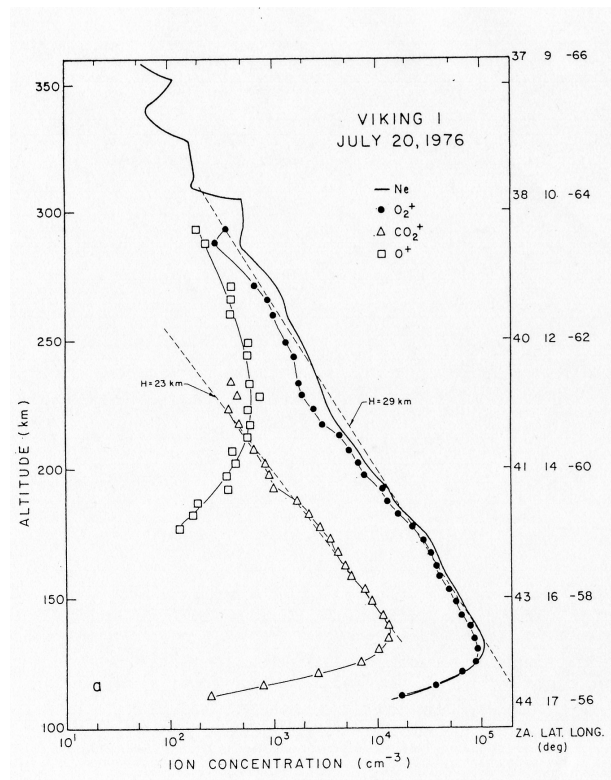


図 4: 火星外気圏中の主要なイオン密度。[Hanson et al.,1977]

### 3 計算方法

地球、金星、火星外気圏において、解離再結合によって生成される酸素原子の密度分布を計算によって求めた。

#### 3.1 軌跡の計算方法

軌跡の計算で使用した運動方程式は

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r} \quad (12)$$

であり、粒子の運動を3次的に計算する。ここで  $G$  は万有引力定数、 $M$  は惑星の質量、 $r$  は惑星中心からの距離である。

解離再結合によって生成される5種類の初速(運動エネルギー)を持った粒子を Branching ratio に従い発生量を変え、昼側の地方時12時の赤道上空の外圏底高度から角度に乱数を与えて射出した。また、使用した Branching ratio は Rourbaugh and Nisbet[1973] によって見積もられたものである。Paxton[1983] の Branching ratio による計算は後で記述する。外圏底高度は地球、金星、火星でそれぞれ 500km、200km、250km とした。計算時間は、粒子が惑星を1周するのに十分な時間 ( $5 \times 10^4$ ) とし、射出した粒子は (12) の方程式に従う。図5、6、7、8は粒子を100秒ごとにプロットしたものである。

太陽の紫外線により原子がイオン化する時間  $t_i$  は次式で与えられる。

$$t_i = \frac{1}{\sigma_a \cdot \Phi_i} \quad (13)$$

ここで、 $\sigma_a$  は原子の吸光断面積 ( $10^{-22}\text{m}^2$ [永田 and 等松,1973])、 $\Phi_i$  は惑星に届く太陽起源の光子の量である。 $\Phi_i$  は金星、地球、火星でそれぞれ  $5.17 \times 10^{15}(\text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ 、 $2.7 \times 10^{15}(\text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ [永田 and 等松,1973]、 $1.15 \times 10^{15}(\text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$  であり、 $t_i$  は金星、地球、火星でそれぞれ  $2 \times 10^6$  秒、 $3 \times 10^6$  秒、 $1 \times 10^7$  秒である。 $\Phi_i$  は太陽からの距離の2乗に反比例するため、金星・火星の値は地球の値から計算により求めた。太陽の紫外線により原子がイオン化する時間 ( $10^6 \sim 10^7$  秒) は計算時間 ( $5 \times 10^4$ ) よりもずっと大きいので、この計算では考慮していない。

この軌跡の計算結果を4.1節に記述する。また捕捉として、粒子のエネルギー別に分けて図示した結果を Appendix に示す。

#### 3.2 密度の計算方法

前節の軌跡の計算をもとに、非熱的酸素原子の密度分布を求めた。昼半球側の外圏底全体で解離再結合がおこるものとし、太陽に一番近い外圏底 (Exo[Max]) で酸素の生成量が最大であるとする。緯度、経度を10度ずつ変えていき、その地点と Exo[Max] の地点のなす角(太陽天頂角)を  $\theta$  としたとき、粒子を射出する割合  $N$  を、

$$N = N_{[\max]} \cos \theta \quad (\theta : 0 - 90^\circ) \quad (14)$$

で計算する。 $N_{[\max]}$  を 10000 とし、太陽天頂角  $20^\circ$ 、高度 200km ごとに粒子の滞在時間の総和をカウントした。密度はそのカウント数を、大気の層を太陽天頂角  $20^\circ$ 、高度 200km ごとに区切った体積、計算時間、射出量で割り、その値に外圏底高度の酸素の生成量 ( $X_{ex} \times$  昼側外圏底高度の大気の体積) を掛けて求めている。このモデルにより、太陽天頂角に応じた密度分布を計算することができ、昼側、夜側外気圏での密度の相違を示すことができる。図 9、10、11 は、金星、地球、火星の結果である。その計算結果と考察を 4.2 節に記述する。

また密度計算の捕捉として、Paxton[1983] の見積もりによる Branching ratio を使用して計算し、Rohrbaugh and Nisbet[1973] によるものと比較した結果を記述する。

## 4 結果と考察

### 4.1 軌跡の計算結果

図5、6、7は、金星、地球、火星外気圏における酸素原子の軌跡を求めた計算結果である。それぞれの惑星の北極上空から見た図であり、太陽方向をx軸の正とし、y軸は朝夕の赤道を通る線である。図の右側が昼側となり、その地方時12時の赤道上空の外圏底高度1点から粒子を射出している。粒子のエネルギー別に色別しており、それぞれ緑:3.48eV、青:2.50eV、ピンク:1.51eV、水色:1.39eV、黄色:0.40eVの粒子の軌跡を示している。また赤線は惑星の地上高度を表している。図8は火星を周回しうるエネルギーを持つ粒子のみ表示した図である。

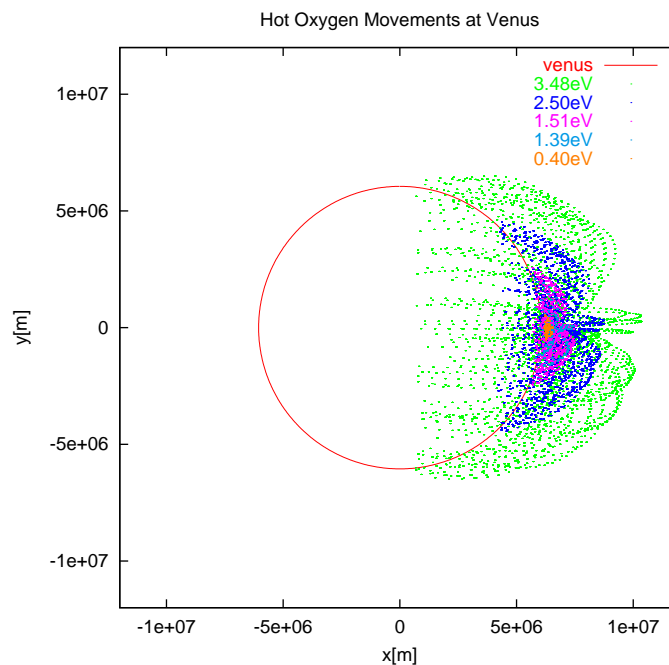


図5: 金星での酸素原子軌跡の計算結果。すべての粒子が散逸できない。エネルギーの大きい粒子ほど遠くまで運動している。

図5、6、7を比べると、金星と地球の粒子の軌跡はよく似ているが、火星の図ではまったく違う軌跡を描いていることがわかる。以下に金星・地球の図と火星の図の特徴を示す。

- 金星・地球
  - － 外圏底から射出されたすべての粒子が散逸することなく、熱圏に突入している。
  - － エネルギーの大きい粒子ほど遠くまで分布している。
- 火星

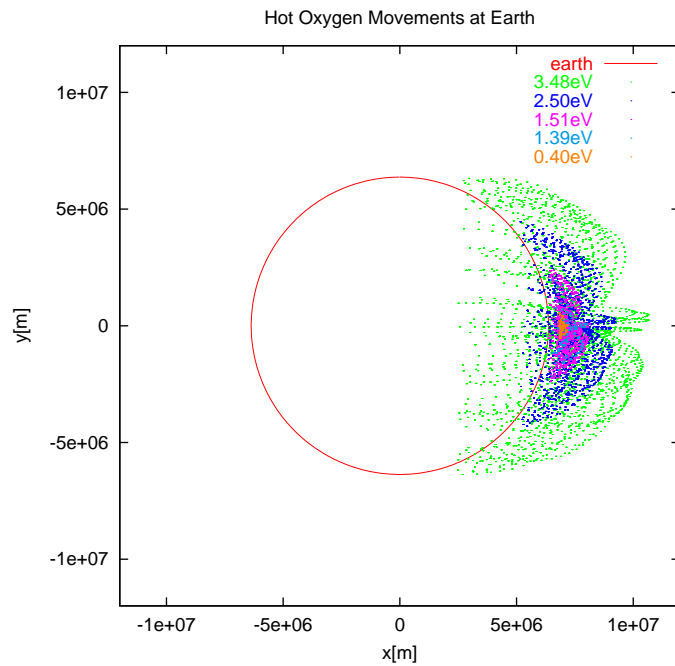


図 6: 地球での酸素原子軌跡の計算結果。金星とよく似ている。

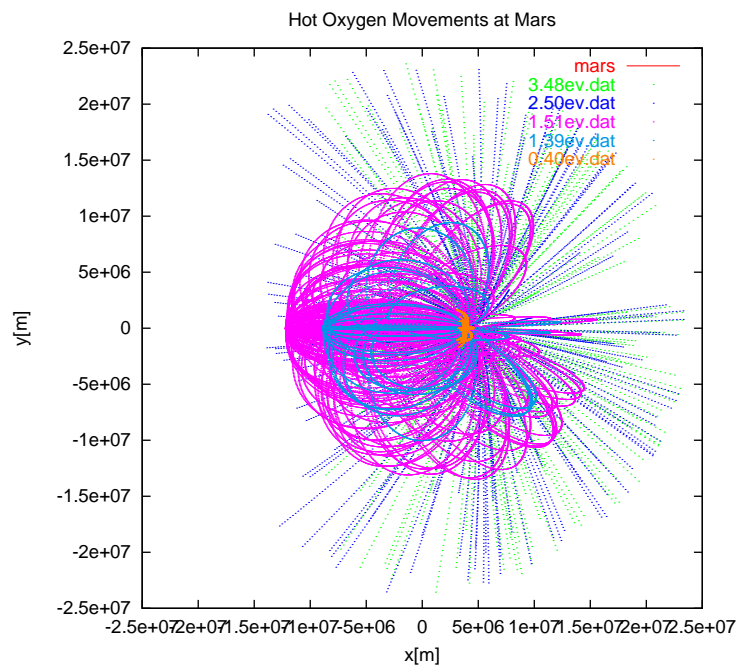


図 7: 火星での酸素原子軌跡の計算結果 1。金星・地球とは違い、惑星を周回する粒子、散逸する粒子の軌跡が見られる。

- 熱圏に突入する粒子 (0.40eV)、惑星を周回する粒子 (1.39eV、1.51eV)、散逸する粒子 (2.50eV、3.48eV) の軌跡が見られる。

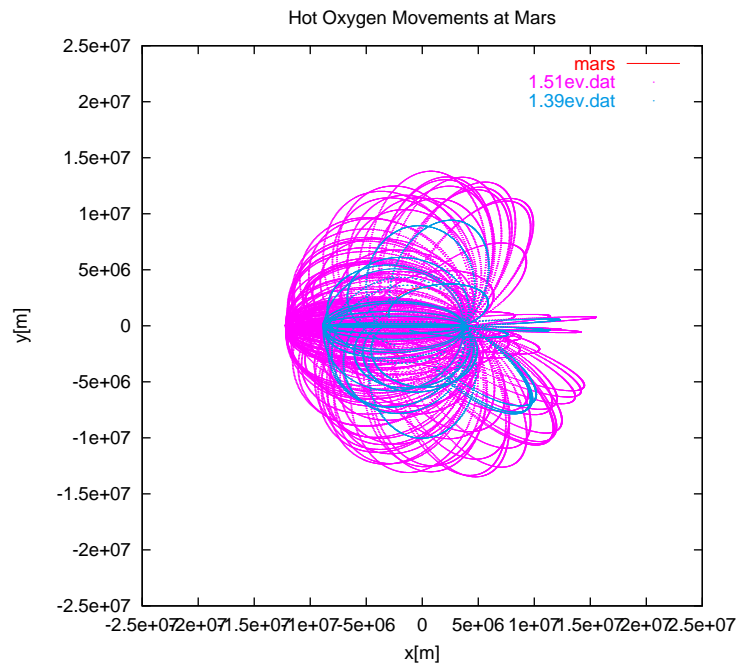


図 8: 火星での酸素原子軌跡の計算結果 2。惑星を周回する 1.51eV、1.39eV の粒子のみ表示した。

- 惑星を周回する粒子に注目する (図 8) と、夜側外気圏に多くの粒子が通過して色が濃くなっている領域が確認できる。

このような結果が出たのは、地球・金星の重力 (脱出速度) はほぼ同じで、火星はそれに比べて重力 (脱出速度) が小さいためである。火星では外気圏中の酸素原子は非常に広範囲に広がった分布をしており、また夜側外気圏中に多くの粒子が通過して密度の大きい領域が存在している。

## 4.2 密度分布の計算結果と考察

外気圏でのより詳しい酸素原子の分布を調べるため、粒子軌跡の計算から得られたデータを元に、密度の高度分布を求めた。

図9、10、11は、それぞれ金星、地球、火星での酸素原子密度の高度分布である。横軸は地上からの高度、縦軸は密度である。密度は太陽天頂角  $20^\circ$  ごとに色別して示しており（赤： $0-20^\circ$ 、緑： $20-40^\circ$ 、青： $40-60^\circ$ 、ピンク： $60-80^\circ$ 、水色： $80-100^\circ$ 、黄色： $100-120^\circ$ 、黒： $120-140^\circ$ 、橙色： $140-160^\circ$ 、灰色： $160-180^\circ$ ）、対数で表示する。

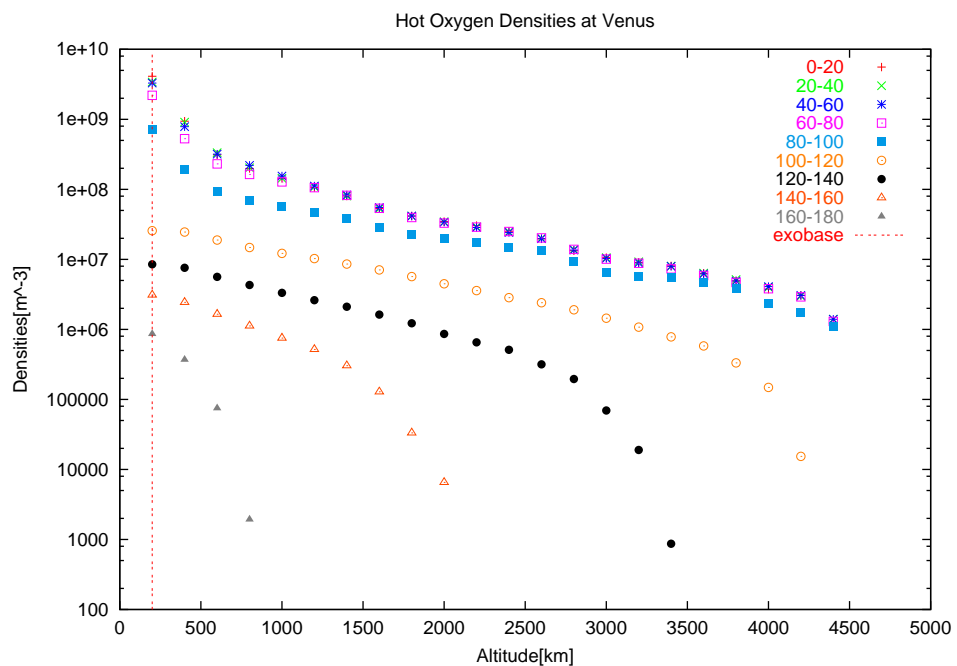


図9: 金星での酸素原子密度分布の計算結果。昼側外気圏ではほぼ一様な密度分布を示しており、朝夕付近から夜側外気圏にかけて密度、分布高度が徐々に減少していく。

それぞれの図の特徴を示す。

- 金星・地球

- 昼側外気圏（太陽天頂角  $[0-80^\circ]$ ）では、太陽天頂角を問わずほぼ同様の密度分布を示しており、高度  $4500\text{km}$  付近まで分布している。
- 朝夕付近（太陽天頂角  $[80-100^\circ]$ ）から夜側外気圏にかけて、太陽天頂角が大きくなるにつれて密度は徐々に減少していき、それに対応して分布高度も減少している。
- 太陽天頂角  $[0-40^\circ]$  付近（真昼）と  $[140-180^\circ]$  付近（真夜中）では外圏底高度で  $10^3 - 10^4$  ほどオーダーの違いが見られる。

- 火星



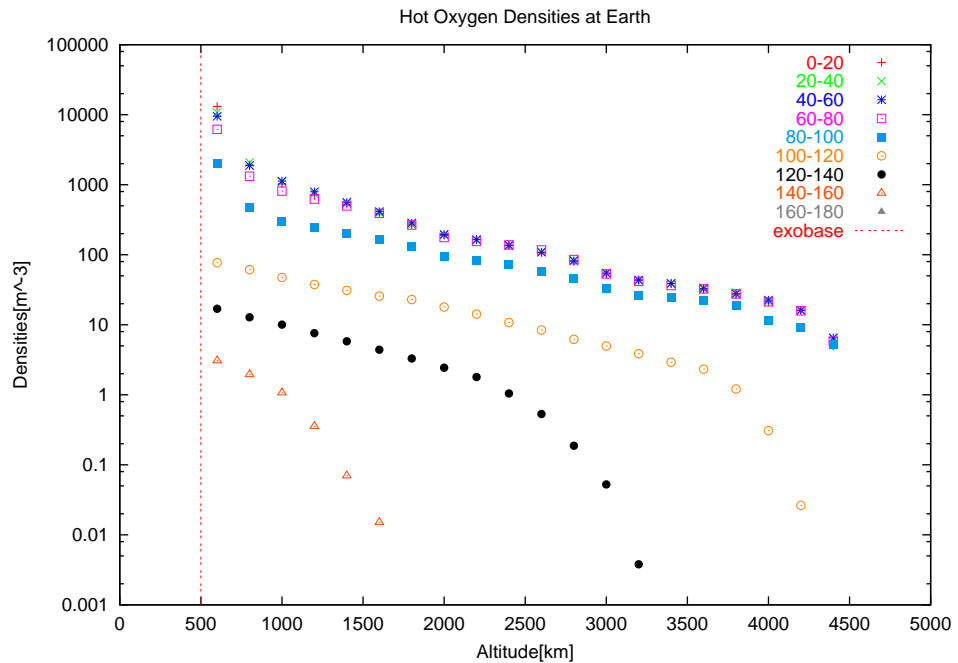


図 10: 地球での酸素原子密度分布の計算結果。金星の計算結果とよく似ている。

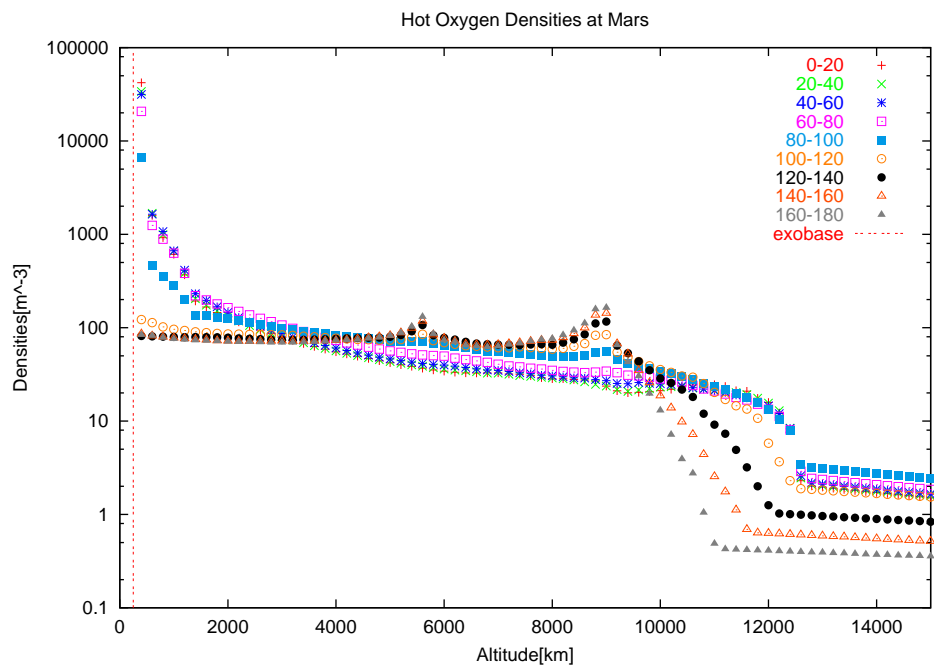


図 11: 火星での酸素原子密度分布の計算結果。全球的に高度 11000km 以上まで広範囲に分布している。夜側外気圏では高度 5000km、9000km 付近に密度の極大値が見られる。

- 全球的に高度 11000km 以上まで広範囲に分布しており、高度 4000km-10000km 付近では昼側より夜側外気圏の方が密度が大きい。また散逸する粒子が存在するため、高度 11000km 以上にも密度分布が示される。
- 昼側外気圏では、太陽天頂角を問わずほぼ同様の密度分布を示しており、高度 12000km 以上まで分布している。
- 夜側外気圏では、10000km 付近までは太陽天頂角を問わず同様の密度分布を示しているが、それ以上の高度では太陽天頂角が大きくなるにつれて密度・分布高度が徐々に減少していく。また、高度 5000km、9000km 付近に密度の極大値が存在する。
- 外圏底高度では、昼側と夜側で  $10^1 - 10^2$  ほどオーダーの違いが見られる。

粒子軌跡の図と同様に、金星、地球での酸素原子密度分布はよく似ていて、滑らかな曲線になる。また、太陽天頂角が大きくなるにつれて、密度・分布高度が徐々に減少する。火星の密度分布は、金星・地球に比べてより広く全球的に分布している。また夜側外気圏では、昼側より密度の大きい領域が存在し、密度の極大値が見られる。

図 12、13、14 は太陽天頂角 [0-60 °]、[60-120 °]、[120-180 °] における密度分布を金星、地球、火星で比較した結果である。昼側 (図 12) において金星、地球の高度分布はよく似ており、火星では金星・地球の約 3 倍もの高高度まで広がっている。また金星外圏底高度では地球・火星に比べて  $10^5$  程オーダーが大きい。昼夜境界線付近 (図 13) から夜側にかけて金星・地球では徐々に密度・分布高度が減少しており、夜側外気圏では金星より地球のほうが密度・分布高度ともに小さくなっている。これは、地球の方が惑星半径が大きく、粒子の飛距離が短くなるためである。一方火星の夜側外気圏では、10000km までほぼ一様の密度分布を示しているが、高度 5000km、9000km 付近に密度の極大値が存在する。これは、火星を周回する粒子 (1.39eV、1.51eV) が影響している (図 8 参照)。

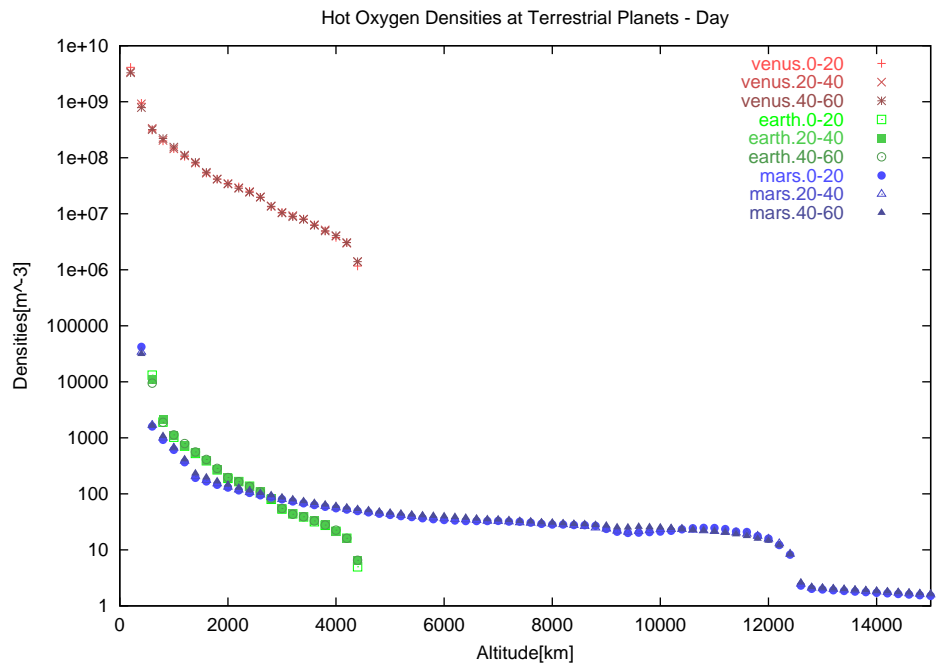


図 12: 地球型惑星での昼側外気圏酸素原子密度分布の計算結果。

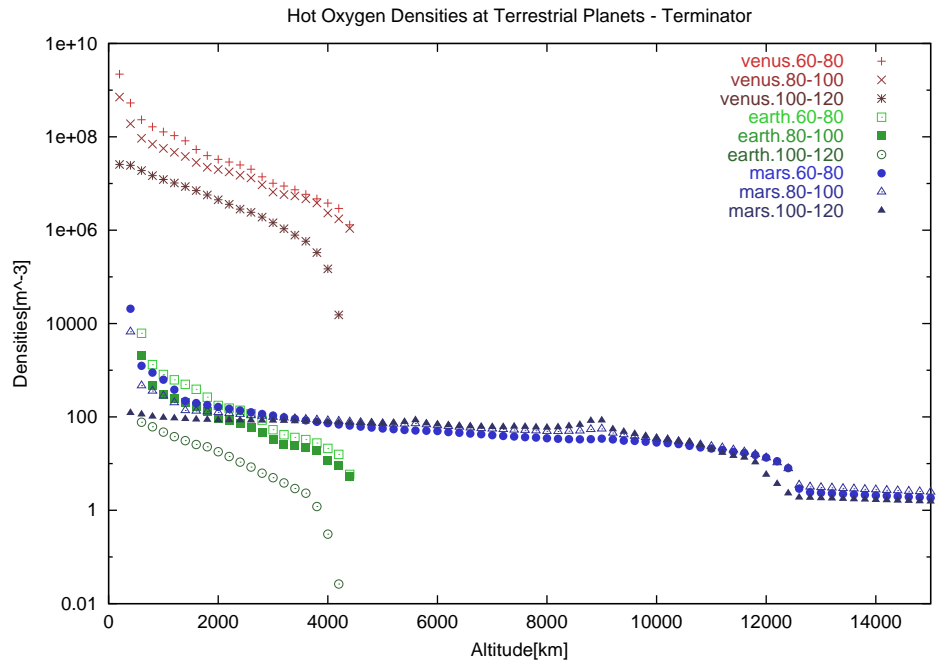


図 13: 地球型惑星での朝夕外気圏酸素原子密度分布の計算結果。

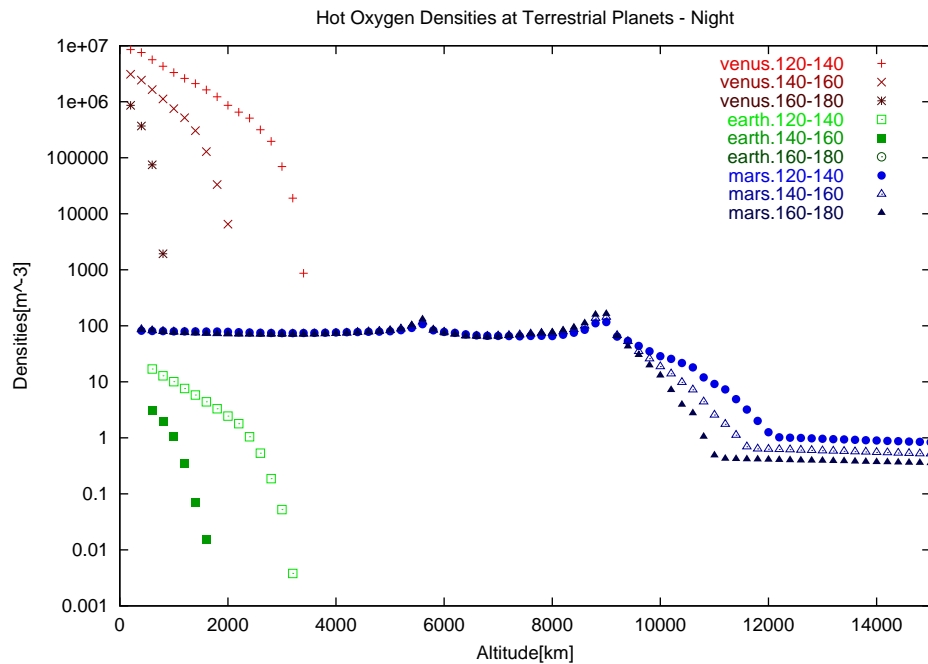


図 14: 地球型惑星での夜側外気圏酸素原子密度分布の計算結果。

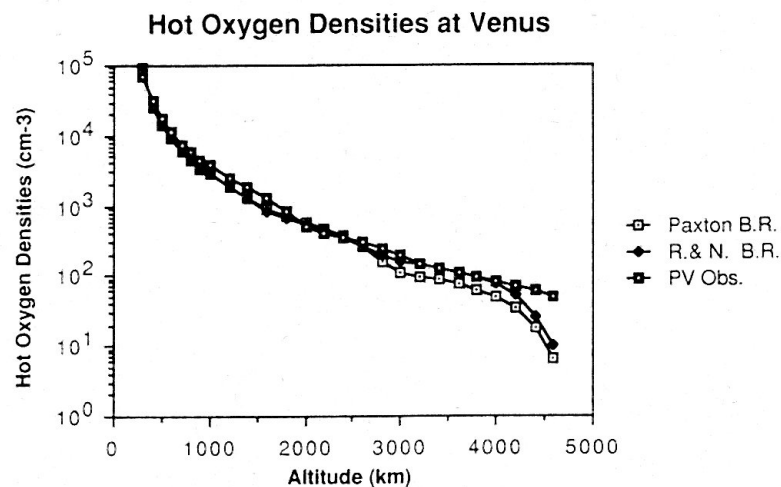


図 15: Nagy and Cravans[1988] によって得られた金星での酸素原子密度の計算結果とPVOによる観測結果。

金星での酸素原子密度の高度分布において、昼側外気圏での計算結果はオーダーが1桁ほど違うが Nagy and Cravans[1988] の高度分布 (図 15) とよく一致している。このオーダーの違いは  $O_2^+$  密度、電子密度の見積りりの違いが影響していると思われる。図 15 には PVO の観測データも載っているが、そのデータは高度 4000km 付近までよく一致している。それ以上の高度では観測値が計算値よりも大きい。この違いは高度 4000km を超える酸素原子には別の散逸過程が存在している、あるいは外気圏での粒子

衝突の重要性を示しているのかもしれない。

図 16、17 は昼側、夜側外気圏において Rohrbaugh and Nisbet と Paxton の見積もりによる Branching ratio を使って金星、地球、火星での密度分布を比較した結果である。

金星・地球では大きな違いはあまりないが、火星では Paxton の見積もりを使った計算で全球的に密度は小さくなっており、また 1.39eV の粒子は生成されないものとしていたので、夜側外気圏高度 5000km 付近の密度の極大値は見られない。金星については Nagy and Cravans[1988] によって計算されたもの (図 15) とよく一致する。Appendix には Paxton の見積もりによる Branching ratio を使って計算した金星・地球・火星での太陽天頂角別の密度分布結果を記載する。

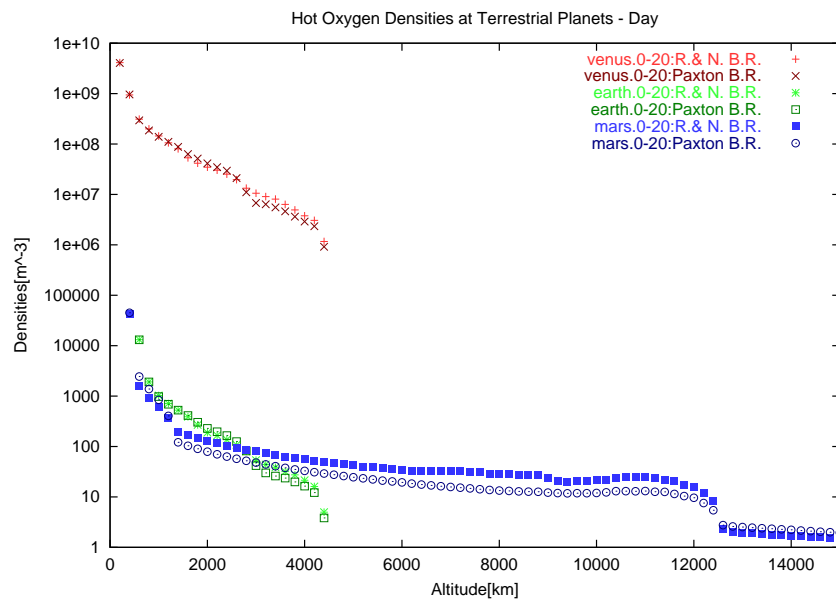


図 16: Branching ratio を変えて比較した結果。地球型惑星昼側外気圏での酸素原子密度分布の計算結果。

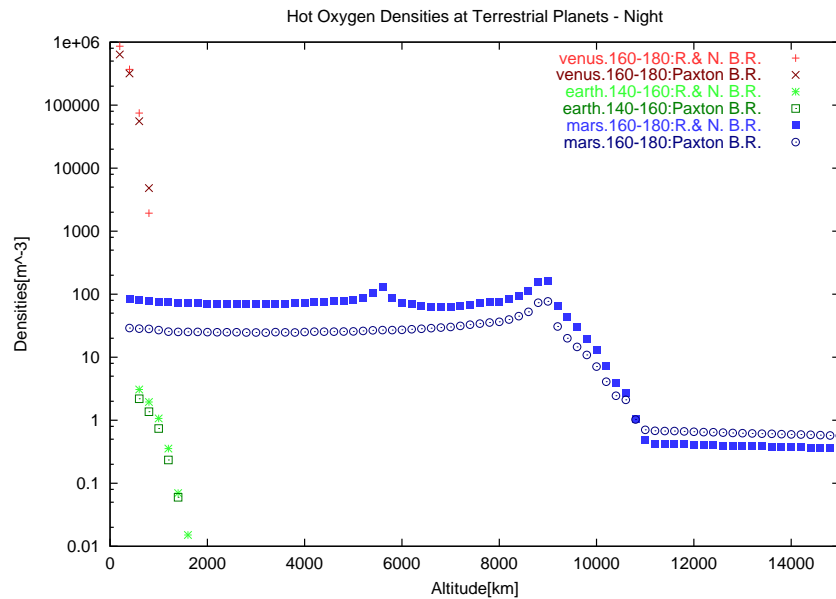


図 17: Branching ratio を変えて比較した結果。地球型惑星夜側外気圏での酸素原子密度分布の計算結果。

## 5 まとめ

地球型惑星外気圏中の酸素原子は、主に  $O_2^+$  イオンの解離再結合によって生成される。生成されるときに運動エネルギーを得た酸素原子は外気圏領域に広く分布する。金星は地球・火星より放射が強く、また外圏底付近では  $O_2^+$  密度・電子密度が高いため、非熱的酸素原子は多量に生成される。地球では  $O_2^+$  密度が金星より小さいために、解離再結合によって生成される酸素原子の量は金星ほど多くない。計算により得られた外気圏中の酸素原子の密度分布を地球型惑星で比較すると、地球・金星では、解離再結合によって生成された酸素原子はすべて脱出速度を超えることができず、重力に捕捉されて放物線を描きながら熱圏へ突入する。また昼側外気圏では高度 4500km 付近まで分布し、それ以上の高度には見られず、夜側外気圏では太陽天頂角が大きくなるにつれて徐々に密度・分布高度が減少する。金星の実際の観測データを見ると、高度 4500km を超える粒子の存在が確認できる。よって高度 4500km 以上まで分布する酸素原子は、さらに別の散逸過程、あるいは衝突の効果をとおして、粒子に運動エネルギーが与えられていると考えられる。火星では生成された酸素原子の約 60% が脱出速度を超える運動エネルギーを持つために、それらの粒子は宇宙空間へそのまま放出 (散逸) される。昼夜を問わず高度 11000km 以上まで分布し、また惑星を周回する酸素原子は夜側外気圏で同じ領域を通過するので、昼側よりも密度の大きい領域があり、その粒子の通過する夜側の高度約 5000km、9000km 付近に酸素原子の溜る場所が存在する。

火星で  $O_2^+$  イオンの解離再結合で  $O$  がどのくらい生成されているのかという観測データはないが、2004 年に火星探査衛星「のぞみ」(Appendix) が火星外気圏中の酸素の密度を観測する予定であり、本研究との比較が可能である。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、渡部重十教授にはたいへんお世話になりました。数々の助言、はげましを与えてくださったすべての方々に感謝の意を表します。また、少々手荒な操作にも壊れることなく、軽快に動作してくれた私のノートPCに感謝と愛情をささげます。

## 参考文献

- [1] 阿部 豊,1997, 岩波講座 地球惑星科学 比較惑星学, 第4章 4.1-4.2 節,233-306
- [2] Chamberlain,J.W.,1963,Planetary coronae and atmospheric evaporation, *Planet. Space Sci.*,11,901-960
- [3] Hanson,W.B.,S.Sanatani,and D.R.Zuccaro,1977, The Martian Ionosphere as Observed by the Viking Retarding Potential Analyzers, *J.Geophys.Res.*,VOL.82,No.28,4351-4363
- [4] Hodges,R.R.,1994,Monte Carlo simulation of the terrestrial hydrogen exosphere,*J.Geophys.Res.*,VOL.99,NO.A12,23,229-23,247
- [5] 飯田 尚志,2001, 理科年表 平成 14 年, 地学部, 電離圏,819-820
- [6] 国立天文台,2001, 理科年表 平成 14 年, 天文部,82-83
- [7] McElroy,M.B.,M.J.Prather,and J.M.Rodriguez,1982,Loss of oxygen from Venus, *Geophys.Res.Lett.*,9,pages 649-651
- [8] 永田 武,and 等松 隆夫,1973, 超高層大気の物理学,45-46,179-190
- [9] Nagy,A.F.,T.E.Cravans,J.H.Yee and A.I.P.Stewart,1981,Hot oxygen atoms in the upper atmosphere of Venus,*Geophys.Res.Lett.*,8,629
- [10] Nagy,A.F.,and T.E.Cravans,1988,Hot oxygen atoms in the upper atmospheres of venus and mars,*Geophys.Res.Lett.*,VOL.15,NO.5,433-435
- [11] 小倉 義光,1999, 一般気象学 [第2版], 第1章 1.2 節,11, 第2章,2.5 節,36-39
- [12] Paxton,L.J.,1983,Atomic Carbon in the Venus Thermosphere:Observations and Theory,Ph.D.Thesis,University of Colorado
- [13] Rodriguez,J.M.,M.J.Prather,and M.B.McElroy,1984,Hydrogen on Venus :Exospheric distribution and escape,*Planet.Space Sci.*,32,1235-1255
- [14] Rohrbaugh,R.P.and J.S.Nisbet,1973,Effect of energetic oxygen atoms on neutral density models,*J.Geophys.Res.*,78,6788

- [15] Shizgal, B.D., and G.G. Arkos, 1996, Nonthermal escape of the atmospheres of venus, *Rev. Geophys.*, VOL.34, NO.4, 483-505



## A Appendix

### A.1 大気の散逸

#### A.1.1 ジーンズエスケープ

大気が熱平衡にある場合、気体の熱運動の速度はある確率で惑星の脱出速度を超える。このような気体分子は惑星の重力を振り切って宇宙空間に放出される可能性がある。下層大気では気体分子の密度が高く、高速で運動している気体分子はすぐに他の気体分子と衝突して減速し宇宙空間に飛び去ることはできないが、上層大気では気体分子の密度が低いので、他の気体分子と衝突しないでそのまま宇宙空間に飛び去ってしまう。これをジーンズエスケープ (Jeans escape) という。散逸量は気体分子の質量に比例するため、軽い気体ほど逃げやすく、重い気体はまったく逃げない。

#### A.1.2 ハイドロダイナミックエスケープ

ハイドロダイナミックエスケープ (hydrodynamic escape) は、惑星大気が静水圧平衡になれない場合に起こる大気の散逸過程である。静水圧平衡がやぶれると大気は全体として流出する。大気の流出は気体が惑星の重力圏から取り去られるということだから、惑星の重力を振り切るだけのエネルギーが必要である。そのエネルギーを得るためには上層大気が加熱されることが必要であり、遠紫外線、極端紫外線による加熱が重要である。この散逸過程は紫外線が非常に強い場合にのみ起こりうる。現在の太陽は紫外線も弱く、惑星でハイドロダイナミックエスケープは観測されていない。しかし、若いころの太陽は非常に強い紫外線を出していた可能性があり、原始惑星からハイドロダイナミックエスケープが起こったことが期待されている。特に、この散逸により金星から水が失われた可能性が指摘されている。

#### A.1.3 非熱的散逸過程

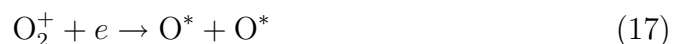
- 電荷交換 (charge exchange)

高いエネルギーを持ったイオンと中性粒子が電荷の交換をし、高い運動エネルギーを持った中性粒子が出現する。例として、



- 解離再結合 (Dissociative recombination)

電離のエネルギーと解離のエネルギーの差が運動エネルギーになるために高速の粒子が発生する。例として、



- ・イオン中性粒子反応 (Ion-Neutral reaction)

化学結合が形成されるときに解放されるエネルギーで粒子が加速されて散逸する。例として、



- ・衝突解離 (Impact dissociation)

光電子または加速された電子が入射して粒子が加速される。例として、



- ・光解離 (Photodissociation)

光子が入射して粒子が加速される。例として、



- ・スパッタリング (sputtering)、ノックオン (knock-on)

高速粒子との衝突でエネルギーが付与されて散逸する。高速粒子は中性粒子でもイオンでもよいが、より加速しやすいイオンの方が重要である。ノックオンは小さいエネルギーでよいが、スパッタリングには数 kV 以上のエネルギーが必要。例として、



以上の非熱的散逸過程はすべて中性粒子が散逸するものであるが、イオンは磁場の制約を受けるために磁場が存在する惑星では中性粒子よりも逃げにくい。しかし、電場による加速を受ける等、イオン特有の散逸機構も存在する。次の太陽風によるピックアップ作用もイオン特有の散逸機構である。

- ・太陽風によるピックアップ作用 (solar wind pick up)

紫外線や電子の衝突等で電離した粒子が太陽風に持ち去られて散逸する。



(参照 [阿部,1997])

## A.1.4 主な原子の主要な散逸過程

ここでは地球型惑星における主な原子の主要な散逸過程を示す。

・地球	
H	電荷交換、ジーンズ、イオンとして散逸
D	電荷交換、ジーンズ、イオンとして散逸
He	イオンとして散逸
O コロナ	解離再結合
・金星	
H	解離再結合またはロックオン
H コロナ	電荷交換、イオン中性粒子反応
O コロナ	解離再結合
・火星	
H	ジーンズ
H <sub>2</sub>	ジーンズ
N	衝突解離、解離再結合
O	解離再結合

(参照:[阿部,1997])

## A.1.5 金星大気の散逸

金星の大気からは中性粒子とプラズマの両方が現在も大量に散逸していると考えられている。金星は惑星固有の磁場が存在しないか、あっても非常に弱いと考えられている。このような惑星では磁気圏が存在しないため、太陽風と惑星大気が強く直接相互作用し、大量の大気・プラズマが流出している。惑星大気と太陽風が直接相互作用することに起因して、散逸のためのエネルギー源が外部から供給されるような過程が卓越している。現在は外気圏温度が約 200K と低いため熱的散逸は少なく、非熱的散逸が重要である。解離再結合による非熱的酸素原子の生成は金星大気で最も重要な反応であり、この酸素原子は水素原子との衝突を通して非熱的酸素、重水素を生成し、これらが金星大気からの散逸粒子の重要な構成要素となる。

(参照:[阿部,1997 ; Shizgal et al.,1996], 金星探査計画提案書)

## A.1.6 地球大気の散逸

地球大気からの荷電粒子の散逸現象に関しては、観測データにより水素イオン、ヘリウムイオン、酸素イオン等が極域電離圏から磁気圏へ大量に流出していることが明らかにされている。地球の熱圏上部では温度約 700K- 1300K あり、熱的散逸も重要である。地球には惑星固有の双極子磁場があるが、強い固有磁場を持つ惑星では磁気圏

と太陽風の相互作用による電離圏プラズマの加熱やオーロラ領域での加速によりプラズマが流出する。

(参照:[阿部,1997 ; Shizgal et al.,1996], 金星探査計画提案書)

#### A.1.7 火星大気の散逸

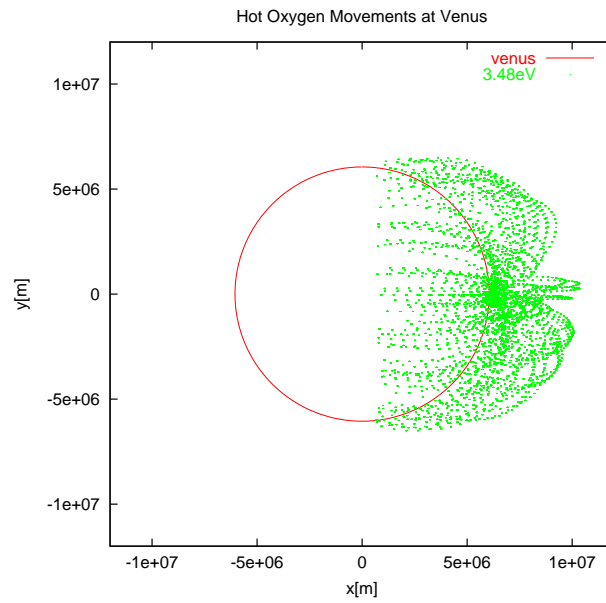
火星大気は、金星同様太陽風(太陽から流れ出ている高速のプラズマ流)が上層大気に吹き付けている。火星大気の散逸は大まかに3つに分けると次のようになる。1、電離圏上部から直接太陽風によってはぎとられていく。2、中性の粒子のまま太陽風の中にしみ出した大気が太陽の紫外線により電離し、太陽風に捕らえられて流される。3、太陽風とは別のなんらかの原因で、上層大気のイオン・中性粒子が加速、加熱され脱出速度を超え火星重力を振り切って流れ出す。旧ソ連の火星探査機フォボスは火星大気から宇宙空間へ大量の酸素イオン、一酸化炭素イオン、二酸化炭素イオンが流出していることを発見している。

(参照:<http://www.planet-b.isas.ac.jp/>,[阿部,1997 ; Shizgal et al.,1996])

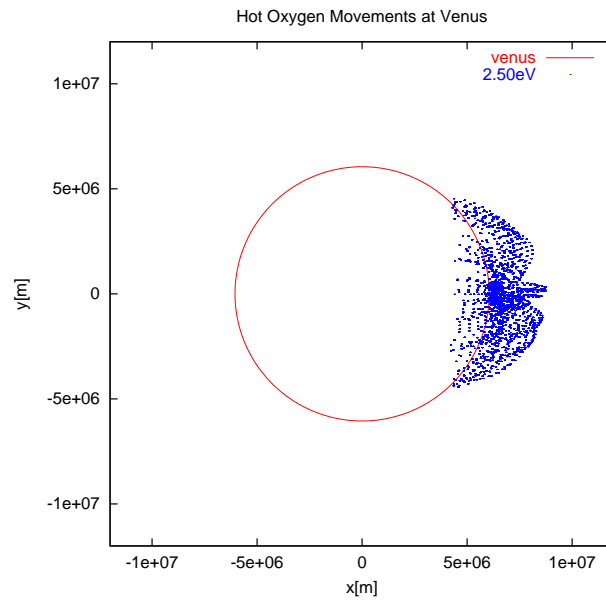
## A.2 粒子軌跡の計算結果、捕捉

軌跡の計算結果を粒子のエネルギー別に図示したものを記載する。

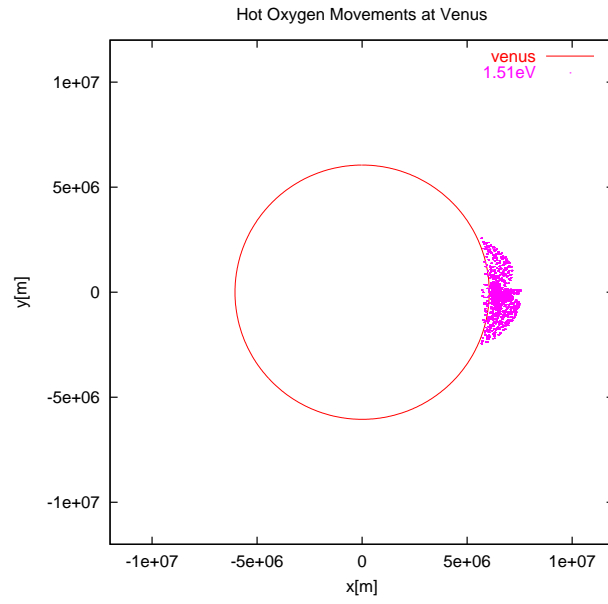
## • 金星



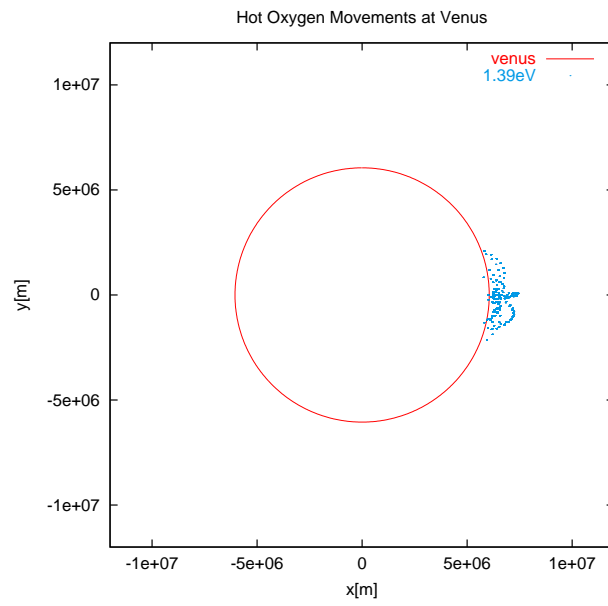
☒ 18: 3.48eV



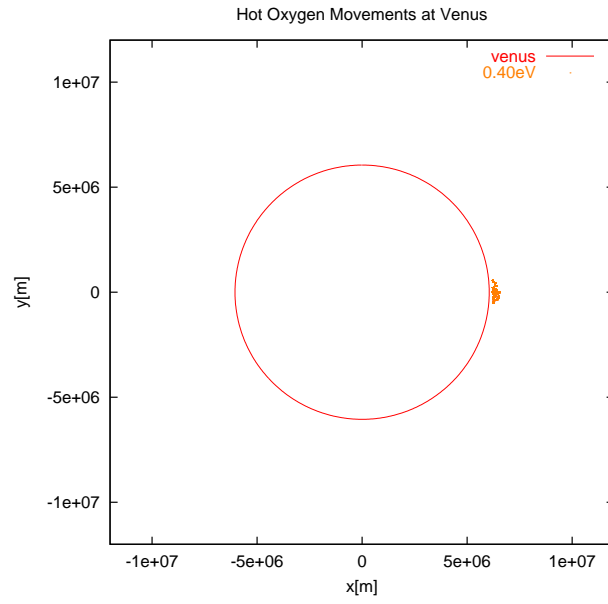
☒ 19: 2.50eV



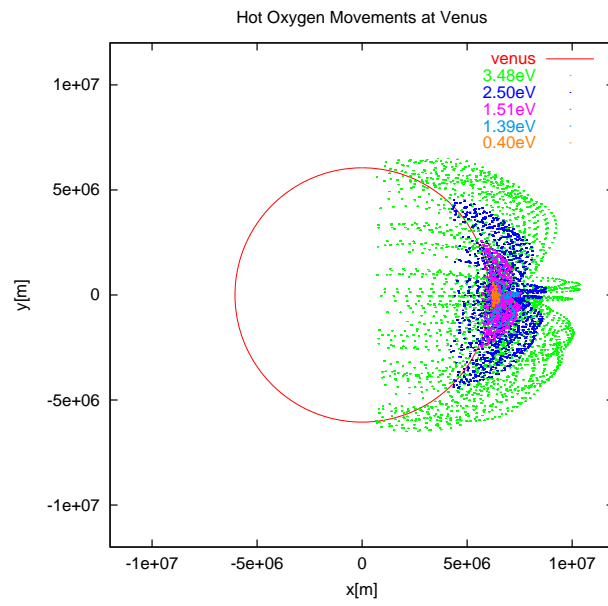
☒ 20: 1.51eV



☒ 21: 1.39eV

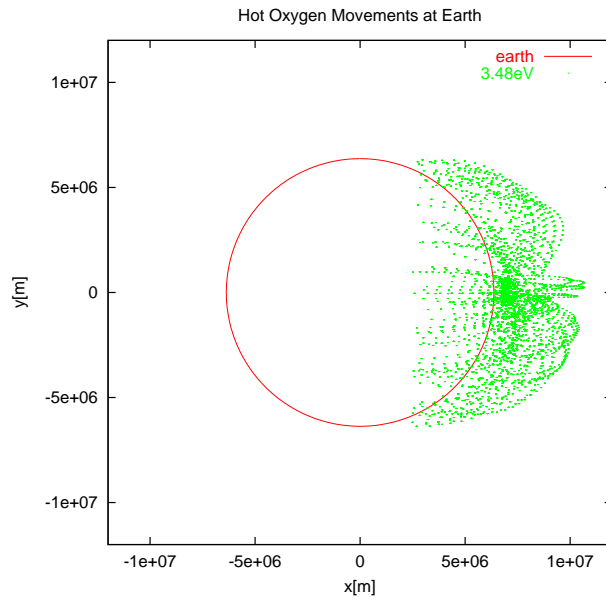


☒ 22: 0.40eV

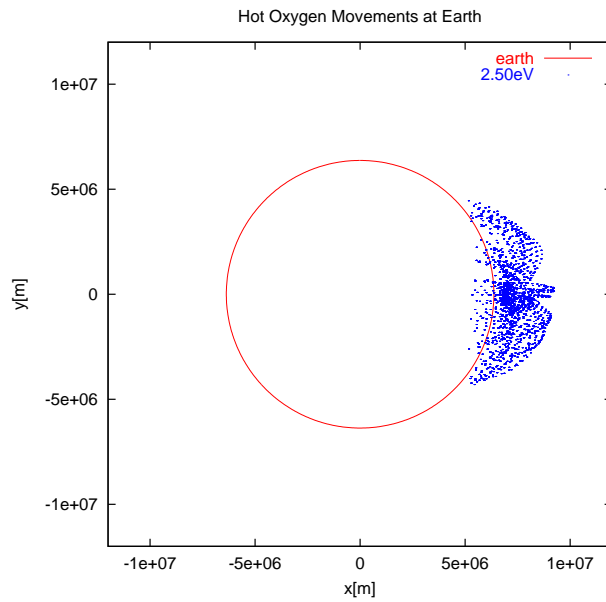


☒ 23: total

• 地球

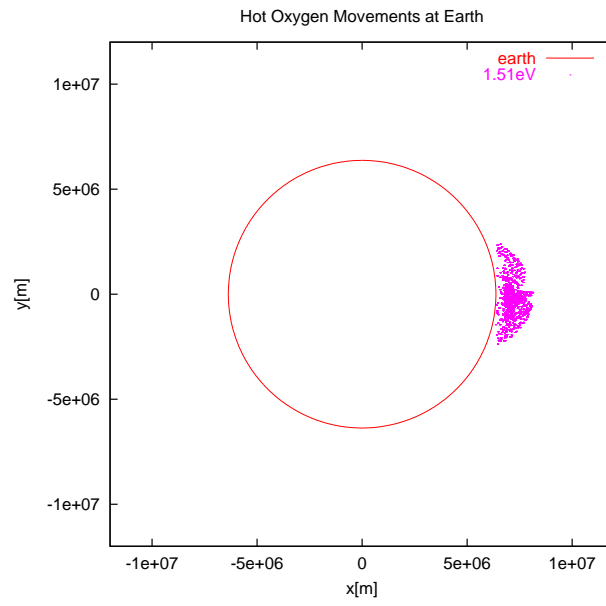


☒ 24: 3.48eV

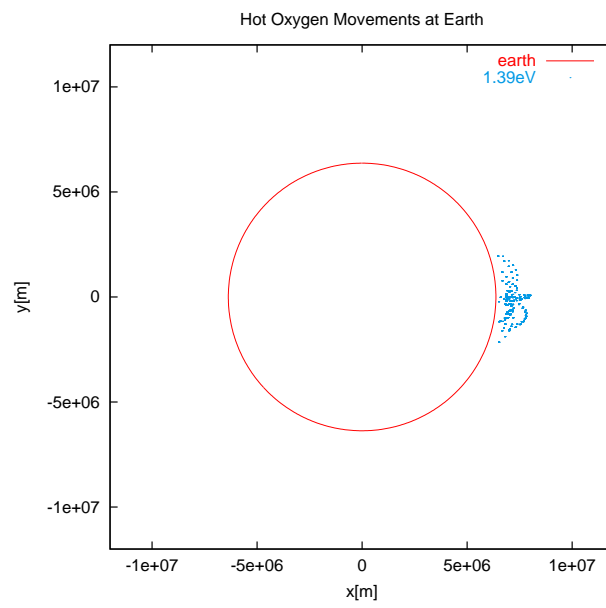


☒ 25: 2.50eV

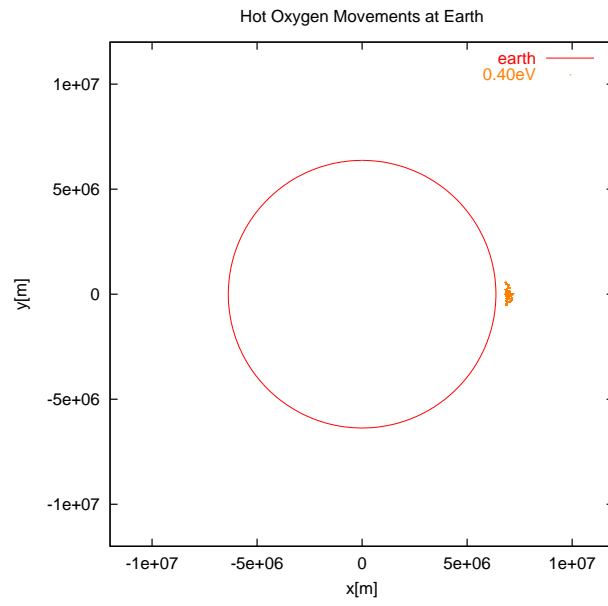




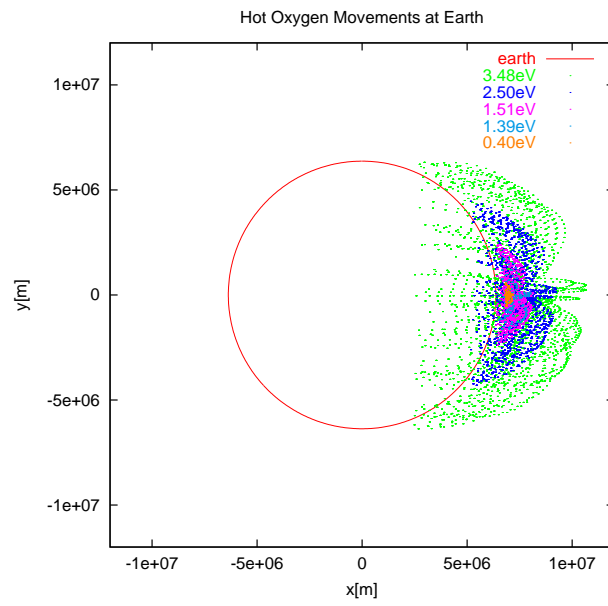
☒ 26: 1.51eV



☒ 27: 1.39eV

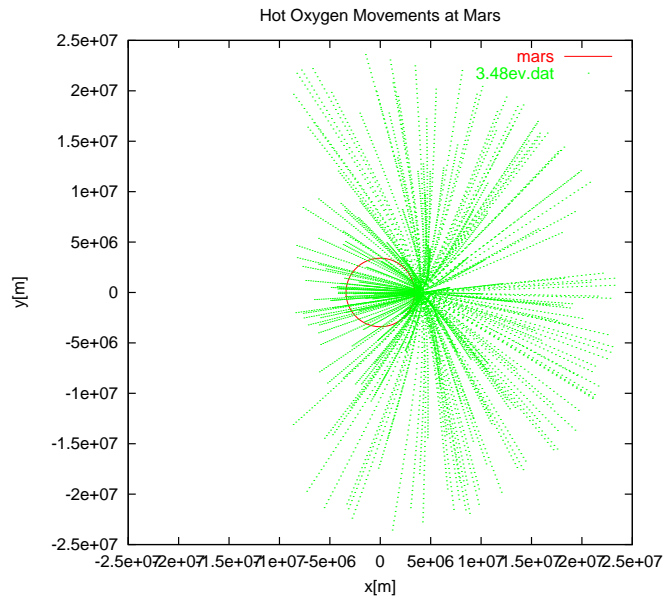


☒ 28: 0.40eV

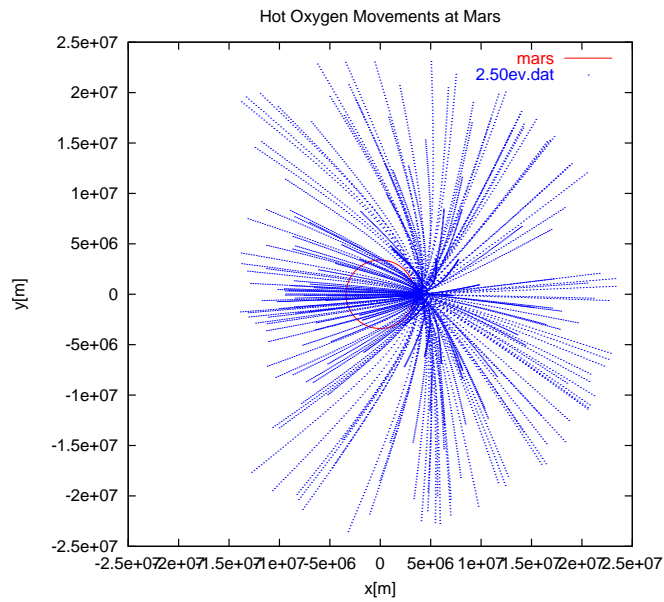


☒ 29: total

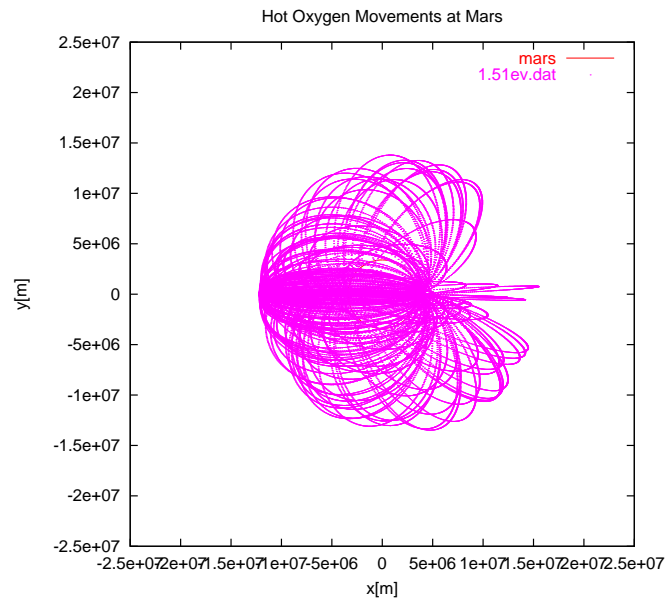
• 火星



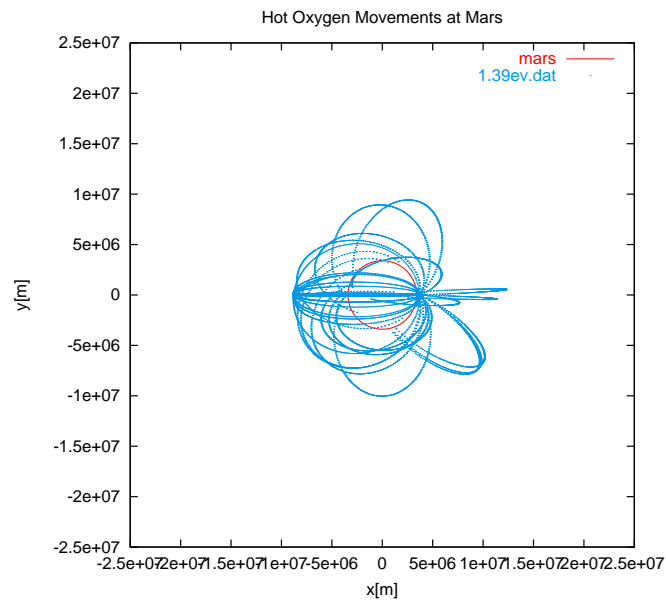
☒ 30: 3.48eV



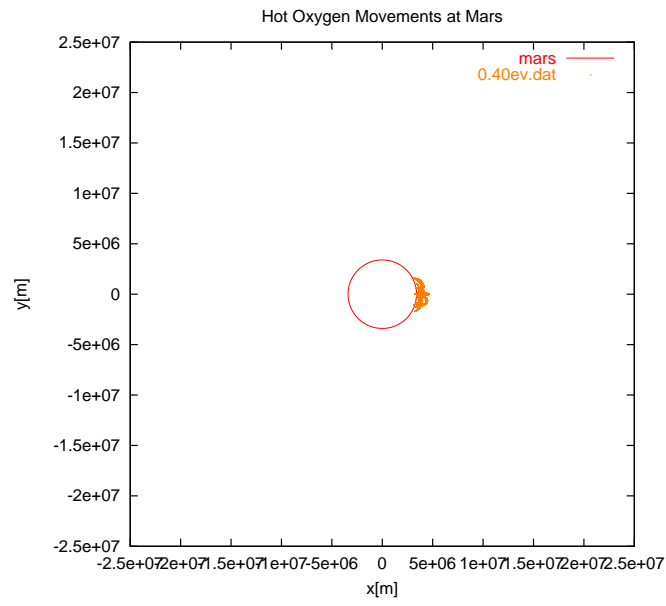
☒ 31: 2.50eV



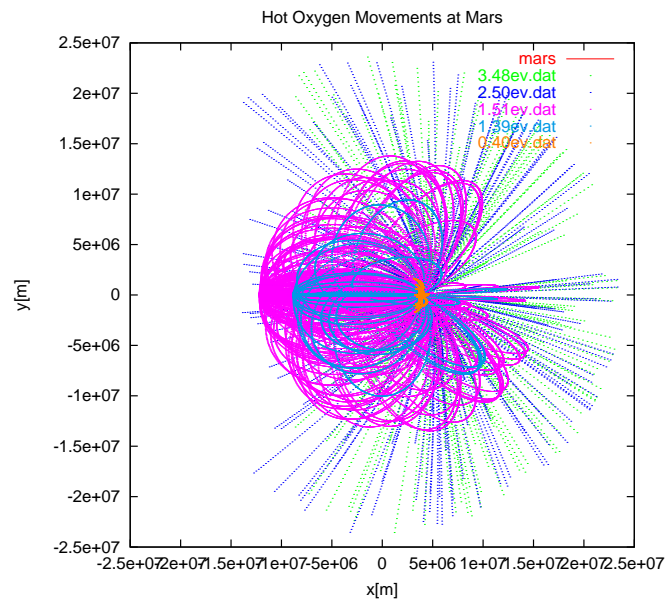
☒ 32: 1.51eV



☒ 33: 1.39eV



☒ 34: 0.40eV



☒ 35: total

### A.3 Paxton の Branching ratio を用いた計算結果

Paxton の見積もりによる Branching ratio を使用して計算した密度分布の計算結果を記載する。

#### ・金星

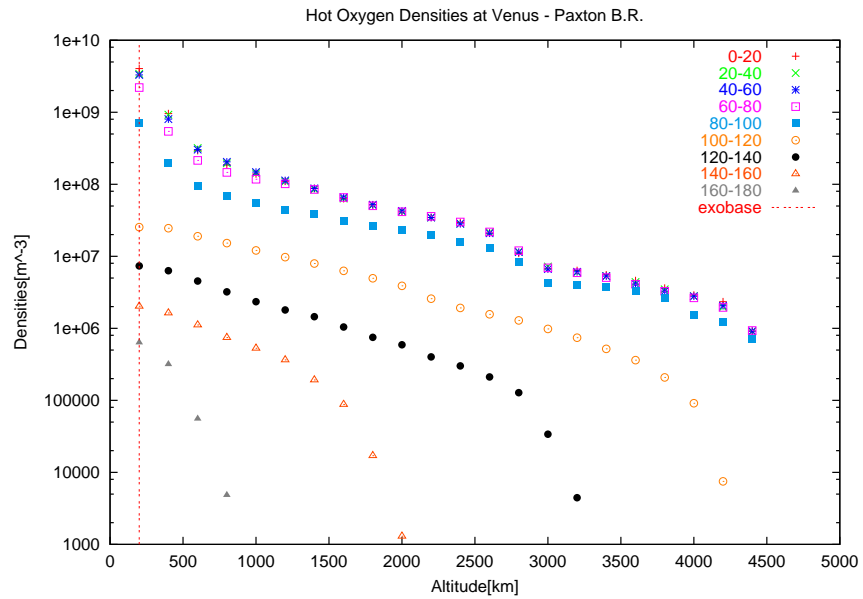


図 36: 金星での Paxton B.R. による酸素原子密度分布の計算結果。

• 地球

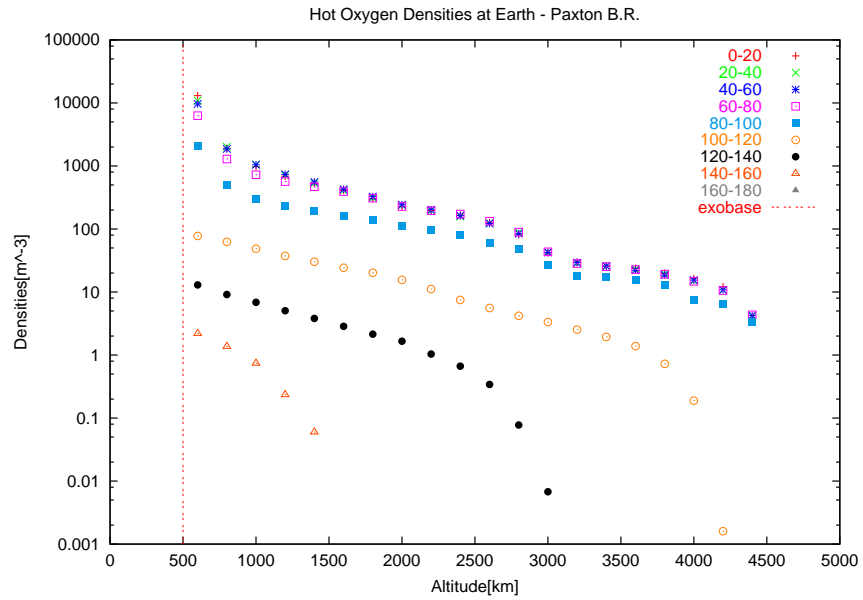


図 37: 地球での Paxton B.R. による酸素原子密度分布の計算結果。

• 火星

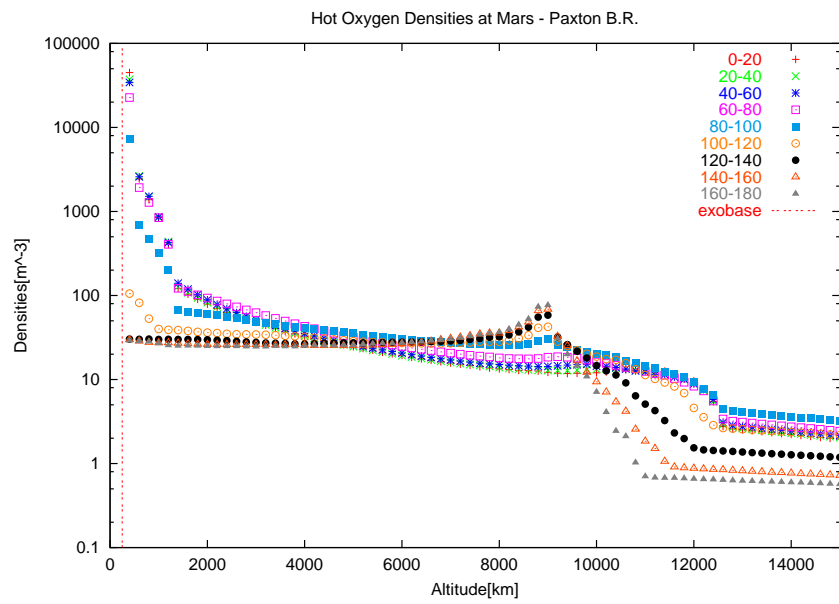


図 38: 火星での Paxton B.R. による酸素原子密度分布の計算結果。

## A.4 火星探査衛星「のぞみ」

「のぞみ」(PLANET-B)は1998年7月4日に、M-Vロケット3号機によって内之浦の鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられた、日本初の火星探査機である。PLANET-B計画の主な目的は、火星の上層大気を太陽風との相互作用に重点をおいて研究することである。外気圏中の非熱的酸素原子は、UVS(紫外線撮像分光計)やNMS(中性ガス質量分析器)によって測定される予定である。2004年に火星に到着する予定であり、到着した際の予定軌道は近火点が150km、遠火点が火星半径の15倍である。

### ・目的

「のぞみ」の主たる目的は、火星の上層大気を太陽風との相互作用に重点をおいて研究することである。「のぞみ」の火星まわりの軌道は楕円で、近火点が150km、遠火点が火星半径の15倍である。近火点が低いのは、電離圏をできるだけ低いところまで観測するためであり、遠火点が比較的高いのは、逃げていく電離圏のイオンを検出できる火星の夜側を研究するためである。

「のぞみ」の観測は5つのカテゴリーに大別される。

1. 火星の磁場を観測する。火星に惑星固有の磁場があるのかどうか、まだ正確にわかっていない。
2. 火星大気の組成や構造を調べる。
3. 火星電離圏の組成、構造、温度、プラズマ波を調べる。
4. 火星、衛星の撮像。非常に小さな搭載カメラによって、火星の天気や2つの衛星(フォボス、ダイモス)の写真を撮る。火星でどのようにして砂嵐や雲が発生するのかを研究し、また氷の極冠の様子を観測する。
5. ダストの存在確認。火星の衛星であるフォボス、ダイモスの軌道に沿って小さな塵(ダスト)がリング状に分布している可能性がある。ダスト・カウンターと搭載のカメラとを用いてその存在を探る。

### ・搭載観測機器

「のぞみ」に搭載されている観測機器は14個ある。

1. UVS(Ultraviolet Imaging Spectrometer:紫外線撮像分光計)  
波長115nmから310nm(遠紫外線から中間紫外線領域)の範囲の分光観測を行う。具体的には、火星まわりの水素・酸素のコロナや、一酸化炭素のカメロン・バンドなどの昼間大気光を観測する。また、火星大気の脱出のプロセスや進化を研究するために、D/H比(重水素/水素比)も測定する。



2. NMS(Neutral Mass Spectrometer:中性ガス質量分析器)  
四重極子タイプの質量分析器。太陽風と火星の上層大気の相互作用を研究するための鍵となる情報の一つである、火星大気の中性粒子の組成と密度を調べる。質量数が1 - 60、密度の範囲が $2 \times 10^4 - 10^{12} \text{cm}^3$ である中性ガスがこの計測器で測定できる。
3. MIC(Mars Imaging Camera:火星撮像カメラ)  
可視光のカメラ。「のぞみ」は非常に長い逆行軌道を描いて火星を周回するので、火星を全体にわたって撮像できる。ダスト・ストームの成長、大気の透明度の変化、雲の特徴の変動、極冠の消長、極域に発生するような霧の発達と厚さなどの、火星大気グローバルな変化を調べることができる。また、火星の衛星フォボス、ダイモスに数回接近する予定であり、これらの衛星の形や表面の様子も観測する。
4. MGF(Magnetic Field Measurement:磁場計測器)  
火星周辺の磁場を計測する。火星の磁気環境についてはまだよくわかっていない。アメリカの火星探査機マーズ・グローバル・サーベイヤーが、火星には強い局所的な磁場があるだけで、惑星固有の磁場はないように見えることを観測したが、火星磁場の大きさや構造については、なお議論の余地が残されている。
5. PET(Probe for Electron Temperature:電子温度測定器)  
火星電離圏の電子温度を測定する。電子温度を連続的に測定することによって、火星電離圏の熱的構造を解明する。
6. ESA(Electron Spectrum Analyzer:電子エネルギー分析器)  
12eV から 16keV までのエネルギー領域で電子のエネルギー・フラックスを測定する。この測定は、磁気圏と電離圏の構造の研究について貴重な情報を与え、また火星周辺の粒子加速や波動・粒子の相互作用のプロセスについても重要な情報となる。
7. ISA(Ion Spectrum Analyzer:イオンエネルギー分析器)  
電荷あたり 10eV から 16keV までのエネルギー領域でのイオンのエネルギー・フラックスを測定する。この測定は、ESA の測定と同様に、磁気圏と電離圏の構造の研究について貴重な情報を与え、また火星周辺の粒子加速や波動・粒子の相互作用のプロセスについても重要な情報となる。
8. EIS(Electron and Ion Spectrometer:電子及びイオン分析器)  
電子、陽子、ヘリウムイオン、酸素イオンなど高エネルギー粒子のエネルギー・フラックスを、電荷あたり 40keV から 500keV の範囲で測定する。火星の上層大気と太陽風との相互作用は、数百 eV から数十 keV のエネルギーの高い電子やイオンを生み出す。EIS はこれらの粒子を観測して、その加速のメカニズムの理解に貢献する。
9. XUV(Extra Ultraviolet Scanner:極端紫外光スキャナー)

中性ヘリウムガスとヘリウムイオンで散乱された極端紫外線領域での太陽光を観測する事によって、火星電離圏のヘリウムガスとヘリウムイオンの量と分布を調べる。中性ヘリウムガスの観測は、火星内部の活動、例えば火山活動や水の循環などについての情報を与えてくれ、一方ヘリウムイオンの測定は、ヘリウムガスのイオン化の過程やその電離圏からの脱出についての情報をもたらす。

10. PWS(Plasma Waves and Sounder: プラズマ波動並びにサウンダー観測装置)

トップサイド・サウンダーという方法によって、火星電離圏の構造を20kHz から7MHz までの周波数範囲で観測する。同時に、波動・粒子の相互作用に関連したプラズマ波動の特徴を調べる。

11. LFA(Low Frequency Plasma Wave Analyzer: 低周波プラズマ波動計測器)

火星のプラズマ波動を調べる。LFA は、低周波帯のスペクトル (10Hz から32kHz) および波形 (0Hz から1kHz) を測定する。その科学目的は、巨視的プラズマ環境や太陽風と電離圏の境界領域、あるいは太陽風と火星大気やフォボスとの相互作用によって引き起こされた微視的プラズマ現象などを観測する。

12. IMI(Ion Mass Imager: イオン質量分析器)

イオンの質量組成を測定する。電荷当たり10eV から35keV までのエネルギーを持つイオンを測定できる。360度の視野を持ち、探査機のスピンの利用してイオンの3次元分布を測定する。他の観測機器とともに、太陽風と火星上層大気の相互作用を解明するのに役立つ。同時にIMIは、ダストを含むプラズマ成分をカバーできる広い質量領域で観測するので、火星の周囲にあると推定されているダストリングを見つめる可能性がある。

13. MDC(Mars Dust Counter: ダスト計測器)

宇宙空間のダスト粒子の速度 (測定範囲は1km/s - 70km/s) と質量 (測定範囲は速度10km/s のダストで  $5 \times 10^{-15}$  -  $10^{-10}$ g) を測定する。ダストの高速衝突で発生したプラズマの電荷変化を直接に測定する。校正データを使って速度と質量の情報を得る。最大の目的は、火星のダストリングの検出である。フォボスの軌道にはリング状に、ダイモスの軌道にはトーラス状にダストの粒子が分布していると予測されているが、今回のMDCで実際にダストを観測し、その分布を明らかにする。

14. TPA(Thermal Plasma Analyzer: 熱的プラズマ分析器)

火星上層大気の熱的イオンの特性物理量、たとえば、ドリフト速度・温度・組成などを観測する。火星のプラズマの熱的エネルギー成分は、

中性大気・電離圏・磁気圏と太陽風との相互作用において重要な役割を演じる。TPAの観測は、これら相互作用のメカニズムの解明に貢献する。

(参照：<http://www.isas.ac.jp>)

## A.5 プログラム

密度計算で使したプログラムを記載する。

program(1/7)

```

c program1
c
  parameter ( in=100 ,jn=9 )
  integer icn(in,jn),jx,u,q
  integer iP,tha,thb
  integer jcn(100),jck(100),jcl(100)
  real ah ,ma,rb,Vj
  real rxa,rxb
  real an,Mm,Im,Nx,l,ll,lm,ki,xi,On,En,Ti,H,Ka
c
  do i=1,100
    jcn(i)=0
    jck(i)=0
    jcl(i)=0
  enddo
c
c
  do i=1,100
  do j=1,9
    icn(i,j)=0
  enddo
  enddo
c
c
  iP=1:earth,2:venus,3:mars
  tha:-80_+80,thb:-80_+80
  read(5,*) iP
c
  data re / 6378.0e3 /
  data Em / 5.974e24 /
c
  data rv / 6052.0e3 /
  data Vm / 4.869e24 /
c
  data rm / 3397.0e3 /
  data Mm / 6.416e23 /

  if(iP .eq. 1) then
    ri = re
    Im = Em
    ex = 500.0e3
    Ti = 1000.0
    On = 1.0
    En = 5.0e5
  else if(iP .eq. 2) then
    ri = rv
    Im = Vm
    ex = 200.0e3
    Ti = 275.0
    On = 4.0e4
    En = 3.0e6
  else if(iP .eq. 3) then
    ri = rm
    Im = Mm
    ex = 250.0e3
    Ti = 300.0
    On = 1.0e3
    En = 2.0e3
  endif
c
  data hm / 1.67e-27 /
  data ch / 1.6e-19 /
  data Ka / 1.38e-23 /
  data Gr / 6.67259e-11 /

```

program(2/7)

```

c
    dt = 1.0
    om = 16.0*hm
c
    H = ((ri+ex)**2)*Ka*Ti/(Gr*Im*om)
    Vi=(1.0/2.0)*(4.0/3.0)*3.14*((ri+ex)**3 - (ri+ex-H)**3)
    ki = (2.2e-7) * (300.0/Ti)
    Xi = 2.0 * ki * On * En * 1.0e6 * Vi / 1.0e4
c
c
    q = 0
    do k=1,5
        if(k .eq. 1) then
            ev = 1.51
            ni = 275
        else if(k .eq. 2) then
            ev = 2.50
            ni = 300
        else if(k .eq. 3) then
            ev = 3.48
            ni = 325
        else if(k .eq. 4) then
            ev = 1.39
            ni = 50
        else if(k .eq. 5) then
            ev = 0.40
            ni = 50
        endif
c
    call cinit
c
    do tha=-80,80,20
    do thb=-80,80,20
        ta = tha * 0.0174533
        tb = thb * 0.0174533
        r = ri + ex
        x1 = ri + ex
        y1 = 0.0
        z1 = 0.0
        x = r*cos(ta)*cos(tb)
        y = r*cos(ta)*sin(tb)
        z = r*sin(ta)
        a = (x-x1)**2 + (y-y1)**2 + (z-z1)**2
        Nx = 1-(a/(2.0*r**2))
        nz = ifix(10.0*Nx*ni)
        q = q + nz
c
    do n=1,nz
        v0 = sqrt(2.0*ch*ev/om)
        call unfm2(ra)
        th = ra*3.14
        call unfm2(ra)
        ph = ra*2.0*3.14
        r = ri + ex
        x = r*cos(ta)*cos(tb)
        y = r*cos(ta)*sin(tb)
        z = r*sin(ta)
        r0 = ri + ex
        x0 = x
        y0 = y
        z0 = z
c
        vx = v0*sin(th)*cos(ph)

```

program(3/7)

```

vy = v0*sin(th)*sin(ph)
vz = v0*cos(th)
do i=1,100
c
  write(6,*) i,te,x,y,z,r,ialt,vx,vy,vz
  do j=1,100
    call cmotion(x,y,z,vx,vy,vz,r,te,dt,Im)
c
    ah = (x-x1)**2 + (y-y1)**2 + (z-z1)**2
    ma = (r**2 + r0**2 -ah) / (2.0*r0*r)
    rb = 57.3*acos(ma)
    jx = ifix(rb/20.0) + 1
    if (jx.eq.10) then
      jx=9
    endif
c
    ialt = ifix( (r-ri)/200.0e3 ) + 1
    if( ialt .ge. 1 .and. ialt .le. 100 ) then
      jcn(ialt) = jcn(ialt) + 1
c
      icn(ialt,jx) = icn(ialt,jx) + 1
c
      if(x .ge. 0) then
        jck(ialt) = jck(ialt) + 1
      else
        jcl(ialt) = jcl(ialt) + 1
      endif
    endif
  enddo
c
  if(r .gt. ri*7.0 ) then
    go to 100
  else if( r .lt. ri+ex-50.0e3) then
    write (6,*) ' '
    r = ri + ex
    x = r*cos(ta)*cos(tb)
    y = r*cos(ta)*sin(tb)
    z = r*sin(ta)
    x0 = x
    y0 = y
    z0 = z
    vx = v0*sin(th)*cos(ph)
    vy = v0*sin(th)*sin(ph)
    vz = v0*cos(th)
  endif
enddo
100 continue
write(6,*) ' '
enddo
c
enddo
enddo
c
enddo
c
open(24,file='q.dat',access='sequential',form='formatted')
write (24,*) 'H,Vi,ki,Xi,q=',H,Vi,ki,Xi,q
close(11)
open(11,file='out2.dat',access='sequential',form='formatted')
pi = 3.1415
lm = ri
do i=1,100
  l = 2.0*i*1.0e5 + ri
  an = Xi*real(jcn(i))/((3.0/4.0)*pi*(1**3-lm**3)*q)

```

program(4/7)

```

        lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
        ll = (1-ri)/1.0e3
        write(11,*) ll, an
    enddo
close(11)
c
open(22,file='day1.dat',access='sequential',form='formatted')
pi = 3.1415
lm = ri
do i=1,100
    l = 2.0*i*1.0e5 + ri
    an = Xi*real(jck(i))*2/((3.0/4.0)*pi*(1**3-lm**3)*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (1-ri)/1.0e3
    write(22,*) ll, an
enddo
close(22)
c
open(23,file='night1.dat',access='sequential',form='formatted')
pi = 3.1415
lm = ri
do i=1,100
    l = 2.0*i*1.0e5 + ri
    an = Xi*real(jc1(i))*2/((3.0/4.0)*pi*(1**3-lm**3)*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (1-ri)/1.0e3
    write(23,*) ll, an
enddo
close(23)
c
c
open(12,file='jx1.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 1
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175
rxbx = real(u-1) *20.0 *0.0175
do i=1,100
    l = 2.0*i*1.0e5 + ri
    Vj = (2.0/3.0)*3.14*(1**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
    an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (1-ri)/1.0e3
    write(12,*) ll, an
enddo
close(12)
open(13,file='jx2.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 2
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175
rxbx = real(u-1) *20.0 *0.0175
do i=1,100
    l =2.0*i*1.0e5 + ri
    Vj = (2.0/3.0)*3.14*(1**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
    an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (1-ri)/1.0e3
    write(13,*) ll, an
enddo
close(13)
open(14,file='jx3.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 3
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175

```

program(5/7)

```

        rxb = real(u-1) *20.0 *0.0175
    do i=1,100
        l =2.0*i*1.0e5 + ri
        Vj = (2.0/3.0)*3.14*(l**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
        an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
        lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
        ll = (l-ri)/1.0e3
        write(14,*) ll, an
    enddo
close(14)
open(15,file='jx4.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 4
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175
rxbx = real(u-1) *20.0 *0.0175
do i=1,100
    l =2.0*i*1.0e5 + ri
    Vj = (2.0/3.0)*3.14*(l**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
    an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (l-ri)/1.0e3
    write(15,*) ll, an
enddo
close(15)
open(16,file='jx5.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 5
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175
rxbx = real(u-1) *20.0 *0.0175
do i=1,100
    l =2.0*i*1.0e5 + ri
    Vj = (2.0/3.0)*3.14*(l**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
    an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (l-ri)/1.0e3
    write(16,*) ll, an
enddo
close(16)
open(17,file='jx6.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 6
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175
rxbx = real(u-1) *20.0 *0.0175
do i=1,100
    l =2.0*i*1.0e5 + ri
    Vj = (2.0/3.0)*3.14*(l**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
    an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (l-ri)/1.0e3
    write(17,*) ll, an
enddo
close(17)
open(18,file='jx7.dat',access='sequential',form='formatted')
u = 7
lm = ri
rxax = real(u) *20.0 * 0.0175
rxbx = real(u-1) *20.0 *0.0175
do i=1,100
    l =2.0*i*1.0e5 + ri
    Vj = (2.0/3.0)*3.14*(l**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
    an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
    lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
    ll = (l-ri)/1.0e3

```



program(6/7)

```

        write(18,*) ll, an
    enddo
close(18)
open(19,file='jx8.dat',access='sequential',form='formatted')
    u = 8
    lm = ri
    rxa = real(u) *20.0 * 0.0175
    rxb = real(u-1) *20.0 *0.0175
    do i=1,100
        l =2.0*i*1.0e5 + ri
        Vj = (2.0/3.0)*3.14*(1**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
        an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
        lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
        ll = (l-ri)/1.0e3
        write(19,*) ll, an
    enddo
close(19)
open(20,file='jx9.dat',access='sequential',form='formatted')
    u = 9
    lm = ri
    rxa = real(u) *20.0 * 0.0175
    rxb = real(u-1) *20.0 *0.0175
    do i=1,100
        l =2.0*i*1.0e5 + ri
        Vj = (2.0/3.0)*3.14*(1**3-lm**3)*(cos(rxb)-cos(rxa))
        an = Xi*real(icn(i,u))/(Vj*q)
        lm = 2.0*i*1.0e5 + ri
        ll = (l-ri)/1.0e3
        write(20,*) ll, an
    enddo
close(20)
stop
end
c*****cinit
subroutine cinit
common /pran/ am,sd,ix
c
    am = 0.0
    sd = 1.0
    ix = 0
c
    return
end
c*****cmotion
subroutine cmotion(x,y,z,vx,vy,vz,r,te,dt,Im)
real Im
data Gr / 6.67259e-11 /
c
    r = sqrt( x*x + y*y + z*z )
    vx = vx - Gr*Im/r/r/r*x*dt
    vy = vy - Gr*Im/r/r/r*y*dt
    vz = vz - Gr*Im/r/r/r*z*dt
    x = x + vx*dt
    y = y + vy*dt
    z = z + vz*dt
    te = 0.5*(vx*vx+vy*vy+vz*vz) + Gr*Im/r
c
    return
end
c*****unfm2
subroutine unfm2(a)
real*8 aa,b,x
real*8 c,ci

```

program(7/7)

```
common /pran/ am,sd,ix  
data aa/32771.d0/, b/1234567891.d0/  
data c/2147483648.d0/, ci/4.6566128730773925d-10/  
x = ix  
x = dmod(aa*x+b,c)  
a = x*ci  
ix = x  
return  
end
```