

火星勉強会
2019/02/13

Dong, C., Lingam, M., Ma, Y., & Cohen, O.
(2017).

Is Proxima Centauri b Habitable? A Study of
Atmospheric Loss.

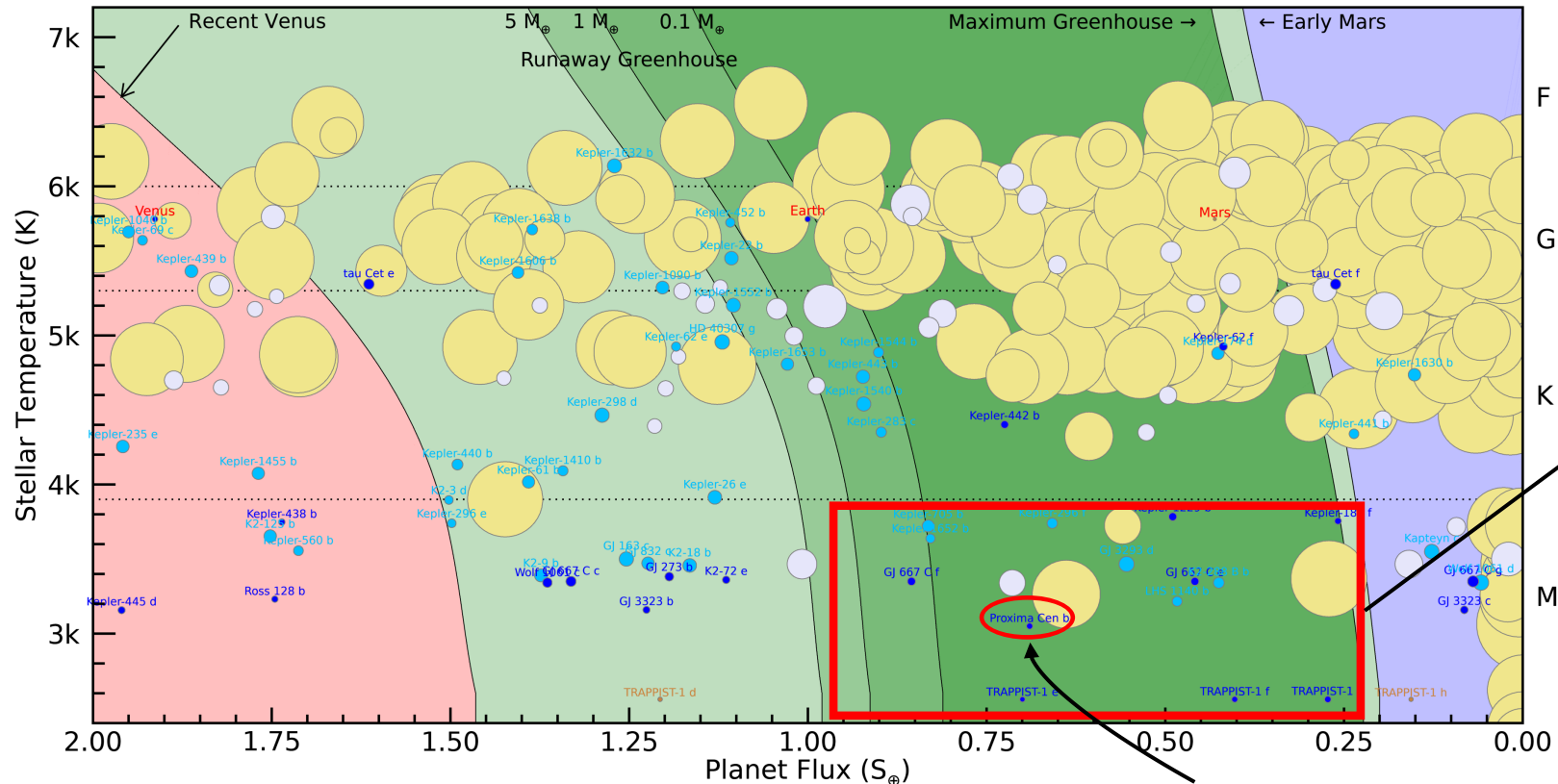
The Astrophysical Journal, 837(2), L26.

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa6438>

東京大学地球惑星科学専攻
M1 坂田遼弥

1. Introduction

- M型星においてハビタブルゾーン内にある地球サイズの系外惑星が多く見つかった
 - M型星系の惑星は中心星の近くを回っていることが多い
- トランジット確率が高いため、大気分光観測の可能性有



M型星まわりのハビタブルゾーン

Proxima Centauri b

<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

1. Introduction

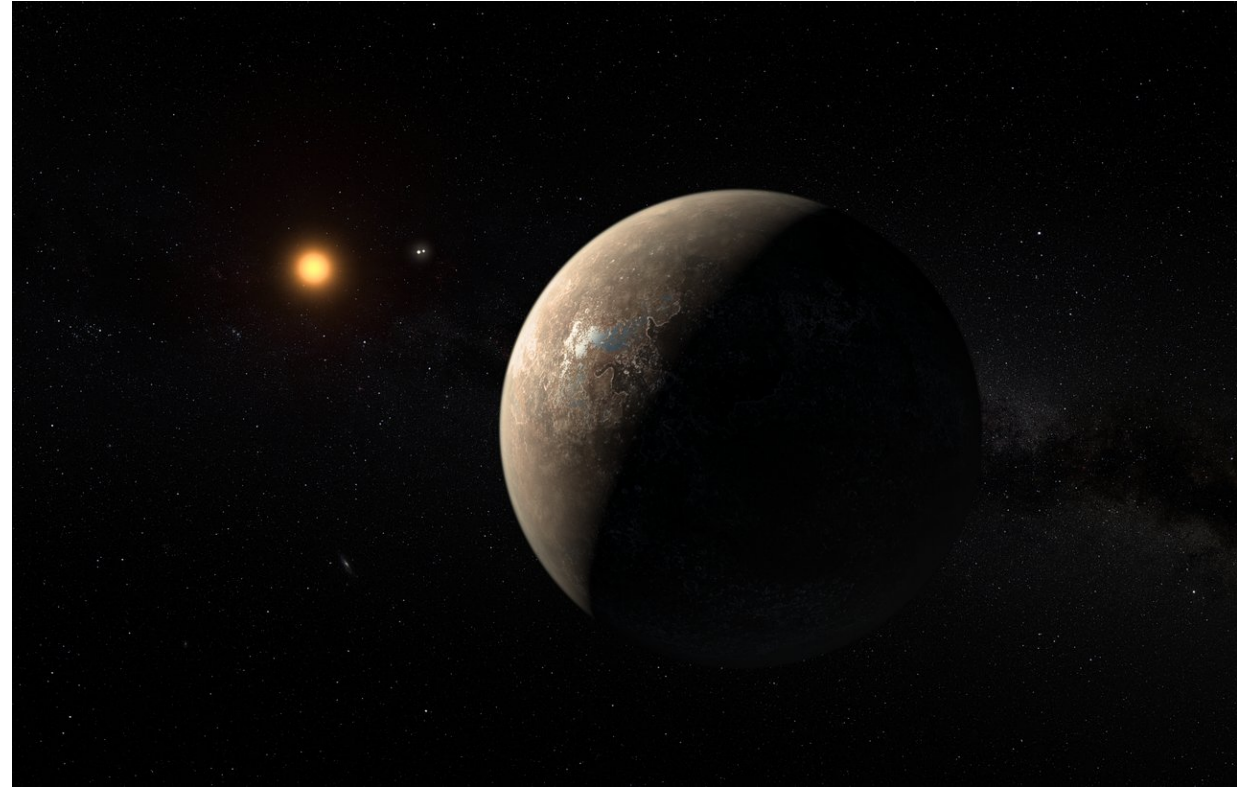
Proxima Centauri (PC): M5.5V 太陽から最も近い
恒星（約4.2光年）

Proxima Centauri b (PCb): 視線速度法によって発見された系外惑星で、ハビタブルゾーン内に存在

Table 1. Adopted stellar and planetary characteristics of the Proxima system.

Parameter	Value	Source
$M_{\star} (M_{\odot})$	0.123	This work
$R_{\star} (R_{\odot})$	0.141	Anglada-Escudé et al. (2016)
$L_{\star} (L_{\odot})$	0.00155	Anglada-Escudé et al. (2016)
$T_{\text{eff}} \text{ (K)}$	3050	Anglada-Escudé et al. (2016)
Age (Gyr)	4.8	Bazot et al. (2016)
$M_{\text{p}} \sin i (M_{\oplus})$	1.27	Anglada-Escudé et al. (2016)
$a \text{ (AU)}$	0.0485	Anglada-Escudé et al. (2016)
e_{max}	0.35	Anglada-Escudé et al. (2016)
$S_{\text{p}} (S_{\oplus})$	0.65	Anglada-Escudé et al. (2016)

Ribas+, 2016



ESO (<https://www.eso.org/public/images/eso1629e/>)

1. Introduction

- Kislyakova et al., 2014: Kepler-11 まわりのsuper-Earthについて, Hの非熱的散逸をDSMC(Direct Simulation Monte Carlo)モデルで計算 (これらのsuper-Earthは水素やvolatileのコロナを持っていることが示唆されている)

→ H^+ のpick upによる散逸は熱的散逸と比べて1桁ほど小さかった

- Cohen et al., 2015: M3.5V型星まわりを回る非磁化惑星について, 異なる恒星風条件(sub- & super-Alfvenic)でのイオンの振る舞いを多粒子種MHDモデルを用いて研究

→ 中心星に近い惑星においては, 恒星風の条件が大きな影響を与える
0.06 AUにある惑星での O^+ の流出率は 10^{28} s^{-1} に達する場合もある

本研究の目的

PCbが非磁化・磁化の両方の場合についてMHDシミュレーションを行い, イオン流出に与える影響を検証する

2. Simulation setup

BATS-R-US multi-species MHD model

(Ma+, 2004, 2013)

- イオン: H^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+
- 計算領域: $-45 R_p \leq X \leq 15 R_p$,
 $-30 R_p \leq Y, Z \leq 30 R_p$
- 高度100 kmの電離圏までself-consistentに計算することができる
 - Photoioniztion, charge exchange, dissociative recombination (Table 1)を考慮
- PSO (PCb-Star-Orbital) 座標系を使用

Table 1
Chemical Reactions and Associated Rates

Chemical Reaction	Rate Coefficient ^a
Primary Photolysis and Particle Impact ^b in s^{-1}	
$CO_2 + h\nu \rightarrow CO_2^+ + e^-$	5.55×10^{-5}
$O + h\nu \rightarrow O^+ + e^-$	2.08×10^{-5}
Ion-neutral Chemistry in $cm^3 s^{-1}$	
$CO_2^+ + O \rightarrow O_2^+ + CO$	1.64×10^{-10}
$CO_2^+ + O \rightarrow O^+ + CO_2$	9.60×10^{-11}
$O^+ + CO_2 \rightarrow O_2^+ + CO$	$1.1 \times 10^{-9} (800/T_i)^{0.39}$
$H^+ + O \rightarrow O^+ + H^c$	5.08×10^{-10}
Electron Recombination Chemistry in $cm^3 s^{-1}$	
$O_2^+ + e^- \rightarrow O + O$	$7.38 \times 10^{-8} (1200/T_e)^{0.56}$
$CO_2^+ + e^- \rightarrow CO + O$	$3.10 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.5}$

Notes. Reaction rates are adopted from Schunk & Nagy (2009).

^a Electron impact ionization is neglected in the calculation, H^+ density is from the stellar wind, and the neutral hydrogen is neglected.

^b The photoionization frequencies are rescaled to PCb values, using the EUV estimate from Ribas et al. (2016), the latter being around 33 times that received by the Earth.

^c Rate coefficient from Fox & Sung (2001).

2. Simulation setup

- 中性大気: 金星の中性大気モデル(solar maximum時) (Ma+, 2013)を基にする

$$(M \leq 1.27 M_E \rightarrow R \sim 1.1 R_E, H_{\text{PCb}} = 0.85 H_{\text{Venus}})$$

↓

$$[\text{CO}_2] = 1.1 \times 10^{13} \exp(-(z - z_0)/4.7) \text{ cm}^{-3}$$

$$[\text{O}] = 2.2 \times 10^9 \exp(-(z - z_0)/14.5) \text{ cm}^{-3}$$

where $z_0 = 100\text{km}$, at $P = 1 \text{ bar}$

- 恒星風: Garraffo et al., 2016

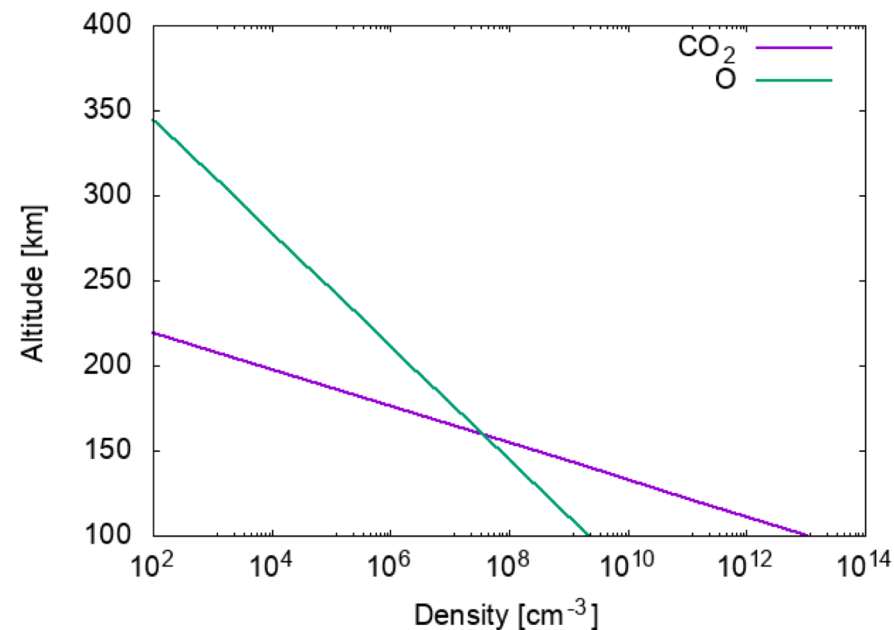
Case 1 $P_{\text{dyn}} \sim 2.5 \times 10^4 \text{ nPa}$

Case 2 $P_{\text{dyn}} \sim 5 \times 10^3 \text{ nPa}$

IMFは南向き

- 惑星の固有磁場: $1/3 M_E$ (M_E : 地球の双極子モーメント), 地球と同じ向き

→赤道表面で約7200 nT ($P_{\text{mag}} \sim 2 \times 10^4 \text{ nPa}$)



中性大気プロファイル

Table 2

The Stellar Wind Input Parameters at PCb (Garraffo et al. 2016) for Two Case Studies in the PSO Coordinate System

	$n_{\text{sw}} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$T_{\text{sw}} \text{ (K)}$	$v_{\text{sw}}^{\text{a}} \text{ (km s}^{-1}\text{)}$	IMF (nT)
C1	21400	8.42×10^5	(−833, 150, 0)	(0, 0, −227)
C2	2460	9.53×10^5	(−1080, 150, 0)	(0, 0, −997)

Note. Case 1 (C1) corresponds to the maximum P_{dyn} and P_{tot} over one orbital period of PCb. Case 2 (C2) corresponds to minimum P_{dyn} and P_{tot} , but with the maximum P_{mag} .

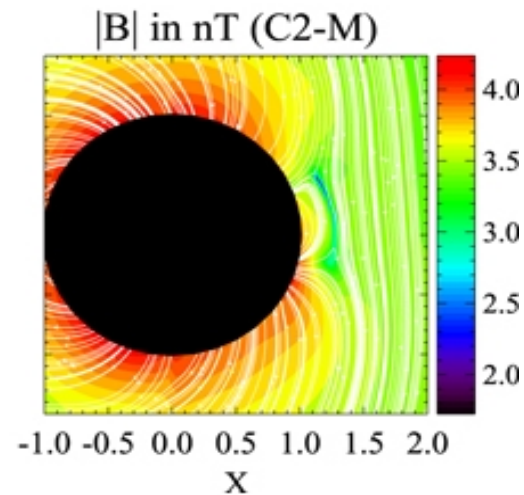
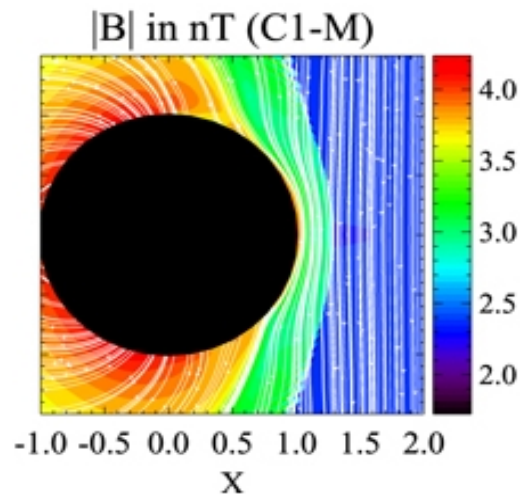
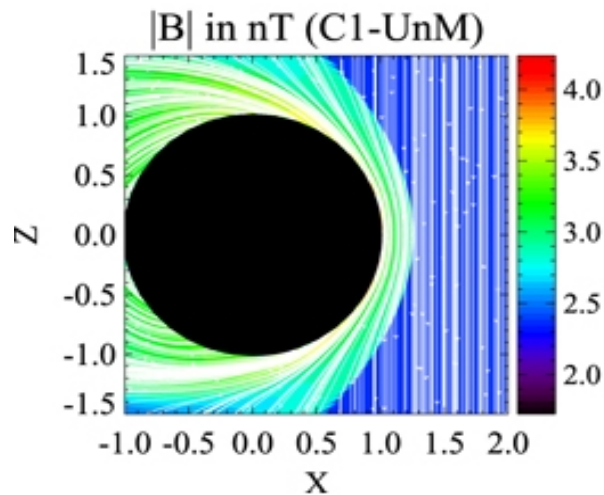
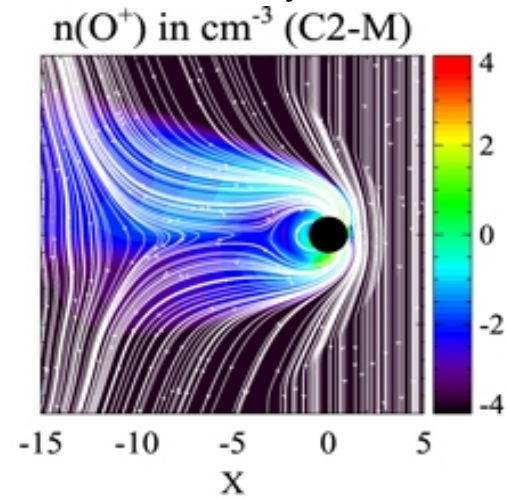
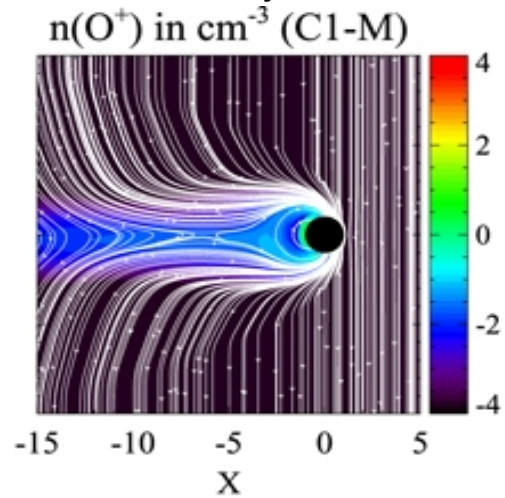
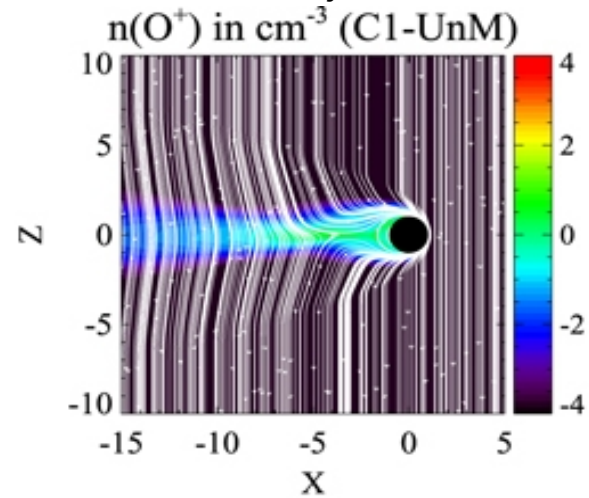
^a The y-component of the velocity arises primarily from the orbital motion of PCb.

3. Simulation results

High P_{dyn} , 非磁化

High P_{dyn} , 磁化

Low P_{dyn} , 磁化



Case 1&2

- イオンは圧力勾配や $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ によって加速されopenな磁力線を通じて流出する
- Polar capがより低緯度にまで広がる

Case 1 (High P_{dyn})

- 惑星近傍まで induced magnetosphere が侵入
- 惑星前面でリコネクション

Case 2 (Low P_{dyn})

- 閉じた磁力線が形成

3. Simulation results

- 非磁化の場合の流出率は 10^{27} s^{-1} 程度
 - 磁化の場合にはCaseによって違い
 - Case 1 (High P_{dyn}): O^+ の流出は約40%に低下
一方, O_2^+ や CO_2^+ は約2倍に増加
 - Case 2 (Low P_{dyn}): O^+ の流出は約5%に低下
一方, O_2^+ や CO_2^+ の減少は小さい
- 全球的なダイポール磁場によって, O の流出は抑制された
- 大気圧が93 barの場合
 - O^+ は約2倍に増加
 - O_2^+ や CO_2^+ は2~3桁減少
- O の流出に惑星表面での大気圧(~大気量)はそれほど影響を与えない

イオンの流出率

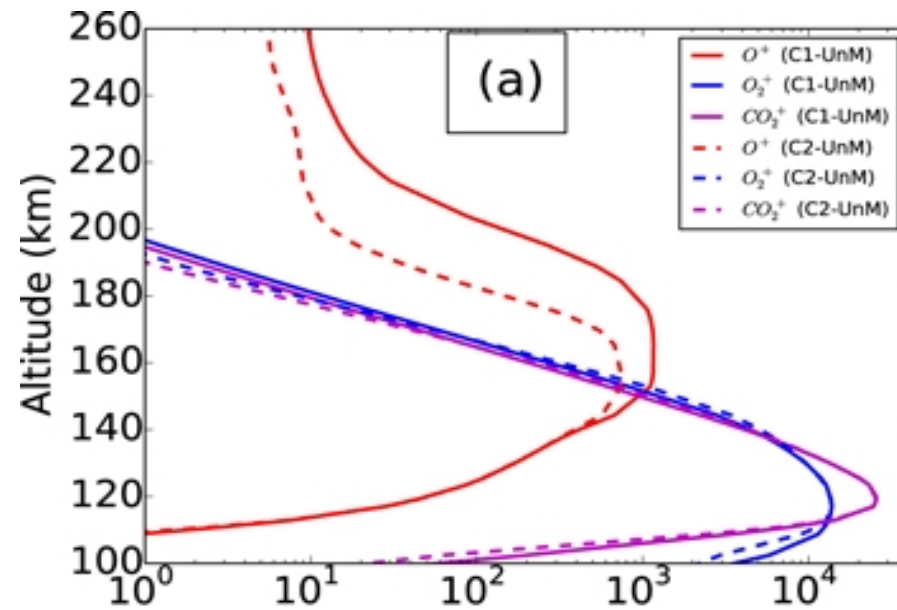
Table 3
Ion Escape Rates in s^{-1}

	O^+	O_2^+	CO_2^+	Total
PCb with 1 bar Surface Pressure				
C1-UnM ^a	1.8×10^{27}	2.4×10^{26}	3.3×10^{26}	2.4×10^{27}
C2-UnM	1.1×10^{27}	9.5×10^{25}	8.2×10^{25}	1.3×10^{27}
C1-M ^b	7.3×10^{26}	5.4×10^{26}	5.8×10^{26}	1.8×10^{27}
C2-M	5.9×10^{25}	8.7×10^{25}	5.3×10^{25}	2.0×10^{26}
PCb with 93 bar Surface Pressure ^c				
C1-UnM ₉₃	3.7×10^{27}	4.1×10^{24}	1.4×10^{23}	3.7×10^{27}

Notes.
^a Unmagnetized Case 1.
^b Magnetized Case 1.
^c Scale height, H_{PCb} , is still equal to $0.85 H_{\text{Venus}}$.

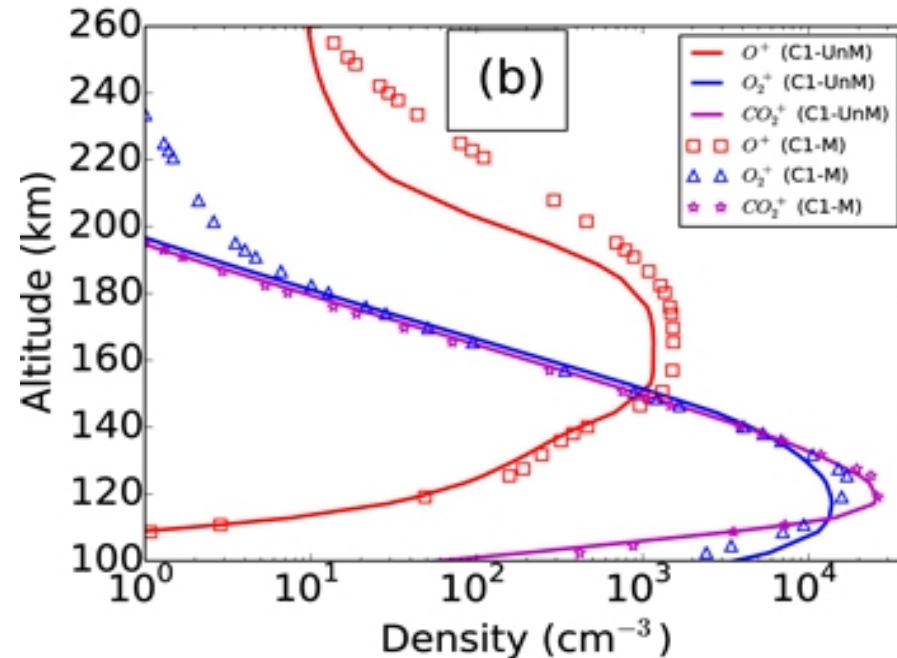
3. Simulation results

- CO_2^+ や O_2^+ は太陽風の影響をほとんど受けていない
- O^+ はCase 1 (High P_{dyn}) でやや多い
→ 電離圏に侵入してきた太陽風起源の H^+ とのcharge exchangeによる
- O^+ のpick upによるmass loadingによってより重いイオンのpick upが抑制される.
また, O^+ によって形成されたconductor layerによって恒星風の侵入が防がれる



非磁化の場合
実線: Case 1
点線: Case 2

赤: O^+
青: O_2^+
紫: CO_2^+



Case 1の場合
実線: 非磁化
点プロット: 磁化

4. Discussion

- 今回求めた流出率のもとで流出するCO₂大気量 (Proxima Centauriの年齢は4.8 Gyr)

Case 1 (磁化 & 非磁化), Case 2 (非磁化) → 260–500 mbar/Gyr

Case 2 (磁化) → 40 mbar/Gyr

→ 過去の恒星風が強かったならば、相当量の大気が流出している

- 高度200 km以下の電離圏の密度プロファイルは太陽風の影響をほとんど受けていない

→ 中心星の活動の変動が地表の生命へ与える影響は小さい

注意すべきはProxima CentauriおよびPCbの詳細なパラメータはよくわかっていないということ

- PCbの大気量や大気組成
- 大気を供給する過程 (outgassingなど)
- イオン流出のKineticなプロセス

など

しかし、ここで用いたパラメータが適用できるような系外惑星が存在している可能性はある

まとめ

- Proxima Centauriのハビタブルゾーン内に存在する地球サイズの系外惑星Proxima Centauri bからのイオン流出について多粒子種MHDモデルを用いて研究を行った.
- 金星と同様のCO₂主体の中性大気を仮定し, 恒星風のパラメータ(High & Low P_{dyn})と固有磁場の有無によって4パターンのシミュレーションを行った.
- 非磁化の場合では, イオンの流出は現在の火星や地球での値よりも2桁程度大きくなった.
- 固有磁場の存在によってイオンの流出がいくらか抑制されたが, その度合いは恒星風の動圧の強弱にも依存していた.
- ただし, 本研究で用いた各種パラメータには不確定性が多く存在する. 今後の観測・研究によって詳細な描像が見えてくれば, 大気散逸をより正確に検証できるようになる.