

2018年2月28日
惑星圏研究会
水惑星学セッション

地球型惑星の大気散逸レビュー (火星と水を中心に)

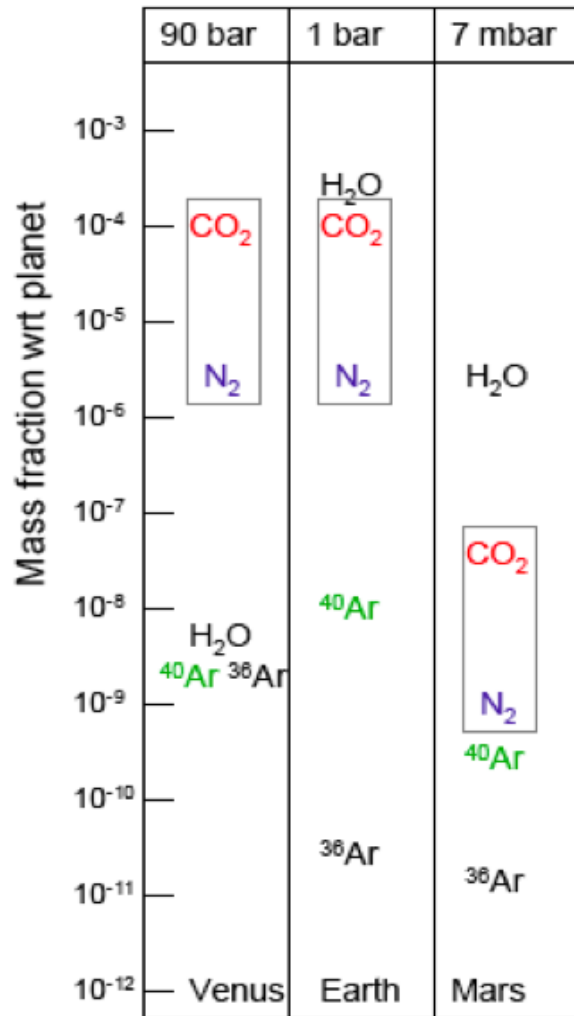
寺田直樹(東北大)

Outline

- 火星と水(H₂O)に焦点
- 水素(H)の散逸
- 酸素(O)の散逸
- 大気散逸の歴史

- 結論：
大気の上端(宇宙空間)と下端(表層)での相互作用を、まずは酸素について抑えるべき

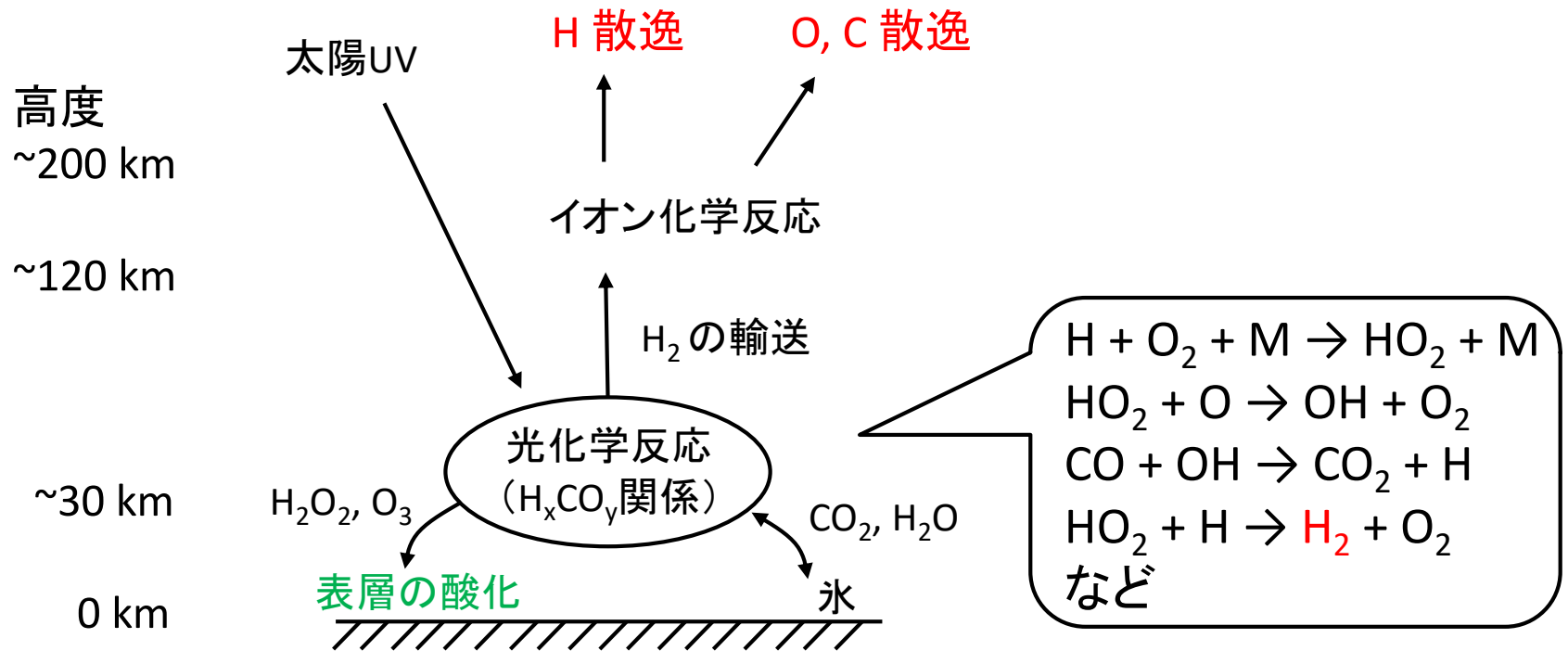
導入



金星 地球 火星
の組成重量比

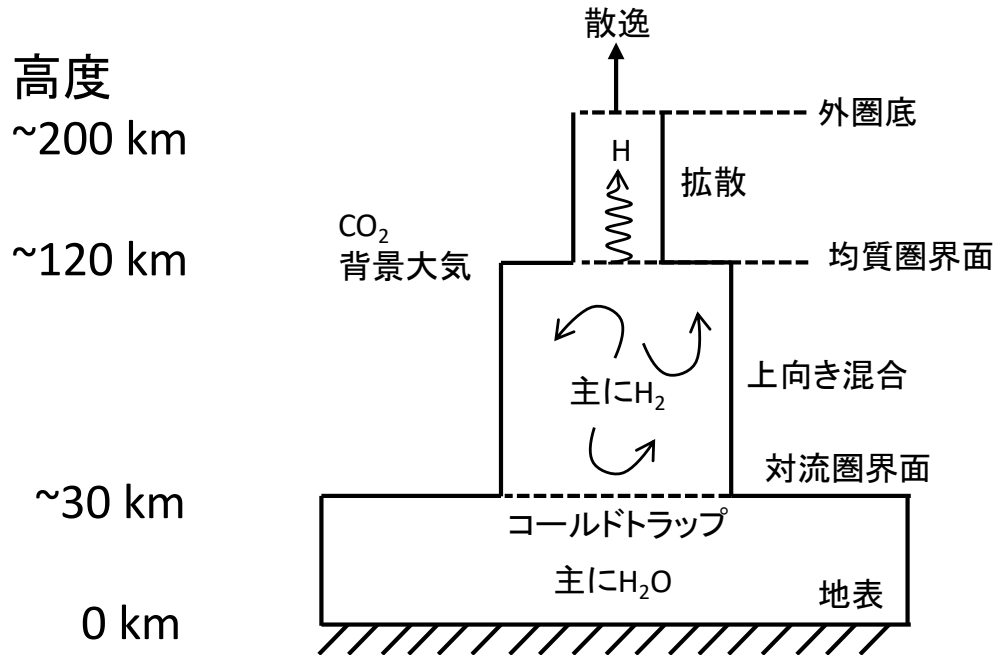
- 重力が小さい火星は大気散逸の影響を受けやすい
 - N₂, CO₂ の惑星質量に対する重量比(左図)は宇宙空間への散逸を示唆
- 同位体比
 - 重爆撃後にも N₂ の大半(50-99%)が散逸したことを示唆 [e.g., Chassefiere et al., 2004, 2007]

火星大気とその散逸：1次近似



- 火星大気は CO₂, H₂O と、それらの光化学生成物から成る
- 宇宙空間への H, O, C の散逸。表層の酸化
- H は軽いので、散逸しやすい。本当？

H, O, C の散逸



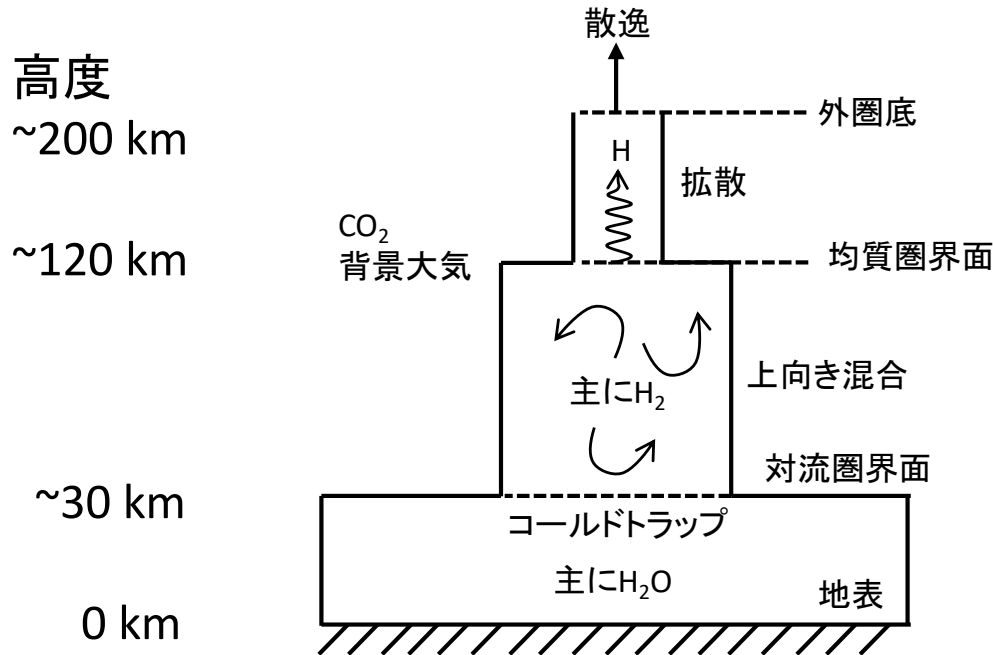
2. H₂ → H, H₂ の散逸
CO₂ → O, C の散逸



1. H₂ の上への輸送

- 水素(H)散逸のボトルネックは2段階
 1. 下から上への輸送 (主にH₂として輸送)
 2. 超高層での散逸 (H₂, H の熱的散逸(ジーンズ散逸など)、H の非熱的散逸)
- 酸素(O)・炭素(C)散逸のボトルネックは1段階
 2. 超高層での散逸 (主成分のCO₂起源のO, Cの非熱的散逸)

Hの散逸



2. H₂ → H, H₂ の散逸
こちらは速い(~時間)



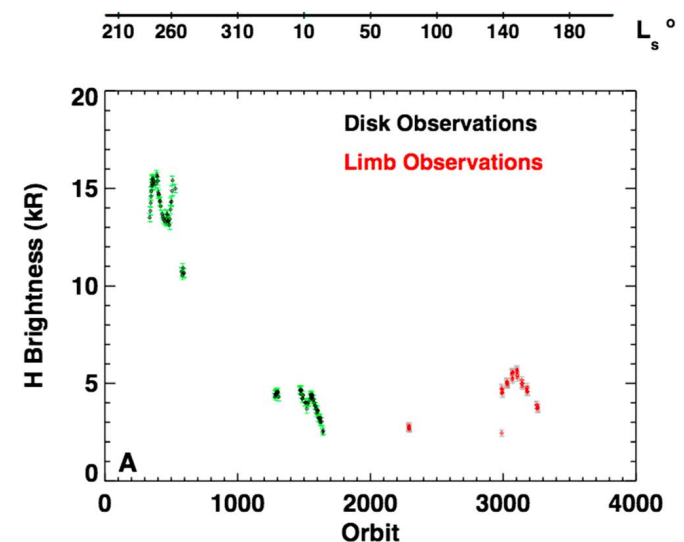
1. H₂ の上への輸送
こちらは遅い(~数ヶ月)
こちらで散逸率が決まる

- 火星・金星・地球・タイタンの水素散逸は、ほぼ**拡散律速散逸**
 - 1.が律速。異論はあるが、ファクター程度の違い [Catling and Kasting, 2017]
- 散逸フラックスは $\Phi_i = b_i f_i / H_a$ で与えられる
 - f_i はコールドトラップより上側の水素混合比、 b_i は相互拡散パラメタ、 H_a はスケールハイト

Hの散逸(やや余談)

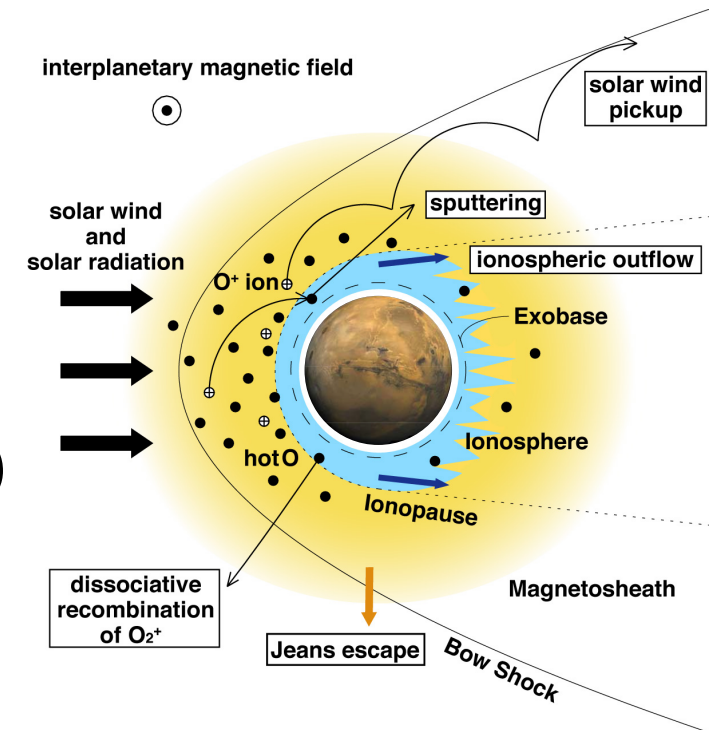
- 今話したのは古典的シナリオ
 - H_2 によるゆっくりとした(~数ヶ月の)上方輸送がボトルネック
- 最近の MEX, MAVEN 等による発見:
 - 高高度 H_2O (→ 青木さん講演)
 - H 散逸の短期変動 (→ 関さん講演、Alex Hubig さんポスター発表)
- しかしこの短期変動(~数週間)を加味しても、以降で説明するシナリオは恐らく変わらない、はず

MAVEN/IUVS による火星水素
コロナ観測 [Clarke et al., 2017]



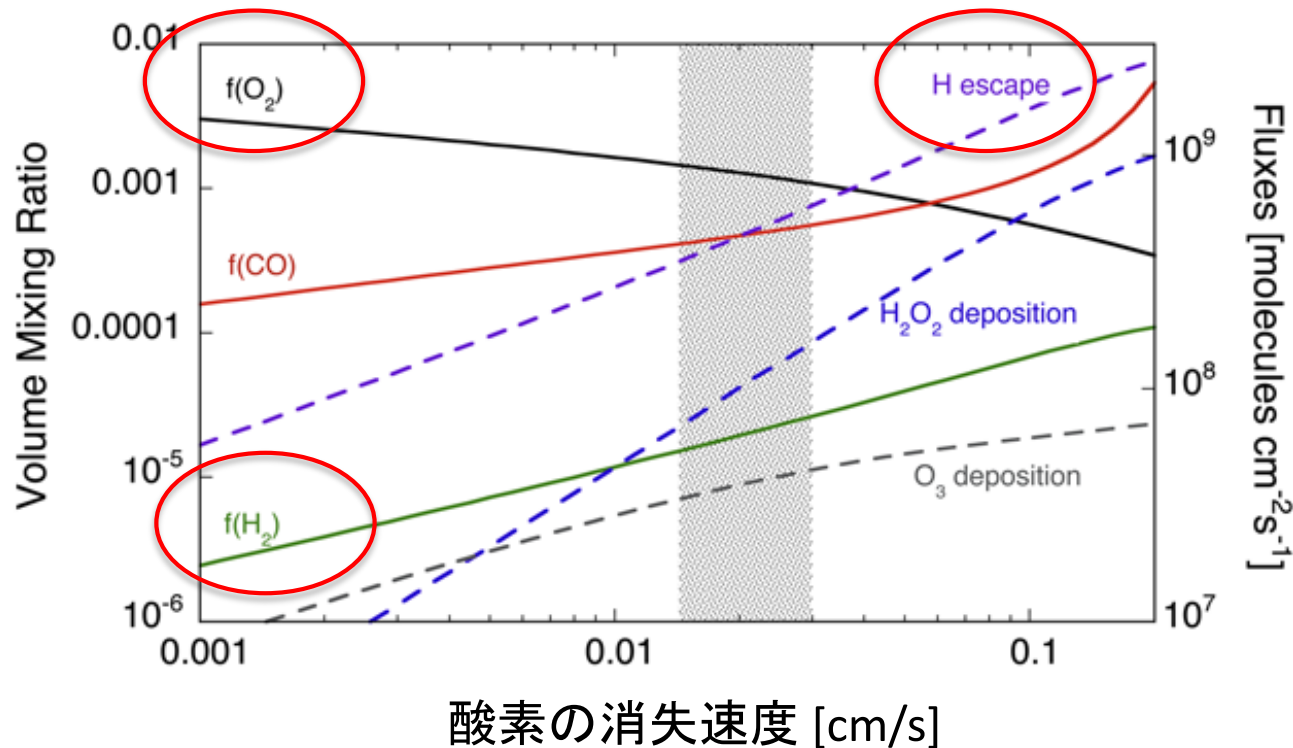
O 散逸による H 散逸の律速

- O は重いので、一般的には H よりも散逸しにくいはず。非熱的散逸 (図)
- 現在の火星
 - H 散逸率: $10^{26} \sim 10^{27}$ atom/s
 - O 散逸率: $10^{25} \sim 10^{26}$ atom/s
 - (C 散逸率: $10^{24} \sim 10^{25}$ atom/s)
- しかし、このままでは O が火星に溜まってしまう



O の非熱的散逸過程
(現在は、解離再結合が支配的)
→ 関さん講演

O 散逸による H 散逸の律速



定常解モデル

O₂が増えると、
OHが増えて、
H₂が減る

[Zahnle et al., 2008]

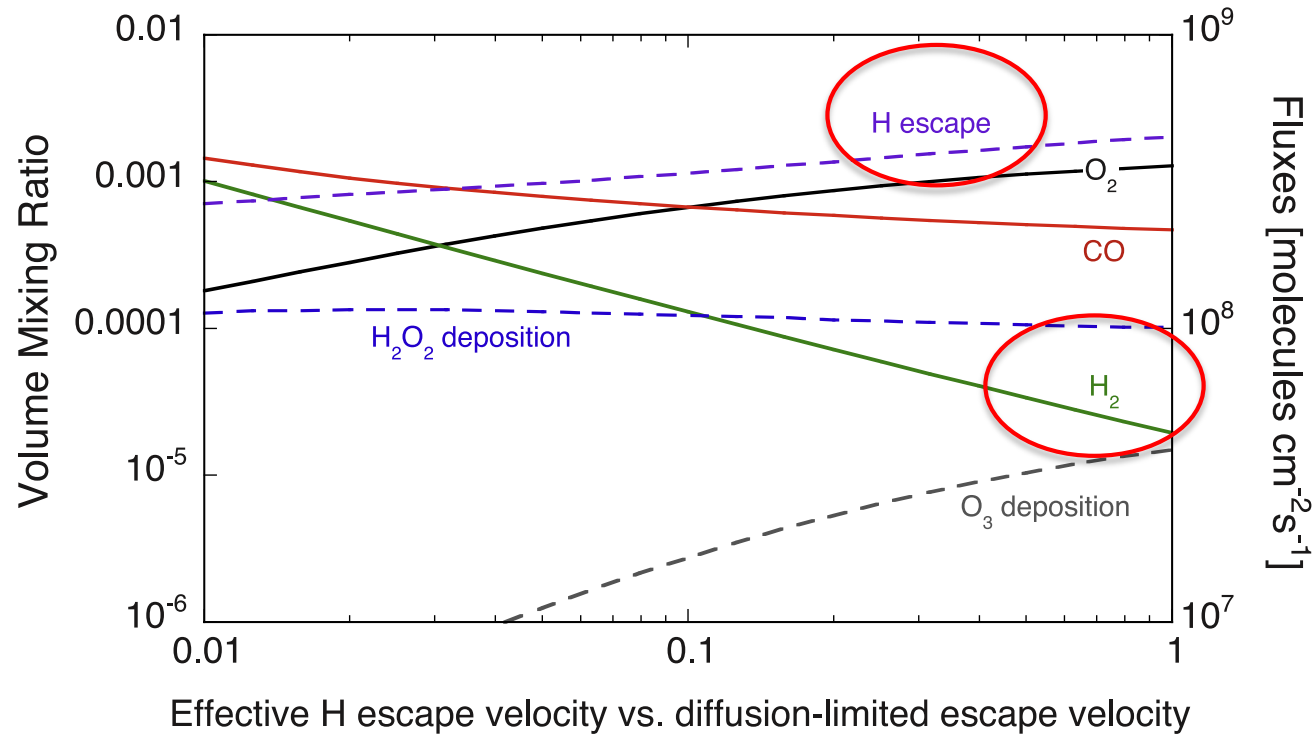
- Oが溜まるとどうなるか？

- 大気中の H₂ の存在度が減り、H の散逸率が減る

- (H の散逸率) : (O の散逸率 + 地殻への消失率) = 2 : 1

になるように大気が自己調整 [McElroy, 1972; Zahnle et al., 2008]

逆は？



定常解モデル

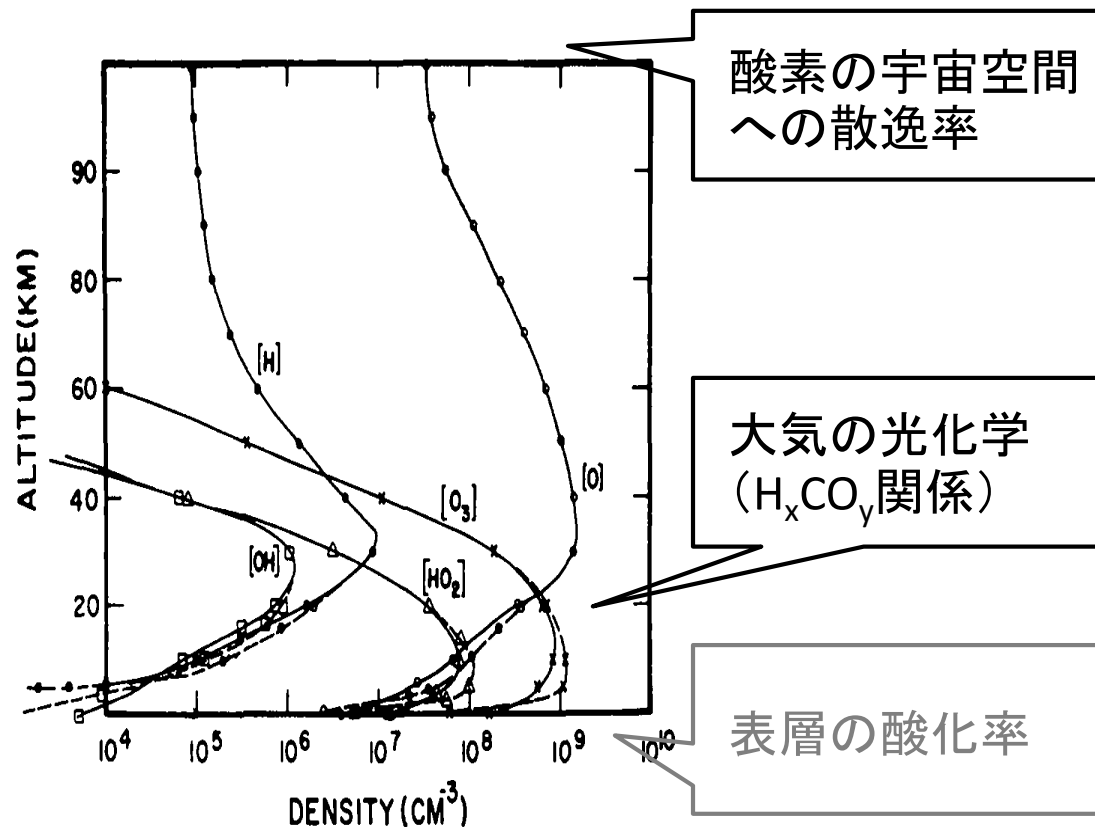
Hの散逸率は変化しにくい
[Zahnle et al., 2008]

- Hの散逸速度を上げて、Hの散逸率はあまり変わらない
 - 大気中のH₂存在度が変わるだけ
- OはHの散逸率を調整するが、逆は起こりにくい

結局、水の散逸率を知りたい時は 何を測れば良いの？

- O に注目すべし
- 火星大気中に O₂ が溜まる時間スケールは10万年
 - 10万年以下では、(H 散逸) : (O 散逸・消失) = 2 : 1 は必ずしも成り立たない
- ミランコビッチ・サイクルで平均すると釣り合う？
[Krasnopolsky, 2002]
 - H の散逸率は、自転軸傾斜角に依存する
 - O の散逸率は、自転軸傾斜角に依存しない
- **O の散逸率 + 地殻への消失率が、
現ミランコビッチ・サイクルにおける水の平均散逸
率を表す**

結局、水の散逸率を知りたい時は 何を測れば良いの？



- 上2つ抑えれば、あとは推定可能？
- ただし、メタン起源の水素も考慮すべき [Chassefiere and Leblanc, 2011]

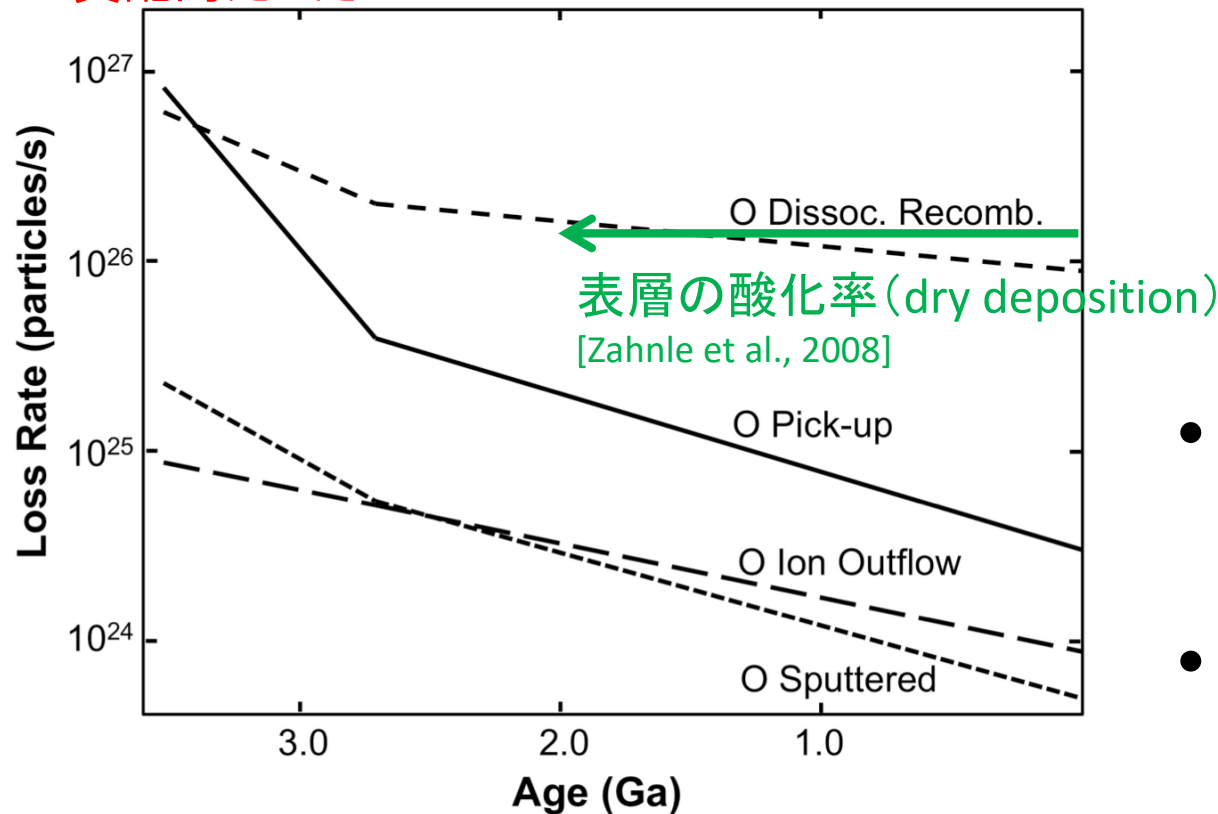
表層の酸化を含めた大気光化学モデル
[Liu and Donahue, 1976]

(Oの消失は、上(宇宙)でも下(表層)でも大気にとってはあまり差はない。消失率/含有量が小さいので) ¹²

過去への演繹



過去は何が
支配的だった？



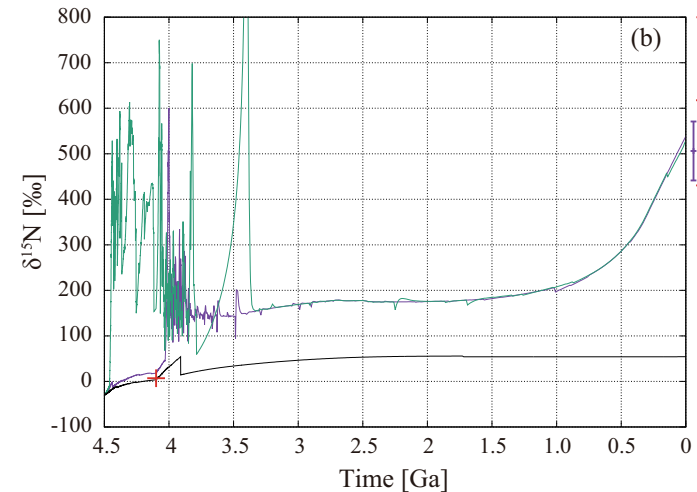
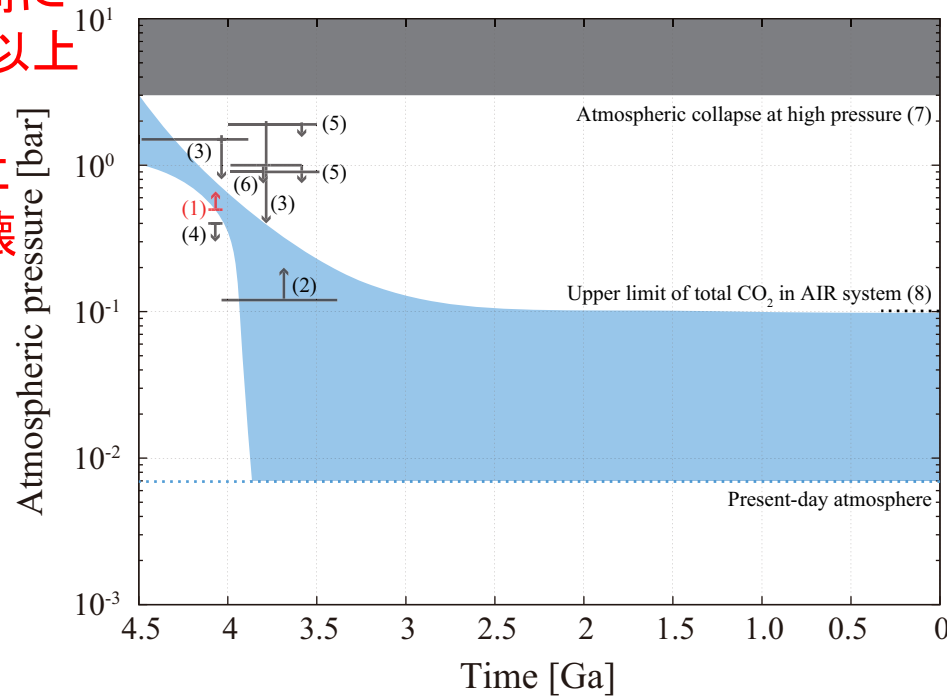
Chassefiere et al. [2013] を改編

- H_2O_2 , O_3 による表層の酸化は、現在の火星では支配的な可能性がある
- 過去は？
- 液体の水があると、酸化速度は速い (地球では 3~50 倍の速度)

大気散逸の歴史

41億年前に
0.5気圧以上

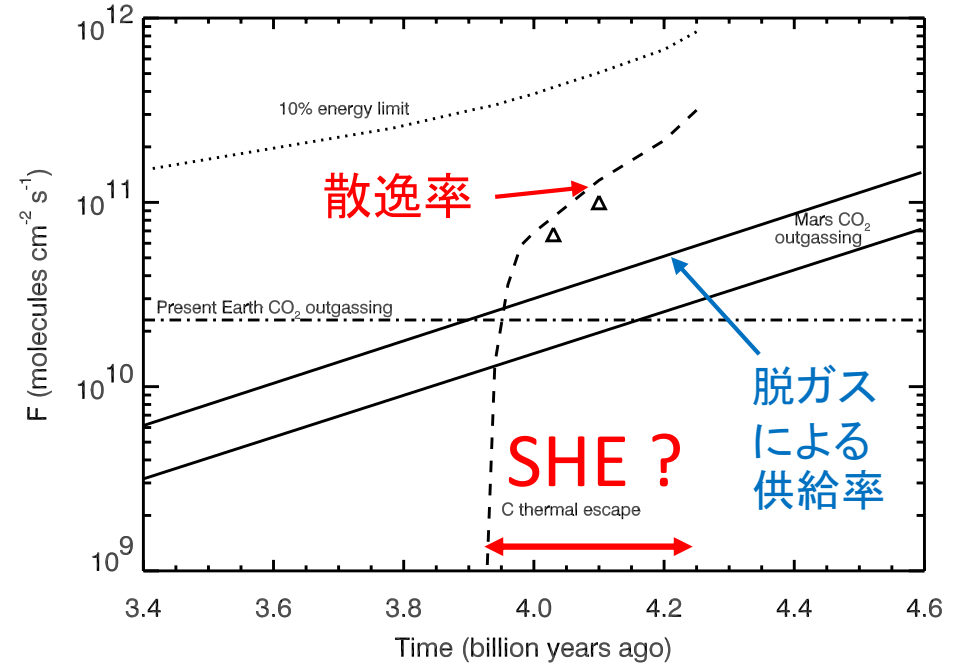
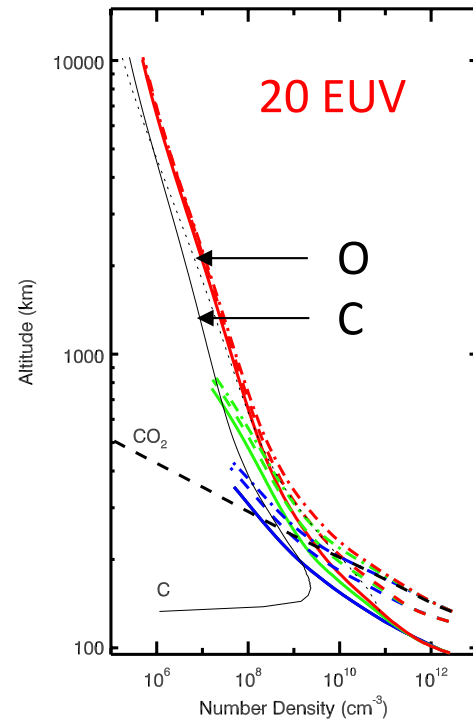
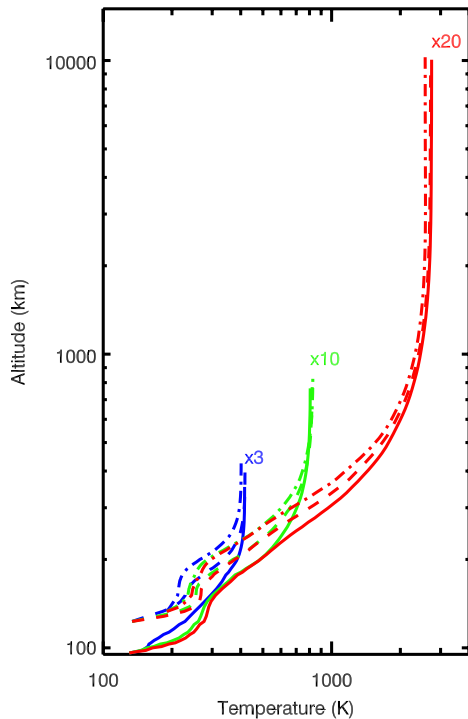
その後に
大気崩壊



[Kurokawa et al., 2018]

- 窒素と希ガス同位体比から導かれる火星大気の歴史 [Kurokawa et al., 2018]
- 散逸に関する2つの問題：
 - 41億年前以前：なぜ大気は崩壊しない？
 - 41億年前以後：なぜ大気は崩壊する？

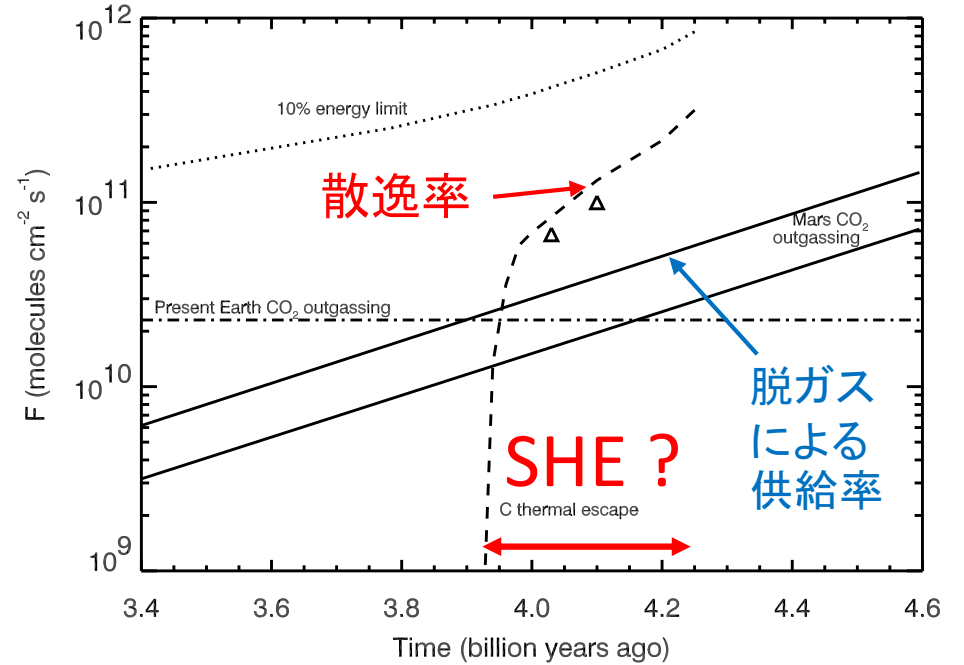
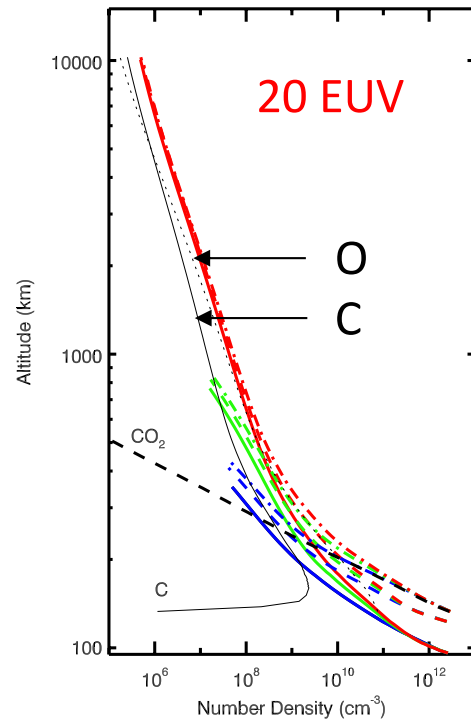
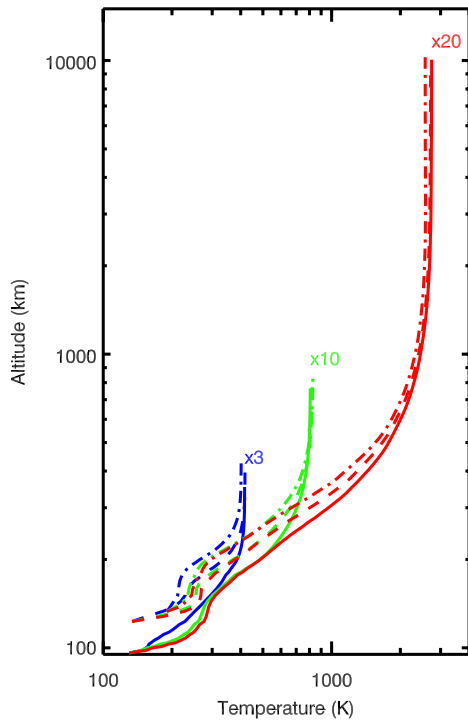
41億年前以前:なぜ大気は崩壊しない?



Tian et al. [2009]

- Tian et al. [2009], Amerstrofer et al. [2017]
- UV放射が強い過去の火星では、CO₂の解離により、熱圏での放射冷却が効きにくくなる → O, Cのスローハイドロダイナミック流出 → ~1億年で大気消失?? (理論予測)
 - 消失後に脱ガスで大気形成??
 - 41億年前までは磁場が大気を守る?? (堺さんポスター発表 → 少なくともイオンは守られない?)

41億年前以前:なぜ大気は崩壊しない?

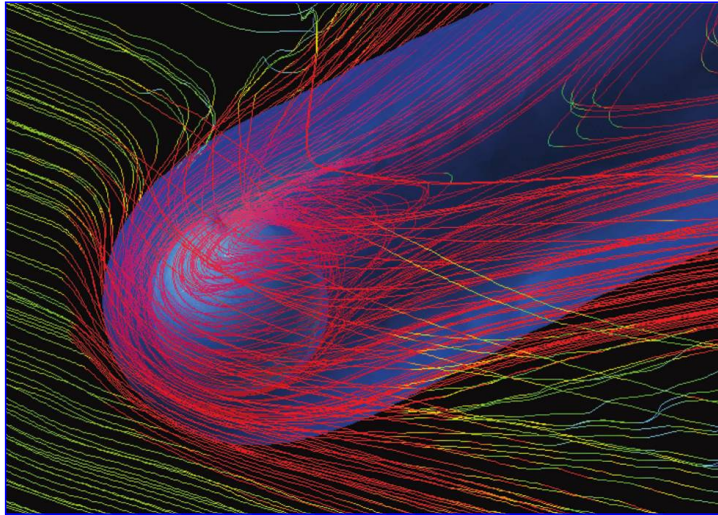


Tian et al. [2009]

- 補足:

- O の散逸には、 H_2O からの寄与と、 CO_2 からの寄与がある
- 過去では、C の散逸率も大きくなるので要注意

41億年前以後：なぜ大気は崩壊する？



<i>Solar period</i>	1 XUV (<i>present</i>)	2 XUV (~2 Ga)	6 XUV (3.5 Ga)
Process [s^{-1}]			
Ion pickup [O^+]	3×10^{24}	3.8×10^{25}	<u>8×10^{26}</u>
Dissociative recombination [O^*]	$\sim 3 \times 10^{24}$	3×10^{25}	8×10^{25}
Sputtering [O]	$\sim 2 \times 10^{23}$	7×10^{25}	<u>1.3×10^{27}</u>
Sputtering [CO]	3.5×10^{22}	2.3×10^{24}	4×10^{25}
Sputtering [CO ₂]	5×10^{22}	2×10^{24}	2.5×10^{25}
Plasma clouds [O^+]	1×10^{24}	8×10^{24}	2×10^{26}
Cold ion outflow [O^+]	$\leq 1 \times 10^{25}$	$\leq 5 \times 10^{26}$	<u>$\leq 3 \times 10^{27}$</u>
Total O loss	$\leq 1.7 \times 10^{25}$	$\leq 6.5 \times 10^{26}$	<u>$\leq 5.4 \times 10^{27}$</u>

[Terada et al., 2009]

- 41-35億年前
 - イオンピックアップ、コールドイオン流出で1気圧程度ならば逃がせそう
 - スパッタリング(イオン降込みによる大気の叩き出し)は効くのかなあ？
 - 誘導磁気圏の形成で、大気は守られるはず
 - 地殻に行った量も多いはず

まとめ

- 火星と水 (H_2O) に焦点
- 水素 (H) の散逸 → 拡散律速散逸
- 酸素 (O) の散逸 → 非熱的散逸。表層の酸化。
H の散逸率を調整
- 大気散逸の歴史 → 黒川さんの講演
- 結論：
大気の上端 (宇宙空間) と下端 (表層) での相互作用を、まずは酸素について抑えるべき