

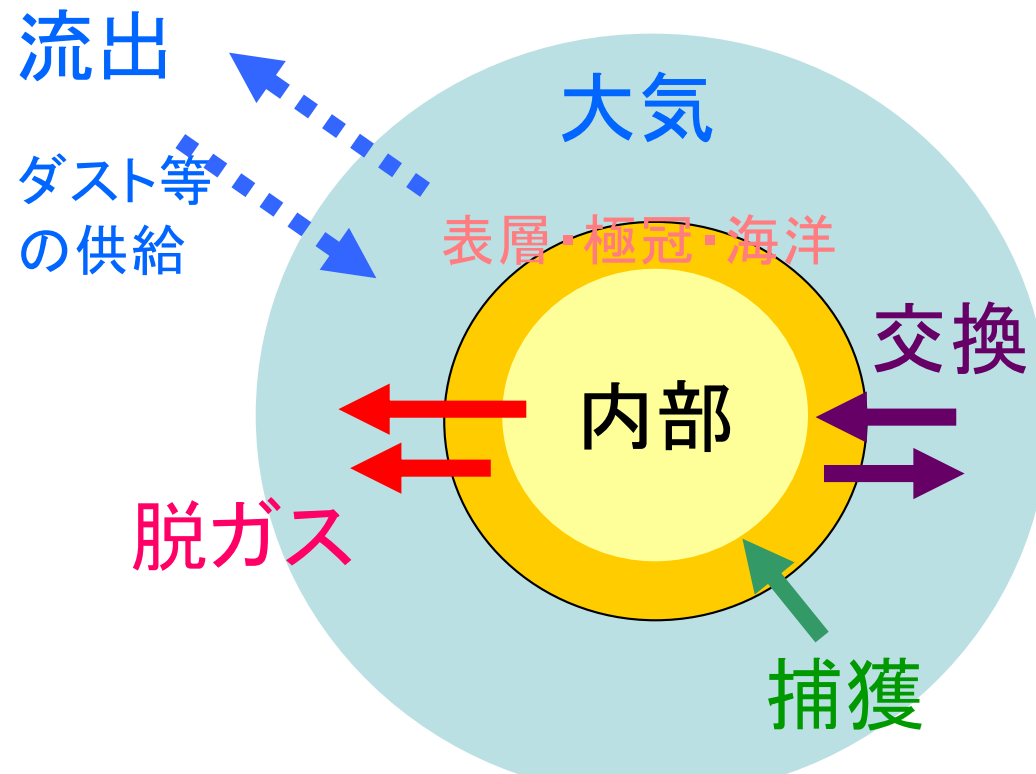
2020年2月17日
惑星圏研究会
水進化学 / ビッグピクチャーセッション

太陽系探査における水進化研究 (惑星超高層視点)

寺田直樹(東北大)

イントロ

- 地球型惑星の水進化を理解する為には、酸素(O)と炭素(C)の宇宙空間への流出を明らかにすべし



MAVENによる火星大気流出観測

	H Jeans	O ion	O Dissoc Recomb	O sputtering	Total loss thru time
Present-day loss rate from MVN (s^{-1})	$1.6-11 \times 10^{26}$	5×10^{24}	5×10^{25}	3×10^{24}	
4.2 b.y. at present rate, H_2O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO_2		6 mbar	68 mbar	4 mbar	
CO_2 loss, extrap. from L1992		630 mbar	113 mbar	7 bar	7.7 bar
CO_2 loss, extrap. from C2013		525 mbar	227 mbar	42 mbar	0.79 bar
CO_2 loss, extrap. from L2017			460 mbar		0.46 bar
H_2O loss, extrap. from L1992		22.1 m	3.6 m	227 m	253 m
H_2O loss, extrap. from C2013		18.8 m	2.9 m	1.4 m	23 m
H_2O loss, extrap. from L2017			16 m		16 m

過去42億年間の流出量

CO_2 からの流出を仮定

H_2O からの流出を仮定

外挿モデルにより~1桁の不確定性

MAVENチームとして大気流出率をまとめた論文
[Jakosky et al., 2018]

- 現在の酸素(O)の流出率を測定。過去に外挿。
- Oの流出は、 H_2O から？ CO_2 から？

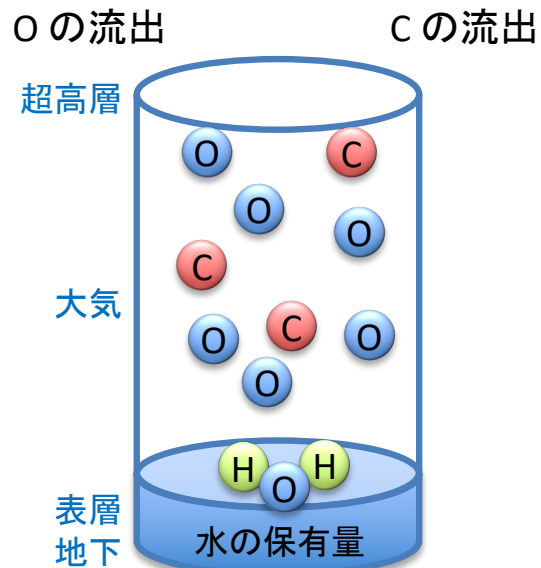
MAVENが残した課題：

「O の流出は、 H_2O から？ CO_2 から？」

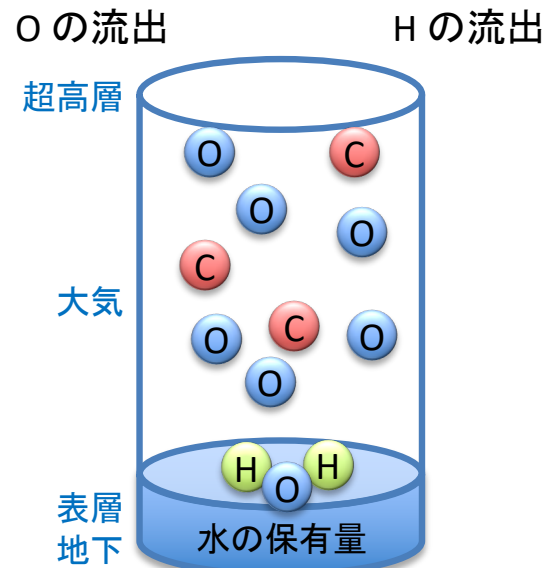
「結局、 H_2O はどれだけ流出したの？」

解決策：O, C, H の流出量比を求めれば良い

CO_2 からの場合



H_2O からの場合



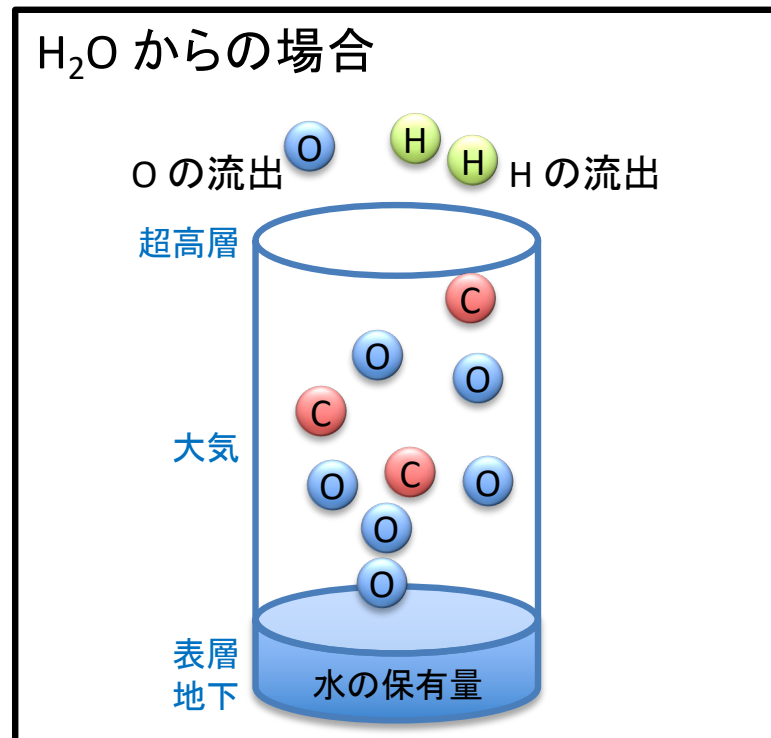
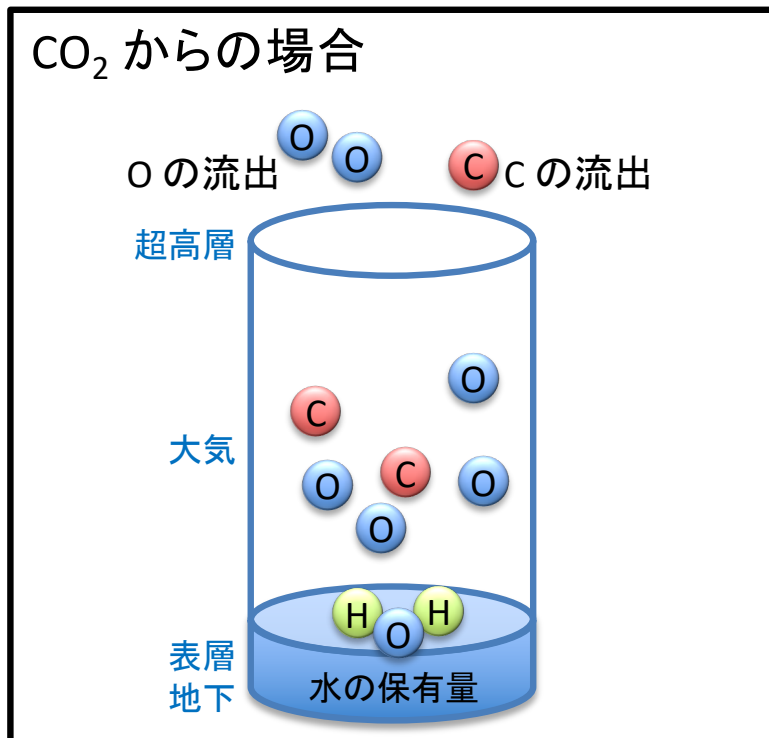
* H_2 脱ガス等を取り敢えずは無視

MAVENが残した課題：

「O の流出は、 H_2O から？ CO_2 から？」

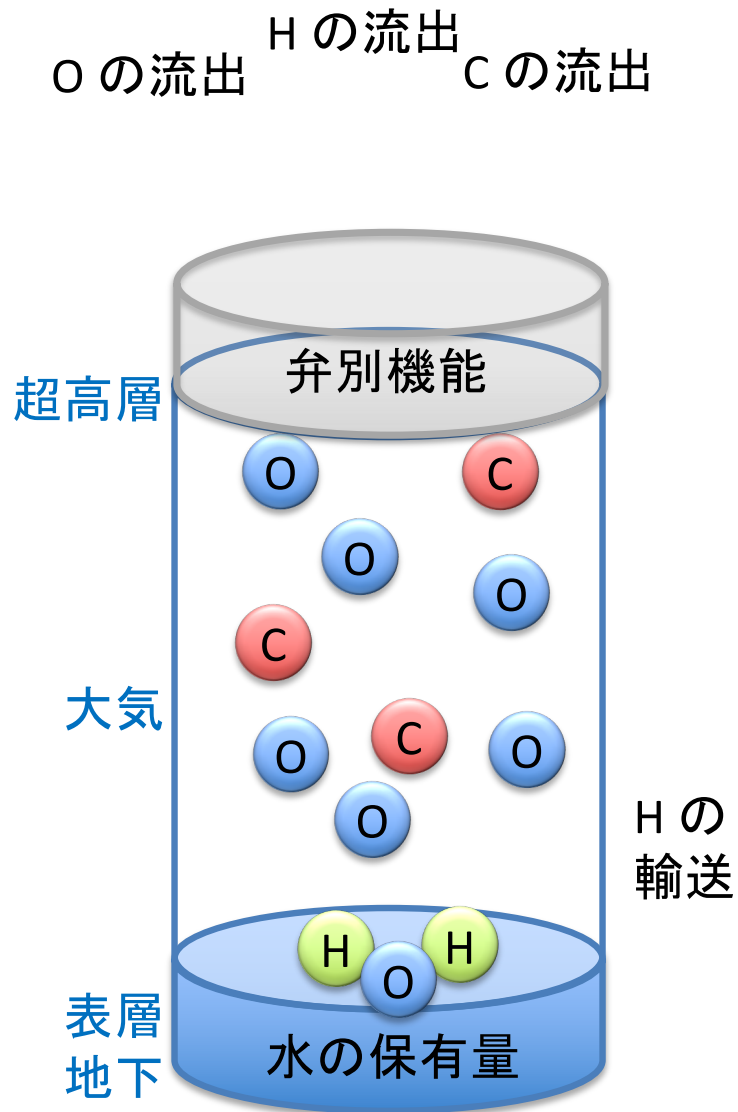
「結局、 H_2O はどれだけ流出したの？」

解決策：O, C, H の流出量比を求めれば良い



* H₂ 脱ガス等には取り敢えずは無視

O, C, H 流出の概要



- O と C の流出量 (弁別機能で比が決定)
 - 太陽FUV/EUV放射、太陽風等に依存
 - O, C の流出率、特に過去は？
→ Q1
- H の流出量 (下層からの輸送量で決定)
 - 太陽可視放射(気温)、大気圧、自転傾斜角、ダスト等に依存
 - 長期的にみると、H の流出量は従属的に決まる？ → Q2

初期の「暴走温室→海消失シナリオ」は
起こりにくい？

Q1: O, C の流出率、特に過去は？

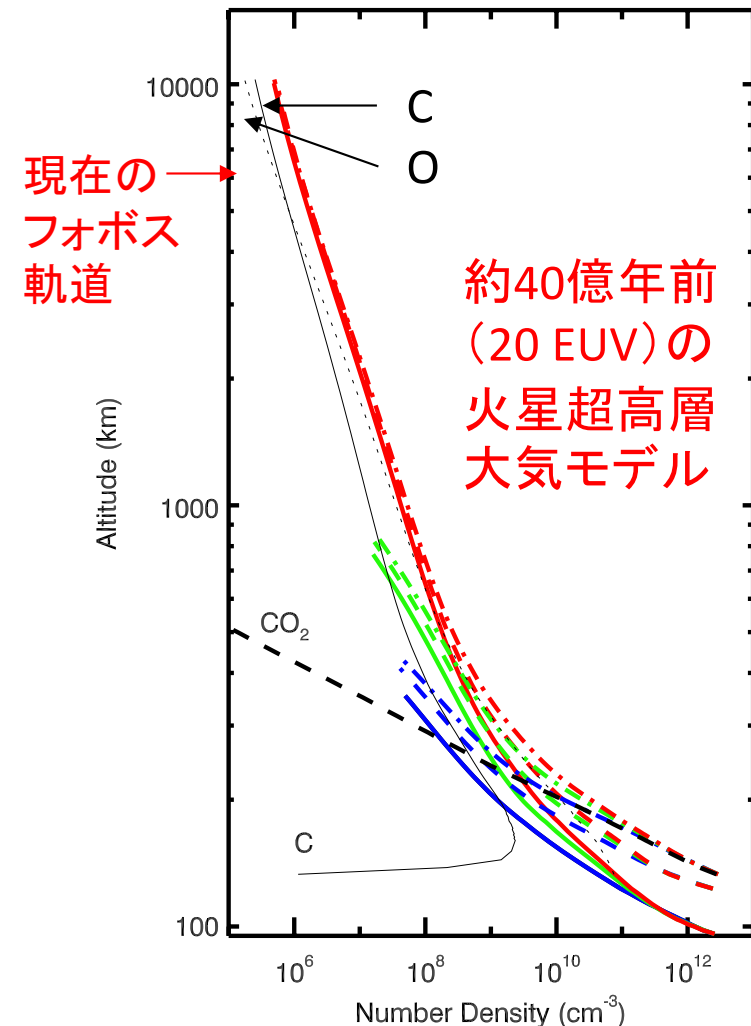
- MAVEN後の課題「O, C, H の流出量比を求める」
 - 過去の探査では O, H の観測が主
 - 理論予測によると、C の流出率は、O より1桁程度小さい
 - 歴史の初期では、C の流出率は、O より高くなるという予測

	Loss Rate (s^{-1})			
	1 EUV	3 EUV	10 EUV	20 EUV
Hot O	現在			約40億年前
$CO + h\nu \rightarrow C + O$	9.6×10^{21}	1.1×10^{23}	1.4×10^{24}	3.9×10^{26}
$O_2^+ + e \rightarrow O + O$	4.8×10^{25}	1.9×10^{26}	3.4×10^{26}	1.1×10^{26}
$CO^+ + e \rightarrow C + O$	6.6×10^{20}	3.0×10^{23}	1.4×10^{25}	1.1×10^{26}
$CO_2^+ + e \rightarrow CO + O$	1.1×10^{25}	1.2×10^{25}	9.8×10^{24}	5.4×10^{23}
$O_2^+ + C \rightarrow CO^+ + O$	4.7×10^{22}	2.7×10^{24}	1.7×10^{25}	2.3×10^{24}
Total	5.9×10^{25}	2.1×10^{26}	3.8×10^{26}	6.1×10^{26}
Hot C				
<u>$CO + h\nu \rightarrow O + C$</u>	9.3×10^{24}	5.1×10^{25}	1.3×10^{26}	6.3×10^{26}
<u>$CO^+ + e \rightarrow O + C$</u>	1.0×10^{23}	5.0×10^{24}	9.6×10^{25}	2.3×10^{26}
$CO_2^+ + e \rightarrow O_2 + C$	1.3×10^{23}	1.2×10^{23}	8.1×10^{22}	9.3×10^{20}
Total	9.5×10^{24}	5.6×10^{25}	2.3×10^{26}	8.6×10^{26}

O と C の非熱的散逸率
[Amerstorfer et al., 2017]

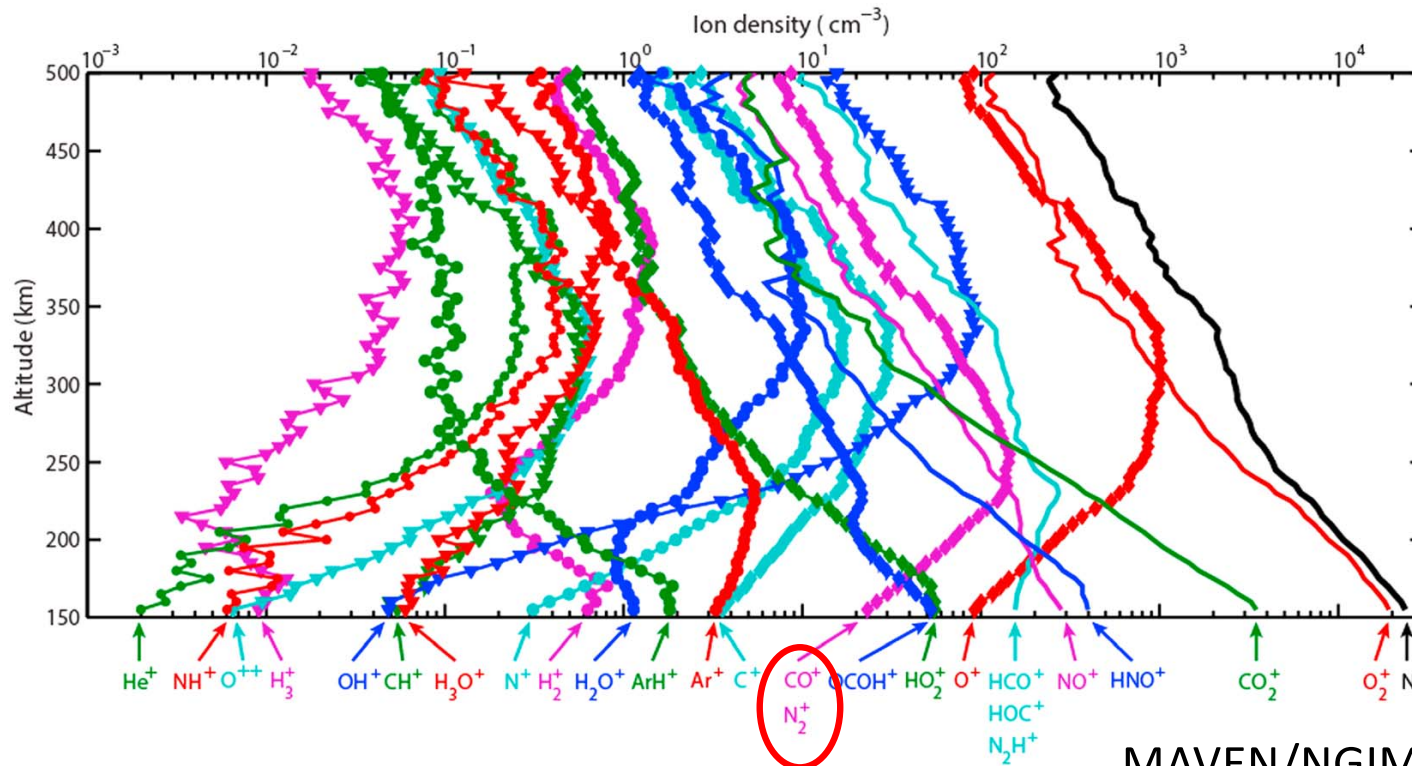
Q1: O, C の流出率、特に過去は？

- 約40億年前には、Slow Hydrodynamic Escape (熱的散逸) が発生
- C の流出率は O よりも高い
 - 1000万年で C 消失、O₂ 大気に？
→ Yagi et al. [2日目夕]
 - 月付近まで大気膨張？
→ K. Terada et al. [2日目夕]
(フォボスの起源に制約)



[Tian et al., 2009]

Q1: 何を測るべきか

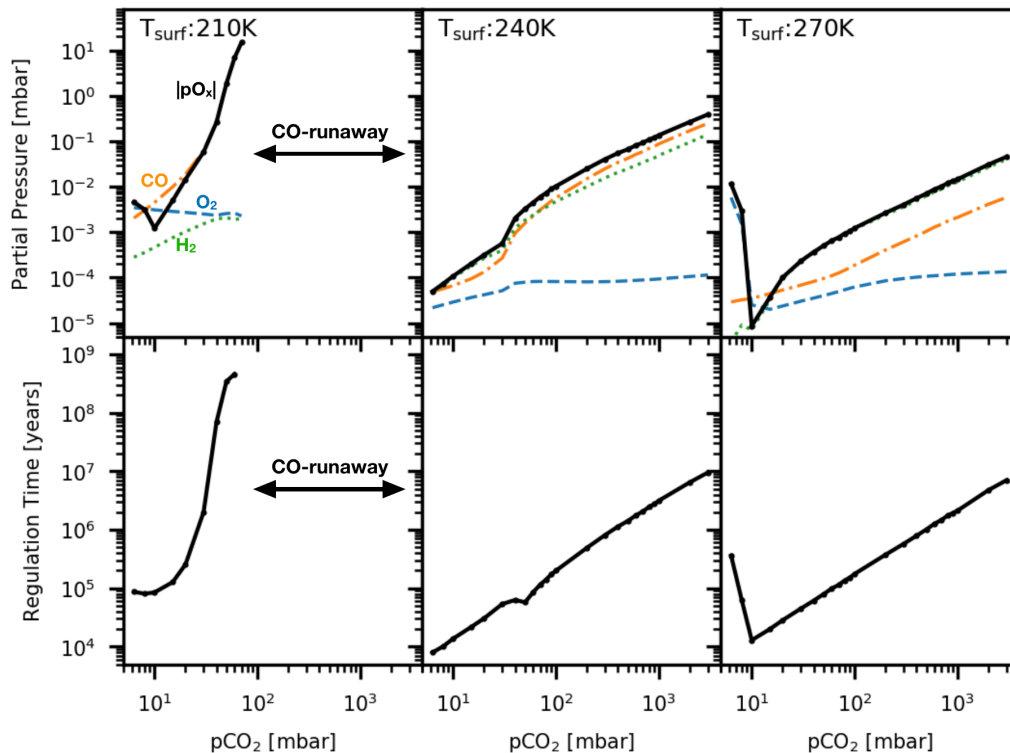


低高度から200 km以上
への輸送も理解途上。電
場？磁気張力？波動？
[Nakagawa, Yoshida et
al., 2日目夕]

MAVEN/NGIMS観測 [Benna et al., 2015]

- 酸素・炭素関連分子。但し、 CO^+ と N_2^+ は質量が近接、高質量分解能計測
- 流出率のCME/CIR応答、EUV依存
→ 過去の流出率の理解へ [Seki et al., 本日午後]

Q2: 水素(H)の流出量は 従属的に決まる？



[Koyama et al., 2日目タ]

Futaana et al. [次講演] も関係

長期的にみると($>10^4$ - 10^7 年)、
O 流出率: H 流出率が 1:2 になる
ように、H 流出率が自己調整

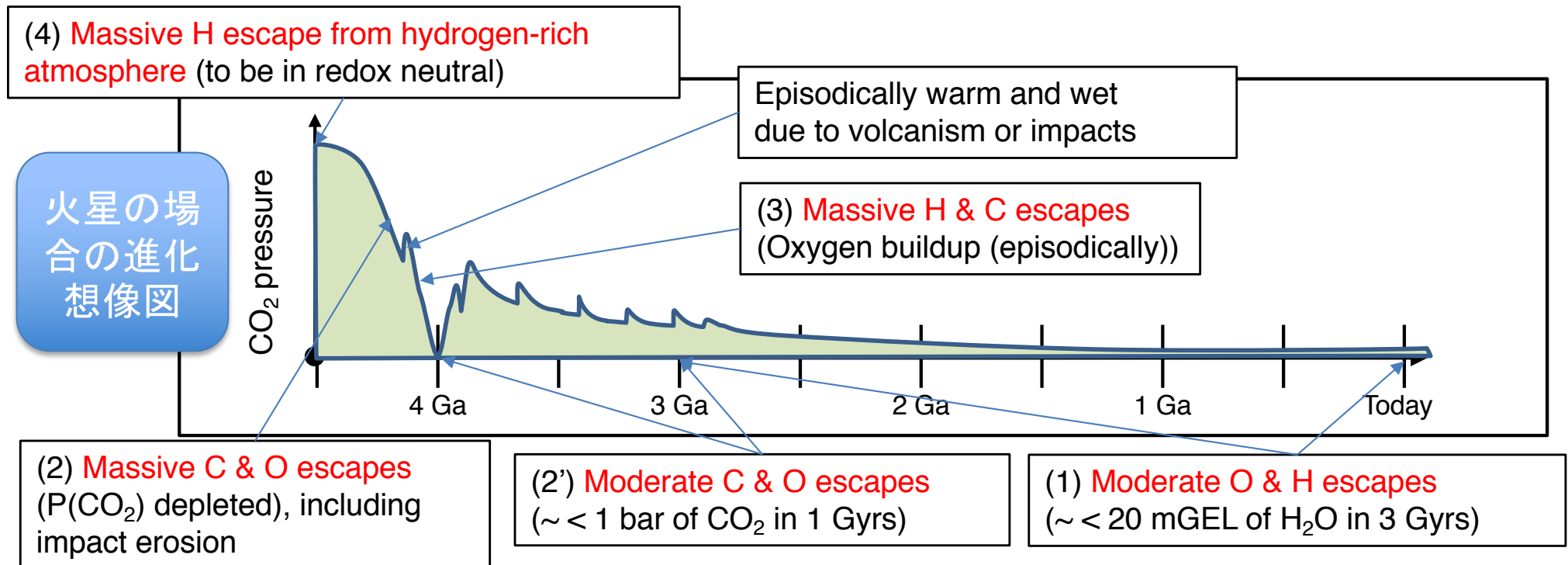
酸素が失われた分しか、水は
流出しない(水素は独立に大量
に流出できない)

初期の「暴走温室→海消失シ
ナリオ」は起こりにくい？

実証は、季節変化、11年変化、
将来の系外惑星大気観測で？

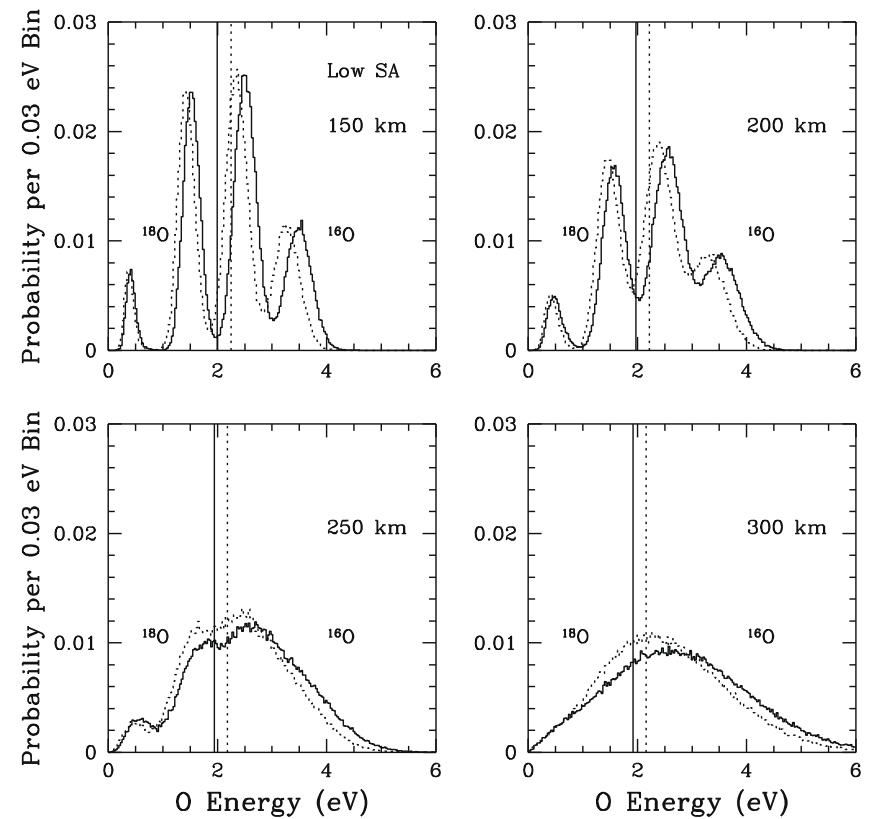
水流出・進化：寺田の想像

- 火星や金星の水は、少量しか流出していない筈（主に CO_2 が流出、 H_2O は地下に埋蔵）。
過去に炭素が流出することで、水を守った？
→ 浅部地下水探査 by MACO



同位体比計測

- 大気進化の歴史を紐解く上で、同位体比は重要
- MMXの高高度観測で先鞭をつけた後、超高層での同位体比高度変化の観測および大気サンプルリターンを狙っていく
- 並行して、固体部との相互作用による同位体比変化の最新の理解も組み込んでいく



[Fox and Hac, 2010]

まとめ

- これまでの大気散逸探査では、酸素(O)と水素(H)の流出に注目してきた
- 水進化を理解する為には、酸素(O)と炭素(C)とその関連分子の流出、そしてその歴史も明らかにすべし
 - O, C 流出のCME応答、EUV依存(MMX、MACO)
 - 熱圏→電離圏への CO^+ , CO_2^+ 等供給(MACO(?))
 - 初期の大気膨張(系外惑星紫外観測、タイタン探査(?))
 - H 流出の自己調整機能(火星・金星の季節～11年変化観測、将来の系外惑星大気観測)
 - 浅部地下水探査(MACO)
 - 同位体比(MMX、将来の大気観測・サンプルリターン)