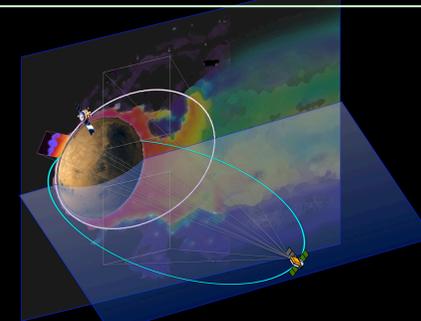


大気散逸と気候変動： 理論研究の現状と発展性

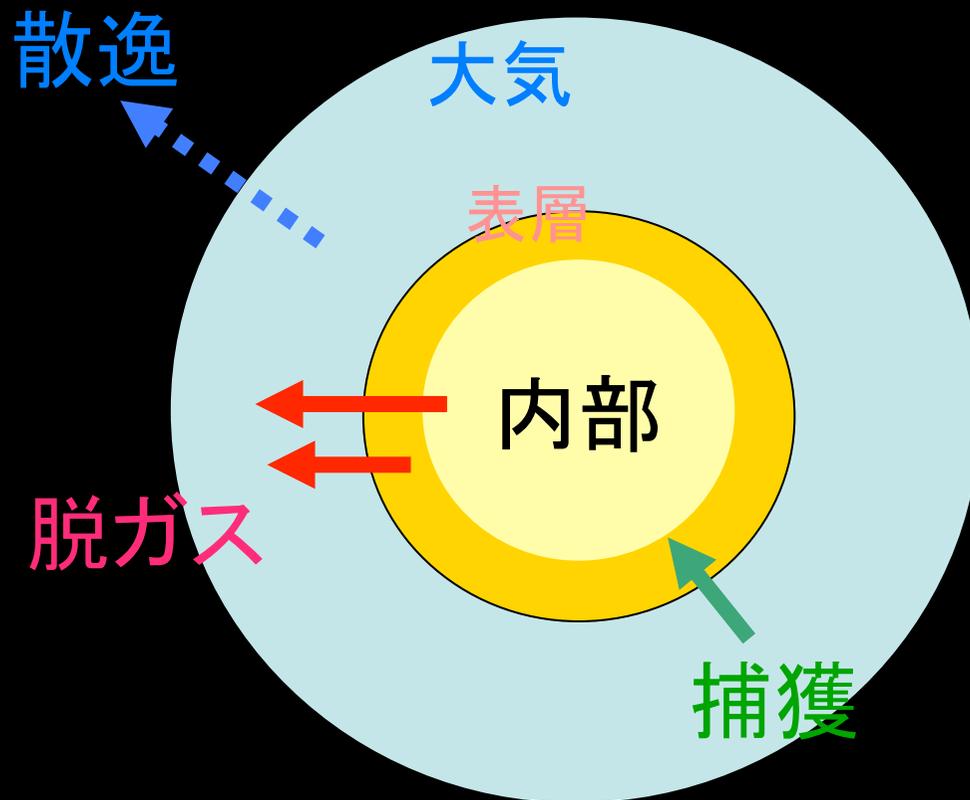


目次

1. 大気散逸と気候変動～「火星システム」の超長期的変遷
 - CO₂散逸量の見積り
 - 下層大気・固体部との関連話題
2. 発展性～非磁化惑星のハビタブルゾーン
の理解へ

寺田直樹(東北大)

1. 大気散逸と気候変動～火星「システム」 の超長期的変遷



火星気候変動の理解には、
火星システムの総合的な理
解が不可欠

- 火星超高層 (大気の散逸)
- 火星気象 (大気の輸送・
表層との交換)
- 火星固体 (大気の供給)

2. 発展性～非磁化惑星のHZの理解へ

火星大気散逸(大気進化) 過程の解明

イオンピックアップ 電離圏イオン流出

スパッタリング 太陽風ボンバードメント

光化学反応 ジーンズ流出

他惑星の大気進化と多様性、
ハビタブル惑星の理解へ

検証

火星：～40億年の表層環境 進化の歴史が残る惑星

弱い風化作用

地形

鉱物

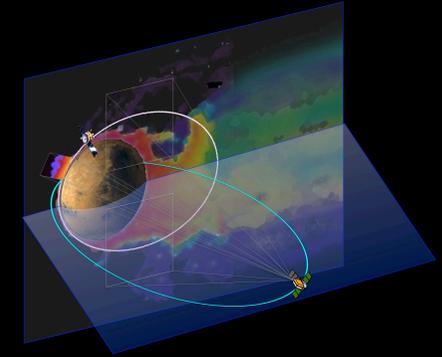
クレータ年代学

火星隕石

火星サンプル(同位体比)

太陽系惑星
太陽系外惑星

大気を保有する条件は？
生命惑星成立の条件は？



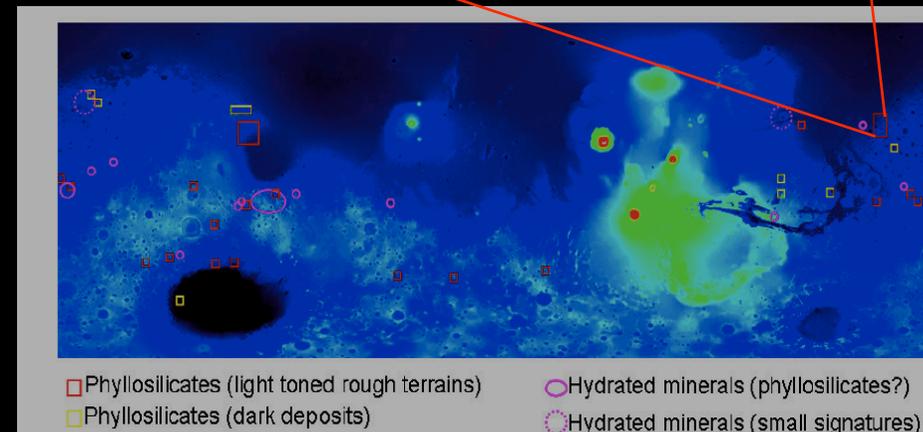
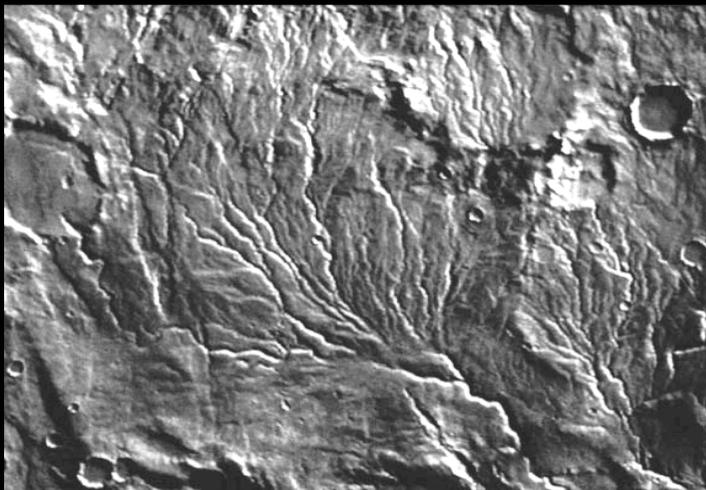
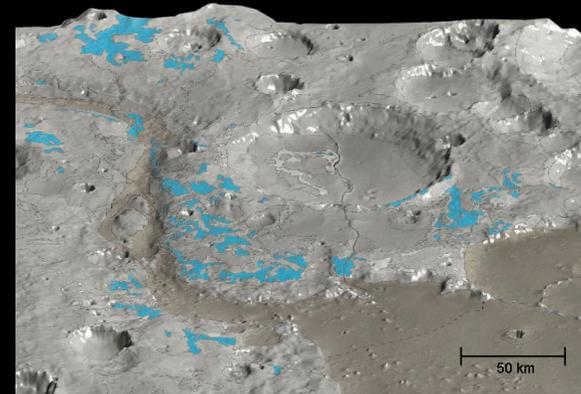
1. 大気散逸と気候変動

火星システムの超長期的変遷

- CO₂散逸量の見積り
- 下層大気・固体部との関連話題

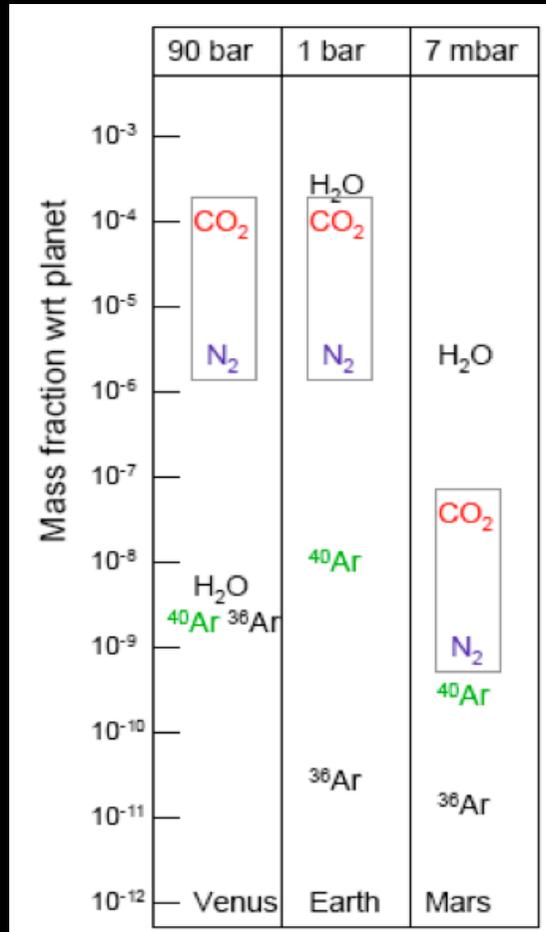
過去の火星気候変動を示唆する観測

- 含水鉱物の分布 (MEX)
 - 40億年前には安定した水に長時間さらされた痕跡
 - 35億年前には酸性の水による洪水を示唆
- 過去に液体の水が存在したことを示唆する地質学上の痕跡



Map of water-bearing minerals
[Poulet et al., 2006]

二酸化炭素と水の行方に関する理解の現状



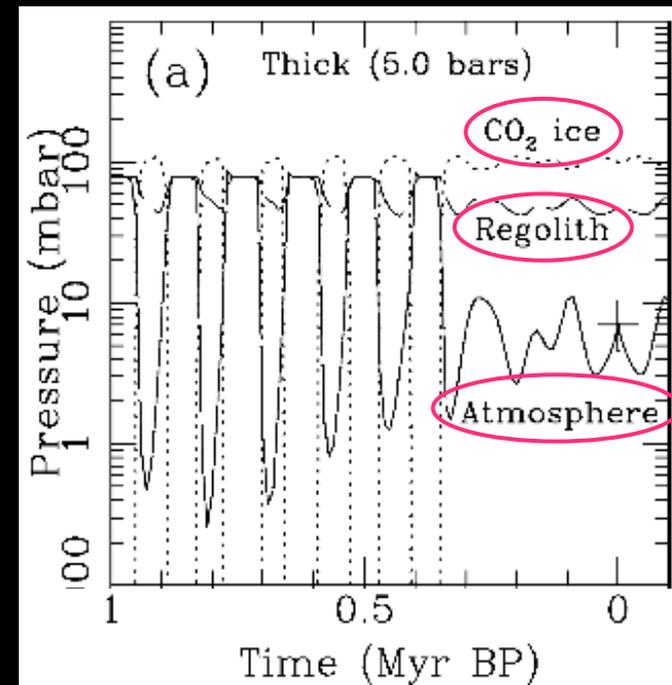
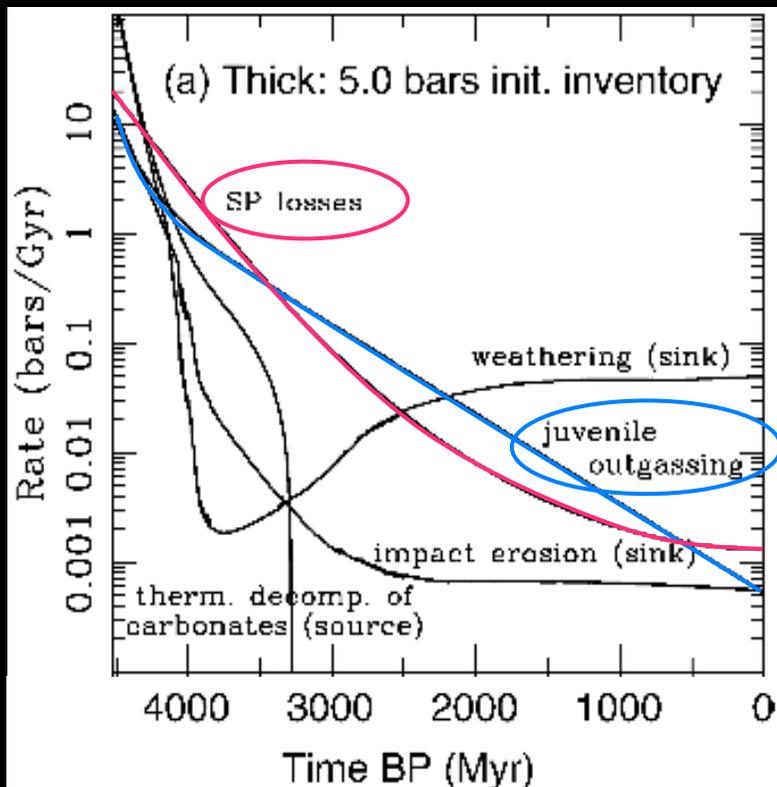
金星 地球 火星
の組成重量比

[Chassefiere et al., 2006]

- 1気圧以上の大量のCO₂の消失
 - MEX / OMEGAの観測では、表層に大量の炭酸塩は見つからず (MRO / CRISMやSpiritは、Nili Fossae等で一部発見)
 - 地下に埋蔵？
 - 宇宙空間に散逸？
- N₂, CO₂の各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
- 理論：
 - 過去35億年間の総散逸量の見積りは一桁以上の不確定性あり

火星史における二酸化炭素量の変遷

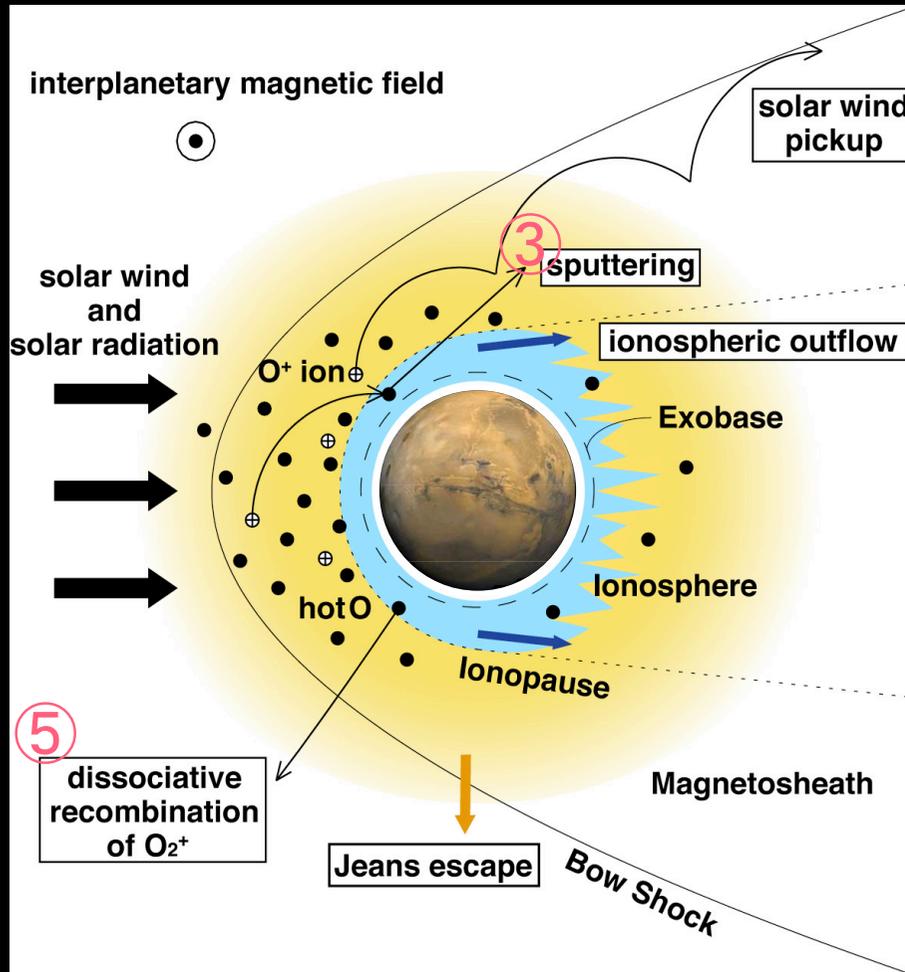
- “粗い”モデルの計算例 [Manning et al., 2006]
- 宇宙空間への散逸には、SP(スパッタリング過程)を仮定



宇宙空間への散逸、火山活動による脱ガス(供給)がCO₂総量変化の鍵

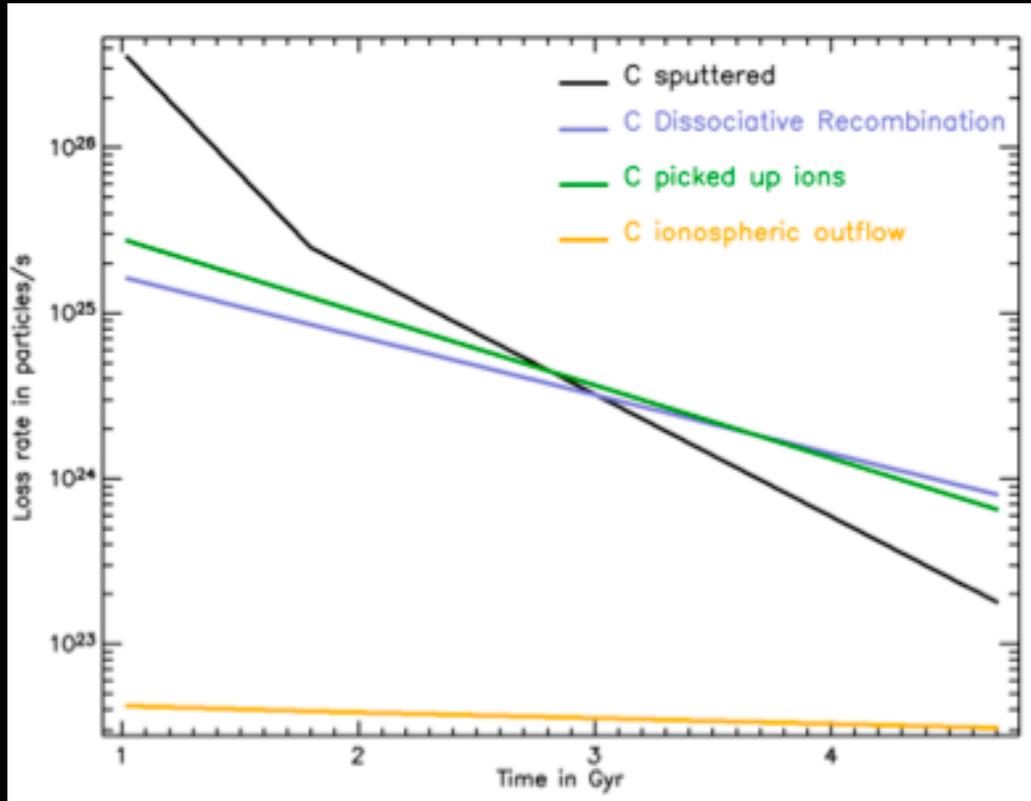
(左図の100万年間を拡大)
大気—極冠—レゴリスシステム内での循環・貯蔵

非磁化惑星からの大気散逸機構



1. 電離圏イオン流出
2. イオンピックアップ
3. スパッタリング
4. ジーンズ流出
5. 光化学反応による流出
6. その他の散逸機構

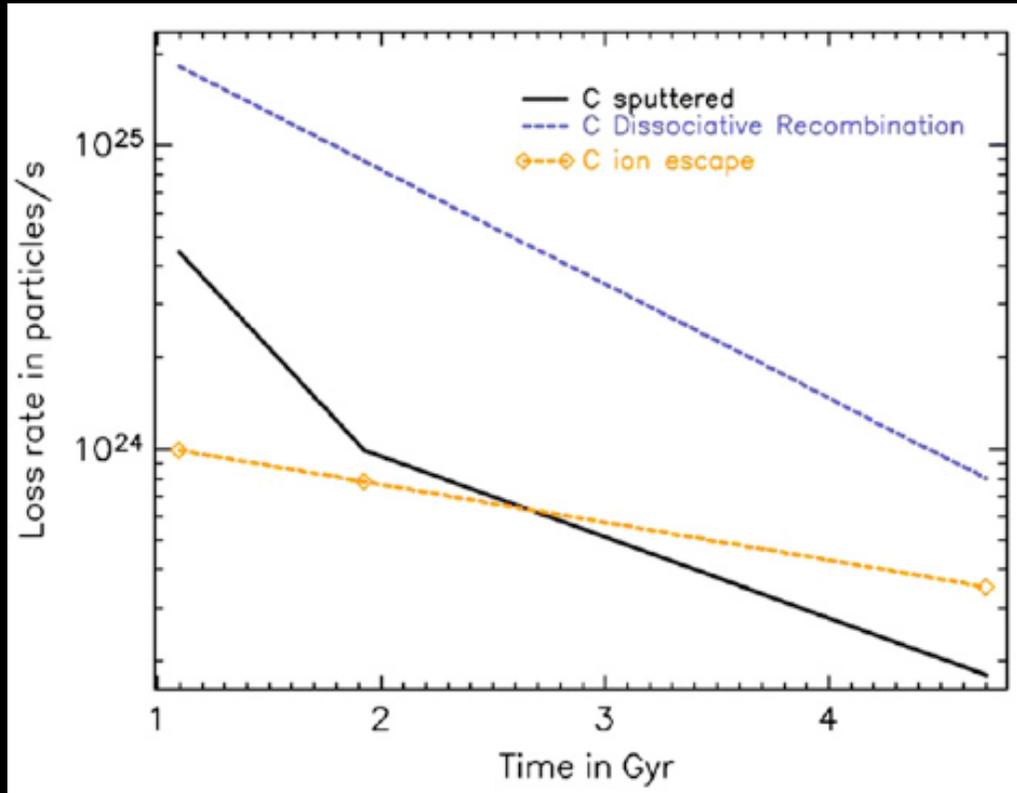
宇宙空間へのCO₂散逸量の見積り



- スパッタリング過程による散逸率は、(太陽EUV)⁷ 仮説に従う！？
- Oの散逸率も同様の傾向 (H₂Oからの寄与分を含むのでCより多く散逸)？

C散逸率の理論見積り
[Chassefiere et al., 2006]

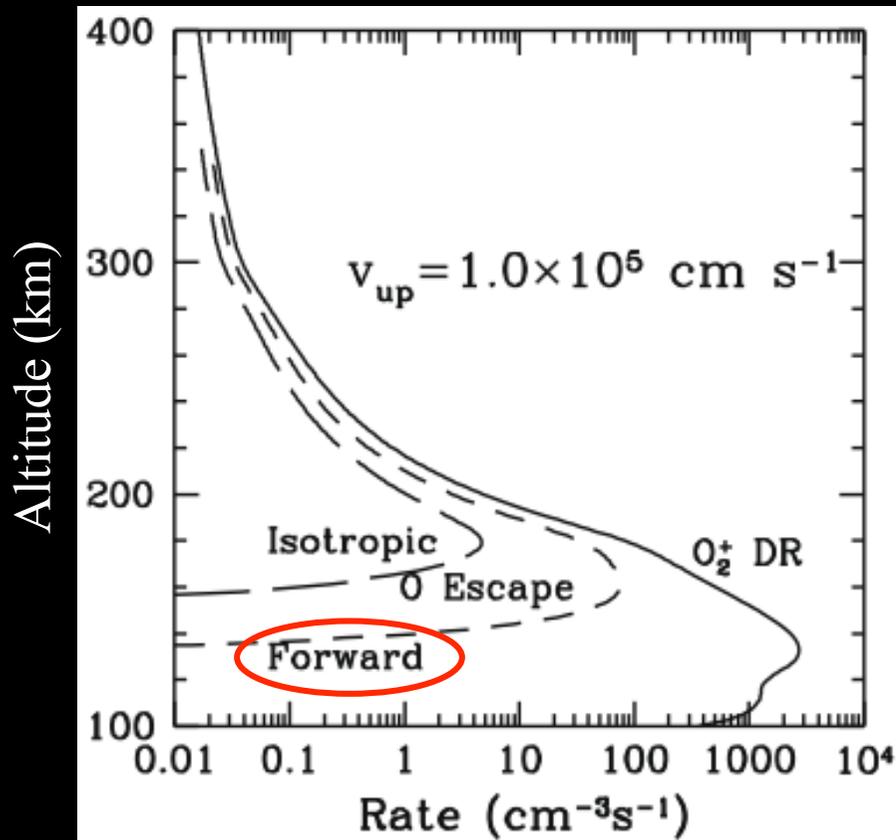
宇宙空間へのCO₂散逸量の見積り



- スパッタリング過程による散逸率は、(太陽EUV)⁷仮説に従う！？
- Oの散逸率も同様の傾向 (H₂Oからの寄与分を含むのでCより多く散逸)？

C散逸率の理論見積り
[Chassefiere and Leblanc, 2011]

宇宙空間へのCO₂散逸量の見積り



Computed total O_2^+ DR rates and production rates of escaping ^{16}O [Fox and Hac, 2010]

- 一方で、光化学反応による散逸率は、forward scatteringモデルの導入により、**1桁以上散逸率が増加** [Fox and Hac, 2010]
- 我々のグループでも追試を行っているが、2倍以上は増加しそう
- 例えば、酸素の散逸率は $1.6 \times 10^{26} \text{ s}^{-1} \Rightarrow$ 水素の散逸率と同程度に

これまでのOやCの流出に関するシミュレーション研究は、定量的な研究としては不十分であり、定性的なものとして捉えた方がよい

宇宙空間へのCO₂散逸量の見積り

- 光化学反応による散逸は、火星では特に効果的
(光化学反応の剰余エネルギー ~数eV
> 惑星重力圏からの脱出エネルギー ~2eV)

例：酸素の解離再結合

	excess energy ³² O ₂ ⁺ (³⁴ O ₂ ⁺)	branching ratio based on Kella et al.[1997] ν = 0 (ν > 0)
O ₂ ⁺ + e → O(³ P) + O(³ P) + 6.95(6.93) eV		0.22 (0.27) (a)
→ O(¹ D) + O(³ P) + 4.98(4.96) eV		0.42 (0.36) (b)
→ O(¹ D) + O(¹ D) + 3.02(3.00) eV		0.31 (0.23) (c)
→ O(¹ S) + O(³ P) + 2.76(2.74) eV		0 (0) (d)
→ O(¹ D) + O(¹ S) + 0.80(0.78) eV		0.05 (0.13) (e)

宇宙空間へのCO₂散逸量の見積り

- このように、理論研究による散逸量の見積りは、オーダーの誤差を含む
 - 一方で、重要な示唆として、
 - 火星サイズの惑星では、光化学反応による原子(O, C)の散逸が効果的
(光化学反応の剰余エネルギー ~数eV
> 惑星重力圏からの脱出エネルギー ~2eV)
- ⇒ 火星サイズ惑星のハビタブルゾーンの定義には、大気散逸が重要な役割を果たしている可能性が高い

下層大気・固体部との関連話題 (1)

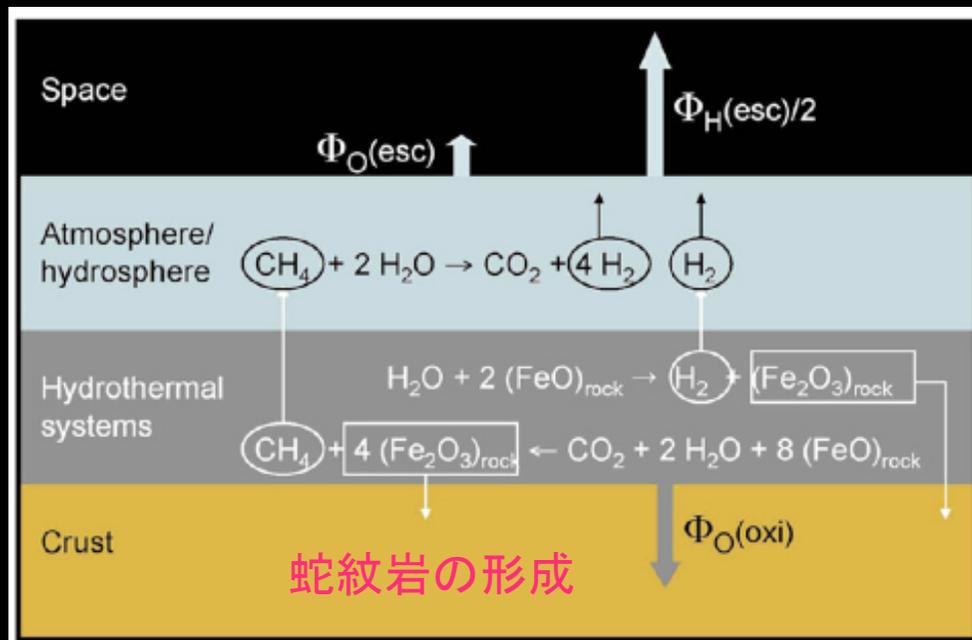
- 従来の見積りでは、酸素の散逸率は、水素の散逸率より1桁小さいと見積られていた

⇒ 残された酸素問題

- 残された酸素をメタンの酸化に使うと(割と)説明がつくという説もある(20%を超えるとD/H比が大きくなり過ぎる等の問題あり) [Chassefiere and Leblanc, 2011a, 2011b]

酸素は地殻に?

酸素は宇宙に?



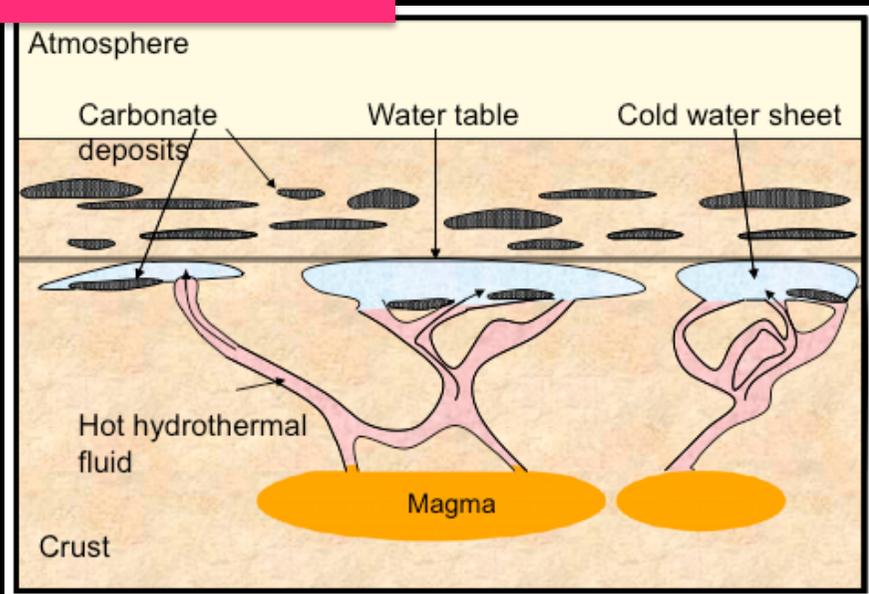
一方で、従来よりも一桁大きな酸素の散逸率が提唱されつつある。Forward scatteringモデル [Fox and Hac, 2010]

下層大気・固体部との関連話題(2)

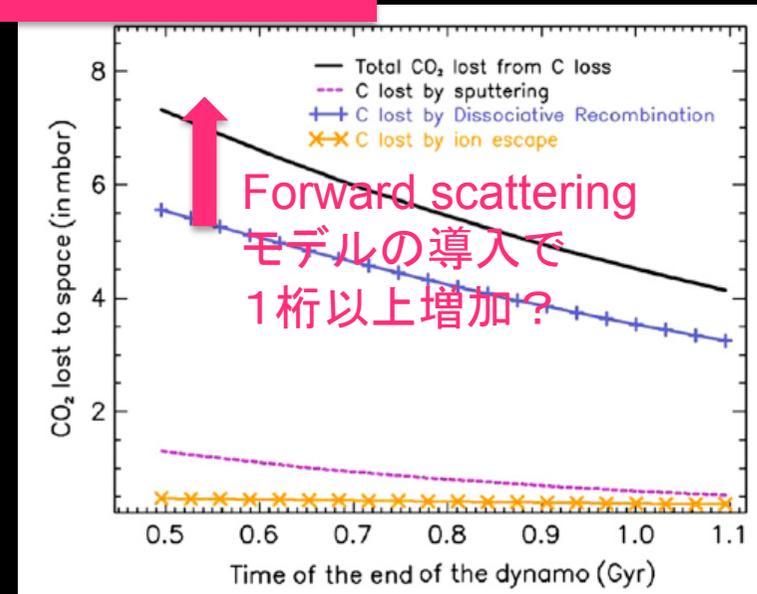
- もし蛇紋岩形成がメタン生成を説明するとすると、過去に0.2~2気圧のCO₂を大気中に放出
- 加えて、火山活動による~0.4気圧のCO₂供給
⇒ CO₂の行方は？

解明の鍵は、組成を分離した散逸率の観測

CO₂は地殻に？



CO₂は宇宙に？

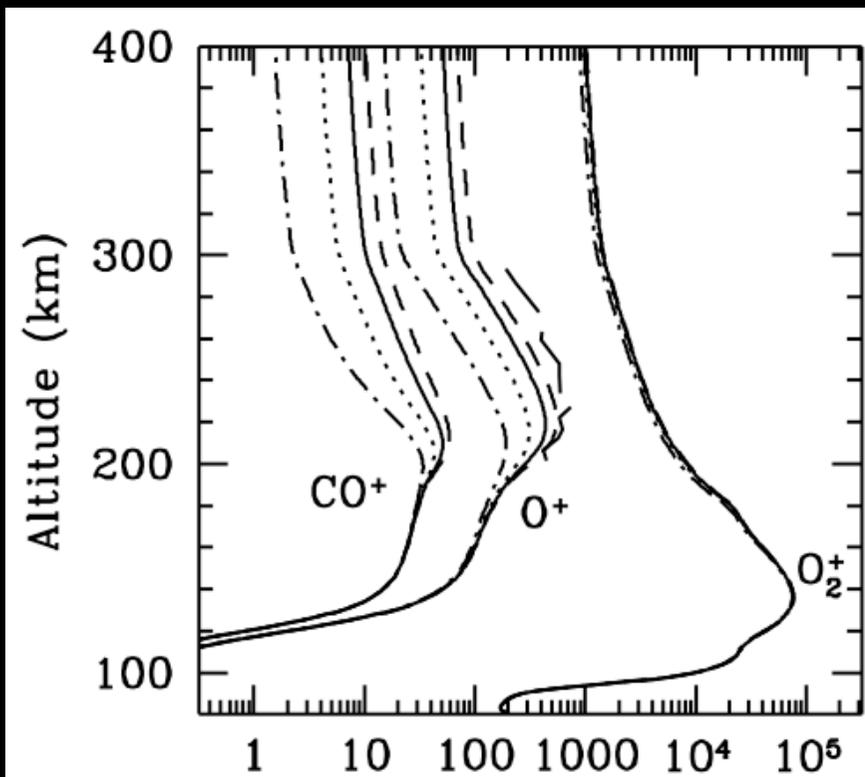


[Chassefiere and Leblanc, 2011c]

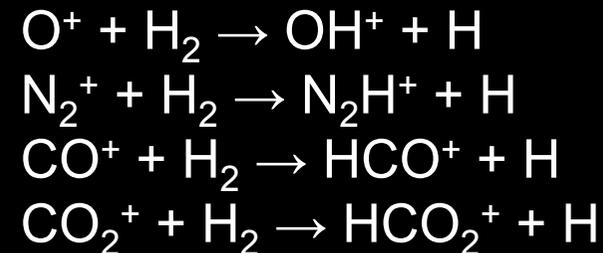
下層大気からの影響

- 光化学反応による大気散逸率は、下層大気からのH₂の供給によって変化する

H₂量を 4, 15, 40, 100 ppmと変化させた時の電離圏イオン分布



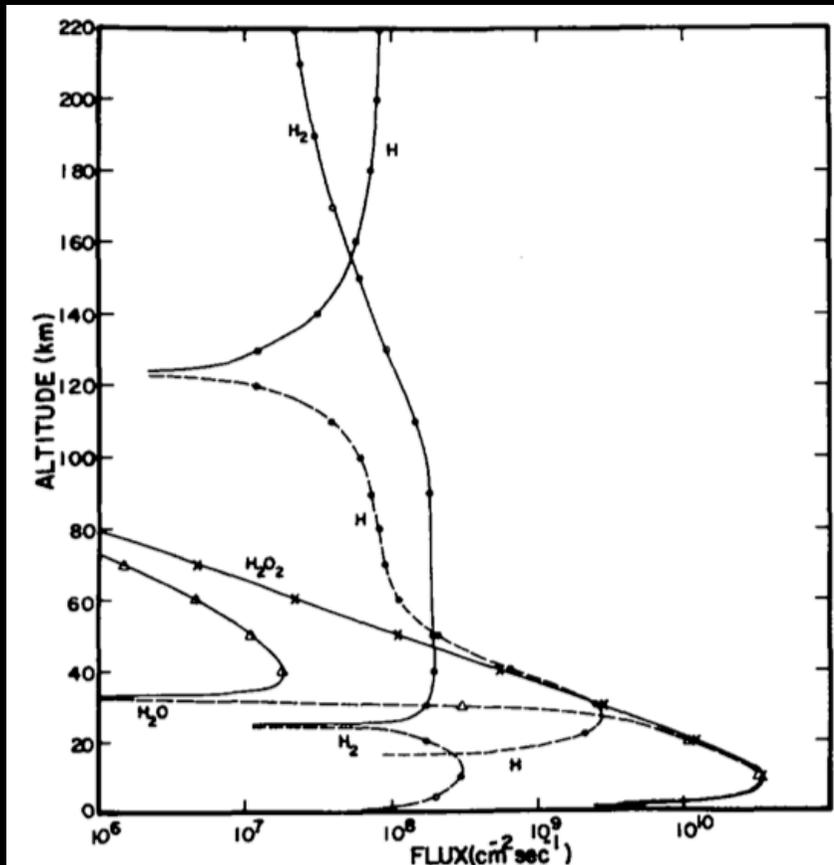
[Fox, 2003]



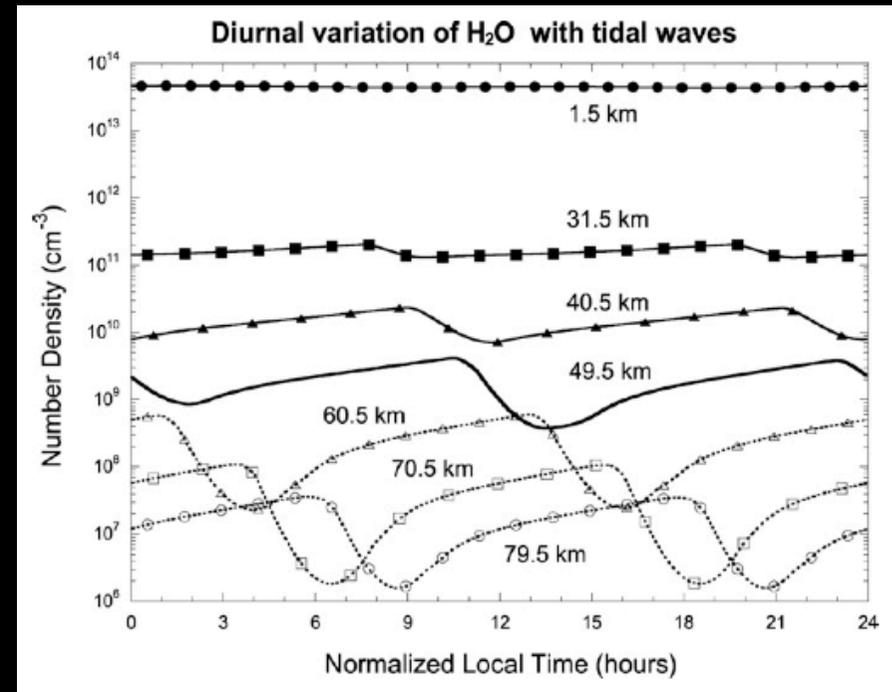
加えて、H₂による太陽EUVの吸収により、O, Cなどの光化学反応率が減少する

H₂の下層大気からの供給

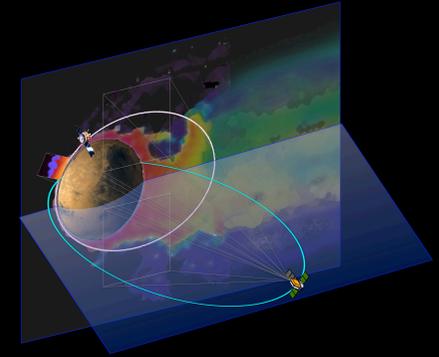
- 下層大気からのH₂の供給フラックスは、下層での水分分布や波動-光化学結合などで変化する？



下層大気からのH₂の供給フラックス
[Liu and Donahue, 1976]



下層大気における波動と光化学の結合 [Zhu and Yee, 2011]



2. 発展性

非磁化惑星のハビタブルゾーン(生命居住
可能領域)の理解へ

科学目標3:

太陽変動への応答の理解(過去への演繹)

現在

- EUV放射強度: 太陽活動周期により平均的には3倍程度変化。太陽フレア時にはさらに大きく変動。
- 太陽風流束: CME(コロナ質量放出)やCIR(共回転相互作用領域)到来時に1桁以上変化。

過去

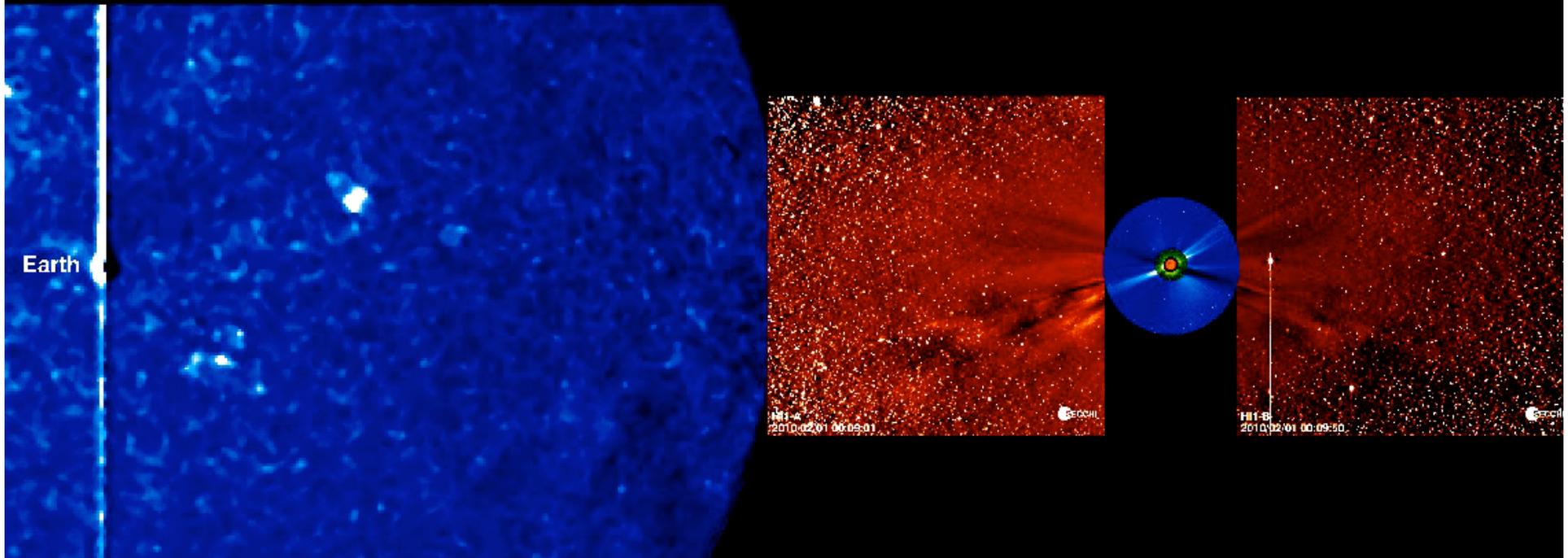
- EUV放射強度: 35億年前に現在の約6倍、40億年前に約10倍強かったと推測されている [Ribas et al., 2005]。
- 太陽風流束: 40億年前に約20-50倍強かったと推測されている [Lammer et al., 2003]。

→ 太陽フレア、CME、CIR等の太陽活動現象毎の影響を明らかにすることで、火星が劇的な気候変動を経験した時代(35-40億年前)まで遡って、大気散逸および大気進化の歴史を推定可能。¹⁹

太陽フレア、CME、CIR等の太陽活動現象
毎の影響を明らかにすることで、過去の
大気散逸・大気進化を推定

地球
↓

太陽
↓



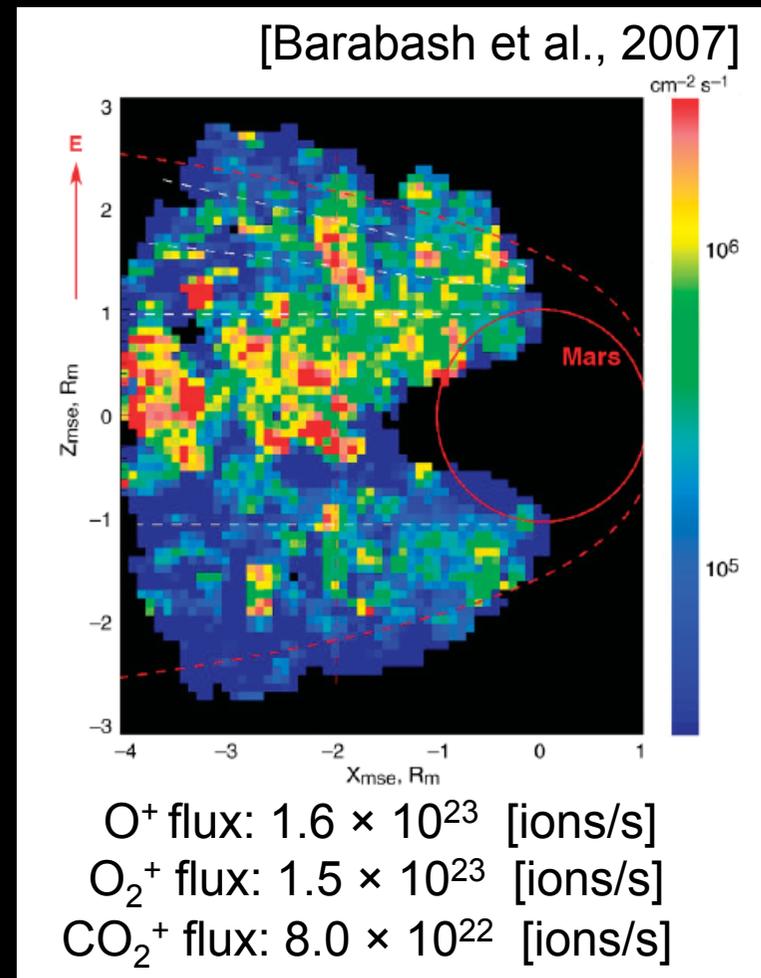
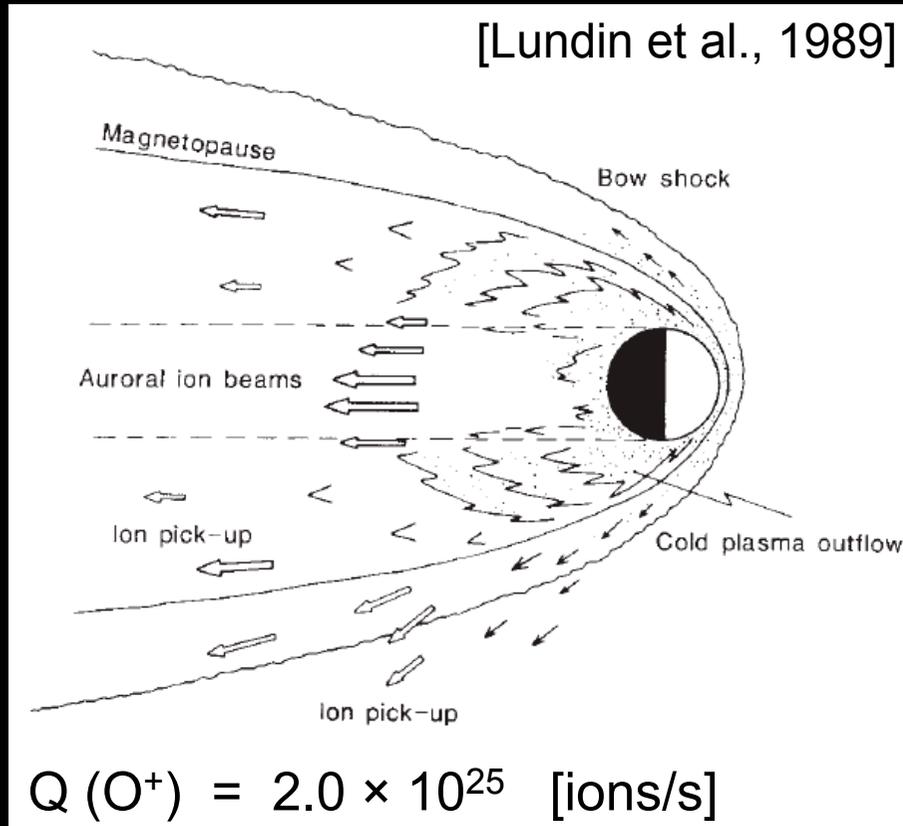
SECCHI-A 2010-02-01 HI2A 02:09:21 HI2B 02:10:10 HI1A 00:09:01 HI1B 00:09:50 COR2A 00:08:15 CO

人工衛星による観測 ©STEREO, NASA
コロナ質量放出(CME)

先行ミッションによる火星大気散逸観測

太陽活動極大期(Phobos-2)

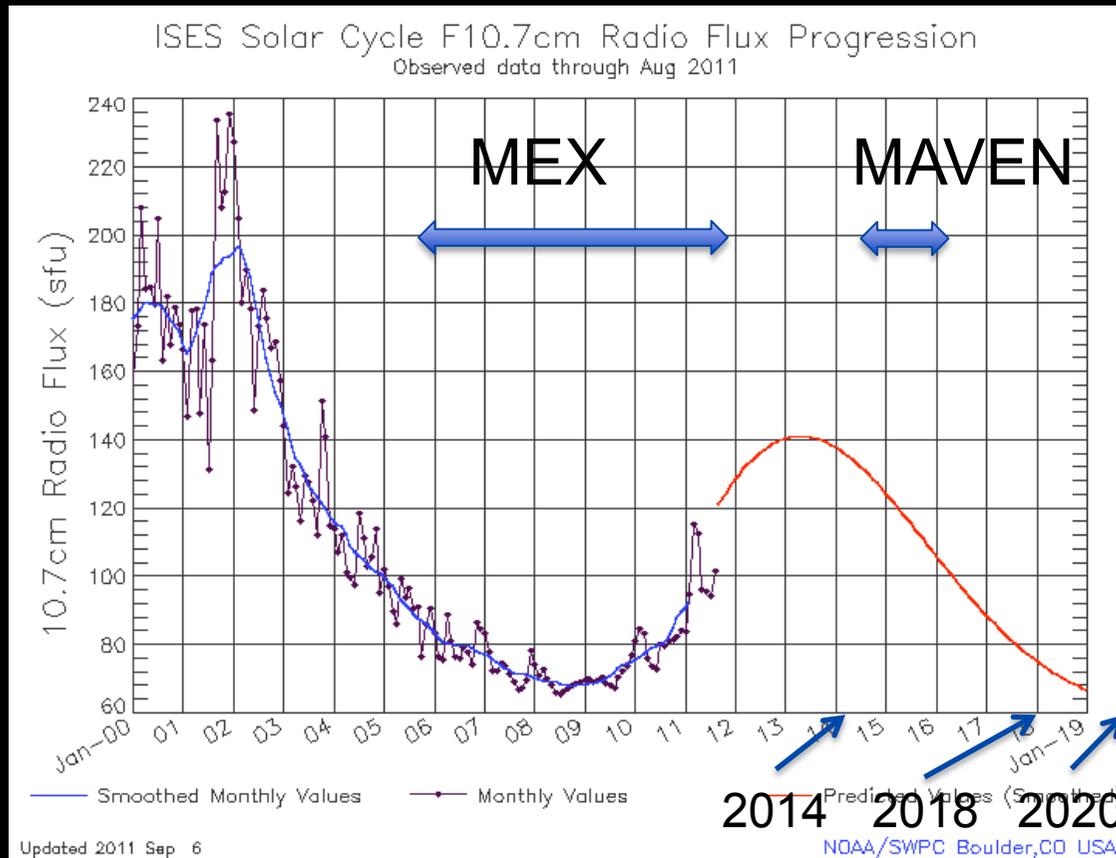
太陽活動極小期(MEX)



両ミッションで観測された散逸量の違いは、太陽風および太陽放射変動の影響の大きさを示唆。

ミッション実施時期

過去への演繹のためには、太陽活動の変動が大きい太陽活動極大期(2024年頃)をミッション期間に含むことが望ましい

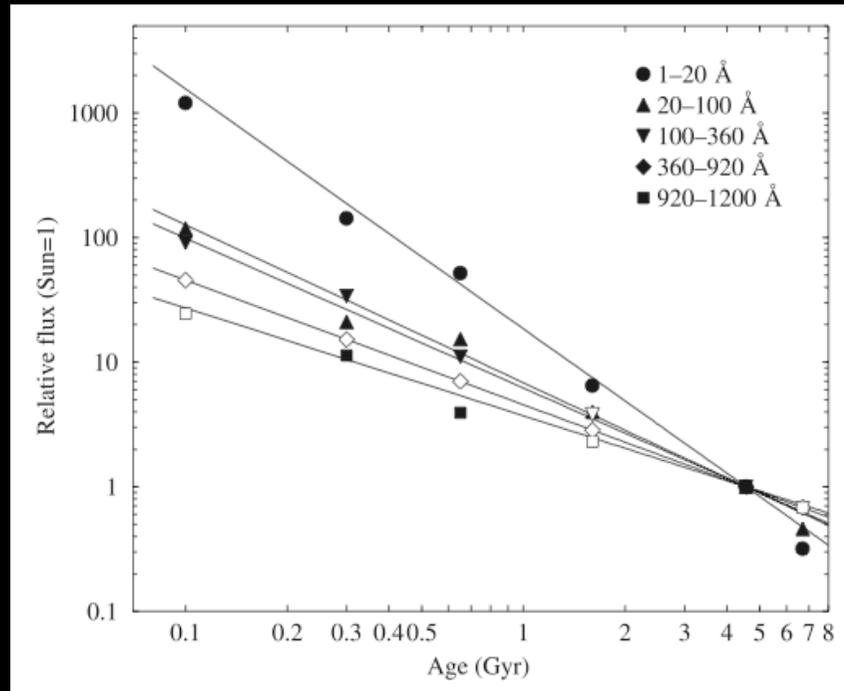


Solar maximum

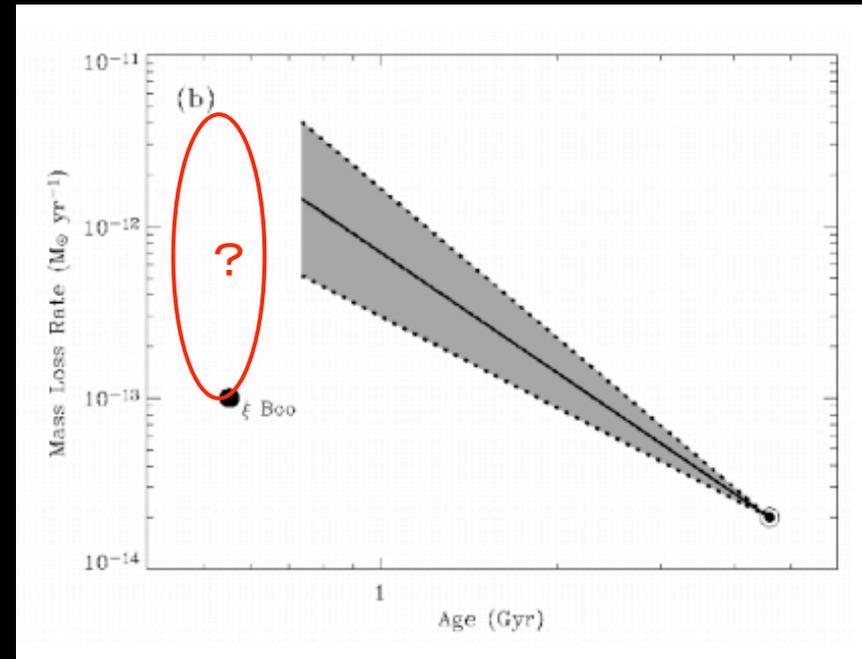
Solar cycle # 25

初期太陽・初期太陽風

- 様々な年代の主系列星の観測 (Sun in Time program [Ribas et al., 2004]) など



EUVは～100倍
[Ribas et al., 2005]



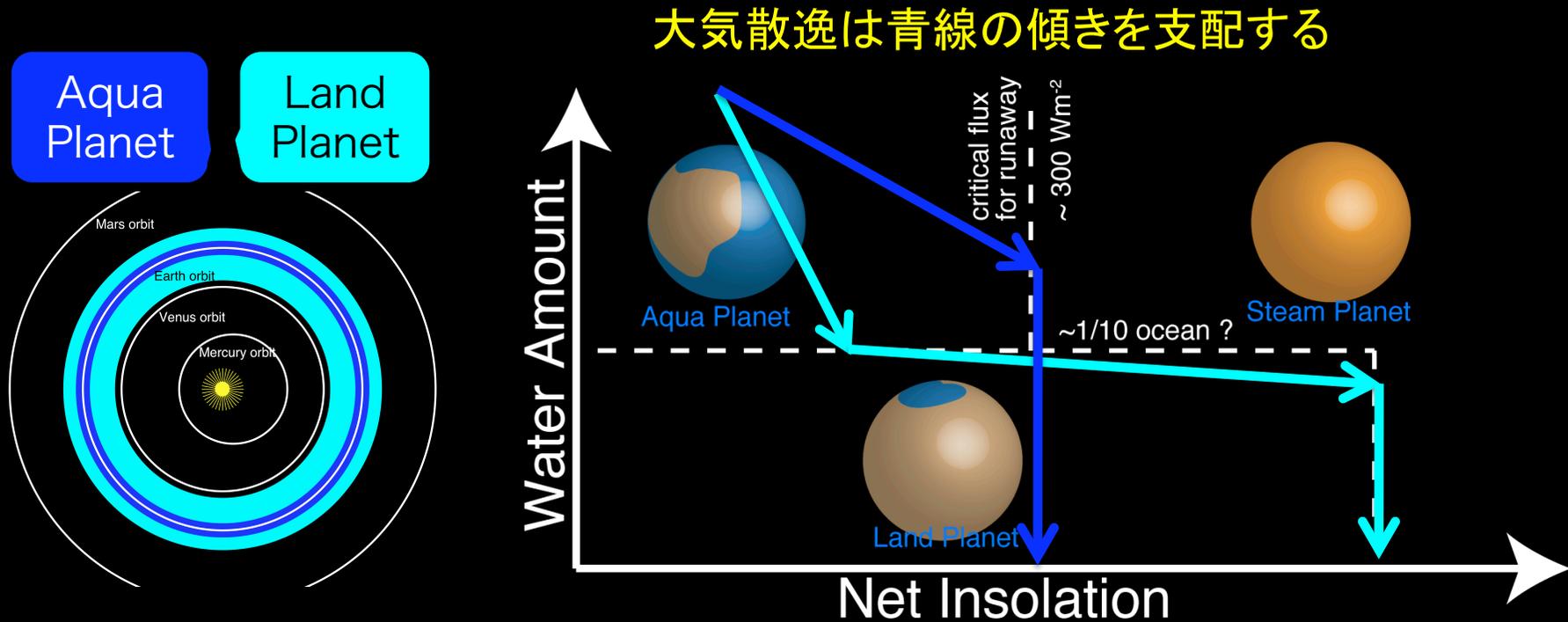
太陽風は～100倍で頭打ち
[Wood et al., 2005]

- 近年の地上観測、Kepler衛星観測などによって、さらに新しい、エキサイティングなデータが得られつつある

非磁化惑星のハビタブルゾーンの理解へ

～火星気候変動理解の鍵を握る二酸化炭素と水の量の変遷

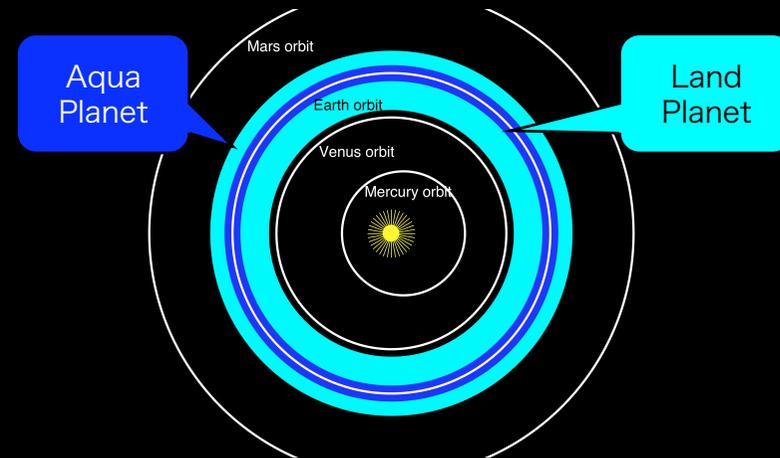
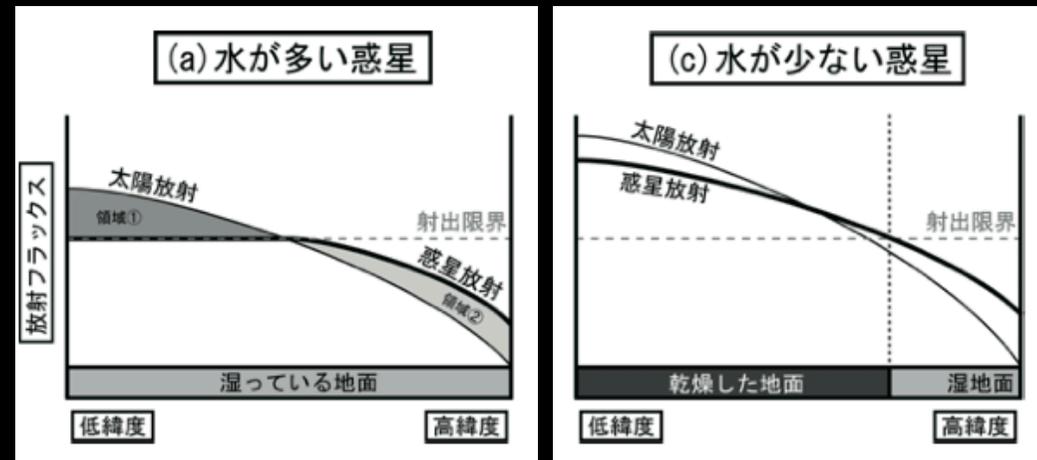
前述のように、火星サイズの惑星（脱出エネルギーが～数eV）は特に大気散逸率が高くなりやすい



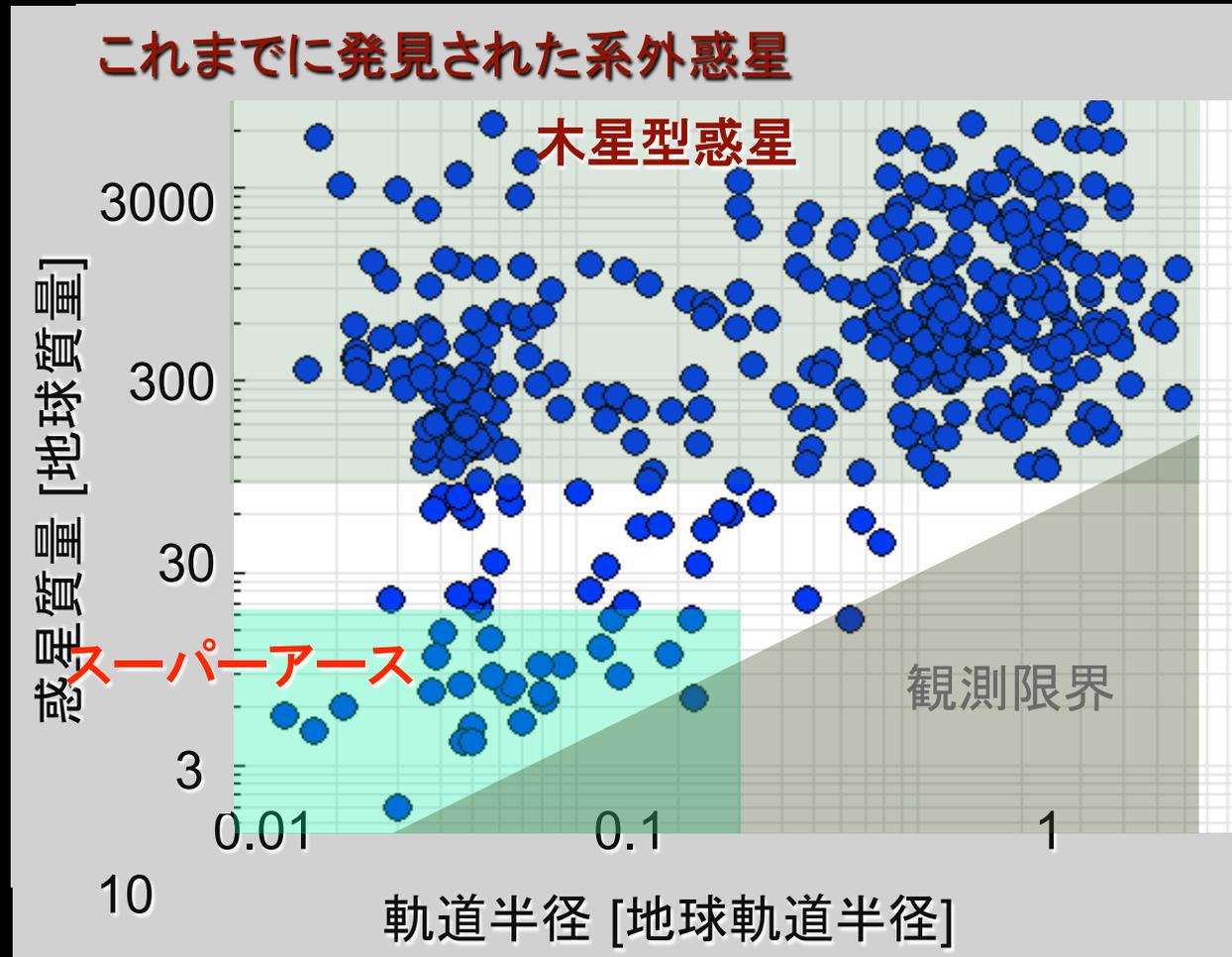
急速な水の散逸は、ハビタブルゾーンの持続時間を長くする。
[Abe et al., 2011]

水惑星と陸惑星

- 全球平均→水循環に伴う不均一性を考慮
- 陸惑星の方がハビタブルゾーンが広がる
- 陸惑星では、惑星表面の水分分布が大気中の循環で支配される(地形的起伏が小さく、流水による再分配が支配的な場合は水惑星的に振る舞う)

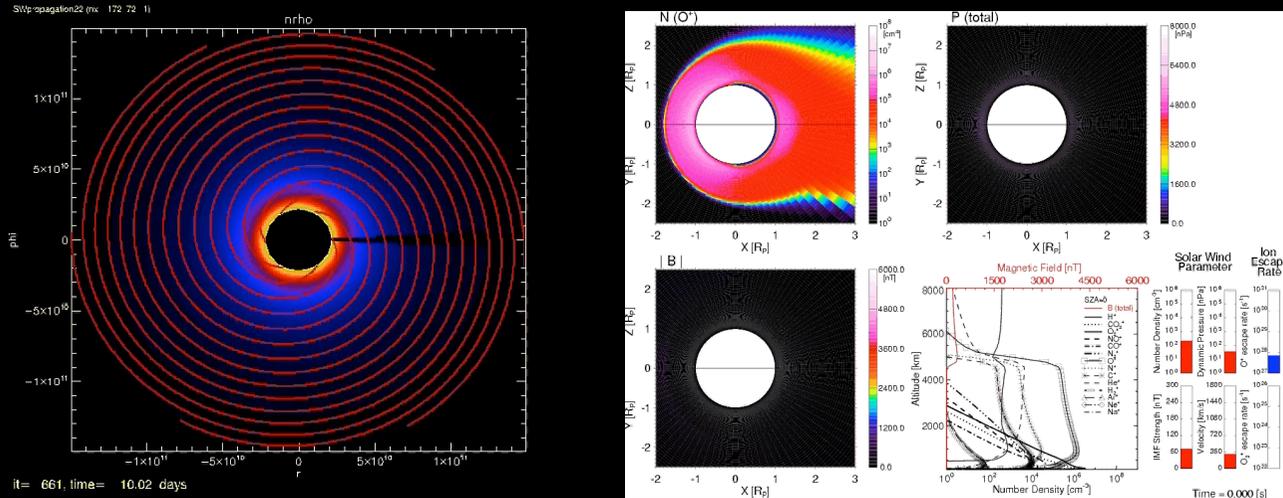


太陽系外惑星

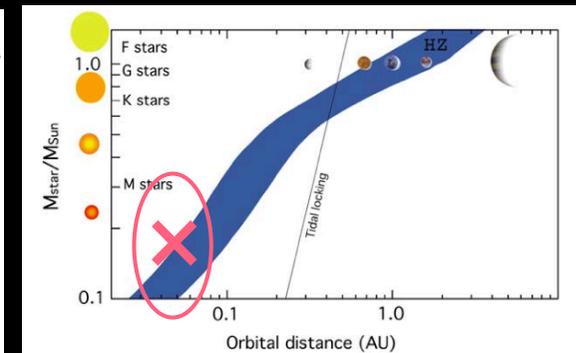


[Ida et al.]

M型星における連続的生存可能領域 (CHZ)



Cases	d [AU]	EUV	L [s^{-1}]	0.1 Gyr [bar]	0.5 Gyr [bar]	1 Gyr [bar]
1 10	0.05	100 30	2×10^{30} 4×10^{29}	32 6.5	160 32.5	320 65
2 11	0.05	100 30	2×10^{29} 5×10^{28}	3.2 0.8	16 4	32 8
3 12	0.1	100 30	8×10^{29} 9×10^{28}	12.8 1.45	64 7.25	128 14.5
4 13	0.1	100 30	7×10^{28} 6×10^{27}	1.1 0.095	5.5 0.47	11 0.95
5 14	0.2	100 30	1.2×10^{29} 1×10^{28}	1.9 0.16	9.6 0.8	19.2 1.6
6 15	0.2	100 30	2×10^{28} 1.3×10^{27}	0.32 0.02	1.6 0.1	3.2 0.2
7 16	0.3	100 30	7.5×10^{28} 5×10^{27}	1.2 0.028	6 0.4	12 0.8
8 17	0.3	100 30	1.8×10^{28} 8×10^{27}	0.29 0.128	1.45 0.64	2.9 1.28



M型星周りでは、非熱的流出により
 ~0.1 AU以内では惑星の大気は安定に存在できない

Mission target:

「火星の二酸化炭素と水の行方を探る」

大気散逸機構の太陽変動への応答の解明

非磁化惑星のハビタブルゾーン(生命居住可能領域)の理解へ

- 科学目標1:
二酸化炭素と水の散逸の分離
- 科学目標2:
太陽変動への応答の理解
(過去への演繹)
- 科学目標3:
謎を解く鍵となる大気散逸過程の理解

