

# 惑星の大気の流出と 進化を探る

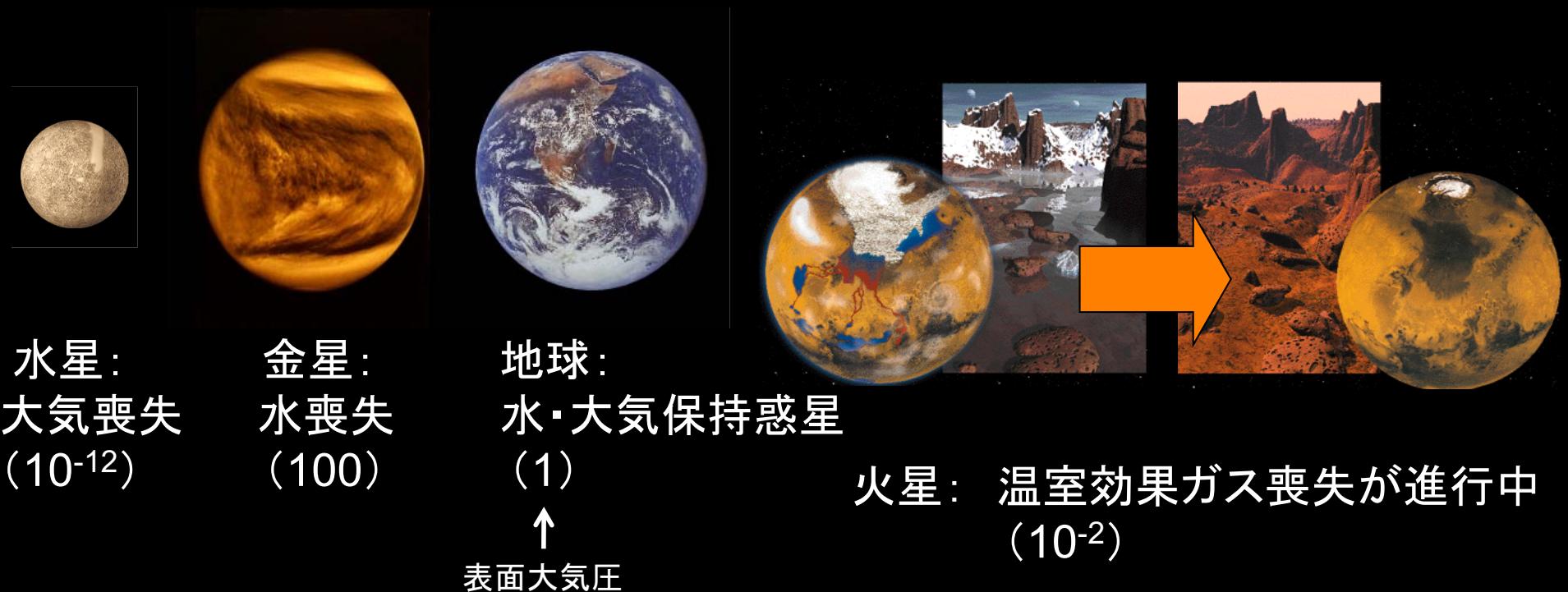
東北大学大学院理学研究科  
寺田直樹

2017年10月20日 京都大学宇宙学セミナー

# Outline

- 地球型惑星の大気の流出と進化
  - 太陽放射・太陽風とその変動・進化
  - 惑星大気の供給と消失
  - 太陽からの距離、惑星サイズ(質量)依存
  - 磁場は大気を守る？ - 恐らくNo
  - 高エネルギー粒子による温室効果ガス・有機分子生成
- 火星、金星、タイタン(初期地球のプロキシ)、初期地球、系外へ

# 太陽放射と太陽風の影響により、惑星 大気が大量に宇宙空間に流出

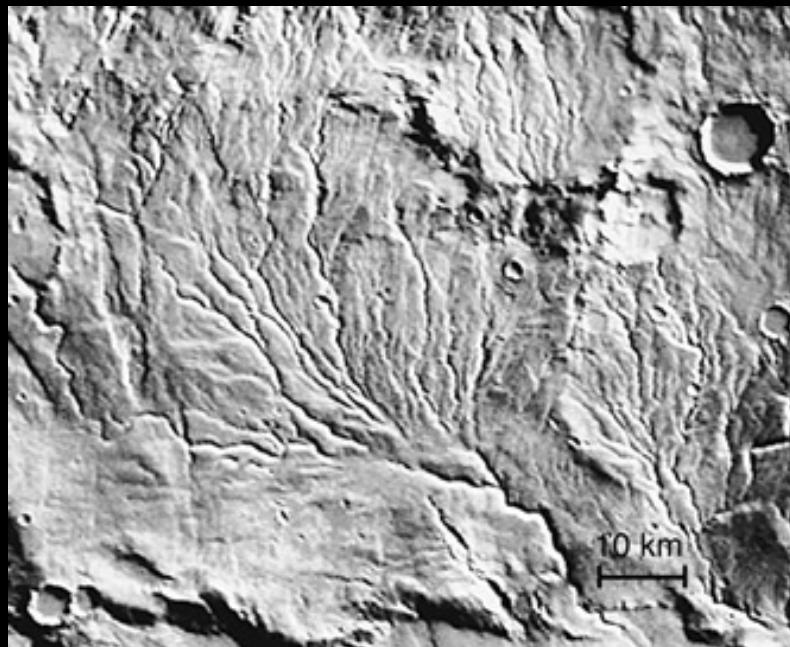


- 大気進化の理解は、惑星環境の進化と多様性の理解に不可欠

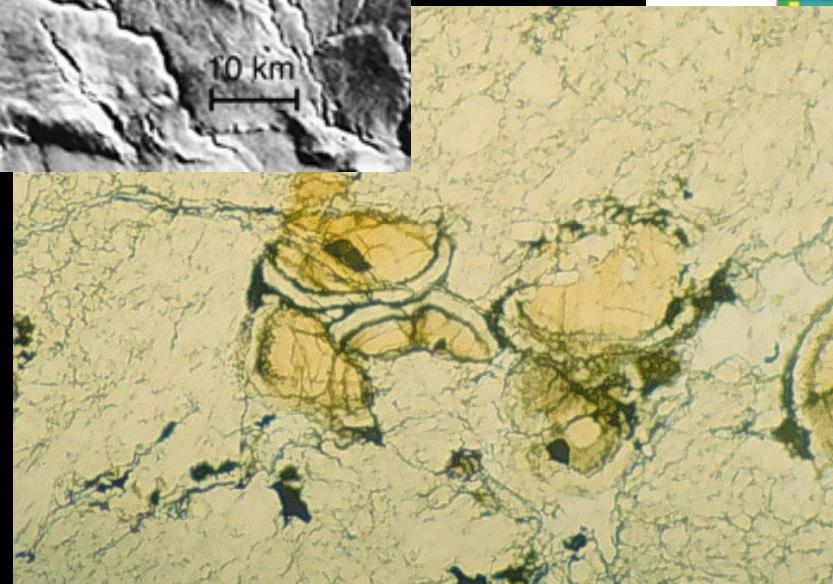
# 太古の火星における表層水の証拠

温室効果ガス( $\text{CO}_2$ 等)と水はどこに行った？

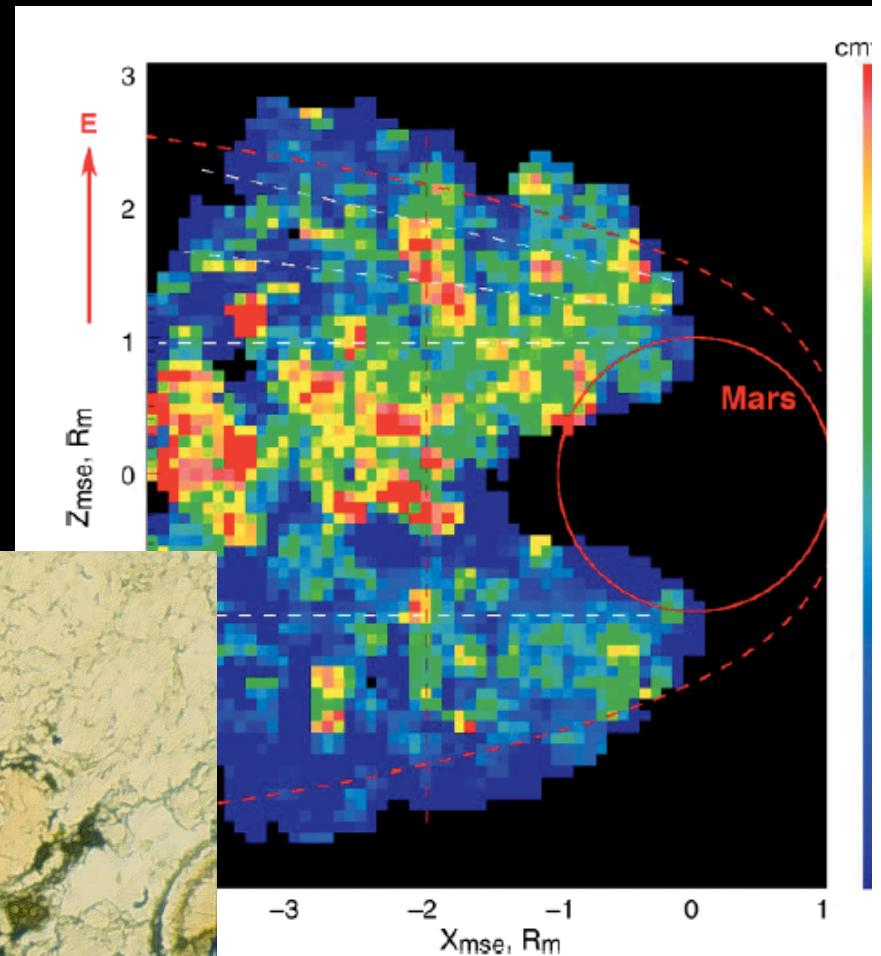
多数の流水地形と水和鉱物の証拠



揮発性物質は  
宇宙もしくは  
地殻へ



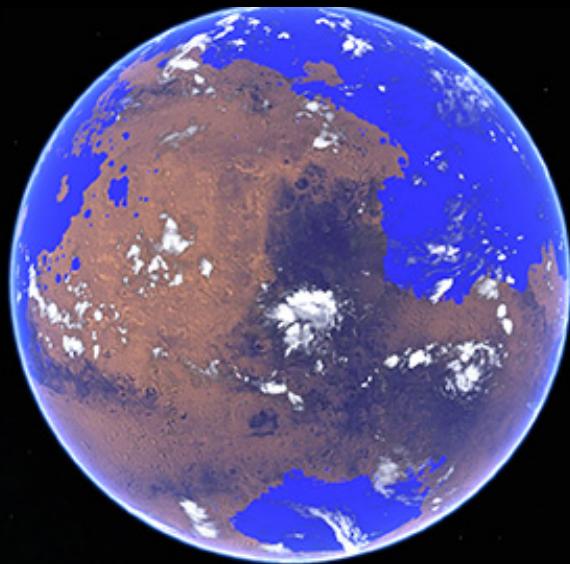
火星隕石における炭酸塩鉱物



Mars Express (ESA)による  
宇宙へ流出するイオンの観測

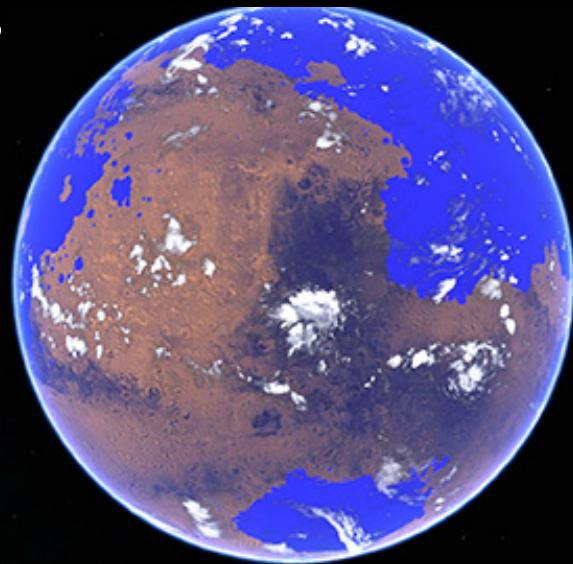
# 太古の火星: 30-40億年前

温暖湿润？



# 太古の火星: 30-40億年前

温暖湿潤？



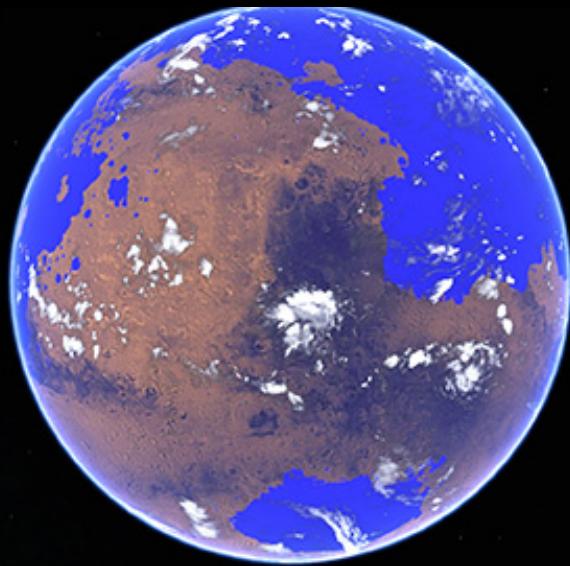
火星古気候モデルからの  
想像図 [Wordsworth et al.,  
2015など]



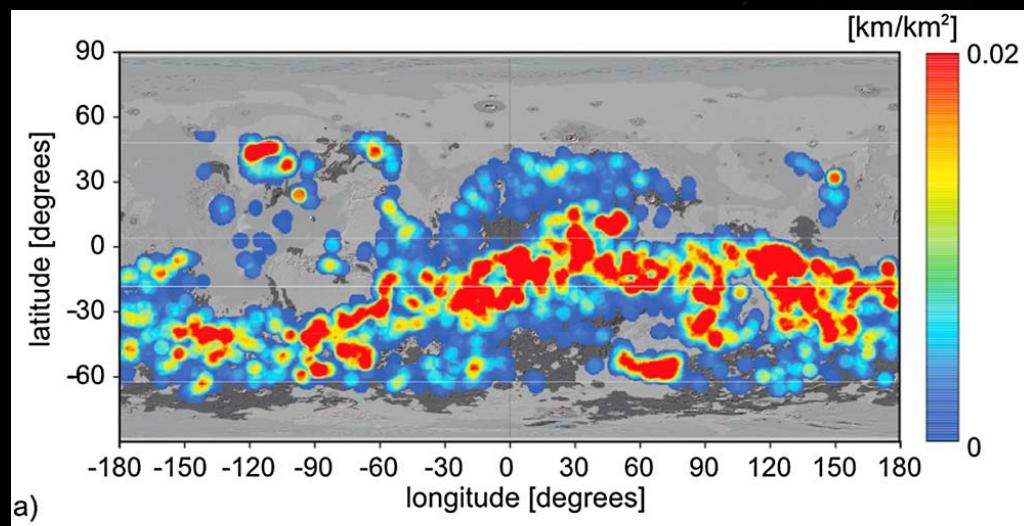
寒冷乾燥？  
(隕石衝突や火山噴火など  
によって氷が時々融解?)

# 太古の火星: 30-40億年前

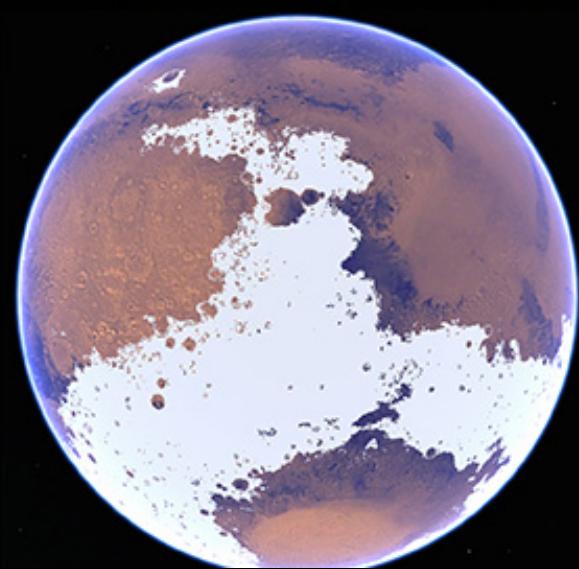
温暖湿润？



火星古気候モデルからの  
想像図 [Wordsworth et al.,  
2015など]



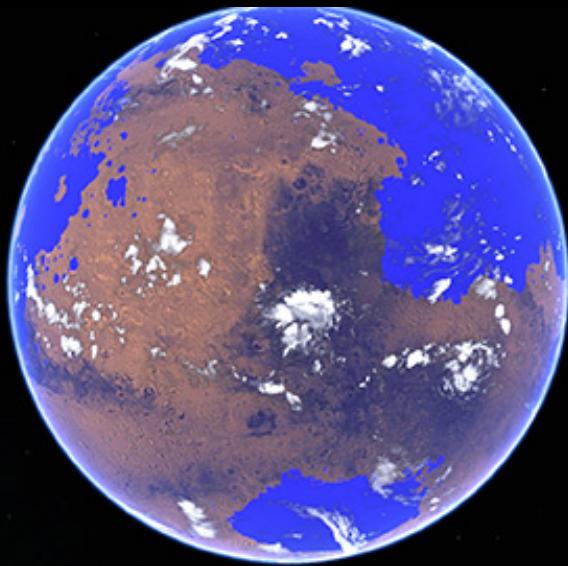
流水地形の分布 [Hynek et al., 2010]



寒冷乾燥？  
(隕石衝突や火山噴火など  
によって氷が時々融解?)

# 太古の火星: 30-40億年前

温暖湿潤？

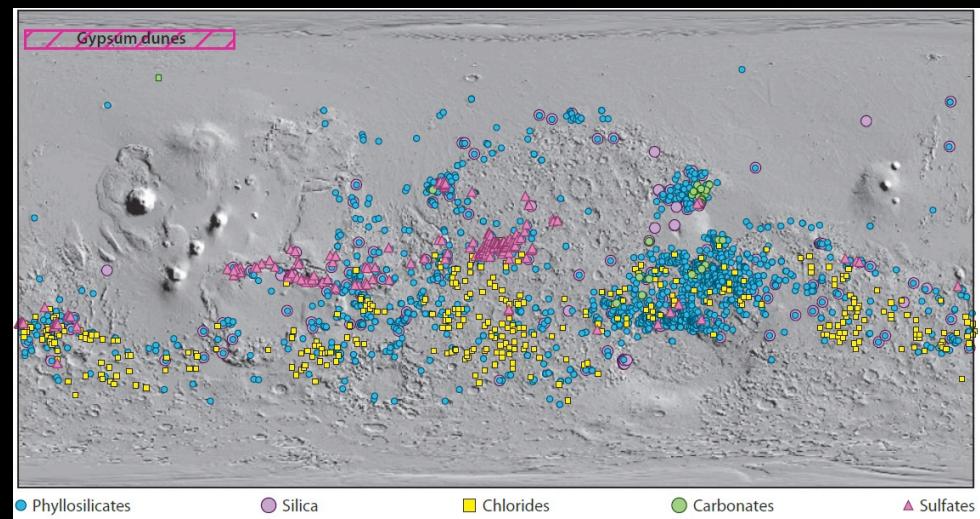


火星古気候モデルからの  
想像図 [Wordsworth et al.,  
2015など]



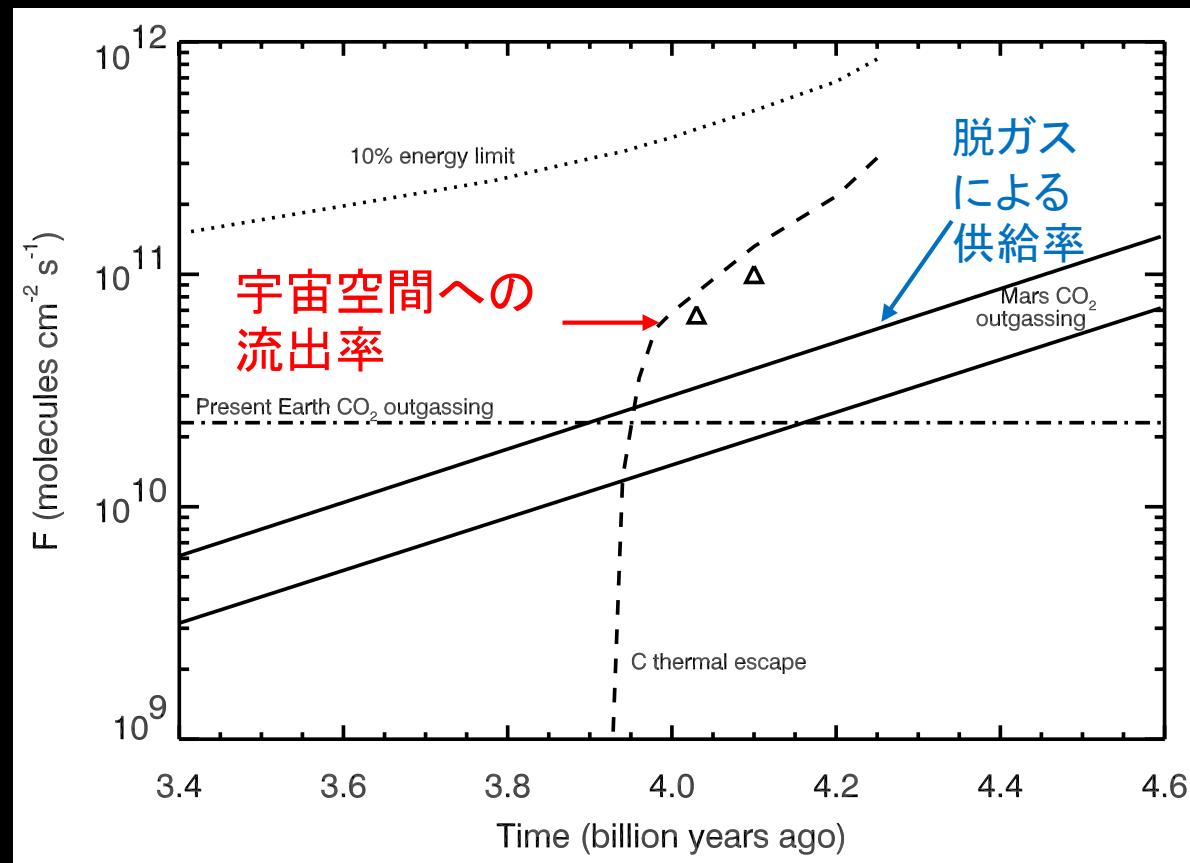
寒冷乾燥？

(隕石衝突や火山噴火など  
によって氷が時々融解?)



水和鉱物の分布 [Ehlmann and Edwards, 2014]

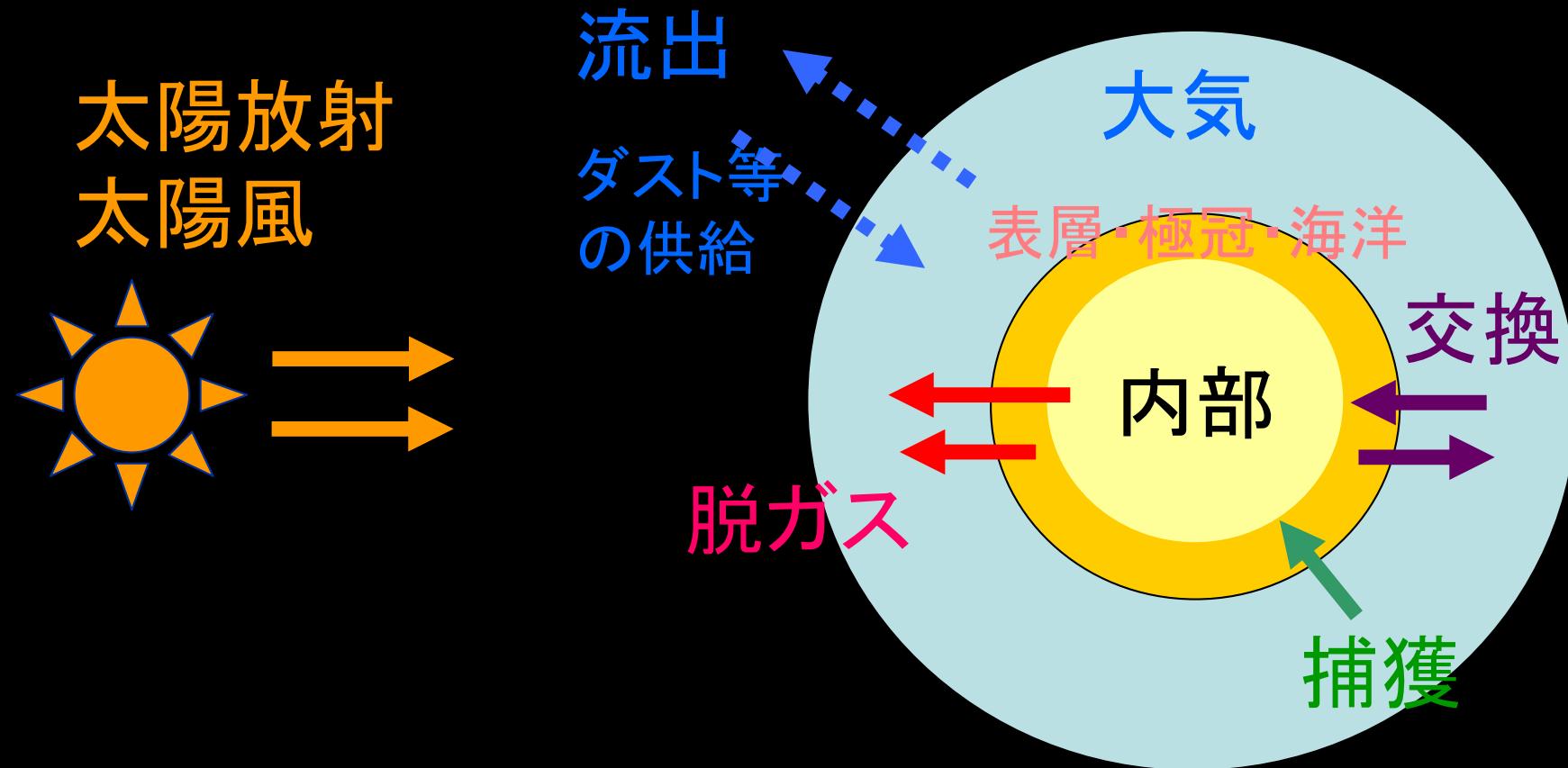
# 太古の火星: 40億年前以前



火星大気の熱的流出過程による  
流出率の見積り [Tian et al., 2009]

- 宇宙空間への大気の激しい流出
- 火星は初期の数億年間は大気を保持できず、その後に大気を形成？

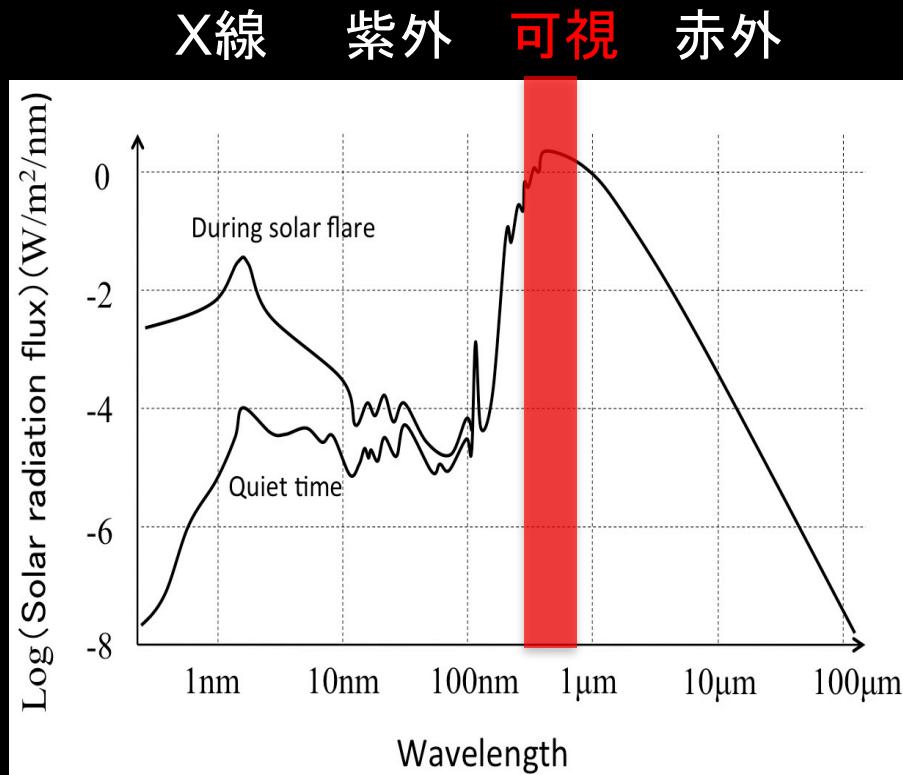
# 太陽-惑星システムにおける大気進化



大気進化の理解には、太陽-惑星システムの総合的な理解が不可欠

- 太陽放射・太陽風とその変動・進化
- 惑星超高層(大気の流出)
- 惑星気象 (大気の輸送・表層等との交換)
- 惑星固体 (大気の供給)

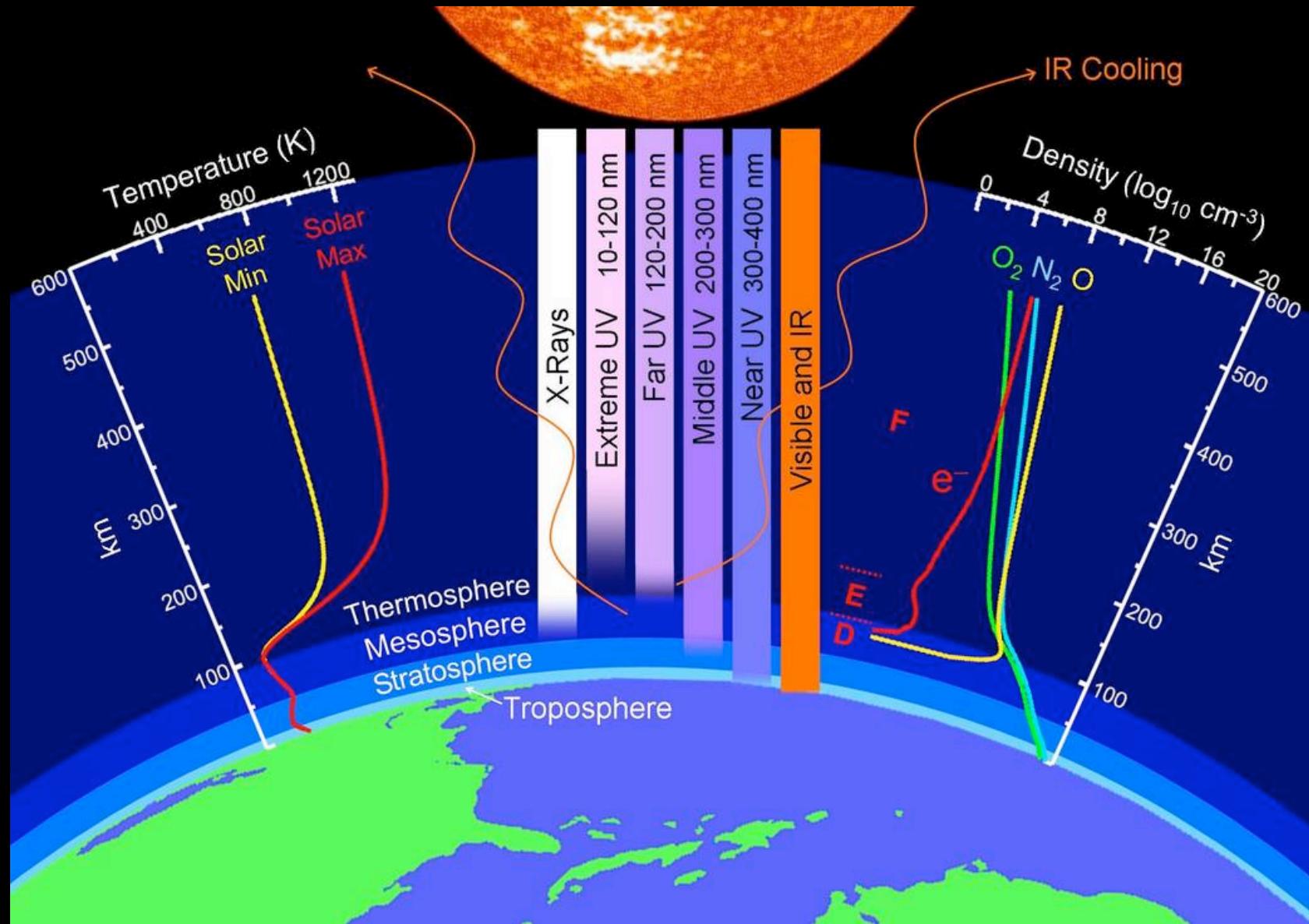
# 太陽：静的から動的描像へ



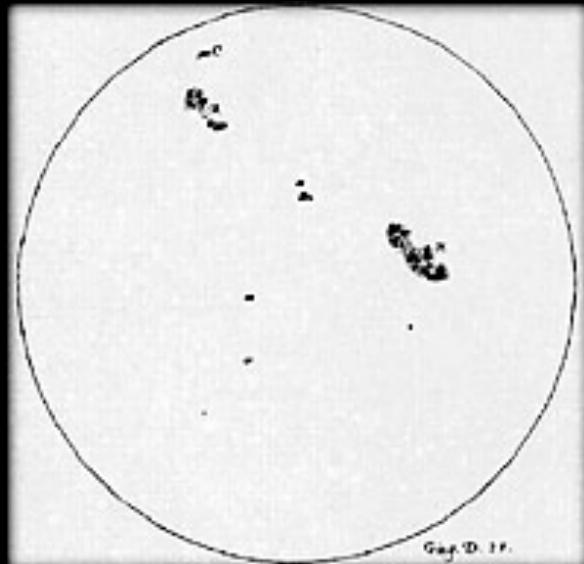
約98%のエネルギーが可視光と長波長域(近赤外)で放射

- 太陽は長年、静的な天体と考えられてきた。
- 実際に、太陽から放射されるエネルギーの大部分は変化しない(可視光及び長波長域の放射)。
- しかし短波長域の放射はフレア等で激しく変動。

# 太陽放射と地球の超高層大気



# 過去の太陽観測



太陽黒点のスケッチ



日食時の太陽コロナの観測

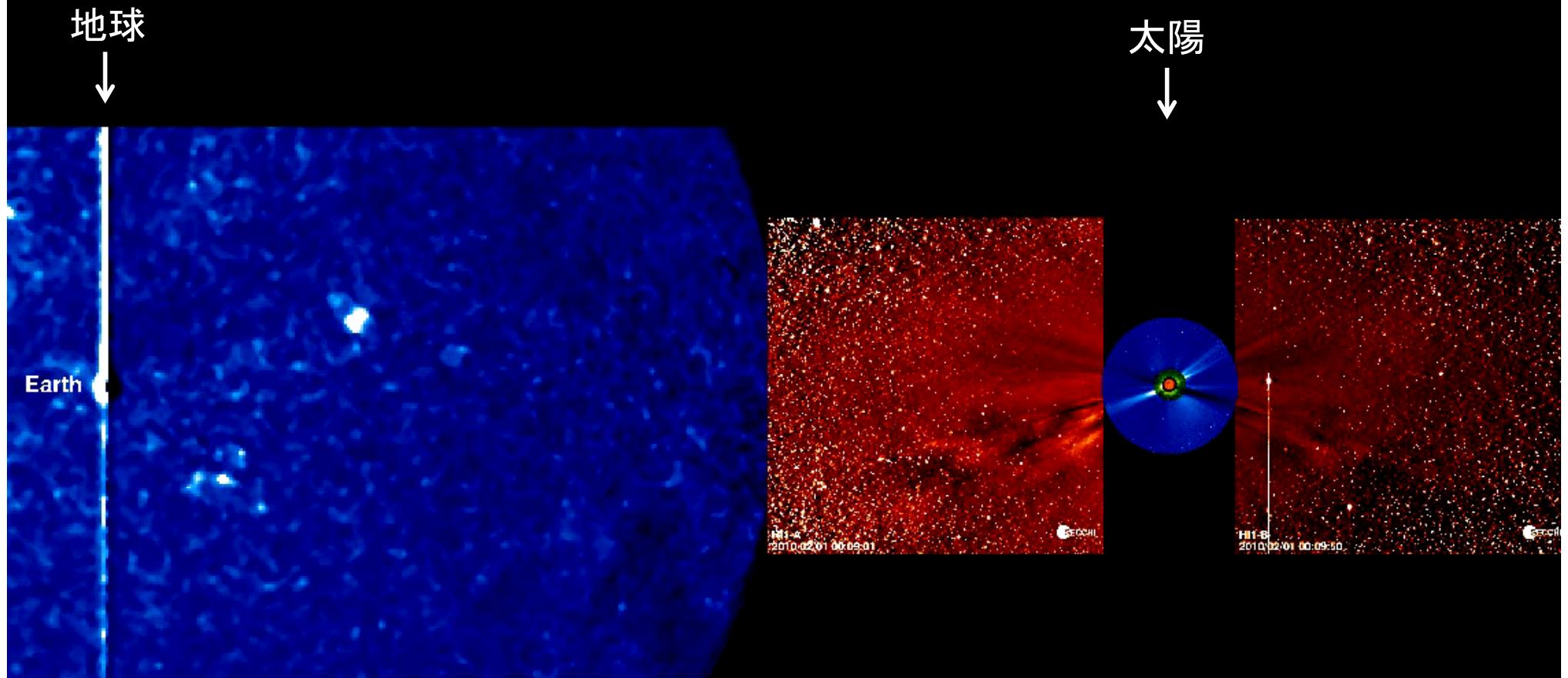
- 19世紀までは、可視光による観測が唯一の情報源。
- 太古には、太陽は信仰と暦とのために観測。
- 黒点数観測(ガリレオ、1610年頃から)
- 日食時に変動するコロナ、プロミネンスを観測。

# 太陽の多波長観測



- 20世紀に入り、X線・紫外・電波を用いた太陽観測が可能に。
- 人工衛星による宇宙空間からの観測の開始。
- 太陽-惑星システムの動的な性質が明らかになりつつある。

# 太陽風の動的変動の観測

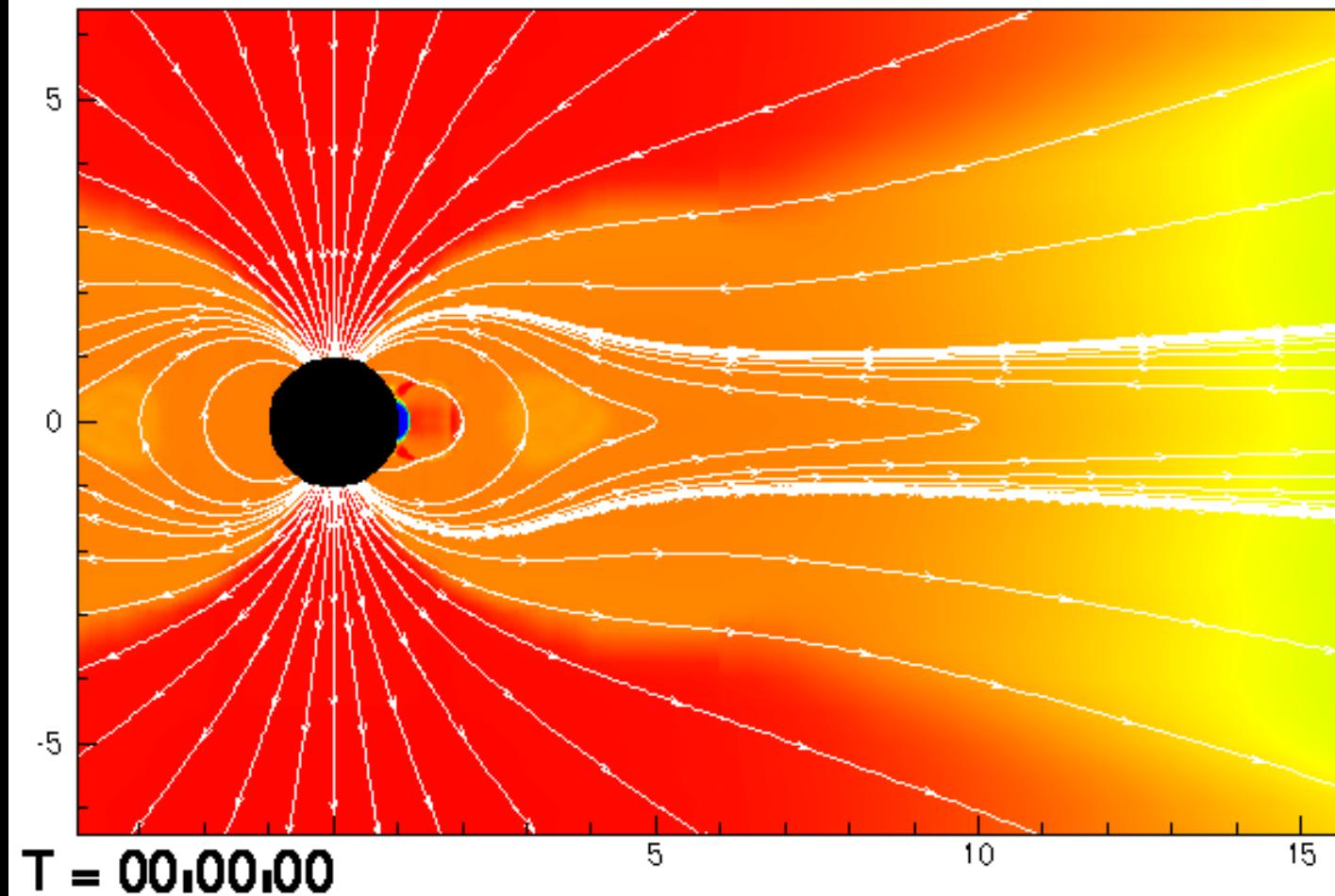


人工衛星による観測 ©STEREO, NASA  
コロナ質量放出(CME)

# 太陽風の動的変動の数値計算

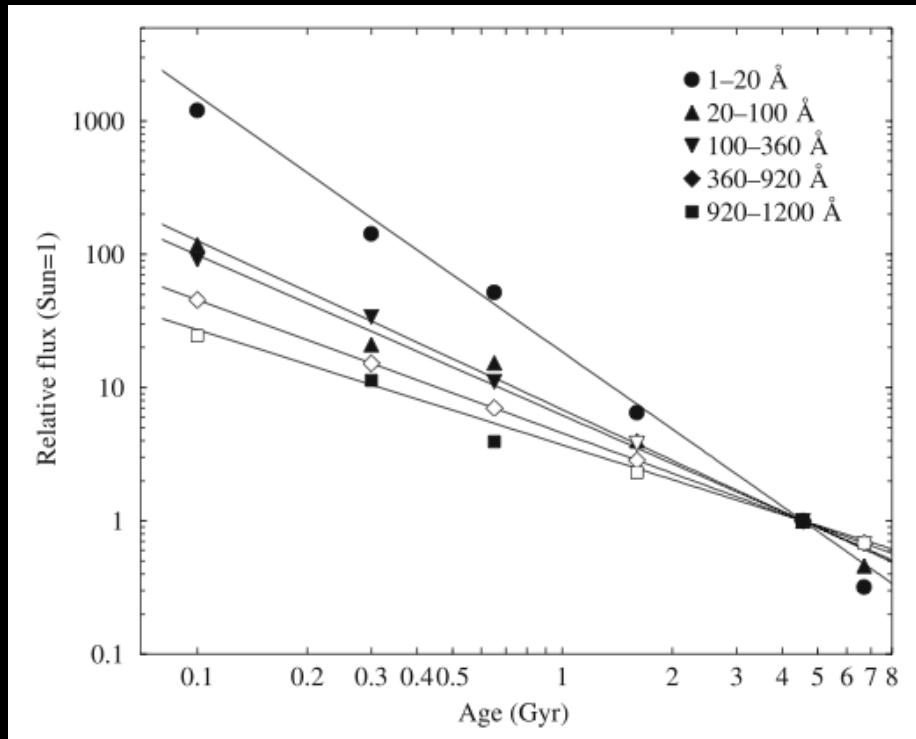
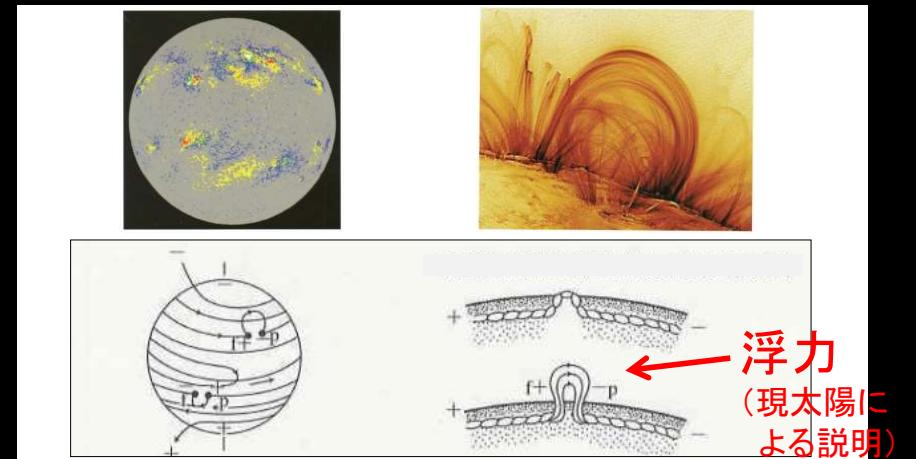


Center for Space Environment Modeling  
University of Michigan



白線は磁力線を表す

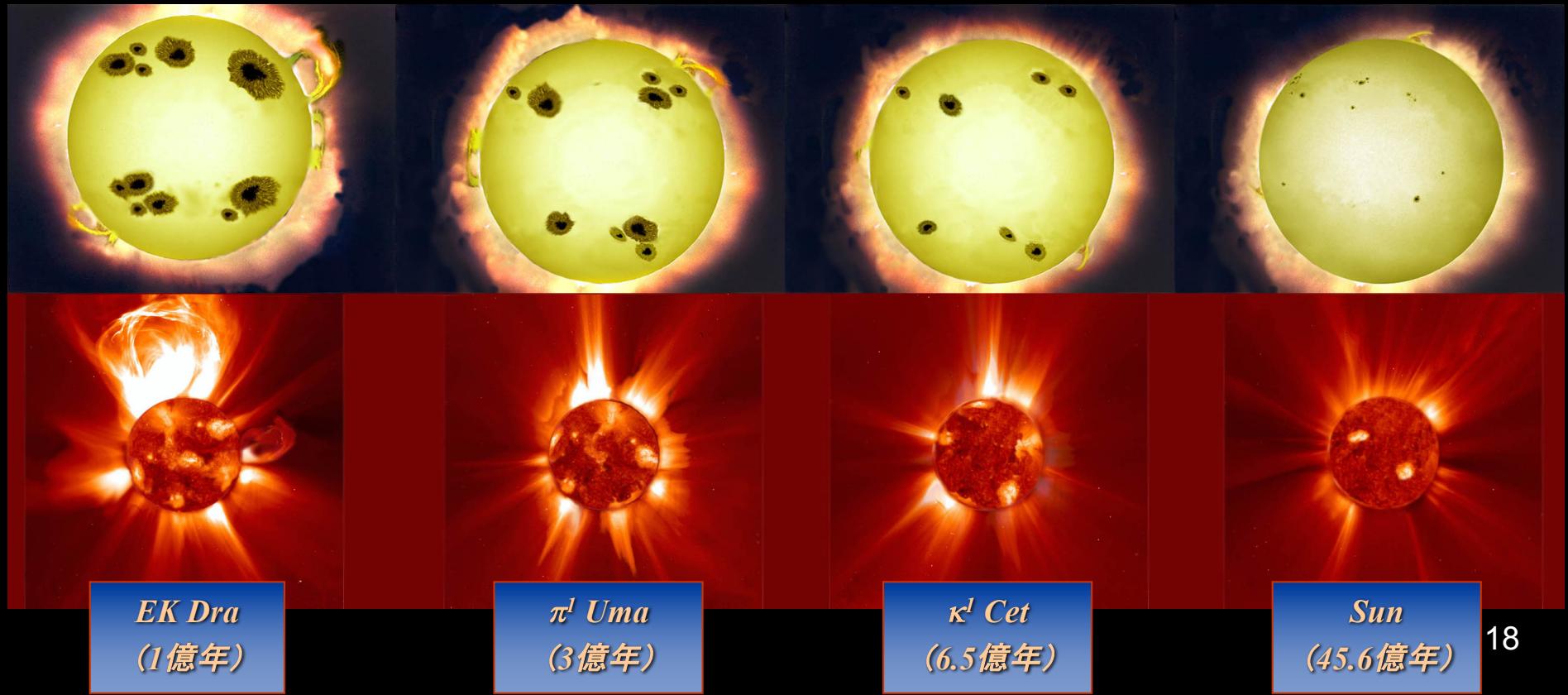
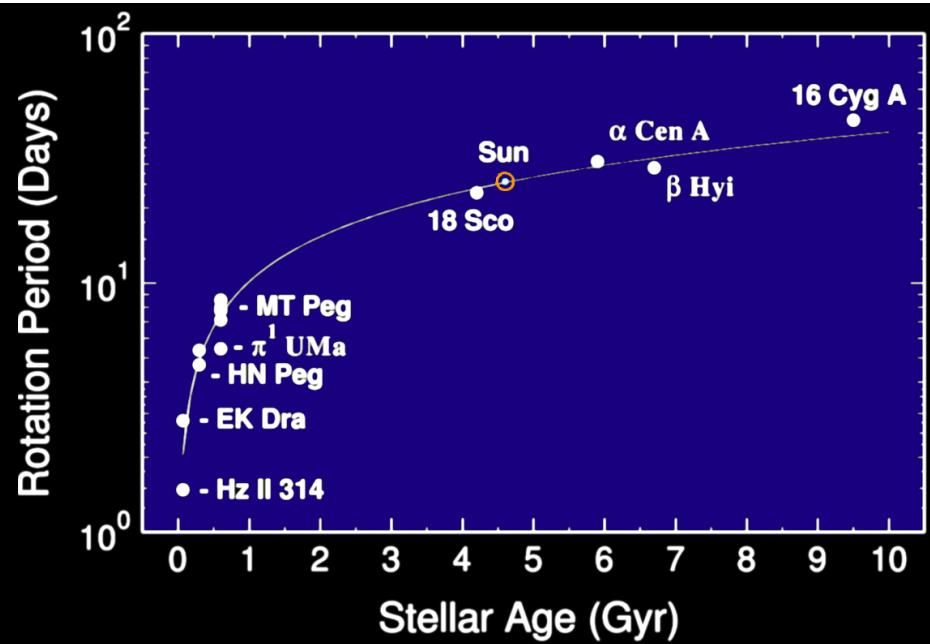
# 昔の太陽



様々な年代の主系列星における  
X線～紫外放射 [Ribas et al., 2005]

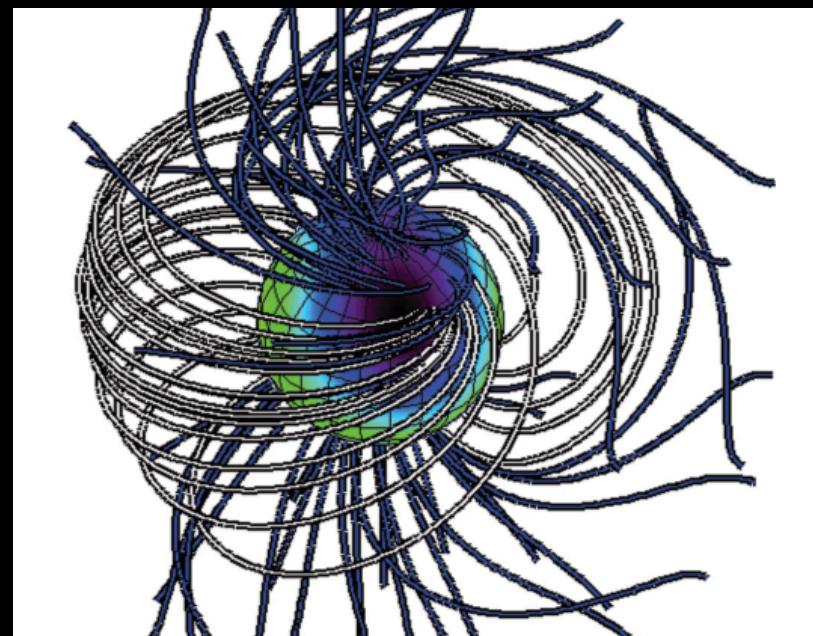
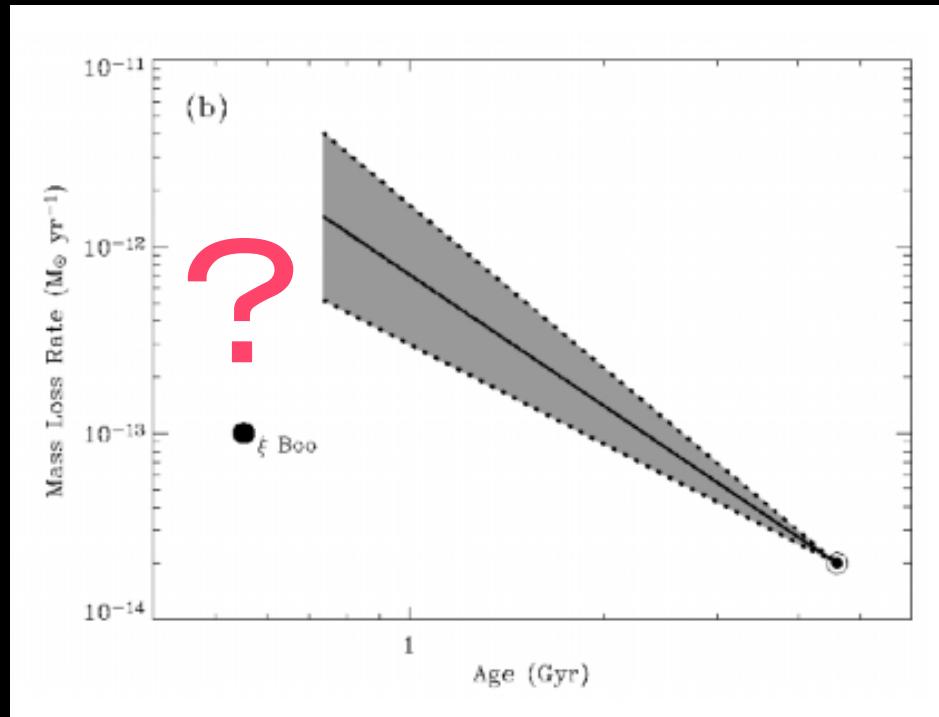
- 可視光は弱かった
  - 昔の太陽総輻射量～0.7-0.8倍
  - Faint young Sun問題
- X線、太陽風はかなり強かった
  - 自転速い⇒内部の差動回転大  
⇒磁場生成大⇒表面活動大⇒  
激しいコロナ、フレア、太陽風
- 異なる年齢の主系列星の観測  
⇒昔の太陽X線放射～1000倍  
昔の太陽EUV放射～100倍  
昔の太陽風～100倍で頭打ち

昔の太陽は約10倍  
速く回転していた。  
激しい紫外放射、  
激しい太陽風



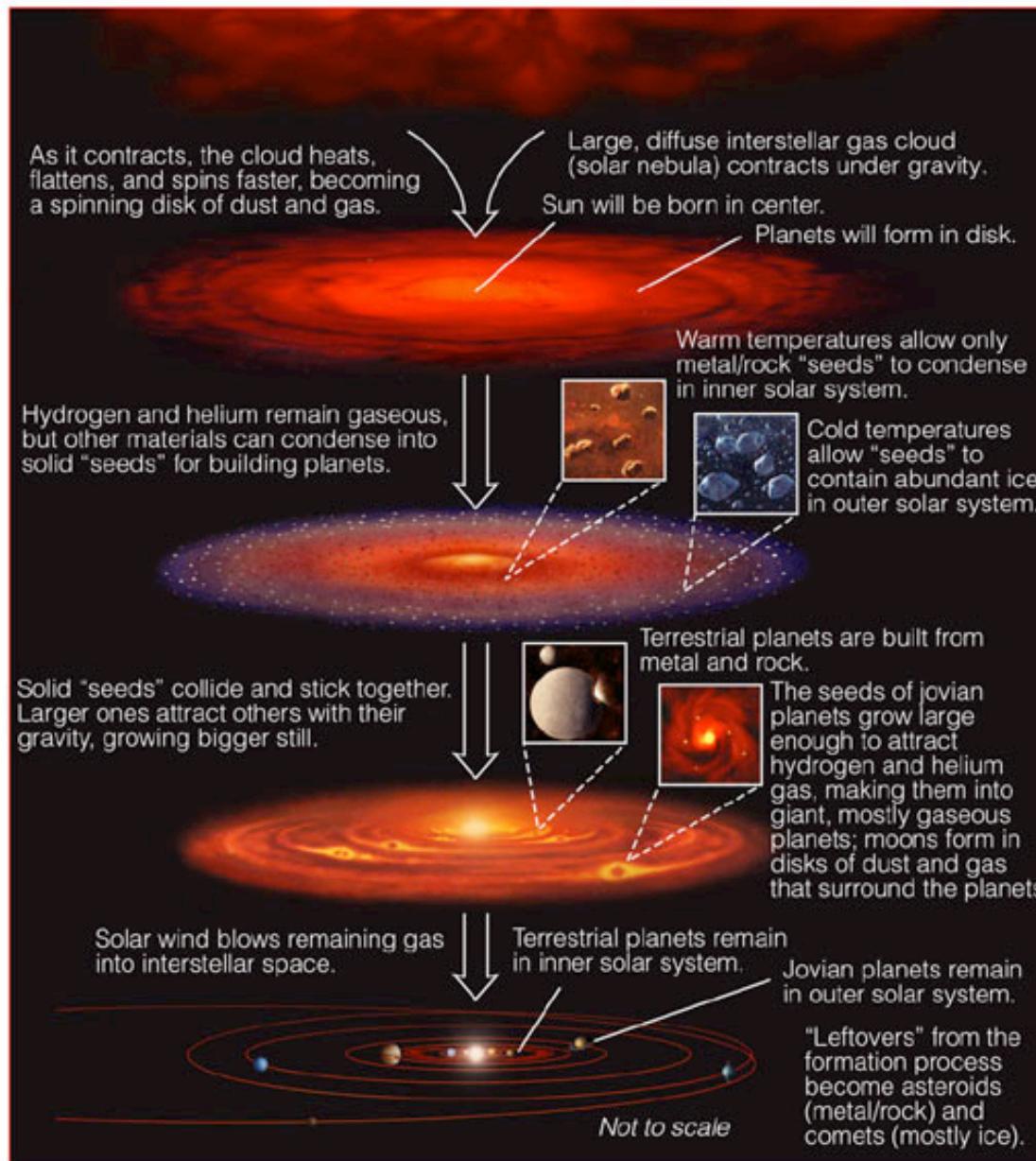
# 初期7億年間の太陽風？

初期は不確定性が大きい。FYS問題も含めて、現理解は疑わしい。



- HSTによるLy $\alpha$ 観測。
- 初期7億年間は太陽風が抑制されていた？ [Wood+, 2005]
- Zeeman-Doppler surface magnetogramsによる観測。
- 初期は磁場が巻き付いていた？ [Petit+, 2008; Jardine+, 2013]

# 太陽系の形成



# 惑星への揮発性物質(特に水)の供給

- 水の起源物質
  - 参考: 現在の地球海洋質量/地球質量  $\sim 0.023 \text{ wt\%}$

## 1. 円盤ガス捕獲

- 基本的にはH<sub>2</sub>大気 (H<sub>2</sub>O含有量は1~2 wt%)
- H<sub>2</sub>はさらに固体惑星(マントル中)の酸化物との反応で H<sub>2</sub>Oを生成

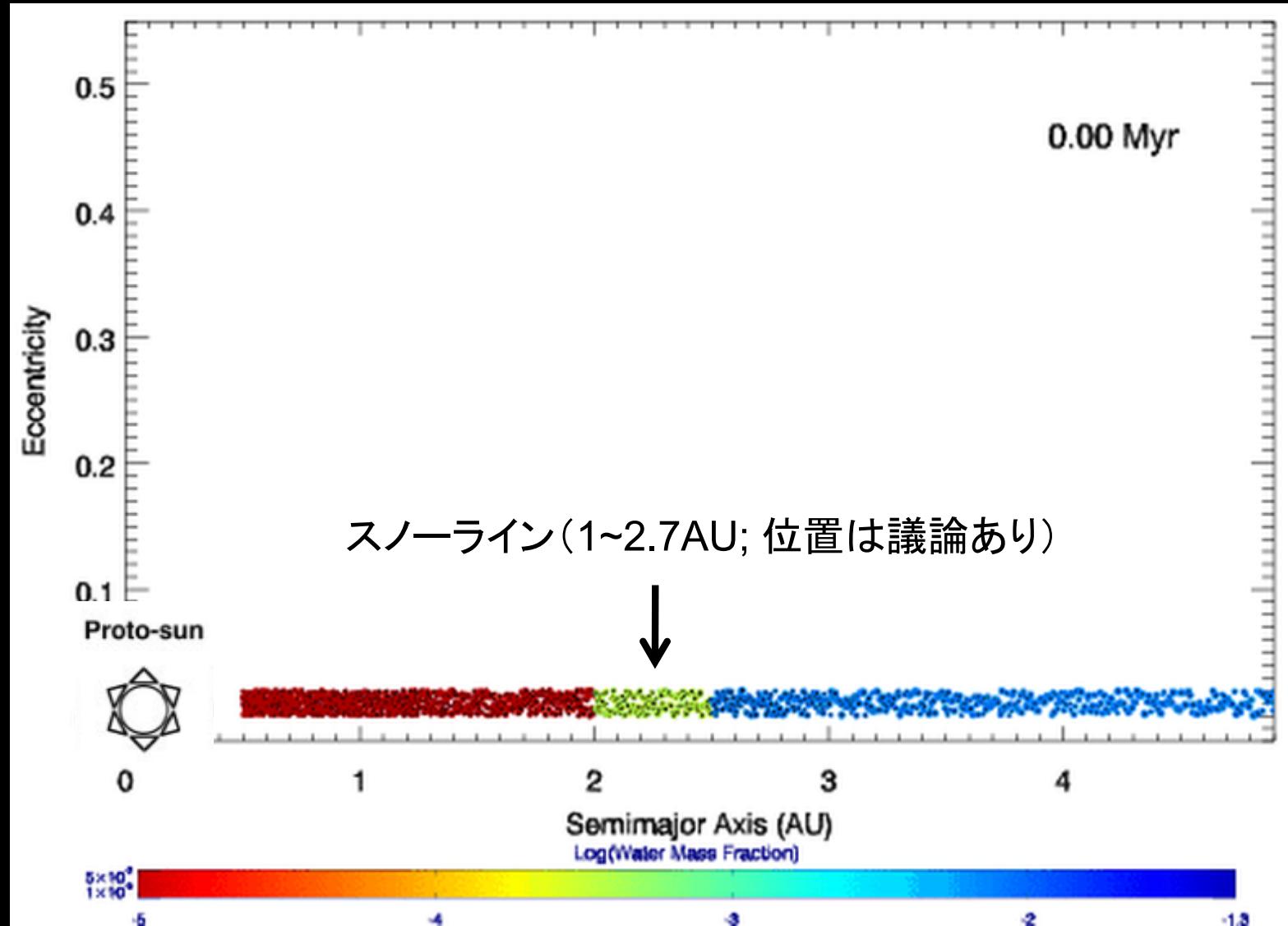


## 2. 微惑星の衝突脱ガス

- 原始惑星が月程度以上のサイズになると脱ガス開始
- ジャイアントインパクトで失われる大気は1/3程度

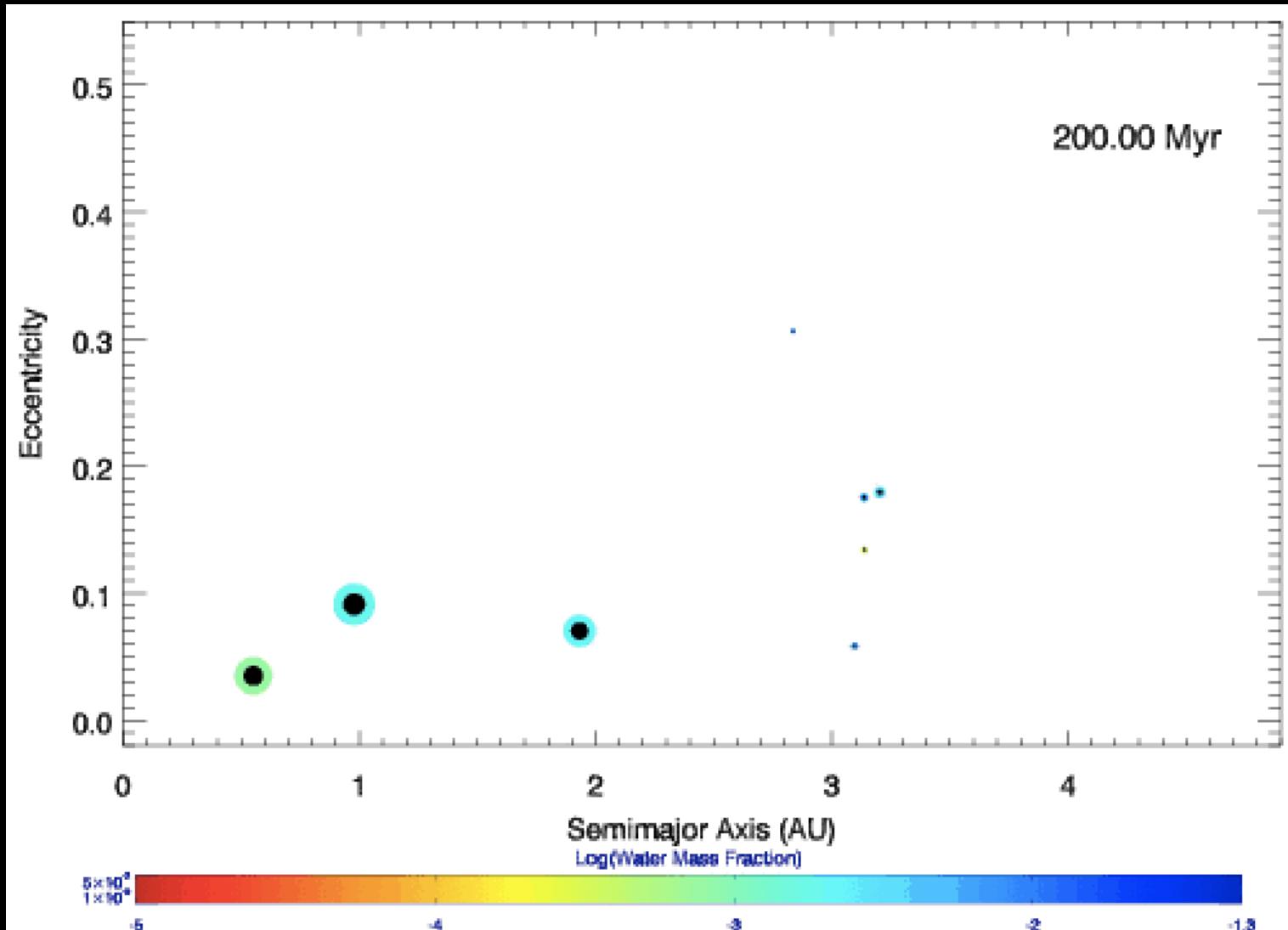
# 惑星への揮発性物質(特に水)の供給

3. 固体地球材料物質からの脱ガス(マグマオーシャン後、いわゆる late veneer)
  - CI炭素質隕石(地球材料の約15%?) ~6 wt%の水を含む
  - 彗星 ~80 wt%の水を含む
- 何れにせよ、水だらけの惑星が出来上がってしまう
- 最近は初期還元大気説が有力



微惑星→惑星形成の数値シミュレーション [Raymond et al., 2006]

- |              |                  |
|--------------|------------------|
| 初期条件: 2AU以内で | 水を含まない材料物質       |
| 2~2.5AUで     | 0.1 wt%の水を含む材料物質 |
| 2.5AU以遠で     | 5 wt%の水を含む材料物質   |



- 惑星に供給される水の量 [Raymond et al., 2006, 2007]
  - 数～数10 TO (Terrestrial Ocean)
  - 金星は地球の～1/3程度(確率論的な計算の平均を取ると)  
地球より多いこともある(確率論的な計算の約10%で)

# 地殻・マントルへの捕獲

- 供給された「数～数10 TOの水」のうち、どの程度が地殻・マントルに捕獲されたのか？
  - 初期約1億年間
    - マグマオーシャン形成中は、マントルに36 TO以下が溶け込み可能（溶融岩石中に水や酸素が溶け込む）[Gillmann et al., 2009]
    - しかし、水蒸気（強力な温室効果ガス）が少なくなると、大気の保温効果が失われるのでマグマオーシャンは固化する  
⇒ 大まかに言って、～数 TOの水蒸気が残ってしまう [e.g., Hamano et al., 2013]
  - 初期約1億年以降
    - 地殻に取り込めるのは 0.1 TO以下  
 $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$
    - (Late veneerの供給の寄与も大きいかもしれない(0.1~100 TO)。月のケレータ頻度やマントル中の元素存在度から推測 [Ikoma and Genda, 2007])

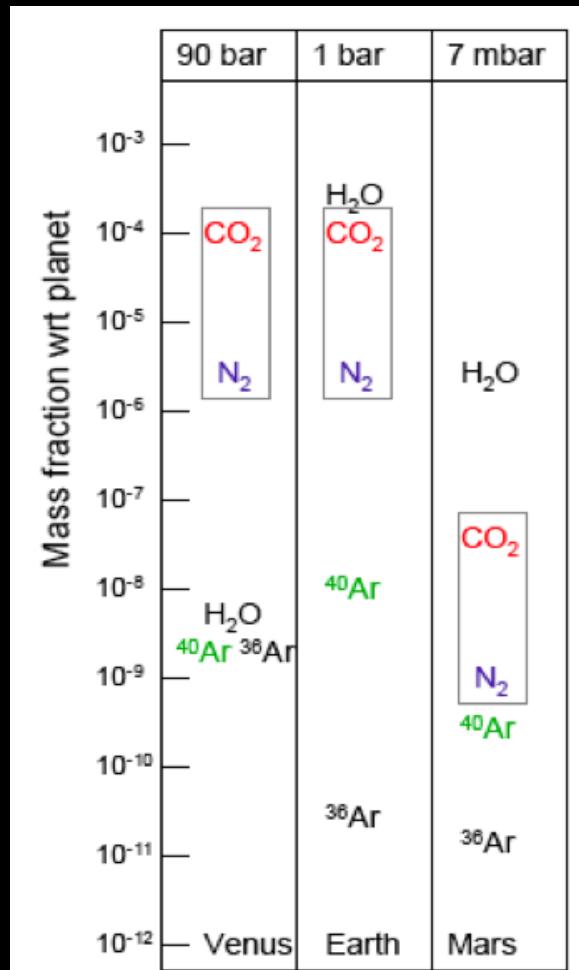
# 残された水の行方は？

- 地球は、~1 TOの海洋を保持
- 金星には、水はほとんど残っていない
  - 宇宙空間に失われた？
  - それとも地殻に？
- 火星では、水は大部分が氷として地下に
  - 温室効果ガスはどこに失われた？

# 地球型惑星の大気進化の標準的なシナリオ



# 大気組成と保有量の比較



金星 地球 火星  
の組成重量比

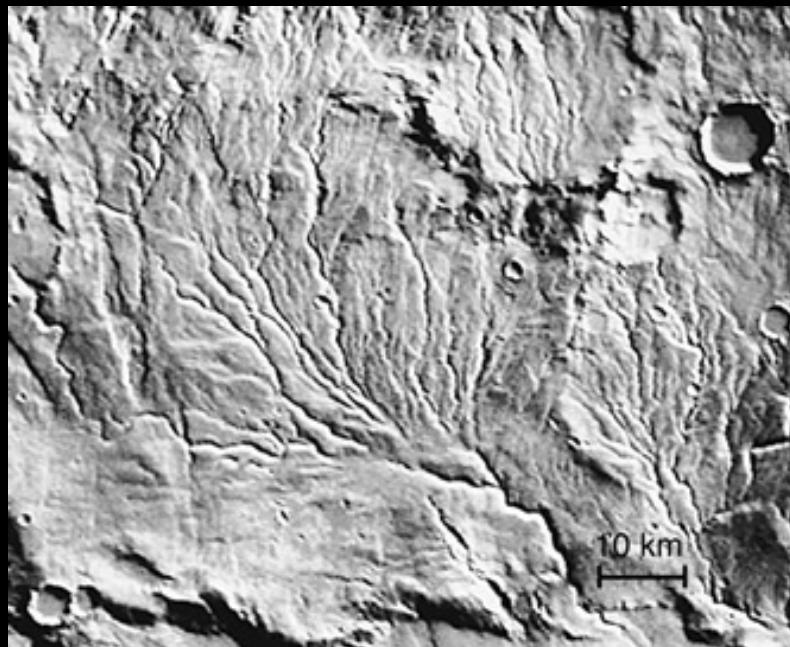
[Chassefiere et al., 2006]

- 火星は特に大気の保有量が少ない
- N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>の各惑星質量に対する重量比(左図)は宇宙空間への流出を示唆
- 数気圧のCO<sub>2</sub>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(< 0.012気圧相当)等で一部発見
    - 地下に埋蔵？
    - 宇宙空間に流出？

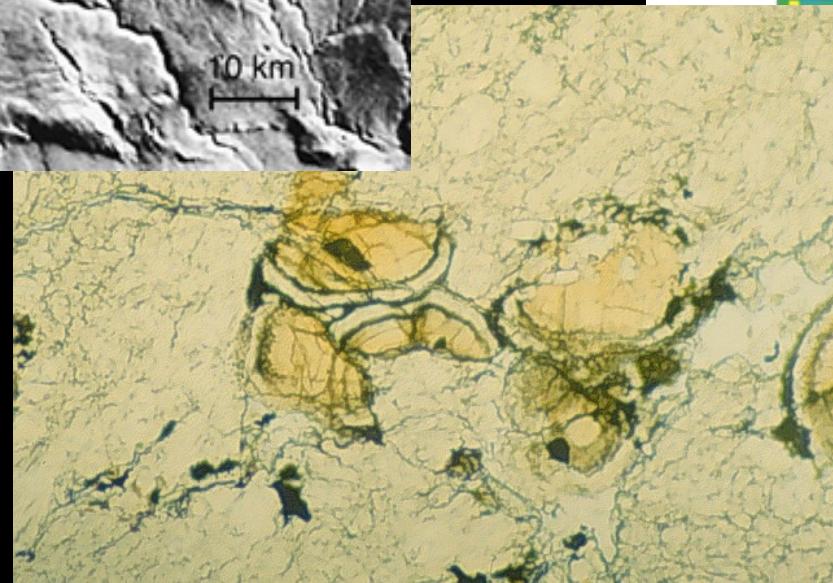
# 太古の火星における表層水の証拠

温室効果ガス( $\text{CO}_2$ 等)と水はどこに行った？

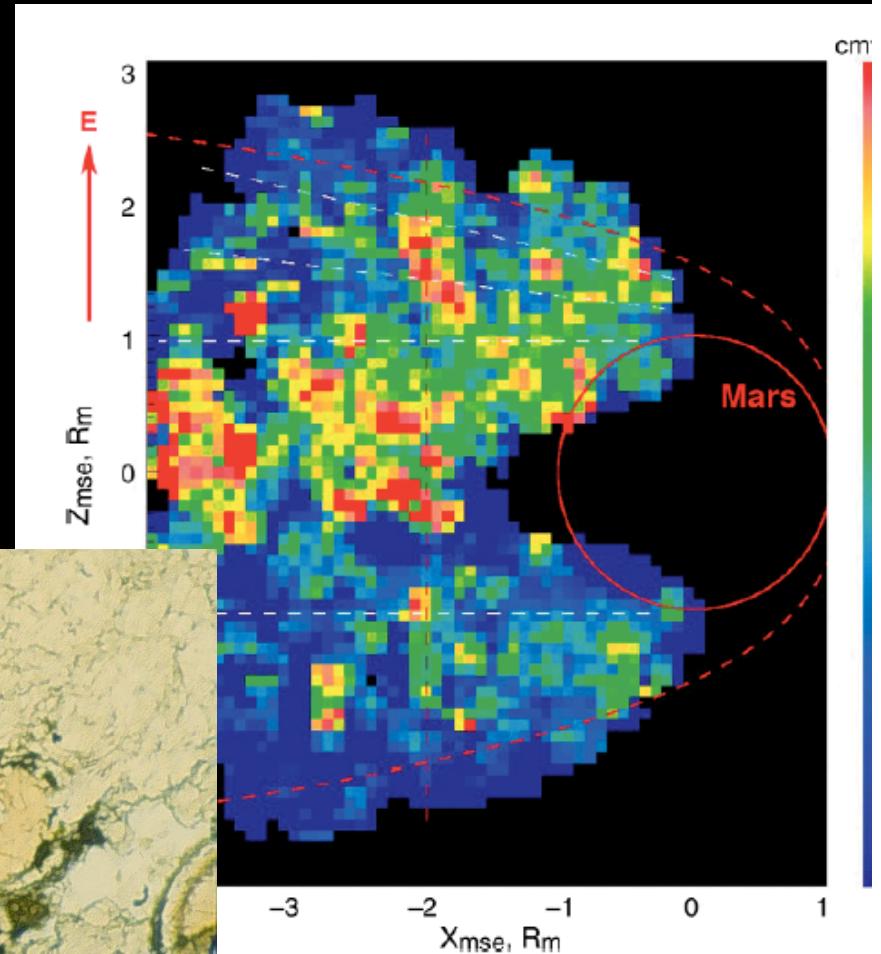
多数の流水地形と水和鉱物の証拠



揮発性物質は  
宇宙もしくは  
地殻へ

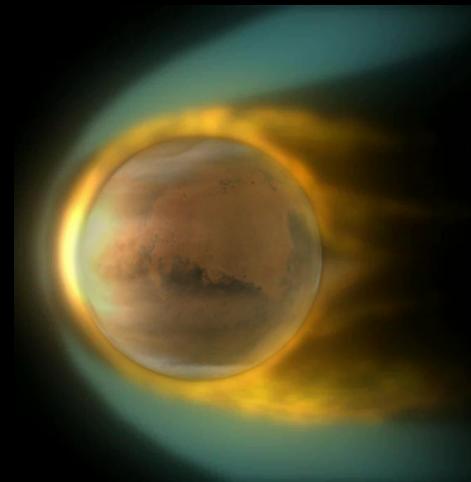


火星隕石における炭酸塩鉱物



Mars Express (ESA)による  
宇宙へ流出するイオンの観測

# 太陽の影響による惑星大気の流出



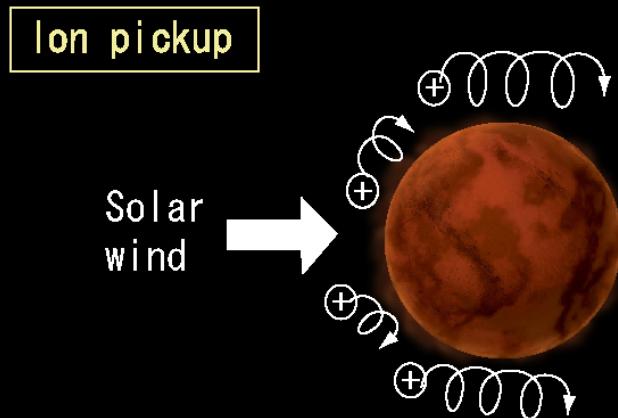
- 惑星重力圏から脱出するエネルギーを大气に付与
- 軽い元素(H, He, O, C, N等)が流出しやすい過程、重い元素(Ar, CO<sub>2</sub>等)が流出しやすい過程など様々

## 惑星の質量は特に重要なパラメータ

- 光化学過程による剩余エネルギーは数eV程度
- 惑星からの脱出エネルギーは、  
酸素原子@火星~2 eV、 @金星・地球~10eV
- 火星ではより流出しやすい

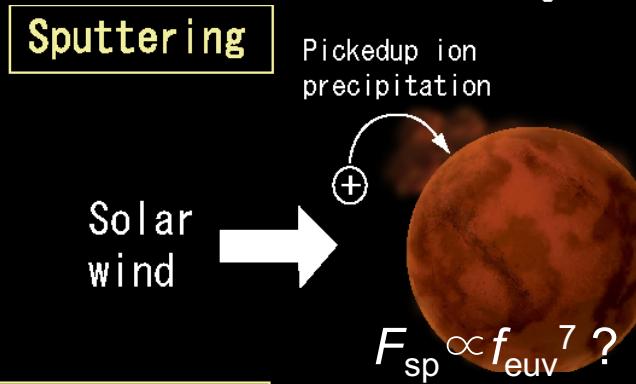
# 太陽風による大気流出(火星)

- ・ イオンピックアップ



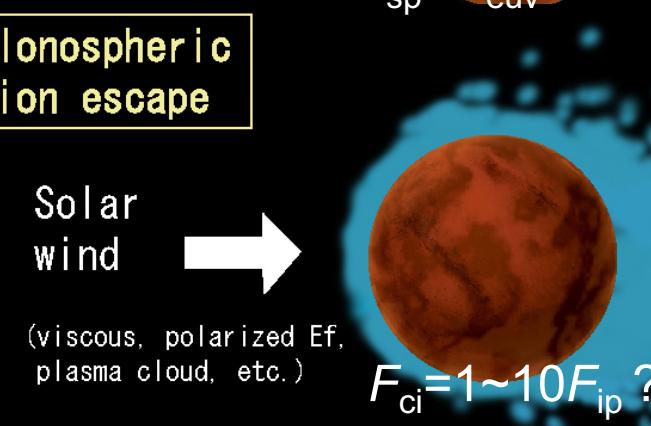
高高度に分布する元素(H, He, hot O, C, N等)が電離して流出

- ・ スパッタリング

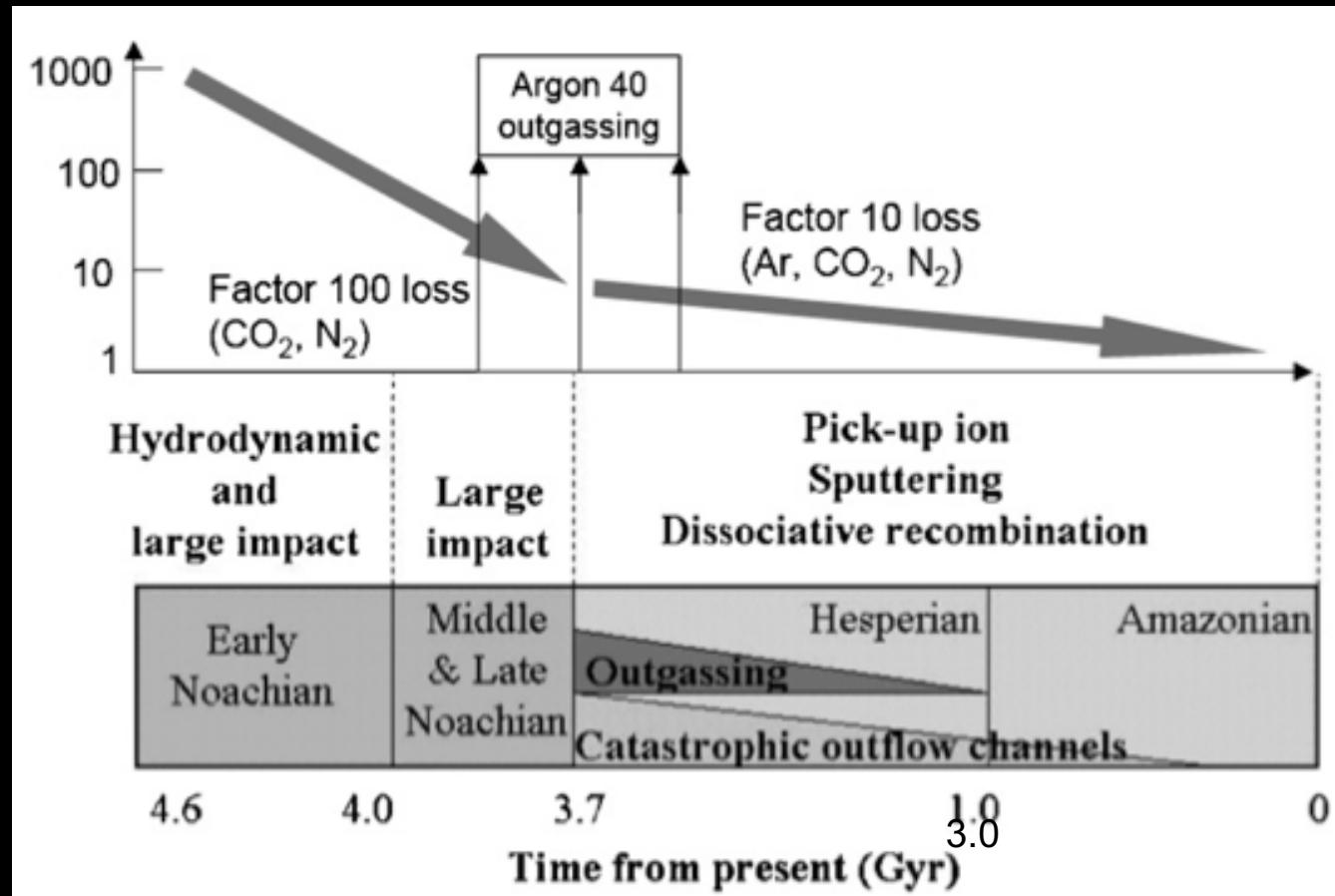


低高度に分布する元素(Ar, CO<sub>2</sub>等)が中性大気のまま、もしくは電離して流出しうる

- ・ 電離圏イオン流出  
(粘性相互作用、プラズマ波動加熱など)



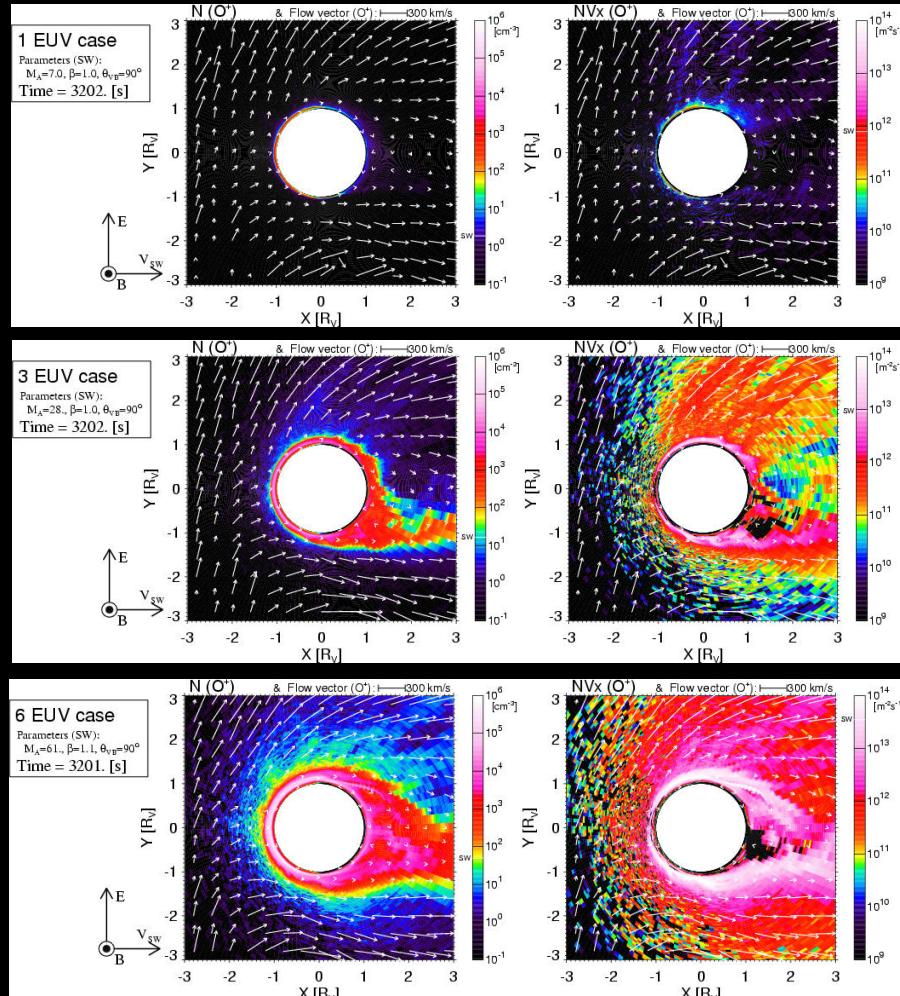
# 火星大気流出の歴史



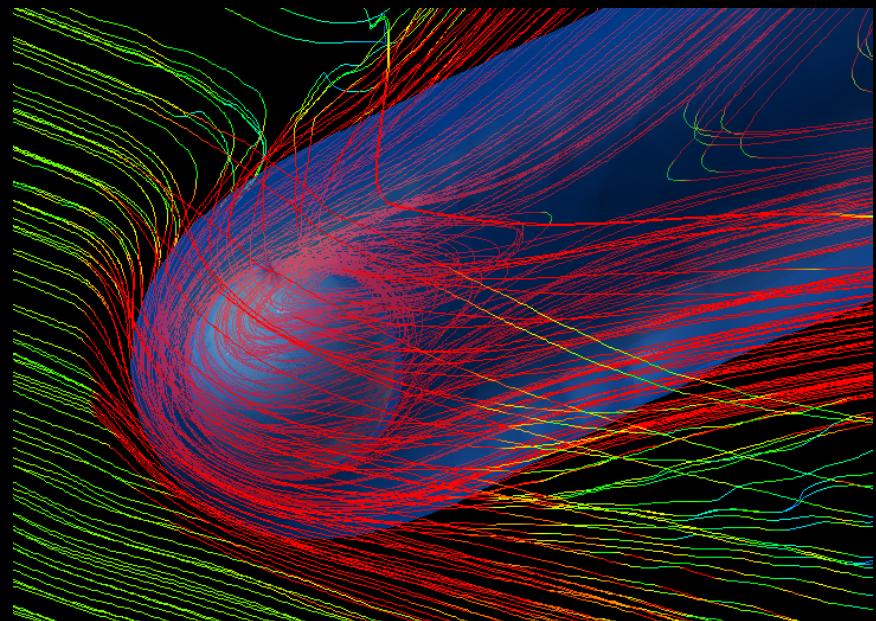
[Chassefiere et al., 2007]

- 初期約10億年間の速い流出( $\text{CO}_2, \text{N}_2$ )
- 後期約35億年間の緩やかな流出( $^{40}\text{Ar}$ )

# 火星からの酸素イオンの流出量のシミュレーションによる見積り: 0~45億年前



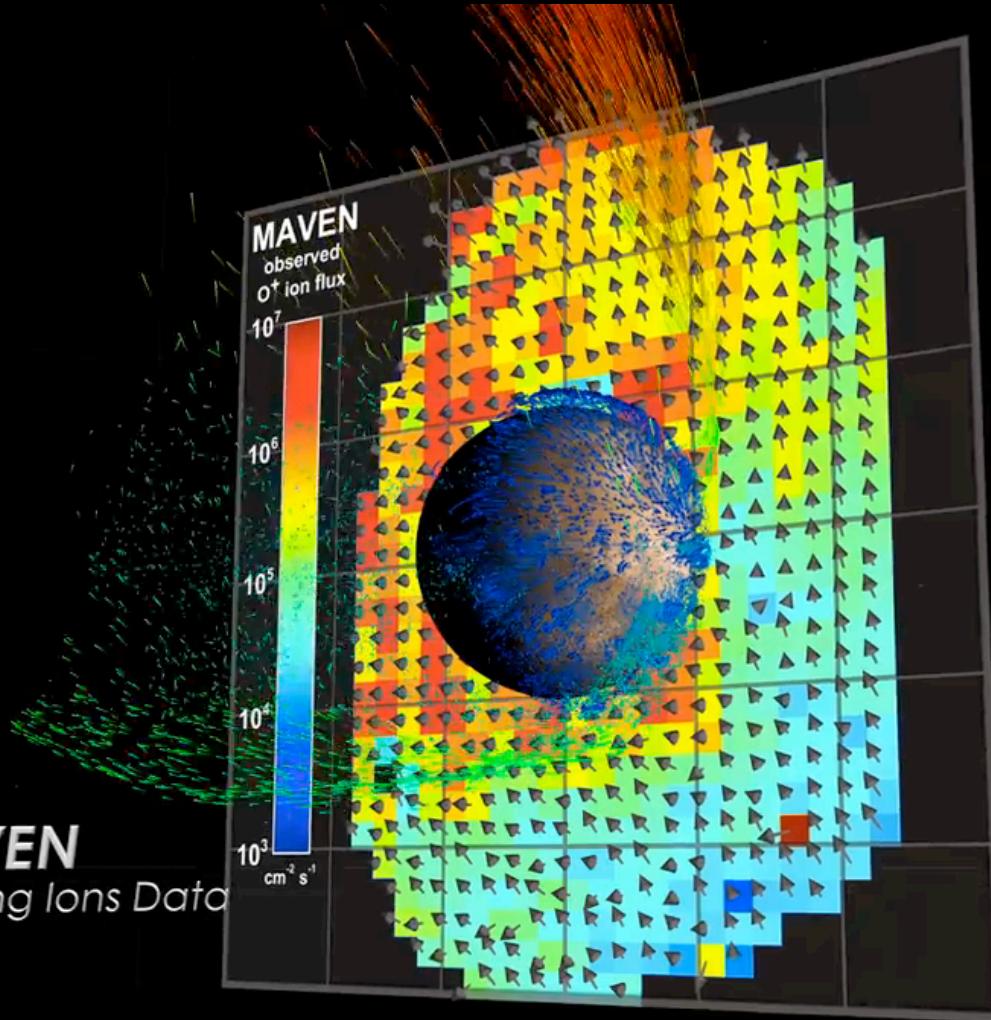
Hybrid simulation:  
present-day, 2.0, and 3.5 Ga



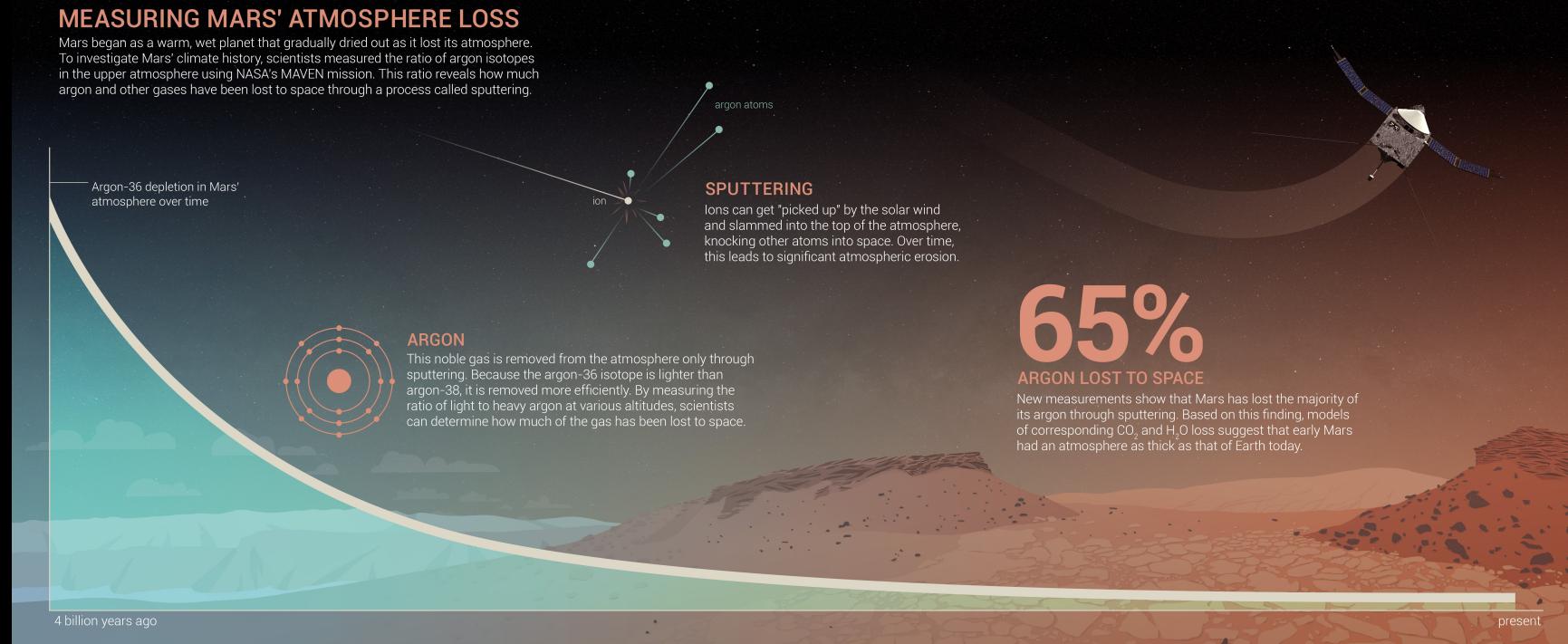
MHD simulation:  
4.5 Ga

Mars has lost up to a few bars  
of oxygen during 4.5 Gyrs

# NASA's MAVEN mission



# NASA's MAVEN mission

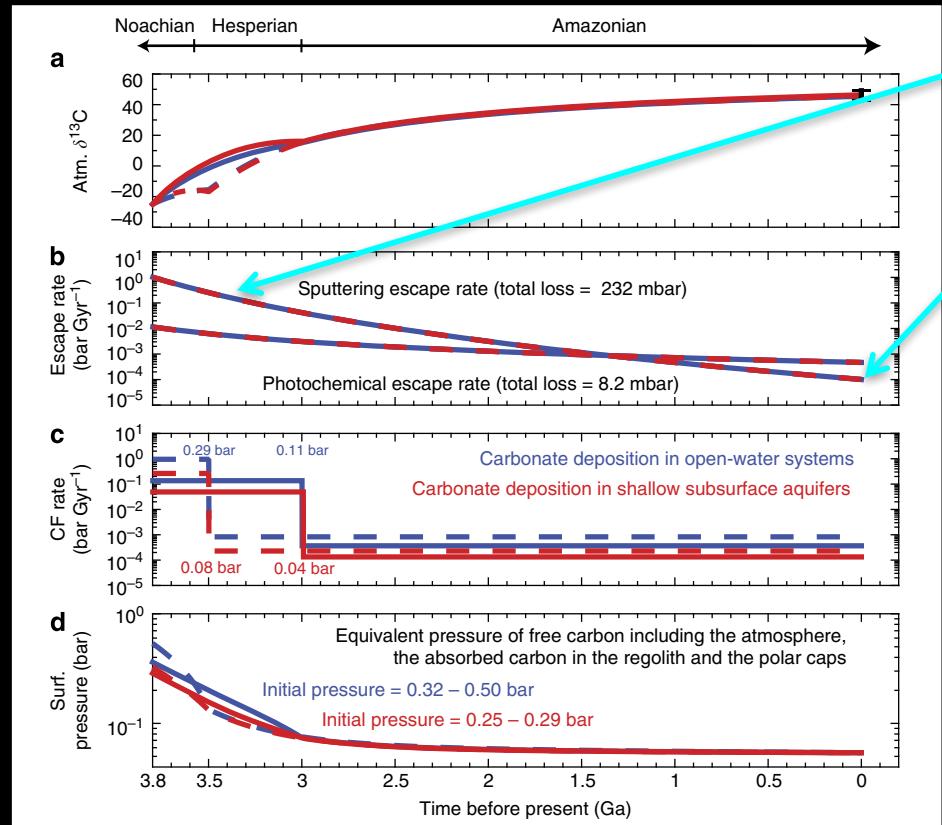


40億年前

現在

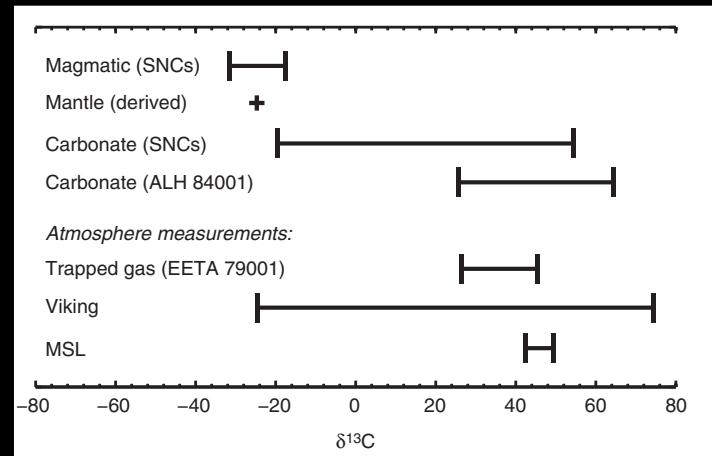
- 過去40億年間で、火星大気中のアルゴンの65%が宇宙空間に流出

# 炭素同位体比に基づく 後期40億年間の大気進化シナリオ



スパッタリング:  
 $f=0.96-0.98$ , < 0.3気圧のCO<sub>2</sub>が流出可能

光解離:  
 $f=0.6$ , 流出量は少ないが、 $\delta^{13}\text{C}$ にインパクト大

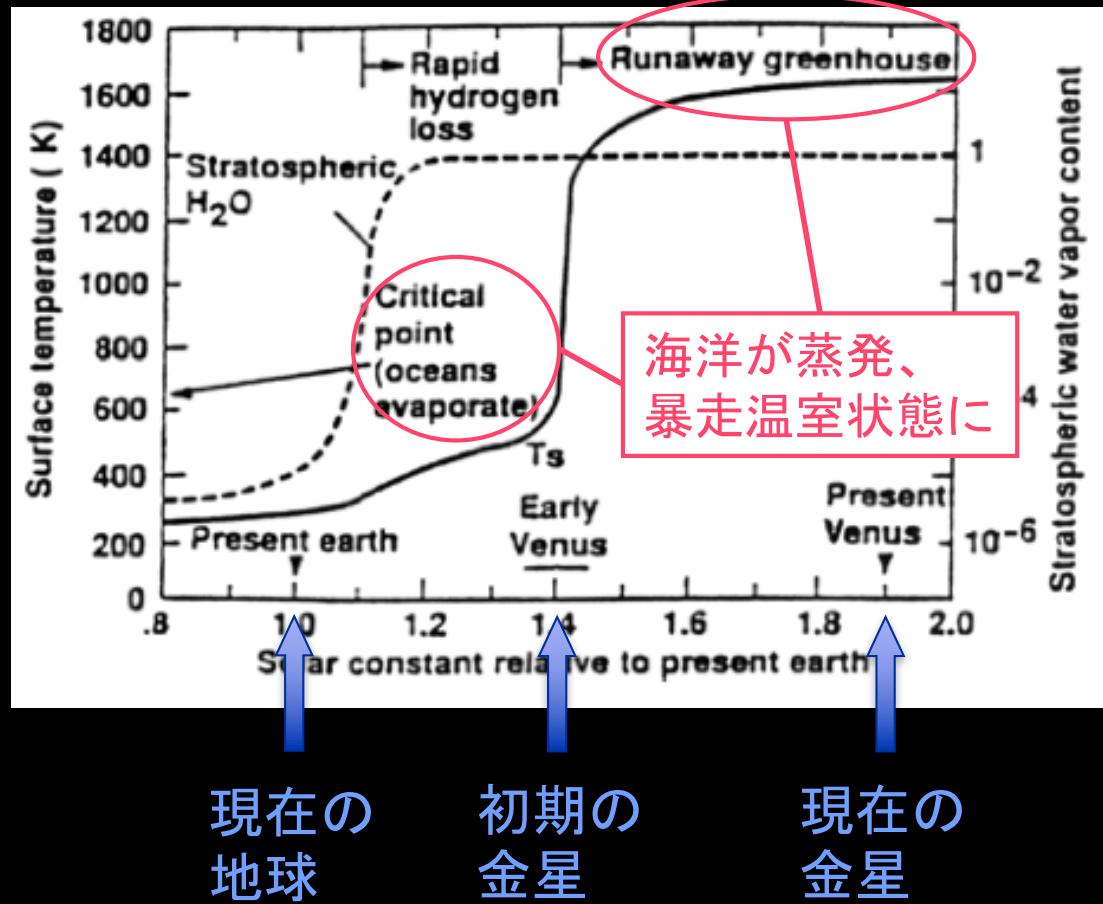


- 炭素reservoir進化モデル [Hu et al., 2014]
  - 光解離による同位体分別  $f=0.6$  を考慮
  - 炭酸塩形成で地殻に < 1.4気圧のCO<sub>2</sub> (参考:Nili Fossaeの炭酸塩 < 0.012気圧)
    - 開放水系では  $\delta^{13}\text{C} \sim 10\text{‰}$  増
    - 深地下帯水層では最大で  $\delta^{13}\text{C} \sim 60\text{‰}$  増 (ALH84001を想定)

# 今後の焦点@火星大気進化

- 低エネルギー粒子流出、同位体比の観測・実証
  - 同位体比観測: MMX、ExoMars/TGO、地上観測など
- 初期10億年間
  - Impact erosion/deliveryの効果
  - ハイドロダイナミック流出モデルの見直し
  - 両極性電場流出 [Collinson+, 2016]
  - 初期磁場の効果(後述)。火星では40-41億年前にダイナモ停止? [Lillis+, 2008, 2013]
  - 温室効果ガス(高エネルギー粒子による生成 [Airapetian+, 2016] など。後述)

# 太陽からの距離の効果

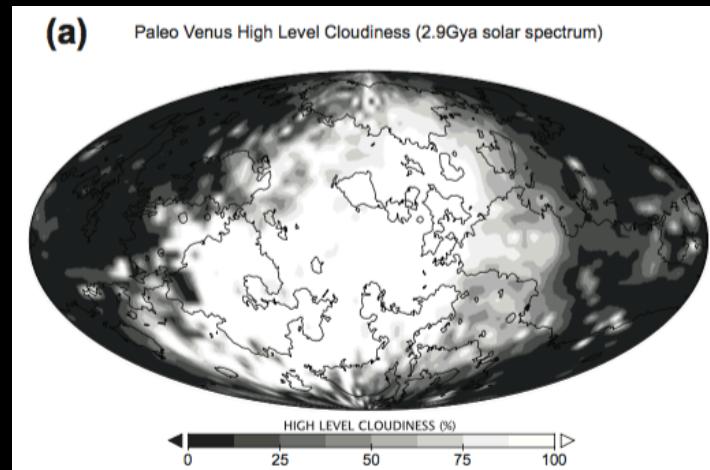
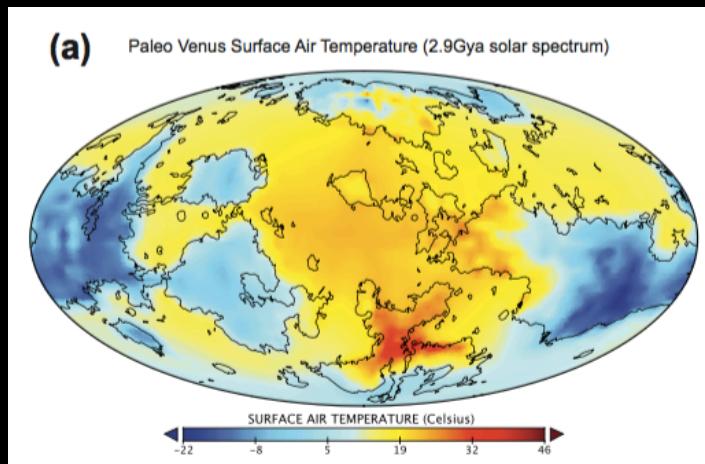


- 地球を太陽にゆっくりと近づけるとどうなるか？
- 実線：惑星表面温度
- 破線：成層圏でのH<sub>2</sub>O混合比
- 雲のアルベドが問題

[Kasting, 1988]

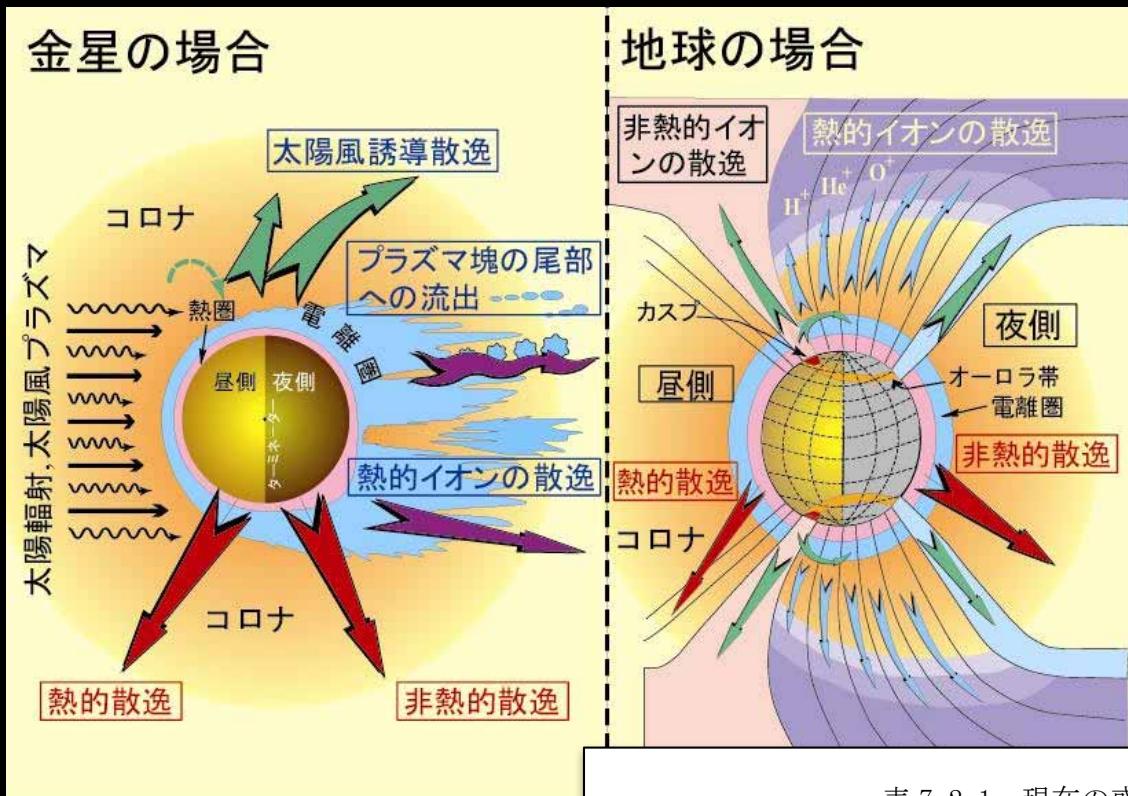
# 金星の暴走温室状態について

- 金星気候モデルによる計算 [Way+, 2016]
  - 地球の気候モデル(ROCKE-3D)を適用して3次元計算
  - 29億年前: 平均気温11度
  - 7億年前: 平均気温15度
  - 昼側に雲が分布。金星で長期に渡って海洋が存在した可能性
  - 自転速度を上げると気温上昇(系外惑星など)



モデル計算による29億年前の気温分布と雲量分布

# 固有磁場の影響



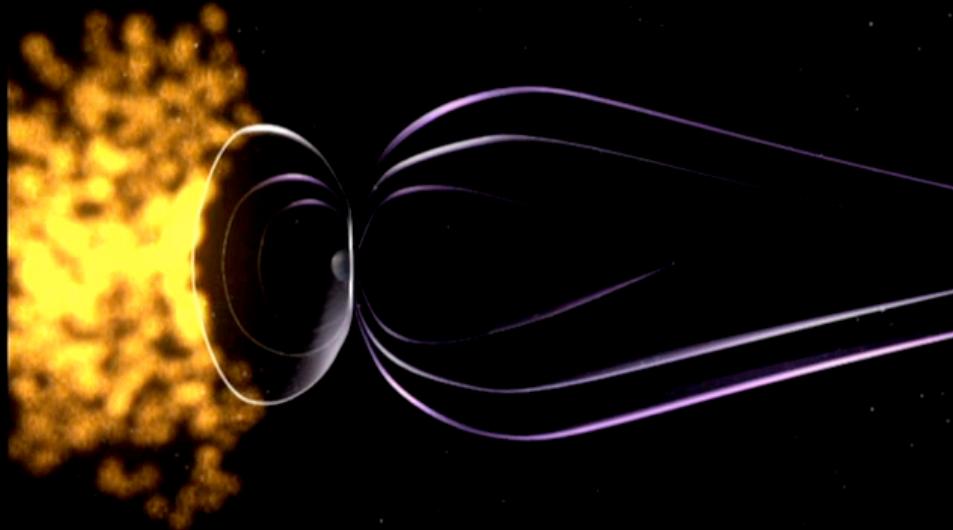
- 固有磁場によるシールド
- 固有磁場による相互作用断面積の拡大
- どちらがより効果的？

表 7.2-1 現在の惑星からの大気散逸量 (単位 個／秒)

惑星	熱散逸量		非熱的散逸量		プラズマ散逸量	
	水素	酸素	水素	酸素	水素イオン	酸素イオン
金星	$< 10^{24}$	0	$(\sim 10^{26})$	$(\sim 10^{25})$	$(10^{25} \sim 10^{26})$	$(10^{25} \sim 10^{26})$
地球	$\sim 10^{26}$	0	$10^{25} \sim 10^{26}$	$< 10^{23}$	$\sim 10^{26}$	$\sim 10^{26}$

注) 表中では地球のプラズマ散逸量のみ実測値、他は間接的な観測をもとに散逸量を推定した値。金星に関しては、理論的推定の根拠となるデータが不十分ため大きな誤差が予想される数値を( )付で記した。

# 固有磁場の影響



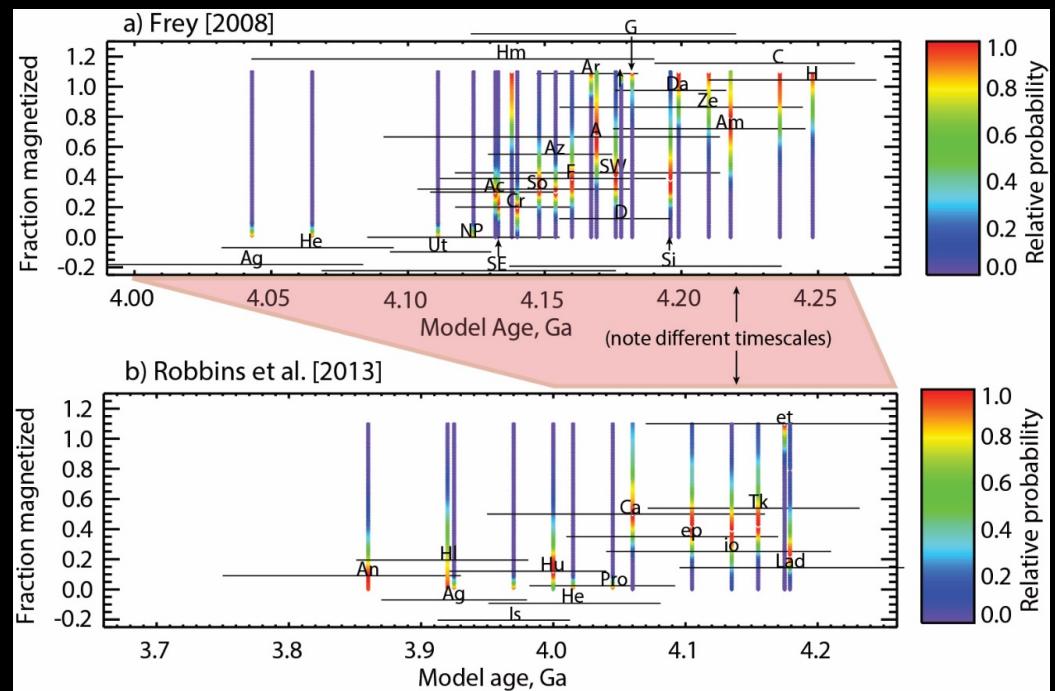
Power category	Particle (GW)	Joule (GW)	Solar (GW)	Total (GW)
Solar min: 75–77, 83–87, 93–98	38 (8%) 21	77 (16%) 63	359 (76%) 46	474 (101)
Solar cycles 21–23	36 (6%) 24	95 (16%) 93	464 (78%) 135	596 (190)
Average S.D.	35 (5%) 23	112 (16%) 111	562 (79%) 116	710 (182)
Solar max: 78–82, 88–92, 99–03				
Top 5% of power events	73 (7%) 36	331 (30%) 226	687 (63%) 116	1090 (226)
Top 1% of power events	104 (7%) 44	638 (45%) 306	691 (48%) 113	1433 (313)

[Knipp+, 2004]

- 固有磁場による極域へのエネルギー流入
- 地球極域へのエネルギー流入は、火星降込粒子のエネルギーより約3桁大きい(エネルギーを与える高度域は異なるが)

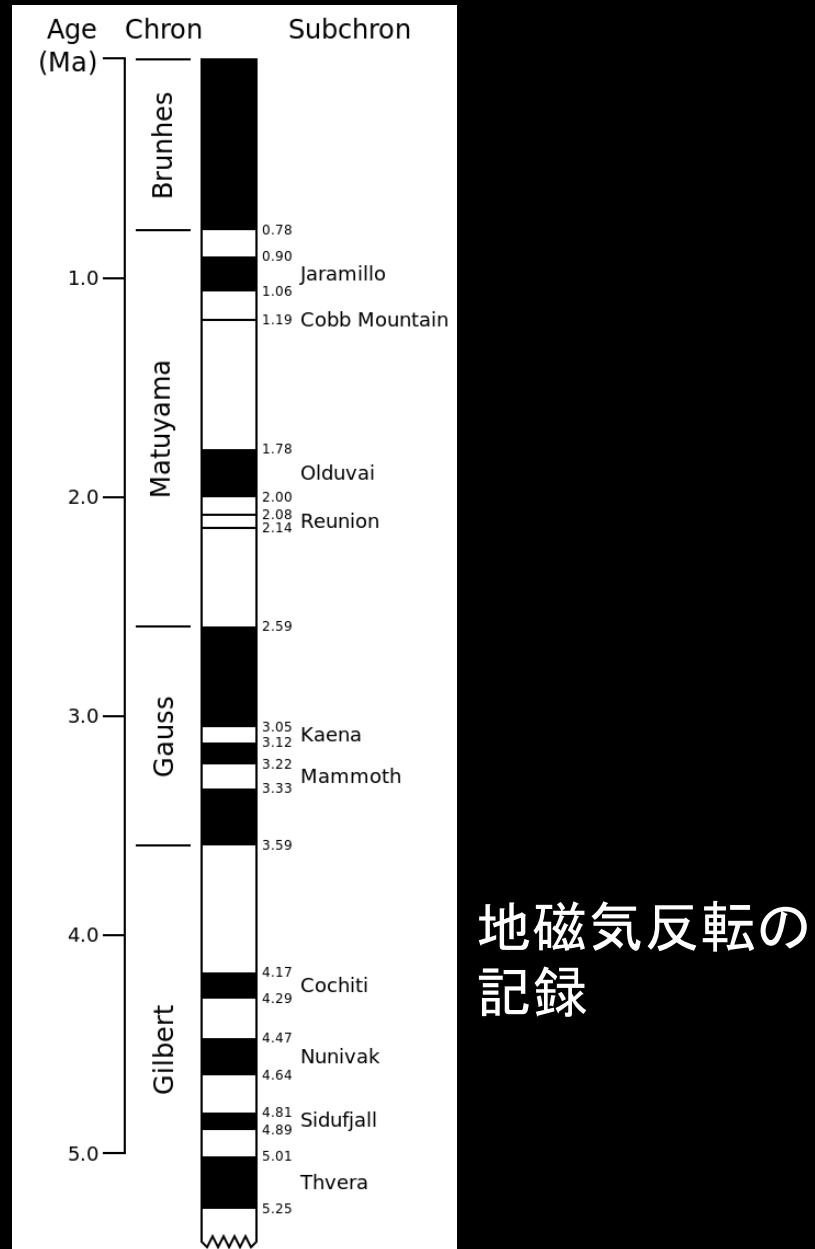
# 初期火星の磁場

- クレータ磁場より、火星のダイナモは40-41億年前に停止 [Lillis et al., 2013]
- 表面磁場強度は~5000nT?? [Weiss et al., 2008]
- 磁気圏は大気を守ったのか？
- それとも大気の流出を促したのか？



[Lillis et al., 2013]

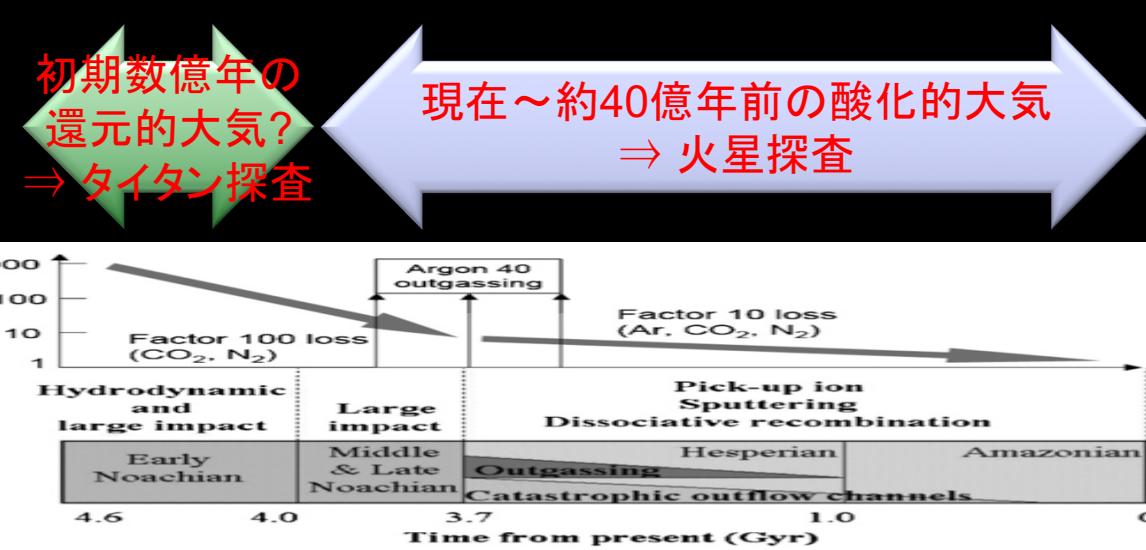
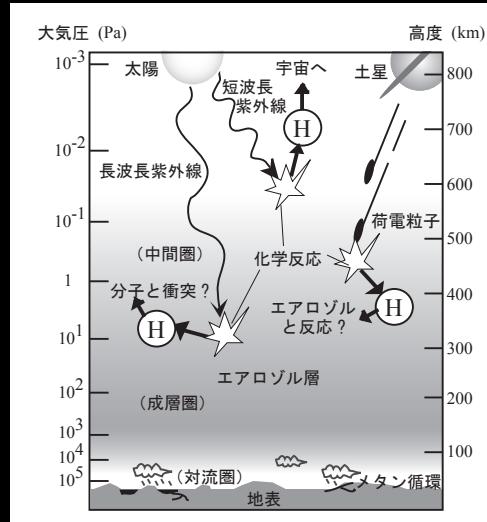
# 地球磁場の反転



- 反転の周期は、数万-数十万年
- 現在の双極子磁場強度は、100年につき 5.5% の割合で減少中
- 1000-2000年で双極子磁場はゼロに？

# タイタン(初期地球のプロキシ?)

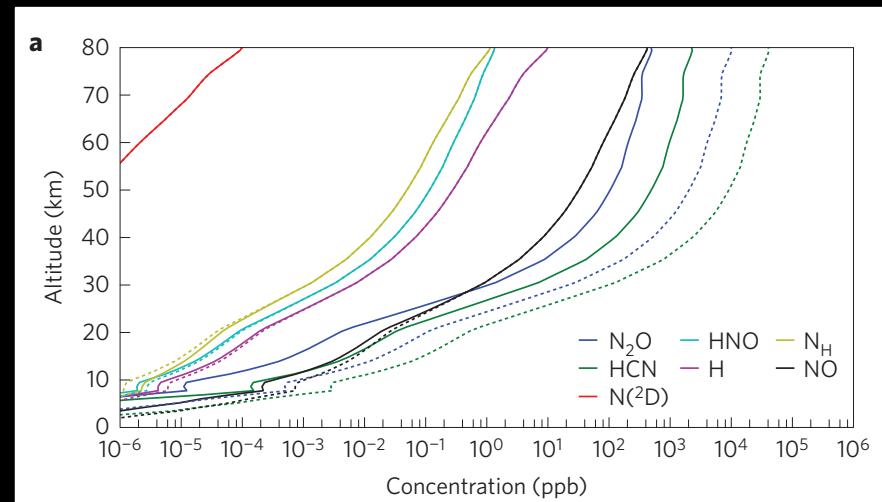
- 太陽系で唯一厚い大気を持つ衛星
- 大気中で高分子有機物を合成
  - 有機物の高分子化は超高層大気中で開始
  - 太陽紫外線、土星磁気圏の影響
- 初期地球大気のプロキシ?
  - 初期の地球・金星・火星大気は、還元的であった可能性が高い。火星などでは風化等のため約40億年前までしか辿れないが、それ以前の還元的大気におけるメタン循環の変動、高分子有機物合成、温室効果等を探る



タイタンでは、太陽紫外線や高エネルギー粒子が高分子有機物合成の鍵となる [Sekine et al., 2008]

# 初期地球

- 初期の激しい太陽活動
- 高エネルギー粒子による温室効果ガス( $N_2O$ )・有機分子(HCN)の生成？ [Airapetian+, 2016]
  - Faint Young Sun問題
  - 温室効果ガスは、候補が出ては否定の繰り返し
    - $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ , ...



# 太陽系内から太陽系外への発展

火星・金星・地球大気流出  
(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
- 太陽風ボンバーメント
- 光化学反応
- ジーンズ流出
- 両極性電場流出

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

太陽系惑星

太陽系外惑星

大気を保有する条件は?

生命惑星の成立条件は?

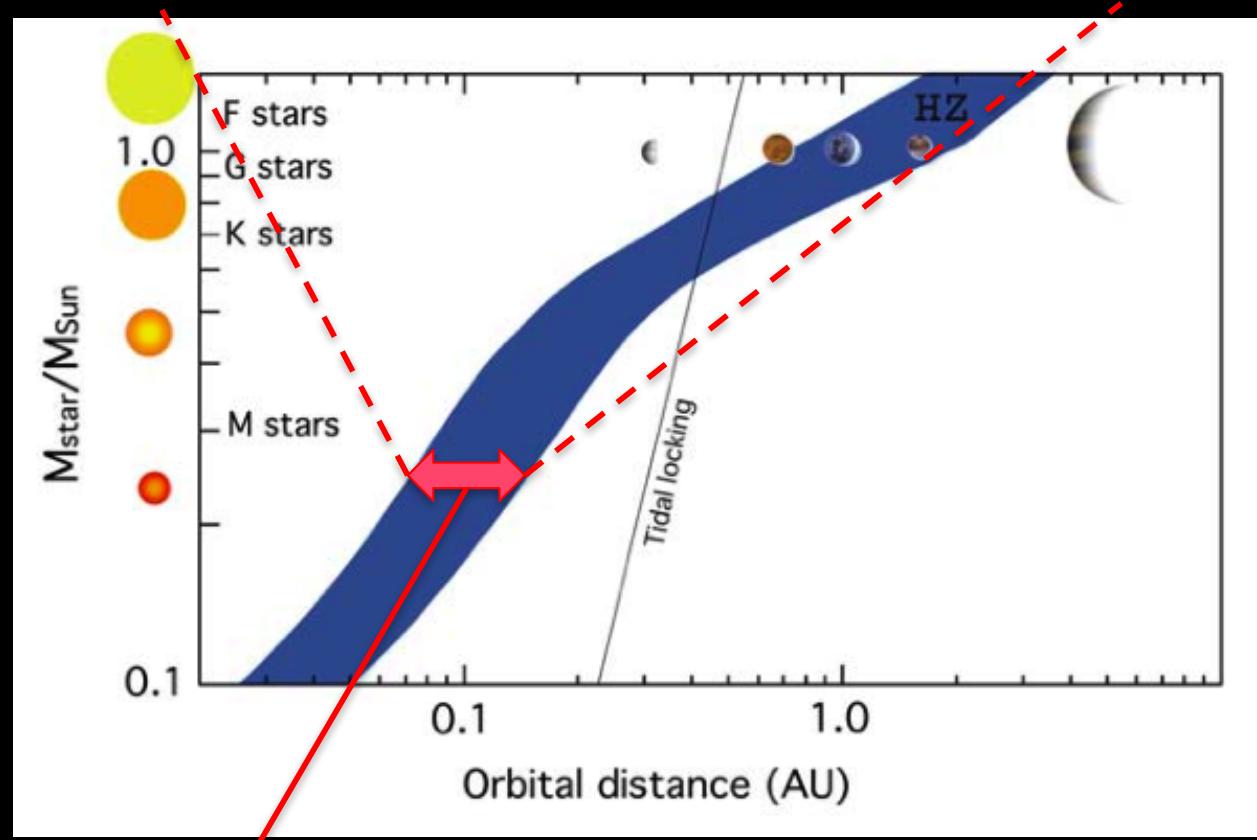
# 連續的生存可能領域(CHZ)

内側限界:

宇宙空間への水素の熱的流出

外側限界:

CO<sub>2</sub>の凝結で温室効果が維持不可

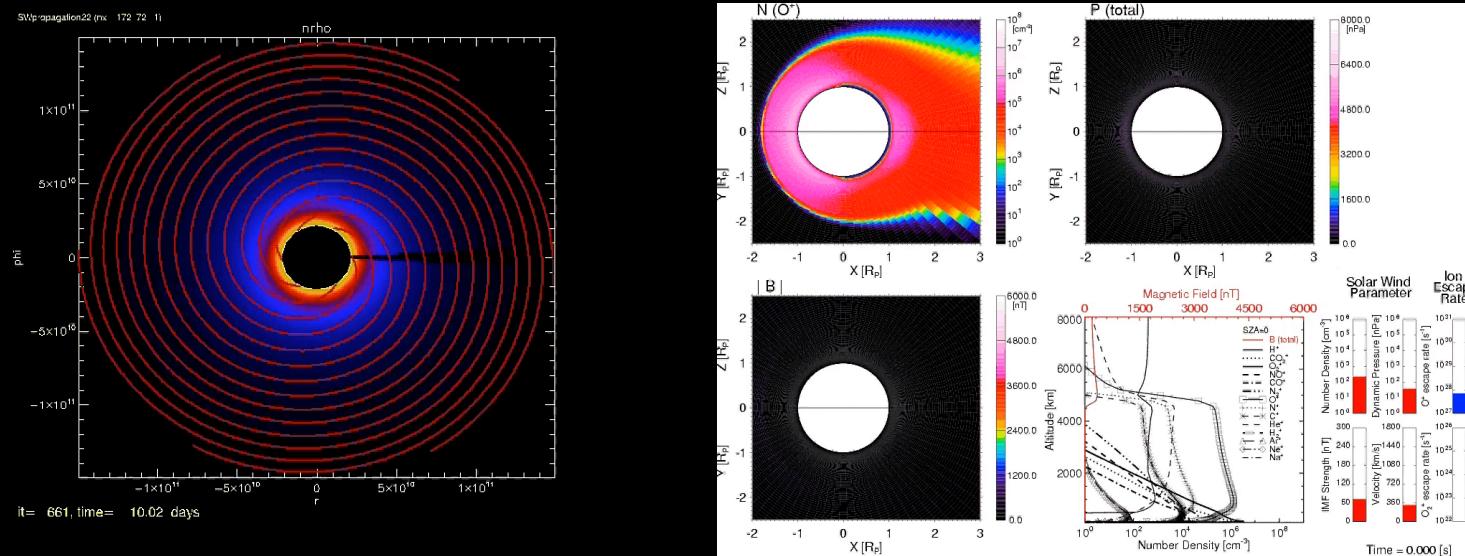


CHZの古典的定義:

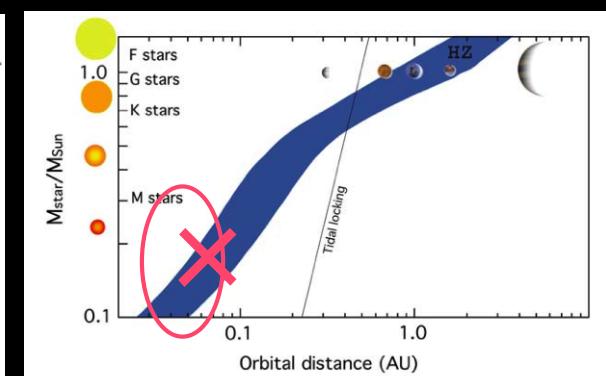
地球類似の惑星が、表面に液体の水を保持できる領域。

現在の太陽系では0.95-1.37 AU(46億年前は1.15 AUまで)

# M型星における連続的 生存可能領域(CHZ)

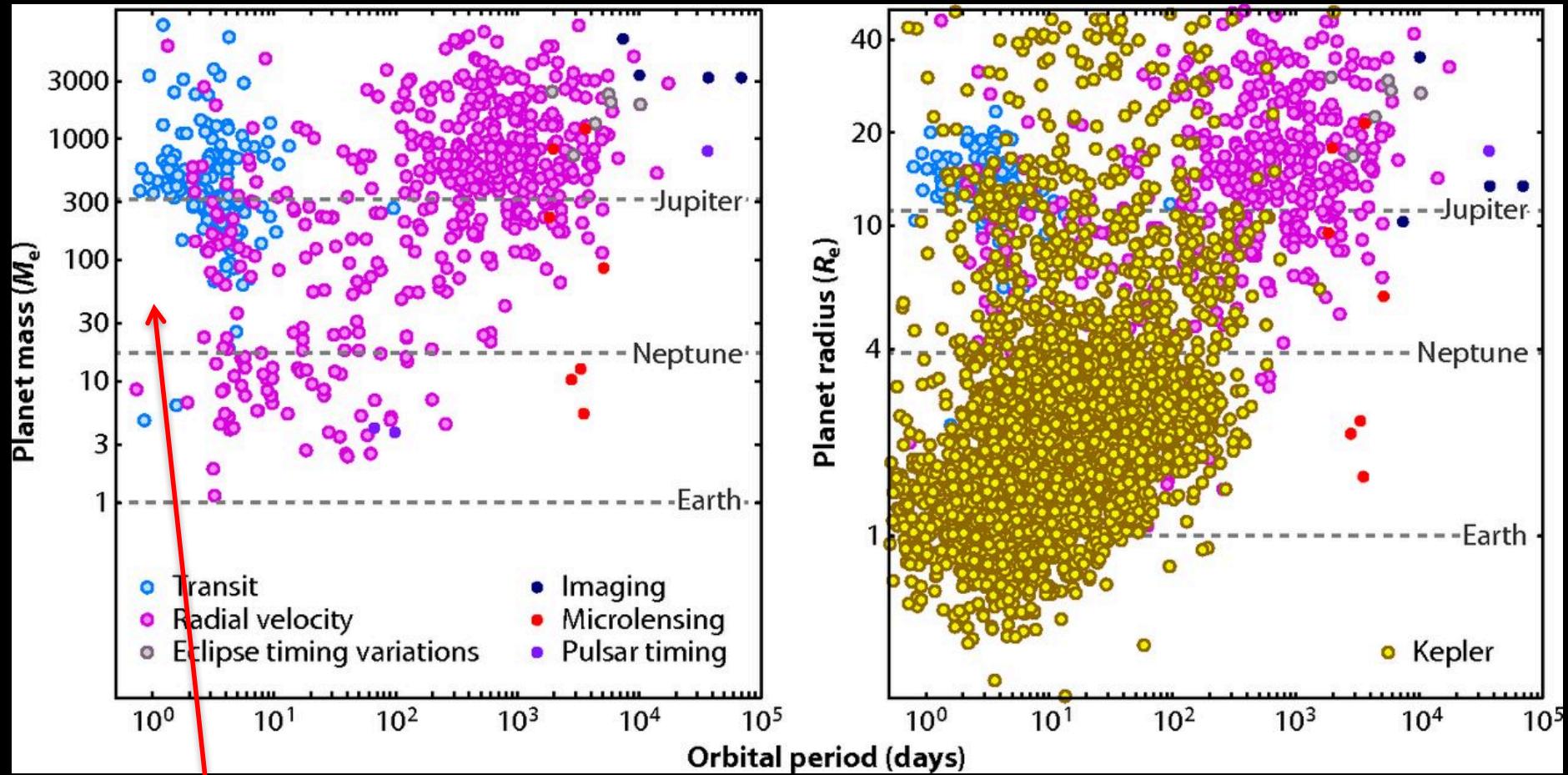


Cases	$d$ [AU]	EUV	$L$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	0.1 Gyr [bar]	0.5 Gyr [bar]	1 Gyr [bar]
1   10	0.05	100   30	$2 \times 10^{30}   4 \times 10^{29}$	32   6.5	160   32.5	320   65
2   11	0.05	100   30	$2 \times 10^{29}   5 \times 10^{28}$	3.2   0.8	16   4	32   8
3   12	0.1	100   30	$8 \times 10^{29}   9 \times 10^{28}$	12.8   1.45	64   7.25	128   14.5
4   13	0.1	100   30	$7 \times 10^{28}   6 \times 10^{27}$	1.1   0.095	5.5   0.47	11   0.95
5   14	0.2	100   30	$1.2 \times 10^{29}   \times 10^{28}$	1.9   0.16	9.6   0.8	19.2   1.6
6   15	0.2	100   30	$2 \times 10^{28}   1.3 \times 10^{27}$	0.32   0.02	1.6   0.1	3.2   0.2
7   16	0.3	100   30	$7.5 \times 10^{28}   5 \times 10^{27}$	1.2   0.028	6   0.4	12   0.8
8   17	0.3	100   30	$1.8 \times 10^{28}   8 \times 10^{27}$	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 <sup>48</sup>

# 系外惑星観測



強い大気流出の影響？