

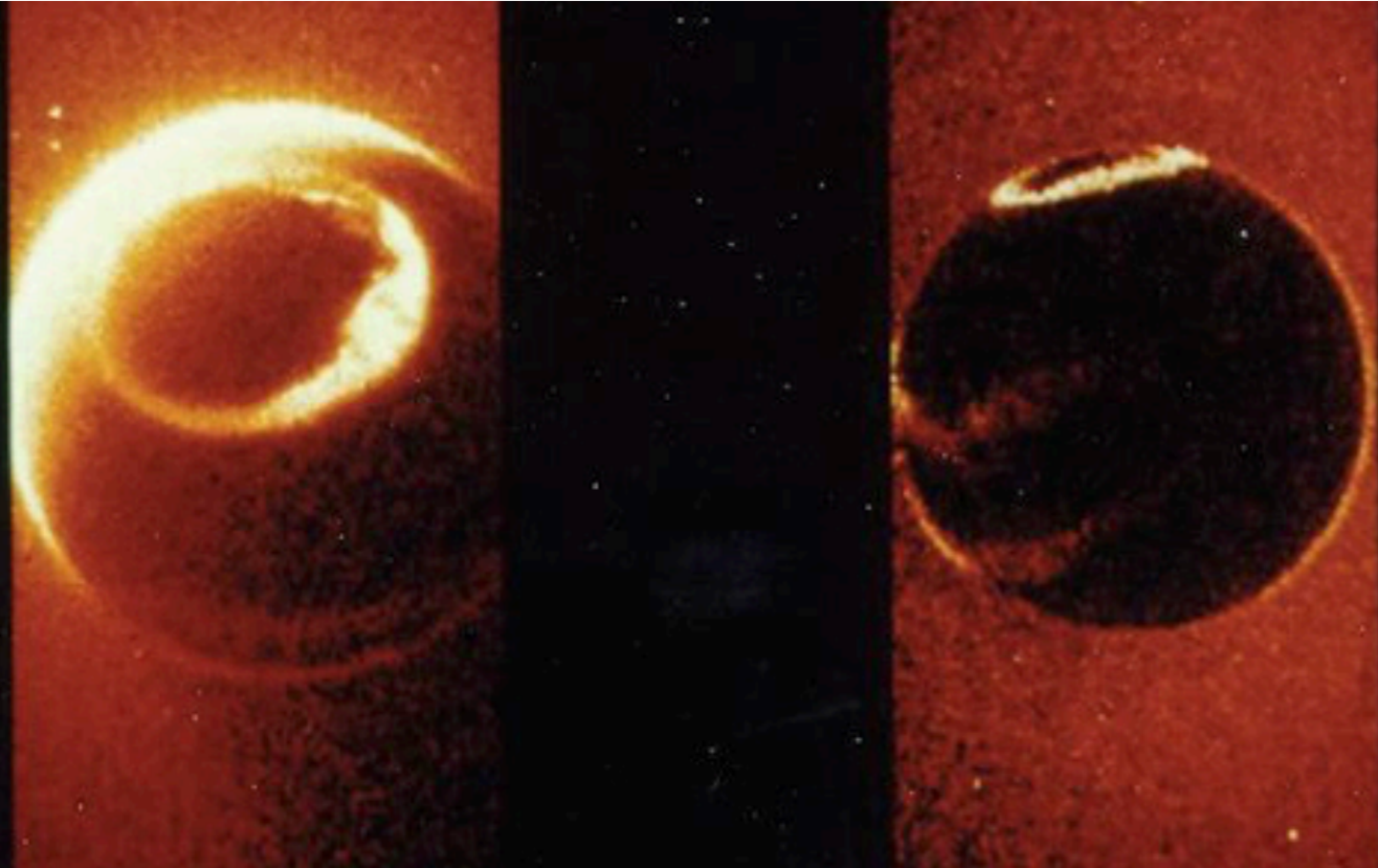


# 地球惑星圈物理学

## 惑星大気(2)

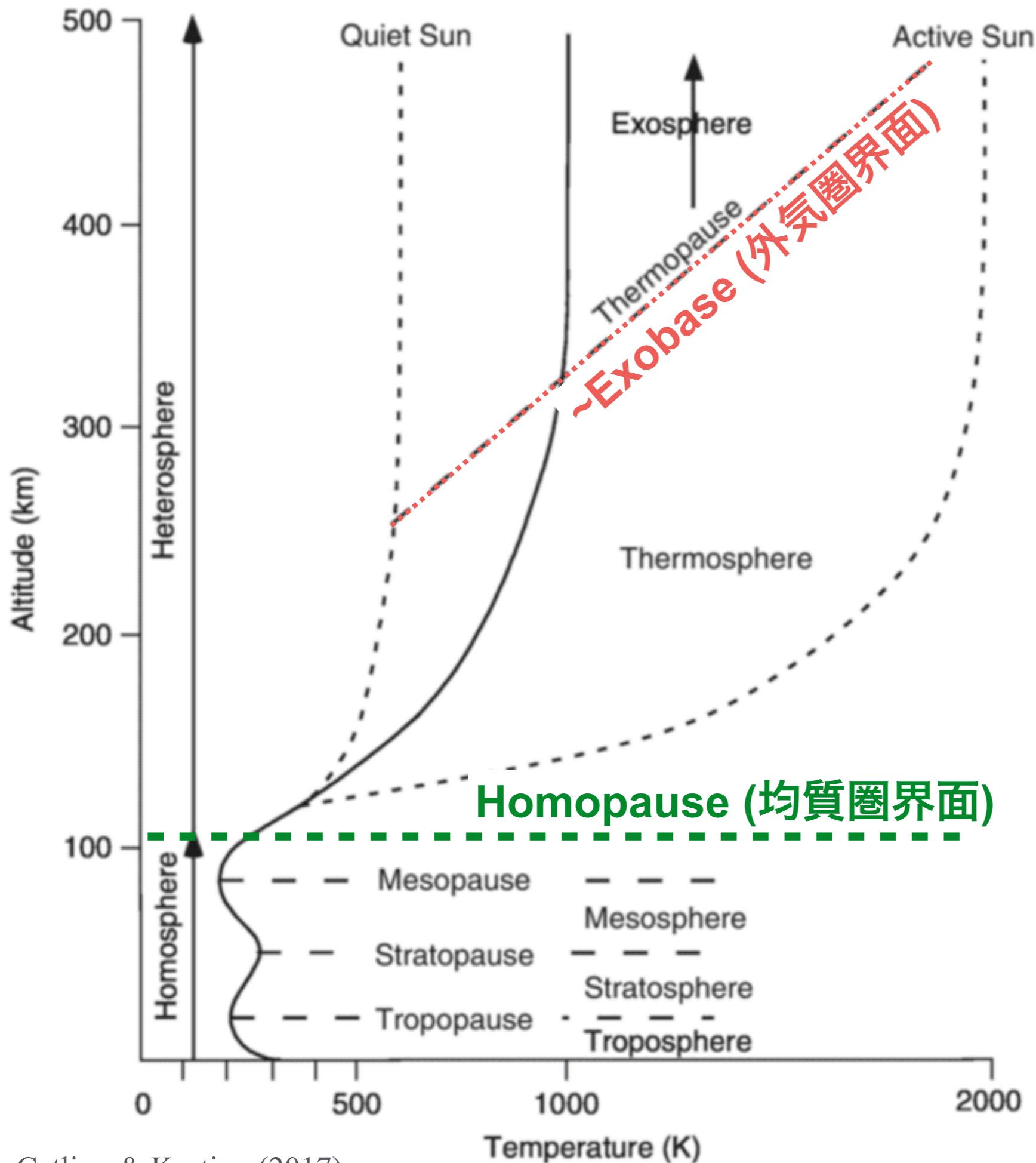
# 宇宙空間に流出する惑星大気

真空紫外線で撮像された地球 (100-200 nm)



Rairden et al. (1986)

- 太陽光 (Lyman- $\alpha$ ) が地球大気を取り囲んで広がる水素で散乱
- 地球大気起源の水素が流出していることを示唆
- 大気散逸は惑星大気と表層環境進化の要因の一つ



大気圧  $p$  は高度  $z$  に応じて減衰

$$p(z) = p_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

$H$  はスケールハイト,

$$H \equiv \frac{kT}{\overline{m}g}$$

上層に行くに従い、化学組成が不均質 (*homopause*) になり、やがて大気は非衝突系 (*exobase*) となる

⇒ 大気散逸

# 大気散逸過程の分類

- **熱的散逸:**

大気成分がその熱エネルギーによって散逸

- Jeans' escape (ジーンズ散逸)
- Hydrodynamic escape (流体力学的散逸)

← 太陽放射・太陽風

- **非熱的散逸:**

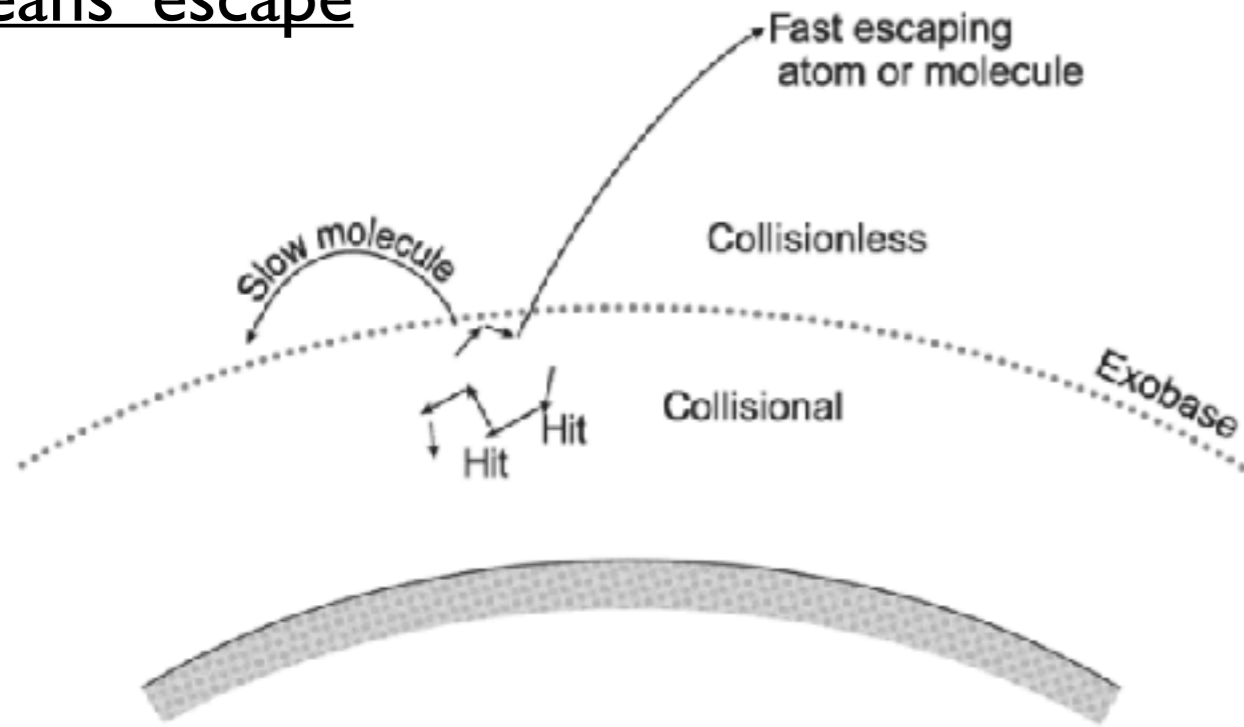
個々の粒子が光化学反応や太陽風との相互作用などで加速

- 光化学的散逸 (e.g. 光解離, 解離性再結合)
- スパッタリング ...etc

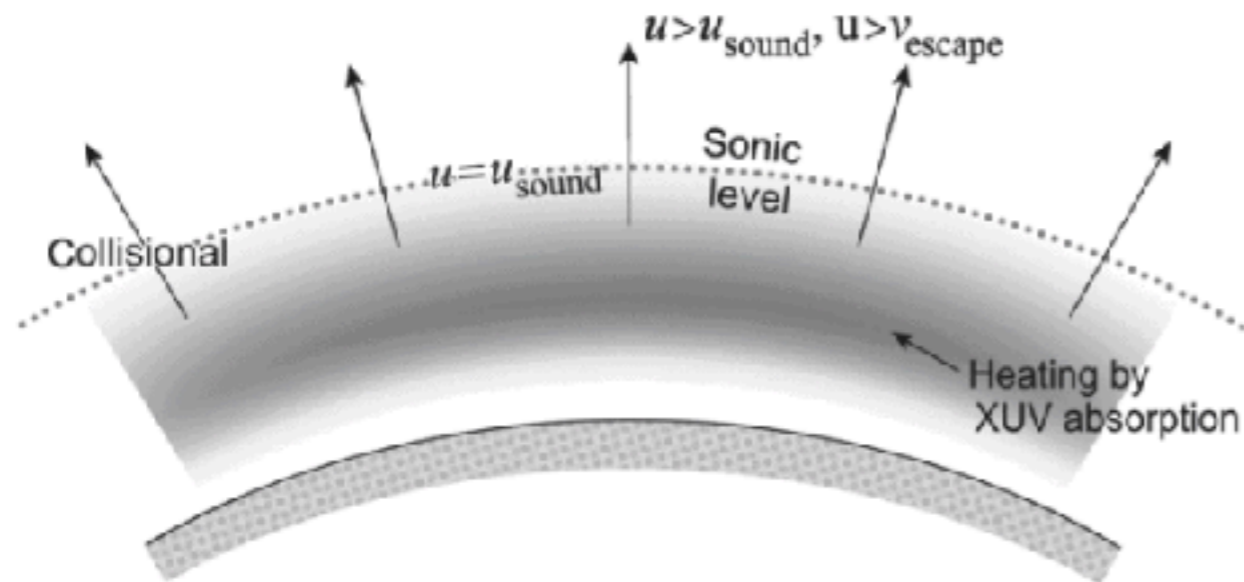
- **天体衝突剥ぎ取り** ← 小惑星・彗星衝突

# 熱的散逸

## Jeans' escape

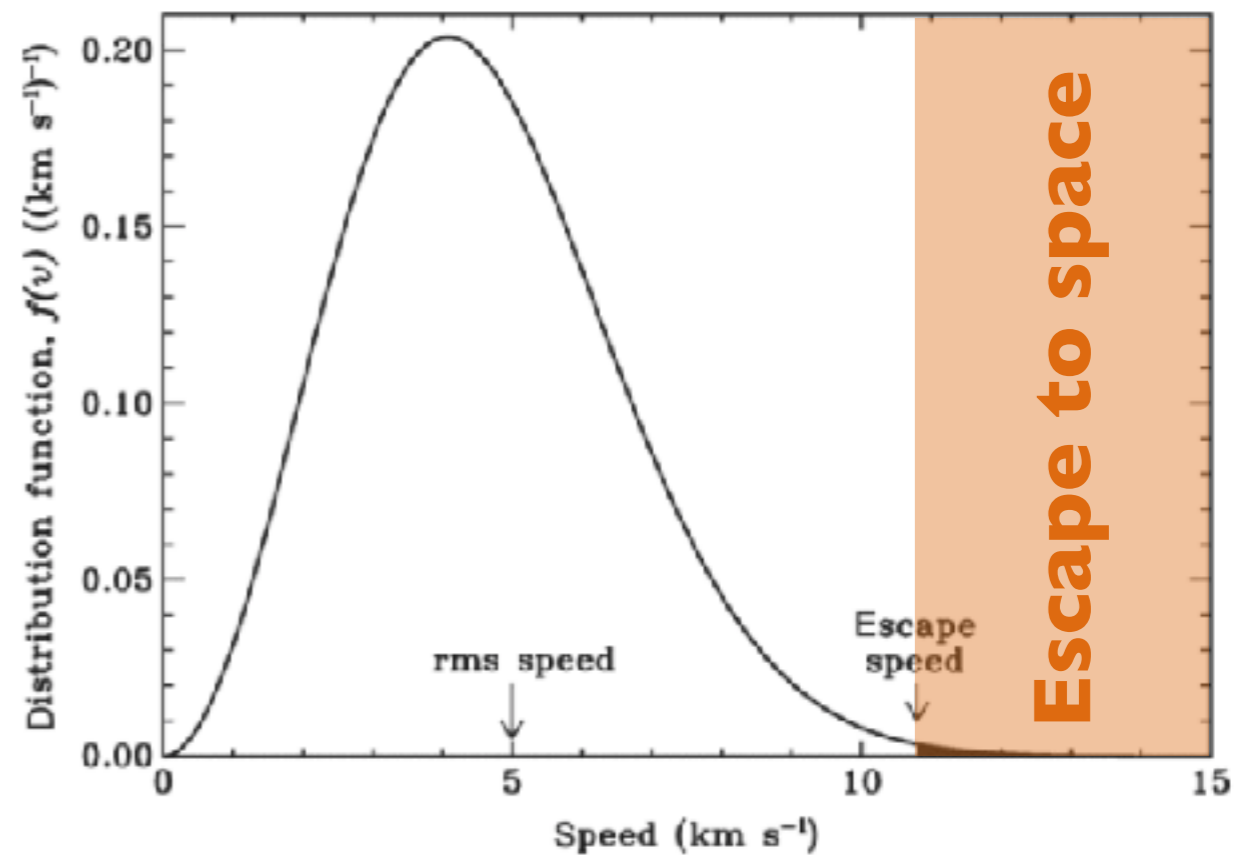


## Hydrodynamic escape



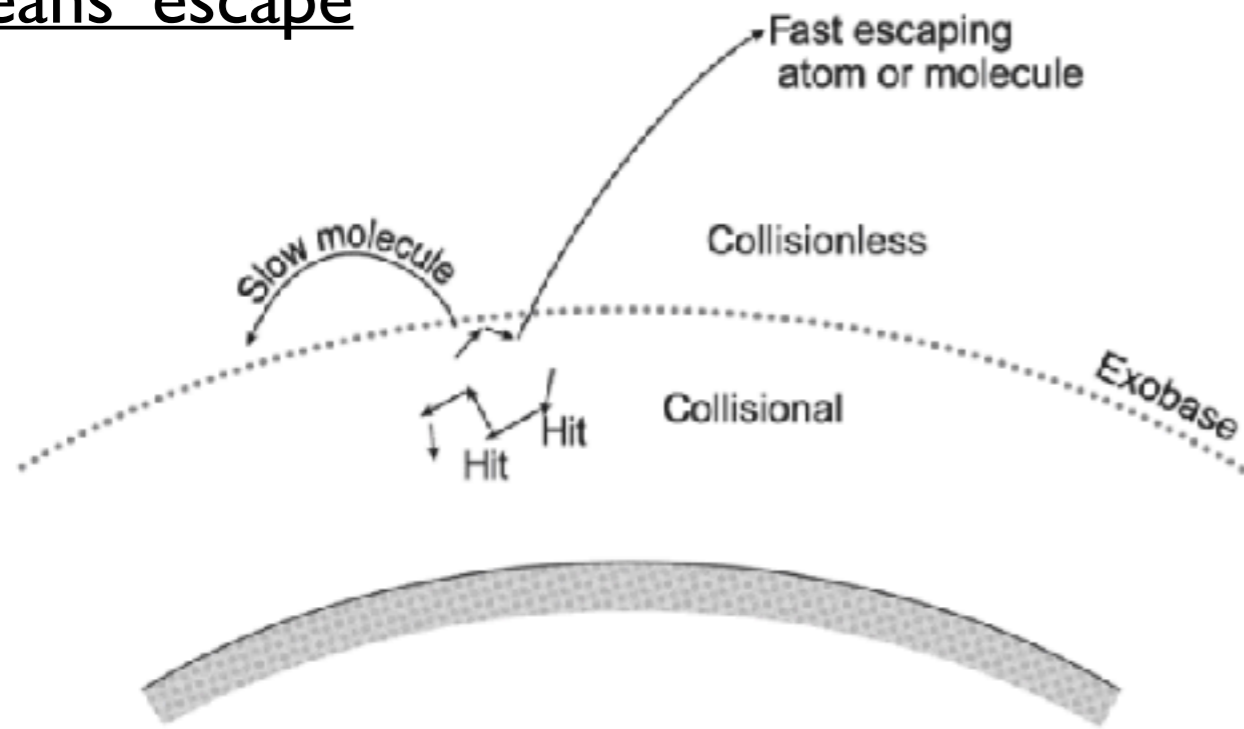
Catling & Kasting (2017)

## Maxwell-Boltzmann speed distribution func.

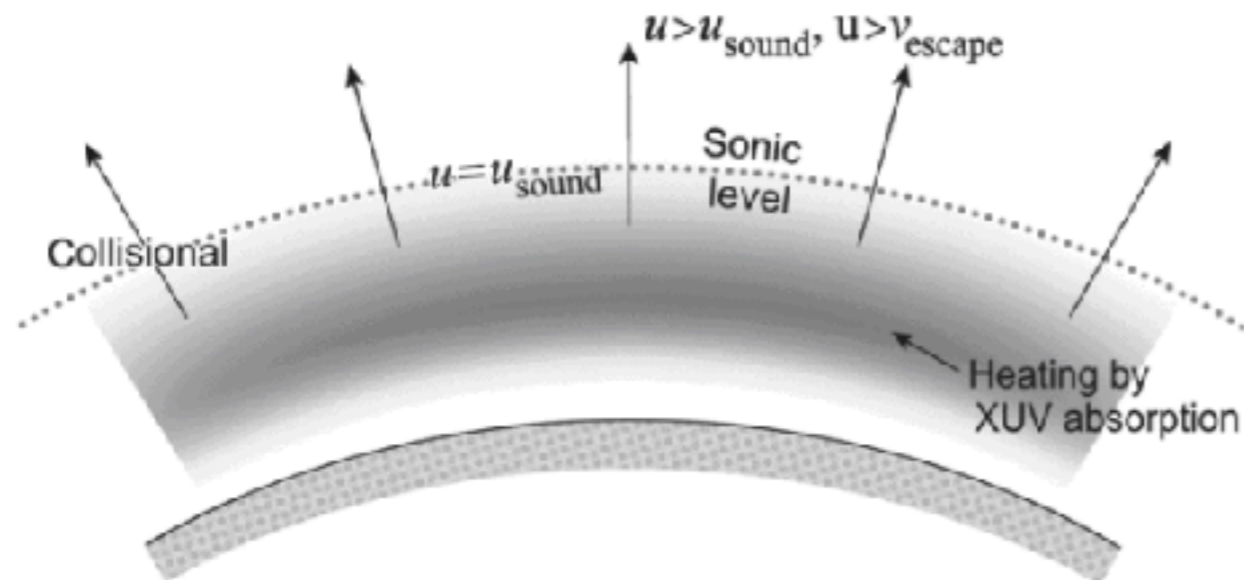


# 熱的散逸

## Jeans' escape



## Hydrodynamic escape



Catling & Kasting (2017)

Exobaseに存在する水素原子の運動速度,

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$$

$m$ : 質量  $1.67 \times 10^{-27}$  kg

$v$ : 平均速度

$k$ : ボルツマン定数  $1.38 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>

$T$ : Exobaseの温度 1000 K

$$\longrightarrow v \simeq 5 \text{ km s}^{-1}$$

一方、地球からの脱出速度は

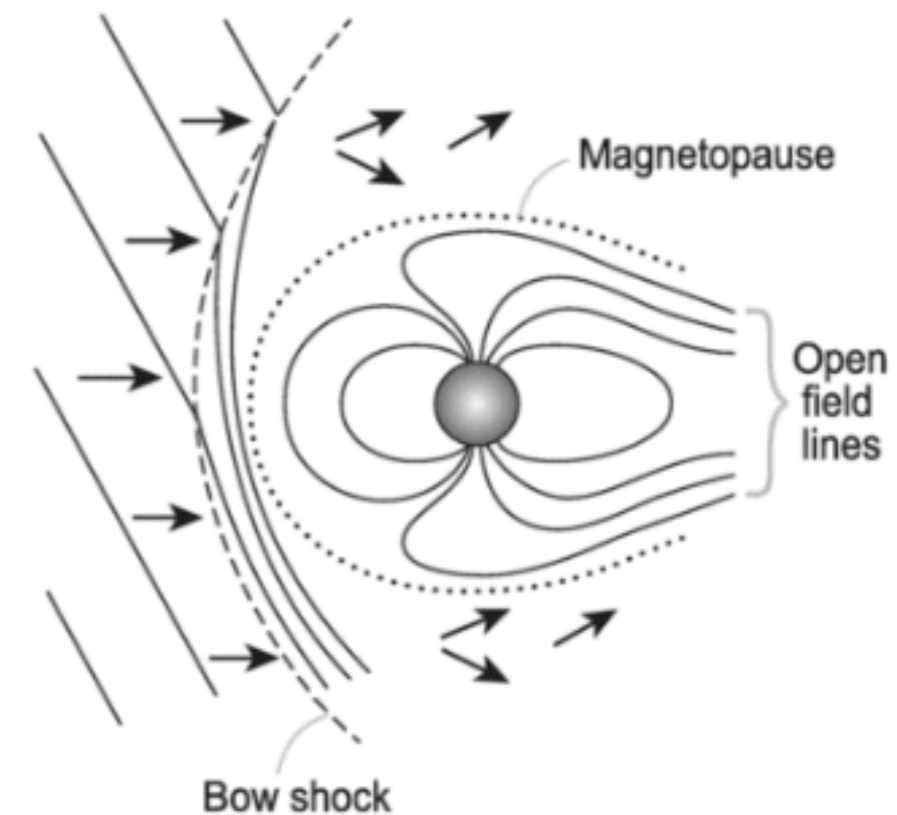
$$v_{\text{esc}} = 11.2 \text{ km s}^{-1}$$

従って、現在の地球大気からの熱的散逸はジーンズ散逸でよく近似できる

# 非熱的散逸

上層大気には 太陽UVによって電離したhot (fast)  $H^+$  イオンが存在

- **The polar wind:**  
磁極からのイオン流出
- **Charge exchange ( $H-H^+$ ) 電荷交換:**  
Hot  $H^+$  イオンが中性原子と電荷交換  
高速の中性原子となって流出

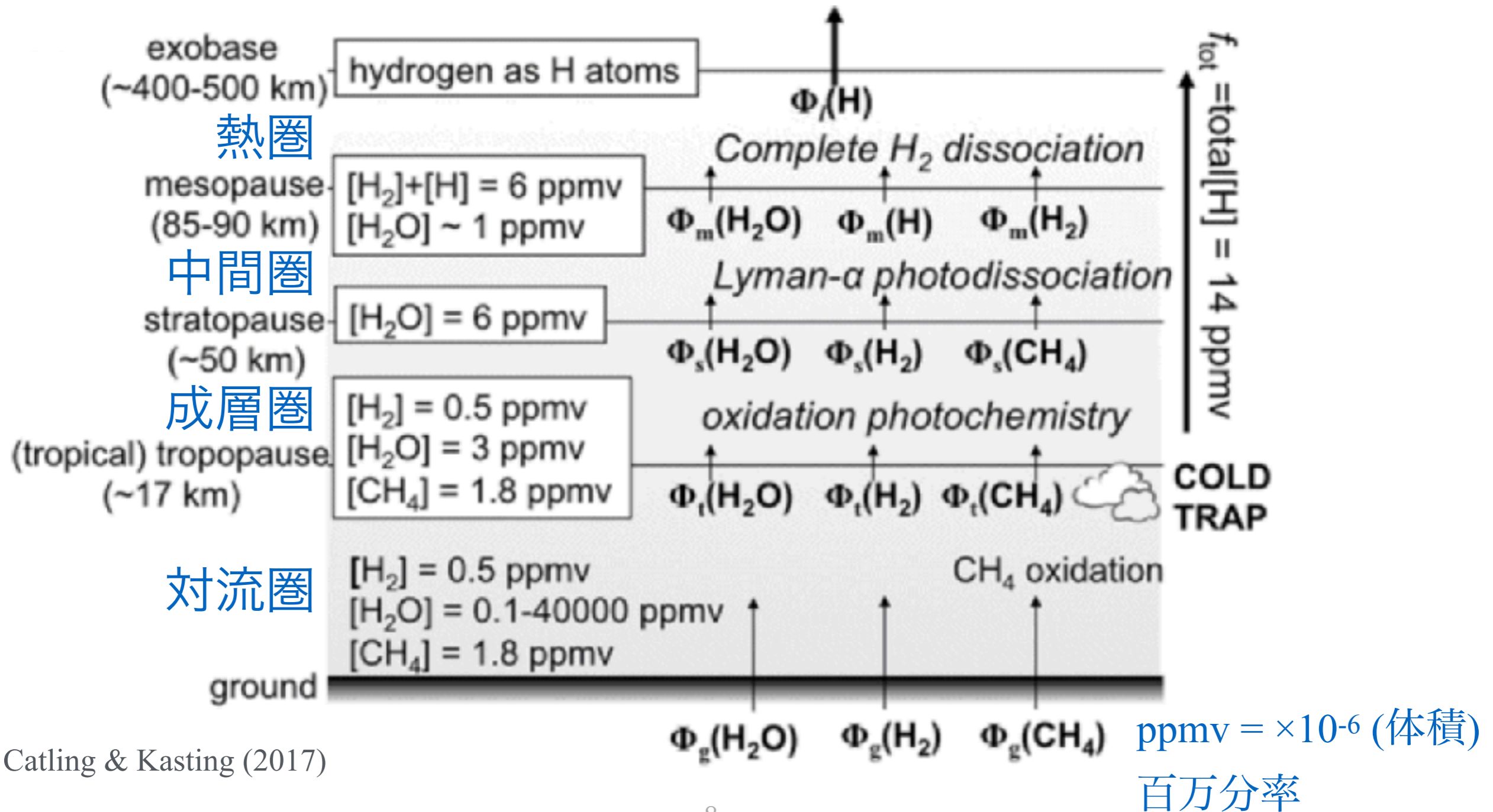


現在の地球における水素散逸への寄与は

60-90% charge exchange, 10-40% Jeans' escape, and 10-15% polar wind

# Diffusion-limited (拡散律速)

水素のexobaseからの散逸は十分に効率的なため、  
散逸率をコントロールする過程はhomopauseからの分子(原子)拡散



Catling & Kasting (2017)



# Diffusion-limited (拡散律速)

均質圏界面から外気圏界面への拡散フラックスは次式で与えられる

$$\Phi_{\text{dif},i} \simeq \frac{b_i f_i}{H_a} \simeq 2.5 \times 10^{17} f_{\text{T}}(\text{H}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$H_a$  : scale height of atmosphere スケールハイト

$b_i$  : binary diffusion coefficient of  $i$  相互拡散係数

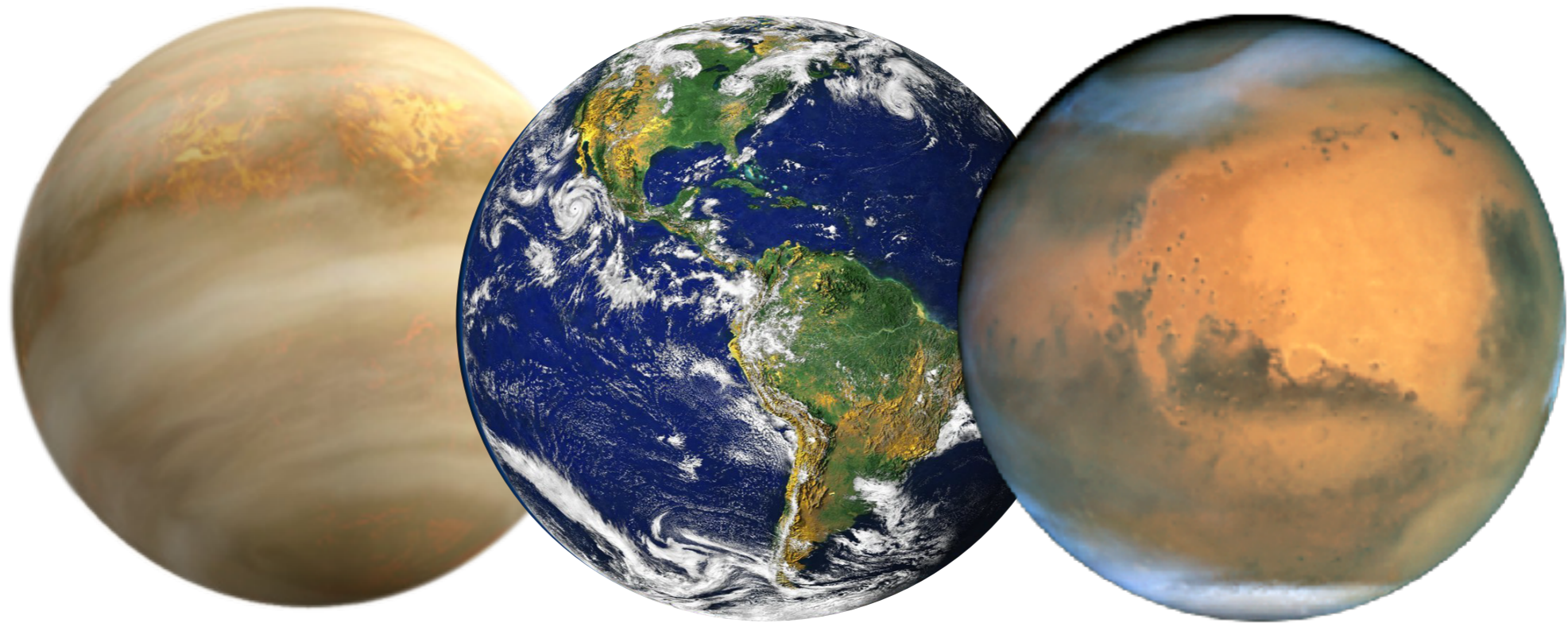
$f_i$  : volume mixing ratio of  $i$  体積混合率

$f_{\text{T}}(\text{H})$  : total hydrogen mixing ratio 水素の総体積混合率

$$f_{\text{T}}(\text{H}) = f_{\text{H}} + 2f_{\text{H}_2} + 2f_{\text{H}_2\text{O}} + 4f_{\text{CH}_4} + \dots$$

対流圏で上昇気流が降雨することで、現在の地球からの水素散逸率は小さく抑えられている (コールドトラップ)

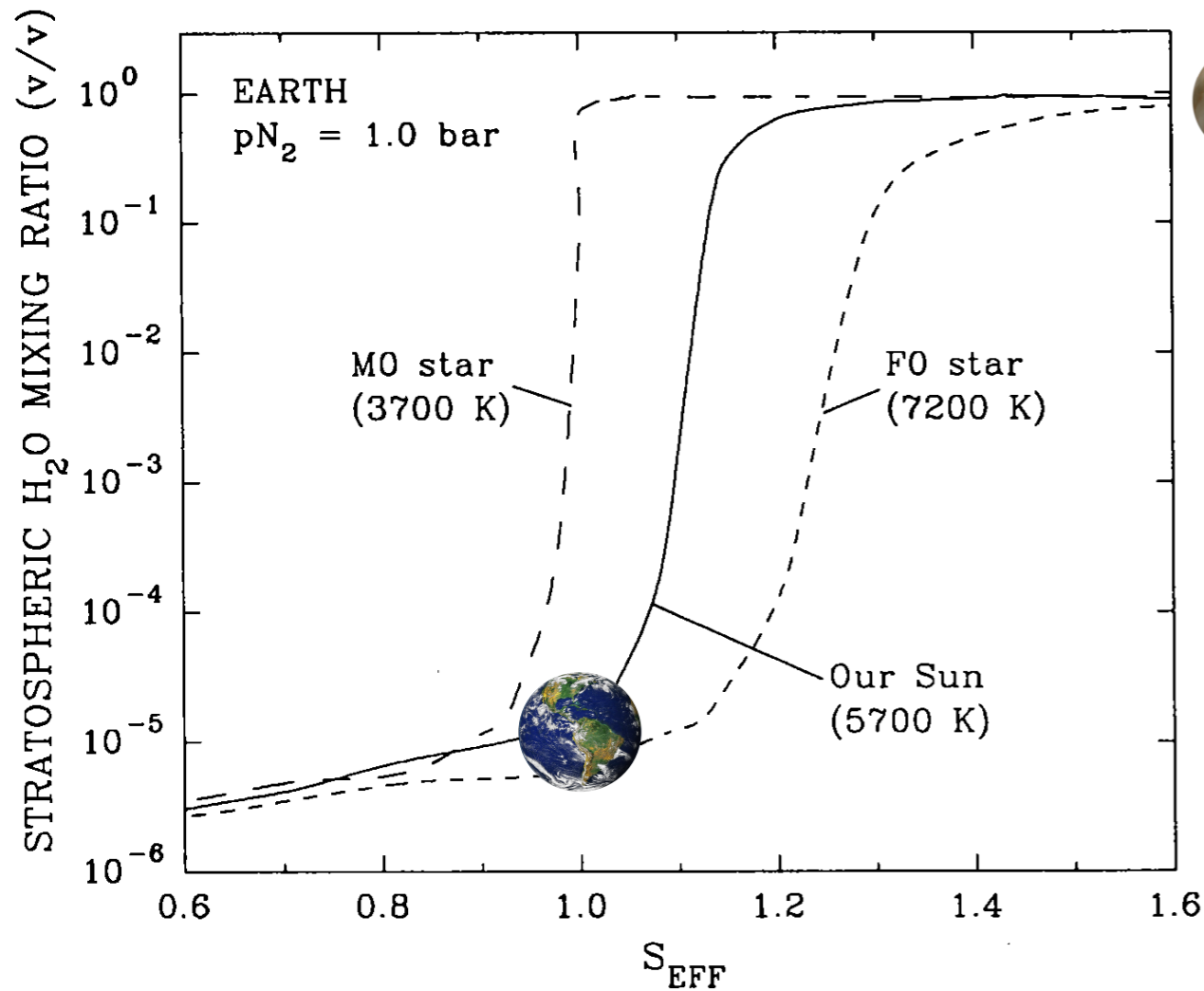
# Surface environments of terrestrial planets



軌道半径	0.7 AU	1 AU	1.5 AU
地表面気圧	90 bar	1 bar	0.006 bar
大気主成分	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
地表平均気温	735 K	288 K	210 K
全球平均水深	30 mm	2700 m	>20 m
水の主な形態	水蒸気	液体の水	極冠の氷

# 金星の水の散逸

## 上層大気におけるH<sub>2</sub>O 混合比

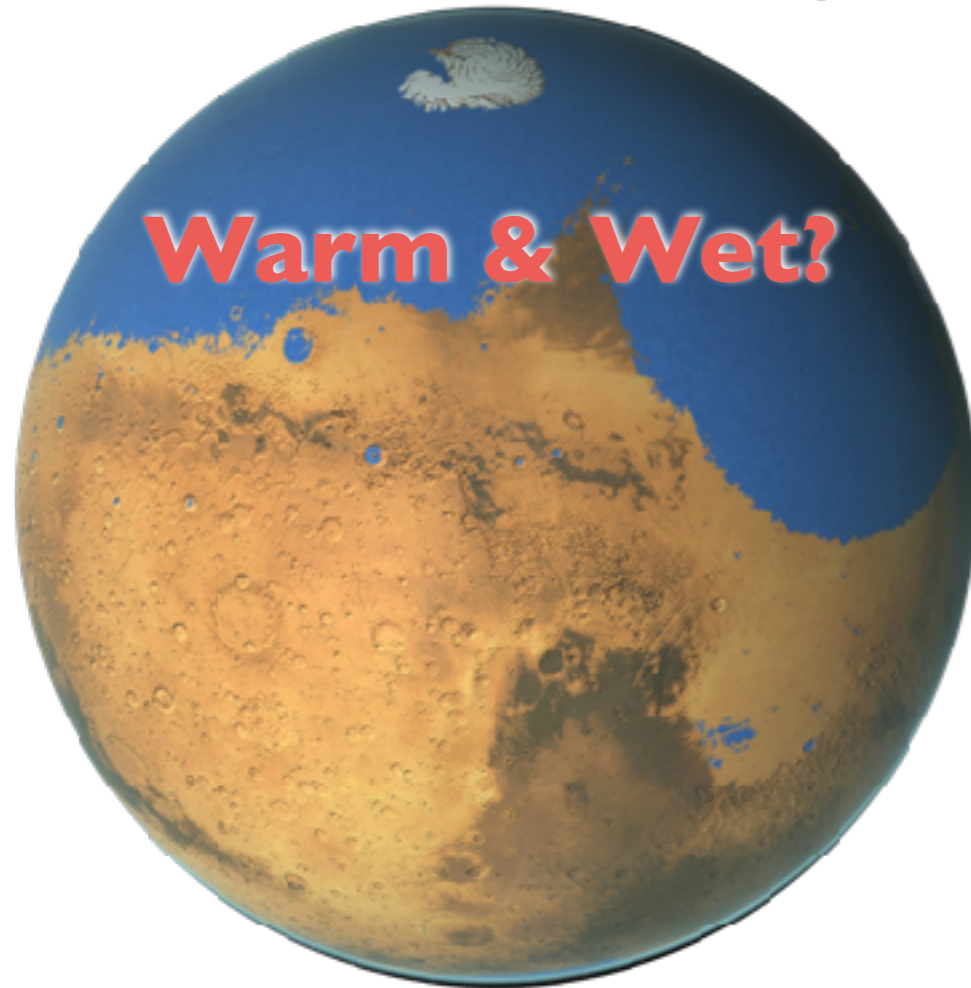


- 金星の軌道半径は液体の水を保持できるか否かを隔てる境界に近い
- 地球ではコールドトラップによって水の散逸は抑えられているが、金星では機能しない
- 大気散逸によって金星の水(水素)はほぼ完全に失われた

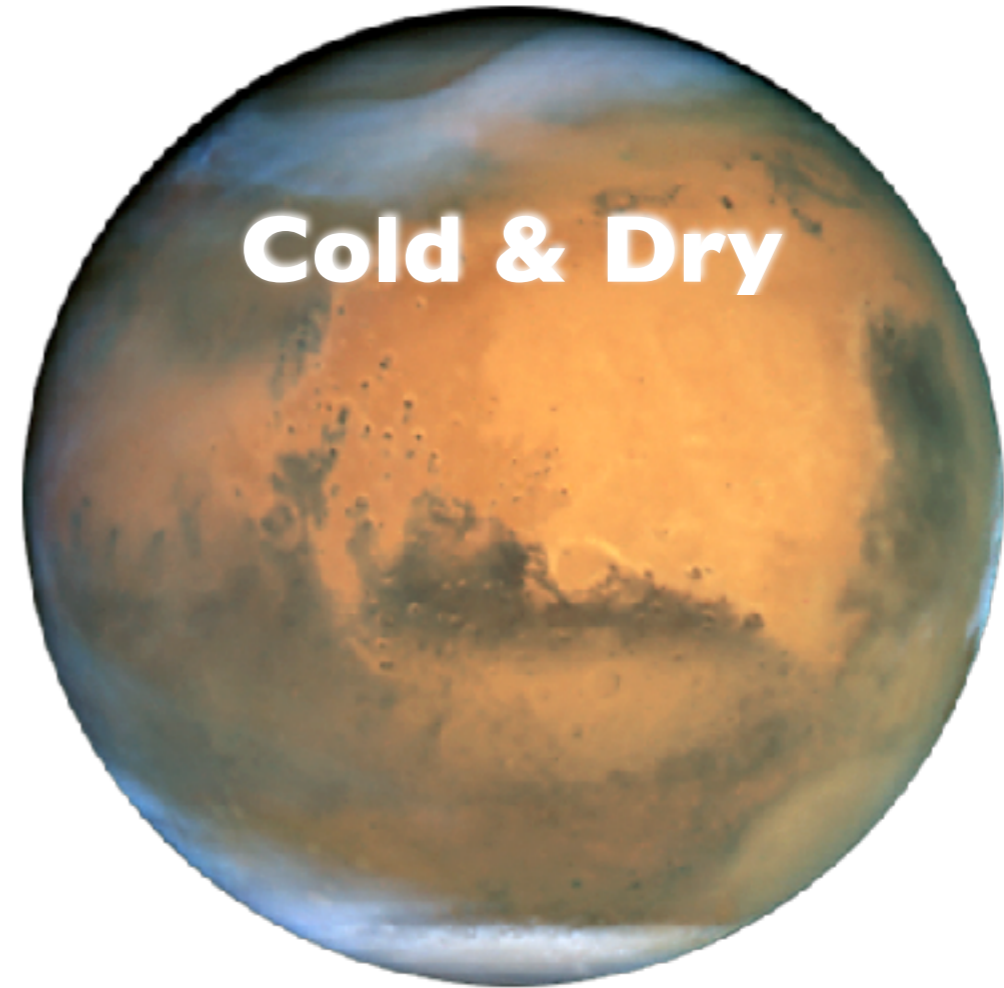
Kasting et al. (1993)

# 火星の気候変動

**~4 billion years ago**

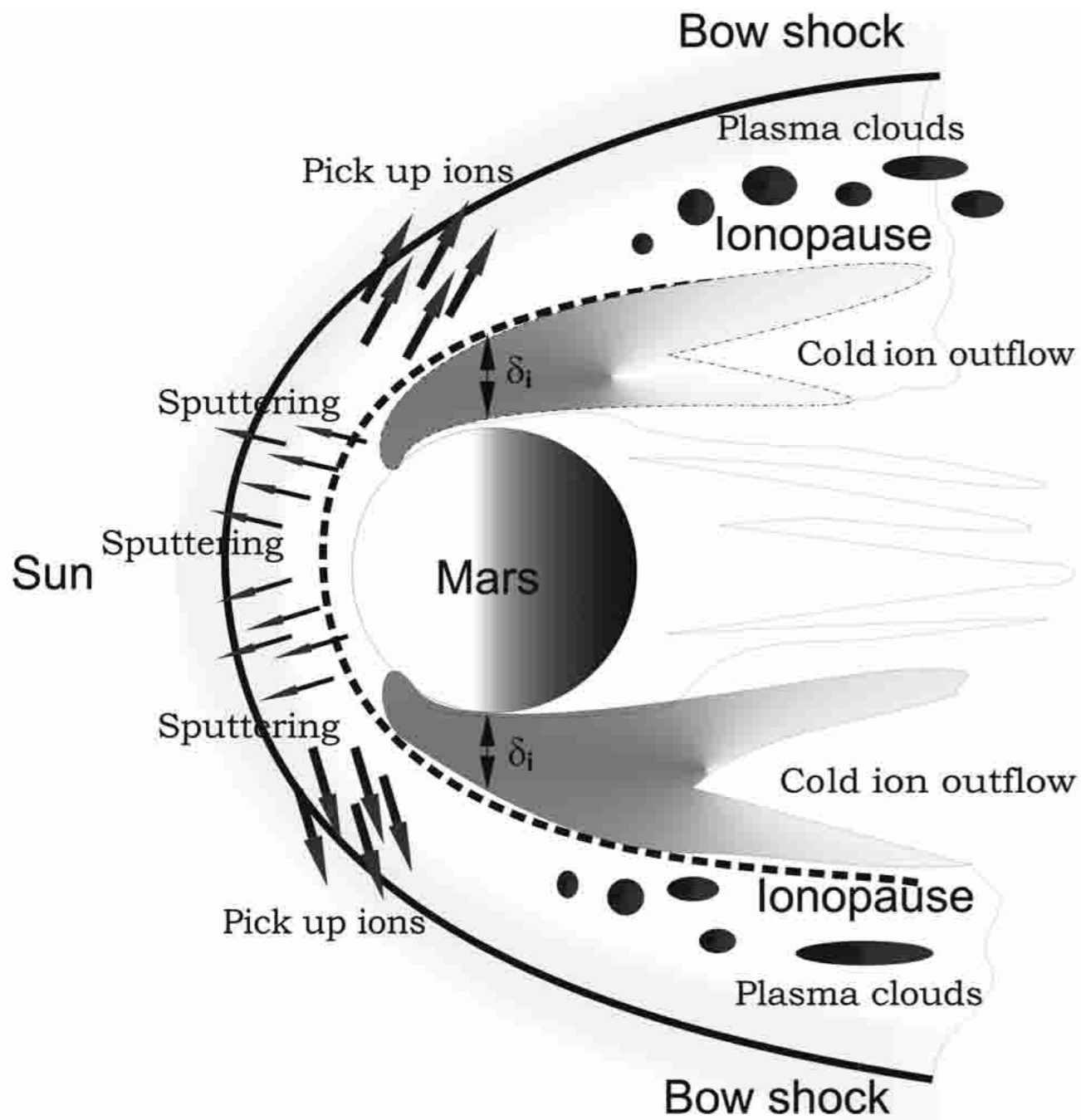


**Present-day**



- \* 火星はかつて液体の水を保持できるほど温暖であった
- \* ⇒ 現在と比較して大量の水と温室効果のある厚い大気が存在した

# 非磁化惑星からの非熱的散逸



Terada et al. (2009)

磁場を持たない惑星の場合、太陽風が上層大気と相互作用することで大気散逸を引き起こす

- **イオンピックアップ:**  
上層大気中のイオンが太陽風磁場によって流出
- **スパッタリング:**  
ピックアップイオンによって中性粒子が叩き出される
- **Bulk removal (cold ion flow):**  
電離した大気の一部が流体的に散逸

# まとめ

- \* 大気散逸：惑星大気への宇宙空間の流出現象
- \* 熱的散逸：Hydrodynamic escape, Jeans escape
- \* 非熱的散逸：光化学的散逸, Ion pick-up, sputtering など
- \* 数十億年スケールでの惑星の表層環境・気候変動に関連  
例：金星・火星の水, 火星の大気