

# 地球惑星圏物理学

## 第8回：大気散逸



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

[hiro.kurokawa@elsi.jp](mailto:hiro.kurokawa@elsi.jp)

# レポート課題 (6/3 17時締切)

---

地球の地殻中には  $3.6 \times 10^{20}$  kg の炭酸塩岩が含まれていると見積もられている。この炭酸塩は原始地球において大気中の二酸化炭素  $\text{CO}_2$  が固定されたものである。炭酸塩岩をすべて炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  であると近似する時、原始地球の大気圧を見積もれ (有効数字1桁)。

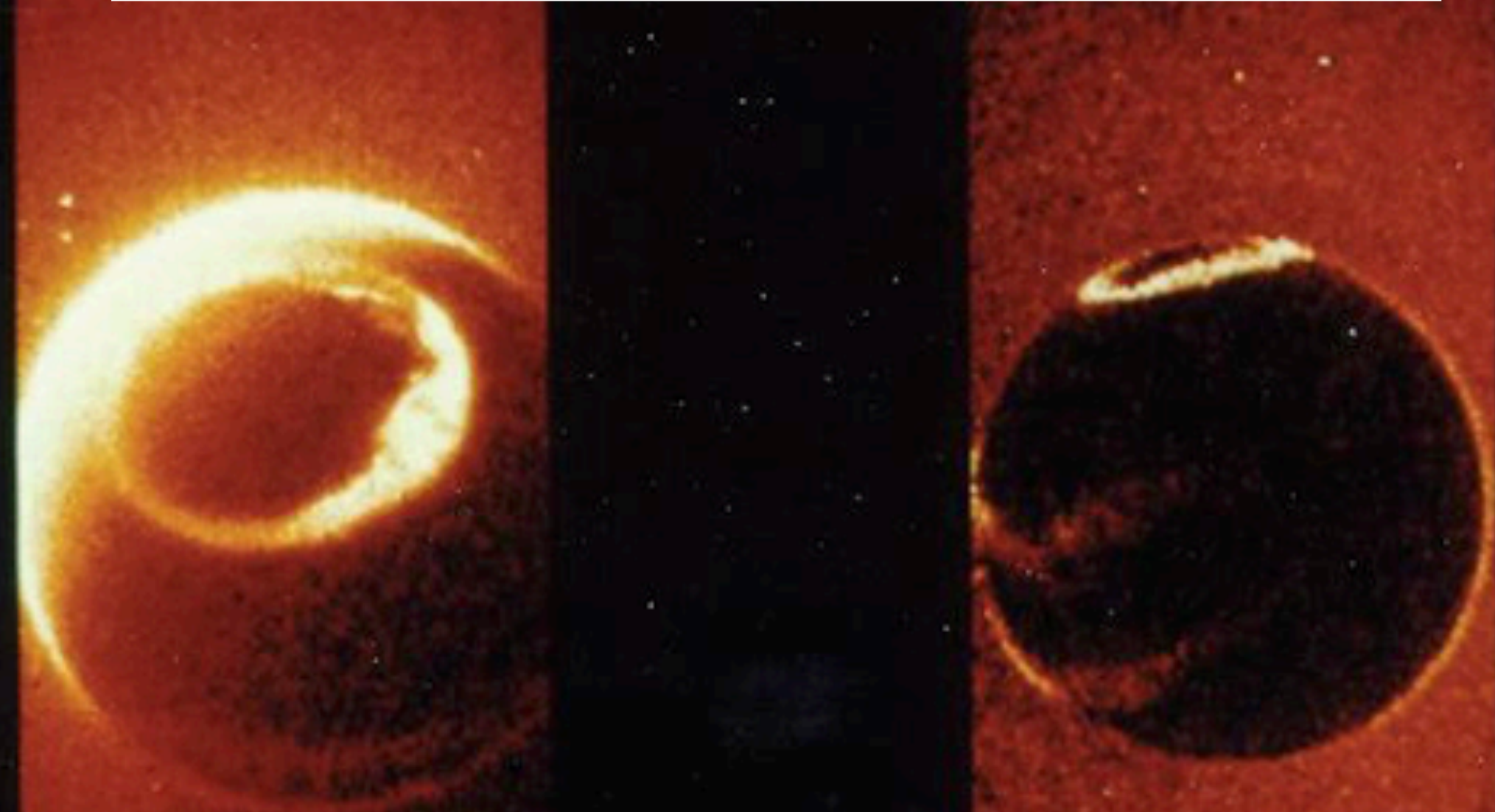
$3.6 \times 10^{20}$  kg の  $\text{CaCO}_3$  うち、 $44/100$  が  $\text{CO}_2$  である。原始地球大気が  $\text{CO}_2$  のみを含むとすると、

$$p = \frac{M_{\text{atm}}}{4\pi R^2} g = \frac{3.6 \times 10^{20} \times 44/100}{4 \times 3.1 \times (6.4 \times 10^6)^2} \times 9.8 \simeq 3 \times 10^6 \text{ Pa}$$



# 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)



- 地球を取り囲んで広がる水素が太陽光 (Lyman- $\alpha$ ) を散乱
- 海水起源の水素が流出(**大気散逸**)している

Rairden et al. (1986)

# 大気散逸過程

- **熱的散逸:**

熱力学平衡にある大気成分が熱エネルギーによって散逸

- ・ ジーンズ散逸
- ・ 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 (≠熱力学平衡)

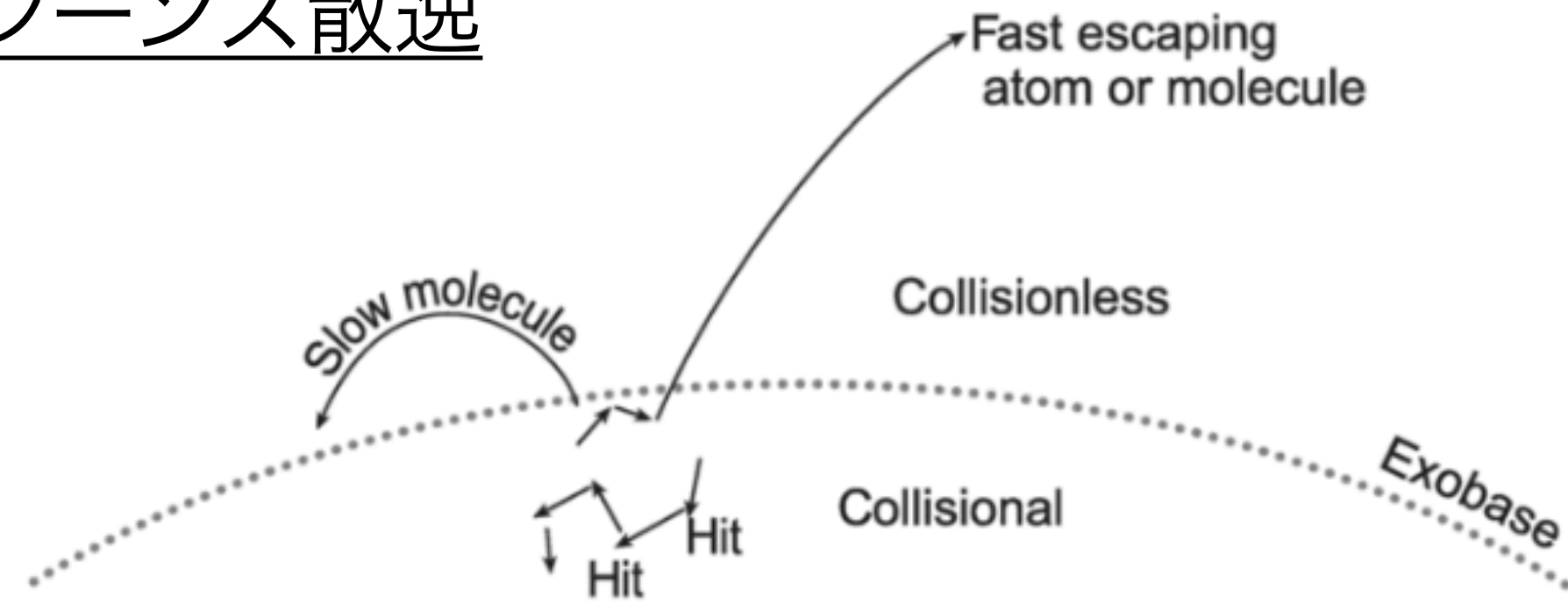
- ・ 光化学的散逸 (光解離, 解離性再結合など)
- ・ スパッタリング …etc

- **天体衝突剥ぎ取り** ← 小惑星・彗星衝突

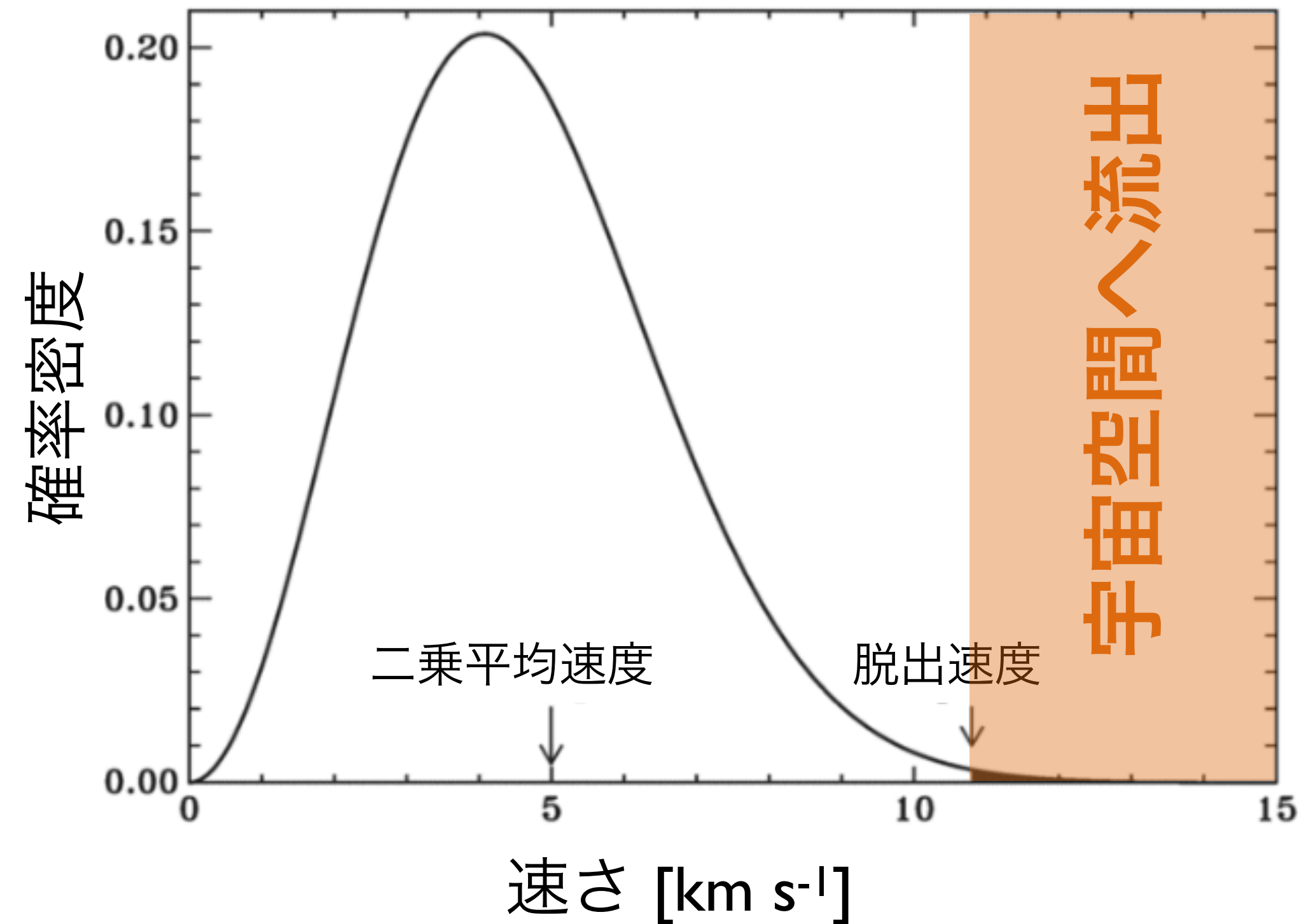


# 熱的散逸

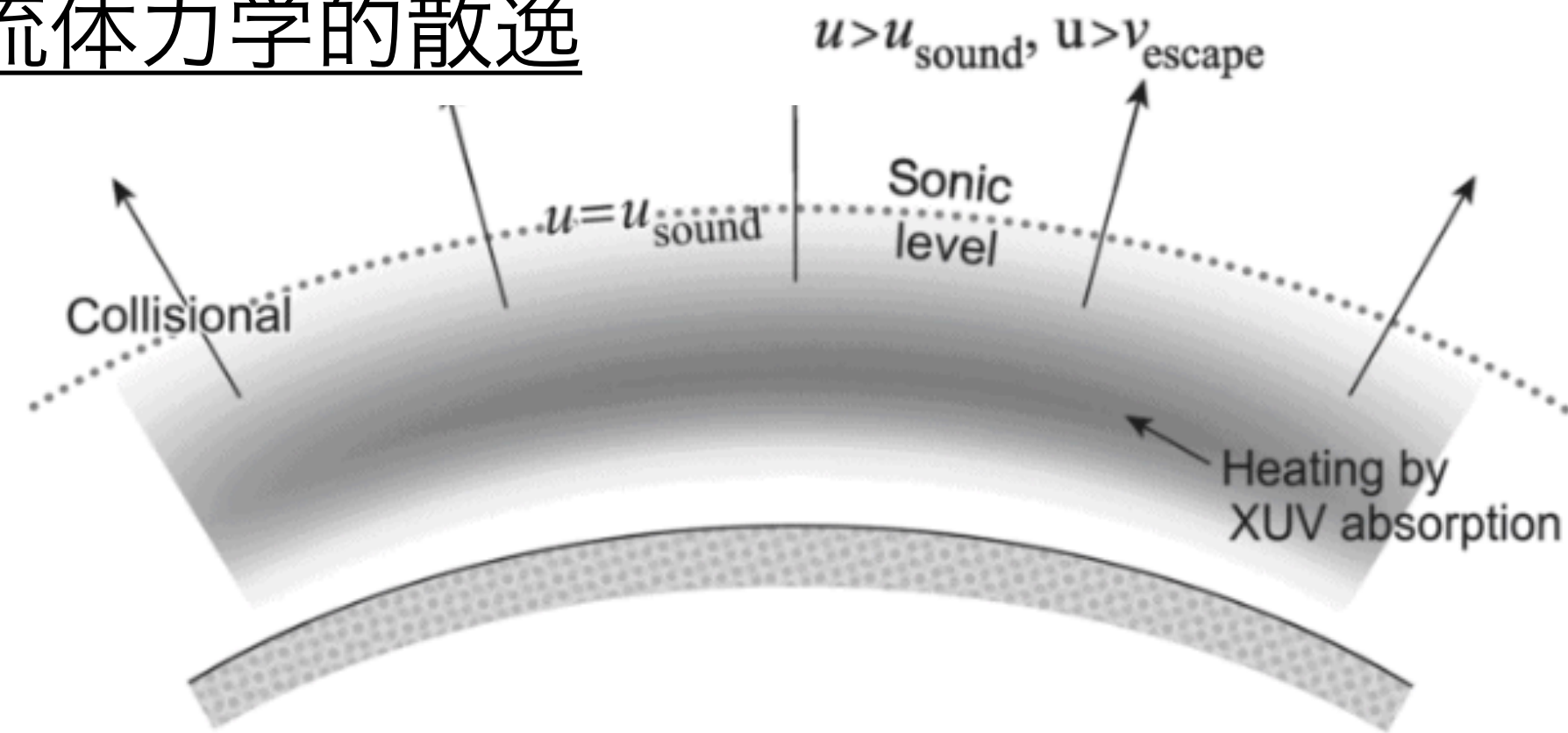
## ジーンズ散逸



外気圏界面粒子の速度分布関数 (マクスウェル分布)



## 流体力学的散逸

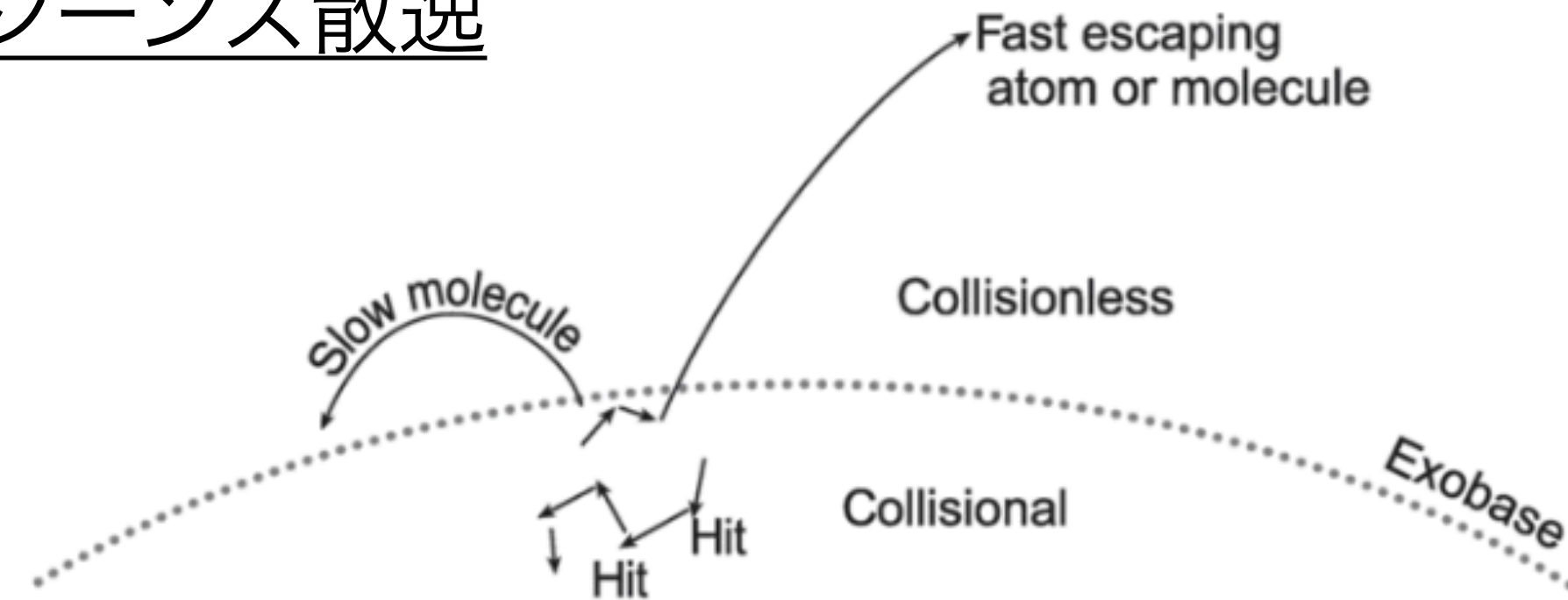


- ジーンズ散逸：少量の粒子が脱出速度を超えて散逸
- 流体力学的散逸：大部分の粒子が脱出速度を超えて散逸

Catling & Kasting (2017)

# 熱的散逸

## ジーンズ散逸



外気圏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

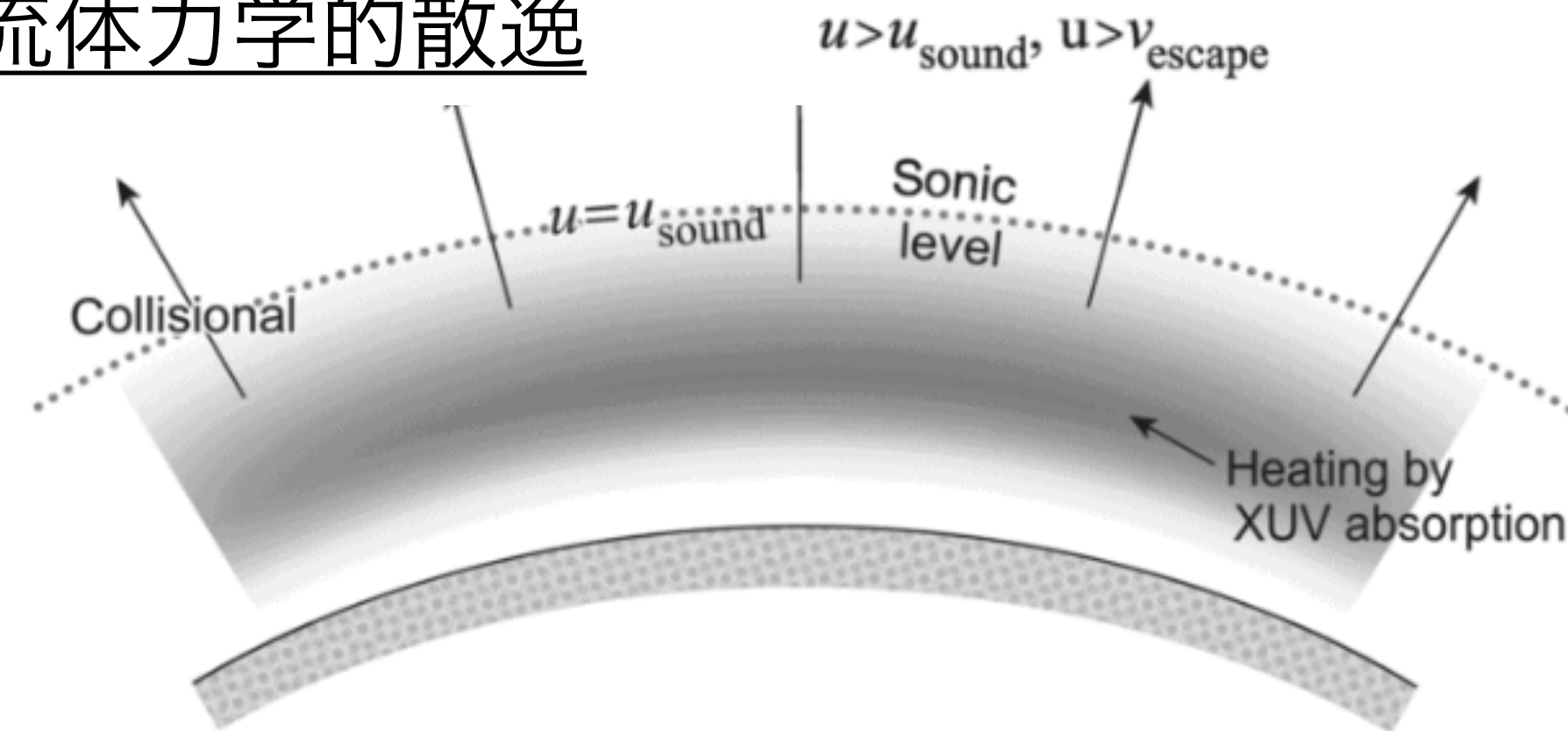
$v$ : 平均速度

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

$T$ : 外気圏の温度  $\sim 1000$  K

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

## 流体力学的散逸



一方、地球からの脱出速度は

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

- 現在の地球大気からの熱的散逸 = ジーンズ散逸
- $T \simeq 5000$  K に達すると流体力学的散逸

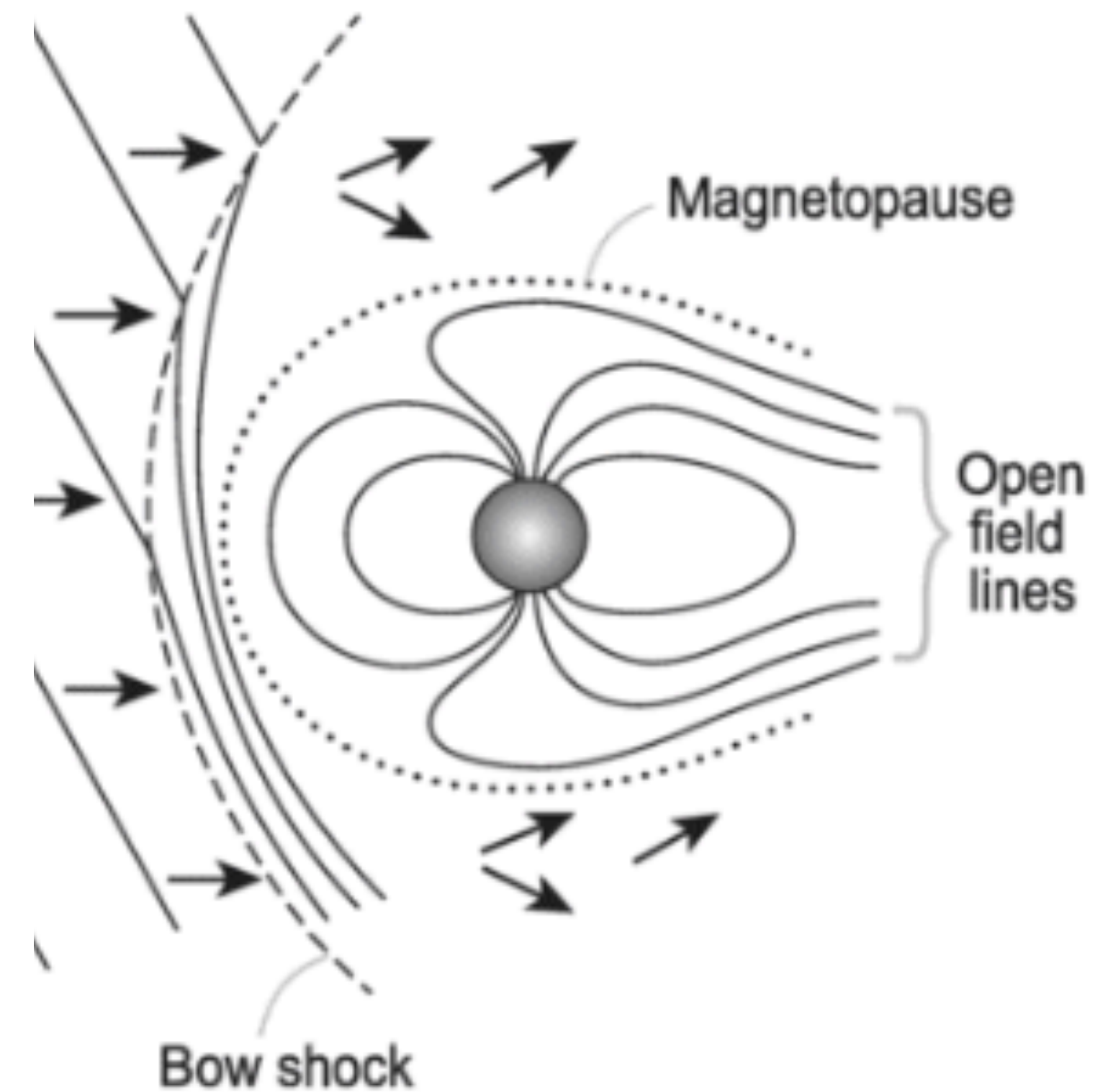
Catling & Kasting (2017)



# 非熱的散逸

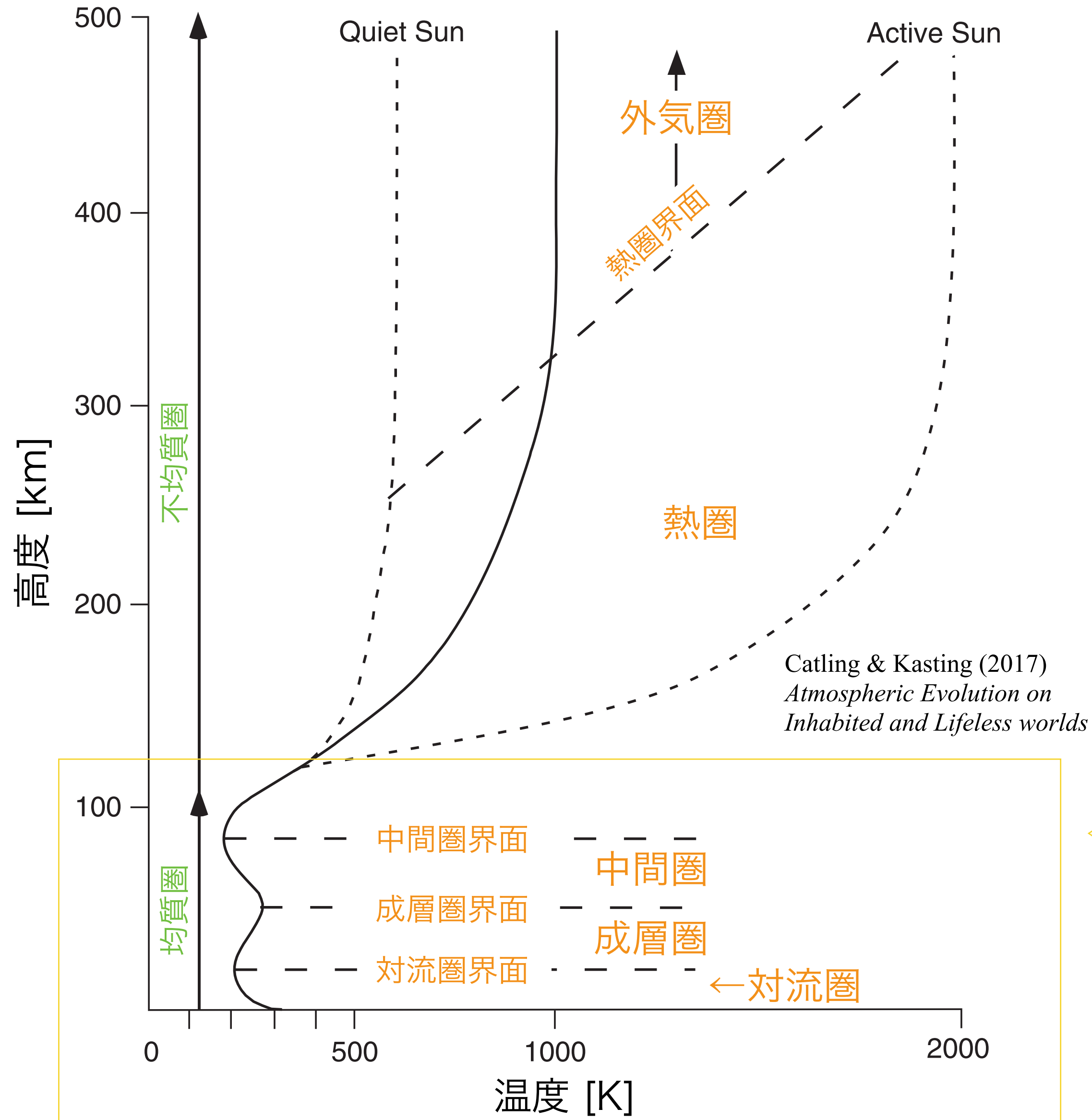
上層大気には 太陽UVによって電離したhot (fast)  $H^+$  イオンが存在

- **The polar wind** ポーラーウインド:  
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

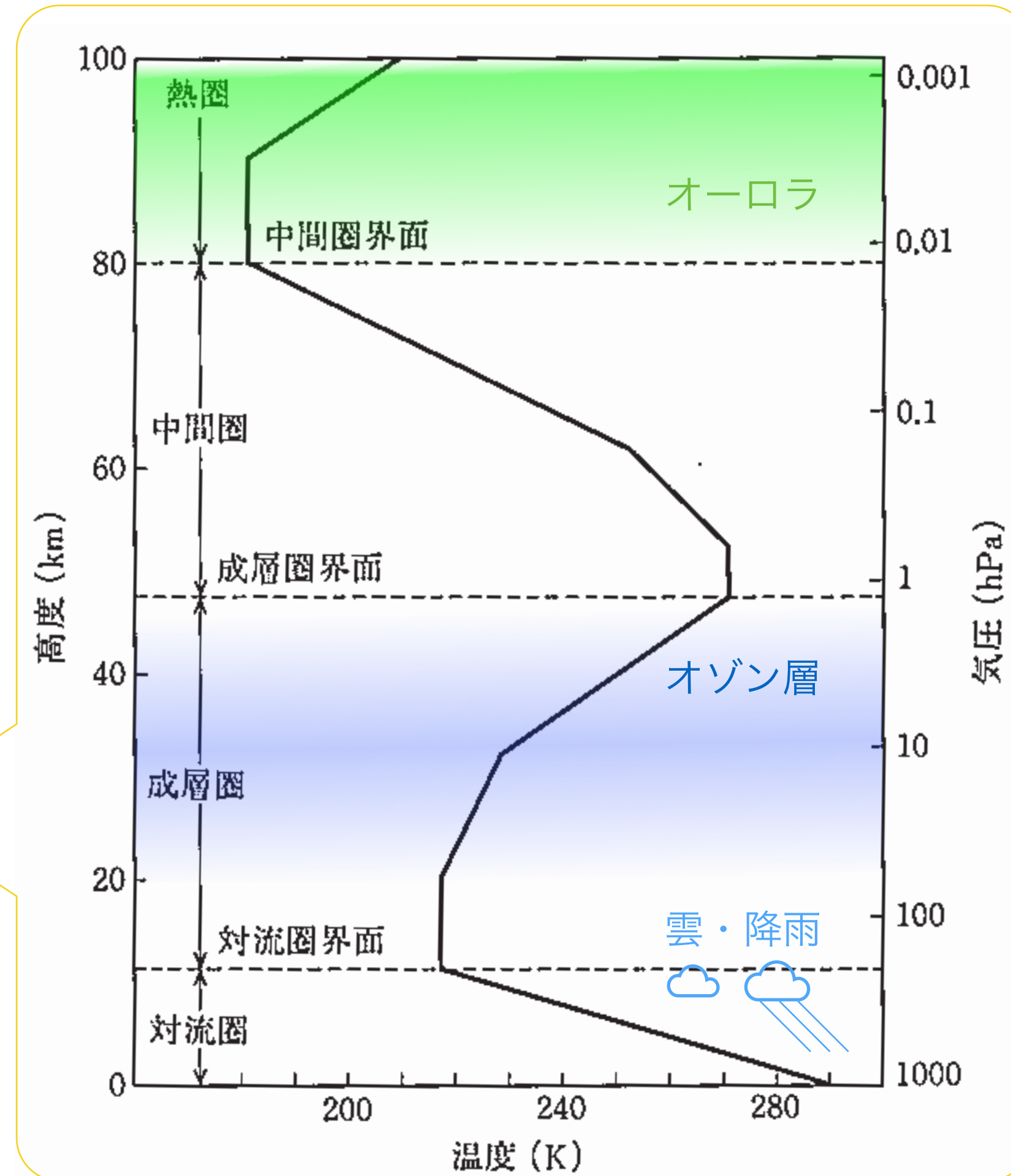


現在の地球における水素散逸への寄与は  
60-90% 電荷交換, 10-40% ジーンズ散逸, and 10-15% polar wind

# 地球大気の温度構造

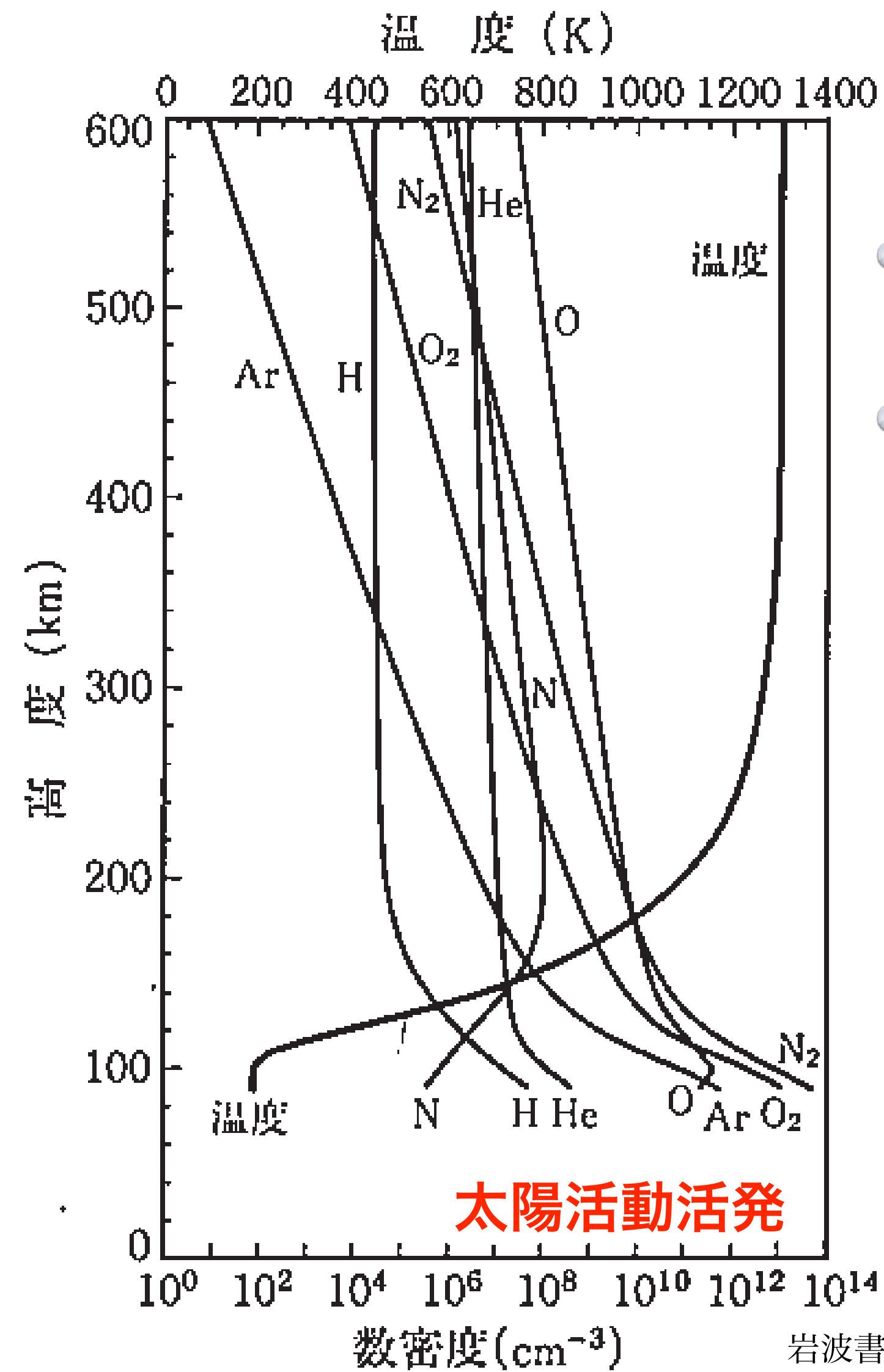
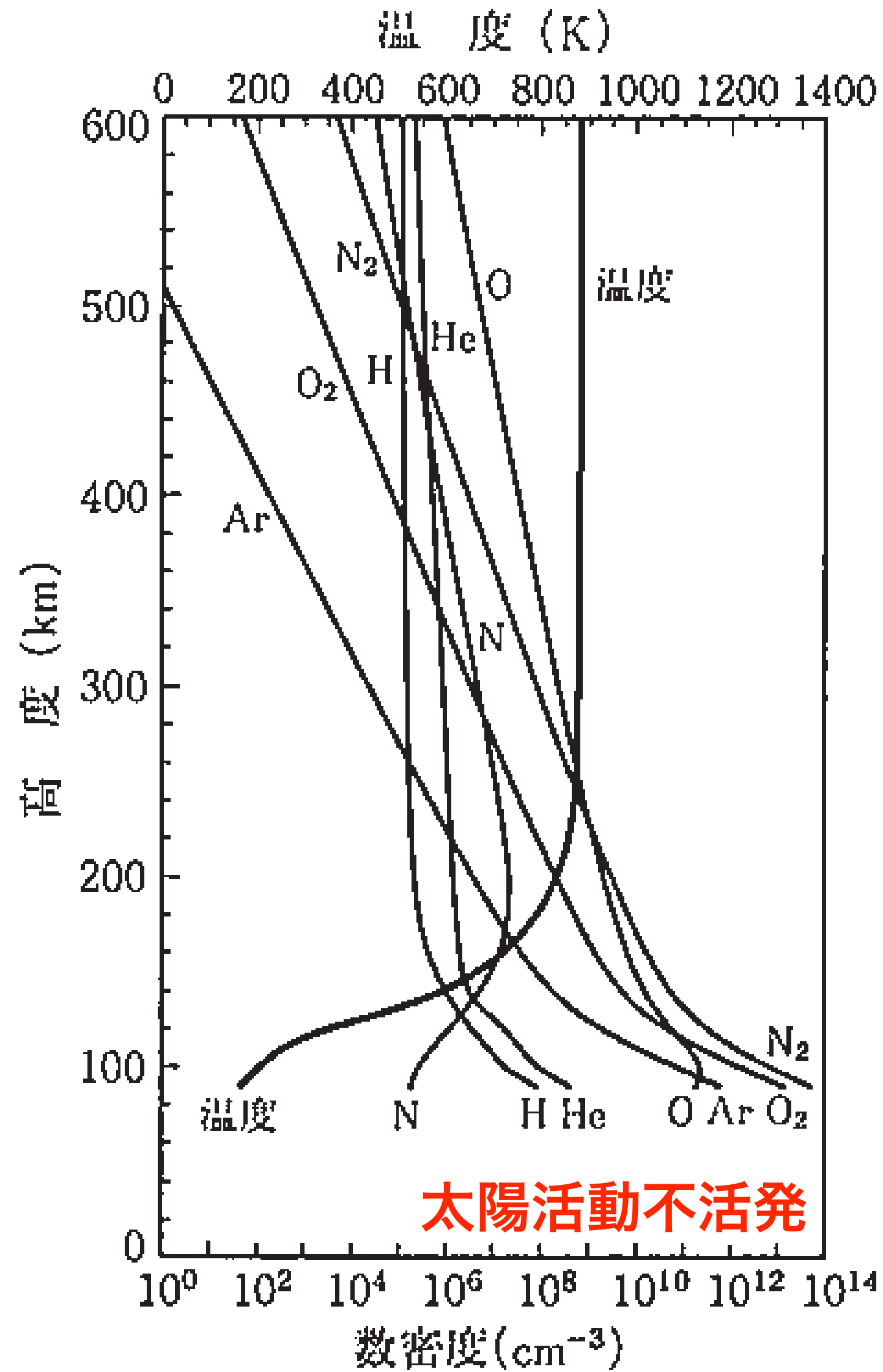


- 温度に着目：対流圏, 成層圏, 中間圏, 熱圏
- 化学組成に着目：均質圏, 不均質圏





# 熱圏の化学組成分布



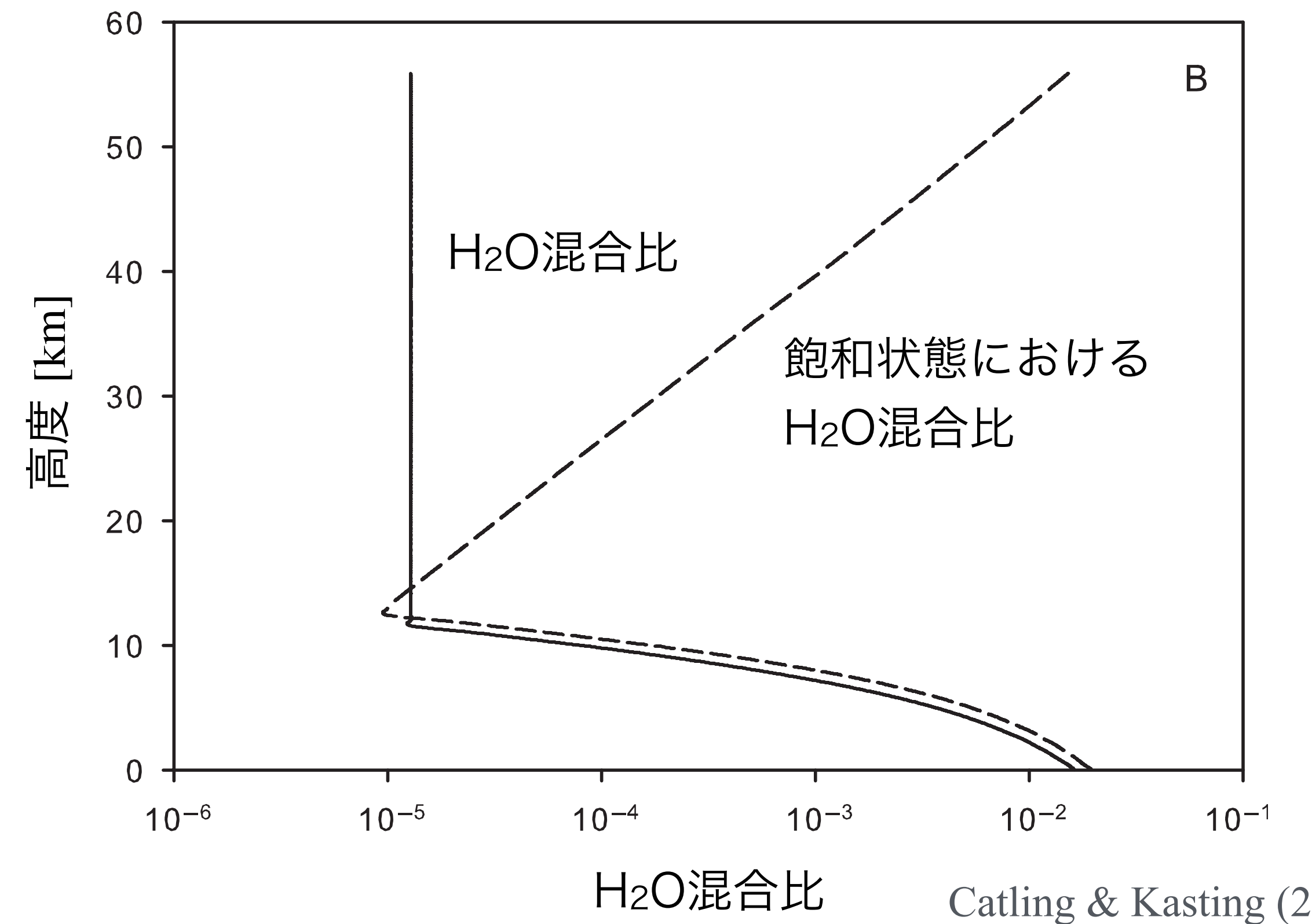
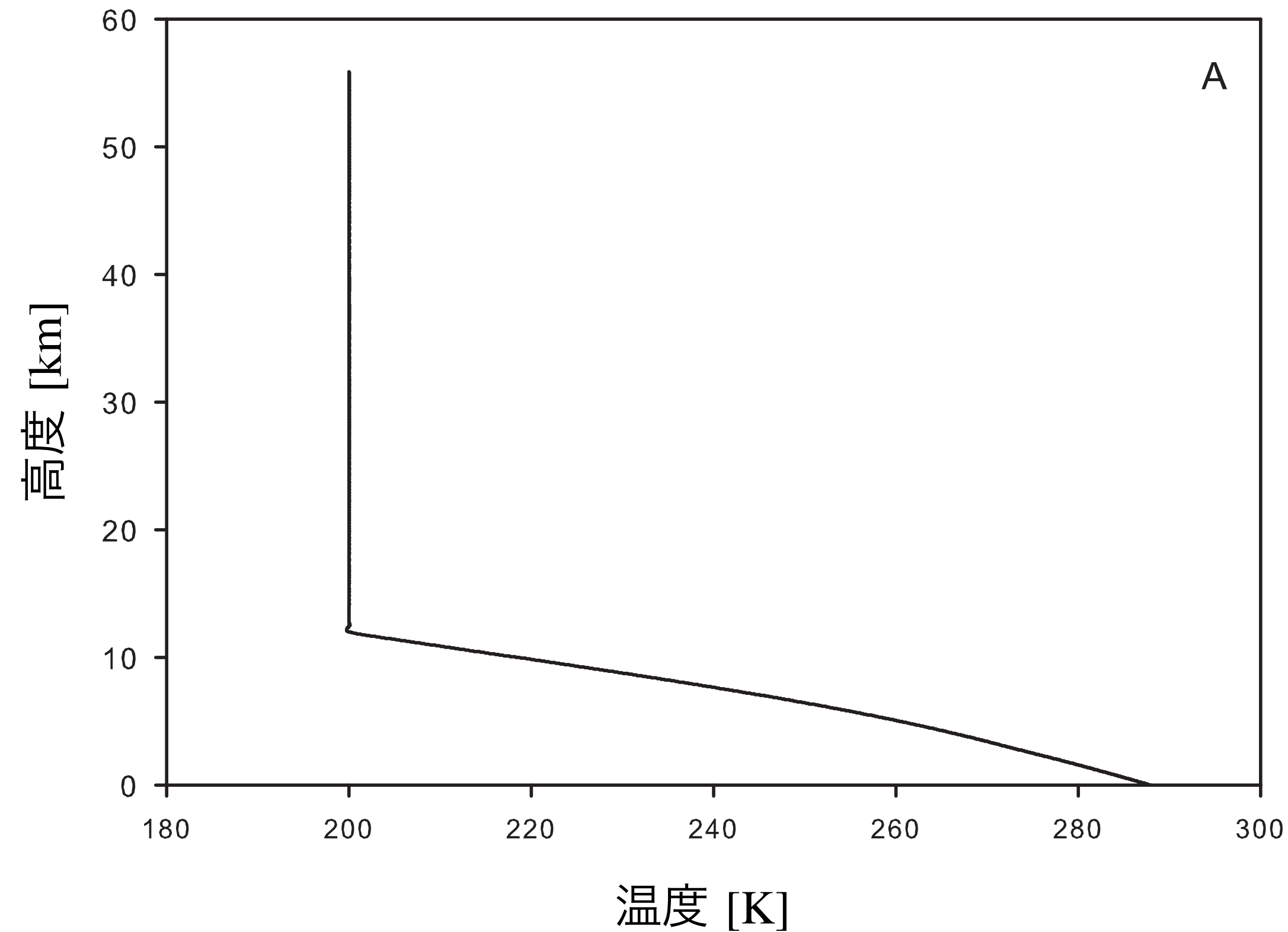
- 不均質圏では上空ほど軽い分子に富む
- それぞれの分子の質量に応じたスケールハイトで分布：

$$H_i = \frac{k_B T}{m_i g}, \quad i \text{ は各分子を表す}$$

岩波書店『比較惑星学』より転載

# コールドトラップと拡散律速散逸

簡略化した地球大気の温度構造と水蒸気の混合比

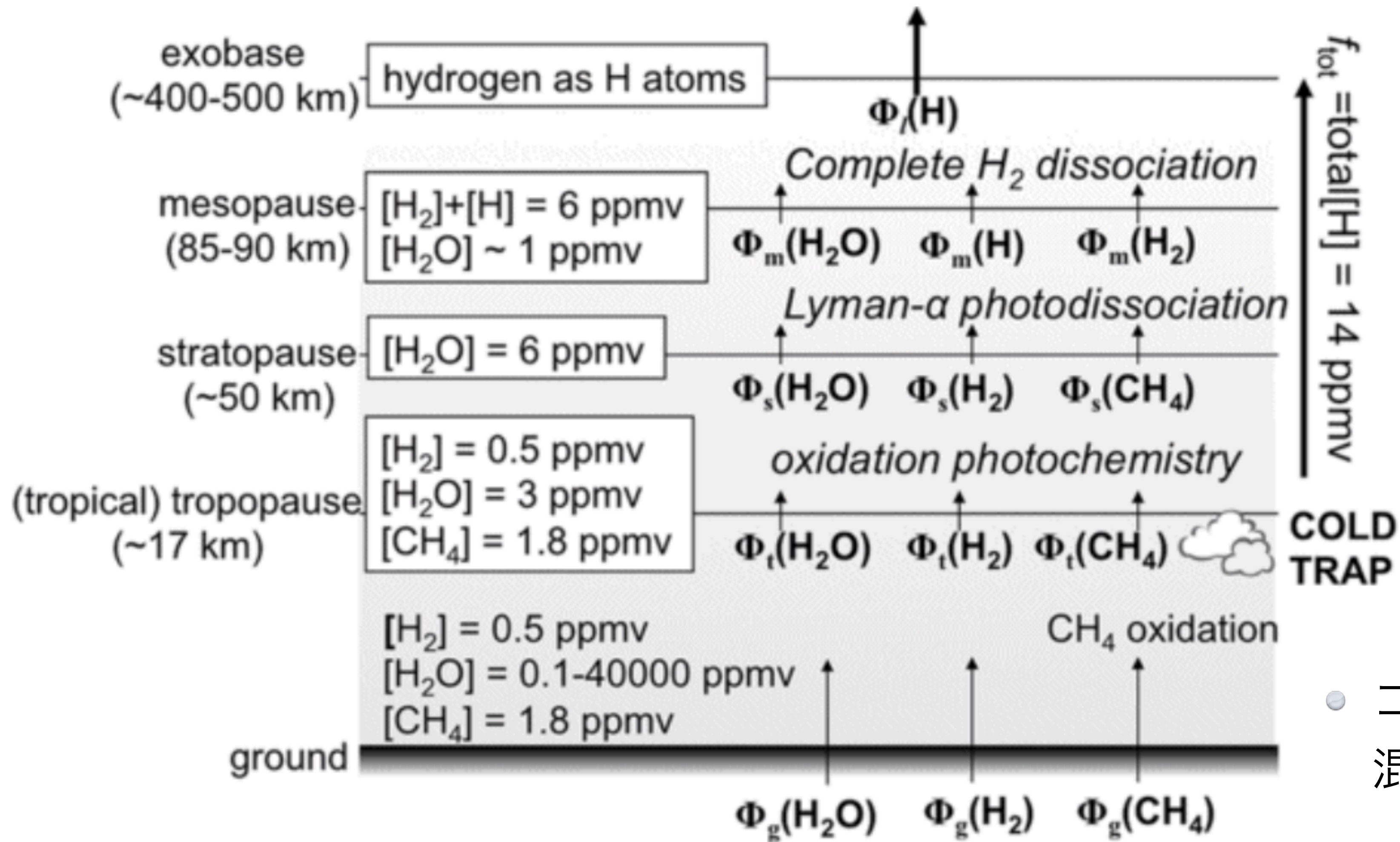


Catling & Kasting (2017)

- 水蒸気が凝結・降雨することで、水素散逸率は小さく抑えられている (コールドトラップ)
- 地球からの水素散逸率は高層大気への水素の輸送が律速 (拡散律速散逸)



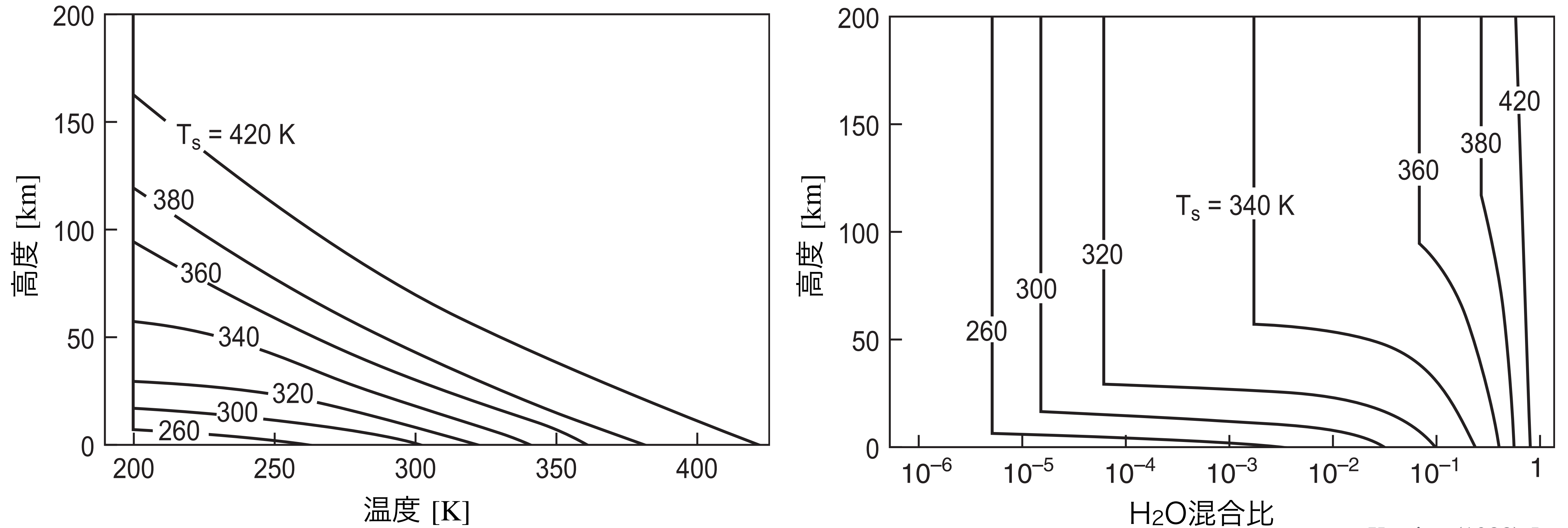
# 拡散律速散逸



- コールドトラップに達した水素が混合比ほぼ一定で上空へ
- 最終的に解離して大気散逸

# コールドトラップの破れ

簡略化した地球大気の温度構造と水蒸気の混合比：地表面温度上昇への応答

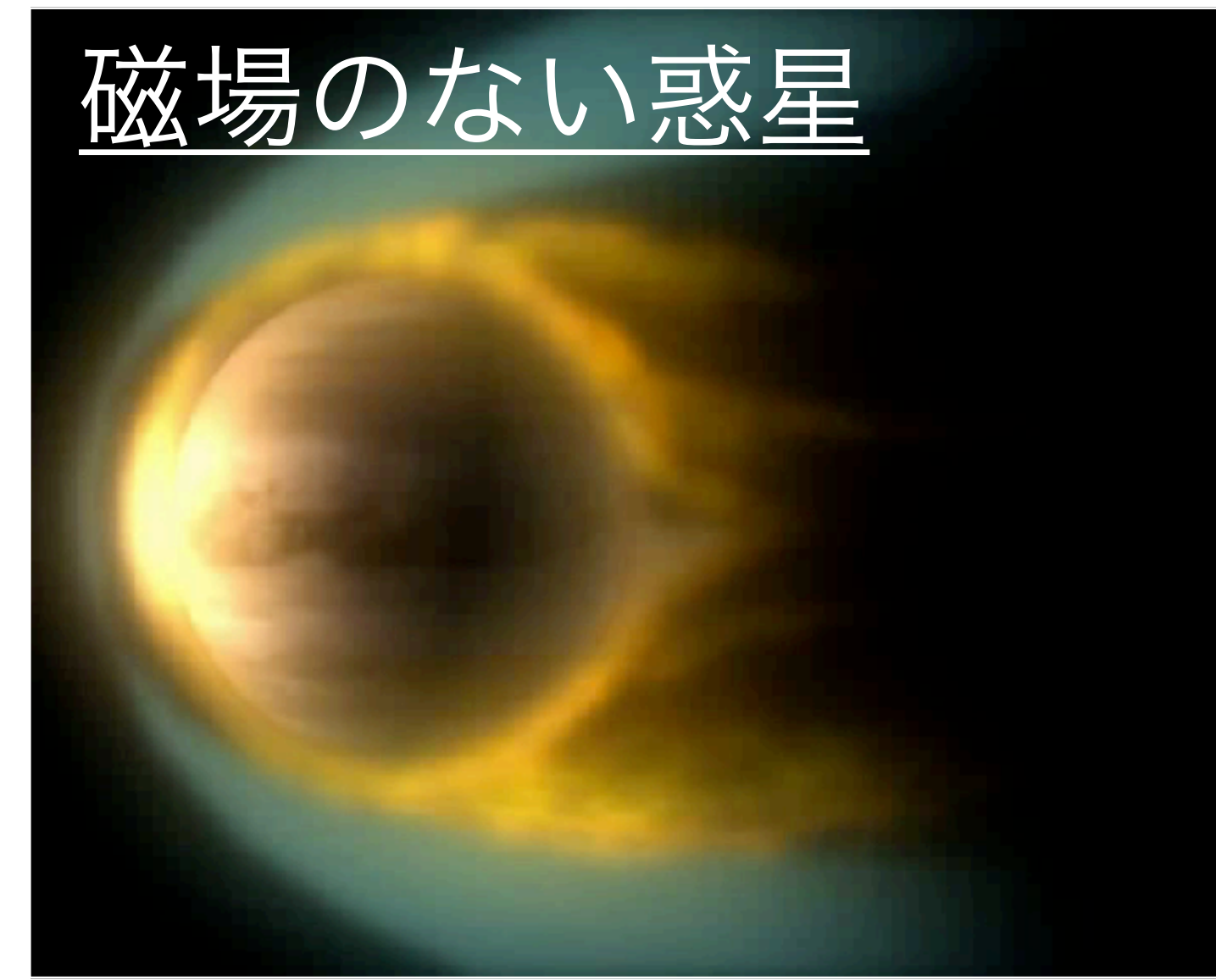
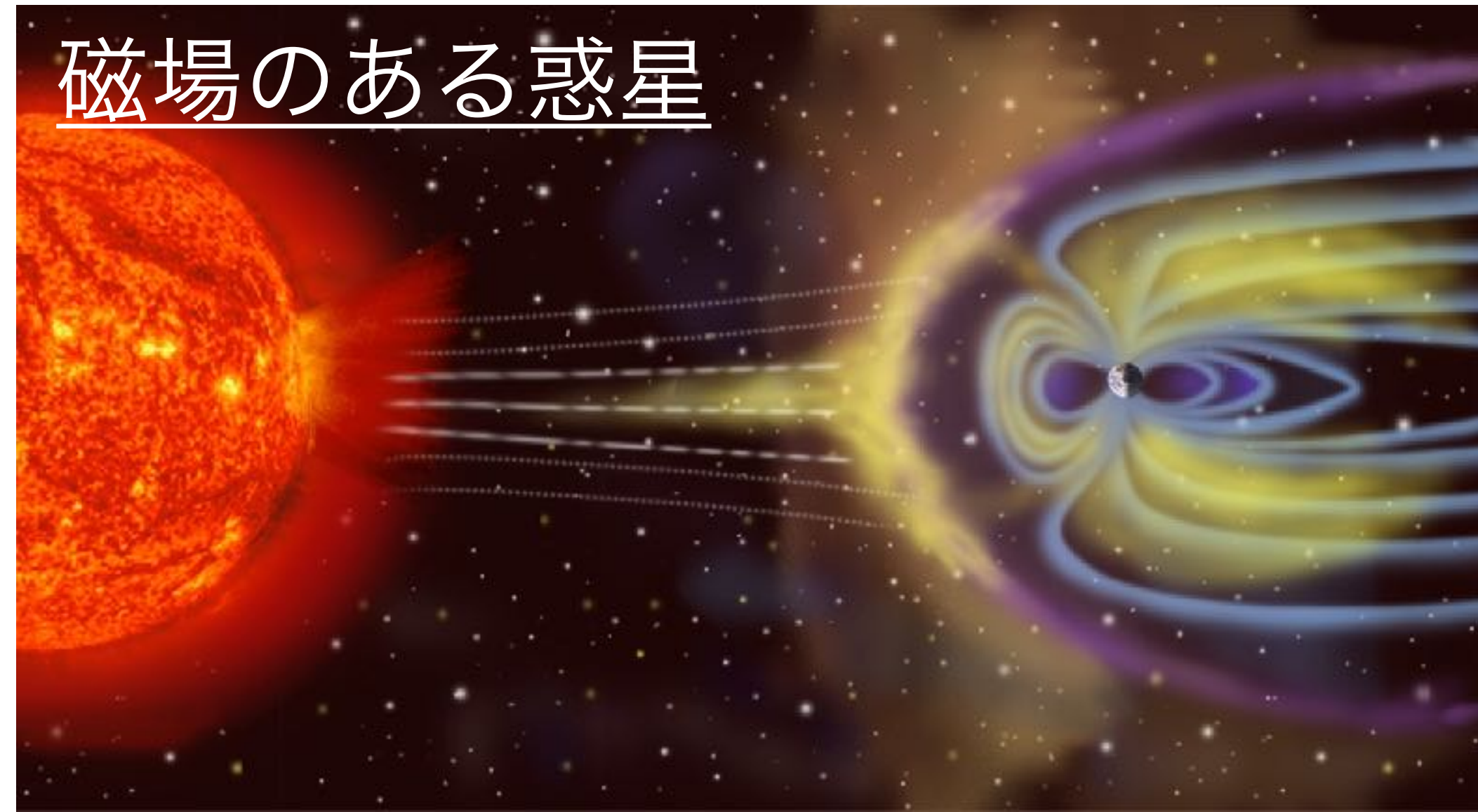


Kasting (1988) *Icarus*

- 地表温度が高い(e.g., 恒星に近い) → 地表付近のH<sub>2</sub>O混合比大 →  $-dT/dz$  小 → 上空のH<sub>2</sub>O混合比大
- 地球ではコールドトラップが水の散逸を抑制 ↔ 金星では散逸



# 磁場を持たない惑星：金星, 火星

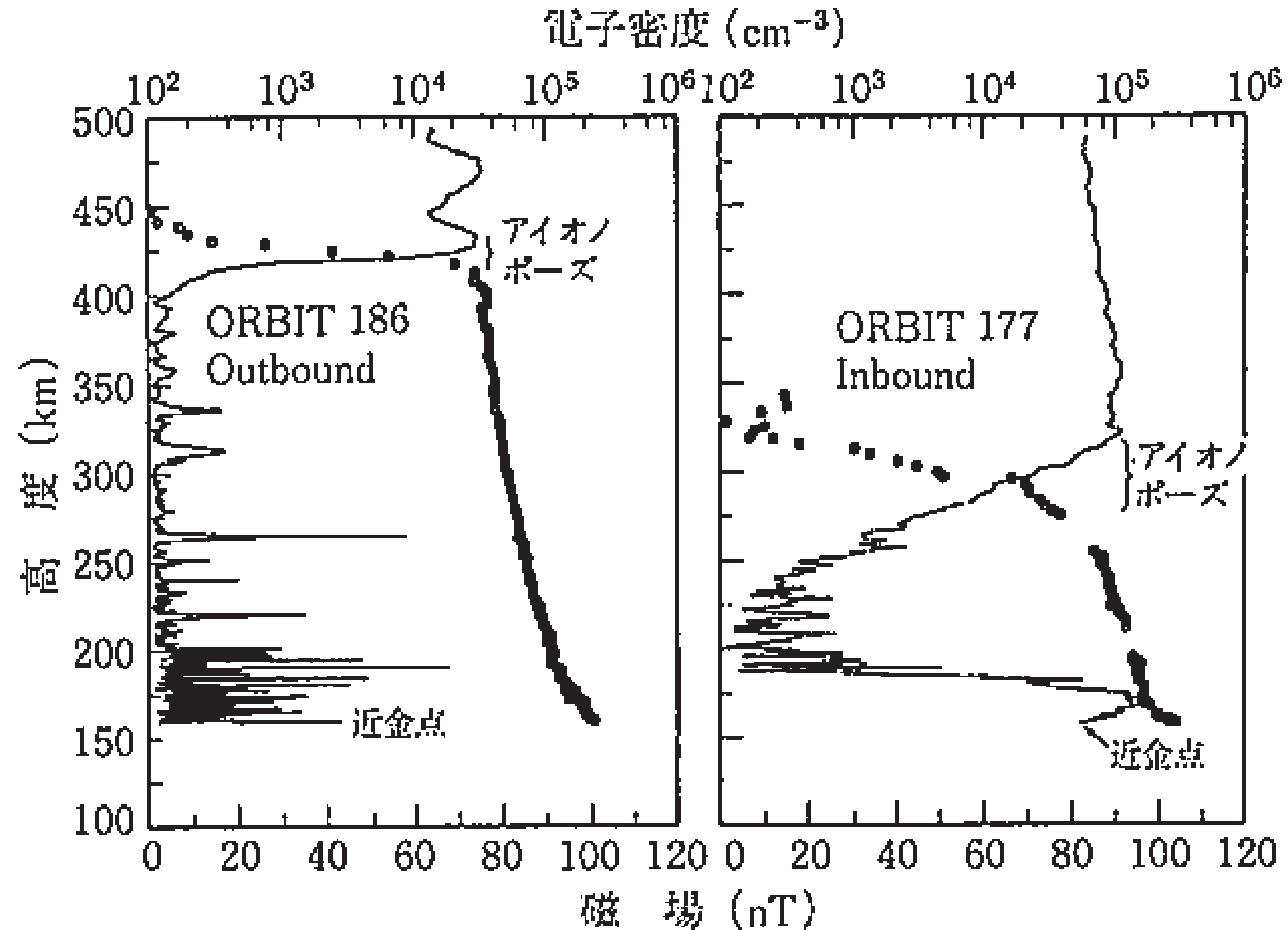


磁気圧 = 太陽風動圧

電離圏プラズマ圧 (or 誘導磁気圧)  
= 太陽風動圧

- 磁場を持たない惑星では大気上層の電離圏と太陽風の間  
の電離圏界面(lonopause)が地上から数100 kmに位置する
- 太陽風による大気散逸を引き起こす

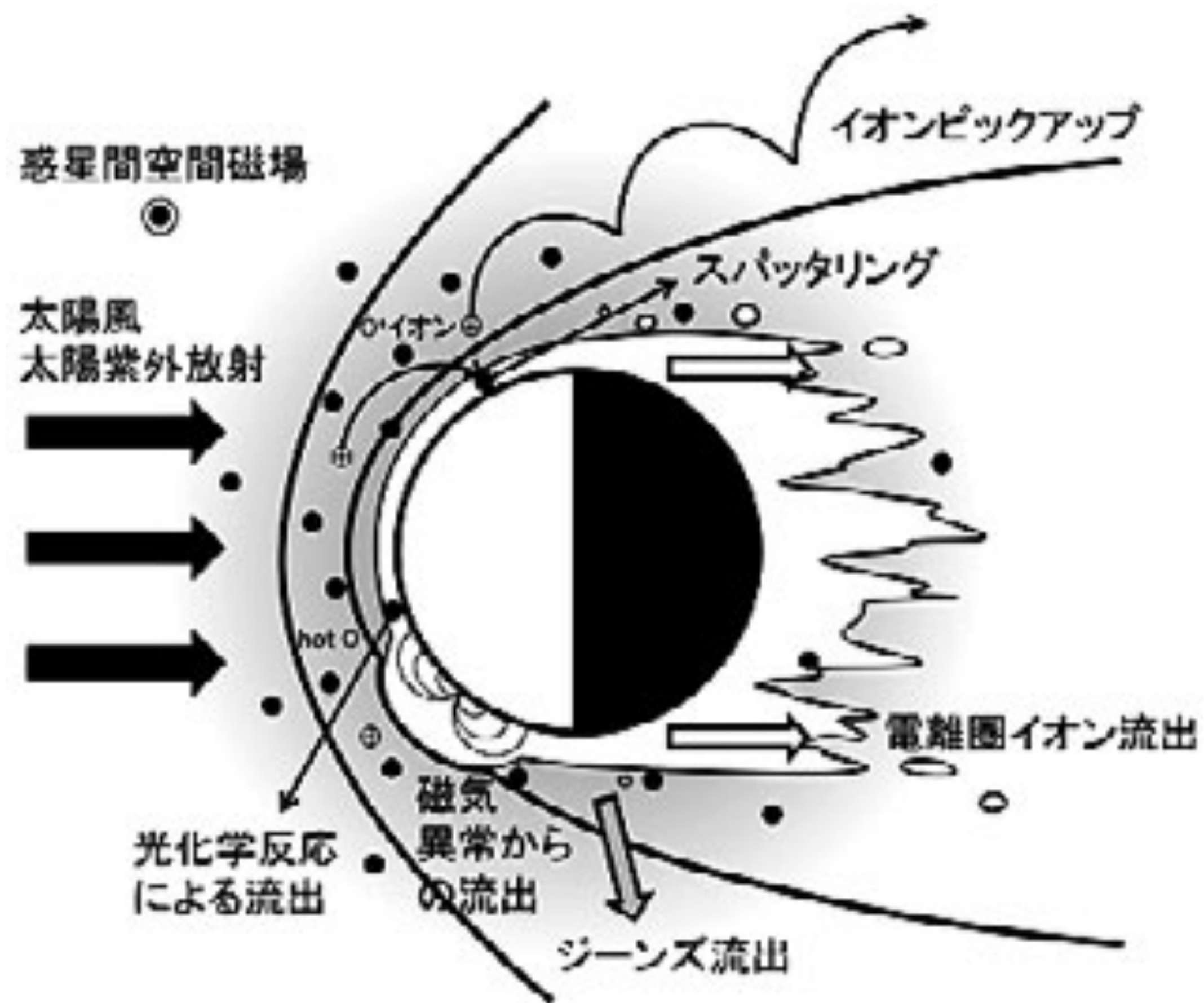
# 太陽風-電離圏界面：アイオノポーズ



金星電離層の磁場強度と電子密度, (左) 太陽風動圧低 (右) 太陽風動圧大



# 非磁化惑星からの非熱的散逸



太陽風が高層大気と相互作用

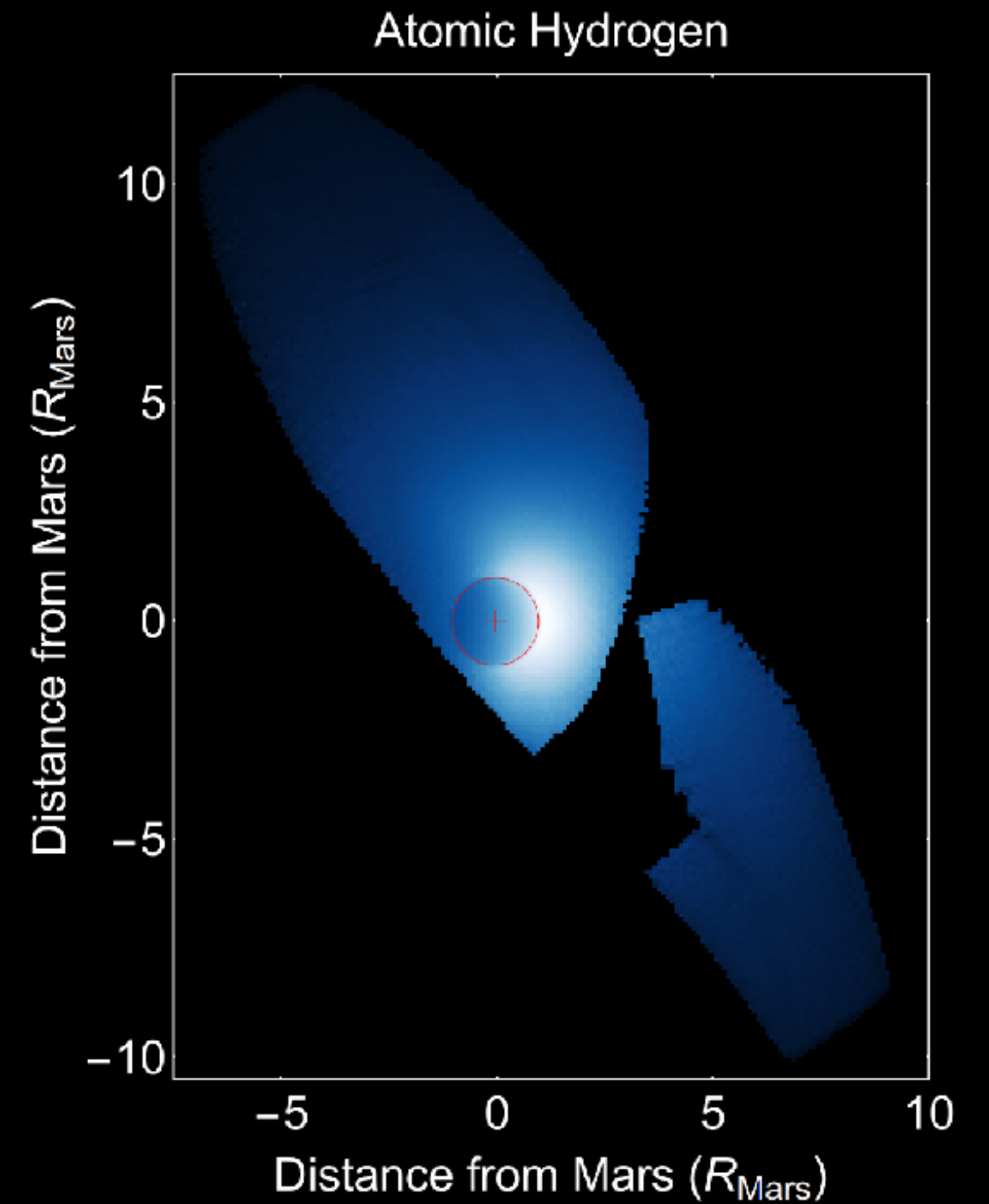
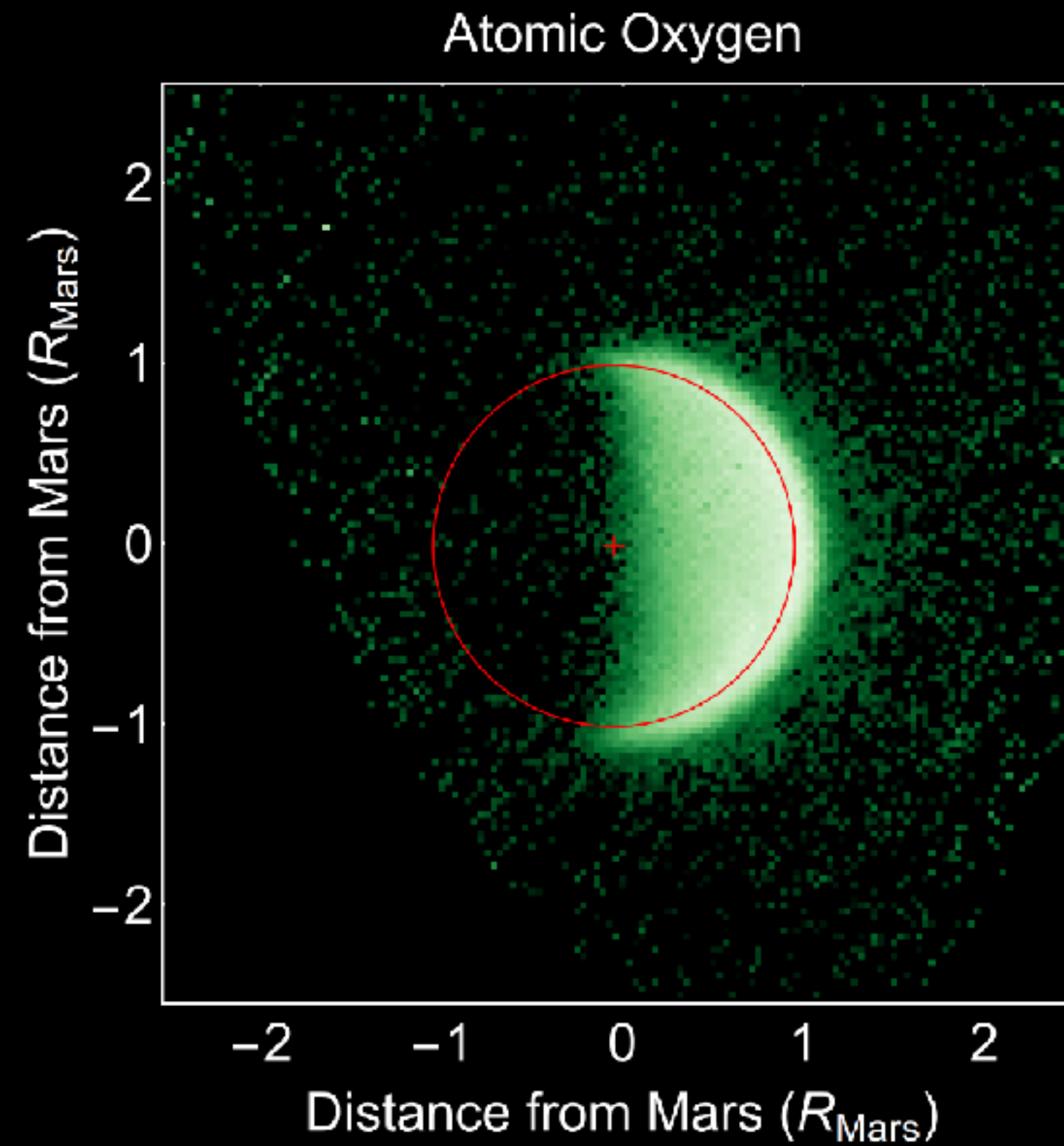
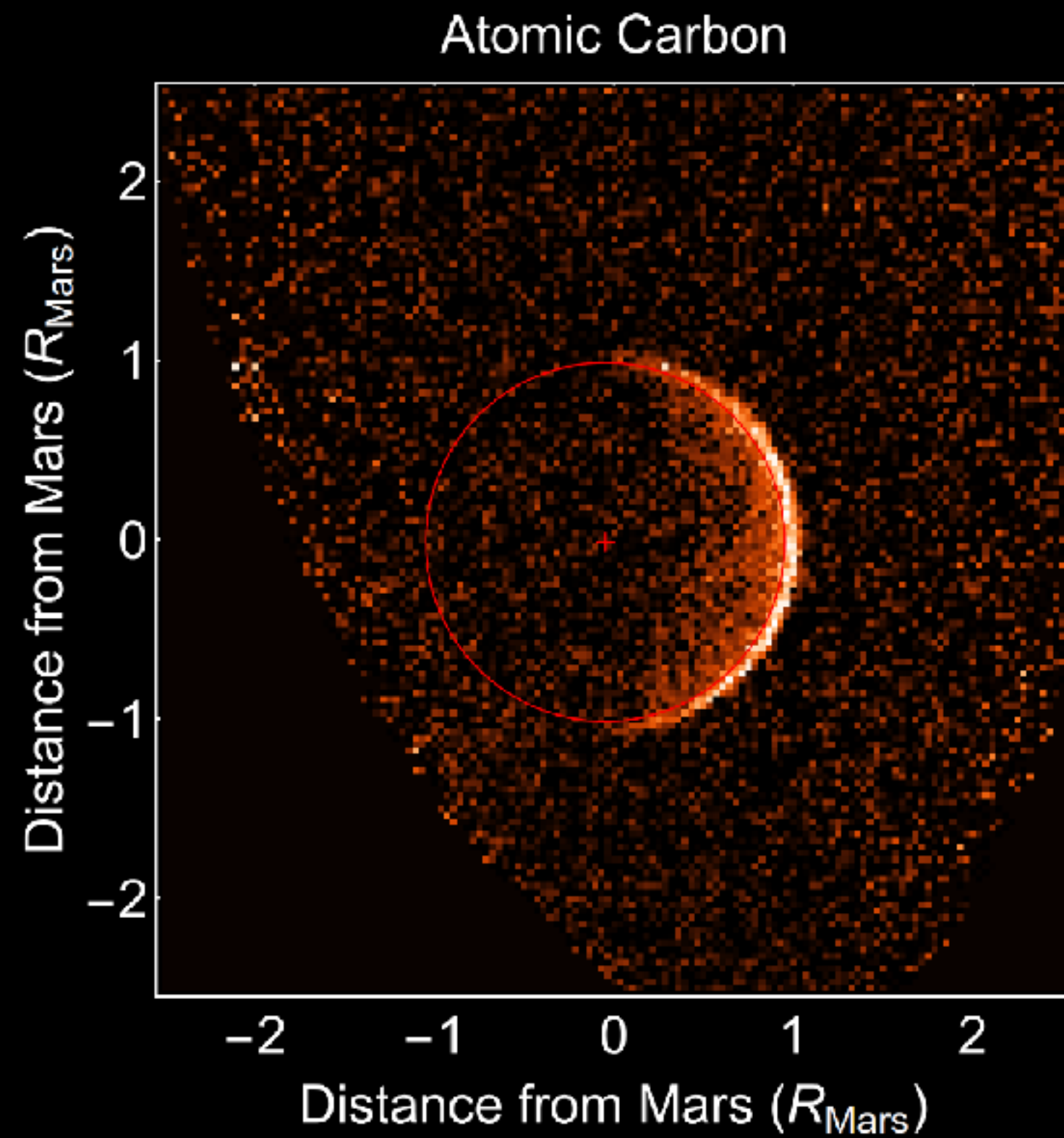
→ 重い元素も大気散逸

- **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
- **電離圏イオン流出:**  
電離した大気の一部が流体的に散逸



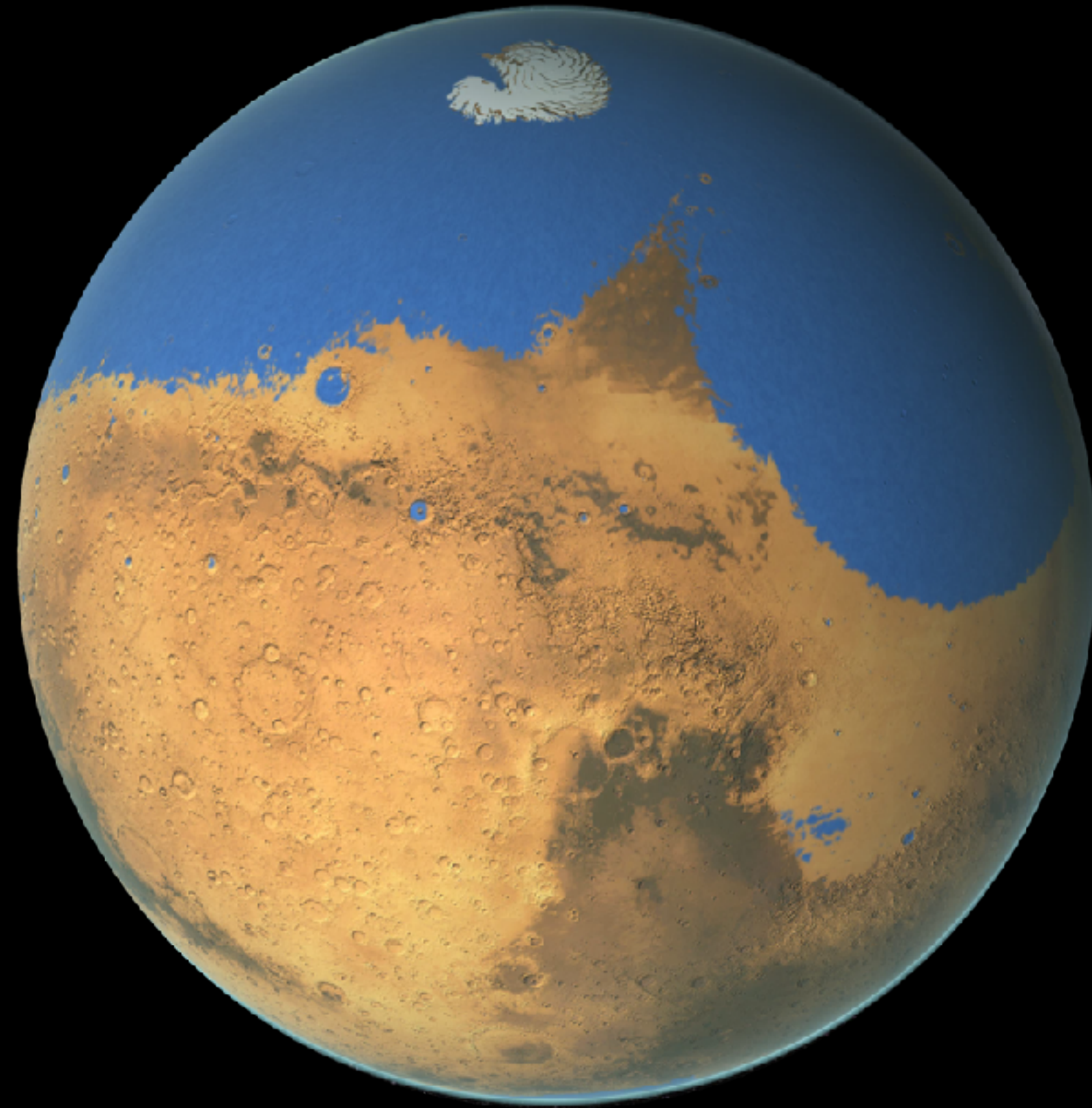
# 火星の大気散逸

探査機MAVENによる火星の散逸大気観測 (credit: Univ. Colorado, NASA)





約40億年前？



現在





# 系外惑星の大気散逸

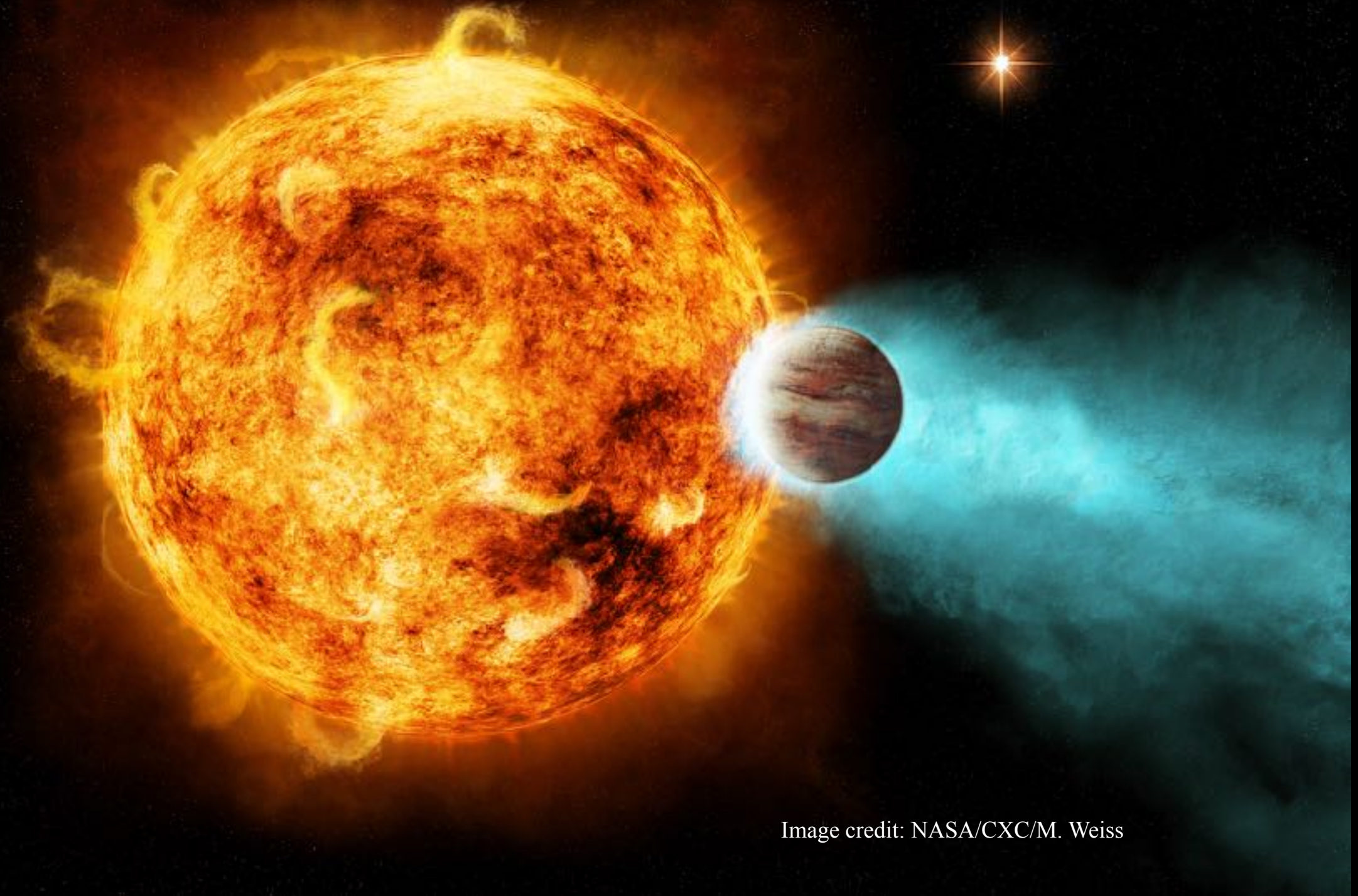
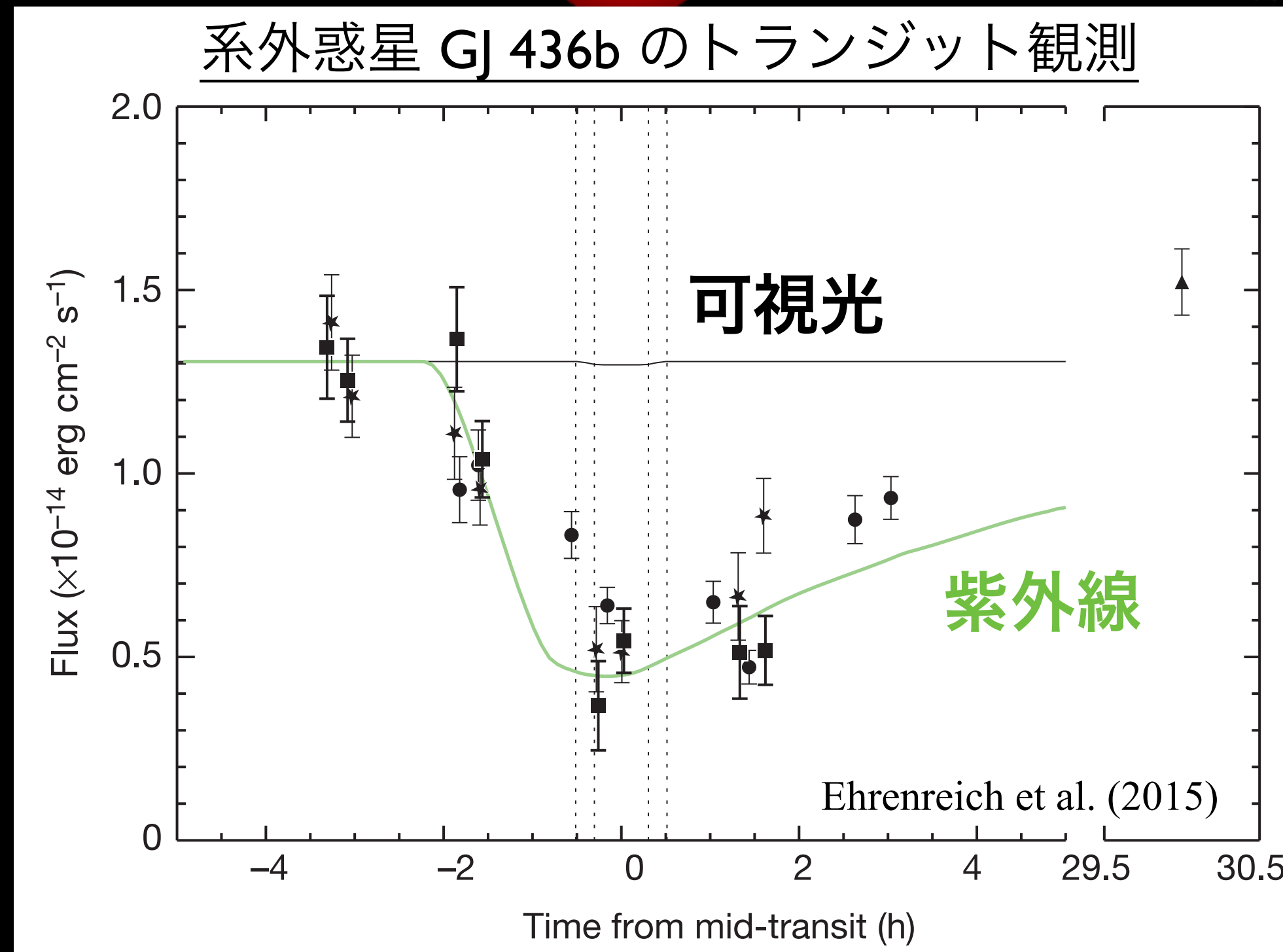
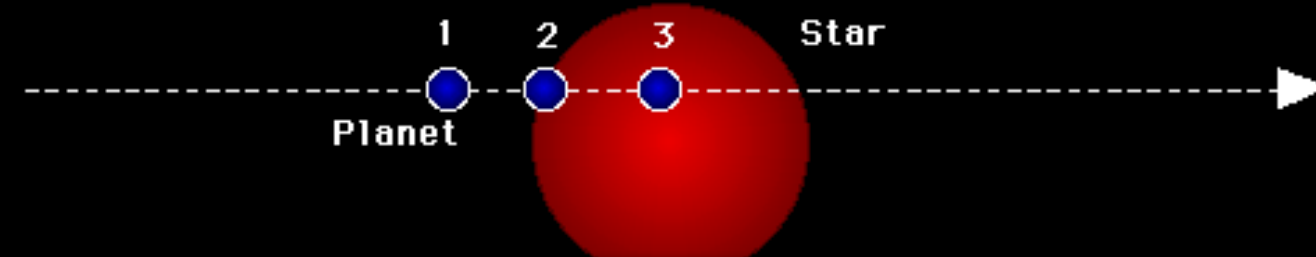
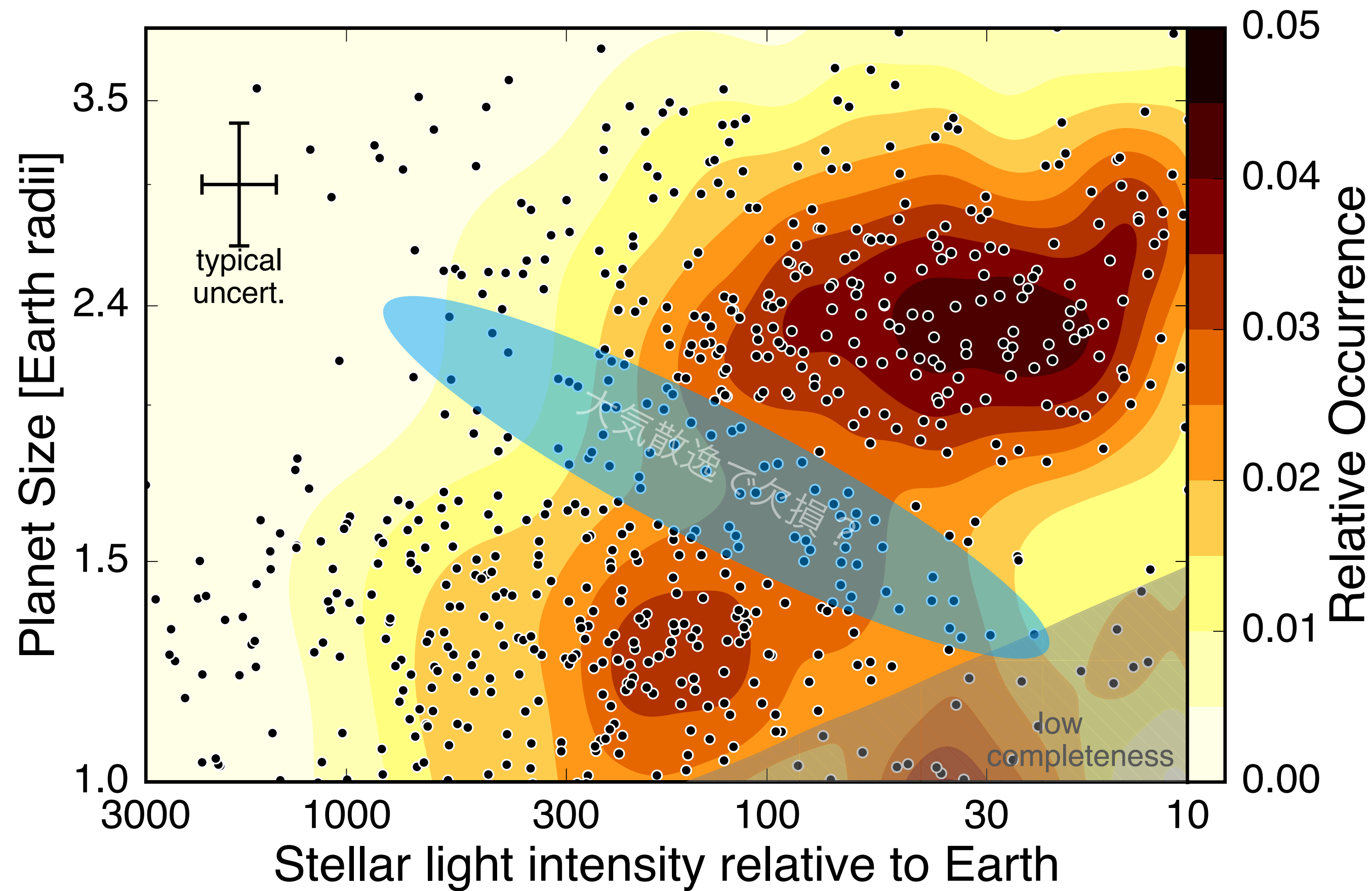


Image credit: NASA/CXC/M. Weiss

- 恒星の近傍 ( $< 0.1$  AU) を公転する惑星：地球の  $10^{2-4}$  倍の恒星放射に暴露
- ガス惑星からの大規模な大気散逸が紫外線トランジットによって検出されている



# スーパーアースの蒸発の谷？

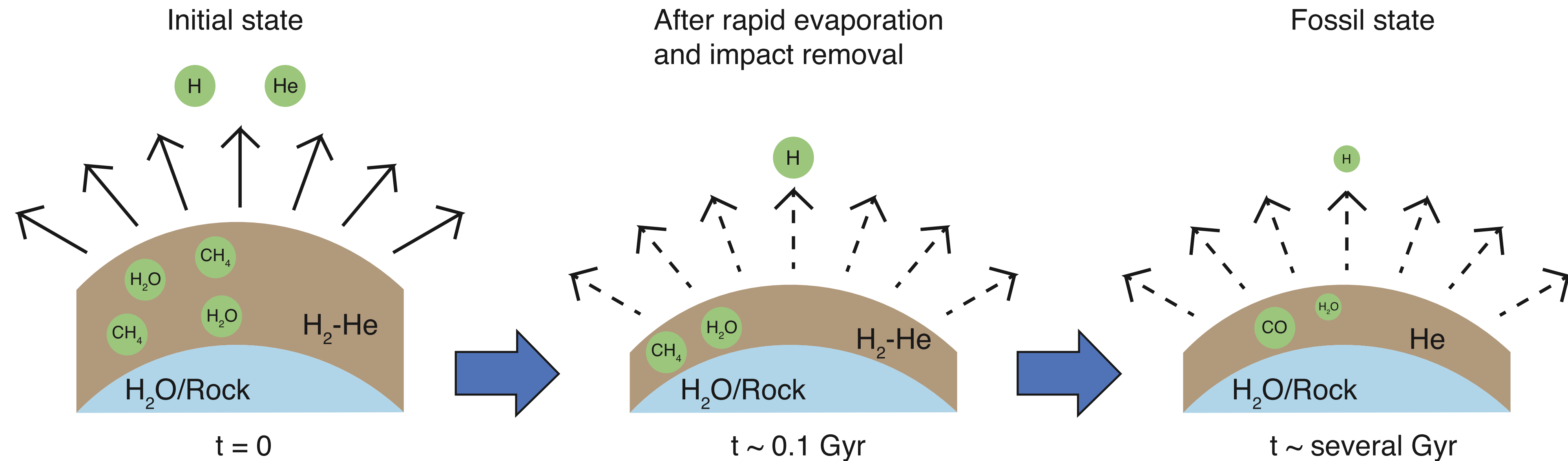


系外惑星の軌道半径-サイズ分布

Fulton et al. (2017) *Astrophys. J.*

短周期系外惑星の大規模な大気散逸は  
観測されるサイズ分布にも影響？

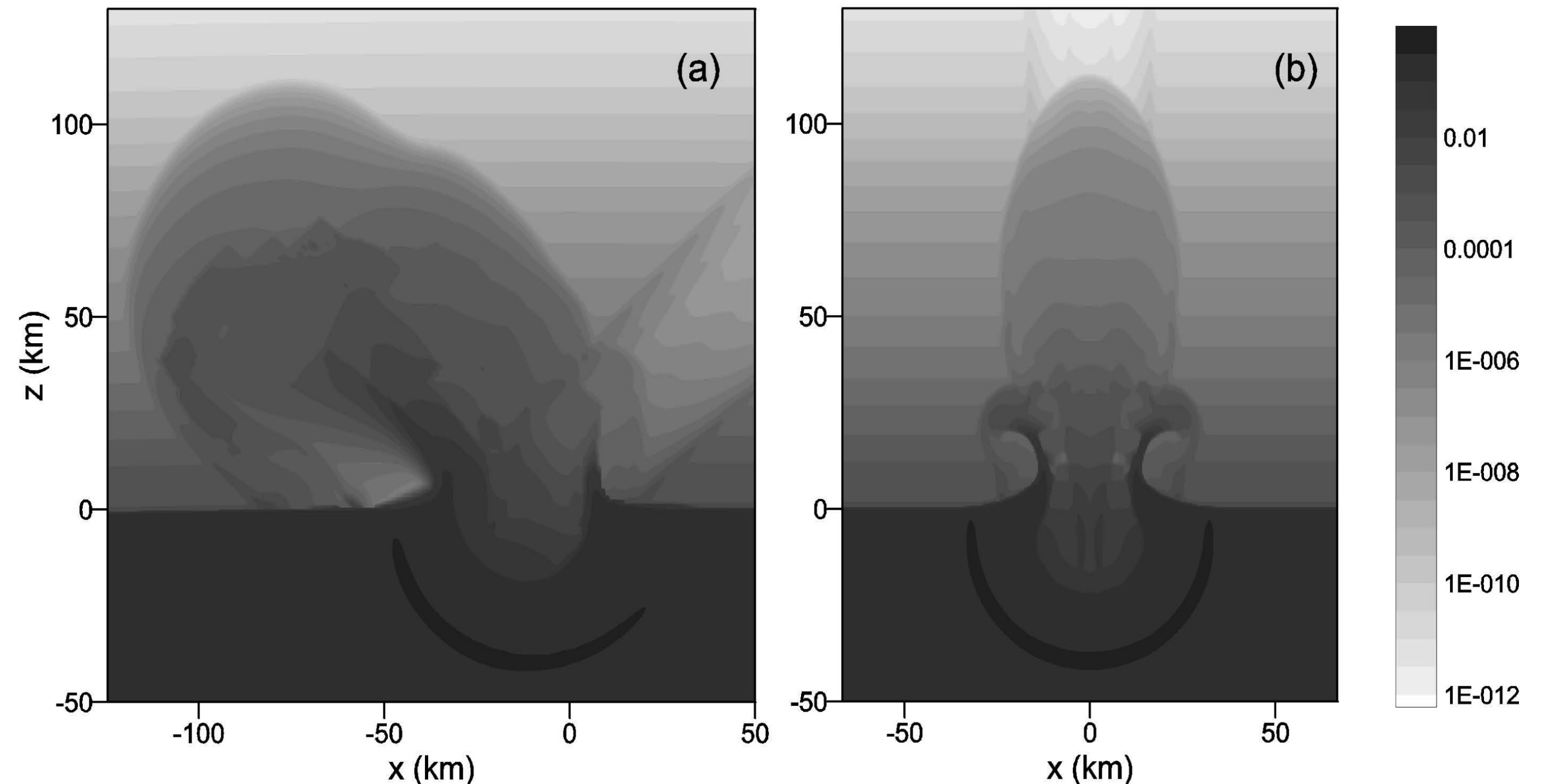
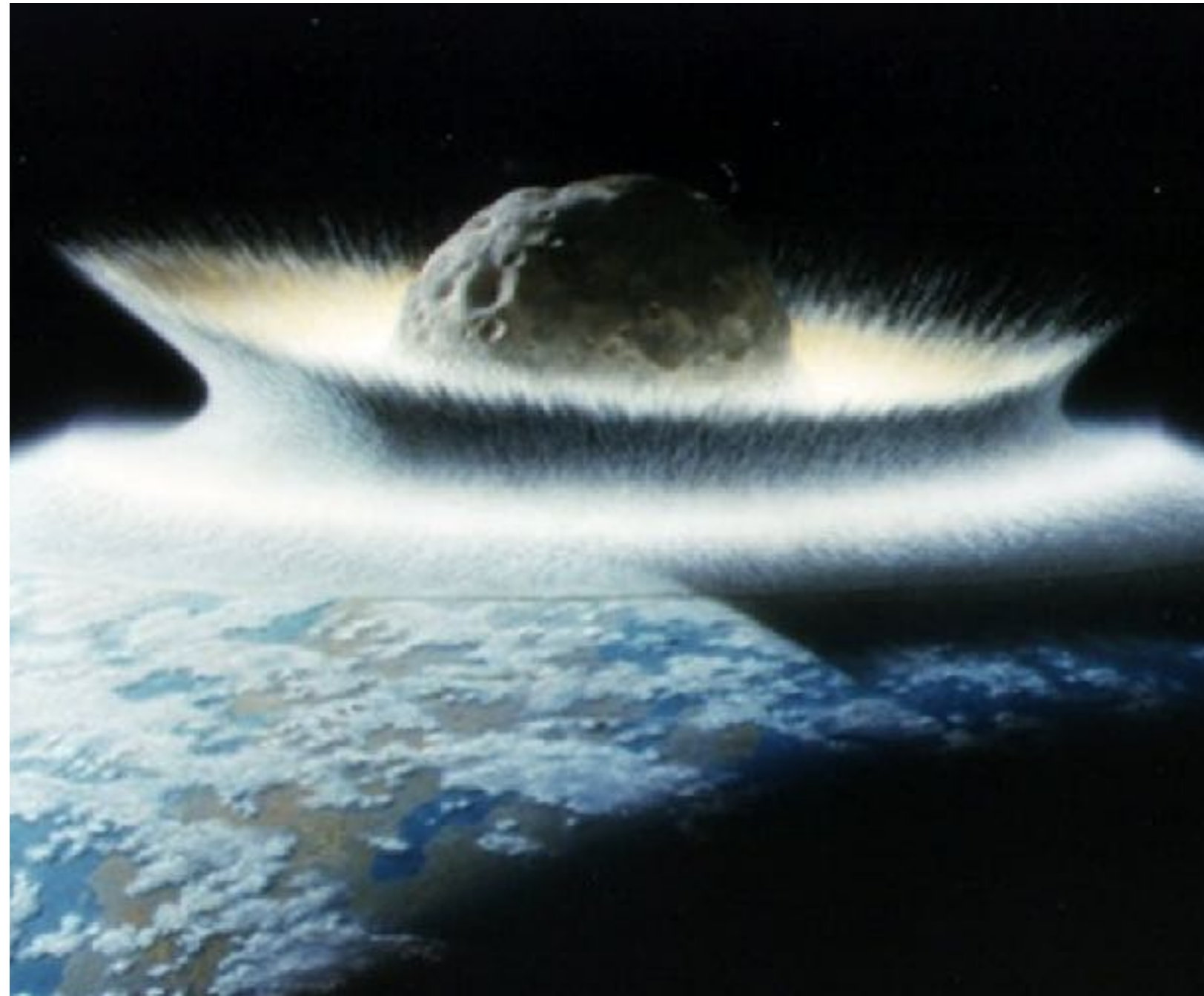
# ヘリウム惑星？



原始惑星系円盤ガスに由来する水素+ヘリウム大気をまとった惑星の一部は、  
軽い水素が選択的に大気散逸で失われることで、ヘリウム大気の惑星になるかもしれない  
(Hu et al. 2015, *Astrophys. J.*)

# 天体衝突による大気剥ぎ取り

10 km の天体衝突のシミュレーション (Shuvalov 2009)

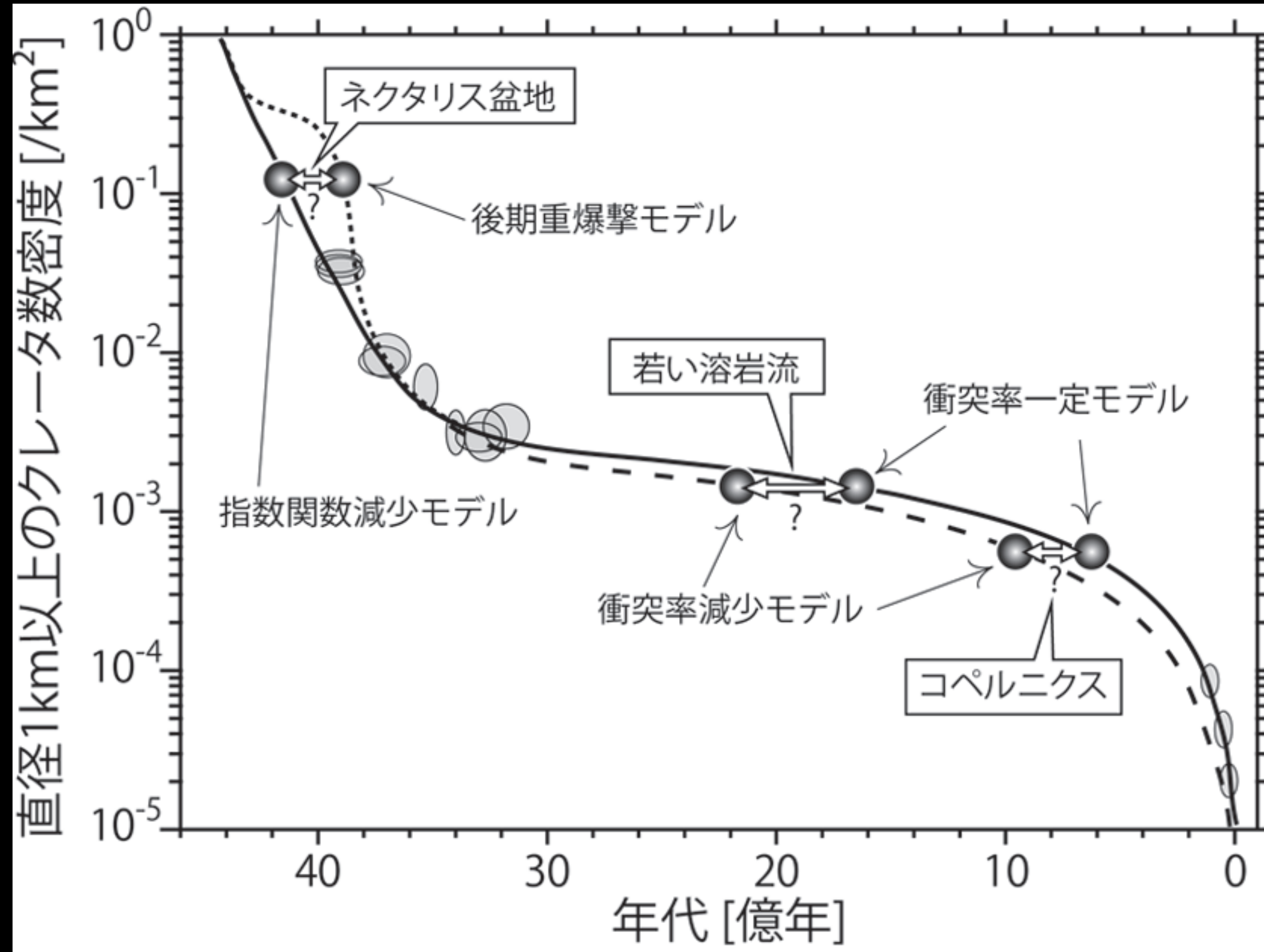


- 天体衝突で生じる蒸気雲や衝撃波で大気が失われる
- 一方で、衝突した天体がもたらす揮発性元素が大気のもととなる



# 月に記録された天体衝突史

月のクレーター数密度と地殻年代の関係



- プレートテクトニクスのない月：古い地殻を残している (↔ 地球)
- 40億年以上前の記録はほぼないものの、
- 過去に遡るほど天体衝突頻度が
- 大きかったことがわかる (図)

長他 (2012) 遊星人

# まとめ

---

- 熱的散逸, 非熱的散逸, 天体衝突剥ぎ取り
- 地球の水はコールド・トラップによって安定に存在  
↔ より高温の金星ではコールド・トラップの破れ
- 非磁化惑星では太陽風が高層大気と相互作用して非熱的散逸を引き起こす
- 火星からの重い元素の大気散逸
- 短周期系外惑星の大気散逸：惑星分布に影響？

# レポート課題 (6/10 17時締切)

1. 地球からの水素原子の大気散逸率はコールドトラップにおける水素を含む分子の混合比に比例し，次式で与えられる。

$$F_{\text{esc}}^{\text{H}} = 2.5 \times 10^{17} f_{\text{T}}(\text{H}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad \text{— (1)}$$

総水素混合比  $f_{\text{T}}$  は水素を含む分子の混合比から以下のように定義される。

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

この時，45億年間で失われる海水の質量割合(%)を求めよ。ただし，残った酸素は地殻を酸化して失われるとする。(有効数字1桁)

2. 地球がより太陽に近い軌道を回っていた場合，コールドトラップが機能せず，大気が水蒸気で満たされる ( $f_{\text{T}}(\text{H}) \simeq 1$ )。この時，地球海水相当の水が失われる時間(年)を見積もれ。(有効数字1桁)

以下の値を用いること。水素原子質量  $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，地球半径  $= 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，海水質量  $= 1.4 \times 10^{21} \text{ kg}$