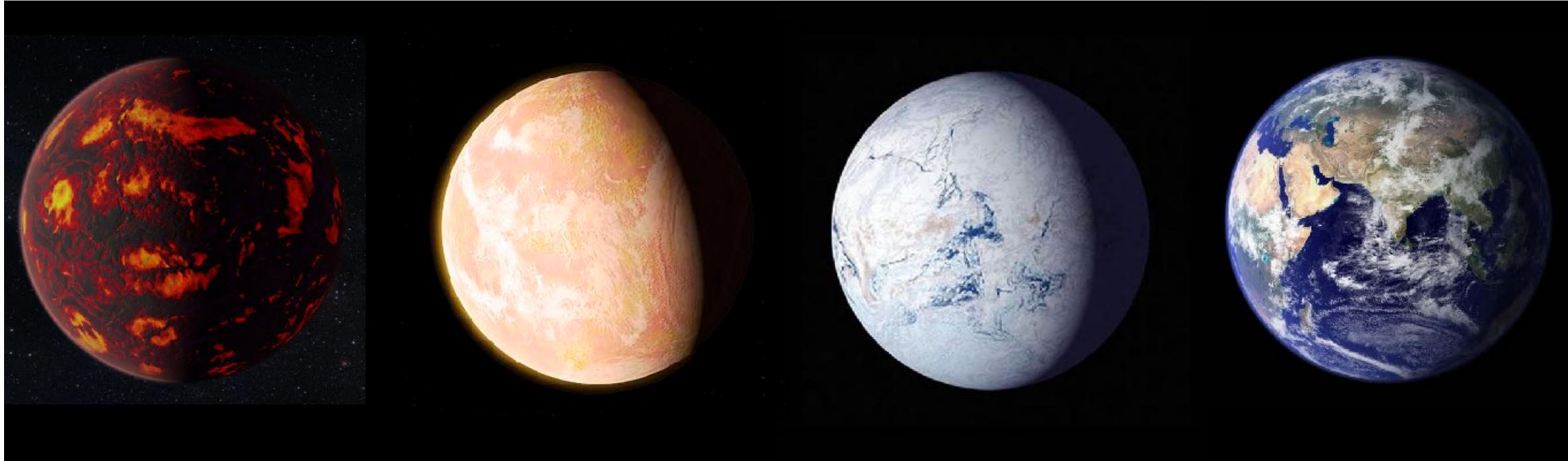


# 地球惑星圏物理学

## 第13回：火星史・系外地球型惑星の表層環境



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

hiro.kurokawa@elsi.jp

# レポート課題 (7/8 17時締切)

1. 小惑星帯における最大の天体であるセレス( $9.1 \times 10^{20}$  kg)が地球に衝突した場合、開放される重力ポテンシャルエネルギーを求めよ(有効数字1桁).

$$E_{\text{impact}} = \frac{GM_{\oplus}M_{\text{Ceres}}}{R_{\oplus}} = \frac{6.7 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24} \times 9.1 \times 10^{20}}{6.4 \times 10^6} \simeq 6 \times 10^{28} \text{ J}$$

2. 地球の海水( $1.4 \times 10^{21}$  kg)をすべて蒸発させるために必要な熱エネルギーを求めよ(有効数字1桁). 海水は $0^{\circ}\text{C}$ とする. 水の潜熱は $2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ , 比熱は $4.2 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ である.

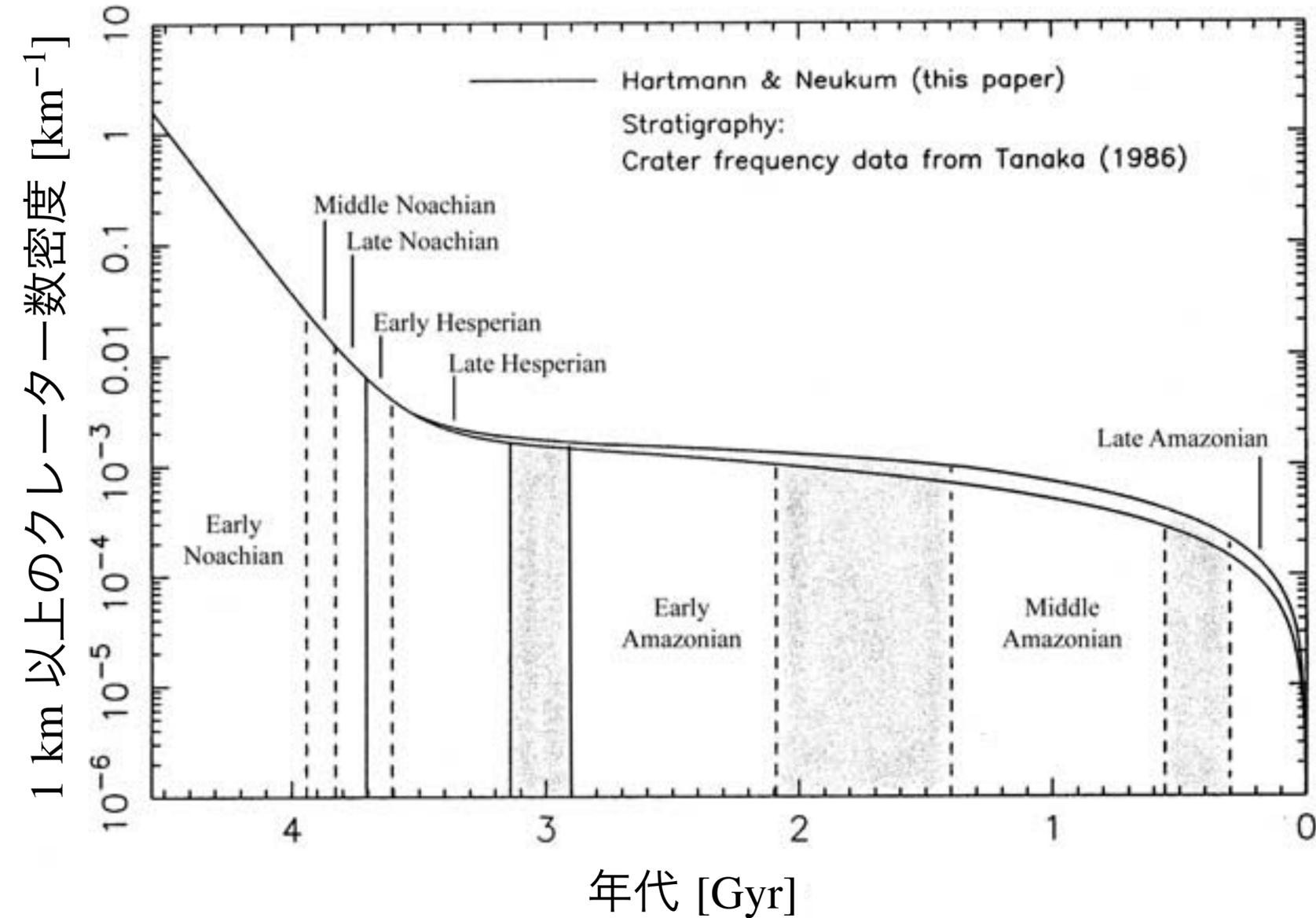
$$E_{\text{evap}} = CM_{\text{oceans}}\Delta T + M_{\text{oceans}}L_{\text{evap}} = 1.4 \times 10^{21} \times (4.2 \times 10^3 \times 100 + 2.5 \times 10^6) \simeq 4 \times 10^{27} \text{ J}$$

3. 1, 2をもとに, セレス質量の天体衝突で地球の海が完全に蒸発するかを議論せよ.  
完全に蒸発する

# 火星

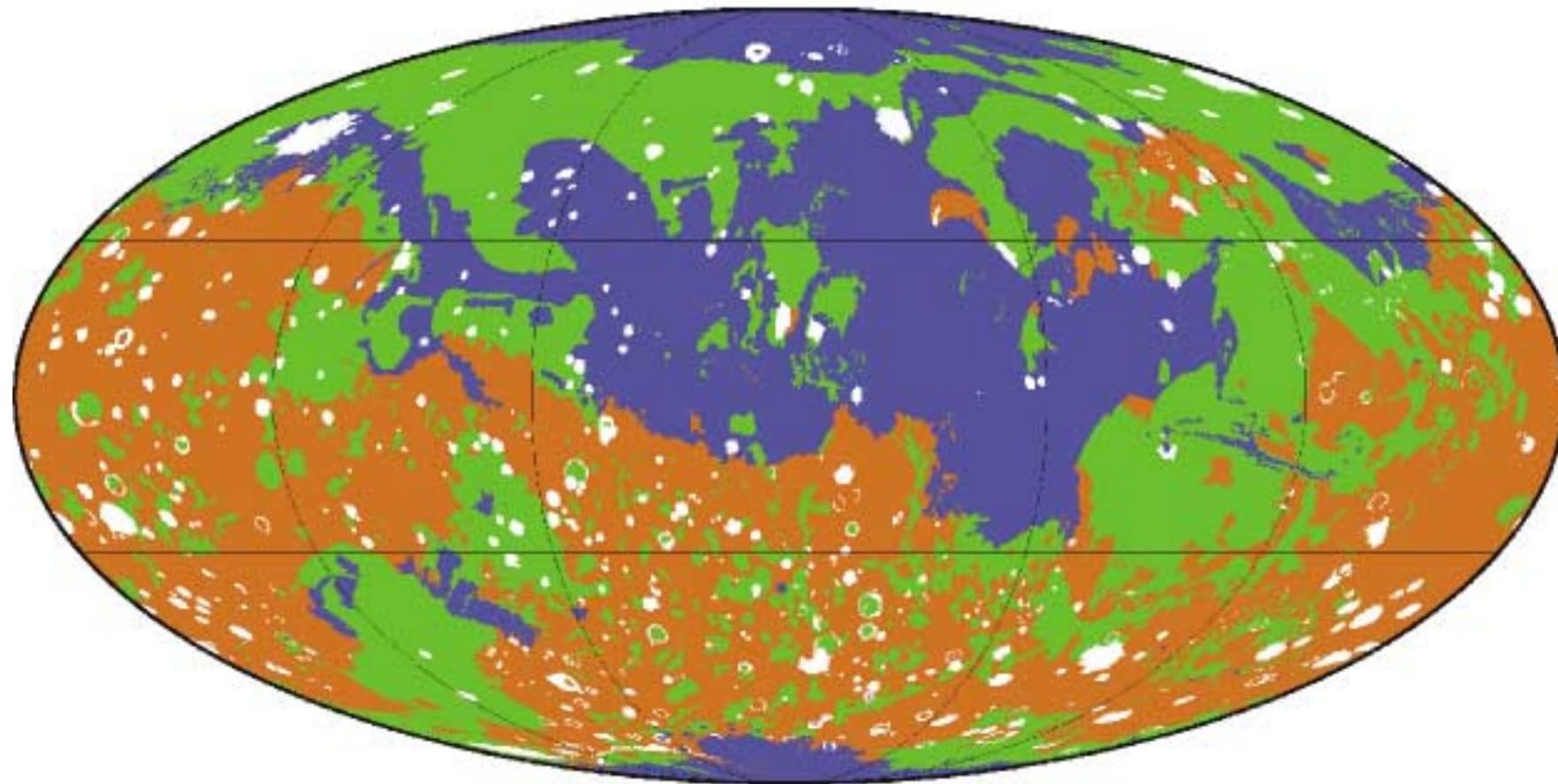
# クレーター一年代

月データから構築された火星のクレーター密度-年代モデル



- 火星：直接的な表面物質の年代測定がない (Curiosity着陸地点のみ; Farley et al. 2014)
- ↔ 月：Apollo 試料の年代測定
- 月と火星への天体衝突頻度比にもとづいて火星のクレーター密度-年代モデルを作成

# 火星表面の年代マップ



■ Amazonian ■ Hesperian ■ Noachian

Solomon et al. (2005) *Nature*

プレ・ノアキアン	45 - 42 億年前
ノアキアン	42 - (37-35) 億年前
ヘスペリアン	(37-35) - (33-29) 億年前
アマゾニアン	(33-29) 億年前 - 現在

- 古い地殻が全球的に残っている  
cf.) 地球：海洋地殻~1億年，大陸地殻~20億年
- 南半球が古く，北半球が新しい

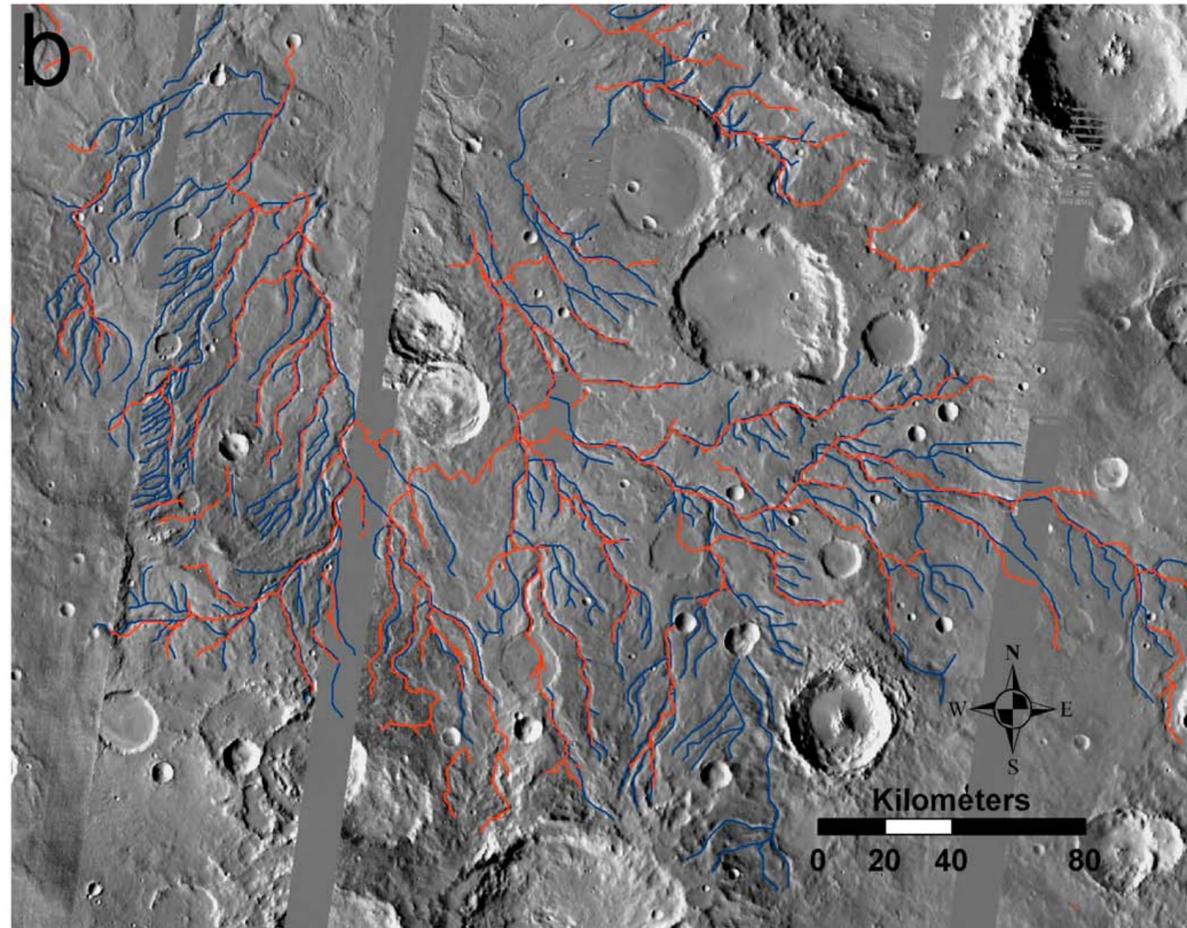
# 地表記録にもとづく火星史の概要



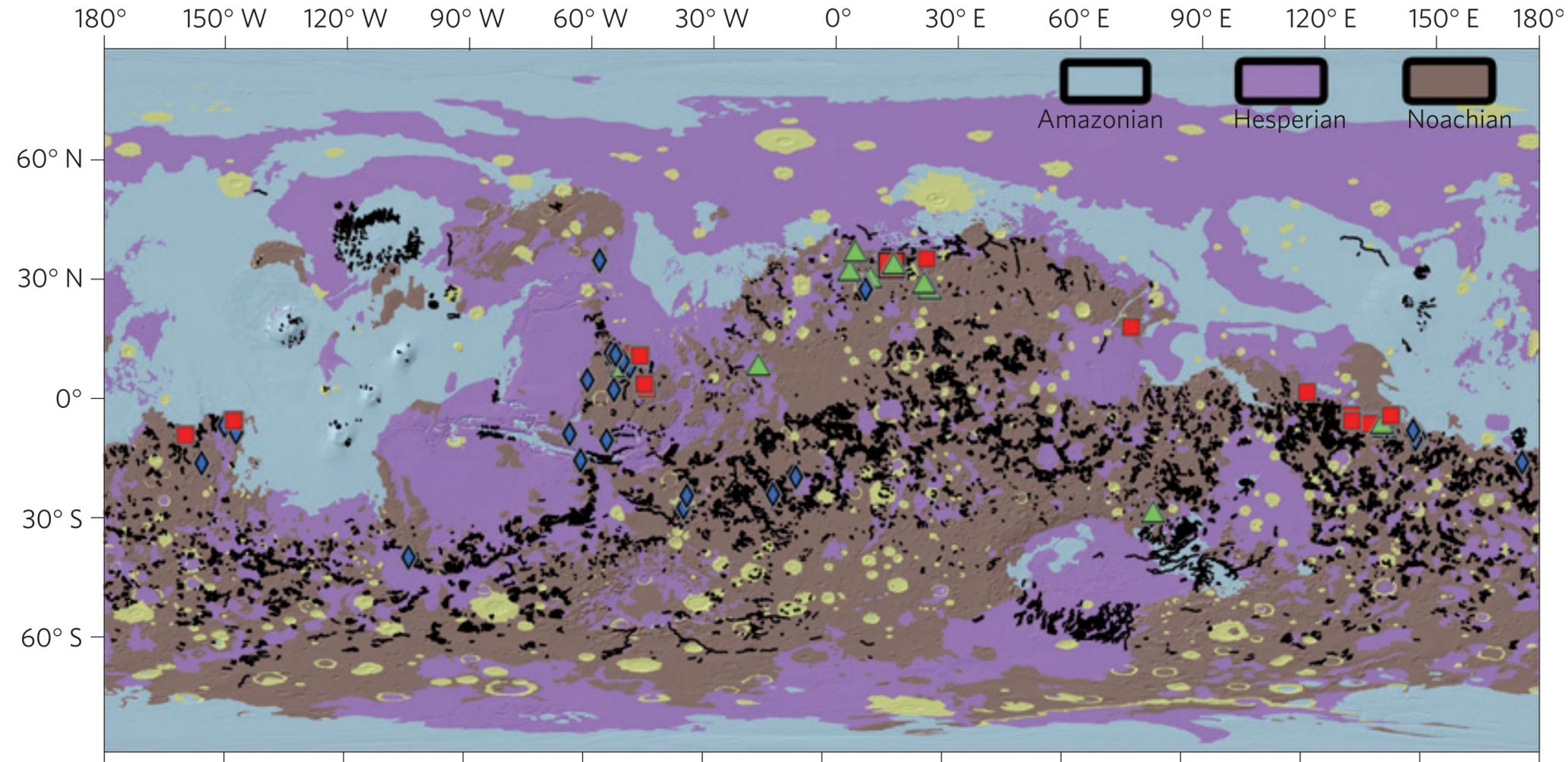
# バレー・ネットワーク (網目状溪谷)

バレー・ネットワーク(青). 赤は別の研究のマッピング

バレー・ネットワーク分布 (黒). 他のシンボルは三角州



Hynek et al. (2010) *J. Geophys. Res.*

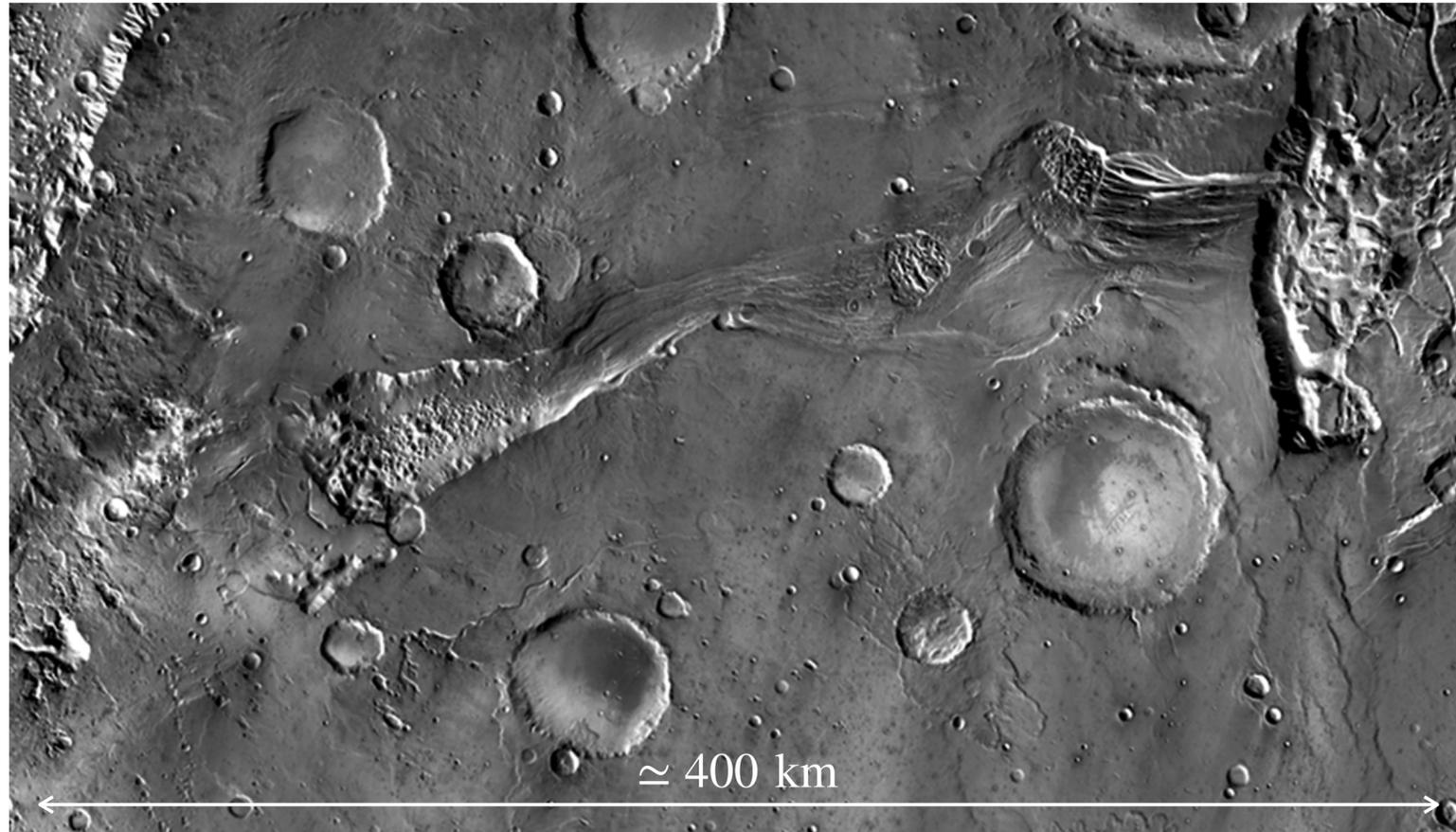


Di Achille & Hynek (2010) *Nature Geosci.*

- ノアキアンに多く存在
- 積算  $> 10^5$  yr の水の流れによって形成 (Kite et al. 2019, *Space Sci. Rev.*)

# アウトフローチャンネル(洪水河床地形)

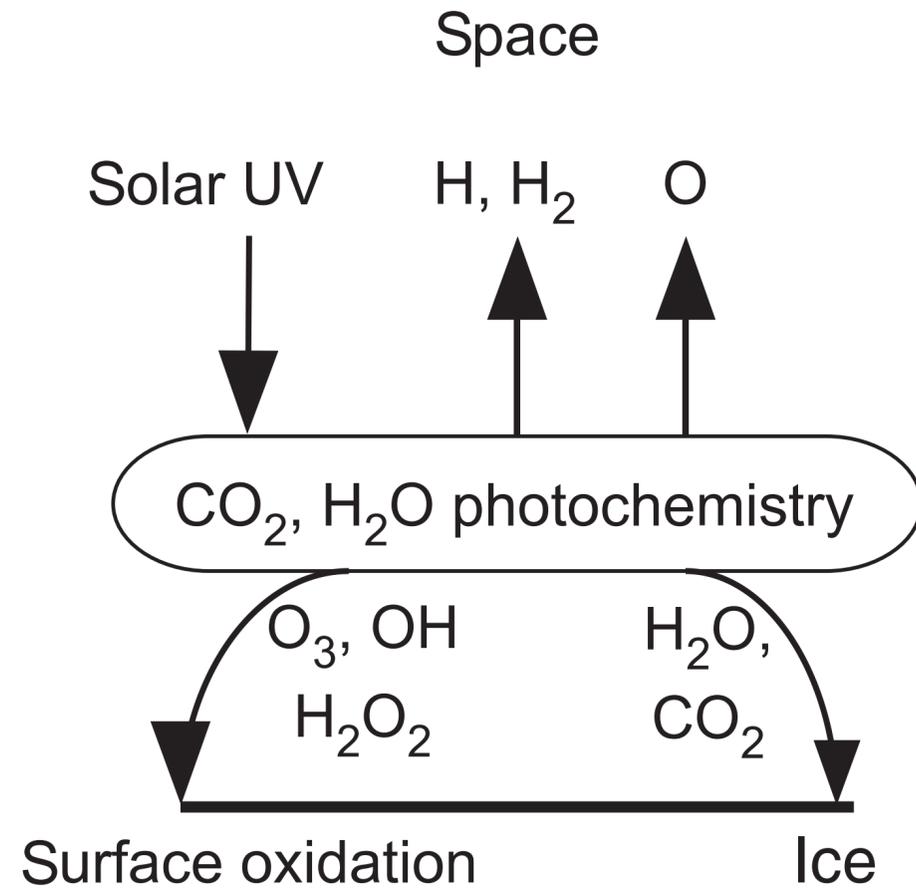
## アウトフロー・チャンネルの例



Courtesy: NASA/JPL/ASU

- ヘスペリアン ~ 初期アマゾニアン
- 大規模(幅: 20 – 100 km, 長さ: 1000 km)
- 大量の水が短期間に削った
- 地下水の湧き出し? (Baker, 2006; Baker et al., 2015)

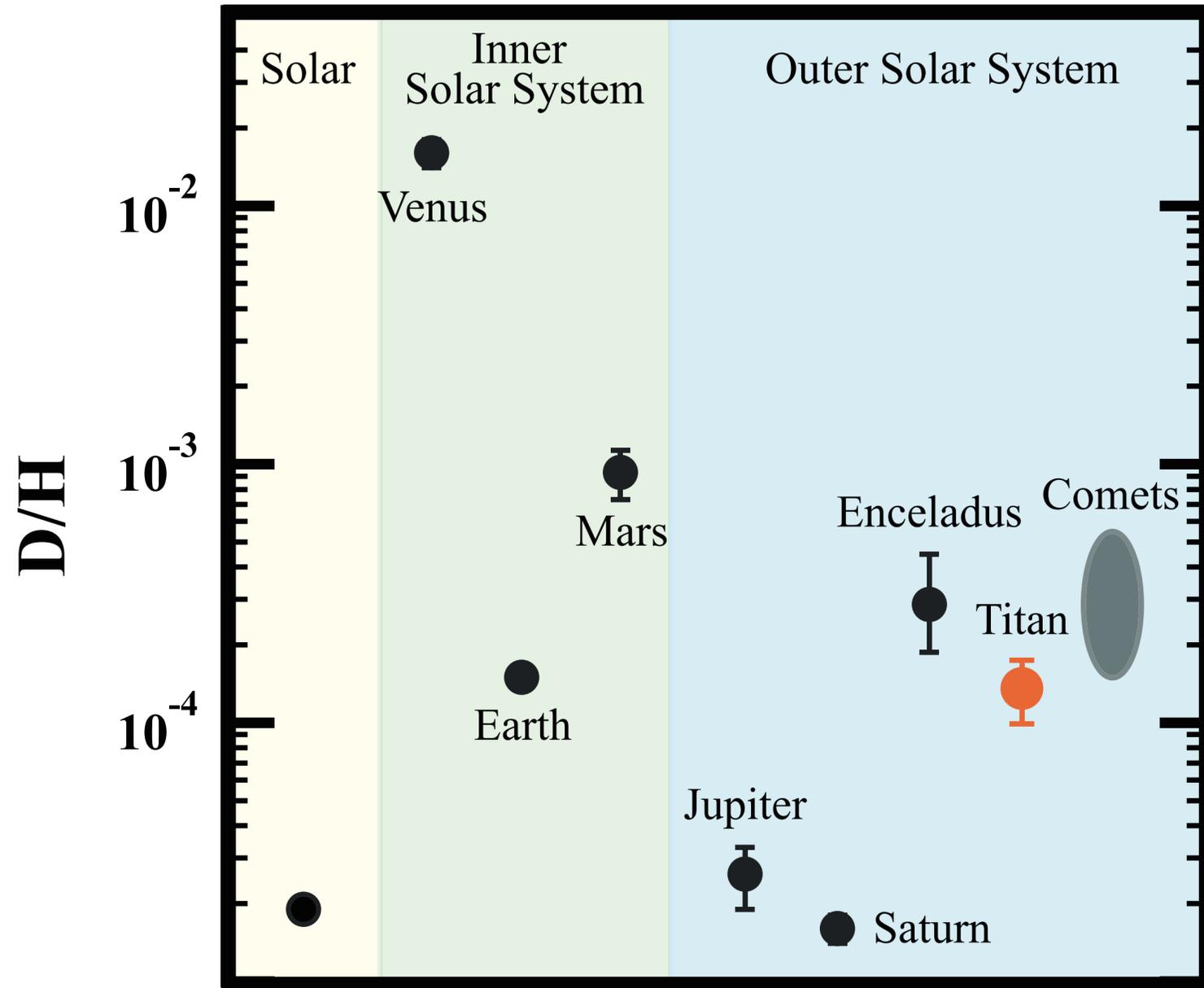
# H<sub>2</sub>Oの解離と大気散逸



- 火星大気中では H<sub>2</sub>O が光解離 → 生成した H<sub>2</sub> が高層大気へ輸送
  - Hは熱的散逸(ジーンズ散逸)
  - Oは非熱的散逸, もしくは地表面を酸化
- Hの散逸 : Oの損失 = 2:1 (Liu & Donahue 1976 *Icarus*)  
Oが大気に蓄積 → 大気が酸化 → H(H<sub>2</sub>)混合比低下  
という負のフィードバックが働くため

# D/Hに記録された大気散逸史

太陽系の各天体のD/H比



- 軽いHが選択的に散逸するため、水素散逸するほど天体のD/H比が上昇
- 金星・火星は彗星(最もD/H比の高い水の供給源)よりさらにD/Hが高い  
→ 水素散逸の証拠



# レイリー分別

同位体種1と2分別を考える (e.g., H, D). それぞれの総量を  $N_1$  と  $N_2$  と書くと,

$$\text{同位体分別係数 } f \equiv \frac{dN_2/dN_1}{N_2/N_1}. \quad \text{--- (1)}$$

$$\text{式変形して, } \frac{dN_2}{N_2} = f \frac{dN_1}{N_1}. \quad \text{--- (2)}$$

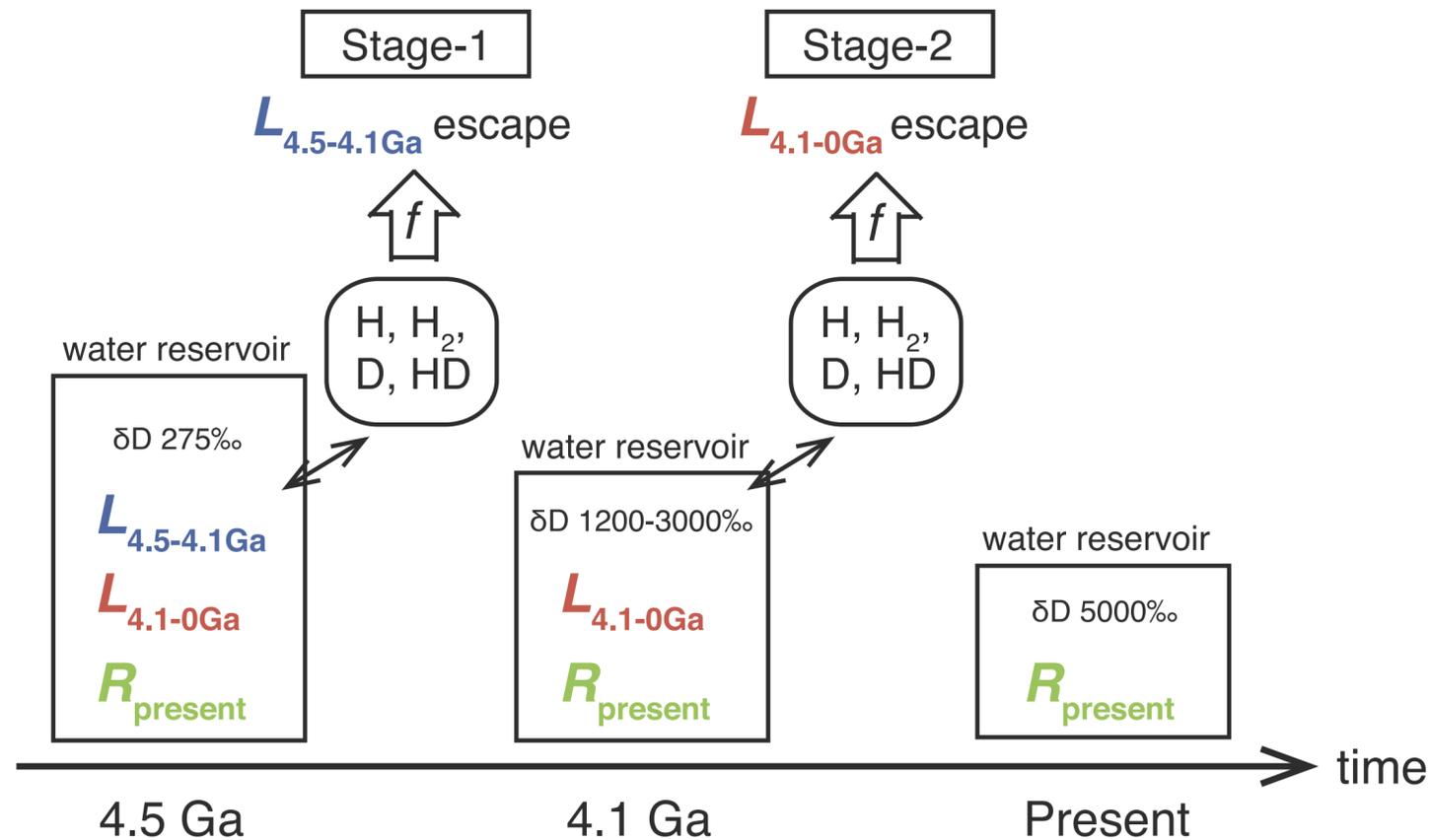
$$\text{初期値 } N_1^0, N_2^0 \text{ として(2)を積分すると, } \int_{N_2^0}^{N_2} \frac{dN_2}{N_2} = f \int_{N_1^0}^{N_1} \frac{dN_1}{N_1}. \quad \text{--- (3)}$$

$$\rightarrow \ln\left(\frac{N_2}{N_2^0}\right) = f \ln\left(\frac{N_1}{N_1^0}\right) \quad \text{--- (4)} \rightarrow \frac{N_2}{N_2^0} = \left(\frac{N_1}{N_1^0}\right)^f \quad \text{--- (5)}$$

$$\text{両辺に } \frac{N_1^0}{N_1} \text{ を掛けて, } \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{N_2^0}{N_1^0}\right)^{-1} = \left(\frac{N_1}{N_1^0}\right)^{f-1} \quad \text{--- (6).}$$

(6) はレイリー分別の式と呼ばれる。

# 火星の水量進化の見積もり



火星表面にある水が大気散逸で失われていく時、水の供給がないとするとレイリー分別の式に従う。

$$\frac{(D/H)_{t=t_2}}{(D/H)_{t=t_1}} = \left( \frac{M_{H_2O, t=t_2}}{M_{H_2O, t=t_1}} \right)^{f-1} \quad (1)$$

(※  $D/H \sim 10^{-3}$  を用いて近似)

ここで、 $M_{H_2O}$  は水量、

$f$  は表面の水が散逸するまでの正味の分別係数、

添字  $t = t_1, t_2$  は各時刻の物理量を表す。

(1)を用いて、

$(D/H)_{4.5Ga}$ : 火星隕石に記録されたマントル値

$(D/H)_{4.1Ga}$ : 火星隕石に記録された表層水の値

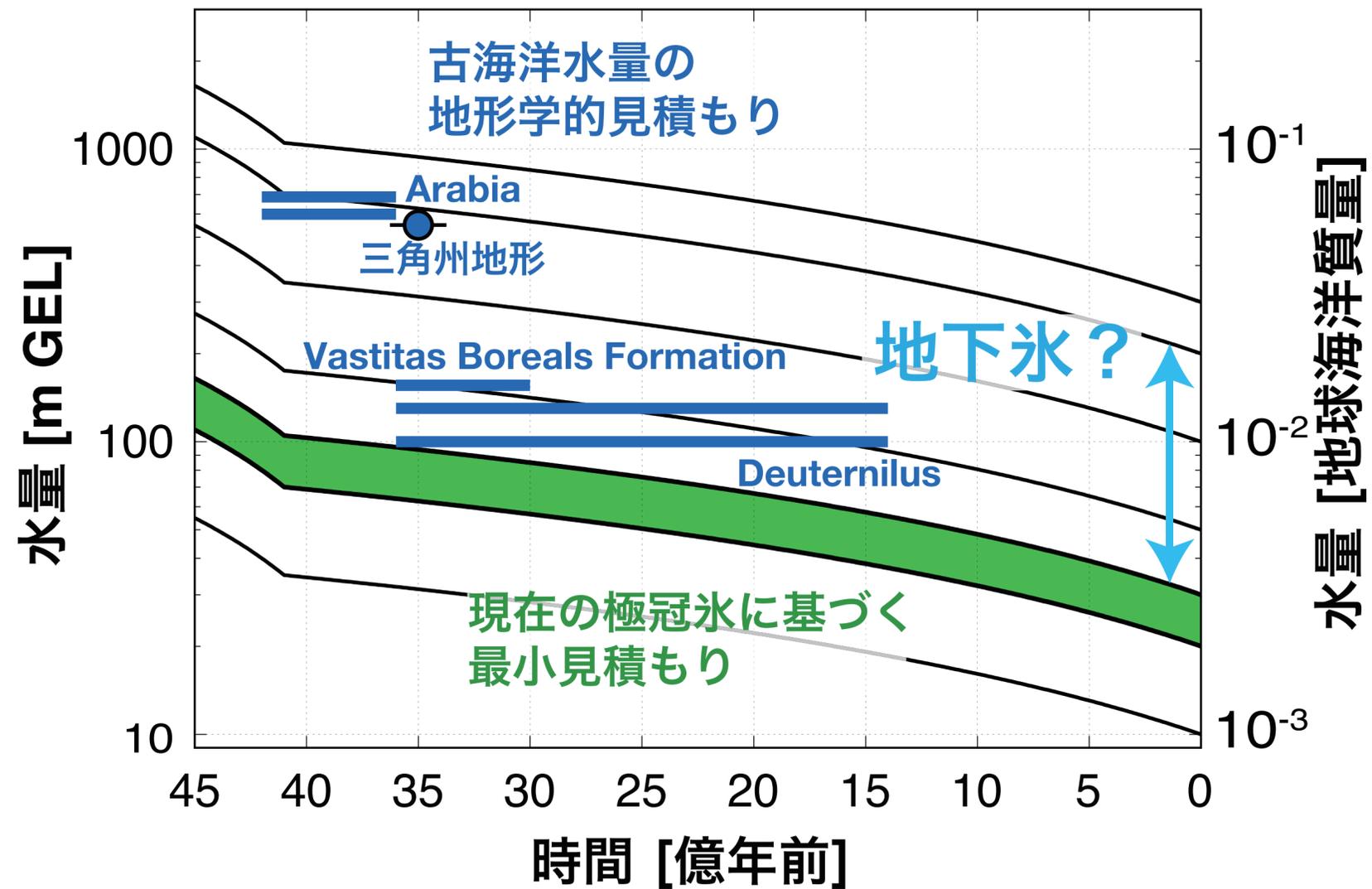
$(D/H)_{present}$ : 探査・天文観測の表層水の値

$M_{H_2O, present}$ : 入力パラメータ

として水量進化を計算する。

# レイリー分別モデルと古海洋記録の比較

モデル(黒線, 緑線は極冠氷量を仮定)と古海洋質量(青)



古海洋と極冠氷が同じ進化パスに乗らない

→ 極冠氷以外に未発見の水がある?

- 地下氷 (Kurokawa et al. 2014, *Earth Planet. Sci. Lett.*)
- 含水鉱物 (Scheller et al. 2021, *Science*)

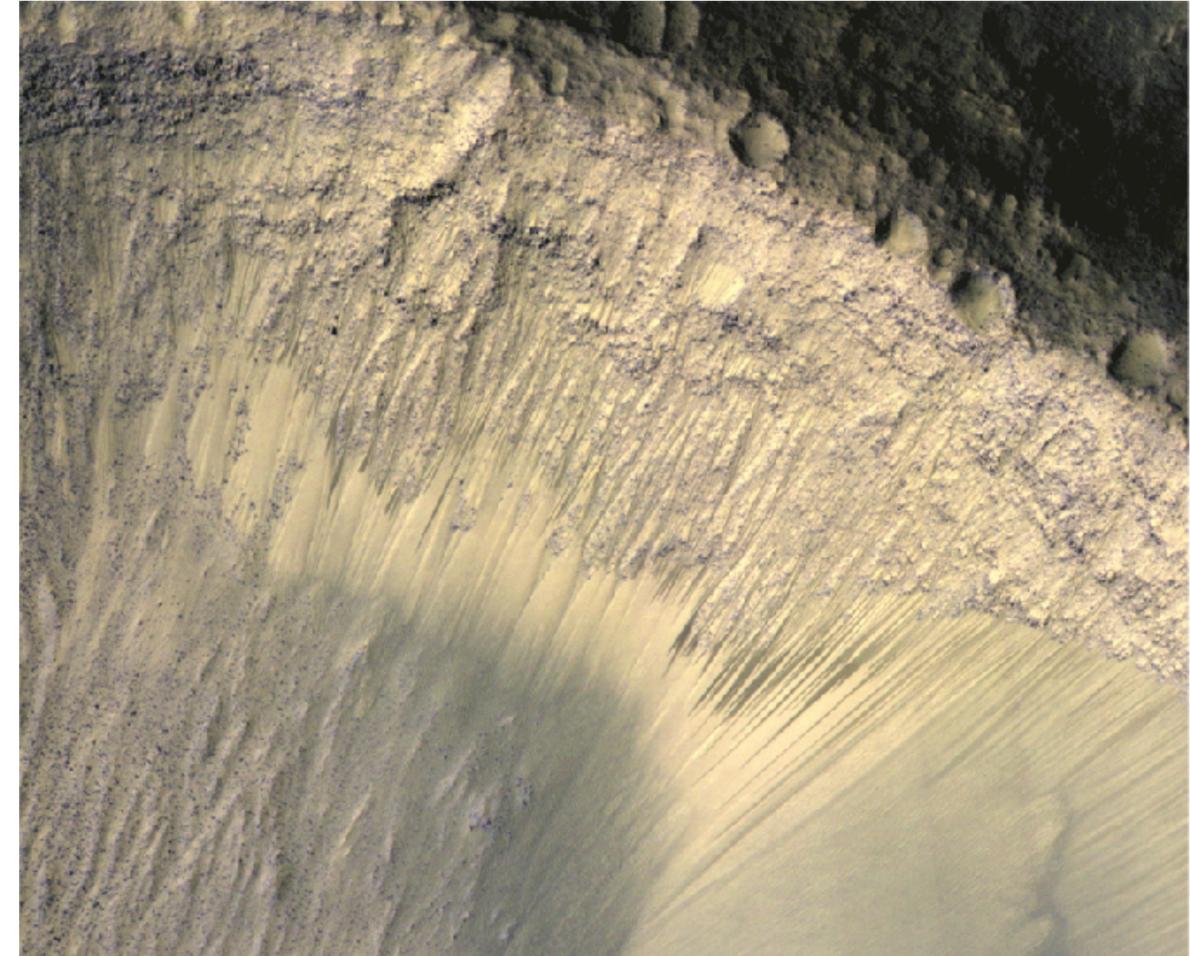
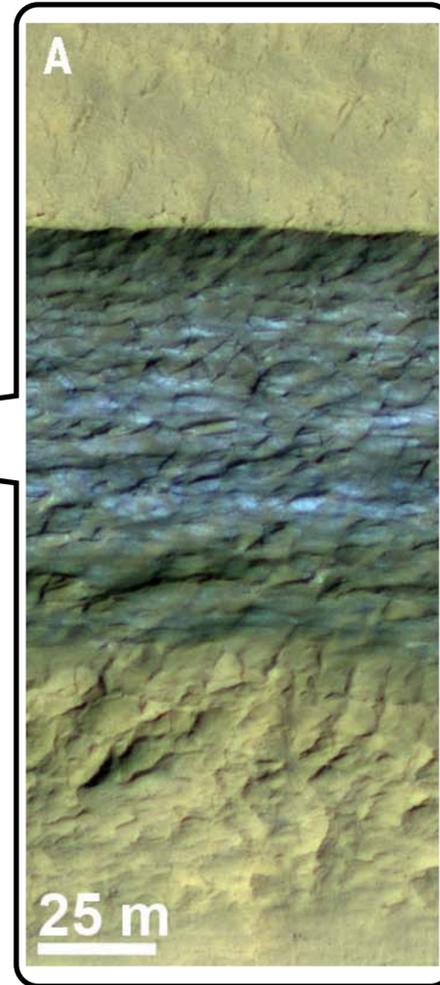
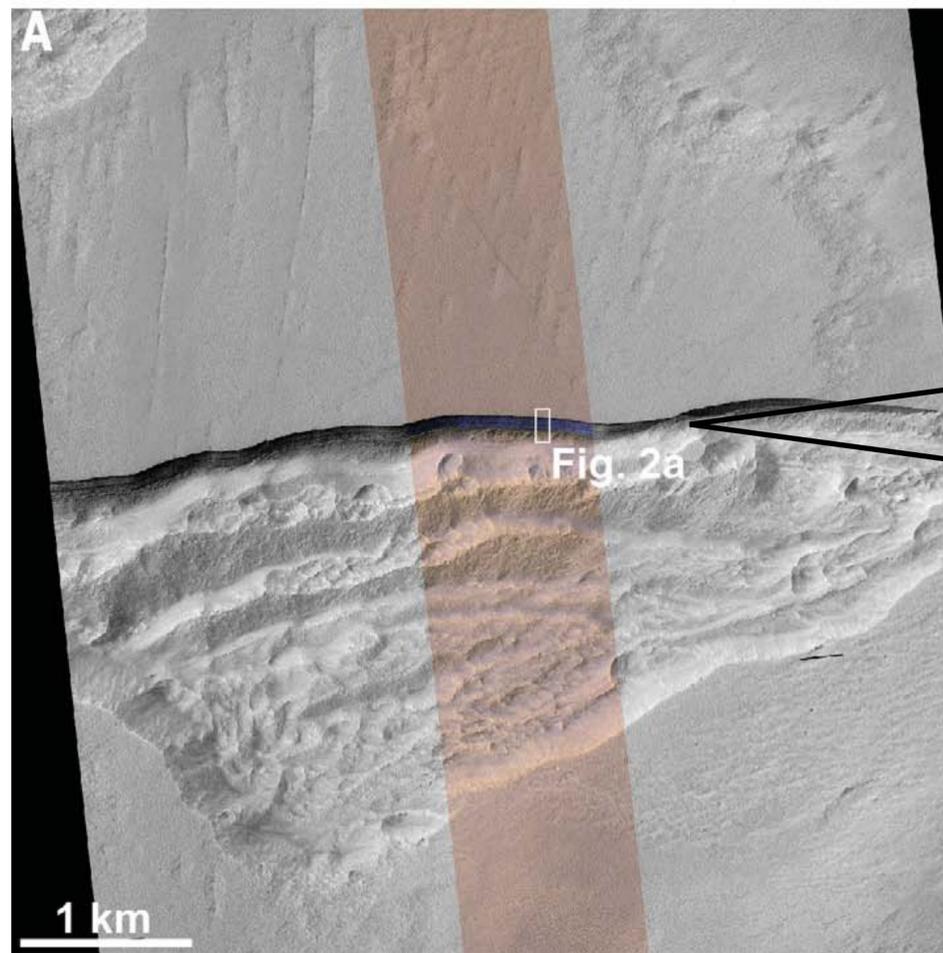
図は黒川, 櫻庭 (2018) 遊星人より

Kurokawa et al. (2014) *Earth Planet. Sci. Lett.* にもとづく

# 火星の地下水(氷)

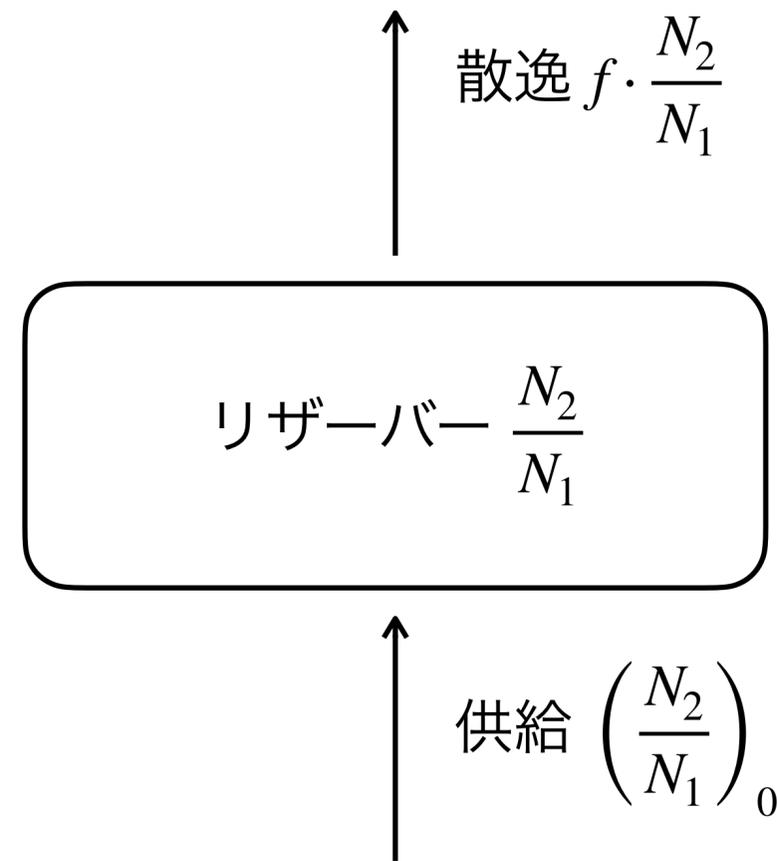
中緯度の断崖に露出した氷 (Dundas et al. 2018)

中・低緯度の斜面に見られる流水(?)地形 (McEwen et al. 2014)



- 理論的には、中緯度 ( $> 30^\circ$ ) では地下氷が安定。過去の表層水がトラップされている？
- 低緯度でも春・夏に水が流れているかもしれない地形 (Recurring Slope Lineae, RSL) がある
- 火星史を理解する上でも重要だが、将来の有人探査の資源としても着目されている

# 供給がある場合の同位体分別



供給(e.g., 火山脱ガス)と散逸が釣り合っている定常状態の時, 両者の同位体比は等しい.

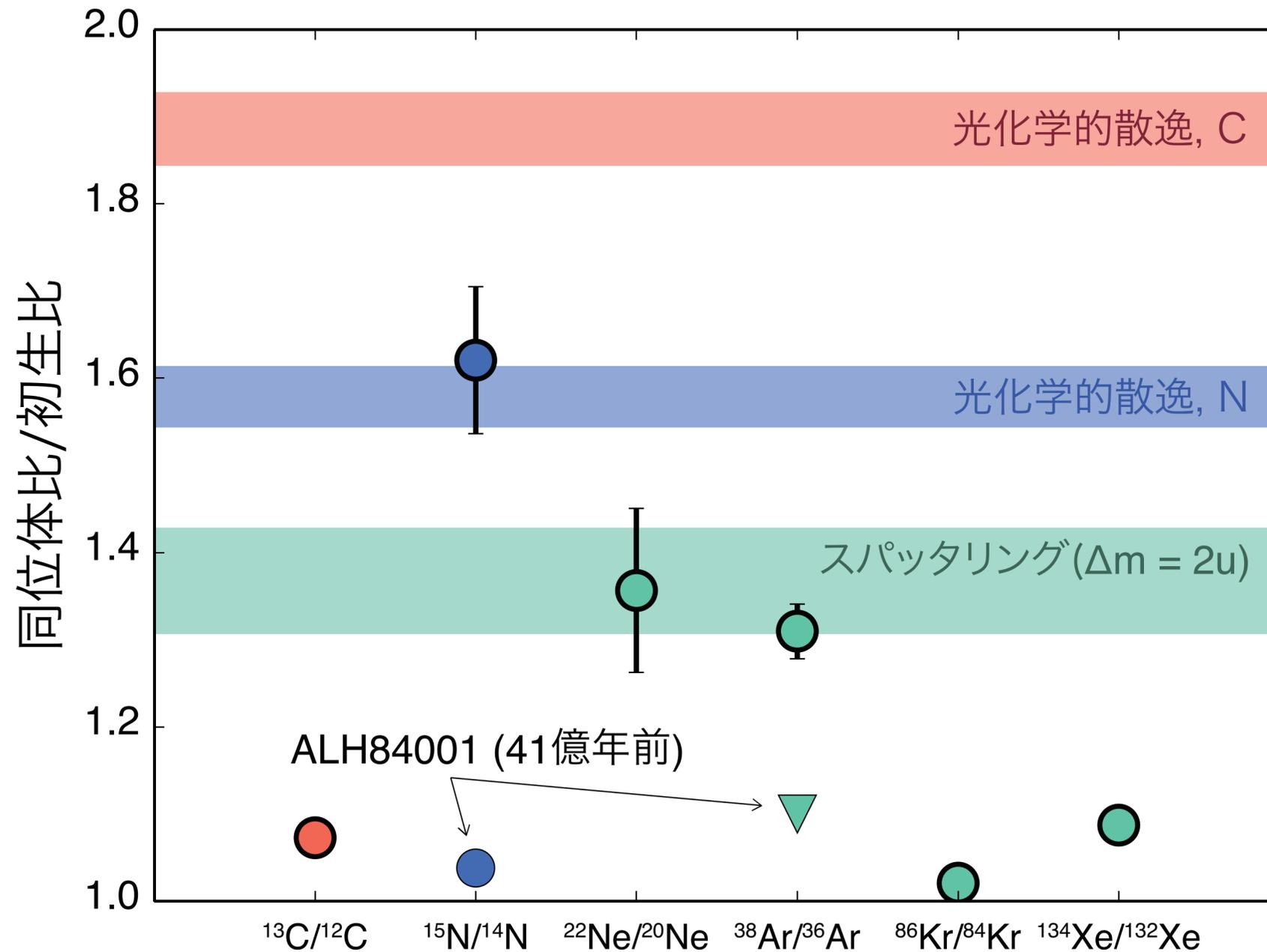
$$\therefore f \cdot \frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)_0 \quad \text{--- (1)}$$

$$\rightarrow \frac{N_2}{N_1} = f^{-1} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)_0 \quad \text{--- (2)}$$

大気中の滞在時間の短い分子種の同位体比は (2) に従うはず.

# 火星大気同位体比

同位体比/初期同位体比 (コンドライト or 太陽組成) と定常モデルの比較



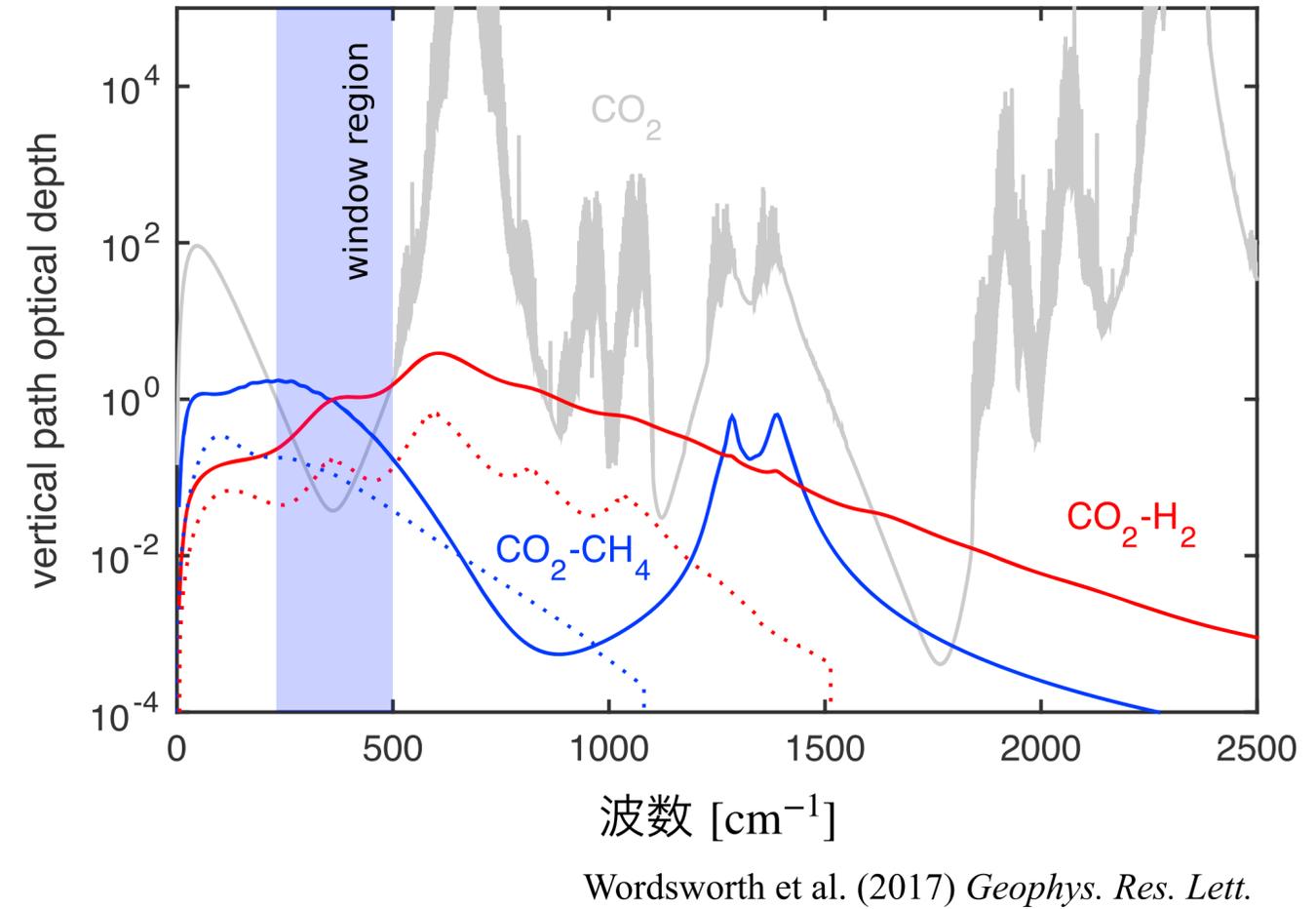
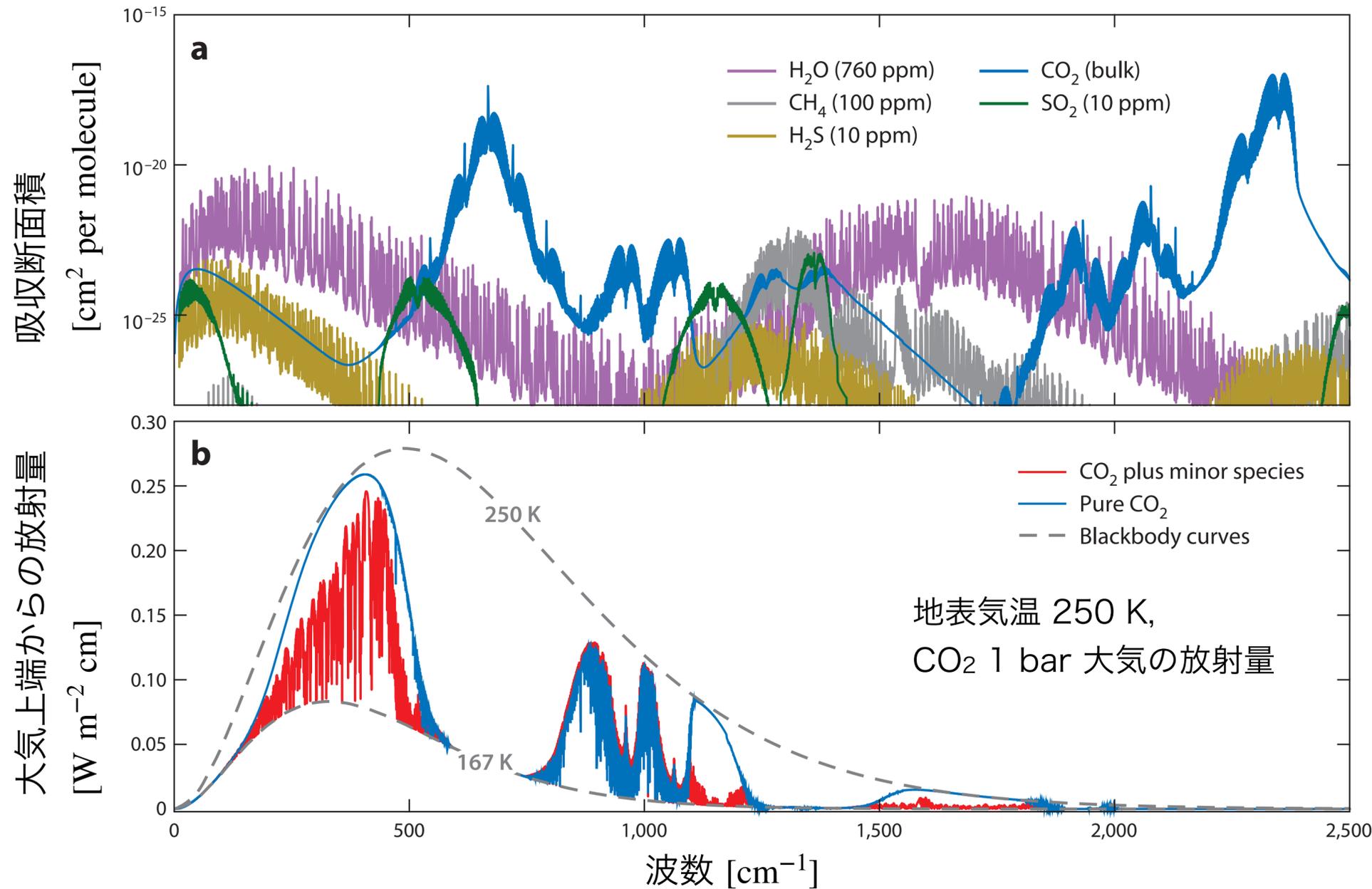
- N, Ne, Ar は定常モデルと一致  
↔ 41億年前は低い同位体比  
→ 41億年前以降の時期に散逸?  
(Kurokawa et al. 2018 *Icarus*)
- Cは定常モデルと一致しない  
→ 炭酸塩岩など散逸以外のシンク?  
(e.g., Hu et al. 2015 *Nature Comm.*)

# 火星気候変動の原因は何か？

---

- 磁場の消失にともなって非熱的散逸で大気を失った, というのが古典的描像
- しかし, そもそも純粋なCO<sub>2</sub>大気では平均気温が 273 K を上回らない
- 温室効果をサポートするもの (次ページ参照)
  - CH<sub>4</sub>: 初期火星では温室効果が非効率的 (平衡温度の黒体放射ピーク付近に吸収帯がない)
  - SO<sub>2</sub>: 温室効果は期待できるが, エアロゾルを生成して寒冷化 (Tian et al. 2014)
  - H<sub>2</sub>: 温室効果は期待できるが, 供給がないと熱的散逸で失われる
  - 高層雲 (Kite et al. 2021): 乾燥した火星でのみ機能
- 地形・含水鉱物の記録 → 温暖な時期があった (がずっと温暖でなくてもいい) (Ehlmann et al. 2011; Kite et al. 2019)  
→ 基本は寒冷な気候で, 脱ガス (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) や水の消失 (高層雲) に伴って一時的に温暖化?  
(e.g., Wordsworth et al. 2021)

# 初期火星の温室効果ガス



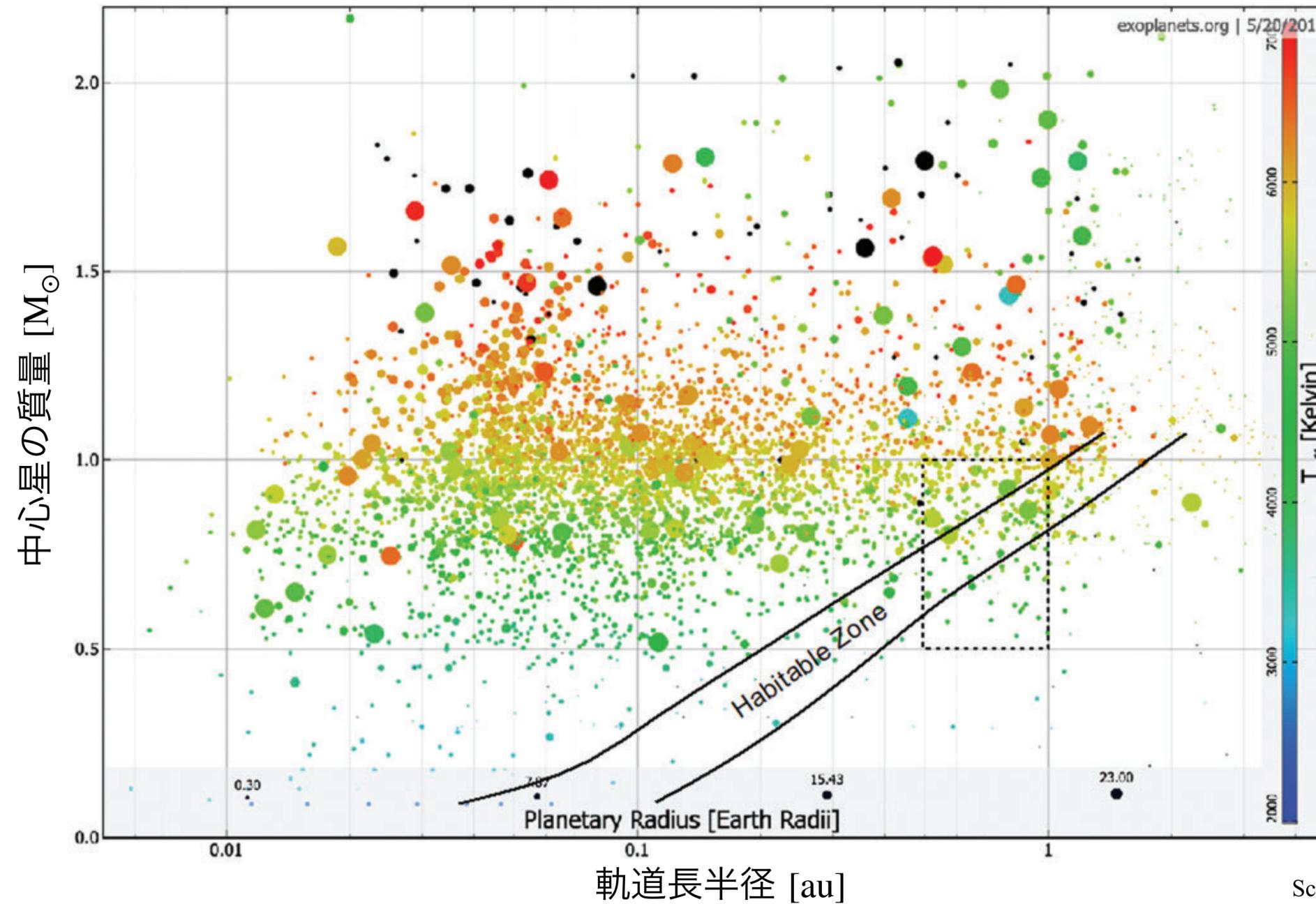
Wordsworth (2016) *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*

火星の大気の窓を塞ぐことのできる分子は？

× CH<sub>4</sub> (↔ 地球では重要な温室効果ガス), ○ SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>

# 系外地球型(?)惑星

# 系外地球型惑星の候補天体

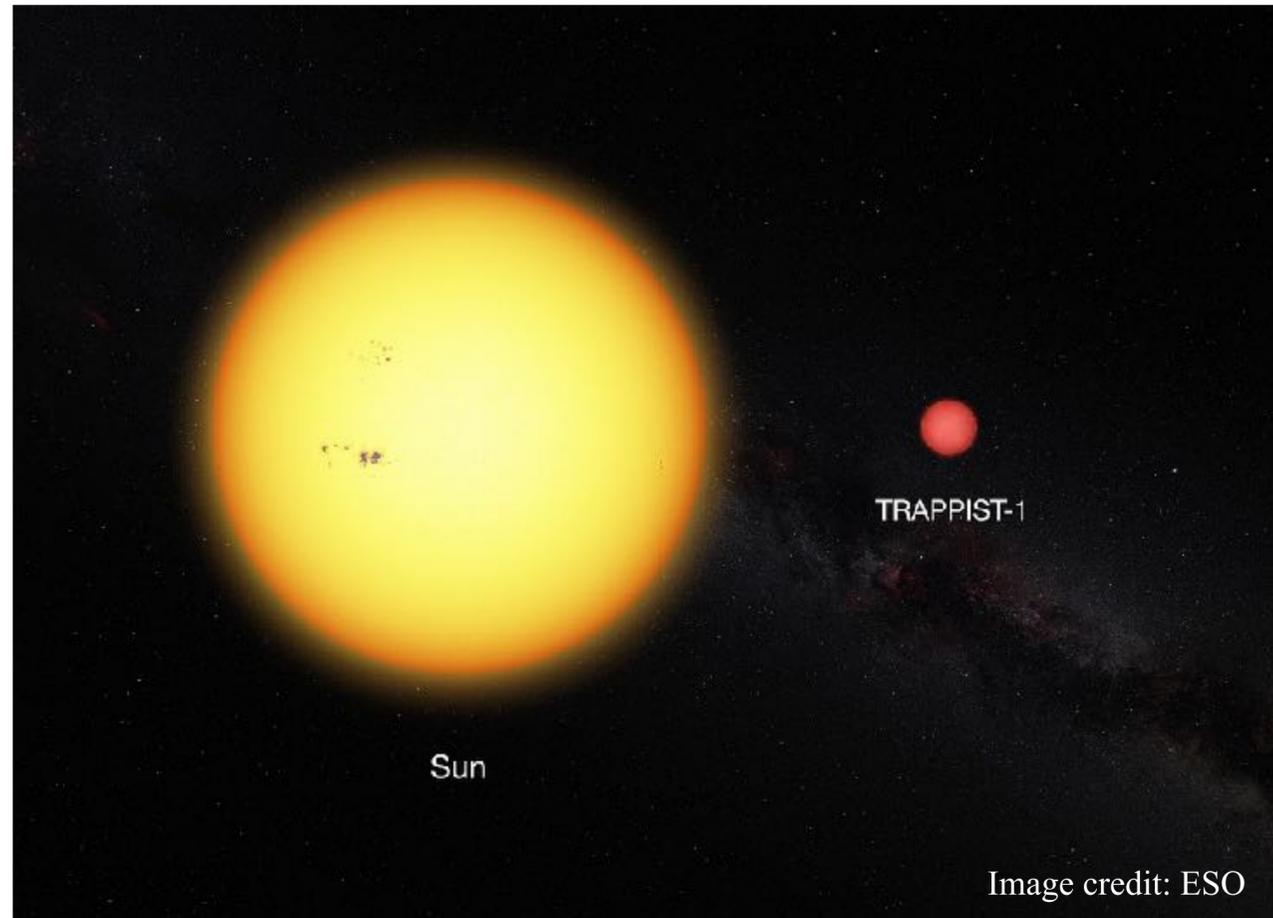


Schulze-Makuch et al. (2020) *Astrobiology*

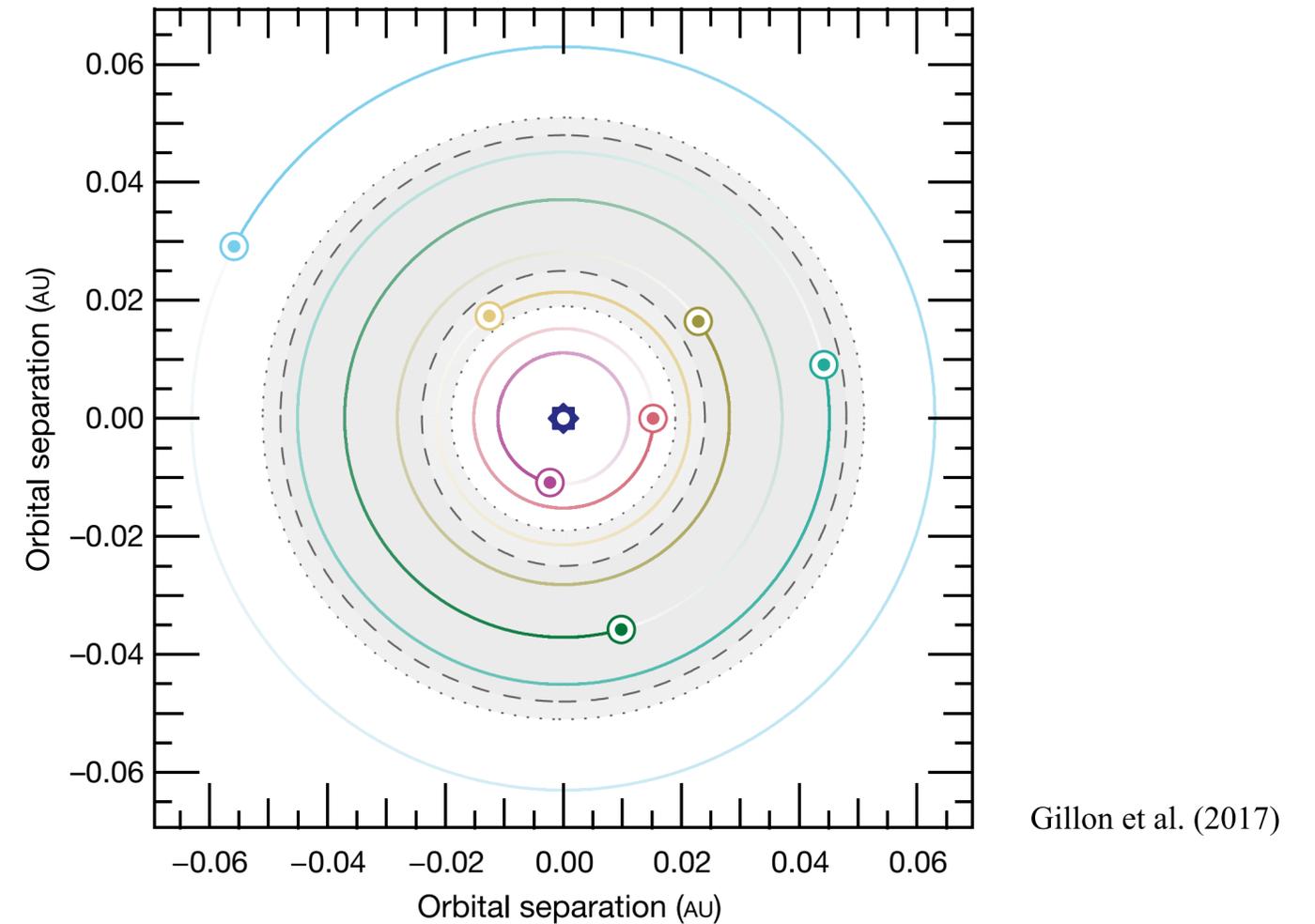
- 中心星に近いものほど発見しやすいが、ハビタブル・ゾーンに位置する惑星も発見されている
  - 特に太陽と同程度から太陽より軽い恒星のまわりにおいて発見

# TRAPPIST-1 惑星系

太陽と中心星 TRAPPIST-1 ( $0.09 M_{\odot}$ , M型星) の比較



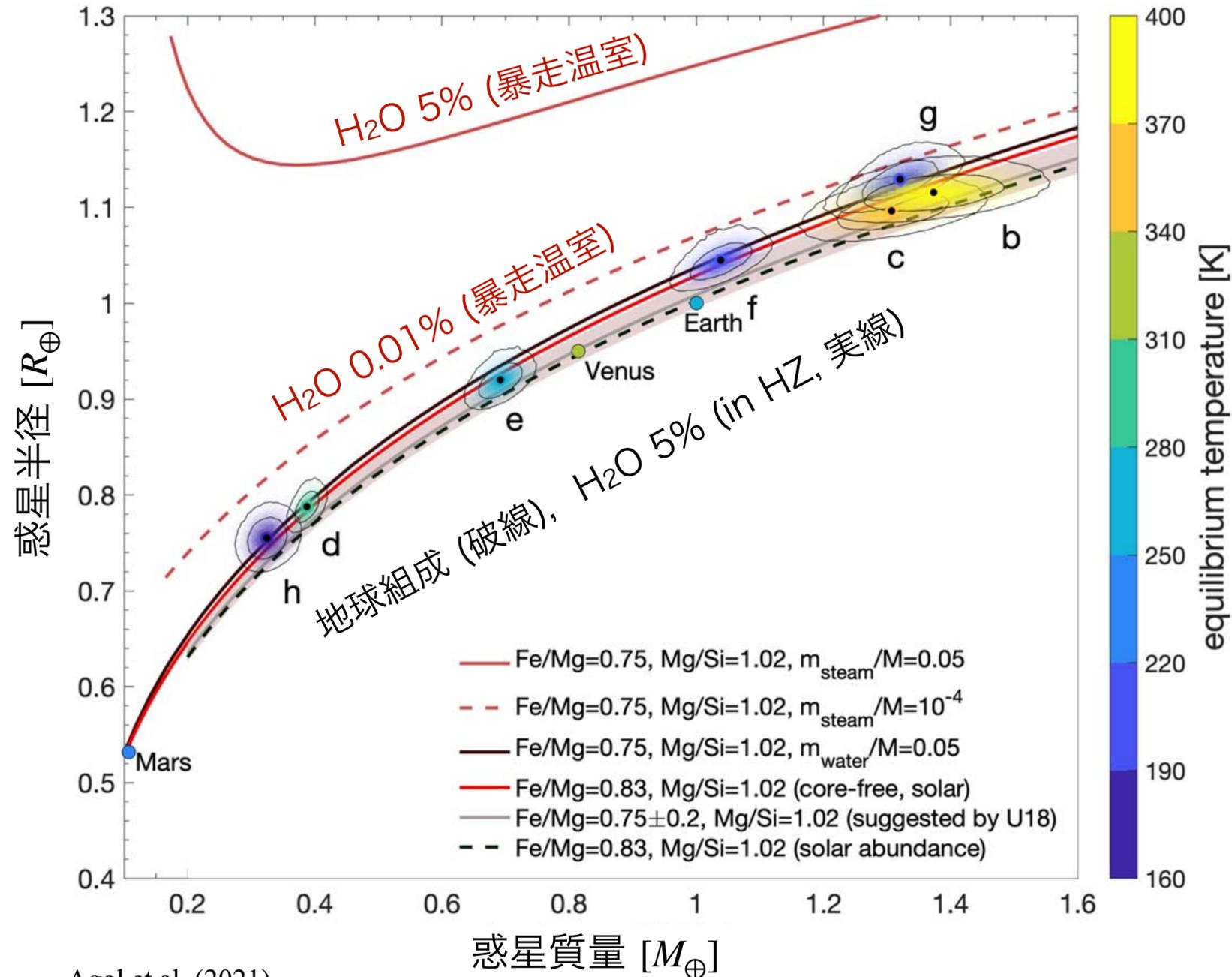
TRAPPIST-1 惑星の軌道(実線)とハビタブル・ゾーン(破線)



- 太陽近傍に多いM型星まわりの惑星は中心星とのサイズ比の観点で観測しやすい
- 太陽から 12 pc の距離にある TRAPPIST-1 の惑星系は3惑星 (e, f, g) がHZに位置する

# 平均密度

## TRAPPIST-1 惑星系の質量・半径と内部構造モデルの比較

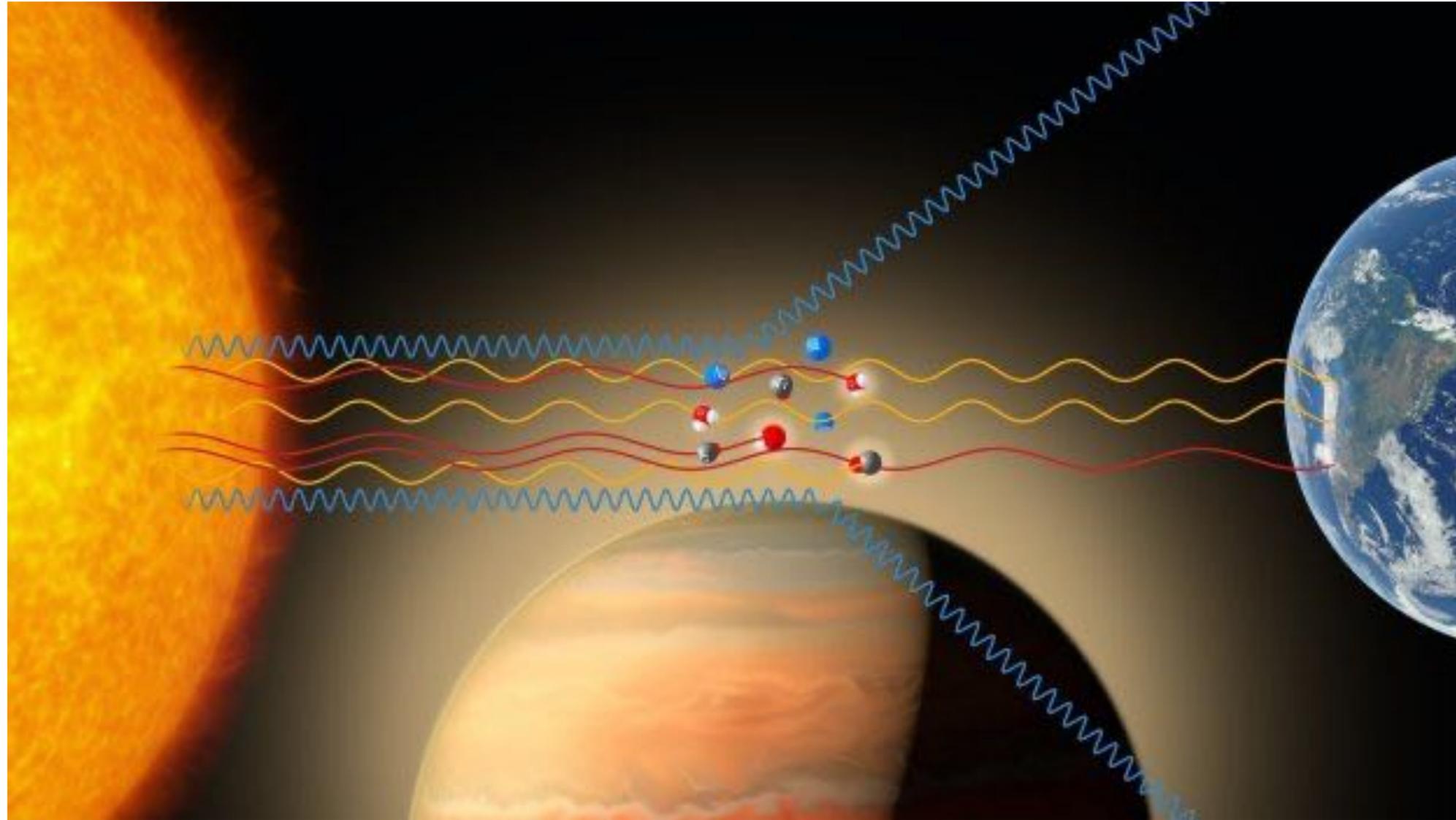


Agol et al. (2021)

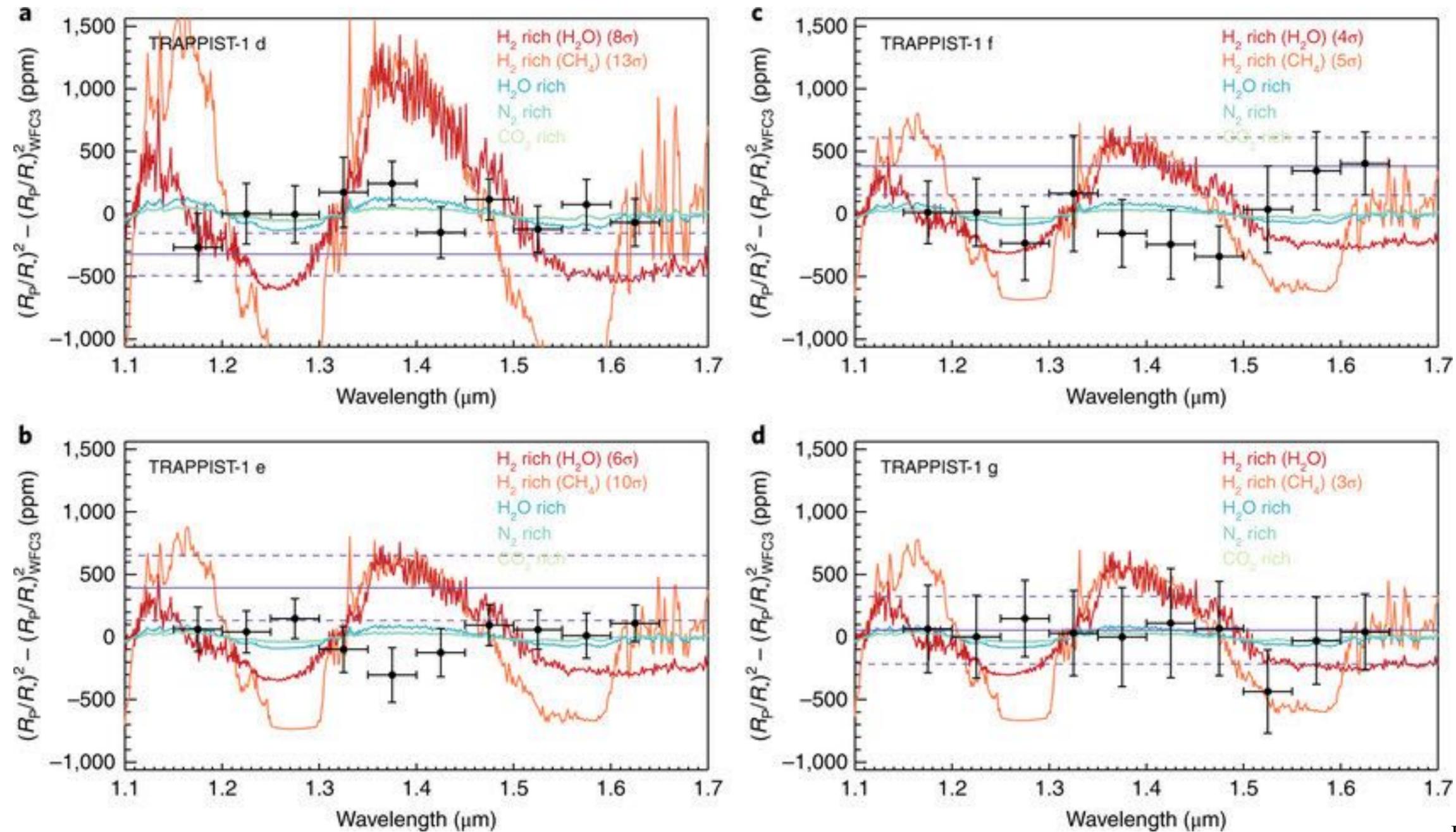
- 平均密度+内部構造モデル → 組成
- TRAPPIST-1 惑星は比較的よく平均密度が制約されている
- 惑星 b, c, d (暴走温室領域)  
→ H<sub>2</sub>Oは 0.01%以下 (cf. 地球海水 0.023%)
- 惑星 e, f, g, h (HZ or 全球凍結領域)  
→ 地球的な組成の可能性もあるが、  
5%程度のH<sub>2</sub>O層がある構造も許容される

# 大気スペクトル

---



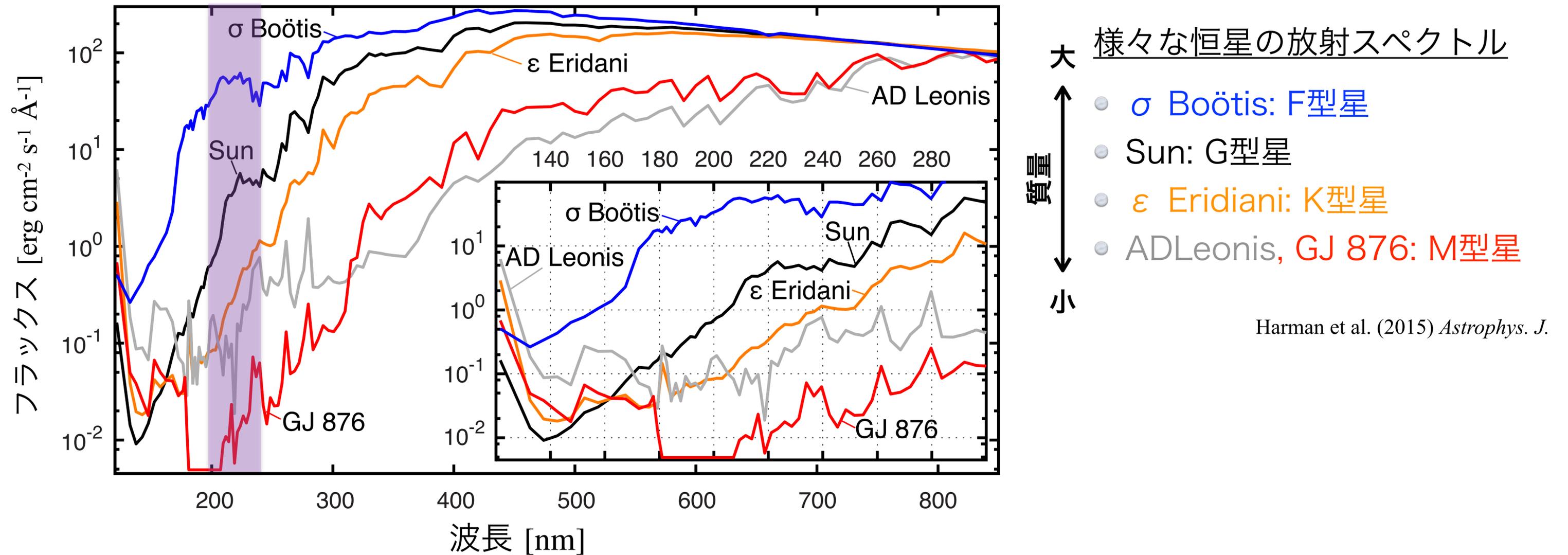
# TRAPPIST-1 惑星の透過光スペクトル



De Wit et al. (2018)

H<sub>2</sub>-richな大気ではないが、それ以上のことは現状わからない

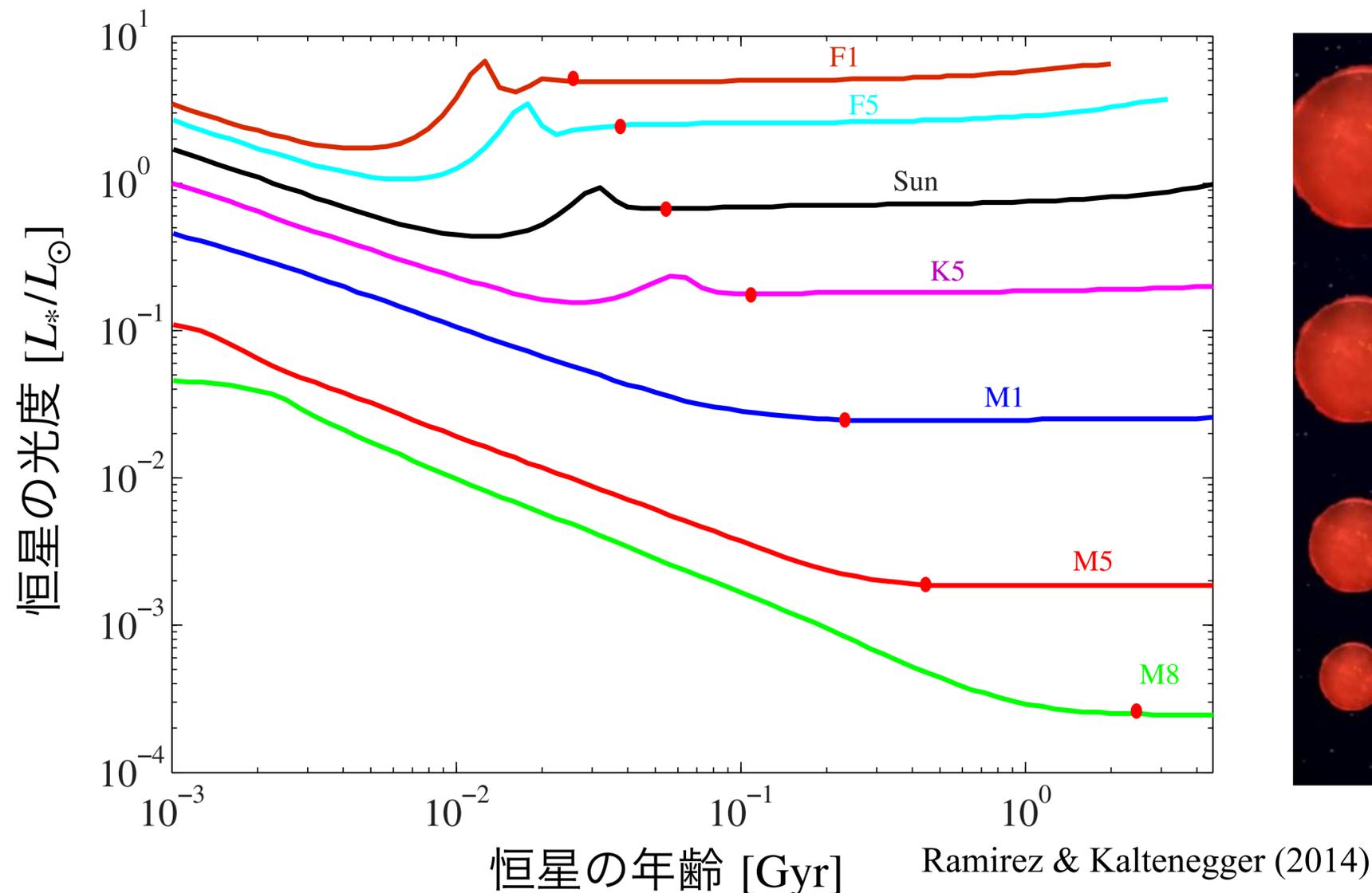
# 大気化学の理論予想



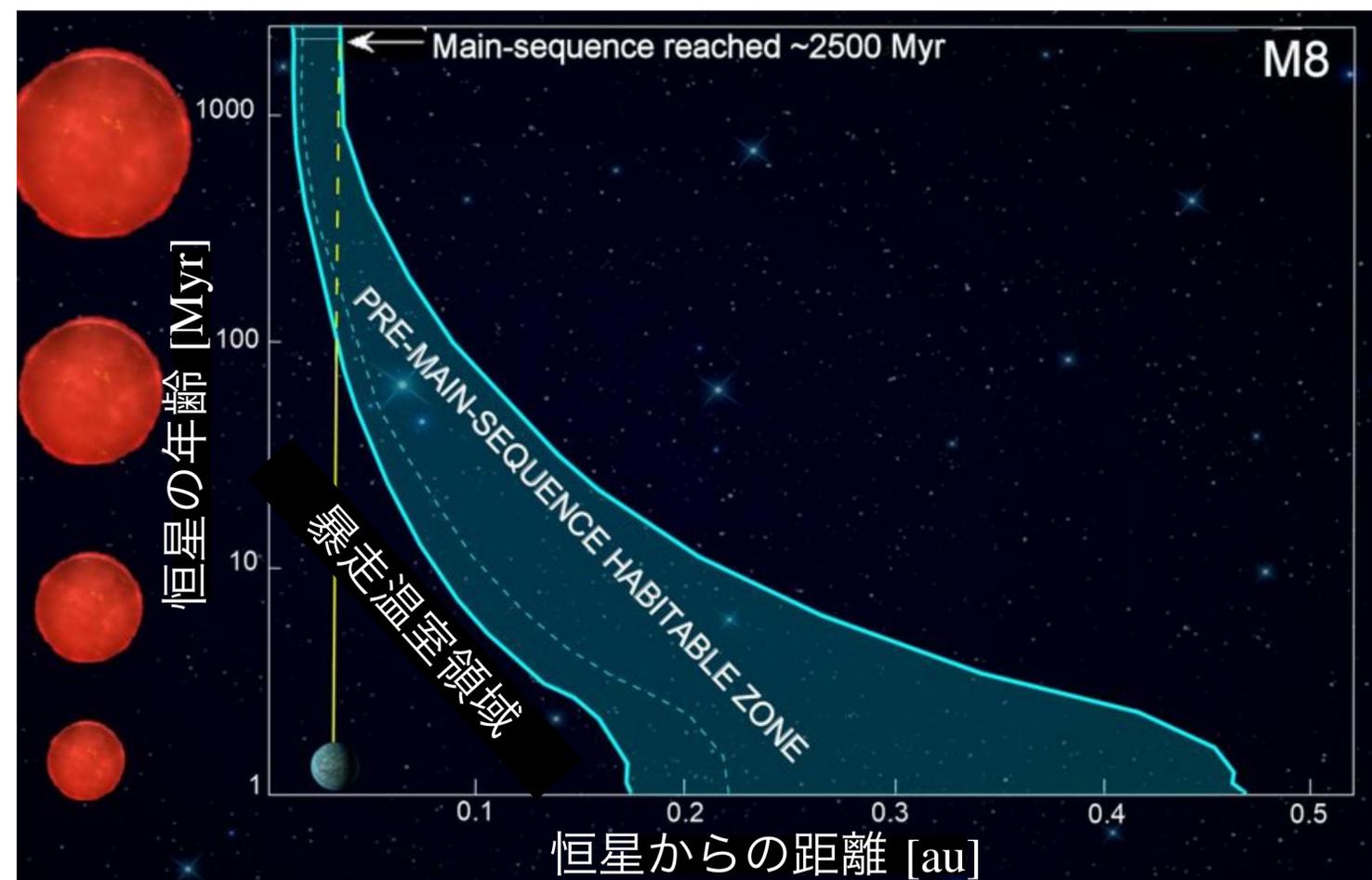
- 仮に地球と同じ大気組成で誕生した場合でも、中心星スペクトルの違いが惑星進化に影響
- M型星はH<sub>2</sub>O解離波長(200 – 240 nm)で暗い → M型星周りの惑星ではCO+O<sub>2</sub>大気? (e.g., Tian et al. 2014)

# 恒星進化の影響

様々なスペクトル型の星の前主系列星段階の光度進化



M型星のハビタブル・ゾーンの時間進化

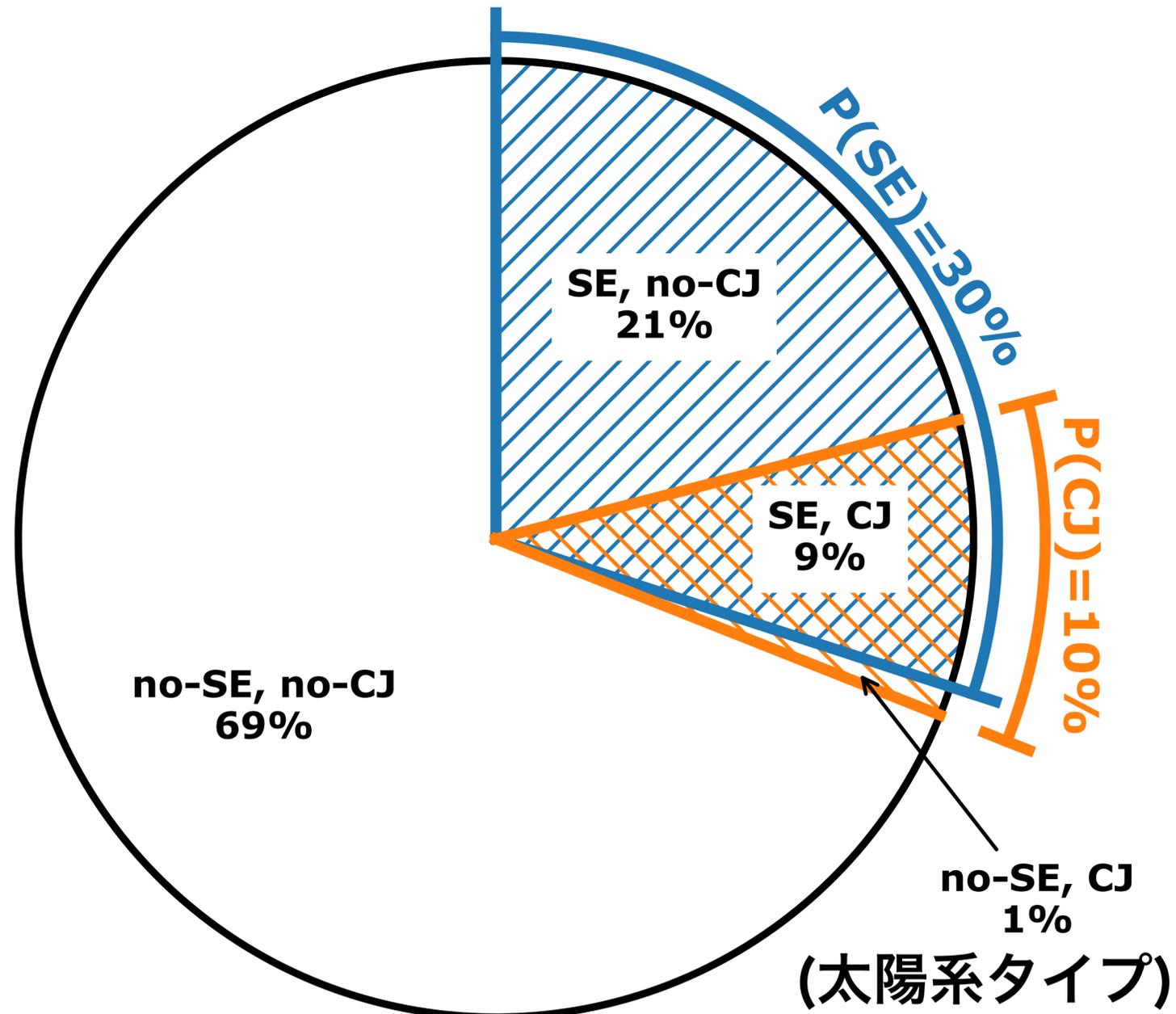


- 軽い恒星ほど前主系列段階が長く， M型星は主系列段階より光度が大きい
- 現在HZに位置する惑星は， かつて暴走温室状態を経験した → 金星のように水散逸？

# 太陽系は普遍的か

系外惑星系の内訳 (Zhu & Wu, 2018)

SE: 近傍スーパーアース, CJ: 遠方巨大ガス惑星



- スーパーアースの存在しない太陽系は特殊な惑星系かもしれない  
→ そもそも形成過程が異なる可能性  
→ 組成・進化に与える影響は？
- 異なるサンプル・統計処理からは真逆の結論も  
(Zhu & Wu 2018; Barbato et al. 2018)

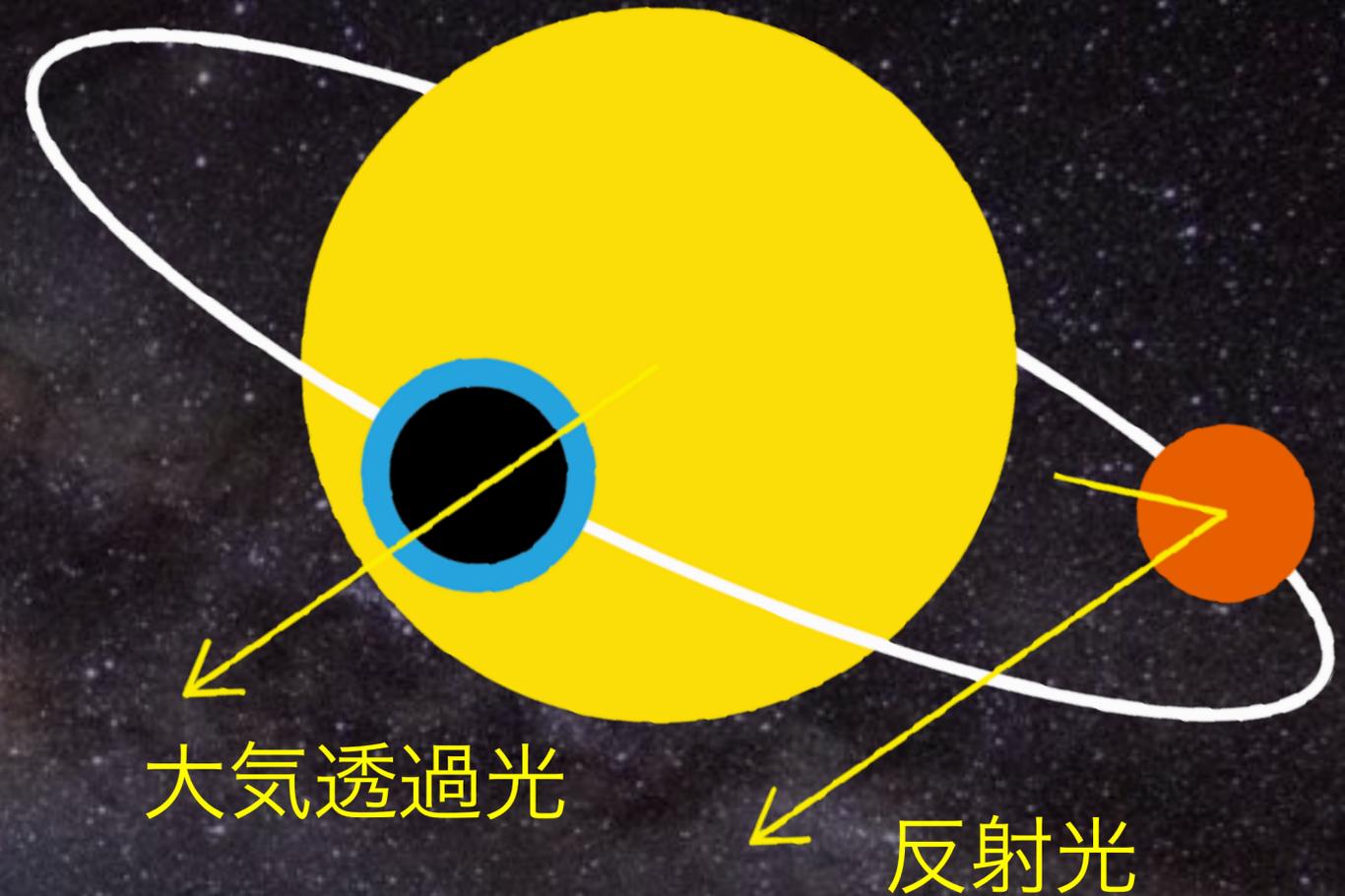
# 将来の系外惑星大気観測



James Webb 宇宙望遠鏡 (JWST)  
2021年打ち上げ



Thirty Meter Telescope (TMT)  
2027年ファーストライト



より精度のよい観測, 小さい惑星へ

+ LUVOIR, HabEx (2030年代)

# まとめ

---

## 火星史

- クレーター年代 → 地球と比較して古い地殻が残っている
- 水の流れた跡：バレー・ネットワーク, アウトフロー・チャンネル
- 水と大気の散逸：H, C, N, 希ガス同位体比で時期・散逸量・残存量を見積もることができる
- 火星の気候変動の要因は何か？
  - CO<sub>2</sub>大気ではそもそも十分温暖にならない。
  - 追加の温室効果ガスの供給と散逸が鍵？

## 系外惑星の表層環境 (TRAPPIST-1 惑星系を例に)

- 中心星・軌道 → 平衡温度, ハビタブル・ゾーンとの位置関係
- 平均密度 → 内部の組成, ただし数%程度の水氷層の有無などを判別は現状できない
- 大気スペクトル → 透過光スペクトルの深さから低分子量大気(H<sub>2</sub>)は否定できる
- 恒星スペクトル・進化・形成過程によって, 地球サイズでも全く異なる惑星かもしれない

# レポート課題 (7/15 17時締切)

---

現在の火星の極冠にある氷の量は、全球平均した水深にすると約 20 m に対応する。現在のD/H比を初期値の6倍とし、火星からの水素散逸の同位体分別係数を  $f = 0.1$  (Krasnopolsky, 2002) とする時、レイリー分別の式(1)から初期水量 (全球平均水深)を計算せよ。

$$\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \left(\frac{N_2^0}{N_1^0}\right)^{-1} = \left(\frac{N_1}{N_1^0}\right)^{f-1} \quad \text{--- (1)}$$

$N_1, N_2$ : 2つの同位体の総量。上付き0は初期値を示す。