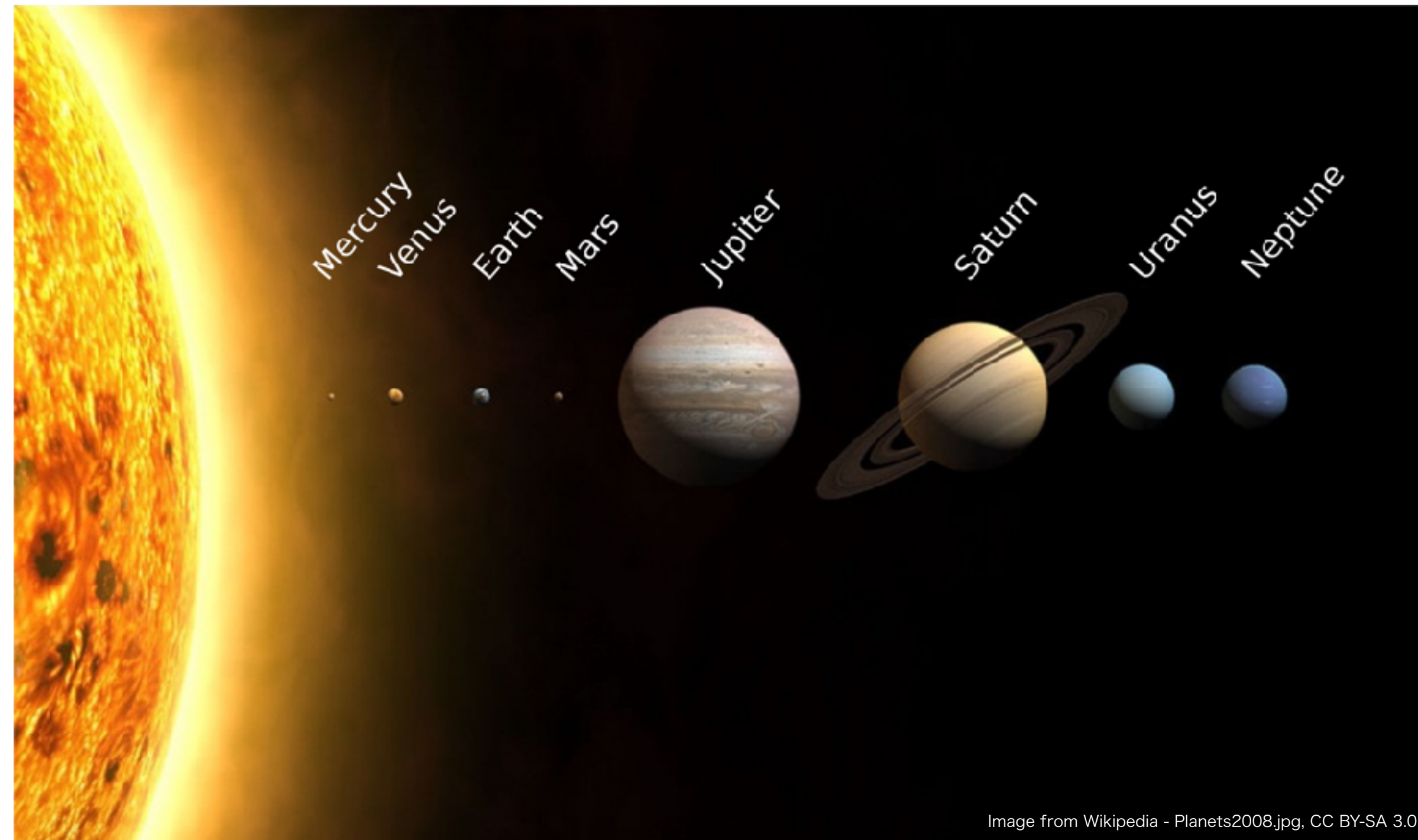


地球惑星圏物理学

第1回：太陽系



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

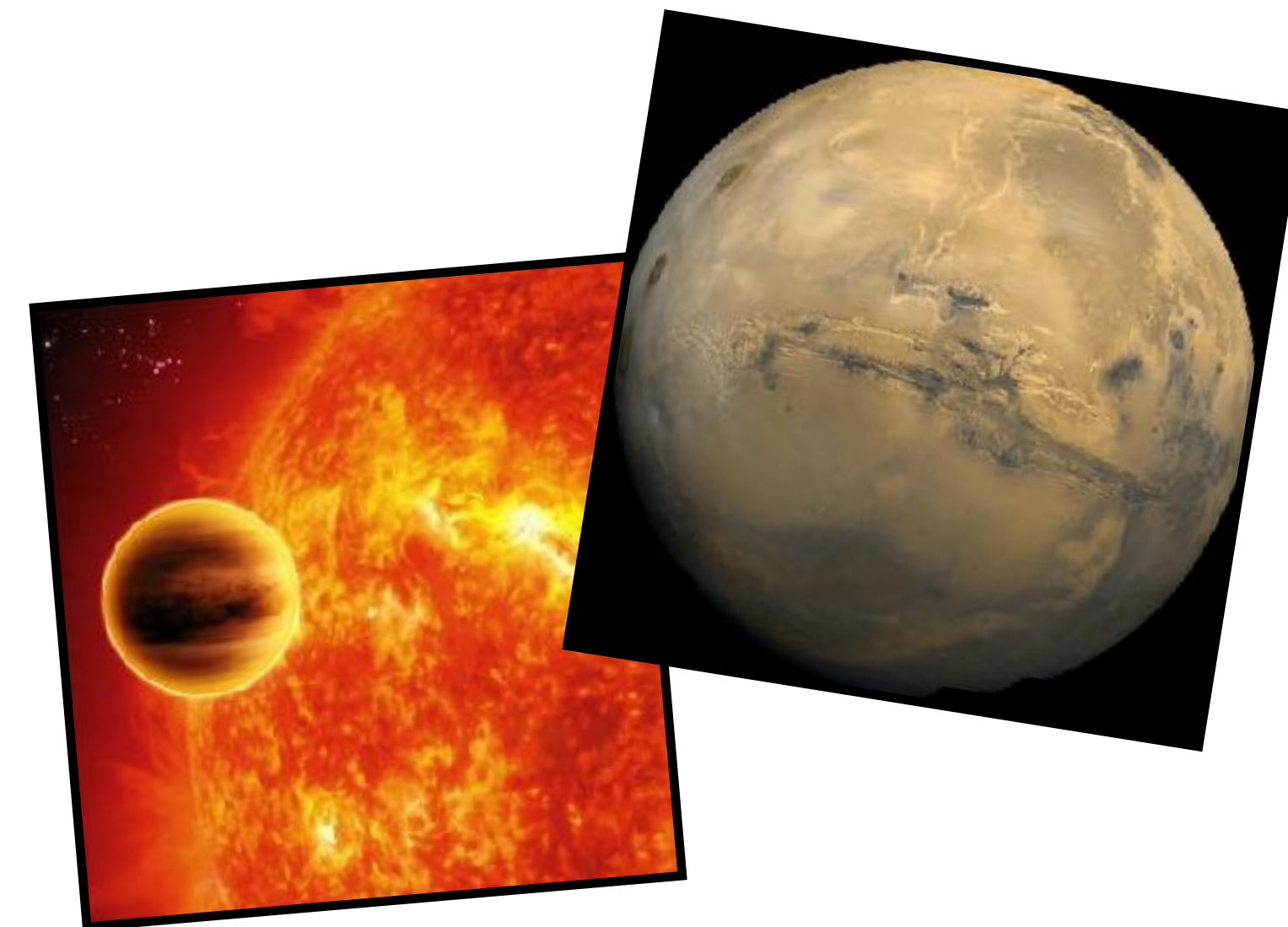
hiro.kurokawa@elsi.jp

自己紹介

- 黒川 宏之 (くろかわ ひろゆき)
- 東京工業大学 地球生命研究所
- 専門：“惑星の形成と進化”の理論研究, 太陽系探査
- 連絡先：hiro.kurokawa@elsi.jp
- 講義時間外の質問はメール, クラスウェブのディスカッション機能へ



Credit: JAXA



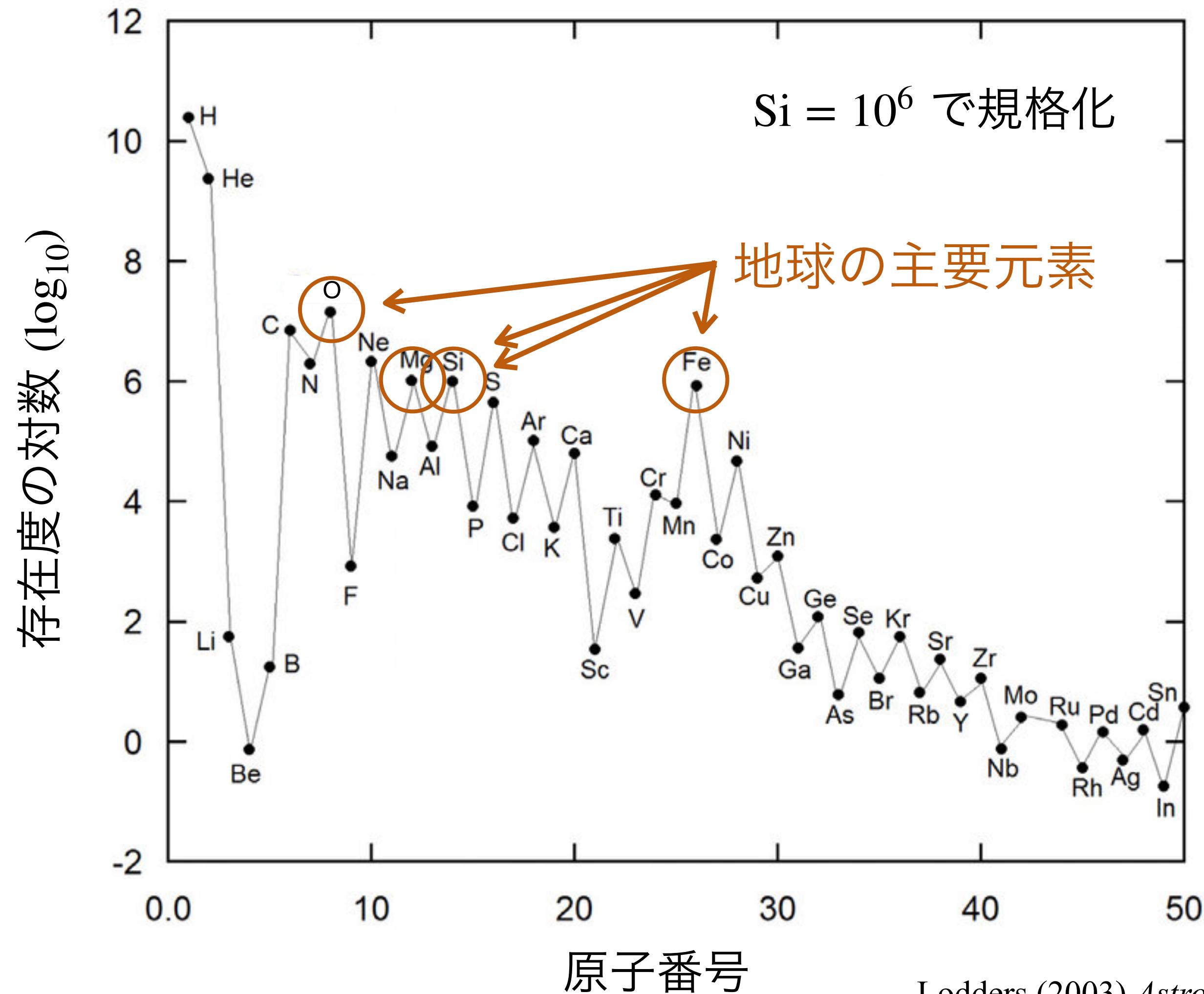
太陽系の惑星

地球質量 $M_{\oplus} = 5.97 \times 10^{24}$ kg,
地球半径 6.371×10^6 m



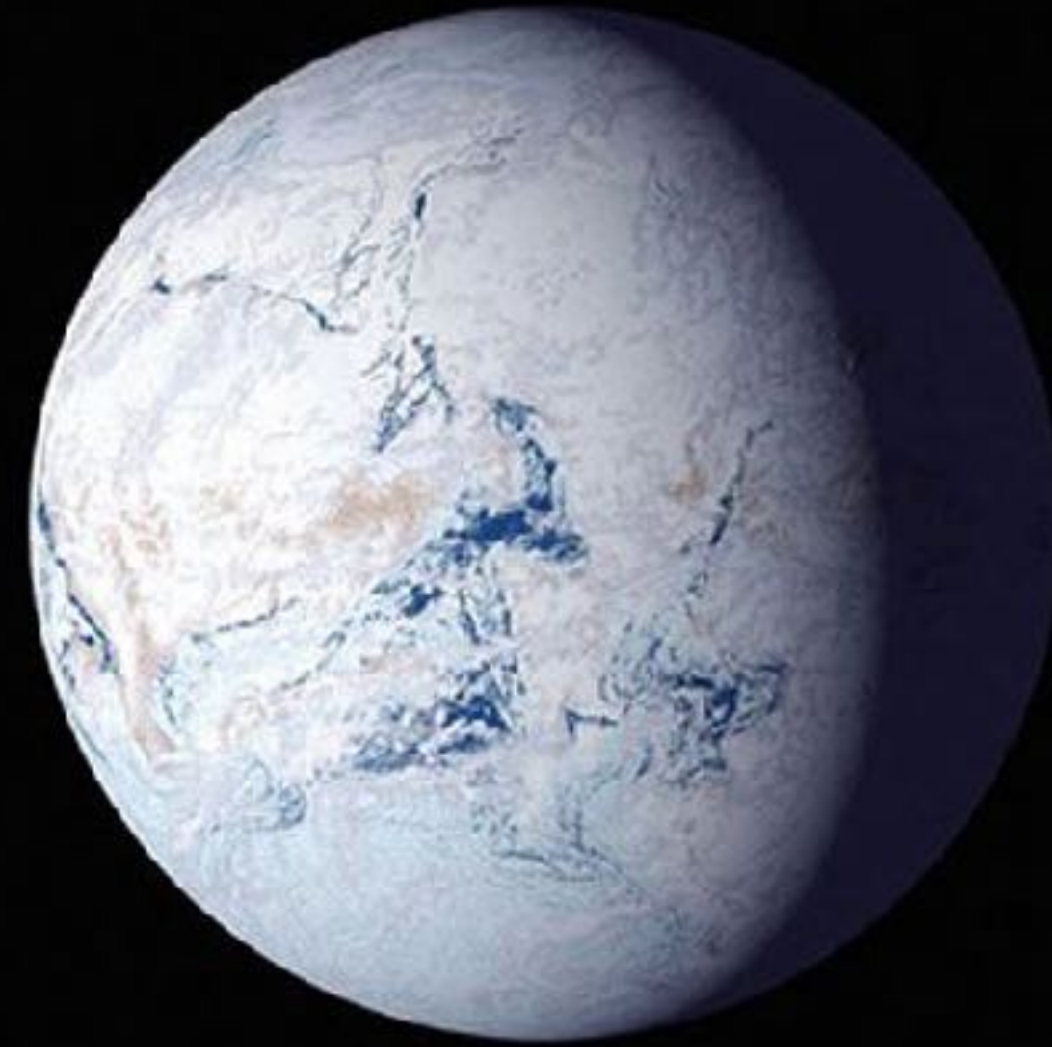
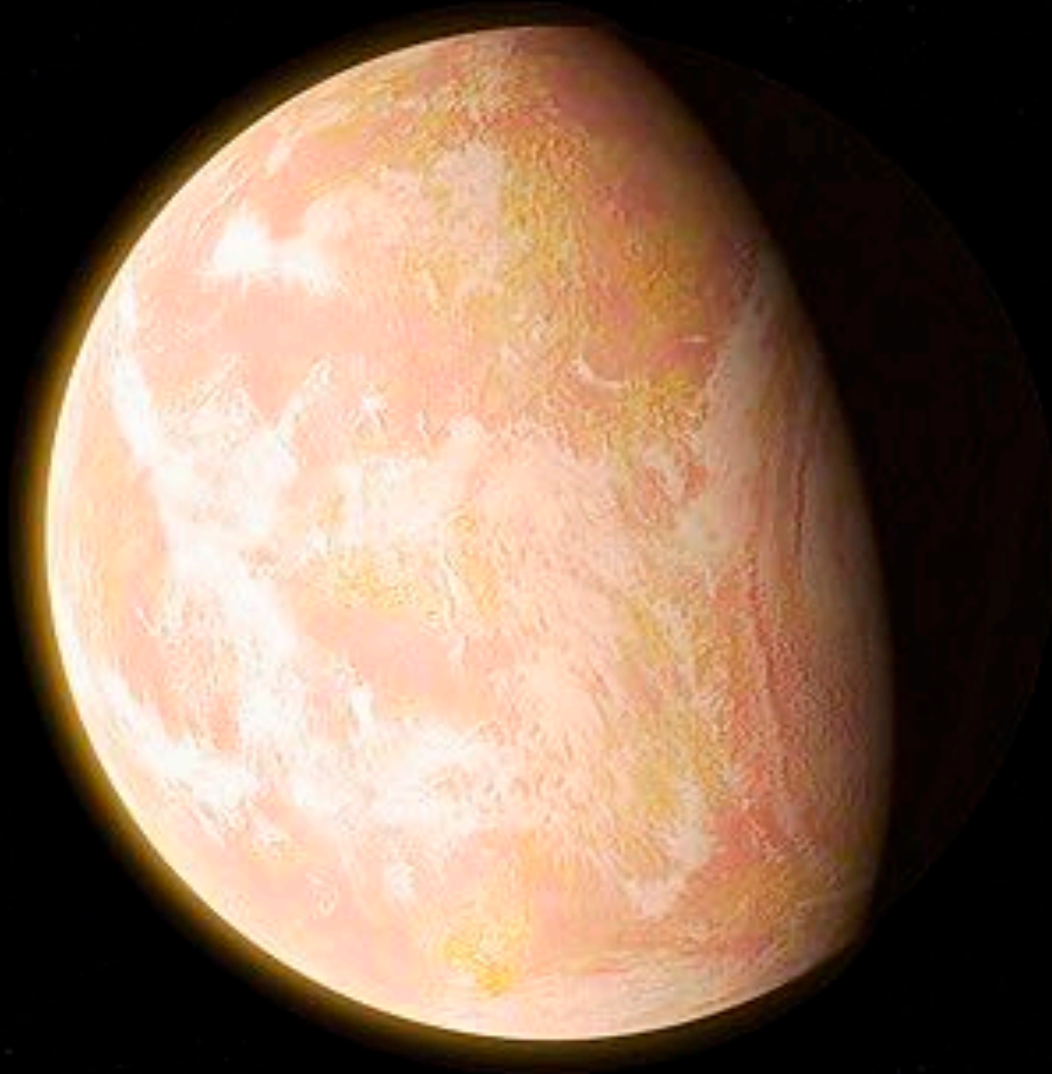
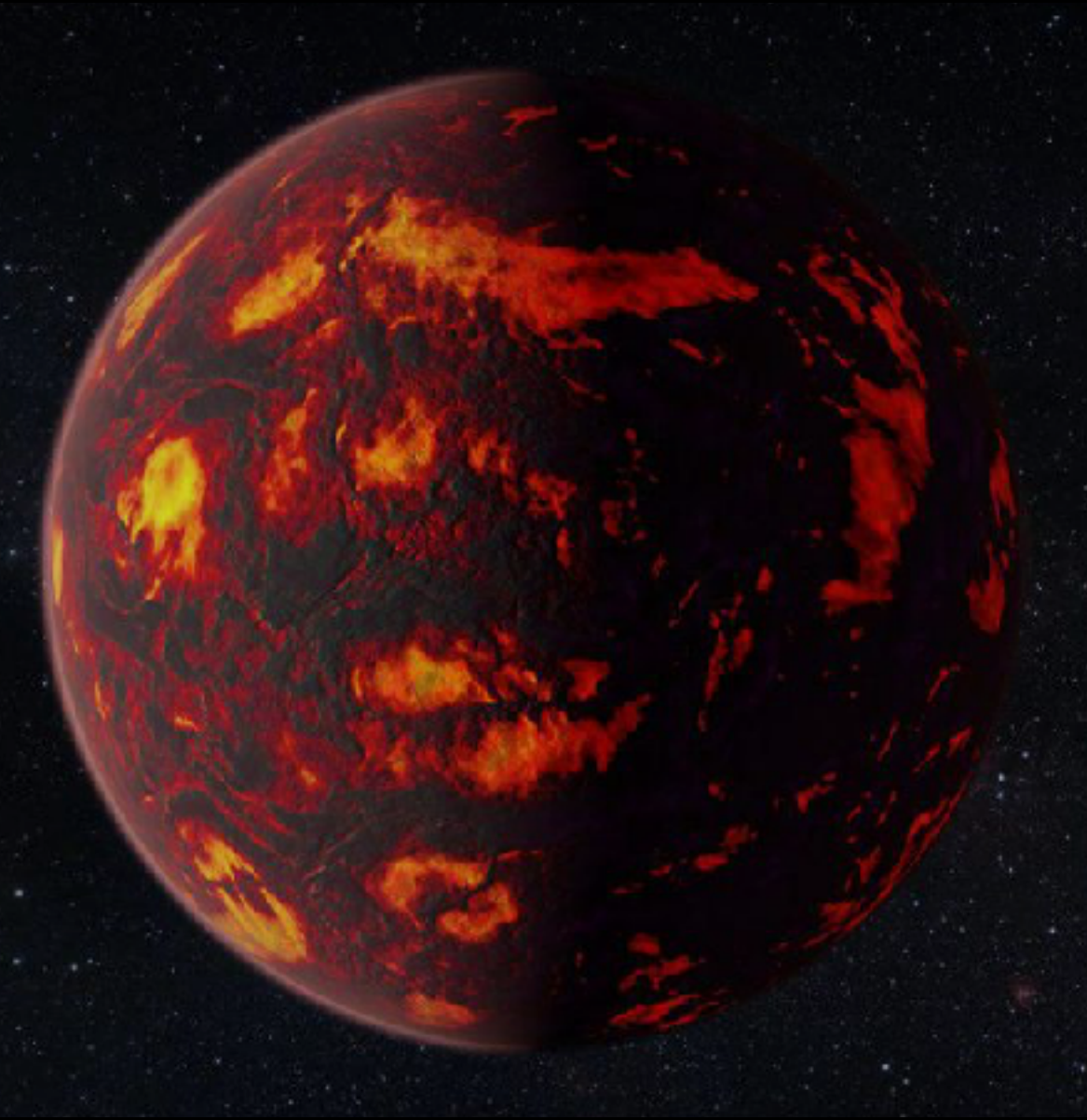
	質量 [M_{\oplus}]	半径 [R_{\oplus}]	密度 [10^3 kg m $^{-3}$]	
水星	0.055	0.38	5.43] 岩石惑星 (地球型惑星) (cf. 0気圧の岩石 $\sim 3 \times 10^3$ kg m $^{-3}$)
金星	0.815	0.95	5.20	
地球	1	1	5.52	
火星	0.107	0.53	3.93	
木星	317.89	10.97	1.33] 巨大ガス惑星
土星	95.18	9.14	0.688	
天王星	14.54	3.98	1.27] 巨大氷惑星 (cf. 水 $\sim 1 \times 10^3$ kg m $^{-3}$)
海王星	17.15	3.86	1.64	

太陽系の元素存在度



- 太陽系の組成 \equiv 太陽の組成
(\because 太陽は太陽系総質量の 99.87% を占める)
- (原始)太陽系の組成(質量割合)：
水素 $X \approx 0.71$, ヘリウム $Y \approx 0.28$,
その他 (“重元素”) $Z \approx 0.015$
- 地球はわずか1%程度しかない元素から形成
→ 惑星形成は元素の分化過程

“進化”する地球



マグマオーシャン

有機物ヘイズ？

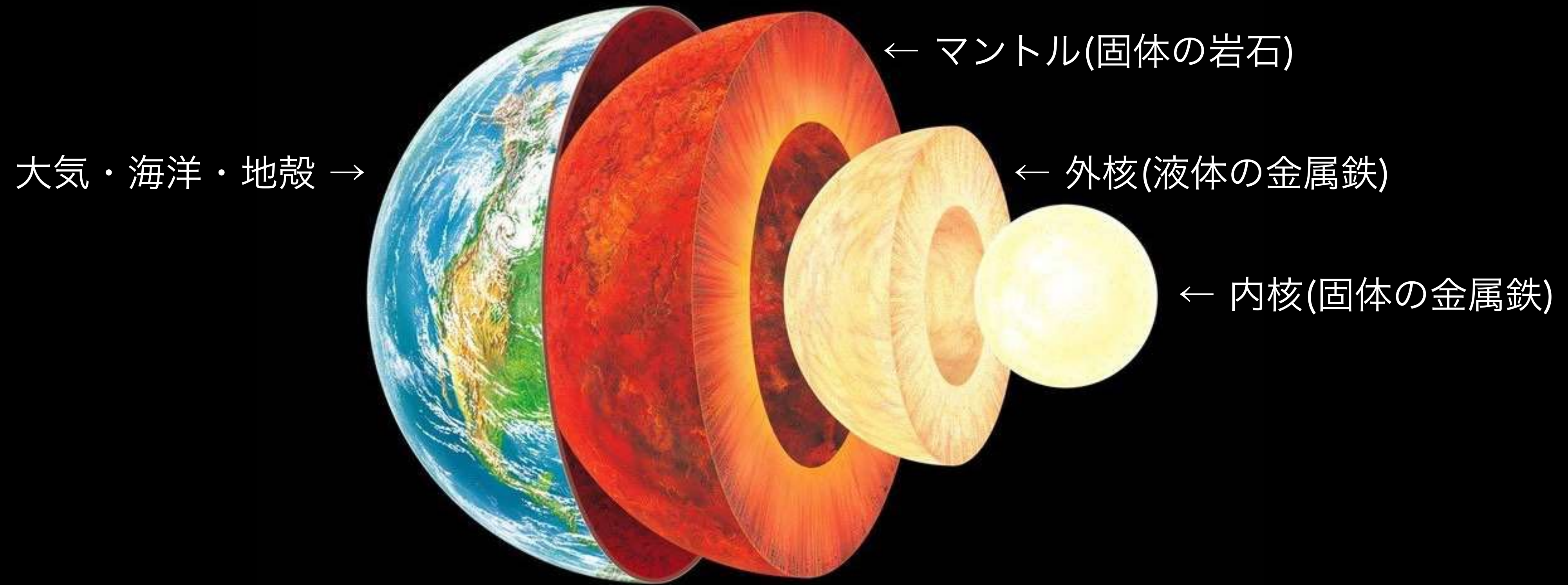
スノーボールアース

現在の地球

→ 時間

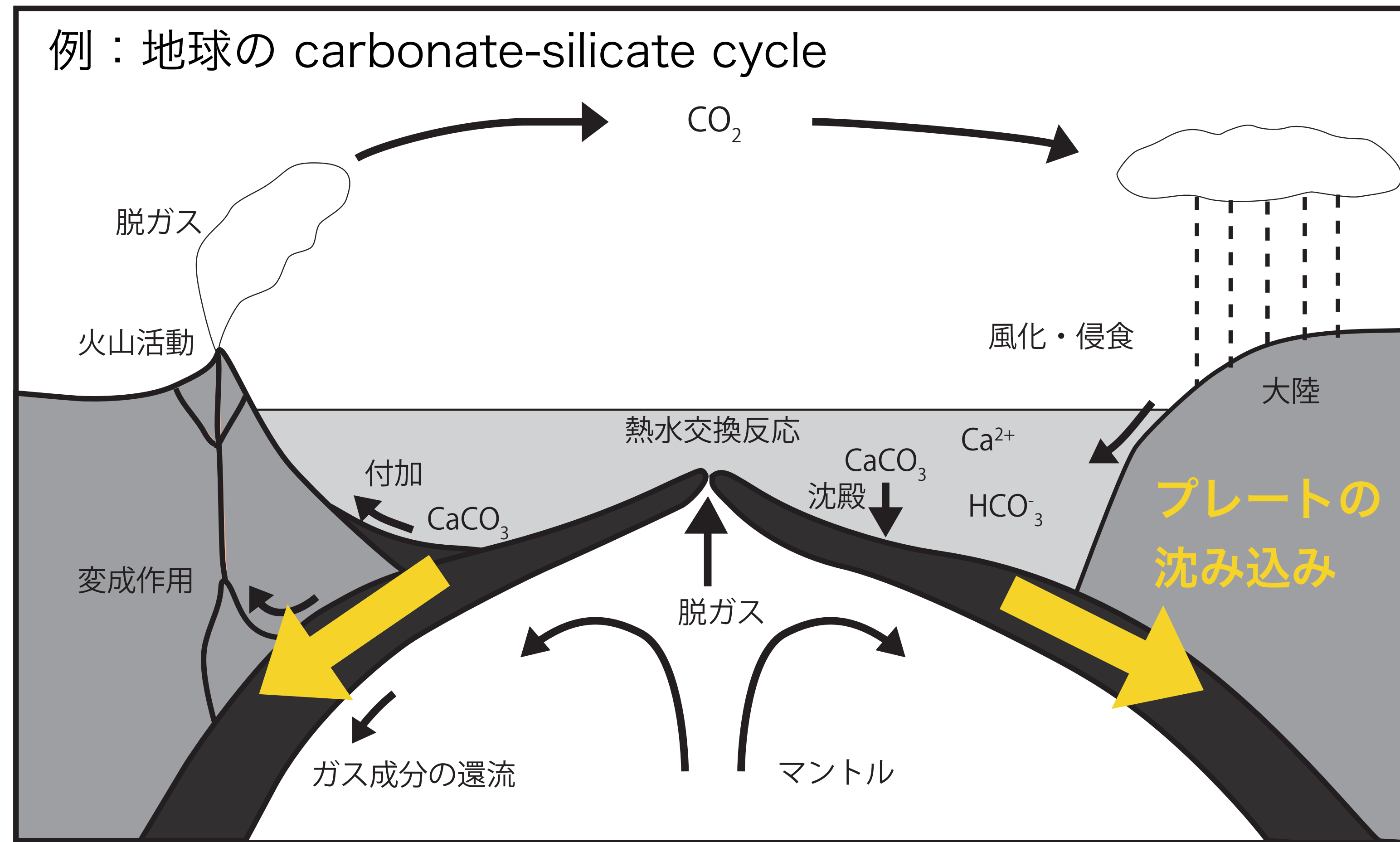
- 地球は歴史を通じてその姿を変えてきた
- 大気組成・気候・水量・大陸地殻…

地球の構造



- 岩石の地殻 + マントル：67.5 wt. %， 金属鉄のコア(外核 + 内核)：32.5 wt. %
- 大気：海洋：固体地球 = 8×10^{-6} ：レポート課題：1
→ 大気・海洋は惑星の“薄皮”であり， 固体地球の影響を強く受ける

地球表層と内部の物質循環



門屋他 (2012) 日本惑星科学会誌, Vol. 21, No. 3.

- 海洋プレート上の鉱物に取り込まれて水(-OH), 炭素(-CO₃), 窒素(NH₄⁺-)がマントルへ還流
- 大気-海洋-地殻系での炭素循環タイムスケール ~ 10⁶⁻⁷ 年

太陽の活動と進化

ニュートリノで観測された太陽の中心核 (核融合領域)

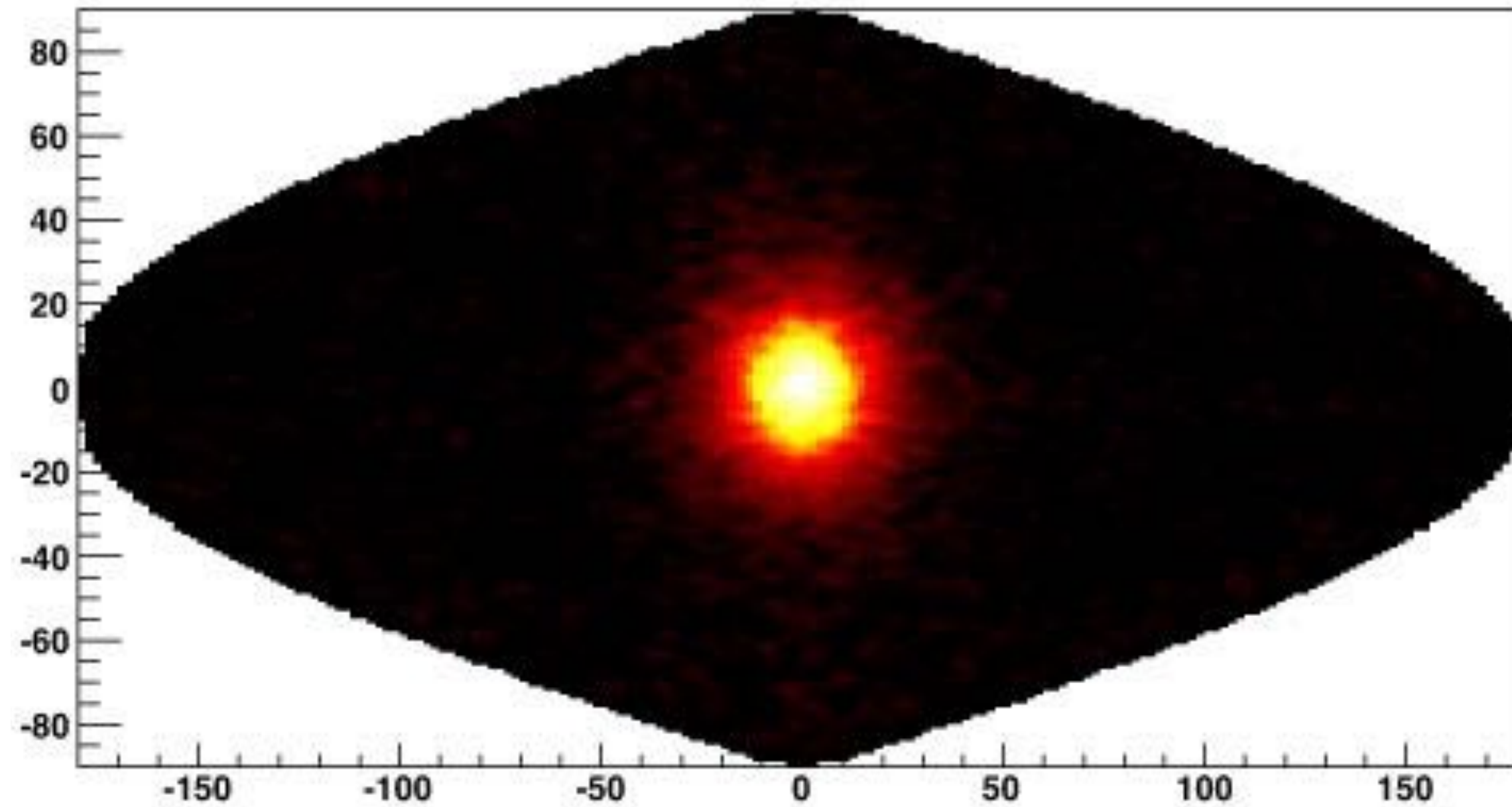


Image credit :東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

紫外線で観測された太陽の質量放出

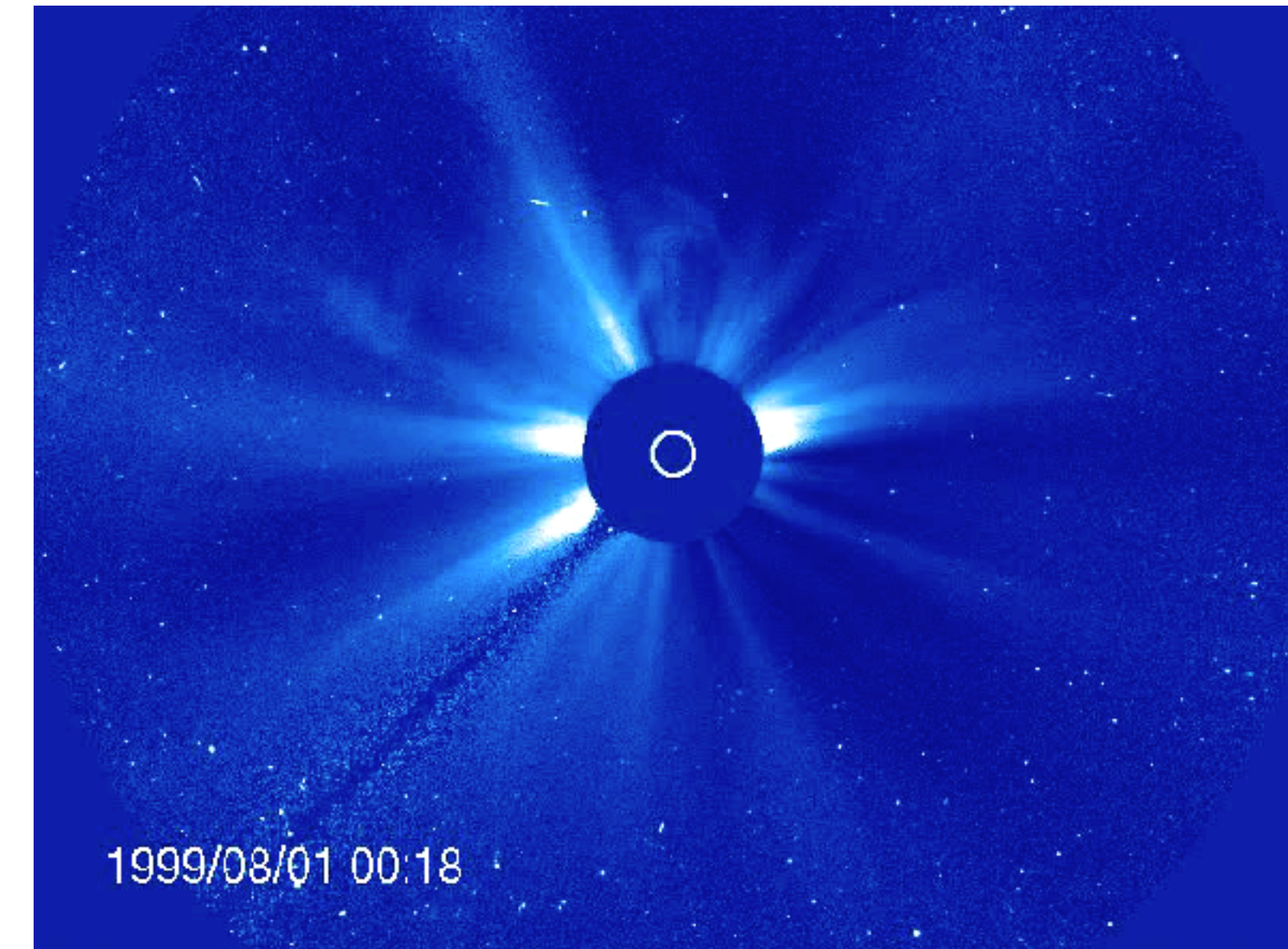
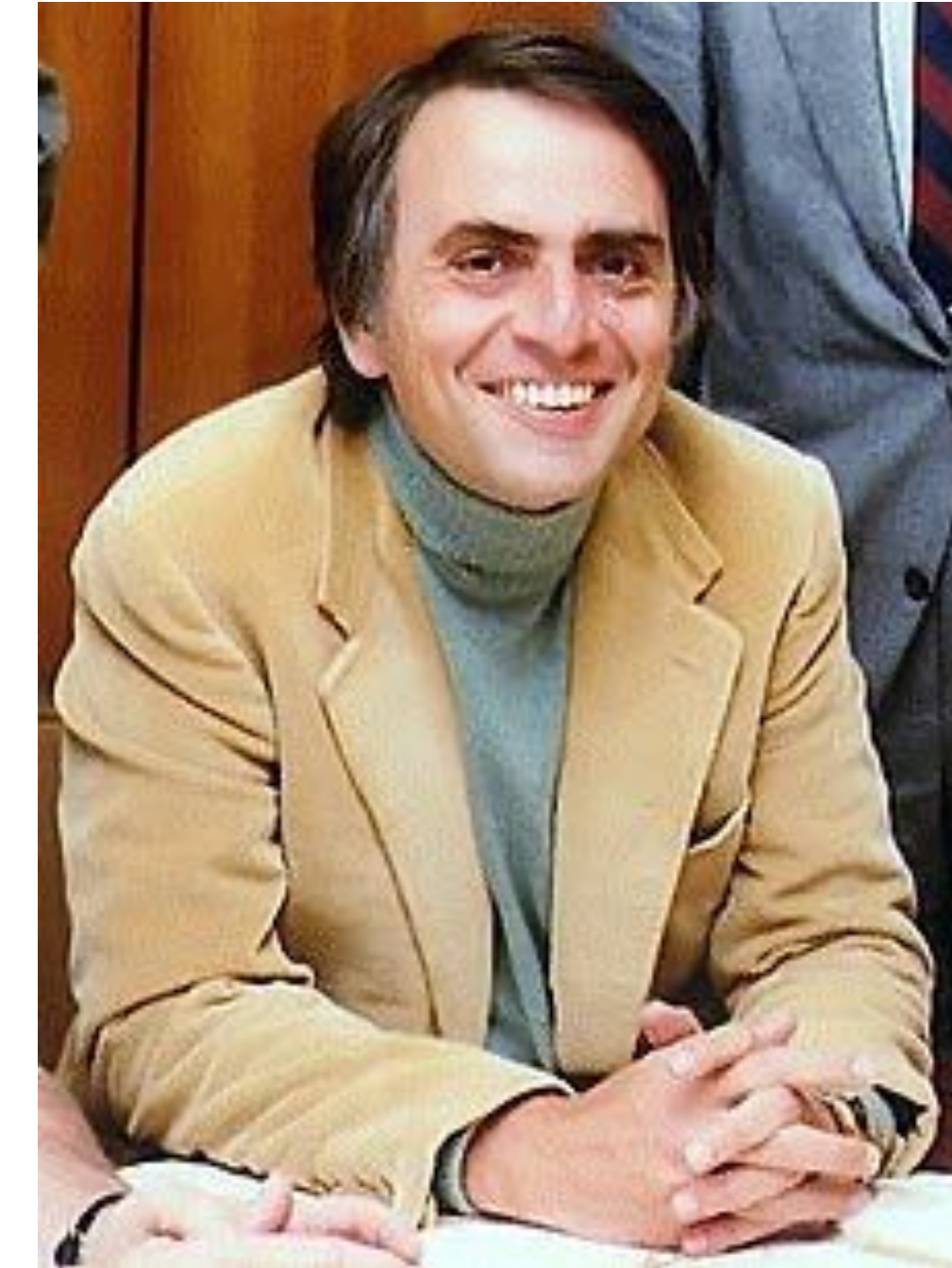
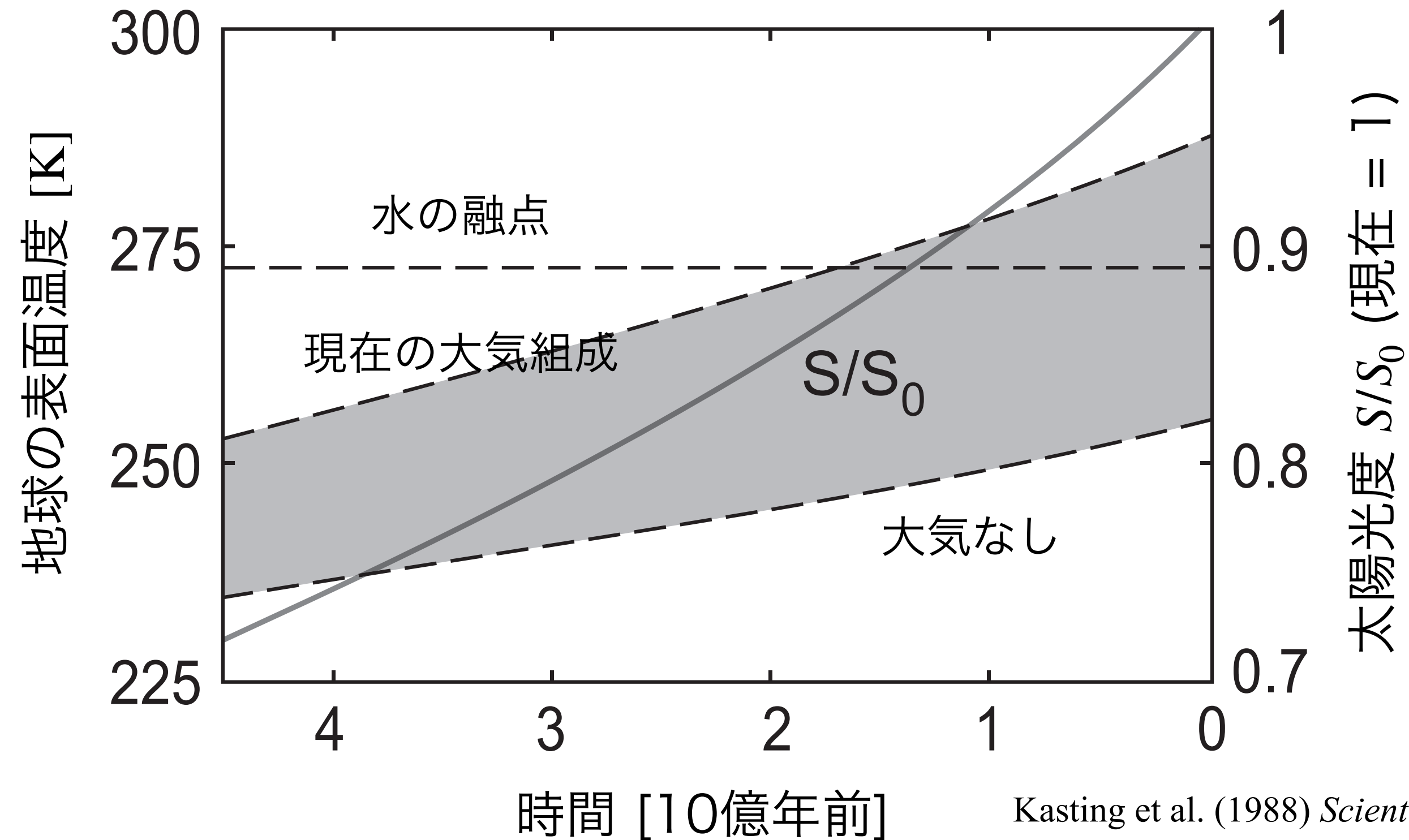


Image credit: NASA

- 太陽放射と太陽風は惑星の環境に大きな影響を及ぼす
- 太陽も進化する
 - 核融合反応 ($4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu$) \rightarrow 密度上昇 \rightarrow 自重を支えるために光度が上昇
 - 太陽風 \rightarrow 自転角速度低下 \rightarrow 極端紫外線・X線光度低下, 太陽風フラックス低下

暗い太陽のパラドックス

太陽光度と地球の表面温度の進化(モデル計算)



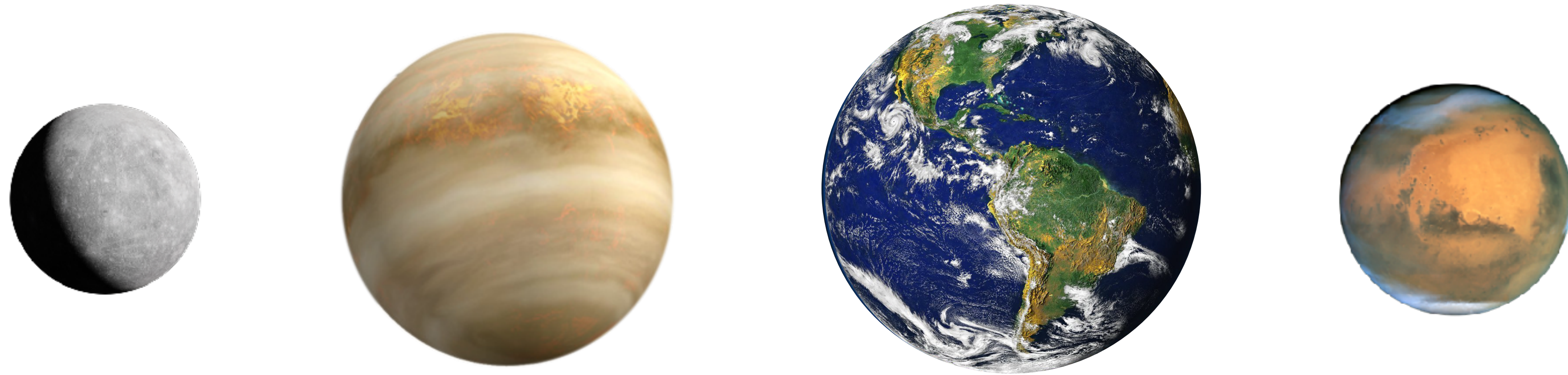
Carl Sagan

40億年前の太陽光度は現在の 70% しかない

→ 現在と同じ大気組成を仮定した場合, 20億年以上前の地球は凍りついてしまう

↔ 海が存在した地質学的証拠と矛盾 (Sagan & Muller 1972, *Science*)

地球型惑星の表層環境

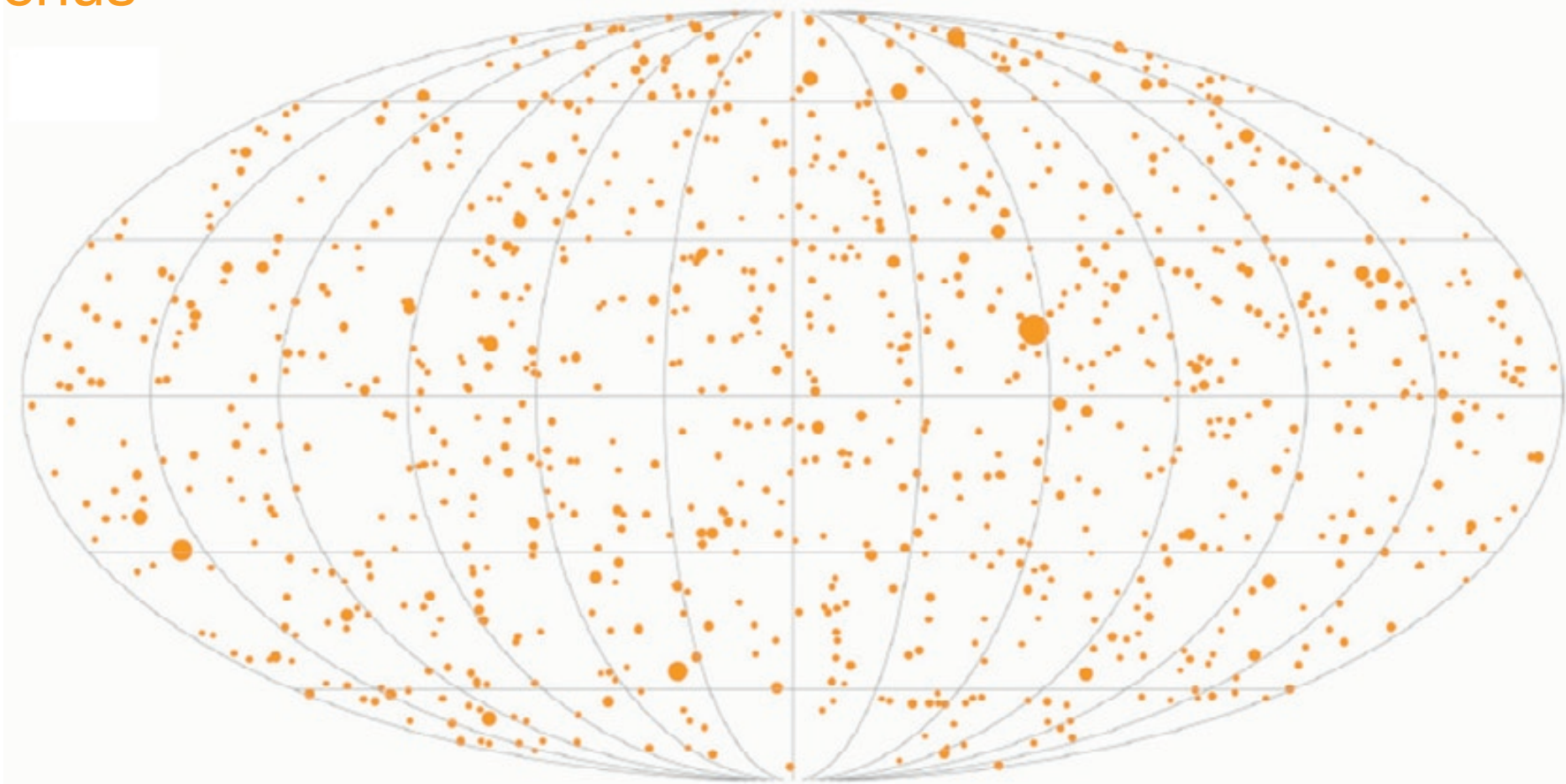


	水星	金星	地球	火星
軌道半径 [au]	0.4	0.7	1	1.5
地表面気圧 [気圧]	—	90	1	0.006
大気主成分	—	CO ₂ (>95%)	N ₂ , O ₂	CO ₂ (>95%)
地表平均気温 [K]	440	740	288	210
表層水量 [地球=1]	—	10 ⁻⁵ (水蒸気)	1 (液体の水)	10 ⁻³ (氷)

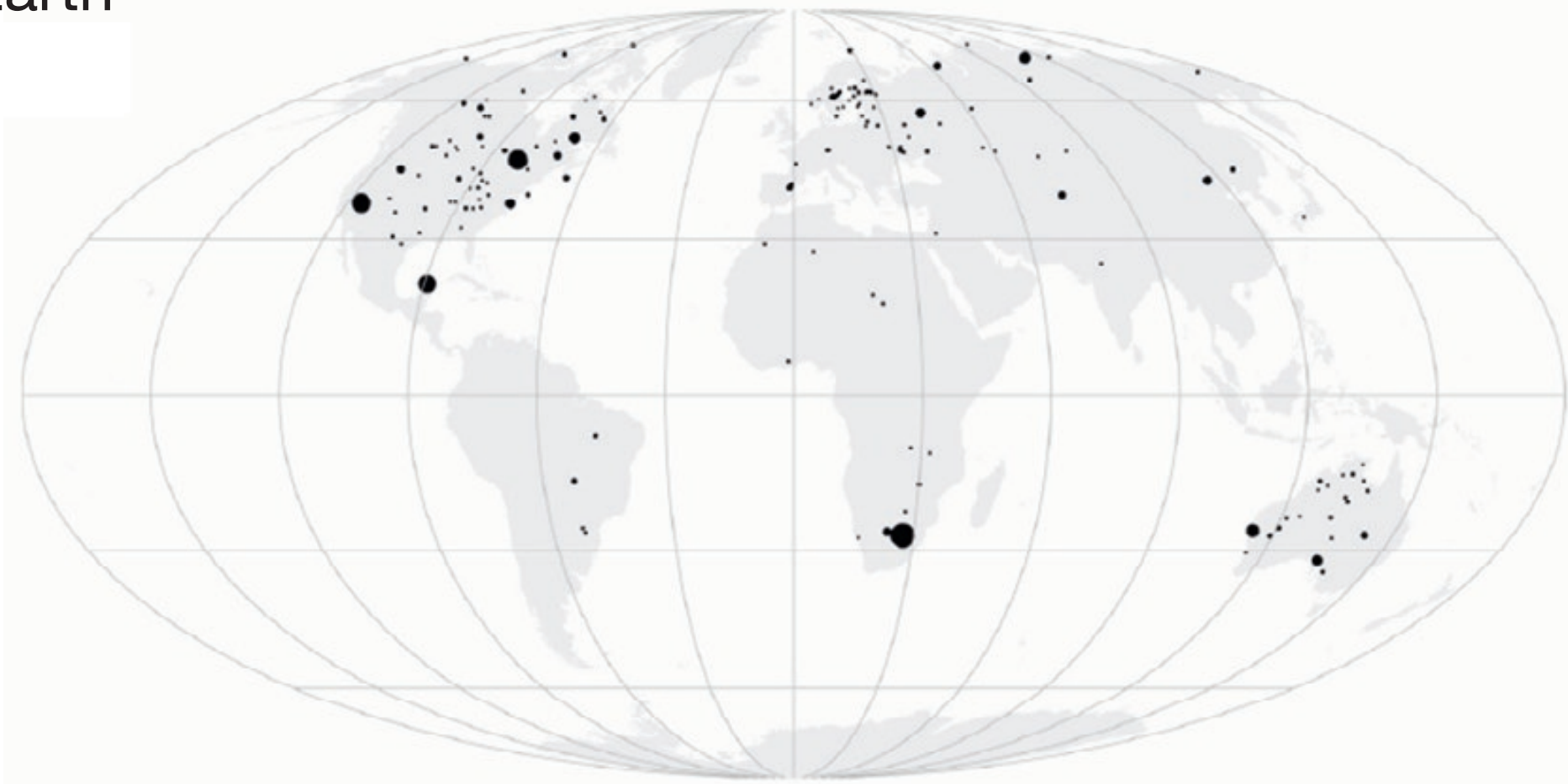
金星

金星と地球のクレーターマップ

Venus

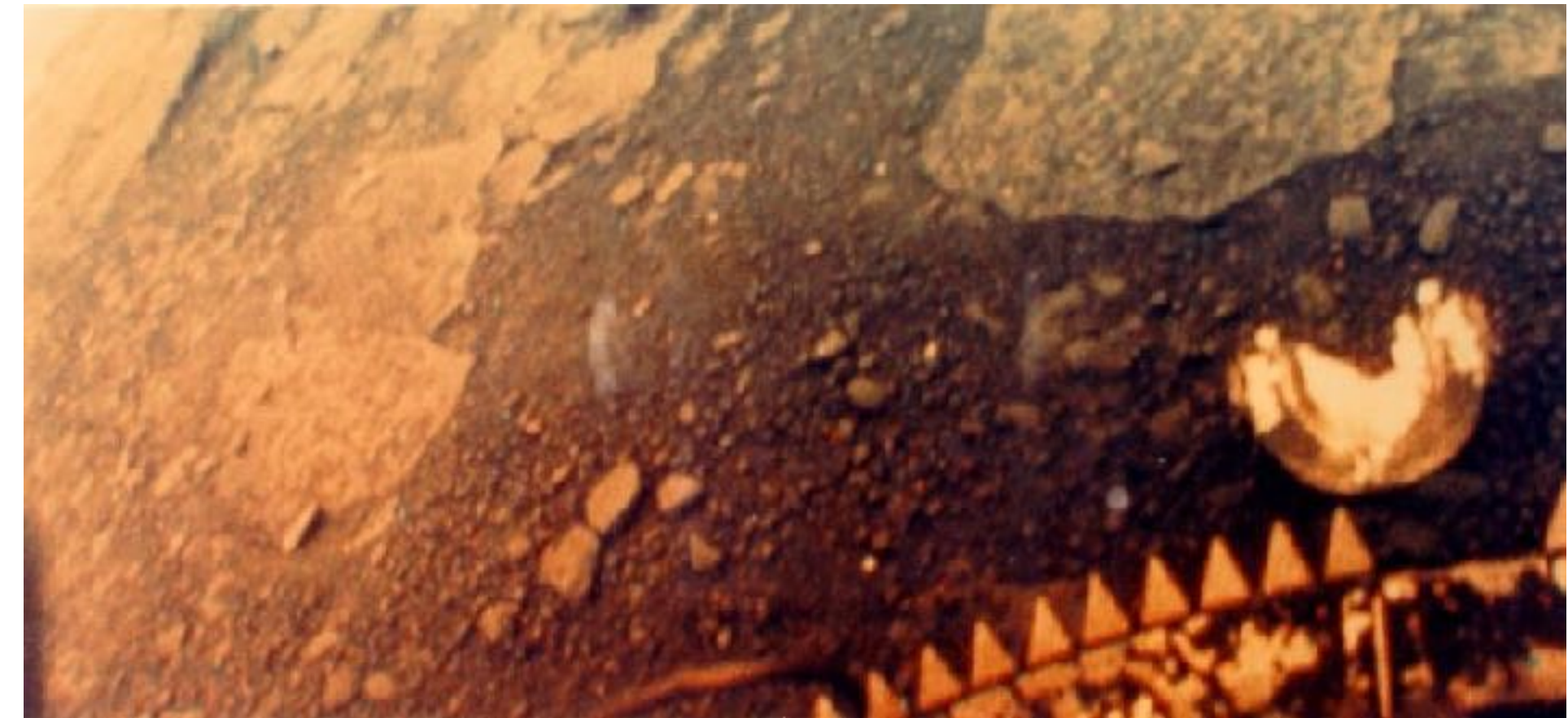


Earth



Werner & Ivanov (2015) in *Treatise on Geophysics 2nd Edition*

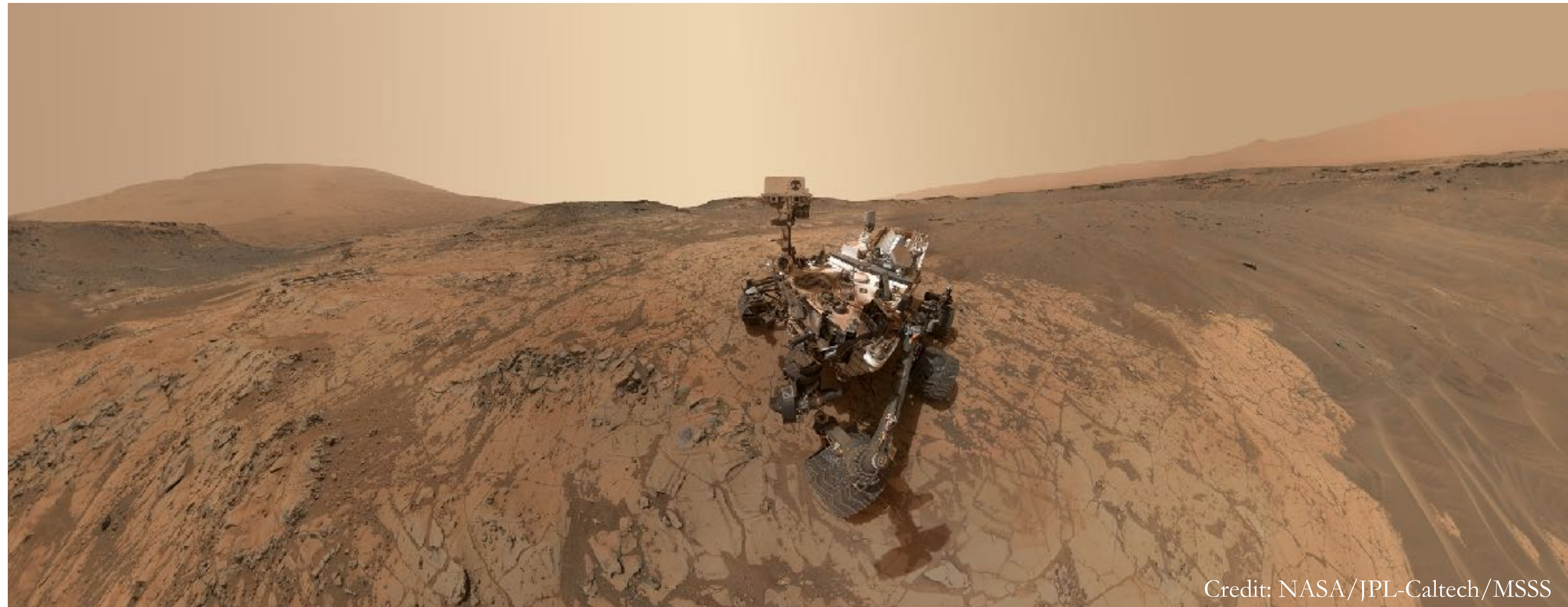
探査機ベネラ13号が撮影した金星の地表



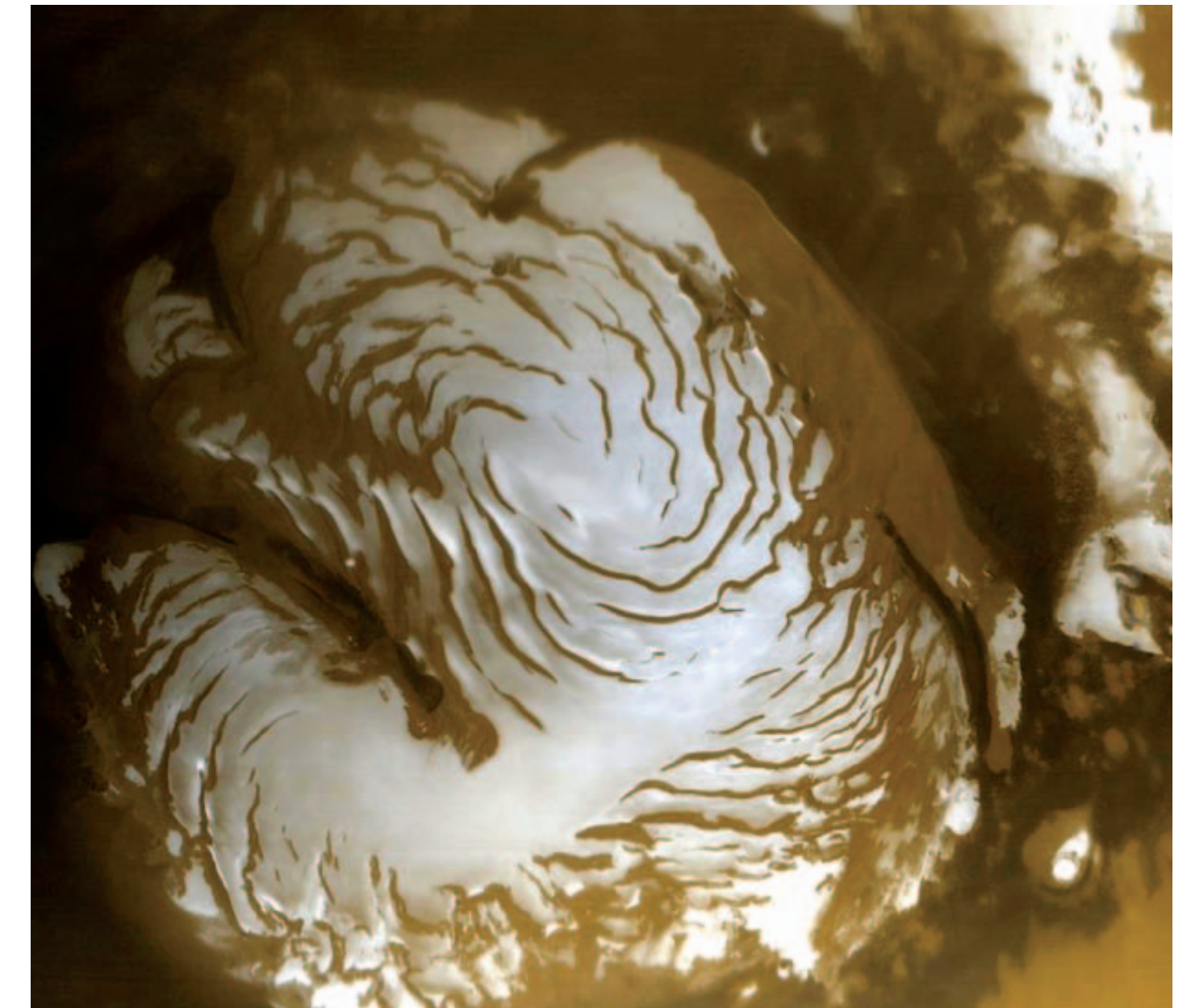
- 高温 (大気の温室効果), 乾燥
- 濃硫酸の雲に覆われている
- ホスフィン (PH₃) の発見が報告されて (反論もある) 生命の存在可能性について議論 (e.g., Greaves et al. 2020)
- プレート・テクトニクスがない
 - 一様なクレーター分布 (表面年代)
 - 大陸・海洋地殻の標高の二分性の欠如

火星

火星探査車 Curiosity の自撮り風画像

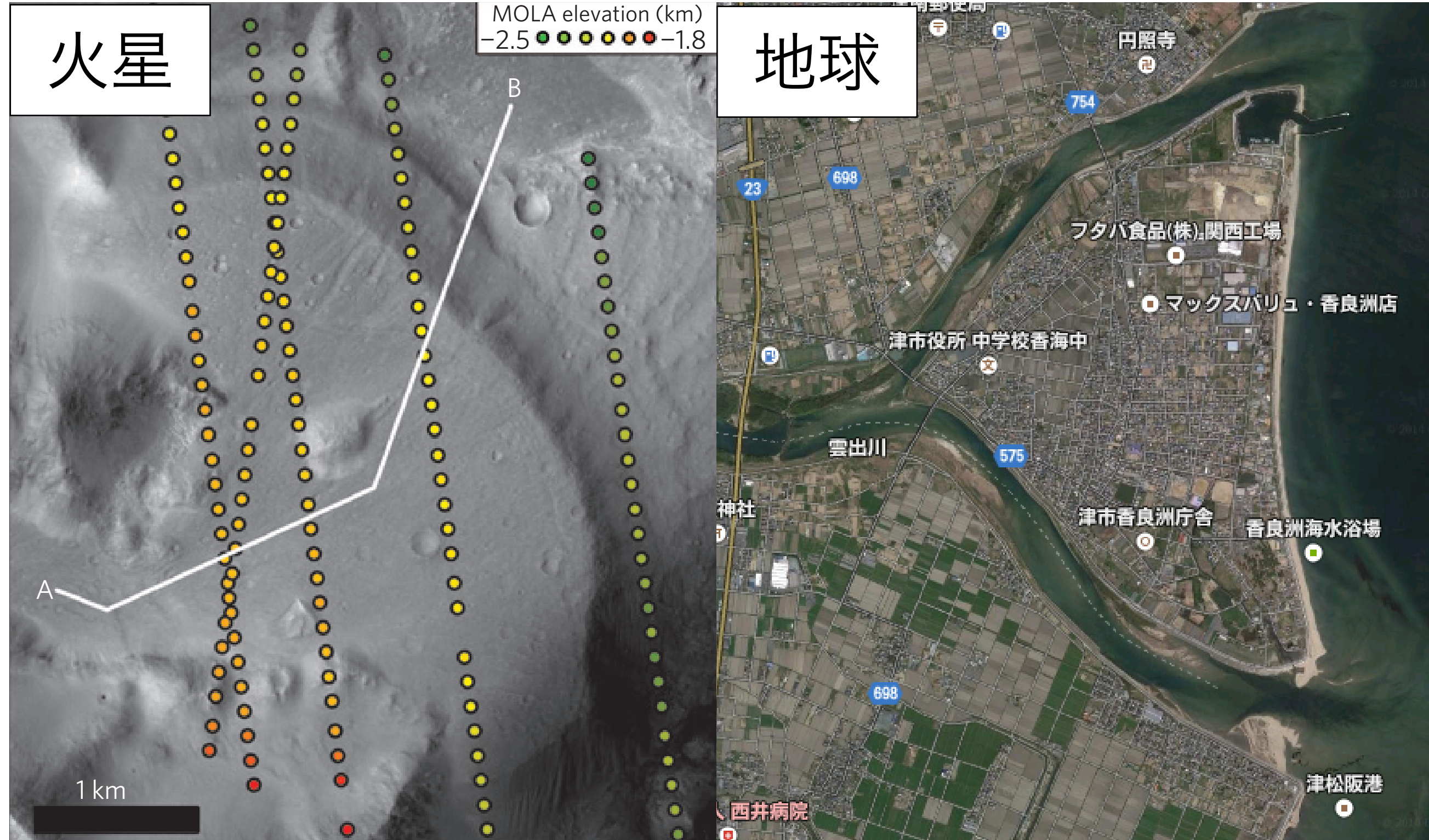


極冠の氷

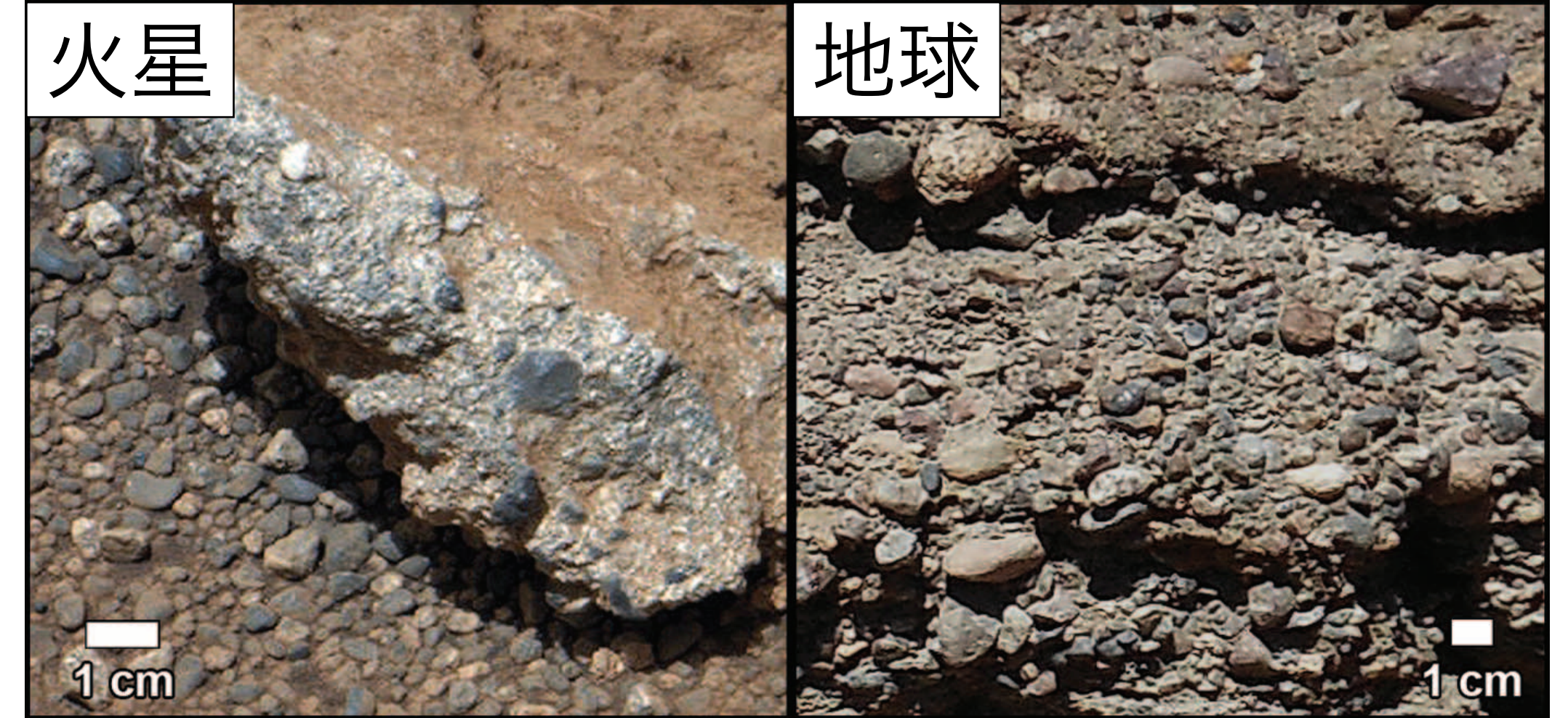


- 低温, 乾燥 (※ 極域には氷)
- 全球に分布するダストが気候にも影響 (太陽光の吸収, 砂嵐)
- 頻繁に探査が行われてきたので, 惑星の中では地球の次くらいには情報がある

火星の流水地形



Di Achille & Hynek (2010) *Nature*

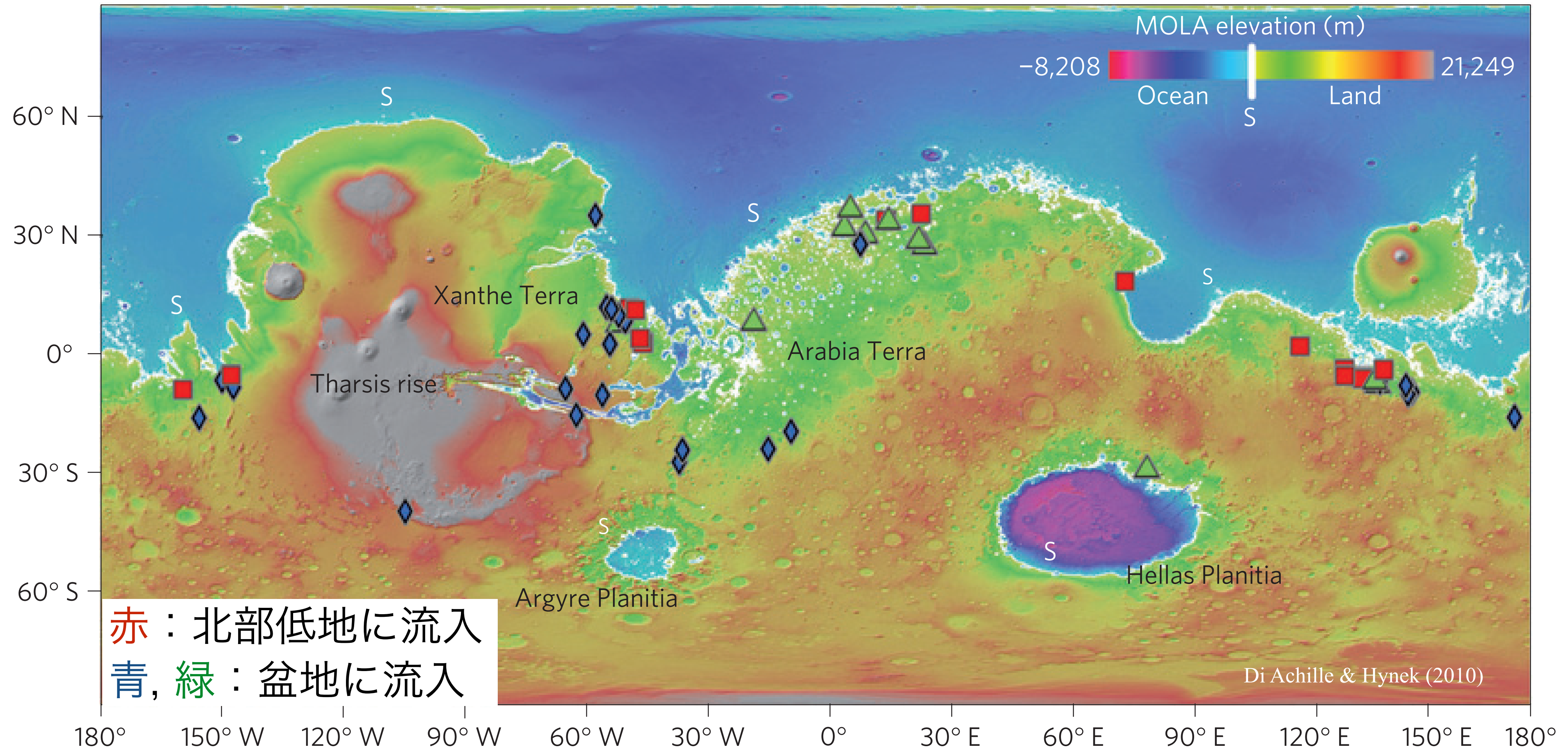


Williams et al. (2013) *Science*

液体の水が存在した数多くの記録

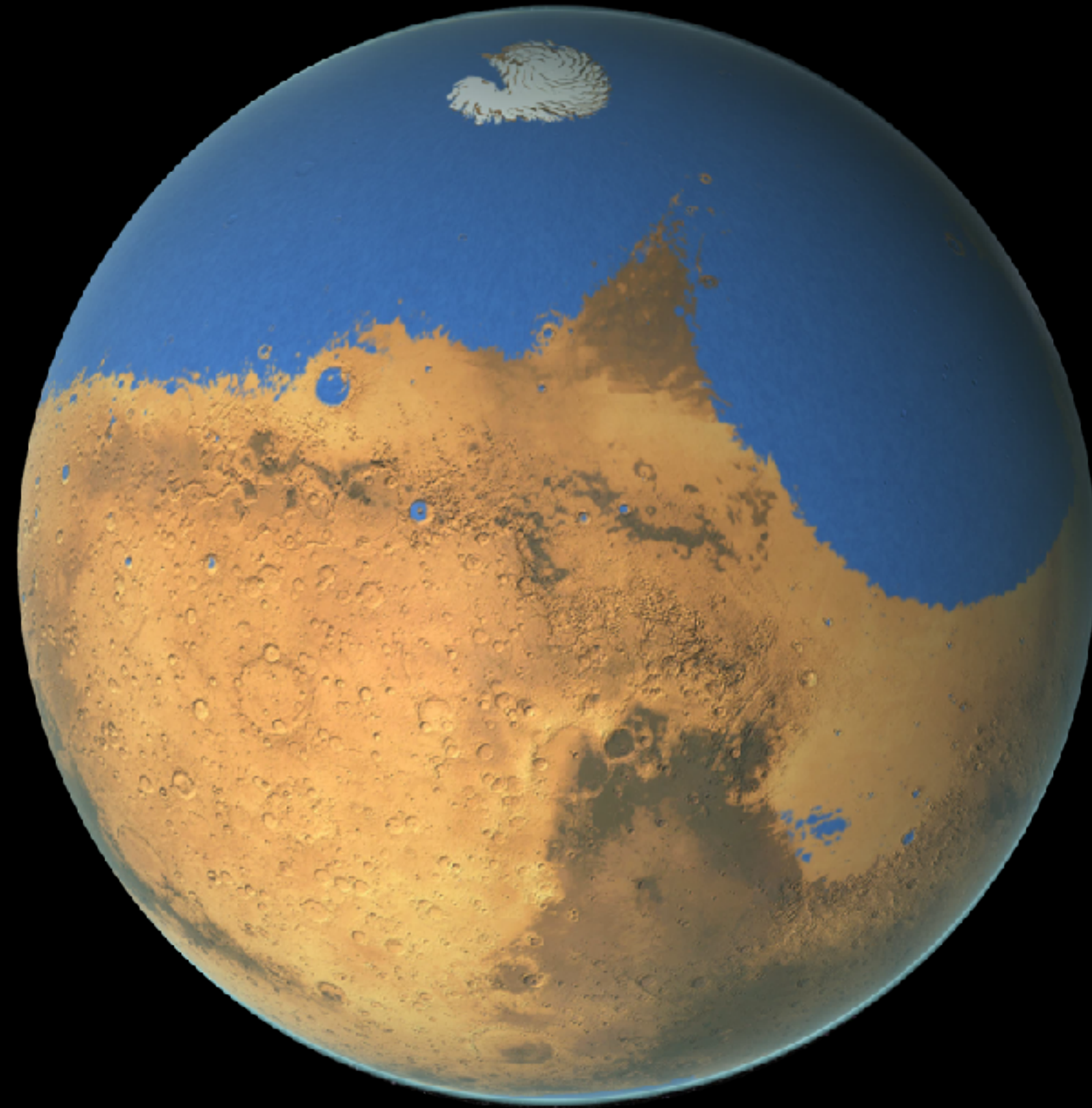
- 溪谷, 三角州, 堆積岩
- 含水鉱物

火星の三角州地形の分布

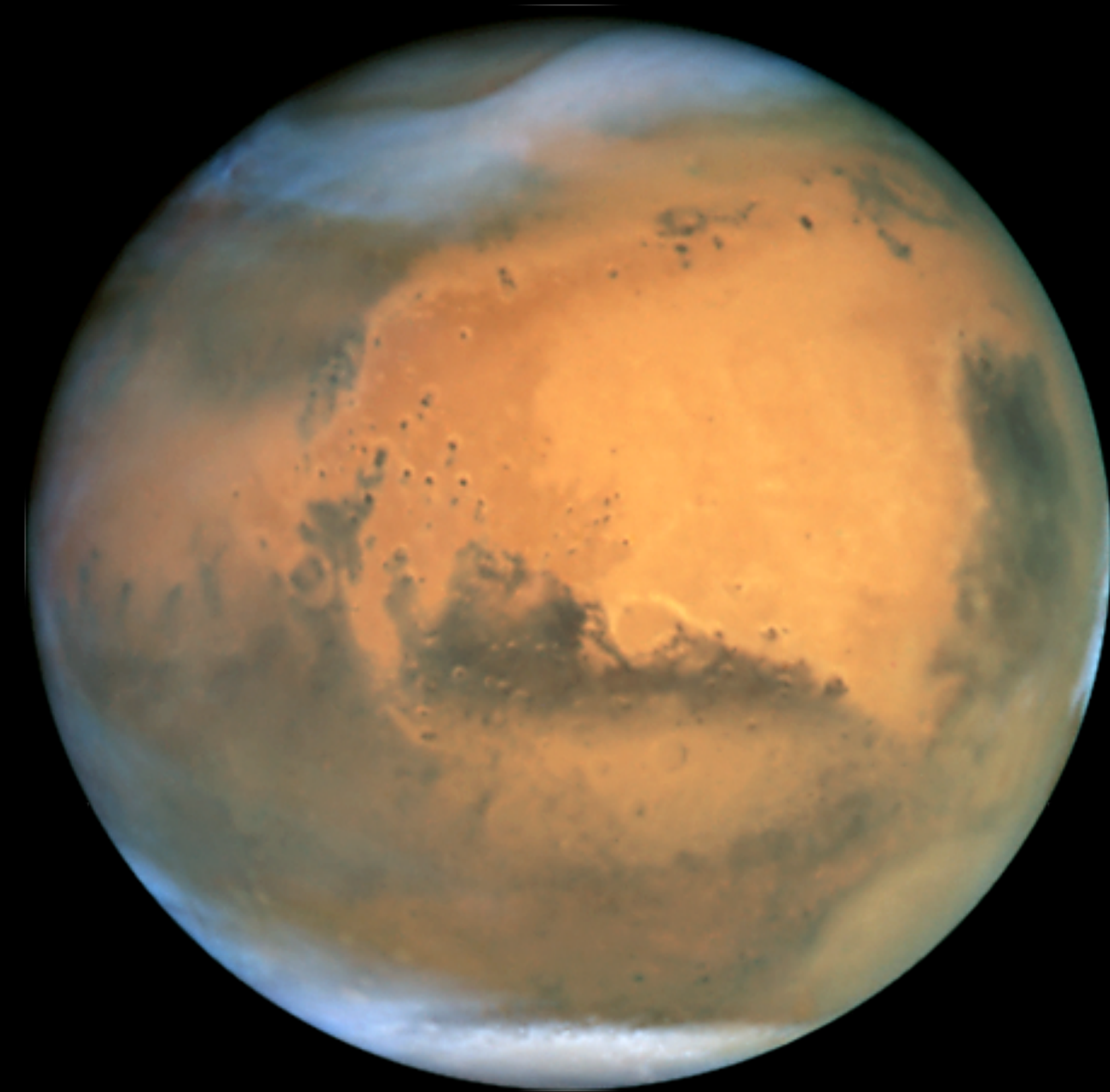


三角州が北部低地を取り囲むように存在 → かつての海？

約40億年前？

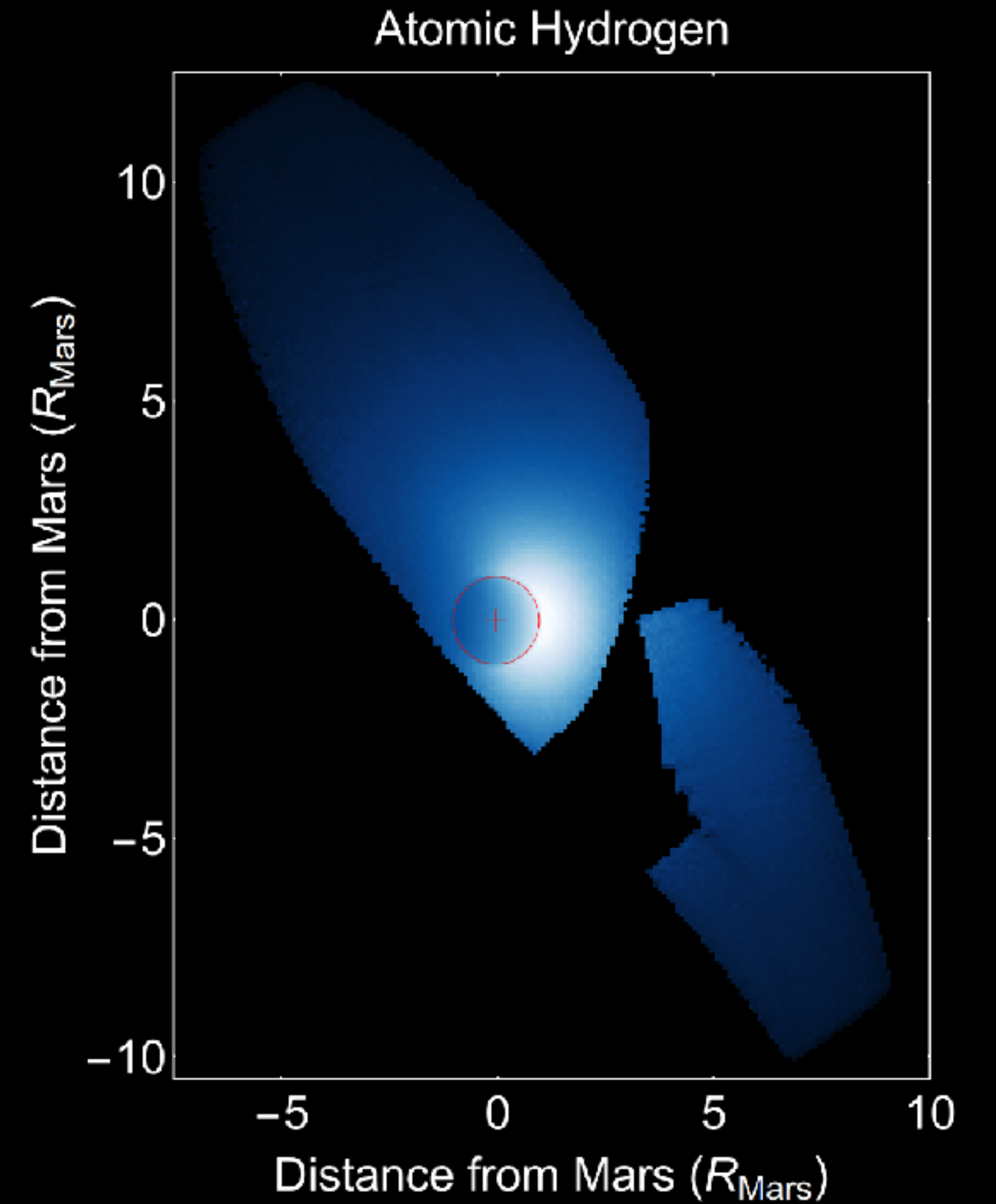
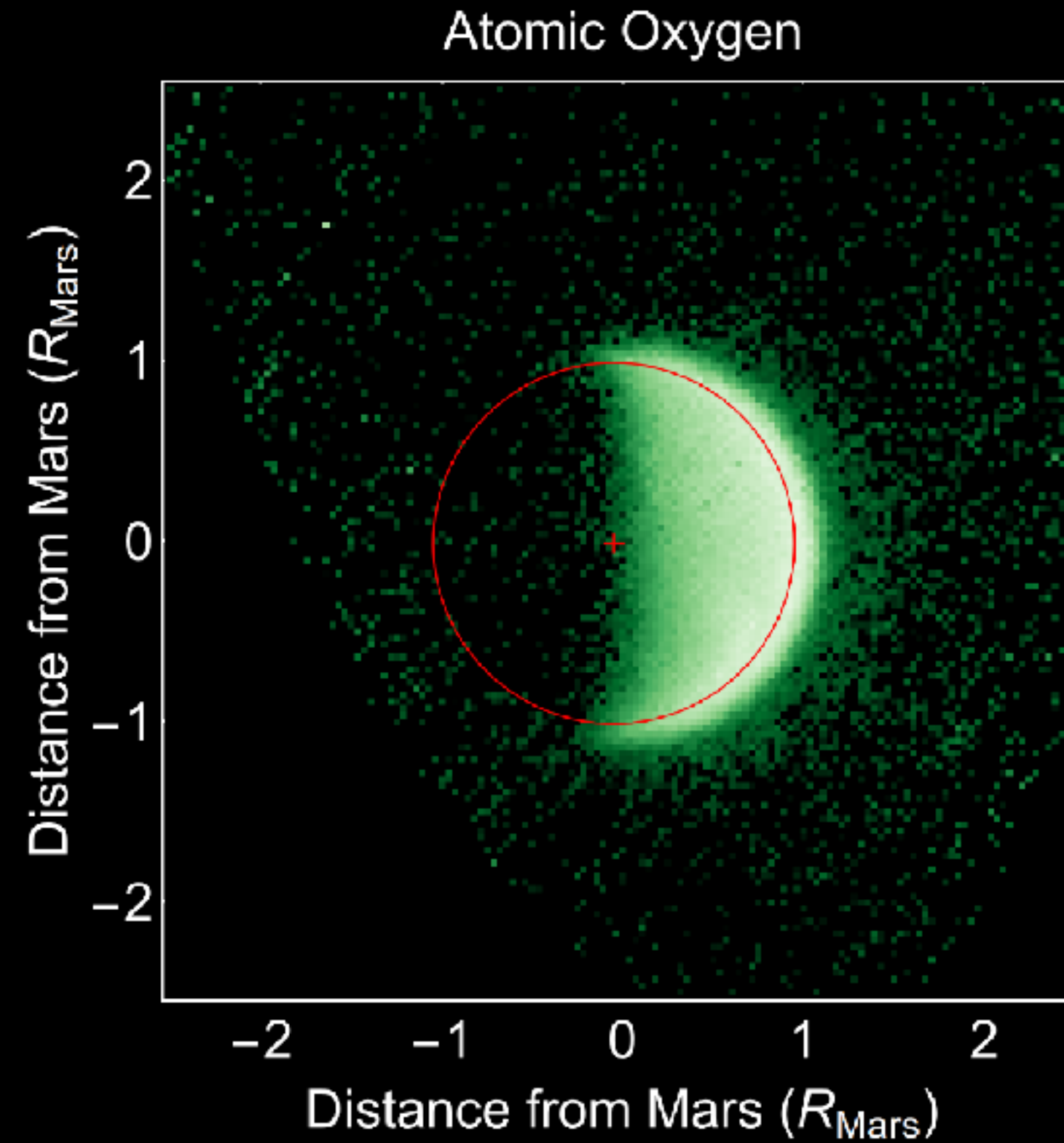
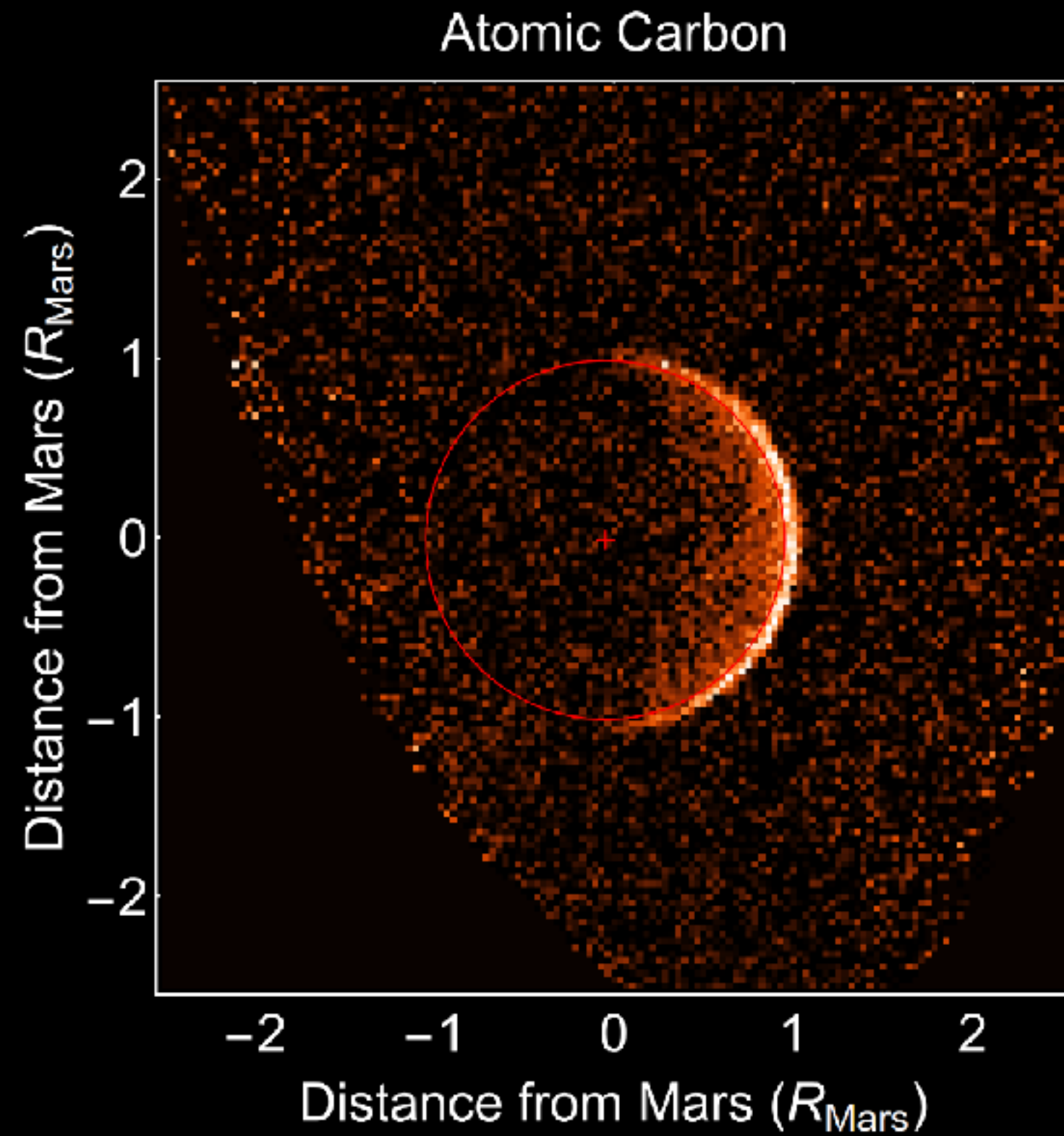


現在



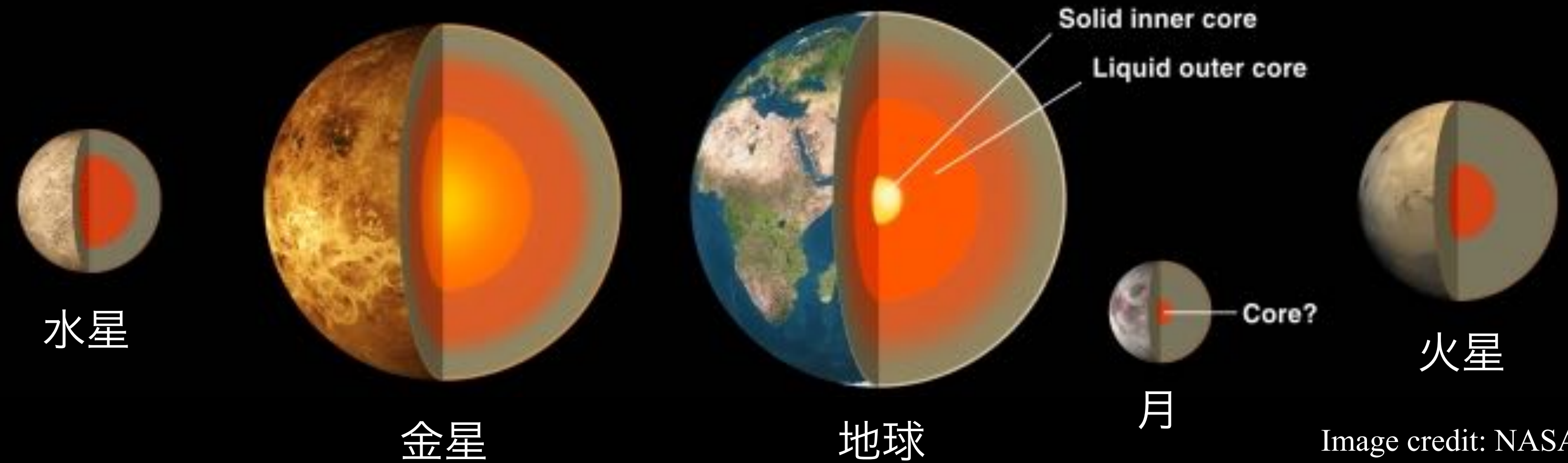
火星の大気散逸

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



水星

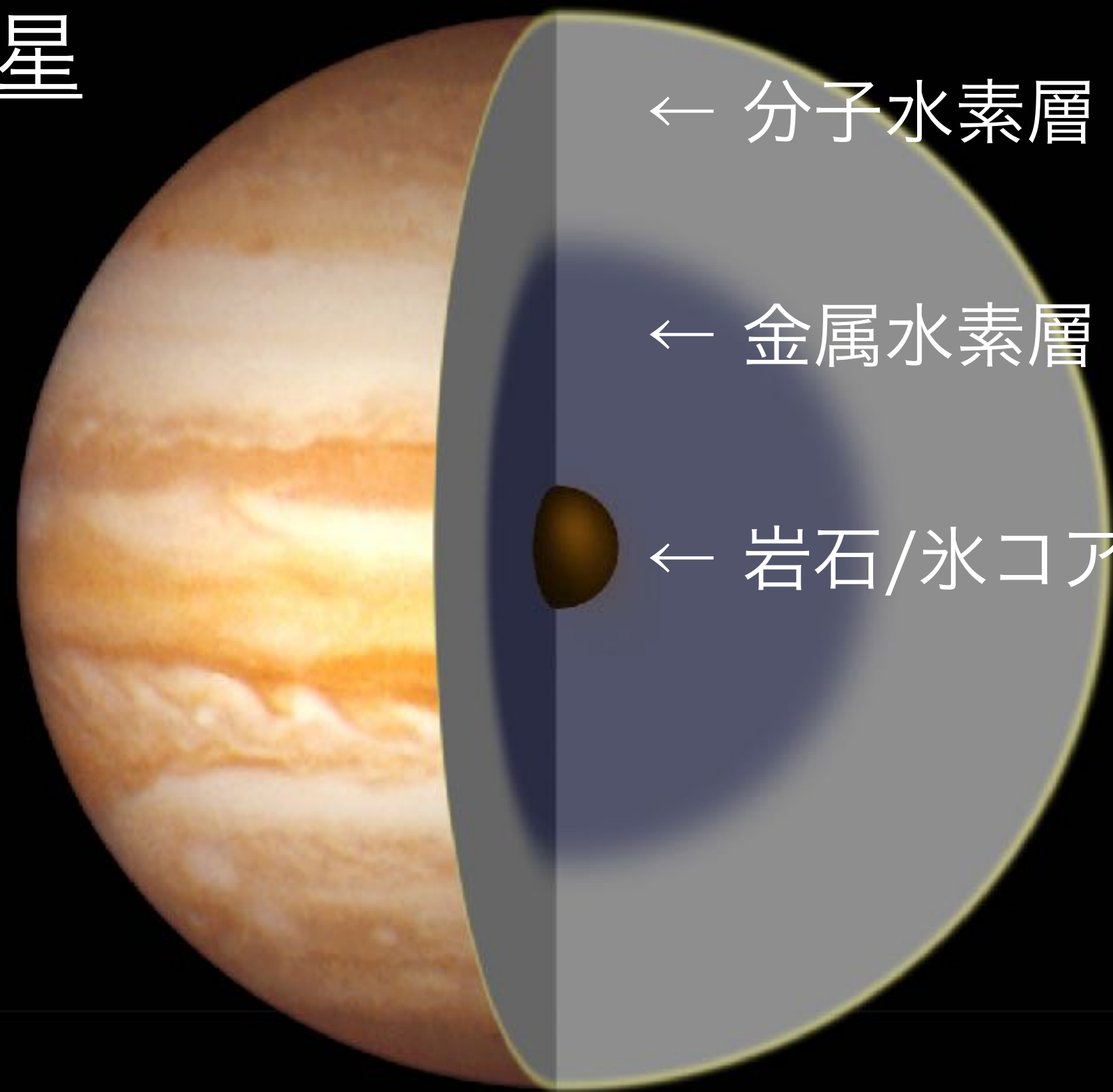
地球型惑星の内部構造の模式図



- 大気を持たない
- 巨大なコアを持つ(質量の $\approx 60 - 70\%$ \leftrightarrow 地球 33%)
- ダイナモ磁場を持つ (地球型惑星では地球と水星のみ)

巨大ガス惑星の構造

木星



土星

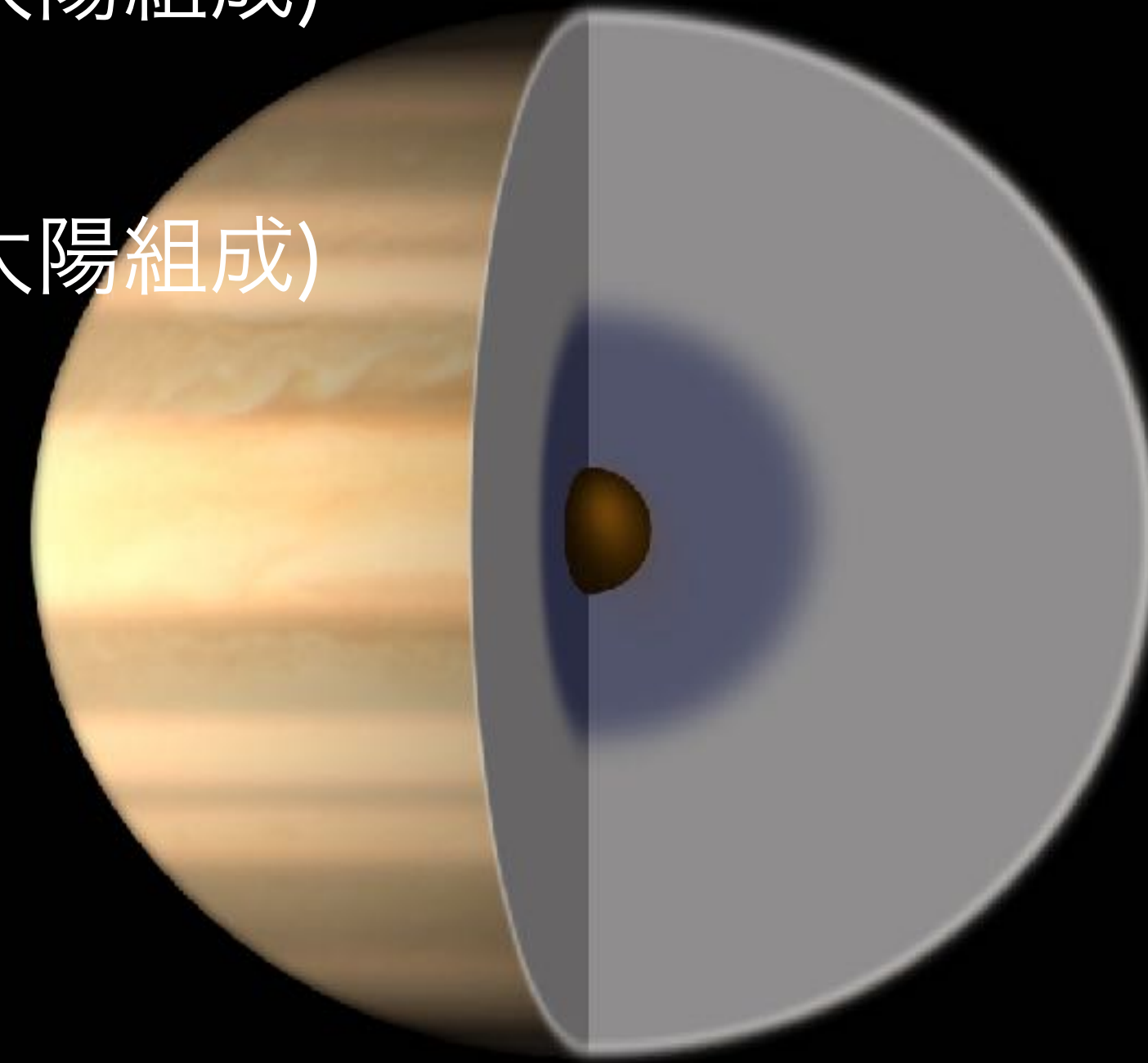
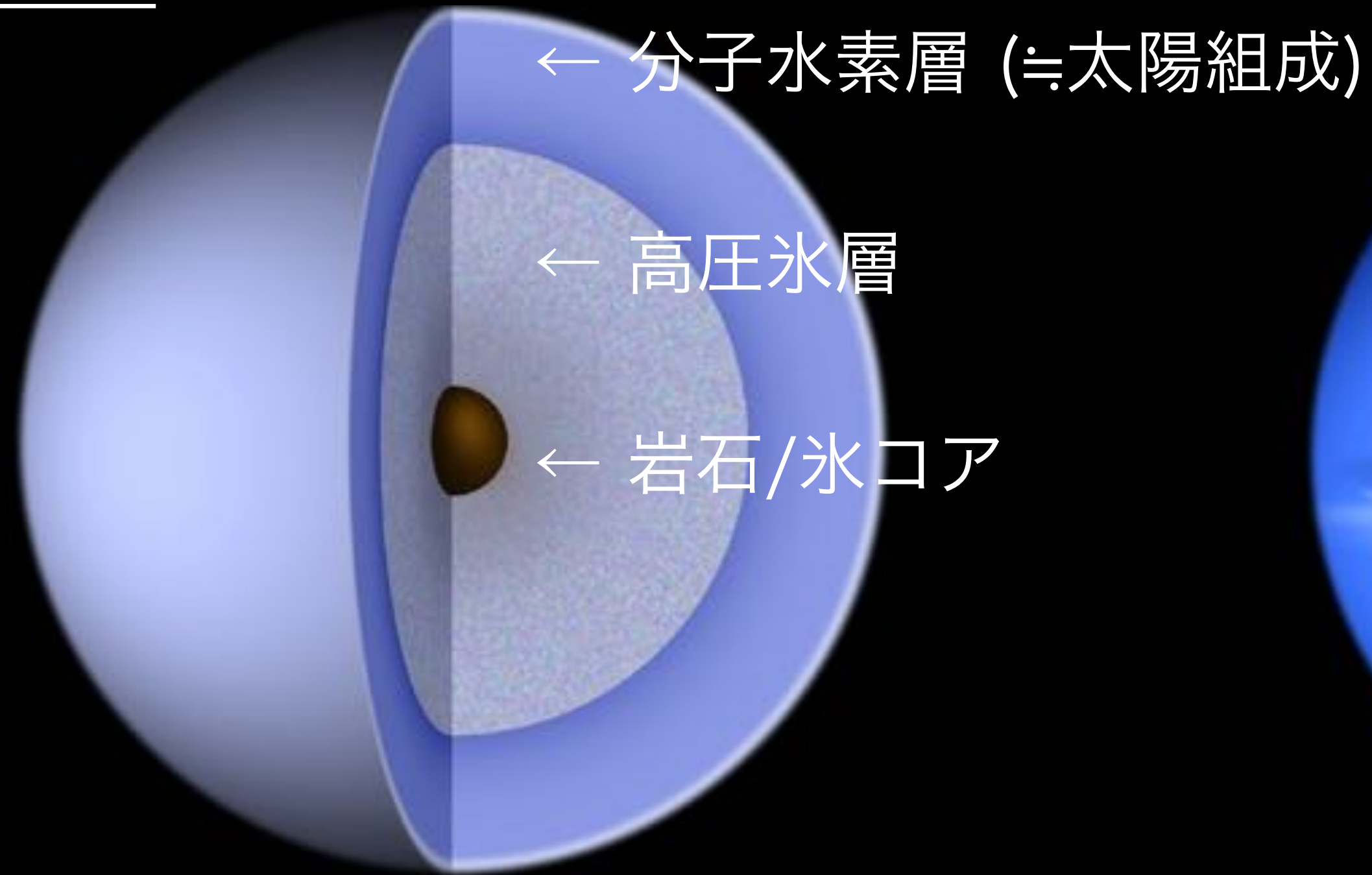


Image credit: NASA/LPI

- 質量の大部分 ($\approx 70 - 90\%$) が水素・ヘリウム
- 高圧 (> 100 万気圧) の内部では水素が金属化 (自由電子を持つ) \rightarrow ダイナモ磁場

巨大ガス惑星の構造

天王星



海王星

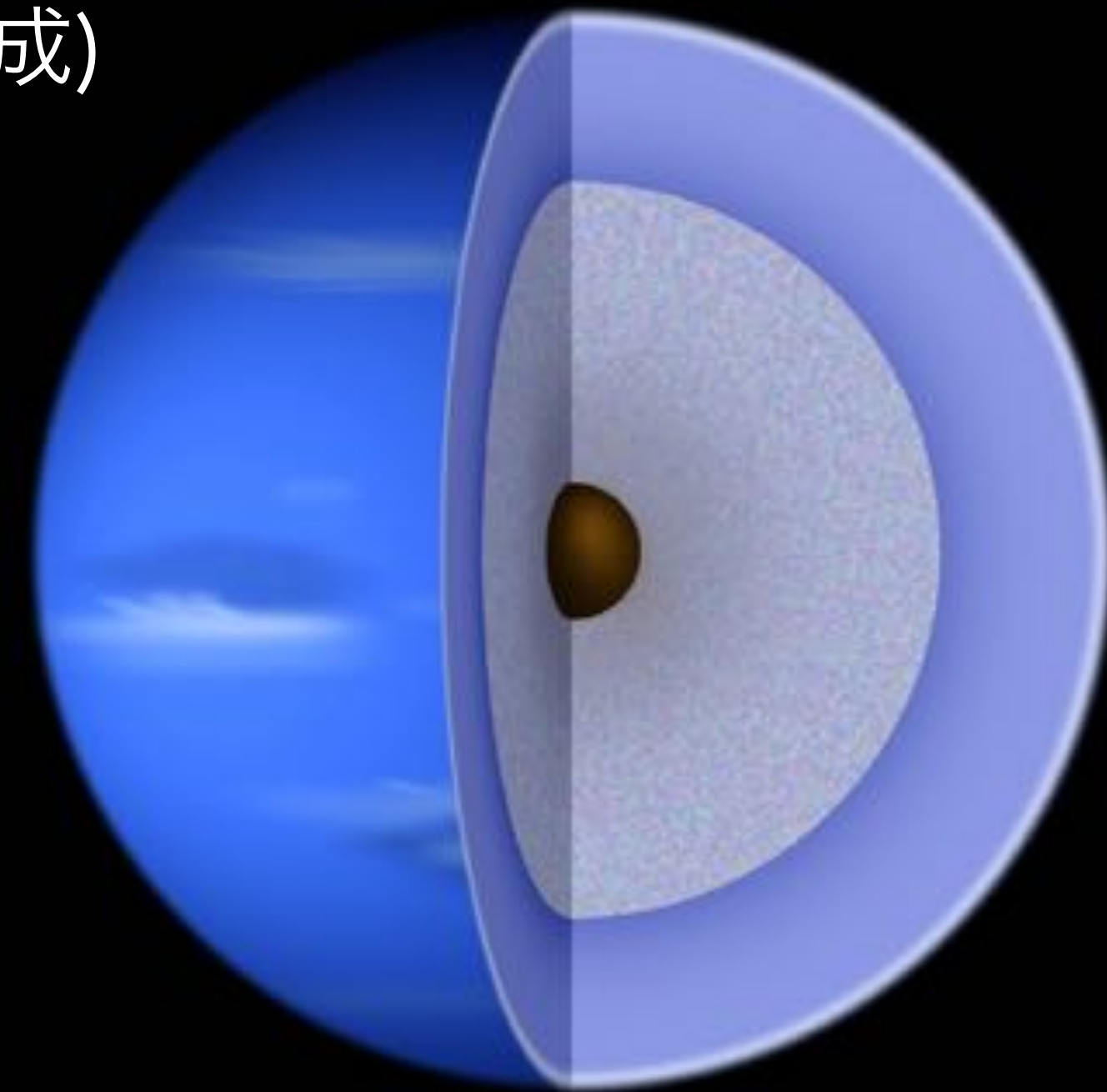
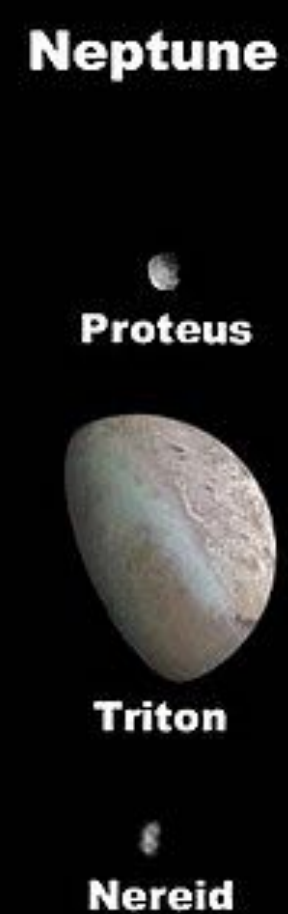


Image credit: NASA/LPI

- 高圧氷層：導電性のあるスーパーアイオニック層 (自由電子的に水素イオンが振る舞う)
- 天王星は自転軸が 97° 傾いている (↔ 海王星は 28°)

衛星



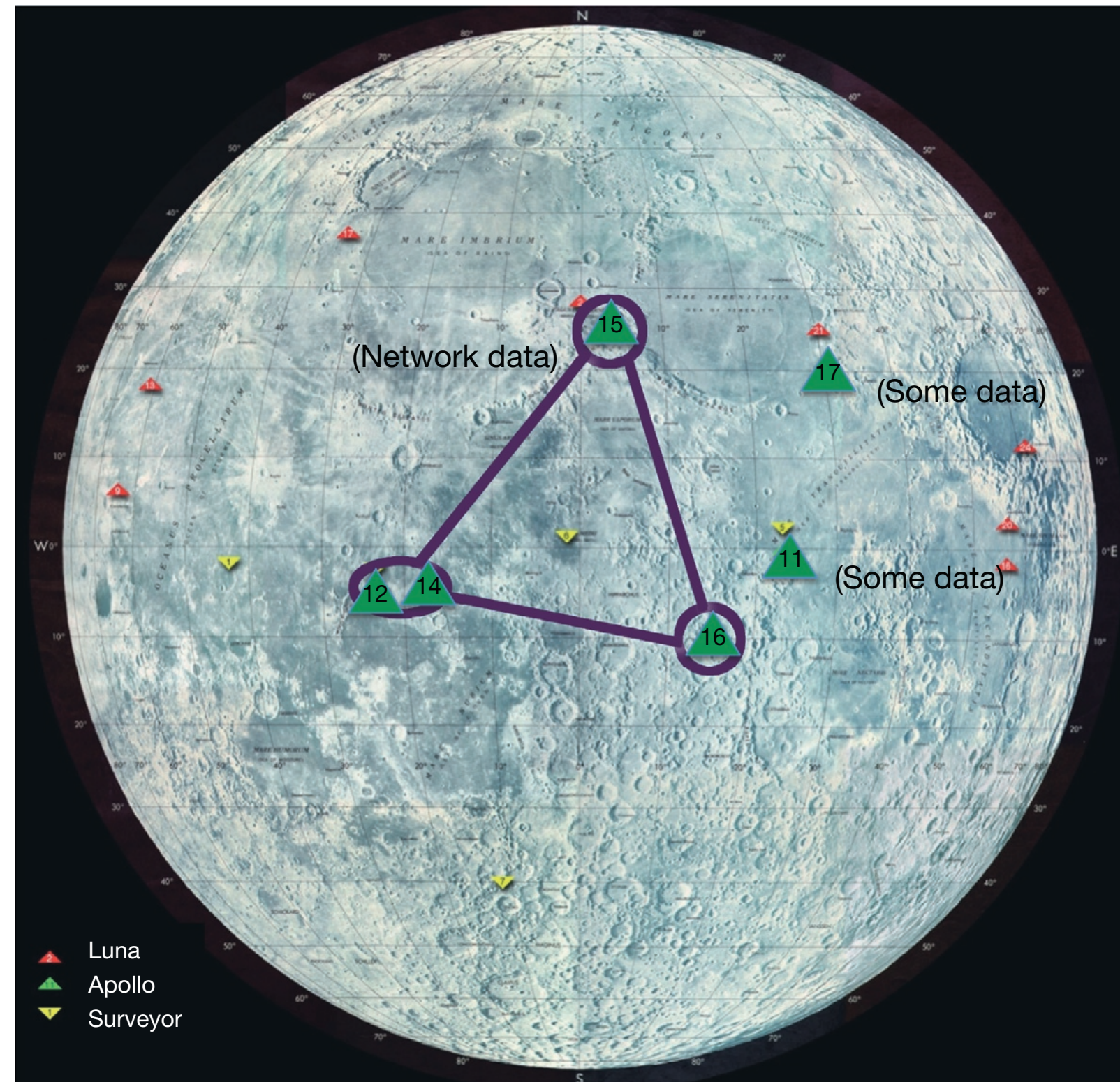
惑星	衛星の数
水星	0
金星	0
地球	1
火星	2
木星	79
土星	82
天王星	27
海王星	24

※2020年5月時点

Image credit: NASA

月の地震波計測

- アポロ 12, 14-16 の 着陸地点に設置された地震計ネットワーク (~1977)
- 小さいコア 170-360 km (Nakamura et al. 1974) → 巨大衝突の破片からの形成



月の地震計ネットワーク
Lognonné & Johnson (2015)



土星の衛星 タイタン

- 大気：約1.5気圧. N_2 + 数%の CH_4
- 光化学によるヘイズ(高分子有機物粒子)
← 太古代地球的？
- 液体 CH_4 , C_2H_6 の湖
- 内部には液体 H_2O の層
(大型氷衛星に共通の性質)

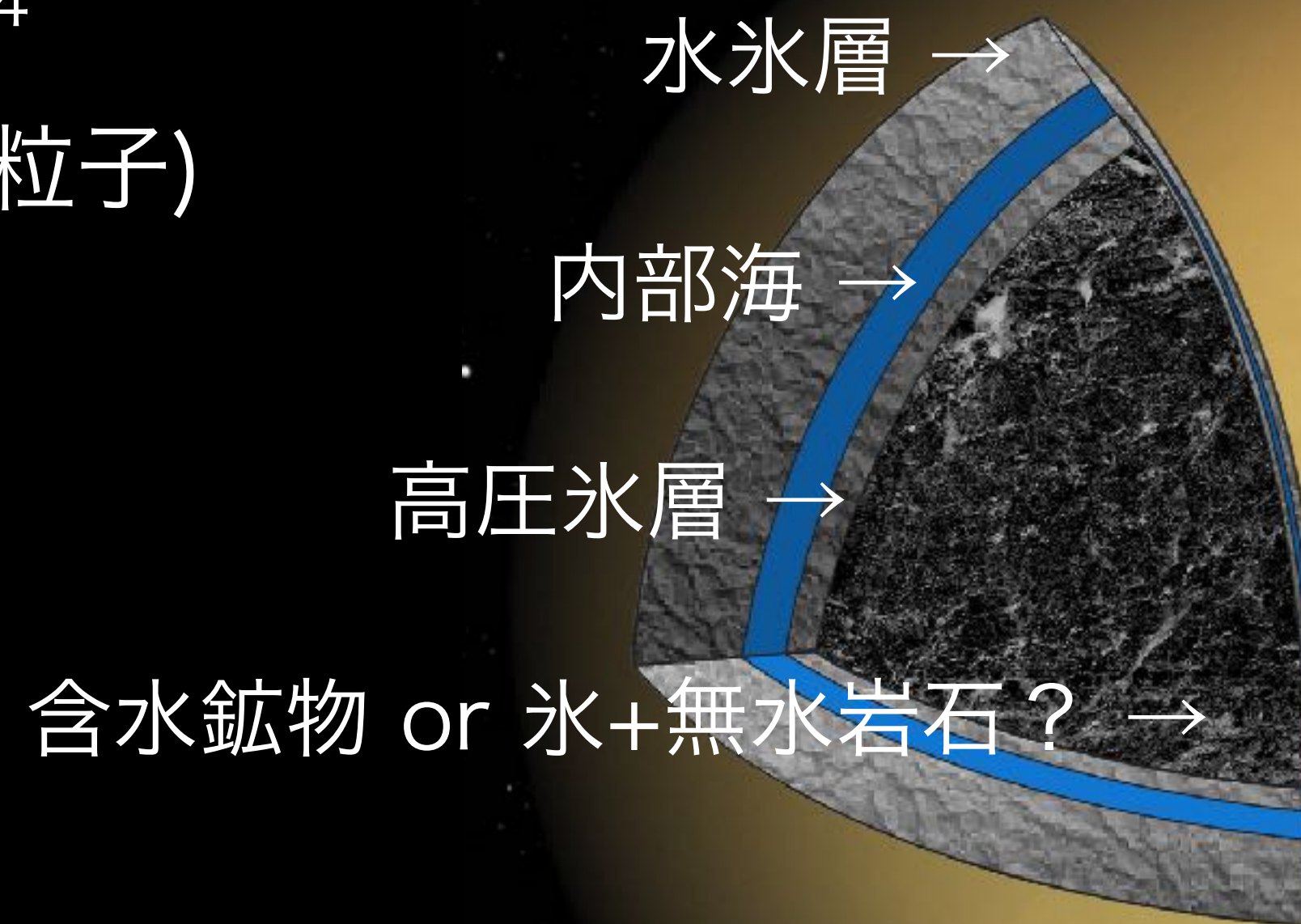
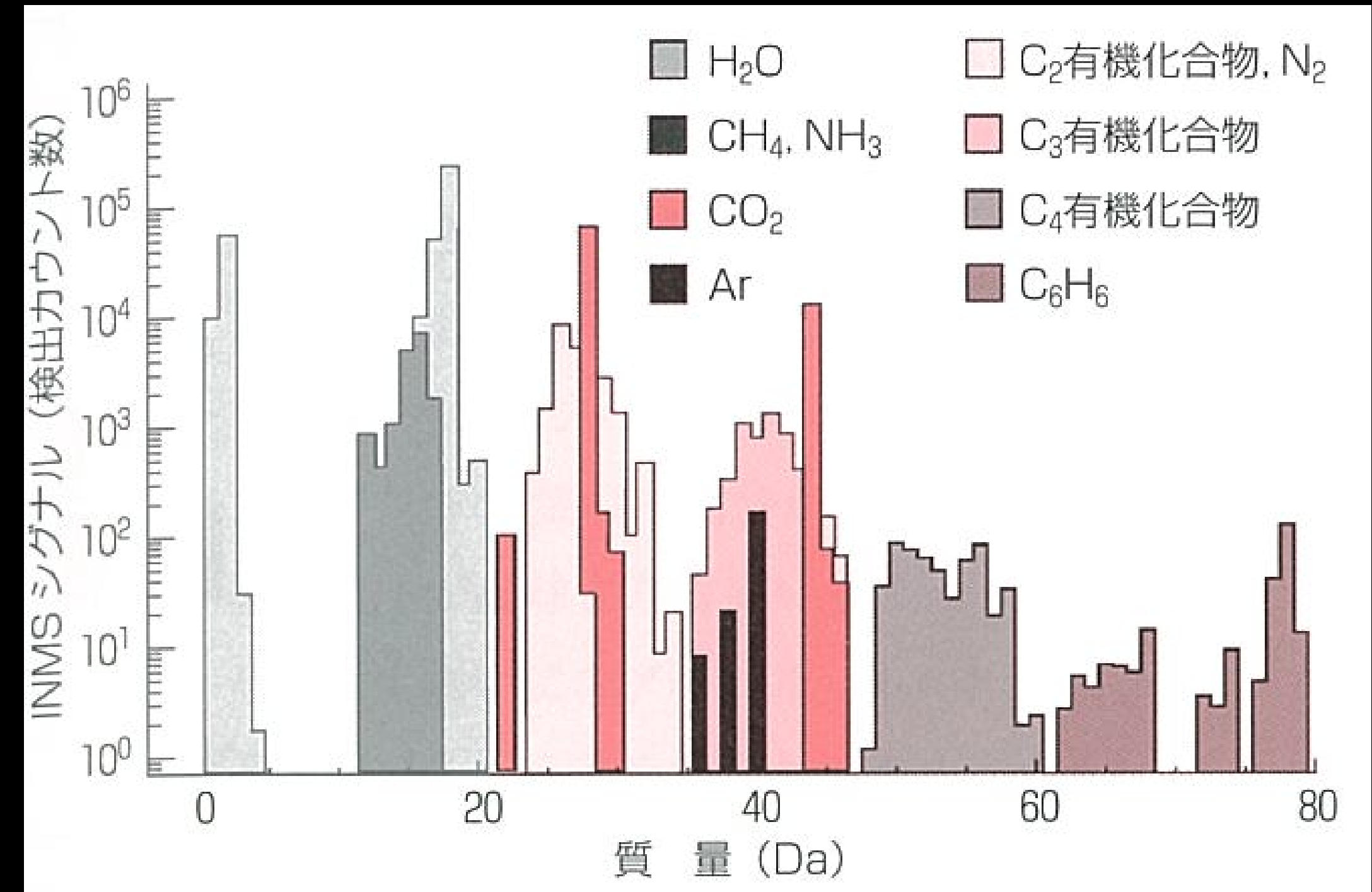
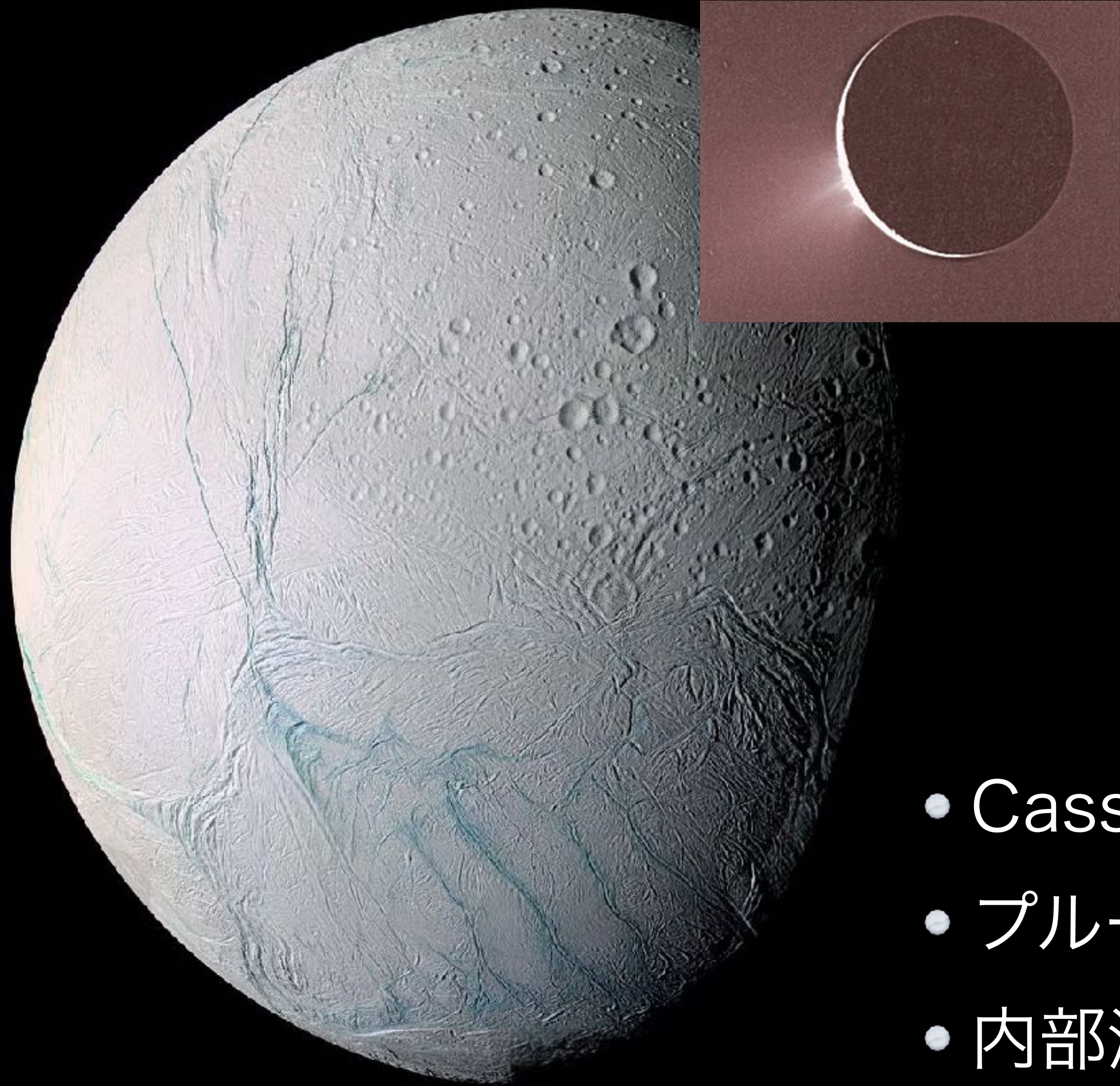


Image credit: NASA

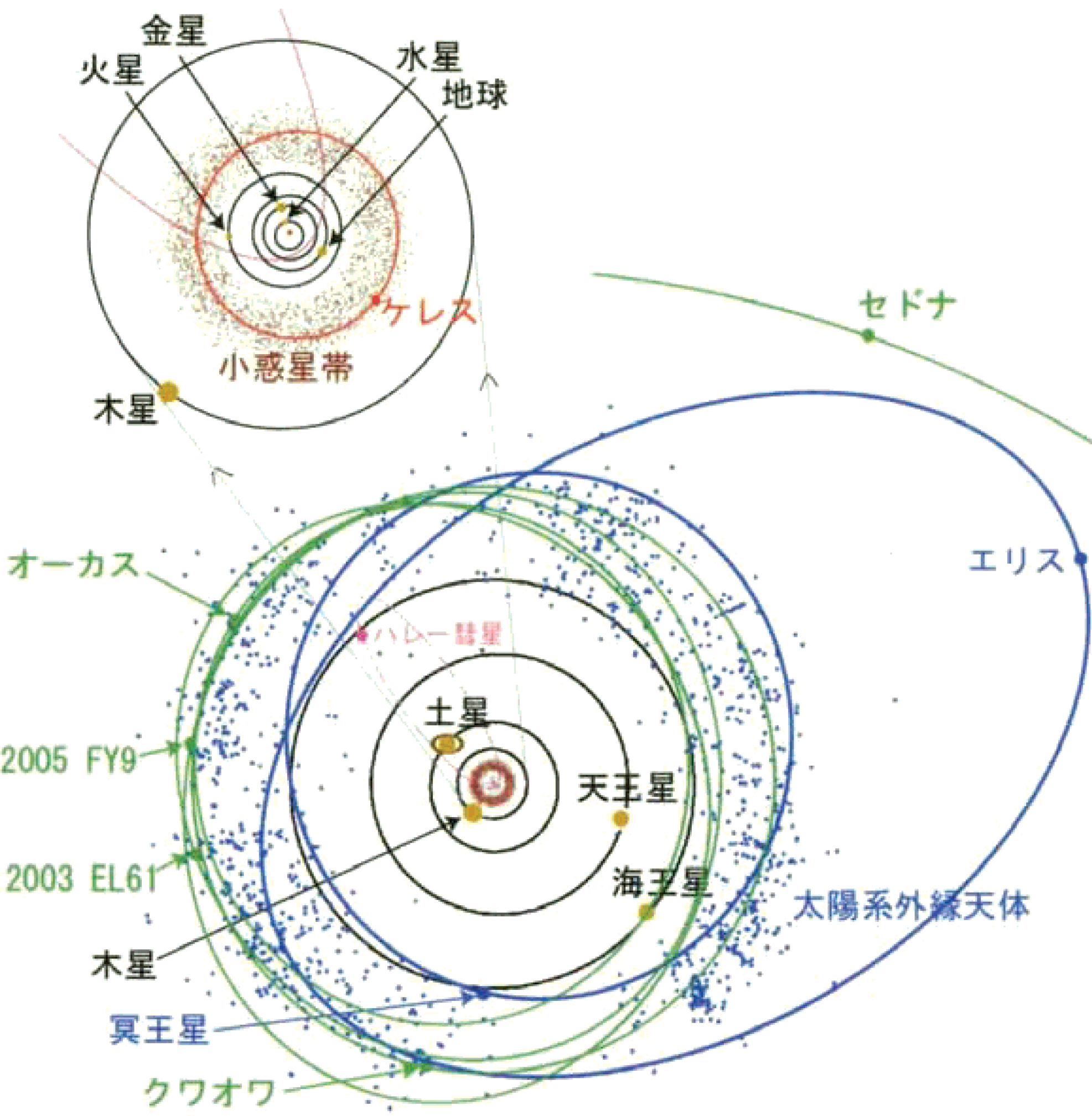
土星の衛星 エンセラダス



化学同人社『アストロバイオロジー』

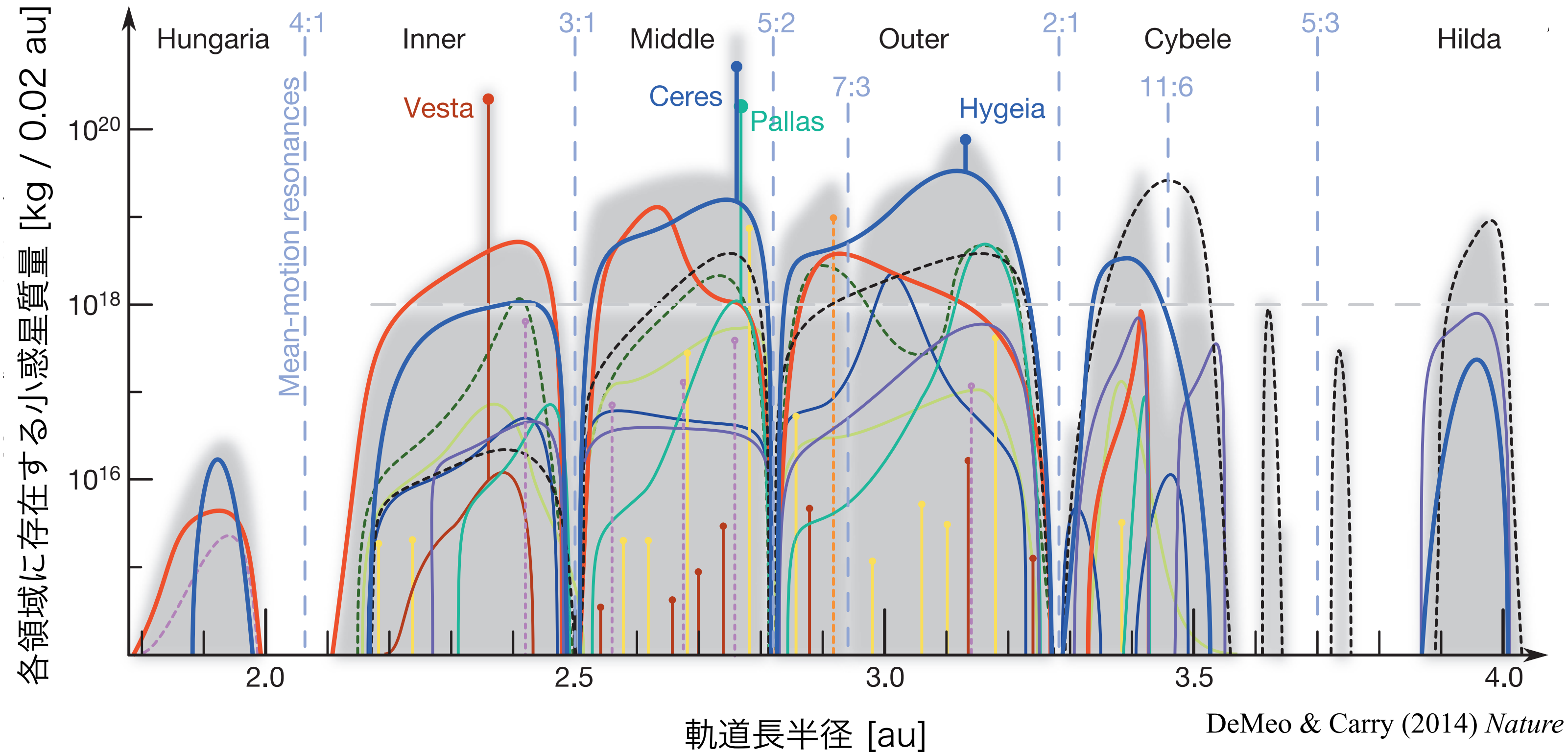
- Cassini探査機がプルーム(噴泉)を発見
- プルーム中にナトリウム塩や高分子有機物
- 内部海での海底熱水活動, 生命の可能性

太陽系小天体

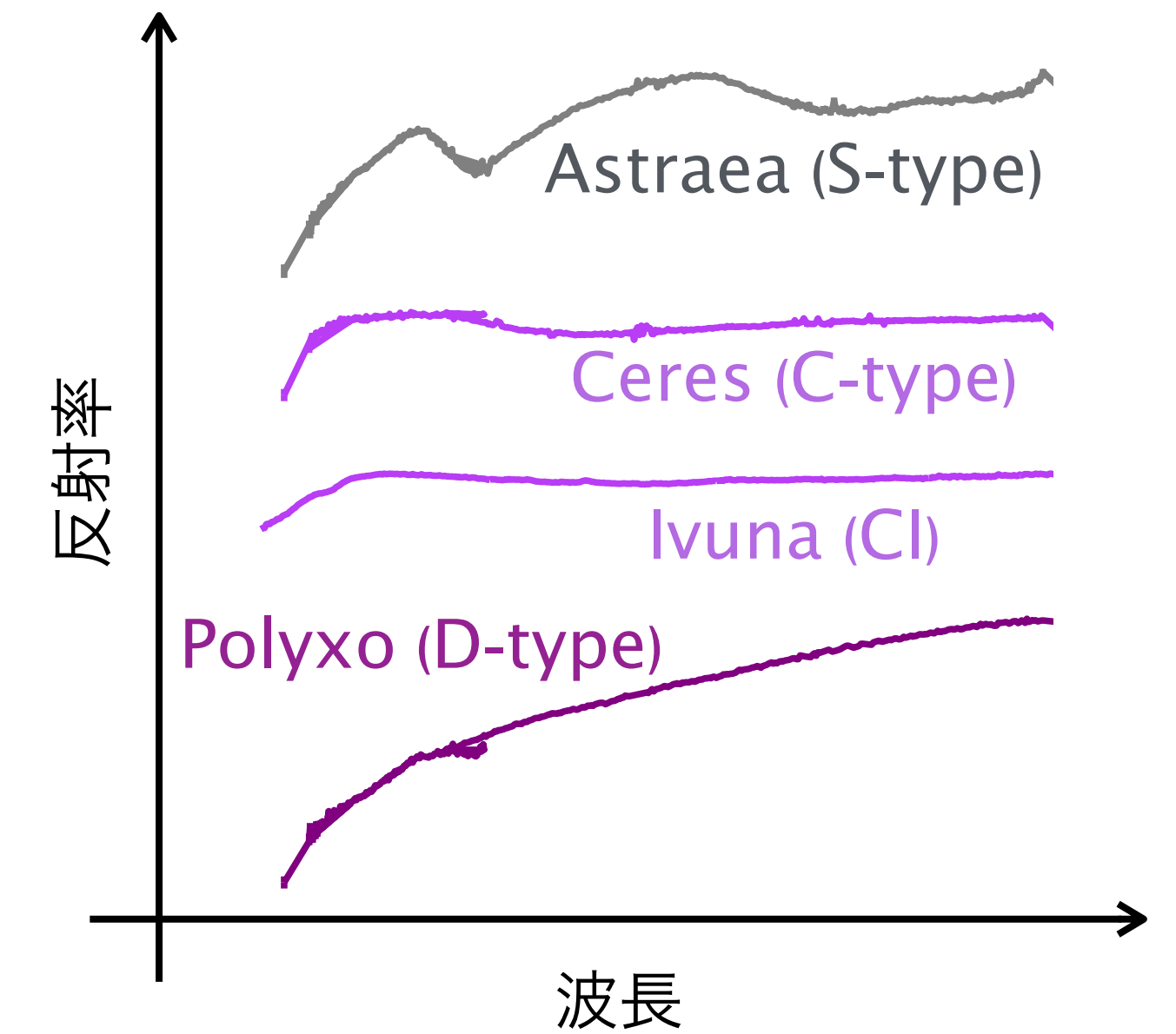


- たくさんある(1km以上だけでも約100万體)が、総質量は小さい(地球の約3000分の1)
- 小惑星帯, 太陽系外縁天体群
- 惑星形成過程の名残(?)
- H₂Oスノーライン(水氷昇華線)は小惑星帯に位置する
→ 小惑星が地球に水をもたらした?

さまざまな小惑星タイプの混在



小惑星分類に用いるスペクトルの例



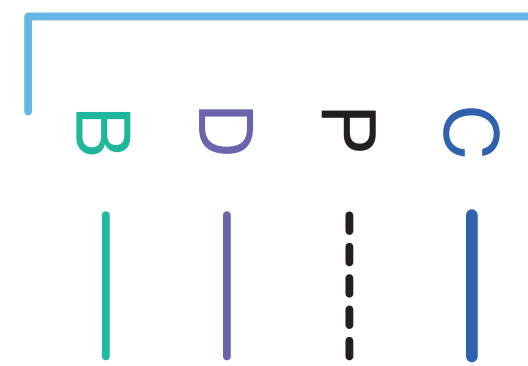
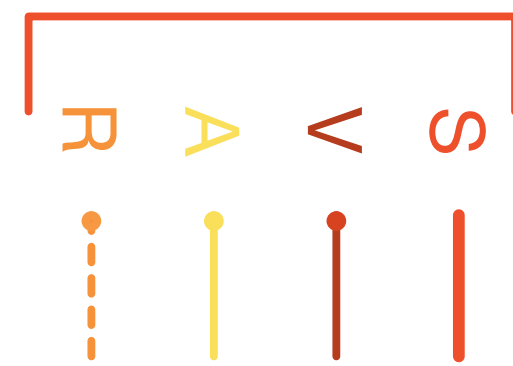
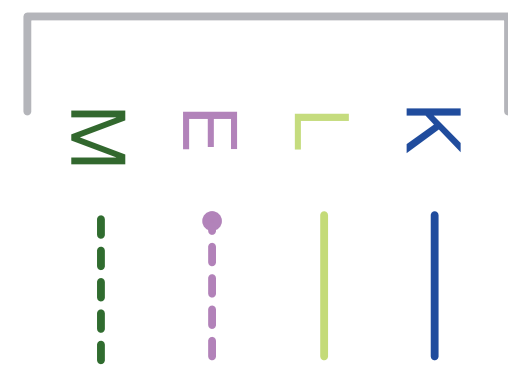
Miscellaneous

Mafic-silicate rich

↔ 普通コンドライト

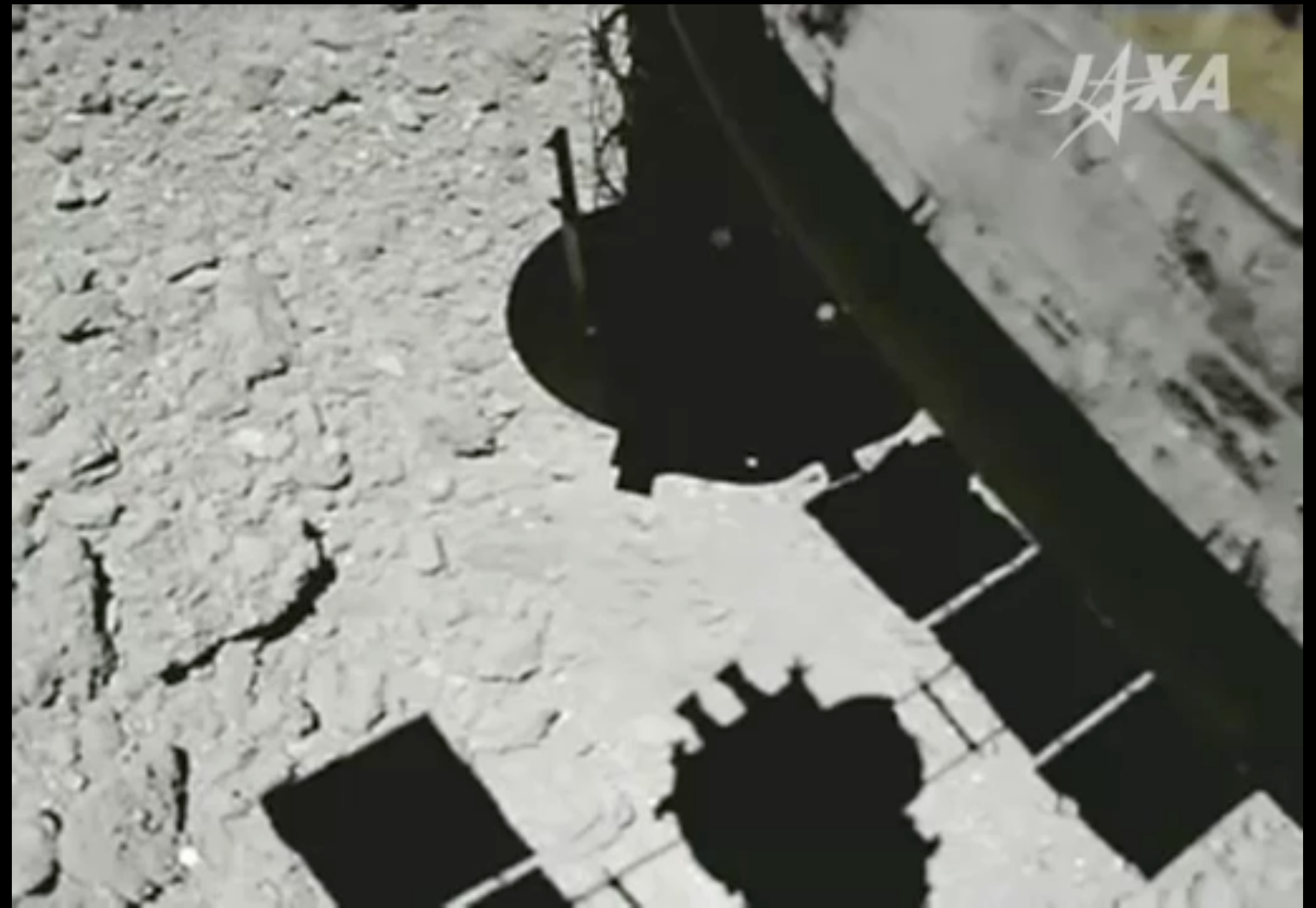
Opaque-rich

↔ 炭素質コンドライト

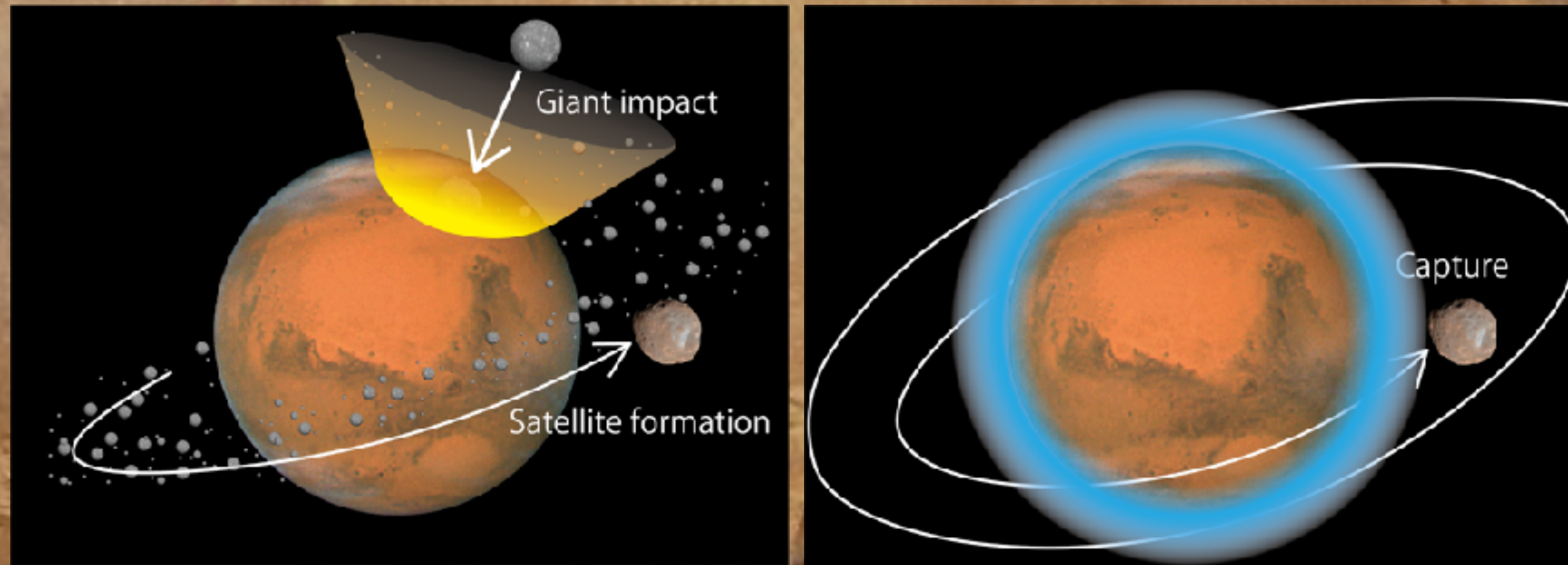


はやぶさ2による小惑星リュウグウ探査

- 2019年にサンプル採取に成功 → 2020年末に帰還
- サンプル初期分析が進行中



火星の小さい衛星



デイモス: ~10 km



フォボス: ~20 km



- 天体衝突破片からできた？捕獲された小惑星？
- JAXAの火星衛星探査計画 MMX (2024年打上予定)

まとめ

太陽系

- 惑星：岩石惑星， 巨大ガス惑星， 巨大氷惑星． 表層環境の変遷
- 太陽の進化：光度の増加， 極端紫外線・太陽風フラックスの減少 → 惑星に影響
- 衛星：巨大衝突や小惑星の捕獲による形成． 氷衛星の生命存在可能性
- 小天体：惑星形成過程の名残， 揮発性物質(海， 大気， 生命の材料)の起源

小レポート課題(4/15 17時締切)

地球の表面は7割が海に覆われており，その平均深さは約4kmである．海水の総質量をkgの単位で求めよ．また地球総質量に占める海水の割合を求めよ(答えは有効数字1桁の精度とする)．地球の質量・半径、水の密度は講義資料中の値を用いてよい．