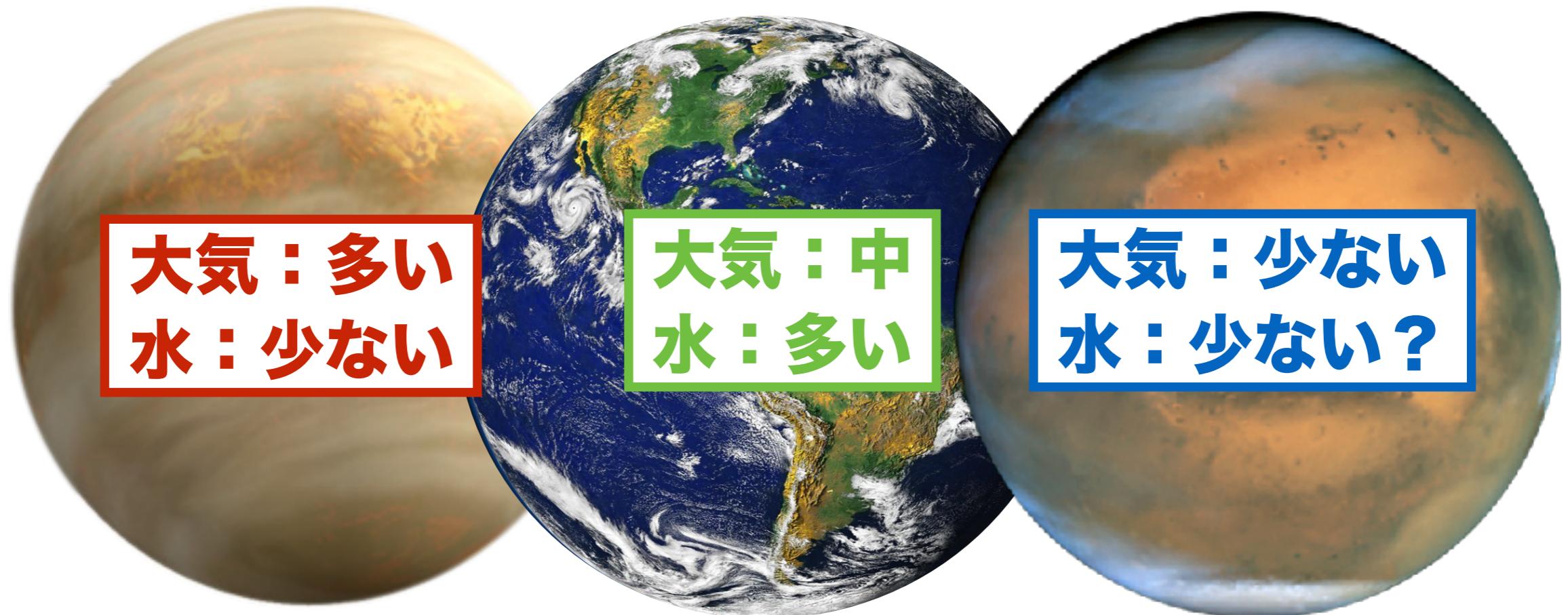




地球型惑星の大気と海の形成と進化

黒川宏之 (ELSI)

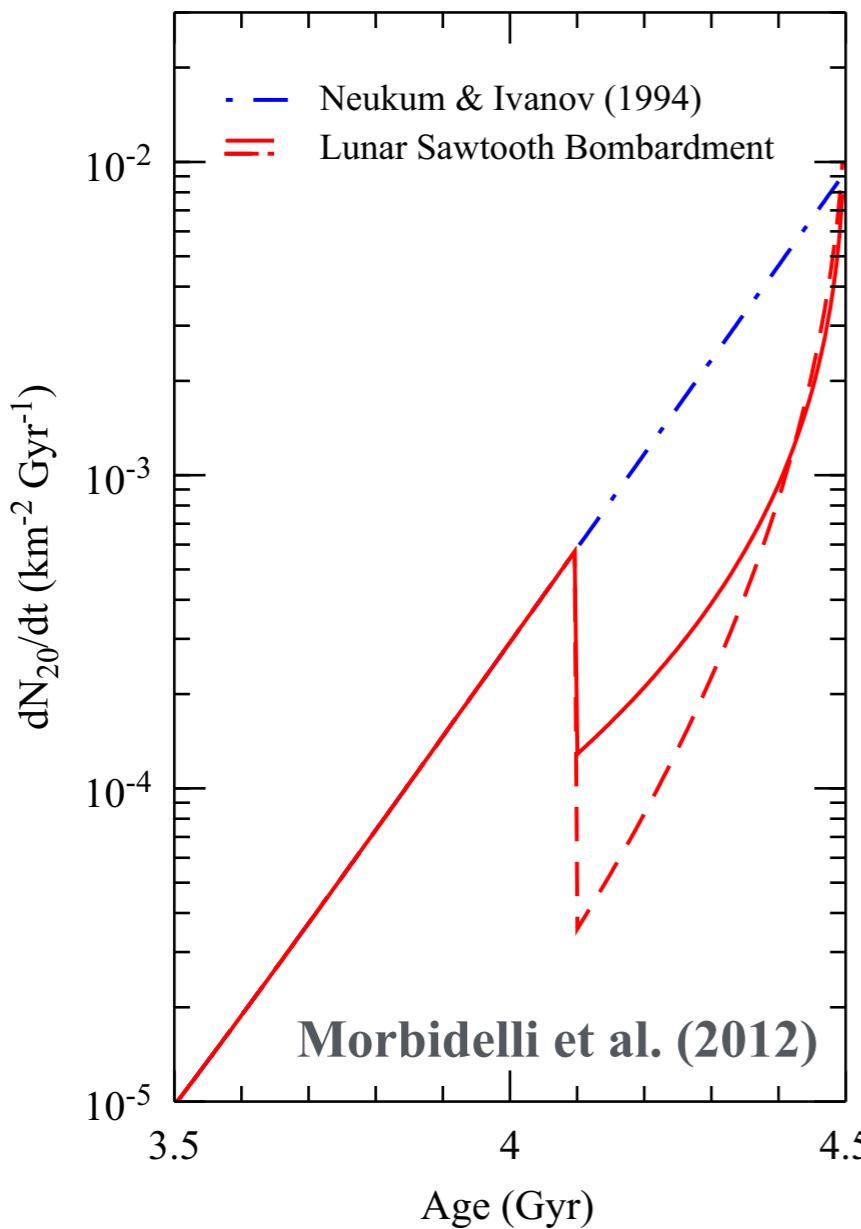
地球型惑星の表層環境の違い



軌道長半径	0.7 AU	1 AU	1.5 AU
大気圧	90 bar	1 bar	0.006 bar
大気組成(主成分)	CO ₂	N ₂ , O ₂	CO ₂
平均地表気温	735 K	288 K	210 K
全球平均水深	30 mm (水蒸気)	2700 m (水)	20 m (水) + 地下氷?

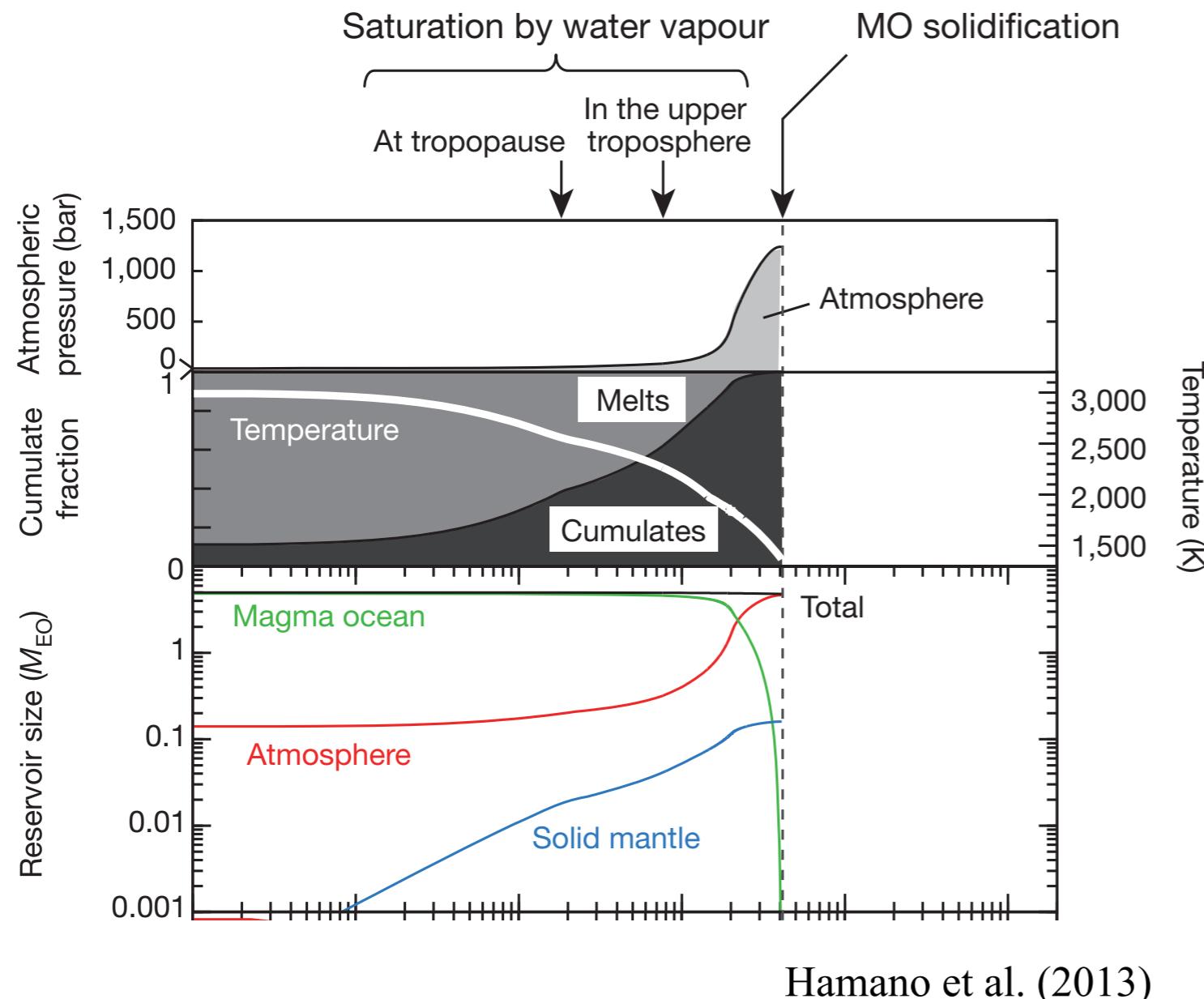
大気と海の形成

月クレーターに基づく天体衝突史



- * 惑星形成の最終段階：巨大衝突
 - ・全球溶融（マグマ・オーシャン）
 - ・固化に伴って大気と海が形成
- * レイトアクリーション：
巨大衝突以後の小天体衝突
 - ・~40億年間前まで継続
 - ・累積質量~惑星質量×1%
 - ・揮発性元素の供給？

マグマ・オーシャン固化と大気・海形成

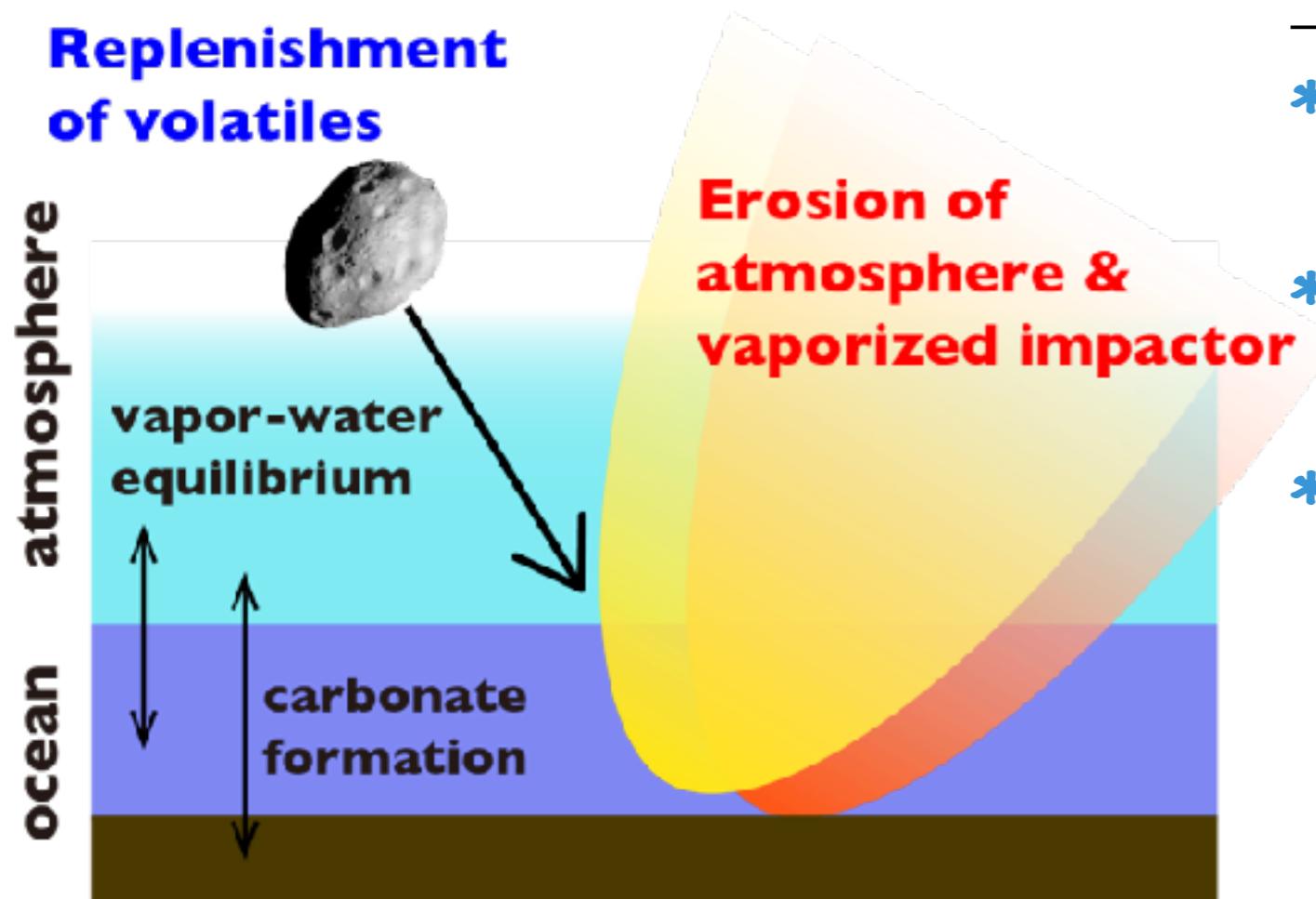


- * 水はマグマ・オーシャン(MO)への溶解度が高い
- * MO固化(~Myr)に伴いマントルからほぼ完全に脱水
- * その後降雨して厚い水蒸気大気から海が形成
(Matsui & Abe 1986; Hamano et al. 2013)
- * 炭素Cや窒素Nの振舞は未知：酸化的MOなら大気へ↔還元的MOならマントルへ
(Hirschmann 2012; Mikhail & Sverjensky 2014)

レイトアクリーションの影響



Replenishment of volatiles



- * レイトアクリーションによる揮発性元素供給への寄与は未解明
- * 小天体衝突の影響：
揮発性元素の供給 & 大気剥ぎ取り

モデル計算

- * 多数の小天体衝突の寄与を統計的に計算
- * 表層における元素分配を考慮：大気, 海, 鉱物(炭酸塩)
- * 地球表層のN, C量との比較から、レイトアクリーション天体の組成を制約

Sakuraba, Kurokawa & Genda in prep.

Earth's nitrogen budget

Preliminary Results

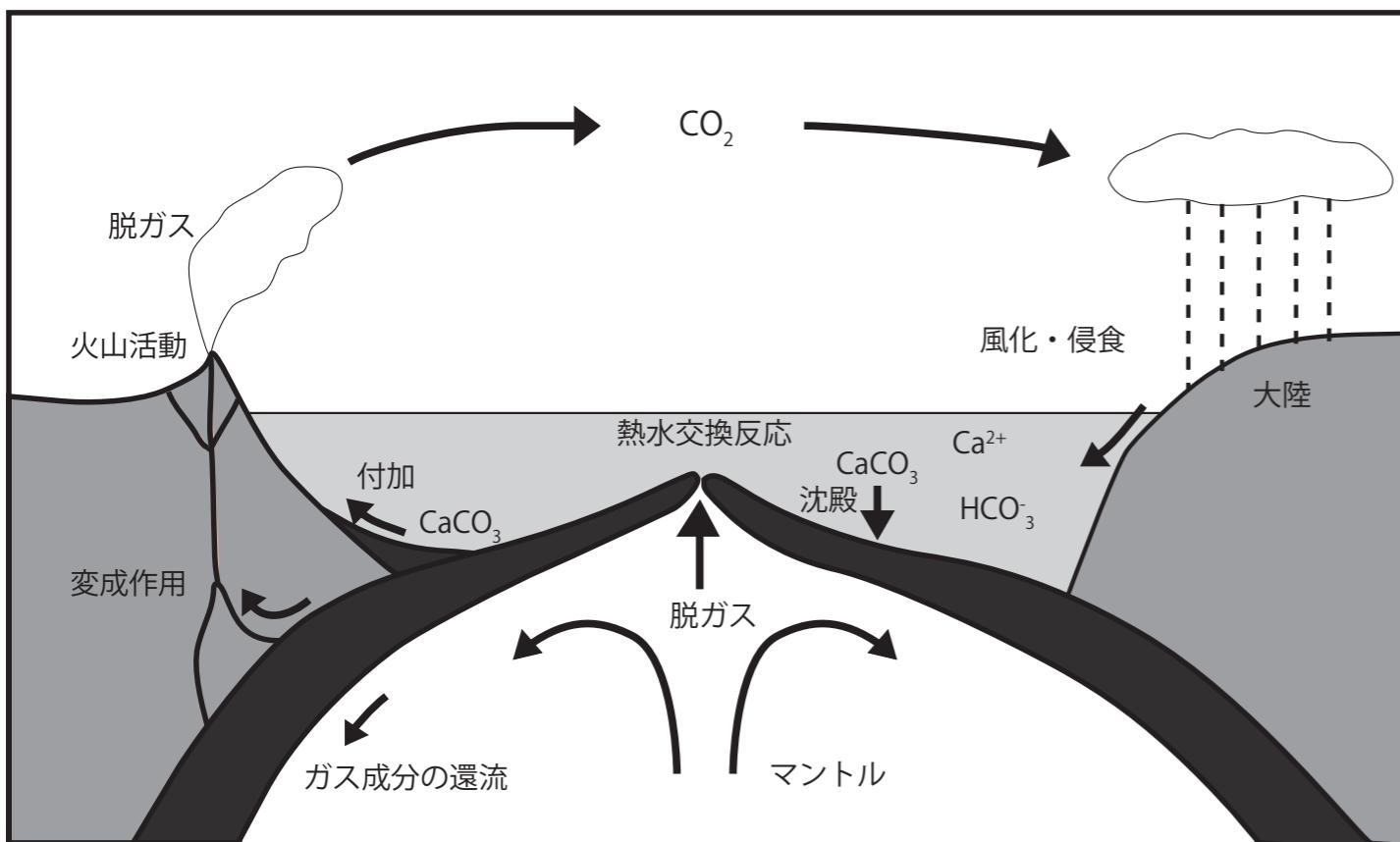
- * レイトアクリーションによって大気量・組成は完全に更新される
- * レイトアクリーションの天体は揮発性元素に枯渇？

大気と海の進化

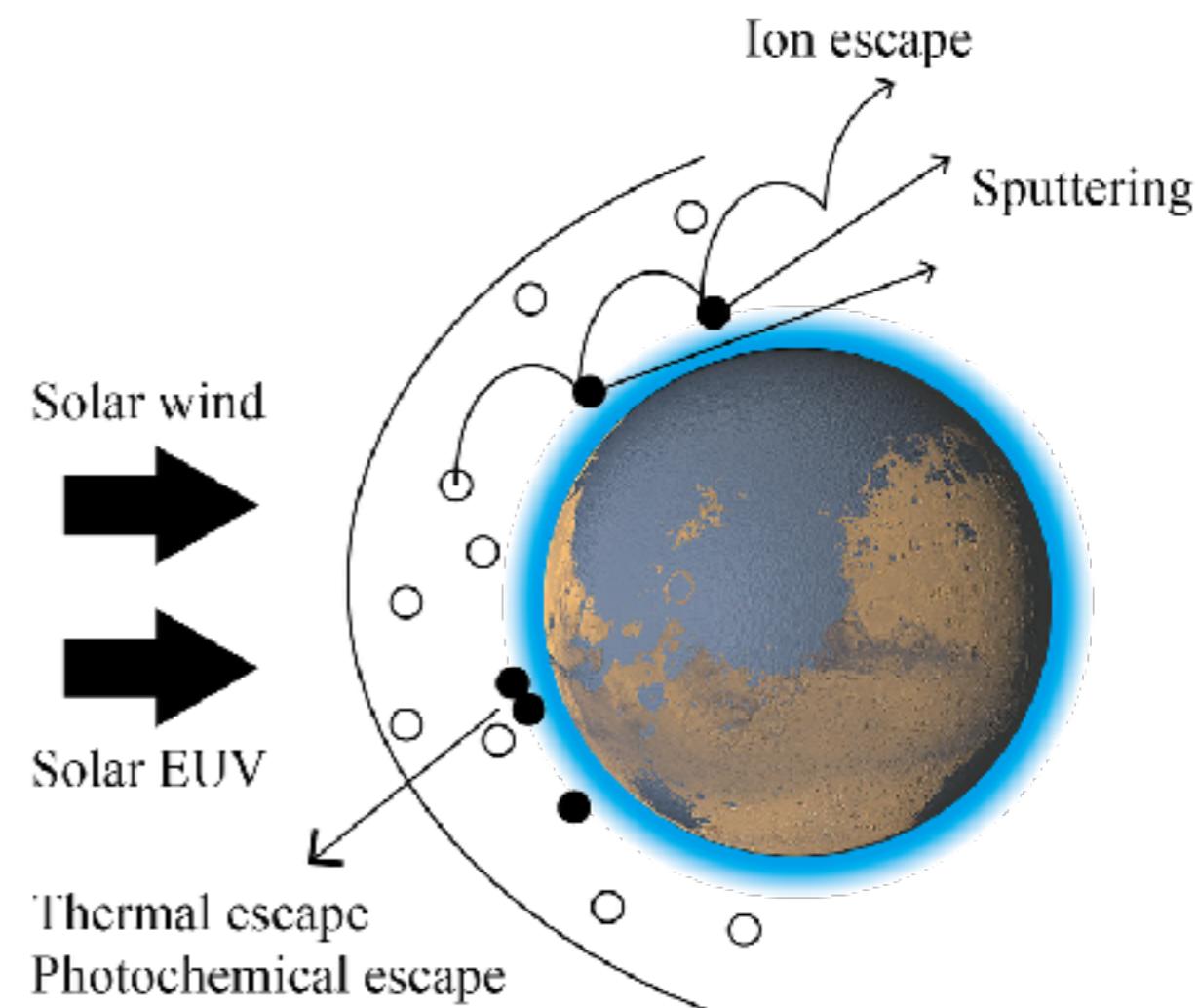
- * リザーバー(大気, 海, 地殻, マントル)間の元素循環

e.g.) 炭酸塩形成：地球大気からCを取り除く主要過程, 海水沈み込み

- * 太陽風, 極端紫外線による大気散逸

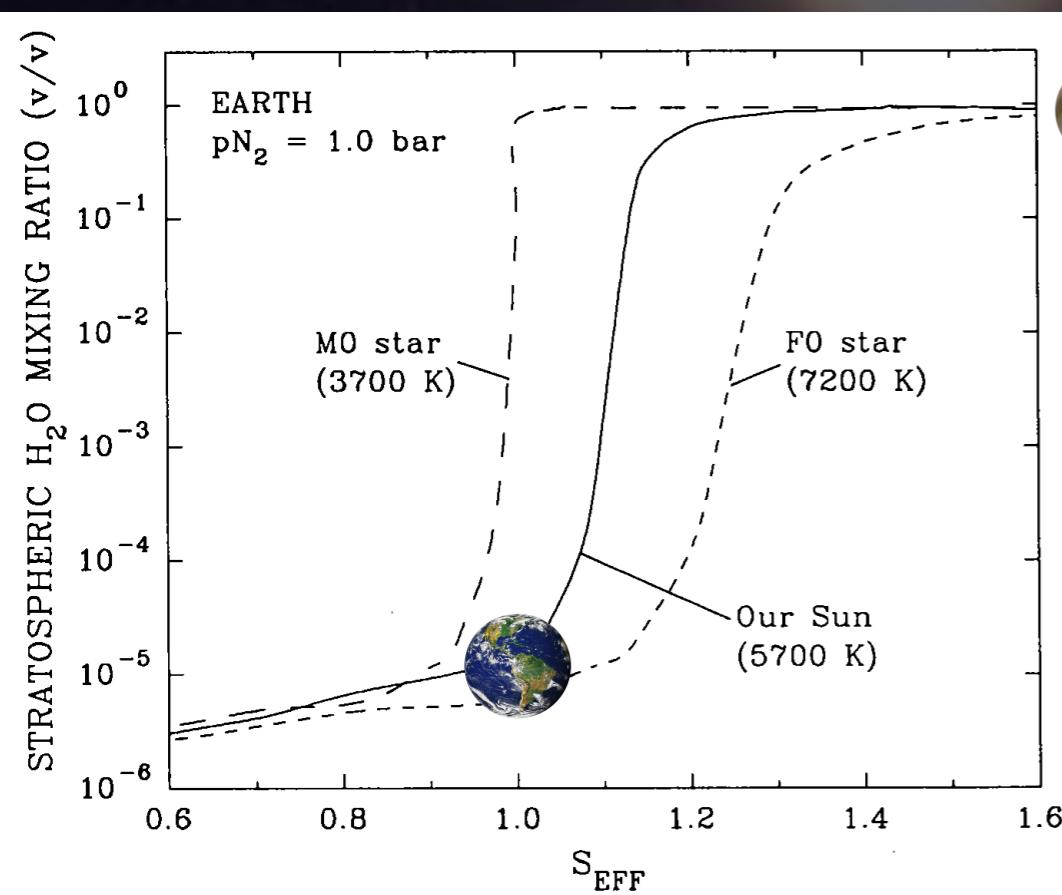


門屋他 (2012)



暴走温室状態と大気散逸

成層圏H₂O混合比の入射量依存性

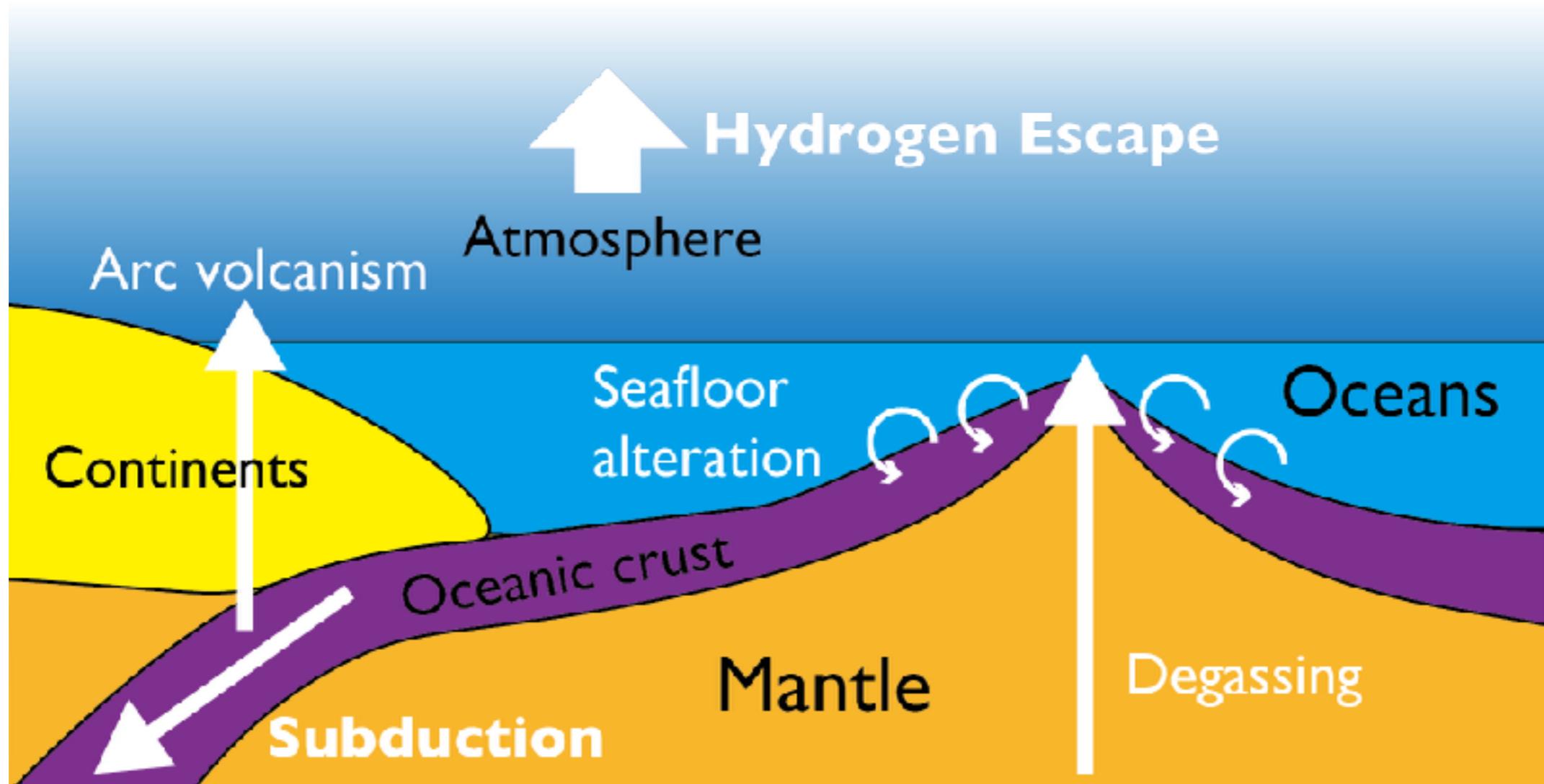


Kasting et al. (1993)

- * ハビタブル・ゾーンを外れ、
金星は暴走温室状態
- * 形成時に獲得したH₂Oは水蒸気として
大気上層まで存在
(↔地球：成層圏のH₂O混合比 $\sim 10^{-6}$)
- * 上層大気でH₂Oは紫外線によって解離
- * 大気散逸によって水素を失う

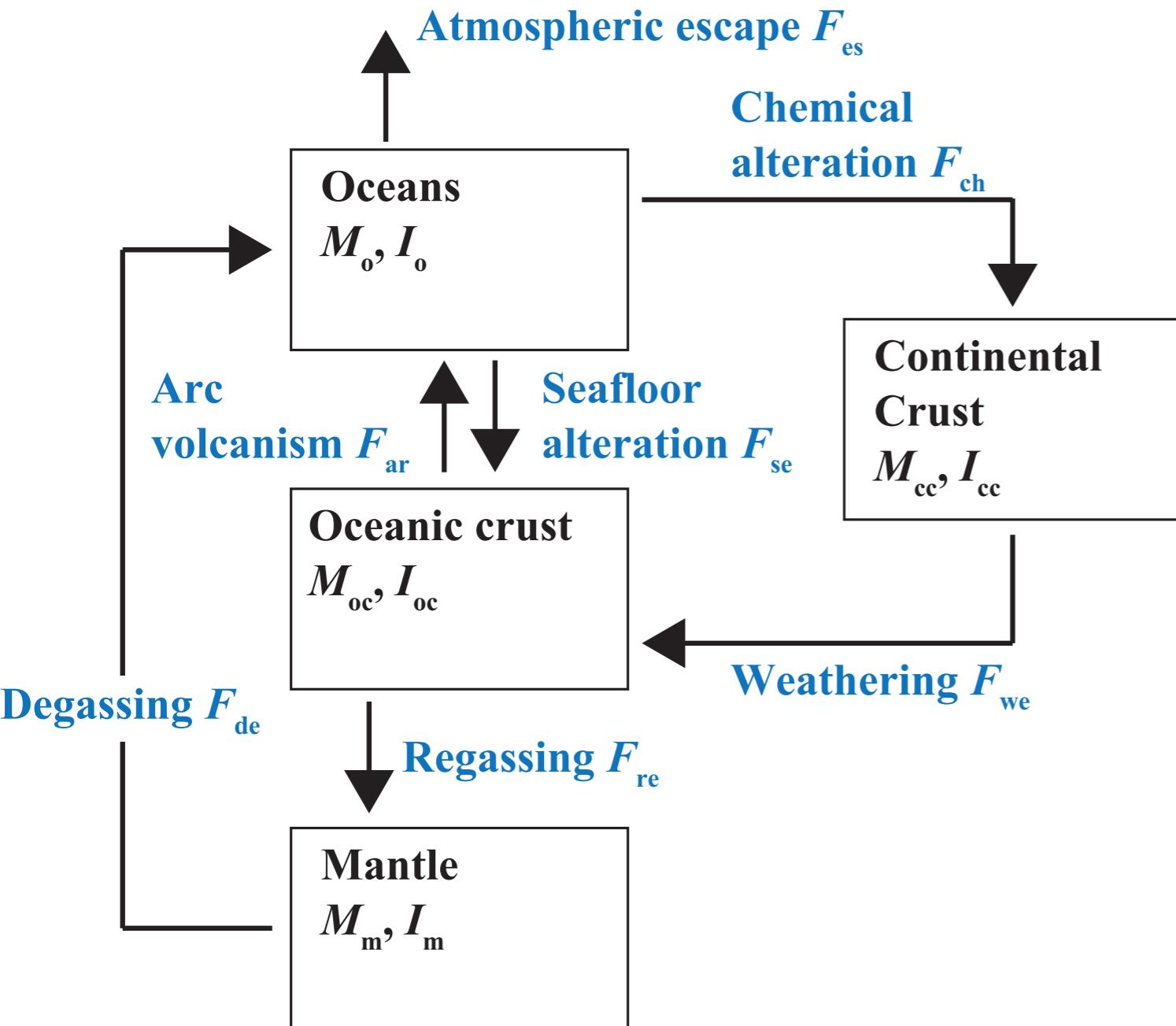
⇒地球と金星は異なる進化を遂げた

地球の水循環



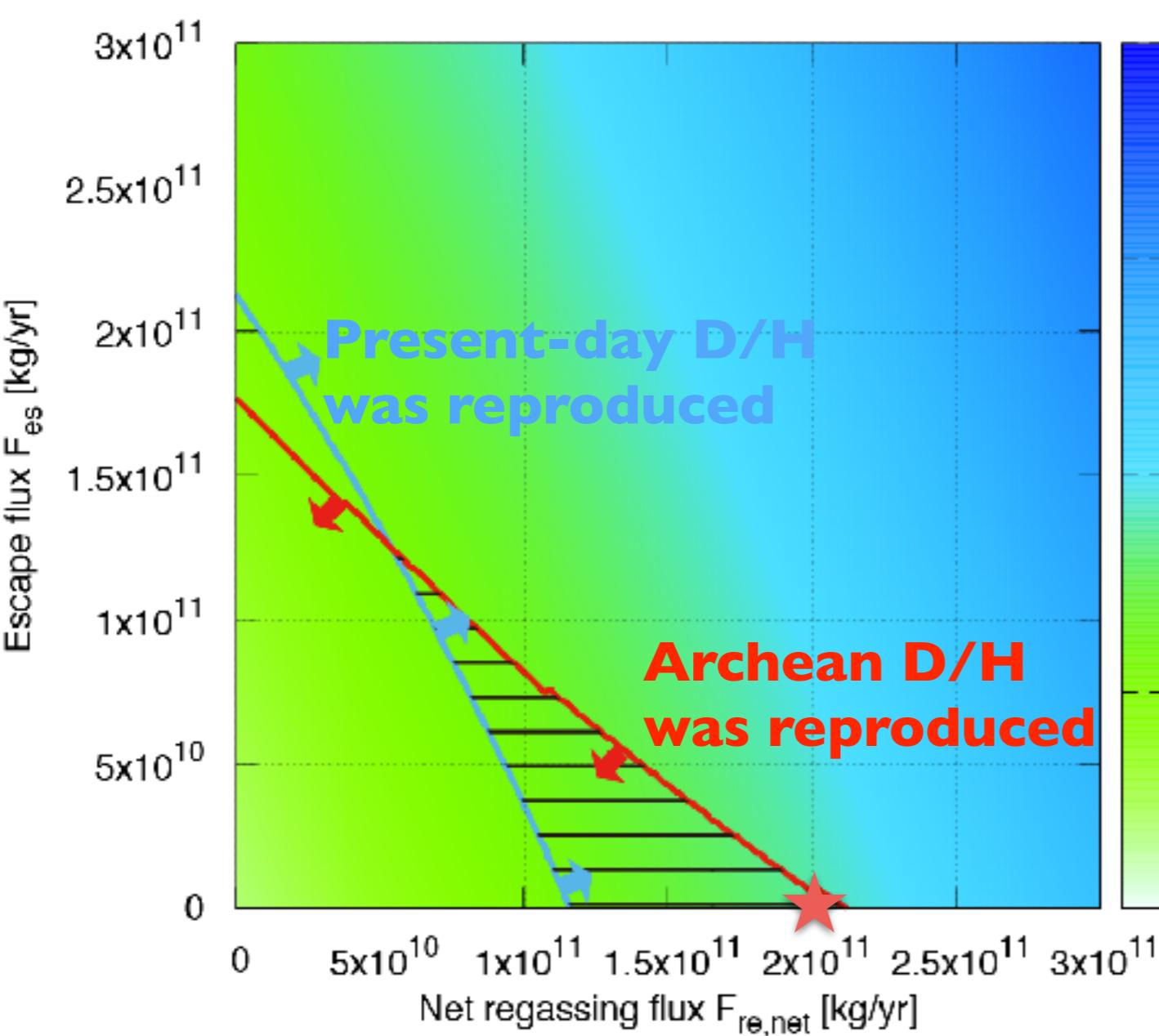
- * プレートの沈み込みに伴って水(含水鉱物)がマントルへ還流
- * 太古代海洋の低いD/H比：大気散逸？ (Pope et al. 2012)
- * 現在の海とマントルのD/Hの違い：水質変成と沈み込み？ (Lécuyer et al. 1998)

Model combined with D/H



- * 地球の水循環ボックスモデル
- * 大気散逸と水質変質によるD/H比の時間進化を考慮
- * パラメータ：
沈み込みフラックス、
大気散逸フラックス
- * モデル計算結果とD/Hデータの比較からパラメータを制約し、海水量の時間進化を解明

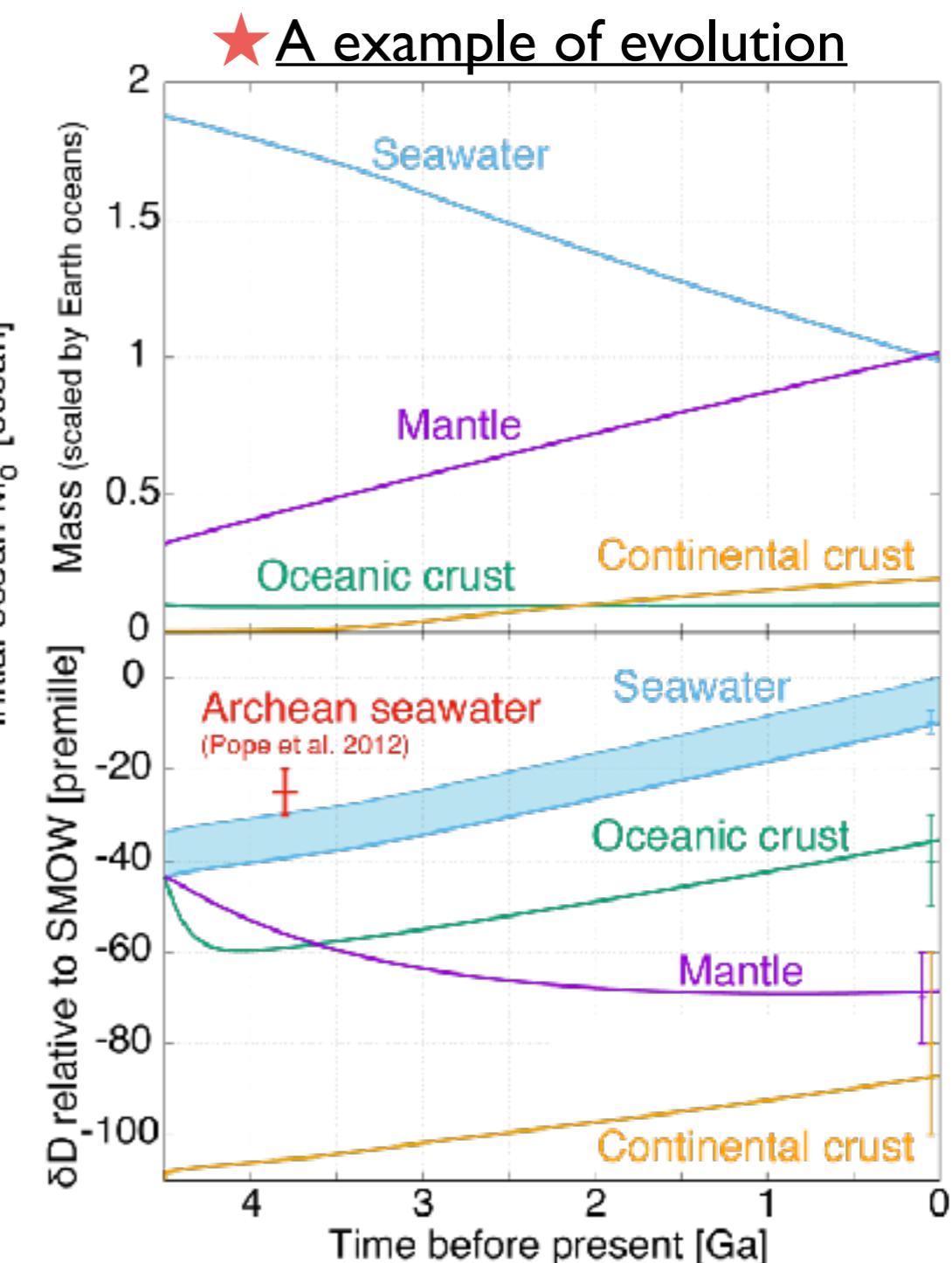
沈み込みによる海水量減少



Kurokawa et al. submitted to *Earth Planet. Sci. Lett.*

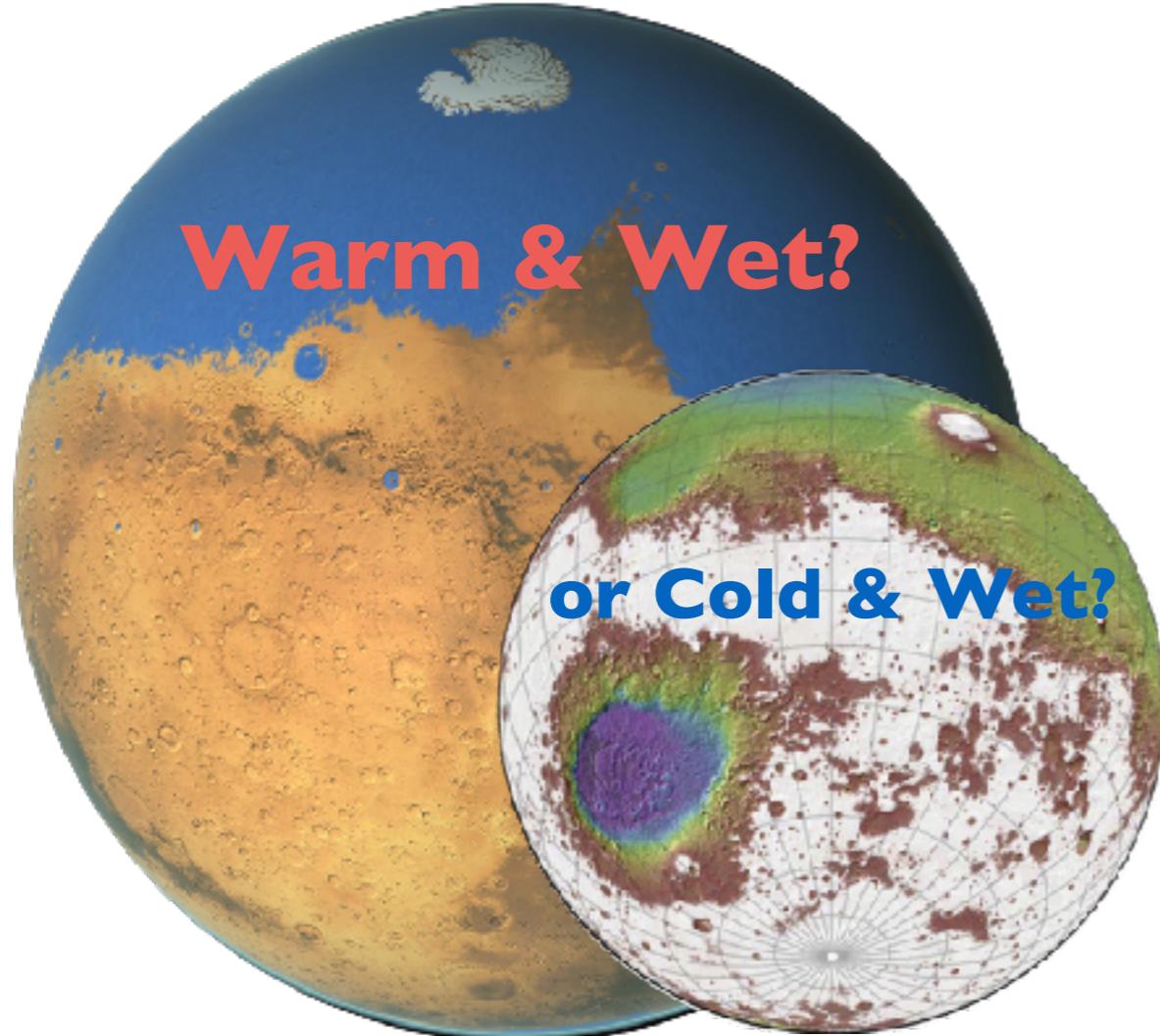
* 初期海水量 $\sim 1.5\text{-}2 \times$ 現在の海水量

\Rightarrow MO固化時のマントル脱水とその後の海からマントルへの還流

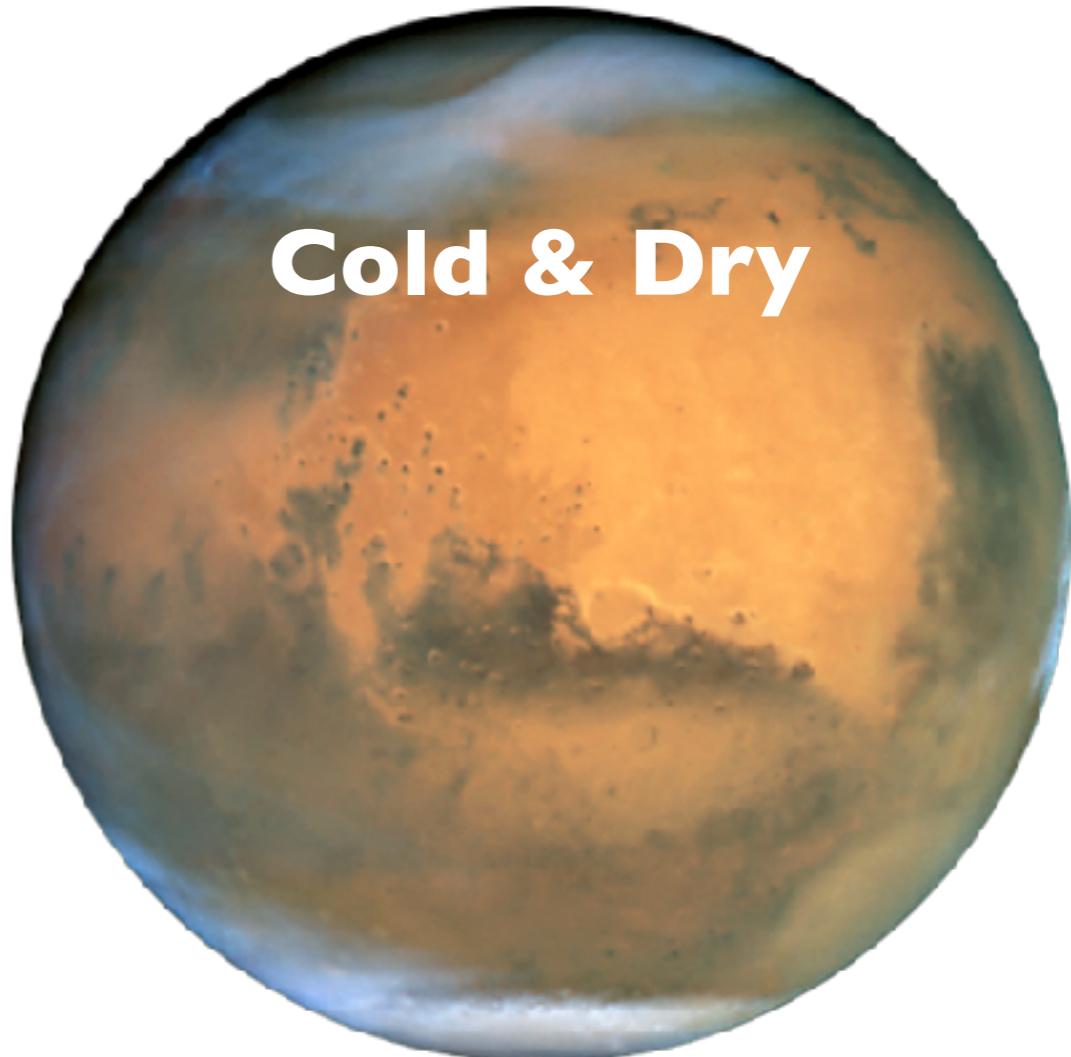


地球と火星の違い：気候変動

~4 billion years ago



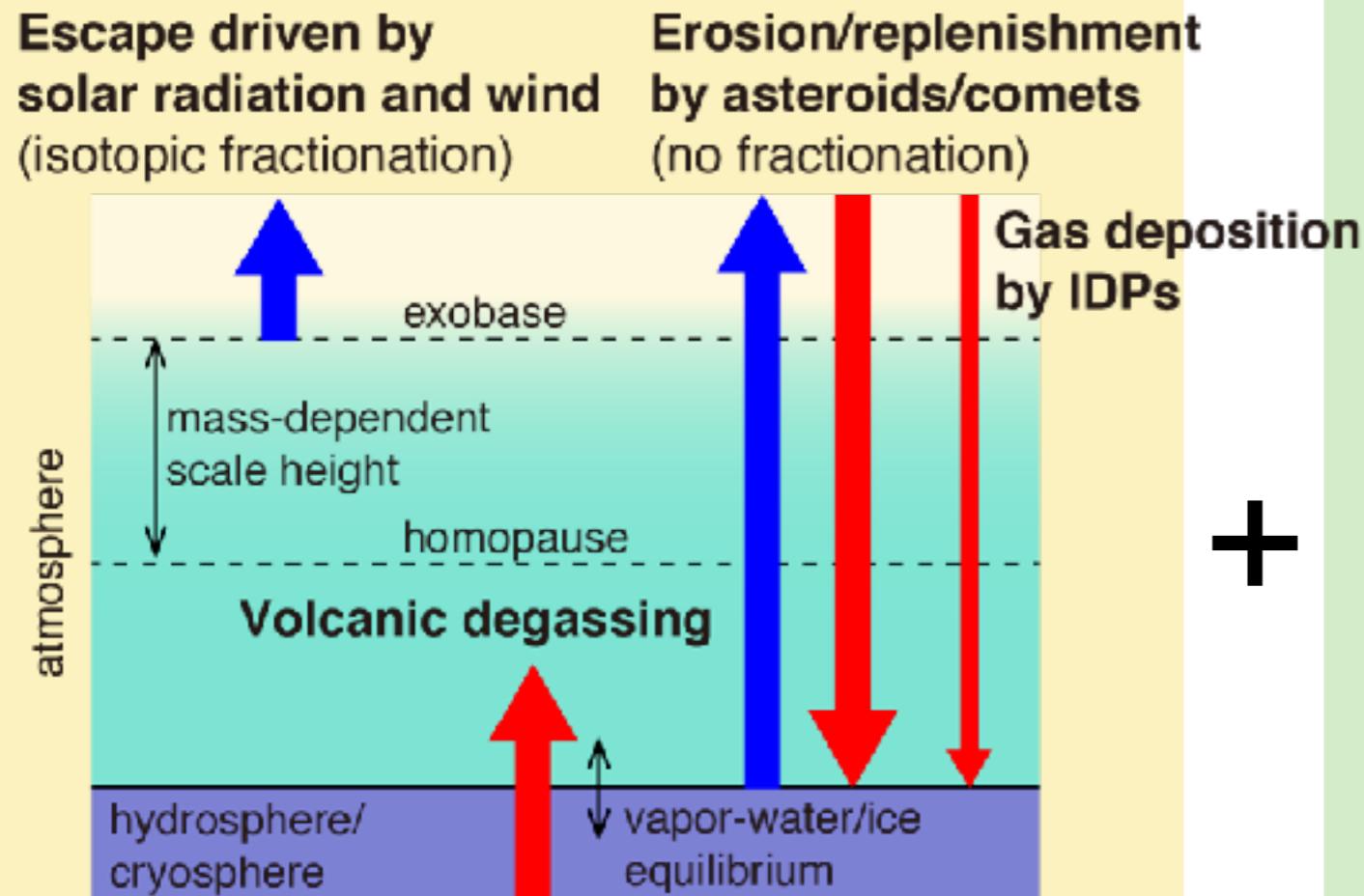
Present-day



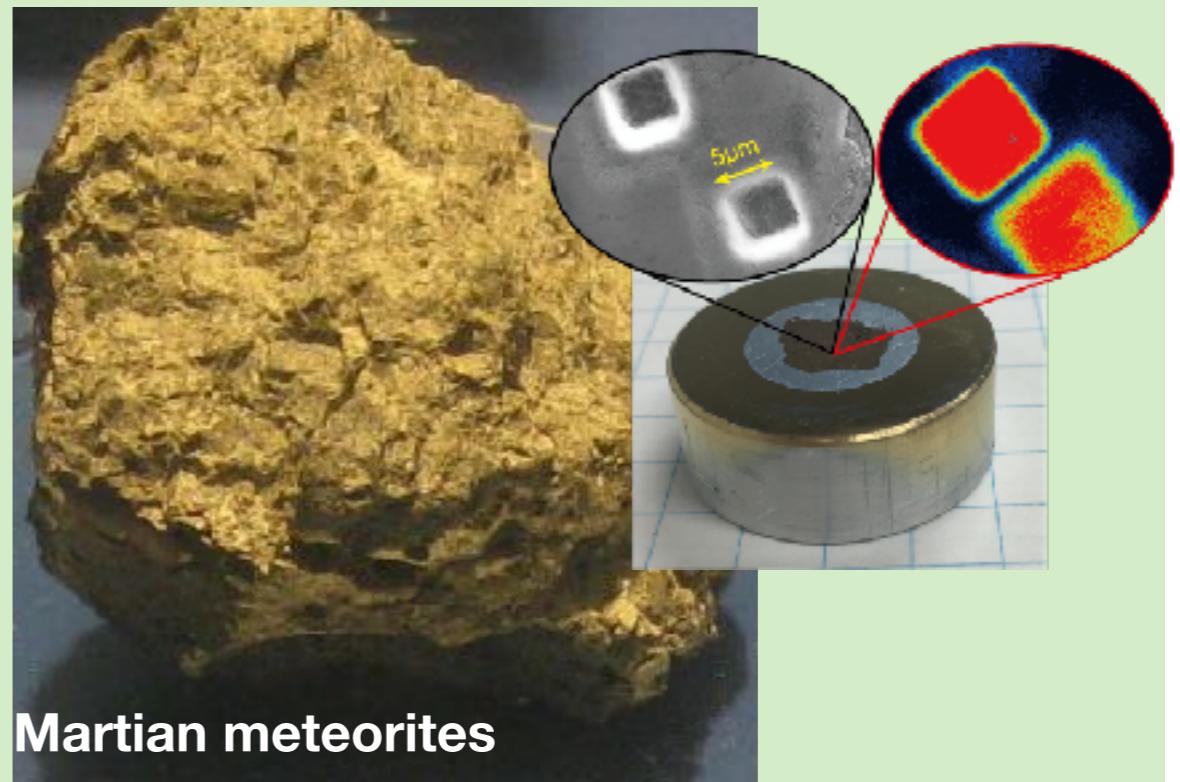
- * 大気散逸によって火星の大気と海が失われた
- * 地球と火星の運命を分けた原因は何か？
: 固有磁場の有無 (e.g., Jakosky et al. 2017), 惑星サイズ (e.g., Tian et al. 2009)?

Our model combined with isotopes

Model



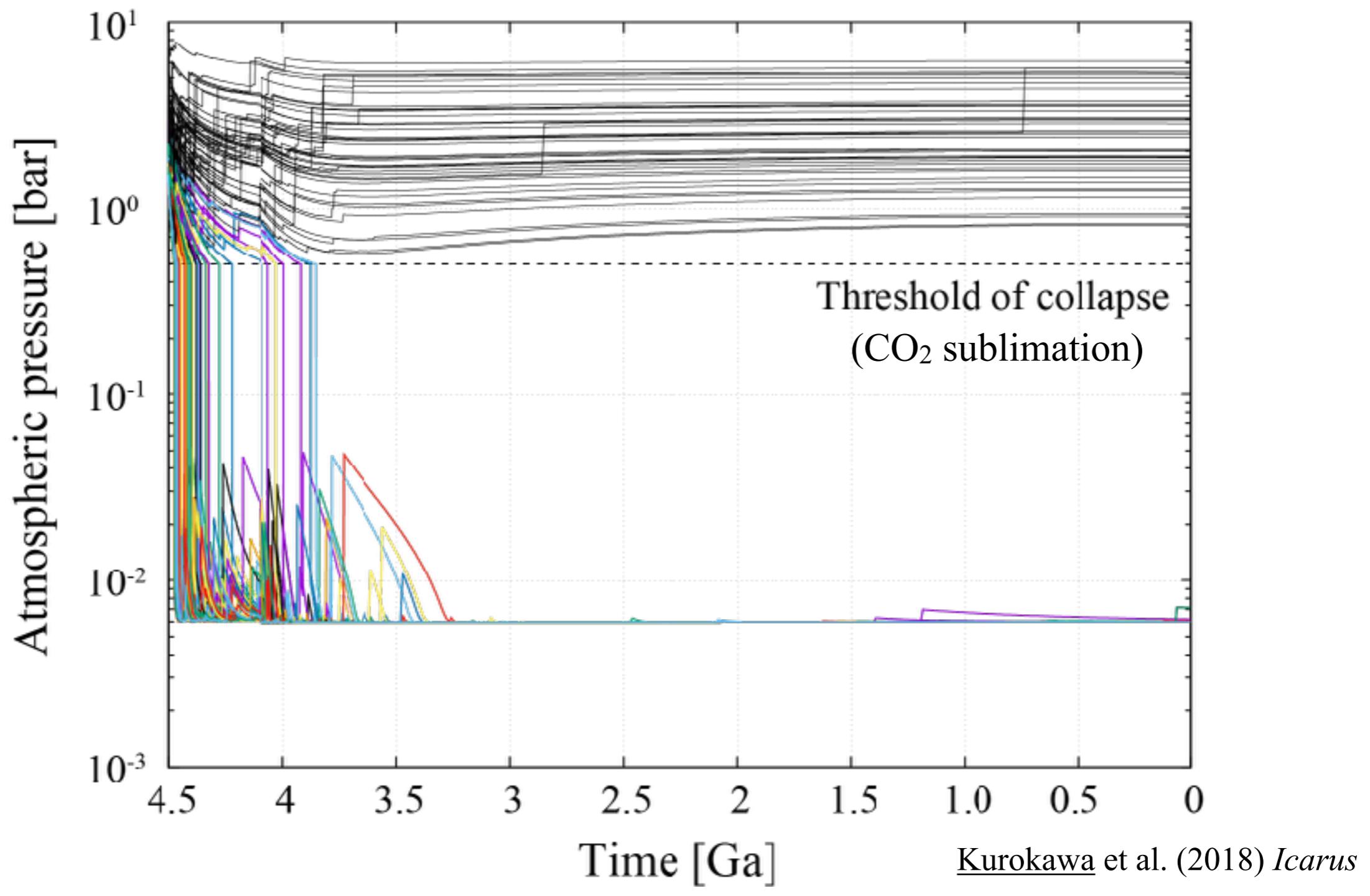
Geochanical analysis



Martian meteorites

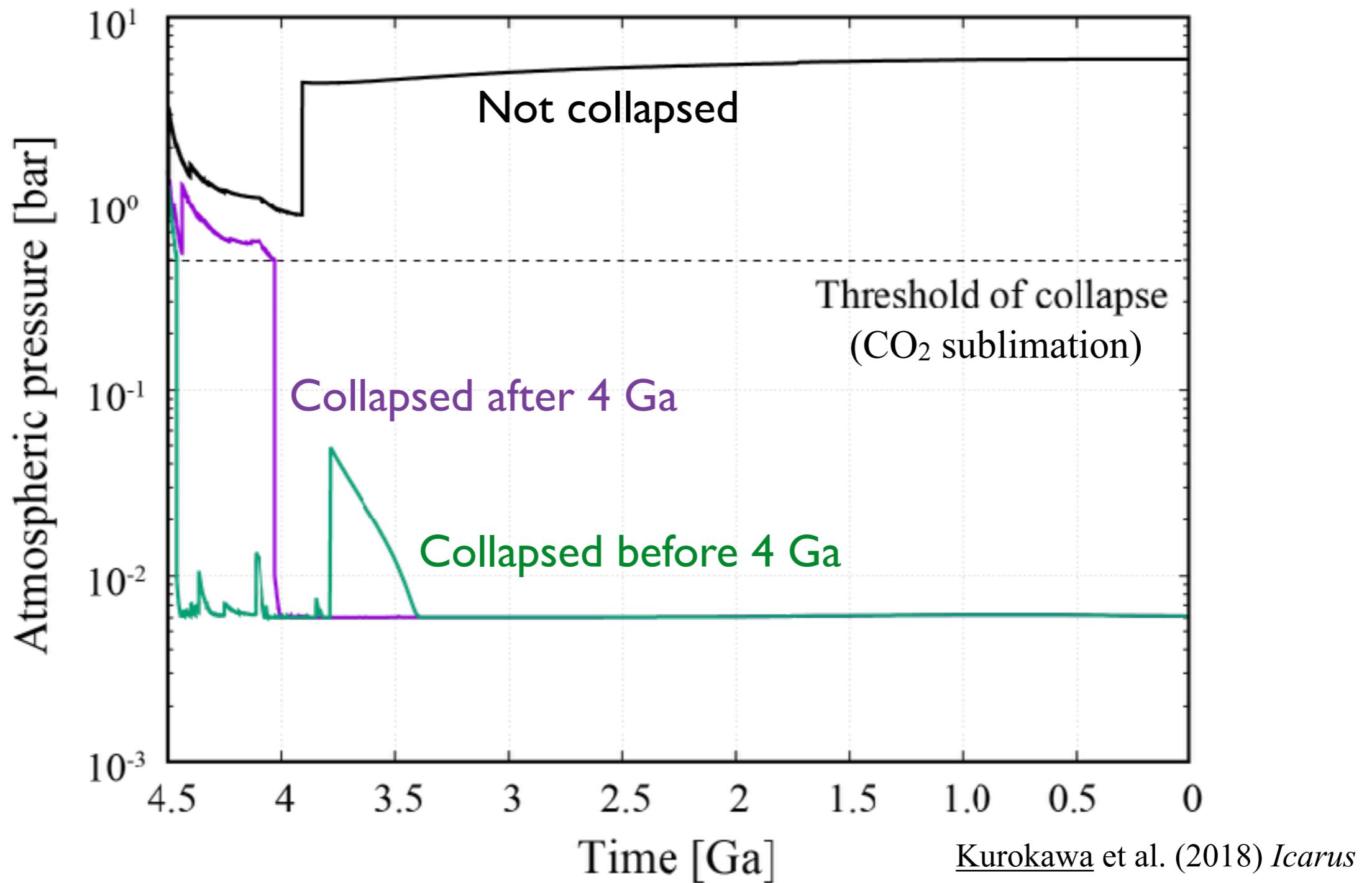
- * 様々な大気量進化パスに対し、同位体組成の進化を計算(D/H , $^{15}N/^{14}N$, 希ガス)
- * 火星隕石中の揮発性元素同位体組成データと比較することで、進化を制約

Evolution of atmospheric pressure



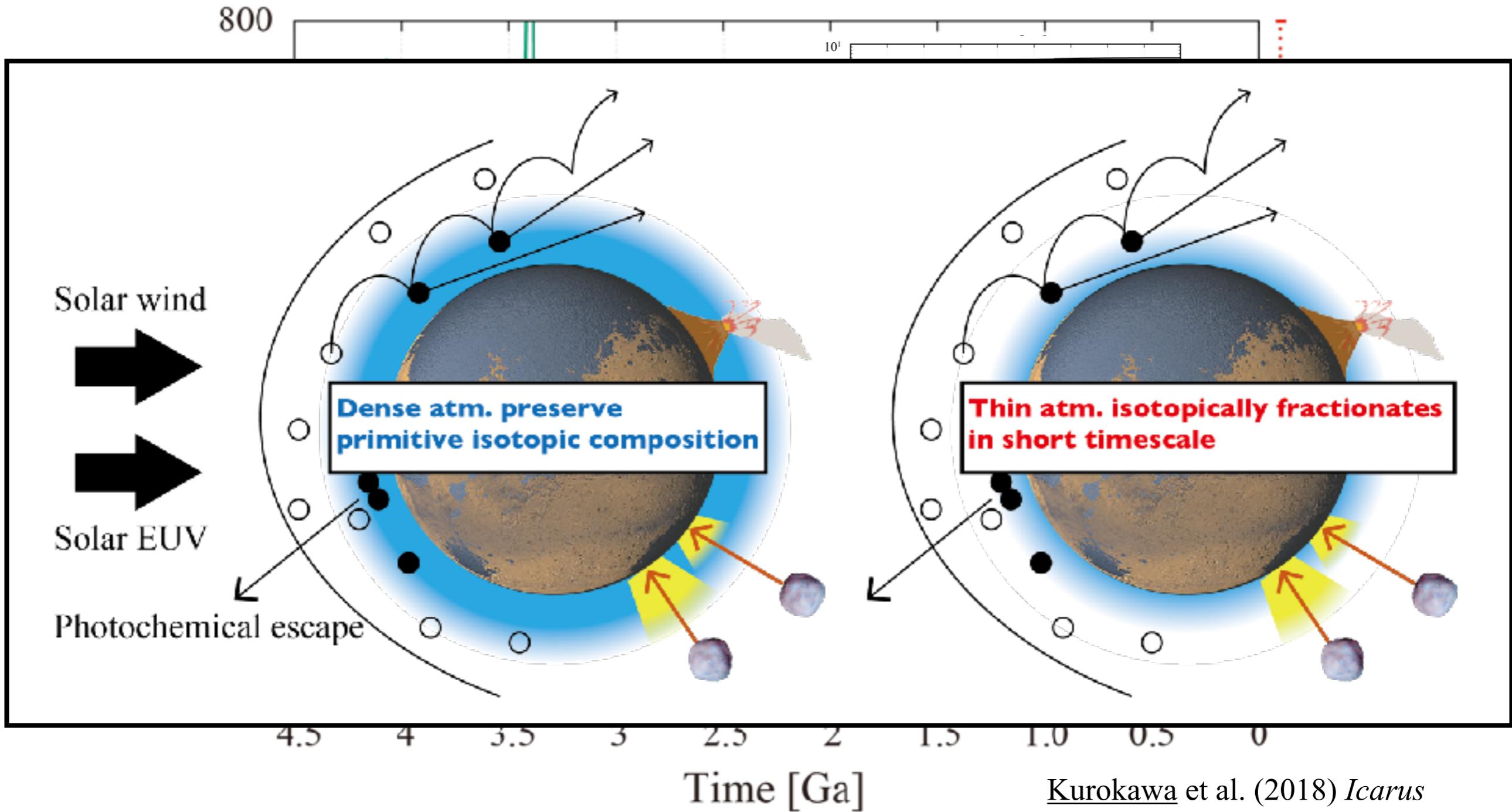
小天体衝突により大気圧が変動

Evolution of atmospheric pressure



小天体衝突により大気圧が変動

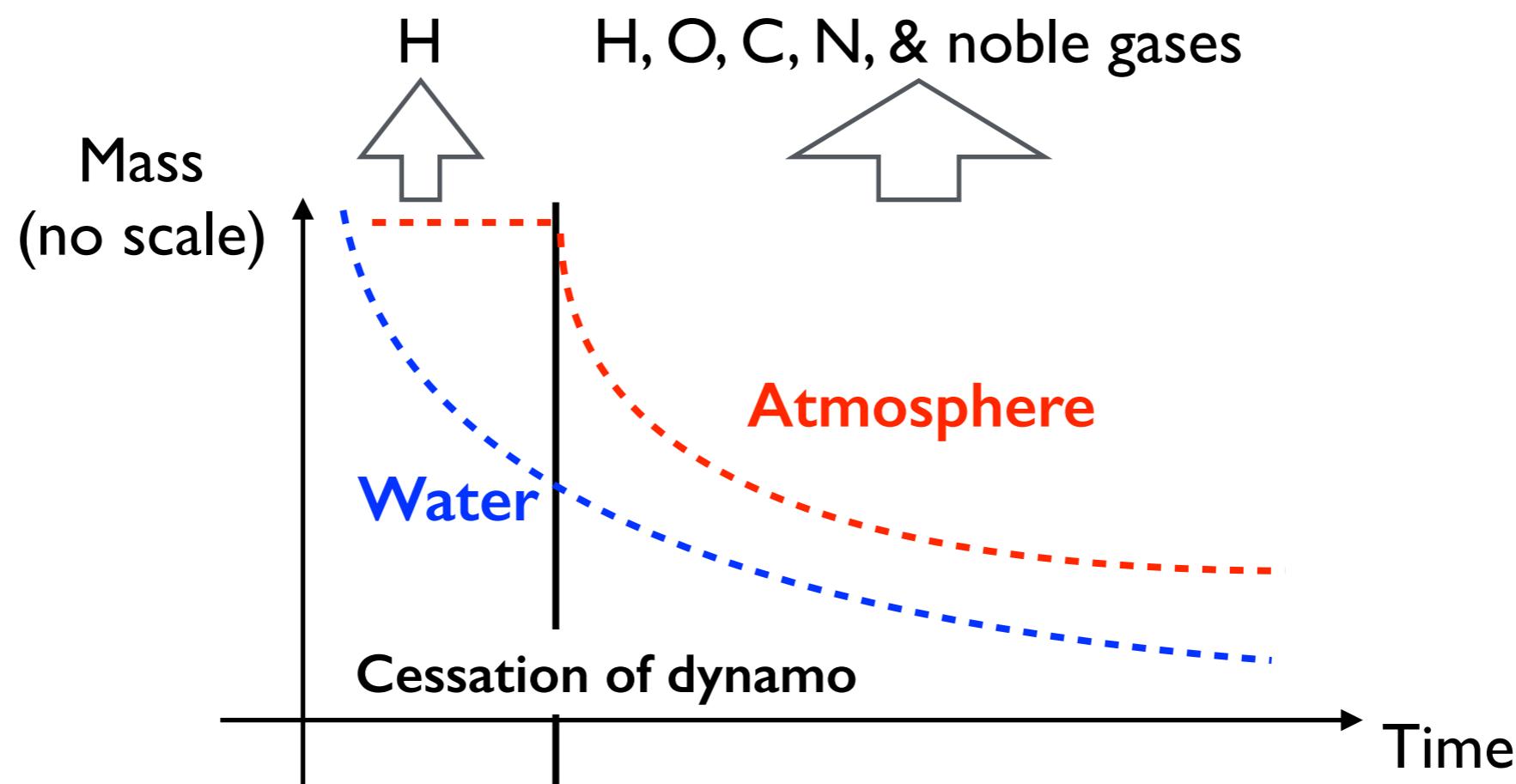
Evolution of nitrogen isotopes



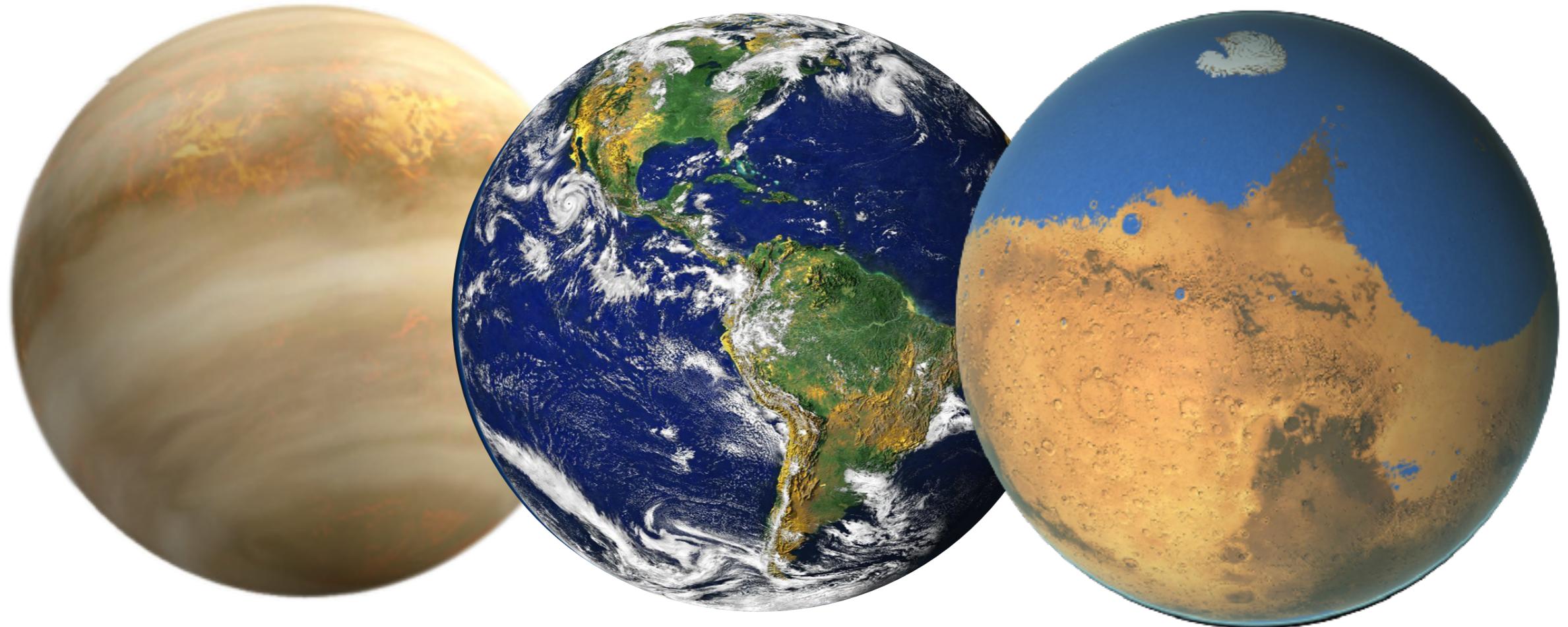
40億年前のN同位体比を再現するためには、
0.5気圧以上の厚い大気が必要

Why did Mars lose volatiles?

- * 40億年前に厚い大気が存在し、その後散逸 (Kurokawa et al. 2018, *Icarus*)
- * 一方、火星の水D/Hから、40億年前までに初期海水量(>0.1×地球海水)の50%以上が失われた
(Kurokawa et al., 2014, *Earth Planet. Sci. Lett.*; Kurokawa et al., 2016, *Geochem. J.*)
- * 40億年前火星は固有磁場を保持していたことから、磁場の消失とその後の太陽風による大気散逸が火星気候変動に寄与していることを示唆

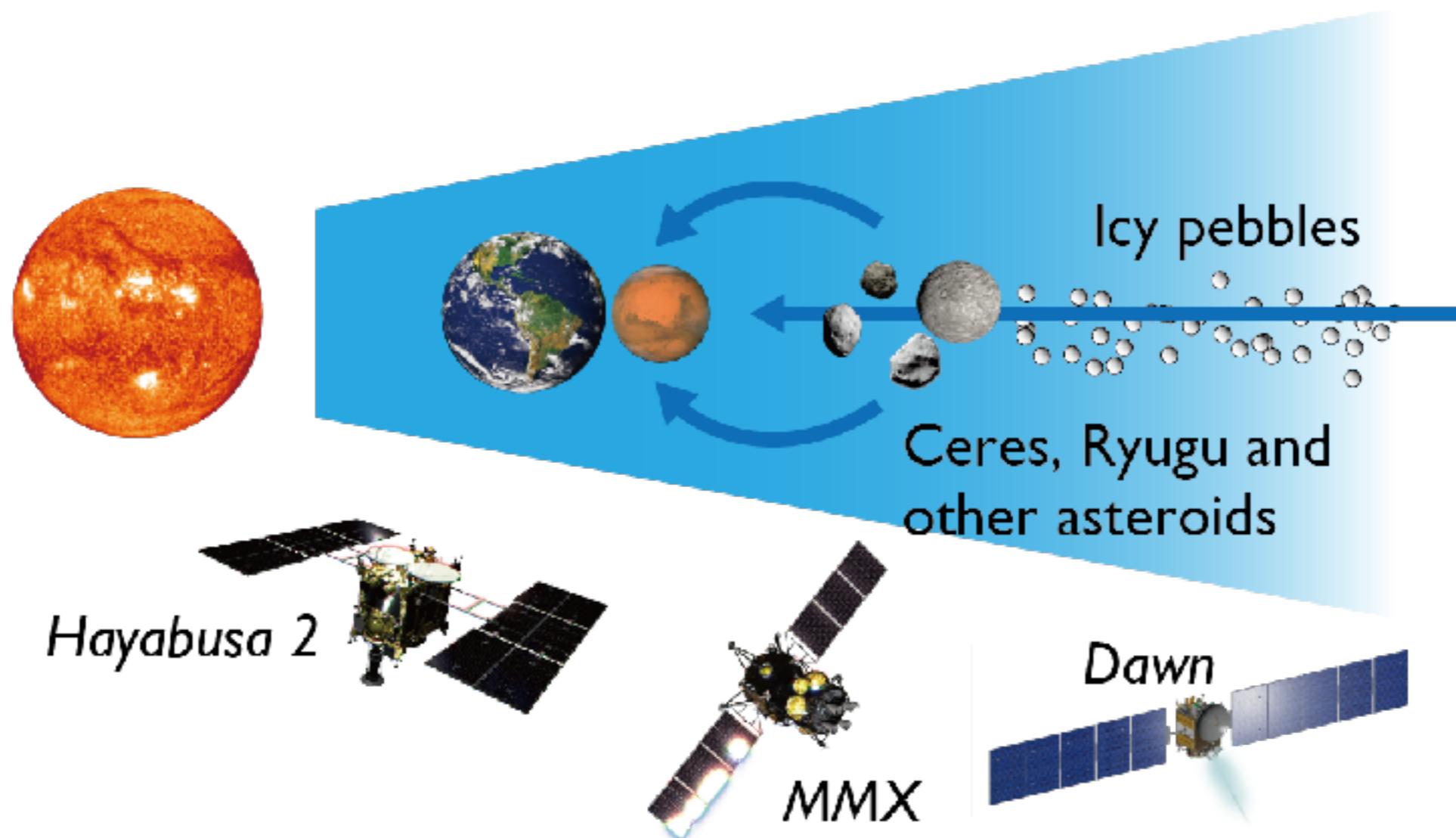


Origin of volatiles on terrestrial planets



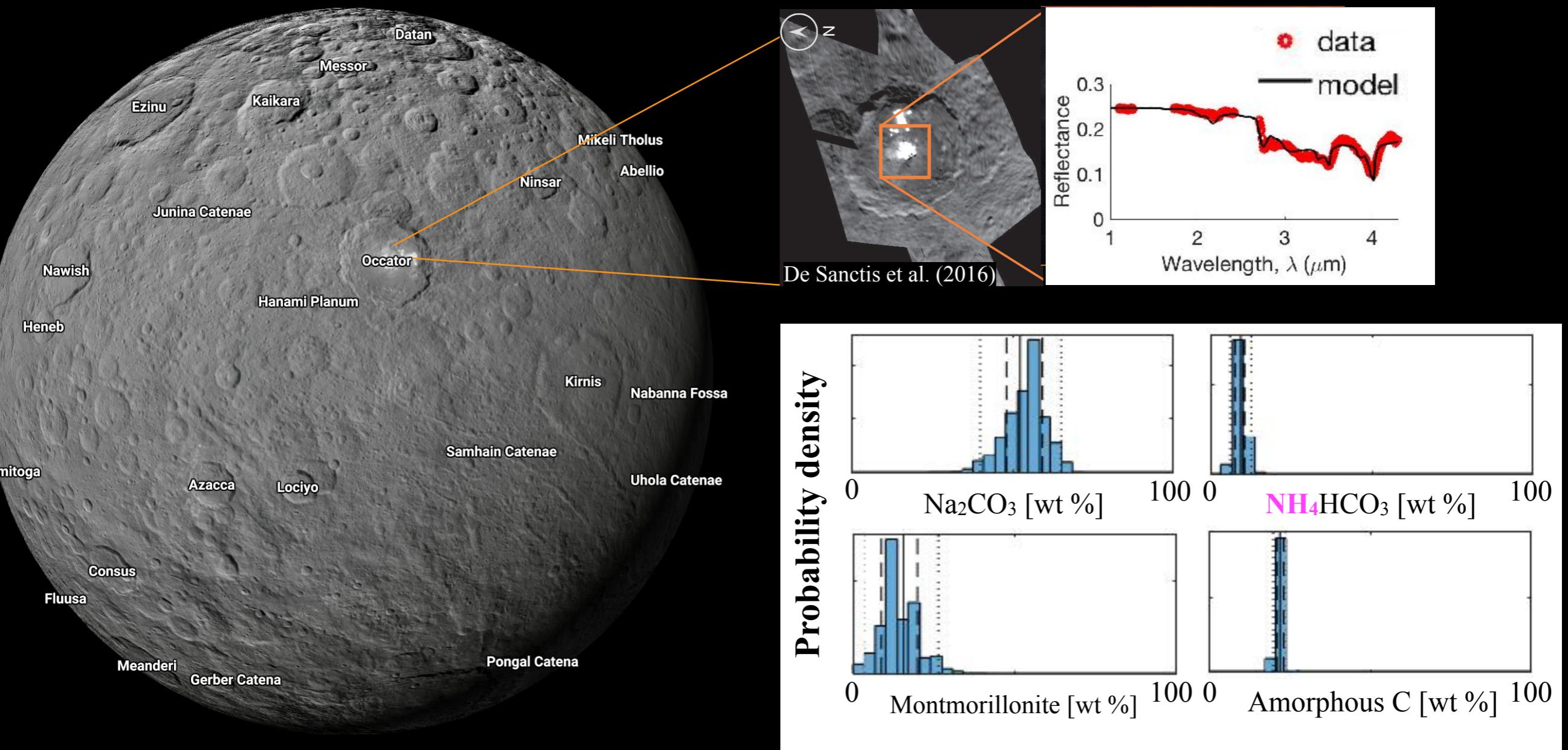
- * 地球型惑星は惑星形成期に揮発性元素を獲得し、その後の元素循環・大気散逸によって異なる進化を遂げた
- * 挥発性元素はどのようにもたらされたのか？

Explorations to unveil the origin



- * Dawn(Ceres), Hayabusa 2(asteroid Ryugu), and MMX(Martian moons) will constrain the abundances of volatiles on small bodies in the outer solar system
- * Because the accretion rate of pebbles differs significantly between Ceres(~ 1000 km) and asteroids(< 100 km), these missions will unveil the process to deliver volatiles: planetesimals vs. pebbles

Bayesian analysis of Near-IR spectra



Kurokawa & Ehlmann in prep.

- * **NH₄-bearing minerals** on Ceres may be a signature of icy pebble accretion
(De Sanctis et al. 2015; 2016)
- * Our approach enables us to estimate the probability distributions of the abundance

まとめ

揮発性元素の供給

- * 小惑星・彗星の衝突、氷ペブル降着
- * 惑星形成期(GI前)に揮発性元素供給、レイトアクリーションは揮発性元素枯渇
- * 今後的小天体探査を通じて供給過程を解明

元素分配・循環

- * マグマオーシャン固化に伴いマントルから脱ガス、大気と海形成
- * その後、プレートテクトニクスにより水がマントルに還流

大気散逸

- * 金星は太陽に近いことで、暴走温室状態と大規模な水散逸を経験
- * 火星は固有磁場を失ったことで厚い大気が散逸