

星雲ガス中で集積する火星の 大気形成と熱進化

北海道大学大学院 理学院

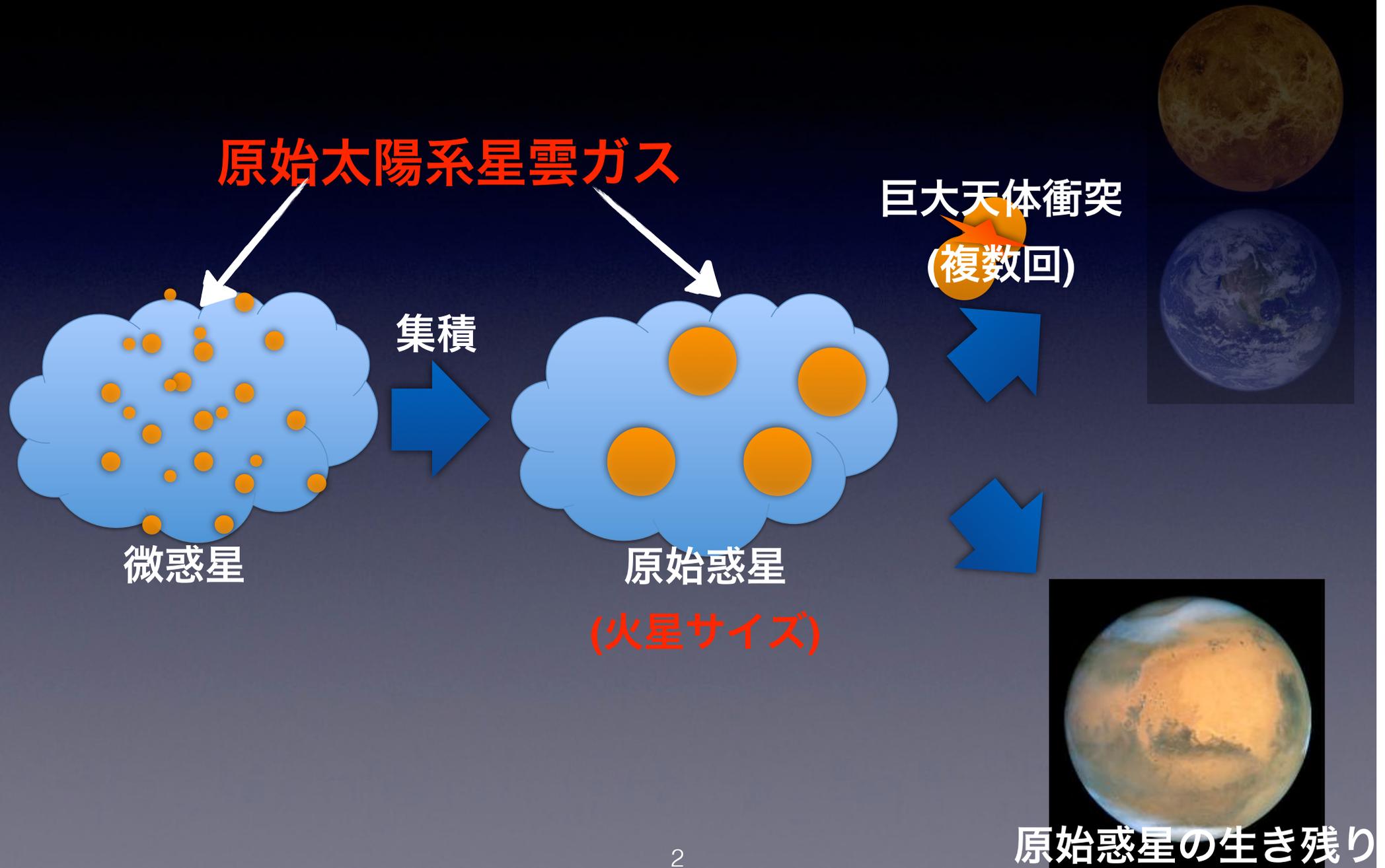
宇宙理学専攻 惑星宇宙グループ

齊藤 大晶, 倉本 圭

系外惑星大気WS

06 -07 Jan. 2014

地球型惑星形成のシナリオ



なぜ火星は星雲ガス中で集積したと言えるか？

火星由来の隕石を用いて、Hf-W 年代測定を実施することにより、火星の形成時期を推定

しかし...

火星マントルから直接採取して解析したわけではないので、
形成時期には大きな不確定さがあった

なぜ火星は星雲ガス中で集積したと言えるか？

SNC隕石の Th/W 比

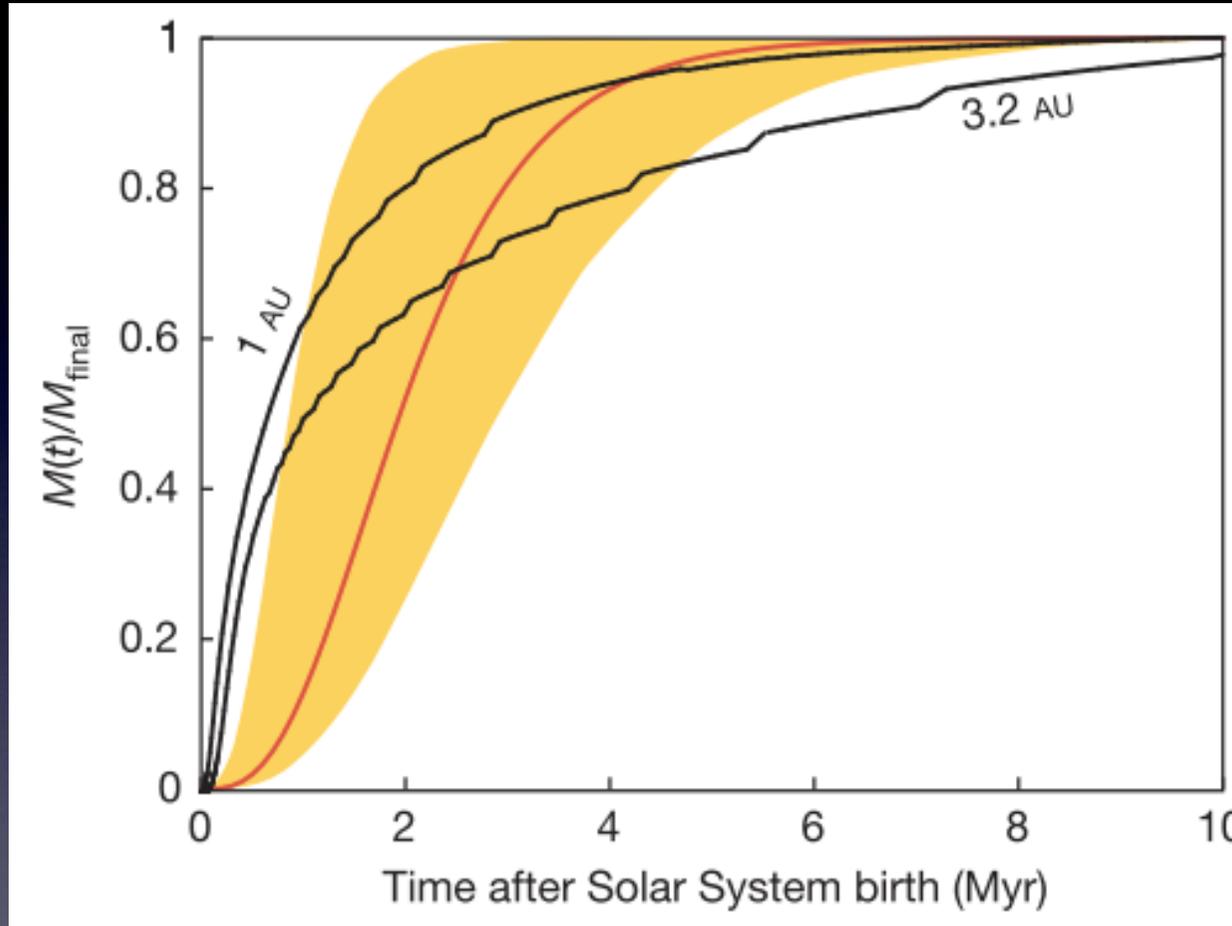
試料, 化学組成に違いがあっても, Th/W 比はほぼ一定

コンドライト隕石の Th/Hf 比

マントルはコンドライト隕石と同じ同位体値と仮定 (CHUR)

$$\left(\frac{\text{Hf}}{\text{W}}\right)_{\text{MarsMantle}} = \left(\frac{\text{Th}}{\text{W}}\right)_{\text{MarsMantle}} / \left(\frac{\text{Th}}{\text{Hf}}\right)_{\text{MarsMantle}}$$

なぜ火星は星雲ガス中で集積したと言えるか？



(Dauphas and Pourmand, 2011)

火星は 100万年オーダーで集積し, マントル・コアに分化した可能性

原始火星は星雲ガス中で集積した可能性

なぜ火星は原始惑星の生き残りか？

火星隕石の試料間で, W, Nd といった娘核種同位体比にバラつき



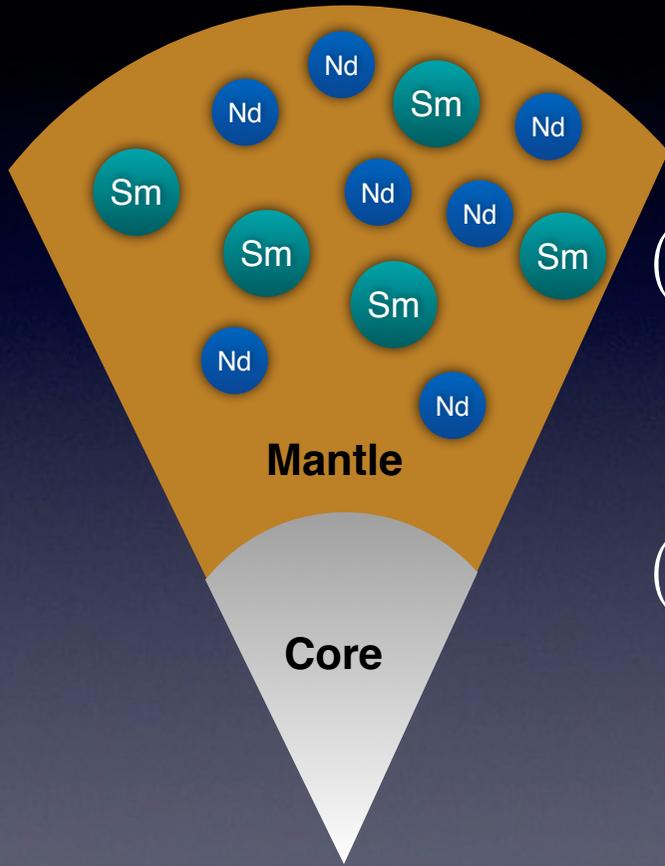
形成初期にマントルが部分的に融解し, 不均一が生じた可能性

(Dauphas and Pourmand, 2011)

マントル中の同位体比を均一化するような過程
(ジャイアント・インパクト) を経験していないことを示唆

なぜ火星は原始惑星の生き残りか？

マグマ形成前



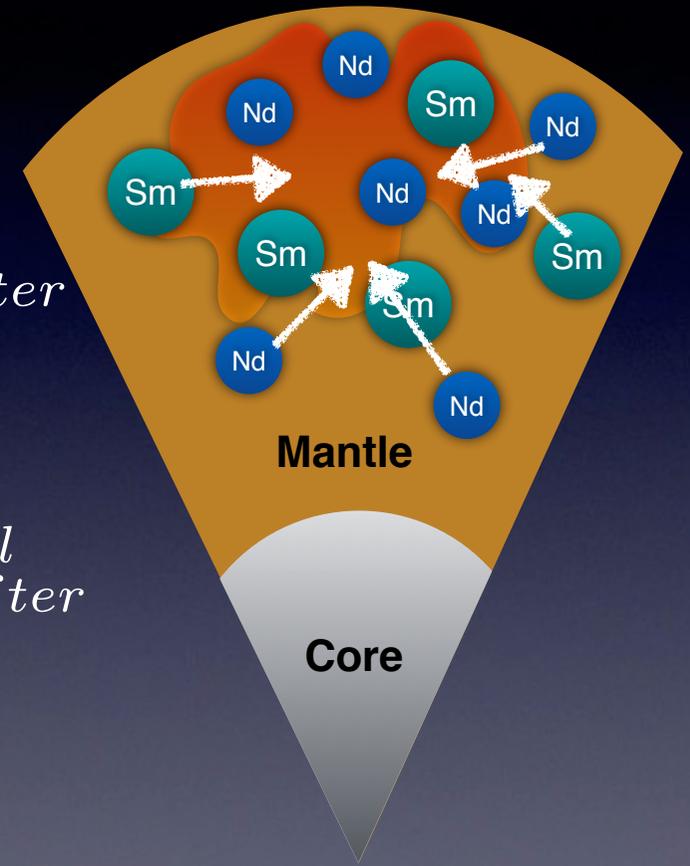
融解領域

$$\left(\frac{\text{Sm}}{\text{Nd}}\right)_{\text{before}}^{\text{sol}} > \left(\frac{\text{Sm}}{\text{Nd}}\right)_{\text{after}}^{\text{liq}}$$

非融解領域

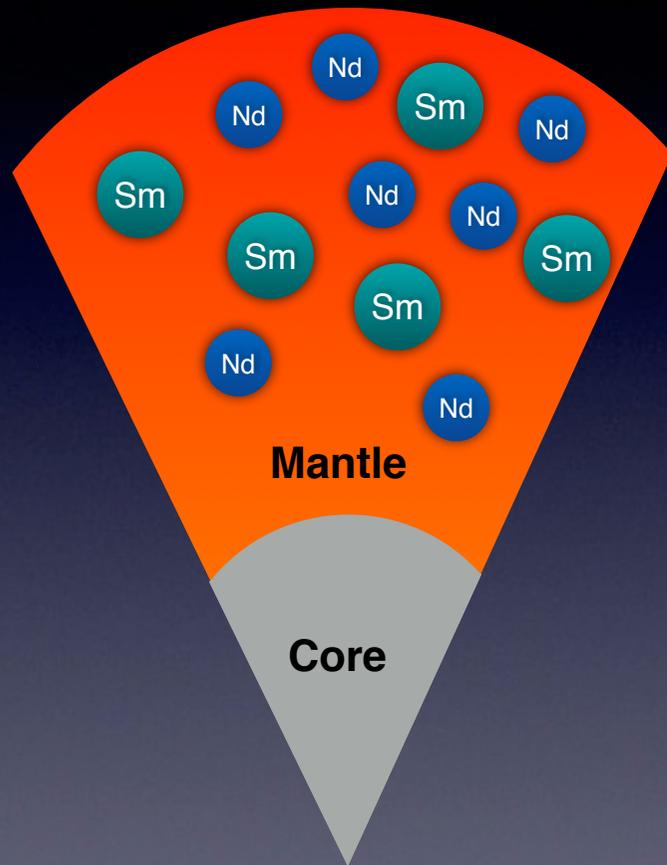
$$\left(\frac{\text{Sm}}{\text{Nd}}\right)_{\text{before}}^{\text{sol}} < \left(\frac{\text{Sm}}{\text{Nd}}\right)_{\text{after}}^{\text{sol}}$$

マグマ形成後



融解した領域としなかった領域で
娘核種 (Nd) の同位体比が異なる (= 不均一)

なぜ火星は原始惑星の生き残りか？



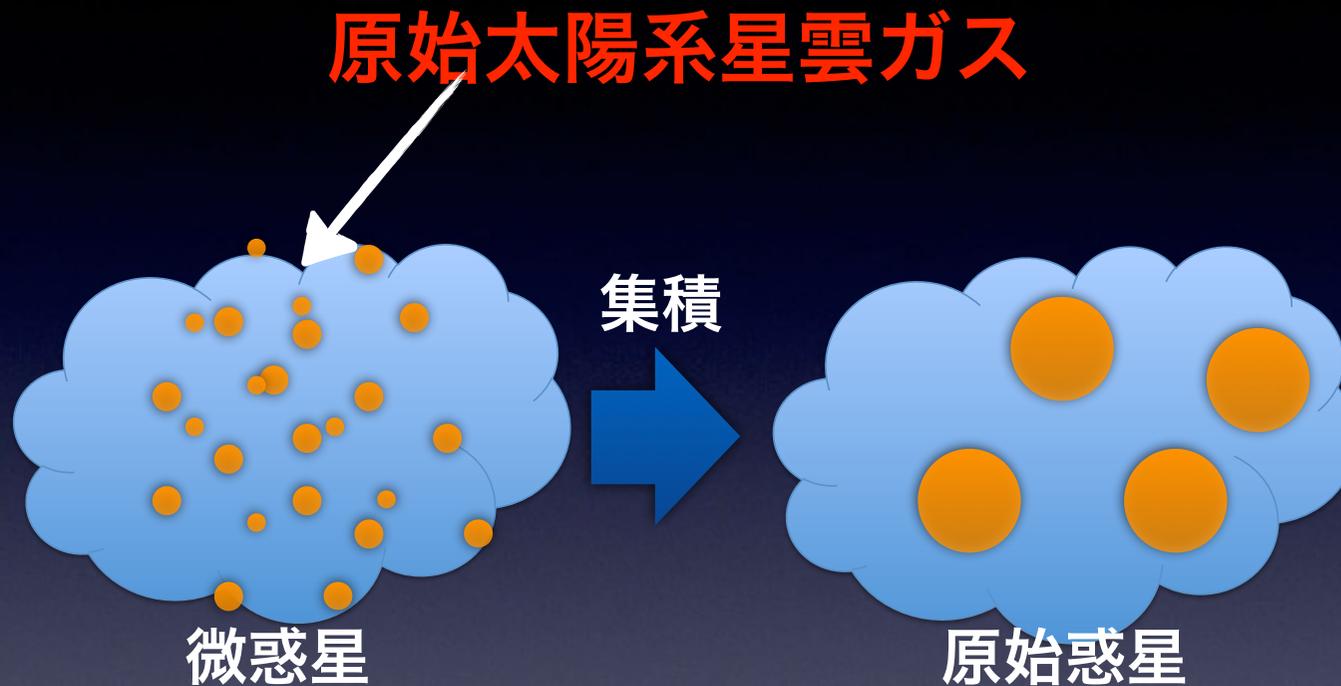
もし大規模な融解が起こるような
イベントがあったら...

マントル全体が融解することにより、
マントル全体を平均した Sm/Nd 比に
バラつきはでない

原始火星はジャイアント・インパクトを
経験していない可能性が高い

原始惑星の熱史

星雲ガスの保温効果

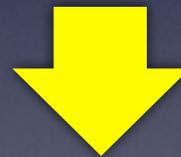


原始惑星の重力で捕獲した星雲ガスの保温効果により、惑星 (地球を想定) 表面が融解するか、放射平衡層 + 対流平衡層で構成される大気モデルを用いて調べた (Hayashi et al, 1979).

林モデルで火星表面は融解するか

M/\dot{M} (yr)	M/M_E	L (erg/s)	r_p (10^8 cm)	$r_b (= R)$ (10^8 cm)	T_p (°K)	T_b (°K)	T_{free} (°K)
10^6	1.0	1.1×10^{26}	74.5	6.9	272	4081	766
	0.5	3.6×10^{25}	33.1	5.4	291	2585	646
	0.2	7.8×10^{24}	11.5	4.0	324	1313	516
	0.1	2.5×10^{24}	5.2	3.2	354	693	438
10^7	1.0	1.1×10^{25}	79.0	6.9	231	3978	438
	0.5	3.6×10^{24}	35.9	5.4	233	2504	375
	0.2	7.8×10^{23}	12.9	4.0	238	1240	311
	0.1	2.5×10^{23}	6.0	3.2	244	625	278

(Hayashi et al., 1979)



林モデルでは、火星サイズの原始惑星の地表面は融解することはない

林モデル全層対流圏の場合

静水圧平衡の式

$$\frac{dp}{dr} = \frac{GM_{\text{sol}}\rho}{r^2}$$

p : Pressure

r : Distance from the center of planet

M_{sol} : Mass of ancient Mars

ρ : Density of the atmosphere

G : Gravitational Coefficient

理想気体の状態方程式

$$p = \frac{k}{\mu m_H} \rho T$$

k : Boltzmann Constant

μ : Mean Molecular Weight

m_H : Units of hydrogen atom mass

T : Temperature

圧力-温度および温度-密度勾配

$$\frac{p}{T} \frac{dT}{dp} = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

$$\frac{T}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{\gamma - 1}$$

γ : Adiabatic Exponent

全層対流圏温度構造

- ・断熱減率で温度構造が決定できると仮定

$$T = T_{\text{neb}} + \frac{GM_{\text{sol}}\mu_{\text{neb}}m_H}{(n+1)k} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{\text{neb}}} \right)$$

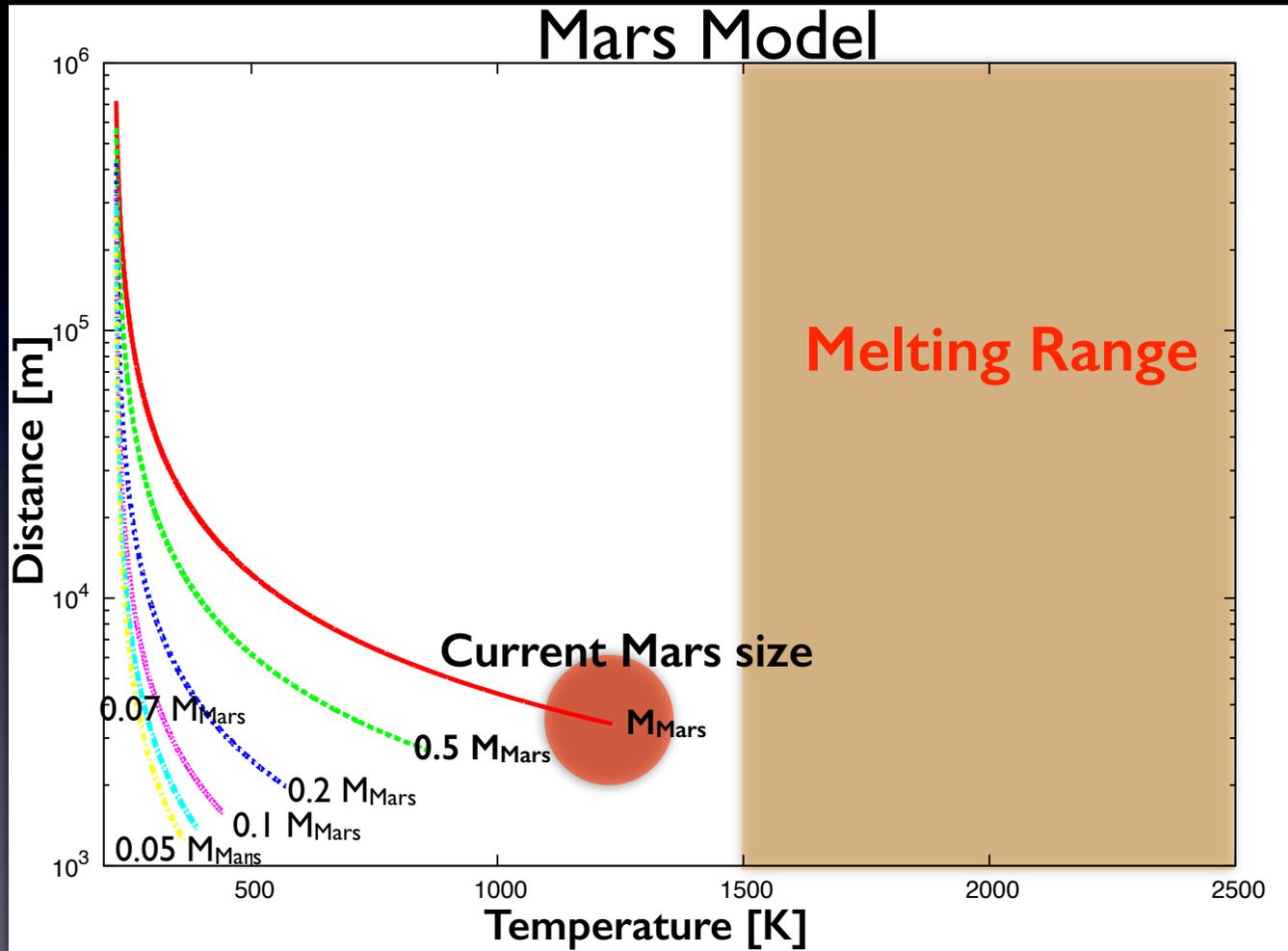
n : polytropic index

T_{neb} : Temperature at the Hill Sphere $T_{\text{neb}} = 255[\text{K}]$

μ_{neb} : Mean Molecular Weight in Nebula Gas Region $\mu_{\text{neb}} = 2.34$

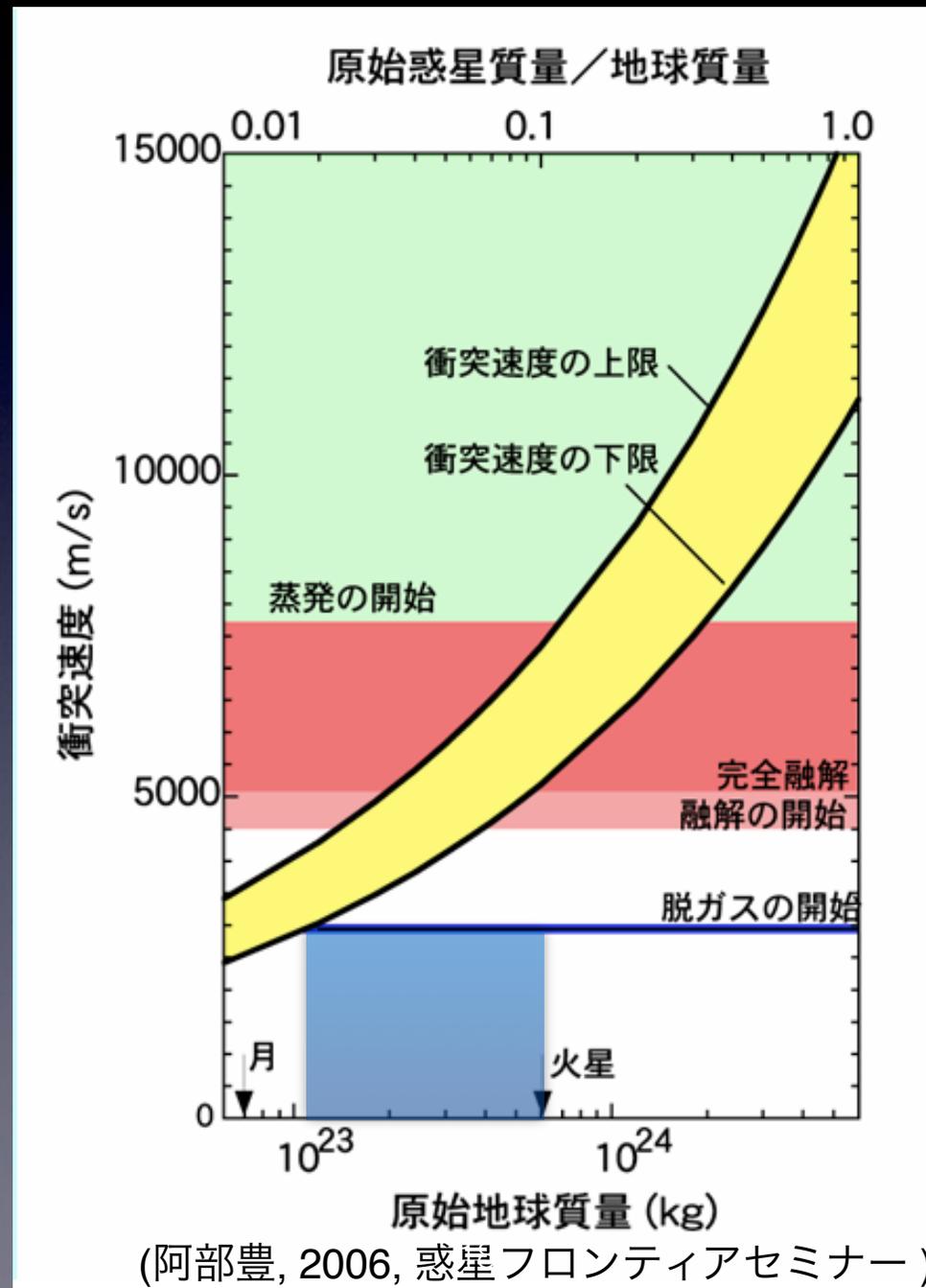
r_{neb} : Distance of Hill Sphere

全層対流圏の場合，融解するか



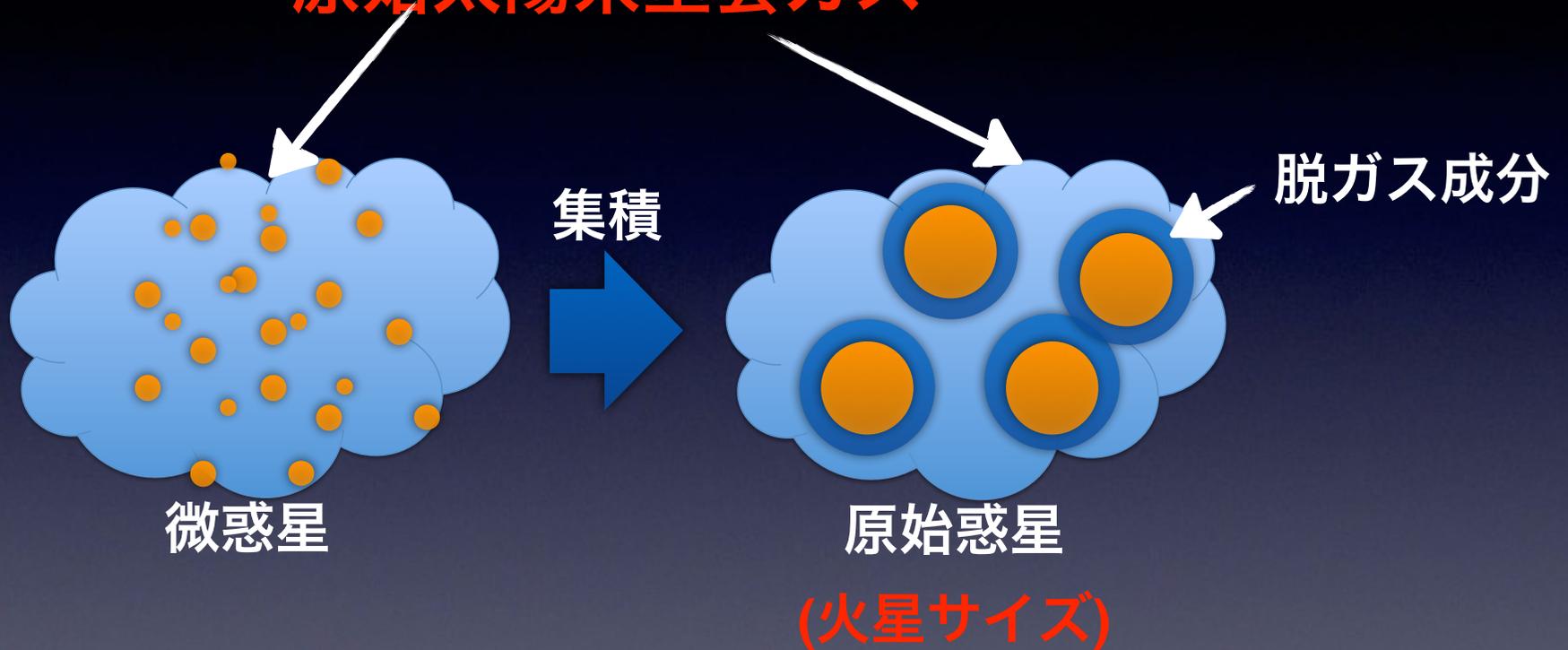
地表面温度が高めに出ると予想できる全層対流圏構造でも，星雲ガスのみで構成される大気の保温効果では溶けることはない

原始火星が脱ガス成分大気をもつ理由



ハイブリッド・シナリオの提案

原始太陽系星雲ガス



原始大気の二元論



原始大気のハイブリッド論

目的

全層対流圏であるとした場合の
原始火星大気の温度構造を調べる。



地表面温度が取りうる最大値を推定

予察的モデルの前提条件

大気

星雲ガス成分

(H_2, He)

+

脱ガス成分

($\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}$)

地表面

大気成分は理想気体

星雲ガス成分と脱ガス成分は互いに交らない

両大気層で温度・圧力は連続, 密度は不連続
(静水圧平衡成立)

惑星中心からの距離と大気温度の関係

全層対流圏の場合

(星雲ガス層)

$$T = T_{\text{neb}} + \frac{GM_{\text{sol}}\mu_{\text{neb}}m_H}{(n+1)k} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{\text{neb}}} \right)$$

(脱ガス層)

$$T = T_{\text{deg}} + \frac{GM_{\text{sol}}\mu_{\text{deg}}m_H}{(n+1)k} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{\text{deg}}} \right)$$

n : polytropic index

T_{neb} : Temperature at the Hill Sphere $T_{\text{neb}} = 255[\text{K}]$

μ_{neb} : Mean Molecular Weight in Nebula Gas Region $\mu_{\text{neb}} = 2.34$

r_{neb} : Distance of Hill Sphere

T_{deg} : Temperature at the boundary between Nebula gas and Degassing Region

μ_{deg} : Mean Molecular Weight in Degassing Region

r_{deg} : Altitude of boundary between Nebula gas and Degassing Region

脱ガス成分大気のもル分率

惑星形成期における、ガス・マグマ・溶融金属鉄間の H, C の平衡分配を推定した数値モデル (Kuramoto and Matsui, 1996) を参考に、脱ガス成分大気のもル分率を与える

(Standard Model)

原始火星の脱ガス層の
大気成分のもル分率



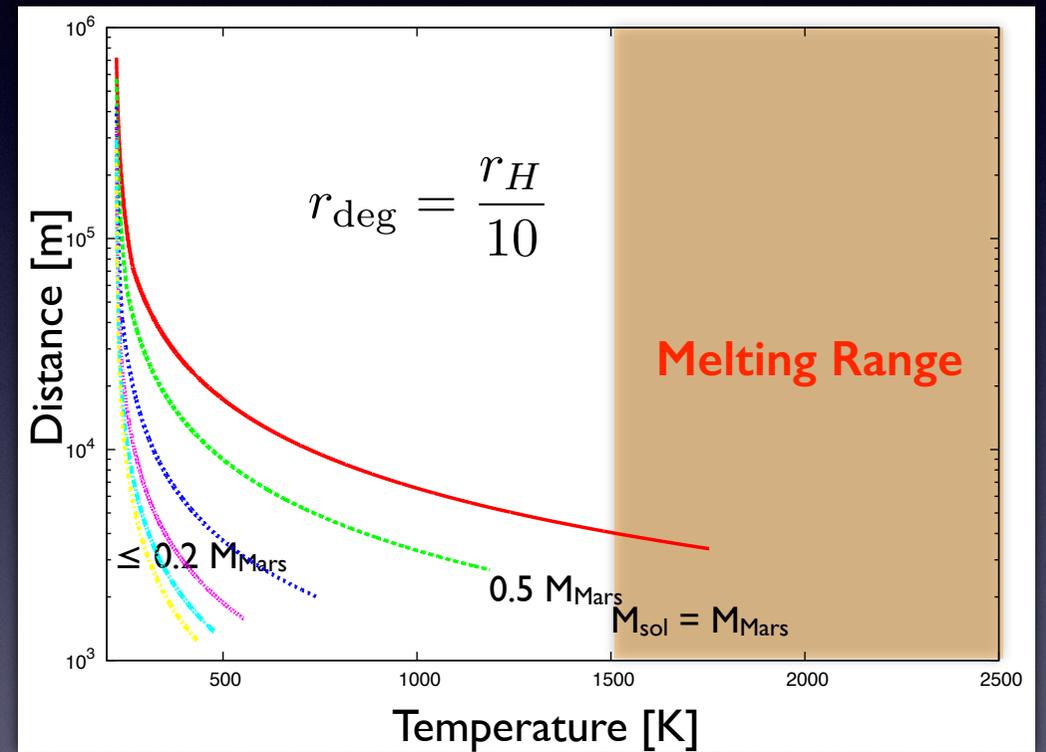
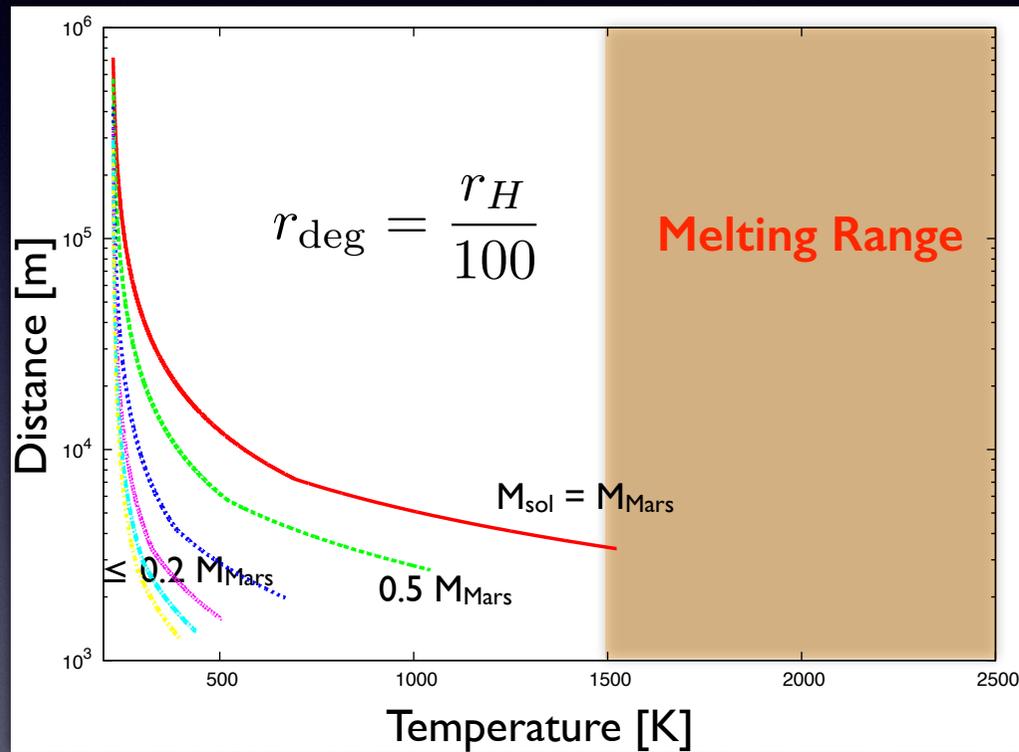
(Abundant-Water Vapor Model)

水が多い場合の大気成
分のもル分率

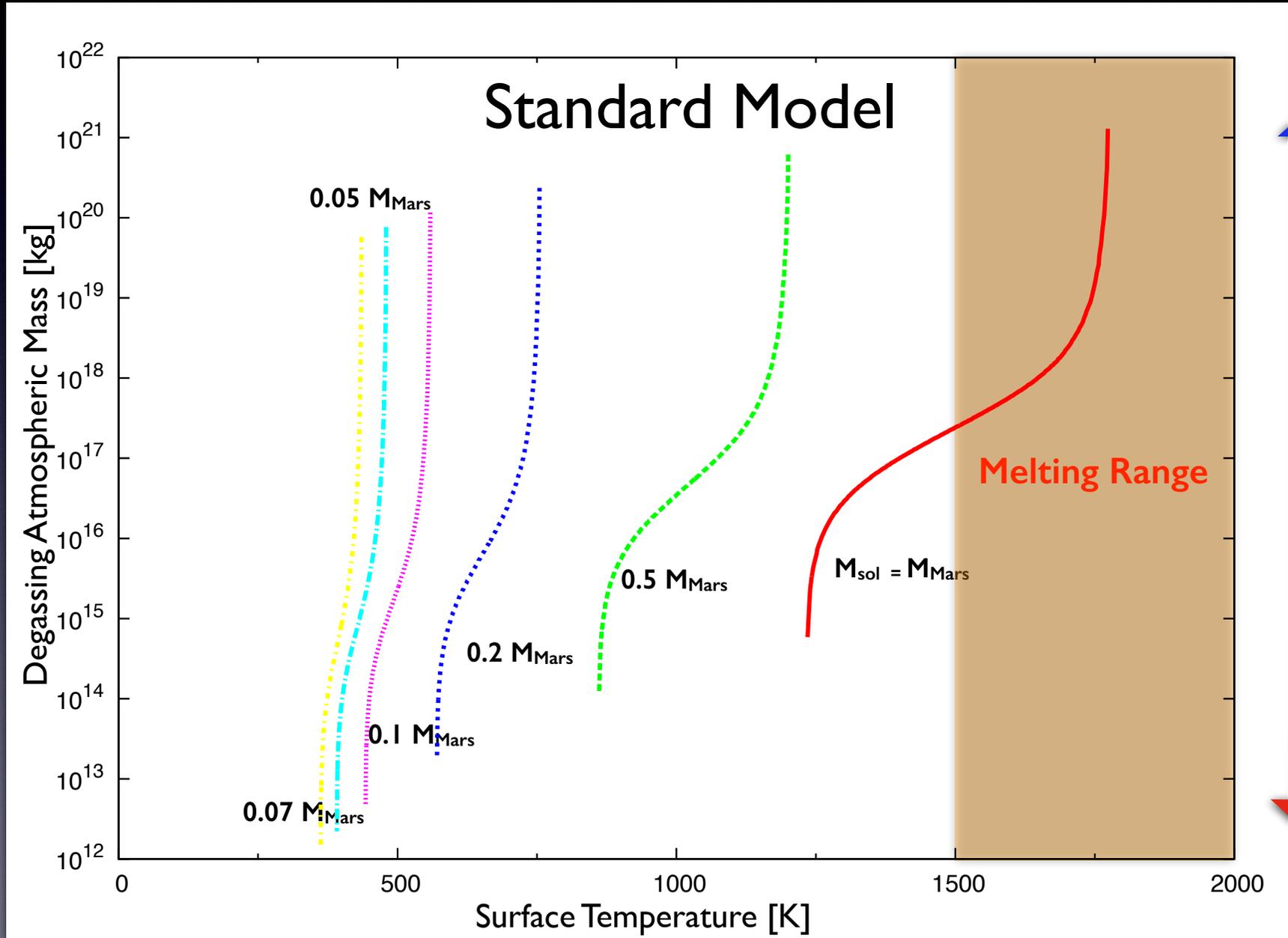


惑星中心からの距離と大気温度の関係

Standard Model $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2 = 1 : 5$

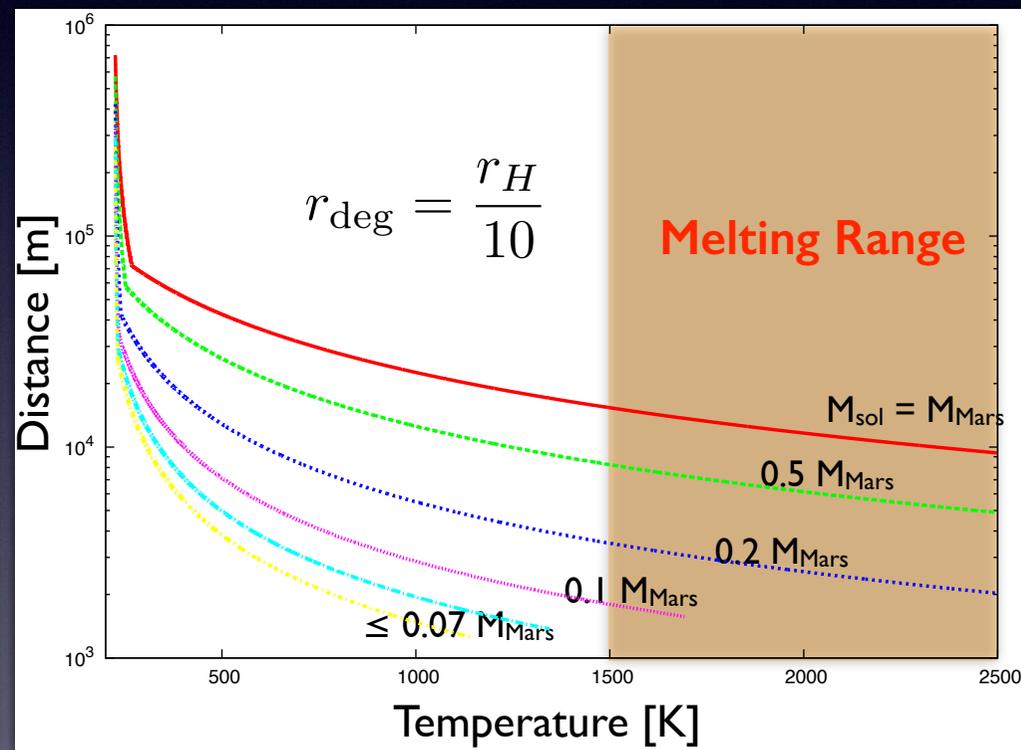
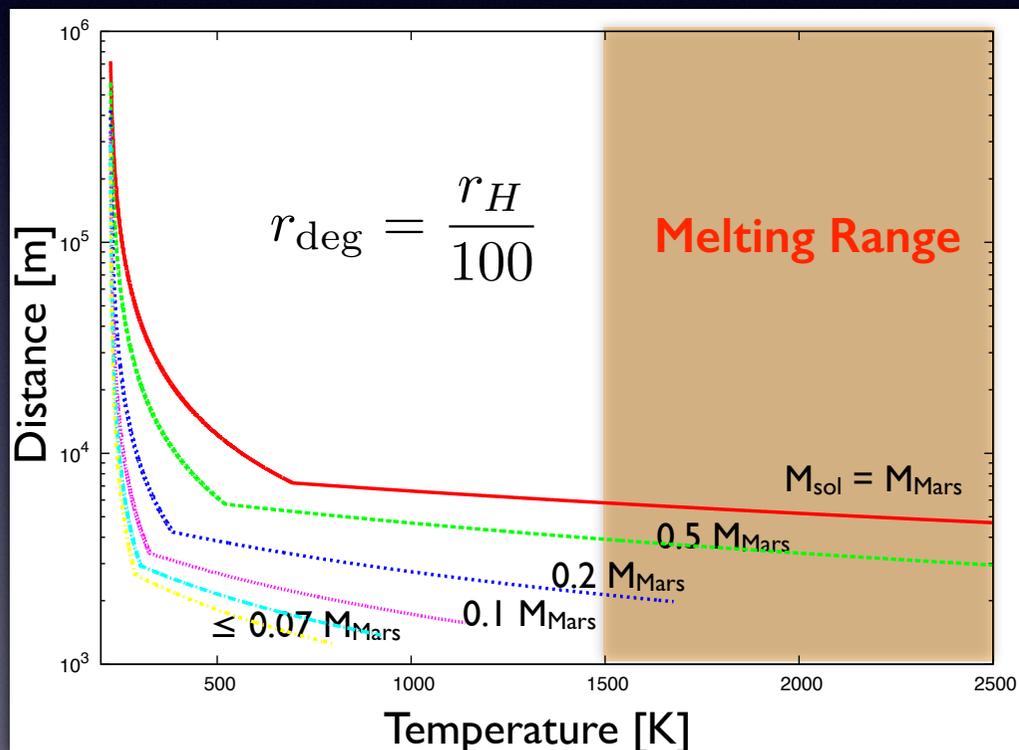


脱ガス成分大気質量と地表面温度の関係

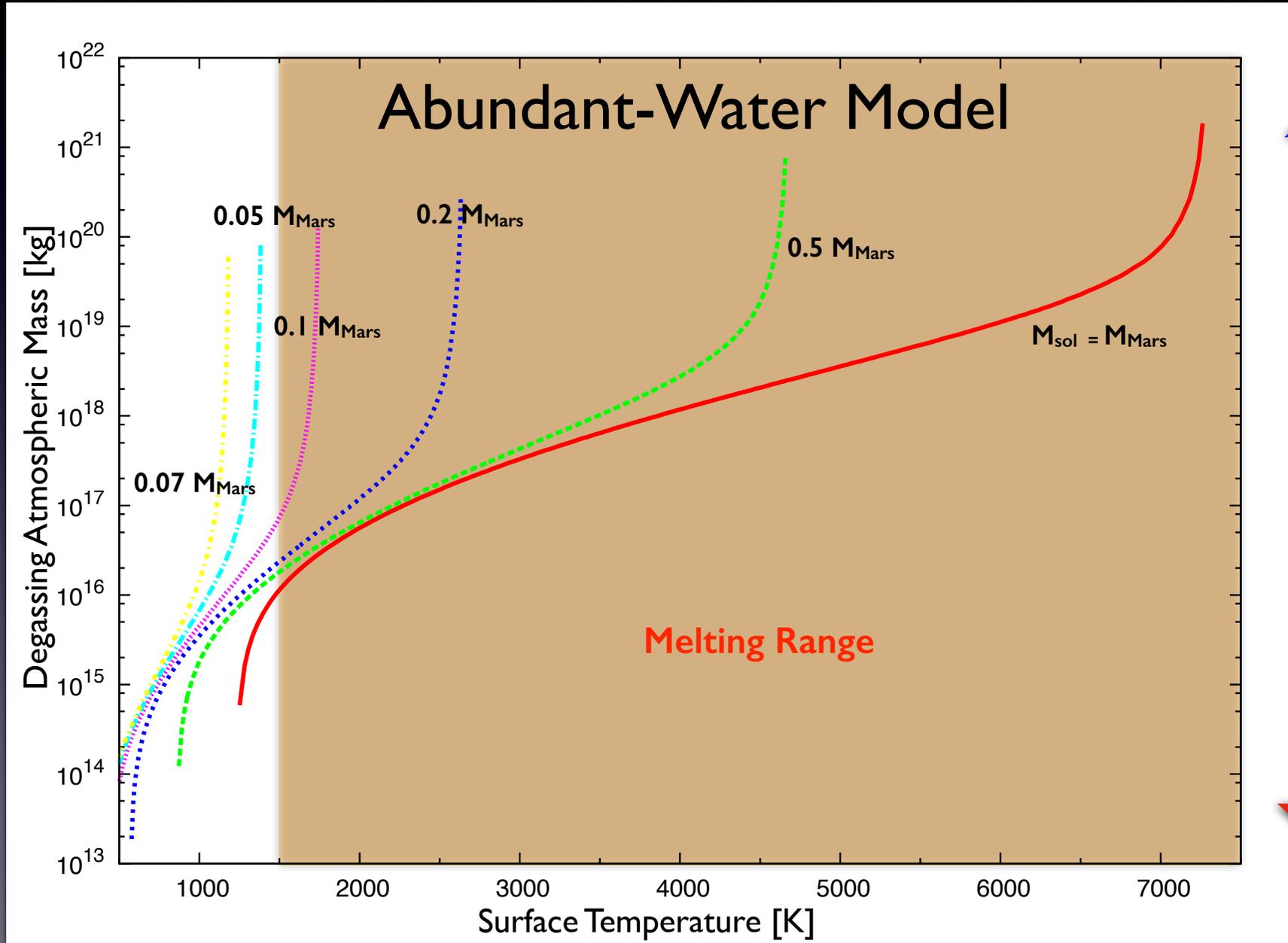


惑星中心からの距離と大気温度の関係

Abundant-Water Vapor Model $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2 = 9 : 1$

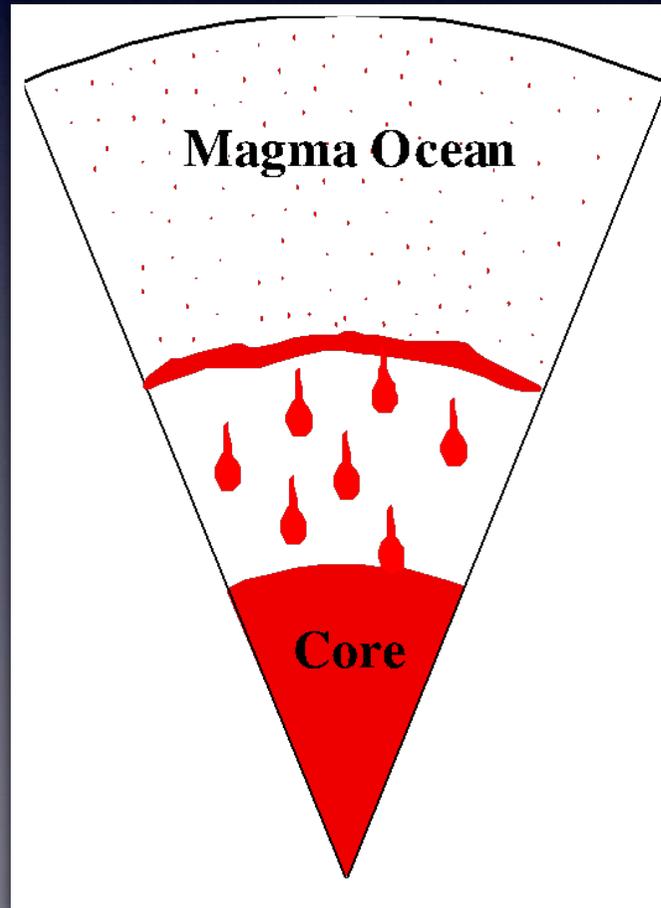


脱ガス成分大気質量と地表面温度の関係



今後の課題

揮発性成分 (脱ガス成分) がどの程度大気中存在したら、
表面が融解するかを明らかにしたい



今後の課題

揮発性成分 (脱ガス成分) がどの程度内部に
分配されるかを明らかにしたい

