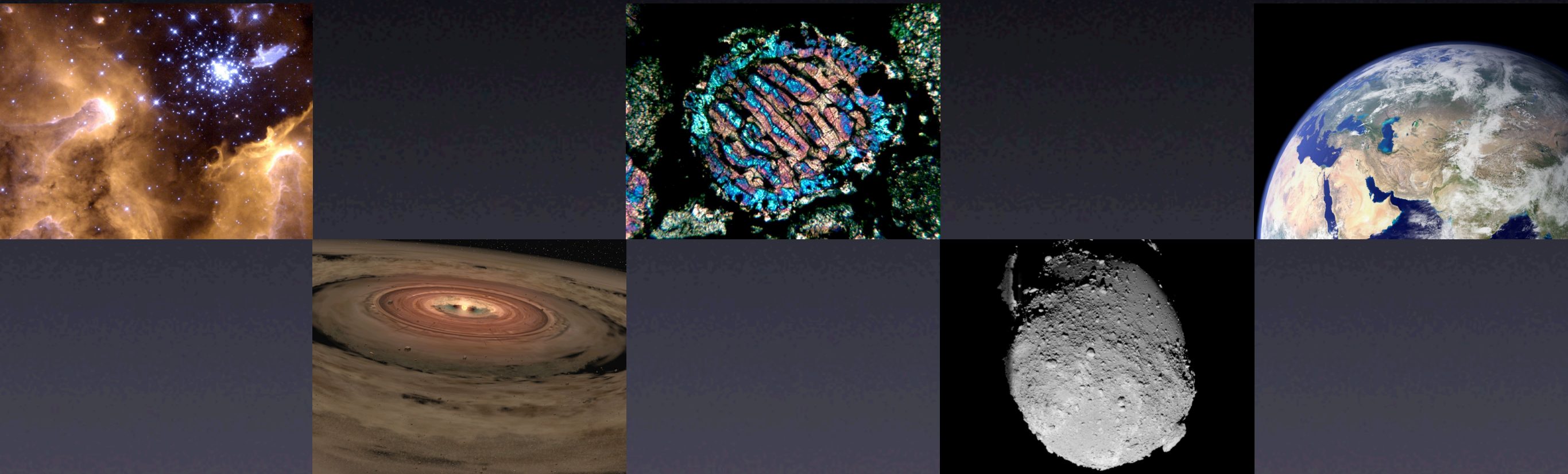


原始惑星系円盤における水の挙動

Ciesla, F. J. & Cuzzi, J. N. 2006. Icarus 181, 178 のレビュー



福井 隆

DM2 Seminar, Jun. 22, 2006

目次

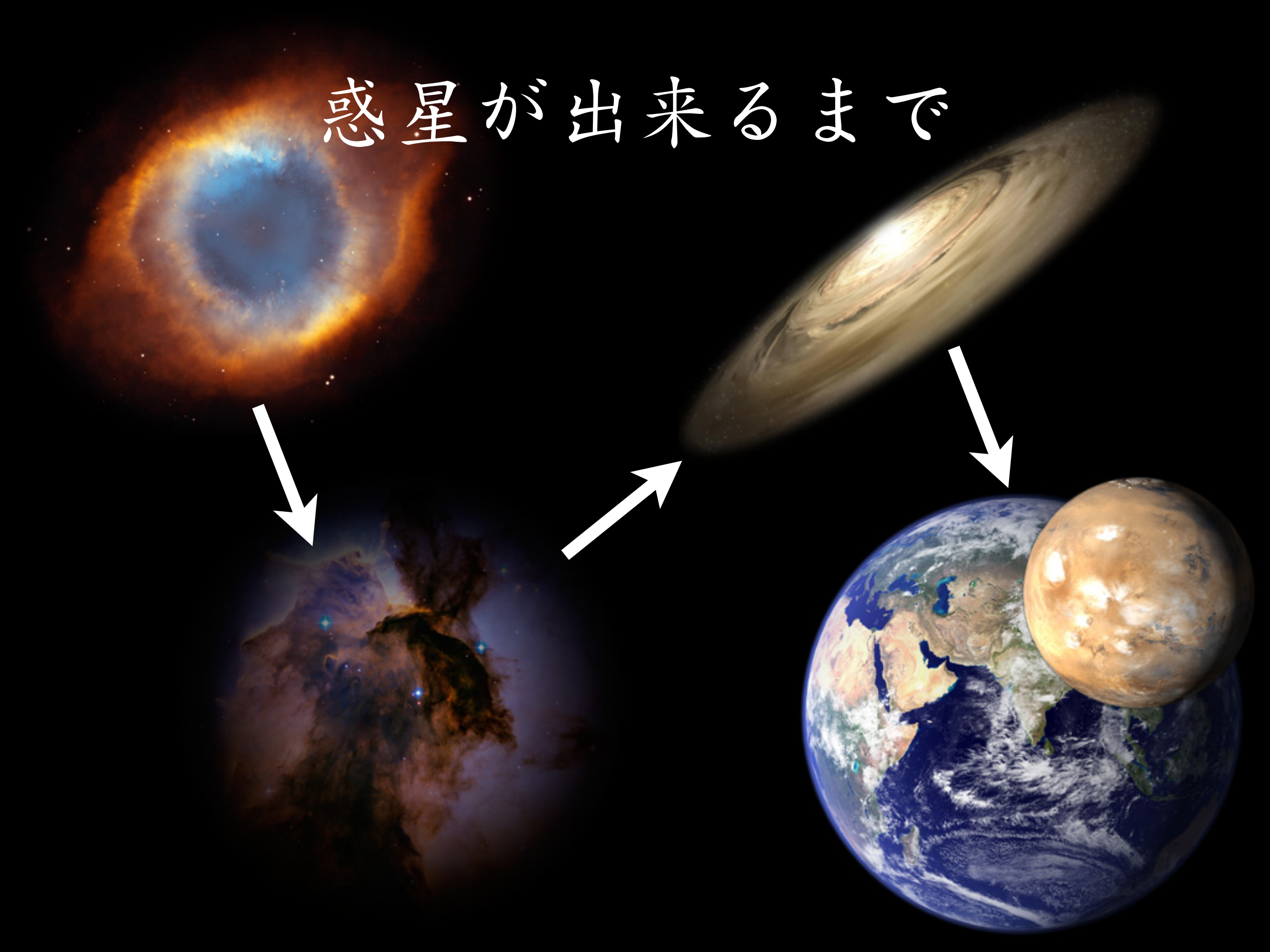
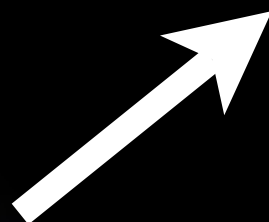
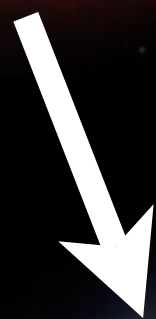
- 📌 Introduction 1 ... 大きな研究背景
- 📌 Introduction 2 ... 現在の研究・本日の話題
 - 📌 円盤の力学的・組成的進化プロセス
 - 📌 Ciesla & Cuzzi (2006) のレビュー



1. 大きな研究背景

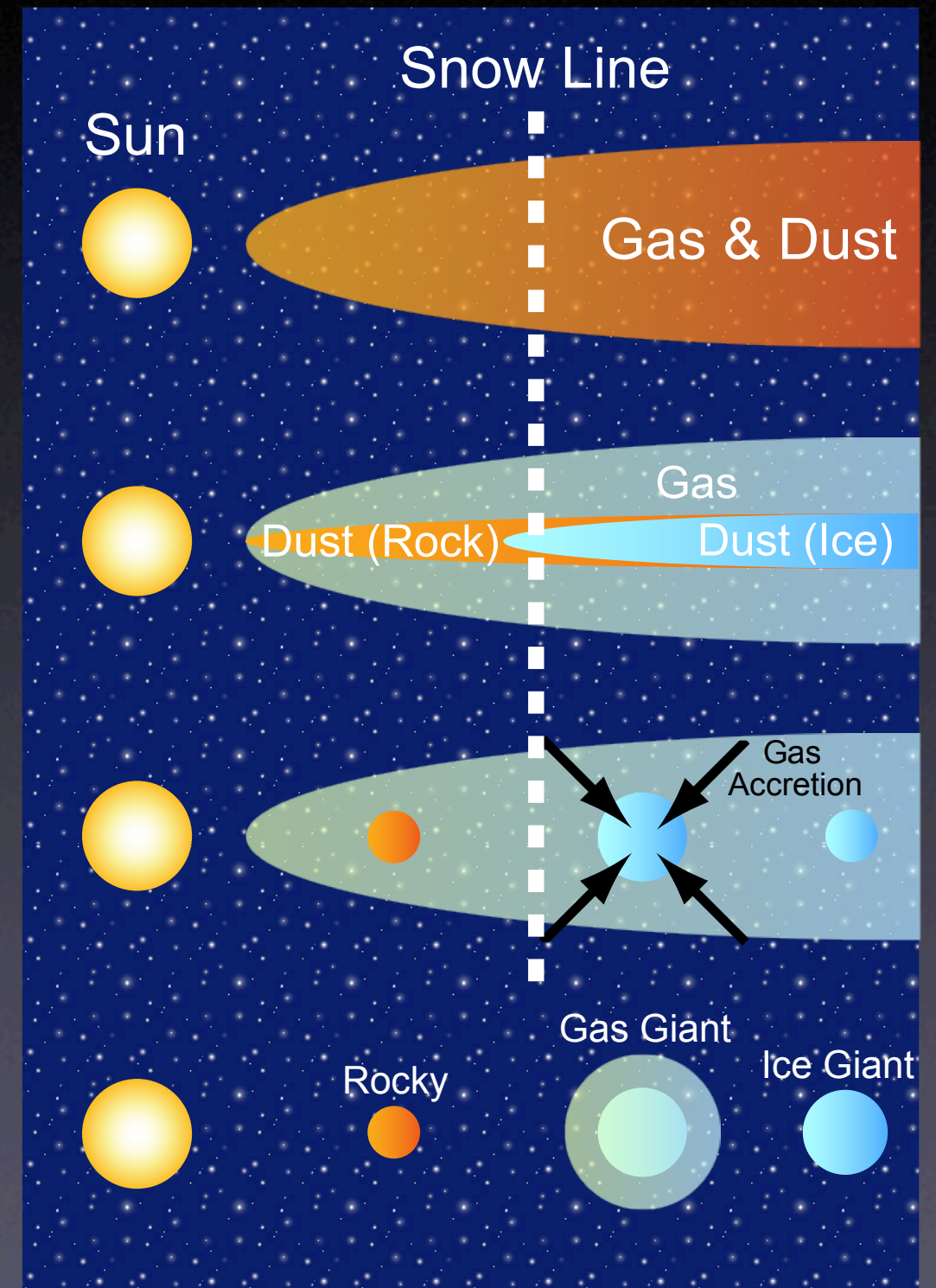
image from “http://artchive.com/ftp_site.htm”

惑星が出来るまで



惑星系形成の標準モデル

- Hayashi et al. (1985) 他が1980年代に構築.
- 各種惑星の形成, その配置などが説明可能.
- 問題もあるけれど...
 - “復元モデル” な問題
 - ダスト落下問題
 - 微惑星形成問題
 - “異形の惑星” 問題
- 原始惑星系の組成進化にはあまり言及していない.



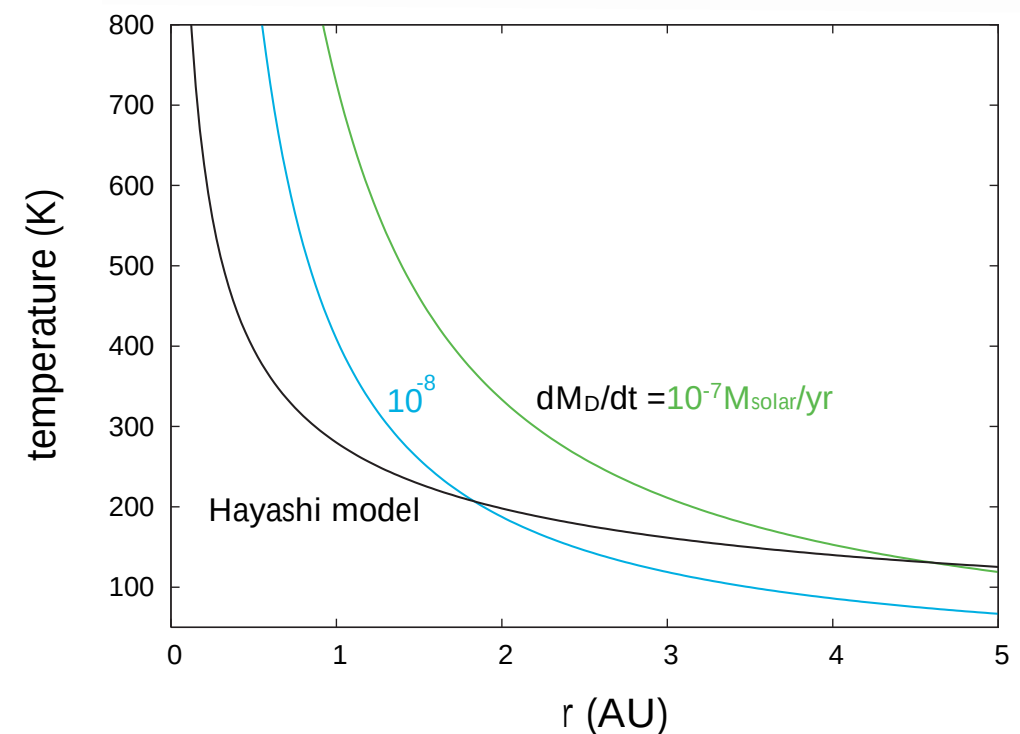
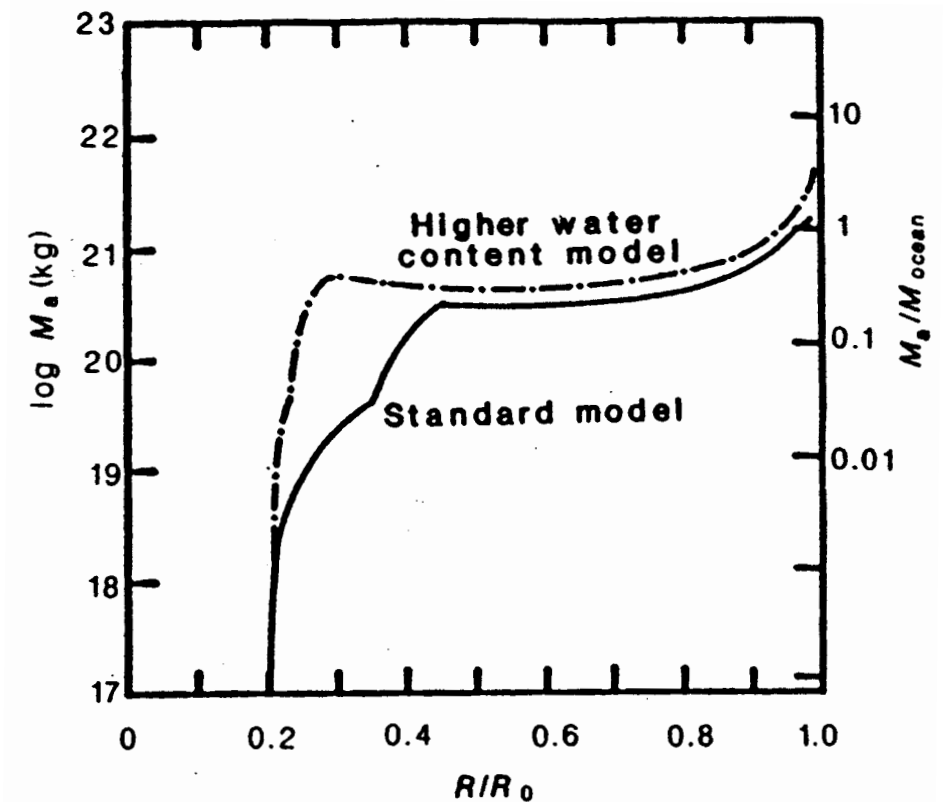
なぜ組成進化か — habitability への影響

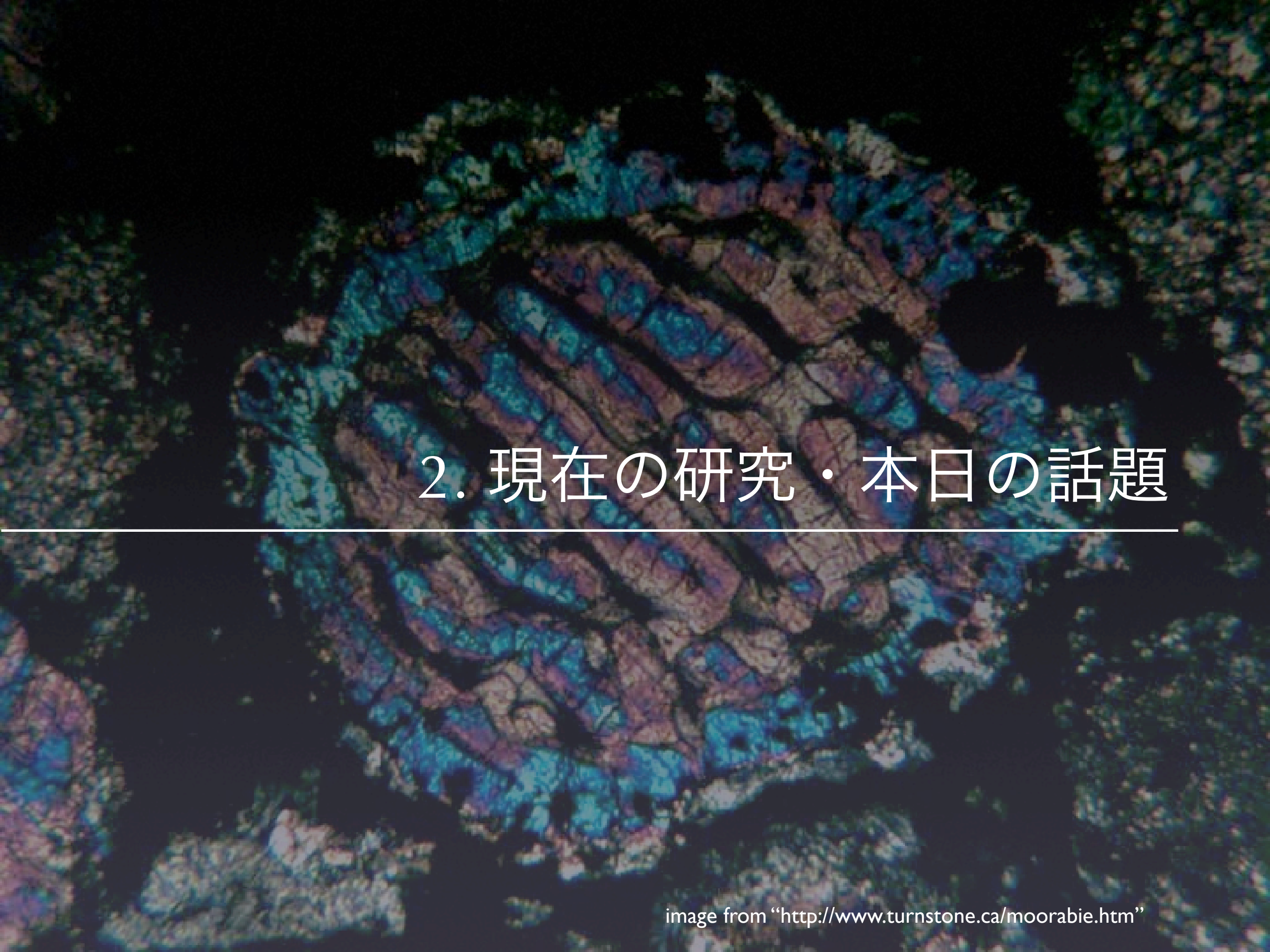
地球の海の起源

- Matsui & Abe (1986) ...
含水率 0.1~1 % の微惑星を
仮定, 現在の海水量を説明.
- 初期の円盤温度 > 1000 K,
岩水鉱物は存在不可.

地球の有機物の起源

- C コンドライト or 彗星?
- 非親生元素の組成も重要
- e.g., 広瀬君 DM2 ゼミ
- 鉱物組成にも C, O が影響.



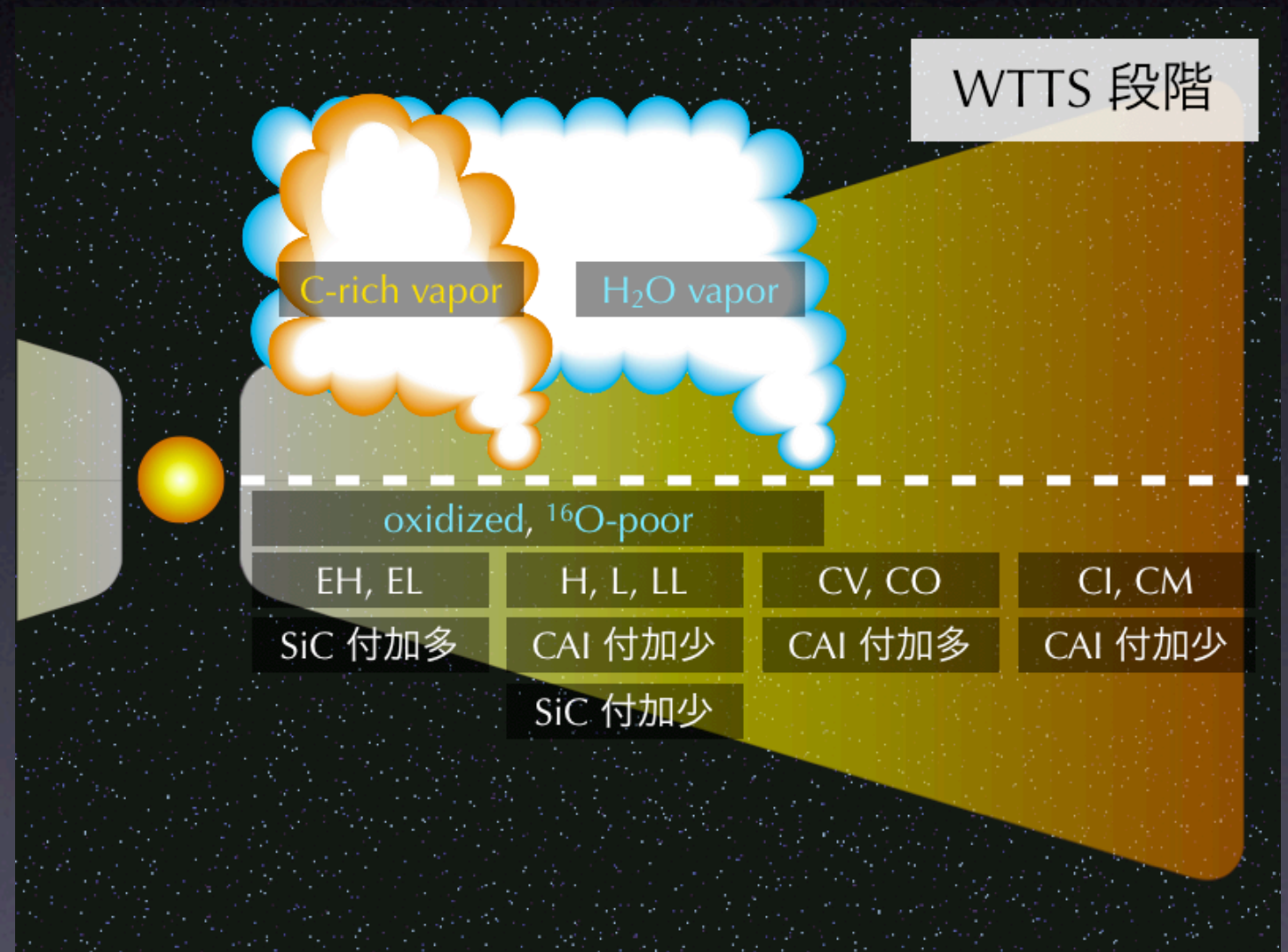


2. 現在の研究・本日の話題

image from “<http://www.turnstone.ca/moorabie.htm>”

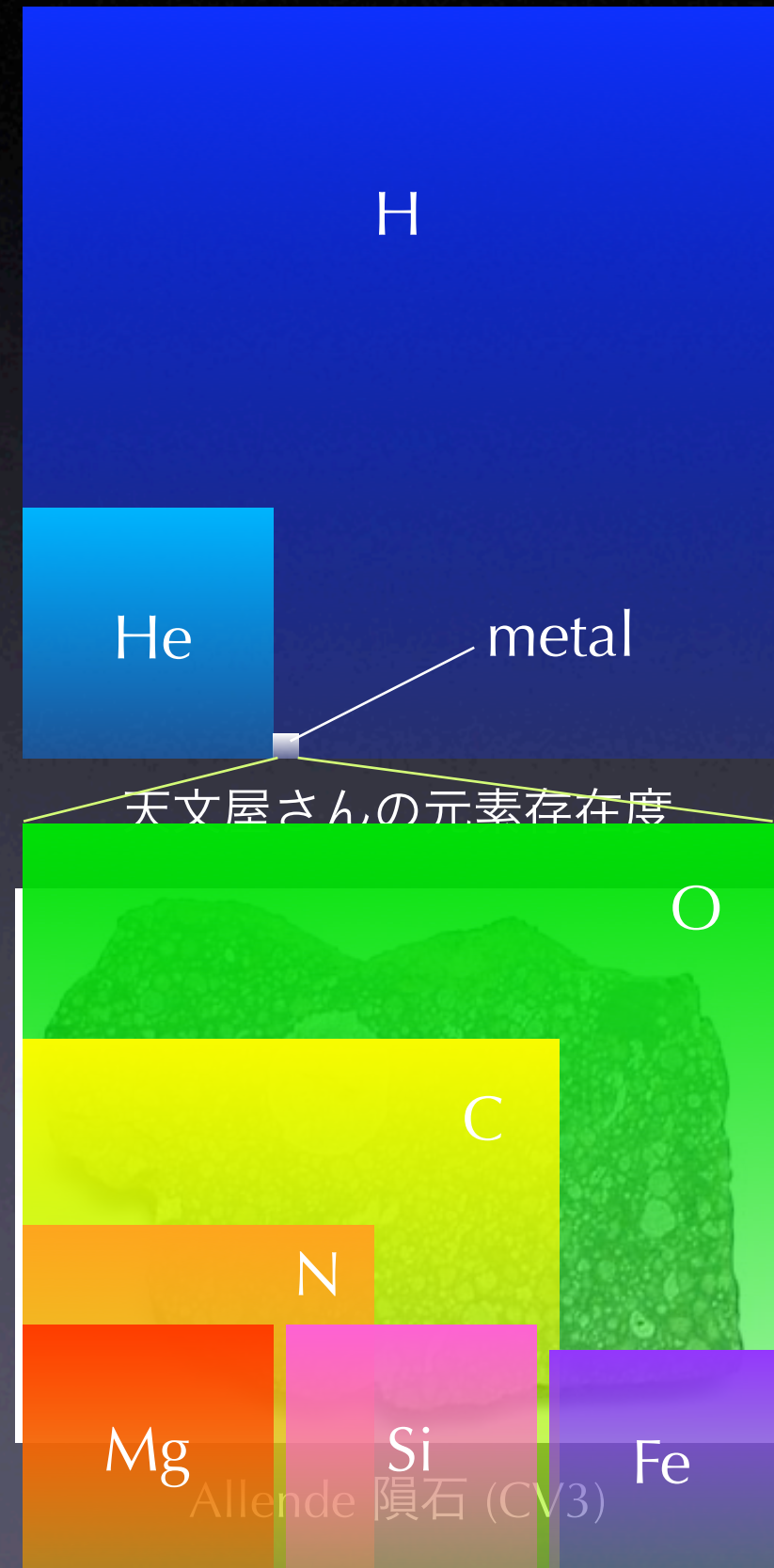
現在行っている研究

- 📌 時代と場所：
降着期の原始惑星系円盤
 - 📌 惑星形成の初期状態を決定.
- 📌 力学的進化に伴う組成
進化過程の解明.
 - 📌 ガスーダスト間の動径分別
 - 📌 ダストの蒸発
 - 📌 蒸気の移流拡散による輸送
- 📌 元素 C, O に注目.
 - 📌 C ... 有機物, CO
 - 📌 O ... H₂O, 珪酸塩, CO



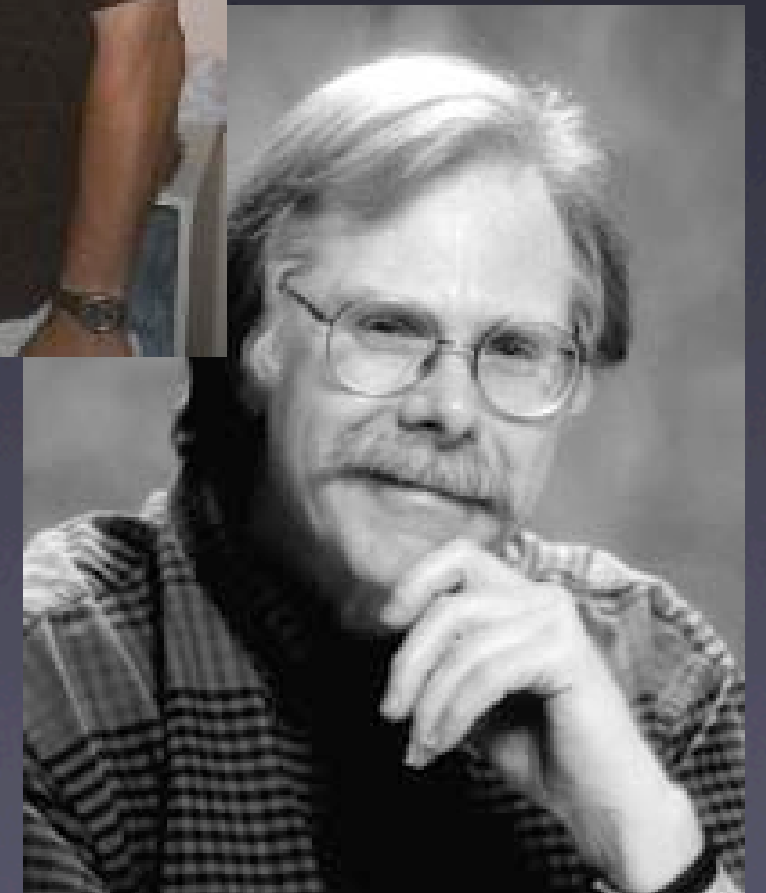
現在行っている研究

- 📌 なぜ C, O か？
 - 📌 豊富な元素 (C は全元素中 4 番目. O は全元素中 3 番目, 固体中では最多.)
 - 📌 円盤環境下において, 固・気・(液) 各相に存在 (特に O).
 - 📌 形成される鉱物組成が酸素分圧に強く依存.
- 📌 制約条件：コンドライト物質
 - 📌 惑星形成以前の情報を保持.
 - 📌 多様な酸化還元状態, 酸素同位体組成を持つ円盤環境を示唆.



本日の話題

- Ciesla & Cuzzi (2006)
 - H_2O の挙動にフォーカス
 - 外惑星領域 ...
固相の主要な構成成分
 - 内惑星領域 ...
円盤の化学に影響
 - 得られた結果
 - H_2O の分配による τ の変動が
力学的進化にフィードバック.
 - snow line 背面に固体が濃集,
Gas Giant 形成に寄与.
 - 内惑星領域の酸素分圧,
酸素同位体組成の変動を示唆.



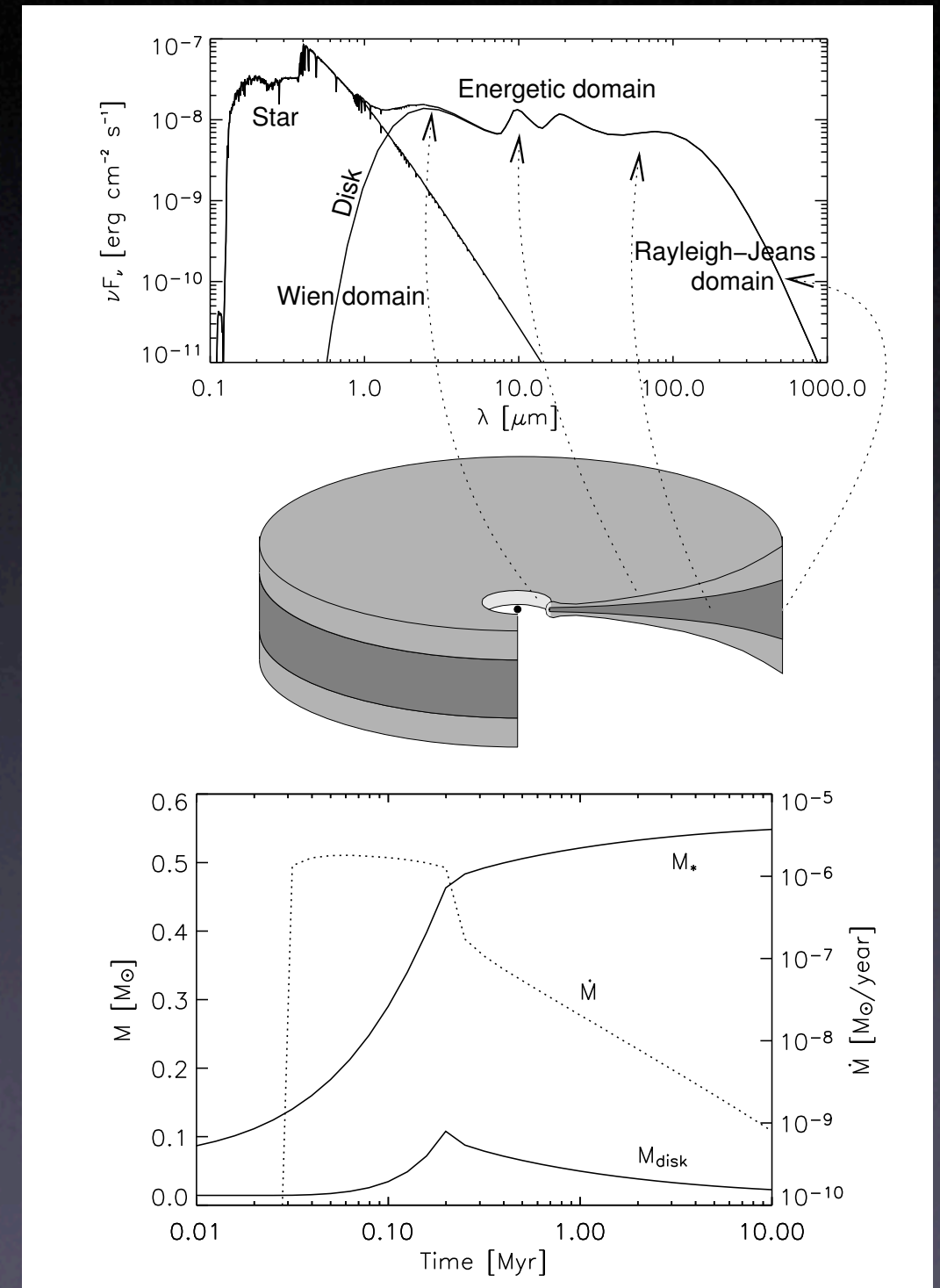


3. 円盤の力学的・ 組成的進化プロセス

image from “<http://www.spitzer.caltech.edu/spitzer/>”

原始惑星系円盤の観測

- CTTS 段階における質量降着
 - スペクトルの赤外線超過 ...
円盤の重力エネルギー解放
 - 物質・角運動量輸送の存在
 - $10^{-8} M_{\text{solar}}/\text{yr}$ @ 10^6 old TTS
- ダストの成長・沈殿
 - 遠赤外域でフラックス小
 - edge-on disk が少ない
 - 表層 ... sub-micron ダスト
 - 中心面 ... mm ダスト



Dullemond et al. (2006)

降着円盤の力学

- 📌 粘性による物質・運動量輸送

- 📌 粘性による剪断応力

$$\tau_{r\phi} = \rho \nu r \frac{d\Omega_K}{dr}$$

- 📌 物質は内側, 角運動量は外側へ

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} - \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_g \nu r^{1/2}) \right] = 0$$

- 📌 乱流粘性と α モデル

- 📌 乱流の成因はまだ不明.

- 📌 分子粘性から類推:

$$\nu_{\text{mol}} \propto v_{\text{th}} l$$

$$\nu \equiv \alpha c_s H$$

時間切れ...

円盤の温度

📌 表面温度 (有効温度)

- 📌 降着によるエネルギー解放との釣り合い:

$$T_{\text{eff}}^4 = \frac{1}{8\pi\sigma_{\text{SB}}} \frac{GM_{\odot}}{r^3} \dot{M}_{\text{disk}}$$

📌 中心面温度

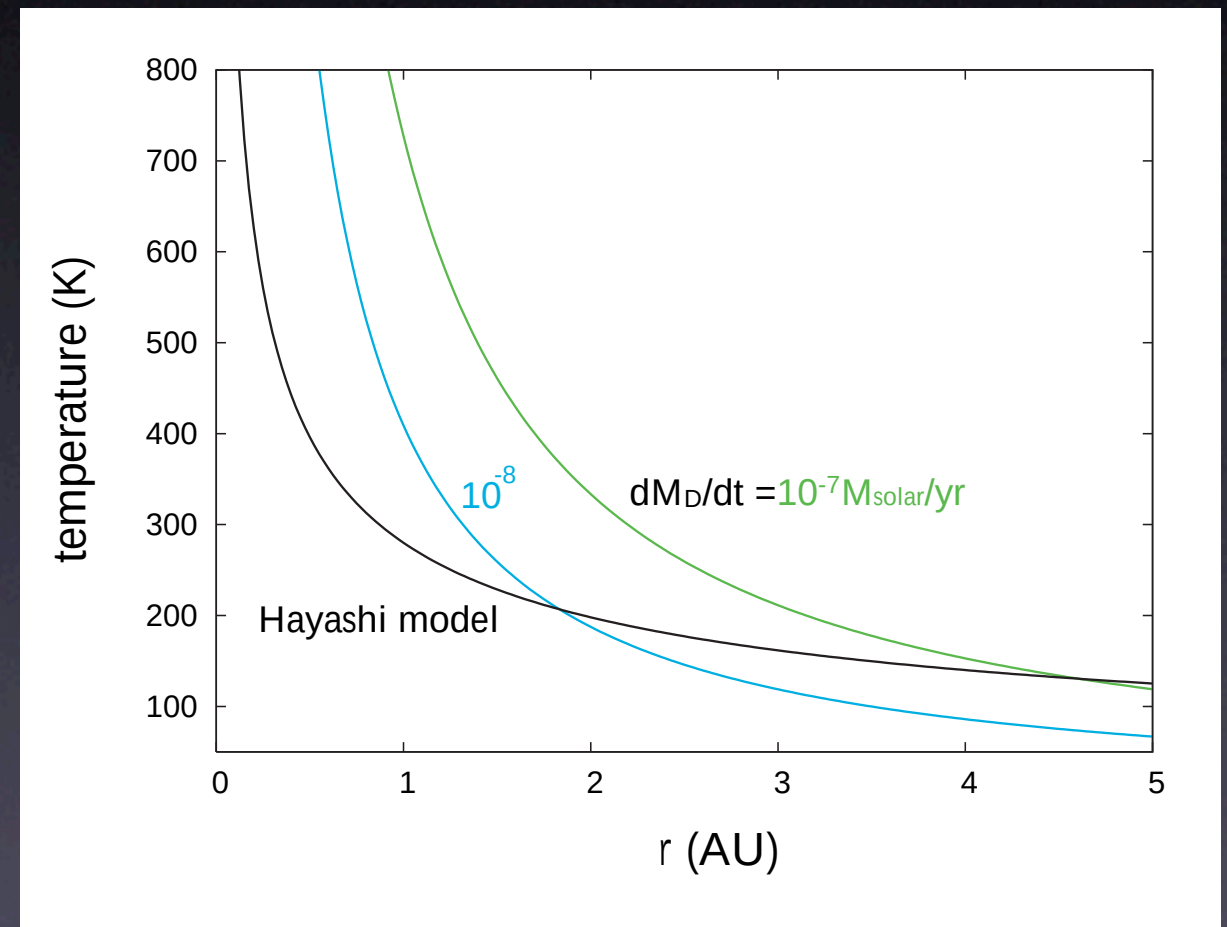
- 📌 τ , ひいては κ に依存.

$$T_{\text{m}}^4 = \frac{3}{4} \tau T_{\text{eff}}^4 \quad \tau = \frac{\kappa \Sigma}{2}$$

- 📌 κ の担い手: 微小ダスト (μm)

📌 円盤の力学に与える影響

$$\nu \propto c_s H \propto c_s^2 \propto T_{\text{m}}$$



ガスーダスト動径分別過程

📌 分別の原因

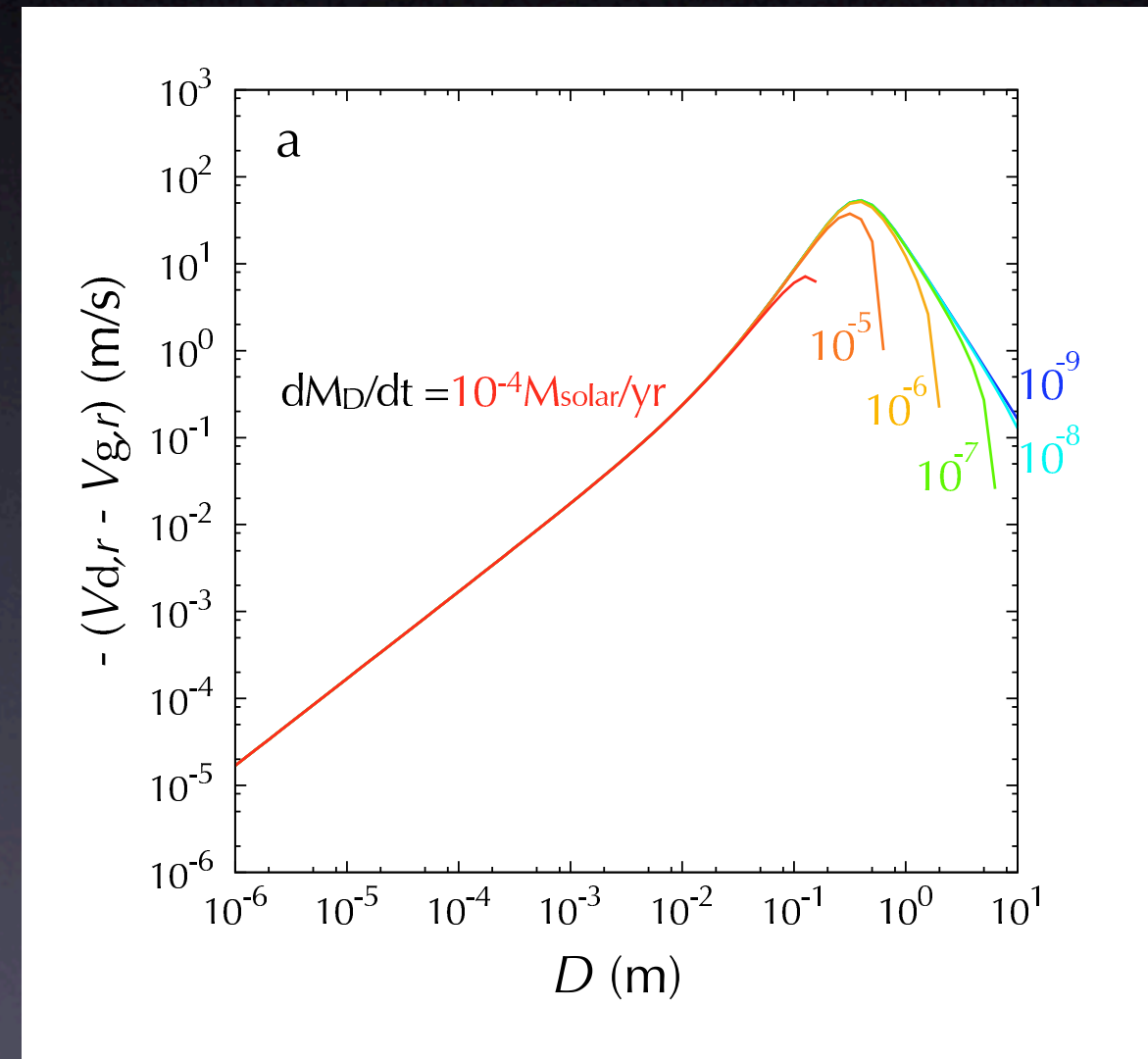
- 📌 ガスは Kepler motion よりも ゆっくり回転

$$\frac{v_{g,\phi}^2}{r} = \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{GM_\odot}{r^2} \quad \frac{v_{d,\phi}^2}{r} = \frac{GM_\odot}{r^2}$$

- 📌 ダストは ϕ 方向に “向かい風” を受けることにより動径落下.

📌 ダストサイズ依存性

- 📌 cm 以下 ... ガスと一緒に運動.
- 📌 m ... 最も速く動径落下.
- 📌 km 以上 ... ガスと独立に運動.



ダストの蒸発による組成変化

📌 H₂O の場合 :

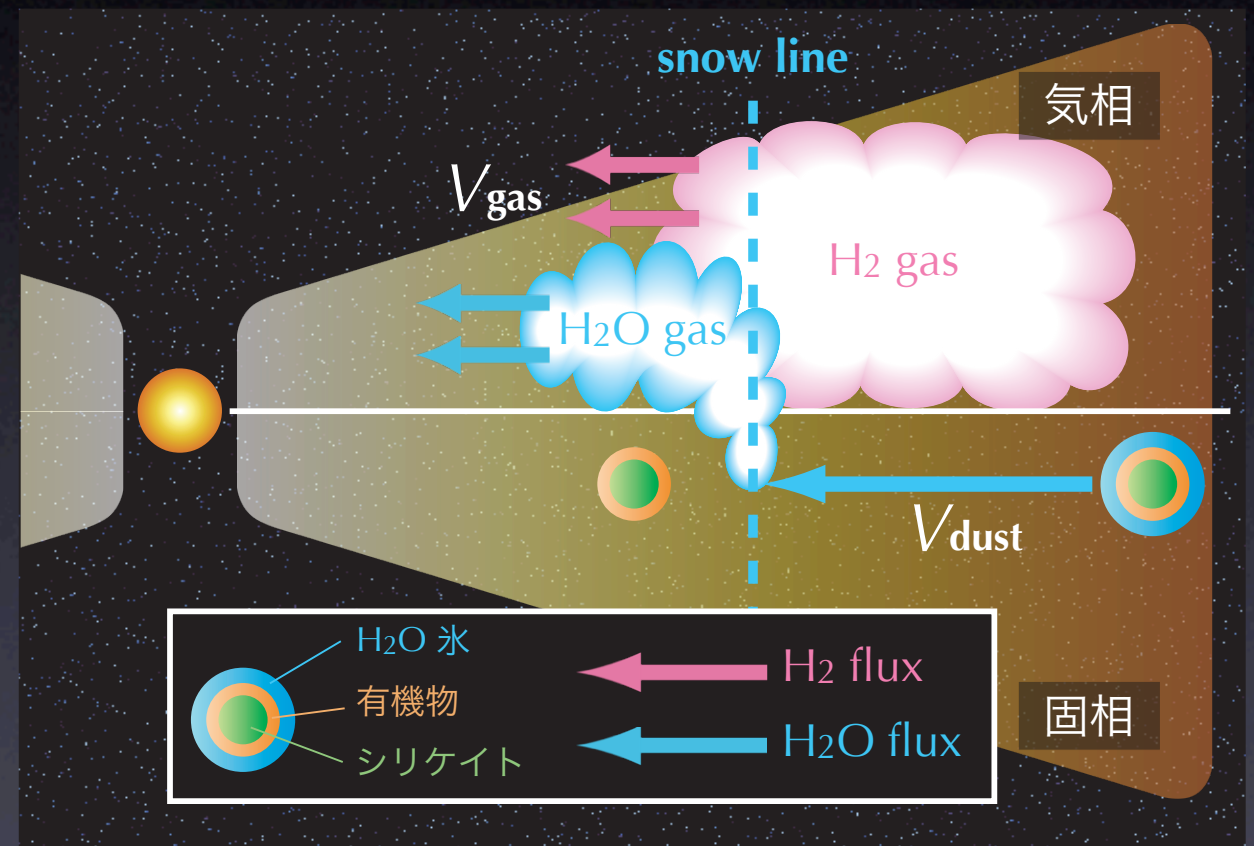
📌 snow line での flux 保存

$$v_{g,r} \Sigma_{\text{H}_2\text{O}}(r_e - \epsilon) = v_{d,r} \Sigma_{\text{H}_2\text{O}}(r_e + \epsilon)$$

📌 輸送速度の減少により, snow line 内側で水蒸気濃度が増加.

📌 円盤全域の組成進化

📌 濃度勾配による拡散, 円盤ガスの移流により他領域へ輸送.



$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + v_{g,r} \frac{\partial C_i}{\partial r} - \frac{1}{r \Sigma_g} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \Sigma_g \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) = S_i$$

4. Ciesla & Cuzzi (2006) のレビュー

固体の種族分け

分類の指標：Stokes 数

$$St = \frac{t_{\text{stop}}}{\Omega_K} \quad t_{\text{stop}} = \frac{m\Delta v}{A\rho_g m\Delta v}$$

Epstein 則 ($a < l$) Stokes 則 ($a > l$)

$$A = \frac{c_s}{\rho a}$$

$$A = \frac{3lc_s}{2\rho a^2}$$

📌 Dust ($D \sim 1\text{cm}$, $St < 1$)

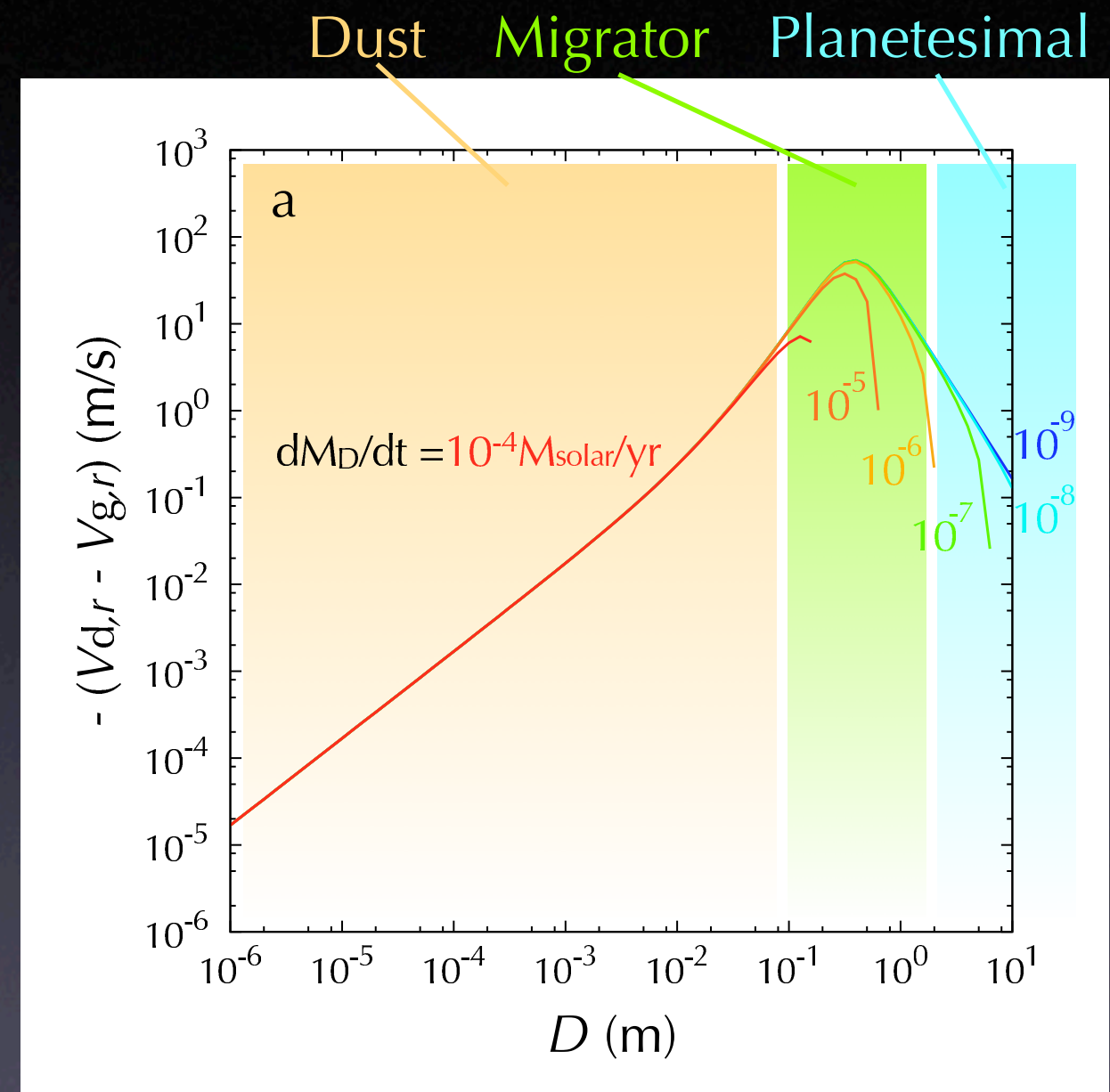
📌 ガスと一緒に移動,
円盤の光学的厚さに寄与.

📌 Migrator ($D \sim 1\text{m}$, $St = 1$)

📌 動径速度大, 濃集過程の担い手.

📌 Planetesimal ($D \sim 1\text{ km}$, $St > 1$)

📌 一度形成されると不動.



各物質の面密度進化

📌 水蒸気

$$\frac{\partial \Sigma_{\text{vap}}}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_{\text{vap}} \nu r^{1/2}) \right] + S_{\text{vap}}(r, t)$$

📌 Dust

$$\frac{\partial \Sigma_d}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_d \nu r^{1/2}) \right] + S_d(r, t) \quad \dots \text{ガスと couple して拡散}$$

📌 Migrator

$$\frac{\partial \Sigma_m}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma_m \nu_m r^{1/2}) \right] + S_m(r, t) \quad \dots \text{弱い拡散} \quad \nu_m = \frac{\nu}{1 + St}$$

$$\frac{\partial \Sigma_m}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_{\text{drag}} \Sigma_m) \quad \dots \text{ガス抵抗による落下}$$

📌 Planetesimal

$$\frac{\partial \Sigma_p}{\partial t} = S_p(r, t) \quad \dots \text{一度形成されると不動.}$$

Sources & Sinks

凝縮過程 : 水蒸気 → Dust

$$\Delta \Sigma_d^{\text{condense}} = (P_{\text{vap}} - P_{\text{eq}}) 2H \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{kT}$$

蒸発過程 : Dust, Migrator → 水蒸気

$$\Delta \Sigma_m^{\text{vaporize}} = \Sigma_m \frac{dm_m}{dt} \frac{\Delta t}{m_m}$$

$$\frac{dm_m}{dt} = -4\pi a^2 m_{\text{H}_2\text{O}} Z(T)$$

Dust 同士の衝突による Migrator 生成 :

Dust → Migrator

$$\Delta \Sigma_m^{\text{coag}} = \Sigma_d (1 - e^{-\Delta t/t_{\text{coag}}})$$

Dust を食べて Migrator 成長 :

Dust → Migrator

$$\Delta \Sigma_m^{\text{acc}} = \frac{\pi a_m^2 v_r \Sigma_d \Sigma_m}{H m_m} \Delta t$$

Migrator 同士の衝突による破壊 :

Migrator → Dust

$$\Delta \Sigma_m^{\text{disrupt}} = -\frac{f \pi a_m^2 \Sigma_m^2 v_t}{2H m_m} \Delta t$$

Migrator 同士の衝突による Planetesimal 生成 :

Migrator → Planetesimal

$$\Delta \Sigma_p^{\text{accretion}} = \Sigma_m (1 - e^{-\Delta t/t_{\text{acc}}})$$

Dust, Migrator を食べて Planetesimal 成長 :

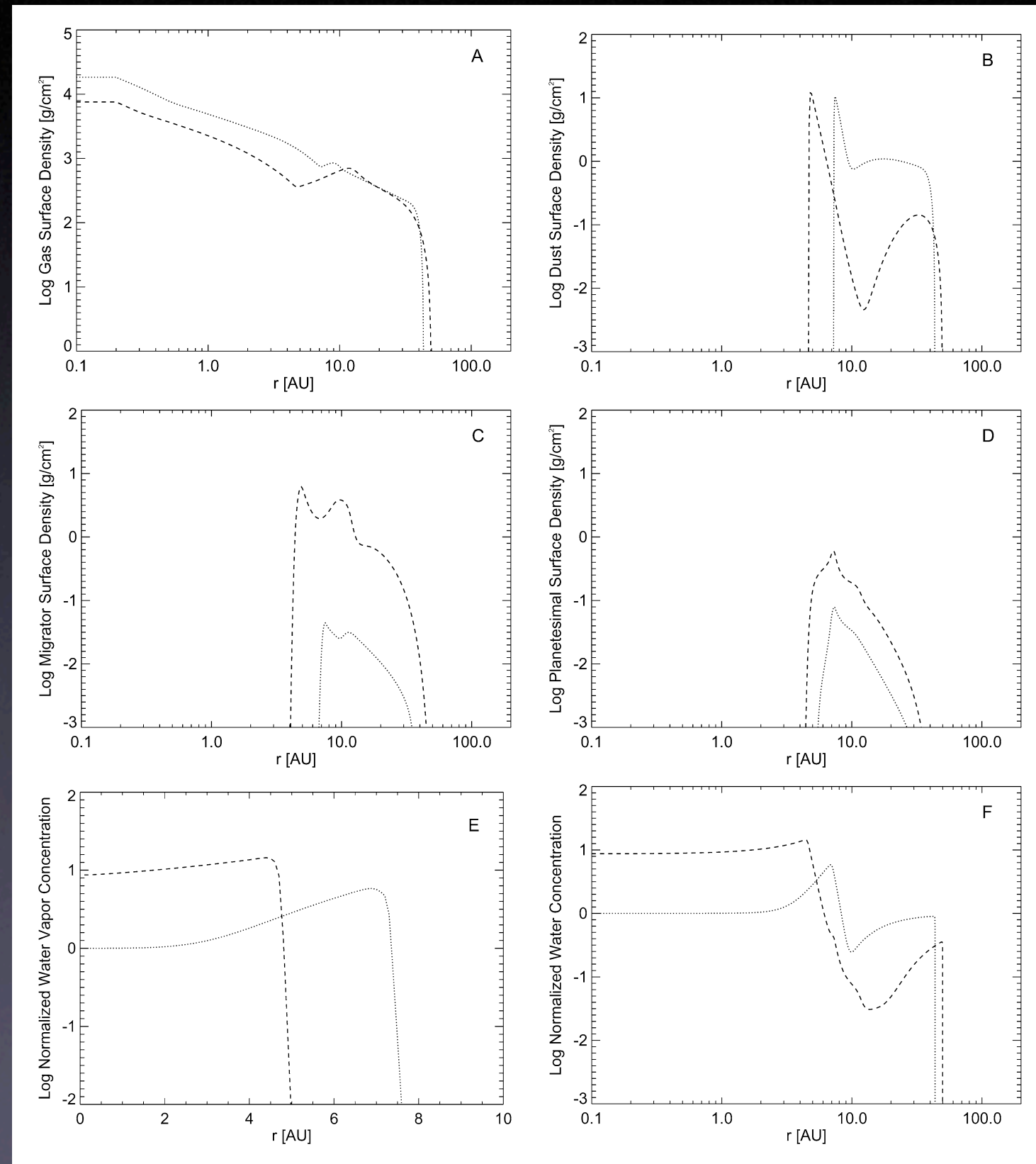
Dust, Migrator → Planetesimal

$$\Delta \Sigma_d^p = -\frac{\pi a_p^2 \Delta v_{p,d} \Sigma_d \Sigma_p}{H_d m_p} \Delta t$$

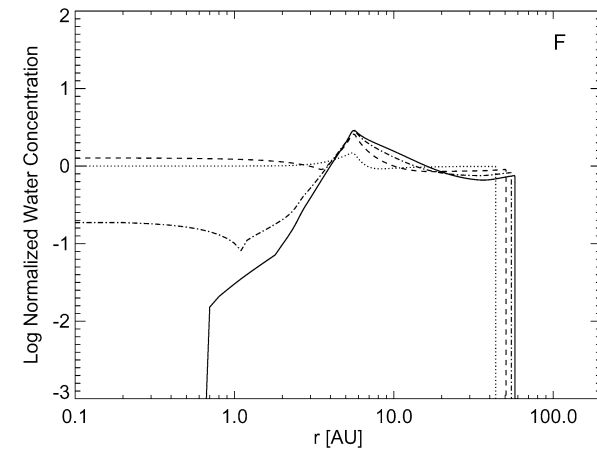
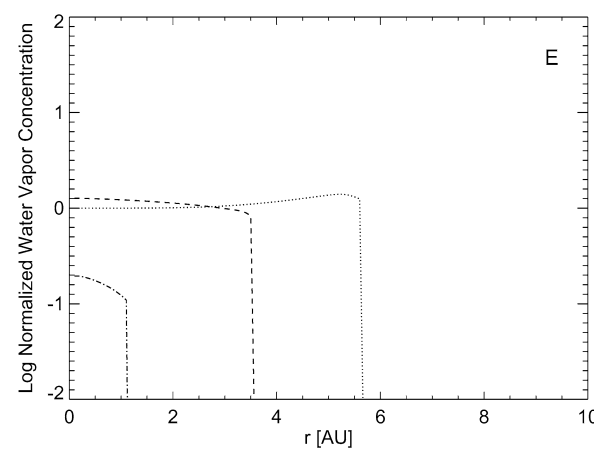
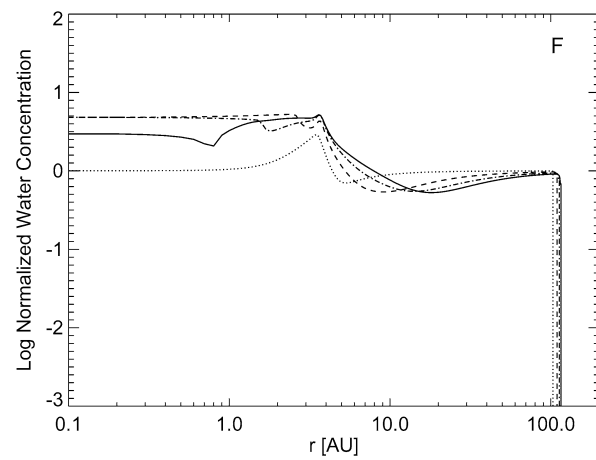
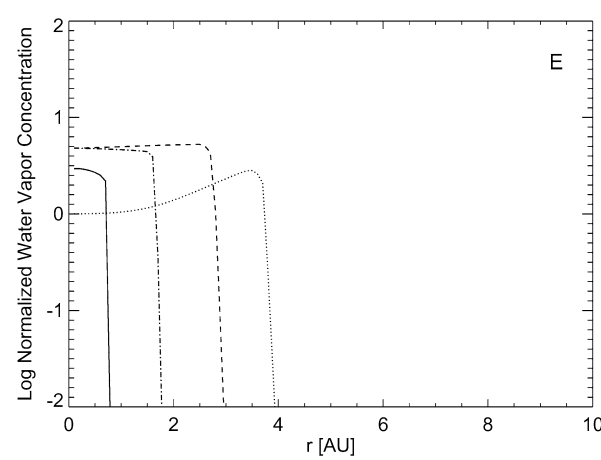
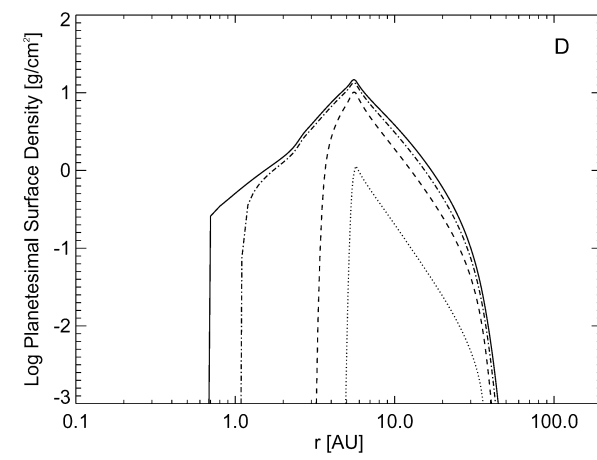
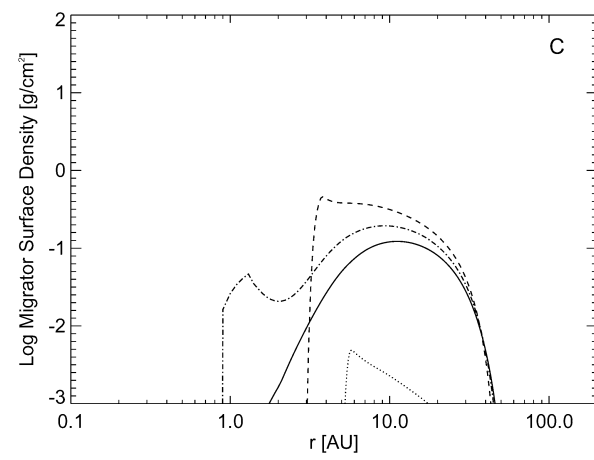
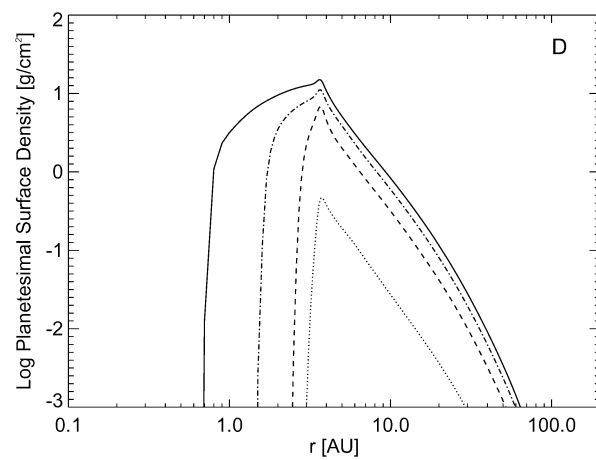
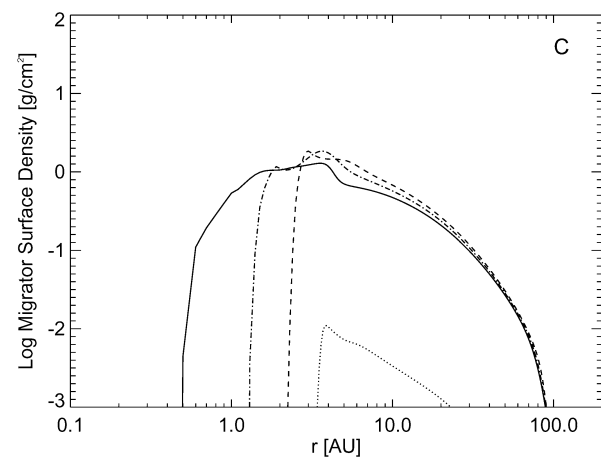
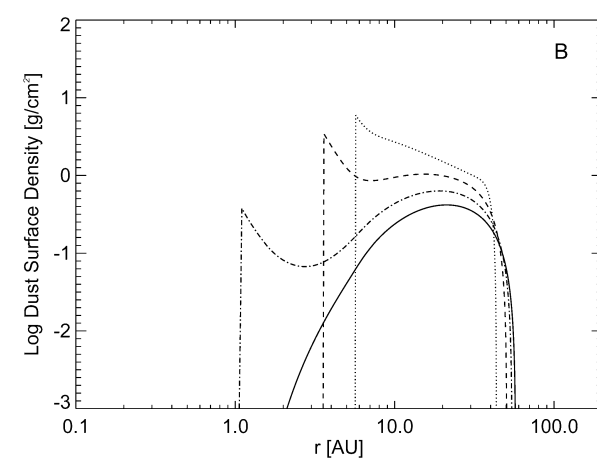
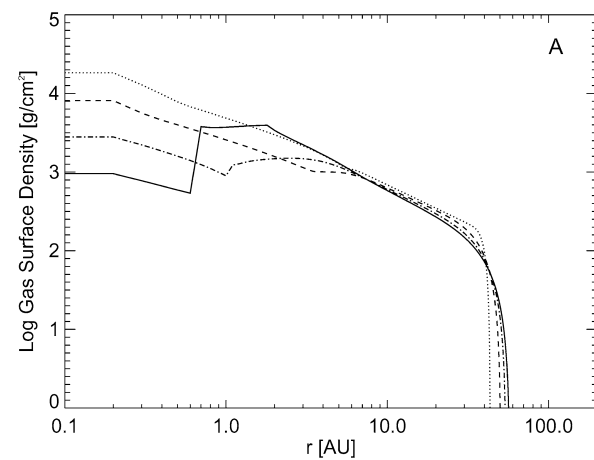
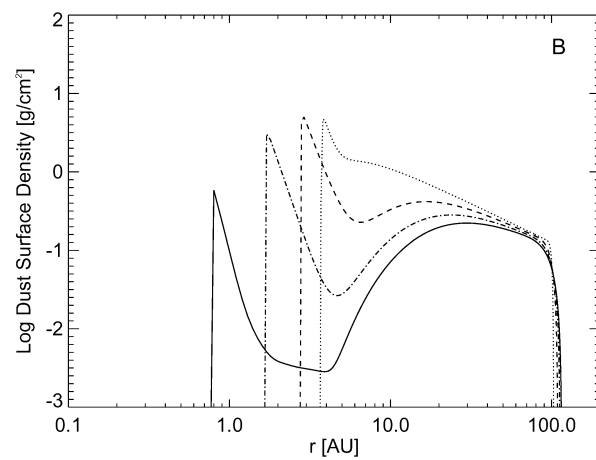
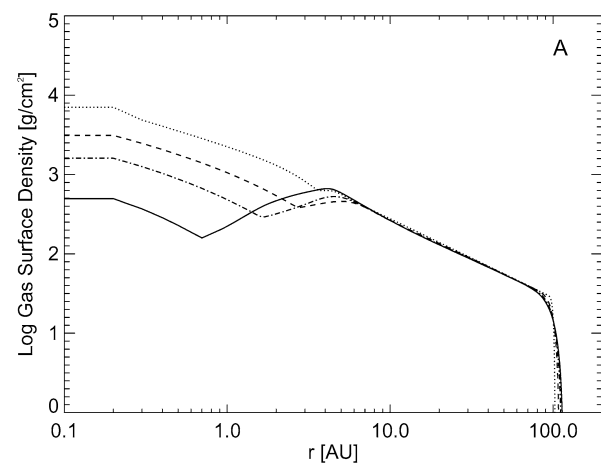
$$\Delta \Sigma_m^p = -\frac{\pi a_p^2 \Delta v_{p,m} \Sigma_m \Sigma_p}{H_m m_p} \Delta t$$

結果

- ❶ snow line の後ろで Dust 面密度大, ガス面密度小.
- ❷ τ が大 $\rightarrow$ ν が大
- ❸ さらに遠方の Dust が枯渇, ガス面密度の進化停止.
- ❹ Dust の極小と Migrator の極大が一致.
- ❺ Migrator の生成位置と分布のピークは一致しない.
- ❻ Migrator の “渋滞”.
- ❼ 内側円盤での水蒸気の濃集
- ❽ 外側円盤からの H_2O の輸送
- ❾ H_2 ガスの供給停止



結果



円盤の化学への影響

● 酸化的なコンドライト物質

- e.g., C コンドライト中の fayalite

- 太陽組成における酸素分圧の 10^3 倍が必要.

- H_2O の濃集過程だけでは説明不可能.

- シリケートの蒸発によるより酸化的环境形成?

- 母天体における水質変成の可能性.

● 還元的なコンドライト物質

- e.g., E コンドライト中の CaS

- 太陽組成における H_2O 量の $1/2$ まで減らす必要あり.

- 条件によっては, 数 Myr 後に実現.

- 酸化的な環境との共存不可.

まとめ

- 📌 ガス・ダスト分別・ダスト蒸発に伴う円盤組成進化シミュレーション
 - 📌 固体を3つの種族 (Dust, Migrator, Planetesimal) に分類.
 - 📌 各相・種族間の source & sink term を結構真面目に考慮.
 - 📌 各相・種族について面密度時間進化を解く.
- 📌 得られた結果
 - 📌 H_2O の分配による τ の変動が輸送過程にフィードバック.
 - 📌 snow line 以遠の広い領域で Planetesimal 面密度大.
 - 📌 複数の Gas Giant コア形成の可能性.
 - 📌 内側円盤における H_2O の濃集と欠乏.
 - 📌 コンドライト物質との関連は不明.
 - 📌 酸化的・還元的な環境を同時には作ることができない.