

# 原始太陽系星雲における 酸素同位体比のグローバル進化

福井 隆      倉本 圭

北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻

# 星屑から惑星まで

重元素の合成・放出  
プレソーラー粒子の形成

ダストの付着成長・沈殿  
円盤内の物質輸送  
凝縮可能物質の濃集  
微惑星の形成

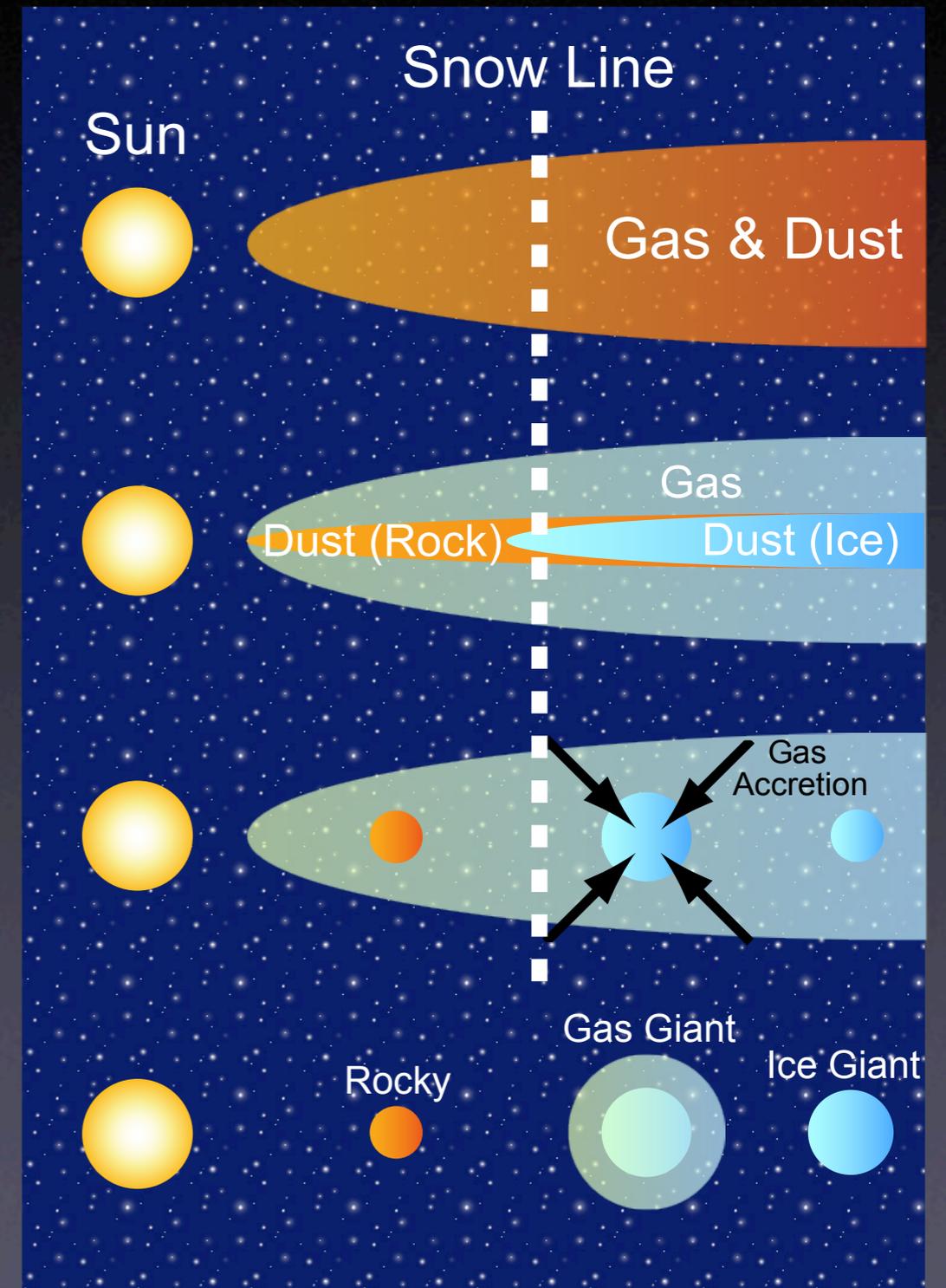
光化学過程による酸素同位体分別  
氷, 有機分子の形成  
分子雲コアの収縮・恒星と円盤の形成

原始惑星の形成  
ジャイアントインパクト



# 惑星形成の標準モデル

- ダストの付着成長
- 中心面への沈殿, ダスト層形成
  - snow line 以遠では氷が存在
- 重力不安定による微惑星形成
- 微惑星同士の合体成長
  - 内側ほど早く成長
- 巨大惑星のガス捕獲
  - snow line 以遠で巨大コア
- 星雲ガスの散逸
  - 海王星はガス捕獲に間に合わず



# コンドライトとは？

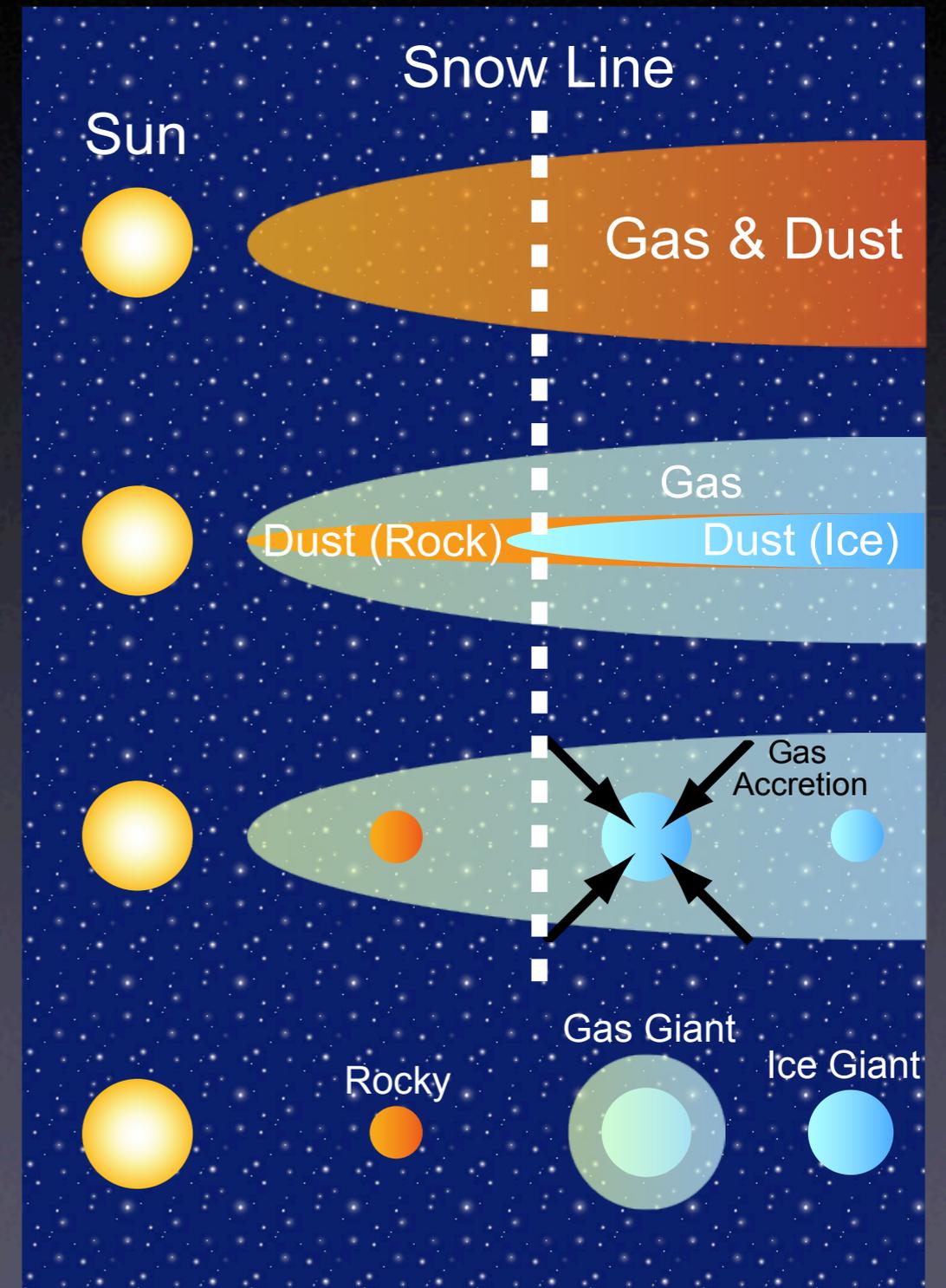
- 太陽系最古の固体物質 (の 1 つ)
  - 小惑星 (微惑星の生残り) のかけら
    - 軌道計算, 分光観測から
  - 母天体が小さいため, 形成後の分化が進んでいない.
- コンドライトの構成物質
  - コンドリユール
    - mm サイズの球粒. 自由空間中でメルトが固化して形成.
  - 難揮発性包有物 (CAI, AOA)
    - 太陽組成の下では最も高温で凝縮する鉱物.
  - Fe-Ni 合金
  - マトリックス



小惑星 Itokawa  
(組成は LL コンドライトに類似)

# 惑星形成の初期条件への制約

- Hayashi et al. (1985) 他 ...  
現在の太陽系から復元
- Hartmann et al. (2005) 他 ...  
実際に観測から
- Ruden & Pollack (1991) 他 ...  
 $\alpha$ -model を用いた力学理論
- 北大グループ, Ciesla, Gail ...  
化学・同位体組成からの制約



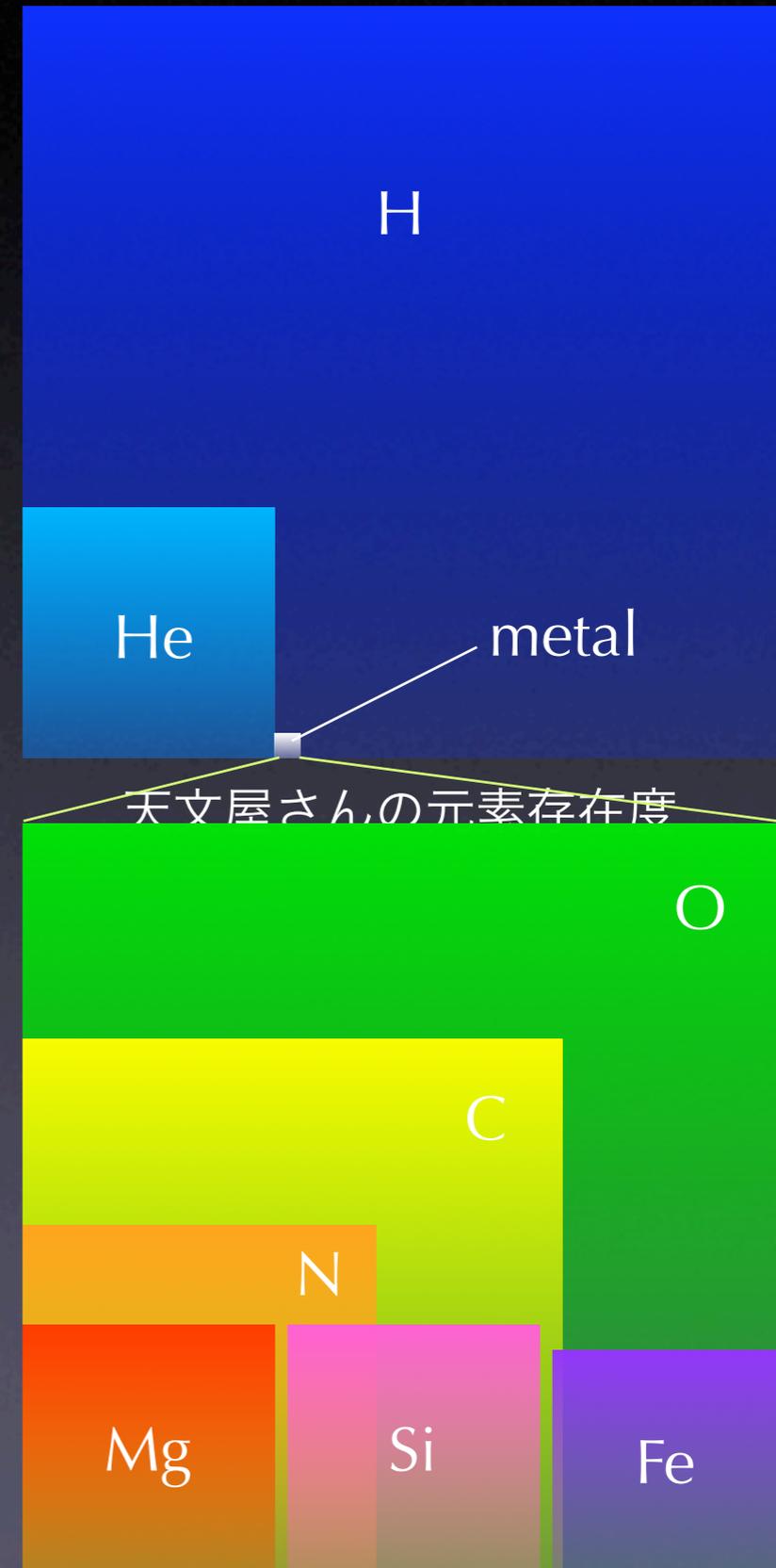
# 酸素同位体比の重要性

- なぜ酸素か？

- 豊富な元素 (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.
- 形成される鉱物組成が酸素分圧に強く依存.

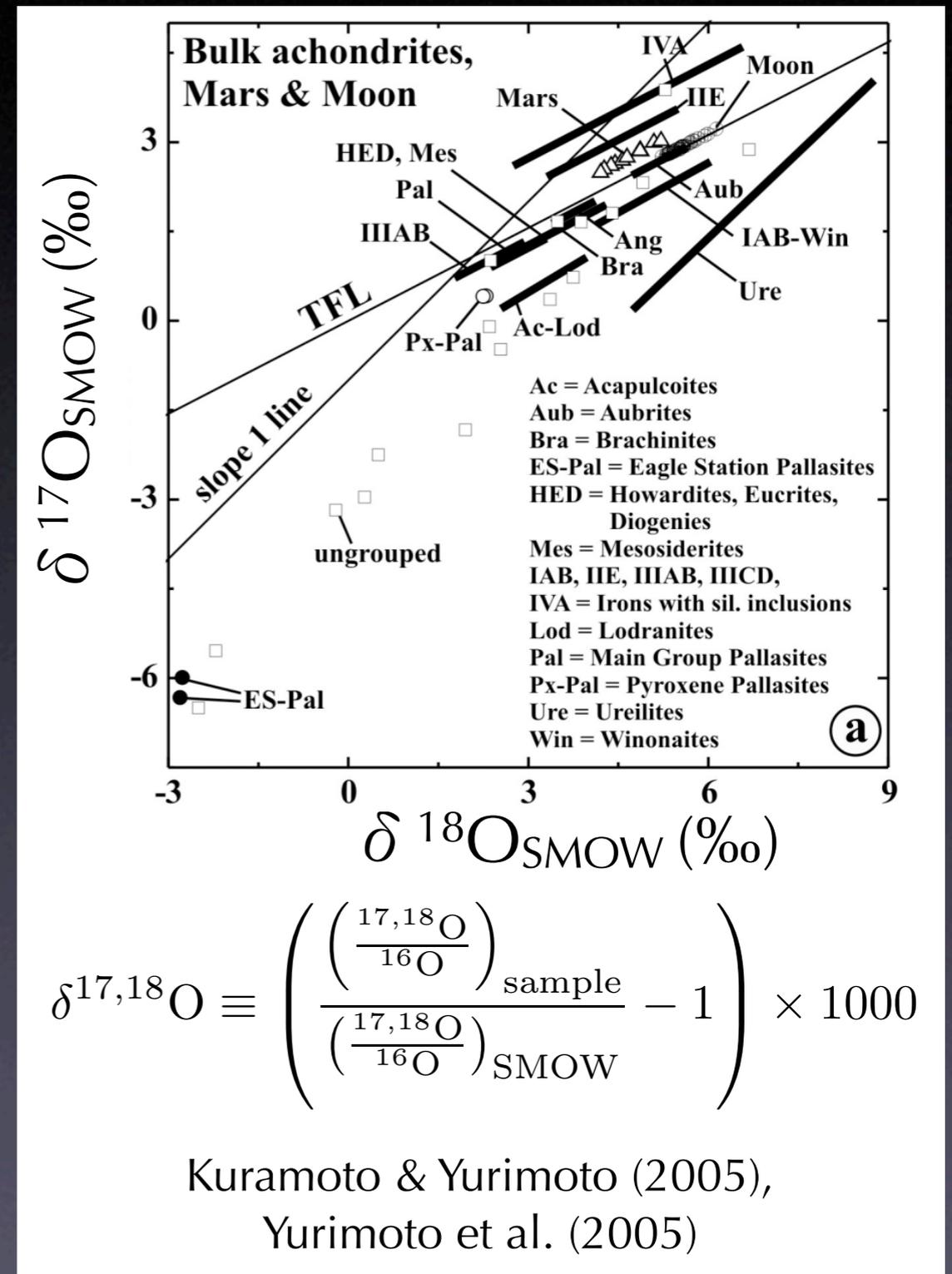
- なぜ同位体比か？

- 酸素は 3 つの安定同位体を持つ
  - 通常の分別過程と混合過程が区別可能, 物質進化の履歴を詳しく読み解くことが可能.



# コンドライト原物質の酸素同位体不均質

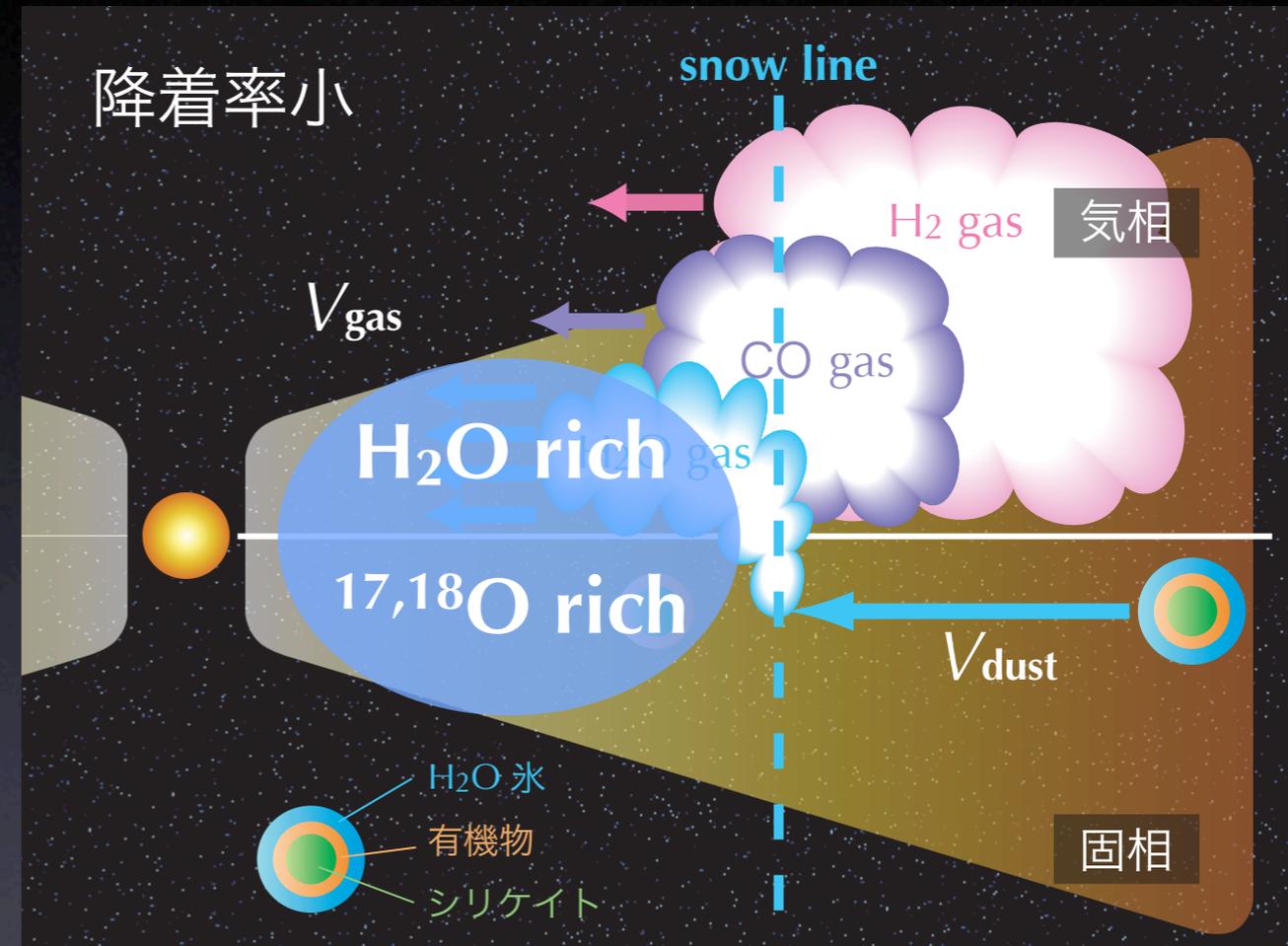
- 傾き 1 の直線上に分布.
  - $^{16}\text{O}$ -rich,  $^{17,18}\text{O}$ -rich な 2 種のリザーバが存在, 量比を変えて混合し形成
- CAI ( $^{16}\text{O}$ -rich), コンドリュール ( $^{17,18}\text{O}$ -rich) ~ 40 ‰ の差 (Clayton, 1993)
- 典型的には CAI の方が 2.5 Myr 程古い. (Amelin et al., 2002)
  - 円盤酸素同位体組成の大局的進化
- コンドリュール・惑星物質間の組成差は 10 ‰ 程度. (Clayton, 1993)
- 形成期間は > 1 Myr (倉橋, 2005)
  - コンドリュール形成期 (以降) の円盤は酸素同位体的にかなり均質



# 先行研究

- Yurimoto & Kuramoto (2004)
  - 2 種のリザーバ形成
    - 分子雲における光化学過程.
    - CO ( $^{16}\text{O}$ -rich) ... 全域で気相に存在.
    - $\text{H}_2\text{O}$  ( $^{17,18}\text{O}$ -rich)  
... snow line を境に固相→気相
  - 量比を変えて混合する過程
    - ガス-ダスト分別による  $\text{H}_2\text{O}$  濃集.
- 問題点 ... 多くの単純化
  - 各進化段階における snapshot.
    - 分析値・年代学との比較が困難.
  - 水蒸気のみ, 準定常状態,  
mm サイズのダストを仮定.

YK04 の  $\text{H}_2\text{O}$  濃集モデル



CO ...  $\text{H}_2$  gas に対する濃度は円盤全域で一定.  
 $\text{H}_2\text{O}$  ... snow line を挟んで輸送速度が減少.  
 $\text{H}_2$  gas に対する濃度増加.

円盤降着が減衰するとダスト/ガス速度比が増加, 円盤内側領域の水蒸気の濃集度も増加.

# 本研究では...

- 主要な酸素キャリアーの円盤内輸送をシミュレート、それが酸素同位体組成に与える影響を再検討.
- $\text{H}_2\text{O}$ , シリケートの固・気両相の輸送過程の計算.
- 衝突破壊による最大ダストサイズの半解析的な見積り.
- 降着の減衰に伴うガス-ダスト分別の時間変化の計算.
- CAI やコンドリュールの酸素同位体組成の分析値や年代学に基づき、その形成シナリオについて議論.
- 制約条件：2.5 Myr で 40 ‰ 程度  $\delta^{17,18}\text{O}$  が変化.  
コンドリュール形成期の組成不均質小.

# 観測に基づく円盤モデル

- 降着率の時間変化

- Hartmann et al. (1998)  $\dot{M}_{\text{disk}}(t) = \left(\frac{t}{10^6 \text{yr}}\right)^{-\eta} \times 10^{-8} M_{\odot} / \text{yr}$

- 観測からの制約 :  $1.5 < \eta < 2.8$ . ダストの観測は 1.5 を支持.

- 計算開始時刻 :  $10^{-7} M_{\text{solar}} / \text{yr}$  の時点.

- ガス面密度 ... 相似的な進化を仮定.  $\Sigma_{\text{g}} = \Sigma_{\text{g},0} \times \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-q}$

- CTTS の観測から, 質量  $0.001 - 0.1 M_{\text{solar}}$ , 半径  $\sim 100 \text{AU}$ ,  $q = 1.0$ .

- 降着による質量減少は考慮.  $M_{\text{disk}}(t) = M_{\text{disk}}(0) - \int_0^t \dot{M}_{\text{disk}} dt$

- 中心面温度分布 ... 粘性散逸による加熱が支配

- 降着で解放される重力エネルギーにより加熱.

- 吸収係数 :  $1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  (Miyake & Nakagawa, 1993)

- 酸素キャリアー濃度変化は円盤構造に影響を与えないと仮定.

- e.g., 光学的厚さの時間変化なし

# 分子種 $i$ の固・気相における輸送方程式

$$\frac{\partial C_{i,\text{sol}}}{\partial t} = -v_{d,r} \frac{\partial C_{i,\text{sol}}}{\partial r} + \frac{1}{r\Sigma_g} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \Sigma_g \frac{\partial C_{i,\text{sol}}}{\partial r} \right) + S_{\text{cond}} - S_{\text{subl}}$$

$$\frac{\partial C_{i,\text{vap}}}{\partial t} = -v_{g,r} \frac{\partial C_{i,\text{vap}}}{\partial r} + \frac{1}{r\Sigma_g} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \Sigma_g \frac{\partial C_{i,\text{vap}}}{\partial r} \right) + S_{\text{subl}} - S_{\text{cond}}$$

$i$  : 酸素キャリアー分子種 (シリケート,  $\text{H}_2\text{O}$ )

$\Sigma_g$  : 円盤ガス面密度

$D$  : 乱流拡散係数

... 乱流粘性係数と等しいと仮定.  $D = \frac{\dot{M}_{\text{disk}}}{3\pi\Sigma_g}$

$v_{g,r}$  : ガス動径速度

... 降着率から決定.  $v_{g,r} = \frac{\dot{M}_{\text{disk}}}{2\pi r \Sigma_g}$

$v_{d,r}$  : ダスト動径速度

... ガス抵抗による落下, 粒径に依存.  $v_{d,r} = v_{d,r}(a_{\text{max}}, \Sigma_g)$

$S_{\text{cond}}, S_{\text{subl}}$  : 蒸発位置を境に  $C_{i,\text{vap}}$  と  $C_{i,\text{sol}}$  を相互に変換.

# ダスト動径速度の計算

1. 衝突破壊過程を考慮, 最大ダストサイズを決定.

- 乱流の速度からダスト層の厚さを計算.

$$v_{\text{turb}} \sim \alpha C_s$$

- 最大サイズ ... その高さでの微小ダストとの鉛直相対速度から決定.

$$v_{d,z} = \min(v_{d,z,H_g}, v_{\text{turb}})$$

$$v_{d,z}(a_{\text{max}}) - v_{d,z}(a_{\text{min}}) = v_{\text{stick}}$$

- 付着限界速度 ...  $v_{\text{stick}} \sim 1 \text{ m/s}$  (Blum and Schräpler, 2004)
- サイズ分布 ... 大きなダストが支配的なベキ ( $p = -3.5$ ) を仮定.

$$n(a) \propto a^p$$

- 最大ダストの速度で代表, 円盤の光学的厚さに影響.

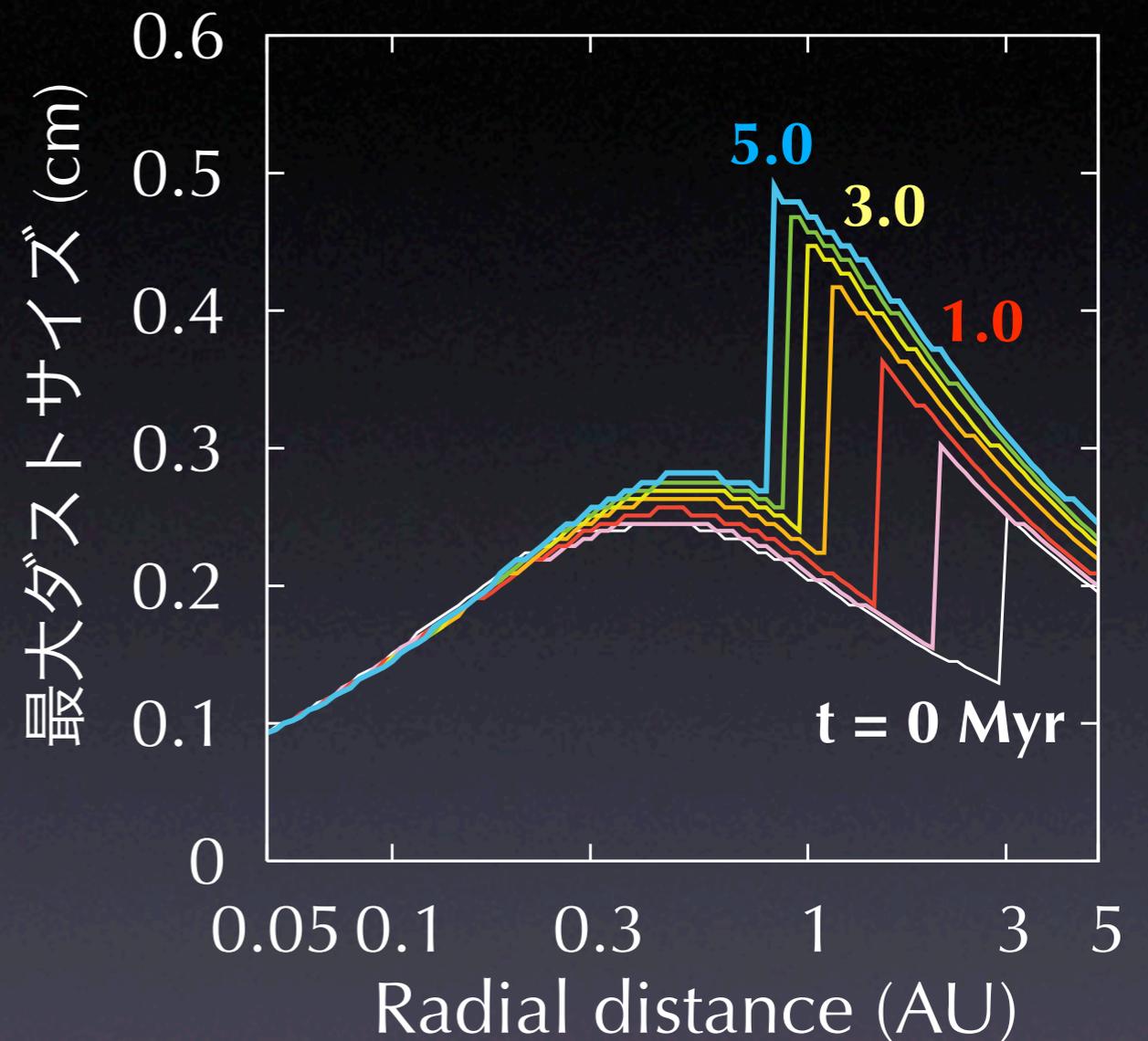
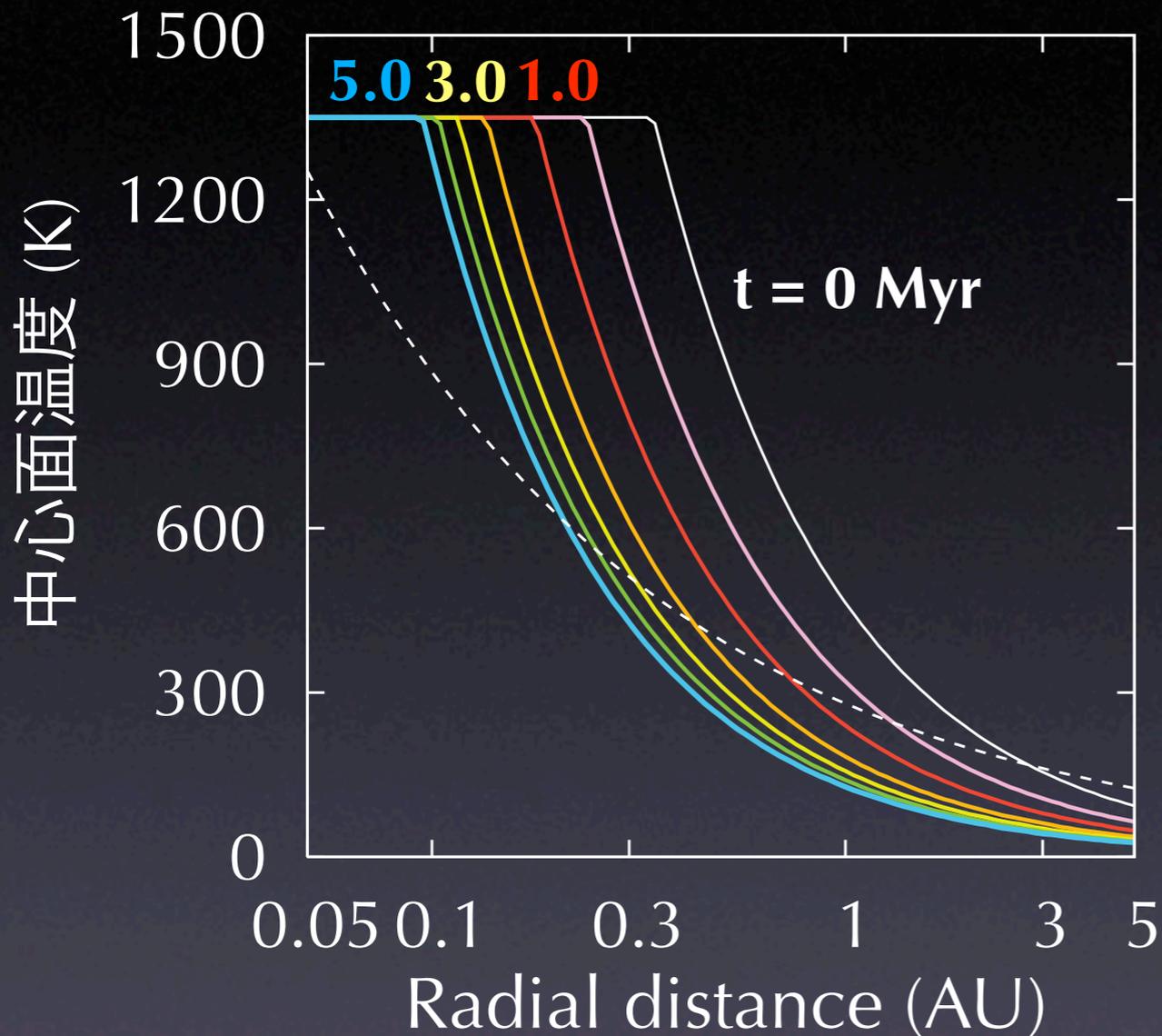
2. 動径方向の運動方程式に最大ダストサイズを代入し, 計算.

# 各キャリアーへの O の配分

	シリケイト	H <sub>2</sub> O 氷	CO ガス
凝固点 (K)	1350	160	—
O (total = 13)	3	6	4
$\delta^{17,18}\text{O}_{\text{solar}}$ (‰)	0	+120	-180

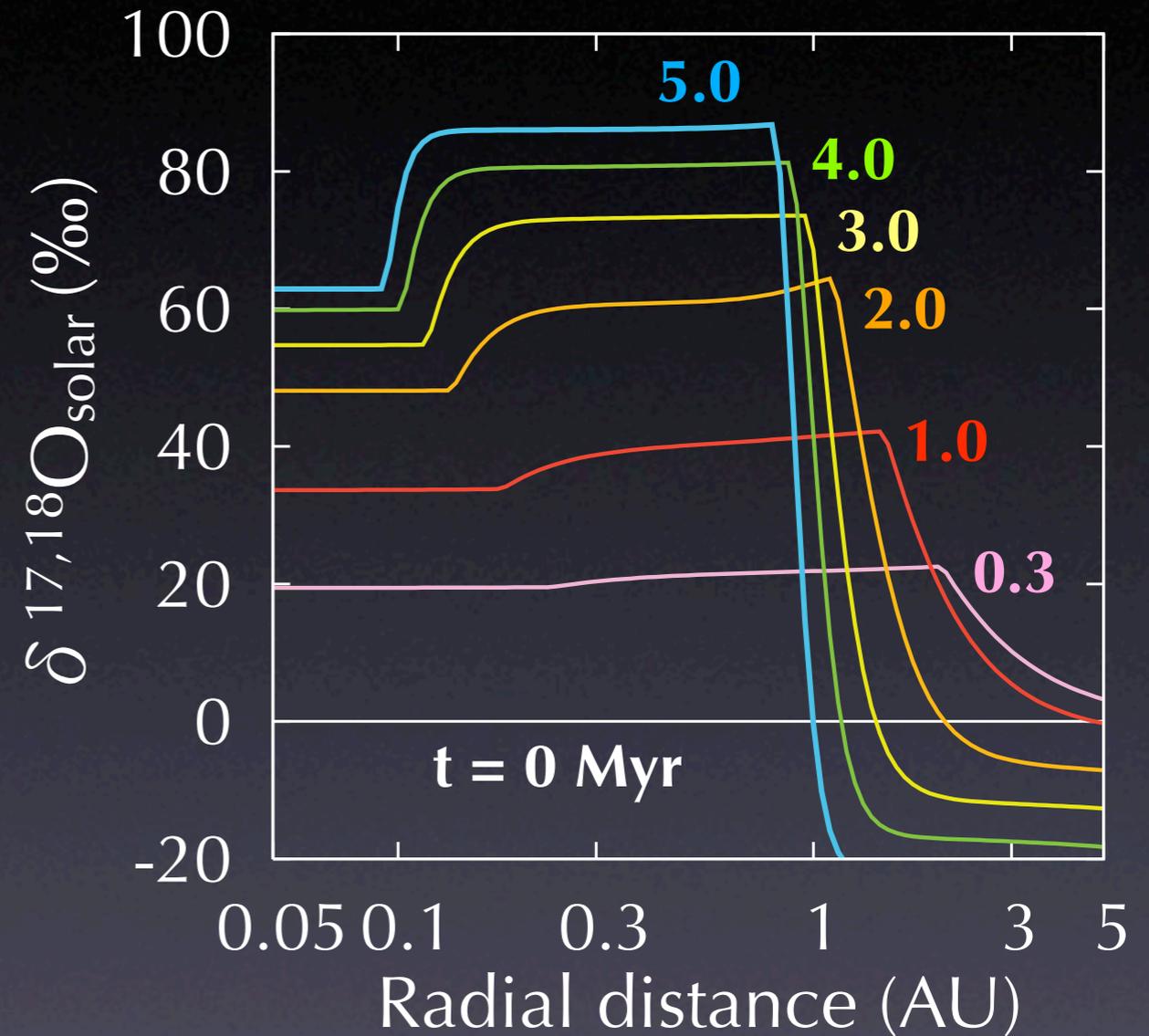
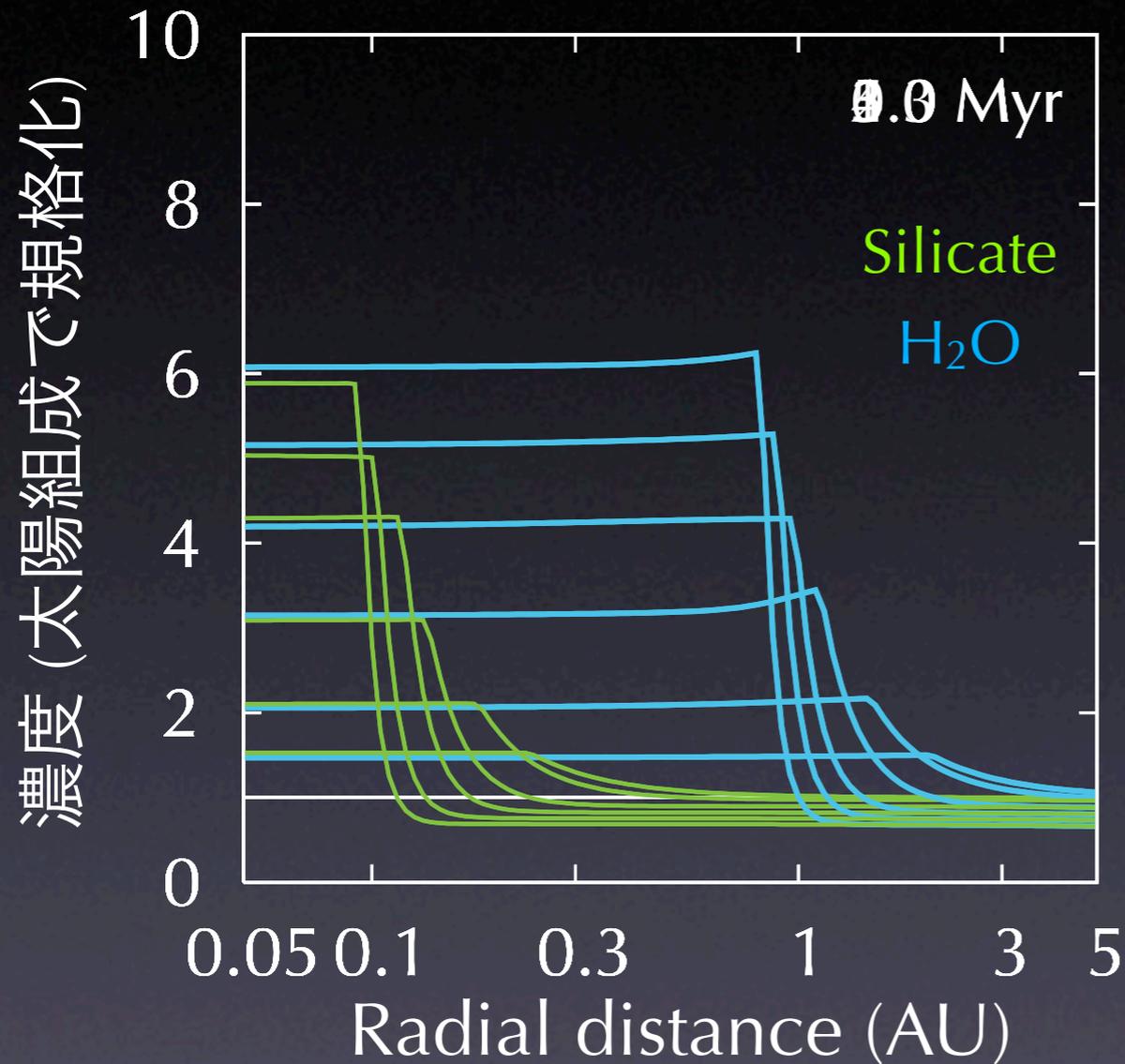
- シリケイトは MgO + SiO<sub>2</sub> として, 太陽組成から計算.
- H<sub>2</sub>O 量はシリケイト量と Greenberg (1998) から決定.
  - 初期分別は YK04 に従う, 理論的見積りの下限付近.
- $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{solar}}$  は太陽 (分子雲) を基準としたもの.
- $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  との対応は計算結果から求まる.

# 降着の減衰に伴う円盤の進化



- 円盤面密度 ... 2/3 程度に減少.
- 円盤温度 ... 徐々に冷却 → 各蒸発領域が内側へ移動.
- ダストサイズ ... 衝突速度が下がり, 徐々に成長.
  - $10^{-8} \sim 10^{-9} M_{\text{solar}}/\text{yr}$  の時点で数 mm.
- ダスト-ガス間の動径速度差 ... 時間と共に増加.

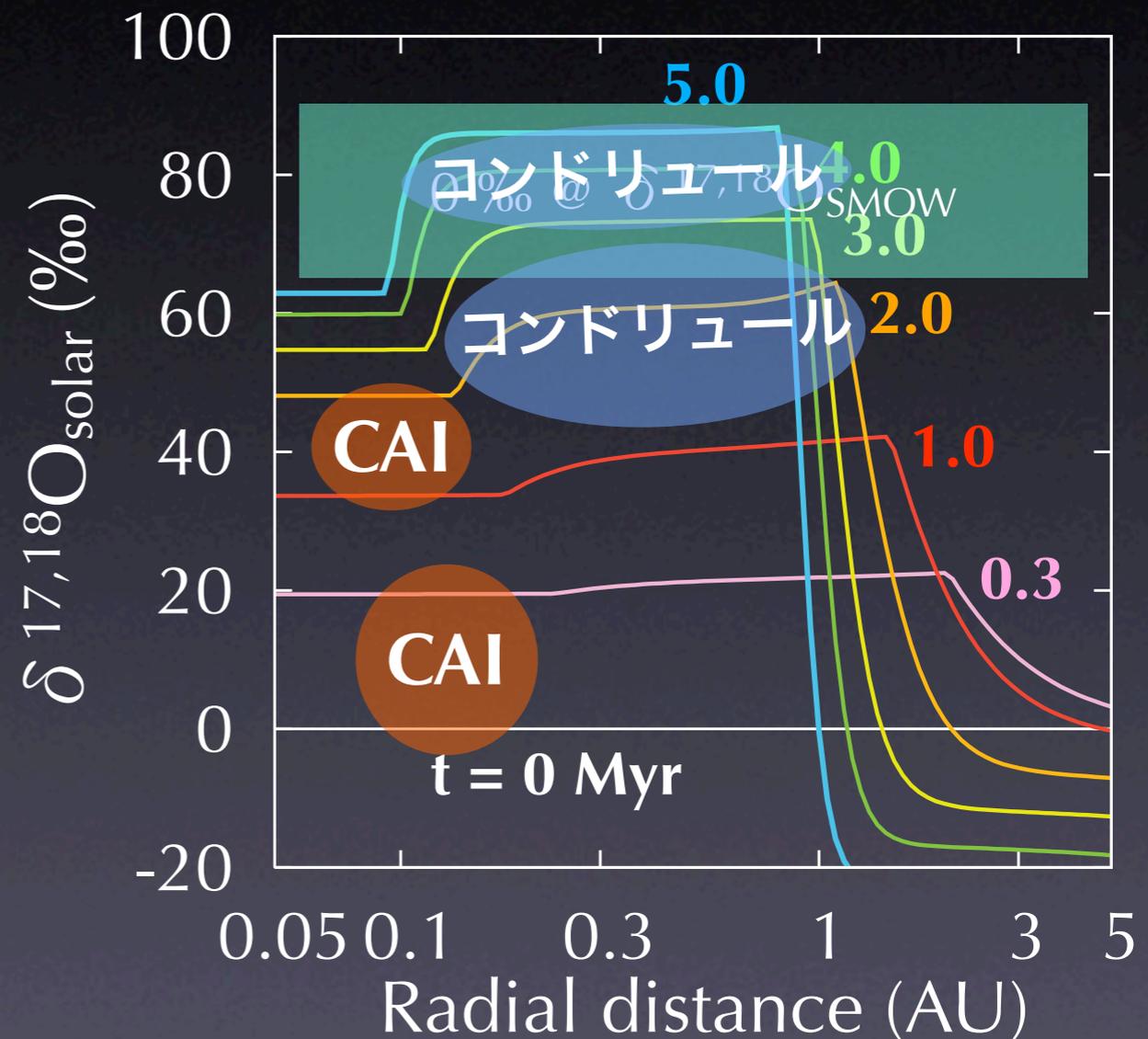
# 円盤の酸素同位体組成進化



- 降着率減少後, H<sub>2</sub>O/シリケート蒸気が各蒸発領域で濃集, 徐々に内側へ輸送.
- H<sub>2</sub>O の濃集に伴い, 円盤組成が大局的に <sup>16</sup>O-rich → <sup>17,18</sup>O-rich へ進化.
- シリケート蒸発領域に不連続, 円盤内縁に局所的に <sup>16</sup>O-rich な環境.

# CAI, コンドリュール分析値との比較

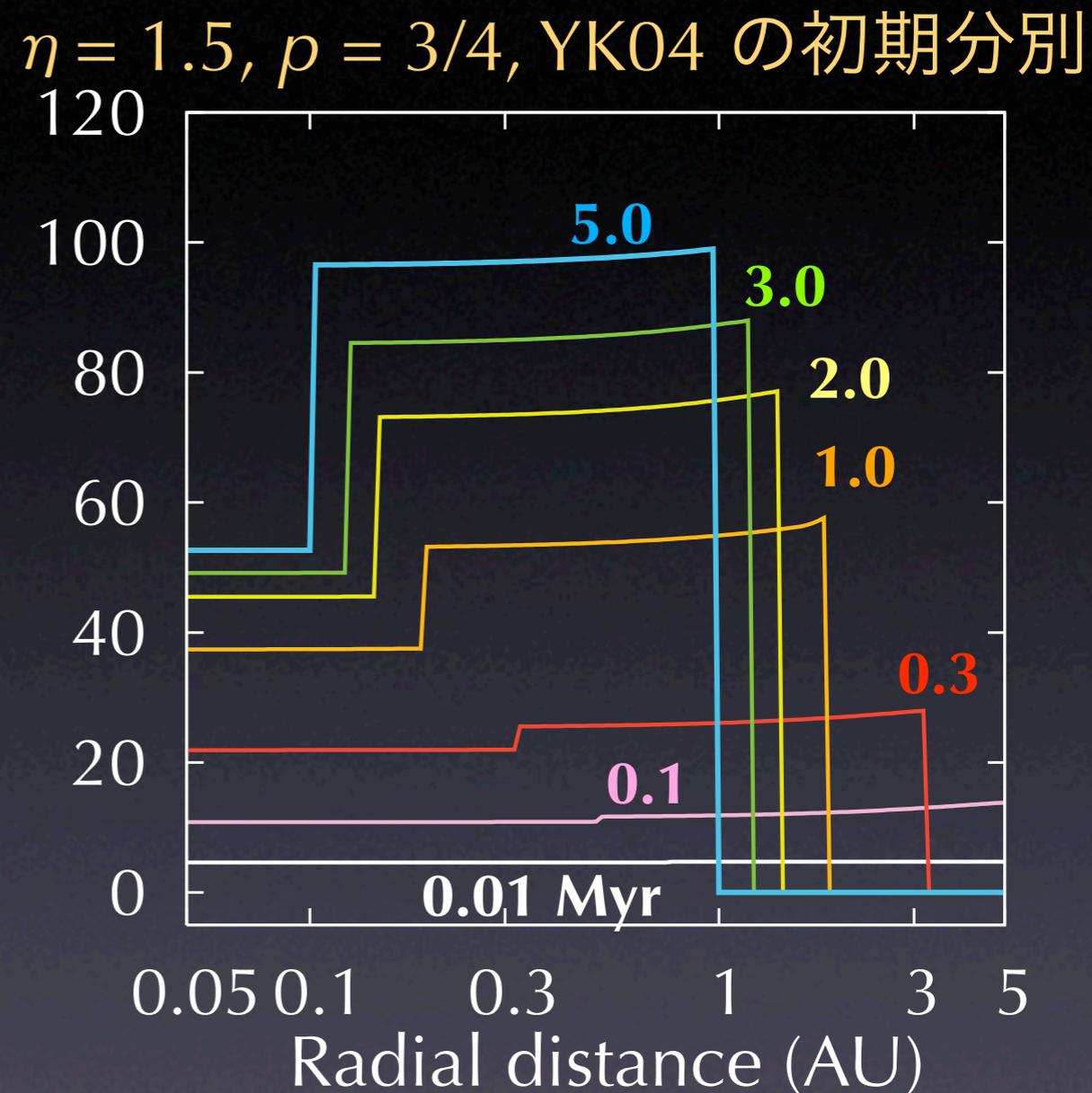
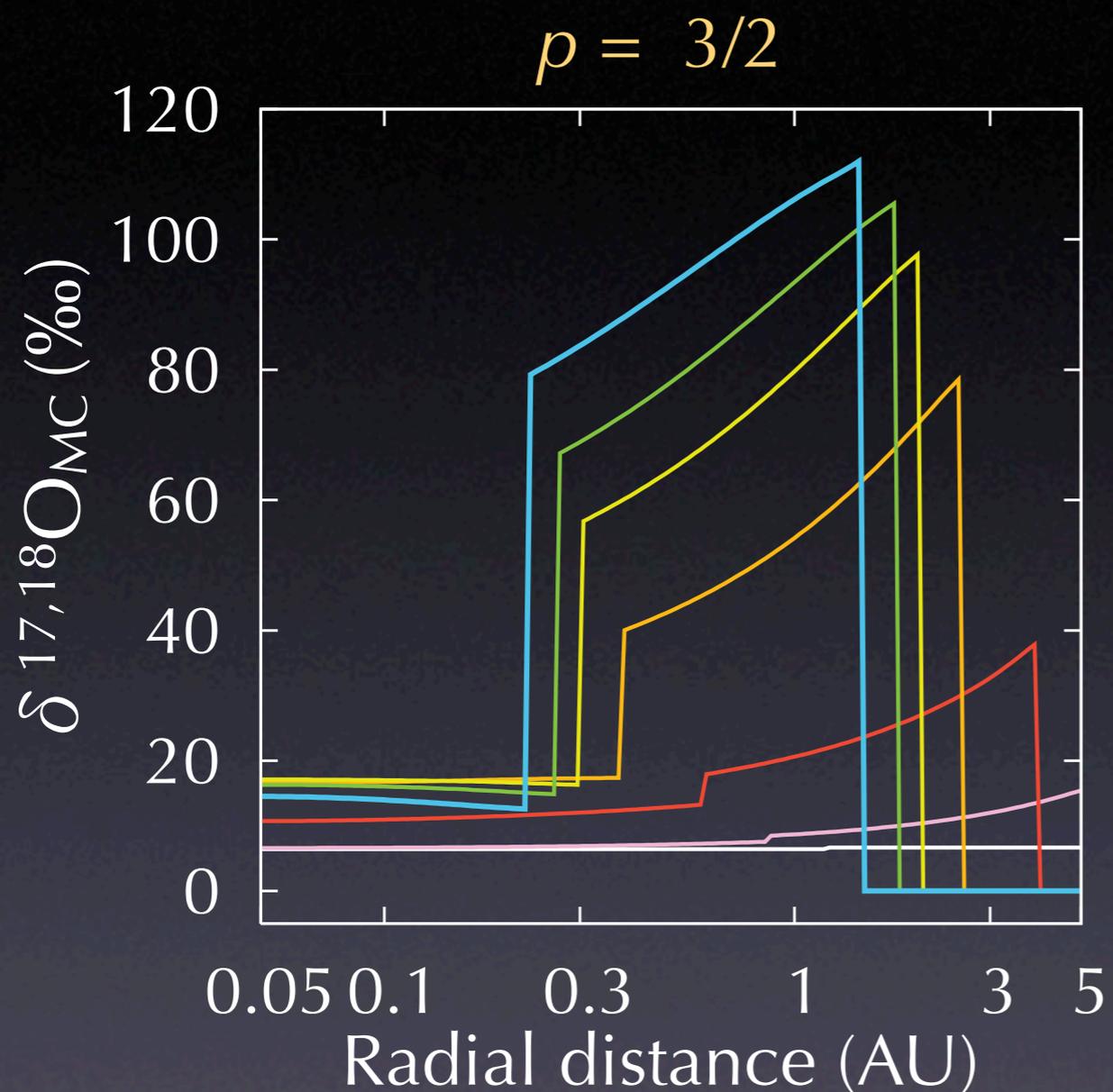
- コンドリュール主要形成期：2.5 Myr 以降  
→ 0 ‰ @  $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}}$   
= 70 ~ 90 ‰ @  $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{solar}}$
- Kobayashi and Yurimoto (2003) のコンドリュール  $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}} = -80$  ‰ と調和的.
- CAI とコンドリュールの組成差
  - 2.5 Myr 間で 40 ‰ 以上の変化は, よほど CAI 形成が遅くない限り満たされる.
- コンドリュール間の一様性
  - 空間的にはどの時点でもかなり一様.
  - CAI 形成が  $\ll 1$  Myr だと, コンドリュール形成期の時間変化大.
  - CAI 形成が 1~2 Myr だと, コンドリュール形成期の時間変化小, 分析結果を再現.



# まとめ

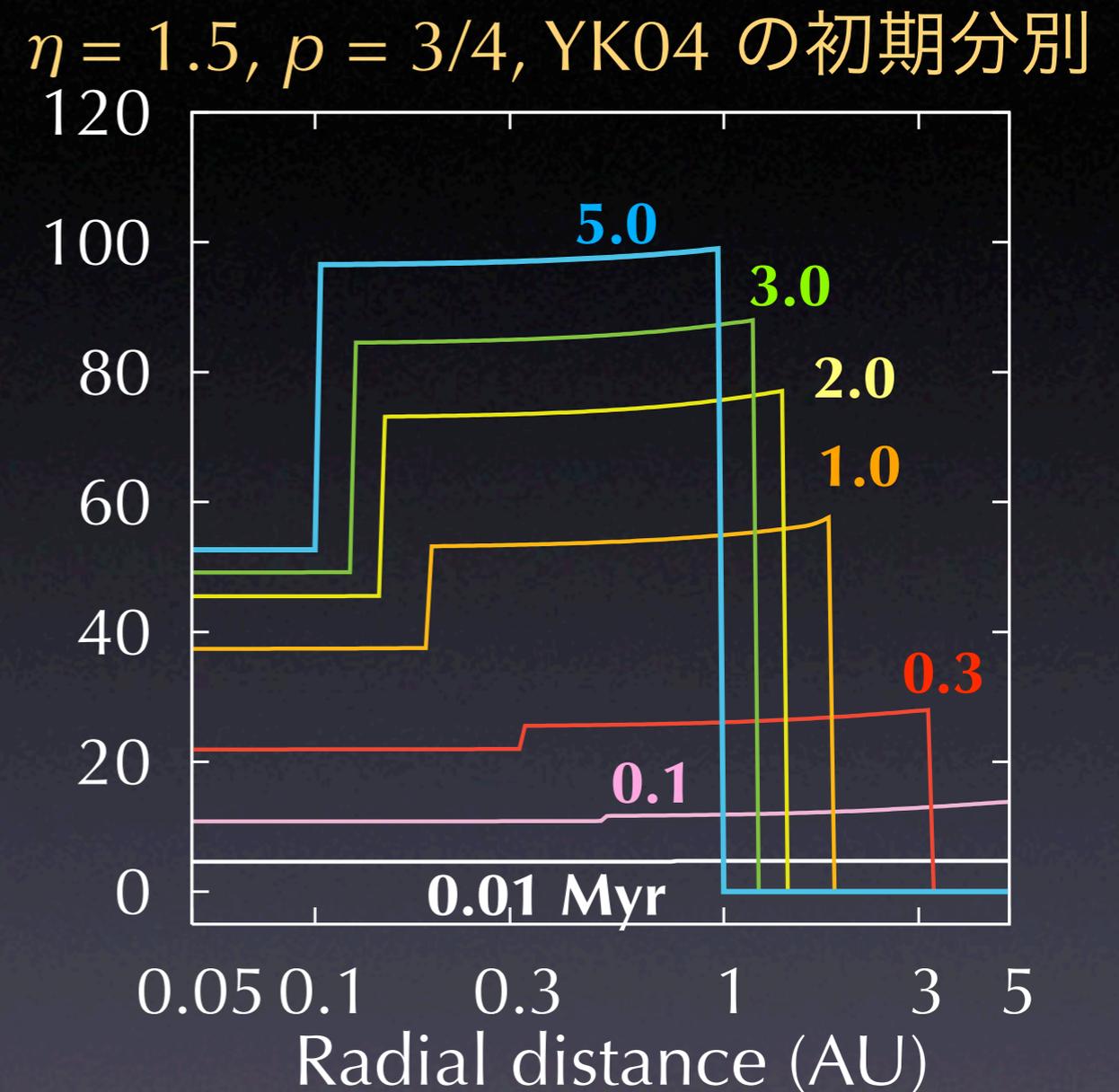
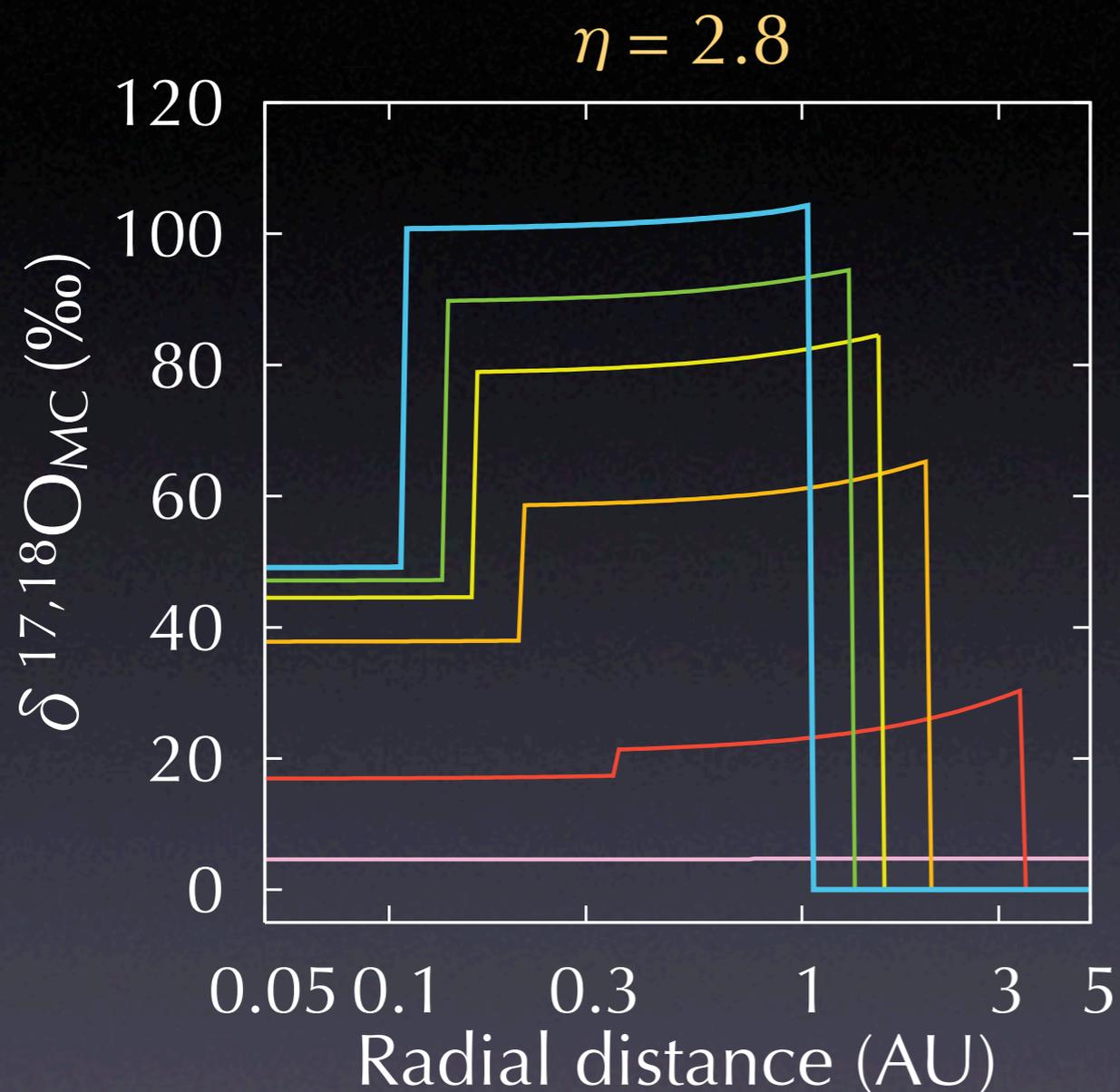
- 水やシリケートの濃度変化が同位体組成に与える影響を再検討.
  - $H_2O$ , シリケートの固・気両相における輸送過程を計算.
  - 衝突破壊による最大ダストサイズの半解析的な見積り.
  - 降着の減衰に伴うガス-ダスト分別の時間変化を考慮.
- コンドライト物質の酸素同位体組成 (In this case...)
  - CAI とコンドリュールの組成差形成
    - 2.5 Myr 間に ~ 40 % 以上の酸素同位体組成差形成.
  - 3~5 Myr の空間的・時間的組成変動小
    - コンドリュール間の一様性 (~ 10 ‰) を再現.
    - 中心星形成の 1 Myr 後に CAI 形成が起これば適当.
- どのようなパラメータ範囲 (e.g., 円盤質量, 付着限界速度, 初期分別) で再現可能かを調べる必要あり.

# 面密度のベキに対する依存性



- 面密度変化が大きいほど空間的不均質も大きい。
- コンドリュール, 惑星物質の一様性を再現できず。

# 質量降着の減衰率への依存性



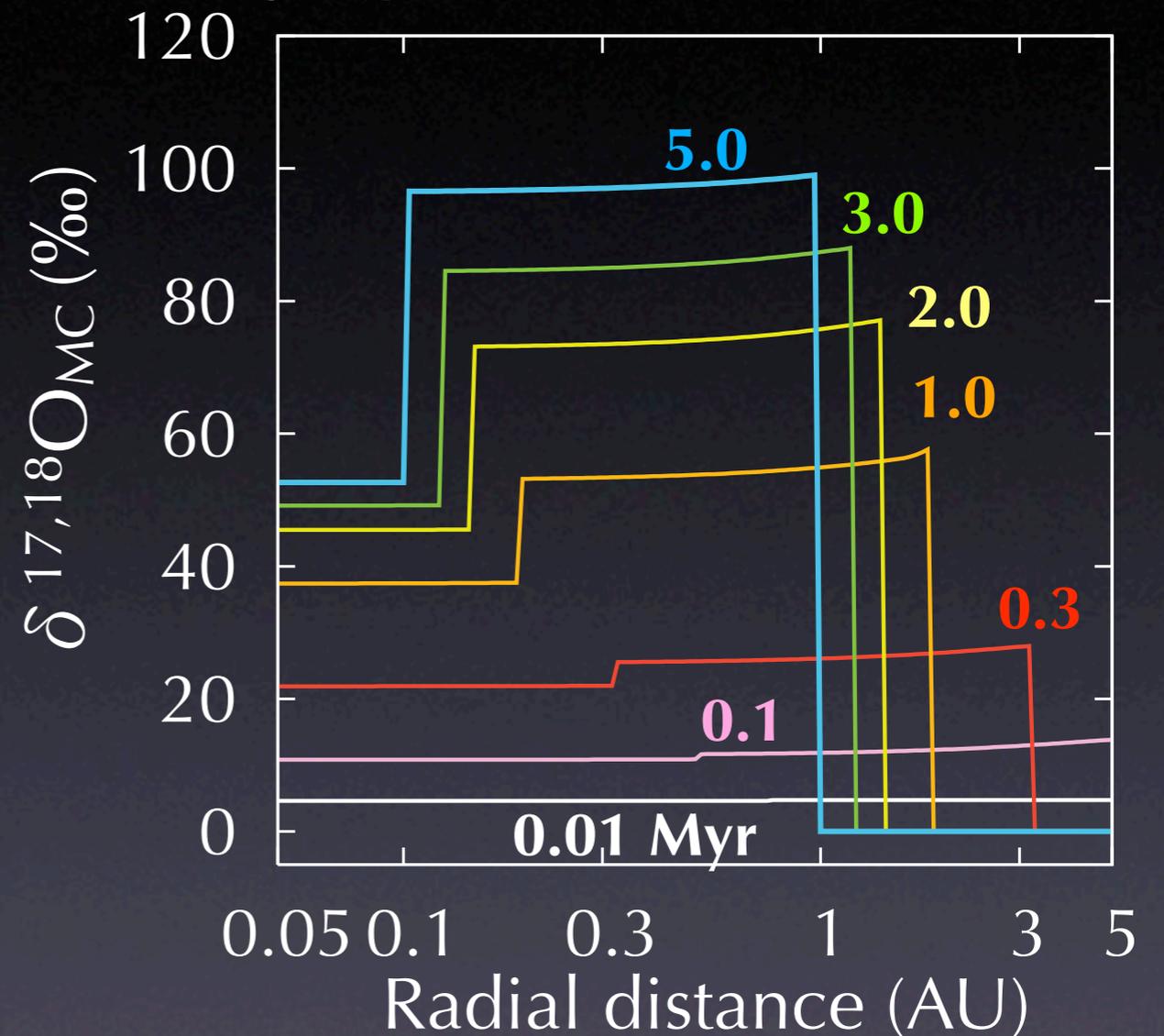
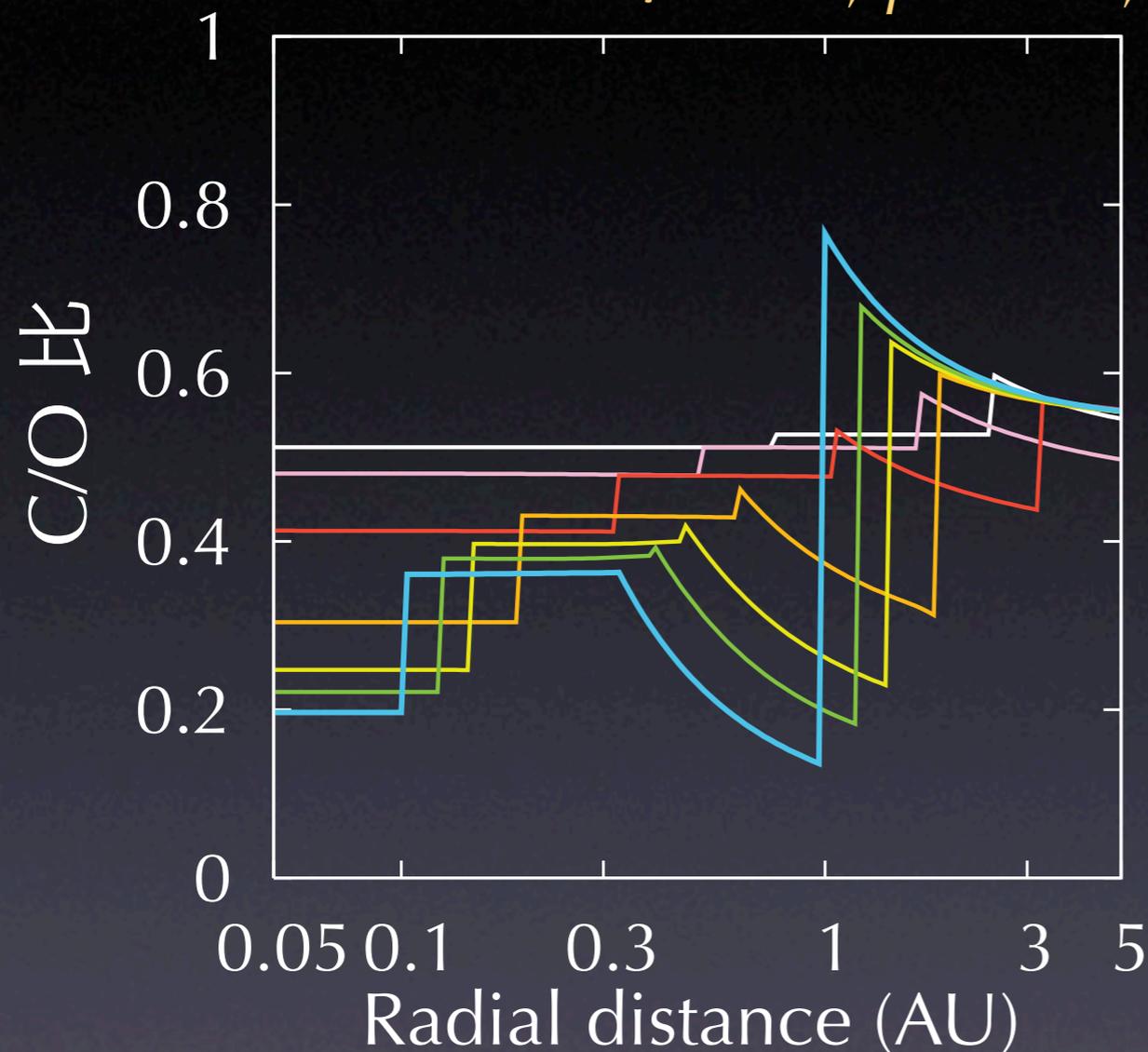
- この場合, 依存性はほぼ無し.
- 重い円盤では, 空間不均質が顕著になる.
- 観測的によりリーズナブルな  $\eta = 1.5$  と調和的.

# 各キャリアーへの C, O の配分

	シリケイト	H <sub>2</sub> O 氷	CO ガス	有機物
凝固点 (K)	1400	160	—	450
C	—	—	6	1
$\delta^{17,18}\text{O}_{\text{MC}}$ (‰)	0	+120	-80	—
O	3	4	6	~0

# 円盤の酸化還元状態への影響

$\eta = 1.5, p = 3/4, YK04$  の初期分別



- Nakano et al. (2003) ... 有機物蒸発領域に還元的環境
- $H_2O$  の濃集により, 必ずしもそうはならない.
- snow line 背面に還元的環境が形成される.