

# H<sub>2</sub>O の濃集に伴う初期太陽系の 酸素同位体比進化モデルの検証

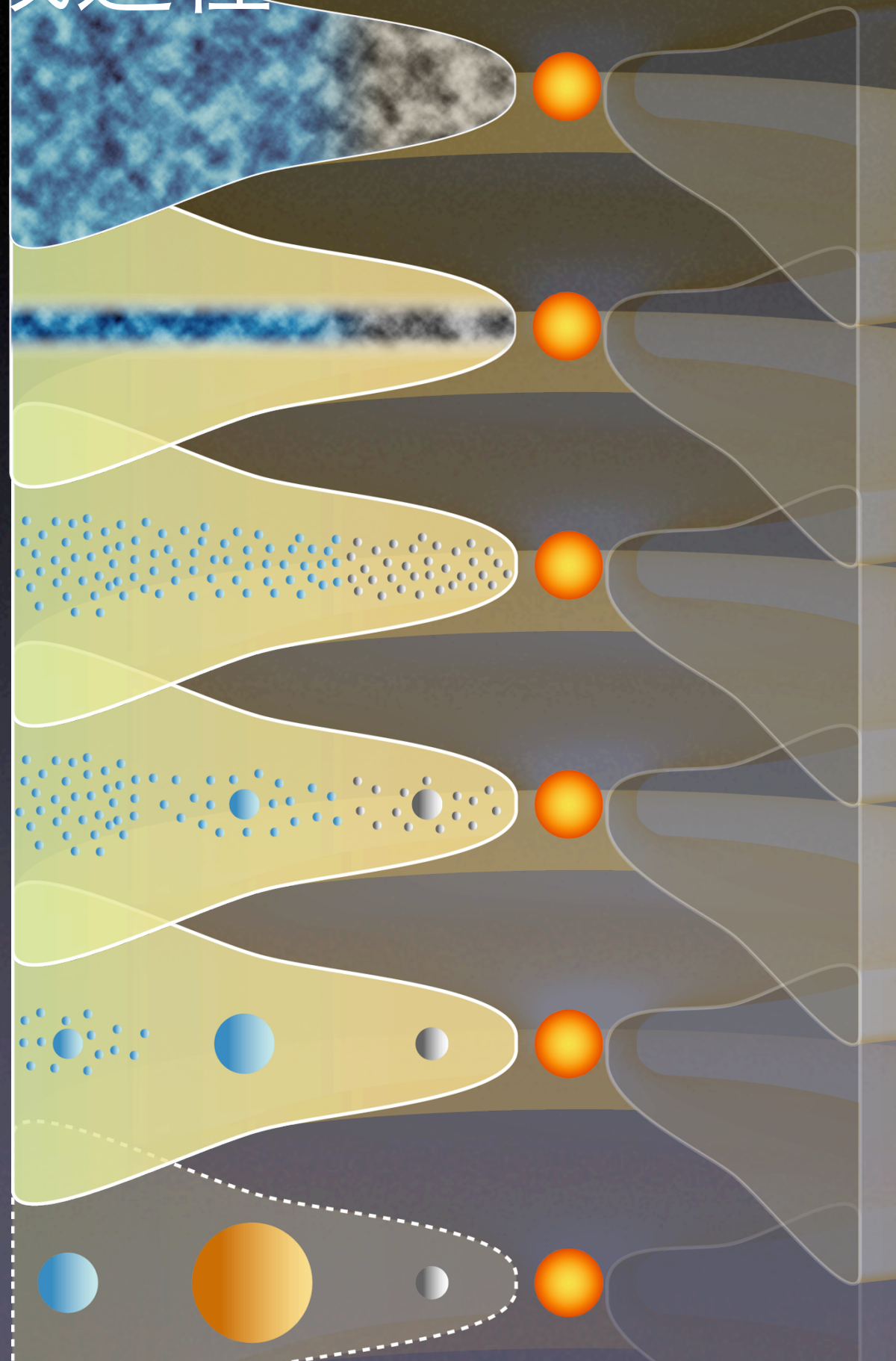
福井 隆      倉本 圭

北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻



# 惑星系の形成過程

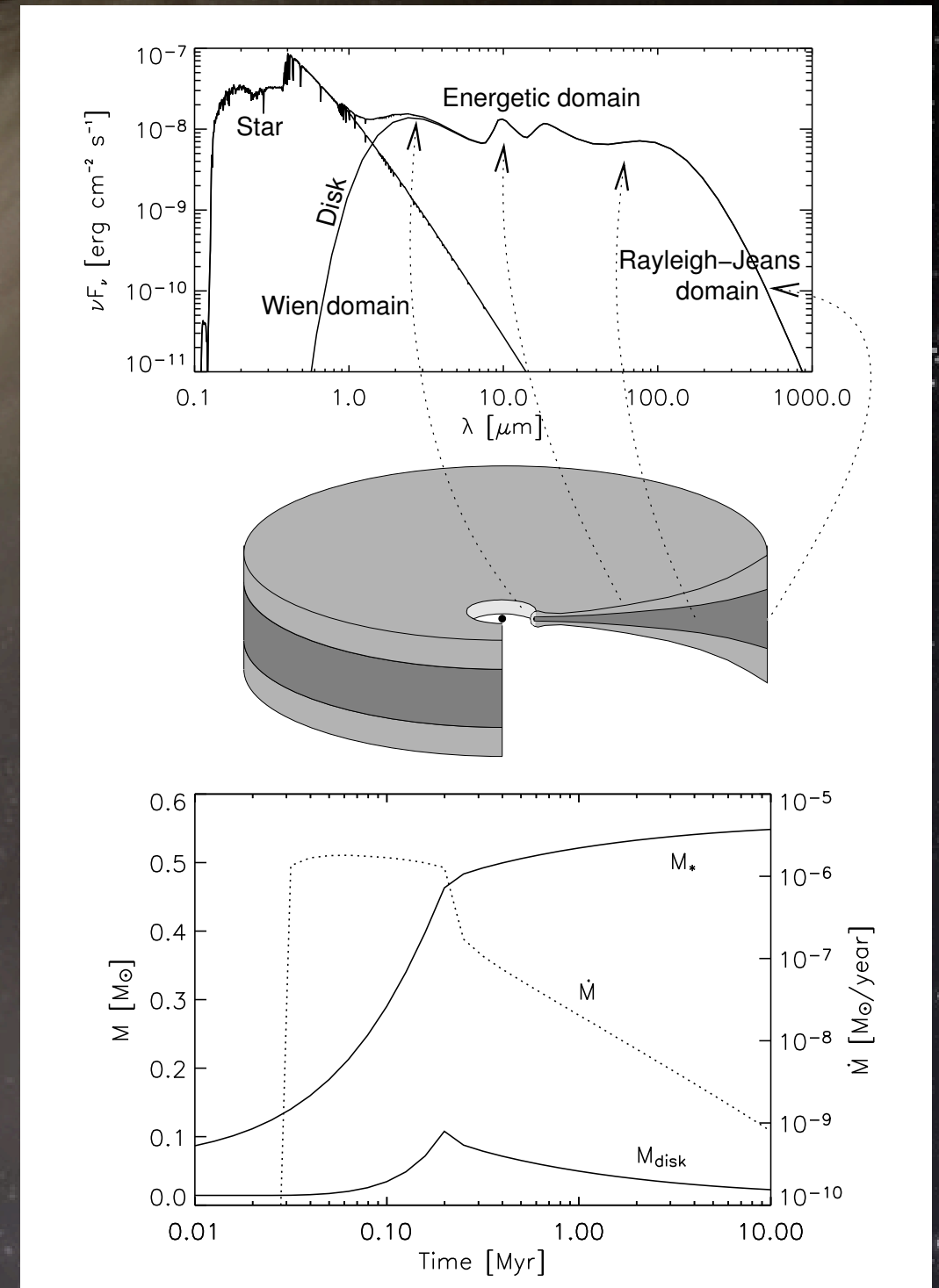
- 標準モデル (Hayashi et al. 1981)
  - ダストの付着成長
  - 微惑星 (~ km サイズ) の形成
  - 惑星集積, 巨大惑星のガス降着
  - 円盤ガスの晴れ上がり
- 微惑星形成後は比較的良く分かっている (らしい)
  - 重力で合体成長
    - 脱出速度  $> 100 \text{ m s}^{-1}$
  - ガス抵抗の影響小
- 微惑星以前が大問題





# 微惑星形成以前の原始惑星系円盤

- 降着円盤 (Lynden-Bell, 1969)
  - 円盤物質が内側へ輸送
    - 角運動量は外側へ
  - “異常” 粘性の存在
    - 乱流状態 (MRI 由来)
- 固体成分 (ダスト) の分離
  - 衝突合体による成長
  - ガス抵抗による落下
  - 蒸発, 再凝縮
- 惑星系形成の初期状態を決定
  - ガス・ダスト面密度, 温度, etc.
  - 惑星材料物質の組成分布

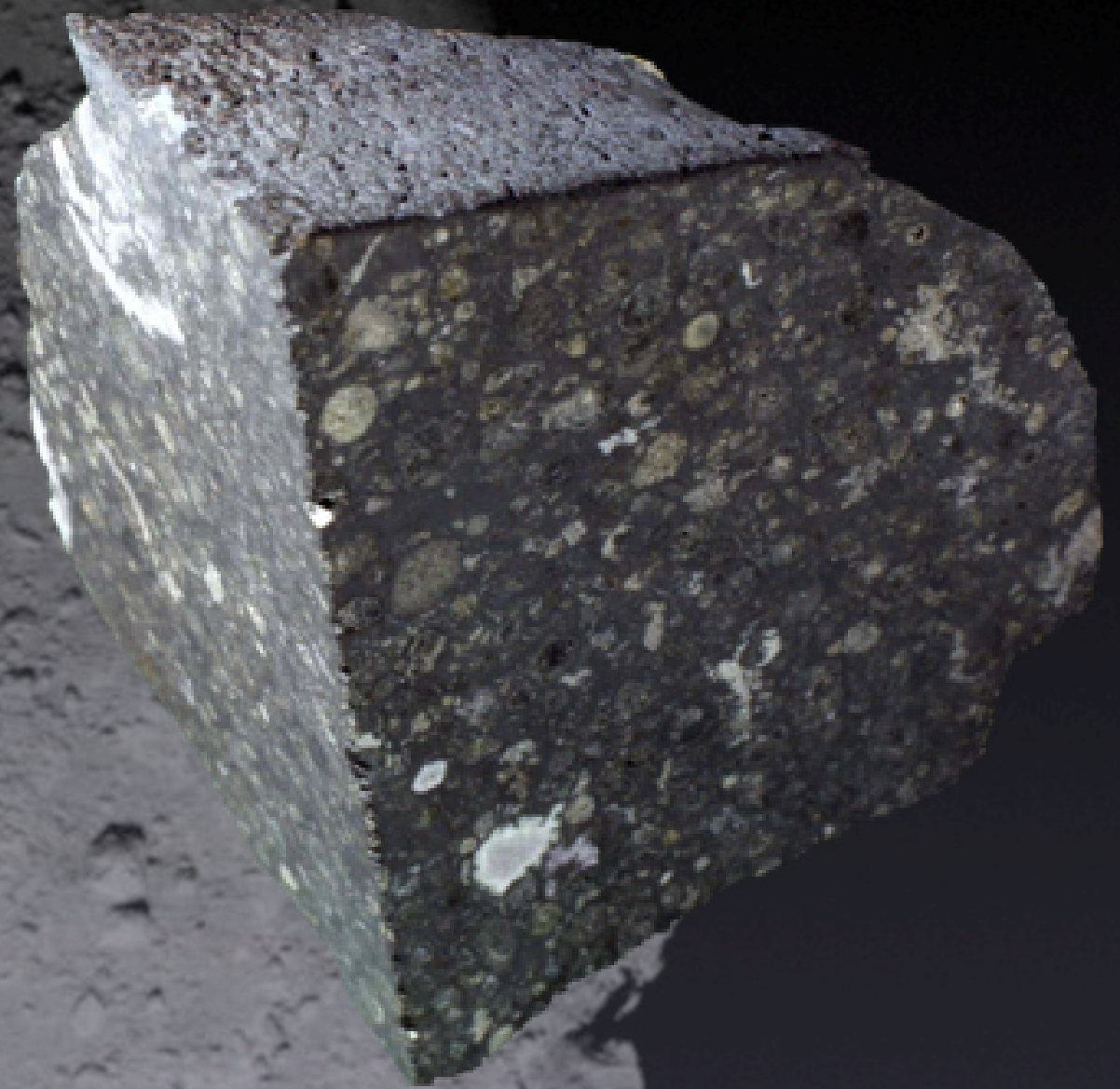


Dullemond et al. (2006)



# コンドライトの重要性

- 円盤生成物を集積したまま
  - 不揮発性元素組成が太陽と酷似
  - 小惑星 (微惑星の生残り) の欠片
    - 軌道計算, 分光観測から
  - 集積後分化 (融解) していない
- コンドライトの構成物質
  - コンドリユール (~ mm の顆粒)
    - 自由空間中でメルトが固化
  - 難揮発性包有物 (CAI, AOA)
    - 4567 Ma に形成, 高温凝縮物
  - Fe-Ni 合金
  - マトリックス (ガラス)

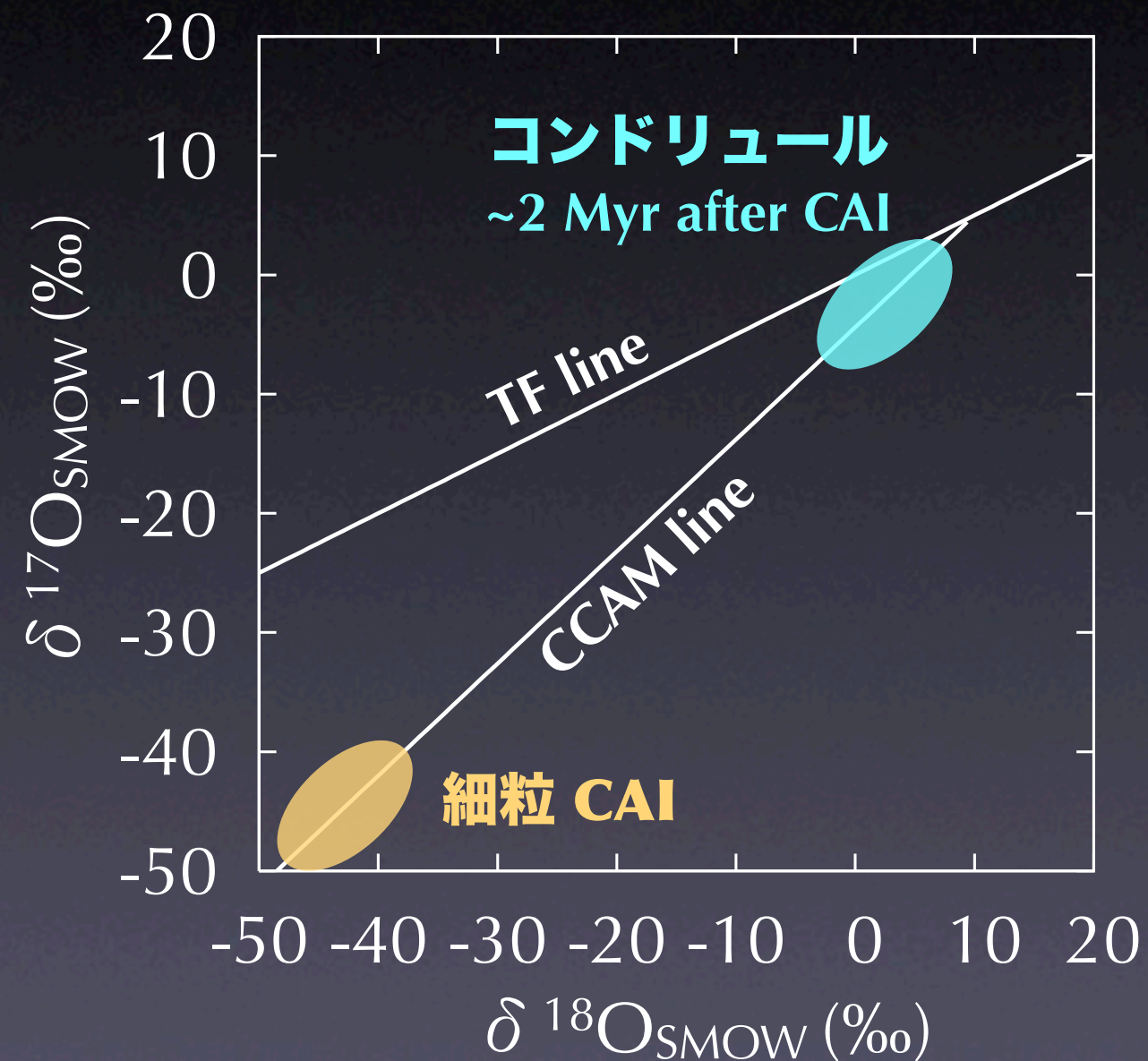


Allende 隕石  
(CV コンドライト)



# コンドライト物質の酸素同位体比

- なぜ酸素同位体に注目？
  - 豊富な元素存在度
    - 全元素中 3 位, 固体中で最多
  - 円盤環境下, 様々な形態で存在
  - トレーサーとして最適
- CAI : 非常に  $^{16}\text{O}$  に富む
- コンドリュール : 地球に類似
- 非質量依存分別
  - 蒸発, 凝縮, 化学反応では不可
  - $^{16}\text{O}$ -rich, -poor な物質の混合

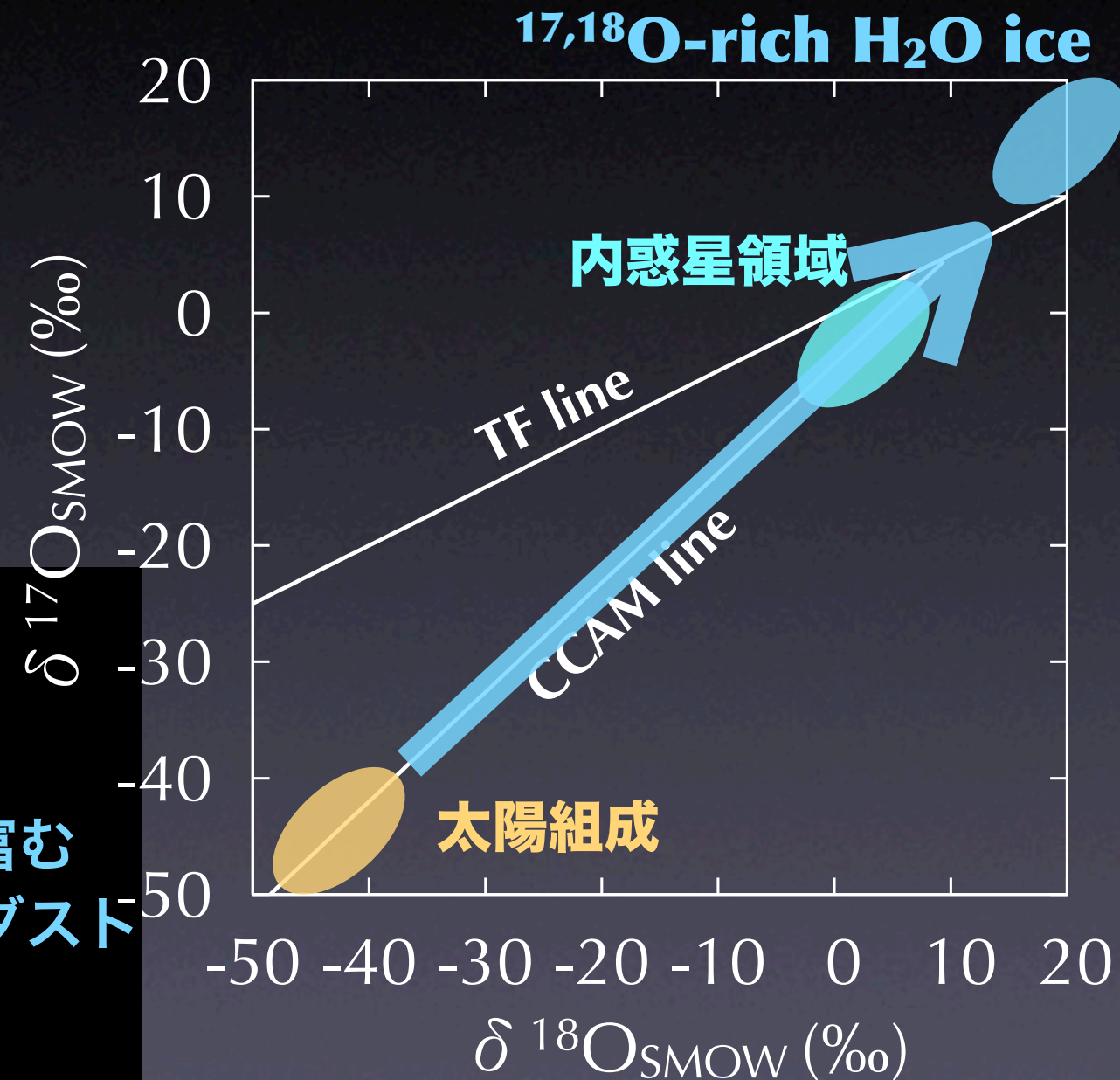
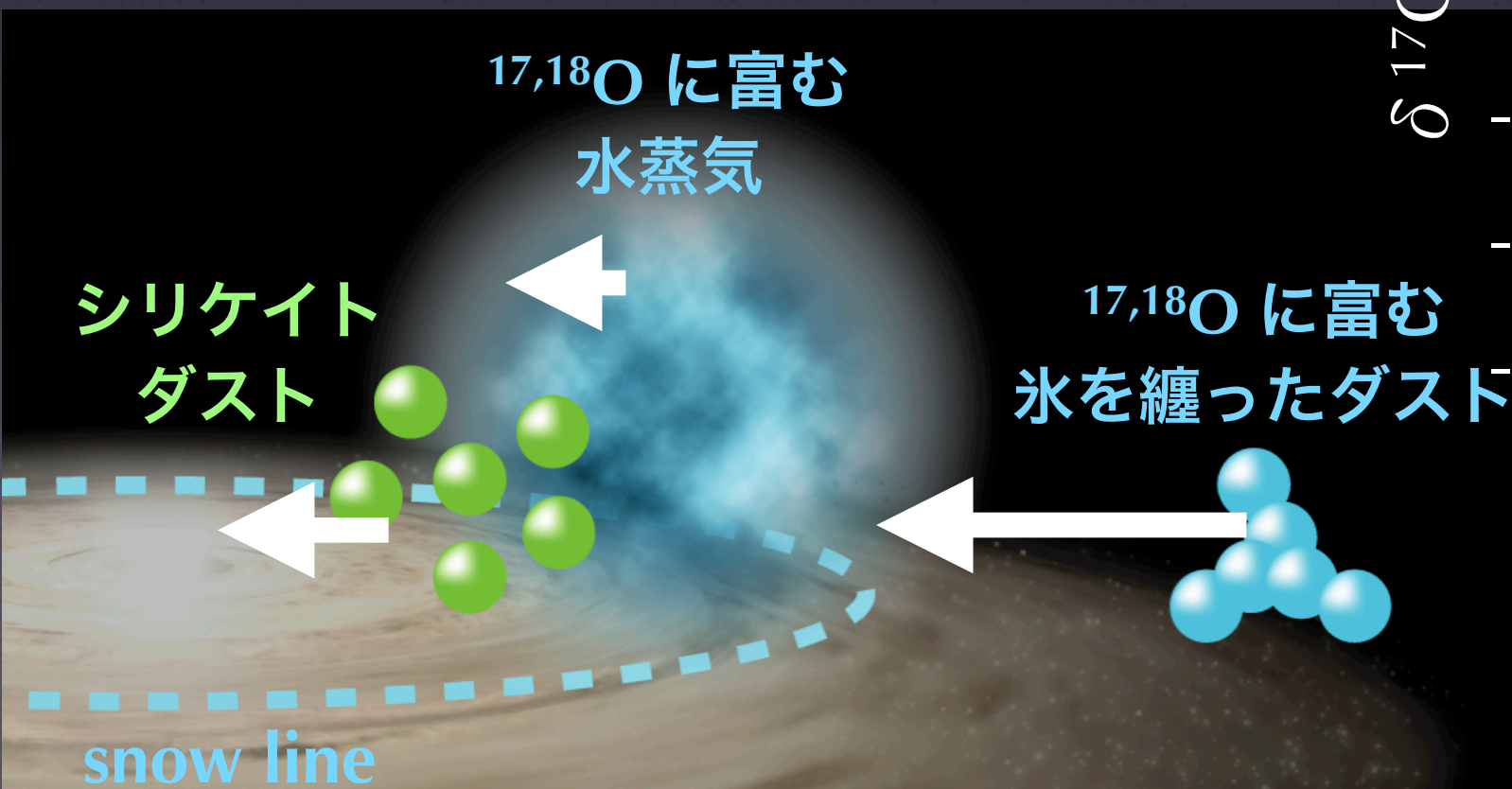




# H<sub>2</sub>O 濃集起源説 (Yurimoto & Kuramoto, 2004)

- 分子雲における光化学過程により, <sup>16</sup>O に乏しい H<sub>2</sub>O 形成
- 氷を纏ったダストがガス抵抗により動径落下
- 内惑星領域で蒸発, 濃集

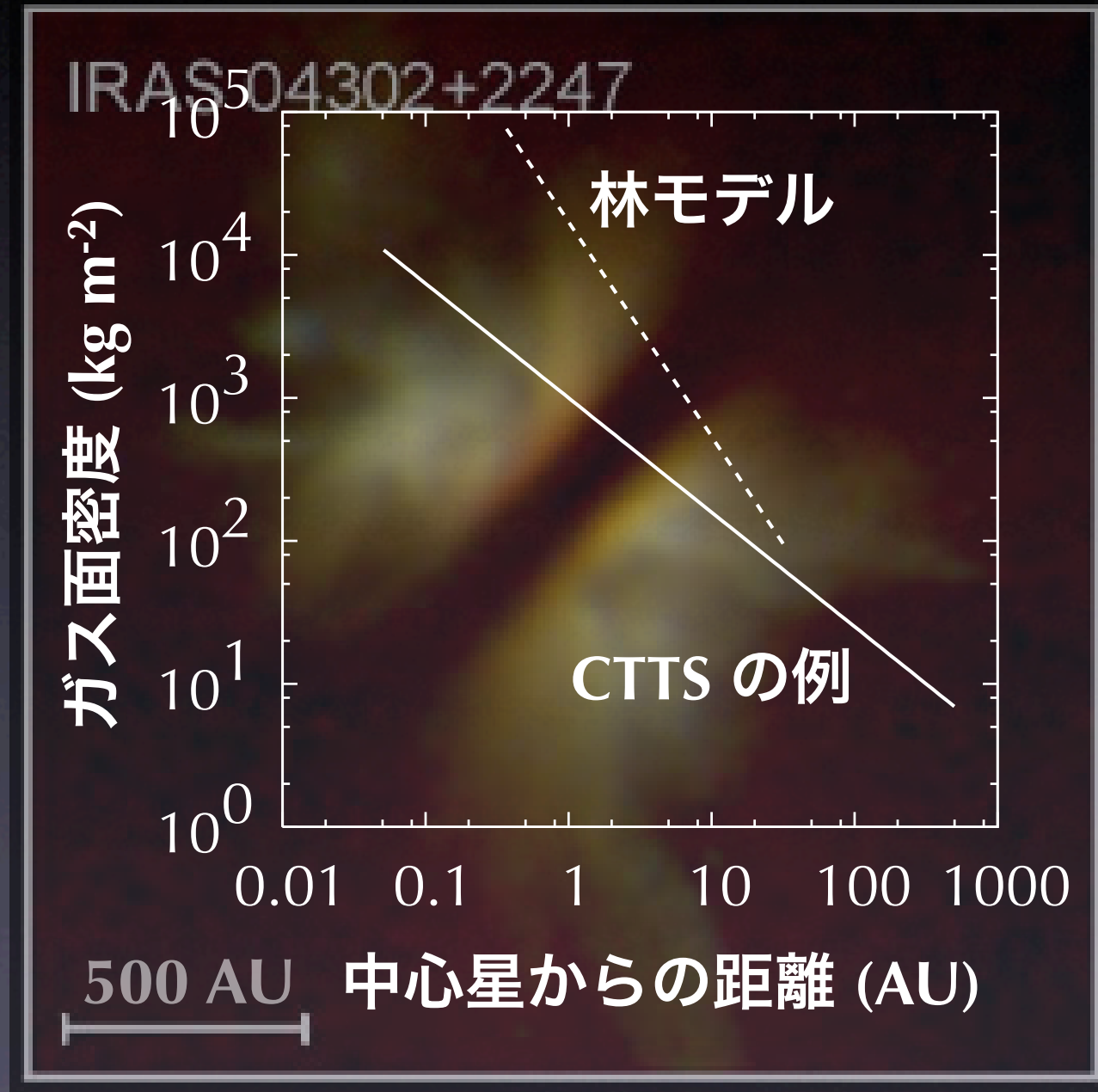
~ 2 Myr, 数倍の濃集が必要





# 残された課題

- ダストサイズの決定機構
- H<sub>2</sub>O 濃集の度合, 持続時間は氷ダストのサイズに依存
- 観測, 理論との整合性
  - 降着される円盤と太陽系の物質分布の差  
(Kitamura et al. 2002)
  - 微惑星形成は可能か？



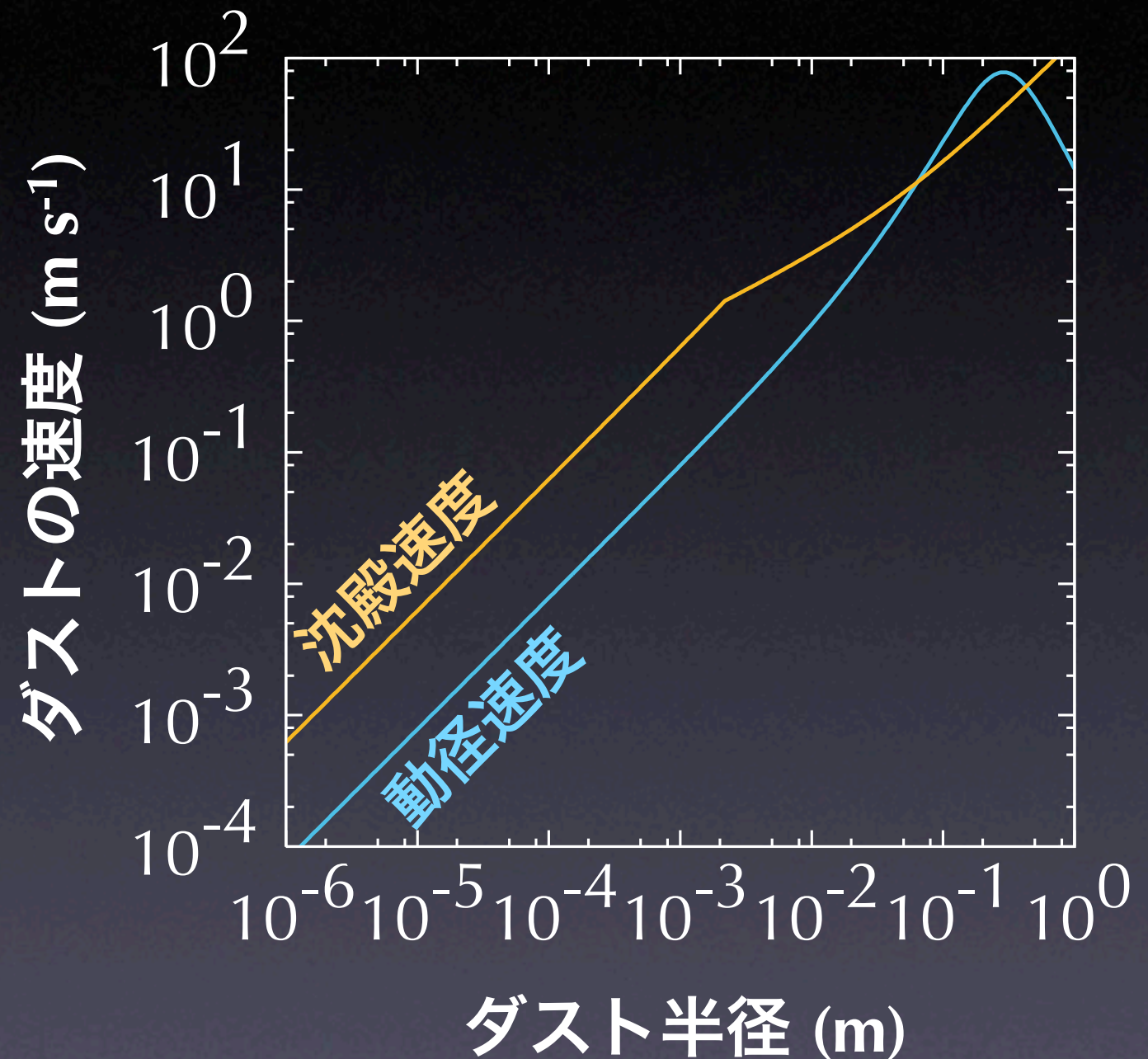
# 本研究の目的

- ダストサイズを決定した過程の考察
  - 付着確率の衝突速度依存性
  - H<sub>2</sub>O 氷とシリケートの付着特性の差
- H<sub>2</sub>O 濃集過程のシミュレーション
  - 現実的な円盤環境下で実現される濃集の度合, 持続時間
  - コンドライト物質と整合的か？
- 観測される円盤と最小質量モデルの相違, 微惑星形成過程への示唆



# 円盤ガス中でのダスト運動

- ダストは圧力勾配を感じないため、ガスとは異なる速度で運動しようとする
- ガス抵抗により、結局ある終端速度で運動
  - $< 10$  cm ... Epstein 則
  - $> 10$  cm ... Stokes 則
- ダスト層の典型的厚さ
  - 乱流による巻き上げと沈殿の釣合により決定
- ダスト間に相対速度が生まれることにより、衝突合体し成長

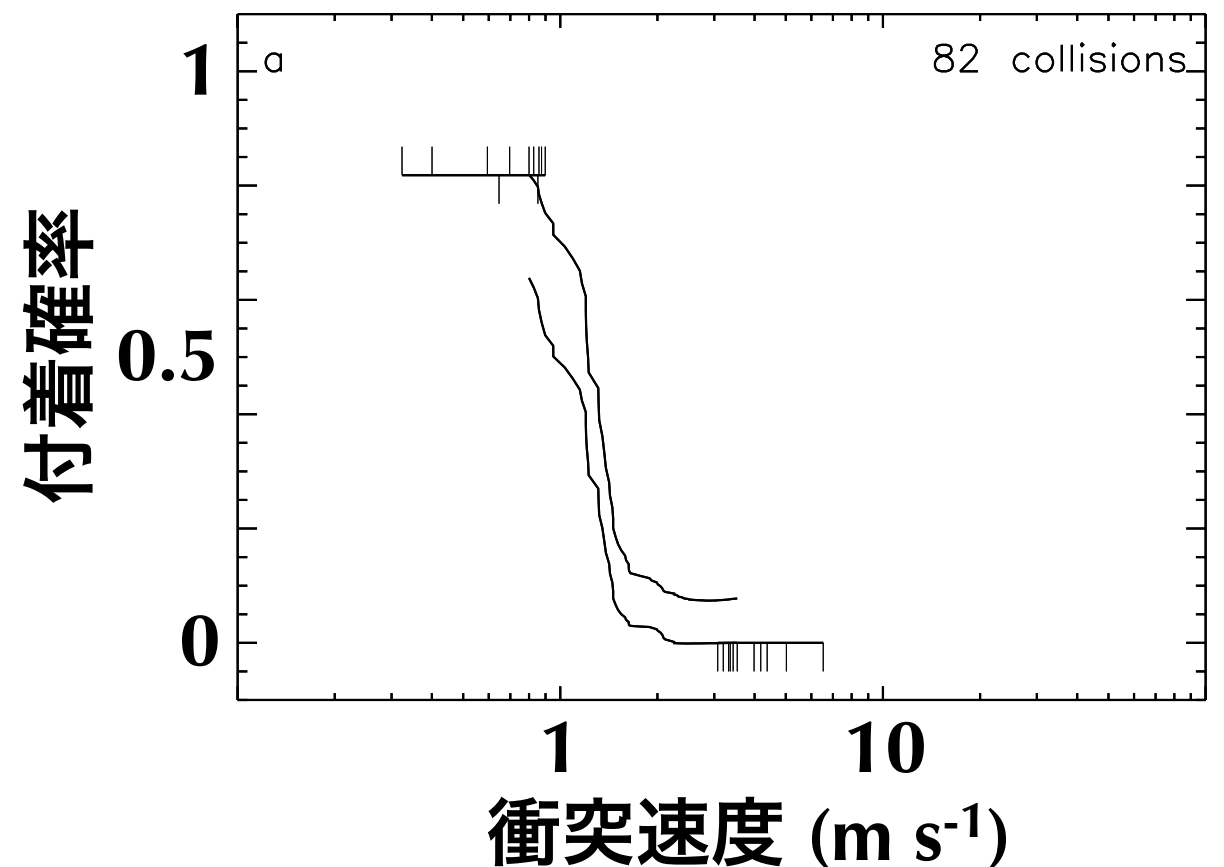
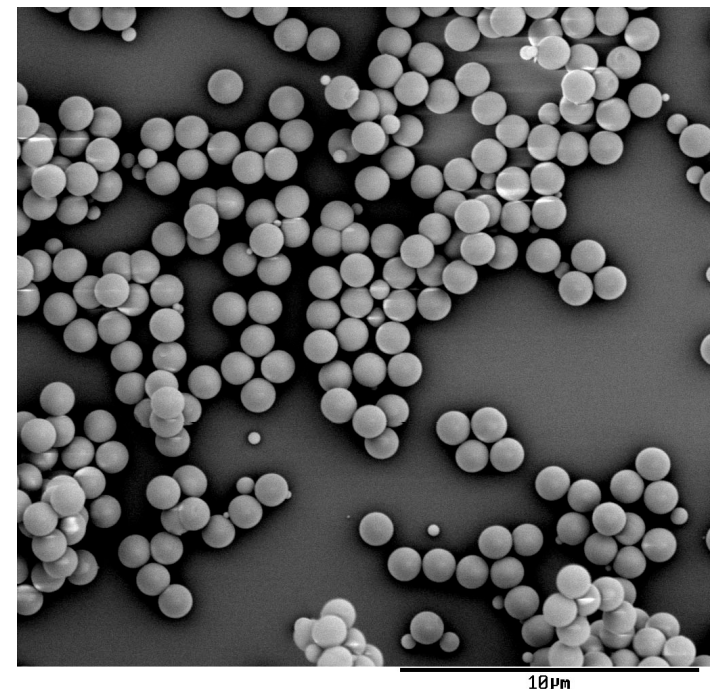


2 流体近似 (Nakagawa et al. 1986)  
を用いて計算



# ダストの付着確率の衝突速度依存性

- “付着限界速度” が存在  
(Blum & Wurm 2000)
- これ以上の衝突速度では付着確率が急激に減少
- $\sim 1 \mu\text{m}$  の  $\text{SiO}_2$  粒子 :  $\sim 1 \text{ m s}^{-1}$
- **付着成長で達しうるダストサイズに上限を課す**
  - 衝突速度は成長に伴い増加
- 限界速度がダスト組成に依存  
(Chokshi et al. 1993)
- **氷の限界速度はシリケートに比べ 1 桁程度大きい**

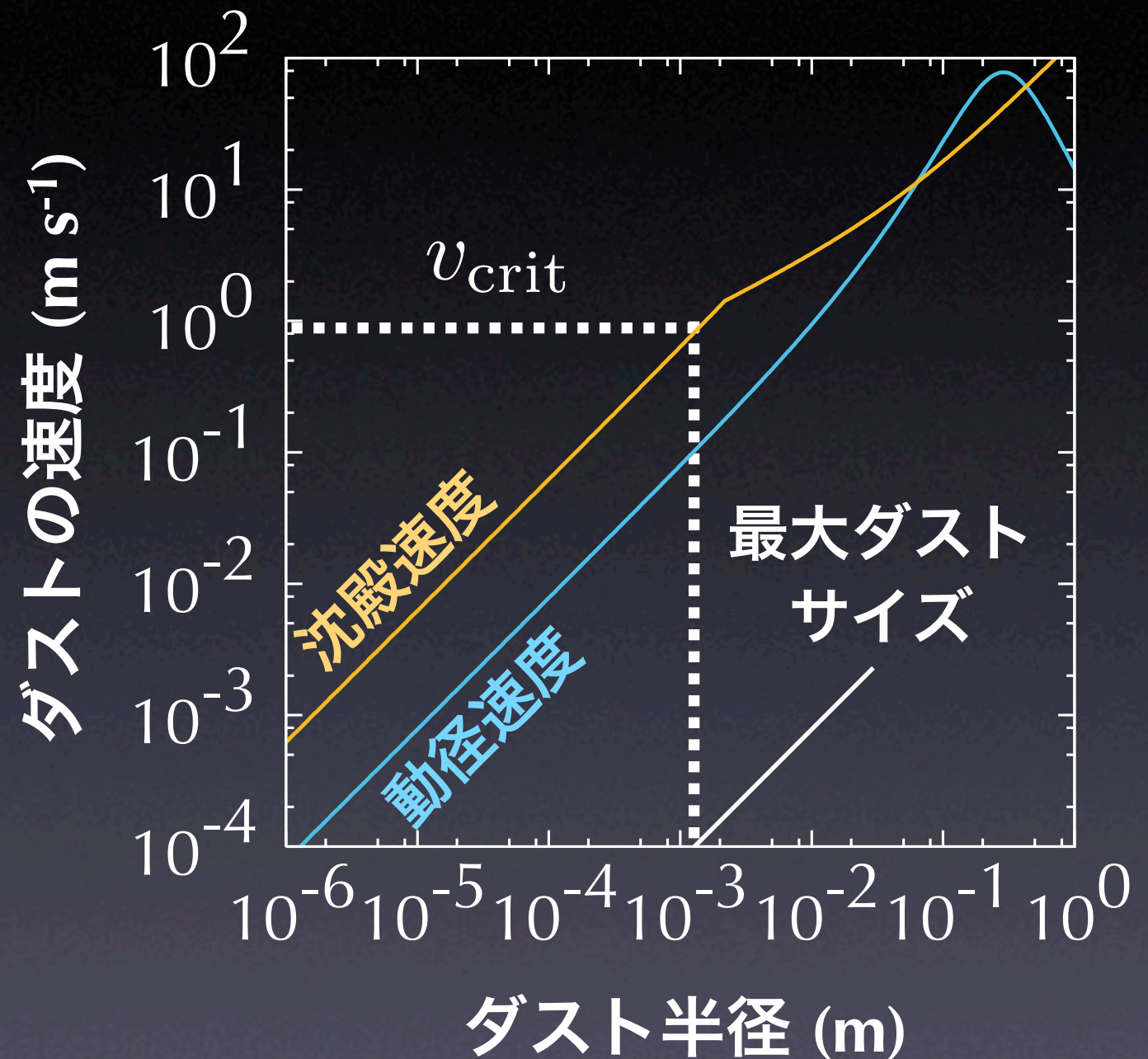


Poppe et al. (2000)



# ダストサイズの決定機構

- 大きなダストが微小なダストを掃き集めて成長
  - 微小ダストはガスと同期
  - 衝突速度  $\equiv$  大きなダストの沈殿速度
- 衝突速度 = 付着限界速度で成長停止
- 典型的ダストサイズを表す
  - 成長時間  $\ll$  落下時間
  - 大きなダストが質量の大部分を占有 (Weidenschilling 1998)



2 流体近似 (Nakagawa et al. 1986) を用いて計算



# 円盤物質の再配置過程

- 円盤ガスの輸送方程式

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

- 固体成分  $i$  (シリケート,  $\text{H}_2\text{O}$ ) の固気相における輸送方程式

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

$$\frac{\partial \Sigma_{i,\text{sol}}}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Sigma_{i,\text{sol}} \nu r^{1/2} \right) \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Sigma_{i,\text{sol}} v_r r \right) + S_{\text{cond}} - S_{\text{evap}}$$

- 乱流粘性:  $\alpha$ -model (Shakura & Sunyaev, 1973)

$$\nu = \alpha c_s H_g$$

- ダストの動径速度: 最大ダストサイズのもので代表



# 円盤温度分布

- 乱流の強さ, ダスト動径速度, 蒸発領域の位置を決定

- 有効温度: 粘性散逸 + 中心星照射とバランス

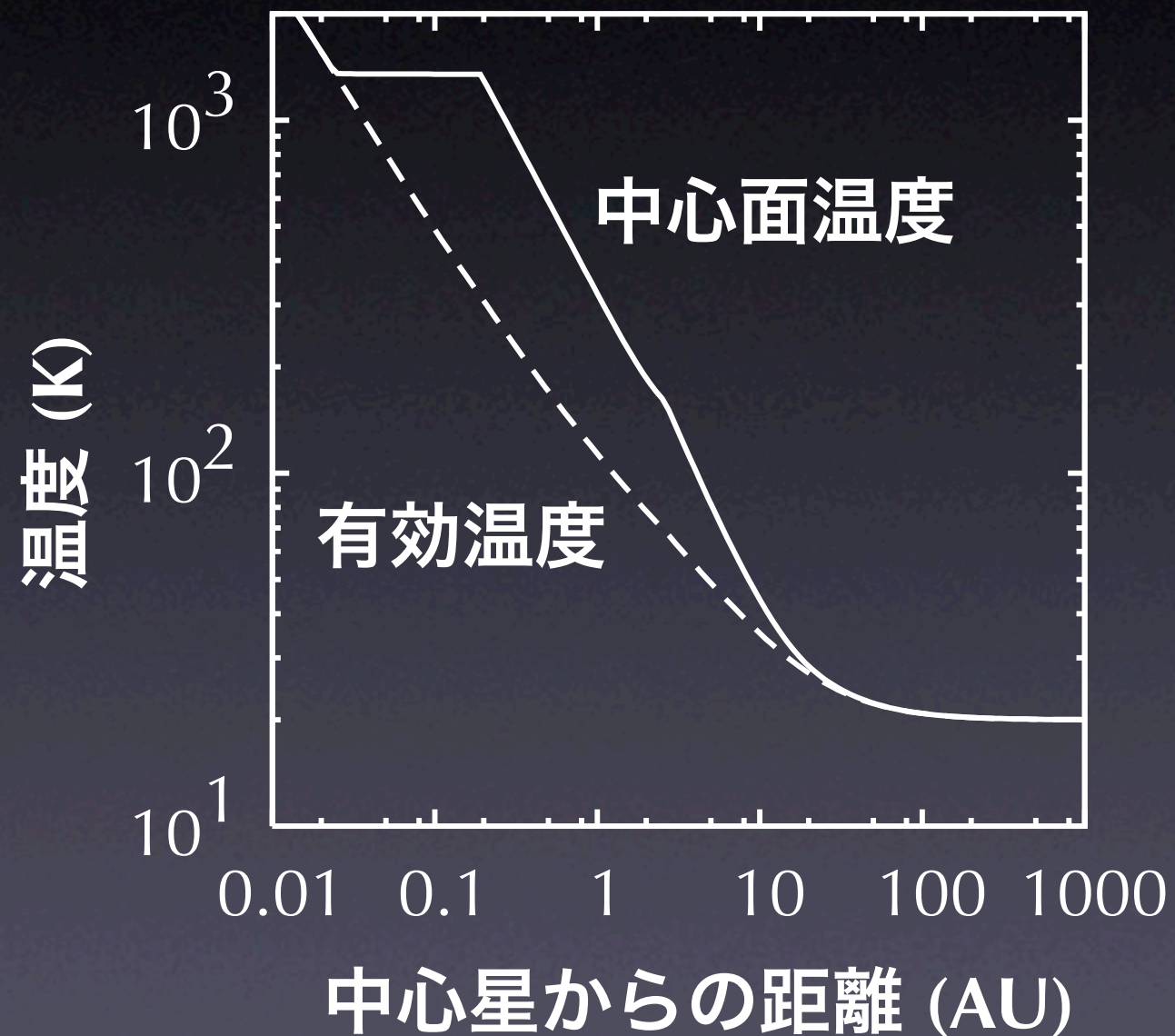
$$\sigma_{\text{SB}} T_{\text{eff}}^4 = \frac{9}{8} \Sigma_{\text{g}} \nu \Omega_{\text{K}}^2 + \sigma_{\text{SB}} T_{\text{irr}}^4$$

- 中心面温度

- 平行平板近似により計算

$$T_{\text{mid}} = T_{\text{eff}} \left( \frac{3}{8} \kappa \Sigma_{\text{g}} + \frac{1}{2} \right)^{1/4}$$

- Cassen (1994) の吸収係数, ダスト/ガス比の変化を考慮





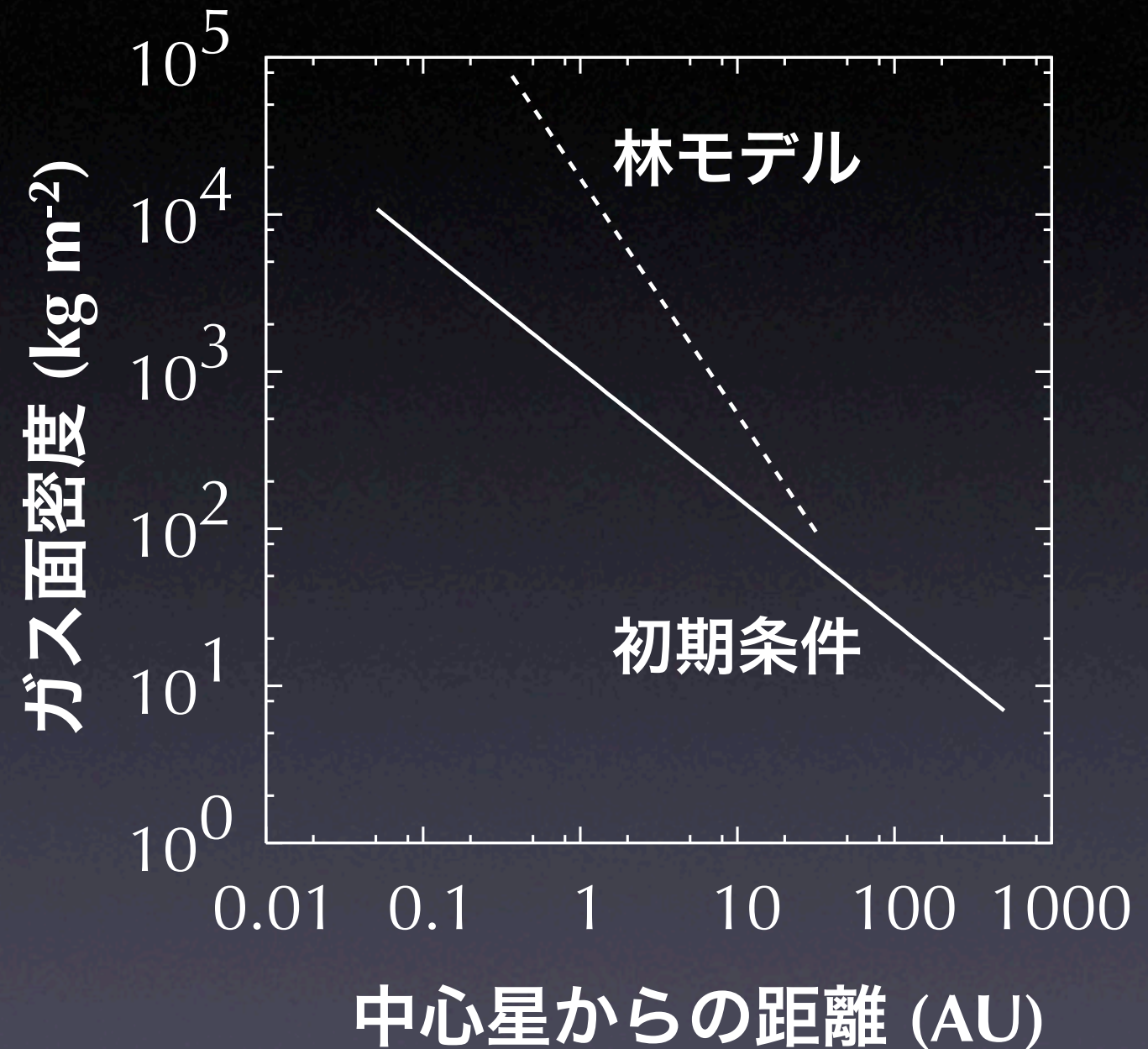
# 用いる円盤パラメータ

- CTTS の観測に基づいて決定 (Kitamura et al. 2002, McCaughrean & O'Dell 1996)

---

総質量	$0.1 M_{\text{solar}}$
半径	500 AU
面密度のベキ	0.8
ダスト/ガス比	$10^{-2}$
$\alpha$	$3 \times 10^{-3}$
中心星質量	$1 M_{\text{solar}}$
中心星半径	$3 R_{\text{solar}}$
中心星温度	4000 K

---

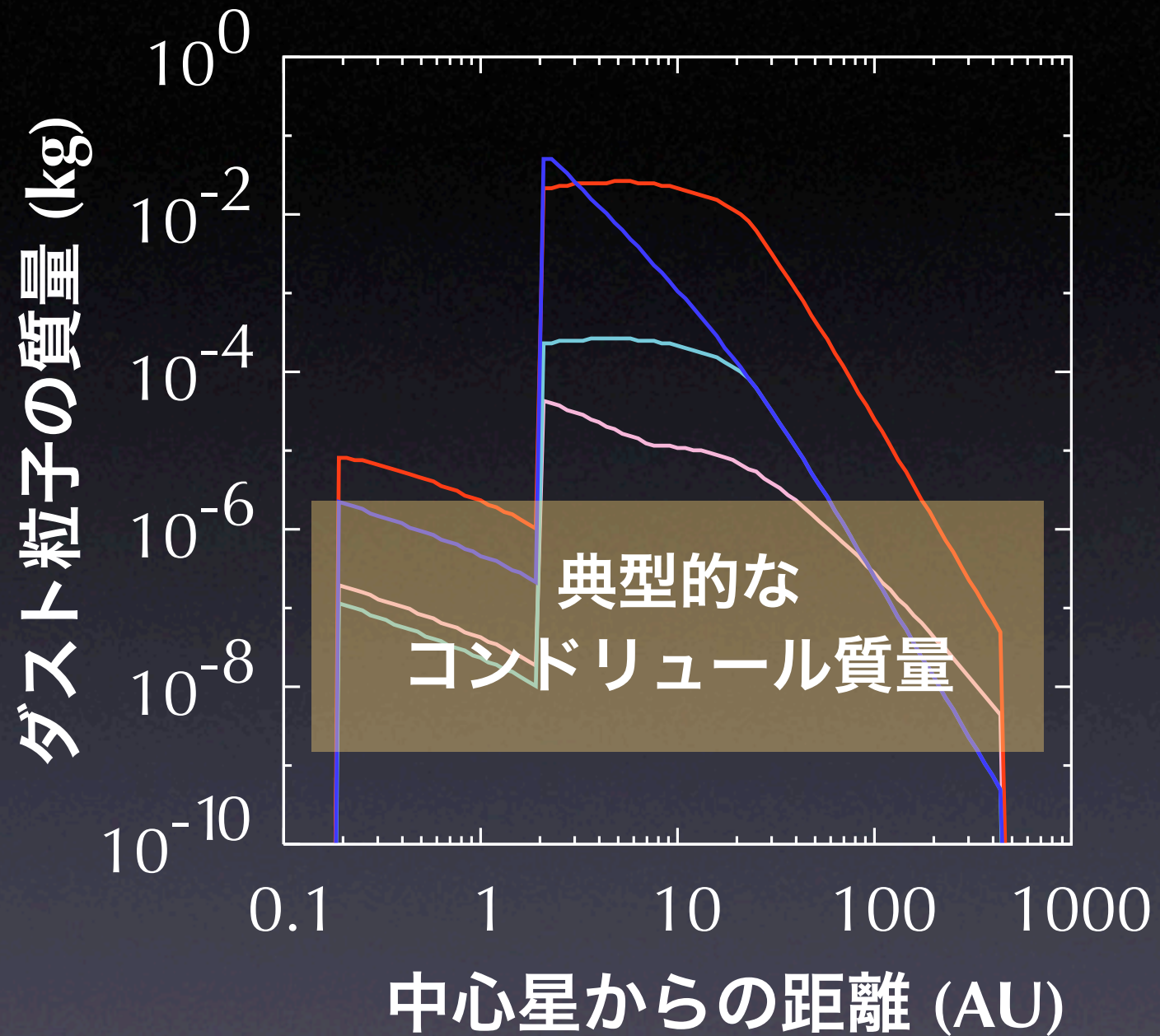


$$\Sigma_{\text{g}}(r) \simeq 1000 \times \left( \frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^{-0.8}$$



# 結果：ダストの大きさ

- $t = 0$  のスナップショット
- snow line で組成が変化
  - 内側：シリケイト
  - 外側：+ H<sub>2</sub>O 氷マントル
- シリケイトダスト
  - 限界速度  $0.1 \sim 1 \text{ m s}^{-1}$  で,  
コンドリュール質量
    - 実験値と同程度
- 氷を纏ったダスト
  - 半径, 落下速度が 1 桁大

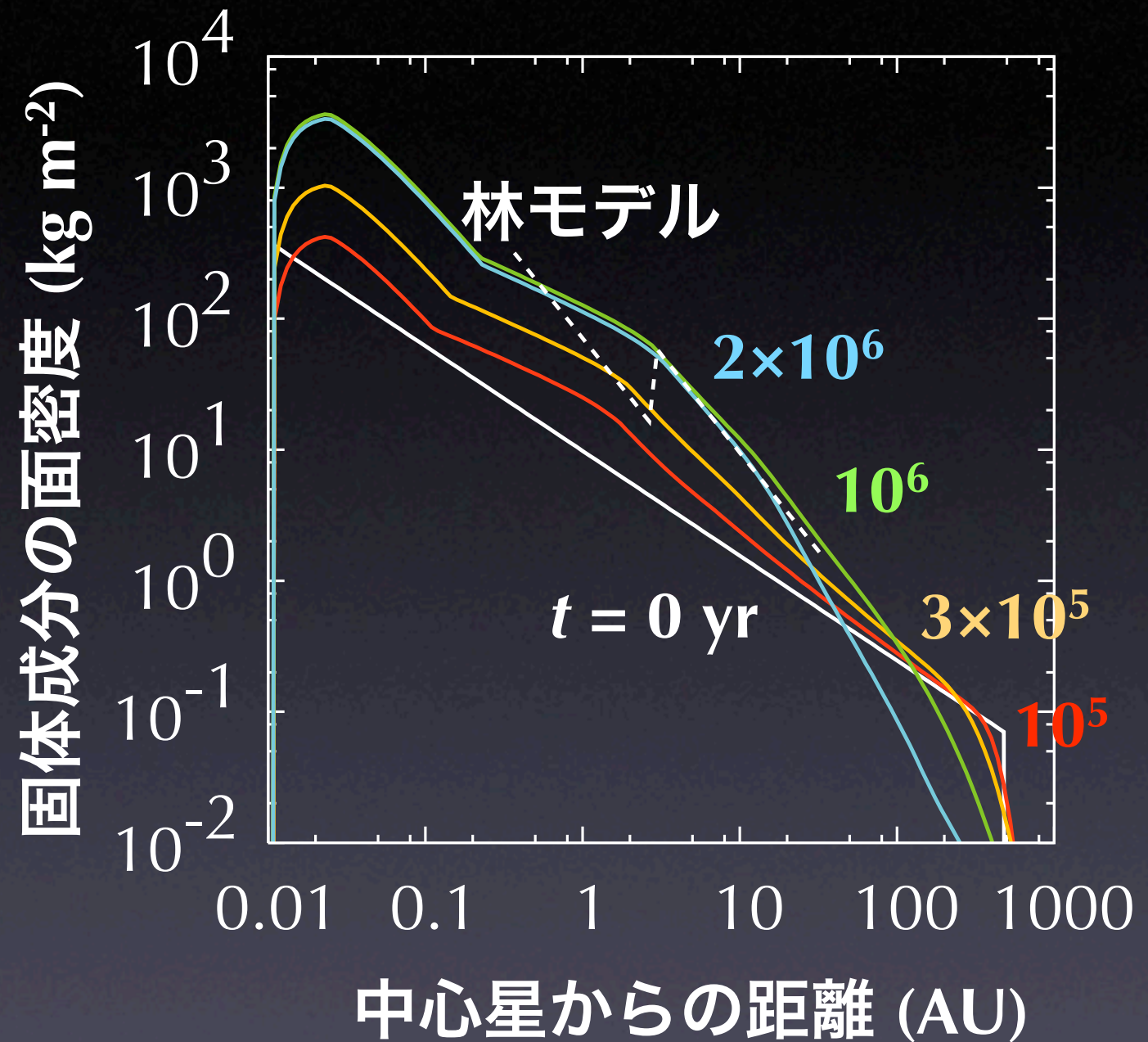


シリケイトの 限界速度 ( $\text{m s}^{-1}$ )	0.1	0.4	0.4	1
充填率	0.1	0.1	1	1



# 結果：固体成分の面密度分布の進化

- 円盤外縁領域
  - ダスト落下により時間とともに縮小, 面密度減少
- 惑星形成領域 (< 50 AU)
  - 外縁領域から固体物質が供給, 面密度増大
  - 惑星形成に必要な固体量が保持
  - 面密度分布のベキは急になる傾向



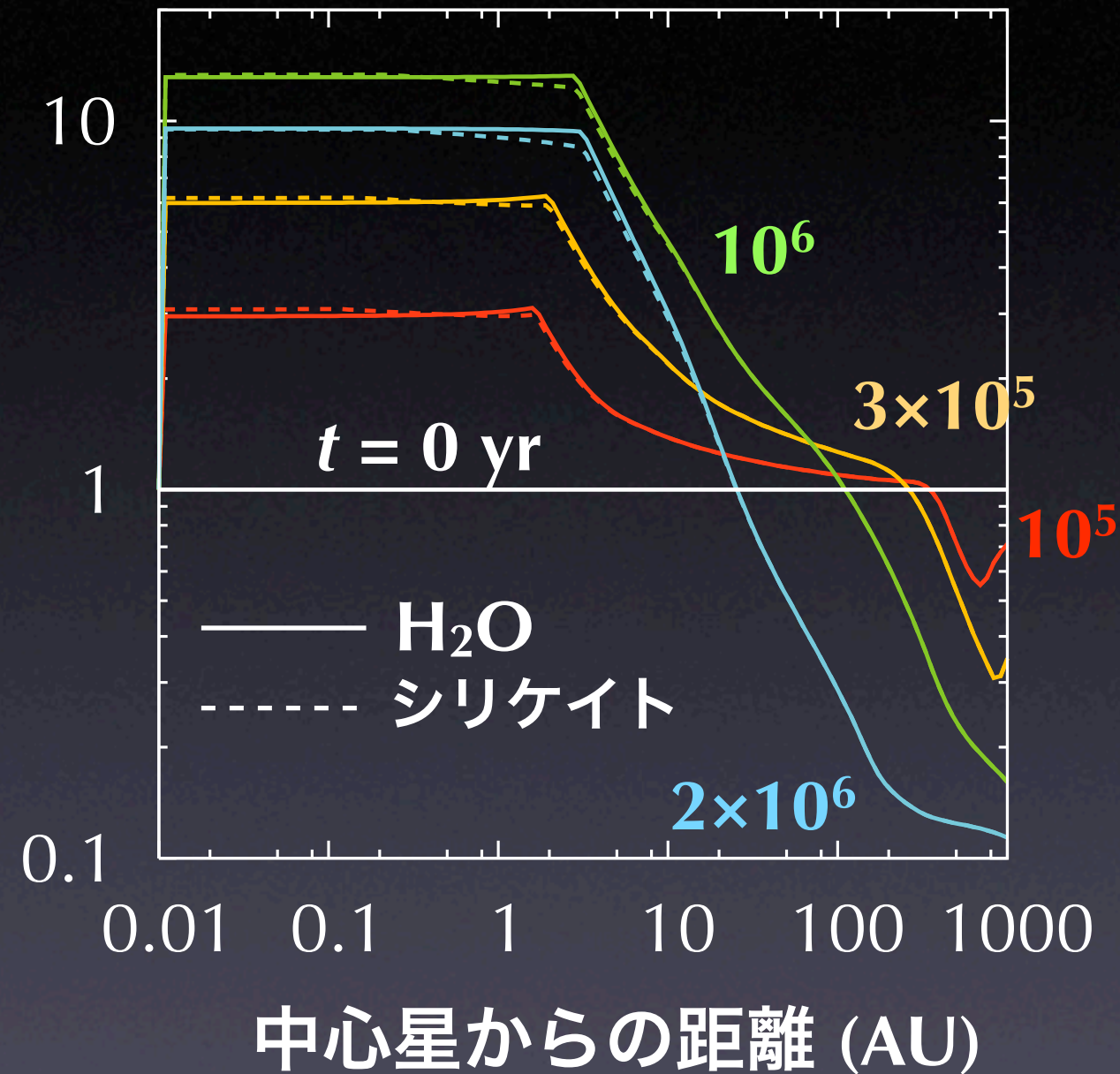
シリケイトの限界速度  $0.1 \text{ m s}^{-1}$   
ダストの充填率 0.1



# 結果：H<sub>2</sub>O, シリケイト成分の濃度分布

- H<sub>2</sub>O 濃度
  - 内惑星領域で 2 Myr 間 太陽組成の数倍濃集
  - 酸素同位体異常の H<sub>2</sub>O 濃集起源モデルと合致
- シリケイト成分の濃度
  - サイズが小さいためガスと分離せず濃集
  - snow line の内側で, ダスト/ガス比 : ~ 0.1

濃度 (太陽組成で規格化)



シリケイトの限界速度  $0.1 \text{ m s}^{-1}$   
ダストの充填率 0.1



# まとめ

- 氷を纏ったダストによる内惑星領域への  $\text{H}_2\text{O}$ , シリケートの供給
  - 酸素同位体組成を説明するのに適当なダスト落下
    - タイムスケール  $\sim 2$  Myr, 数倍の  $\text{H}_2\text{O}$  濃集
  - シリケートも濃集することにより, 高いダスト/ガス比
- 観測される円盤と太陽系の固体分布の差
  - ダストの存在領域が数 Myr かけて徐々に収縮
  - 外縁領域からの固体の供給により, 分布のベキが急化