

# タンデム惑星形成理論 京都モデルの枠組みに新物理

戎崎俊一

今枝佑輔

RIKEN

# 星は星雲から生まれる

- 分子雲=非常に密度が濃い星雲
  - 密度 $\sim 1000$  protons per  $\text{cm}^3$
  - 大きさ $\sim$ 数光年
  - 分子が (e.g. CO)が形成される:高密度のために星間紫外線から遮断される
  - 分子のミリ波放射により冷却
- 重力 $>$ ガス圧
  - 重力崩壊
  - 中心に自由落下 (1 Myr)
  - 原始星誕生



# 原始星 = T Tauri型星

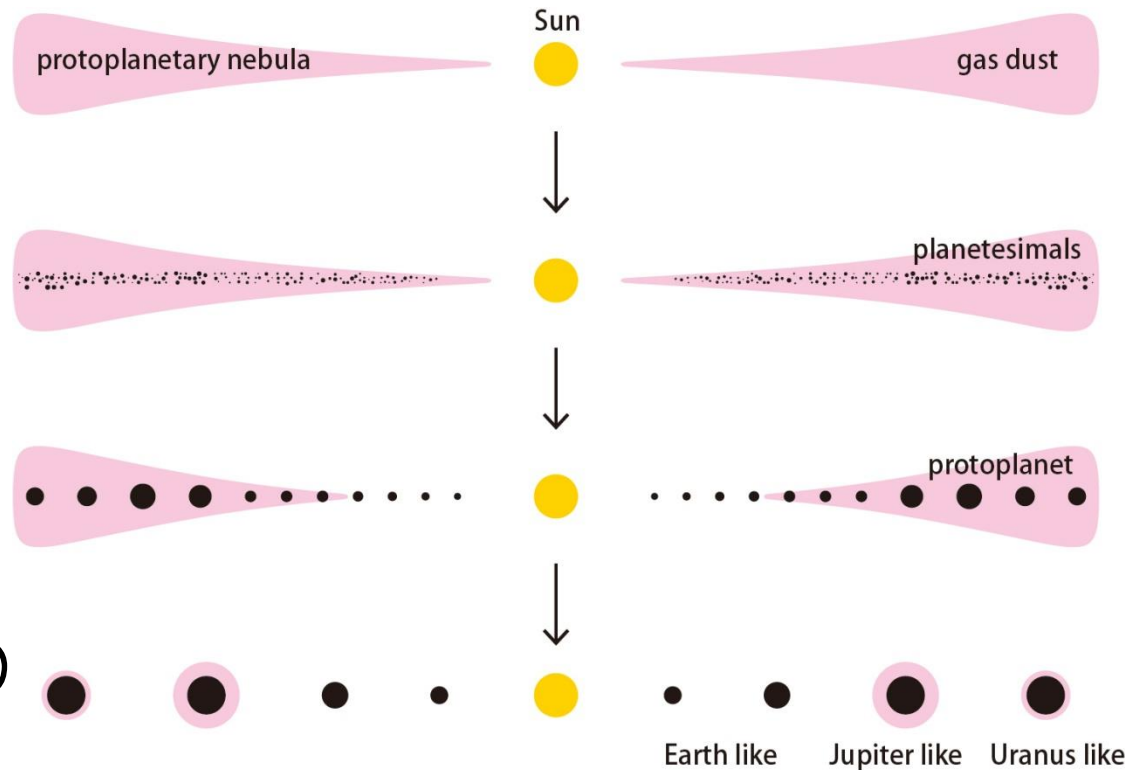
- 可
- ガ
- 強
- 高



<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html>

# 惑星形成標準モデル

1. 固体微粒子が静穏円盤の中心面に落下して小石サブ円盤を形成
2. 固体粒子がサブ円盤内で重力不安定性を起こして微惑星となる
3. 微惑星がお互いの衝突で成長して惑星になる



# 標準モデルの仮定

- 1. ガス円盤内に乱流はない**
  - 磁気回転不安定
- 2. 固体成分の重力不安定**
  - よく調べると柱密度が足りない
- 3. 固体の動径移動はない**
  - 固体粒子は結構移動する
- 4. 相互衝突による成長**
  - 惑星に成長するには遅すぎる

# 我々のアプローチ

## 原始星の磁気活動を考慮する

- 原始星磁場による円盤の終端
  - アルフベン半径
  - 磁気乱流KH/RT不安定
    - 宇宙線の閉じ込め
    - 縦磁場の拡散
  - 固体微粒子の溶融
    - CAI/chondrule/matrix
- 原始星による電離放射
  - UV and X-ray (恒星表面かアルフベン半径)
    - 光電離蒸発
  - 荷電粒子 (宇宙線) →円盤内部を直接電離
- 恒星風
  - 粒子の循環と成長
  - 隕石のアイソトープ比との比較

# 式と仮定

- **1D 降着円盤**

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r} - \dot{\Sigma}_{pe} = 0, \quad \dot{M} = 6\pi r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\Sigma v r^{1/2})$$

- **定常状態** constant  $\dot{M}$ :

- **自己加熱**:  $T_m^4 = \frac{3\dot{M}\Omega_K}{8\pi\sigma} \left( \frac{3}{4}\tau + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) + T_r^4, \quad \tau = \kappa\Sigma/2$

- **磁気回転不安定**

$$\Lambda = \frac{2c_s H}{\eta \Omega_K \beta_z}, \quad \eta = 2.3 \times 10^3 \left( \frac{T}{300 \text{ K}} \right) x^{-1}$$

$$\alpha = 0.01 (\Lambda > 1) \quad \alpha = 0.001 (\Lambda < 1)$$

- **電離**: 銀河宇宙線、恒星宇宙線、放射性元素、熱電離

- **再結合**: 粒子表面

- $\beta_z = 8\pi P_g / B_z^2 = 200 (R < 2\text{AU}), B_z \propto r^{-2} (R > 2\text{AU})$

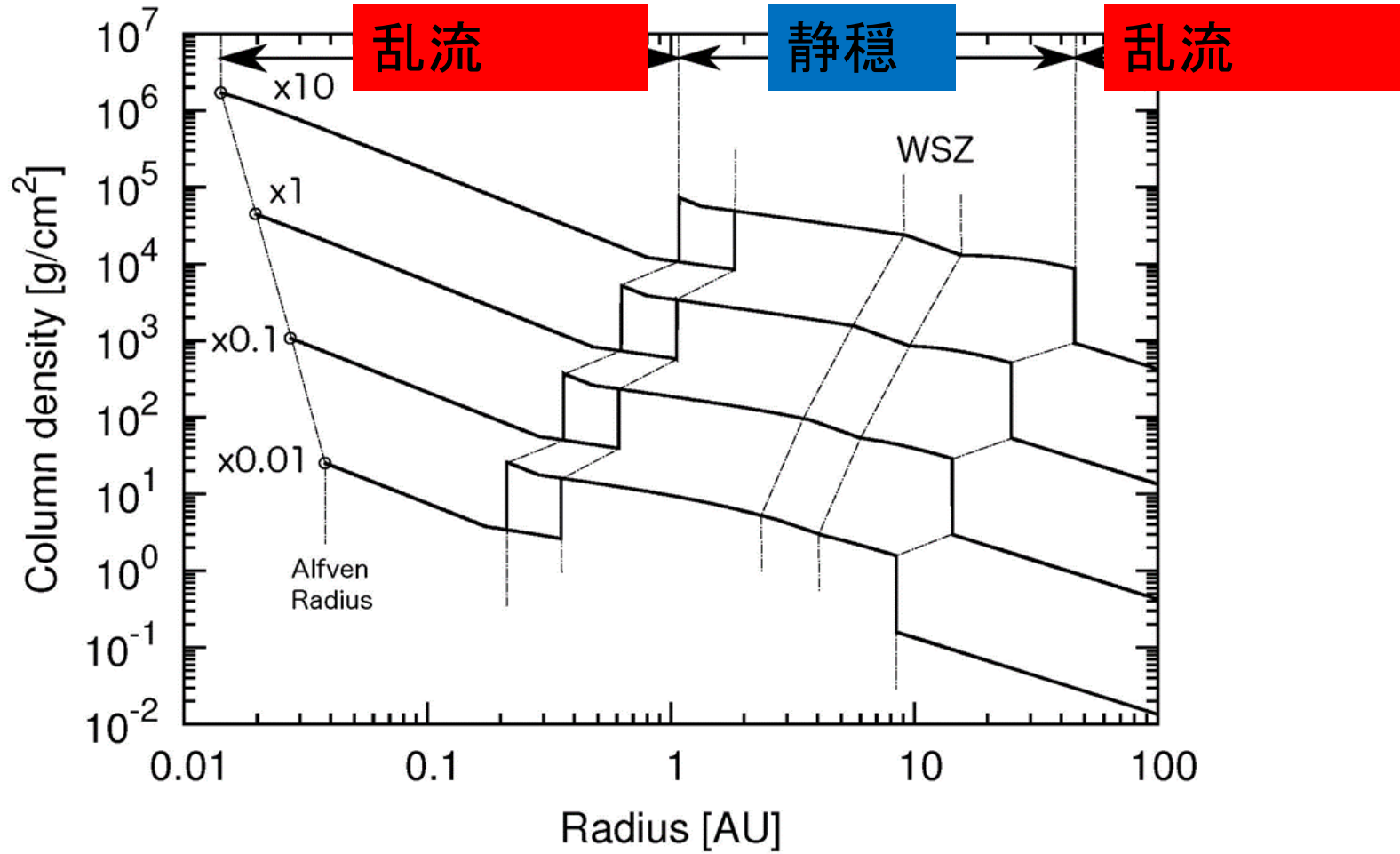
- 恒星磁場によるトランケーション: Alfvén Radius

# 結果

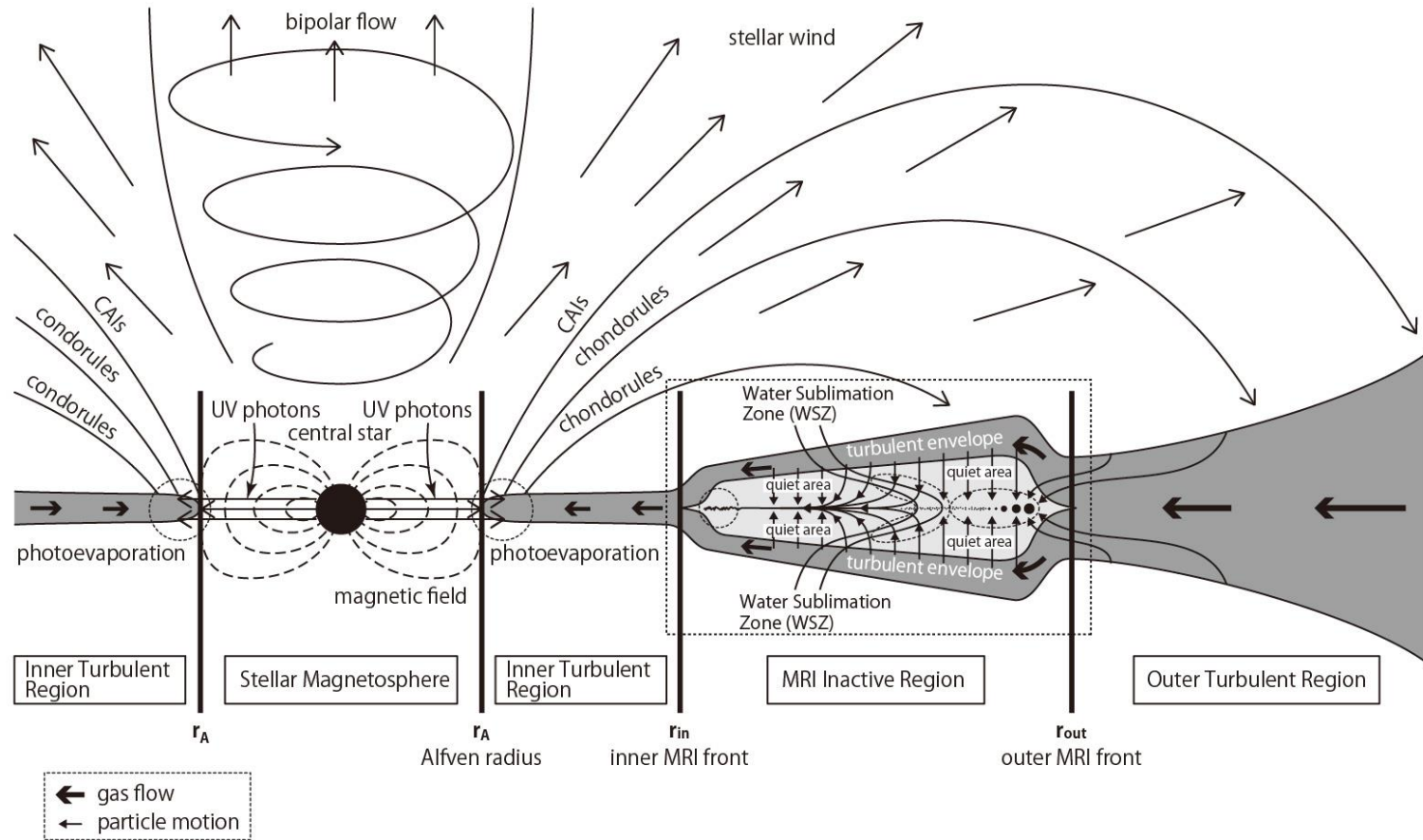
- **円盤 =**  
**外部乱流領域 +**  
**MRI不活発領域 (静穏領域) +**  
**内部乱流領域**
- **二つの境界:**  
**MRI不活発 / 乱流**



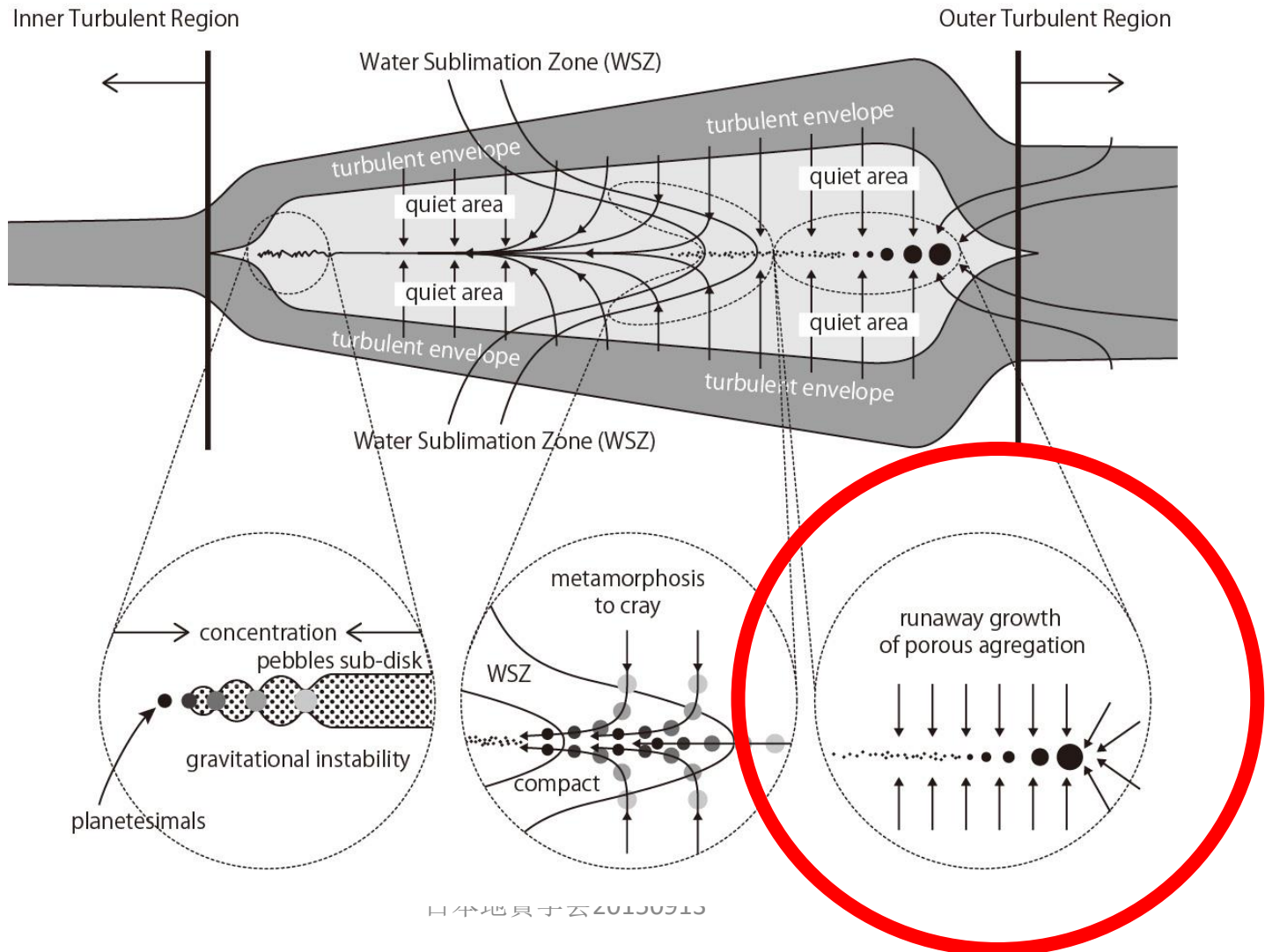
# 柱密度



# Tandem Formation of Planetesimals



# Tandem Formation of Planetesimals

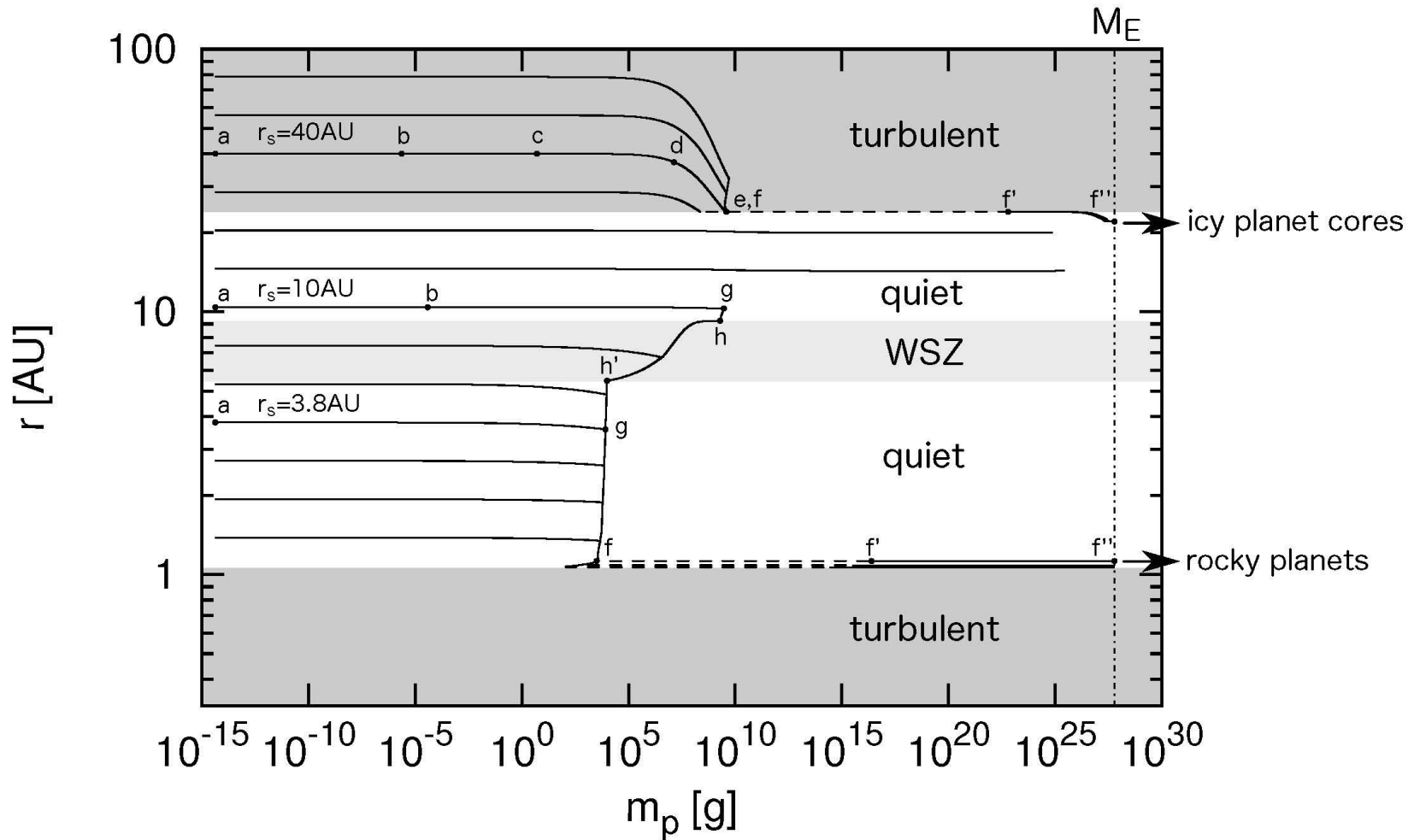


# 外側の境界～5-30AU

- **水の昇華領域の外→多孔性氷粒子**  
**=巨大雪片 (Okuzumi et al. 2012)**
  - 非常に低密度～ $10^{-5}$ - $10^{-4}$  g cm<sup>-3</sup>
  - 非常に低速の衝突
  - メートルサイズの困難がなくなる
- **暴走的に成長**
  - 薄い**粒子サブ円盤**を形成
  - 重力崩壊→**氷の微惑星**
  - 100万年以内に地球サイズに成長

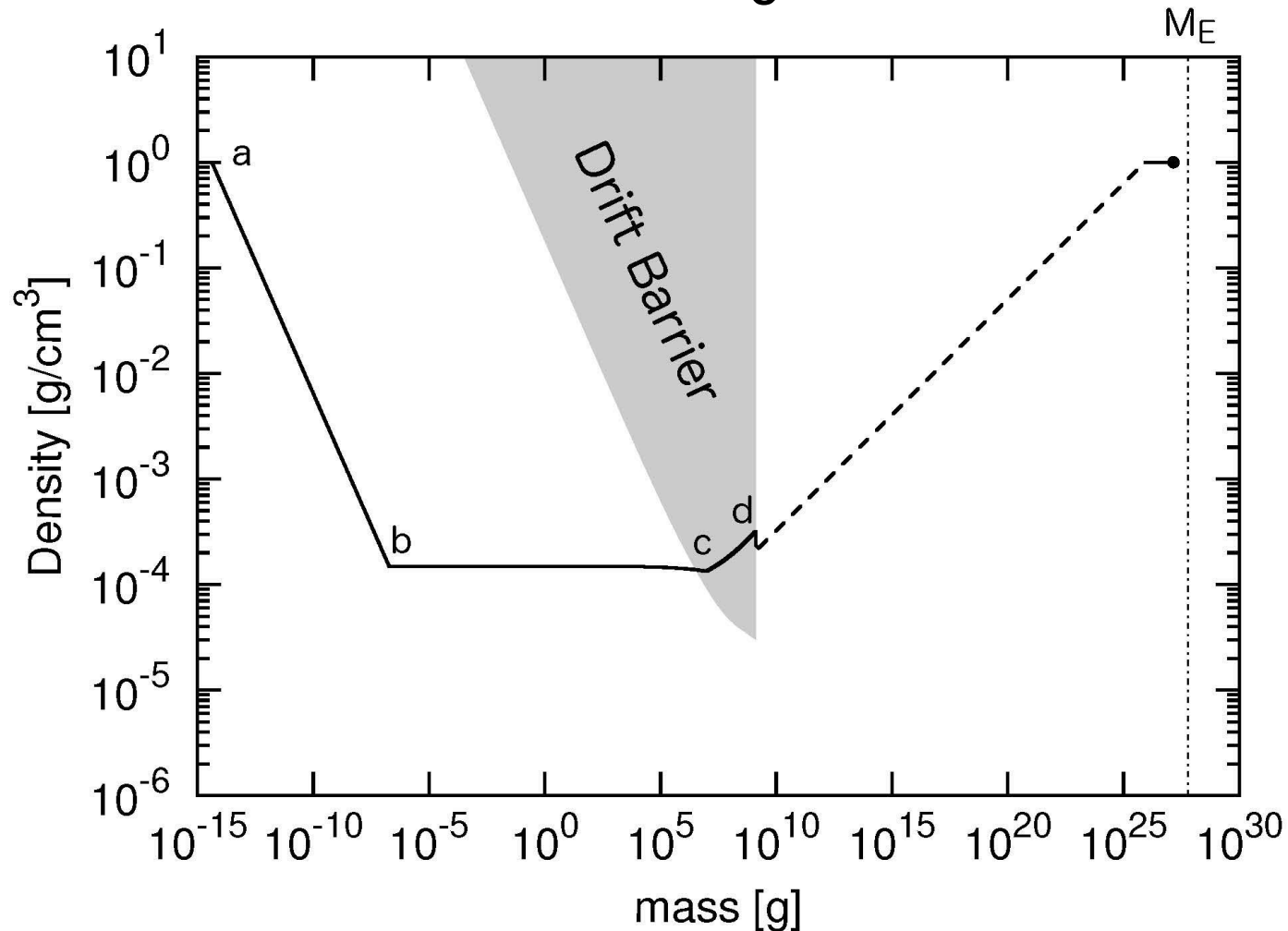
# Porous aggregation runaway growth

$10^7 \text{ Ms yr}^{-1}$



# Porous aggregation runaway growth

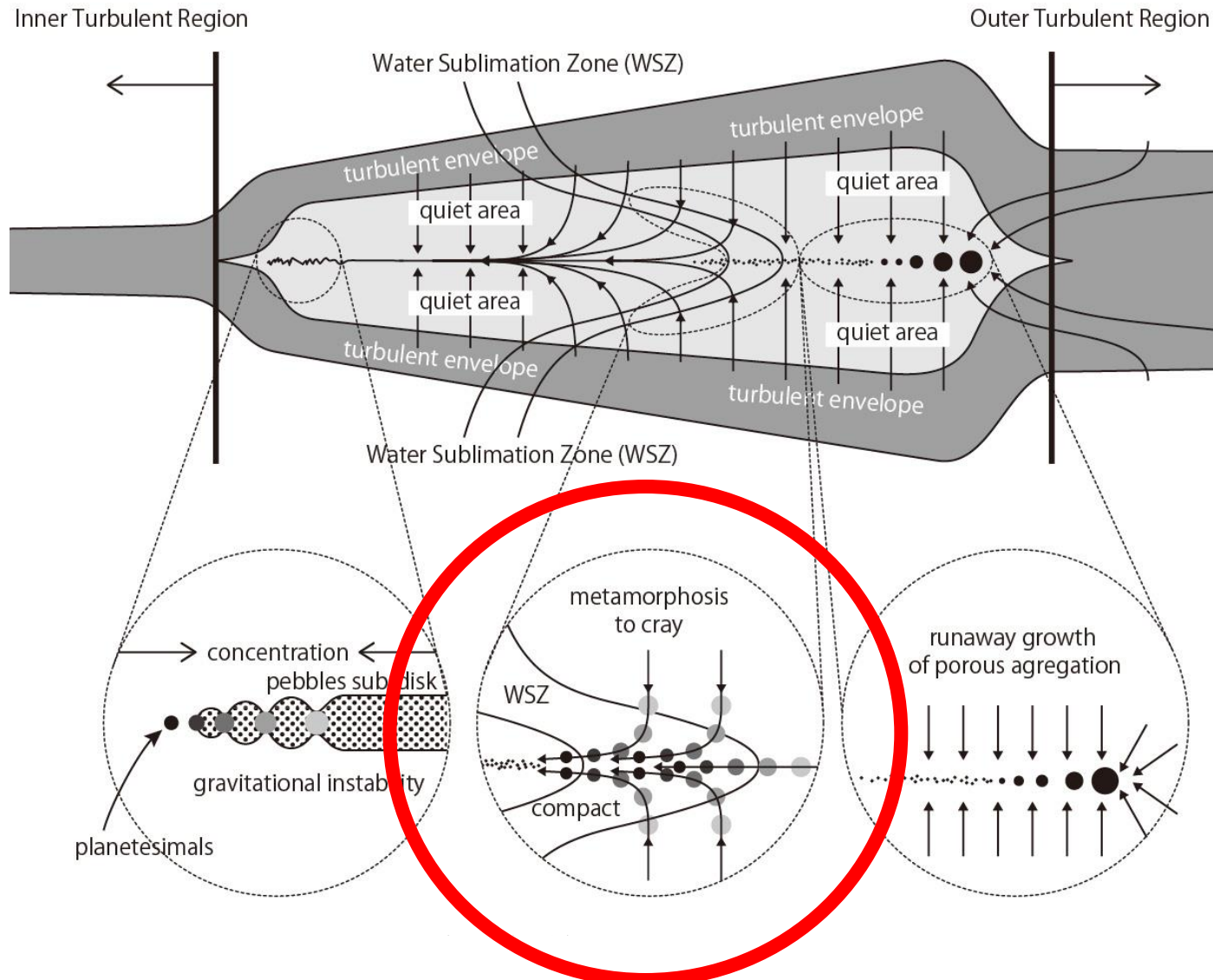
$10^7 \text{ Ms yr}^{-1}$   $r_0=60\text{AU}$



# 水揮発領域と熱変性

- 氷粒子から**水が昇華する**
  - **有機物・ケイ酸塩鉱物複合体へ凝集**
  - 一時的に液相の水：表面張力=凝集力：
    - $\rho = 10^{-5} \rightarrow \sim 1 \text{ g cm}^{-3}$
  - 砂場の鉄則：水を混ぜろ
- 熱変性して**粘土に**
- さらに落下
  - 高温（ $\sim 1000\text{K}$ ）で**揮発成分**を失う
  - **焼成化**が進む

# Tandem Formation of Planetesimals

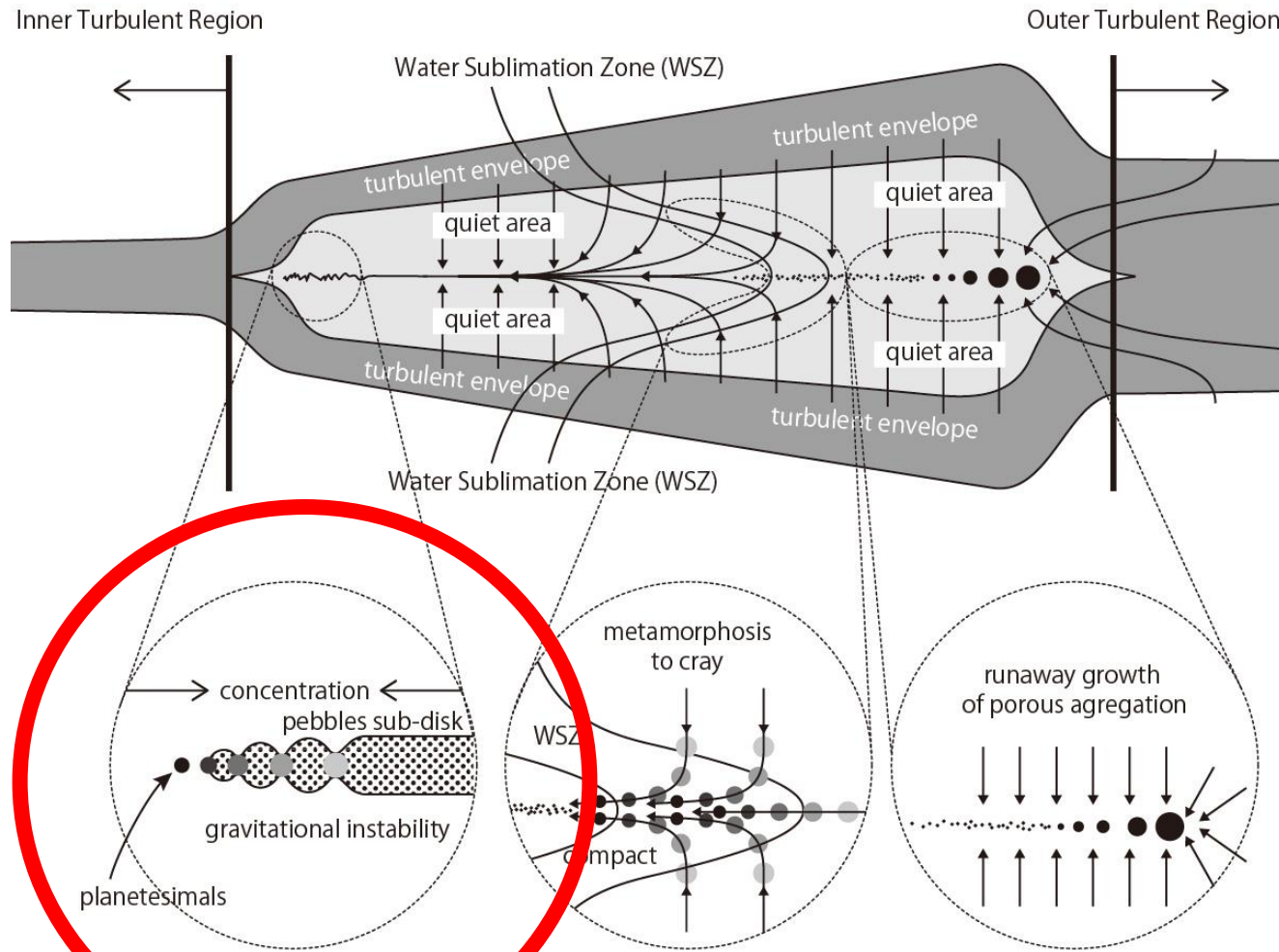




# 内側の境界 (0.3-1AU)

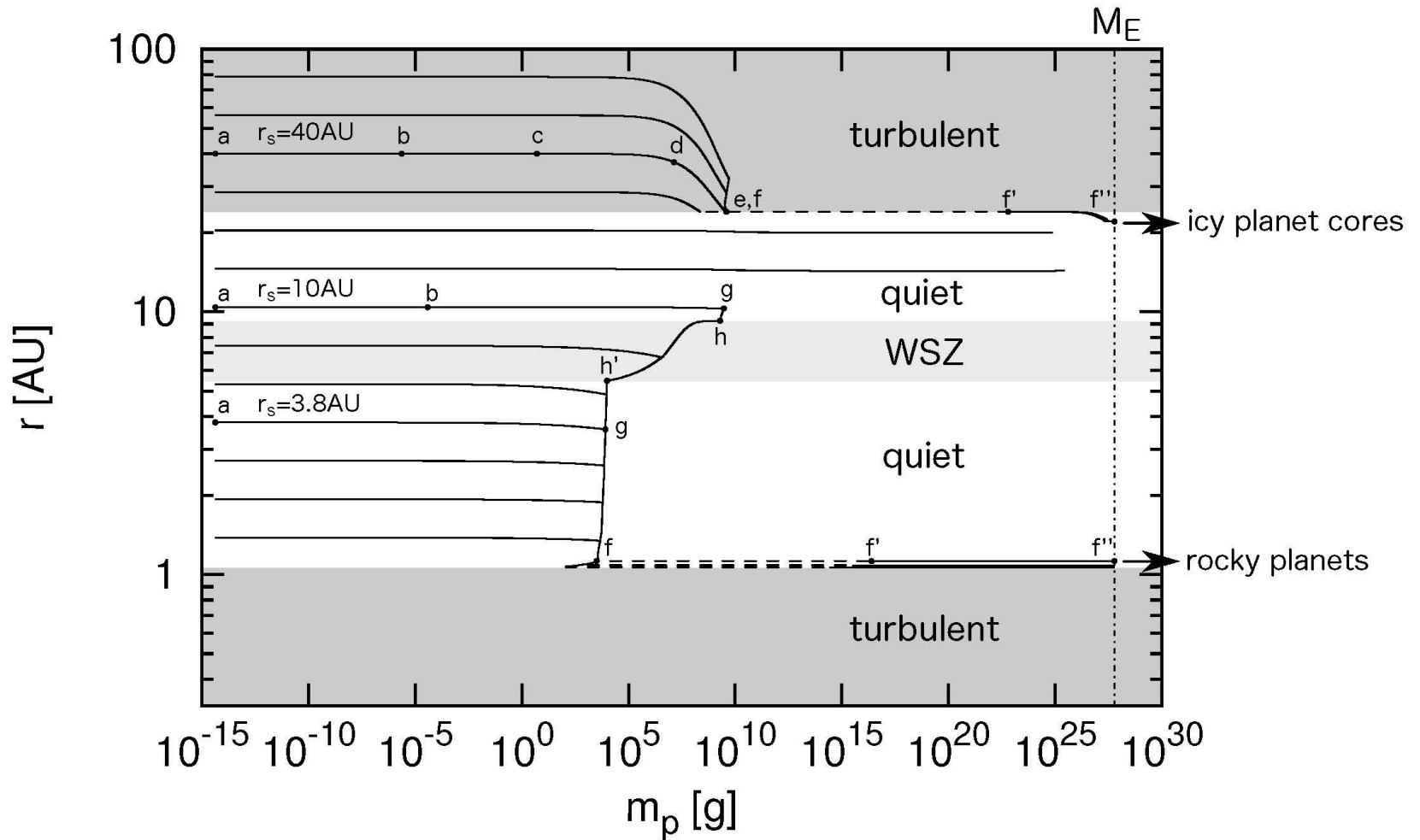
- 円盤の自己加熱 :  $T \sim 1200-1300\text{K}$
- **岩石粒子の集積**
  - 動径ドリフト速度 $\sim 0$
- 粒子サブ円盤の重力不安定 $\rightarrow$ **岩石微惑星**
  - **揮発成分を持たない**
  - 粒子密度 $>$ ガス密度 $\rightarrow$ コンドリュール形成論へ
- 岩石微惑星の成長
  - $\rightarrow$ 100万年以内に地球サイズ

# Tandem Formation of Planetesimals



# Porous aggregation runaway growth

$10^7 \text{ Ms yr}^{-1}$



# 新しいモデル: タンデム惑星形成

1. **ガス円盤内に乱流はない**
  - 磁気回転不安定
2. **固体成分の重力不安定**
  - よく調べると柱密度が足りない
3. **固体微粒子の動径移動はない**
  - 固体粒子は結構移動する
4. **相互衝突による成長**
  - 惑星に成長するには遅すぎる

MRI不活発領域

柱密度の増加

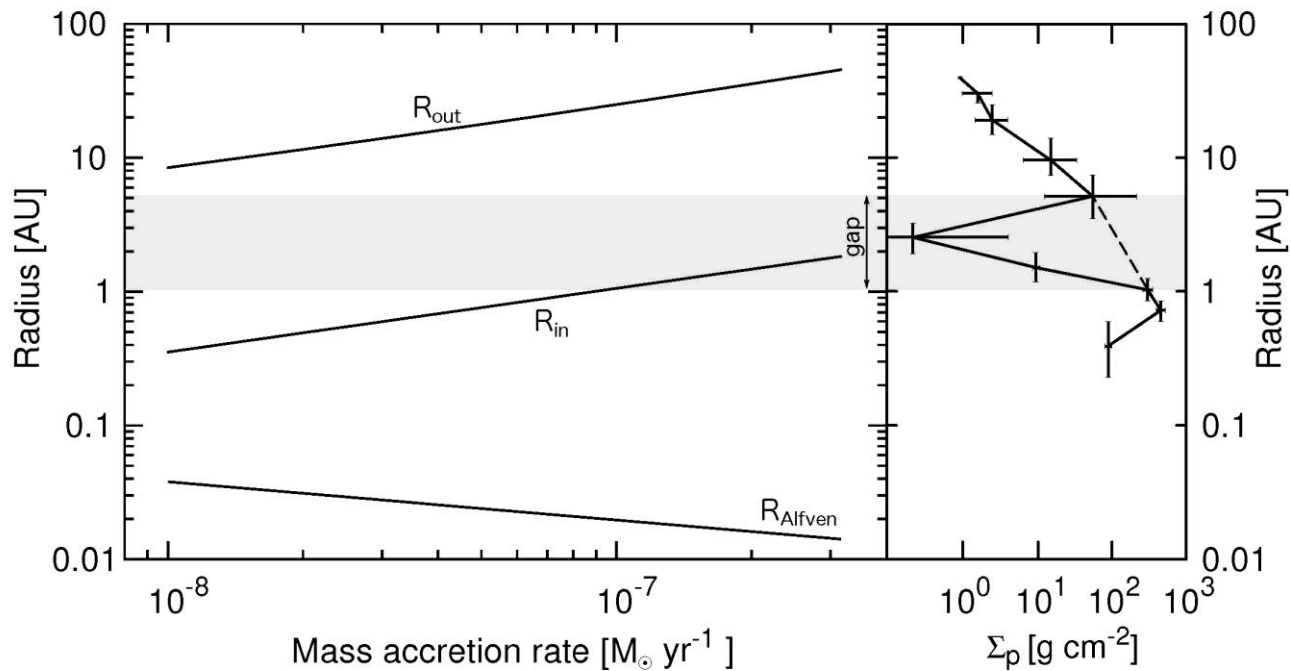
境界への  
粒子集積

急速成長

# 小惑星帯の謎と生命の起源

- 固体成分分布に間隙
  - 太陽系で昔から指摘されていた。
  - 小惑星帯の謎
- 二つの惑星形成領域が交り合わない
  - 地球型惑星はまず、水なしで作られる
    - 還元的鉱物 ( $\text{Fe}_3\text{P}$  やウラン鉱物など) の形成
  - その後、小惑星帯から落下 (ごくわずか)
    - ガス惑星の軌道不安定 → 後期重爆撃
    - 内惑星に揮発性成分 (水と炭素) がもたらされる
  - 還元的鉱物と水との激しい反応 → 初期生命を育む

# 二つの形成領域は混ざらない 固体成分分布に間隙



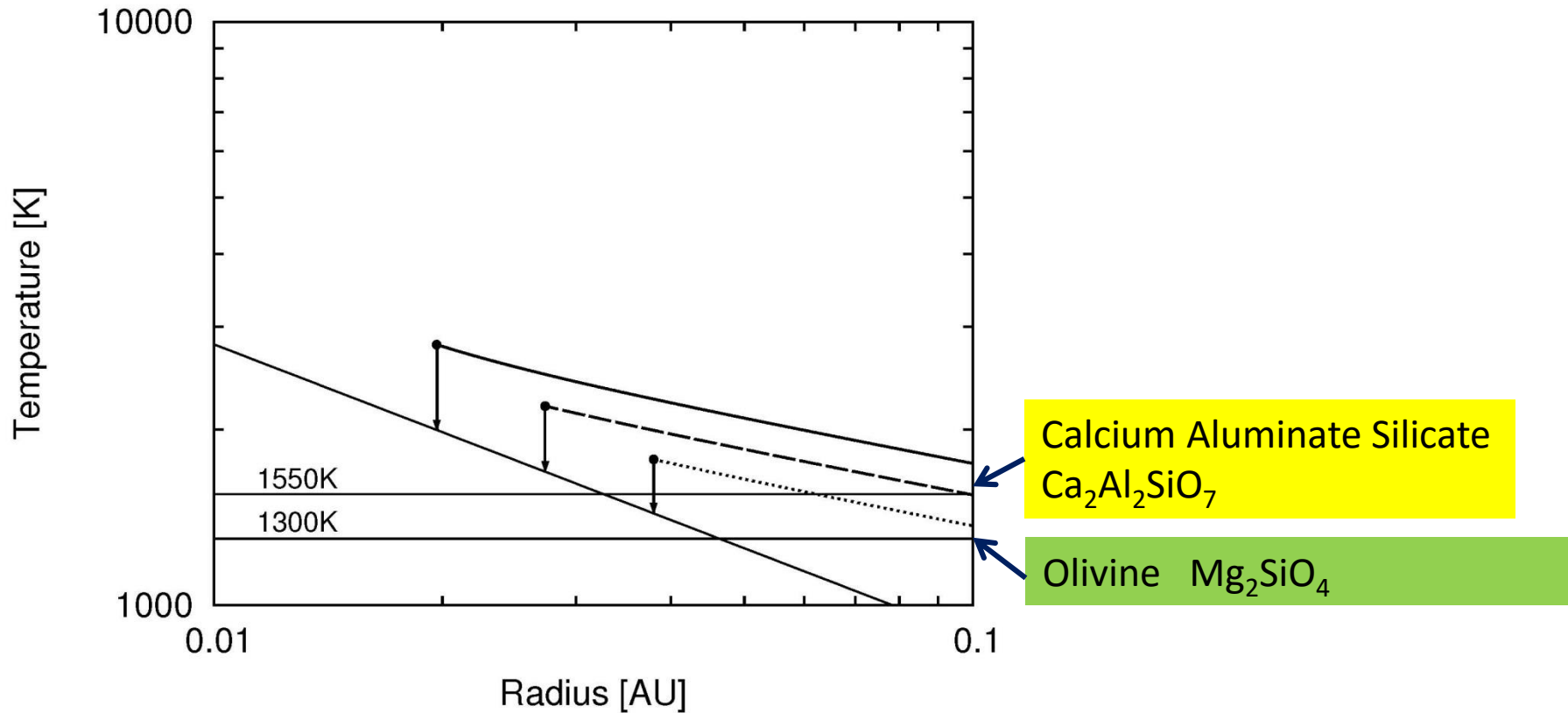
right panel

modified Weidenschilling 1977

# 結論

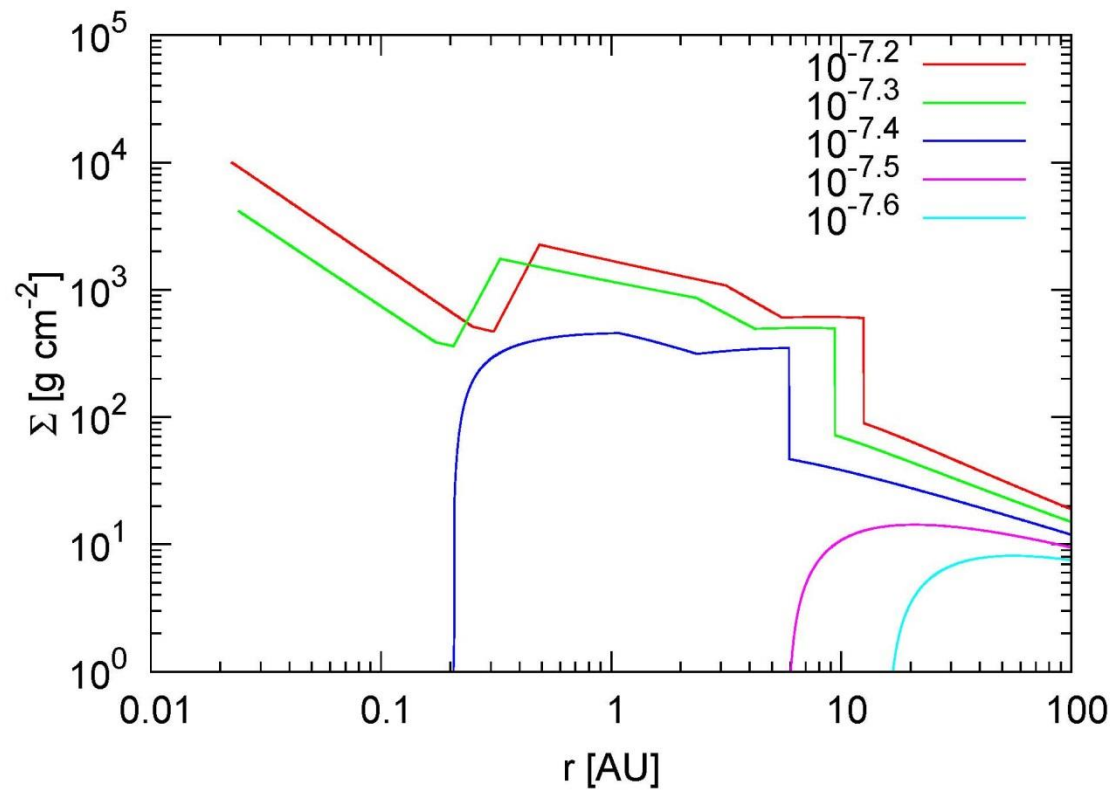
- **標準モデルへの批判を克服**
  - 新物理：磁気回転不安定と多孔質氷粒子集積
- **惑星・微惑星のタンDEM形成**
  - 外側の境界で**氷微惑星**
  - 内側の境界で**岩石微惑星**
- **これからの仕事**
  - 宇宙線と恒星風による**ガス円盤の消散**
  - **惑星形成の後期**：重力散乱成長
  - 系外惑星の**多様性**の説明：母星雲の**角運動量と磁場**
  - 岩石・氷惑成分の混合
  - 変成 氷+ケイ酸塩→含水（粘土）鉱物→焼成化
  - **物質科学的な証拠（隕石資料など）との突合せ**
    - 化学組成と同位体比（コンドリュール形成論など）
    - 宇宙機によるサンプル回収

# Radiation equilibrium temperature

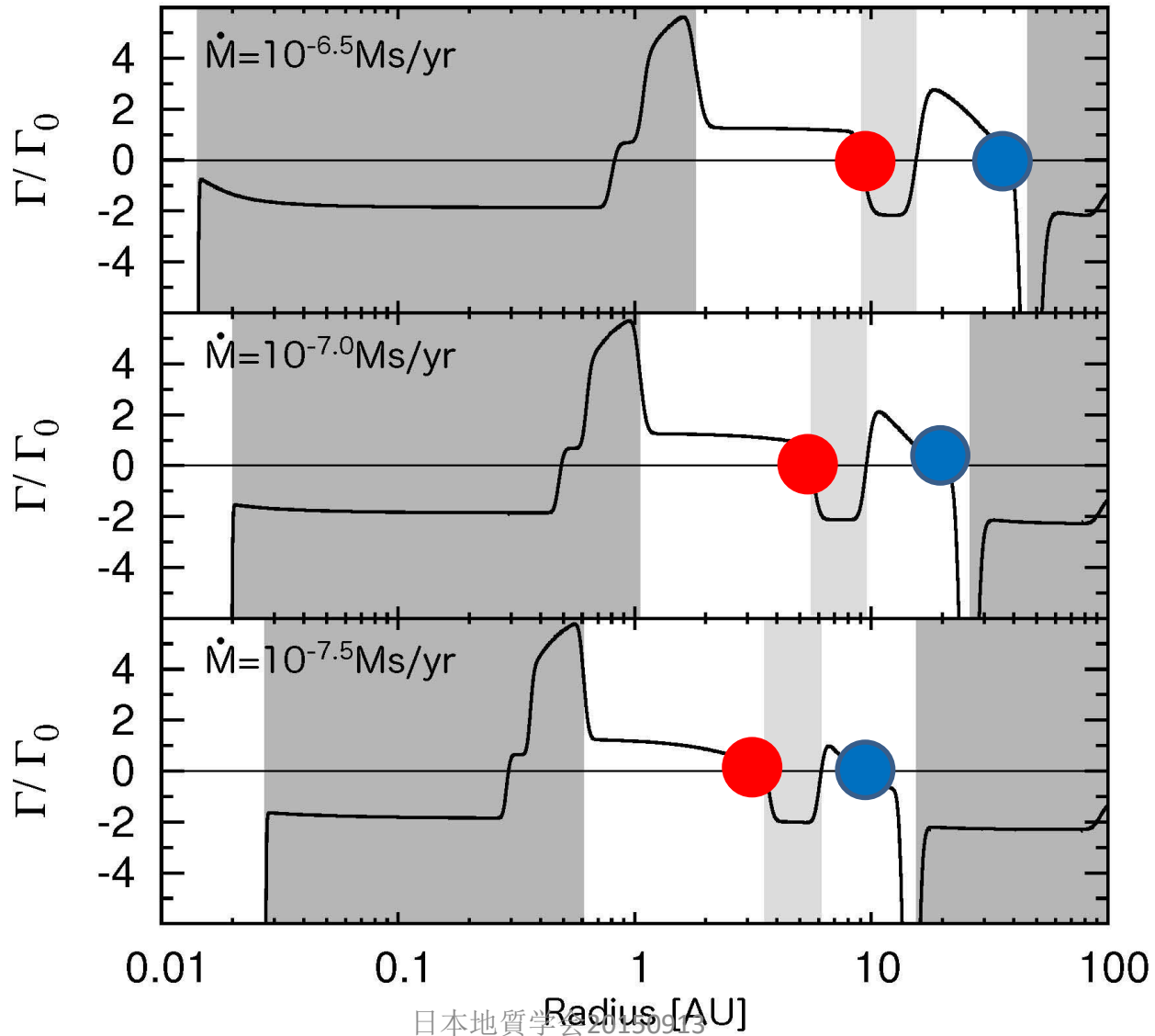




# ガス円盤の消散：光電離蒸発

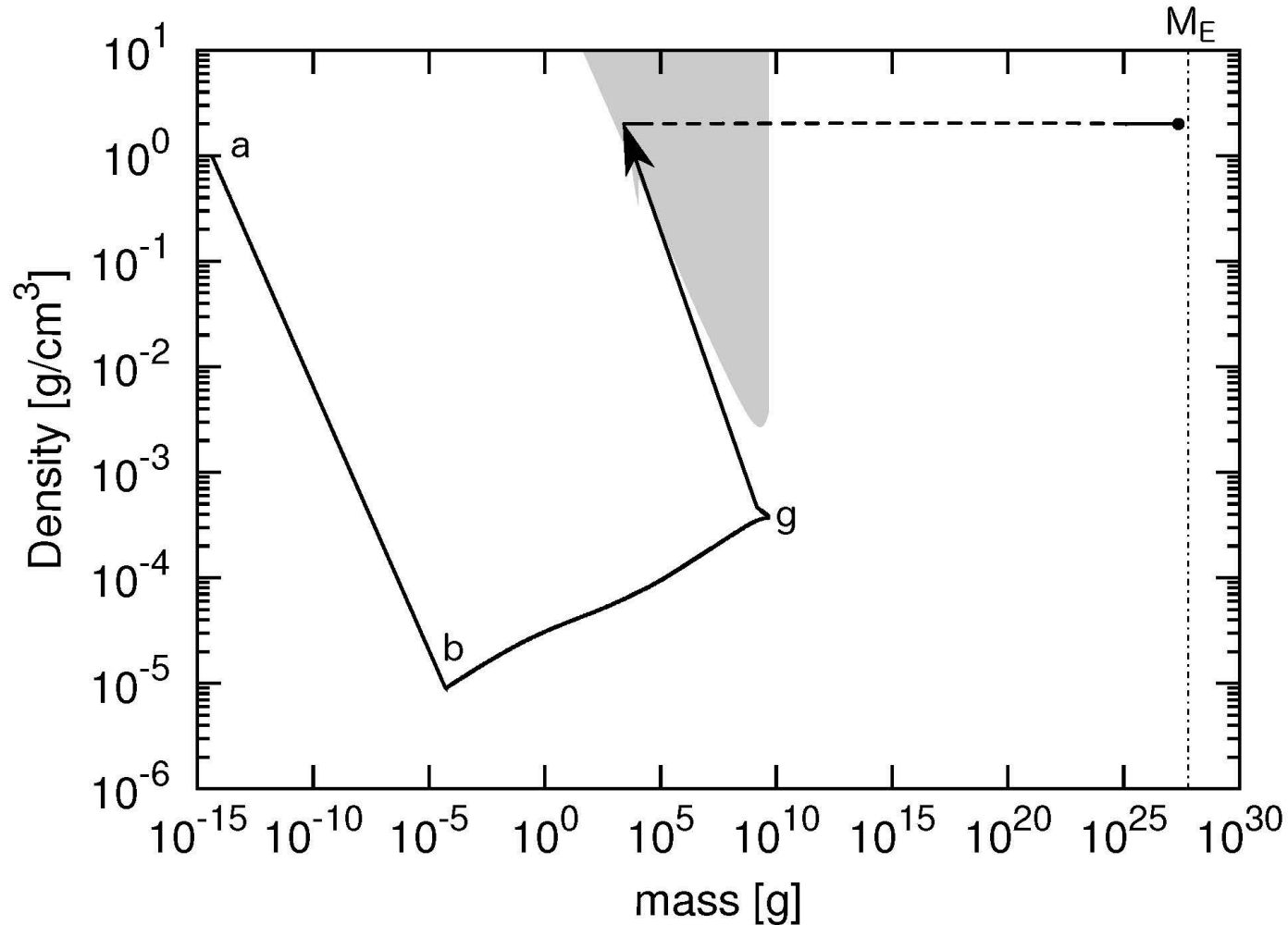


# Torques from Disk Gas



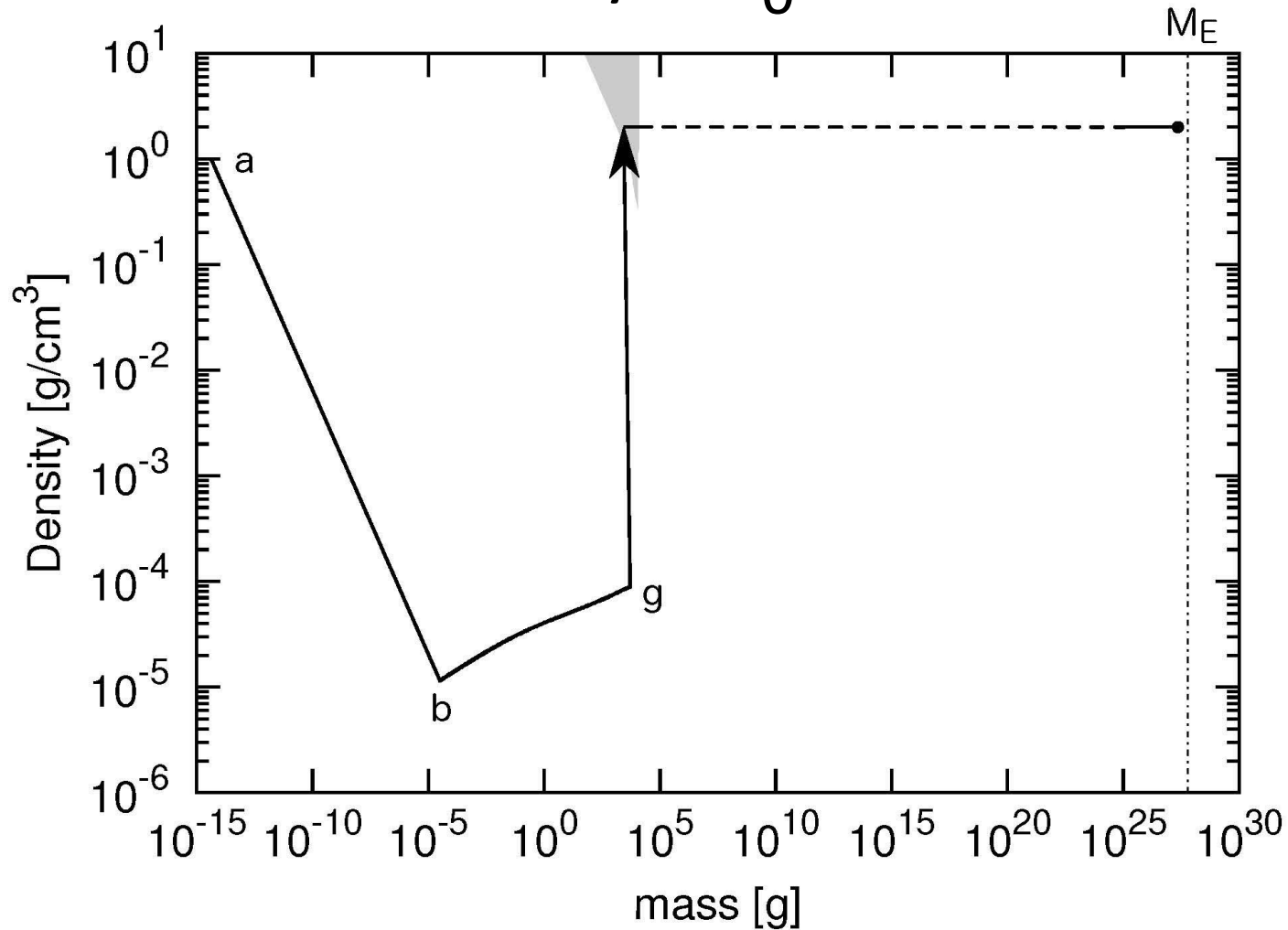
# Porous aggregation runaway growth

$10^7 \text{ Ms yr}^{-1}$   $r_0=13\text{AU}$

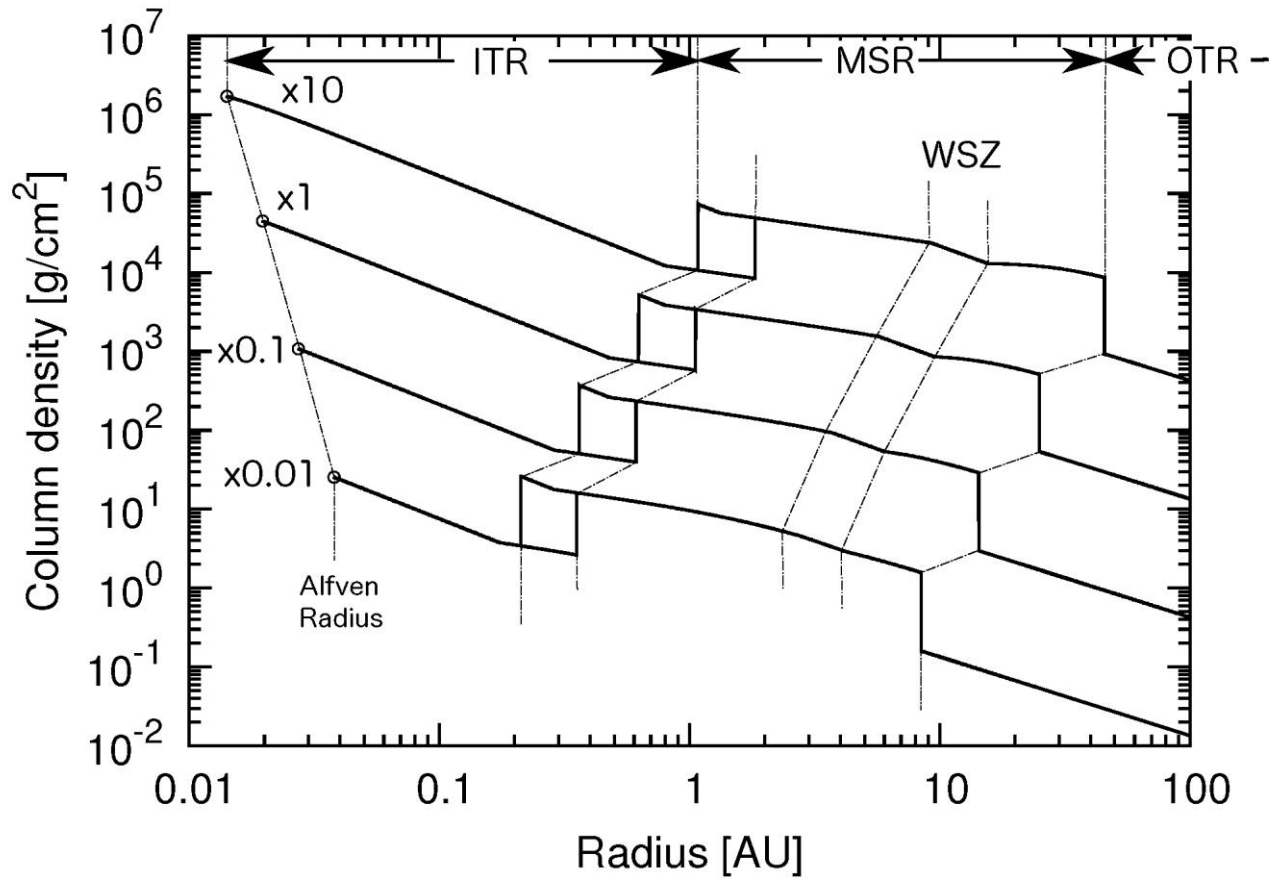


# Porous aggregation runaway growth

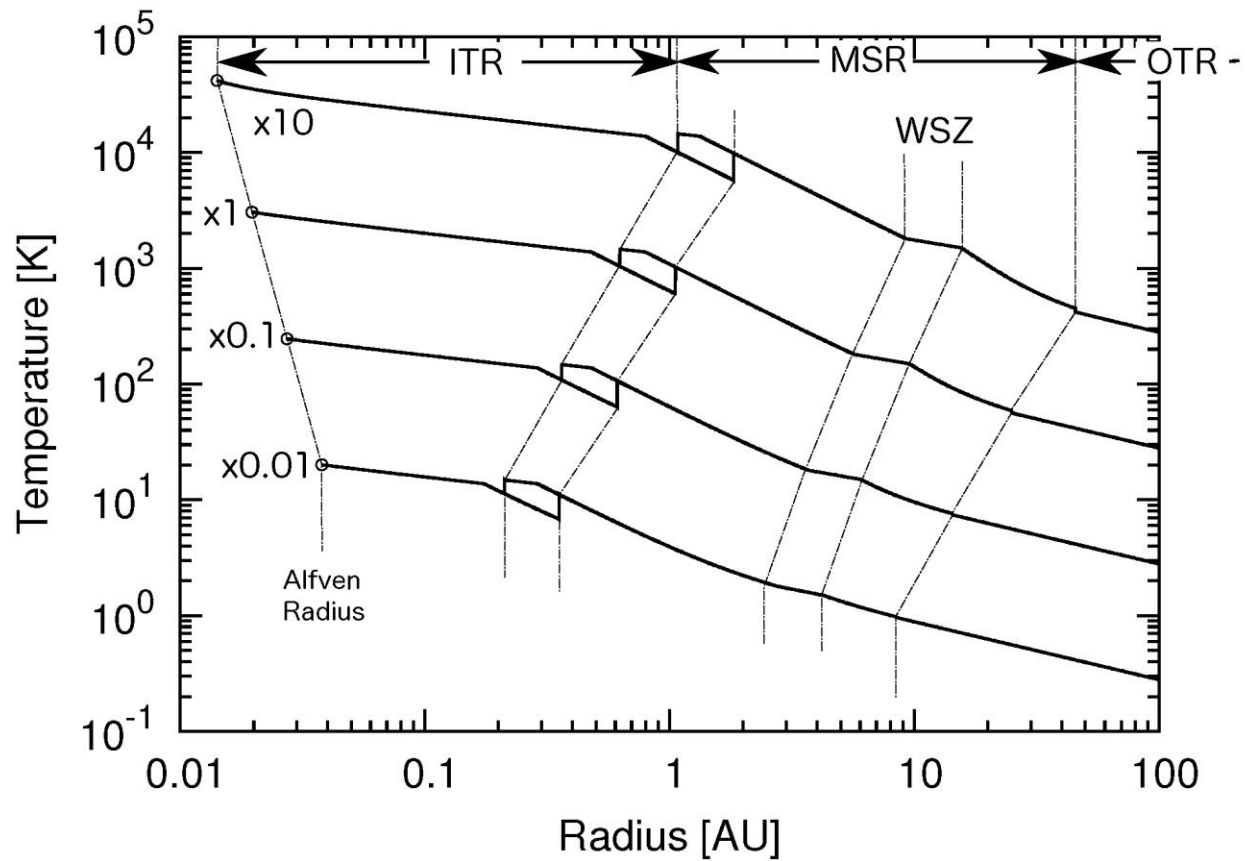
$10^7 \text{ Ms yr}^{-1} \quad r_0 = 9\text{AU}$



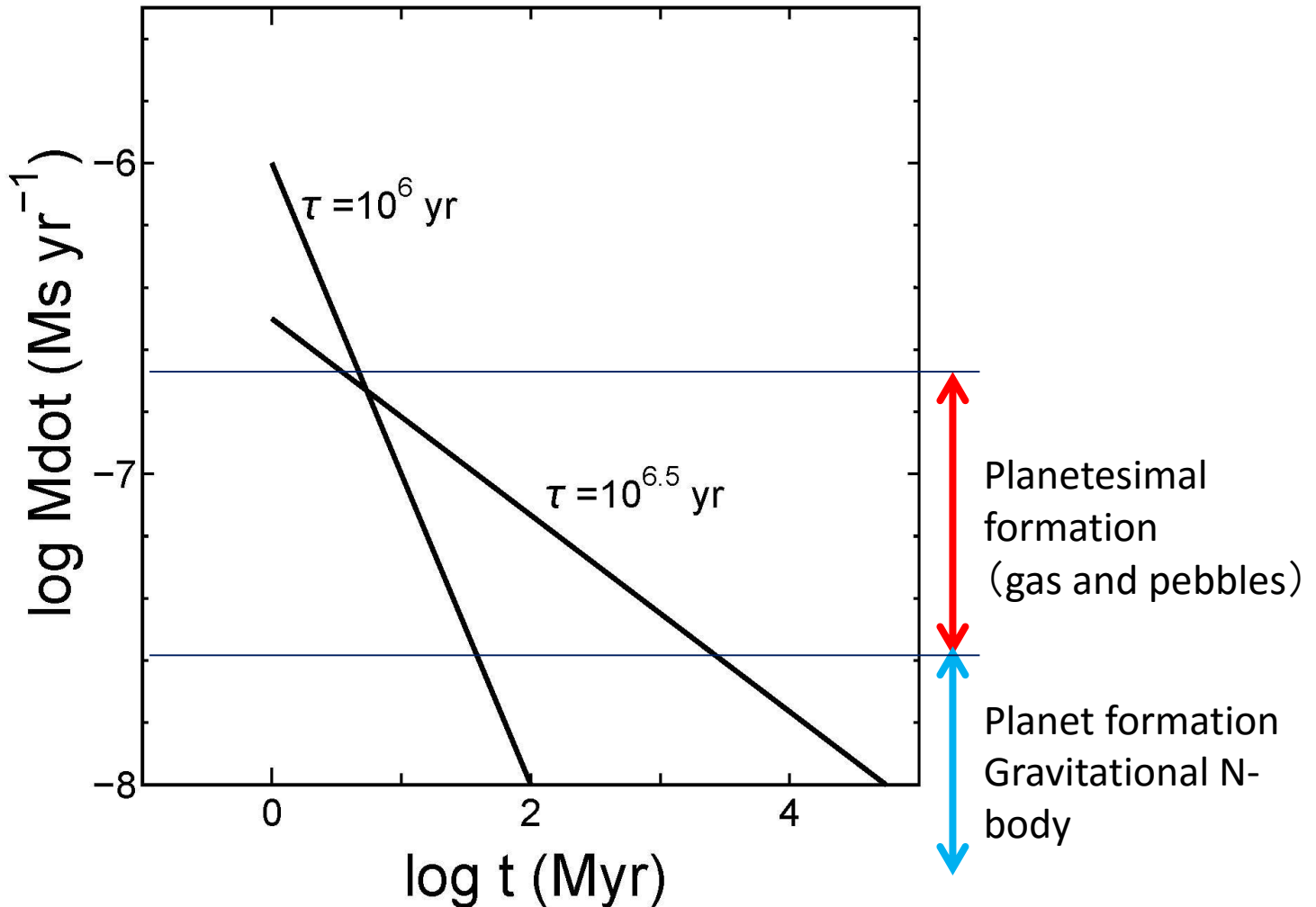
# Column density distribution



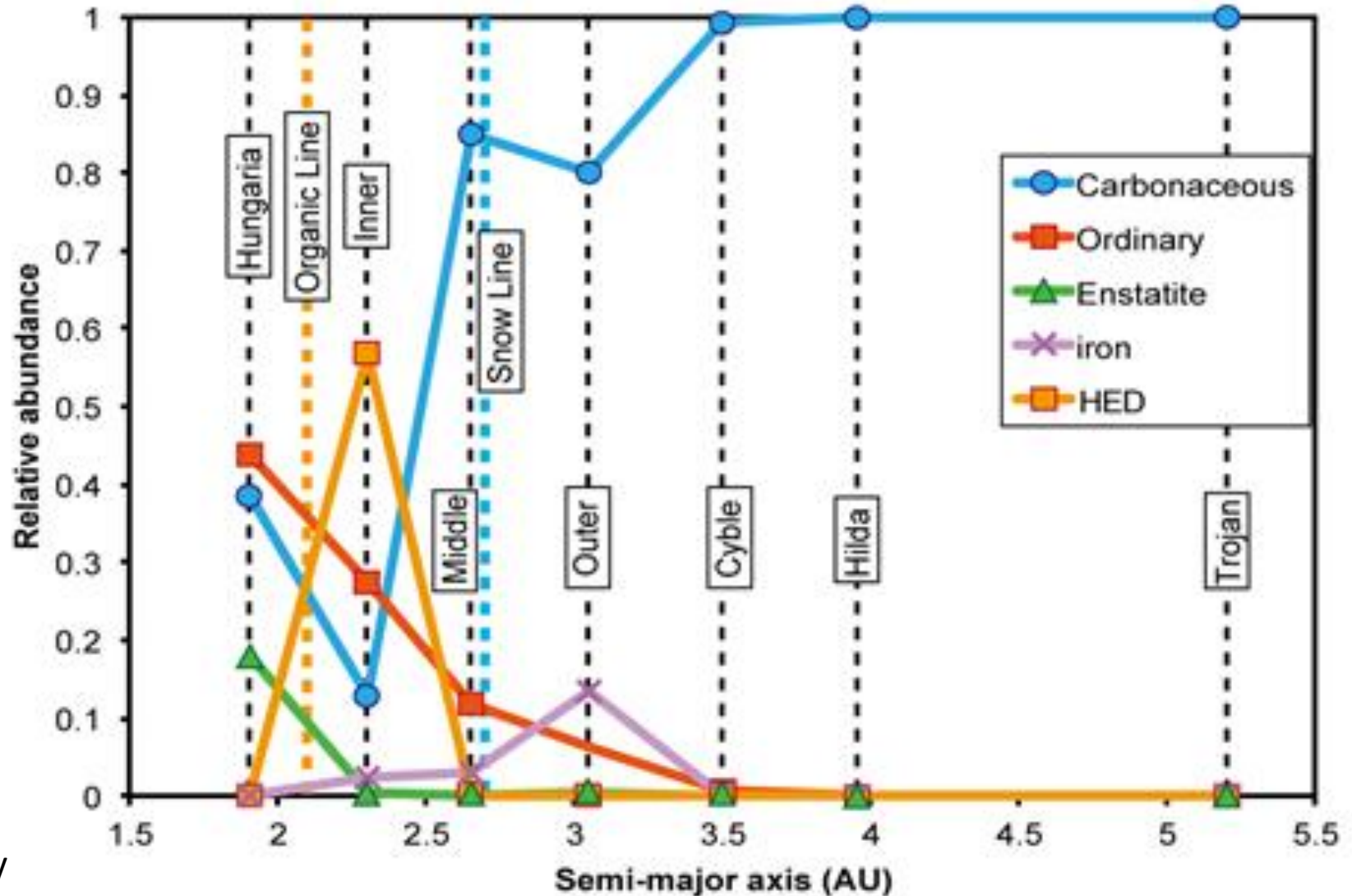
# Temperature distribution



# Time variation of accretion rate



# Gradient in material distribution

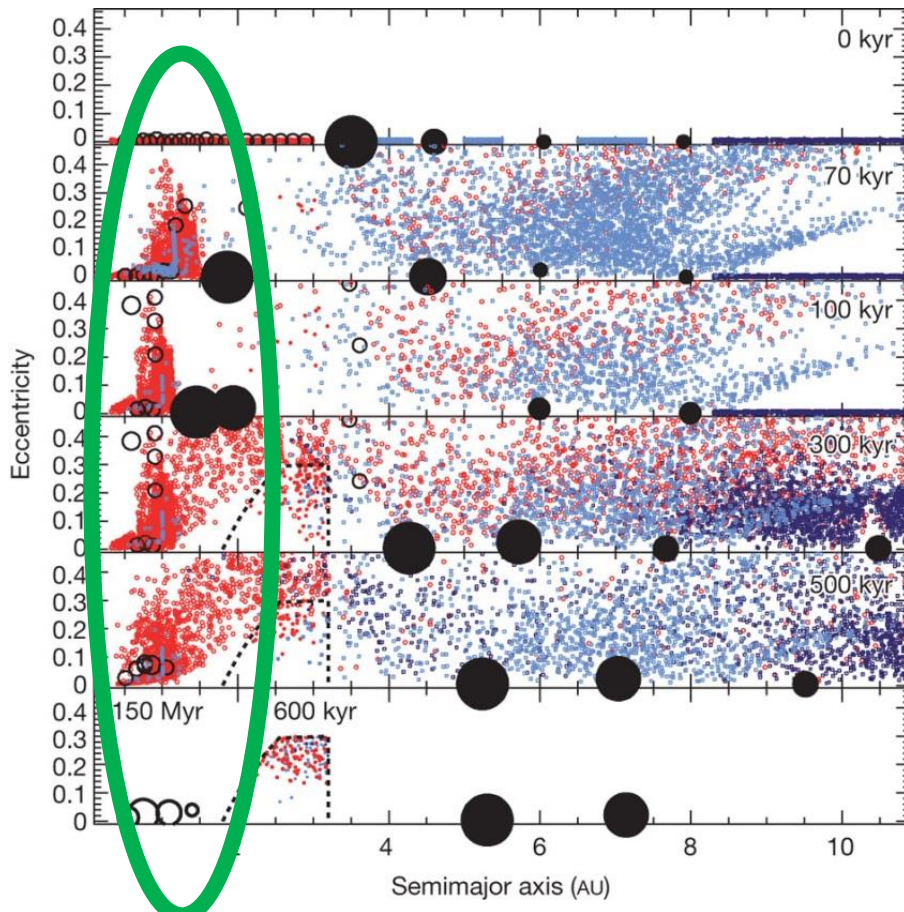


cited by  
Carry, 2012. DeMeo et al., 2013?



# Grand tack model

## To solve problem 4



- Accumulate particles  $\sim 1$  AU by Jupiter
- Accelerate particle growth
- Fall of Saturn
- Two Giants  $\rightarrow$  back to the outside

Marty et al., 2013

Vanish material gradients 1-10 AU

# 参考文献

- Carry, B. 2012, Density of asteroids, Planet. Space Sci., 73, 98–118.
- DeMeo, F.E., and Carry, B., 2013 The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. Icarus, 226, 723–741.
- Marty, B. Alexander, Conel, M.O'D. Raymond, S. N., 2013, Primordial Origins of Earth's Carbon, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 75, 149-181.
- Weidenschilling, S.J., 1977, The distribution of mass in the planetary system and solar nebula, Astrophysics and Space Science, 51, 153-158.
- HABBLESITE newscenter Thackeray's Globules in IC 2944
  - <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2002/01/image/a/http://www.nasa.gov/>
- HABBLESITE newscenter Embryonic Stars Emerge from Interstellar "Eggs"
  - <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/44/image/a/>
- ALMA プレスリリース
  - <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201411067466.html>
- Wikipedia おうし座T型星
  - <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%81%8A%E3%81%86%E3%81%97%E5%BA%A7T%E5%9E%8B%E6%98%9F>