

分子雲コア収縮過程を考慮した 原始惑星系円盤内の物質混合

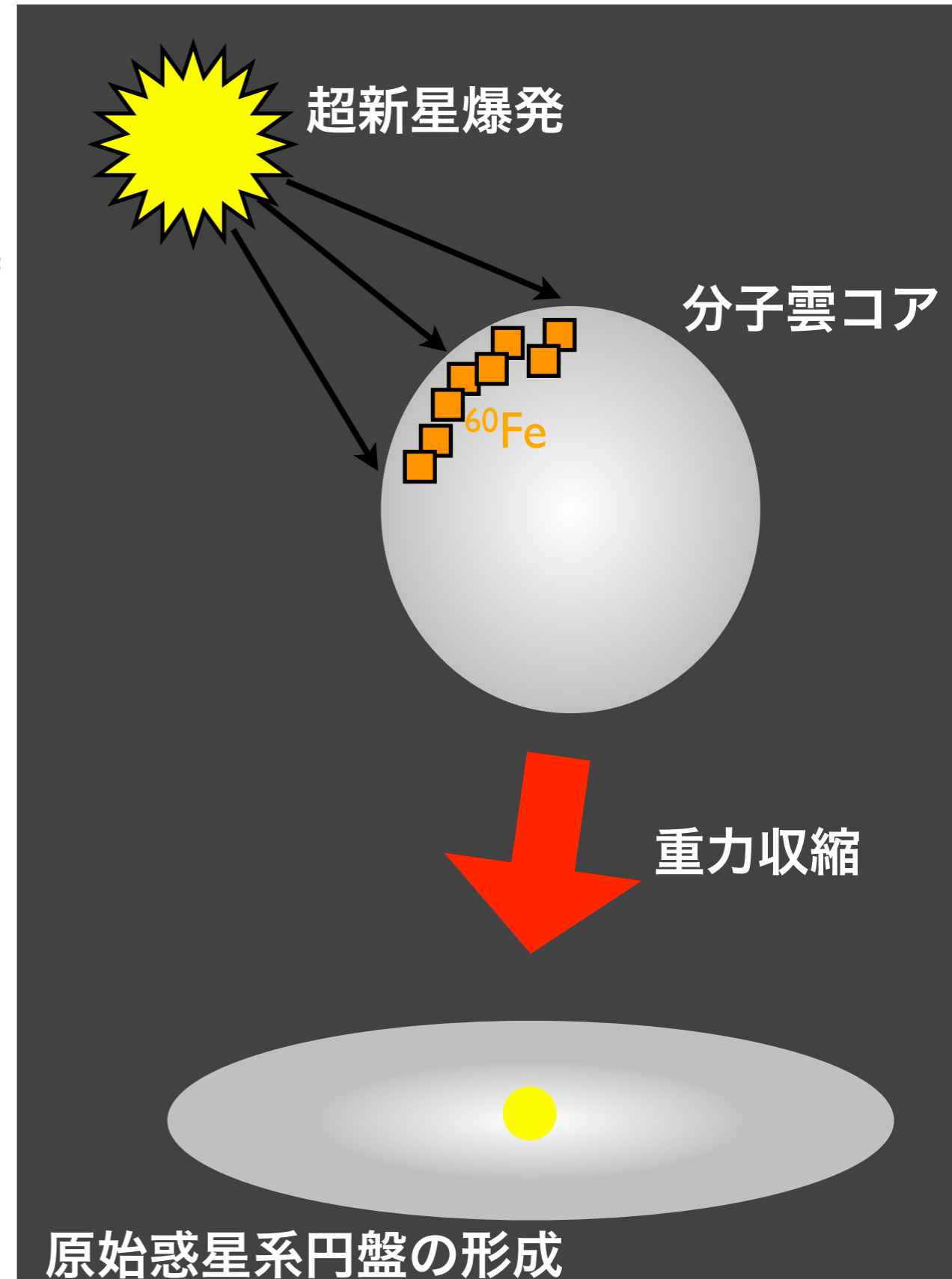
理学院 宇宙理学専攻

惑星宇宙グループ 修士2年

安達 俊貴

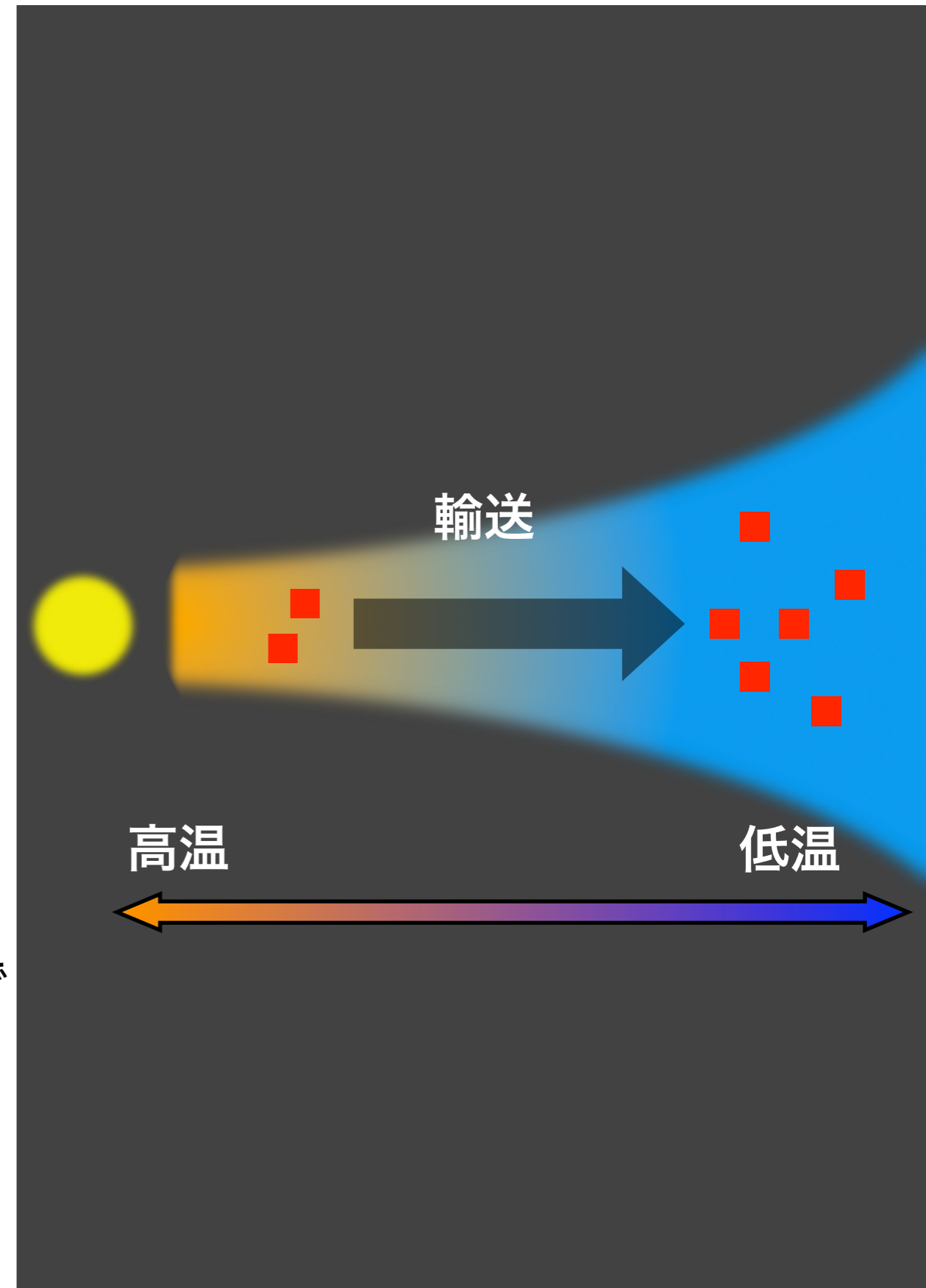
太陽系の元素同位体組成の均質性

- 地球型惑星、隕石のほとんどの元素の同位体組成は~0.1%のレベルで一定(e.g. Norman et al. 2004)
- 少なくとも最古の太陽系物質の形成時点で小惑星帯よりも内側の領域は均質化
- 太陽系の母体となった分子雲コアでは不均質だったと考えられる
 - 短寿命放射性核種 ^{60}Fe の高い太陽系初期存在度(Tachibana et al. 2006)
 - 超新星爆発による分子雲コア表面への ^{60}Fe の添加と,分子雲コア収縮の誘発
- 同位体組成の均質化は分子雲コア内ではなく,原始惑星系円盤の形成段階に起きたと考えられる



円盤低温領域における高温起源物質の存在

- 彗星放出物に結晶質ケイ酸塩が見出されている
 - ヘールボップ彗星の赤外波長スペクトル (e.g. Min et al. 2005)
 - ヴィルト第2彗星のサンプル分析 (e.g. Zolensky et al. 2006)
- 若い星の周星円盤の観測 (e.g. Honda et al. 2003)
- 円盤初期段階で、中心星の近傍で形成された高温起源物質が数10～数100AUまで輸送されたことを示唆 (e.g. Lisse et al. 2006)



円盤内物質混合に関する先行研究

- Boss(2004, 他)

- 円盤の自己重力不安定に起因する重力乱流により, 同位体組成の均質化を説明
- 原始惑星系円盤の3次元流体力学計算, 初期条件として重い円盤を仮定
- そのような状況の実現性に疑問

- Dullemond et al. (2006)

- α 粘性円盤モデルを用い高温起源物質の低温領域への輸送を説明
- 分子雲コアの収縮を考慮した1次元軸対称円盤進化計算
- 同位体組成の均質化は解いていない

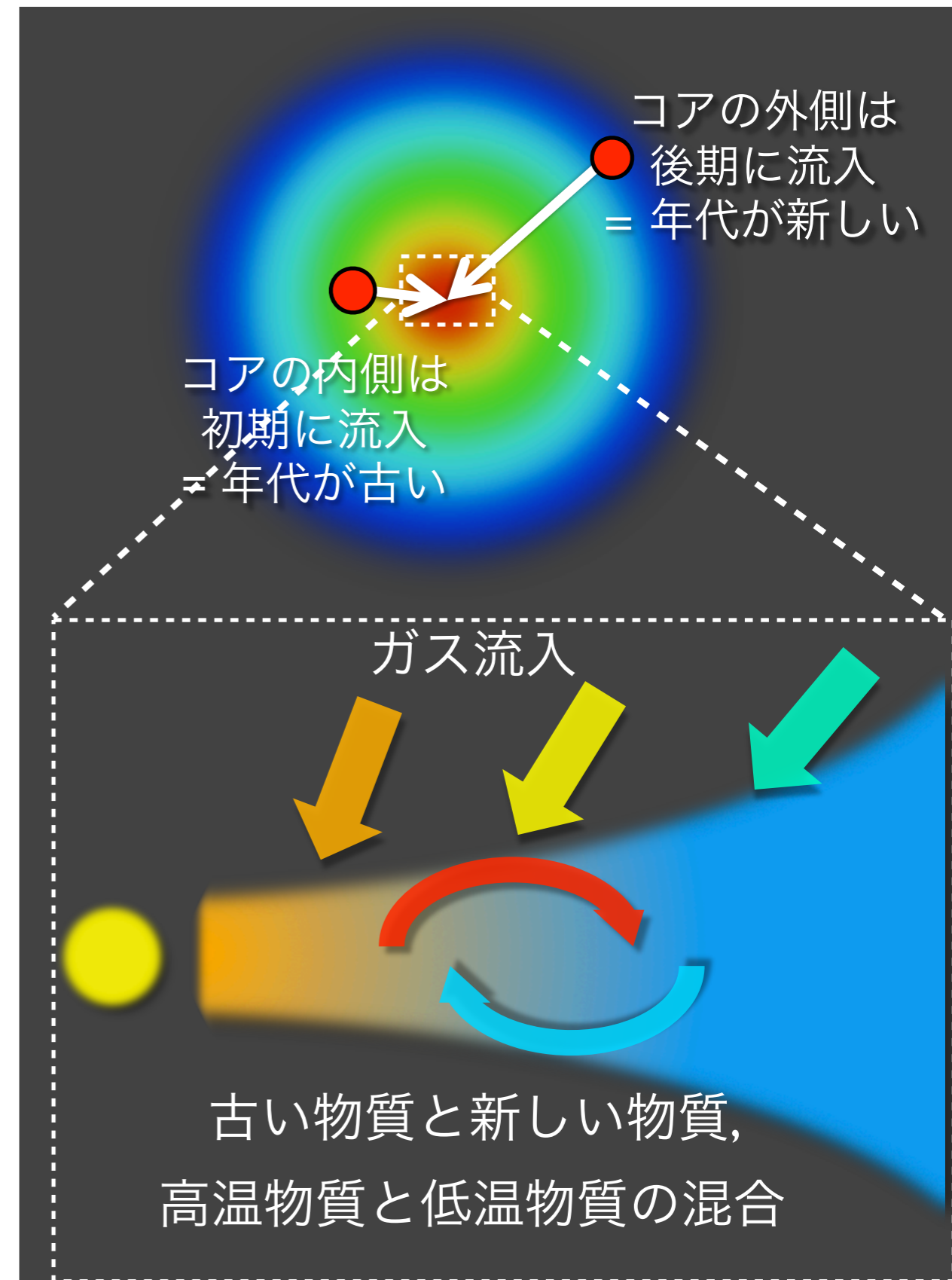
※ α 粘性円盤モデル：円盤質量降着率と円盤の質量分布の観測結果を説明できる実効的な乱流粘性を定式化したモデル

本研究の目的

- 同位体組成の均質化と円盤ダストの結晶化度の進化を同時に表現できる分子雲コア収縮と円盤内物質混合のモデルを構築
- 分子雲コア収縮開始から、小惑星帯より内側の領域が均質化するまでの時間発展と、そのパラメータ依存性を明らかにする

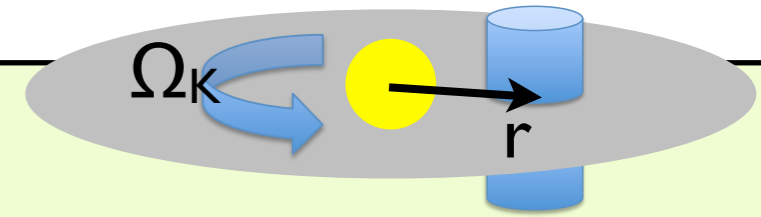
モデルの概要

- 円盤への流入年代と, 最高到達温度に応じてガスを区別
 - それぞれを独立成分とみなして乱流混合を計算
- 流入年代の違いは分子雲コア内での存在位置の違いに対応
 - 流入年代の異なるガスの混合を調べることで同位体組成の均質化を表現可能



輸送方程式・円盤温度

Σ : 全面密度



I次元軸対称輸送方程式

各成分の移流拡散を表現

$$\frac{\partial \Sigma_{ij}}{\partial t} = \boxed{-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma_{ij} v_r)} + \boxed{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\Sigma \nu r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Sigma_{ij}}{\Sigma} \right) \right]} + \boxed{S_{ij}}$$

移流項

濃度拡散項

湧出項

コアからの流入,
低温成分から高温
成分への転換

Σ_{ij} : 年代 i に流入し, 最高到達温度が T_j のガスの面密度

乱流粘性係数 : α モデル (Shakura & Snyaev 1973) $\nu = \alpha c_d^2 / \Omega_K$

α は定数パラメータ, 拡散係数=粘性係数, ダストはガスと共に運動すると仮定

円盤中心面温度 T_m : Nakamoto & Nakagawa (1994) に中心星照射の効果を追加

コア熱放射

$$\sigma T_m^4 = \frac{1}{2} \left[\boxed{\left(\frac{3}{8} \tau_R + \frac{1}{2\tau_P} \right) \dot{E}_{\text{vis}}} + \boxed{\left(1 + \frac{1}{2\tau_P} \right) \dot{E}_{\text{shock}}} \right] + \sigma \left(\boxed{T_{\text{irr}}^4} + \boxed{T_{\text{core}}^4} \right)$$

粘性散逸

コアからの流入に
よる衝撃加熱

中心星照射

τ_R, τ_P : 光学的深さ (Rosseland 平均, Planck 平均)

年代別ガス流入フラックスの定式化

コア収縮モデル : Shu (1977), Cassen & Moosman (1981) を適用

$$S_i(r, t) = A_i S(r, t)$$

年代 i では流入量は S , それ以外は 0

$$S(r, t) = \frac{\dot{M}}{4\pi r R_d} \left(1 - \frac{r}{R_d}\right)^{-1/2}$$

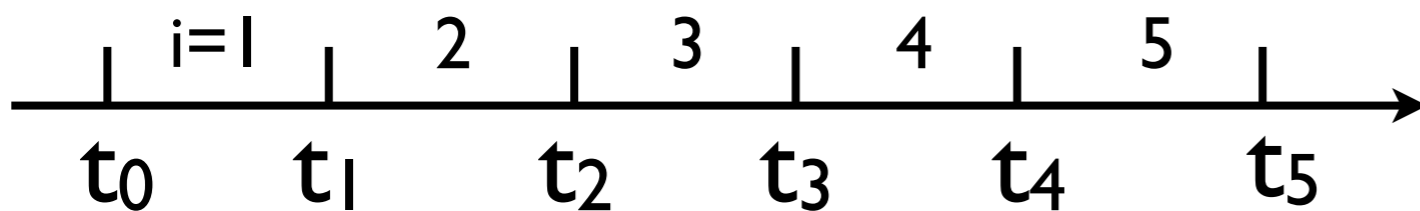
流入年代による区別

$$A_i = \begin{cases} 1 & (t_{i-1} < t < t_i) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases}$$

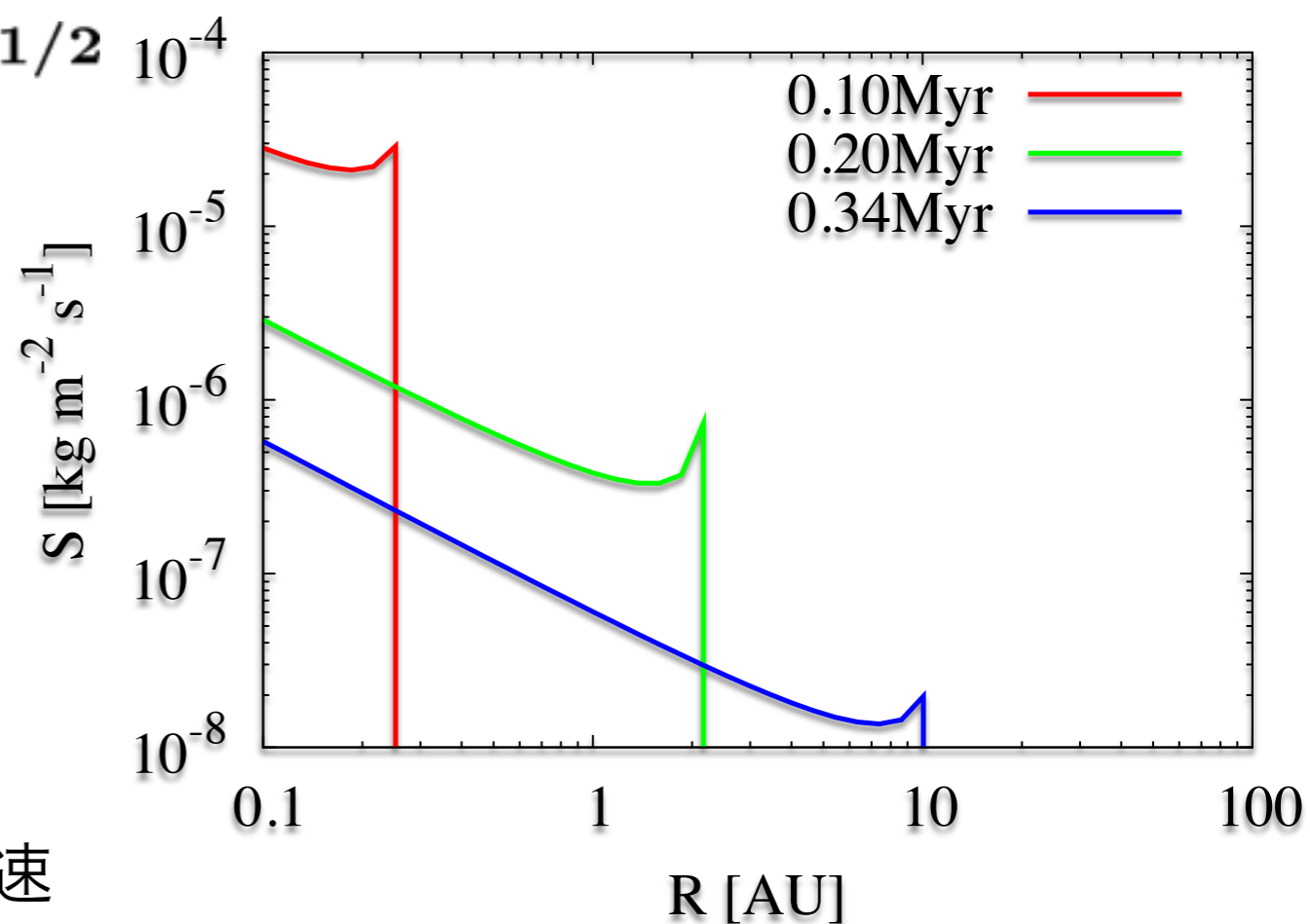
R_d : 最大ガス流入半径

$$R_d = \frac{\Omega_c^2 G^3 M_*^3}{16c_c^8}$$

Ω_c, c_c : 分子雲コア自転角速度, ガス音速



$T_c = 15\text{K}, \Omega_c = 1 \times 10^{-14}$

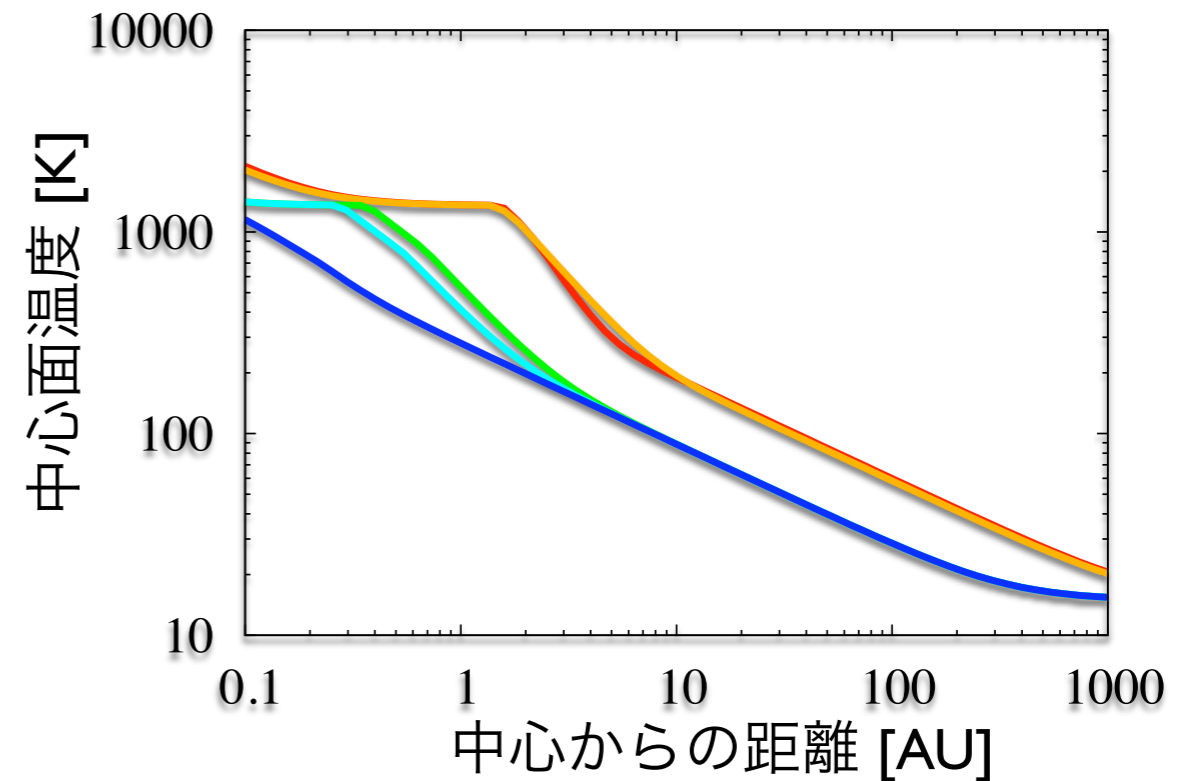
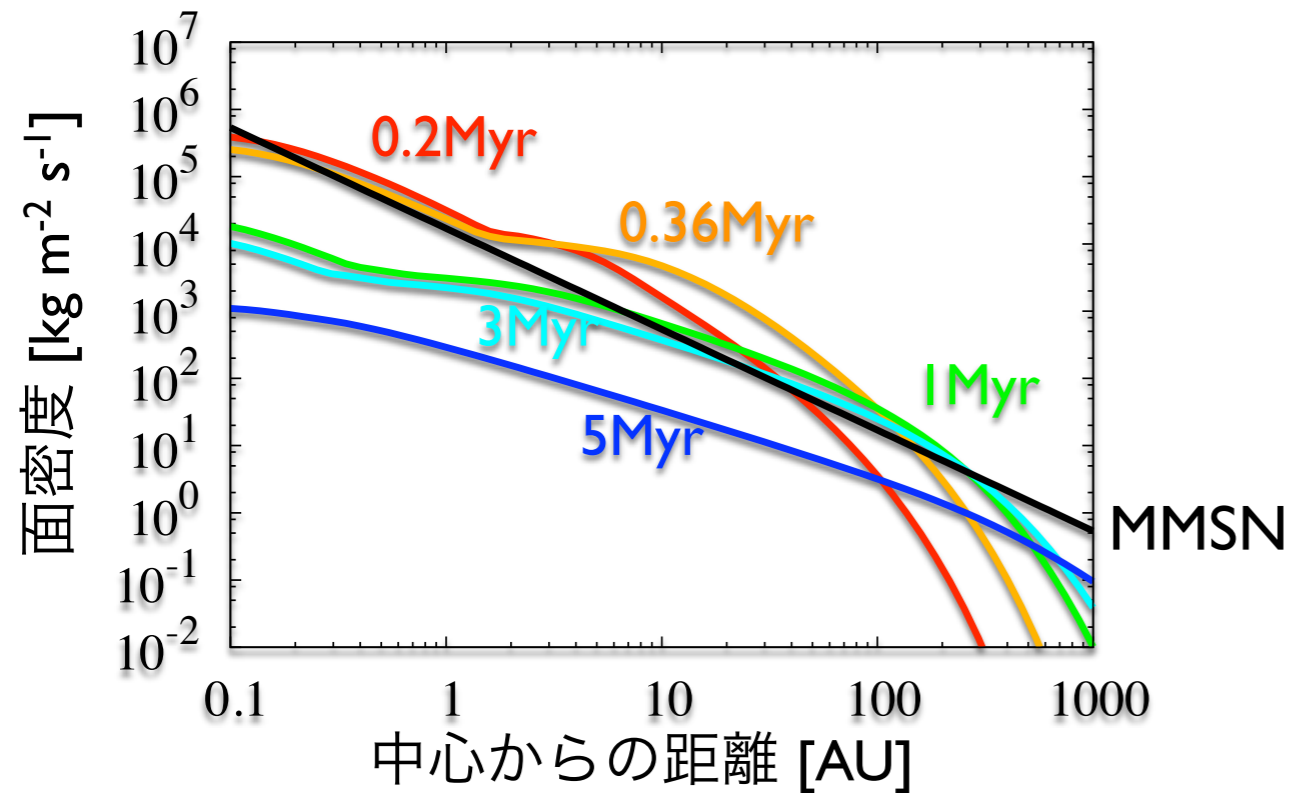


計算設定

- 分子雲コア質量 : 1太陽質量
 - 太陽系を想定
- 境界条件 : $r_{in} = 0.04 \text{ AU}$ と $r_{out} = 10^4 \text{ AU}$ で面密度0
 - r_{in} : 共回転半径
- 分子雲コア温度 $T_c = 15 \text{ K}$ (観測される典型的な値),
ガス流入継続時間 : 36万年
 $t_0 = 0, t_i = 7.2 \times i$ 万年
- 分子雲コア自転角速度 $\Omega_c = 1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$
 - 観測値の下限, 上限

円盤面密度と温度の時間発展

$$\alpha=10^{-2}, \Omega_c=1 \times 10^{-14}$$

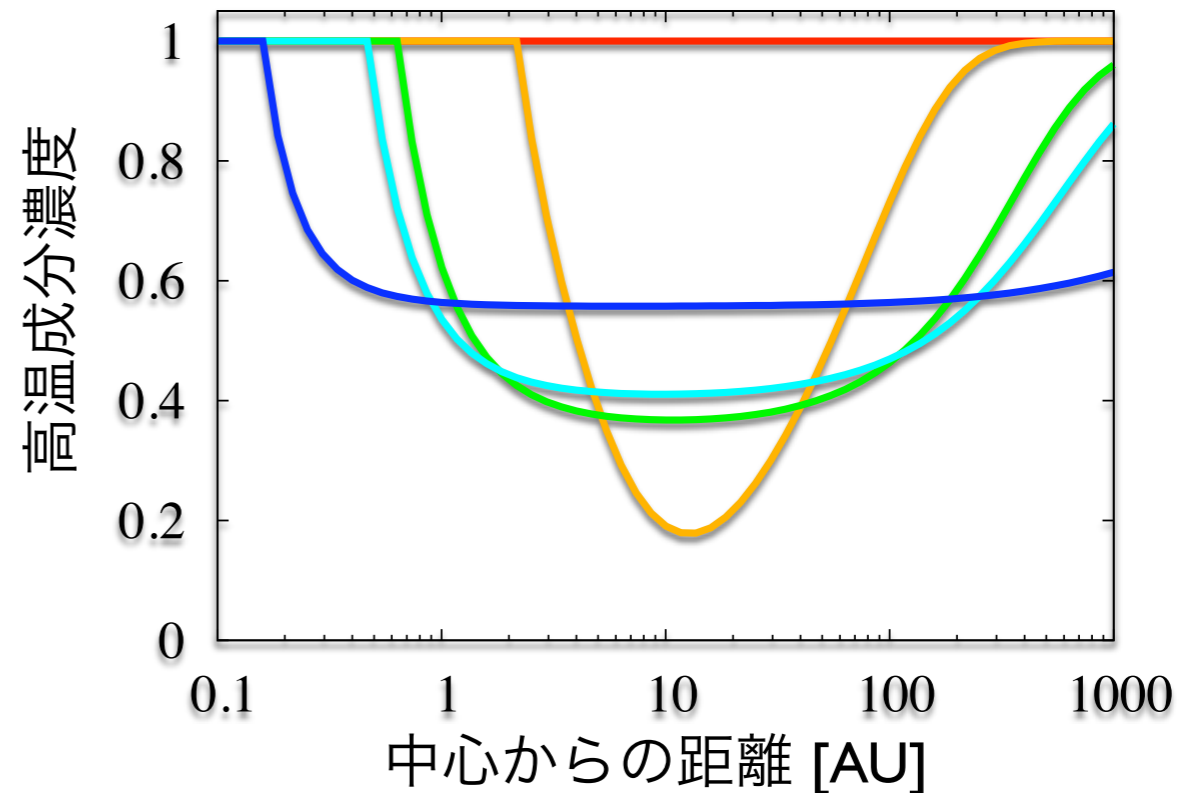
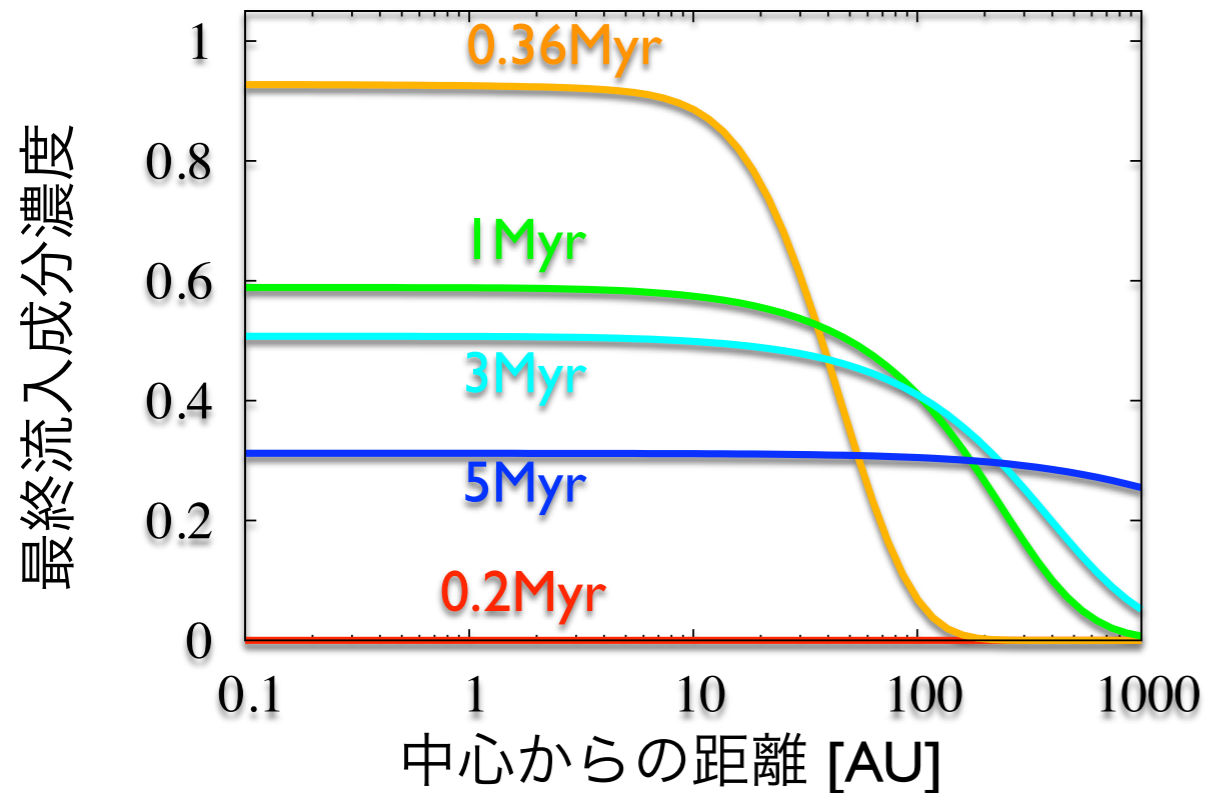


- ガス流入中は面密度が増加, 流入が完了すると面密度は減少
 - 中心星へ降着するため
- 中心から近い領域から, 時間とともに外側へ拡散

- 温度は時間とともに減少
 - 面密度減少とともに放出する重力エネルギーが減少
 - 光学的に薄くなり, 円盤内部に熱がこもらなくなる

成分濃度の時間発展

$$\alpha = 1 \times 10^{-2}, \Omega_c = 1 \times 10^{-14}$$



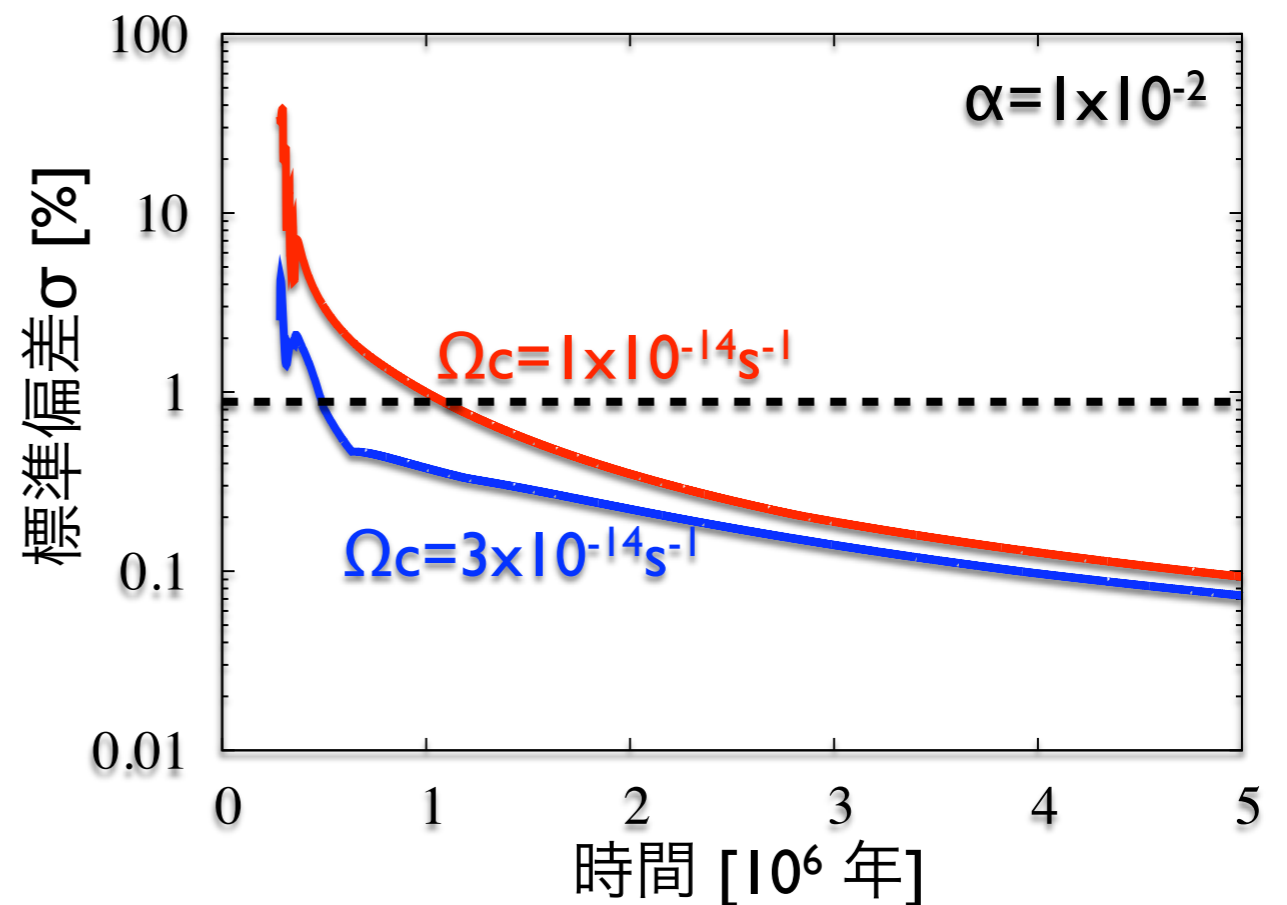
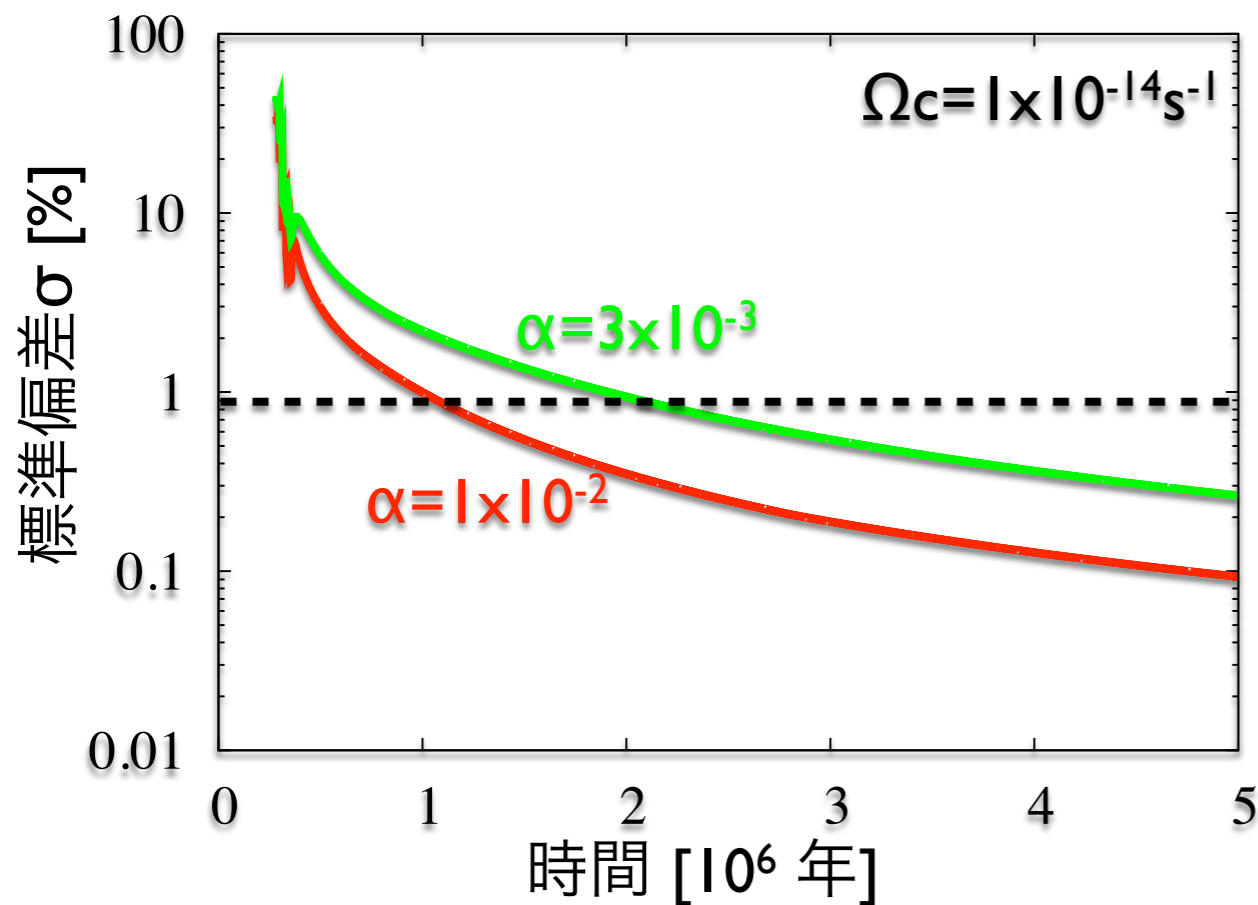
- 平坦な領域は拡散により均質化したことを示す
- 均質化は内側から起こる

- $T > 800\text{K}$ を高温成分と定義
 - 非晶質ケイ酸塩から結晶質ケイ酸塩に転換する温度 (Dullemond et al. 2006)
- 高温領域から外側へ拡散

均質化の時間スケール

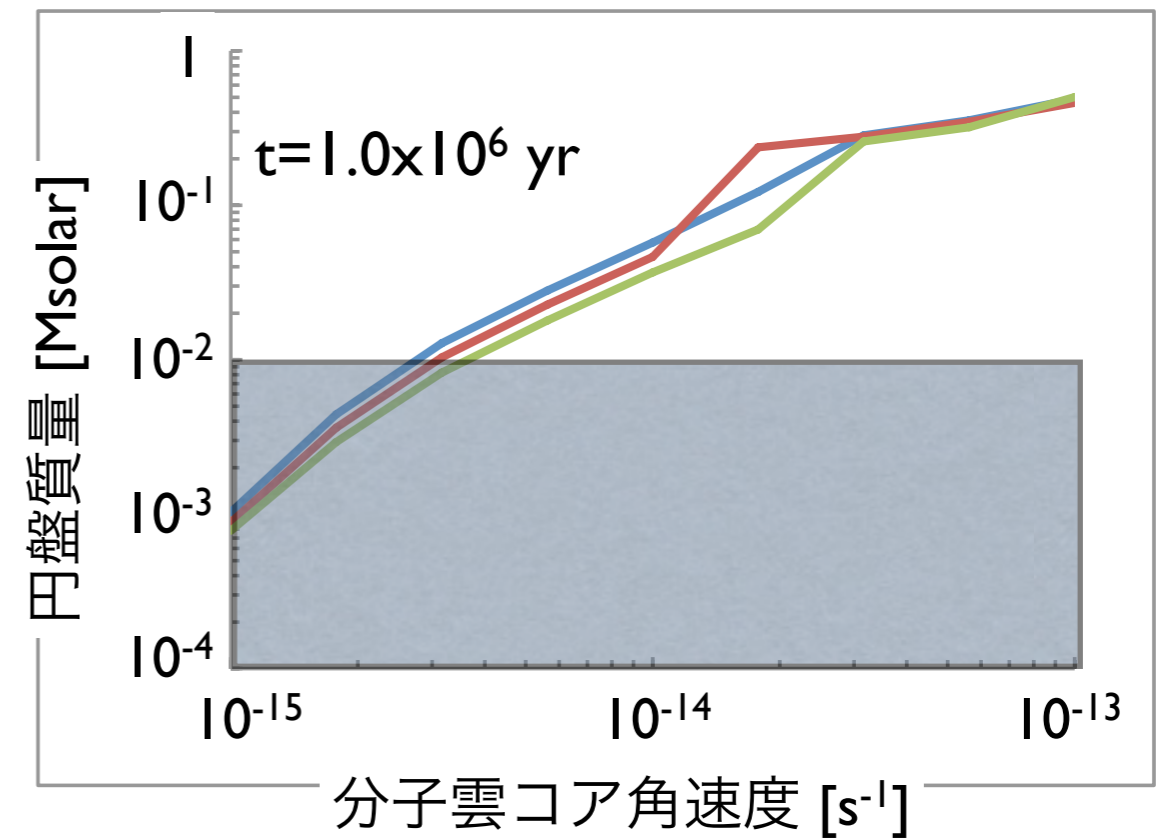
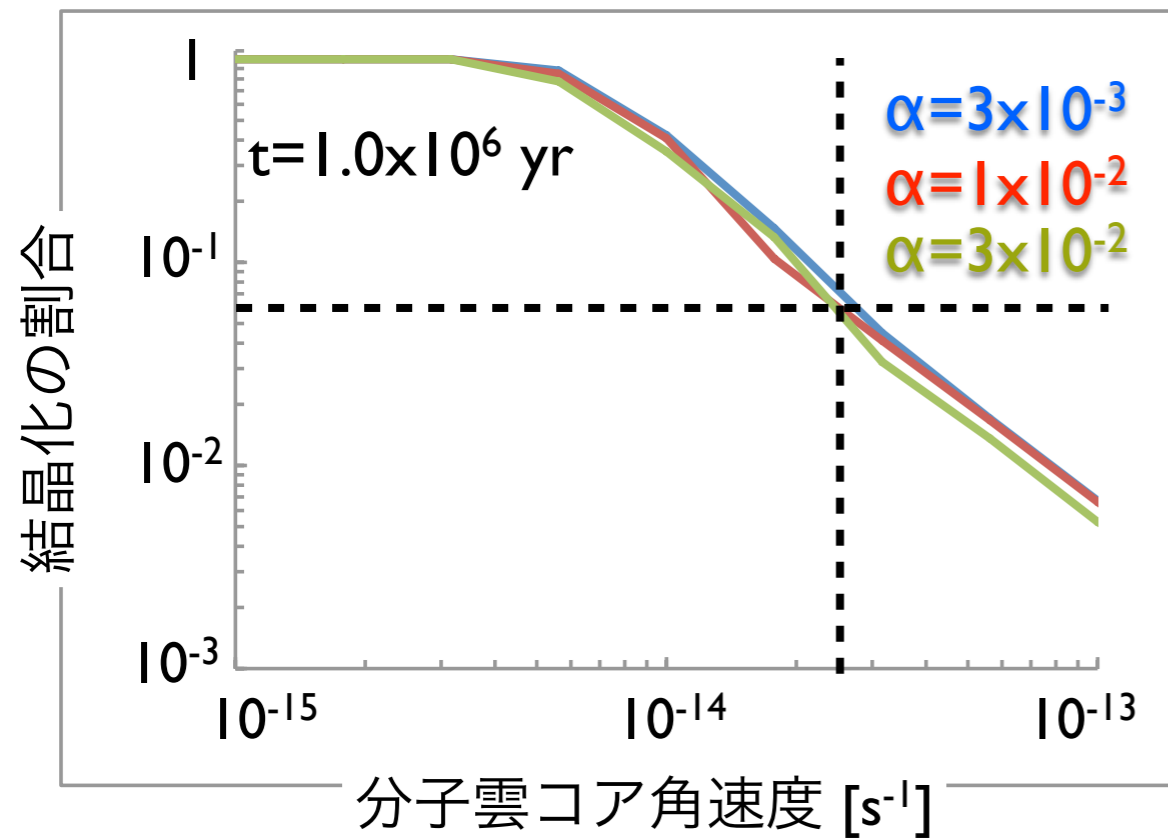
不均質度：10AU 以内の年代成分濃度 c_i の標準偏差 σ_i の和 σ

$$\sigma = \sum_{i=1}^5 \sigma_i, \quad \sigma_i^2 = \frac{1}{\bar{c}_i M_d} \int_{0.04\text{AU}}^{10\text{AU}} [c_i(r) - \bar{c}_i]^2 \cdot 2\pi \Sigma r dr$$



- 均質化の時間スケールは α に依存し, Ω_c にはあまり依存しない
 - α が大きいほど粘性拡散時間 $t_{\text{diff}} = r^2/\nu$ が短くなるため, 均質化が早期化
- $\alpha = 10^{-2}$ の場合, $t = 10^6$ 年で 1% 前後まで均質化

太陽系を説明可能な分子雲コア条件



- 観測・隕石分析からの要請

- 10⁶ 年以内の同位体組成均質化 (⁶⁰Feの半減期 = 1.49×10⁶ 年より)
- ヘールボップ彗星の塵の結晶化度(～7.5%)
- 惑星系が形成可能な円盤質量(>10⁻² 太陽質量)

- 要請を満たす分子雲コア条件

- もとの同位体不均質性が10%程度もしくはそれ以下
 - 1% × 10% = 0.1%
- 自転角速度が2-3×10⁻¹⁴s⁻¹
 - 観測範囲内の値
 - 円盤質量～10⁻¹ 太陽質量

まとめ

- 分子雲コアから原始惑星系円盤への流入年代と,円盤内での最高到達温度に応じてガスを区別し,それらの混合過程を調べた
- 均質化の時間スケールは,乱流粘性の強さに依存
- $\alpha > 10^{-2}$ の場合, 10^6 年で10AU以内の不均質性が1%以下に
- 観測範囲内の分子雲コア自転角速度で,彗星放出ダストの結晶化度と太陽系惑星の形成に十分な円盤質量を共に実現可能