

縦列惑星形成の理論

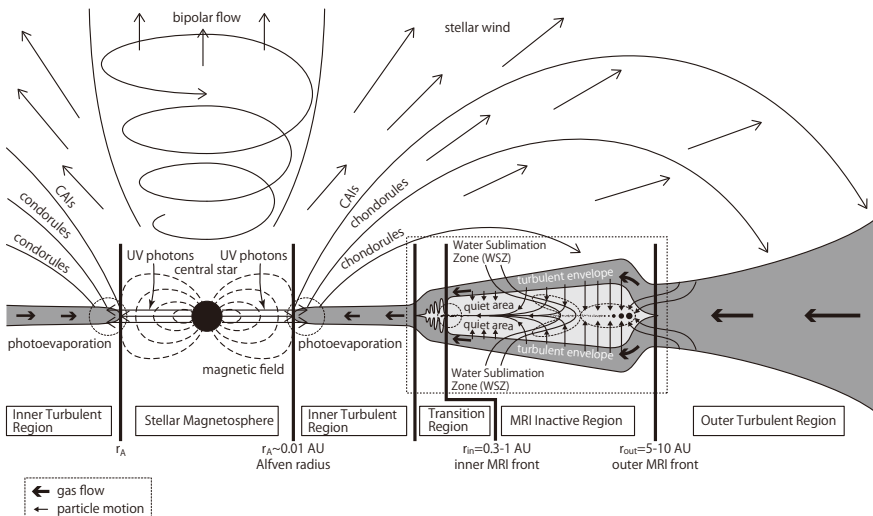
今枝 佑輔¹ 戎崎 俊一¹

¹ 理研

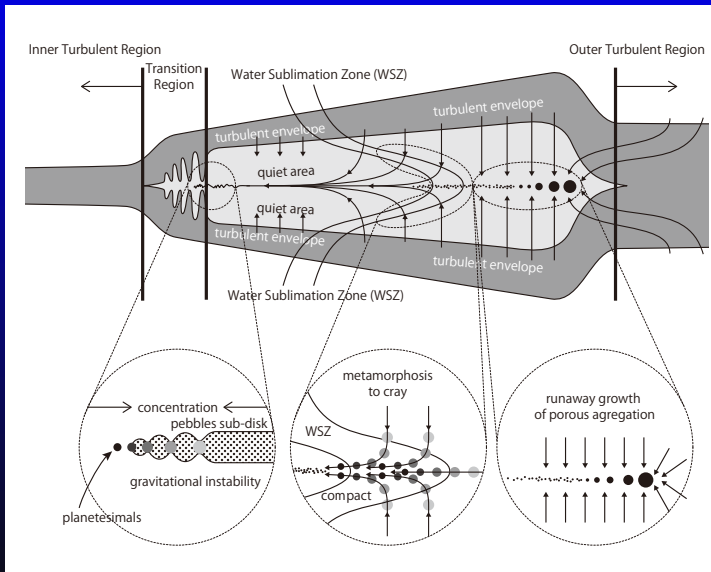
June 2, 2015

- 1 星形成過程と原始惑星系円盤
- 2 原始惑星系円盤中での惑星系形成
- 3 一次元定常粘性円盤モデルの構築
- 4 定常原始惑星系円盤モデル中での固体粒子の進化
- 5 まとめ

Picture



Picture



原始惑星系円盤の存在

原始惑星系円盤

- 観測的には1990年代～
- 電波、赤外、可視
- スペクトル、シルエット、熱放射



Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

原始惑星系円盤とは?

- 恒星は星間ガスの収縮によって生まれる

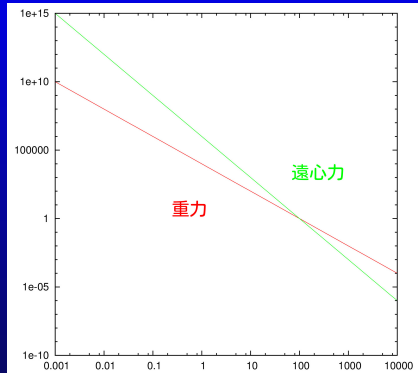
分子雲コア → 恒星

- 分子雲コア

- ~ 10000 [AU]
- $\sim 10^{-19}$ [g/cm³]
- ~ 10 [K]

- 恒星

- ~ 0.001 [AU]
- ~ 1 [g/cm³]
- \sim 数千 [K]



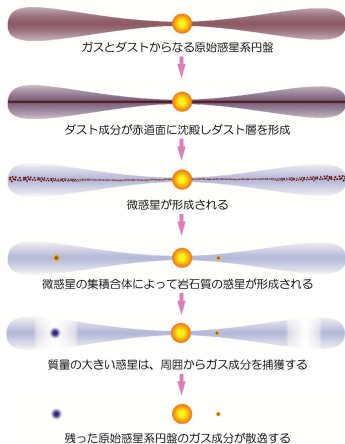
- 動径方向には遠心力
- 垂直方向には圧力勾配

で支えられた円盤状の平衡形状

→ 原始惑星系円盤

原始惑星系円盤中での惑星系形成

惑星系形成の標準的なシナリオ（京都モデル）



仮定

- 層流環境下での惑星形成
- ダスト層の重力不安定による微惑星形成
- Porosity 進化を考慮しない粒子の合体成長
- 惑星位置が移動しない形成過程

原始惑星系円盤中での惑星系形成

以後の様々な研究により様々な進展
京都モデルの仮定との矛盾

- MRI Active region, Dead Zone, Layered accretion
(Balbus and Hawley 1991,2000, Gammie 1996, Sano and Miyama 2000)
- Fluffy aggregation with drifting dust
(Suyama+ 2008, Okuzumi+ 2012, Kataoka+ 2013)
- Dust destruction by collision
(Wada+ 2009, Stewart and Leinhardt 2009)
- Planet migration
(Paardekooper+ 2010, Lyra+ 2010)

原始惑星系円盤中での惑星系形成

京都モデルの仮定: 原始惑星系円盤が層流環境

- 原始惑星系円盤は磁気乱流環境

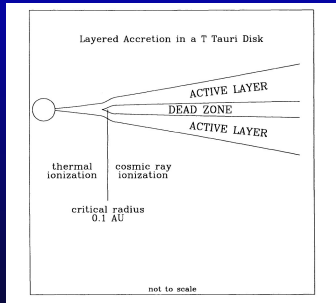
(Balbus and Hawley 1991,2000, Gammie 1996, Sano and Miyama 2000)

原始惑星系円盤中での惑星系形成

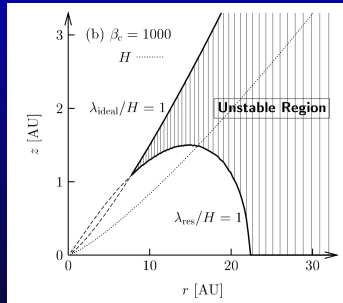
乱流の起源

- 磁気回転不安定 (MRI)

電離度が低いところでは乱流が発生しない



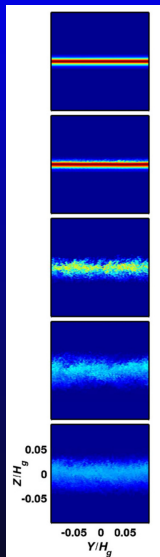
Gammie+ 1996



Sano+ 2001

乱流-デッドゾーンの存在域を判定 → 惑星系形成

原始惑星系円盤中での惑星系形成



京都モデルの仮定:

ダスト層の重力不安定による微惑星の形成

- ダスト濃集層と上空ガストの間で Kelvin Helmholtz Instability
- ダスト巻き上げによるダスト密度低下
重力不安定の阻害

Radial Drift を積極的に使い
局所的な固体粒子濃集領域での集積で回避

Barranco+ 2009

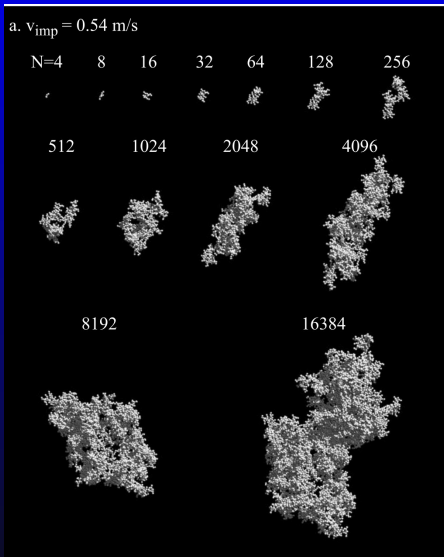
原始惑星系円盤中での惑星系形成

京都モデルの仮定: 内部密度一定な固体粒子集積

- m サイズの固体粒子はガス円盤に角運動量を奪われて1000年程度で落下 (通称ダスト落下問題)
- 高速度衝突によるダスト成長の阻害 (通称ダスト破壊問題)

陶山、奥住、片岡らによる
「ふわふわダスト」モデルを考慮する

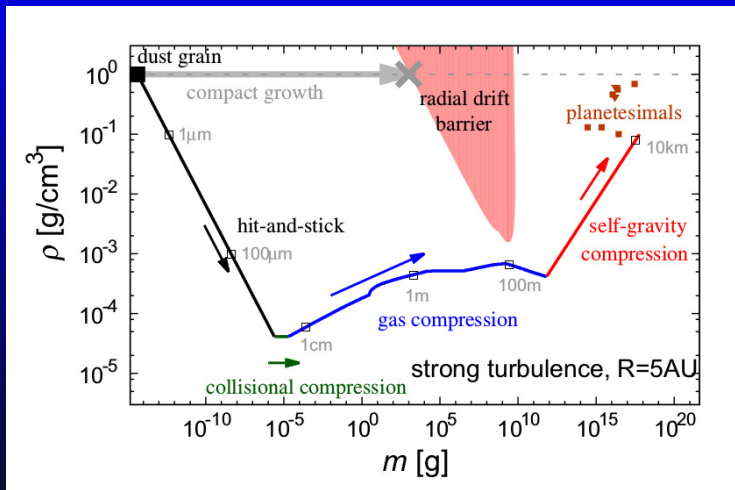
原始惑星系円盤中での惑星系形成



Suyama+ 2008

- 微小粒子の付着成長
→ BCCA
- 粒子が重く成長するほど内部密度低下
- ダスト成長時間
< ダスト落下時間
→ 落下問題回避
- ダスト衝突速度
→ 破壊問題回避

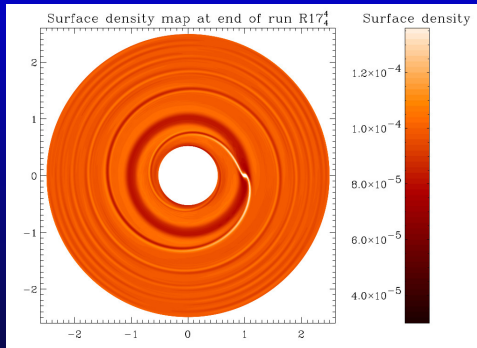
原始惑星系円盤中での惑星系形成



Kataoka+2013

原始惑星系円盤中での惑星系形成

京都モデルの仮定: 惑星は移動しない



Masset 2002

- 原始惑星系円盤と惑星の重力相互作用
- 非対称な wake
角運動量輸送
- 惑星の動径方向移動

0.1 ~ 1 地球質量程度以上の惑星
生まれた場所から動く

原始惑星系円盤中での惑星系形成

移動方向は微妙な問題

- ガス円盤の密度構造
- ガス円盤の温度構造

ここでは

- エントロピー勾配の効果を含む惑星移動を考慮

(Paardekooper+ 2010, Lyra+ 2010)

「惑星位置が移動しない形成過程」しか考慮していない
問題を回避

How do we construct a disk model?

- 一次元定常粘性降着円盤の解

(Shakura and Sunyaev 1973)

$$\begin{aligned}\dot{M} &= \frac{3\pi k_B \alpha T \Sigma}{\Omega \mu m_H} \\ &= 10^{-6.5}, 10^{-7.0}, 10^{-7.5}, 10^{-8.0} M_\odot/\text{yr} = \text{const}\end{aligned}$$

$$T^4 = \frac{3\dot{M}}{8\pi\sigma_{\text{SB}}}\Omega^2\tau_{\text{eff}} + T_{\text{amb}}^4,$$

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{3}{8}\kappa(a, T)\frac{\Sigma}{2} + \frac{\sqrt{3}}{4}$$

- $\dot{M} \rightarrow [T(r), \Sigma(r), \alpha(r)]$
- \dot{M} は中心星の進化段階の指標と考える

How do we construct a steady state disk?

- 粘性の起源 :

Magneto-Rotational Instability (磁気回転不安定)

- 磁場分布

- $\beta_z = 200$ for $r < 2\text{AU}$
- $\beta_z = 200\left(\frac{r}{2\text{AU}}\right)^{5/4}$ for $r > 2\text{AU}$

i.e. $B_z \propto r^{-2}$ for passive disk.

- エルサッサ数 Λ の分布 $\rightarrow \alpha$ の分布.

$$\Lambda \equiv v_{Az}^2 / \eta \Omega_K > 1 \quad \text{for MRI active}$$

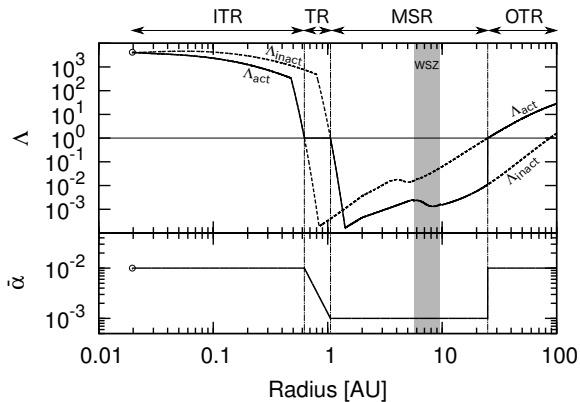
$$\eta = 234 \sqrt{T} / x_e \text{ [cm}^2\text{/s]}$$

How do we construct a steady state disk?

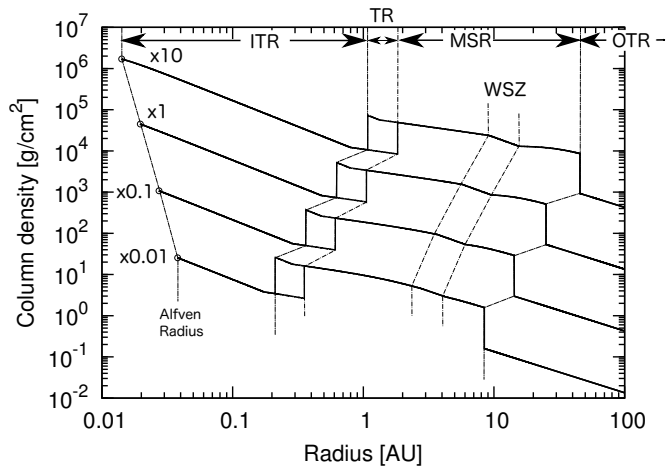
- 電離源
 - 宇宙線
 - 放射性核種
 - 熱電離
- サハの式
- 電離とリコンビネーションとの釣り合い
- ソース：ダストと H_3^+
- 設定した α 円盤モデル

$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.001$	Adopted α
$\Lambda > 1$	$\Lambda > 1$	0.01
$\Lambda < 1$	$\Lambda > 1$	Interpolation
$\Lambda > 1$	$\Lambda < 1$	0.01
$\Lambda < 1$	$\Lambda < 1$	0.001

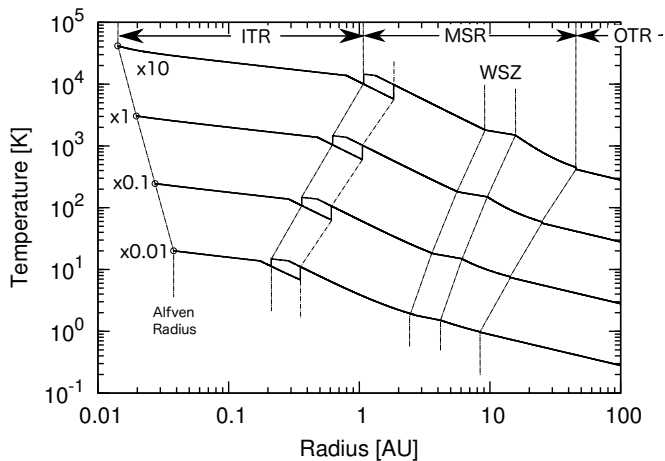
Elsasser Number and α



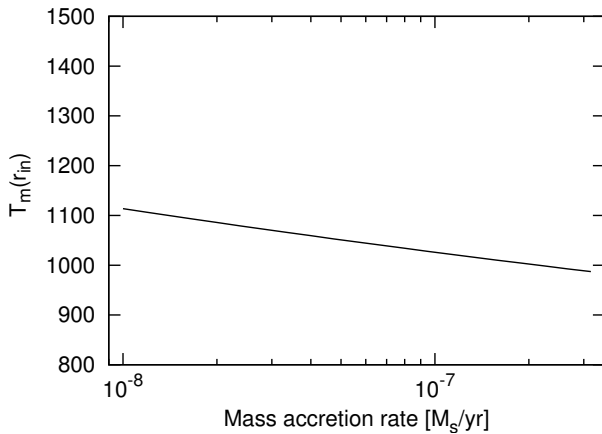
Column Density



Temperature



MRI front temperature



構築した原始惑星系円盤の特徴

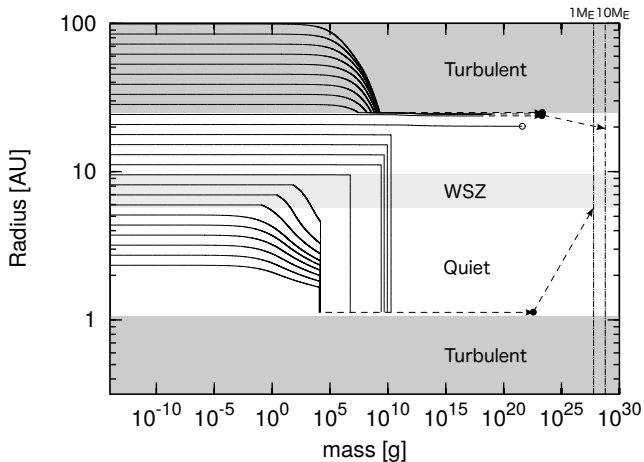
- 内側に熱電離に起因する MRI 乱流領域
- その外側に乱流領域 静穏領域をつなぐ遷移領域
- 遷移領域の圧力勾配が正.
- 内側 MRI フロントの温度が $T < 1300\text{K}$.
- 揮発性元素が無い環境下での岩石微惑星の形成
- ABEL model に整合的な岩石惑星形成のシナリオ

定常原始惑星系円盤モデル中での固体粒子の進化

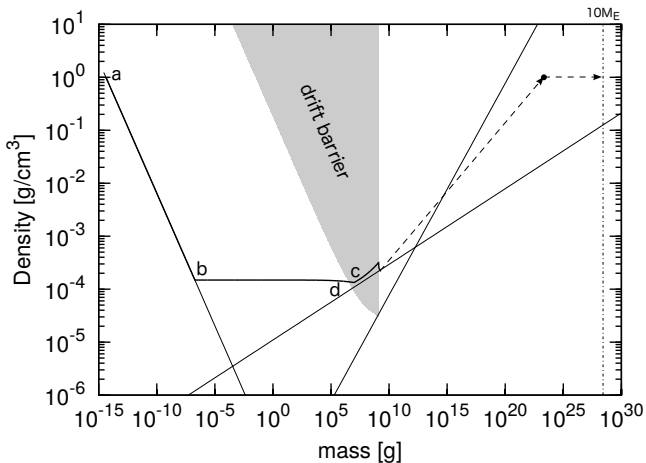
- 質量分布を一代表質量で近似した成長合体方程式
- 粒径に依存した固体粒子ドリフト
- 粒子円盤スケールハイトの粘性拡散係数 α 依存
- 粒子円盤スケールハイトの粒径 a 依存
- 高密度粒子円盤での重力不安定
- 高速衝突破壊による粒子成長の阻害
- 惑星移動

→ 定常原始惑星系円盤モデル中での粒子進化を追跡

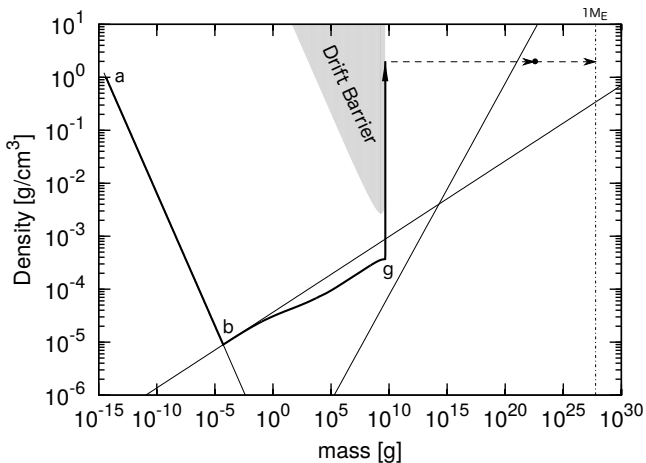
Particle Trajectories with Mass Evolution



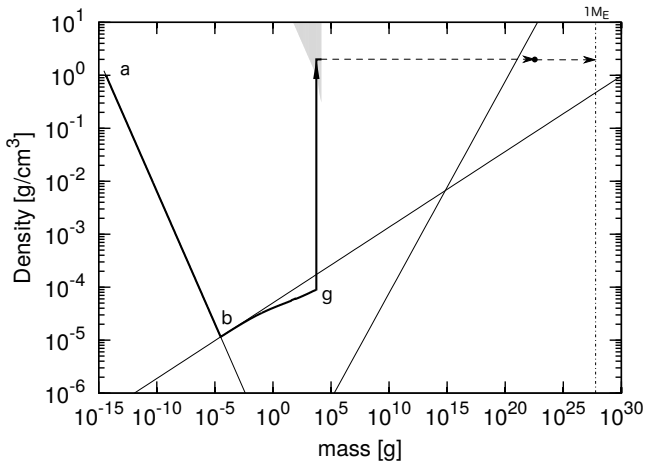
Mass - Mean Density evolution from 60AU



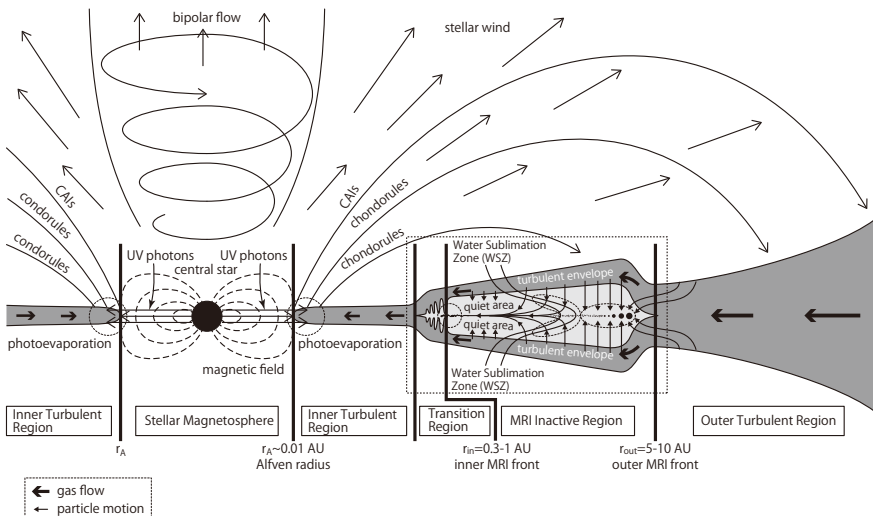
Mass - Mean Density evolution from 13 AU



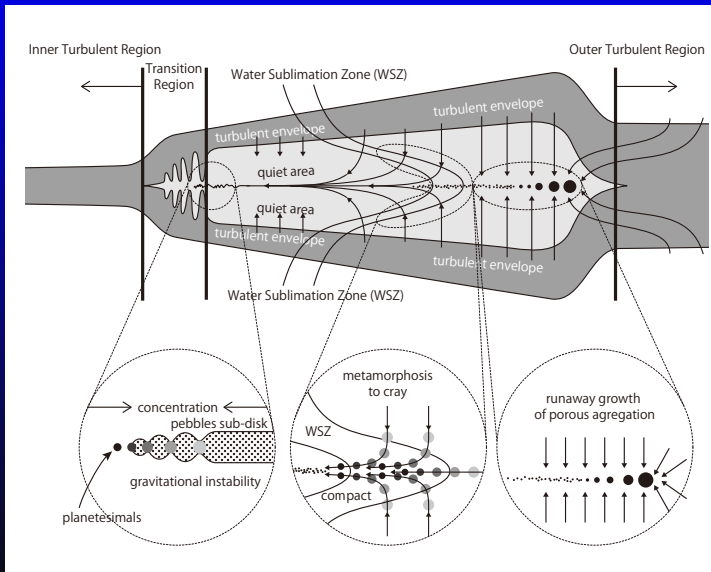
Mass - Mean Density evolution from 9AU



Picture



Picture



Comparison

京都モデル

- 層流環境下での惑星形成
- ダスト層の重力不安定による微惑星形成
- Porosity 進化を考慮しない粒子の合体成長
- 惑星の位置が移動しない惑星形成過程

我々のモデル

- MRI turbulent region, Quiet Area, and Turbulent Envelope
- 粒子の動径ドリフトと局所集積
- Porosity 進化を考慮した粒子の合体成長・破壊
- 惑星移動

Conclusions

- 一次元定常粘性降着円盤モデルを構築した
($\dot{M} = 10^{-6.5} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr.}$)
- 遷移領域は正の圧力勾配をもつ
- MRI front で固体物質の濃集が生じる
- これにより Tandem Planet Formation (縦列惑星形成) が起こることを示した
- 内側 MRI フロントでは揮発性物質を欠く微惑星形成が進行し、地球が海惑星になってしまう問題を回避できる可能性がある