

# 主降着期における 星周円盤の進化過程

塚本裕介

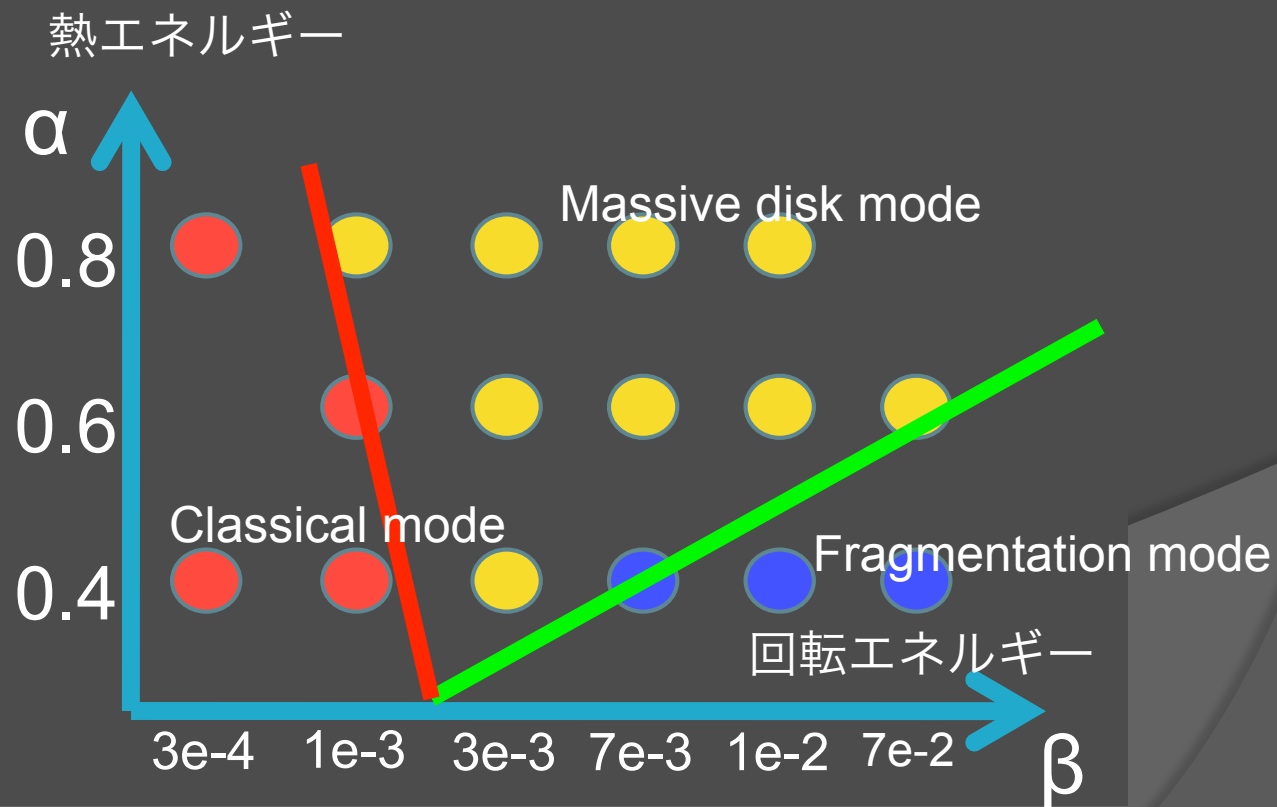
(東京大学天文学専攻D2)

町田正博 (国立天文台)

牧野淳一郎 (国立天文台)

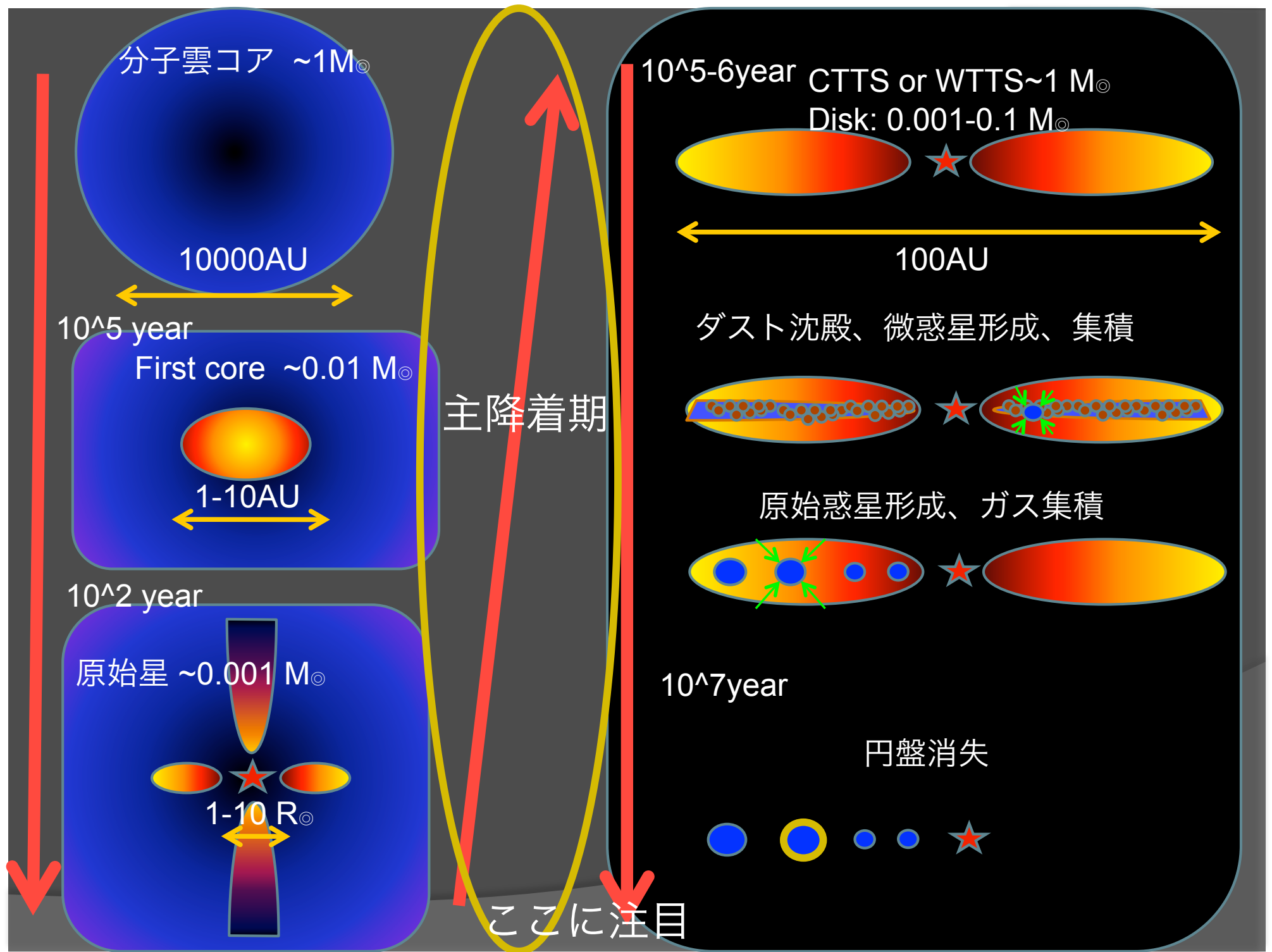
# 概要

- 星周円盤の進化過程をSPH法を用いて分子雲コアから調べた
- $M_{\text{disk}} > M_{\text{star}}$  が  $10^4$ - $5 \text{ year}$  続くモードが**広いパラメータレンジ**で存在することが分かった



# Outline

- ◎ Introduction
- ◎ 計算手法、初期条件
- ◎ 結果
- ◎ まとめ

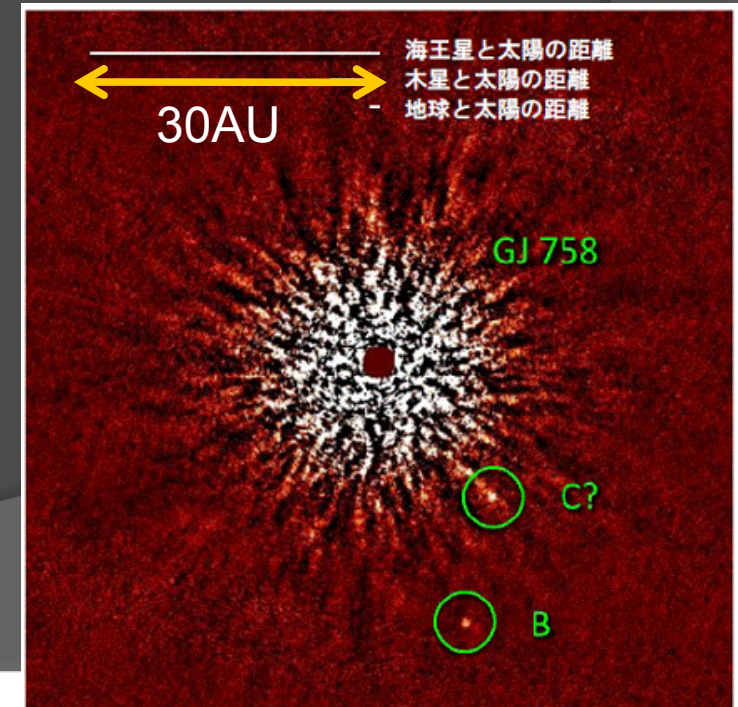
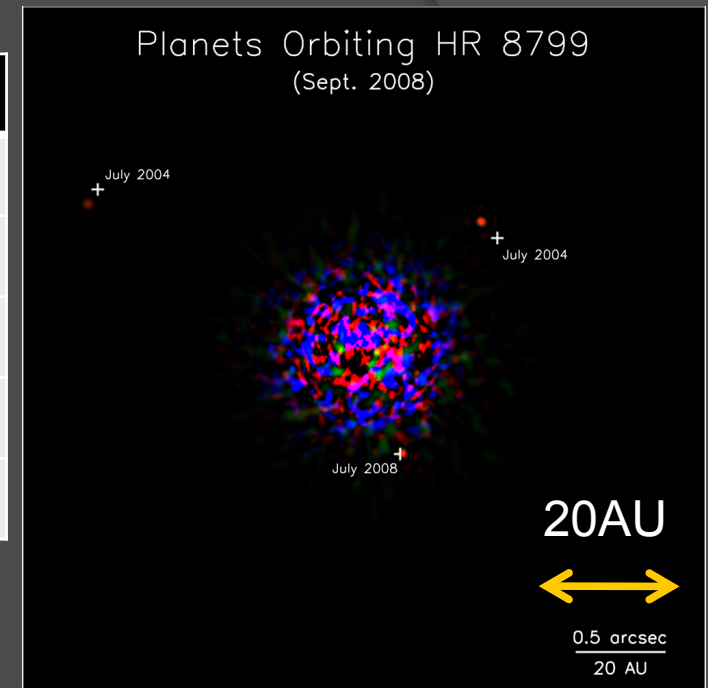


# なぜ主降着期に注目するか ~観測的モチベーション~

天体名	質量 ( $M_j$ )	距離 (AU)
HR8799 b	7	24
c	10	37
d	10	67
GJ758 b	10-40	30
c	19	12-47

- コアアクリーションモデルでは説明が極めて難しい  
(Dadson-Robinson et al 2009)
- 重力不安定では円盤が**軽すぎて**100AU以内では作れない (Rafikov 2005)

円盤が**重い**主降着期なら重力不安定によって形成する可能性がある (Machida et al 2010)



# Outline

- ◎ Introduction
- ◎ 計算手法、初期条件
- ◎ 結果
- ◎ まとめ

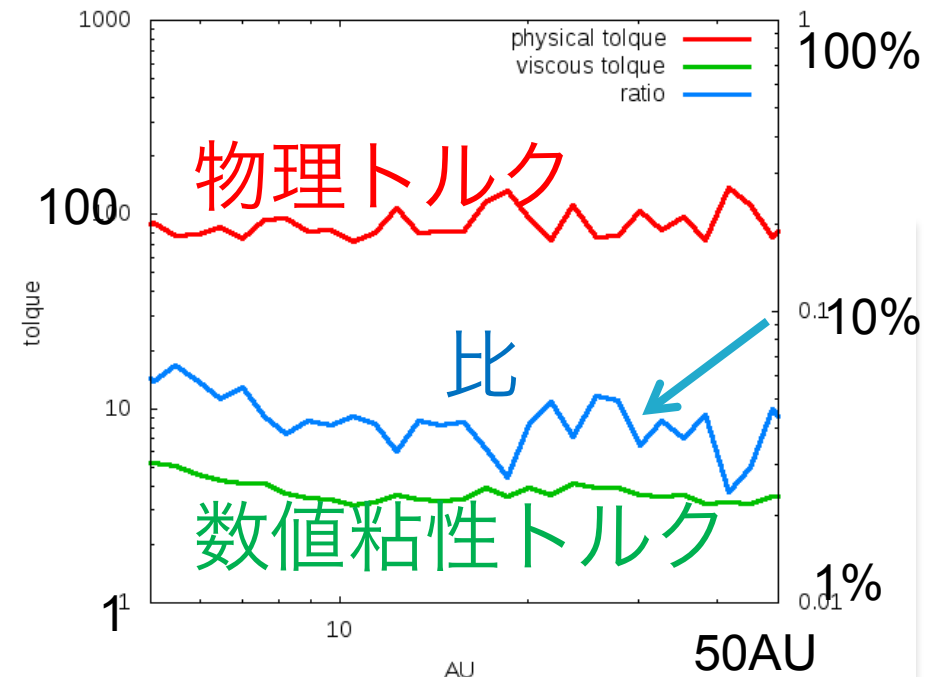
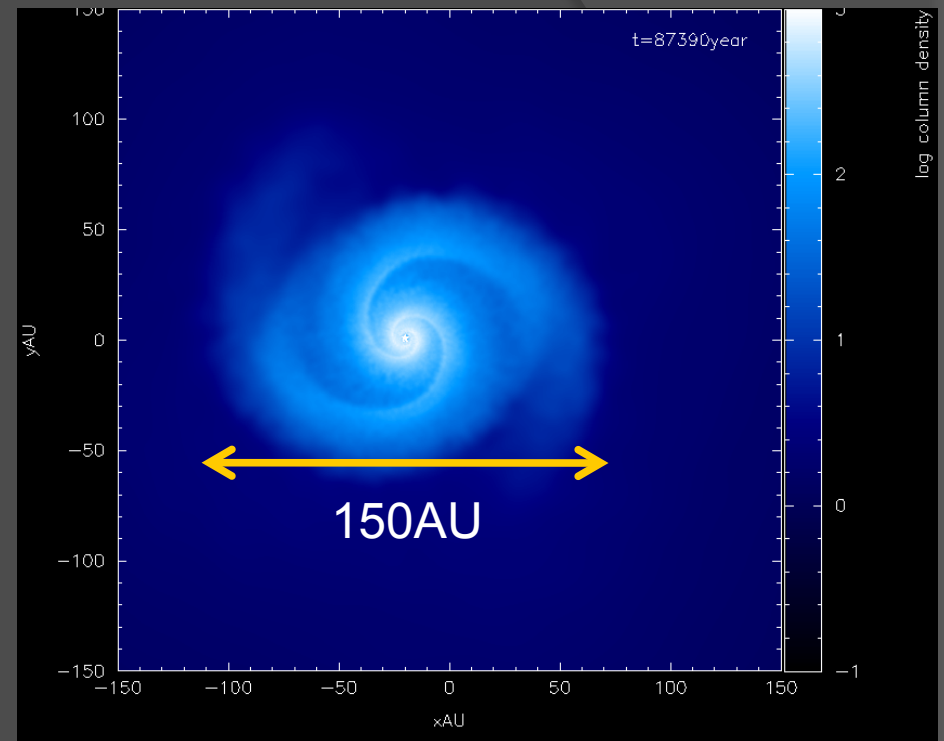
# 計算手法

- ◎ 流体:独立時間刻み SPH
- ◎ 重力:Tree法  $\theta=0.5$
- ◎ 粒子数: 54万體
- ◎ 状態方程式:

$$P(\rho) = c_{s0}^2 \rho \quad (\rho < \rho_c)$$
$$= c_{s0}^2 \rho_c \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^{\frac{7}{5}} \quad (\rho > \rho_c)$$

( $\rho_c=4.0e-14$  g/cm<sup>3</sup>,  $c_s=190$  m/s)

- ◎ Second collapse以後はsink particleを導入する
- ◎ MPI並列, Cray XT4 (NAOJ)
- ◎ dt~0.01 year各run, 300万step程度



# 初期条件

- ◎ 一様密度球
- ◎ 全質量:  $1M_{\odot}$

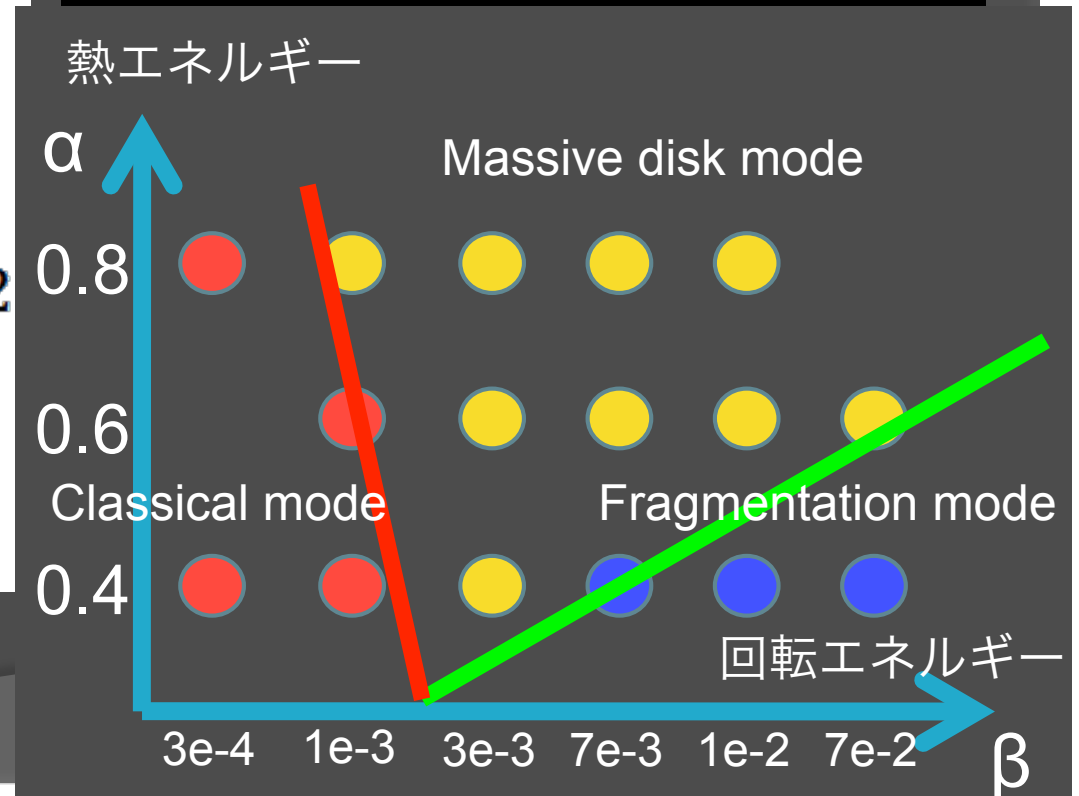
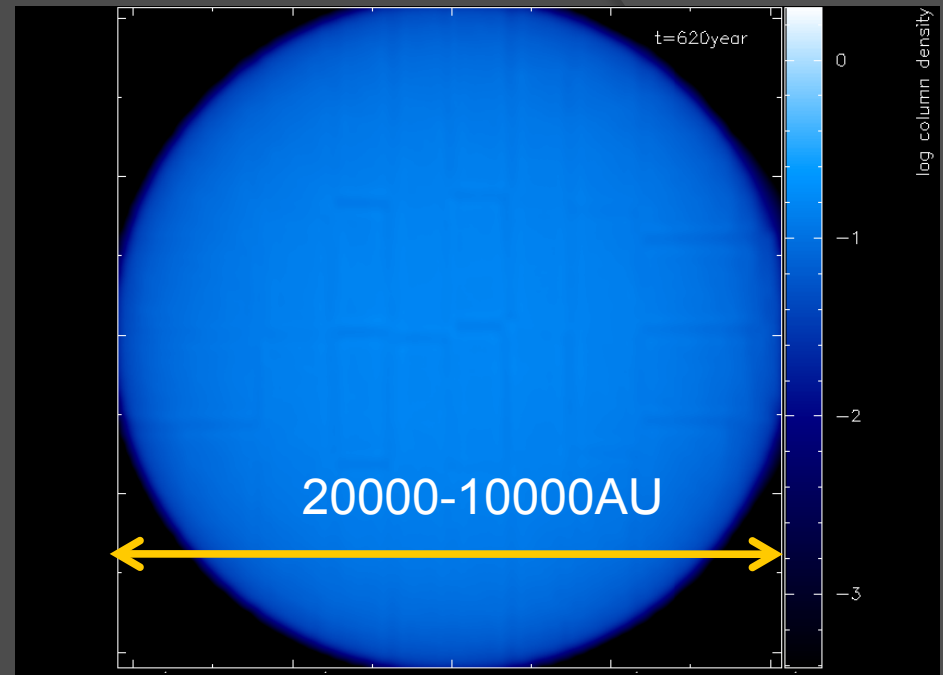
$$\alpha = \frac{5Rc_s^2}{2GM} = 0.4, 0.6, 0.8$$

$$\beta = \frac{\omega^2 R^3}{3GM}$$

$$= 3 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-2}$$

$$\rho_{\text{init}} \simeq 3 - 23$$

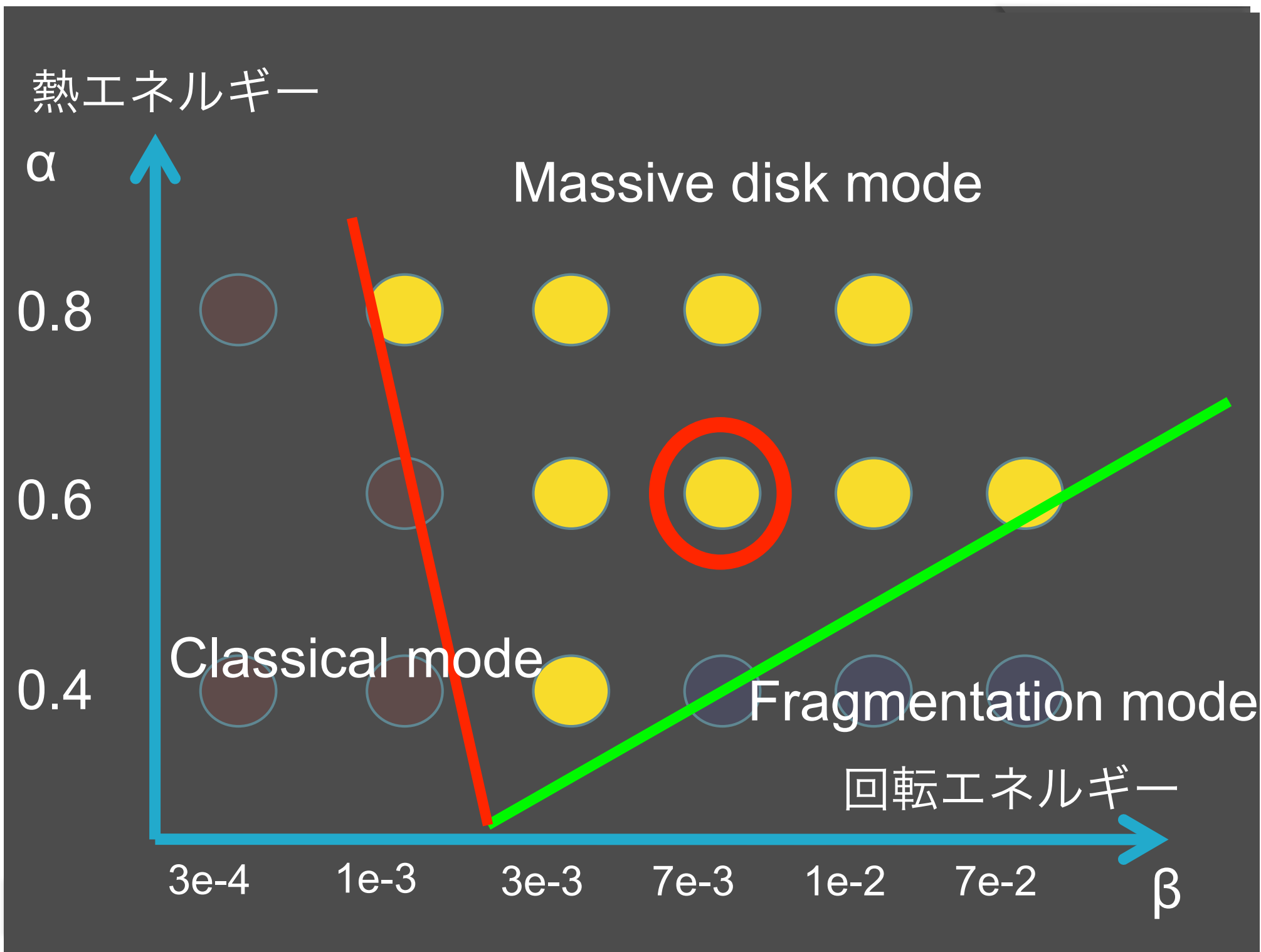
$$\times 10^{-19} \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$$



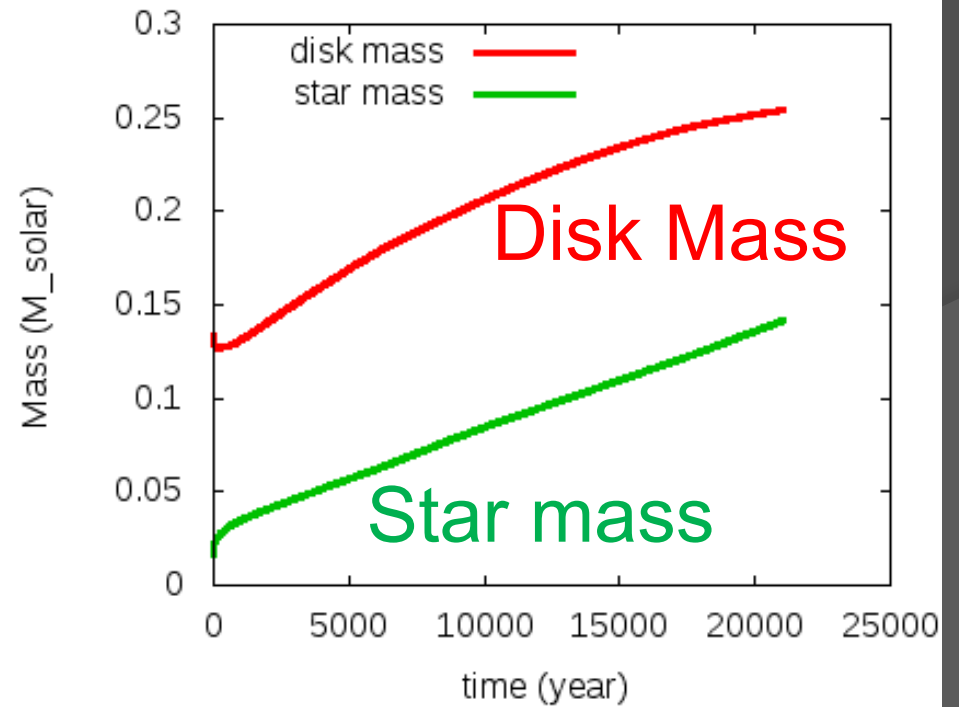
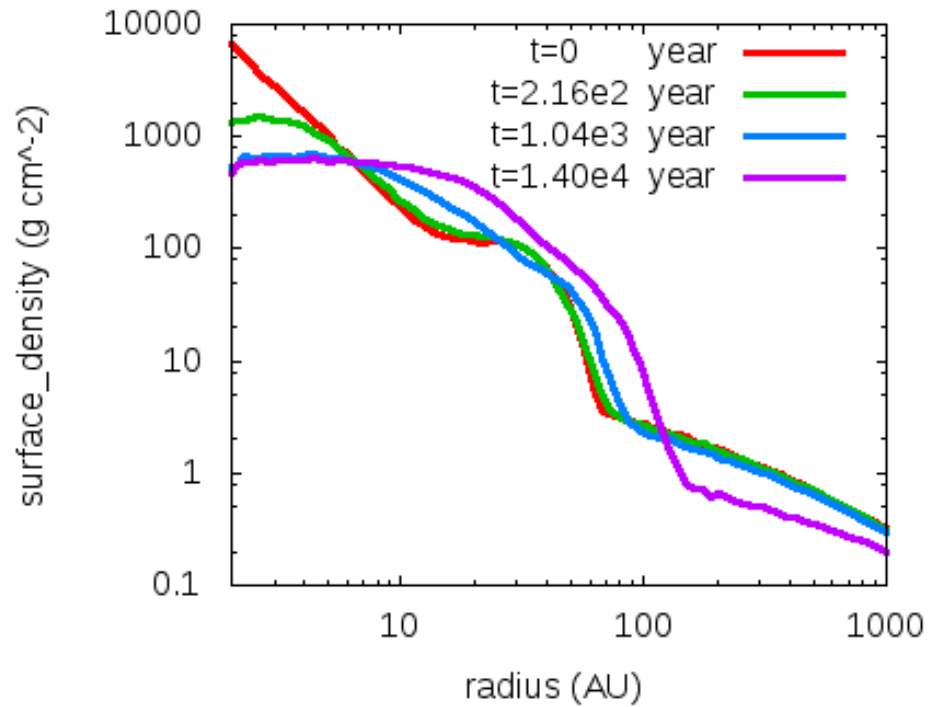
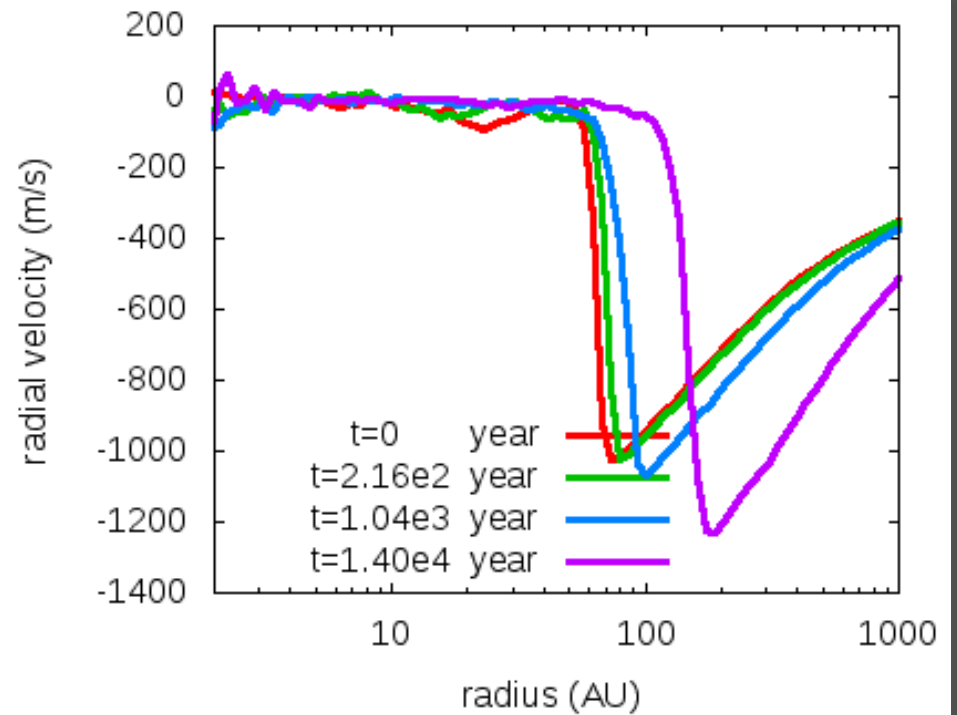
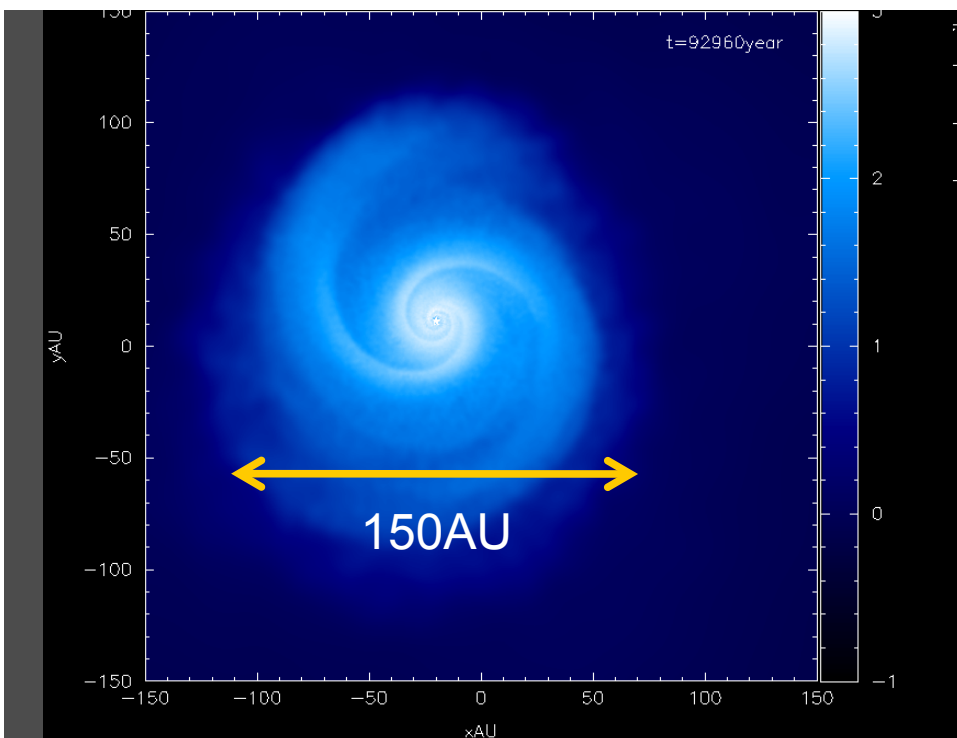


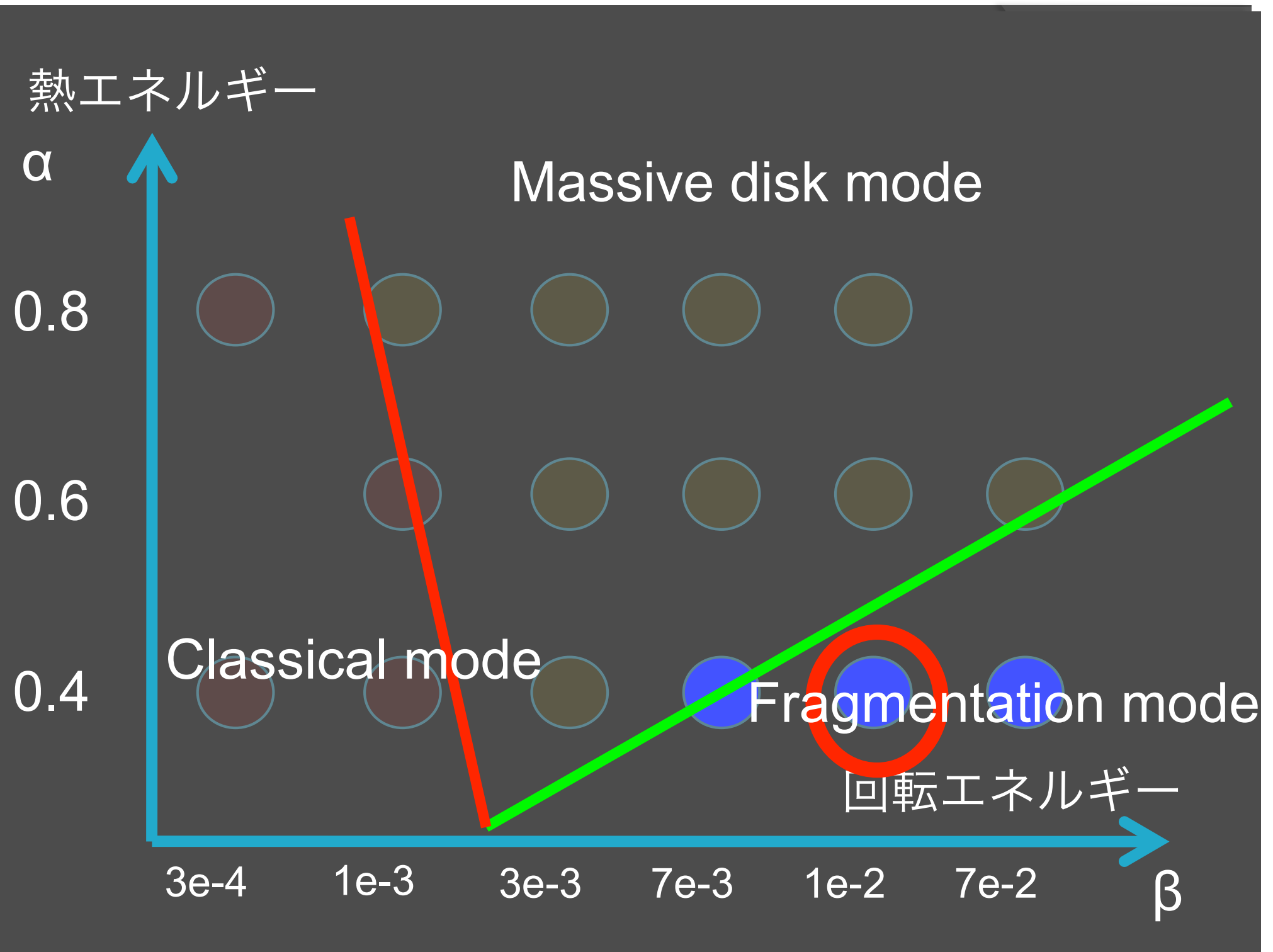
# Outline

- ◎ Introduction
- ◎ 計算手法、初期条件
- ◎ 結果
- ◎ まとめ



ムービー





ムービー

# 分裂のCriteriaは？

Miyama (1992)によると比熱比が $\gamma$ の回転ガス球のFlattnessは

$$F^\gamma = \frac{135}{256} \left(\frac{32}{9}\right)^\gamma c_g^{4-3\gamma} \left(\frac{m_d}{M}\right)^{2\gamma-2} (\alpha_0 \beta_0^{4-3\gamma})^{-1}$$

であたえられる。

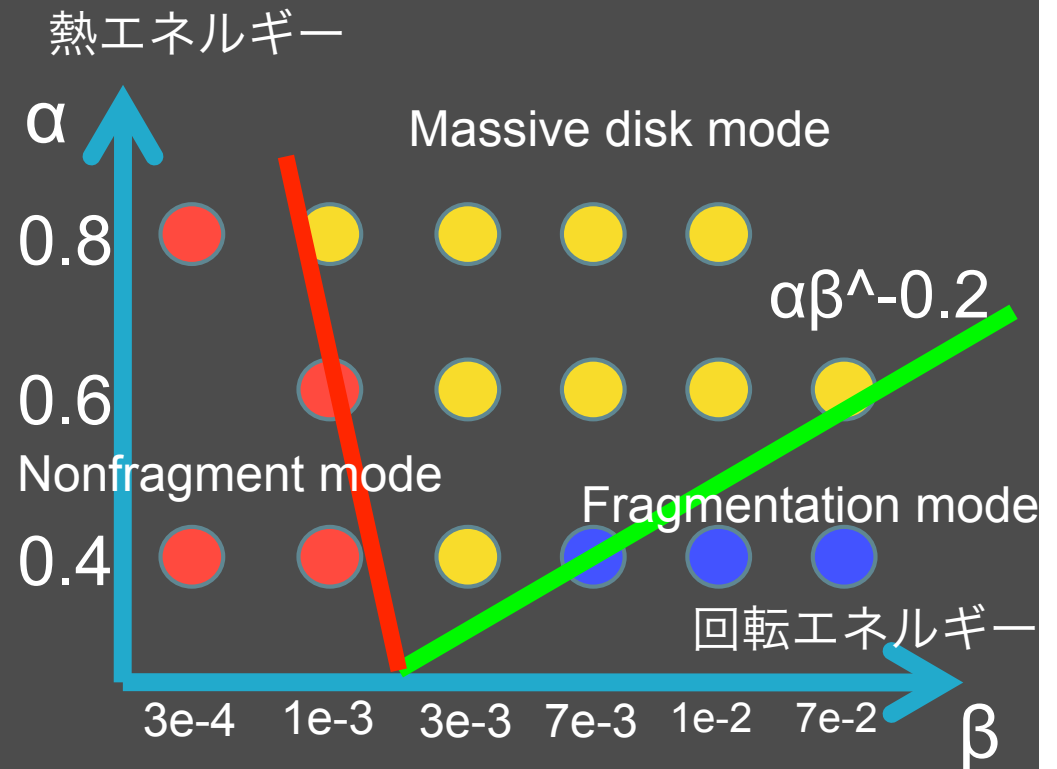
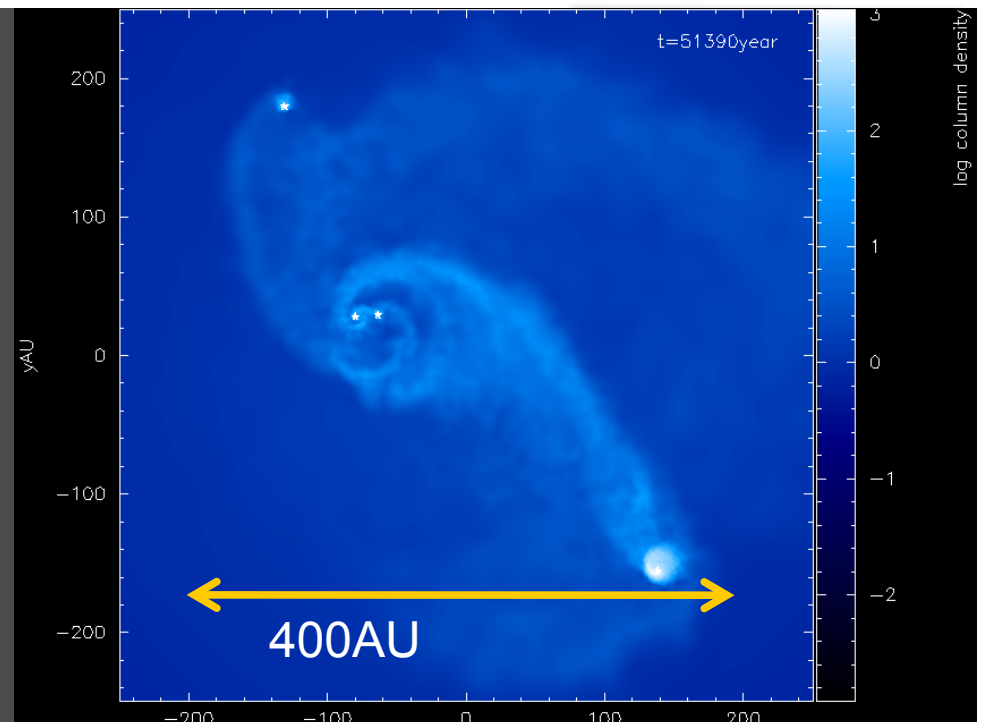
一方回転ディスクの分散関係から

$$\begin{aligned} \omega^2 &= c_s^2 k^2 - 2\pi G \sigma k + \kappa^2 \\ &= c_s^2 \left(k - \frac{\pi G \sigma}{c_s^2}\right)^2 + \kappa^2 \left[1 - \left(\frac{\pi G \sigma}{c_s \kappa}\right)^2\right] \\ &= c_s^2 \left(k - \frac{1}{\gamma z_d}\right)^2 + \kappa^2 \left(1 - \frac{F}{c_g c_\Omega}\right), \end{aligned}$$

したがってFlattnessがある値,0(1)より大きい場合不安定。  
このことから

$$\alpha \beta^{4-3\gamma} = \alpha \beta^{-0.2} = \text{const}$$

に沿って分裂/非分裂が分けられると思われる。



熱エネルギー

$\alpha$

Massive disk mode

0.8

0.6

0.4

Classical mode

Fragment mode

回転エネルギー

$3e-4$

$1e-3$

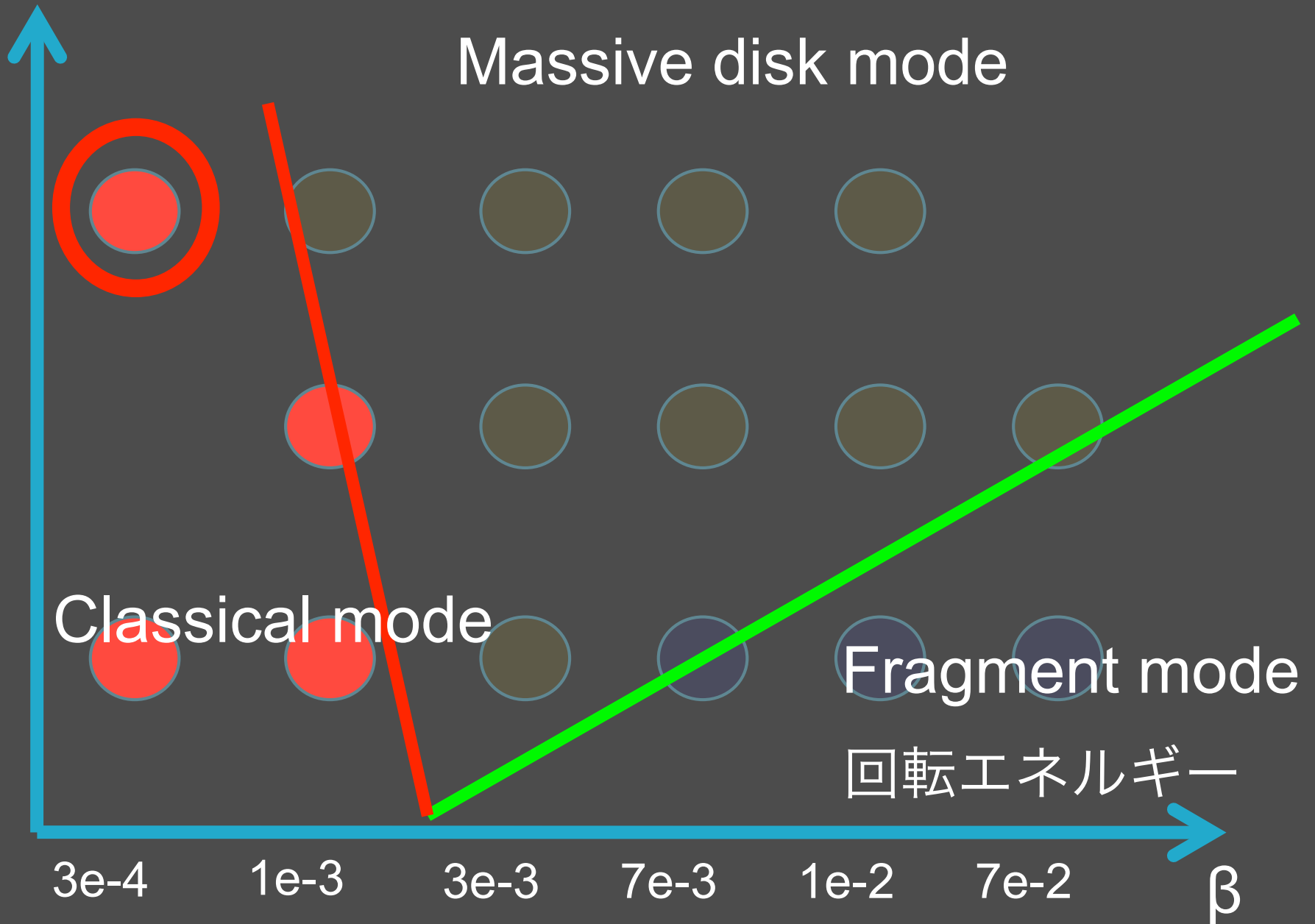
$3e-3$

$7e-3$

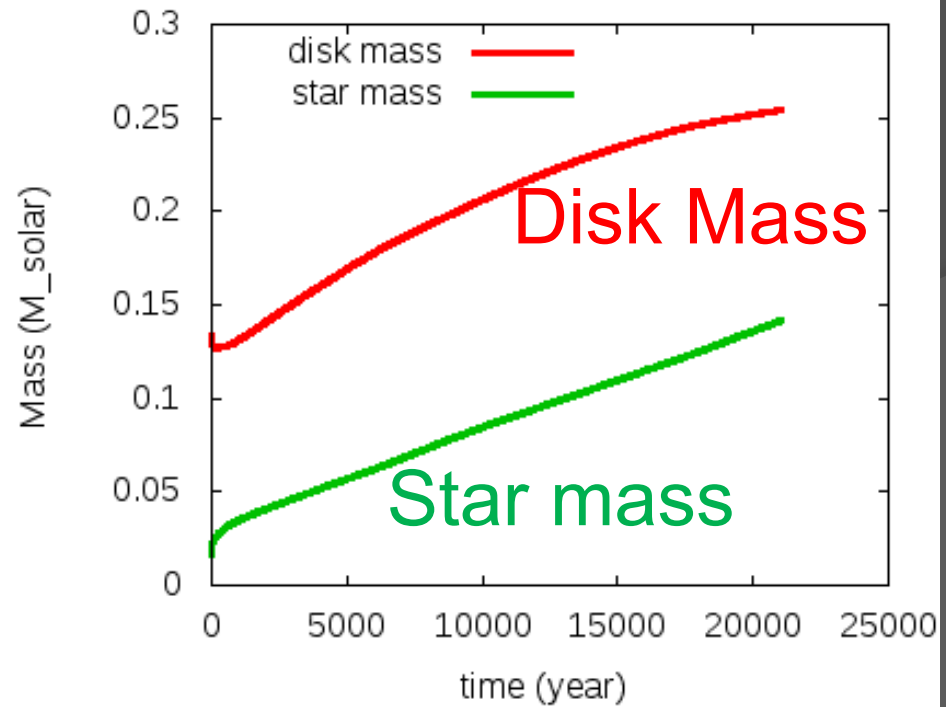
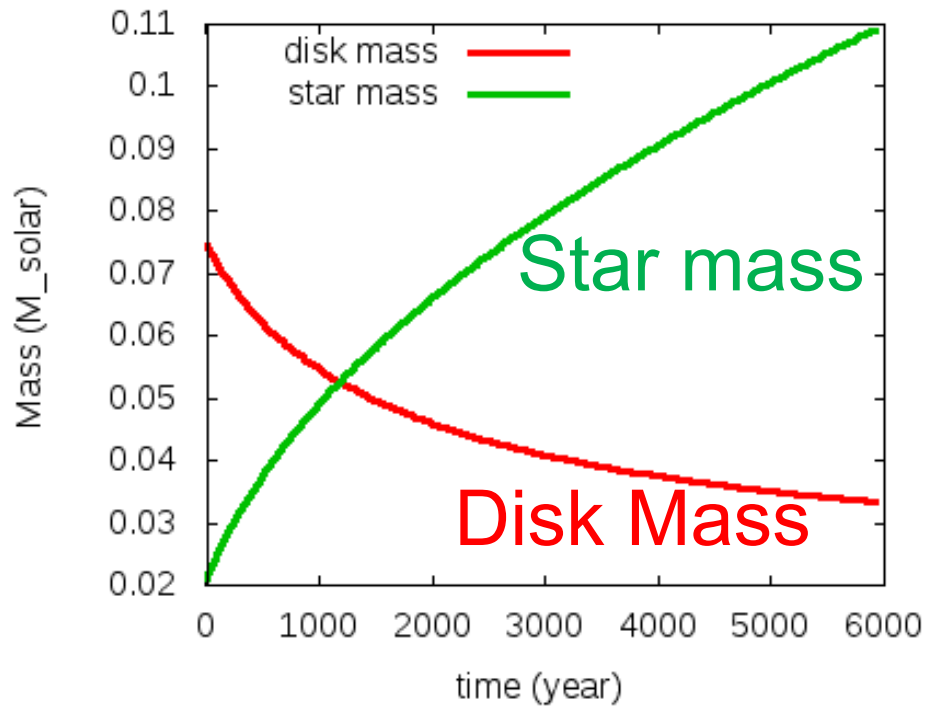
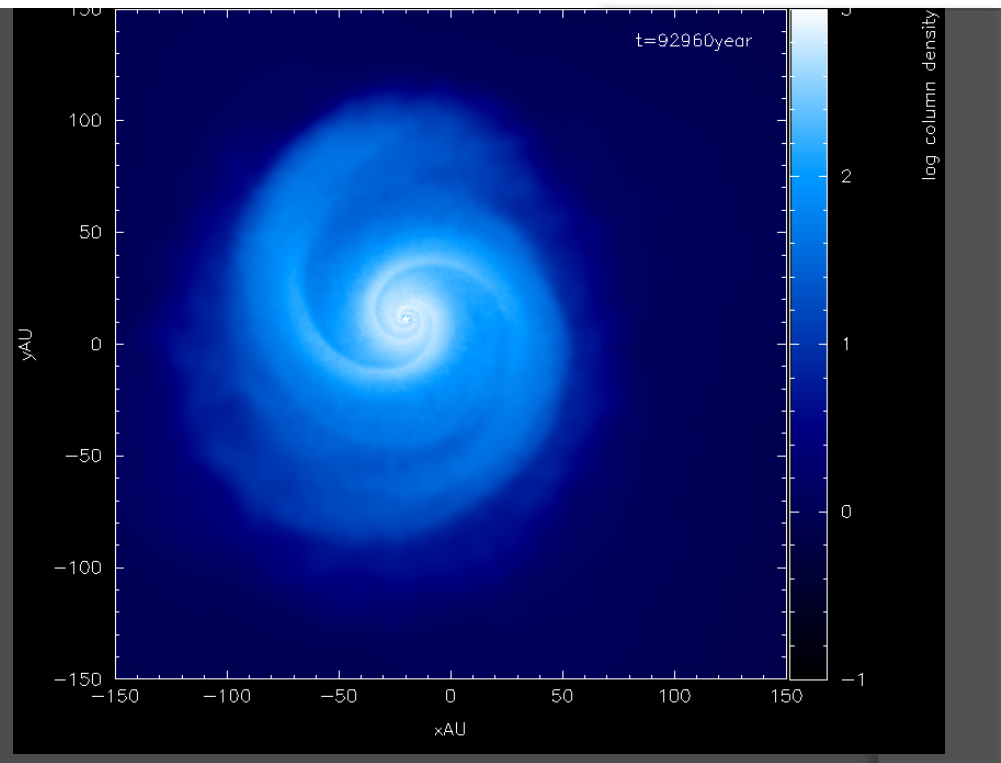
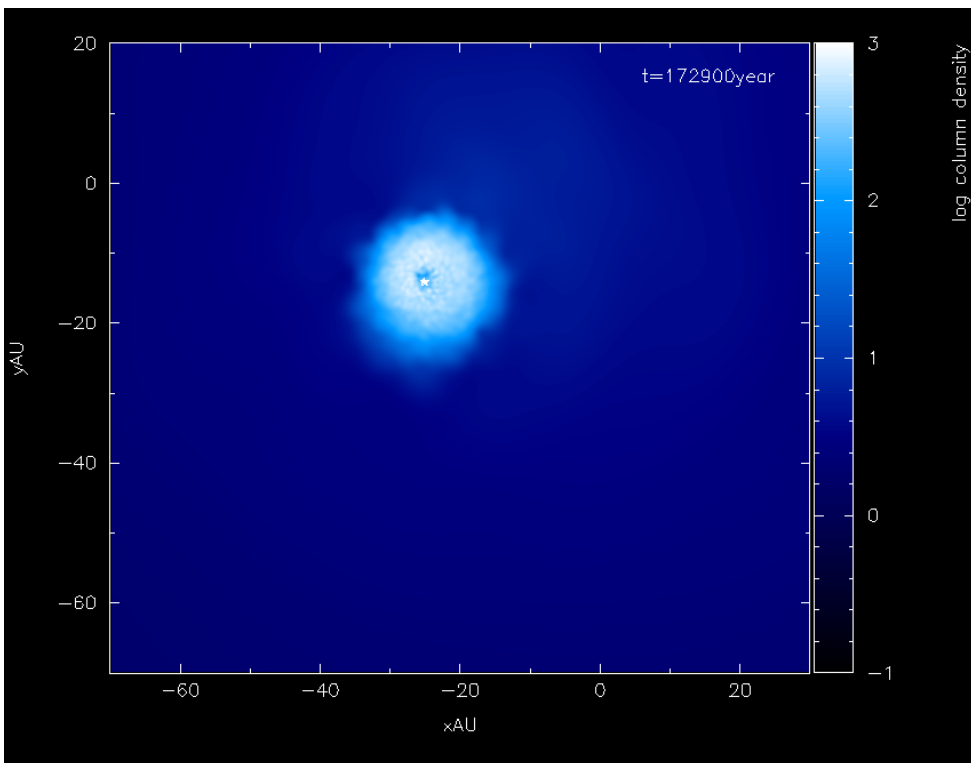
$1e-2$

$7e-2$

$\beta$







# Outline

- ◎ Introduction
- ◎ 計算手法、初期条件
- ◎ 結果
- ◎ まとめ

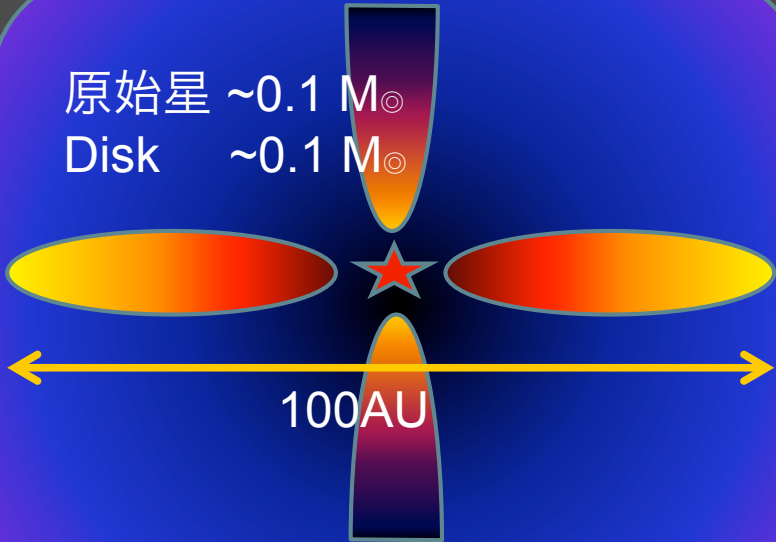
# まとめ

原始星  $\sim 0.001 M_{\odot}$



$1-10 R_{\odot}$

原始星  $\sim 0.1 M_{\odot}$   
Disk  $\sim 0.1 M_{\odot}$



100AU

$10^{5-6}$  year CTTS or WTTS  $\sim 1 M_{\odot}$   
Disk:  $0.001-0.1 M_{\odot}$



100AU

ダスト沈殿、微惑星形成、集積

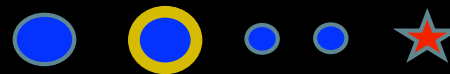


原始惑星形成、ガス集積



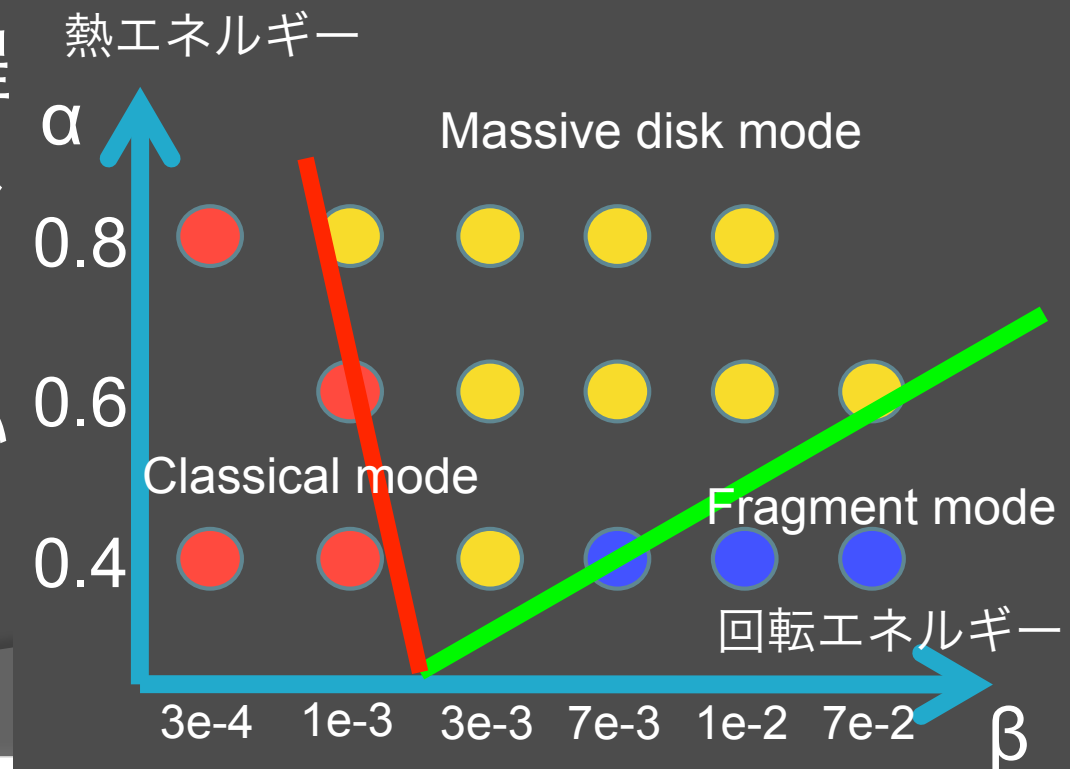
$10^7$  year

円盤消失

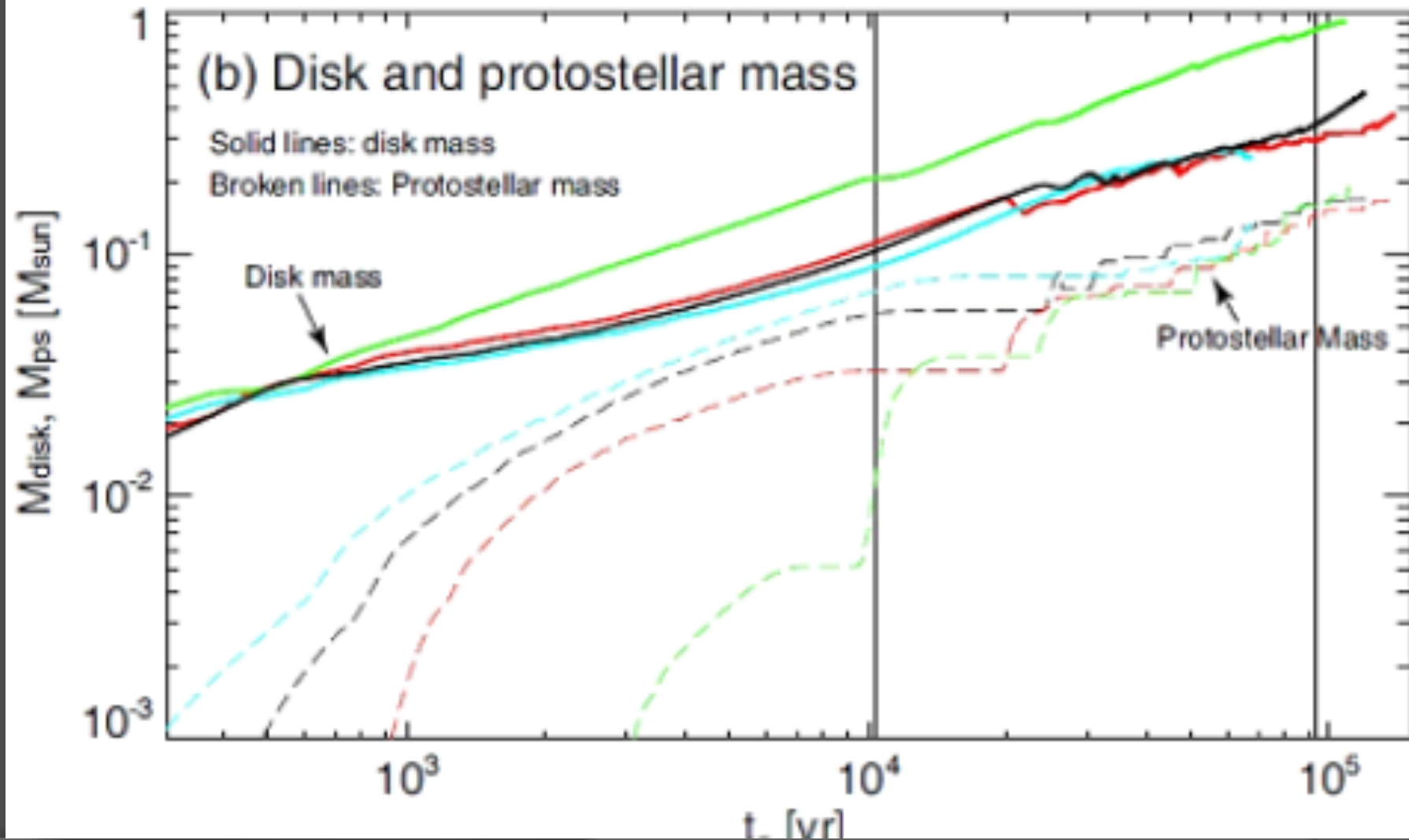


- 星周円盤の進化過程をSPH法を用いて分子雲コアから調べた
- $M_{\text{disk}} > M_{\text{star}}$  が  $10^4$ -5 year 続くモードが**広いパラメータレンジ**で存在することが分かった

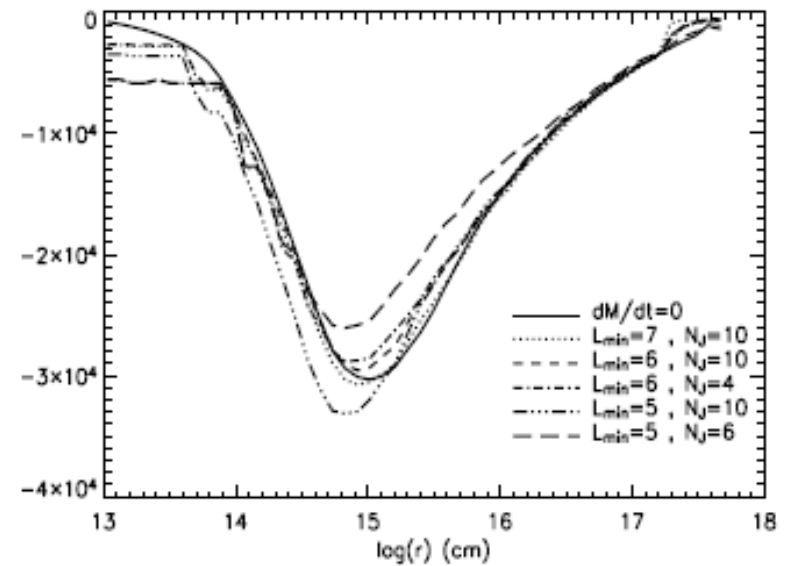
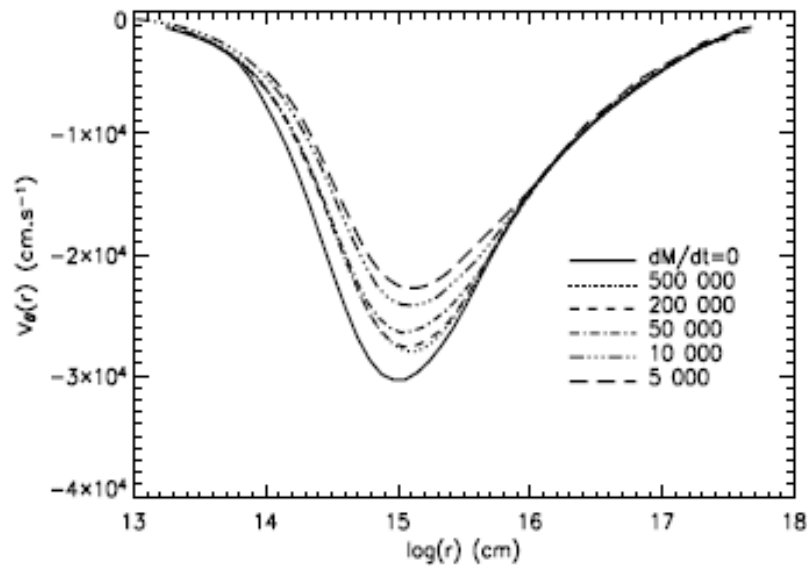
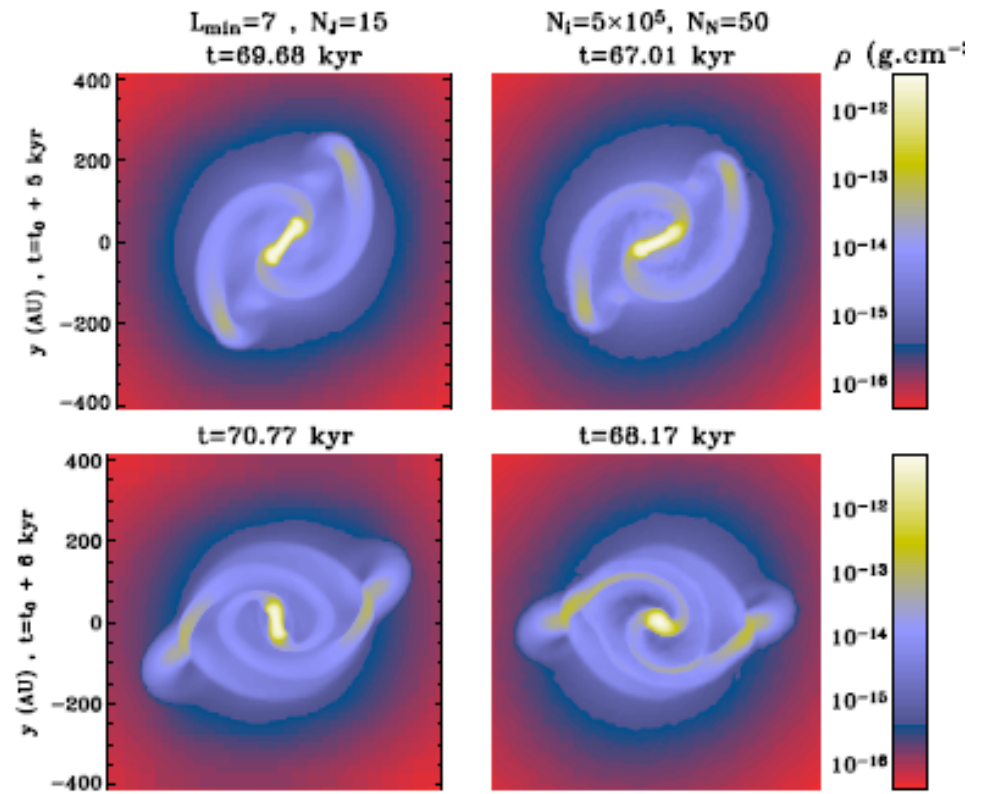
- 今後、適切な輻射過程をとりこんだシミュレーションを行い円盤の分裂過程を調べていく



# 補足1 磁場の効果 Machida et al 2010



# 補足2 SPHとAMRの比較



# 考察:重い円盤は分裂するか ~Rafikov (2005)に従って議論~

Toomre の条件      Gammie の条件

$$Q \equiv \frac{\Omega c_s}{\pi G \Sigma} < Q_0 \quad \Omega t_{\text{cool}} < \xi,$$

ここでcooling timeを

$$t_{\text{cool}} \approx \frac{\Sigma c_s^2}{\gamma - 1} \frac{f(\tau)}{2\sigma T^4}, \quad f(\tau) = \tau + \frac{1}{\tau},$$

のように仮定する。すると音速に対して

$$\left[ \Sigma \frac{f(\tau)}{\xi} \frac{\Omega}{\sigma} \left( \frac{k}{\mu} \right)^4 \right]^{1/6} \leq c_s \leq \pi Q_0 \frac{G \Sigma}{\Omega},$$

これから円盤の面密度、midplaneでの温度について下限として

$$\Sigma_{\text{min}} = \Omega^{7/5} (\pi G Q_0)^{-6/5} \left[ \frac{1}{\xi \sigma} \left( \frac{k}{\mu} \right)^4 \right]^{1/5} f(\tau)^{1/5}$$

$$\approx 6.6 \times 10^5 \text{ g cm}^{-2} a_{\text{AU}}^{-21/10} (Q_0^6 \mu^4 \xi)^{-1/5} \left( \frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{7/10} f(\tau)^{1/5}$$

$$T_{\text{min}} = \Omega^{4/5} (\xi \pi Q_0 G \sigma)^{-2/5} \left( \frac{k}{\mu} \right)^{3/5} f(\tau)^{2/5}$$

$$\approx 5800 \text{ K } a_{\text{AU}}^{-6/5} \mu^{-3/5} (Q_0 \xi)^{-2/5} \left( \frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{2/5} f(\tau)^{2/5}$$

いま、 $a \sim 20 \text{ AU}$ での条件は $k \sim O(1)$ として (Semenov et al 2003)

$$\Sigma_{\text{min}} \sim 300 \text{ g cm}^{-2}$$

$$T_{\text{min}} \sim 350 \text{ K}$$

- 面密度に関しては条件を満たす
- 温度に関しては形成初期には断熱的に進化するの条件を満たすことは可能。詳しくは輻射流体力学シミュレーションが必要

