

円盤の大質量星への接近 が惑星移動へ与える影響

小野智弘

京都大学 宇宙物理教室 修士一年
共同研究者

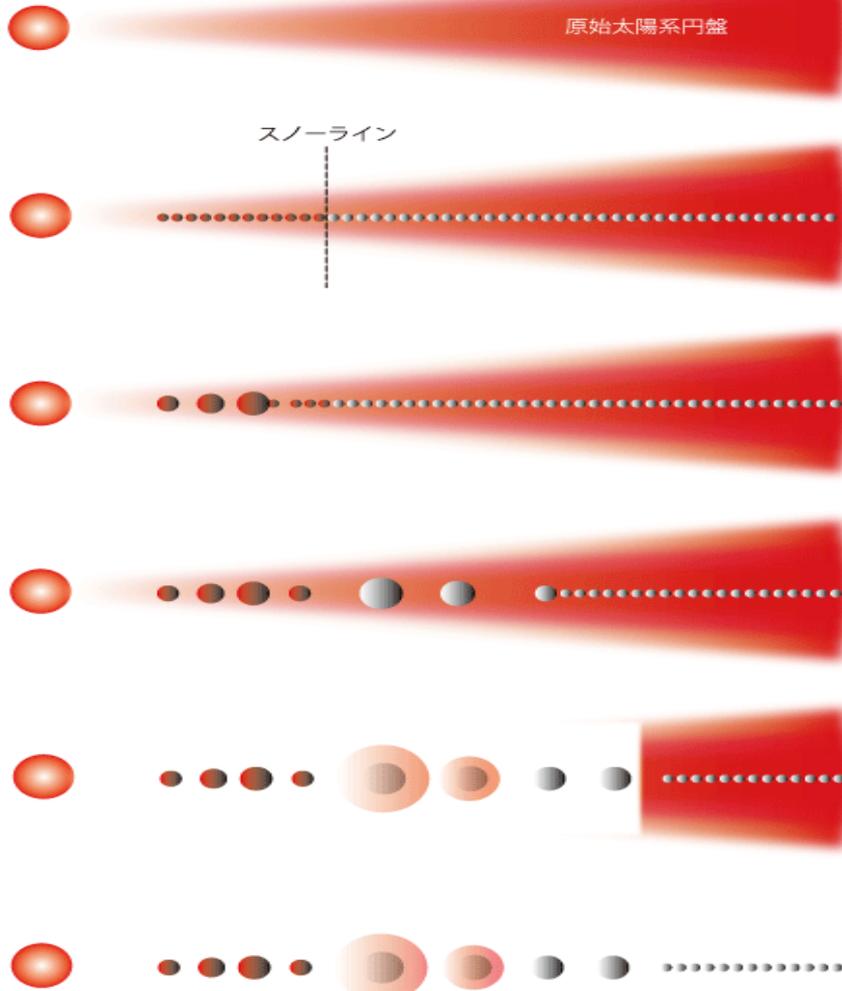
野村 英子(京都大学)

武藤 恭之(工学院大学)



原始惑星系円盤の進化

原始太陽



原始惑星系円盤の寿命

1-10 Myr

- ガス散逸
粘性降着・光蒸発
- 惑星移動
円盤ガスと惑星の間の
重力相互作用
- 惑星の大気成長
ガスの惑星への降着

目次

- 導入
- 円盤ガス散逸
- 惑星移動・ガス降着
- 結果
- まとめ



目次

- 導入
- 円盤ガス散逸
- 惑星移動・ガス降着
- 結果
- まとめ



導入 1 大質量星接近

- 星の多くは星団内で形成される

(Lada & Lada. 03)



- 近傍に大質量星がある時、
大質量星からの紫外線照射による光蒸発



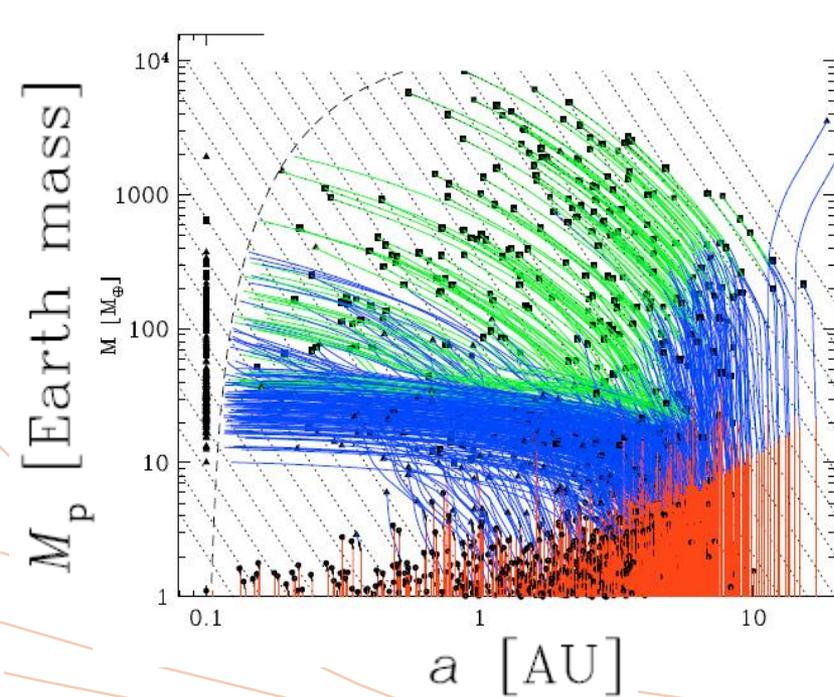
- 大質量星がある時と無い時で
惑星移動、ガス降着がどう変わるか



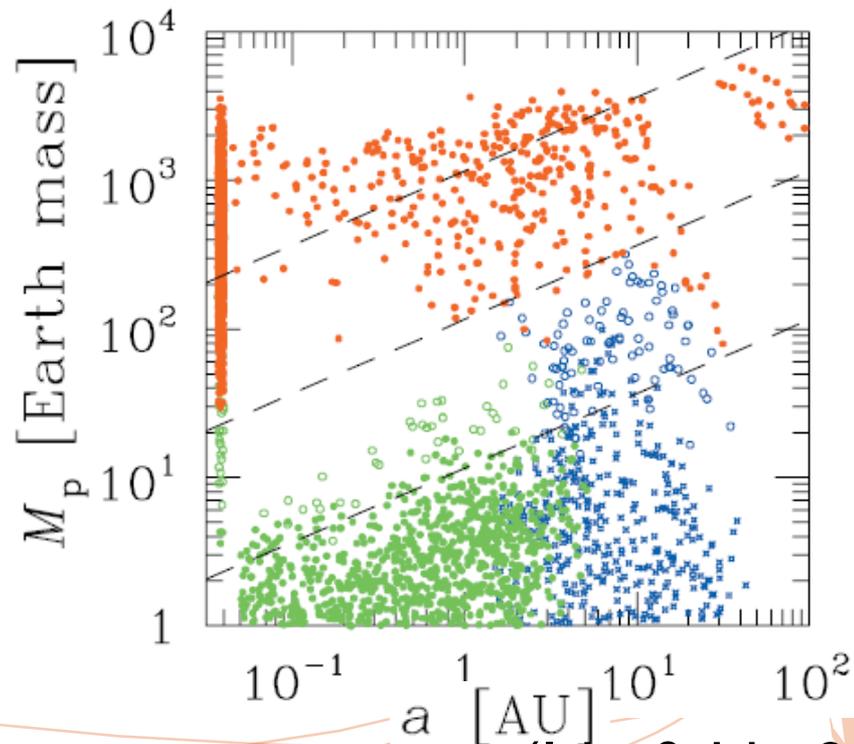
導入2 先行研究

大質量星からの光蒸発を
考慮して行った計算はない

と訂正した論文はたくさんある。



(Mordasini + 08a)



(Ida & Lin 04)

導入3 やったこと

- 粘性降着・光蒸発により面密度進化する円盤中に惑星を置き、惑星の軌道進化、大気成長の一次元数値計算を行う。
- 大質量星接近がある時とない時で、ガスが散逸した後に残る惑星にどのような違いがあるかを考える。



目次

- 導入
- 円盤ガス散逸
- 惑星移動・ガス降着
- 結果
- まとめ



ガス散逸 1 大質量星による光蒸発 I

- 大質量星による光蒸発

近くに接近した大質量星の紫外線放射によって円盤ガスが散逸する機構

面密度進化の式

(粘性降着 + 中心星と大質量星による光蒸発)

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[3R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma R^{1/2} \right) \right] - \dot{\Sigma}_{Cpe} - \dot{\Sigma}_{Epe}$$

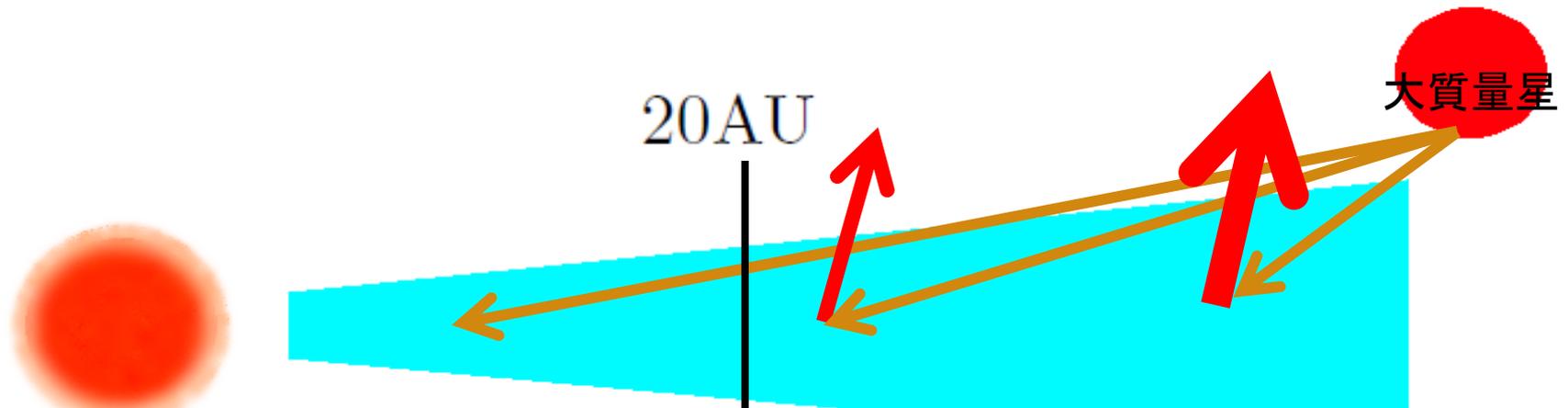
中心星 大質量星

初期面密度

$$\Sigma = \frac{M_d(0)}{2\pi R_0 R} \exp(-R/R_0) \quad \nu(R) = \alpha \Omega_K H^2 \propto R$$

$$\alpha = 0.01, \quad H \propto R^{5/4} \quad R_0 = 10 \text{ AU}, \quad M_d = 0.1 M_\odot$$

ガス散逸 1 大質量星による光蒸発 II



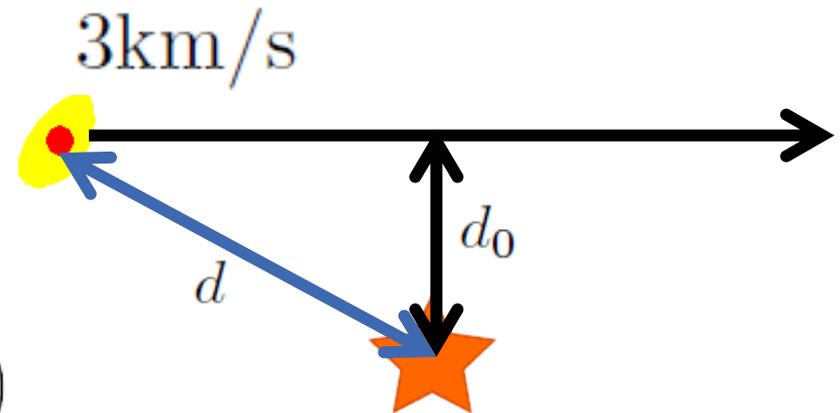
大質量星と円盤の距離 d (pc)

t_E : 最も大質量星に近づく時間

v : 大質量星と円盤の相対速度

$v = 3\text{km/s}$ (Hartmann + 05)

d_0 : 最も近づいた時の距離



ガス散逸 1 大質量星による光蒸発Ⅲ

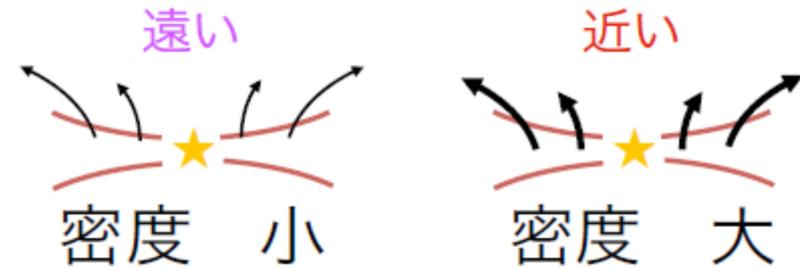
散逸率 (O 型星からの照射)

$$\dot{\Sigma}_{Epe} = 2n_1 m_H c_s$$

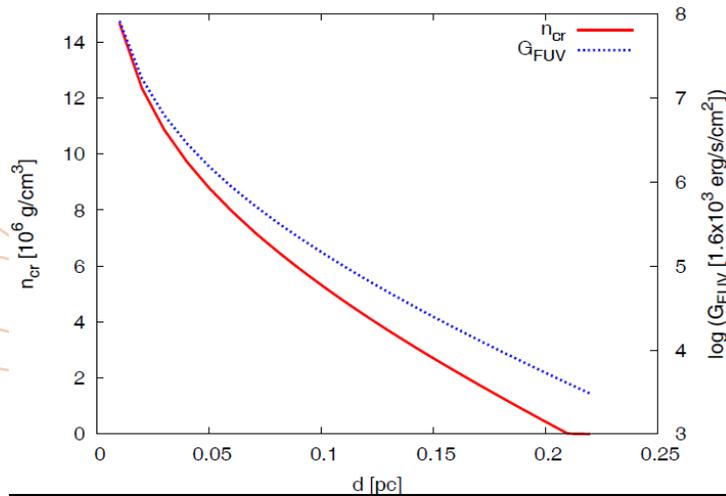
光蒸発流の根本での数密度 n_1

光蒸発が盛んになる円盤半径

$$r_{in} \sim 20\text{AU} \quad (\text{Tamura} + 13 \text{ in prep})$$



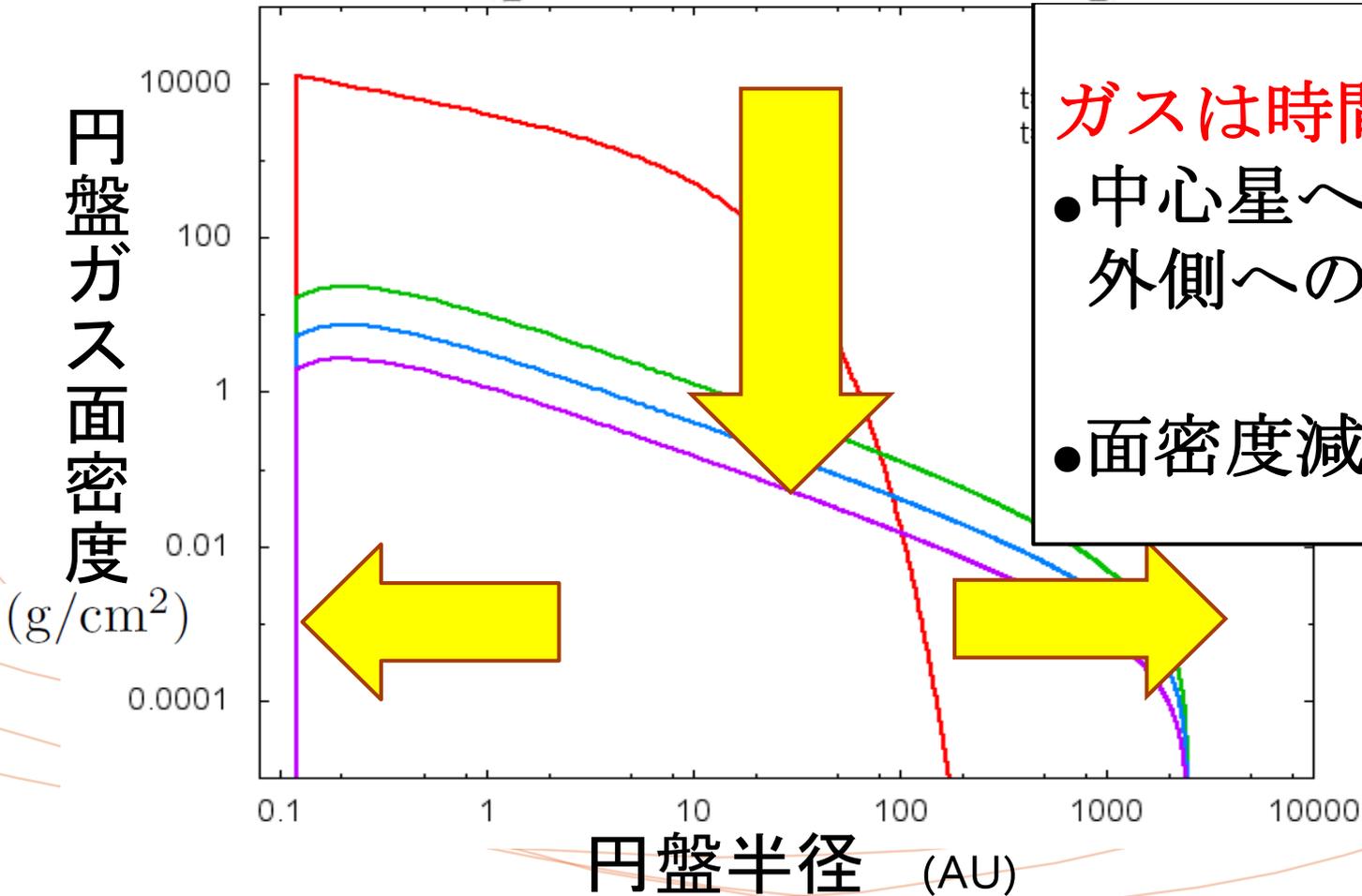
光蒸発流の根本での数密度 n_1 と大質量星との距離の関係



$d \uparrow$ → フラックス ↓
→ n_1 ↓
→ $\dot{\Sigma}_{Epe}$ ↓
(Tamura + 13 in prep.)

ガス散逸 2 粘性降着 I

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[3R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma R^{1/2} \right) \right] - \dot{\Sigma}_{Cpe} - \dot{\Sigma}_{Epe}$$



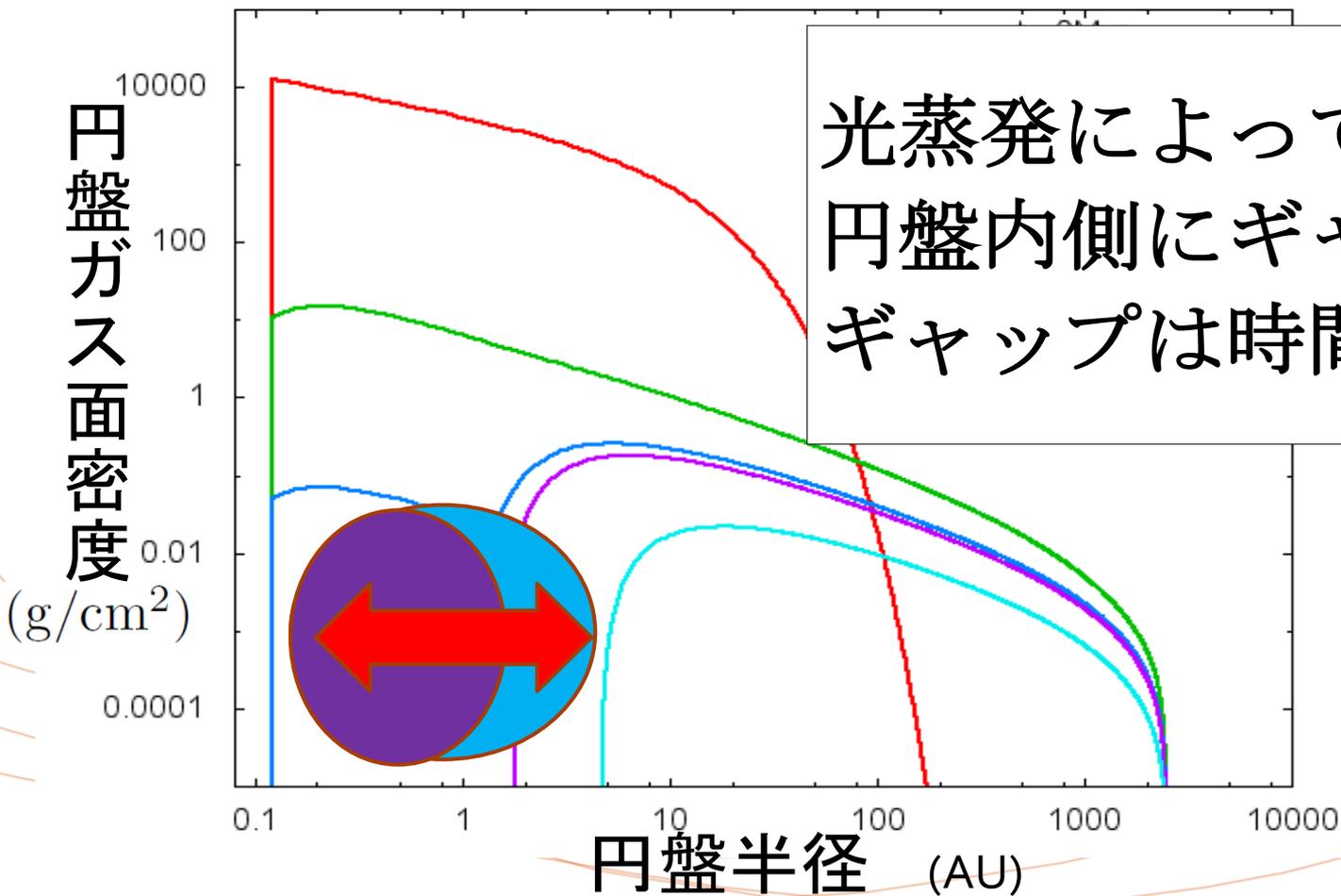
ガスは時間と共に

- 中心星への降着
- 外側への拡散

- 面密度減少

ガス散逸 2 中心星による光蒸発 II

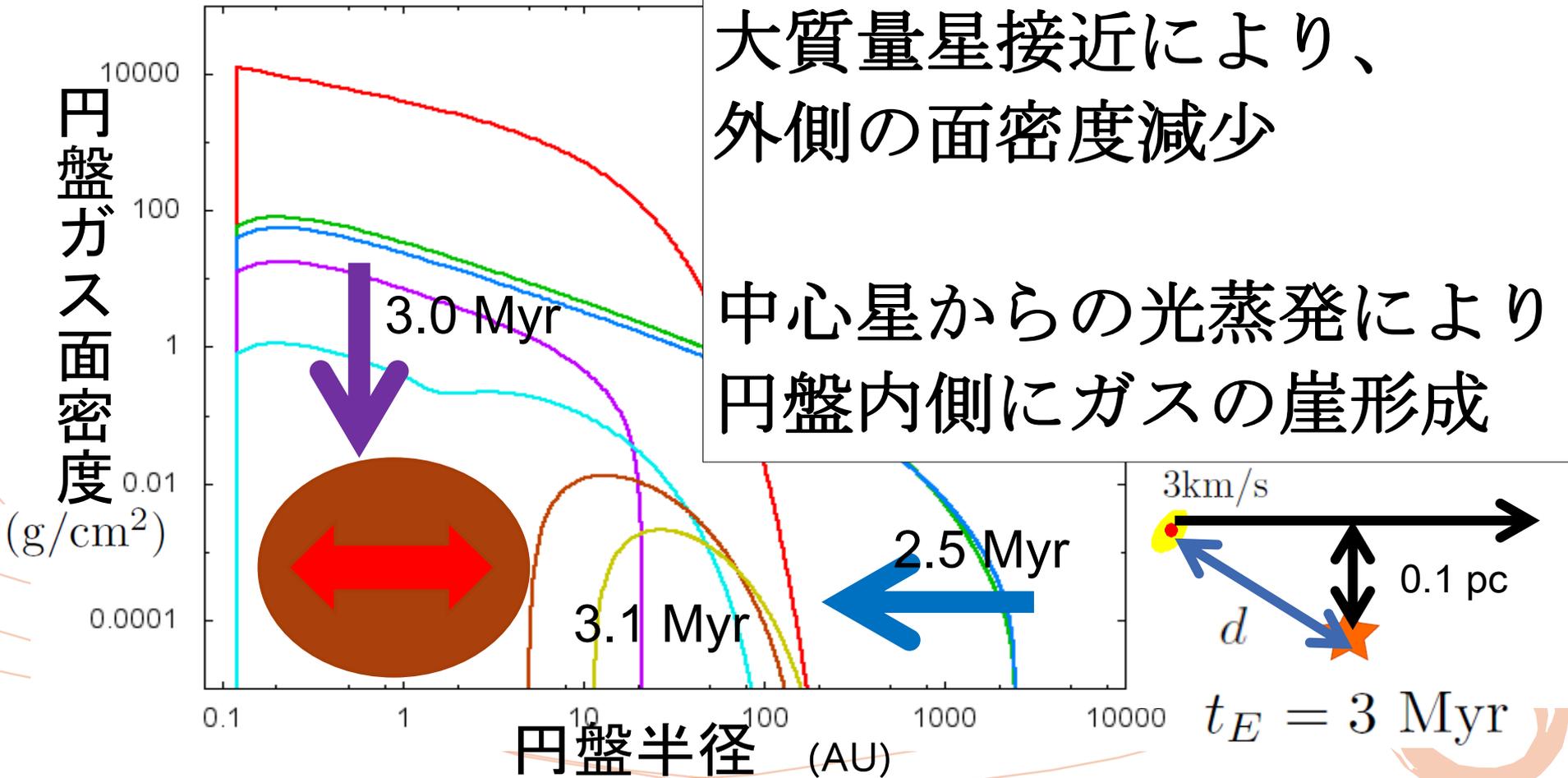
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[3R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma R^{1/2} \right) \right] - \dot{\Sigma}_{Cpe} - \dot{\Sigma}_{Epe}$$



光蒸発によって
円盤内側にギャップ形成
ギャップは時間と共に拡大

ガス散逸 2 大質量星による光蒸発Ⅲ

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[3R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma R^{1/2} \right) \right] - \dot{\Sigma}_{Cpe} - \dot{\Sigma}_{Epe}$$



目次

- 導入
- 円盤ガス散逸
- 惑星移動・ガス降着
- 結果
- まとめ



惑星移動 1 概要

- **惑星移動**する＝惑星に**トルク**が働く
トルクを発生させるのは
円盤ガスとの重力相互作用

惑星移動は二種類

- **Type I**

惑星質量が**小さい**時の移動

- **Type II**

- 惑星質量が**大きく、**

- ガス円盤内に**ギャップ**が形成される時の移動

惑星移動 2 惑星移動モデル I

- Type I 移動

タイムスケール

$$t_{mig,I} = (2.7 + 1.1\beta)^{-1} \frac{M_*^2}{M_p \Sigma a^2} \left(\frac{H}{R}\right)^2 \Omega_K^{-1} \propto M_p^{-1} \Sigma^{-1}$$

$$\beta \sim 1.5 \quad (\text{Tanaka } +02)$$

- Type II 移動

$M_d \gg M_p$ の時のタイムスケール

$$t_{mig,IIa} = \frac{a}{(3/2)\nu/a}$$

$M_d \sim M_p$ の時のタイムスケール

$$t_{mig,IIb} = \frac{(1/2)M_p \Omega_K(a) a^2}{3\pi \Sigma(R_m) R_m^2 \nu(R_m) \Omega_K(R_m)} \propto M_p \Sigma^{-1}$$

$$R_m = 10\text{AU}$$

(Ida & Lin 07)



惑星移動 2 惑星移動モデル II

- Type I と Type II の切り替わり
ギャップが開く条件

$$\left(\frac{M_p}{M_\odot}\right)^2 \geq \frac{3\pi\alpha}{\xi} \left(\frac{H}{a}\right)^5$$

(D'Angelo & Lubow 2010)

この条件を満たす時 → Type II

満たさない時 → Type I

ガス降着 ガス降着モデル

惑星大気質量： M_{env} 、 惑星コア質量： M_{core}

ガス降着を何が律速するかは2種類

- 大気収縮による律速 ($M_{env} \sim M_{core}$)

$$\dot{M}_p = 10^{-9} \left(\frac{M_p}{M_{\oplus}} \right)^4 \quad (\text{Ikoma} + 00)$$

- 円盤からの供給による律速 ($M_{env} > M_{core}$)

$$\dot{M}_p = 3\pi\epsilon(M_p)\nu(3a)\Sigma(3a) \quad (\text{Lubow \& D'Angelo 06})$$

$$\frac{\epsilon(M_p)}{\epsilon_{max}} = 1.67 \left(\frac{M_p}{1M_{Jup}} \right)^{1/3} \exp\left(\frac{-M_p}{1.5M_{Jup}}\right) + 0.04 \quad (\text{Veras \& Armitage 04})$$

$$\epsilon_{max} = 0.1$$

目次

- 導入
- 円盤ガス散逸
- 惑星移動・ガス降着
- 結果
- まとめ



結果 1 ガス降着が無い時 I

入力パラメータ

- 初期惑星質量 M_{P0} (15 地球質量)
- 初期軌道長半径 a_{P0} (10 AU)
- 惑星形成時間 T_P (0.1-15 Myr)
- 大質量星への最接近時間 t_E (3, 6 Myr)
- 大質量星への最接近距離 d_0 (0.1, 0.15 pc)

出力

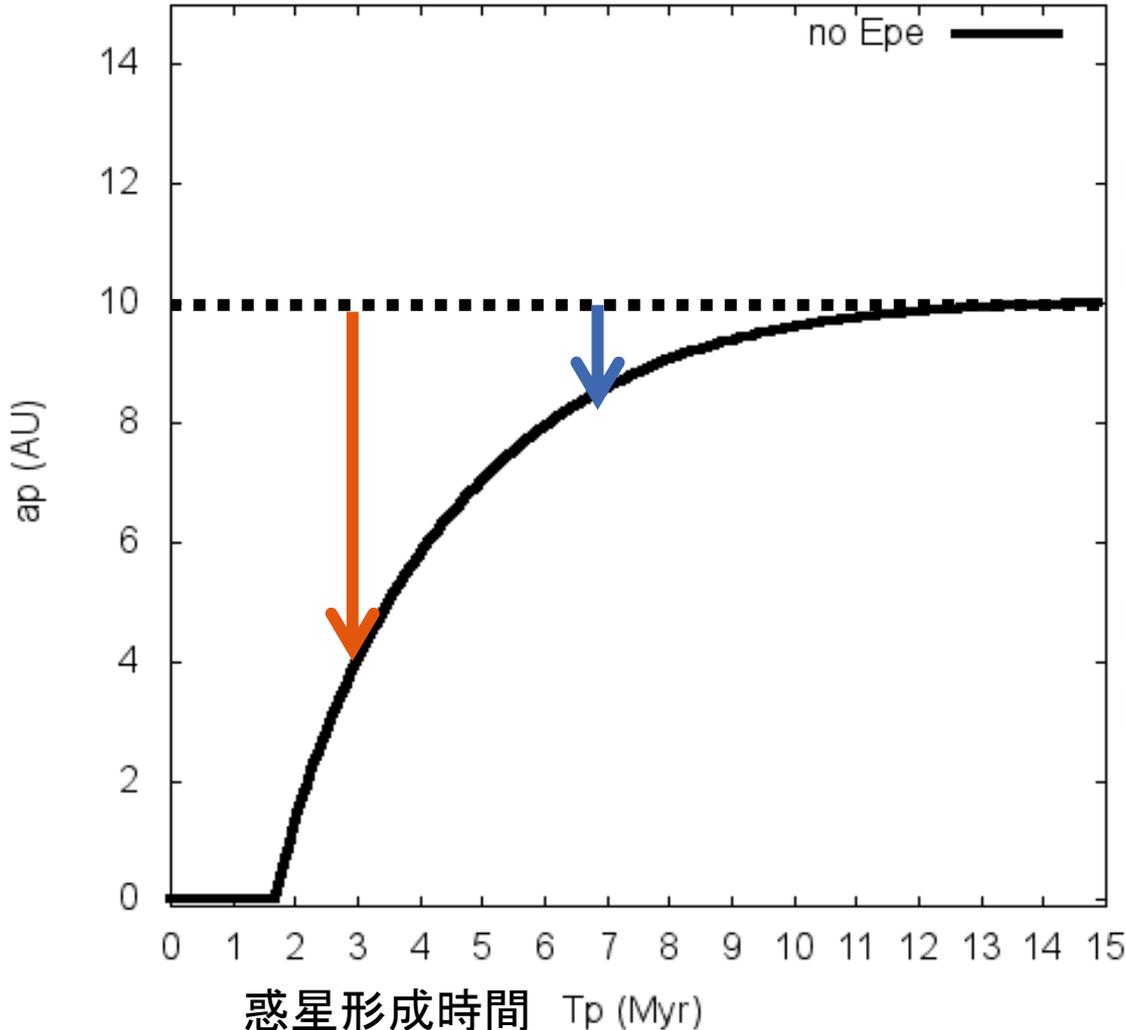
- 円盤散逸後(15 Myr) の軌道長半径 a_P



結果 1 ガス降着が無い時 II

15 M_{earth} で大質量星接近が無い時

最終軌道長半径



早い時期に形成
⇒ ガス 多
⇒ 移動 大

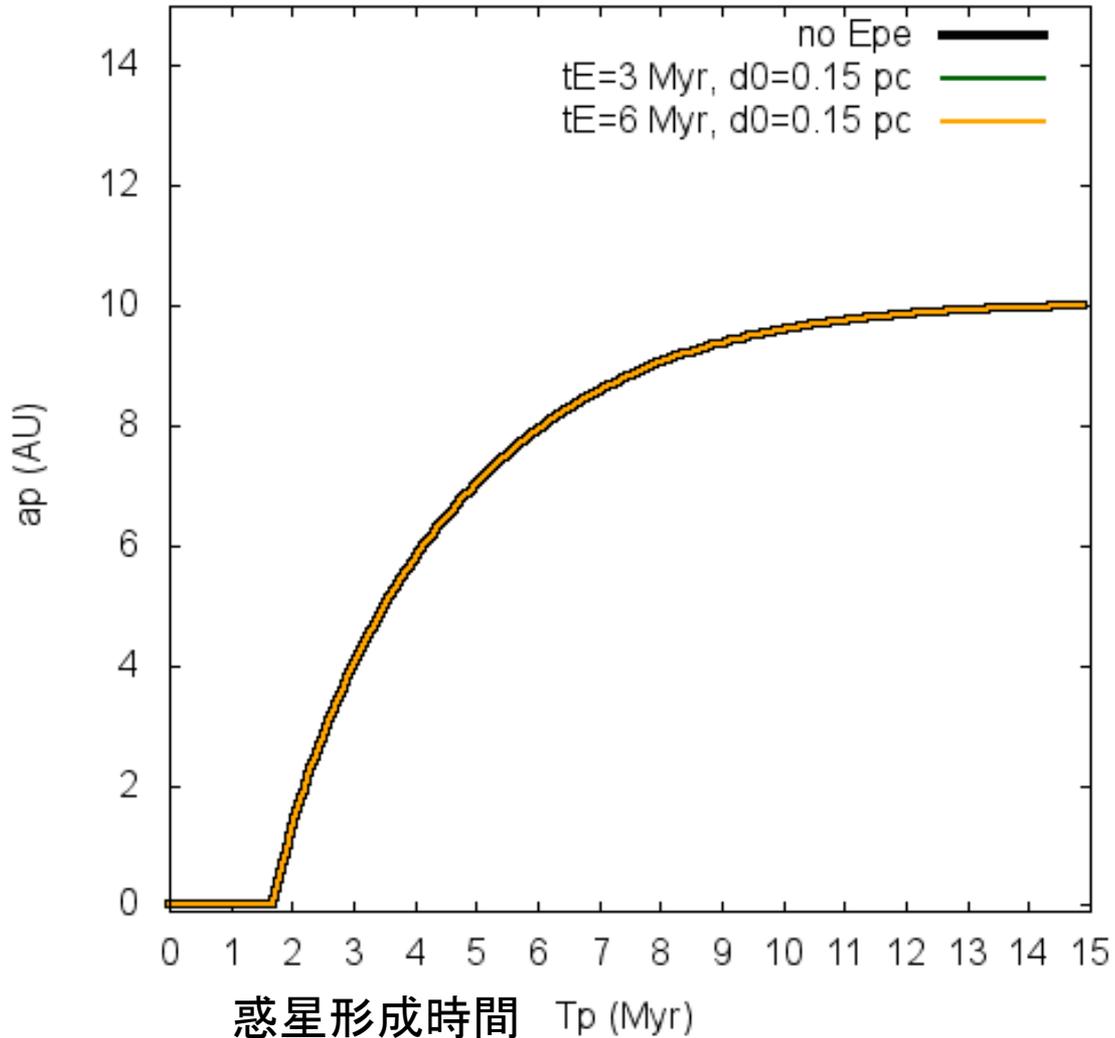
遅い時期に形成
⇒ ガス 少
⇒ 移動 小



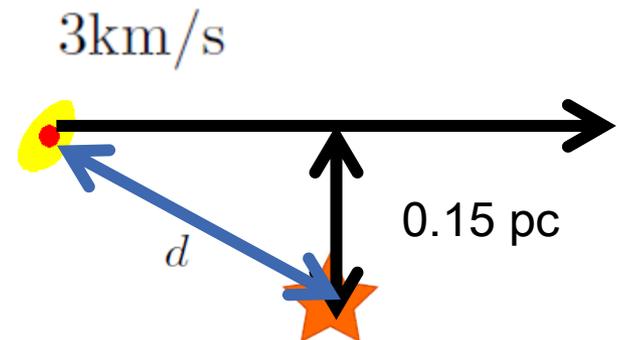
結果 1 ガス降着が無い時Ⅲ

15 M_{earth} で大質量星接近が有る時

最終軌道長半径



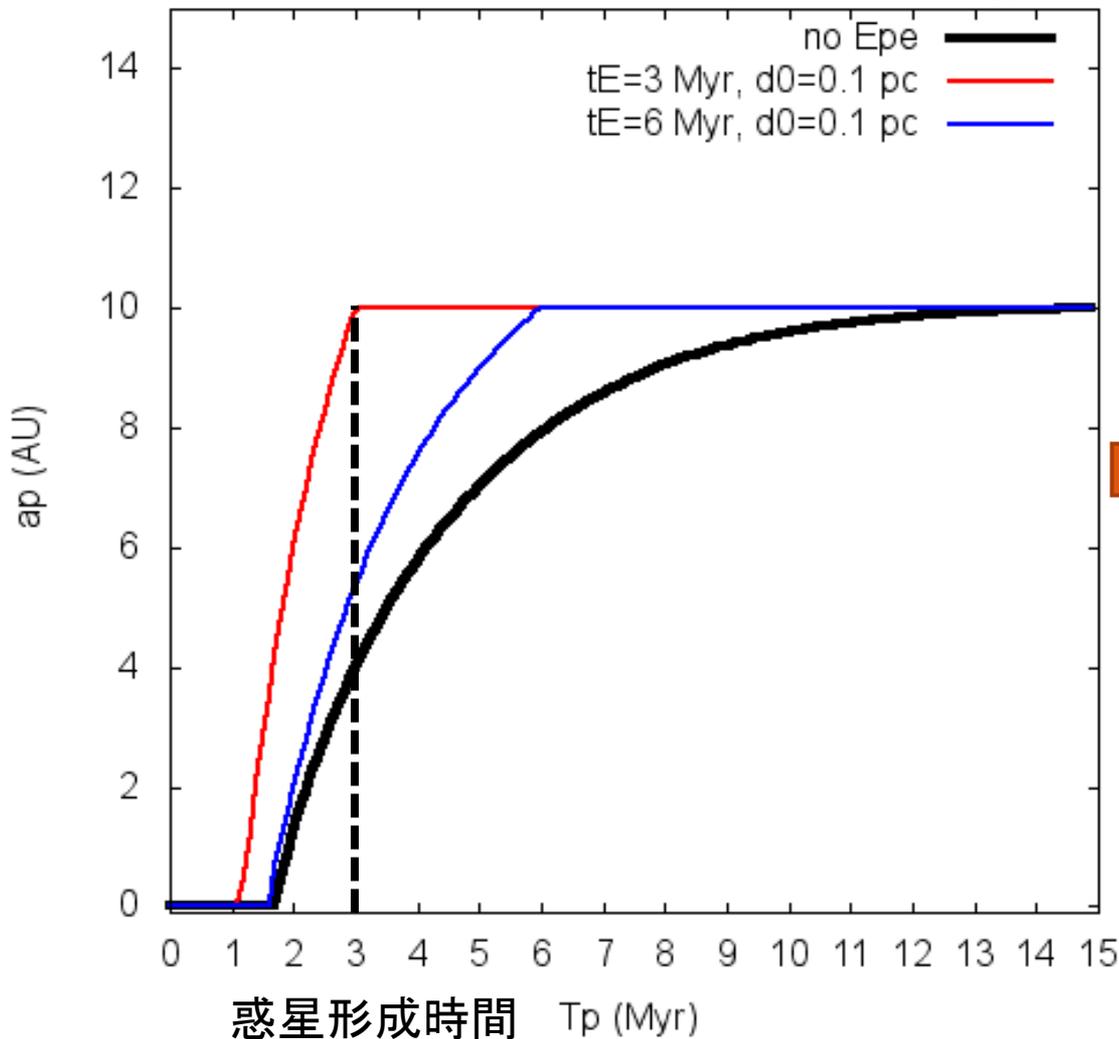
大質量星接近の影響はほぼない



結果 1 ガス降着が無い時IV

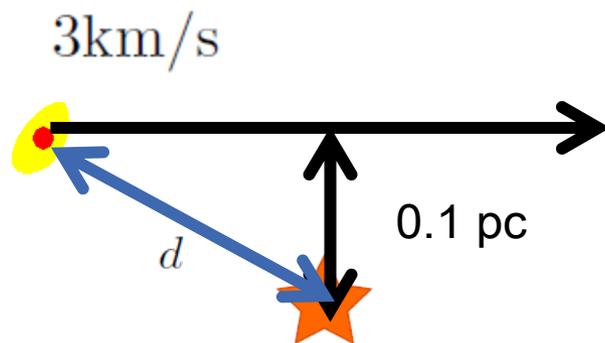
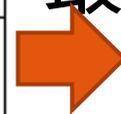
15 M_{earth} で大質量星接近が有る時

最終軌道長半径



大質量星接近は移動を軽減する

最接近時間 早
移動制限 大



結果 2 ガス降着が有る時 I

入力パラメータ

- 初期惑星質量 M_{P0} (5 地球質量)
- 初期軌道長半径 a_{P0} (10 AU)
- 惑星形成時間 T_P (0.1-15 Myr)
- 大質量星への再接近時間 t_E (3, 6 Myr)
- 大質量星への再接近距離 d_0 (0.1, 0.15 pc)

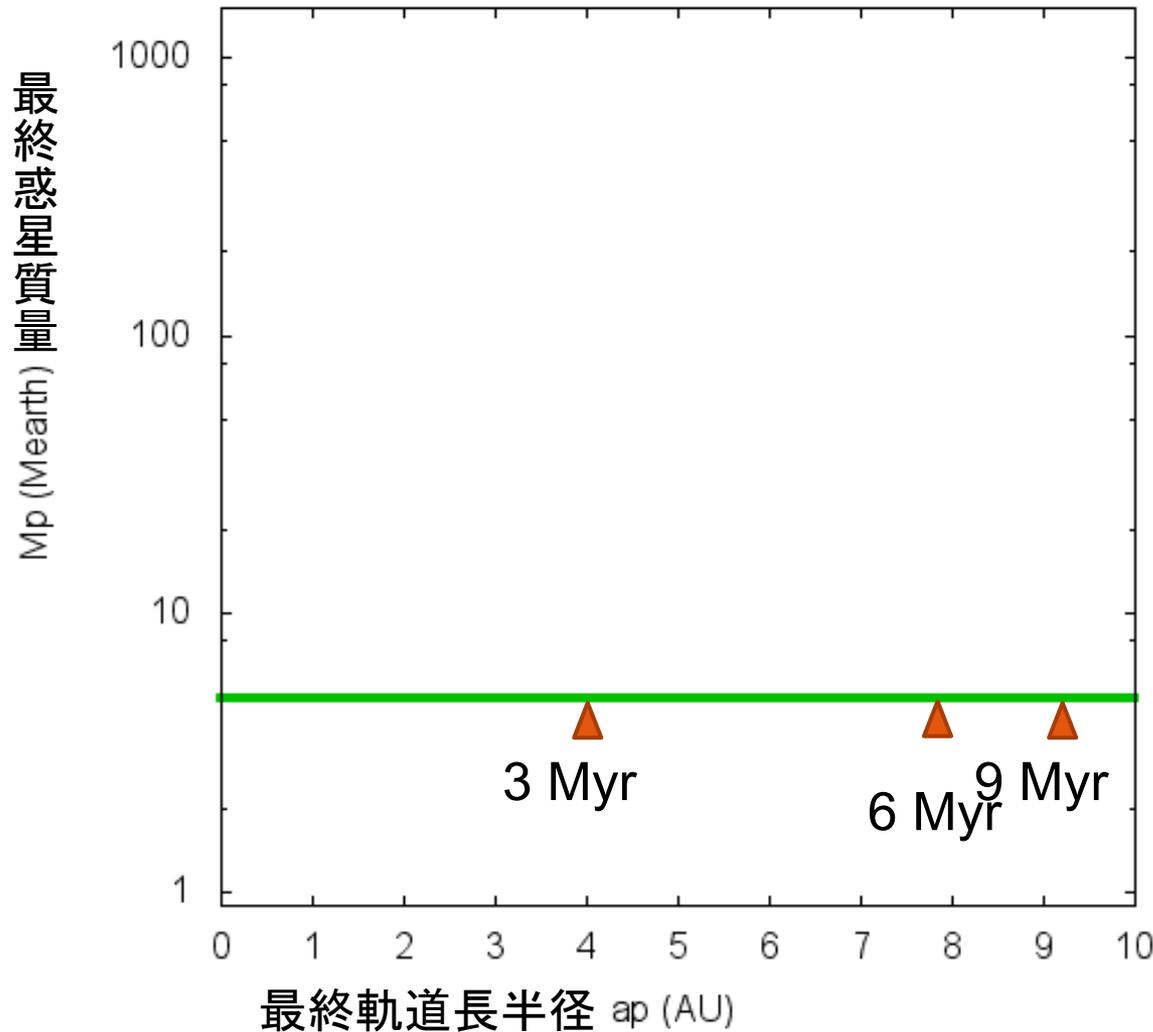
出力

- 円盤散逸後(15 Myr) の軌道長半径 a_P
惑星質量 M_P



結果 2 ガス降着が有る時Ⅲ

5 M_{Earth} で大質量星接近が無い時



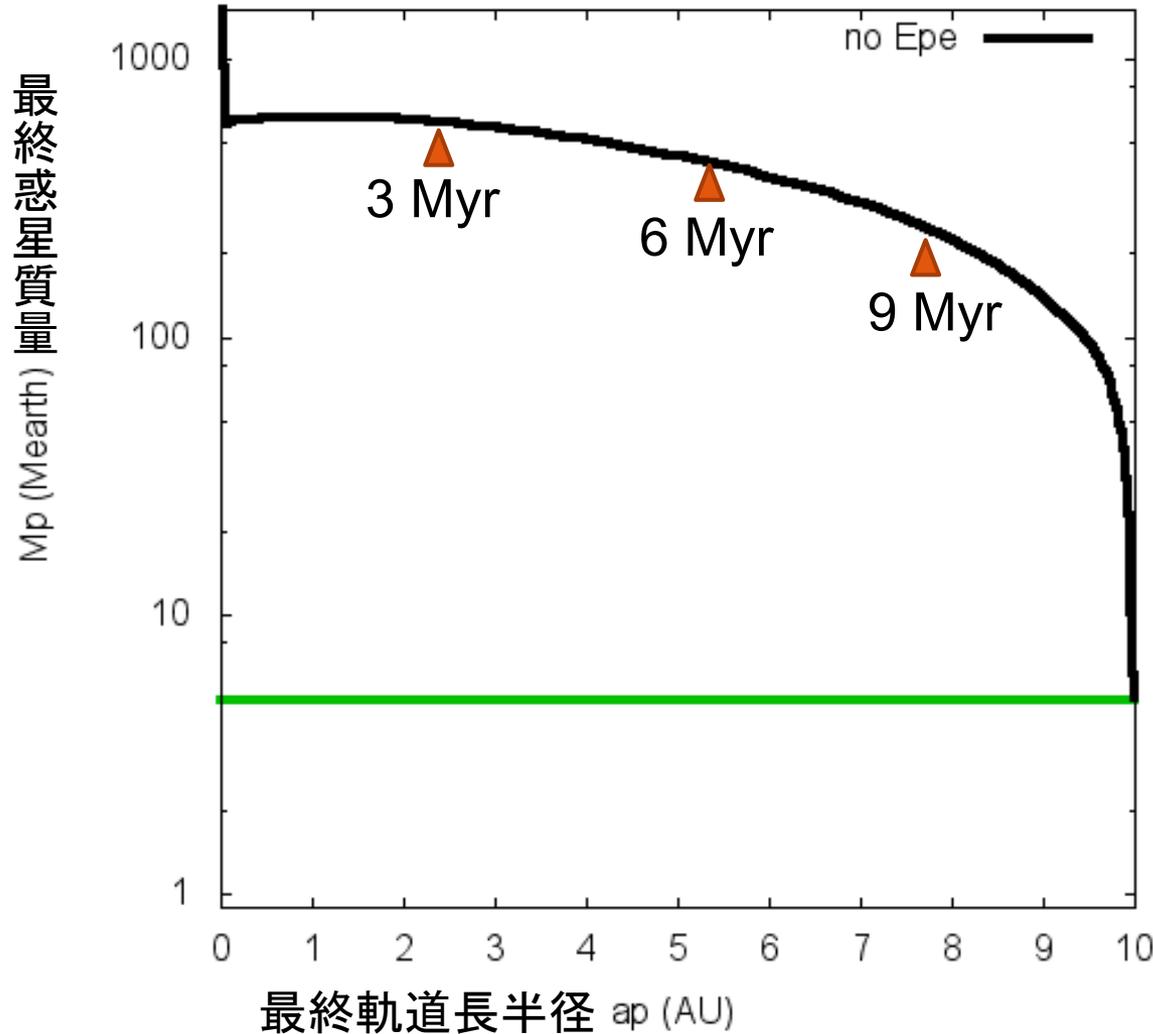
ガス降着がない時

惑星質量一定



結果2 ガス降着が有る時Ⅲ

5 M_{Earth} で大質量星接近が有る時

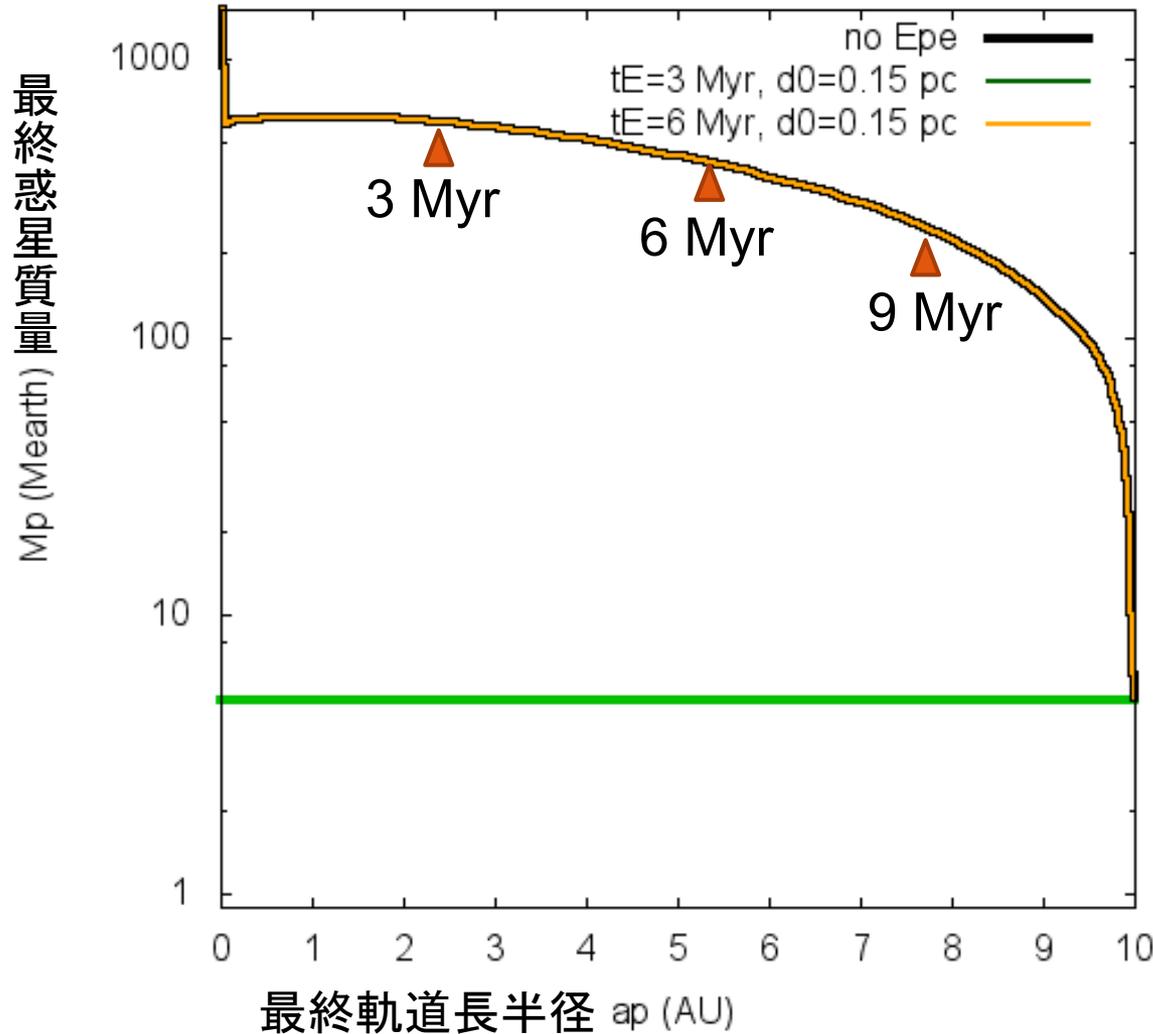


ガス降着が有る時

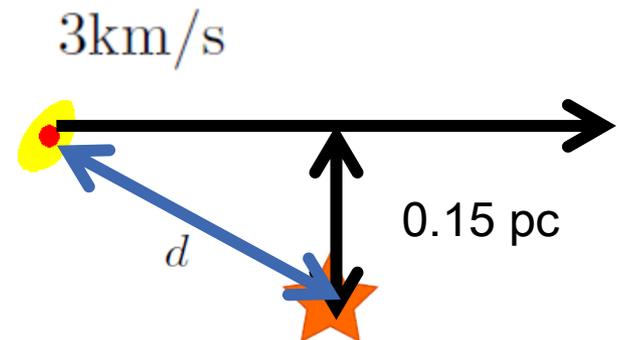
惑星質量は軌道長半径が小さい程増加

結果2 ガス降着が有る時IV

5 M_{Earth} で大質量星接近が有る時

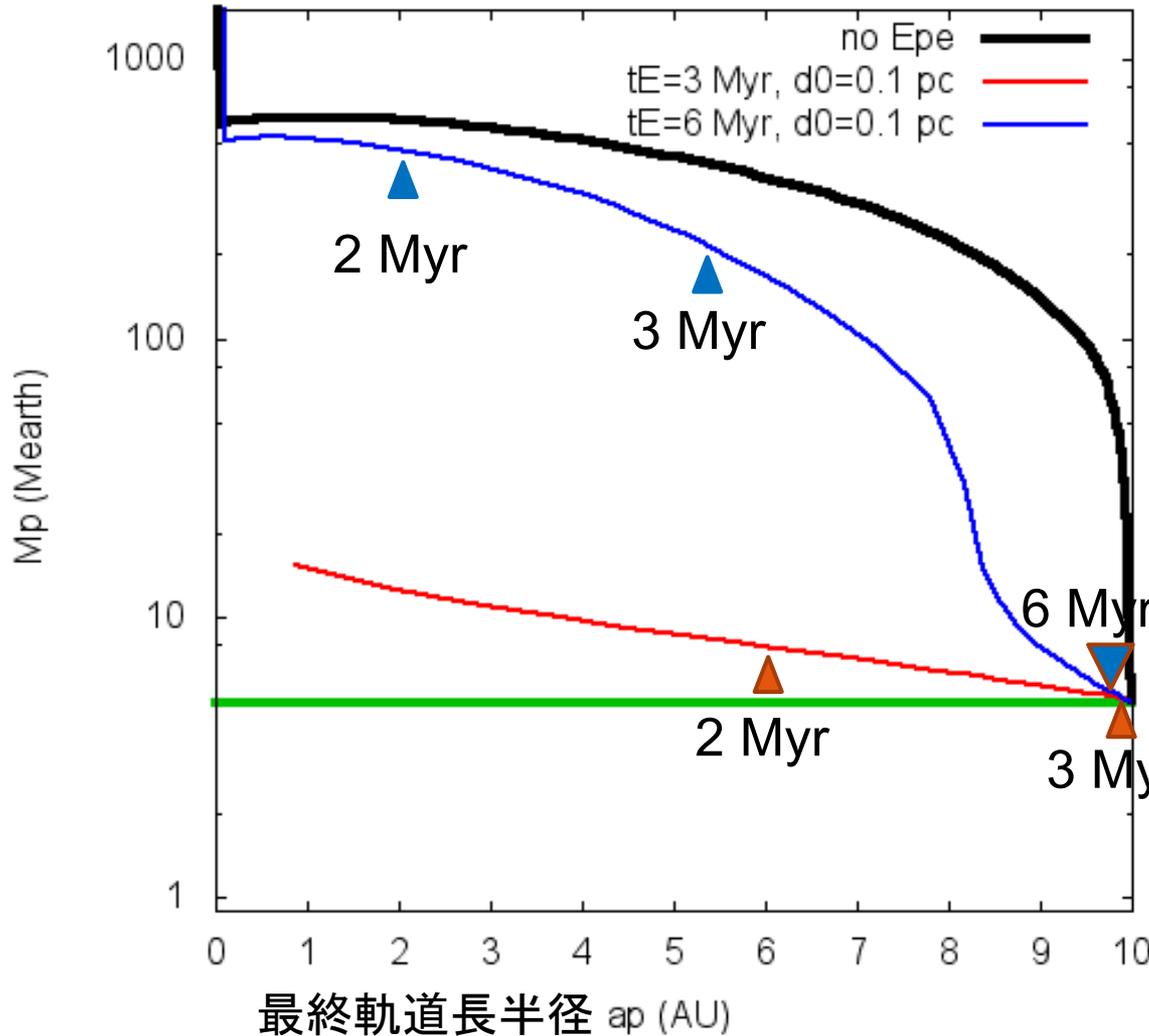


大質量星接近の影響はほぼない



結果 2 ガス降着が有る時Ⅲ

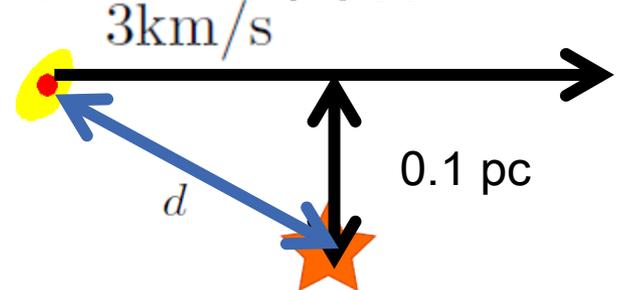
5 M_{earth} で大質量星接近が有る時



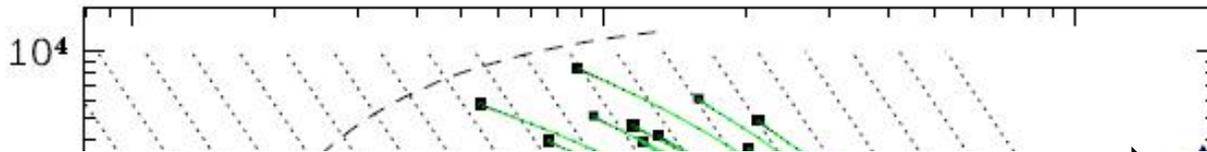
大質量星接近は
ガス降着を軽減

最接近時間 早

質量降着制限 大



結果 2 ガス降着が有る時IV

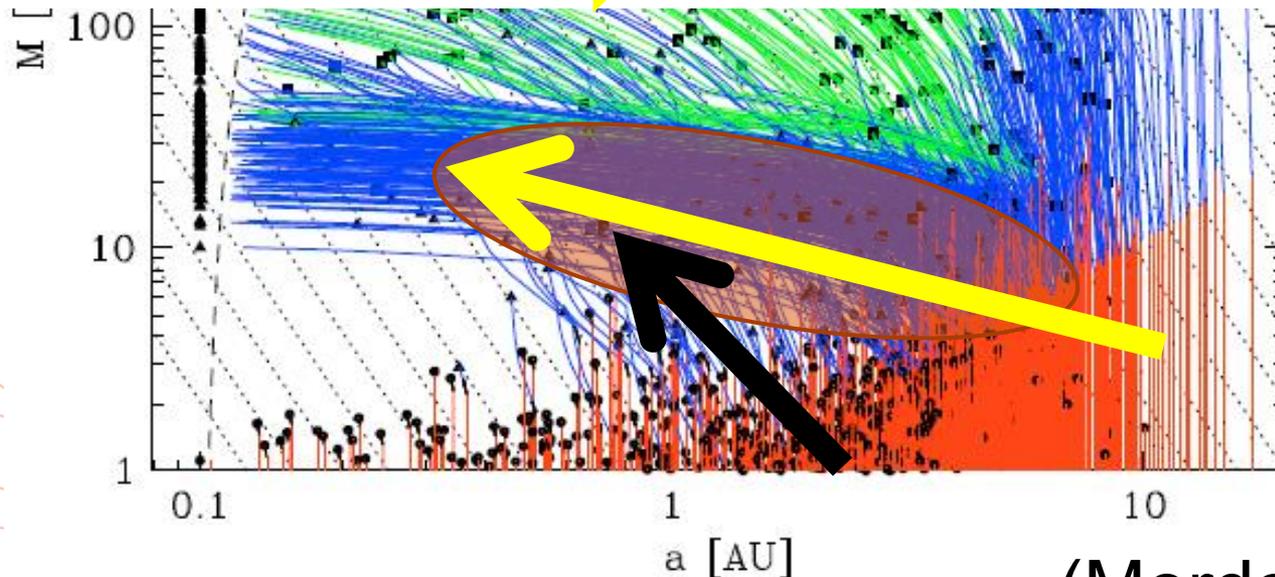


Type II 移動
+
大気降着

この辺りの領域を作るパスは



しかし大質量星接近を考えると
のパスも可能



Type I 移動
+
原始惑星
コア成長

(Mordasini + 08a)

目次

- 導入
- 円盤ガス散逸
- 惑星移動・ガス降着
- 結果
- まとめ



まとめ

- 大質量星接近は距離が近いほど、接近時期が早いほど影響大。
- 大質量星接近によって惑星移動、ガス降着共に軽減される。
- 大質量星接近があると、数AUの軌道長半径にあるスーパーアース型やネプチューン型の惑星は異なった経路で作られるのではないか。



今後の研究

- 面密度進化、ギャップ形成を反映した、
Type I、Type II 移動で統一的に考えたい。
 トルク分布を使って、計算。

D'Angelo & Lubow (2010)を使う

- ガス降着をちゃんと考えたい。

 Tanigawa & Watanabe (2002)

Tanigawa & Ikoma (2007) を使う

おわり

