

# 原始惑星系円盤との重力相互作用 を考慮した原始惑星形成

小南淳子

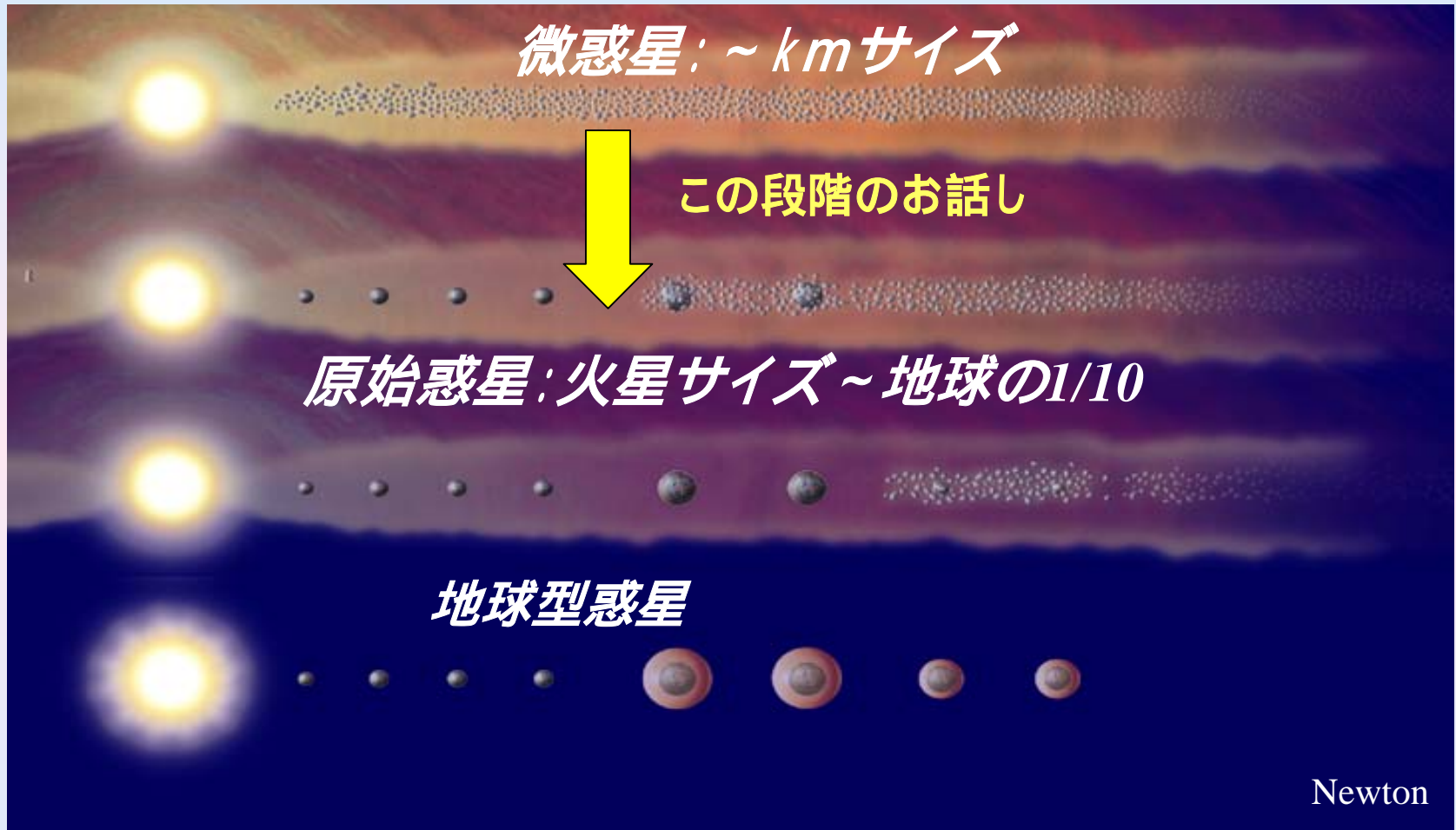
東京工業大学地球惑星科学専攻  
井田研究室所属D2

(井田茂 東工大地惑)

天体力学N体力学研究会

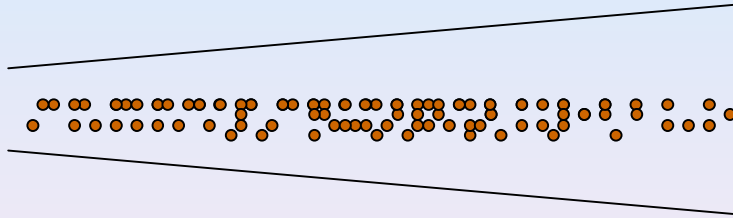
2004年3月

# 惑星の形成シナリオ



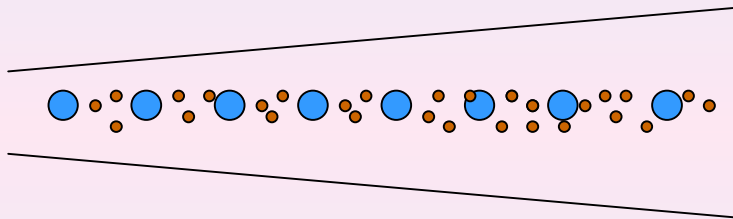
本研究 : 微惑星 原始惑星を扱う

# 微惑星から原始惑星の形成

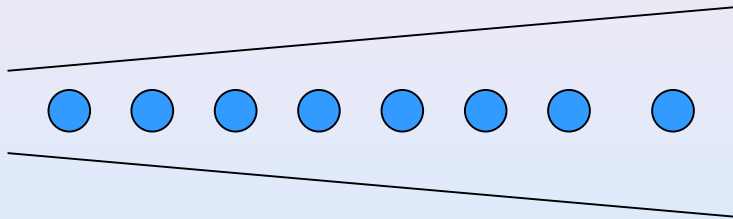


原始惑星の種が暴走成長： $\sim 10^{25}$  g

Greenberg et al. (1978)  
Wetherill & Stewart (1989)  
Kokubo & Ida (1996)



暴走成長したものが寡占的成長：  
 $\sim 10^{26}$  g ( $0.1M_{\oplus}$ )



原始惑星の形成

Kokubo & Ida (1998,2000,2002)

# ガス円盤からの効果

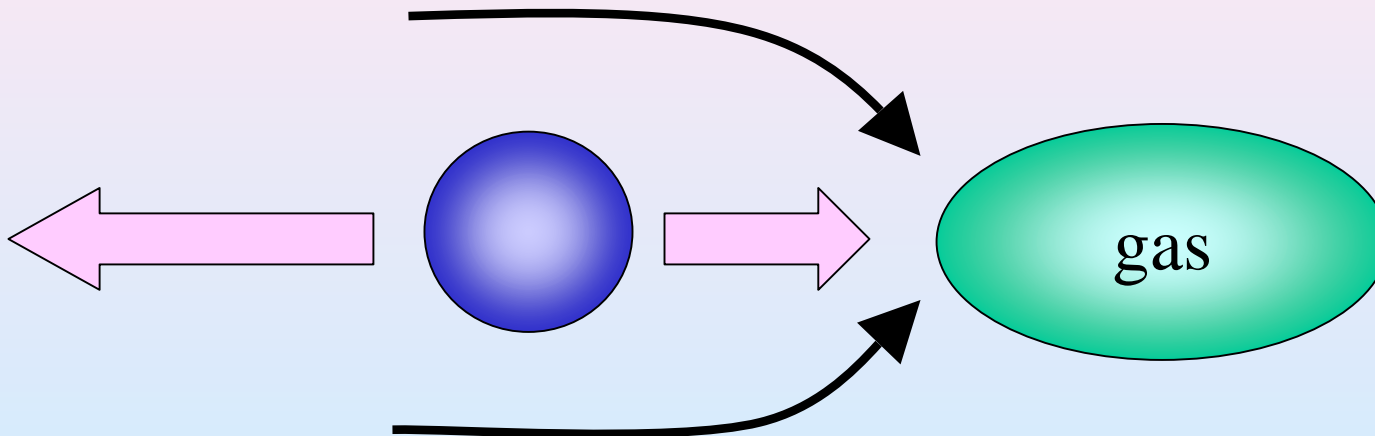
(1) ガス抵抗:  $a, e, i$  の減衰

(Adachi et al. 1976, Tanaka & Ida 1999)

(2) 円盤からの重力相互作用:  $a, e, i$  の減衰

(e.g. Ward 1986, Tanaka et al. 2002, 2004)

天体 円盤に密度波 天体に重力的にブレーキ



# 円盤ガスからの効果の比較

## 円盤ガスからの効果

(1) **ガス抵抗** (Adachi et al. 1976, Tanaka & Ida 1999)

$$f_{\text{gas}} \propto \left(\frac{m_p}{M_*}\right)^{-1/3} \left(\frac{\rho_p}{3\text{g/cc}}\right)^{-2/3} \left(\frac{a_p}{1\text{AU}}\right)^{-11/4} |\mathbf{u}| \mathbf{u} \quad \rightarrow \quad \text{質量が小さいほど効く}$$

(2) **円盤からの重力相互作用** (e.g. Ward 1986, Tanaka et al. 2002)

$$f_{\text{grav}} \propto \left(\frac{m}{M_*}\right) \left(\frac{a}{1\text{AU}}\right)^{-2} \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_H}\right) \quad \rightarrow \quad \text{質量が大きいほど効く}$$

月質量弱(  $\sim 10^{25} \text{g}$  )以上になると円盤からの重力相互作用が効いてくる。

**原始惑星は月質量以上**  
**(2)も原始惑星形成にきくはず**

# 惑星落下問題

円盤からの重力相互作用  $a$  の減衰

$$\tau_{\text{mig}} = 7 \times 10^4 \left( \frac{m_p}{M_{\oplus}} \right)^{-1} T_k$$

(Tanaka et al. 2002)

1AUで火星サイズの原始惑星

$$\tau_{\text{mig}} = 7 \times 10^5 \text{ yr} \quad \text{で落ちる}$$

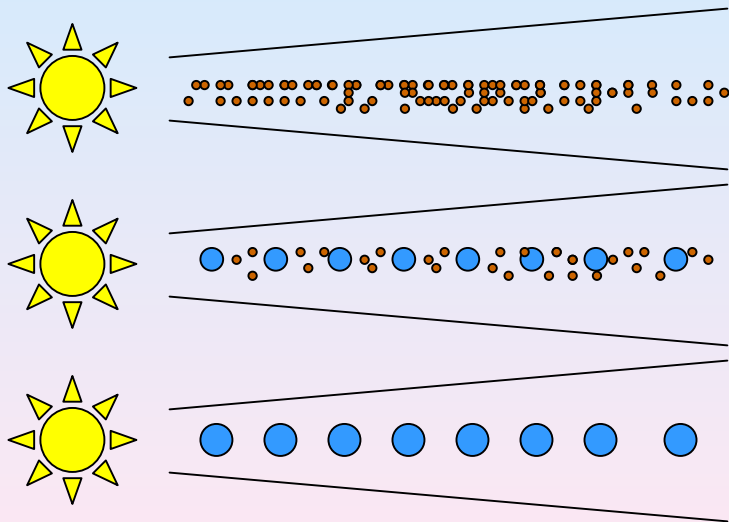
ガス円盤の寿命 (観測より)

$$\tau_{\text{円盤}} \sim 10^6 - 10^7 \text{ yr}$$

$$\tau_{\text{mig}} < \tau_{\text{円盤}}$$

惑星が形成される前に中心星に落ちてしまう

# 過去の研究



原始惑星の種が暴走成長： $\sim 10^{25}$  g

Greenberg et al. (1978)

Wetherill & Stewart (1989)

Kokubo & Ida (1996)

暴走成長したものが寡占的成長：

$\sim 10^{26}$  g ( $0.1M_{\oplus}$ )

Kokubo & Ida (1998, 2000, 2002)

今までのN体計算  $a$  の減衰は考慮しなかった

(1) ガス抵抗： $a, e, i$  の減衰

(Adachi et al. 1976, Tanaka & Ida 1999)

(2) 円盤からの重力相互作用： $a, e, i$  の減衰

(e.g. Ward 1986, Tanaka et al. 2002, 2004)

(1)、(2) 両方を入れたN体計算はされていない

# 研究目的

微惑星から原始惑星を

(1) ガス抵抗

(2) 円盤からの重力相互作用

を考慮してN体計算

(1)(2)両方を考慮したときの  
原始惑星形成を調べる

「惑星の中心星落下は防げるのか」を検証



# 運動方程式

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \underbrace{-GM_\odot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3}}_{\text{太陽重力}} - \underbrace{\sum_{i \neq j} \frac{GM_j(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3}}_{\text{原始惑星同士の相互重力}} + \underbrace{\mathbf{f}_{\text{grav}} + \mathbf{f}_{\text{gas}}}_{\text{drag force}}$$

$e, i$  を落とす力 (Tanaka and Ward 2004)

$$f_{\text{grav}, r} = 150m_p a_p^{-2} \left[ 2A_r^c (v_\theta - v_{\text{kep}}) + A_r^s v_r \right]$$

$$f_{\text{grav}, \theta} = 150m_p a_p^{-2} \left[ 2A_\theta^c (v_\theta - v_{\text{kep}}) + A_\theta^s v_r \right]$$

$$f_{\text{grav}, z} = 150m_p a_p^{-2} \left[ A_z^c v_z + A_z^s a_p^{-1.5} z \right]$$

$a$  を落とす力

(Tanaka et al. 2002)

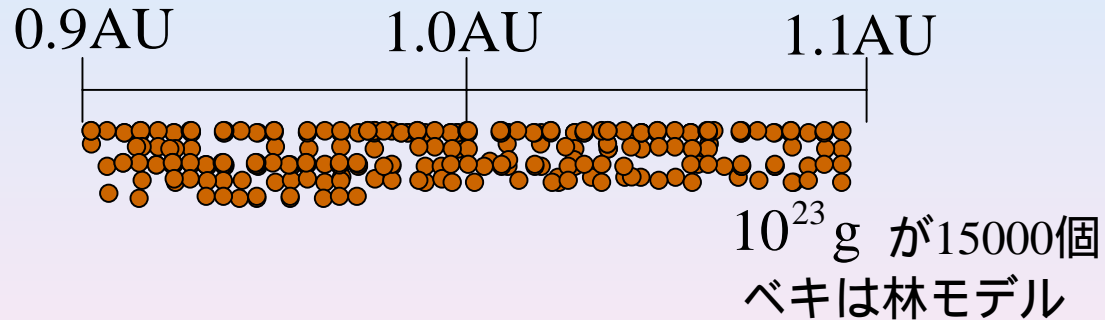
$$-0.4m_p r_p^{-2}$$

ガス抵抗 (Kokubo and Ida 1998)

$$\mathbf{f}_{\text{gas}} = -10^{-7} \left( \frac{m_p}{M_*} \right)^{-1/3} \left( \frac{\rho_p}{3\text{g/cc}} \right)^{-2/3} \left( \frac{a_p}{1\text{AU}} \right)^{-11/4} |\mathbf{u}| \mathbf{u}$$

# 初期条件 & モデル

## 初期条件



## ドラッグ

- ガス抵抗
- 円盤からの重力相互作用

## ガスの量

10倍の林モデル

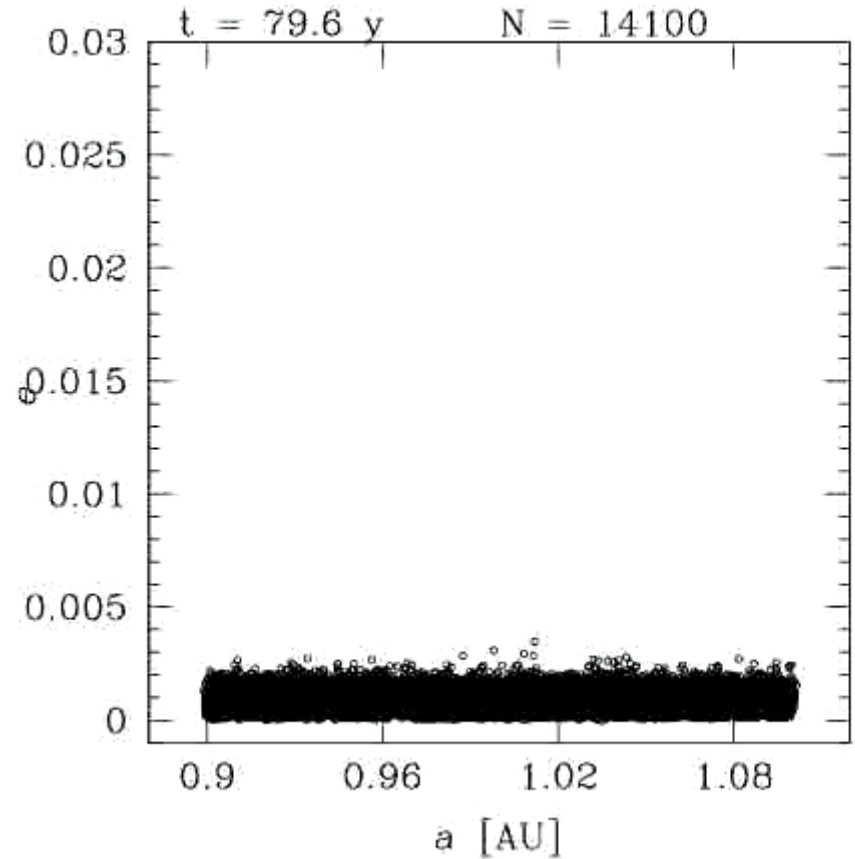
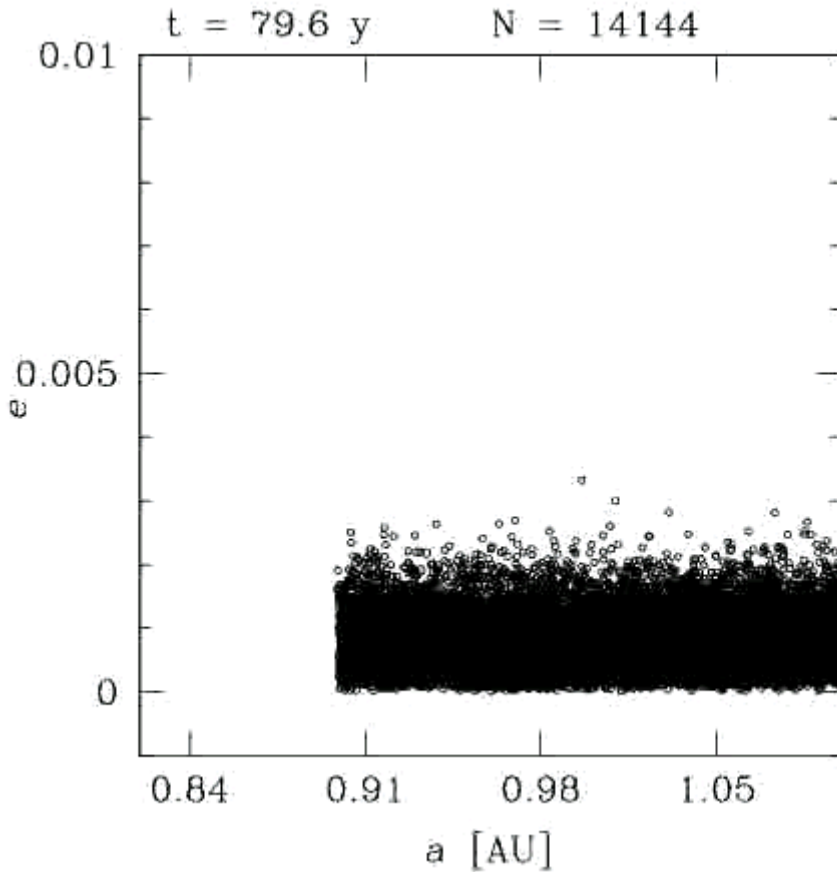
## ふくらまし係数

5

# 計算結果 ( $e, a$ の時間進化)

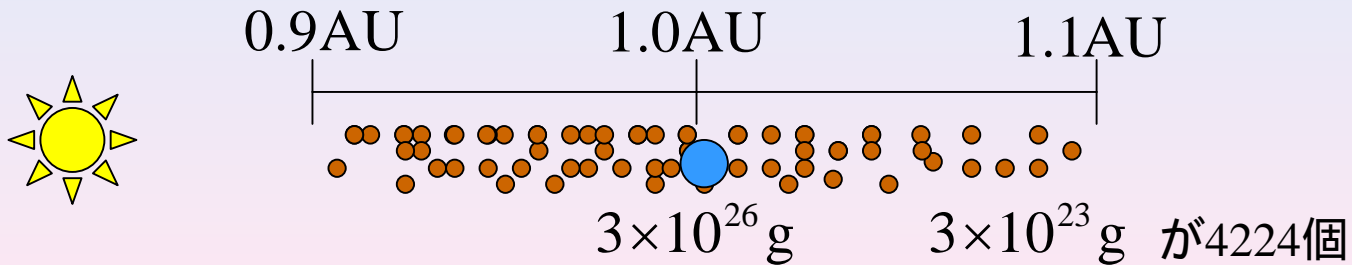
ガス抵抗 + 円盤からの重力相互作用

円盤からの重力相互作用のみ



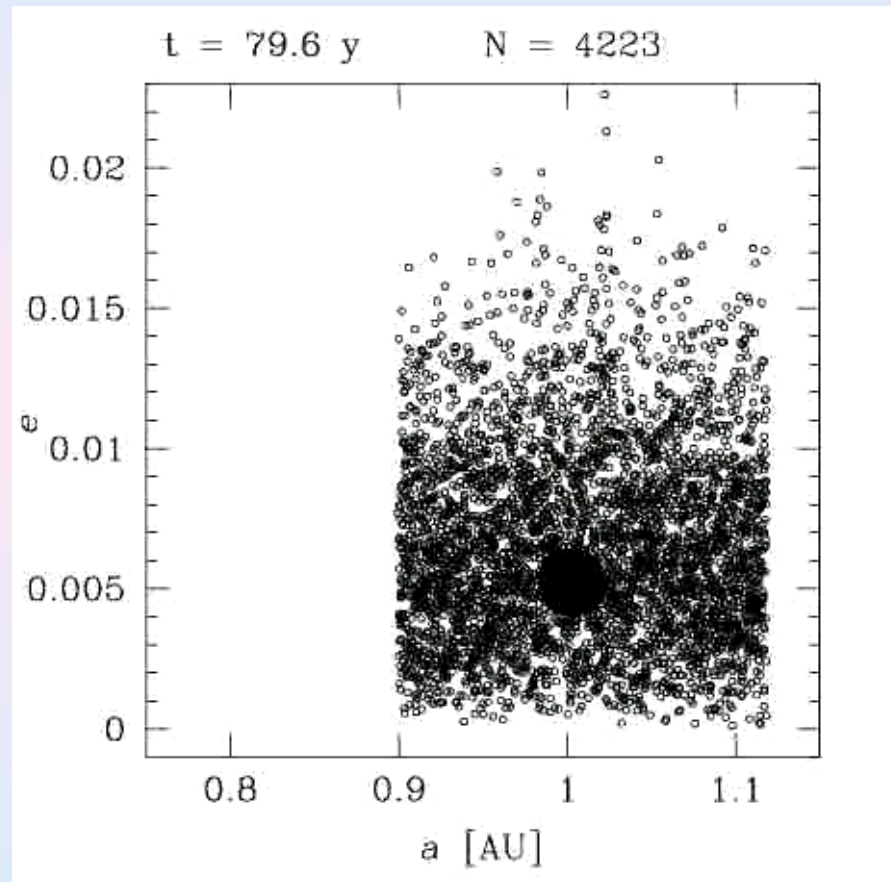
ガス抵抗を入れたほうが微惑星の  $e, i$  が下がり、集積が促進される。  
成長した原始惑星の近傍で密度の高いところが形成される。

# 密度の偏りによって migration の速度は変化するのか 考える系



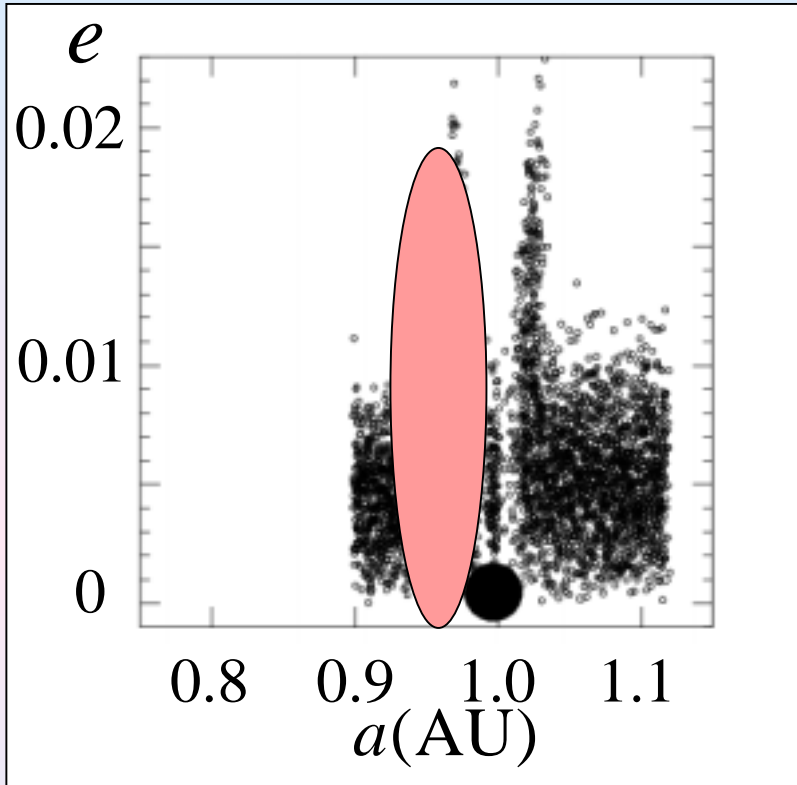
- 林モデルの10倍のガスを入れる。
- 「ガス抵抗」と「円盤からの重力相互作用」両方入れる。

# $N$ 体計算の結果 ( $e, a$ の時間進化)



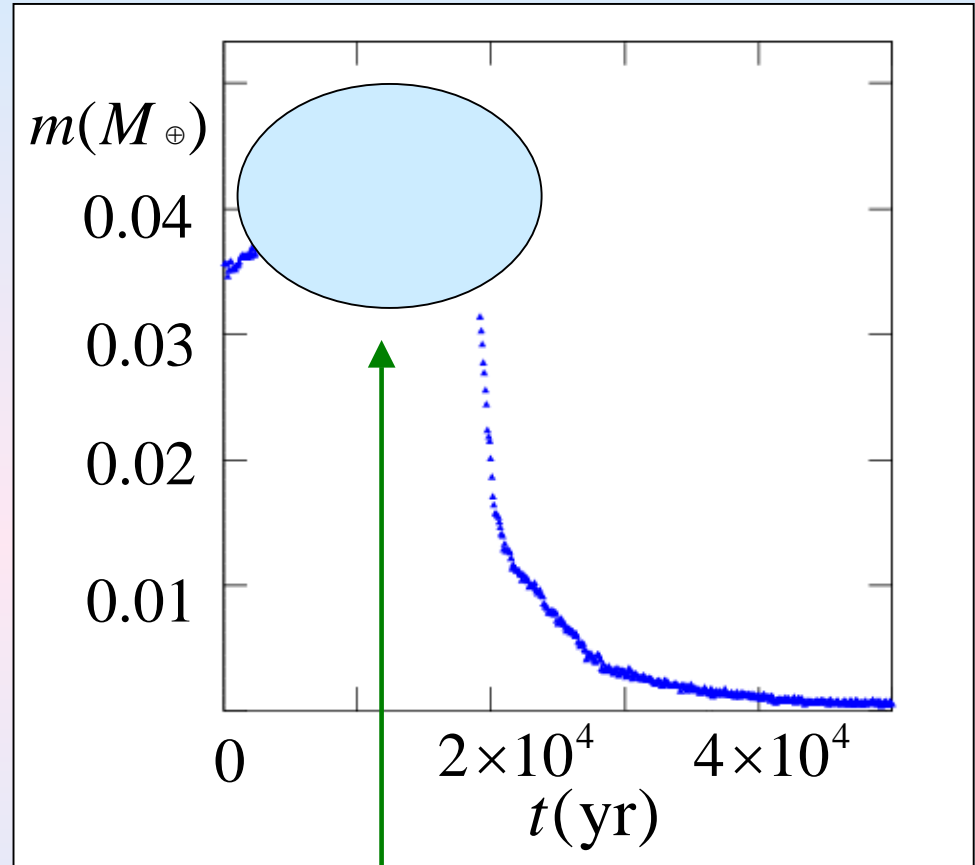
微惑星を跳ね飛ばしつつ、成長。周りには密度の濃いところがある。

# 1 Hill 半径内の質量変化



10 $r_H$  内の微惑星の総質量

$$r_H = \left( \frac{m_p}{3M_*} \right)^{1/3} a_p$$



原始惑星が落下しながら  
微惑星を押しやっている。

# 解析的な見積もり Tanaka and Ida 1999

## 考えている描像

ガス円盤中で、微惑星円盤があり、原始惑星が一つ成長しながら落ちていく。

### •原始惑星

動径方向に落下する力 + 微惑星を跳ね飛ばす反作用

### •微惑星

原始惑星からの重力散乱 +  $e, i$  の減衰させるガス抵抗による力

微惑星円盤にギャップが形成される効果は入っていない。

# 解析的な見積もりとN体計算

Tanaka and Ida 1999

- 原始惑星の migration の速度
  - 微惑星の面密度
  - 原始惑星と微惑星との衝突確率
- $$\longrightarrow \frac{da_p}{dt}, \frac{dm_p}{dt}$$

$$\frac{da_p}{dt} = -1.4 \times 10^{-5} \left( \frac{a_p}{1\text{AU}} \right) \left( \frac{m_p}{M_{\oplus}} \right) (\text{AU} / T_k)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = 1.65 \times 10^{-4} \left( \frac{a_p}{1\text{AU}} \right) \left( \frac{m_p}{M_{\oplus}} \right) \langle P_{\text{col}} \rangle (M_{\oplus} / T_k)$$

$a$  の時間進化

$m$  の時間進化



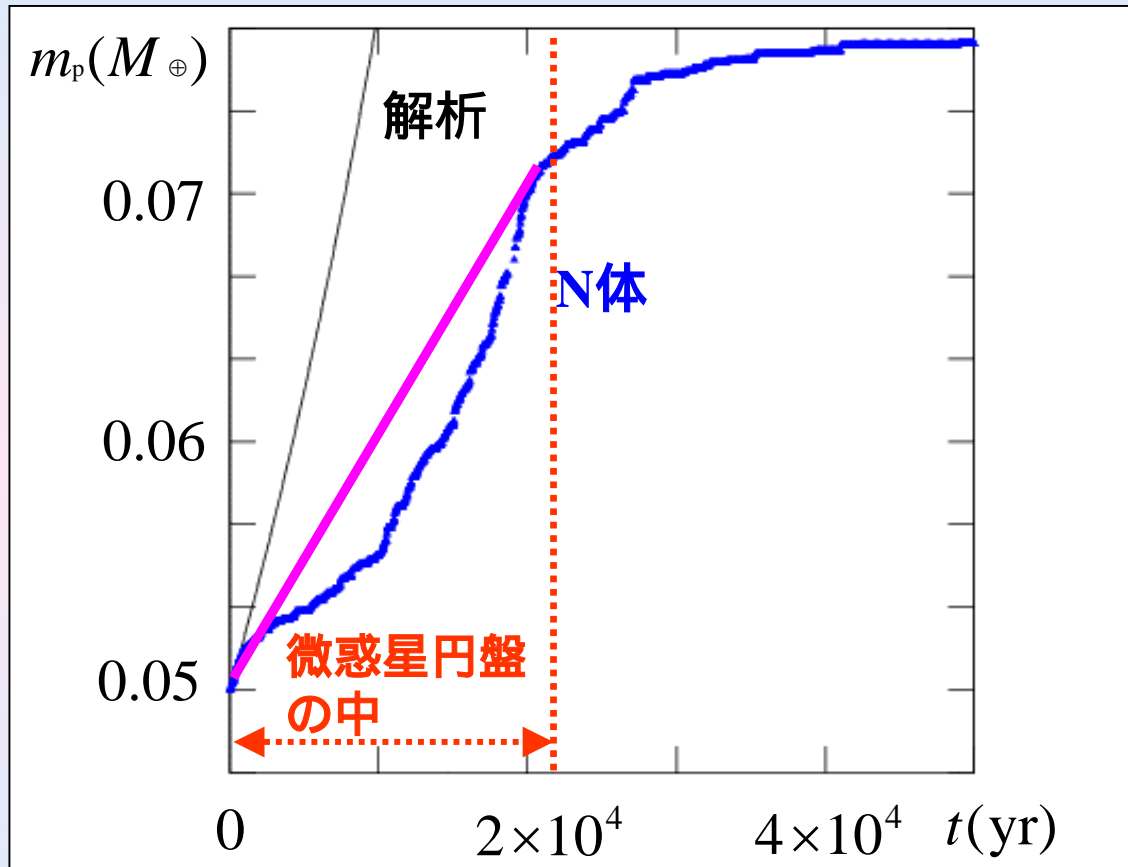
- 解析的に出す。
- N体計算から出す。

比較し、ずれているのかどうか、をみる。



# 解析的な線とN体との比較 ( $dm/dt$ )

## 質量の時間進化

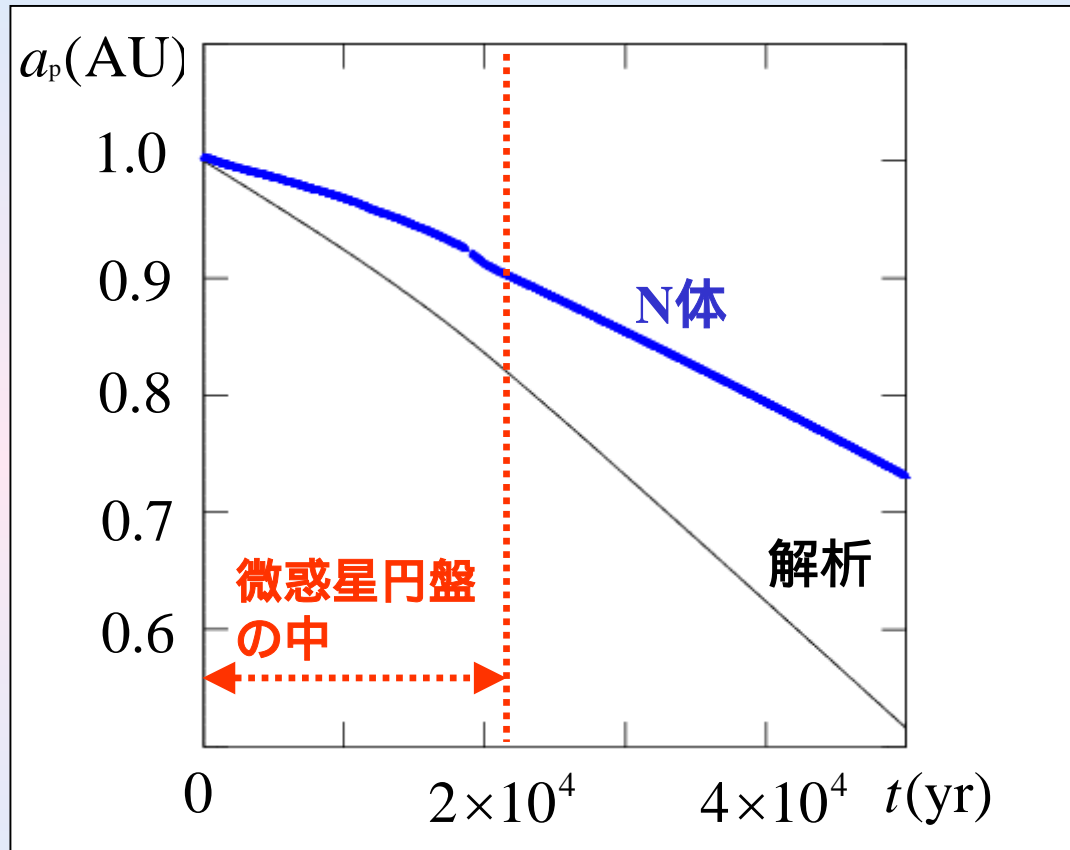


集積の速度が遅くなっている。

**N体 = 解析 × 0.3**

# 解析的な線とN体との比較 ( $da/dt$ )

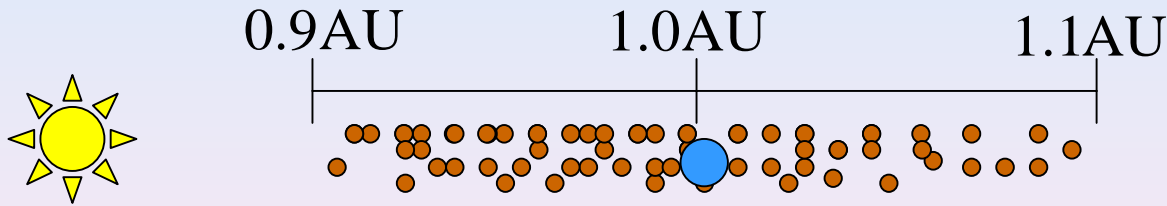
軌道長半径の時間進化



落下の速度が遅くなっている。

$$\text{N体} = \text{解析} \times 0.5$$

# 原始惑星一つ + 微惑星円盤の 解析結果



- 原始惑星は微惑星を押しやりながら落下していく。 **ギャップ形成**
- 原始惑星の成長率は下がる。 **惑星は落ちにくくなる**
- 原始惑星の軌道長半径の減衰は遅くなる。 **落下タイムスケールを数倍のばせる**

$$\tau_{\text{mig}} \sim 7 \times 10^5 \text{ yr} \longrightarrow \tau_{\text{mig}} \sim 2 - 3 \times 10^6 \text{ yr}$$
$$\tau_{\text{円盤}} \sim 10^6 - 10^7 \text{ yr}$$

$$\tau_{\text{mig}} \sim \tau_{\text{円盤}}$$

惑星の中心星落下は防げるかもしれない。

# まとめ

## 本研究

原始惑星が形成される過程を、  
ガス円盤からの重力相互作用とガス抵抗を考慮してN体計算した。

## 結果

- ガス抵抗を入れると惑星が成長しやすい。
- 原始惑星は微惑星円盤に密度波を立てる。

**ギャップの効果を考えて・・・**

- 原始惑星の成長は遅くなる。
- 落下速度は遅くなっている。

## 議論 & 結論

落下のタイムスケールがガス円盤の寿命のタイムスケールに近づいた。  
落下がふせげるかもしれない。

## 今後

たくさんの原始惑星があった場合、どうなるのでしょうか。

終わり。