

# 惑星系の形成と多様性 (Kokubo & Ida 2002 のレビュー)

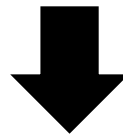
新潟大学 宇宙物理学研究室  
M1 石川善隆

Ref) Kokubo, E., & Ida, S., 2002, ApJ, **581**, 666

# 目的

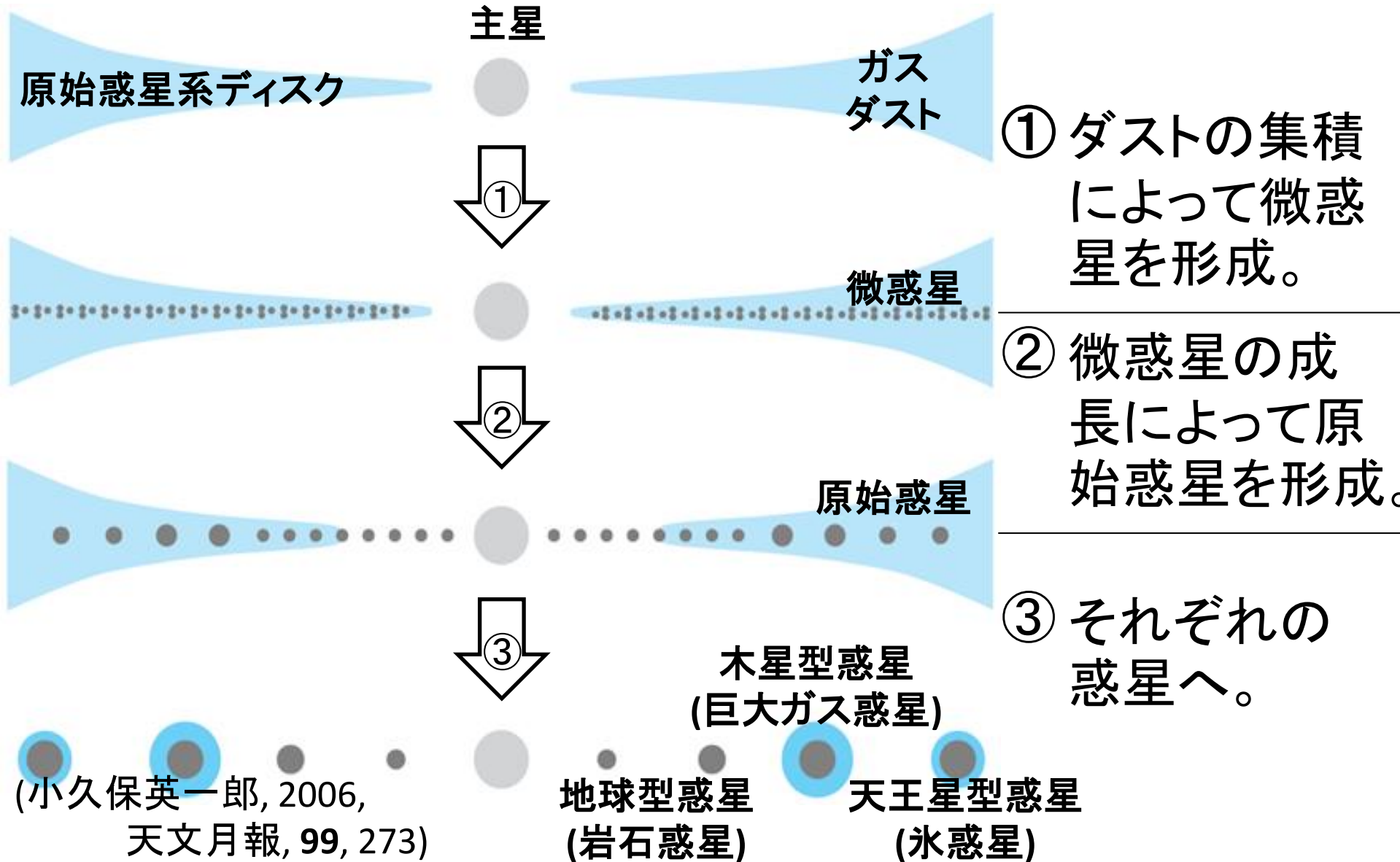
太陽系とは大きく異なる、多様な惑星系の発見。

例：ホットジュピター（主星からの距離が  $\lesssim 0.1\text{AU}$  の、  
非常に内側の軌道の木星型惑星）



従来の太陽系形成モデルを応用。  
ディスクの初期密度分布によって、  
様々な惑星系を再現する。

# 太陽系形成モデル



# ディスクモデル

$$\times M_* = M_\odot, L_* = L_\odot$$

$M_*$ ,  $L_*$ : 主星の質量、光度

## ◇固体の密度分布

$$\Sigma_{\text{solid}} = f_{\text{ice}} \Sigma_1 \left( \frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-\alpha} \text{ g cm}^{-2}$$

$\Sigma_{\text{solid}}$ : 固体の面密度

$\Sigma_1$ :  $a = 1\text{AU}$  での  
ディスク面密度

$\alpha$ : 初期密度分布を決める  
パラメータの一つ  
今回は  $\alpha = 3/2$  を  
用いる。

$a$ : 主星からの距離

$f_{\text{ice}}$ : 氷の有無を表わす  
ファクター

$$f_{\text{ice}} = \begin{cases} 1 & (a < a_{\text{snow}}) \\ 4.2 & (a > a_{\text{snow}}) \end{cases}$$

$a_{\text{snow}}$ : 水が凝縮を始める  $a$

(Hayashi 1981)

# ディスクモデル

$$\times M_* = M_\odot, L_* = L_\odot$$

◇ディスク温度とガス密度分布

$$T \cong 2.8 \times 10^2 \left( \frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-1/2} \text{ K}$$

$$\Sigma_{\text{gas}} = 240 \Sigma_1 \left( \frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-\alpha} \text{ g cm}^{-2}$$

$T$  : ディスク温度

$T \cong 170\text{K}$  : 水の凝縮温度

$a_{\text{snow}}$  は  $T \cong 170\text{K}$   
での  $a$  で

$\Sigma_{\text{gas}}$  : ガスの面密度

$$a_{\text{snow}} \cong 2.7\text{AU}$$

# 原始惑星の形成と成長

ダストの集積によって、微惑星が形成。



一部の微惑星が暴走成長することにより、原始惑星が形成。

(質量 → 大で成長速度 → 大)



原始惑星まで成長すると、  
成長モードが暴走成長から寡占成長へ。

(質量 → 大で成長速度 → 小)

---

原始惑星において

暴走成長のタイムスケール  $\ll$  寡占成長のタイムスケール

➡ 寡占成長が原始惑星成長の鍵。

# 寡占成長モデル

## ◇原始惑星の軌道間距離

原始惑星の軌道間距離： $b$

$$\text{相互ヒル半径} : r_{\text{H}} = \left( \frac{2M}{3M_{\odot}} \right)^{1/3} a \longrightarrow \tilde{b} \equiv \frac{b}{r_{\text{H}}}$$

$M$ ：原始惑星の質量

典型的な  $\tilde{b}$ ： $\tilde{b} \simeq 10$  (Kokubo & Ida 1998)

# 寡占成長モデル

◇原始惑星の成長タイムスケール  $T_{\text{grow}}$

$$T_{\text{grow}} \cong 1.7 \times 10^5 \left[ \frac{\langle e^2 \rangle^{1/2}}{6 \left( \frac{M}{3M_{\odot}} \right)^{1/3}} \right]^2 \times \left( \frac{M}{10^{26} \text{ g}} \right)^{1/3} \left( \frac{f_{\text{ice}} \Sigma_1}{10} \right)^{-1} \left( \frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^2 \text{ yr}$$

$e$  : 原始惑星の離心率



# 寡占成長モデル

## ◇原始惑星の質量と個数

$$M_{\text{iso}} \cong 0.16 \left( \frac{\tilde{b}}{10} \right)^{3/2} \left( \frac{f_{\text{ice}} \Sigma_1}{10} \right)^{3/2} \left( \frac{a}{1\text{AU}} \right)^{3/4} M_{\oplus}$$

$$n_M \cong \frac{1}{2\pi a b 2ai}$$

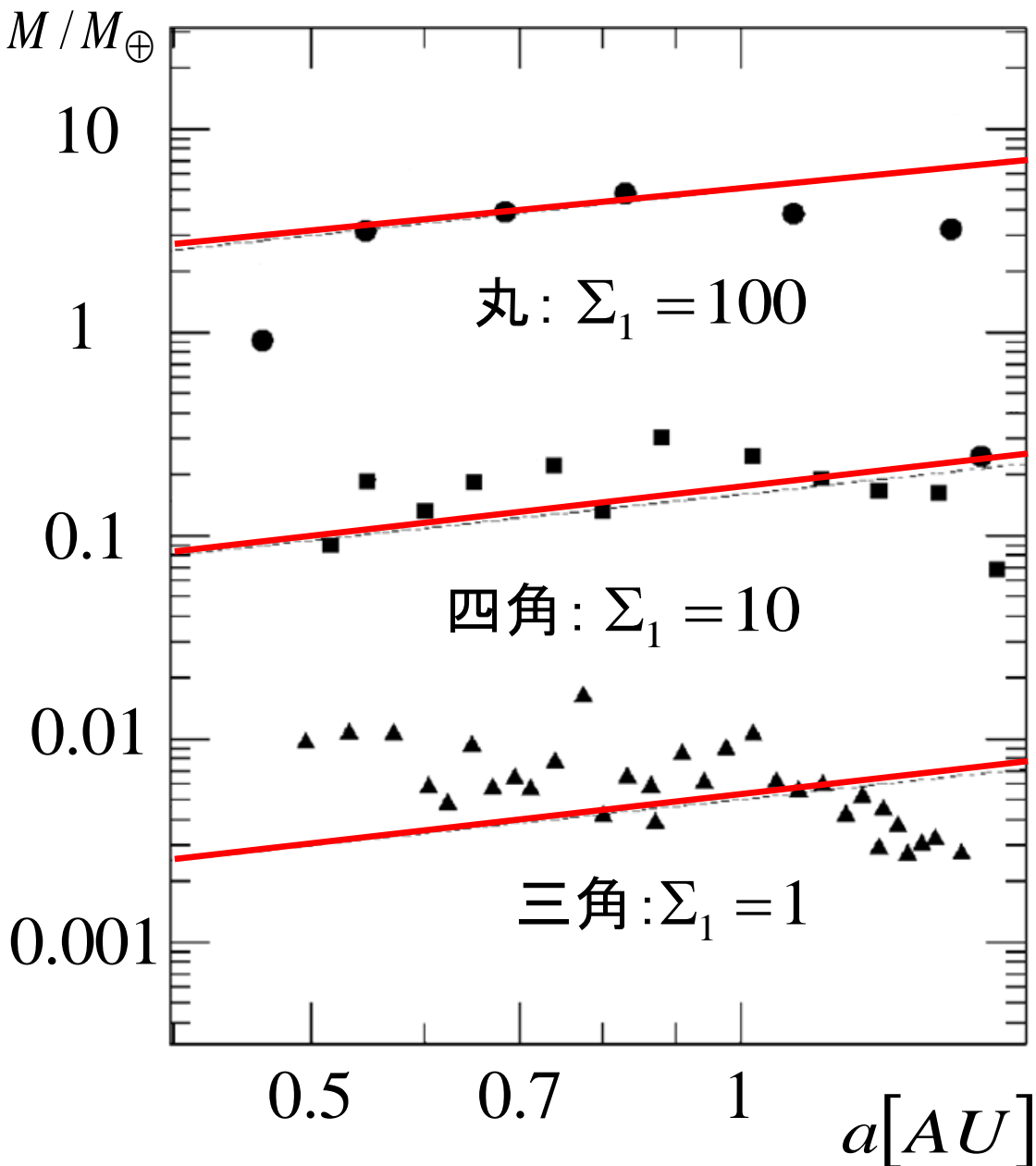
$M_{\text{iso}}$ : 最終的な原始惑星質量

$M_{\oplus}$ : 地球質量 ( $\cong 6 \times 10^{27}$  g)

$n_M$ : 原始惑星の個数面密度

$i$ : 軌道傾斜角

# N体シミュレーションと比較



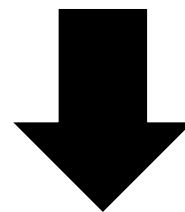
◇寡占成長モデル

$$\begin{cases} M_{\text{iso}} \propto \Sigma_1^{3/2} \rightarrow \text{大} \\ n_M \propto \Sigma_1^{-1/2} \rightarrow \text{小} \end{cases}$$

上記の矢印は  $\Sigma_1 \rightarrow$  大のとき

&

赤線:  $\tilde{b} = 10$  の  
ときの  $M_{\text{iso}}$



よく合致!

# 原始惑星から惑星へ

地球型惑星  
(岩石惑星) : 原始惑星同士の衝突から形成、  
または原始惑星がそのまま成る。

天王星型惑星  
(氷惑星) : コアの主成分が氷で、木星型惑  
星よりも少ないガスの降着で形成。

木星型惑星  
(巨大ガス惑星) : コア(大質量の原始惑星)にガス  
が降着で形成。



木星型惑星に注目

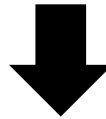
# 木星型惑星

$M \gtrsim 5-15M_{\oplus}$  で、ガス降着が開始。

$$\text{降着タイムスケール : } T_{\text{cont}} \cong 10^8 \left( \frac{M_{\text{iso}}}{M_{\oplus}} \right)^{-5/2} \text{ yr}$$

$$\tilde{b} = 10 \quad \Rightarrow \quad T_{\text{grow}} \cong 3.2 \times 10^5 f_{\text{ice}}^{-1/2} \\ \times \left( \frac{\Sigma_1}{10} \right)^{-9/10} \left( \frac{a}{1\text{AU}} \right)^{59/20} \text{ yr}$$

ガスディスクの寿命 :  $T_{\text{disk}}$



木星型惑星形成の条件 :  $T_{\text{cont}}, T_{\text{grow}} < T_{\text{disk}}$

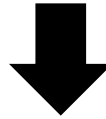
# 木星型惑星

$$T_{\text{cont}} < T_{\text{disk}}$$

$$\Rightarrow a > a_{\text{gas}}^{\text{min}} \cong 12 f_{\text{ice}}^{-2} \left( \frac{T_{\text{disk}}}{10^8 \text{ yr}} \right)^{-8/15} \left( \frac{\Sigma_1}{10} \right)^{-2} \text{ AU}$$

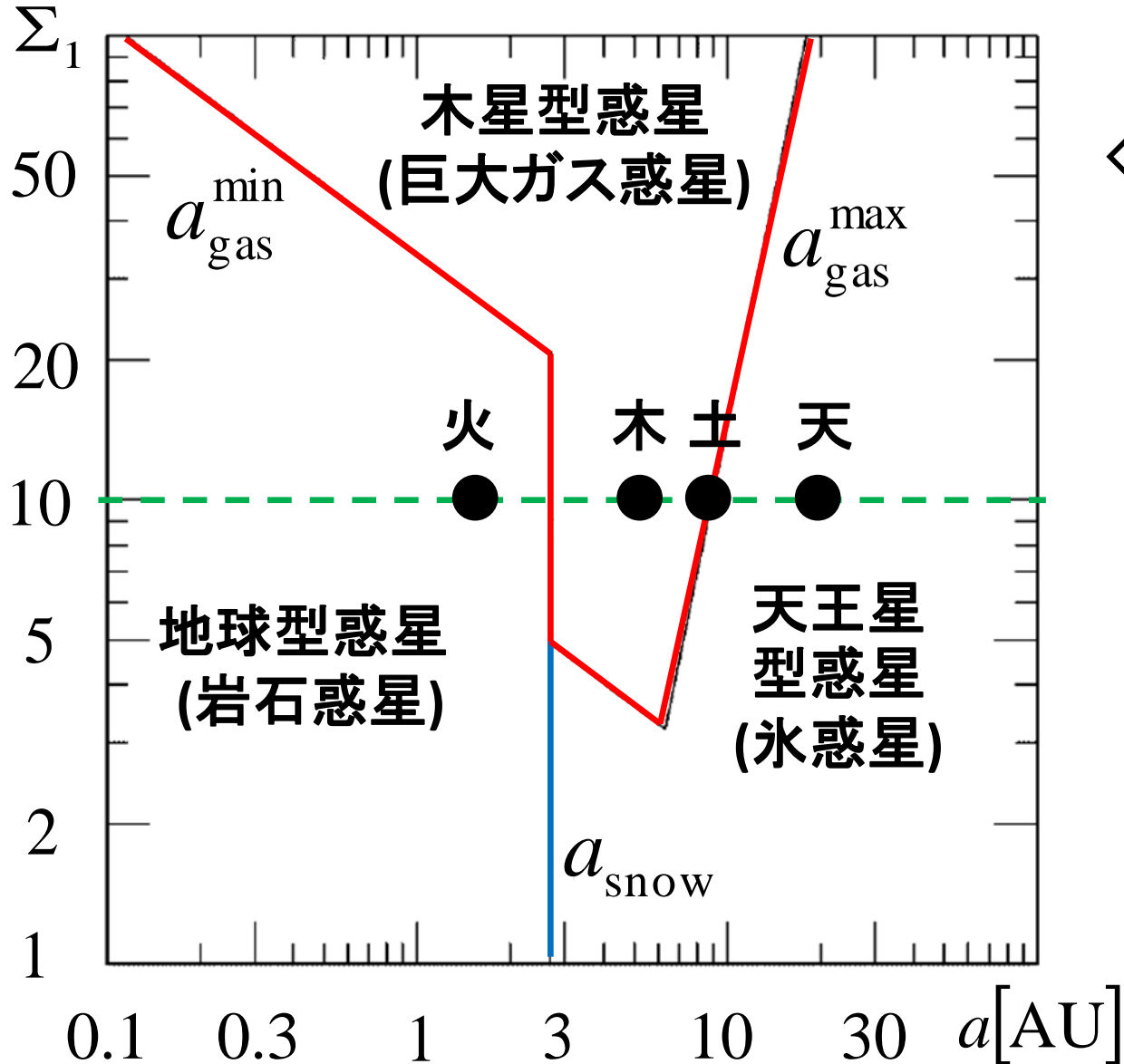
$$T_{\text{grow}} < T_{\text{disk}}$$

$$\Rightarrow a < a_{\text{gas}}^{\text{max}} \cong 5.5 f_{\text{ice}}^{10/59} \left( \frac{T_{\text{disk}}}{10^8 \text{ yr}} \right)^{20/59} \left( \frac{\Sigma_1}{10} \right)^{18/59} \text{ AU}$$



木星型惑星の形成領域： $a_{\text{gas}}^{\text{min}} < a < a_{\text{gas}}^{\text{max}}$

# $\Sigma_1$ による各惑星の形成領域



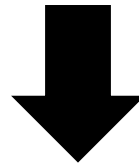
◇ 太陽系 :  $\Sigma_1 = 10$

今回用いた値

$$\left\{ \begin{array}{l} M_* = M_{\odot} \\ L_* = L_{\odot} \\ \alpha = 3/2 \\ T_{\text{disk}} = 10^8 \text{ yr} \\ \tilde{b} = 10 \end{array} \right.$$

# まとめ

初期のディスク密度  $\Sigma_1$  と、各惑星の形成領域との関係を導出。



ディスクの初期密度分布を変えることによって、様々な惑星系を再現できることを示した。

（ホットジュピターは非常に大きな  $\Sigma_1$  で形成可能。）