

# 原始太陽系星雲の 準平衡とダスト密度

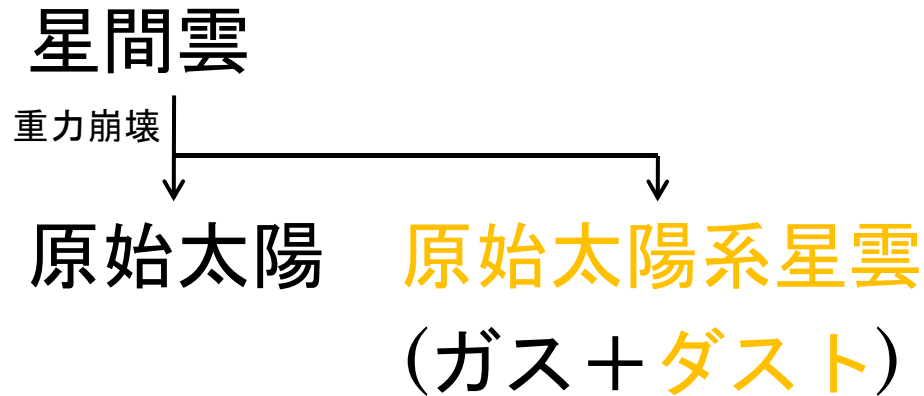
大阪大学大学院 理学研究科  
宇宙地球科学専攻 宇宙進化グループ M2

長谷川幸彦

・ Sekiya, M. *Icarus* 133, 298 (1998)

# 1. INTRODUCTION

# 太陽系形成のシナリオ

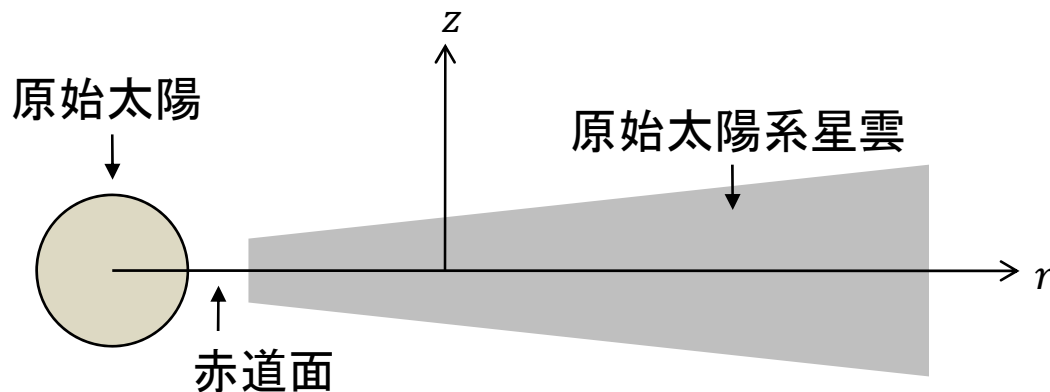


衝突によって合体・成長  
赤道面へ向かって沈殿

→ ダスト層の形成  
密度(大)

→ 重力不安定

→ 微惑星 → ...



# シナリオの問題点

ダストが赤道面へ向かって沈殿していく。



- 重力不安定より先にKelvin-Helmholtz不安定が起こる？



- ダストが上空へ巻き上げられて赤道面付近に沈殿できず、ダスト層が形成されない？



- ダストの密度が重力不安定を起こす密度 $\rho_c$ に達しないため、微惑星は形成されない？

# 目的

- 惑星形成の標準モデルである林モデル(最小質量モデル)において、ダストの密度が重力不安定を起こす密度  $\rho_c$  に達するののかについて調べる。
- もし密度が  $\rho_c$  に達しないのであれば、モデルをどのように変更すればよいのかについても調べる。

## 2. Kelvin-Helmholtz不安定

# Kelvin-Helmholtz不安定とは

- 原始太陽系星雲内のガスとダストの混合流体は、原始太陽の重力によって、沈殿しながら原始太陽の周囲を回転している。
- ある半径における星雲の混合流体の密度や回転速度は $z$ によって異なるため、密度や回転速度が異なる流体が接する、不安定な面が生ずる。
- これをKelvin-Helmholtz不安定という。

# Richardson数

Kelvin-Helmholtz不安定が起こるかどうかを評価するための指標。

- 浮力(ダストの巻き上げ)と慣性(それに対する反作用)の比。
- 混合流体の回転速度  $v$ 、ガスの密度  $\rho_g$ 、ダストの密度  $\rho_d$ 、重力加速度  $g$  を用いて

$$J = -\frac{g}{\rho_g + \rho_d} \frac{\partial \rho_d}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^{-2}$$

と書ける。  $J < J_c = \frac{1}{4}$  の時、Kelvin-Helmholtz不安定が起こる。



### 3. 原始太陽系星雲

# 混合流体の回転速度

ガスとダストの混合流体の回転速度

$$v = \left[ 1 - \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d} \eta \right] v_K$$

$v_K$  : ケプラー速度

$$\eta : \eta = -\frac{1}{2v_K^2 \rho_g} \frac{\partial P_g}{\partial \ln r} = 1.81 \times 10^{-3} \left( \frac{r}{1\text{AU}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

# 密度と面密度

原始太陽系星雲が  $z$  方向に等温だと仮定すると、ガスの密度は

$$\rho_g = \frac{\Sigma_g}{\sqrt{\pi}H} \exp \left[ - \left( \frac{z}{H} \right)^{-2} \right]$$

$H$  : 星雲のスケールハイト

$\Sigma_g$  : ガスの面密度

$$(\Sigma_g = 1.7 \times 10^3 f_g (r/1AU)^{-3/2} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}])$$

※ダストの面密度  $\Sigma_d = 7.1 f_d (r/1AU)^{-3/2} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}]$

$f_g = 1$  かつ  $f_d = 1$   $\Rightarrow$  林モデル(最小質量モデル)  
(1AU)

# Richardson数と密度勾配

Richardson数の式に原始太陽系星雲の回転速度と密度を代入すると、

$$J = -\frac{g}{(\eta r)^2} \frac{(\rho_g + \rho_d)^3}{\rho_g^2} \left( \frac{\partial \rho_d}{\partial z} \right)^{-1}$$

と書ける。これより、ダストの沈殿によってダストの密度勾配  $\partial \rho_d / \partial z$  が大きくなると、 $J$  は小さくなることがわかる。

# ダストの巻き上げと準平衡状態

- ダストが沈殿してダストの密度勾配が大きくなると Kelvin-Helmholtz 不安定が起こり、ダストは巻き上げられる。
  - ダストの巻き上げが起こると、ダストの密度勾配は緩やかになるため、 Kelvin-Helmholtz 不安定はおさまる。
- ↓
- これを繰り返すことにより、星雲は臨界値  $J \simeq J_c = \frac{1}{4}$  の準平衡状態に落ち着くと考えられる。

# 本論文で扱う原始太陽系星雲

原始太陽系星雲について、

- $J \simeq J_c = \frac{1}{4}$

の準平衡状態を仮定する。また、ダスト層の形成される赤道面付近( $z \ll H$ )について考えるため、ガスの密度について、

- $\rho_g \simeq \Sigma_g / \sqrt{\pi} H$

とする。

$$\rho_g = \frac{\Sigma_g}{\sqrt{\pi} H} \exp \left[ - \left( \frac{z}{H} \right)^{-2} \right]$$

# 赤道面付近で成り立つ式

$$\frac{|z|}{\sqrt{J_c \eta r}} = \sqrt{[u(z)]^2 - [u(0)]^2} - q \ln \left\{ \frac{u(z) + \sqrt{[u(z)]^2 - [u(0)]^2}}{u(0)} \right\}$$

$$\Sigma_d = \sqrt{J_c \eta r} \rho_g \left\{ (1 + q) \ln \left\{ \frac{1 + q + \sqrt{(1 + q)^2 - [u(0)]^2}}{u(0)} \right\} - \sqrt{(1 + q)^2 - [u(0)]^2} \right\}$$

$$u(z) = \frac{\rho_g}{\rho_g + \rho_d(z)} + q \quad , \quad q = \frac{4\pi G \rho_g}{\Omega_K^2}$$

## 4. 計算結果



# モデル一覧

Model	$r$ (AU)	$f_g$	$f_d$	林モデルと 比べて
A	1	1	1	-
B	1	1	16.8	ダストが多い
C	1	0.029	1	ガスが少ない
D	10	1	4.2	-
E	10	1	25.1	ダストが多い
F	10	0.092	4.2	ガスが少ない

$$\left( \begin{array}{l} \Sigma_g = 1.7 \times 10^3 f_g (r/1AU)^{-3/2} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}] \\ \Sigma_d = 7.1 f_d (r/1AU)^{-3/2} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}] \end{array} \right)$$

# モデル一覧

Model	$r$ (AU)	$f_g$	$f_d$	林モデルと比べて
A	1	1	1	—
B	1	1	16.8	ダストが多い
C	1	0.029	1	ガスが少ない
D	10	1	4.2	—
E	10	1	25.1	ダストが多い
F	10	0.092	4.2	ガスが少ない

# 結果(林モデルA, D)

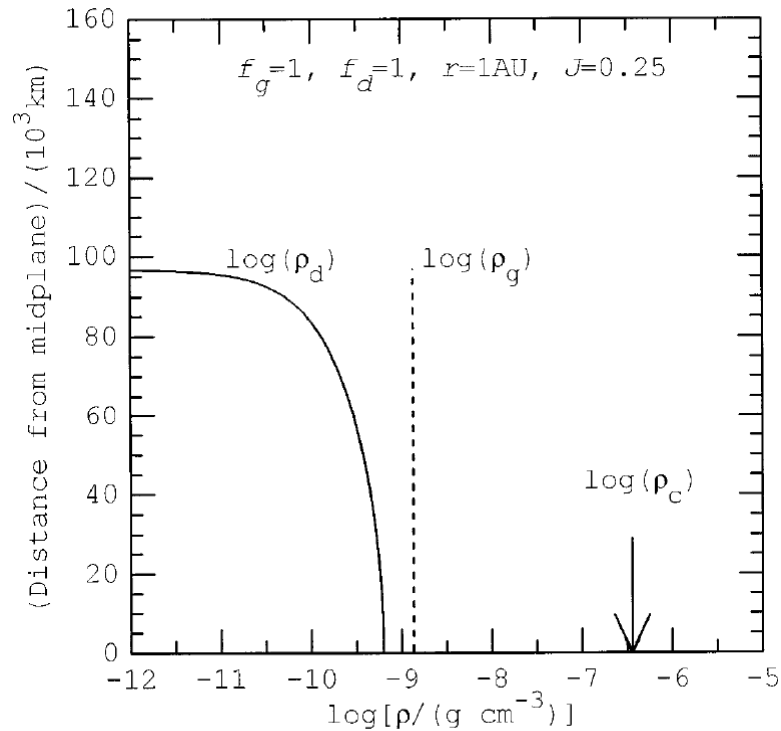


FIG. 1. The critical Richardson number density distribution of dust for model A (solid curve). The gas density distribution is also drawn (dotted line). The arrow shows the critical density of the gravitational stability.

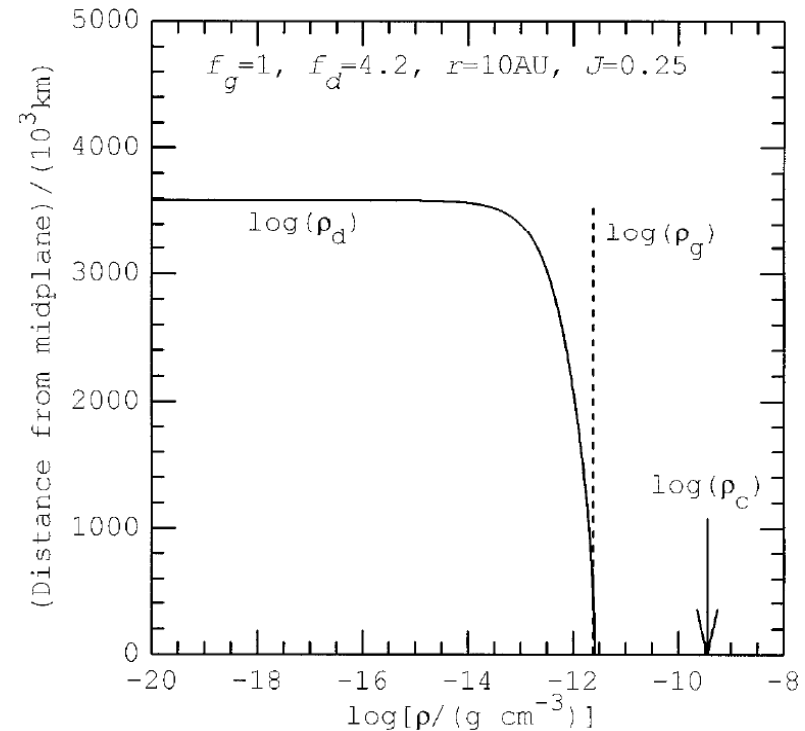


FIG. 4. Same as Fig. 1, but for model D.

# 結果(林モデルA, D)

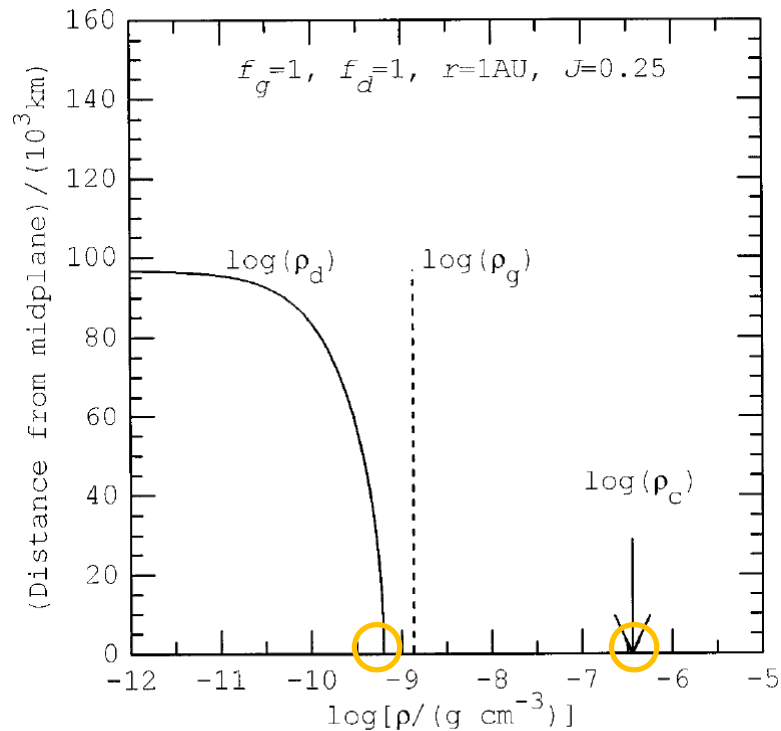


FIG. 1. The critical Richardson number density distribution of dust for model A (solid curve). The gas density distribution is also drawn (dotted line). The arrow shows the critical density of the gravitational stability.

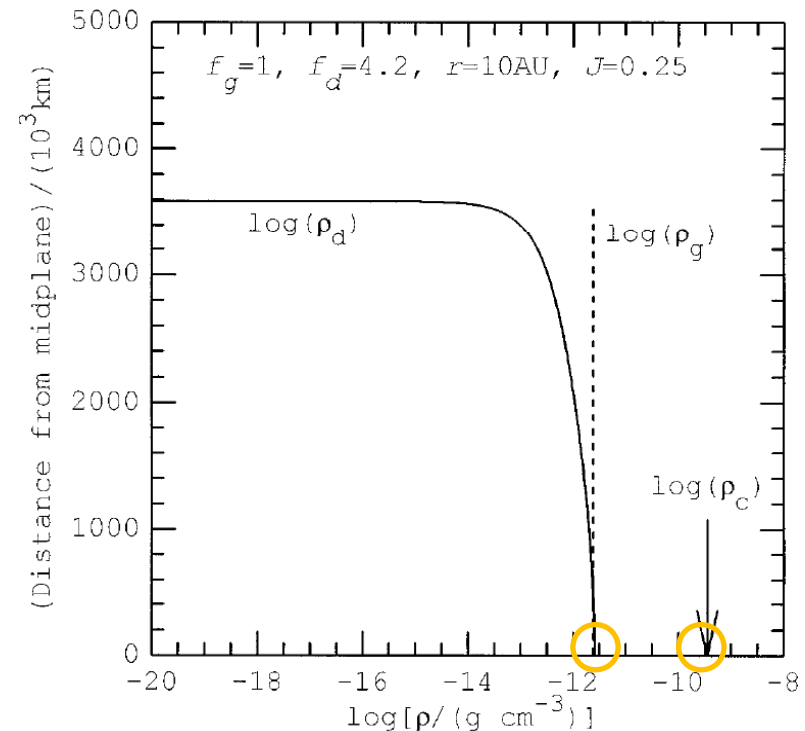


FIG. 4. Same as Fig. 1, but for model D.

⇒ 林モデルでは、 $\rho_d$ が $\rho_c$ に達しない。

# モデル一覧

Model	$r$ (AU)	$f_g$	$f_d$	林モデルと 比べて
A	1	1	1	-
B	1	1	16.8	ダストが多い
C	1	0.029	1	ガスが少ない
D	10	1	4.2	-
E	10	1	25.1	ダストが多い
F	10	0.092	4.2	ガスが少ない

# 結果(ダストが多いモデルB, E)

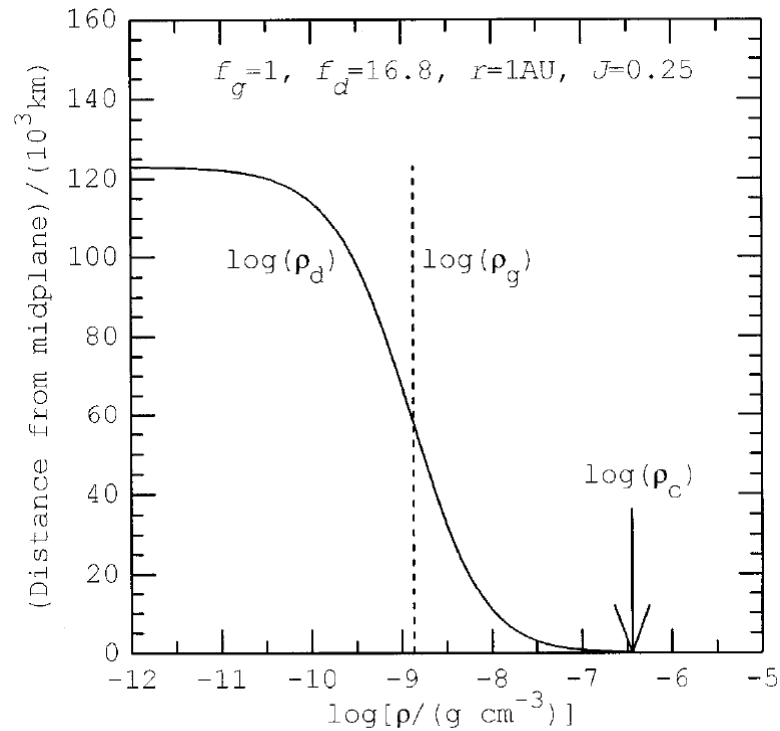


FIG. 2. Same as Fig. 1, but for model B. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

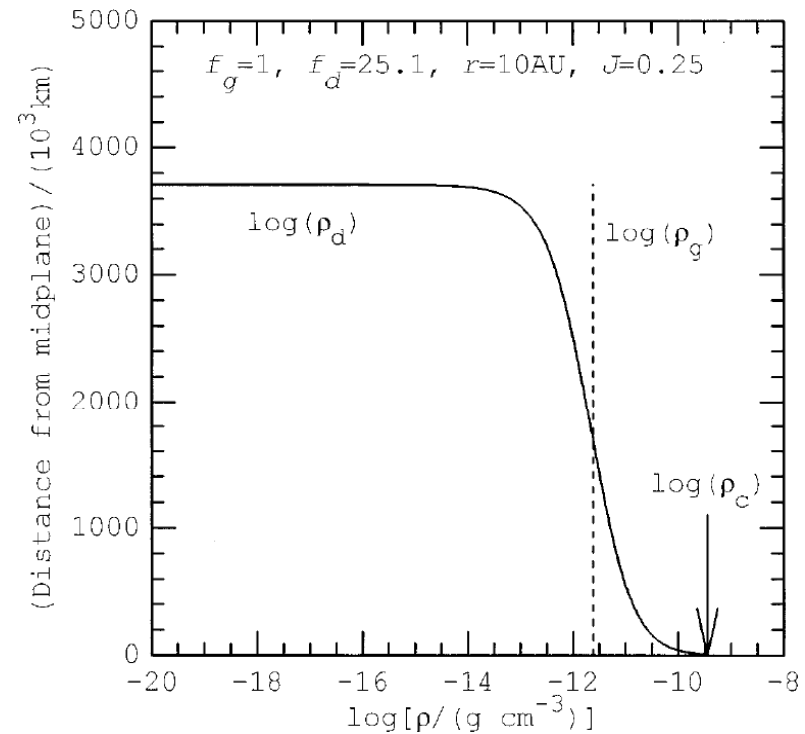


FIG. 5. Same as Fig. 1, but for E. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

# 結果(ダストが多いモデルB, E)

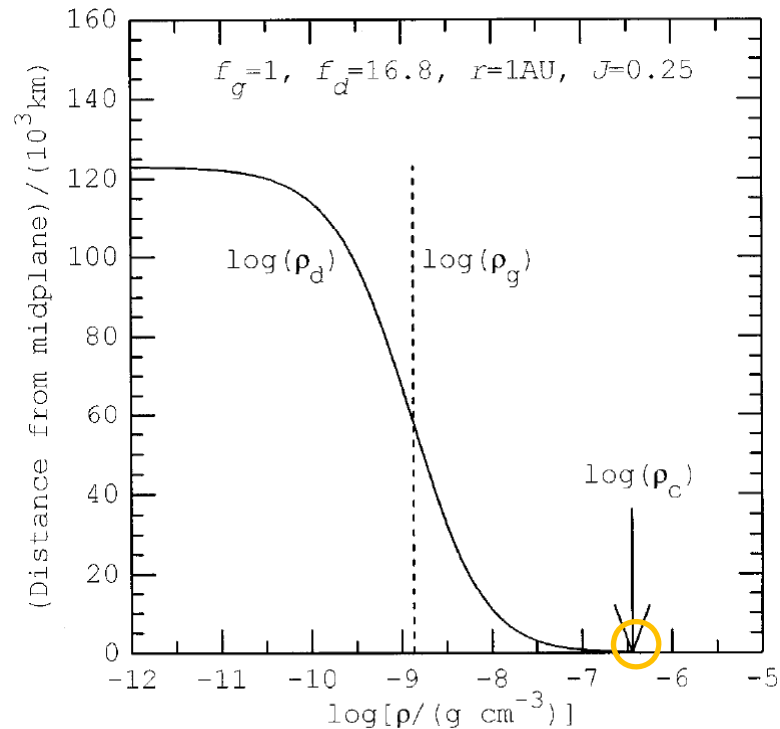


FIG. 2. Same as Fig. 1, but for model B. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

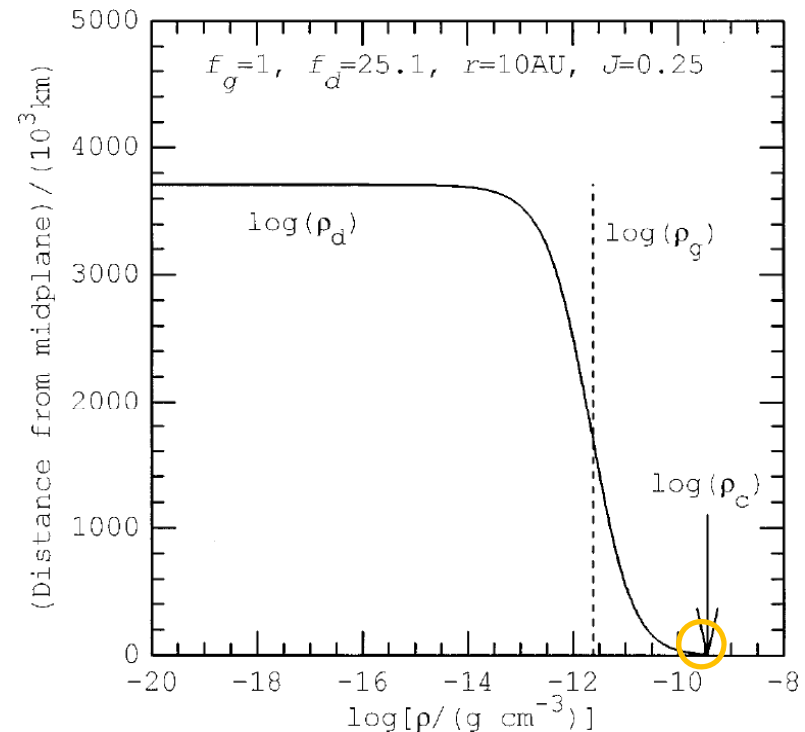


FIG. 5. Same as Fig. 1, but for E. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

⇒ ダストが多いと、 $\rho_d$ が $\rho_c$ に達する。

# モデル一覧

Model	$r$ (AU)	$f_g$	$f_d$	林モデルと比べて
A	1	1	1	-
B	1	1	16.8	ダストが多い
C	1	0.029	1	ガスが少ない
D	10	1	4.2	-
E	10	1	25.1	ダストが多い
F	10	0.092	4.2	ガスが少ない



# 結果(ガスが少ないモデルC, F)

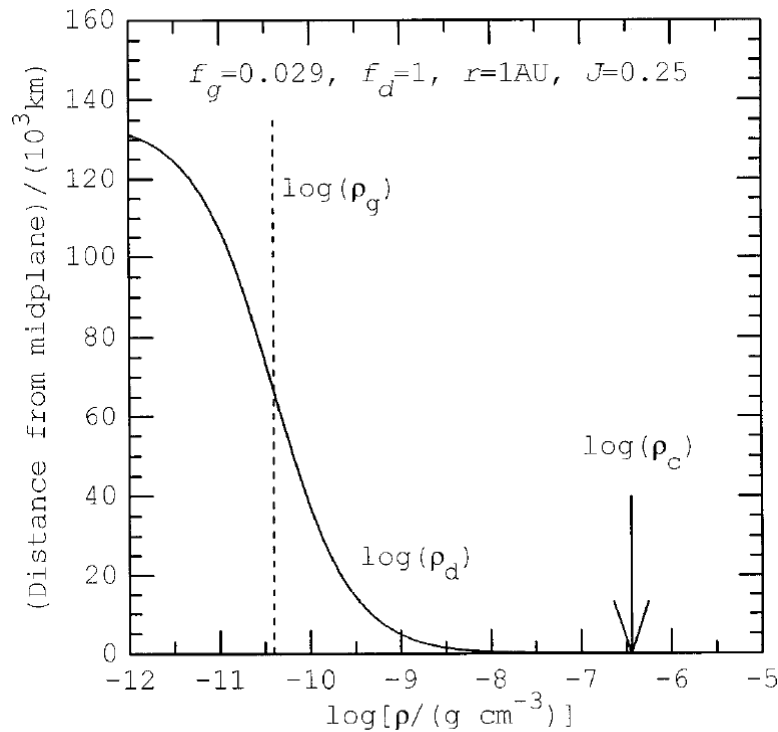


FIG. 3. Same as Fig. 1, but for C. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

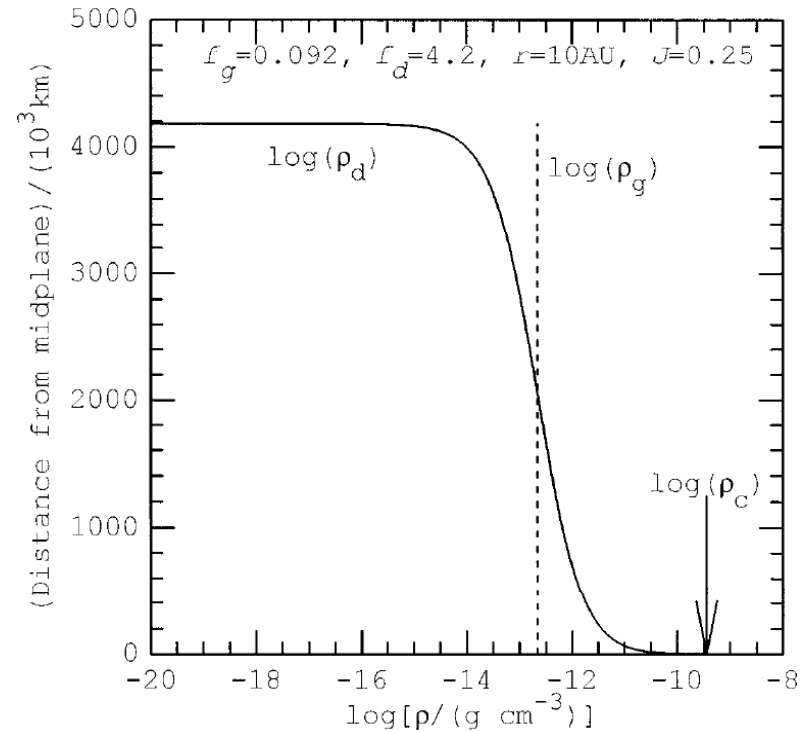


FIG. 6. Same as Fig. 1, but for model F. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

# 結果(ガスが少ないモデルC, F)

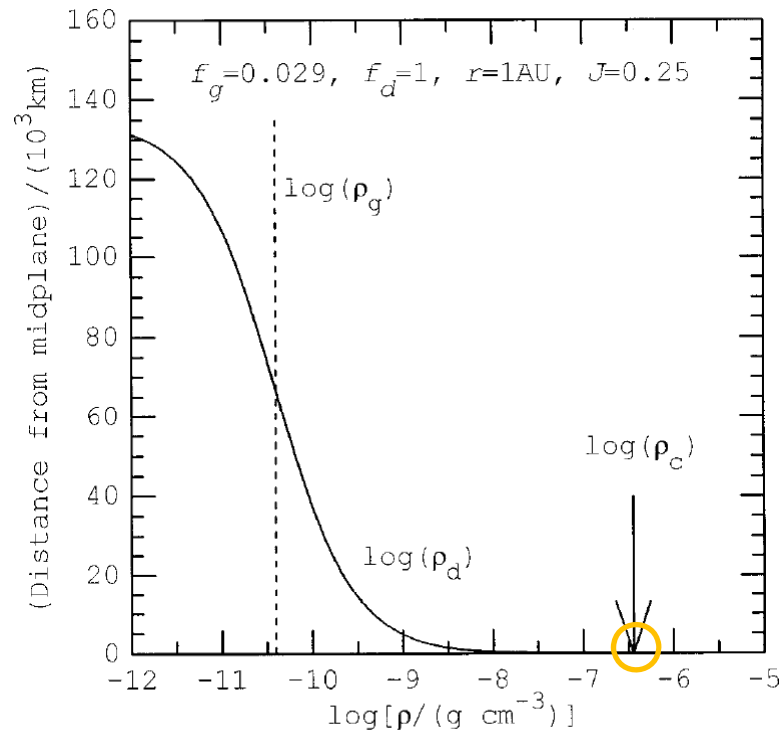


FIG. 3. Same as Fig. 1, but for C. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

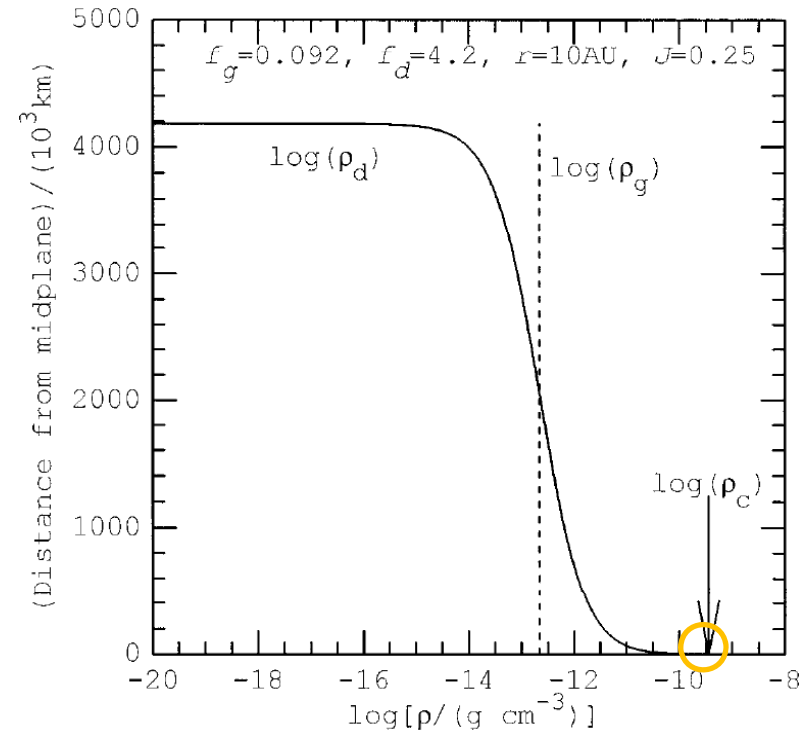


FIG. 6. Same as Fig. 1, but for model F. The dust density distribution has a sharp peak at  $z = 0$ , where the dust density  $\rho_d$  is equal to the critical density  $\rho_c$ .

⇒ ガスが少ないと、 $\rho_d$ が $\rho_c$ に達する。

## 5. まとめ

# まとめ

- 林モデル(最小質量モデル)の場合、ダスト層の密度は重力不安定を起こす密度にまで達しない。
- 林モデルよりも
  - ダストの量が多い
  - ガスの量が少ない場合、重力不安定が起こる密度に達する。