

原始惑星系円盤内の物質移動

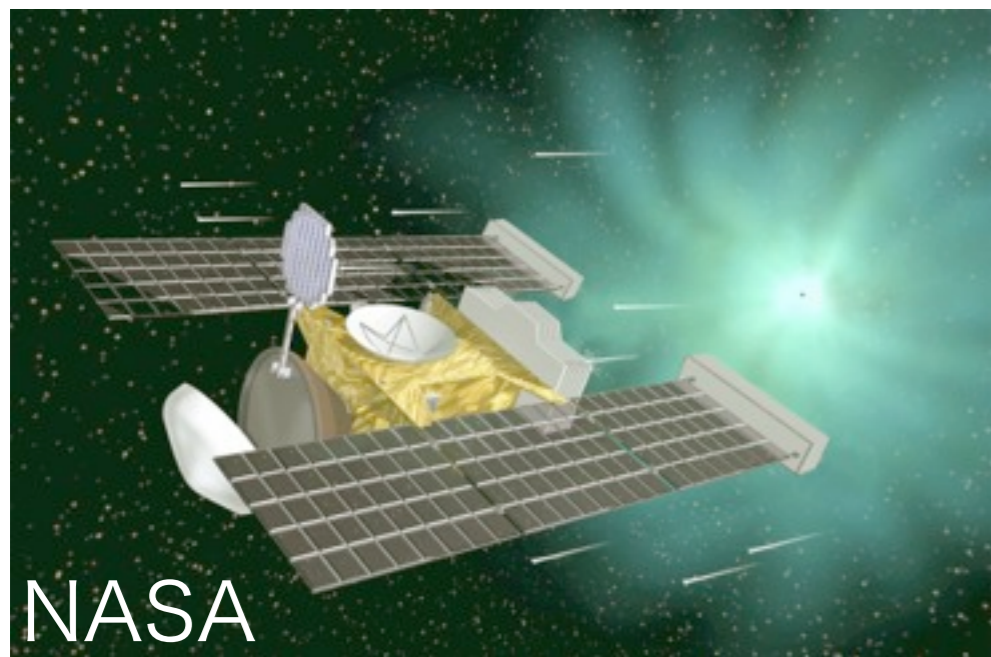
田崎 亮

(京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室)

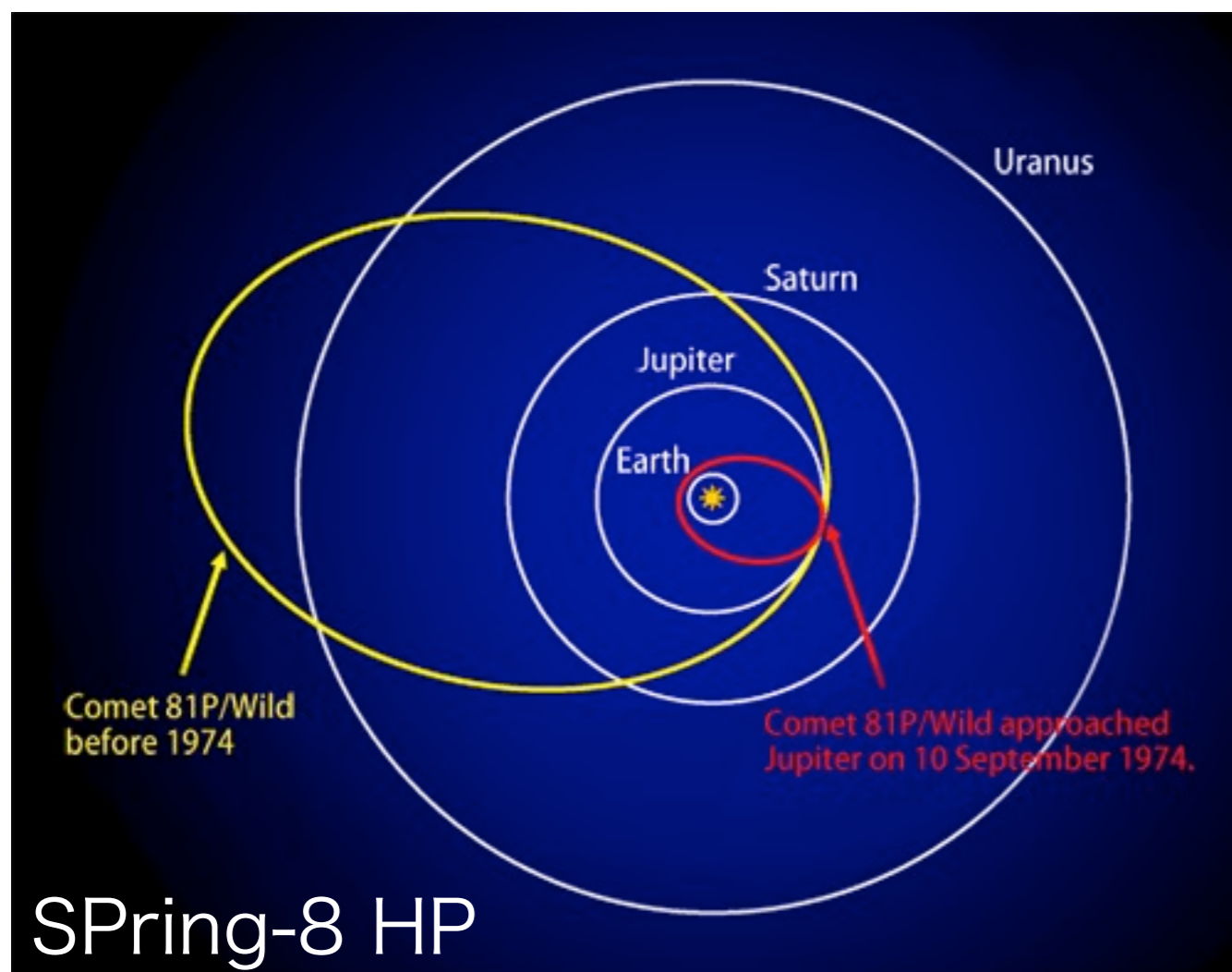
共同研究者：野村 英子

Grain Formation Workshop
2012/11/28-30 @CPS

Stardust Mission



1999 - 2006年 @ NASA
彗星の塵(81P/Wild 2)からの
サンプルリターン・ミッション
⇒この塵から太陽系初期の環境を探る

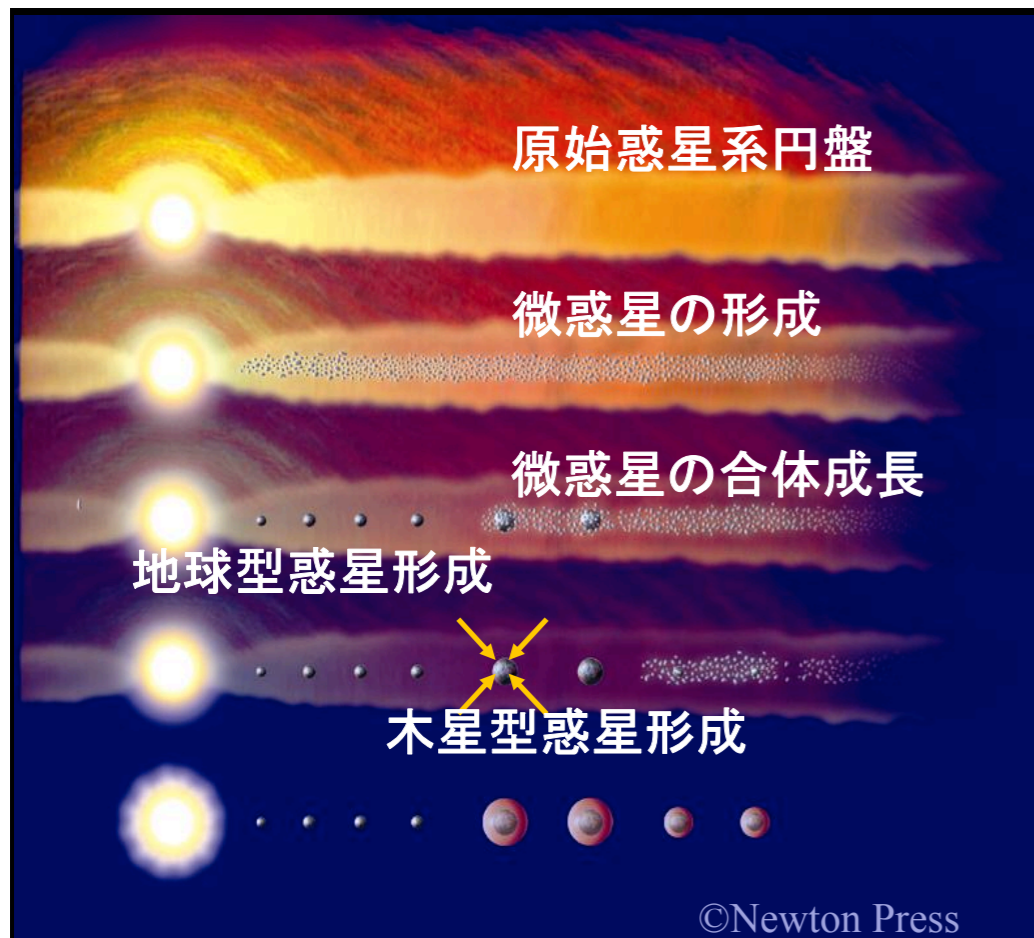


持ち帰ったサンプルから、
最大で20micronサイズの
結晶質シリケートが発見される。

(Brownlee et al.2006;Zolensky et al. 2006;
Westphal et al.2009)

結晶質シリケート問題

惑星形成標準シナリオ



©Newton Press

結晶質シリケート

- ・ **高温**領域(円盤内縁部)で形成～数AU

彗星

- ・ **低温**領域(円盤外縁部)で形成～20-30AU

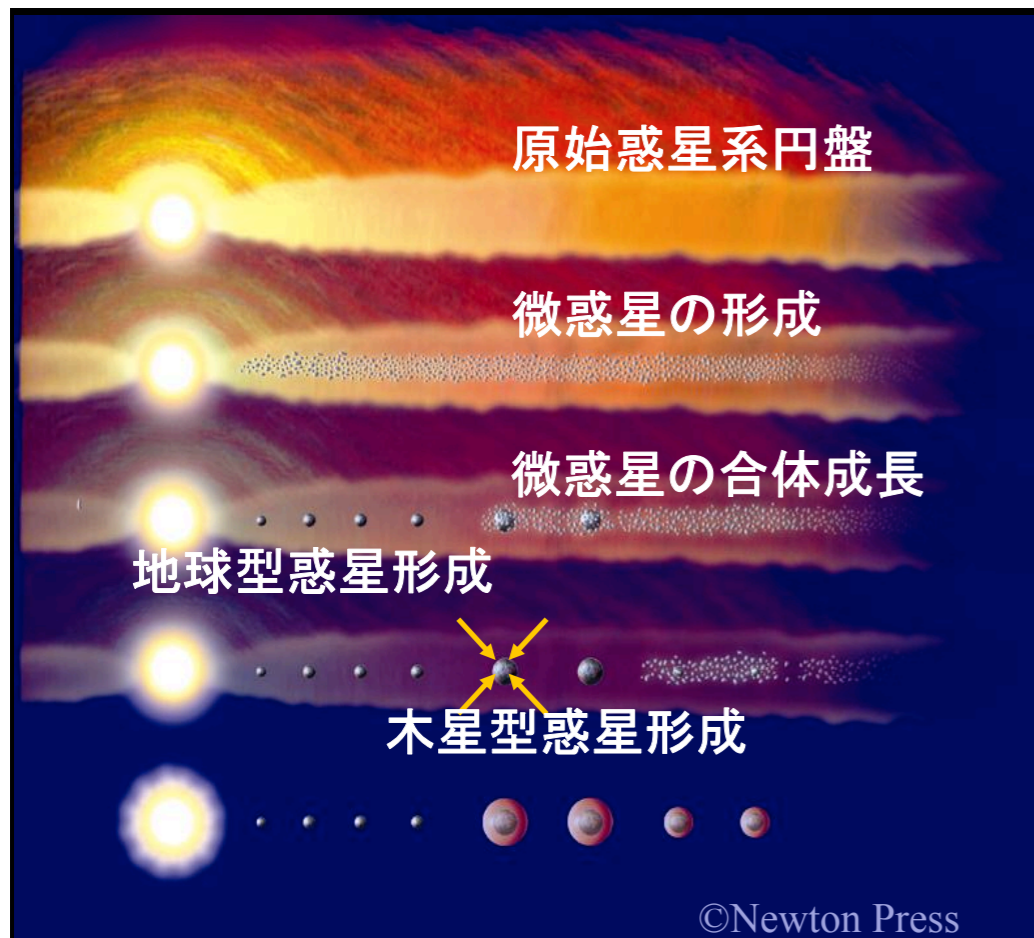
Q. 彗星内の結晶質シリケートは、

(i) どこで結晶化したのか？

(ii) どのように彗星に混入したのか？

結晶質シリケート問題

惑星形成標準シナリオ



©Newton Press

結晶質シリケート

- ・ **高温**領域(円盤内縁部)で形成～数AU

彗星

- ・ **低温**領域(円盤外縁部)で形成～20-30AU

Q. 彗星内の結晶質シリケートは、

(i) どこで結晶化したのか？

(ii) **どのように彗星に混入したのか？**

⇒ 原始惑星系円盤内をダストが外向きに移動した？

ダストが円盤表層部まで巻き上り、
輻射圧で飛んで行ったのではないか？

(I) Radial Motion of Dust Grain

ダストの動径方向の運動は、、、
 ガスとダストの回転方向の **"相対速度"** が重要

動径方向の力の釣り合い(円筒座標系)

$$\text{ガス: } r\Omega_g^2 - \frac{GMr}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P_g}{\partial r} = 0$$

ガス圧

⇒ ケプラー回転より少し遅く回転

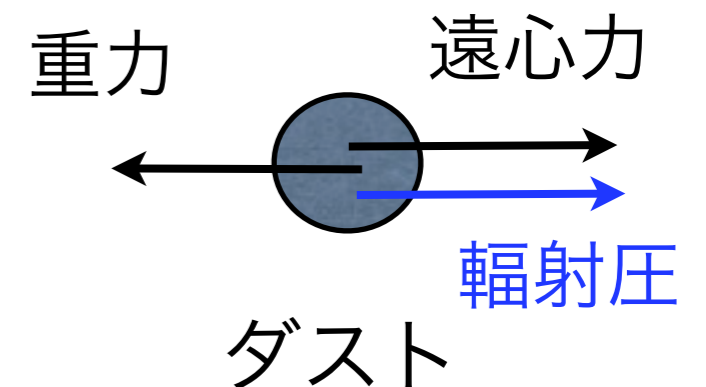
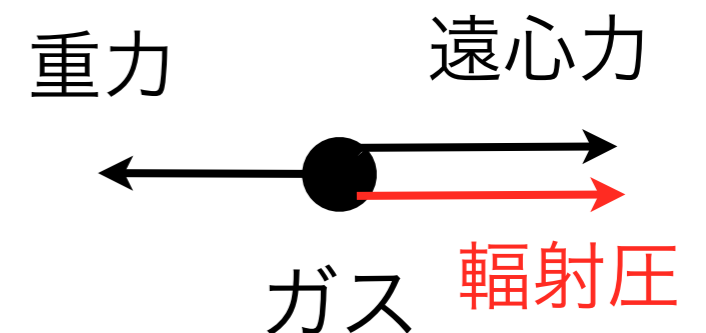
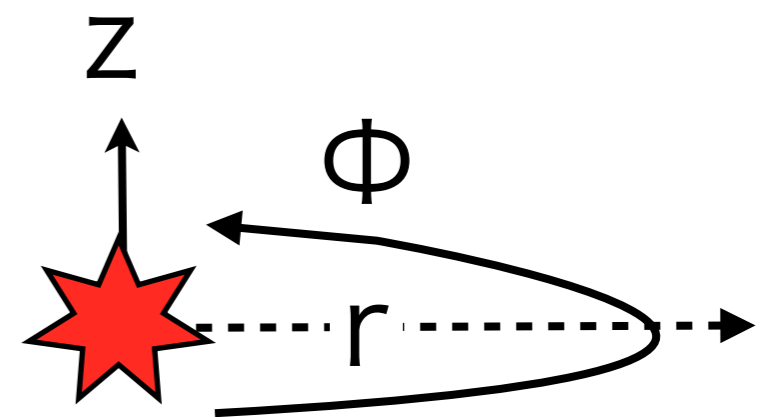
ガス圧によるケプラー回転からのズレ: η

$$\text{ダスト: } r\Omega_d^2 - \frac{GMr}{(r^2 + z^2)^{3/2}} + F_{\text{rad}} = 0$$

輻射圧

⇒ ケプラー回転より少し遅く回転

輻射圧によるケプラー回転からのズレ: β



(I) Radial Motion of Dust Grain

ガス・ダスト間の相対速度 => 角運動量のやりとりが生じる

(i) $\beta > \eta$ (ガスの方が速く回転)

ダストはガスからの”**追い風**”を受ける => **外側へ移動**

(ii) $\beta < \eta$ (ガスの方が遅く回転)

ダストはガスからの”**向かい風**”を受ける => **内側へ移動**

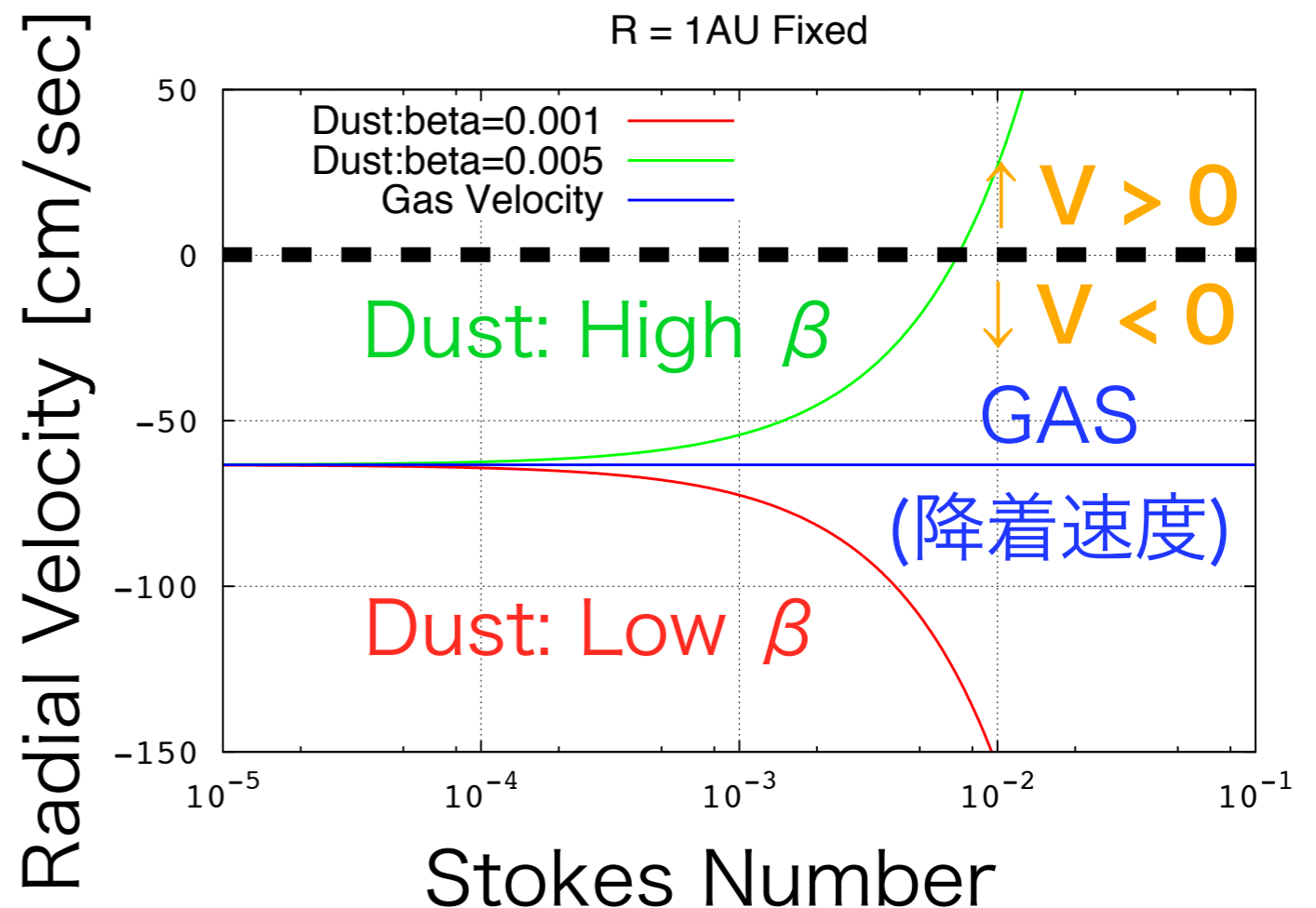
ダストの動径方向の移動速度
(e.g. Takeuchi & Lin 2003)

$$v_{d,r} = \frac{v_{g,r} T_s^{-1} + (\beta - \eta) v_K}{T_s + T_s^{-1}}$$

T_s : 無次元ストッピングタイム
(ストークス数)

$$T_s = \frac{3m}{4\sigma \rho_g v_t} \Omega_K$$

(σ :ダストの断面積、 m :ダストの質量)



(I) Radial Motion of Dust Grain

ダストの動径方向の移動速度

(Takeuchi & Lin 2003)

$$v_{d,r} = \frac{v_{g,r} T_s^{-1} + (\beta - \eta) v_K}{T_s + T_s^{-1}}$$

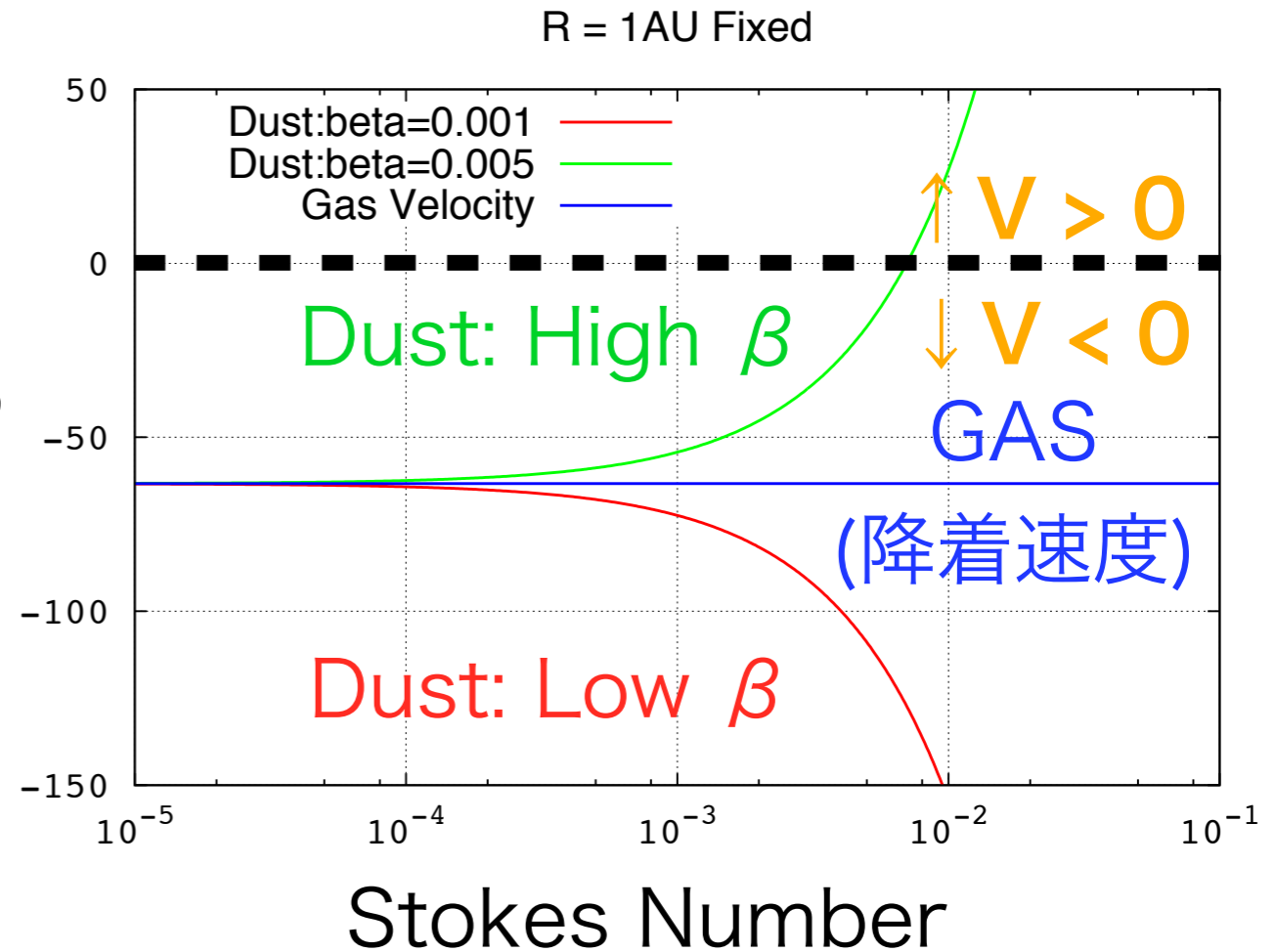
T_s : 無次元ストッピングタイム

(ストークス数)

$$T_s = \frac{3 m \Omega_K}{4 \sigma \rho_g v_t}$$

(σ :ダストの断面積、 m :ダストの質量)

Radial Velocity [cm/sec]



T_s : ガスとダストのカップリングの程度を決める

$T_s \ll 1$: Well Coupled

: ダストはガスと共に内側へ移動

$T_s \gg 1$: Decouple

: ダストは $\beta \cdot \eta$ の値によって内側 or 外側に移動

(II) Vertical Motion of Dust Grain

円盤上層部では沈殿が、赤道面付近では乱流ガスによる巻き上げが卓越する。

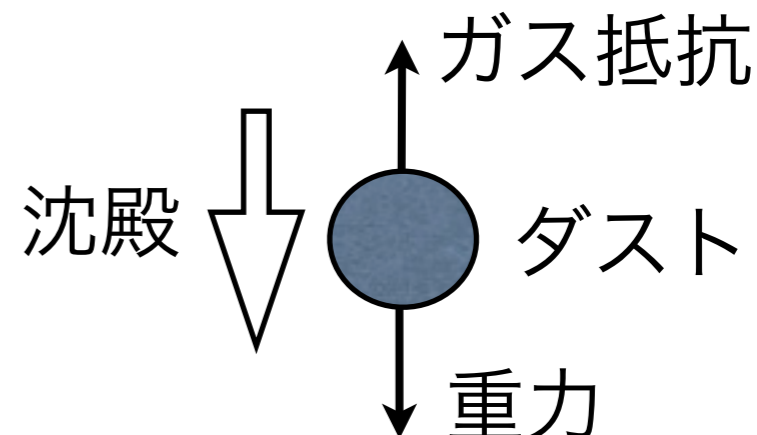
(Dullemond & Dominik 2004)

Settling

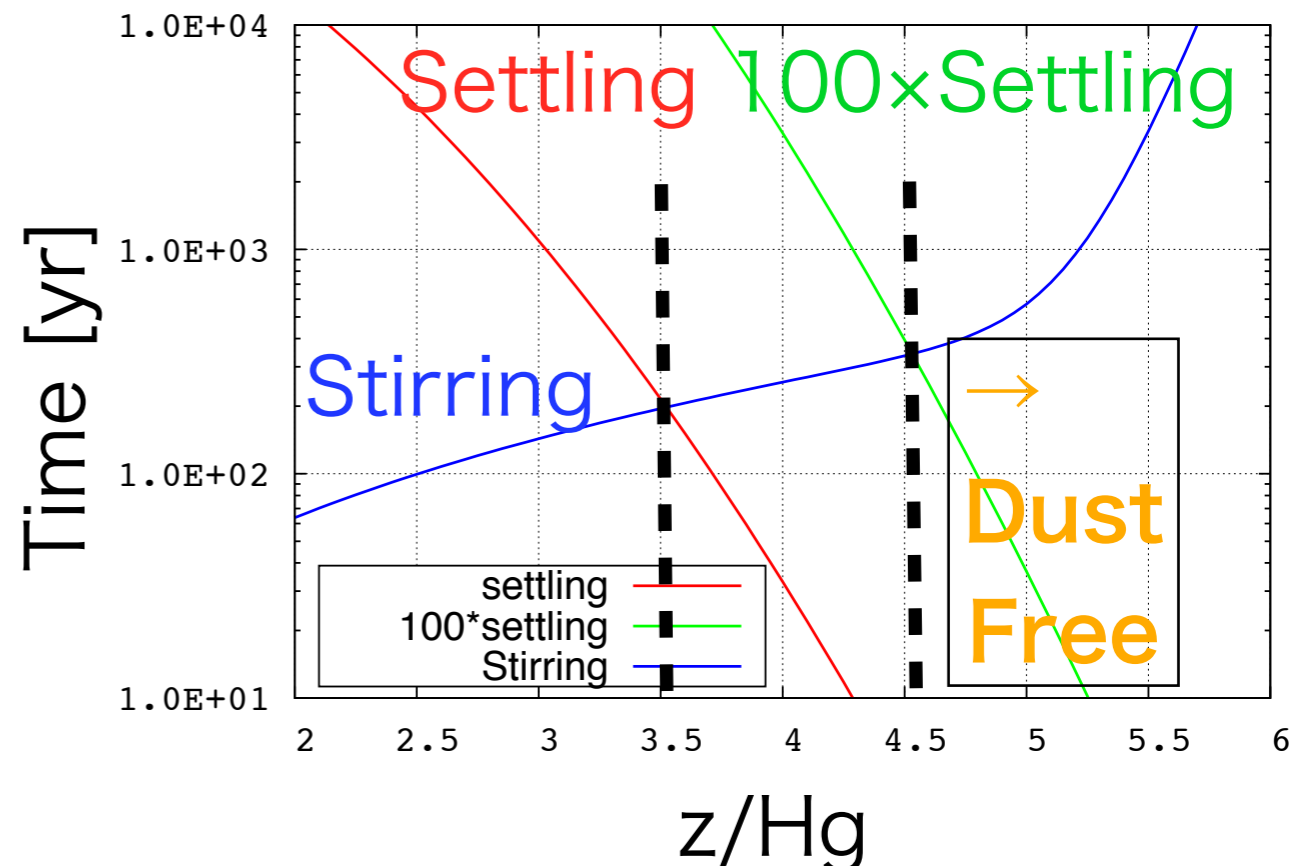
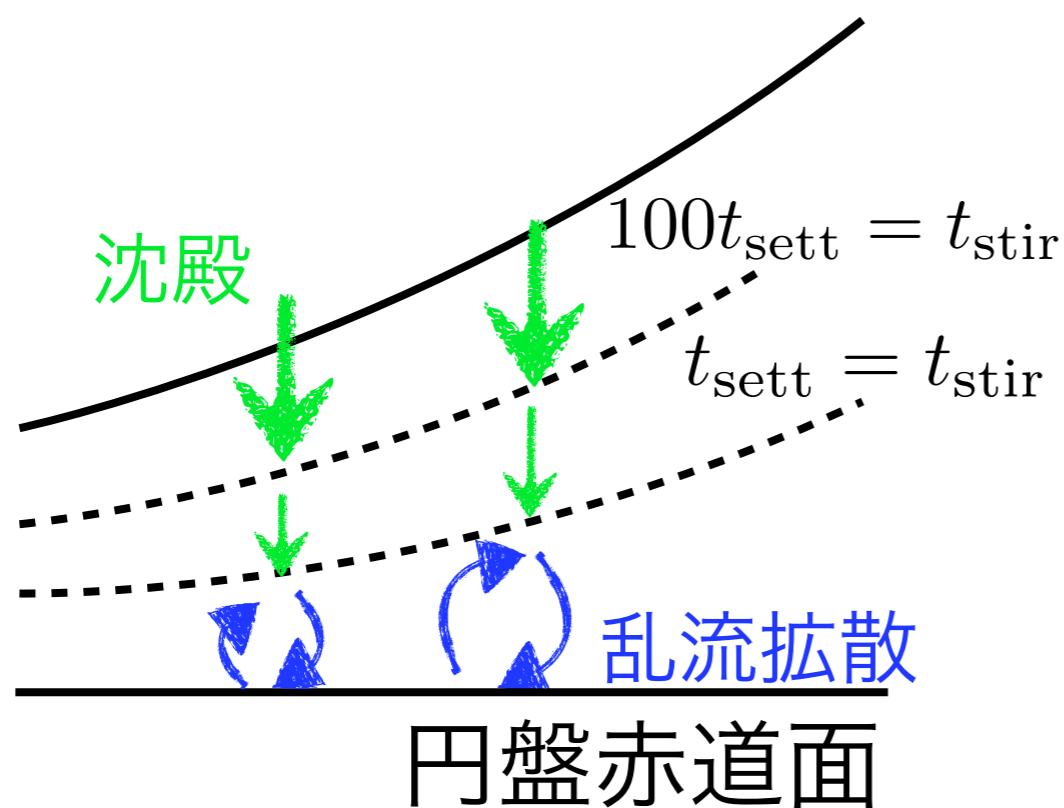
$$t_{\text{sett}} = \frac{4 \sigma \rho_g(r, z) c_s}{3 m \Omega_K^2}$$

Stirring

$$t_{\text{stir}} = \frac{Sc}{\alpha \Omega_K} \frac{z^2}{H_g^2} \left(\begin{array}{l} Sc = 1 + St \\ St = \frac{3 m \Omega_K}{4 \sigma \rho_g c_s} \end{array} \right)$$



< BPCA @ R=1AU >

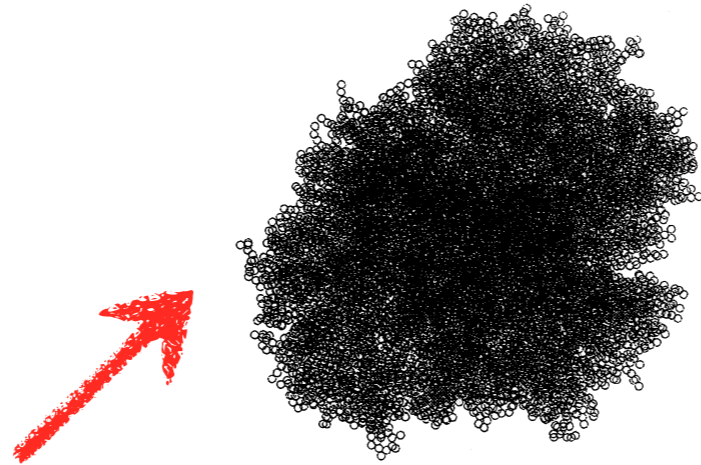


(III) Porous Aggregates Model

Mukai et al. 1992

317

空隙を考慮した
2種類のダスト

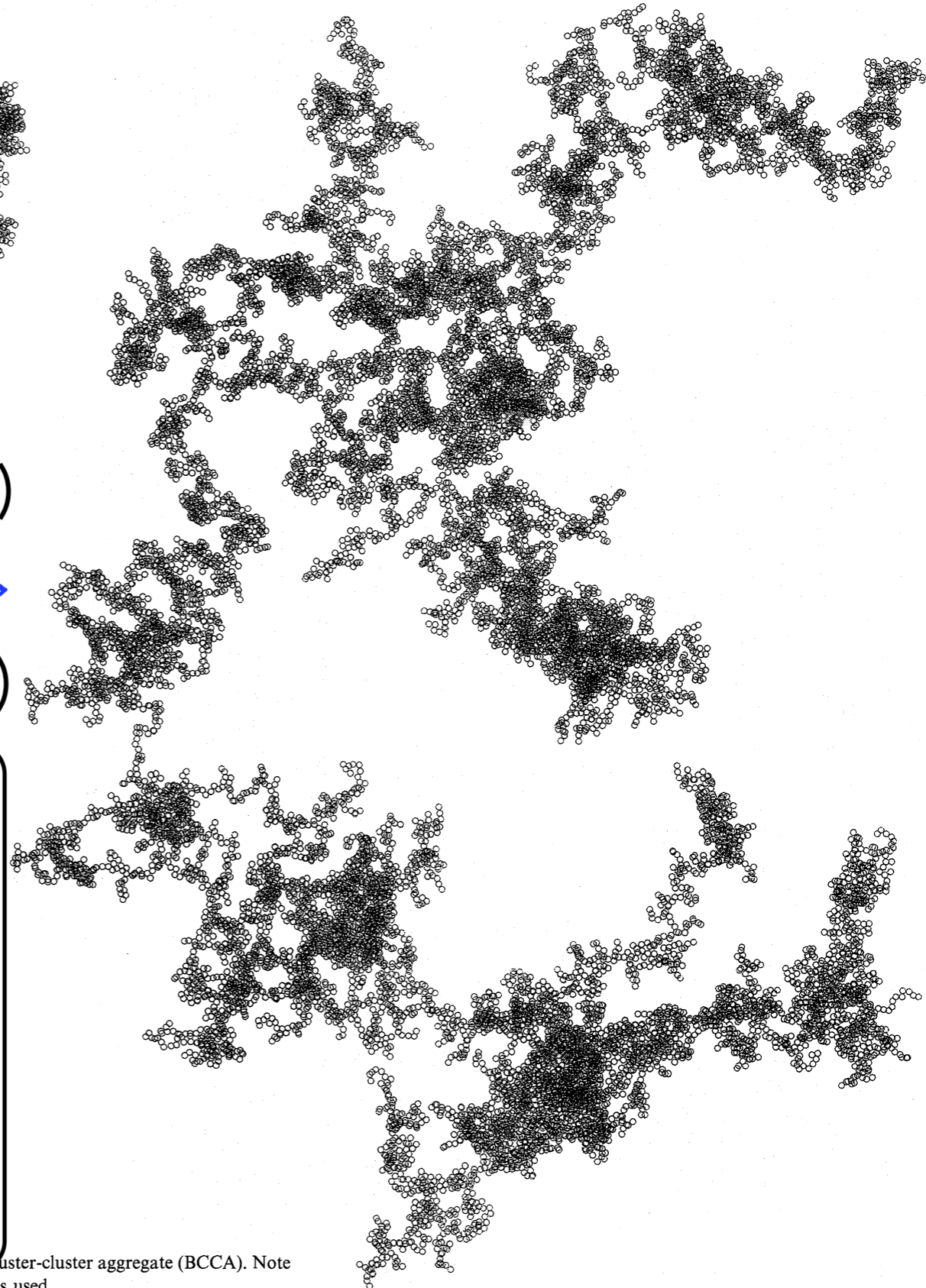


BPCA

(Ballistic Particle Cluster Aggregate)

BCCA

(Ballistic Cluster Cluster Aggregate)



フワフワダストについての m と σ の比は

$$\frac{\sigma}{m} = \frac{1}{\rho_d \alpha} \frac{s^{2-D}}{s_0^{3-D}}$$

$D \approx 2$ (BCCA)
 $D \approx 3$ (BPCA)

D : フラクタル次元、 s : ダストサイズ
(D が小さいほどフワフワしたダスト)

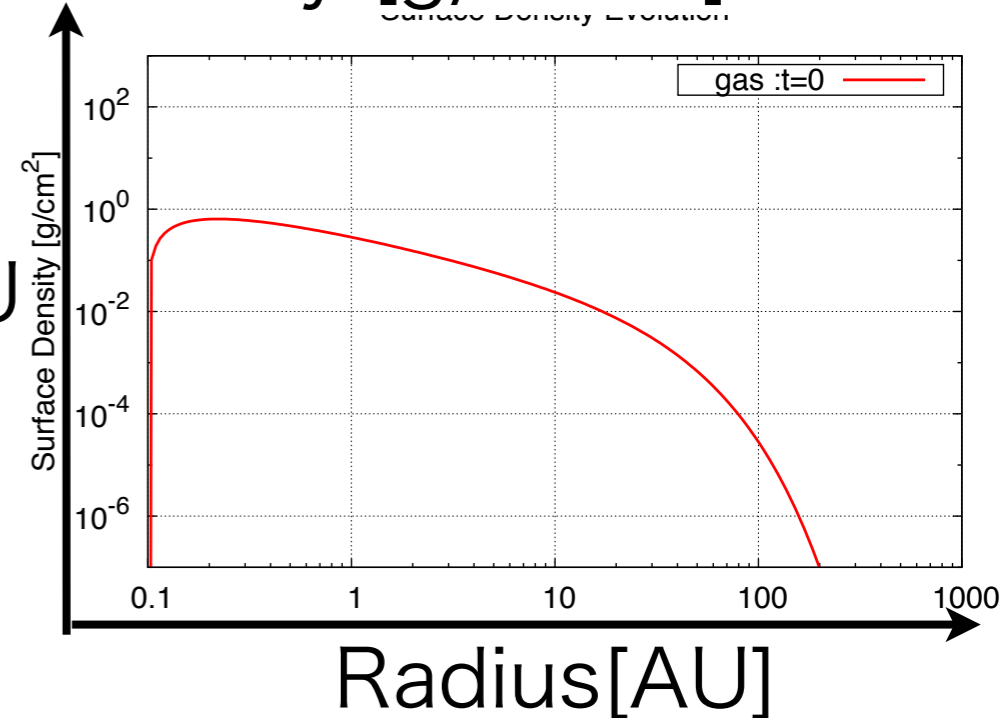
cluster-cluster aggregate (BCCA). Note that the same scale in length as Fig. 1a is used

今回行なった計算

Gas

- 定常降着円盤の面密度+カットオフ@20AU
- 乱流粘性： α モデル ($\alpha=0.01$)
- 円盤鉛直方向に静水圧平衡&等温

Surface Density [g/cm²]



Dust

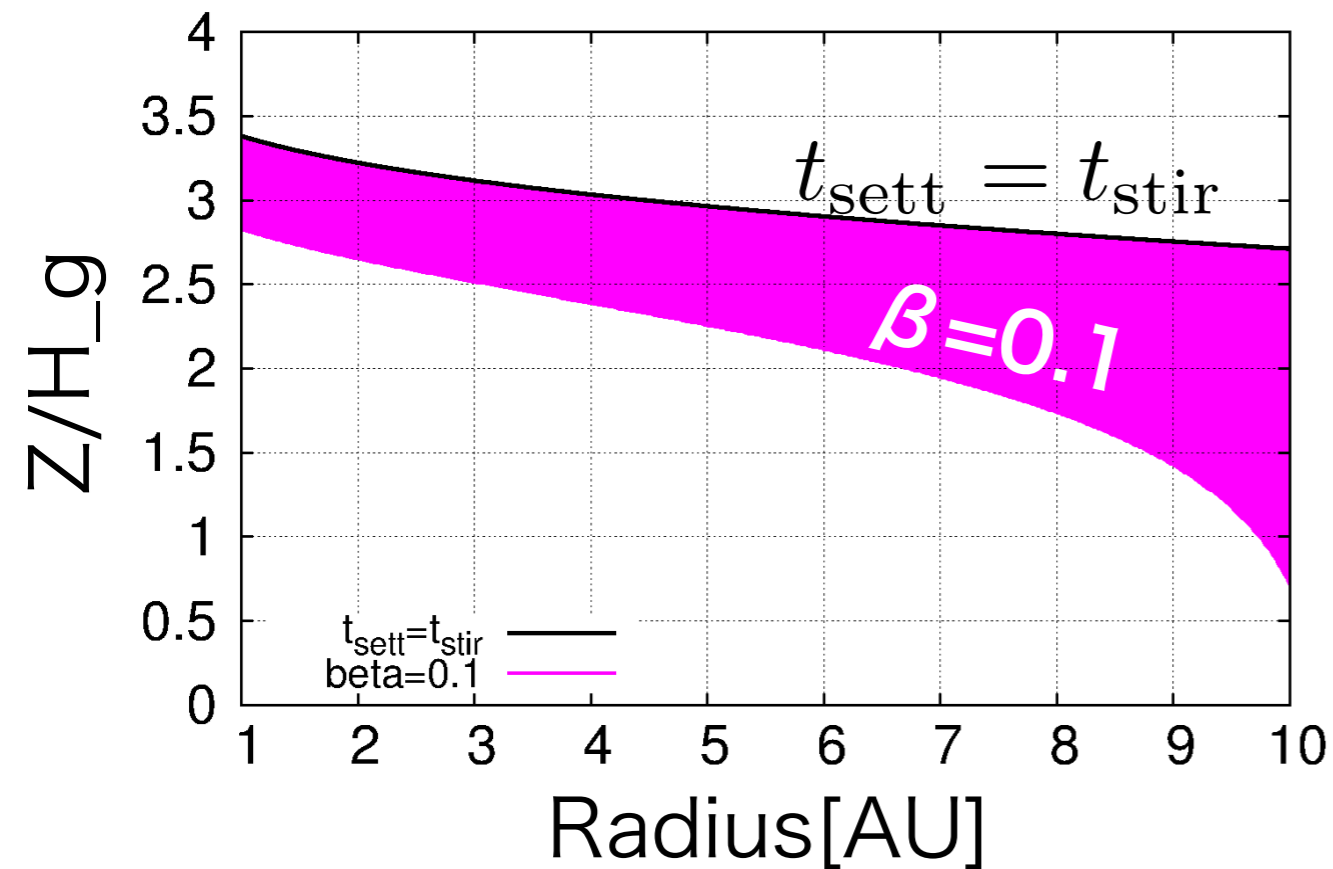
- Porous Dust(BPCA,BCCA)、ダスト半径 20 micron.

- 様々なベータの値のもとで、ダスト速度が正となる境界の(R,Z)
 - 乱流による巻き上げの時間尺度が沈殿の時間尺度よりも短くなる境界の(R,Z)
- を求め、ダストが外側へ移動し得る領域が存在するベータの臨界値を、BPCA, BCCAモデルについて調べた。

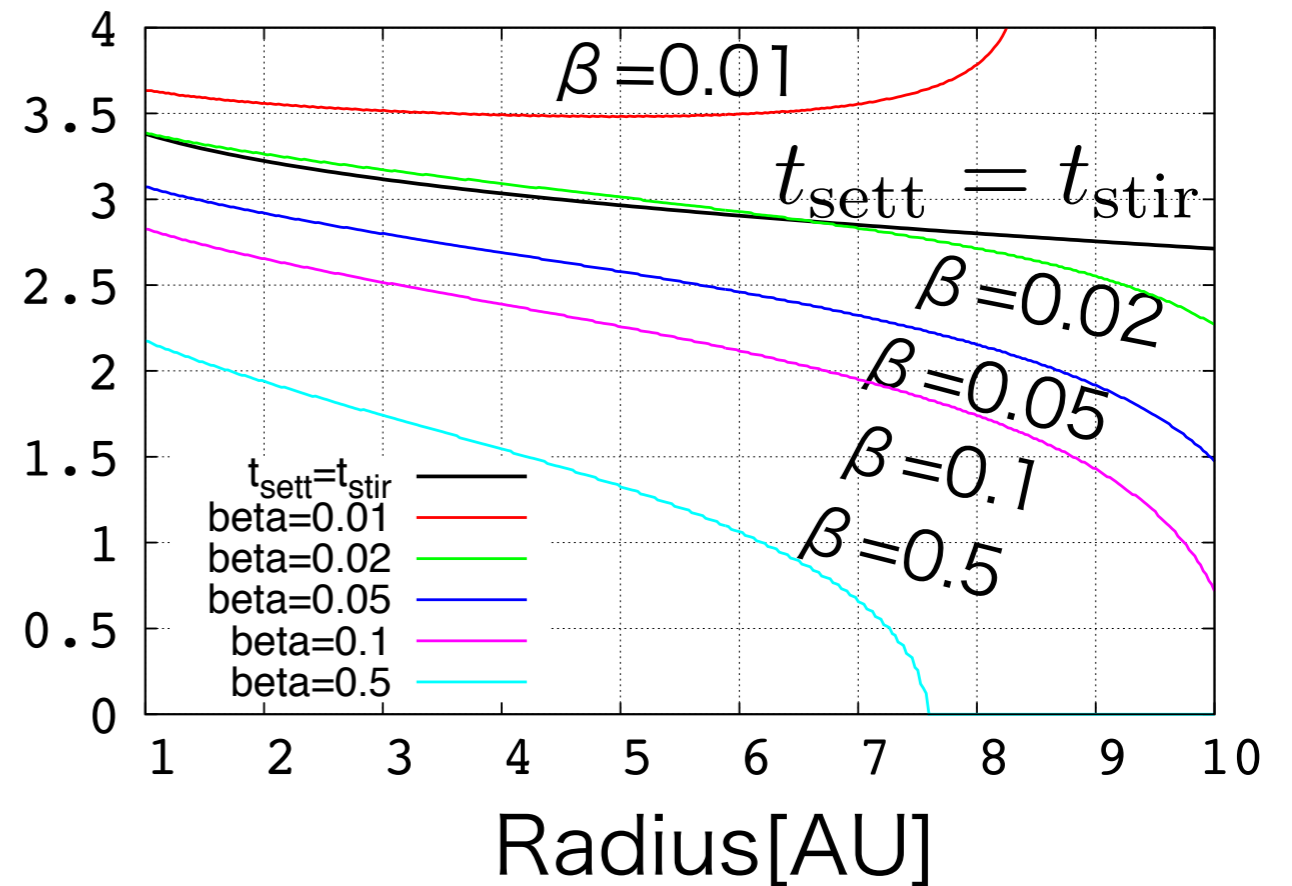
RESULT

BPCA

BPCA with 20micron



BPCA with 20micron

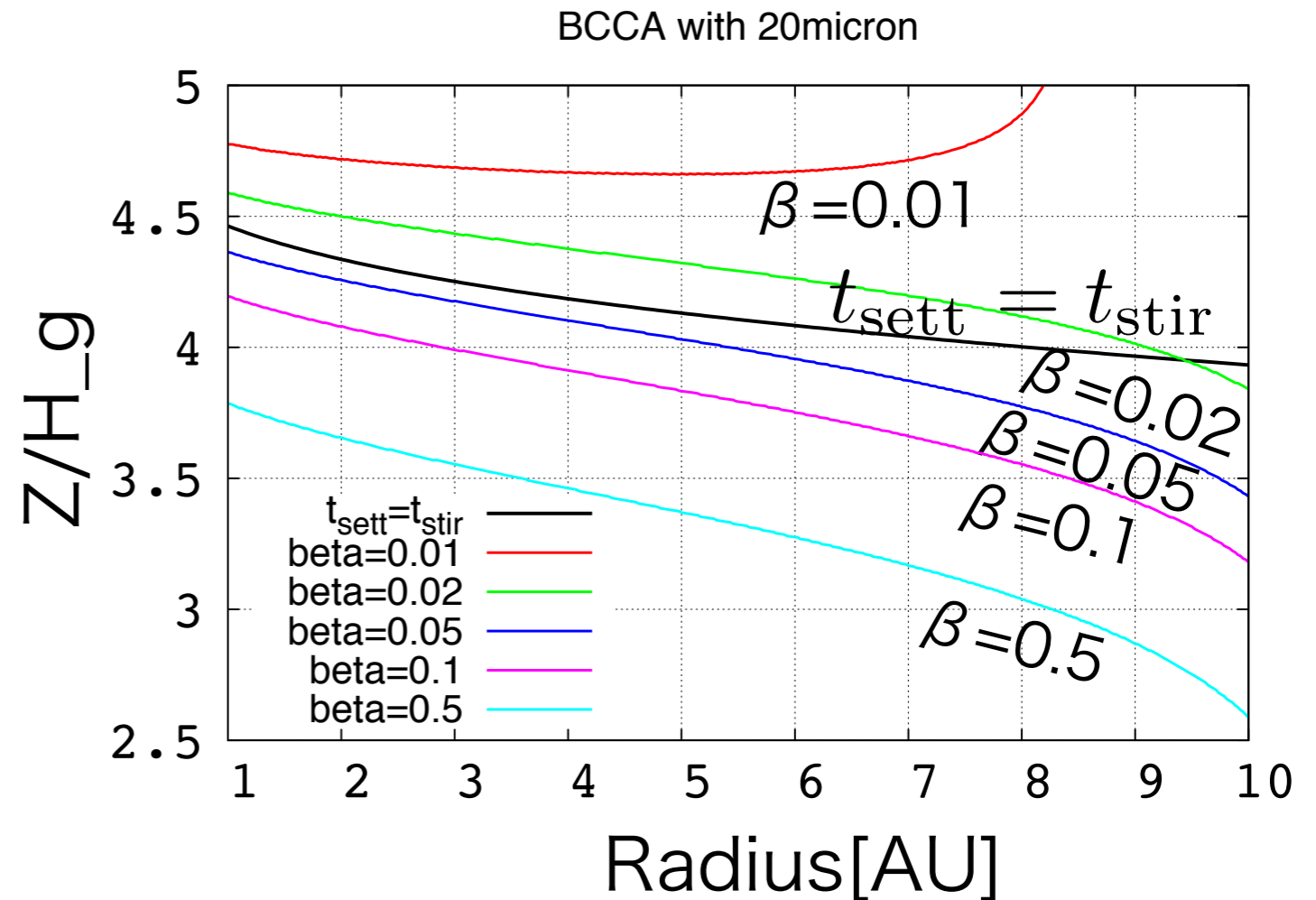


- 円盤上層部ほどガス密度が薄いため、外へ飛びやすくなる。
- 円盤外側ほど密度が薄いため、外へ飛びやすくなる。
- BPCAダストのStirring層の高さはおよそ3.5スケールハイト@1AU

RESULT

BCCA

- BCCAはフラクタル次元が小さいので巻き上りやすい。
- Stirring層の高さはおよそ4.5スケールハイト@1AU
- ガスとのカップリングが強い
ためBPCAより飛びにくい。



Stirring層にいるダストを飛ばすには最低でも

BPCA $\beta \sim 0.02$

BCCA $\beta \sim 0.05$

程度が必要である。

DISCUSSION : β の値

$$\beta = \frac{F_{\text{rad}}}{F_{\text{grav}}} = K \left(\frac{\sigma}{m} \right) \int_0^\infty \lambda^{-5} Q_{\text{PR}}^* \left\{ \exp \left(\frac{hc}{\lambda kT} \right) - 1 \right\} d\lambda$$

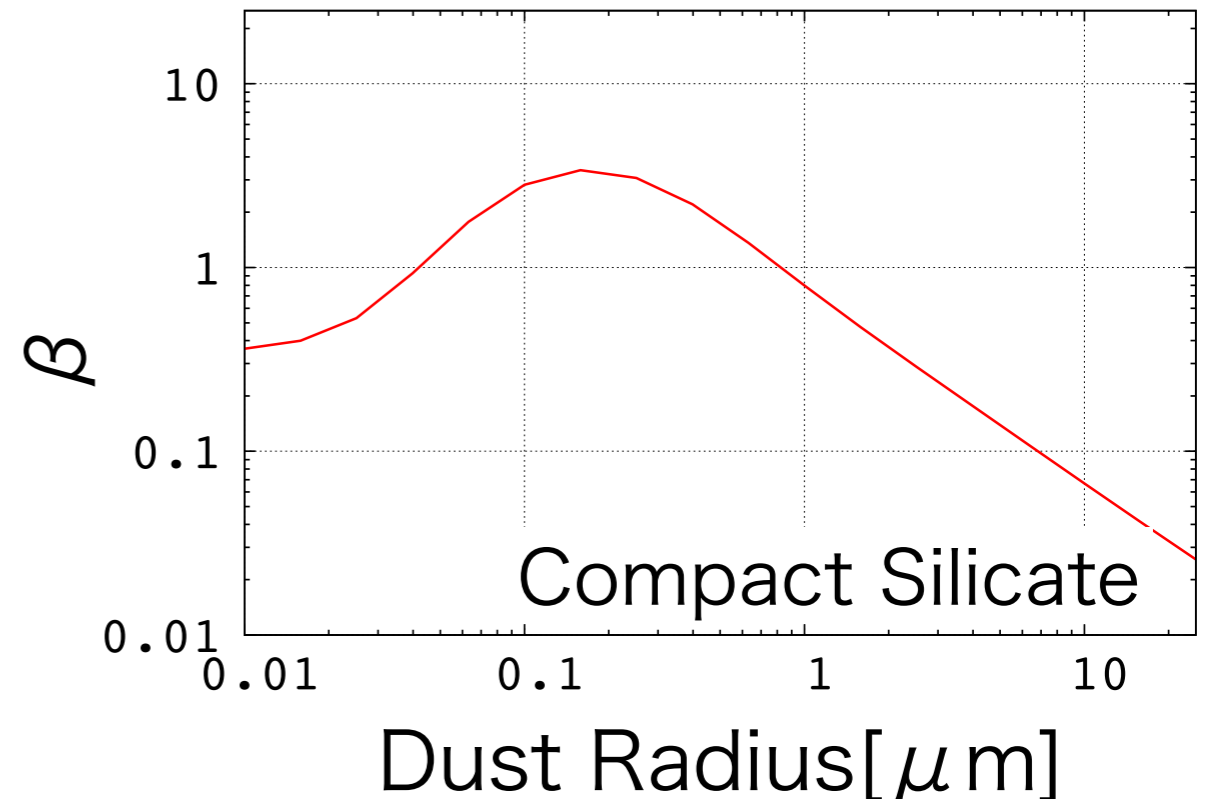
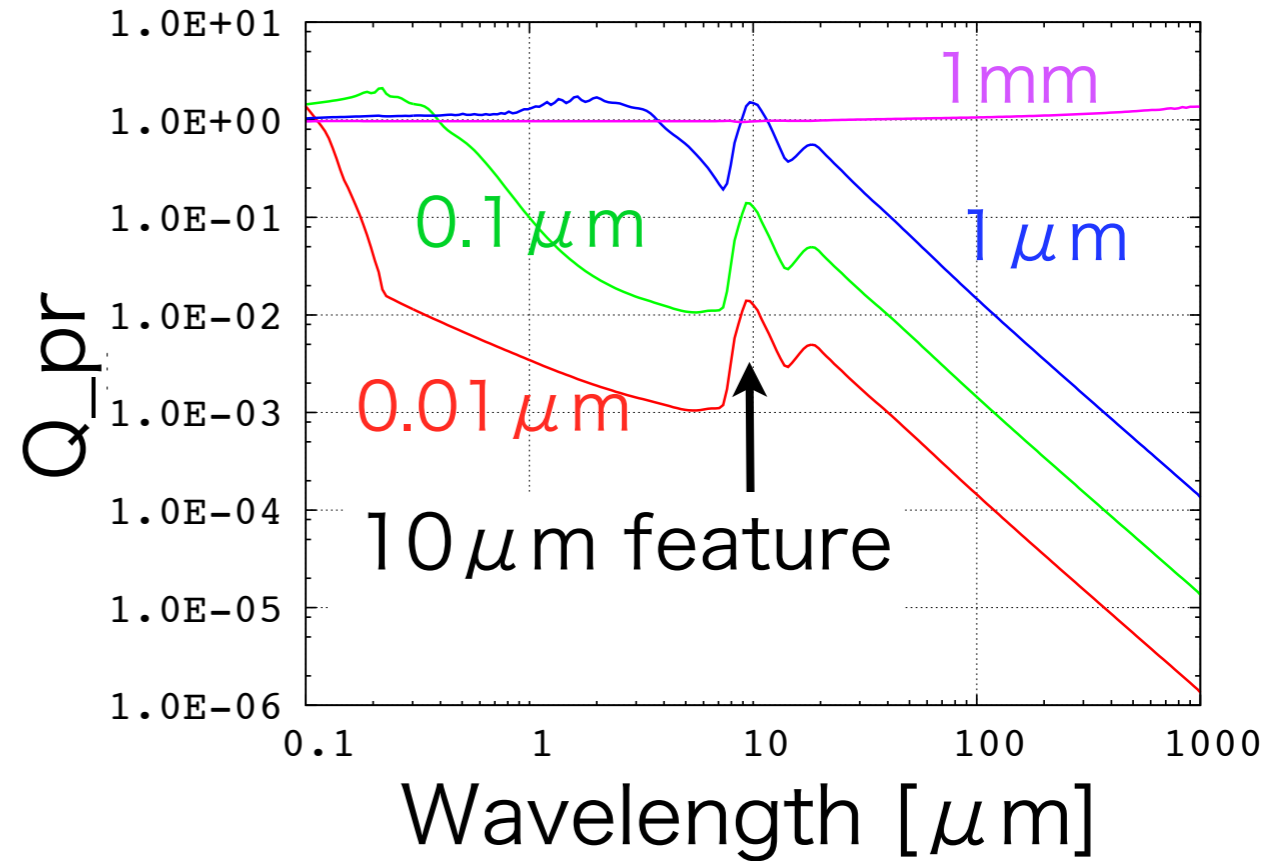
ダストサイズ・
フラクタル次元
から決まる

吸収・散乱係数
から決まる

- Compact・中心星=太陽を仮定
 - Mie理論で計算
- (Porous Dust -> MG-Mie理論など)

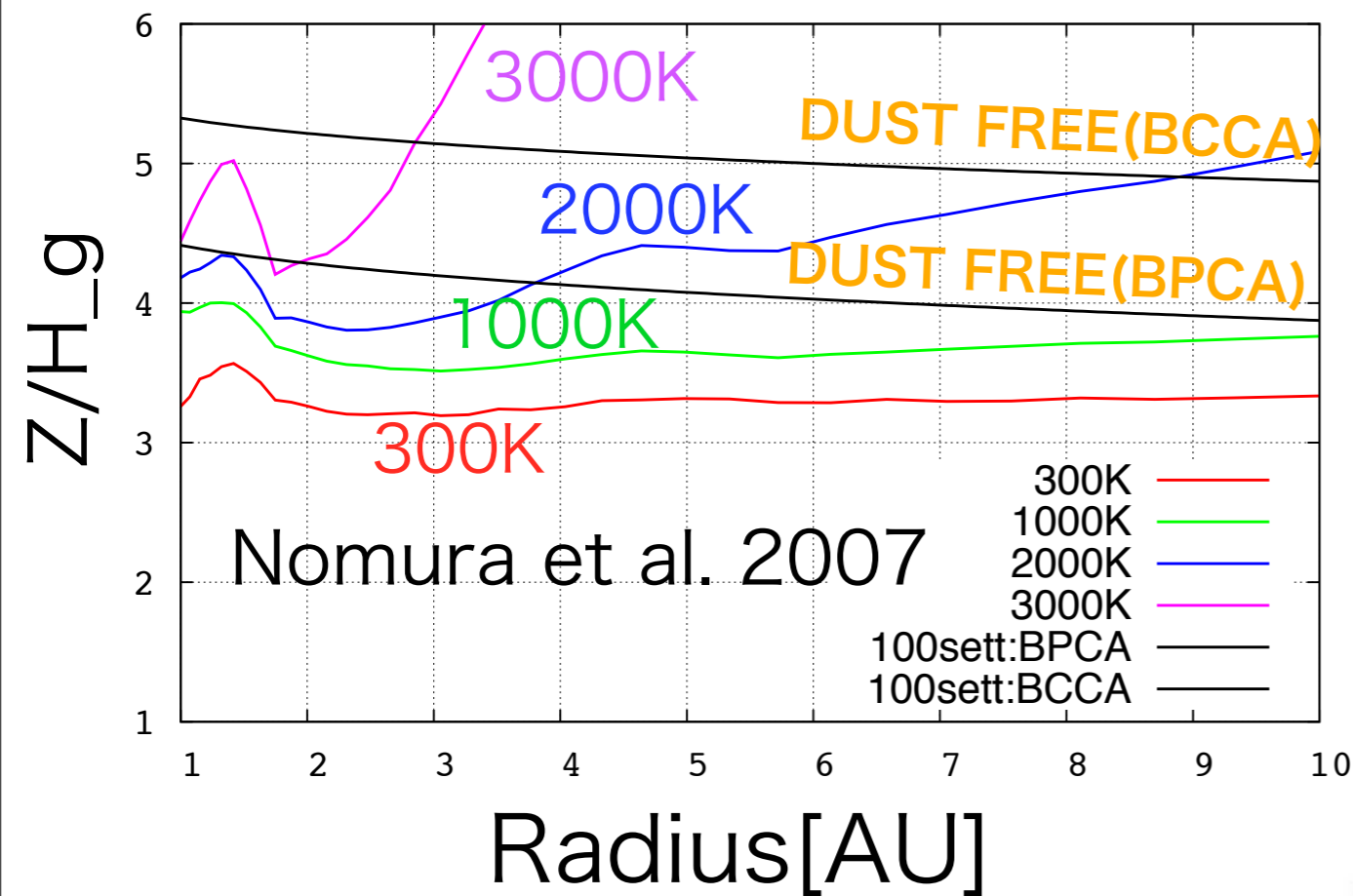
20micron、Compactな
ダストの β の値 ≈ 0.04

Compact Silicate Dust



DISCUSSION :シリケイトダストの結晶化

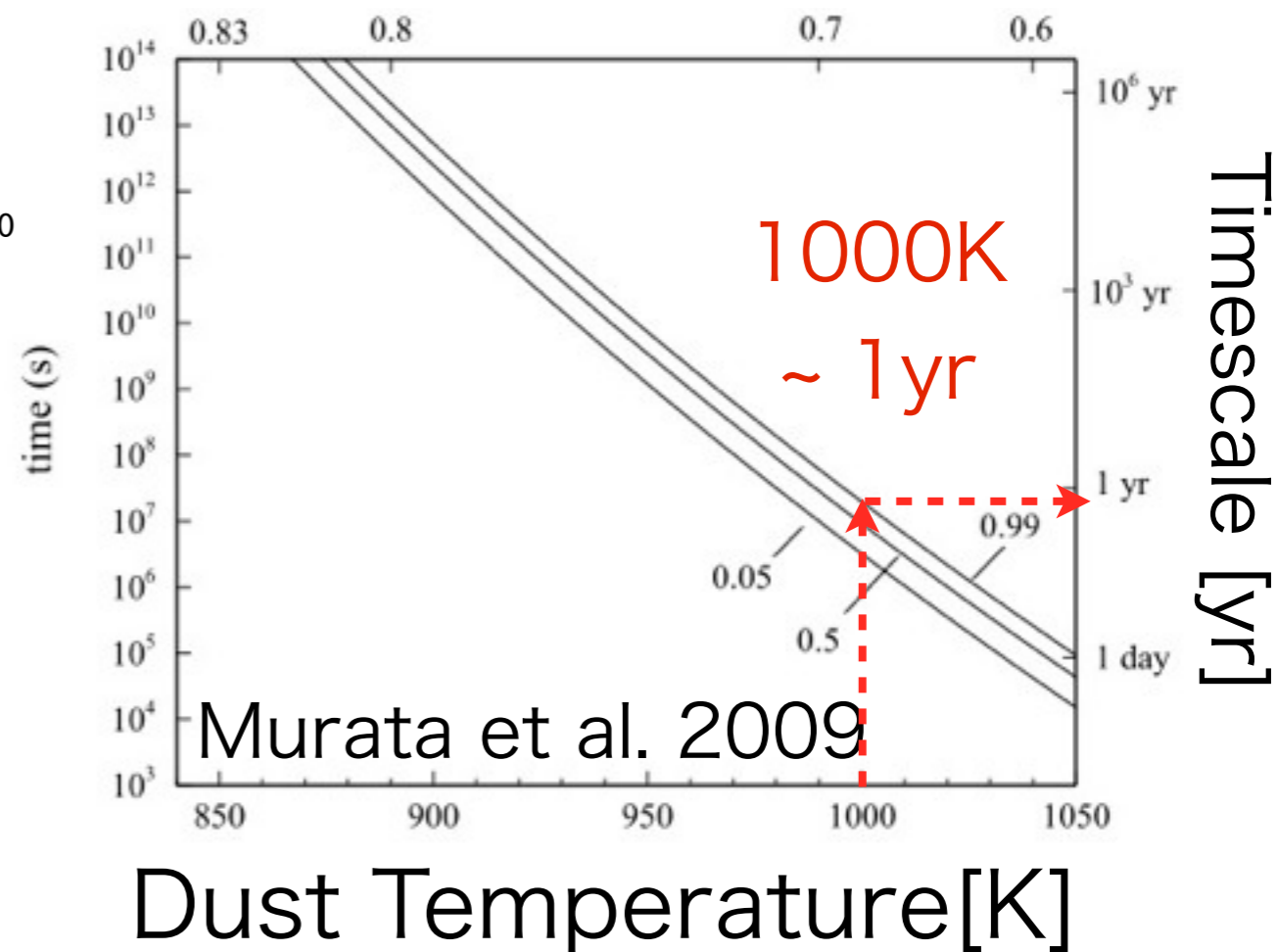
< 円盤内の温度分布 >



巻き上ったダストは周囲の高温のガスによって表面が結晶化される？

4スケールハイト程度のガスの温度は約1000[K]程度であり、高温な状態となっている。

実験室でのシリケイトの結晶化実験の結果



SUMMARY & FUTURE WORKS

- ・円盤内のStirring層にいるダストを輻射圧で飛ばすために必要な β の値の下限値を見積もった. その結果は

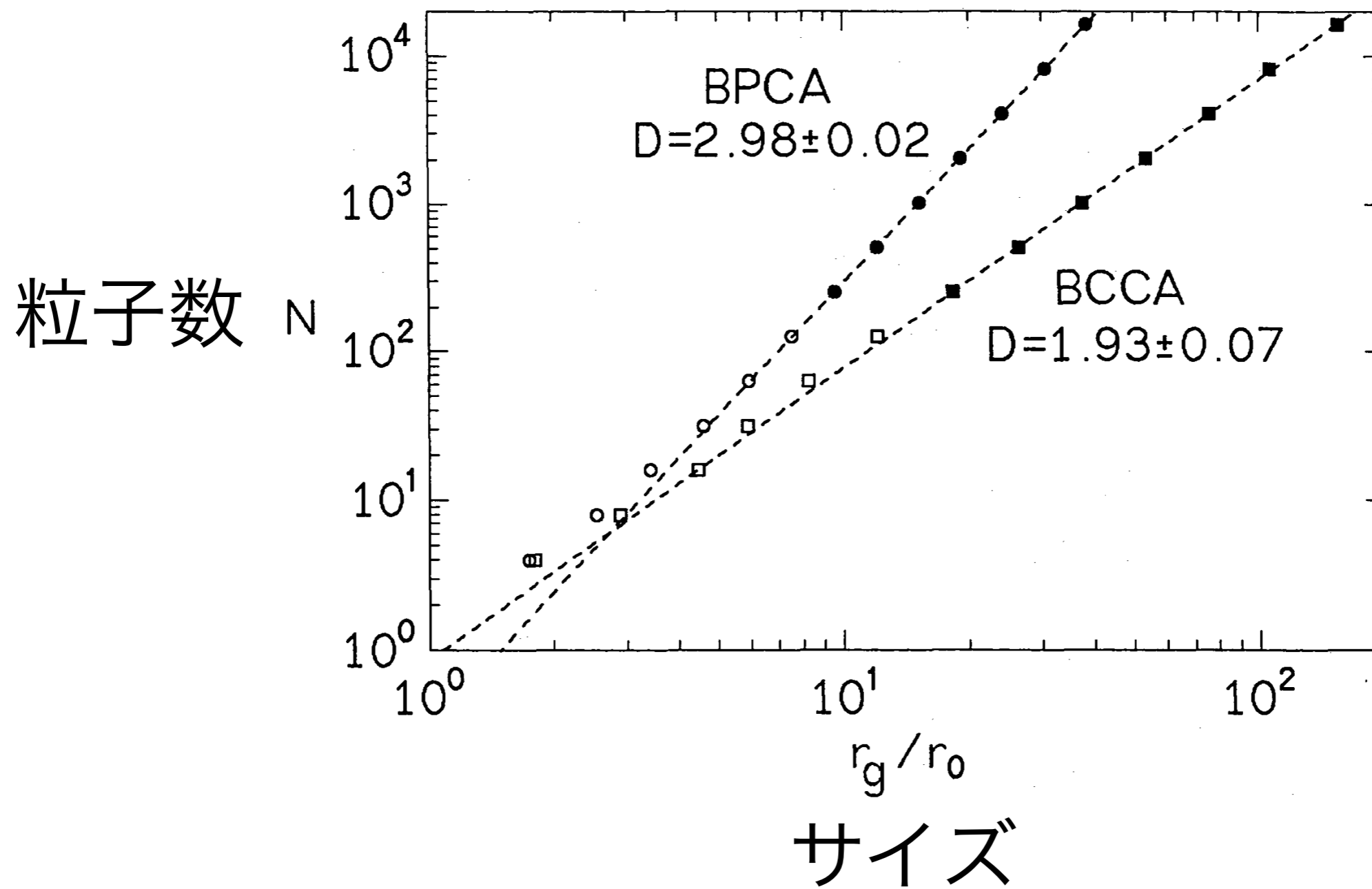
$$\text{BPCA } \beta \geq 0.02$$

$$\text{BCCA } \beta \geq 0.05$$

- ・20ミクロンサイズのコンパクトなダスト (Silicate) の場合、 β の値はおよそ0.04程度である

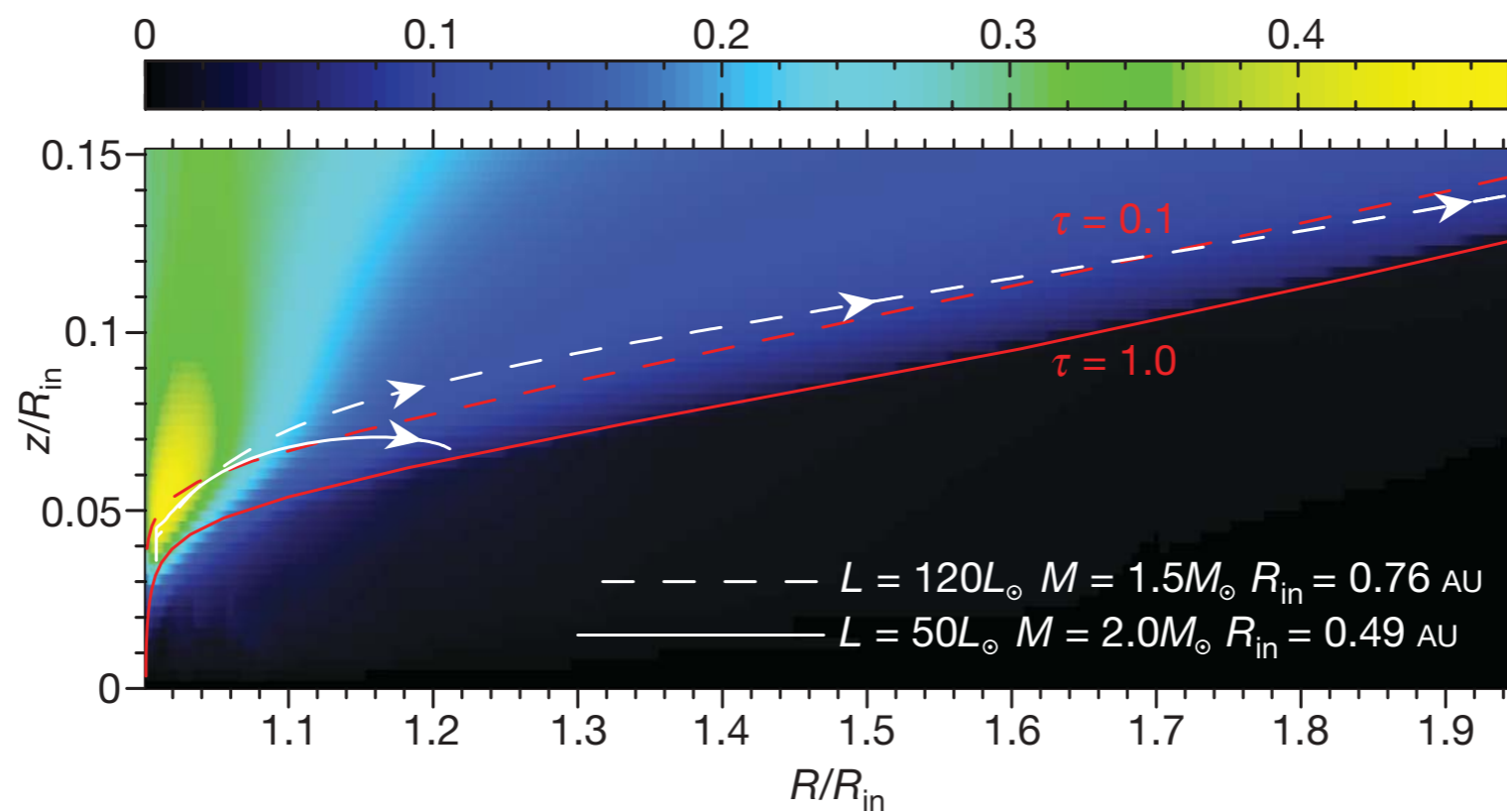
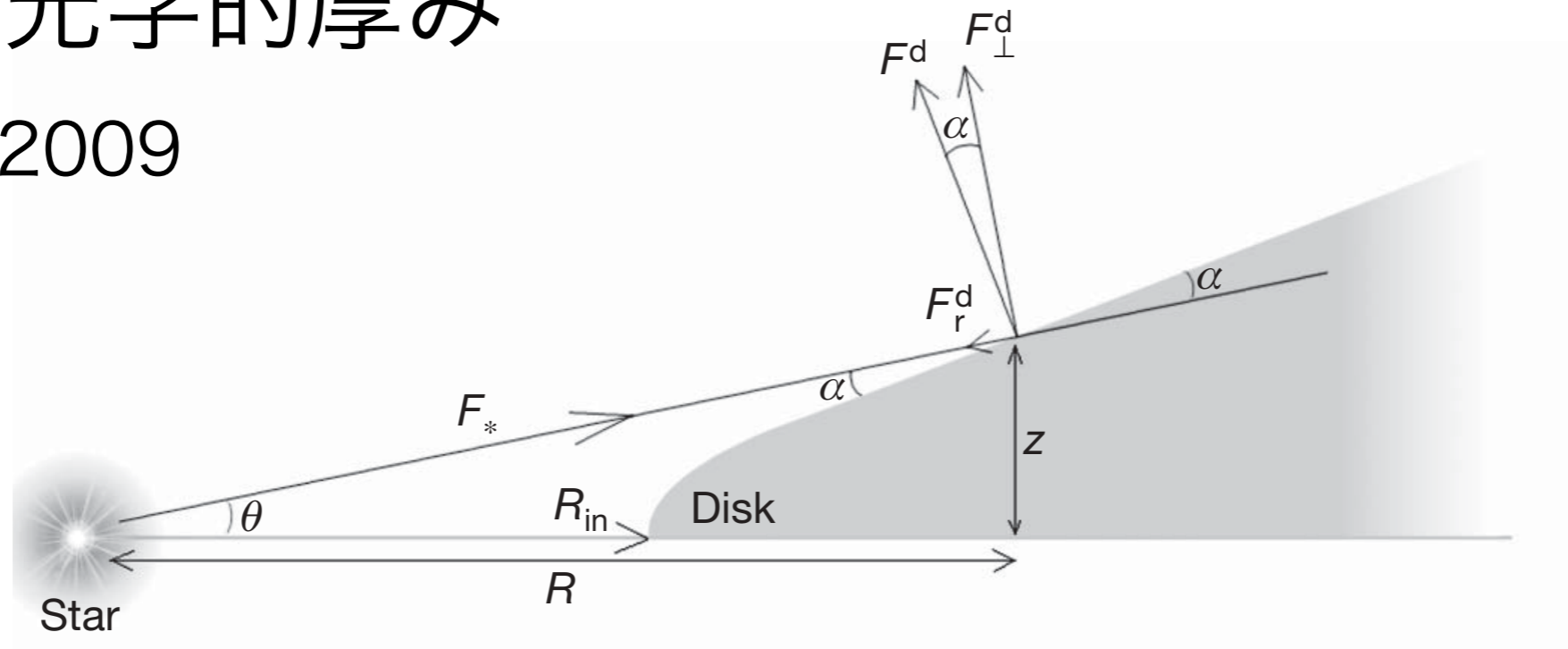
- ・今後はBCCA・BPCAの場合の β の値を計算し、モデルの妥当性を考察する. さらにこれらのダストが存在が円盤の結晶質シリケートの観測にどのような影響を与えるかについて調べる.

フラクタル次元



円盤の光学的厚み

Vinkovi 2009

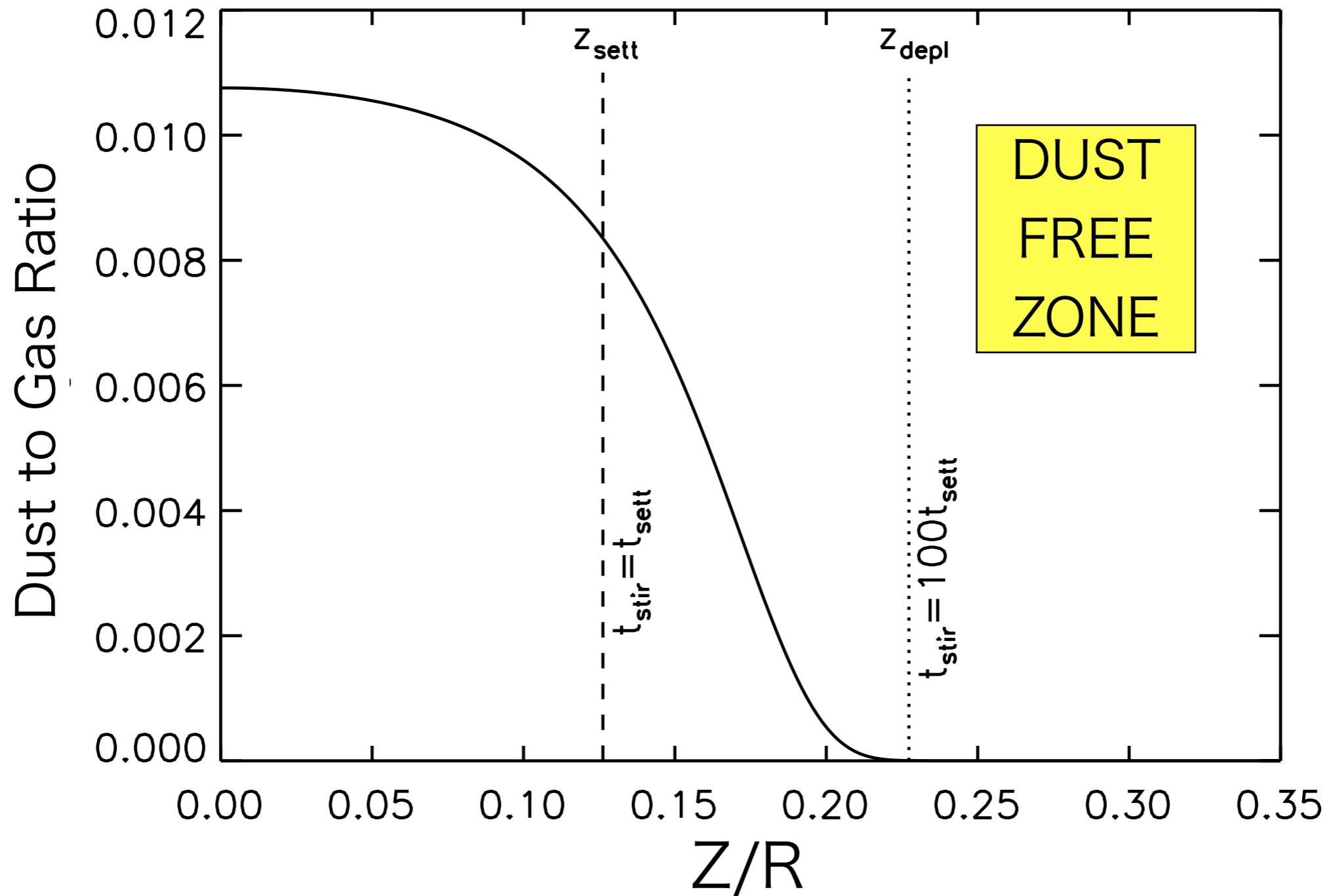


Optical Depth $\tau \sim 1$:

1AUでおおよそ2~3スケールハイト程度

(III) Vertical Motion of Dust Grain

Dullemond & Dominik 2004



DISCUSSION : β の値

Mukai et al. 1992

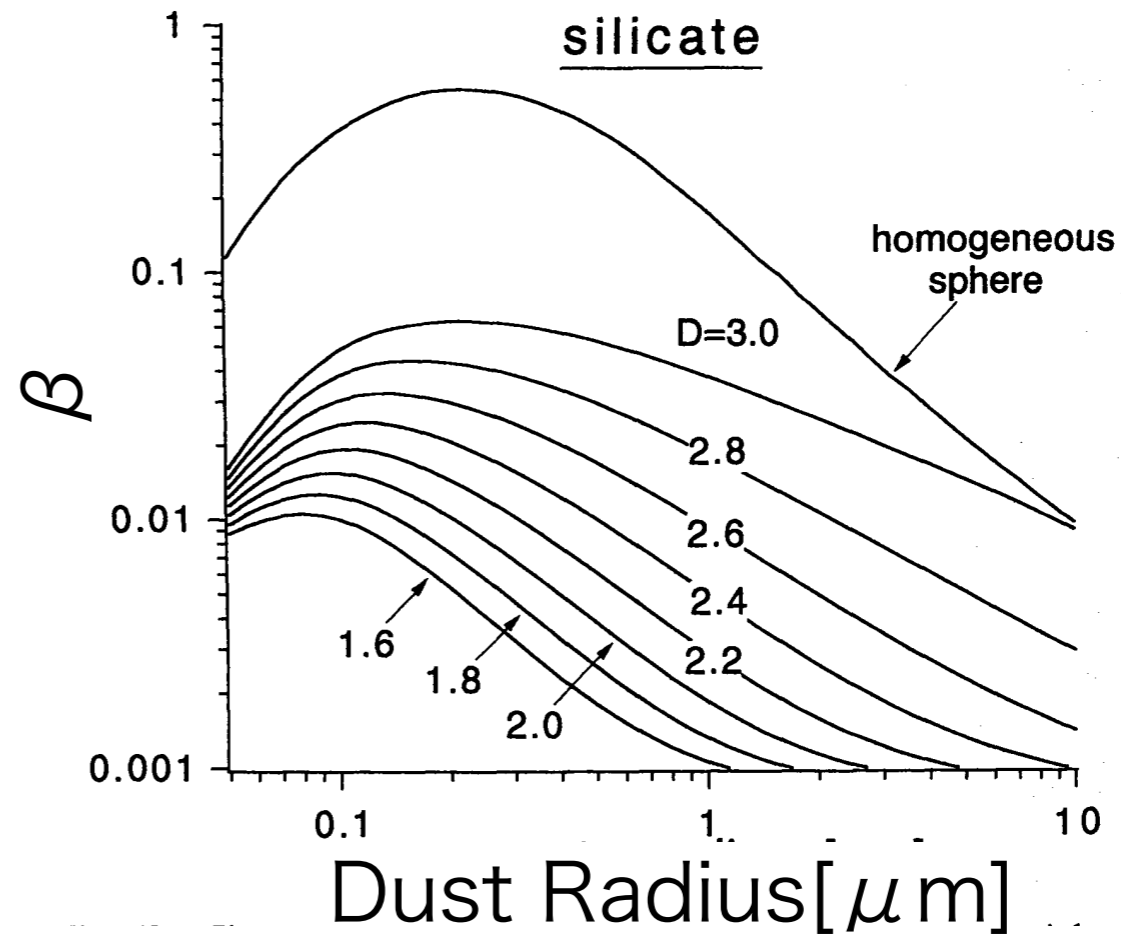
- Porous Aggregate
- 中心星 = 太陽を仮定
- Q_{pr} : MG-Mie理論

Silicate

Compact : $\beta \sim 0.01$

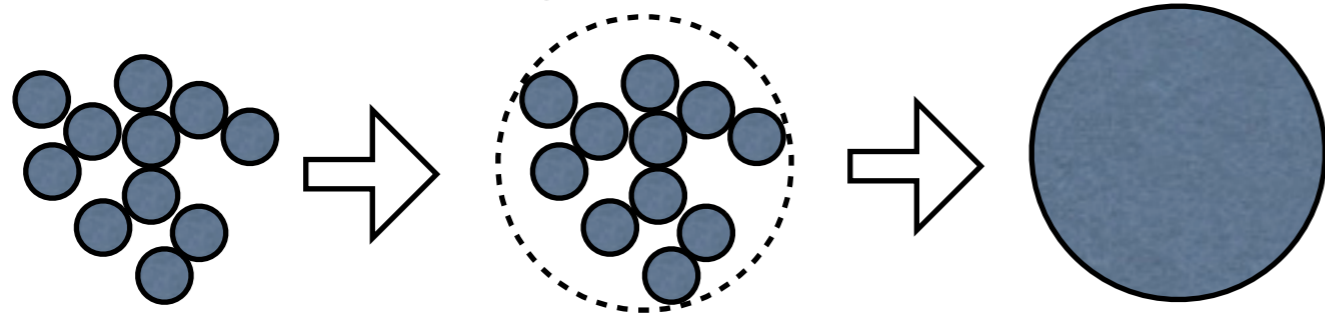
$D=3$ (BPCA) : $\beta \sim 0.01$

$D=2$ (BCCA) : $\beta \leq 0.001$



< Porous Silicate Dust >

MG-Mie Theory



Porous
Aggregates

Maxwell-Garnett
Approximation

Mie Theory

円盤温度分布

ガスの温度 局所熱平衡

lineによるcooling

$$\Lambda_{\text{FUV}} + \Lambda_{\text{X-ray}} + \Lambda_{\text{gr}} + \Lambda_{\text{line}} = 0$$

光電加熱

宇宙線による電離

ガス・ダストcollision

ダストの温度

局所輻射平衡

$$\frac{L_*}{4\pi r^2} \pi d^2 = 4\pi d^2 \sigma_{\text{SB}} T^4$$

temperature structure

