



高空隙率ダストの光学特性計算と 原始惑星系円盤表層部におけるダストのダイナミクス

田崎亮(京都大学), 野村英子(京都大), 岡田靖彦(神戸大)



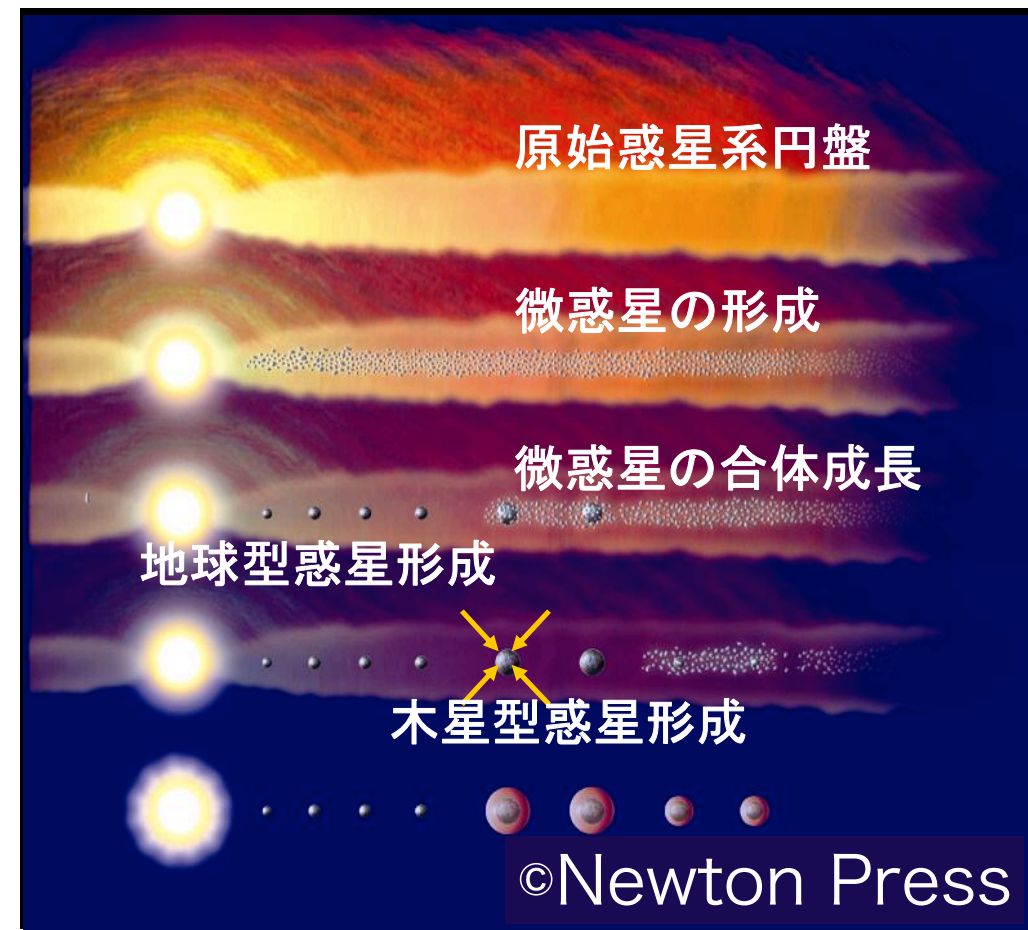
SUMMARY

彗星は太陽から離れた極低温の領域で形成されたと考えられているにも関わらず、観測などによってその内部には約1000[K]という高温を経験したダストが含まれていることが示唆されている。そのようなダストは中心星付近で加熱された後、原始惑星系円盤外縁部まで運ばれ、彗星形成時に取り込まれたのだと考えられているが、そのプロセスは謎に包まれている。今回、我々は中心星輻射圧によるダストの外向き移動について研究を行なった。特に、ダストの形状は従来考えられてきた密度一様な球対称のダスト(Compact Grain)ではなく、空隙があるようなアグリゲイト(Porous Aggregates)について計算を行なった。まず輻射圧の値を計算するためにダストの光学特性計算を行い、それを元にダストが外向きに移動し得る領域を計算した。またダストの鉛直方向の運動と動径方向の運動のタイムスケールを比較することで、Compact Grainに比べてPorous Aggregatesの方がより短いタイムスケールで外側に向かった移動が可能であることを示した。

INTRODUCTION

原始惑星系円盤とは

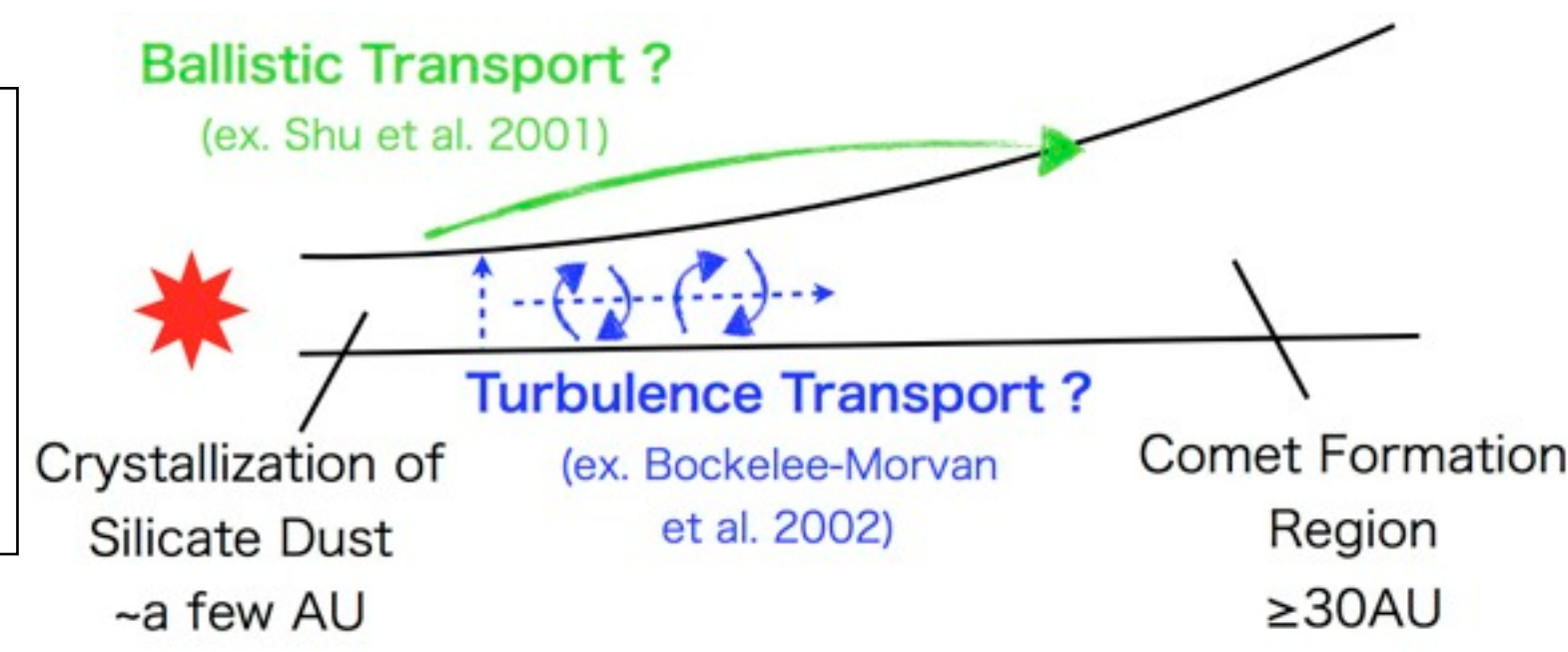
- 惑星形成の現場となる円盤。
- 太陽系の惑星や小惑星、彗星などの天体は円盤内に存在する固体微粒子(ダスト)から形成されたと考えられている。



彗星の結晶質シリケート問題

彗星

- ：円盤外縁部(低温領域)で形成
- 結晶質シリケート
- ：円盤内縁部(高温領域)で形成



★彗星には結晶質シリケートが含まれている! (e.g., Blownlee et al. 2006)
→円盤内縁部で高温に加熱されたダストが
中心星輻射圧を受けてによって外向き移動した? = 本研究の目的

Basic Equations for Radial Drift of Dust Grains

< 円盤内のダストの外向き移動に必要な条件 >

- (1) ガス、ダスト間が弱くcoupleしている

couplingに程度を表すパラメーター(Stokes Parameter)

$$T_s(r, z) = \frac{3m}{4\sigma} \frac{\Omega_K}{\rho_g(r, z)v_t}$$

ρ_g : ガス密度、 m :ダスト質量、 σ :ダスト断面積

- (2) 中心星の周りをガス円盤がダストより速く回転

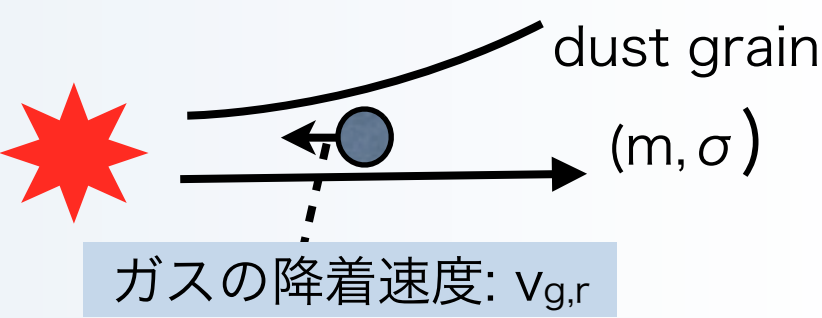
ガス円盤の回転角速度: $\Omega_g = \Omega_K(1 - \eta)$

ダストの回転角速度: $\Omega_d = \Omega_K(1 - \beta)$

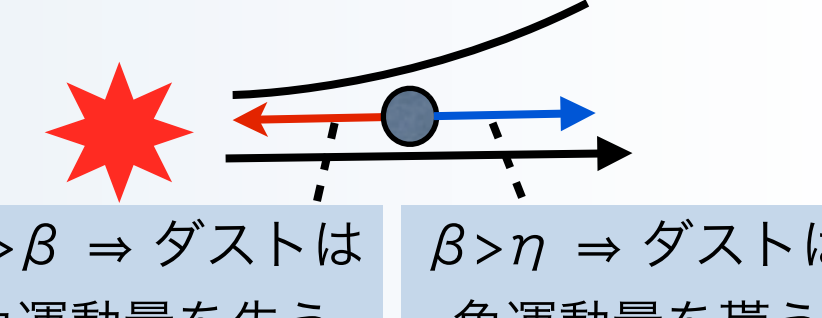
Ω_K : ケプラー角速度、 η : ガス圧/中心星重力、 β : 輻射圧/中心星重力

ガス円盤がダストより早く回転($\beta > \eta$) ⇒ ダストはガスから角運動量貰って外向き移動

$T_s \ll 1$: Well Coupled



$T_s \sim 1$: Weakly Coupled



★ ダストの動径方向の速度 (e.g., Takeuchi & Lin 2003)

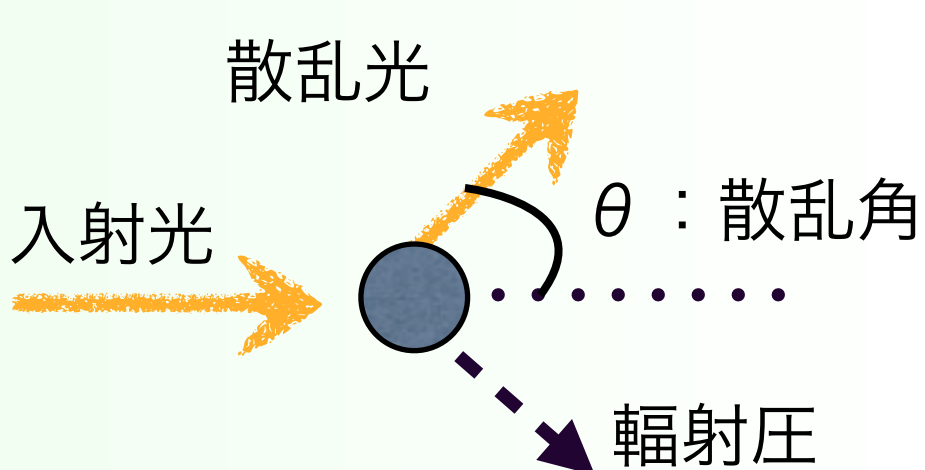
$$v_{d,r} = \frac{v_{g,r} T_s^{-1} + (\beta - \eta) v_K}{T_s + T_s^{-1}} \quad \dots \text{Eq. (1)}$$

< ダストに働く輻射圧 >

β (=輻射圧/中心星重力)の値 (e.g., Mukai et al. 1992)

★ 輻射圧と中心星重力の比: β

$$\beta \equiv \frac{F_{RP}}{F_{grav}} = K \left(\frac{\sigma}{m} \right) \int_0^\infty Q_{PR}(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda, \quad \dots \text{Eq. (2)}$$



$$Q_{PR} = Q_{ABS} + (1 - g) Q_{SCA}$$

黒体輻射($M=M_\odot, T=5778[K]$)

Q_{ABS} : 吸収の効率、 Q_{SCA} : 散乱の効率、 $g = \langle \cos \theta \rangle$: 非対称因子

Dust Model & Calculation of Optical Properties

今回は、以下の2種類のダスト粒子を考える。

1. Compact Grain Model

球対称ダスト (サイズ: $4\mu m$)

$Q_{PR} \rightarrow$ Mieの散乱理論 (e.g., Hage & Greenberg 1992)

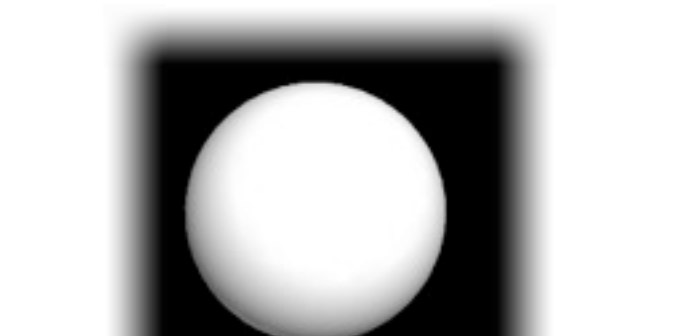
2. Porous Aggregates Model

モノマー半径: $0.1\mu m$

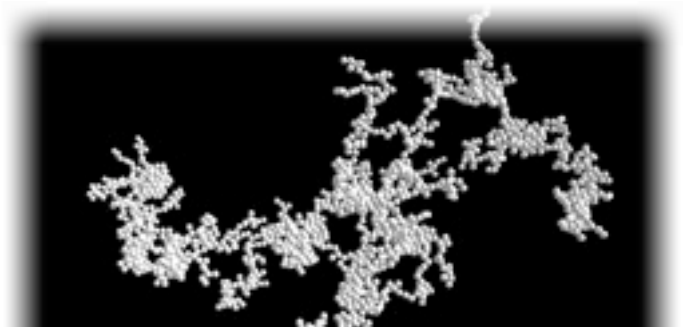
モノマー数1024個のふわふわなダスト (サイズ: $a \sim 4\mu m$)

$Q_{PR} \rightarrow$ T-Matrix Method (e.g., Okada et al. 2008)

ダストの化学組成: Astronomical Silicate (Draine & Lee 1984).



< Compact Grain >



< Porous Aggregates >

Result 1. 光学特性計算

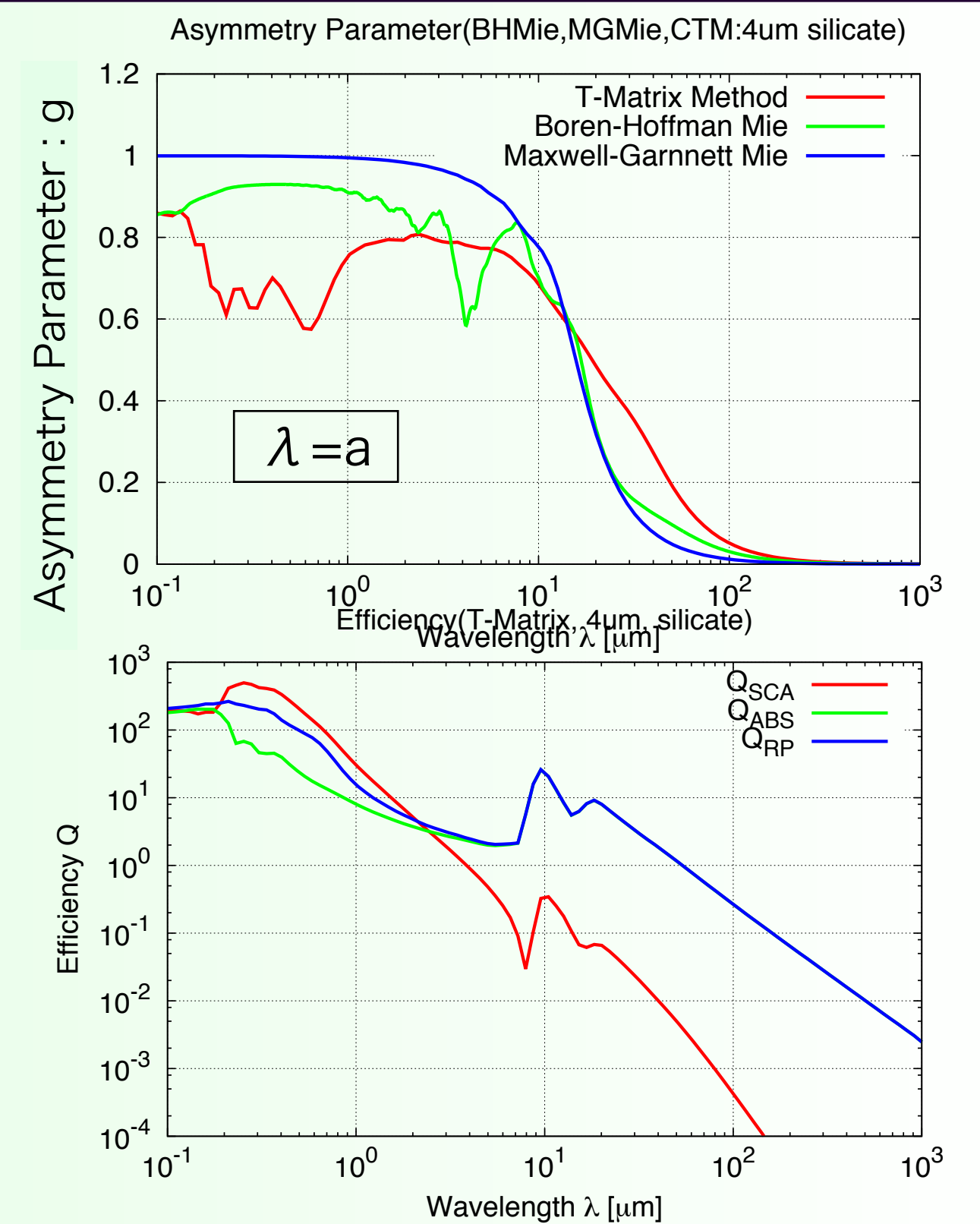
- $\lambda > a$: 等方散乱
- $\lambda < a$: 前方散乱

- Porous aggregatesはcompact grainよりも弱い前方散乱となる。

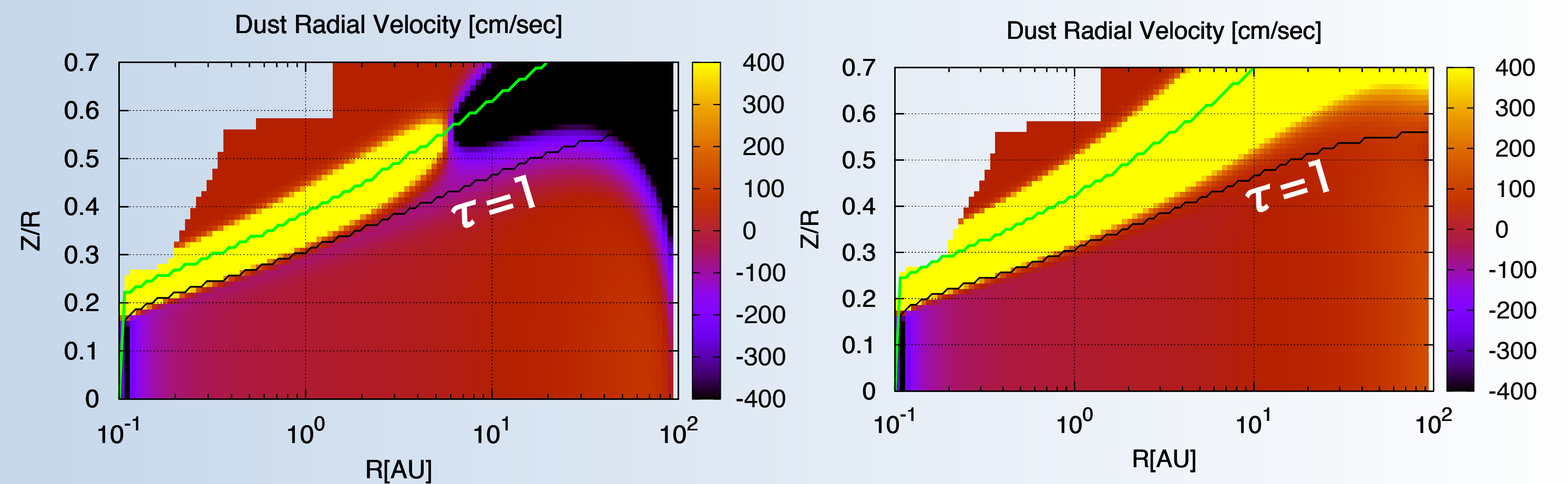
- β (=輻射圧/重力)の値(Eq.(2)):

- $\beta \sim 0.018$ for compact grains,
- $\beta \sim 0.26$ for porous aggregates.

*: 上の図の青線: MG-Mie Theory (アグリゲイトの球体近似) による計算結果



Result 2. 輻射圧によるダストの外向き移動領域



黒の実線: 光学的厚み $\tau=1$
緑の実線: Stokes Parameter $T_s = 1$

- ダストは内向きor外向きに移動する領域 => ガスとダストがWeakly Coupled.
- ダストの内向き移動と外向き移動の境界: $\beta \sim \eta$
- Compact grains はR ~ 6 AUまで輻射圧で移動できる。
- Porous aggregatesは数10AU(~彗星形成領域)まで移動できる。

Timescale of Settling, Stirring & Radial Motion

ダスト粒子は動径方向だけでなく、鉛直方向にも運動する。

ダストの外向き移動のさらなる条件:

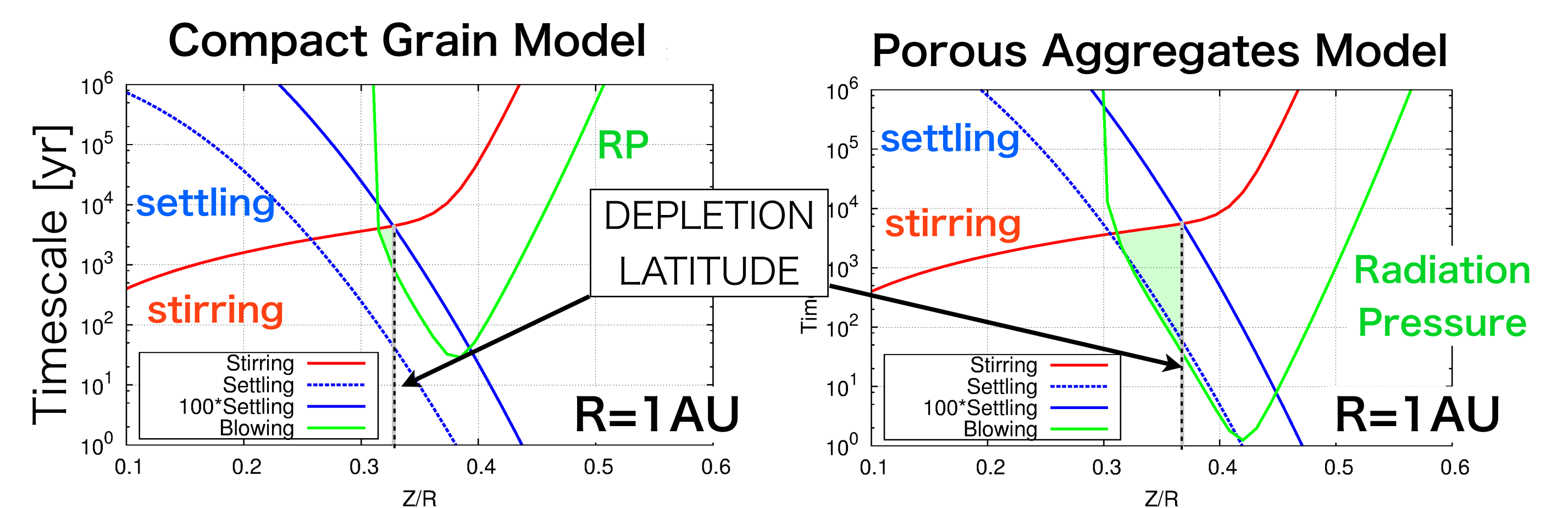
動径方向の運動のタイムスケール < 鉛直方向の運動のタイムスケール

鉛直方向の運動:

中心星重力による沈殿(Settling)+ガス乱流による巻き上げ(Stirring)

Dust Depletion Latitude: $100t_{sett} = t_{stir}$ (Dullemond & Dominik 2004)

⇒ ここより高い所ではダストはほとんど存在できない。



緑色で塗られた領域: $t_{radial} < t_{vertical}$ かつ Depletion Latitude以下

Compact Grain: 外向き移動のタイムスケールの最小値~ 10^3 [yr]

Porous Aggregates: 外向き移動のタイムスケールの最小値~ 10^2 [yr]

⇒ この結果はPorous AggregatesがCompact Grainに比べて、より短いタイムスケールで外縁部へ移動可能であることを示唆している。

- References: [1] Brownlee, D., et al. 2006, Science, 314, 1711, [2] Kozasa, T., Blum, J., & Mukai, T. 1992, A & A, 1992, 263, 432, [3] Takeuchi, T., & Lin, D. N. C. 2003, ApJ, 593, 524, [4] Dullemond, C. P., & Dominik, C. 2004, A & A, 421, 1075, [5] Mukai, T., Ishimoto, H., Kozasa, T., Blum, J., Greenberg, J. M. 1992, A & A, 262, 315, [6] Weingartner, Joseph C.; Draine, B. T. 2001, ApJ, 548, 296, [7] Li, Aigen & Draine, B. T. 2001, ApJ, 554, 778, [8] Miyake, K., & Nakagawa, Y. 1993, Icarus, 106, 20, [9] Okada Y, Mann I, Mukai T, Kohler M. JQSR 2008;109:2613-27.

2013年度第42回天文・天体物理若手夏の学校、07/29-08/01、宮城蔵王ロイヤルホテル