

# ダストの空隙率進化を考慮した微惑星形成

片岡 章雅 (東京工業大学)

共同研究者：田中秀和(北大)・奥住聡(東工大)・和田浩二(千葉工大)・野村英子(東工大)

百瀬宗武・塚越崇(茨城大学)・武藤恭之(工学院大学)

深川美里・芝井広(大阪大学)・花輪知幸(千葉大学)

# 惑星形成の諸段階

タイムスケール

0 yr

原始星形成

## 原始惑星系円盤

99%はガス、1%がダストで構成される

$\mu\text{m}$ サイズのダスト  $\rightarrow$  1000kmサイズの惑星へ

$10^6$  yr

$10^{7-8}$  yr

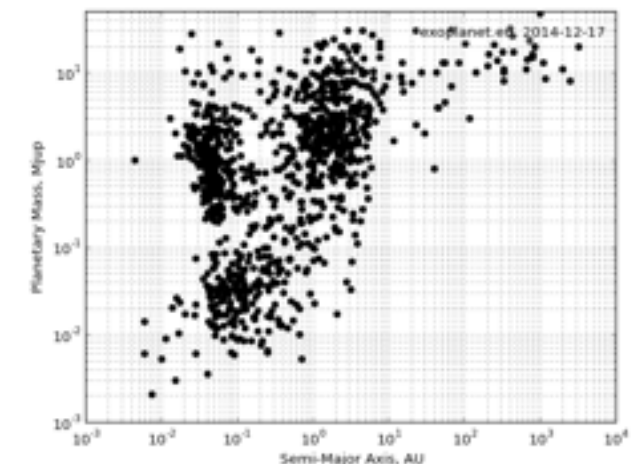
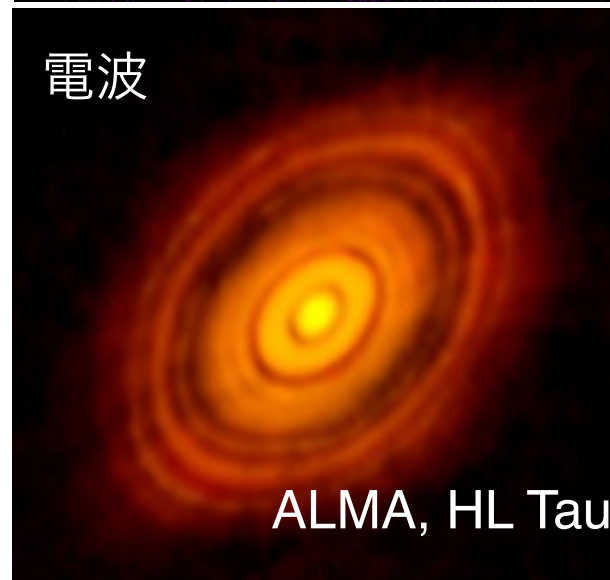
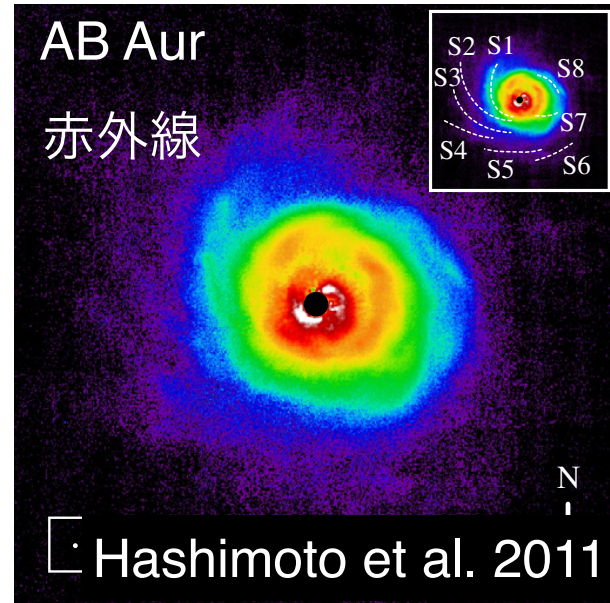
## デブリ円盤

ガスが散逸した円盤

$10^{8-9}$  yr

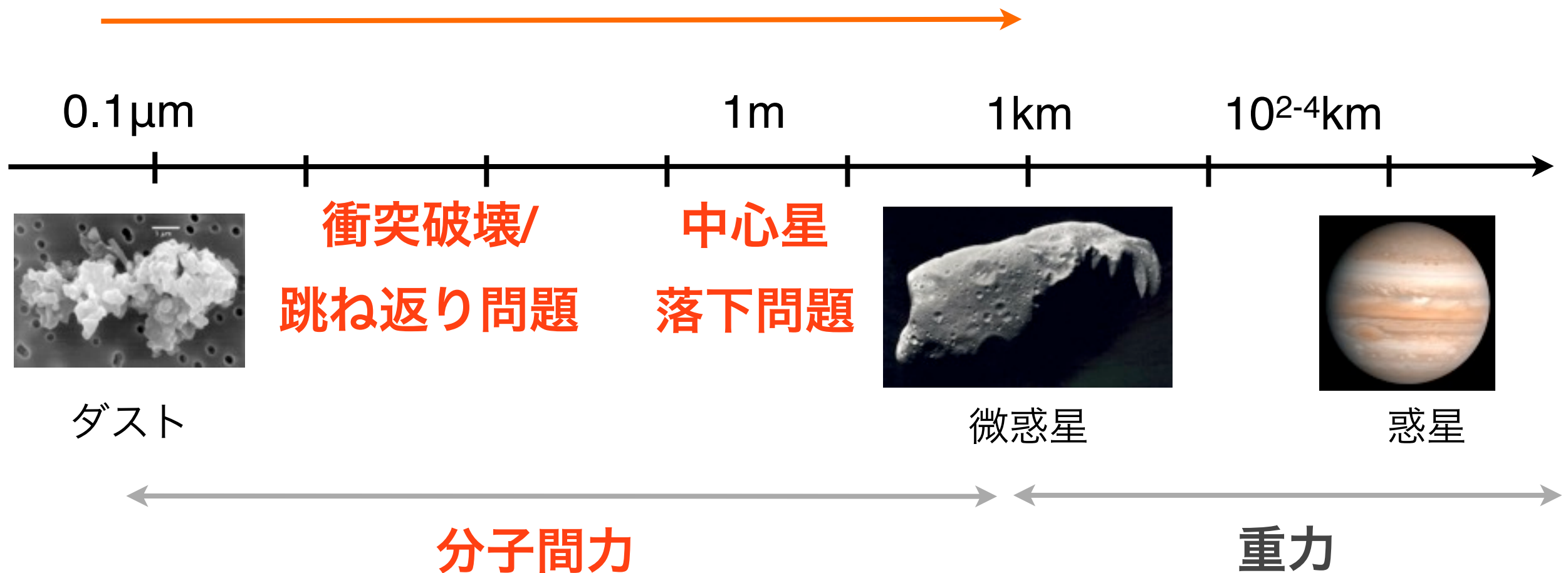
## 惑星系

- 太陽系 (熱進化・化学進化等の情報)
- 系外惑星 (多様な惑星系)



# 固体のサイズ成長

## ダストの合体成長



目標：問題点を回避しつつ微惑星を形成するシナリオの構築

# 空隙率の考慮

空隙率の影響：

断面積大

- 衝突確率増加 ↑
- ガス抵抗力 ↑



Suyama et al. 2008

ダストは低速付着成長により空隙を形成する

cf). Wada et al. 2007, 2009, 2011, Suyama et al. 2008, 2012, Okuzumi et al. 2009, 2012

cf) 空隙率 $p$ , 充填率 $f \Rightarrow f=1-p$

Wada et al. 2009



ダストアグリゲイト

有効半径： $r$ , 質量： $m$

内部密度： $\rho$



# 低密度アグリゲイトと微惑星形成問題

- 中心星落下問題

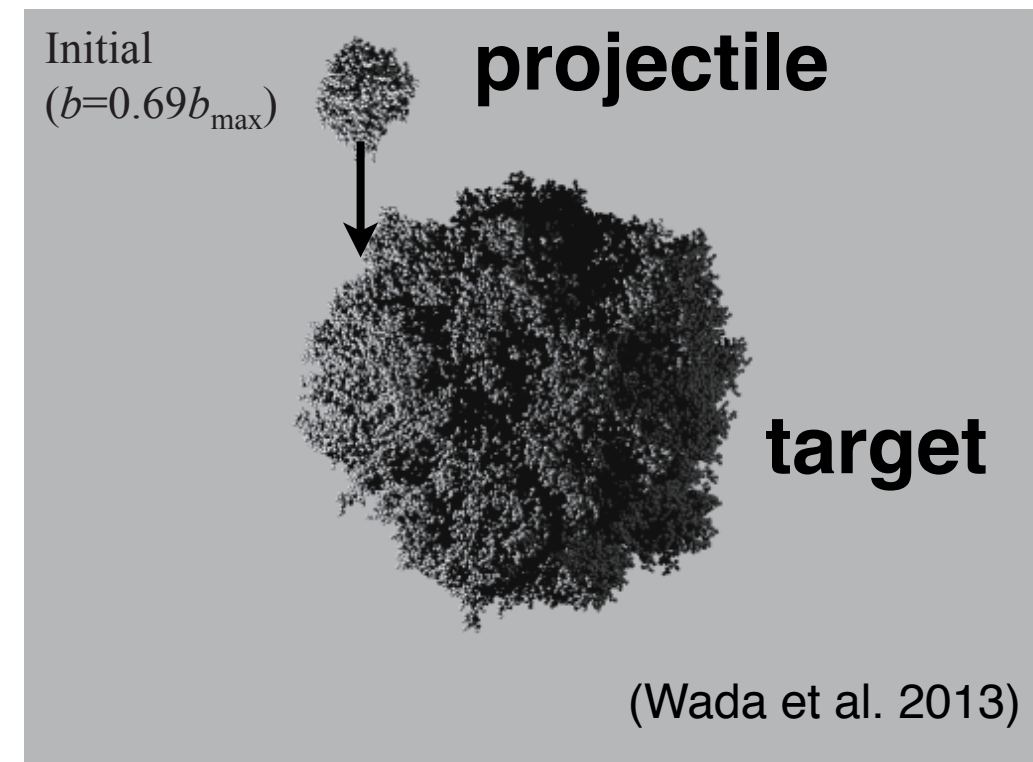
ダストアグリゲイトは大きな断面積を持つため、衝突確率増加  
⇒中心星落下より早く成長することで回避可能? (Okuzumi et al. 2012)

- 衝突破壊問題

岩石に比べ氷は付着力が強いため、  
~80 m/s の衝突でも成長可能  
→氷なら回避可能 (Wada et al. 2009,2013)

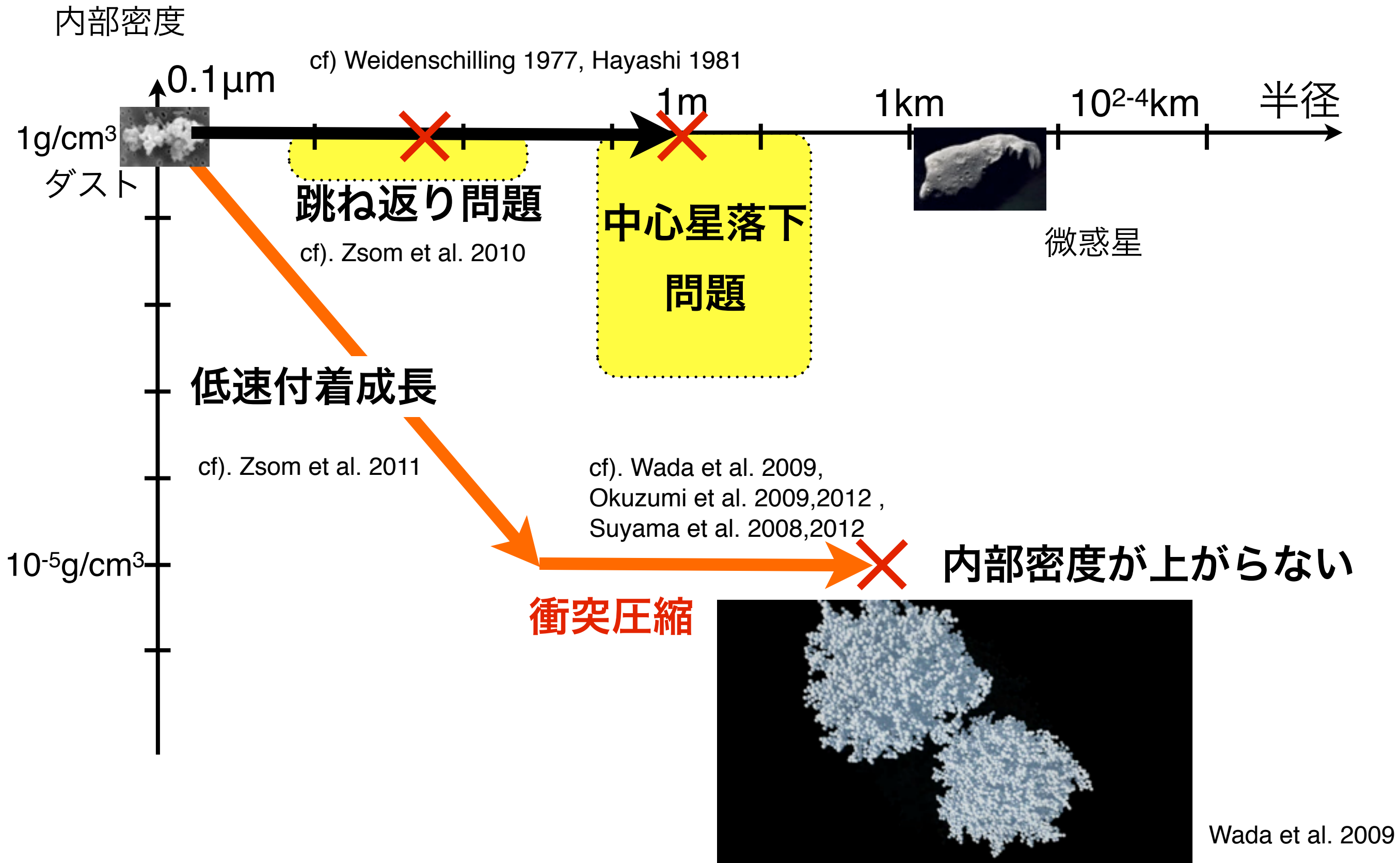
- 跳ね返り問題

低内部密度 ( $\Phi < 0.5$ ) なら跳ね返らない  
(Wada et al. 2011)

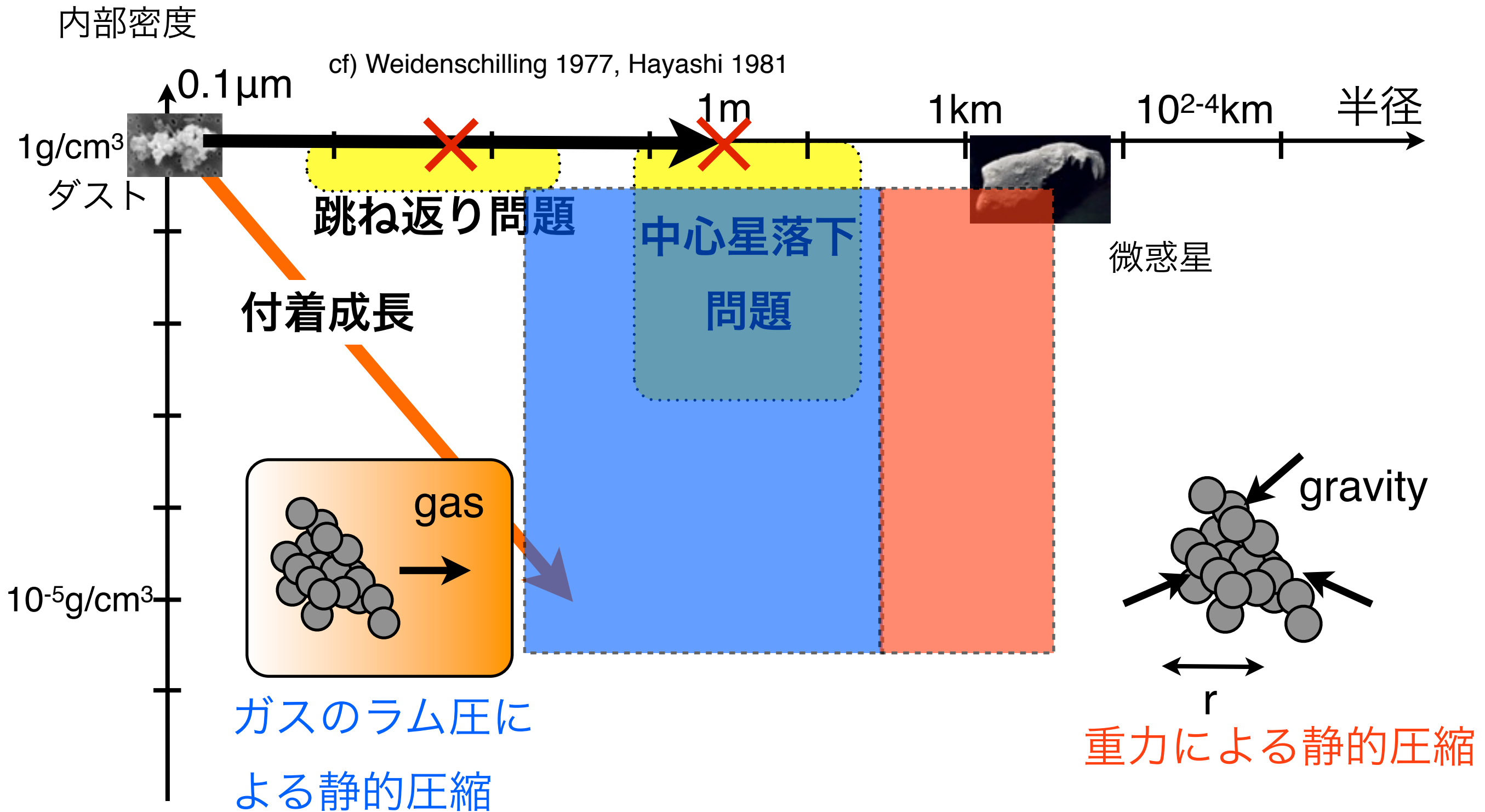


氷ダストアグリゲイトなら問題回避の可能性あり

# 内部密度進化の問題点

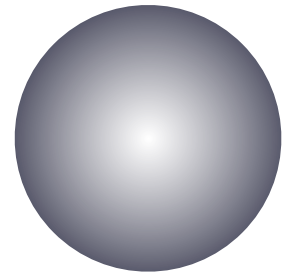


# 本研究: 静的圧縮



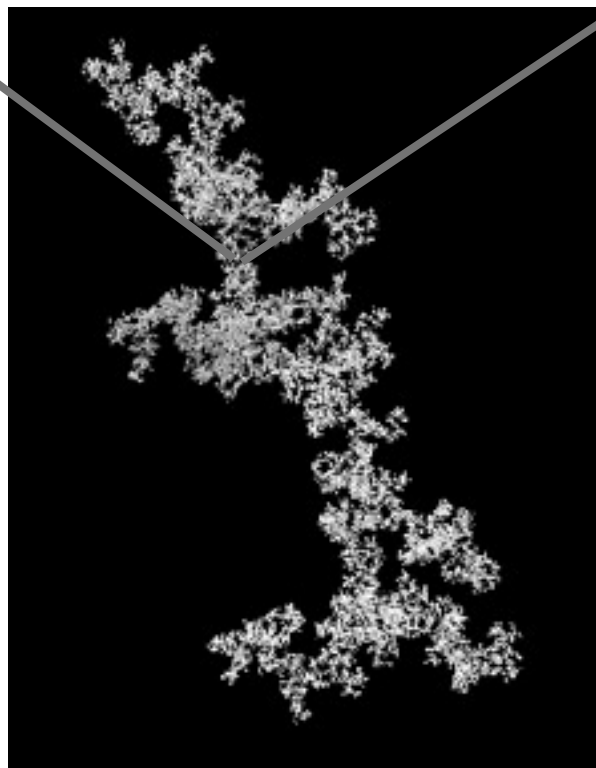
本研究ではダストアグリゲイトの静的圧縮を導入

# 付着力を考慮したダストN体計算



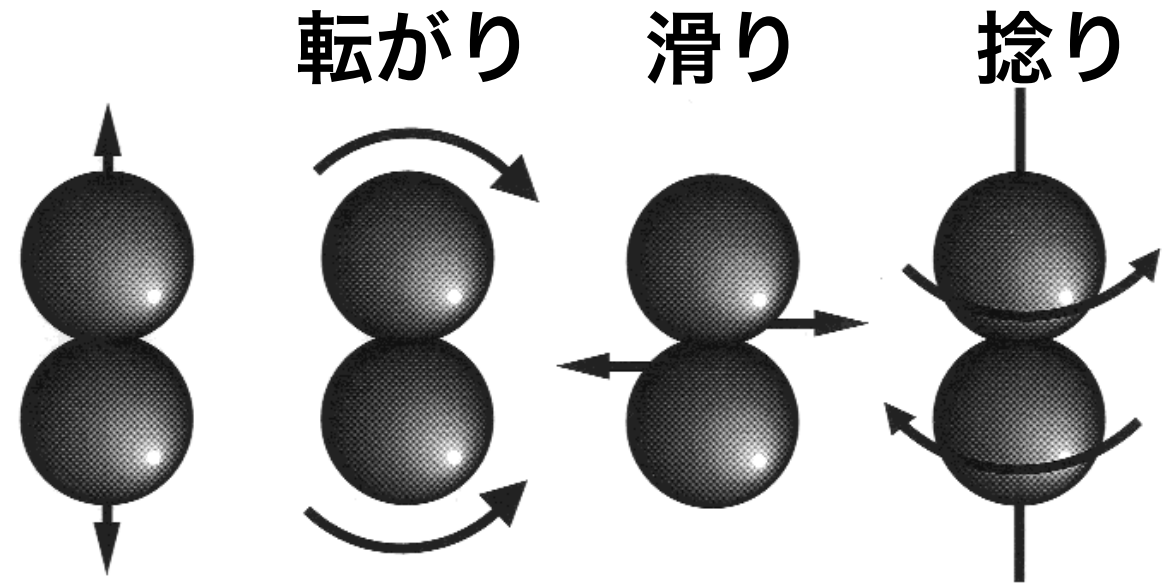
モノマー

例： $r_0=0.1\mu\text{m}$ , 氷



ダストアグリゲイト

モノマー同士の付着相互作用モデル

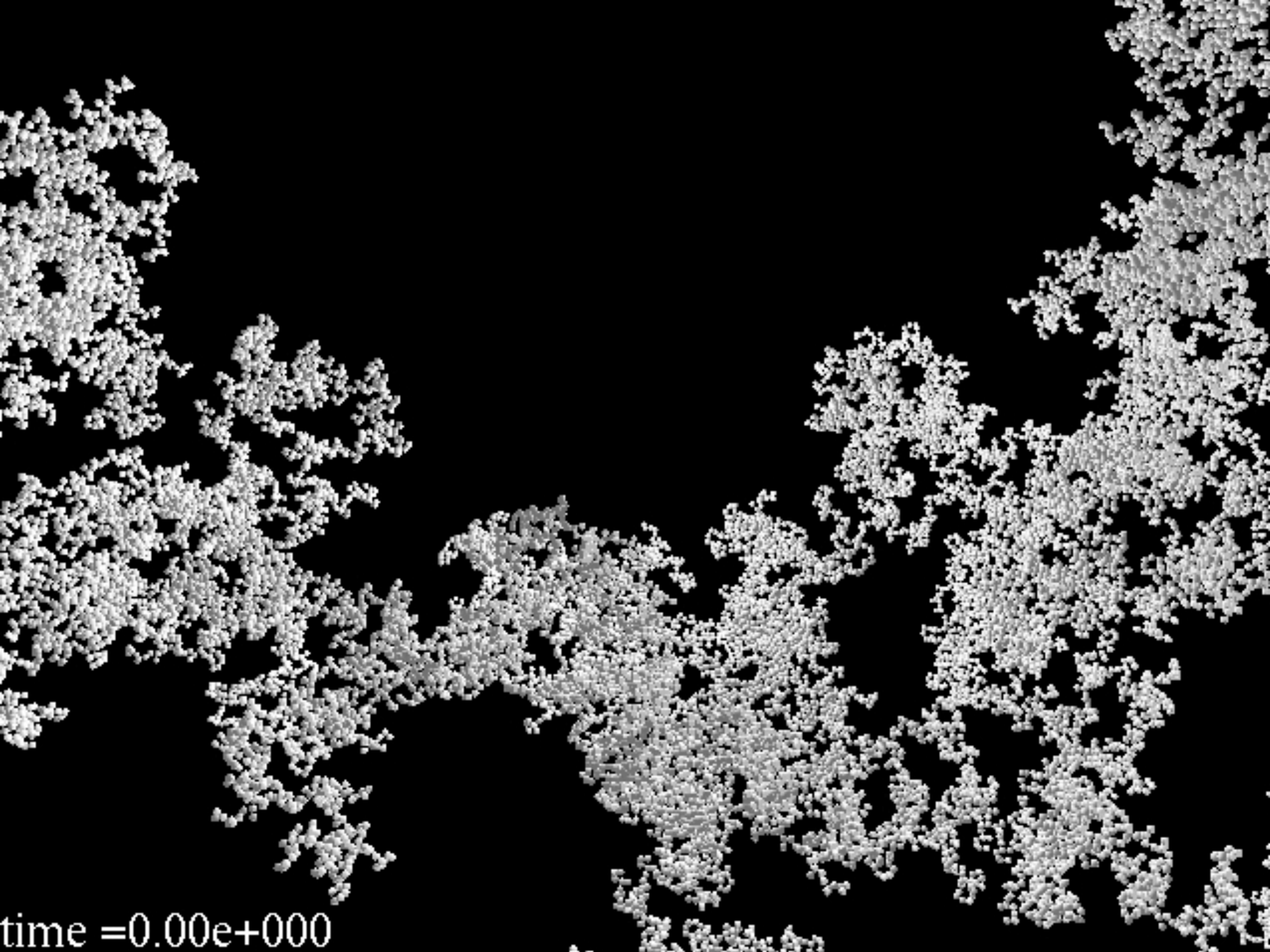


cf).Dominik & Tielens 1997, Wada et al. 2007

モノマー同士の相互作用はよくわかっている  
↔その集合体の振る舞いはわかっていない

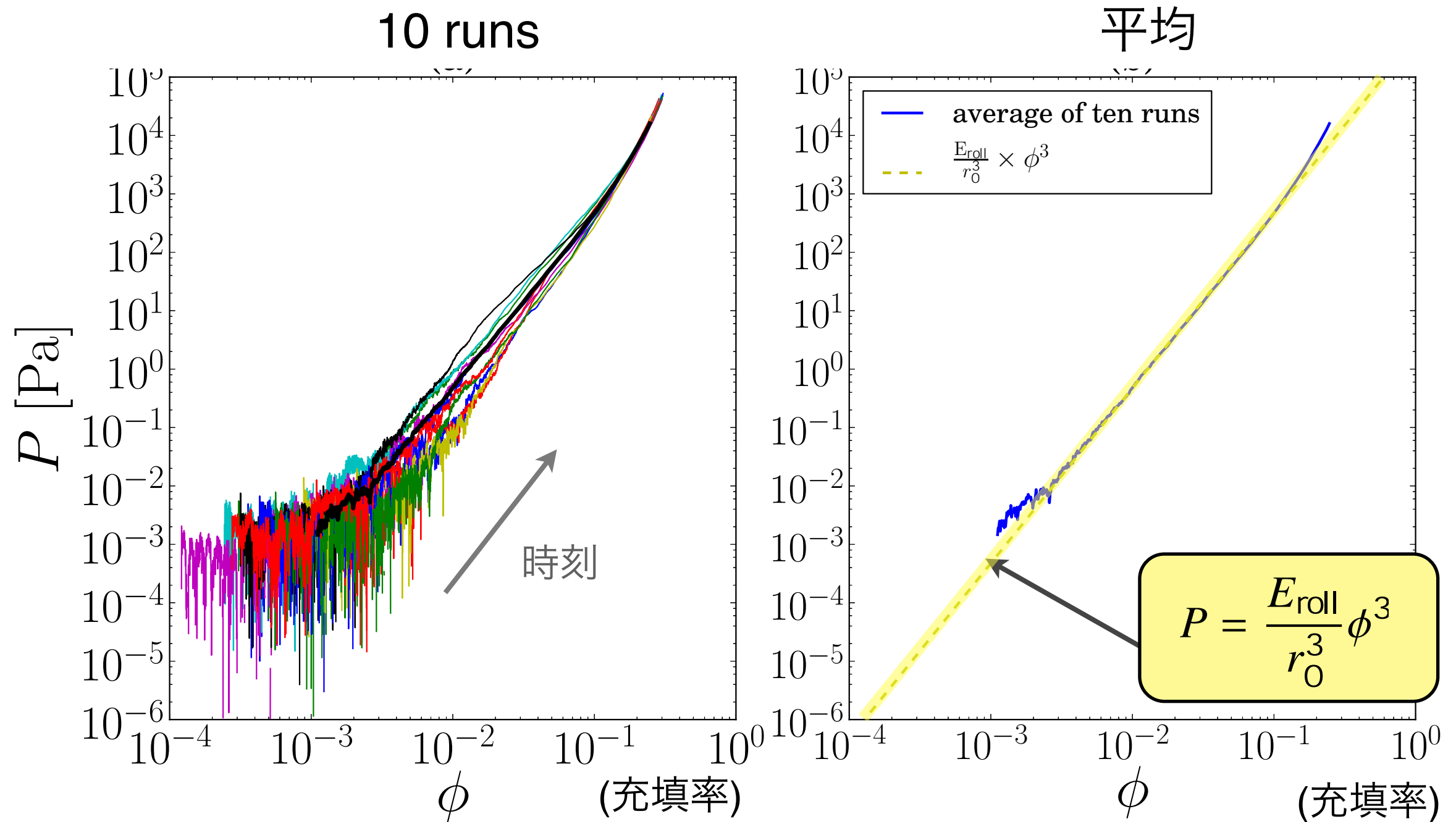
→N体計算を用いて、  
アグリゲイトの圧縮強度を求める





time = 0.00e+000

# 結果：圧縮強度



N体計算により圧縮強度を充填率の関数として導出

Kataoka, Tanaka, Okuzumi, & Wada (2013a)

# 圧縮強度と転がりエネルギー

$$P = \frac{E_{\text{roll}}}{r_0^3} \phi^3$$

cf)  $E_{\text{roll}}$ : 転がりエネルギー  
 $r_0$ : モノマー半径  
 $\phi$ : 充填率 ( $\phi = \rho/\rho_0$ )

## 転がりエネルギー

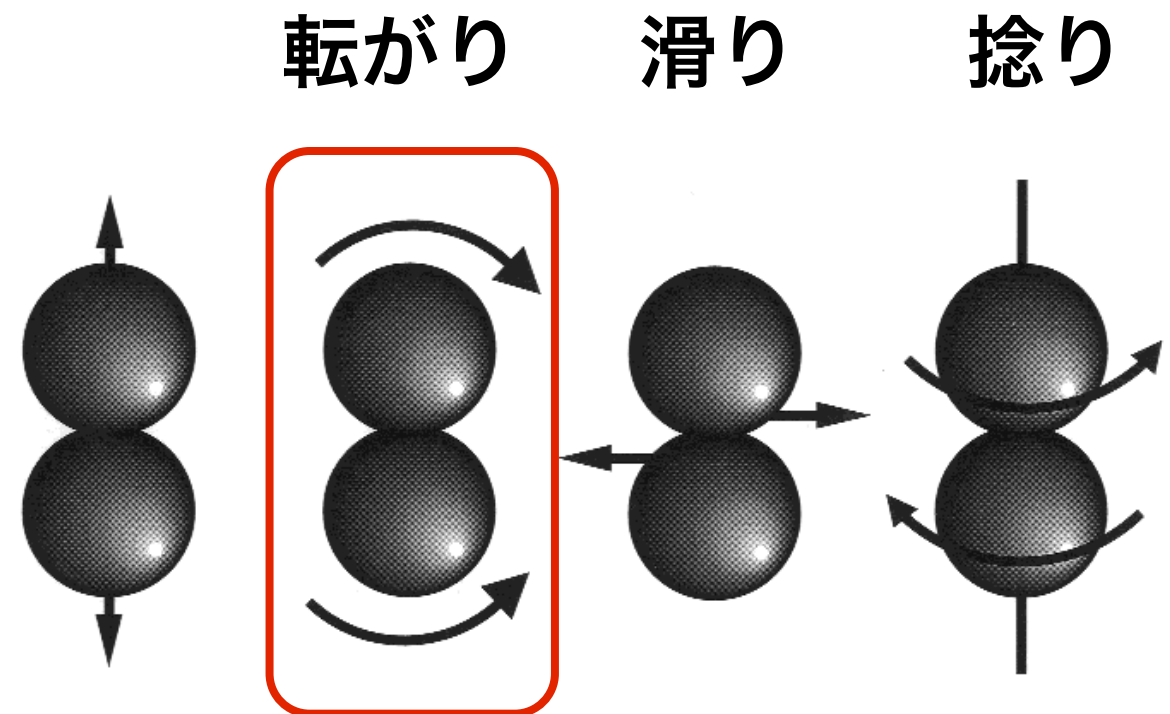
接触する2つの球を90度転がすのに  
必要なエネルギー

$$E_{\text{roll}} = 6\pi^2 \gamma r_0 \xi_{\text{crit}}$$

( $\gamma$ : 表面エネルギー)

$\gamma = 25$  [erg/cm<sup>2</sup>] (シリケート)

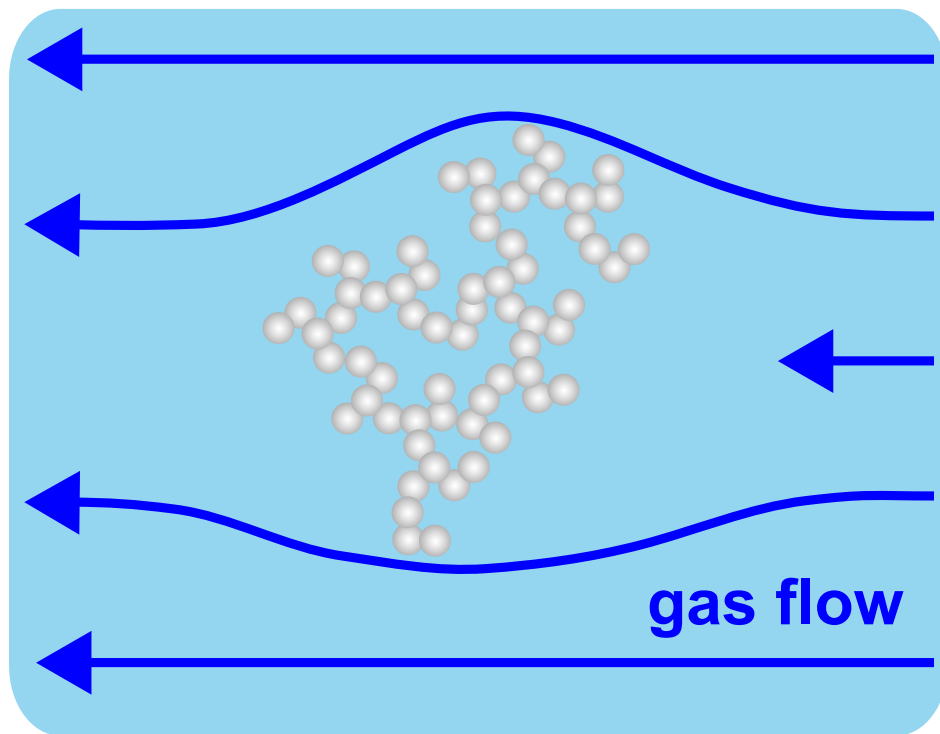
$\gamma = 100$  [erg/cm<sup>2</sup>] (氷)



Kataoka, Tanaka, Okuzumi, & Wada (2013a)

# 原始惑星系円盤で想定される圧力

## 1. ガス圧による圧縮



ダストとガスの相対速度  
(熱運動、radial drift、乱流など)

→ダストはガスからの抵抗力  
を受ける

- ・ガス圧

$$P \equiv \frac{F_{\text{drag}}}{\pi a^2}$$

$$\text{(圧力)} = \frac{\text{(ガス抵抗力)}}{\text{(断面積)}}$$

- ・ダスト圧縮強度

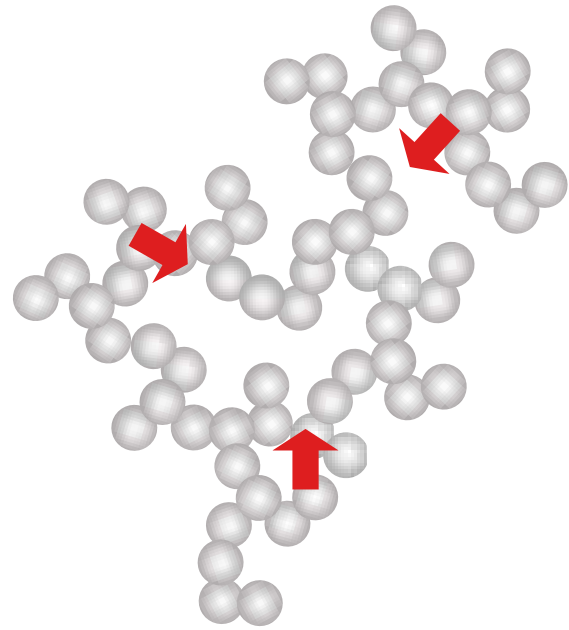
$$P = \frac{E_{\text{roll}}}{r_0^3} \phi^3$$

ガス圧と圧縮強度がつりあう  
密度を求める



# 原始惑星系円盤で想定される圧力

## 2. 自己重力による圧縮



**gravitational force**

ダストが重くなると自身の重力で構造が潰れる

- 自己重力

$$P \equiv \frac{F_{\text{grav}}}{\pi a^2}$$

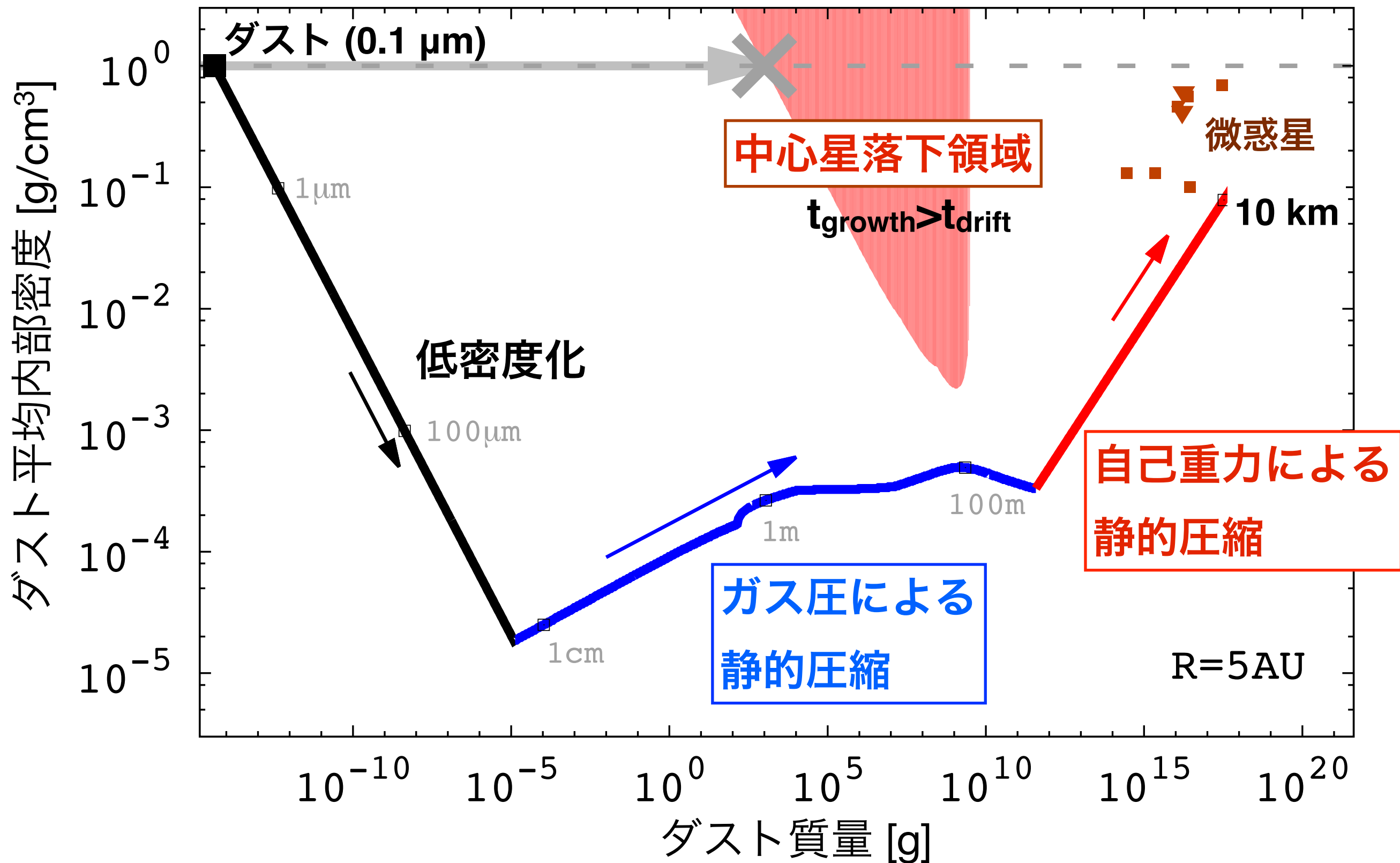
$$\text{(圧力)} = \frac{\text{(自己重力)}}{\text{(断面積)}}$$

- ダスト圧縮強度

$$P = \frac{E_{\text{roll}}}{r_0^3} \phi^3$$

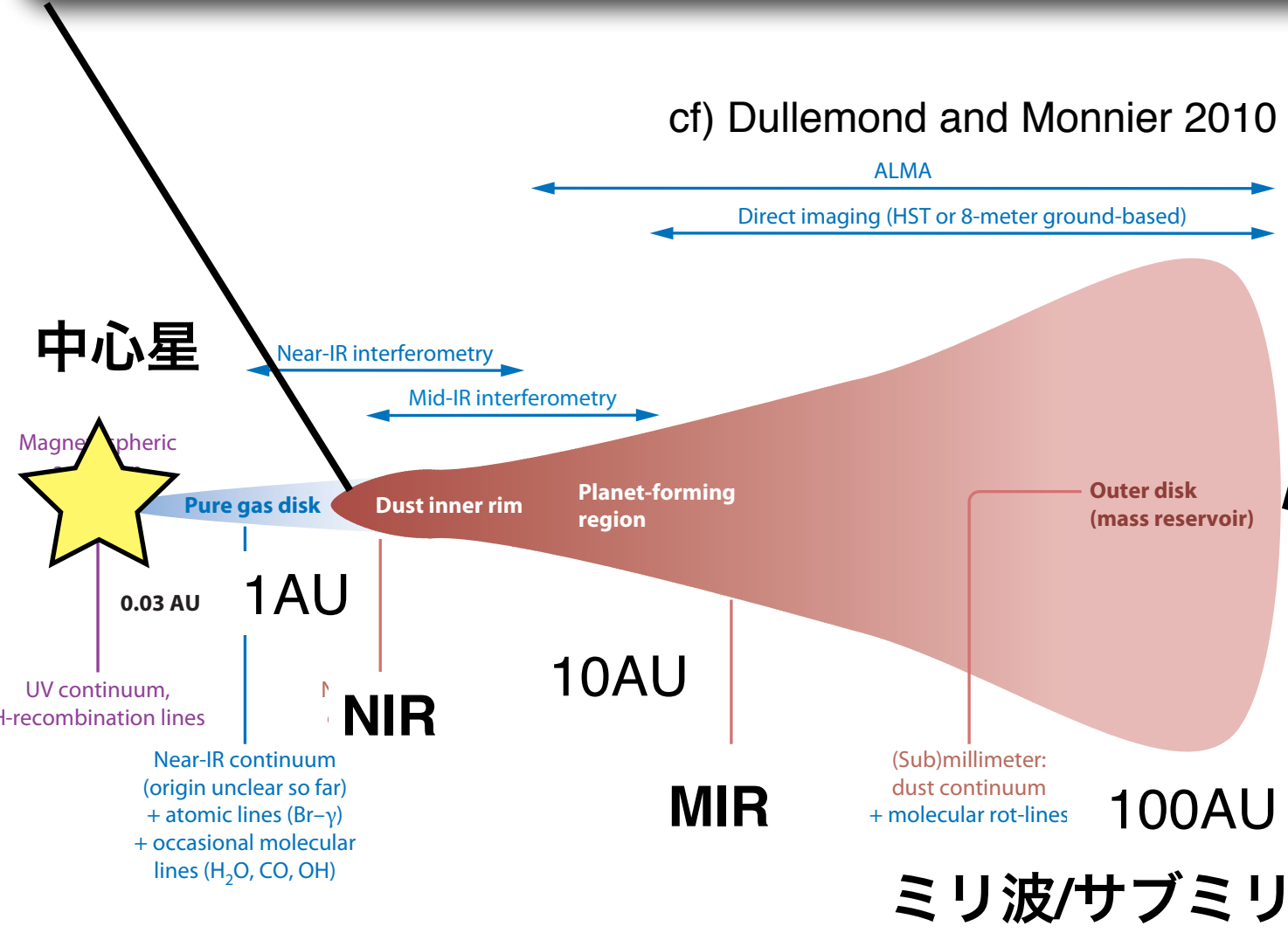
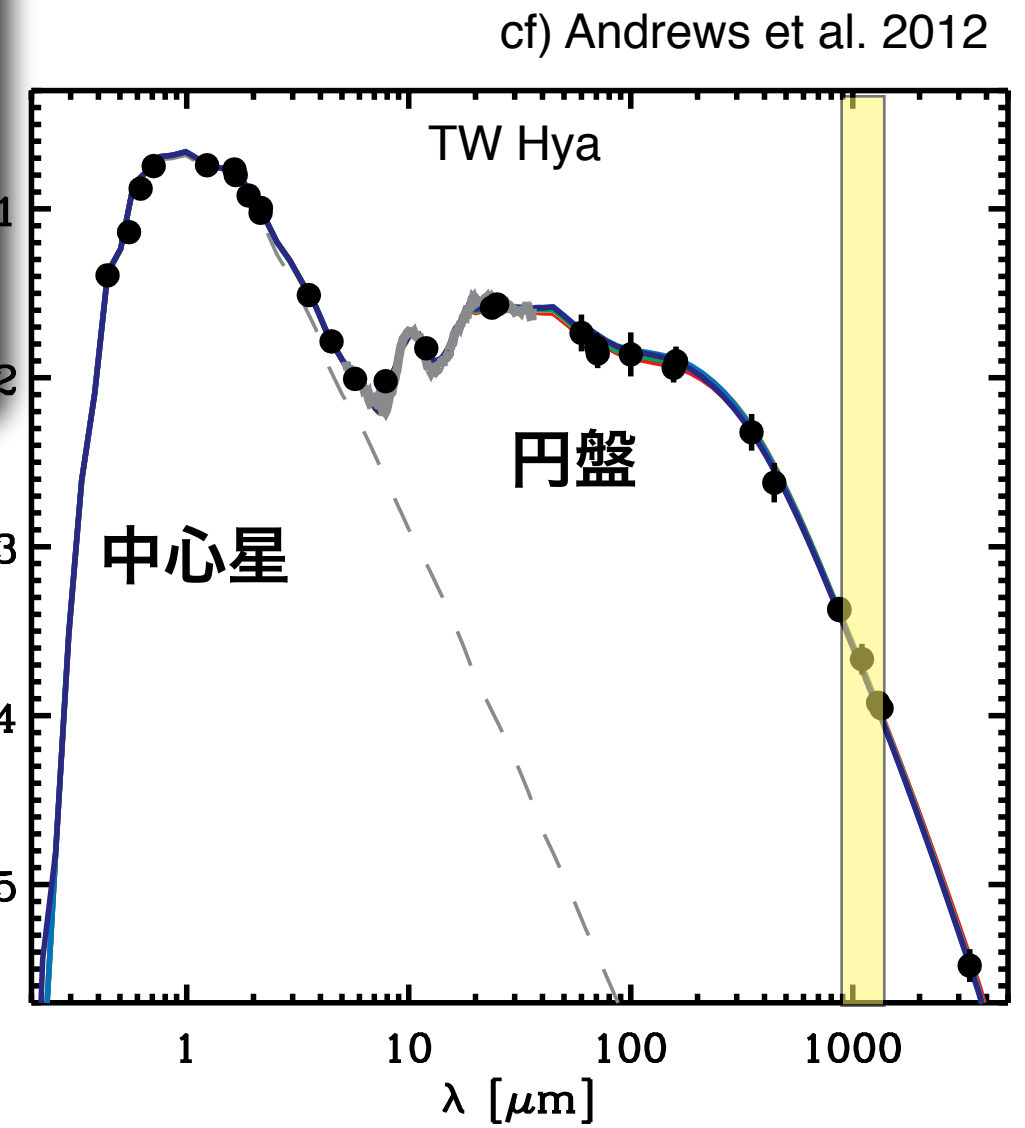
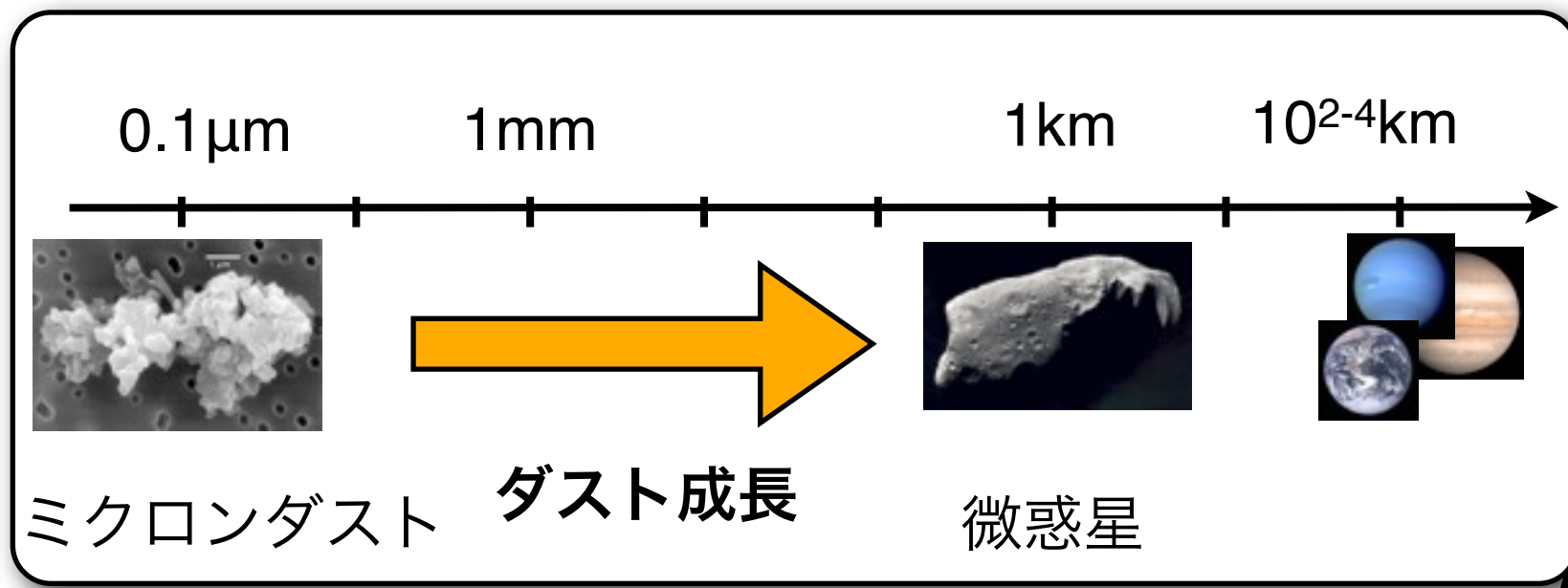
自己重力と圧縮強度がつりあう密度を求める

# ダストアグリゲイトの内部密度進化



Kataoka, Tanaka, Okuzumi, & Wada (2013b)

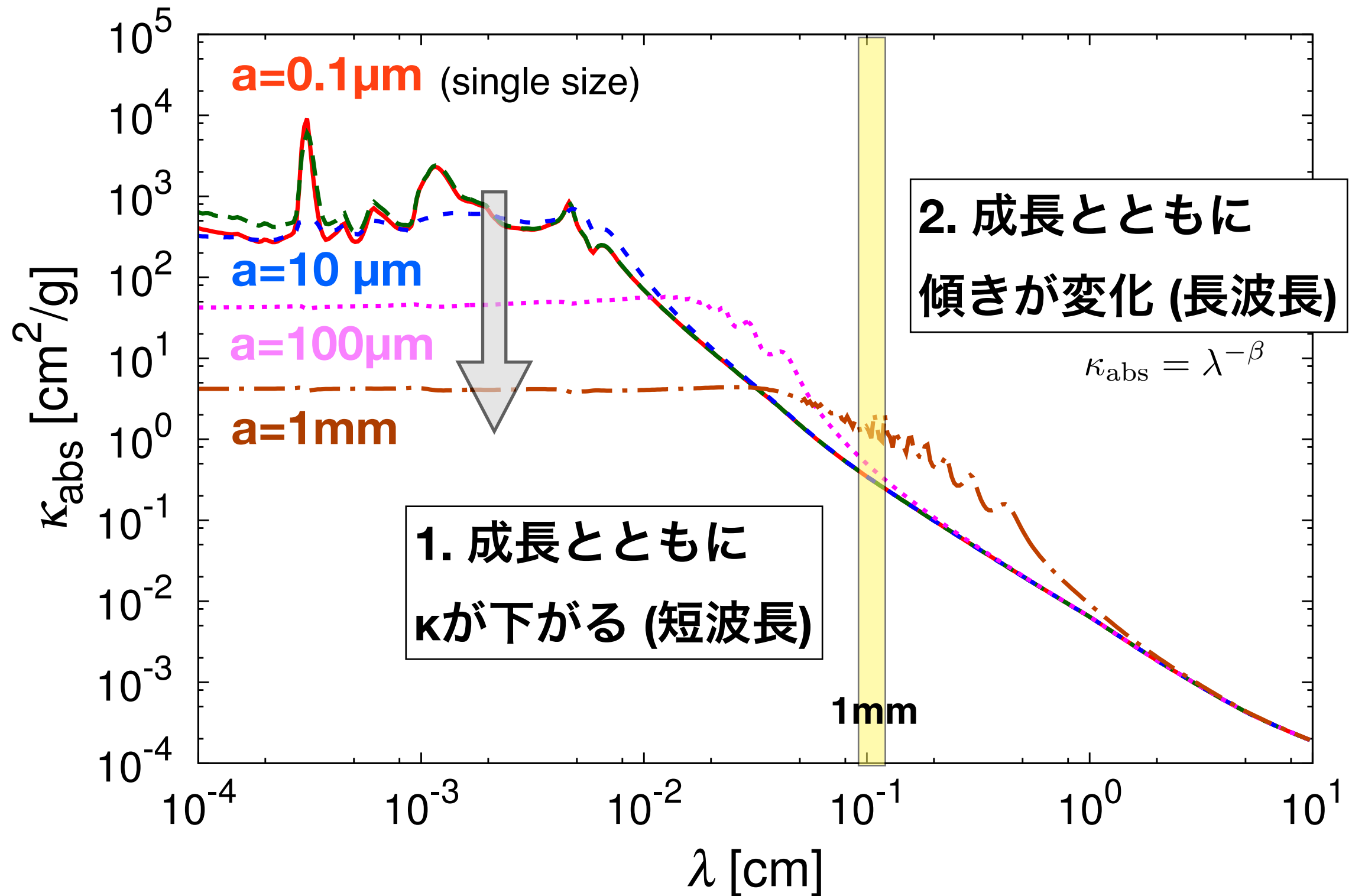
# 原始惑星系円盤の観測



ミリ波/サブミリ波：光学的に薄くダスト進化を反映

# ダスト成長とオパシティ進化

e.g., Miyake & Nakagawa 1993, D'Alessio et al. 2001

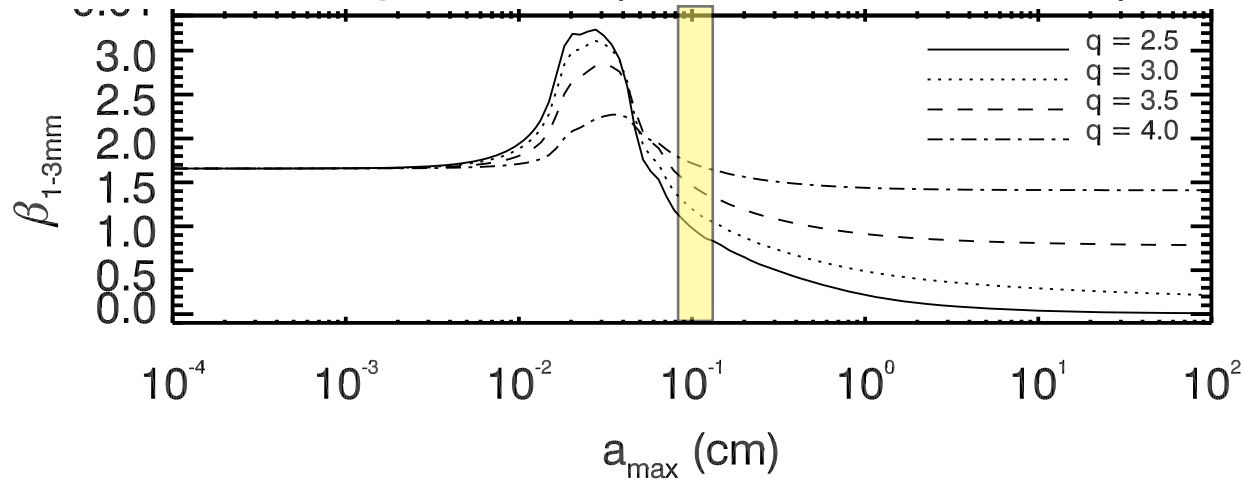




# 原始惑星系円盤の観測とダスト成長

$$\beta: \kappa_{\text{abs}} = \lambda^{-\beta}$$

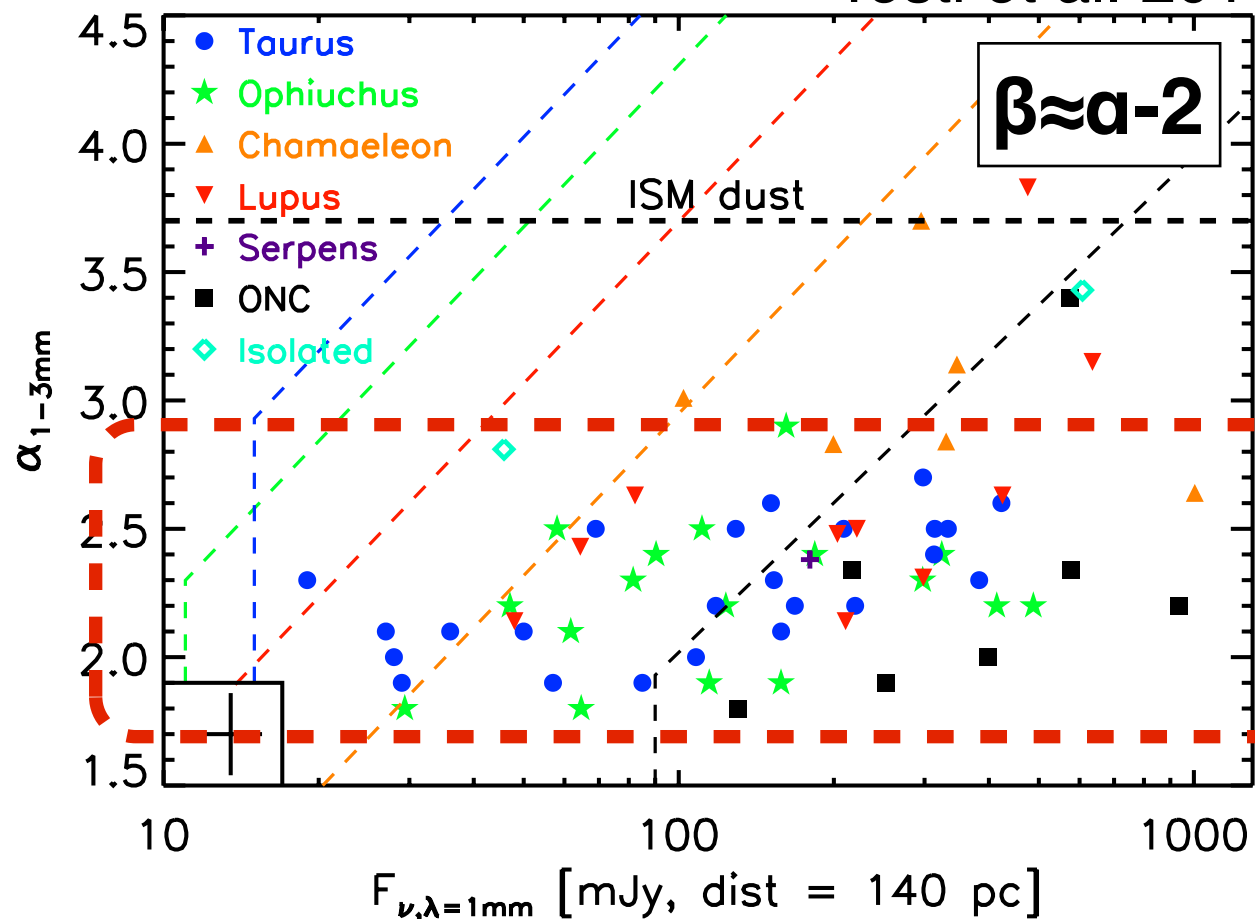
$\beta - a_{\text{max}}$  (Ricci et al. 2010a)



原始惑星系円盤のダスト :  $\beta \sim 0-1$

(e.g., Kitamura et al. 2002, Andrews & Williams 2005)

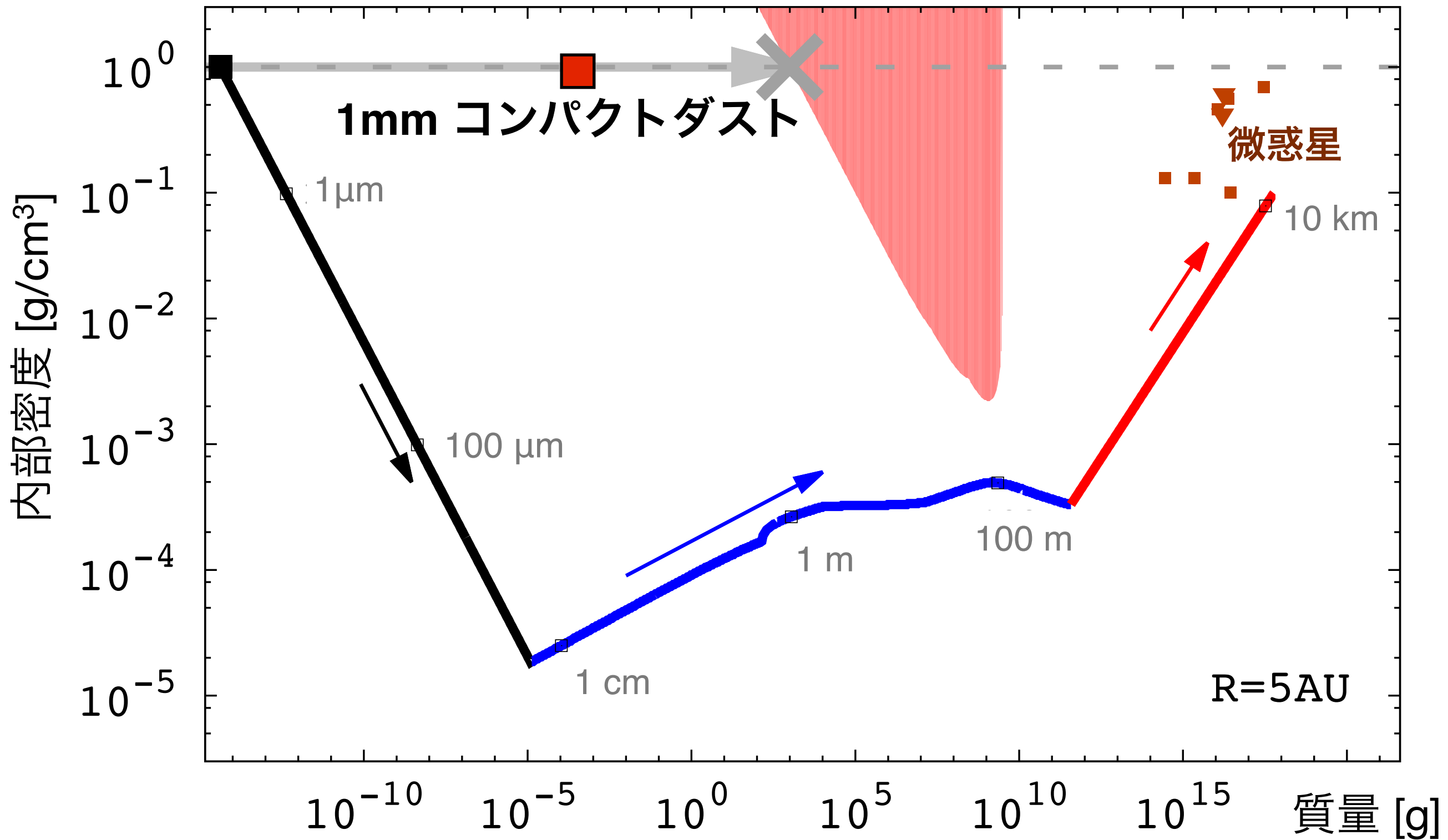
Testi et al. 2014



cf) 星間空間のダスト :  $\beta \sim 2$

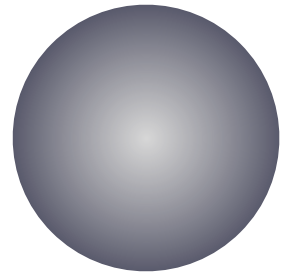
⇒原始惑星系円盤において、ダストは~1mmサイズ以上に成長している

# 1mmのダスト？



低密度ダストアグリゲイトで観測を説明できるか？

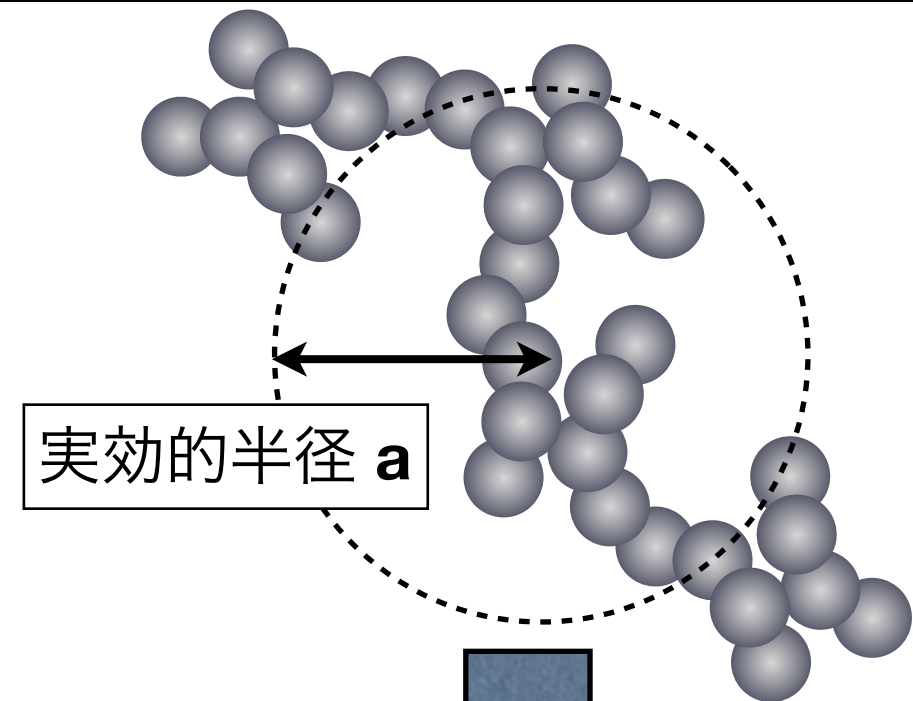
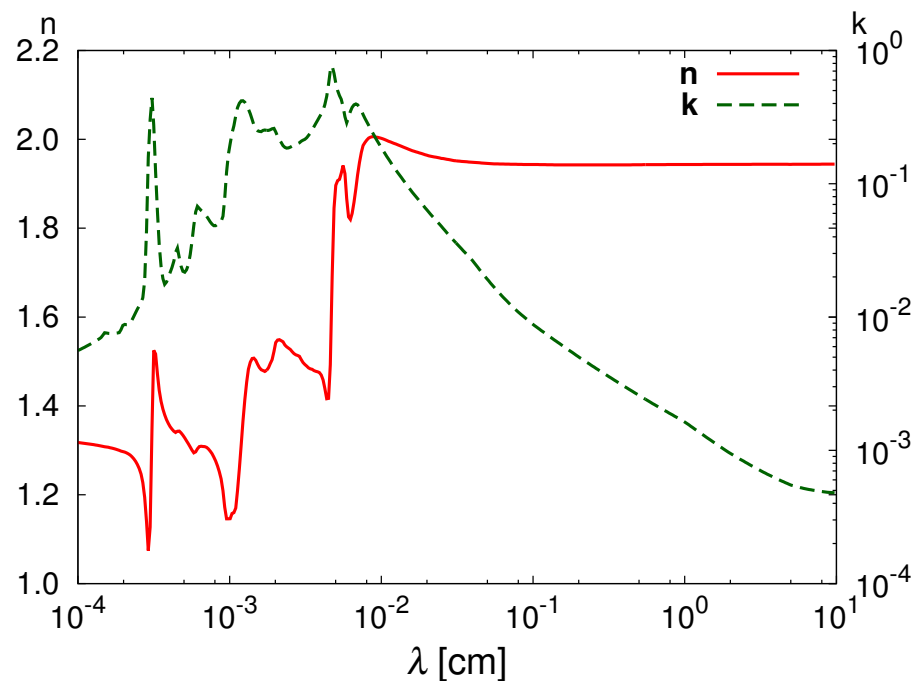
# 手法：Mie計算 with 有効媒質理論



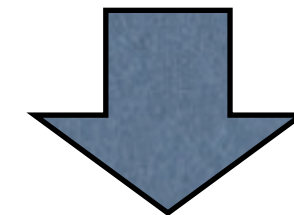
ダスト

組成：H<sub>2</sub>O氷, シリケート, 有機物の混合物 (Pollack et al. 1994)

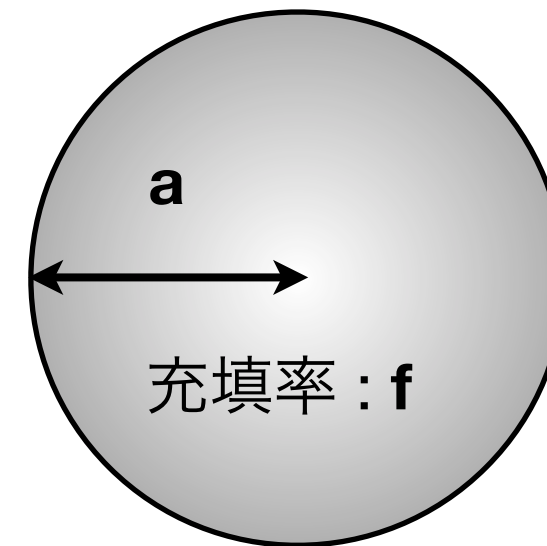
屈折率： $m = n + ik$



実効的半径  $a$



屈折率  $m' = m'(m, f)$

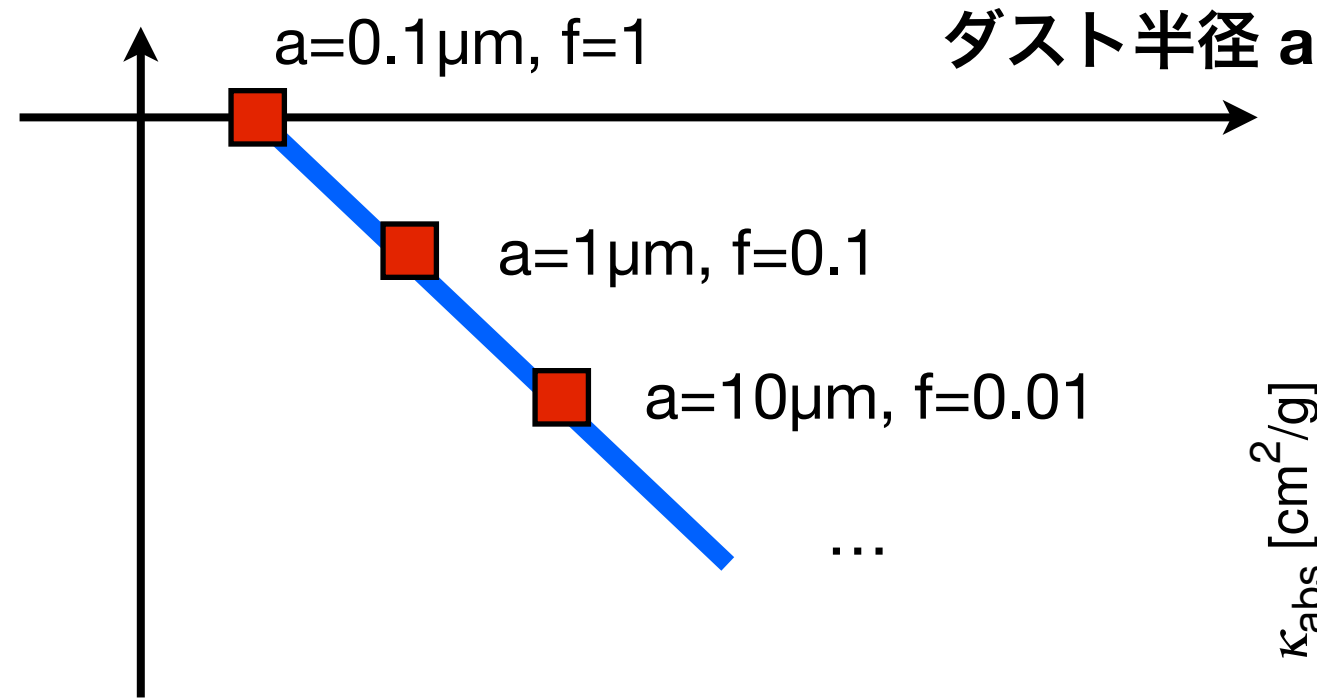


アグリゲイトを半径 $a$ , 有効屈折率をもつ一様球と近似

(=有効媒質理論 cf. Miyake & Nakagawa 1993)

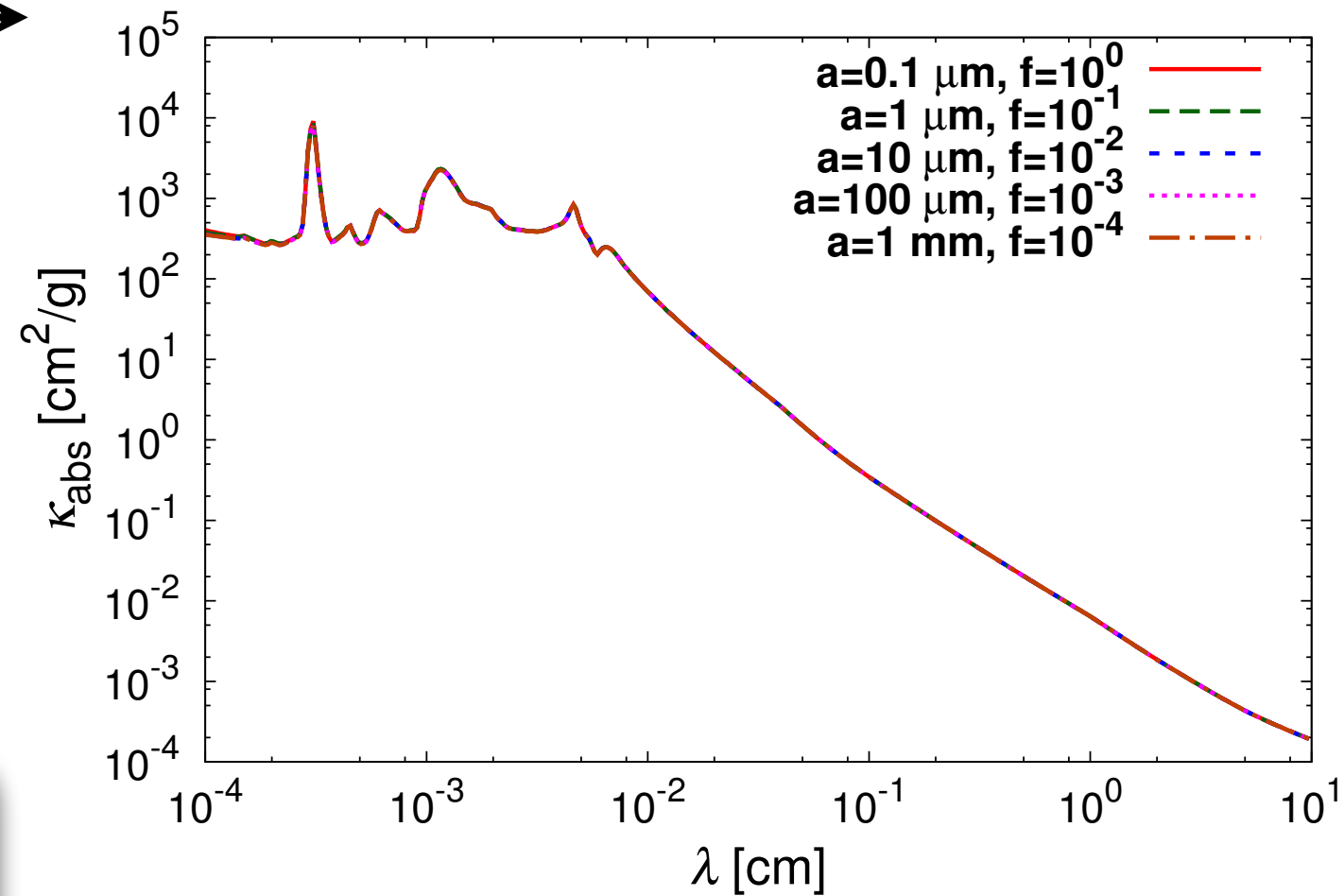
# 結果:低密度アグリゲイトのオパシティ

充填率  $f$



$af=0.1\mu\text{m}$

(d) constant mass-to-area ratio :  $af = 0.1 \mu\text{m}$



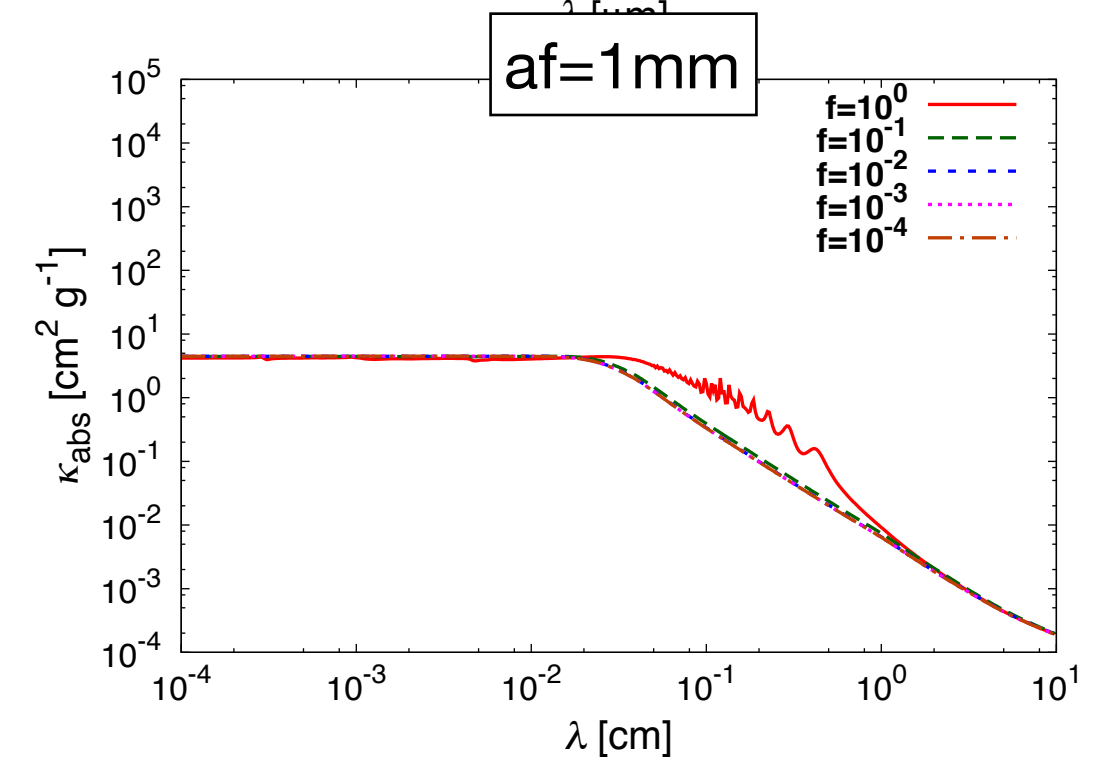
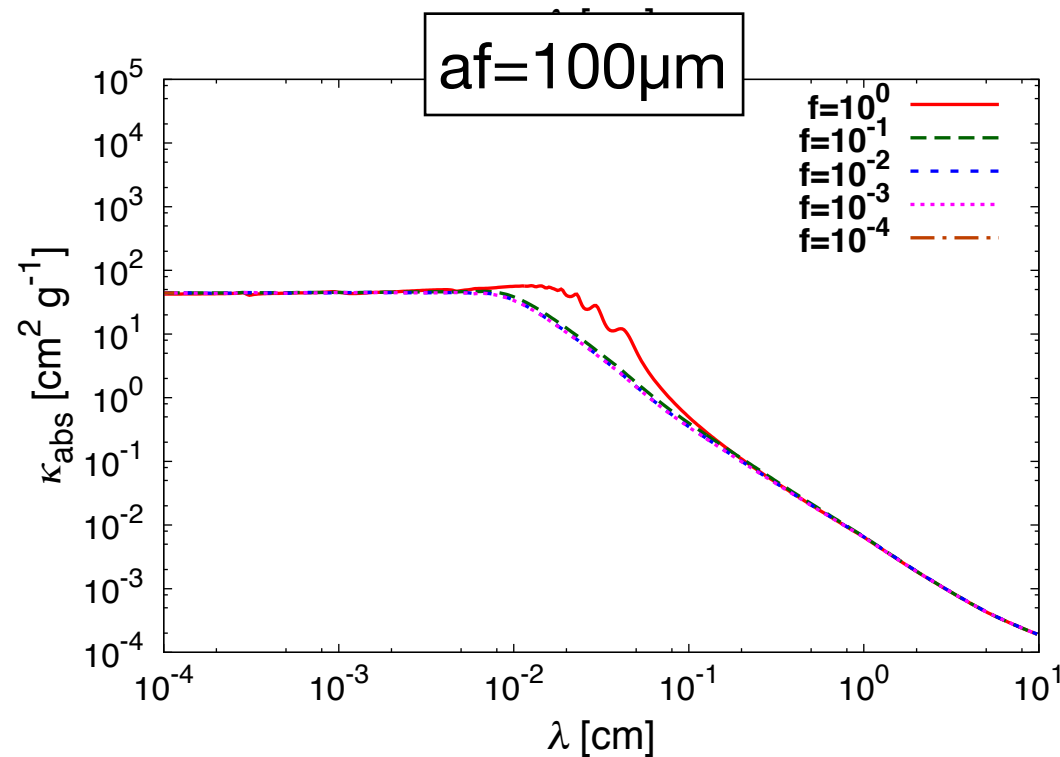
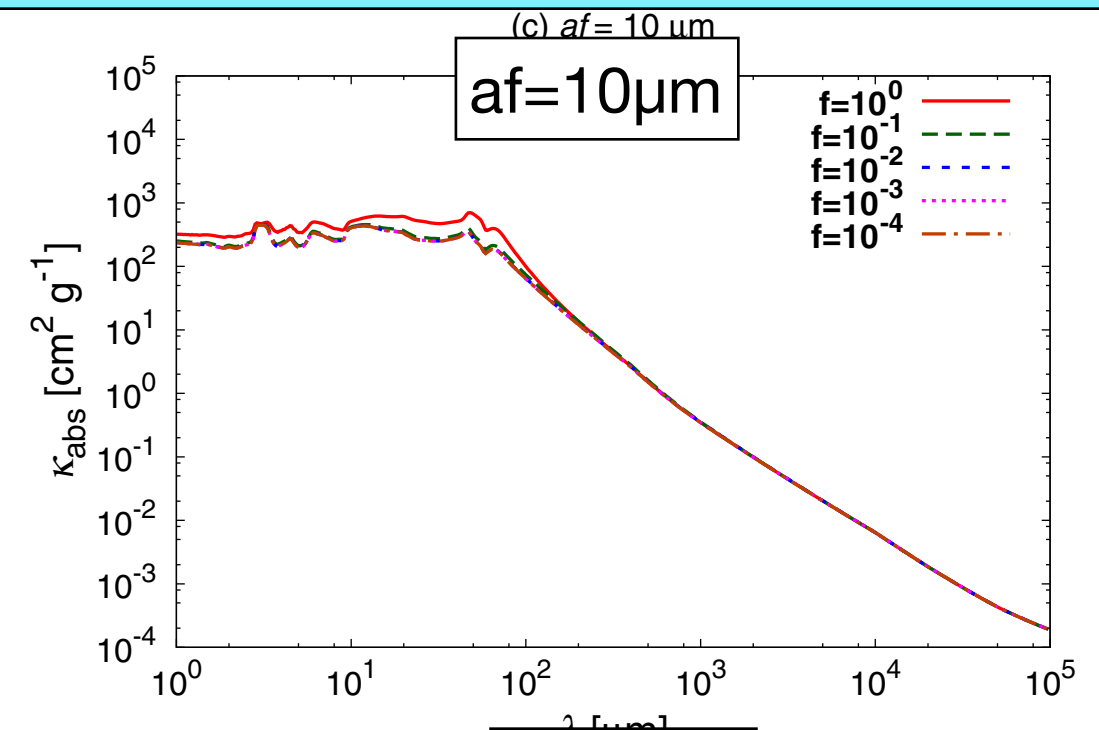
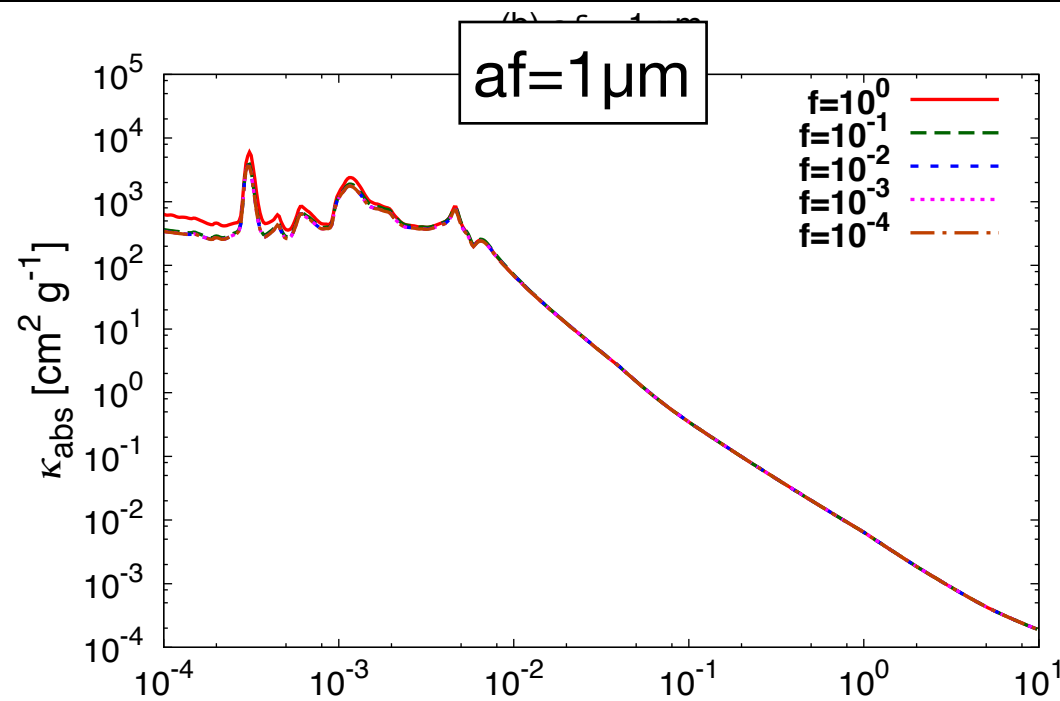
cf) 
$$\frac{(\text{mass})}{(\text{area})} \sim \frac{a^3 f}{a^2} \sim af$$

$\Rightarrow af$  一定なら mass-to-area ratio 一定

$af$ 一定値  $\Rightarrow$  opacity一定



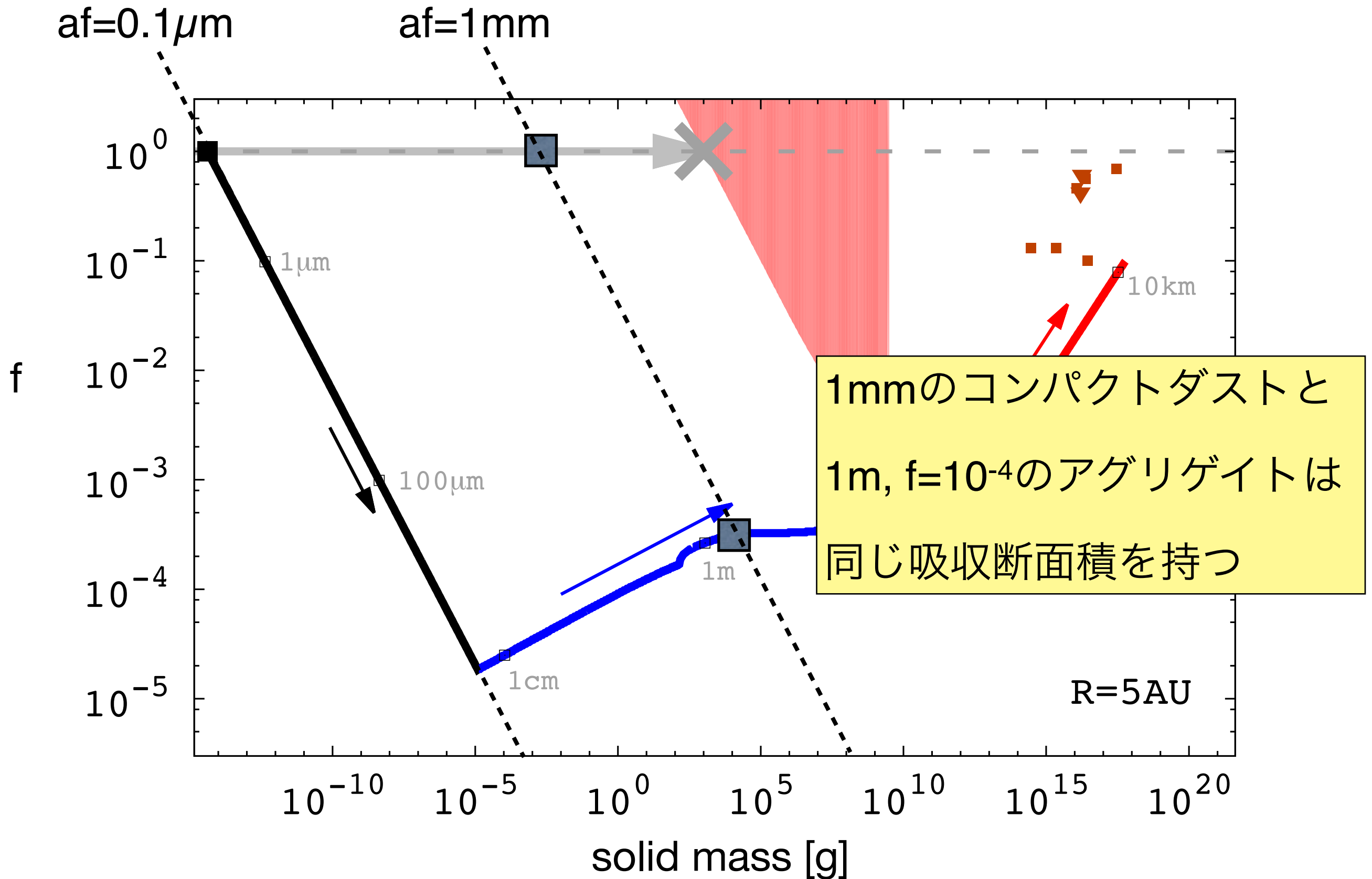
# 結果:低密度アグリゲイトのオパシテイ



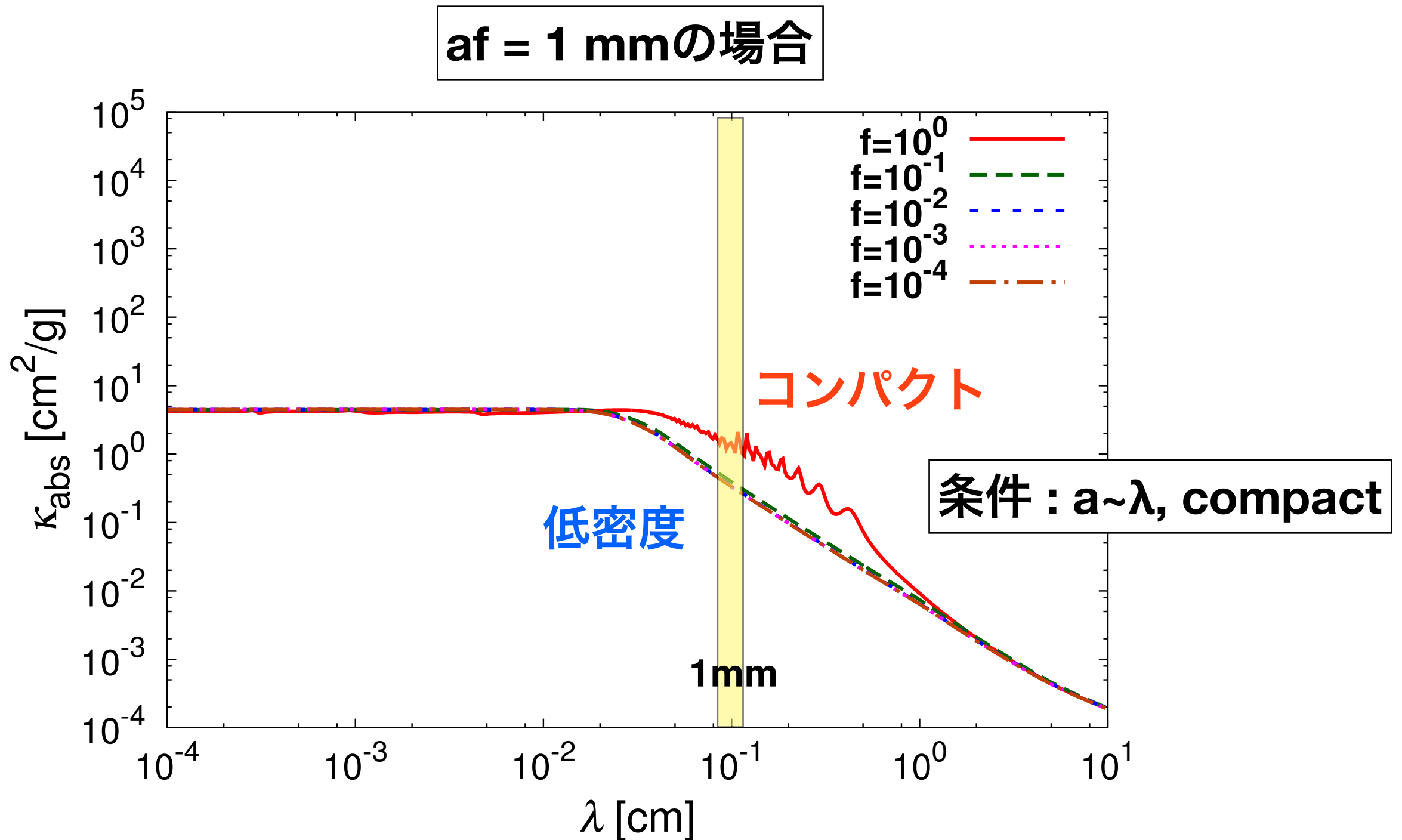
吸収断面積は**af**によって特徴付けられる

Kataoka, Okuzumi, Tanaka, & Nomura (2014)

# “mmダスト”の解釈



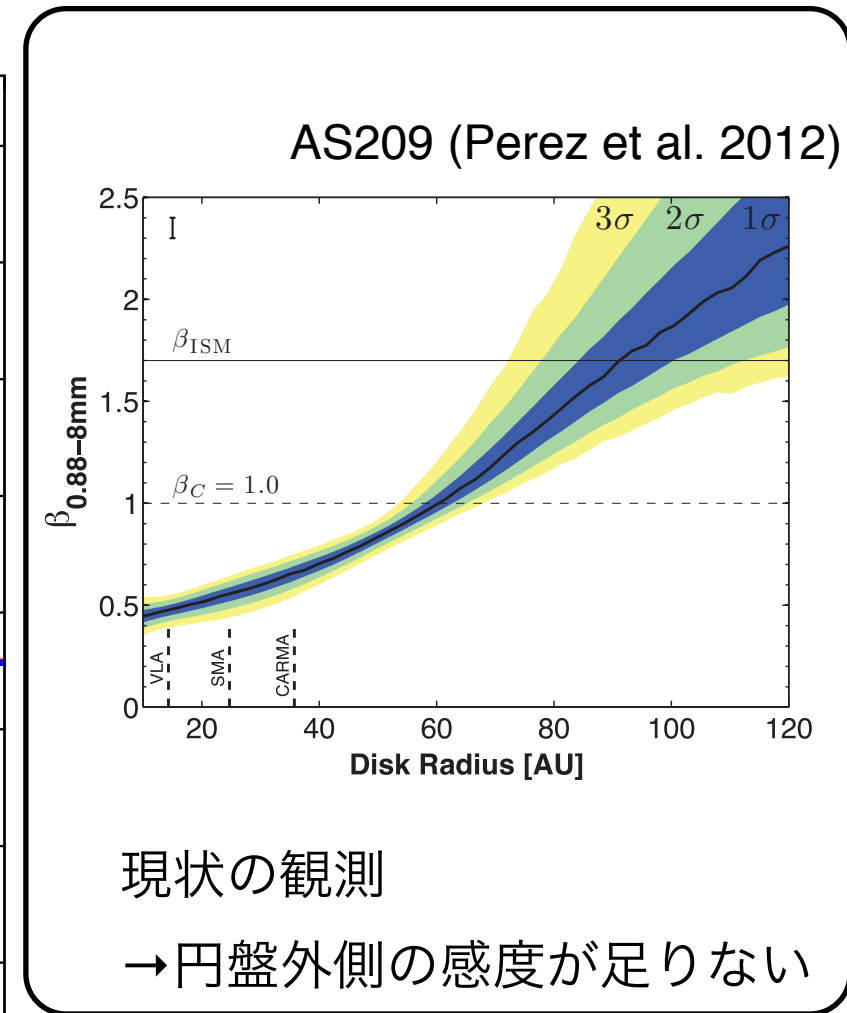
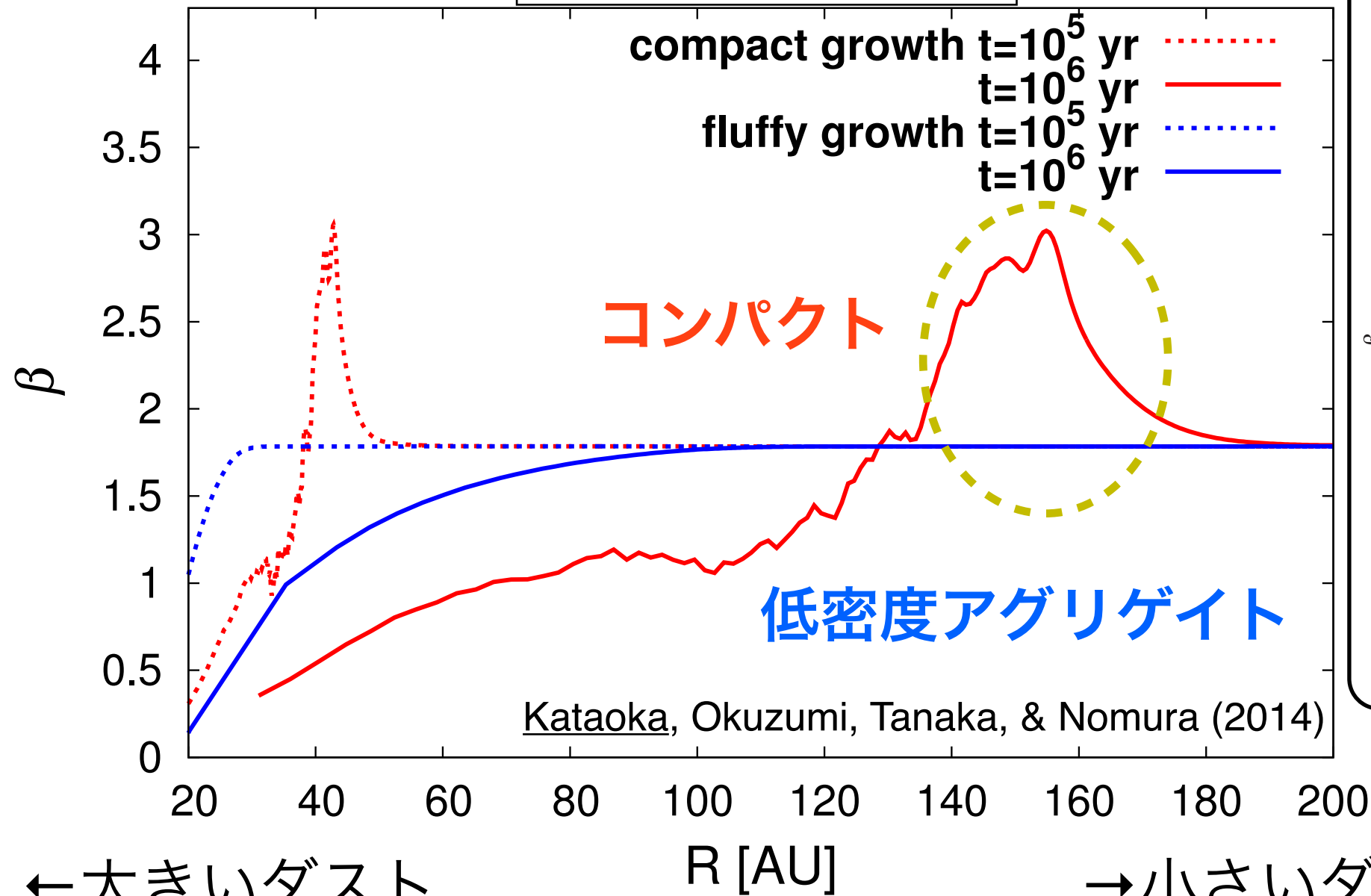
# 観測的実証1: opacity index



ダストがコンパクトなときのみ、 $a \sim \lambda$ で傾きに違い

# 観測的実証1: opacity index

$\beta$ の動径分布予測



高空間分解能2波長観測(~10AU)で低密度アグリゲイトを識別可



# 結論

- N体計算を用いて低密度ダストアグリゲイトの静的圧縮を計算
- 低密度アグリゲイトの圧縮強度を導出・定式化

**Kataoka et al. 2013a, A&A, 554, A4**

- 圧縮強度を円盤内のダスト進化に応用
- ダストから微惑星までの内部密度進化を解明
- 微惑星形成問題(中心星落下・衝突破壊・跳ね返り)を回避

**Kataoka et al. 2013b, A&A, 557, L4**

- 低密度アグリゲイトのオパシティを計算
- 吸収断面積は(ダスト半径) $\times$ (充填率)で特徴付けられる
- 低密度アグリゲイトの観測的実証方法を提案

**Kataoka et al., 2014, A&A, 568, A42**

**Kataoka et al. in prep**