

# 原始惑星系円盤における 空隙率進化するダストの合体成長・沈殿過程

Grain Formation Workshop/銀河のダスト研究会@CPS 2010年9月3日

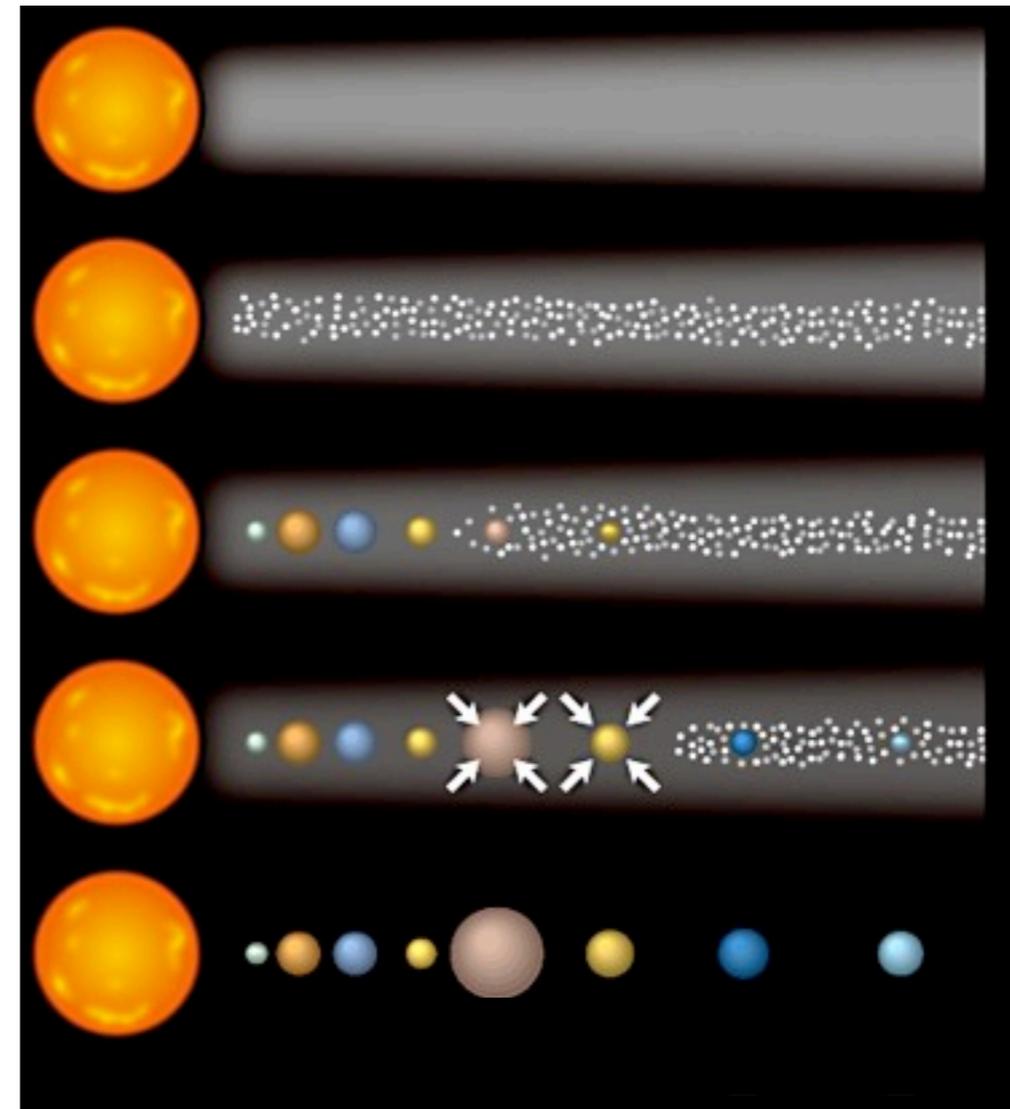
京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 片岡 章雅

共同研究者：野村英子(京都大学)、奥住聡(名古屋大学)、中川義次(神戸大学)

# イントロダクション

# 惑星形成標準シナリオ

- 円盤形成
- ダストが赤道面に沈殿
- ダスト層で固体惑星形成
- ガス惑星形成
- 円盤消失

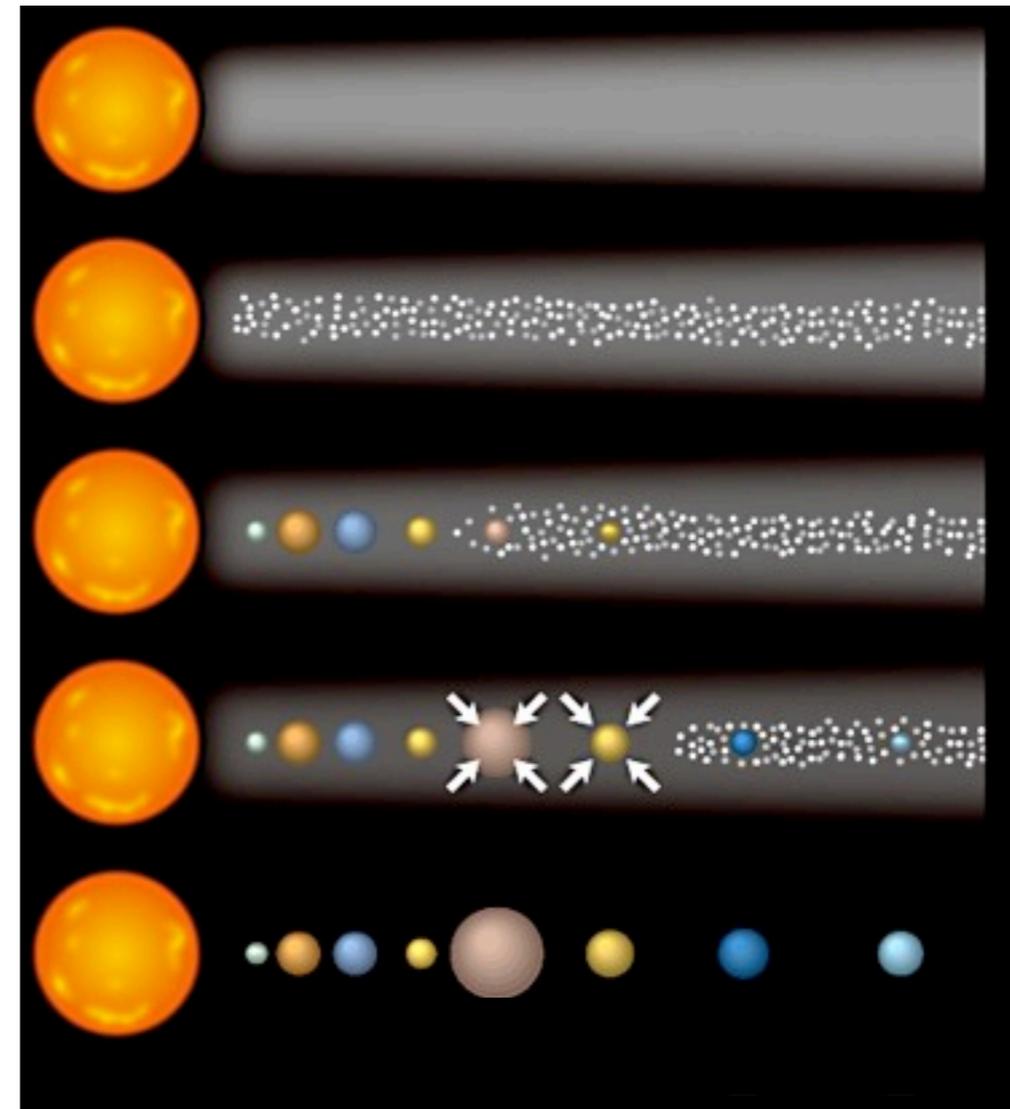


[http://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq\\_ten\\_007.html](http://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_007.html)

ダスト合体成長・沈殿過程 = 惑星形成第一段階

# 惑星形成標準シナリオ

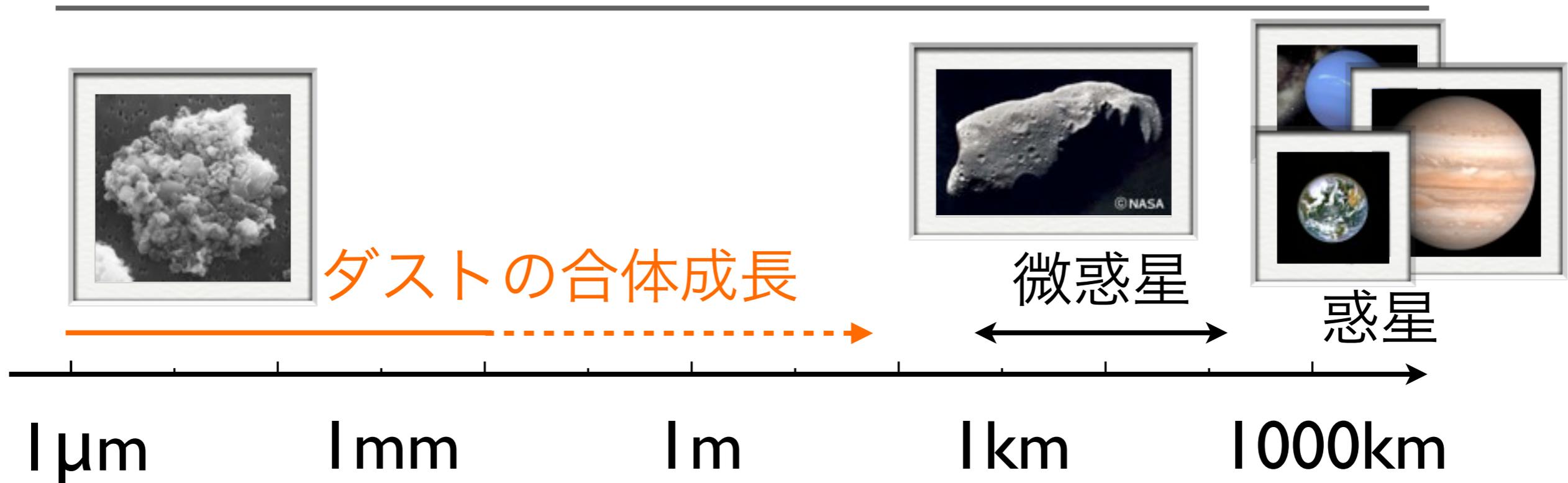
- 円盤形成
- **ダストが赤道面に沈殿**
- ダスト層で固体惑星形成
- ガス惑星形成
- 円盤消失



[http://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq\\_ten\\_007.html](http://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_007.html)

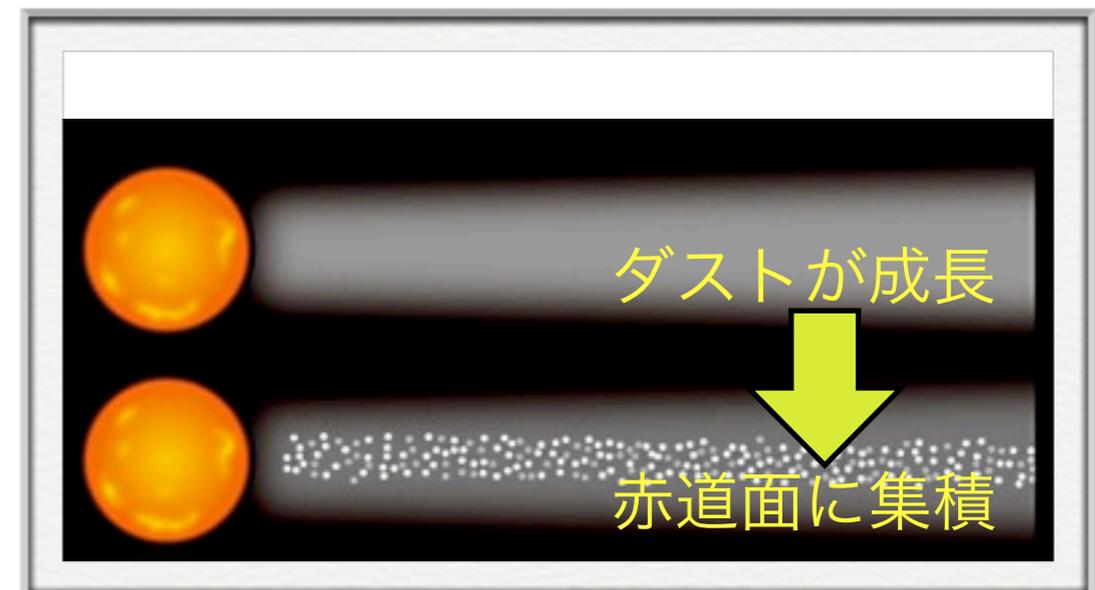
ダスト合体成長・沈殿過程 = 惑星形成第一段階

# ● ダストの合体成長

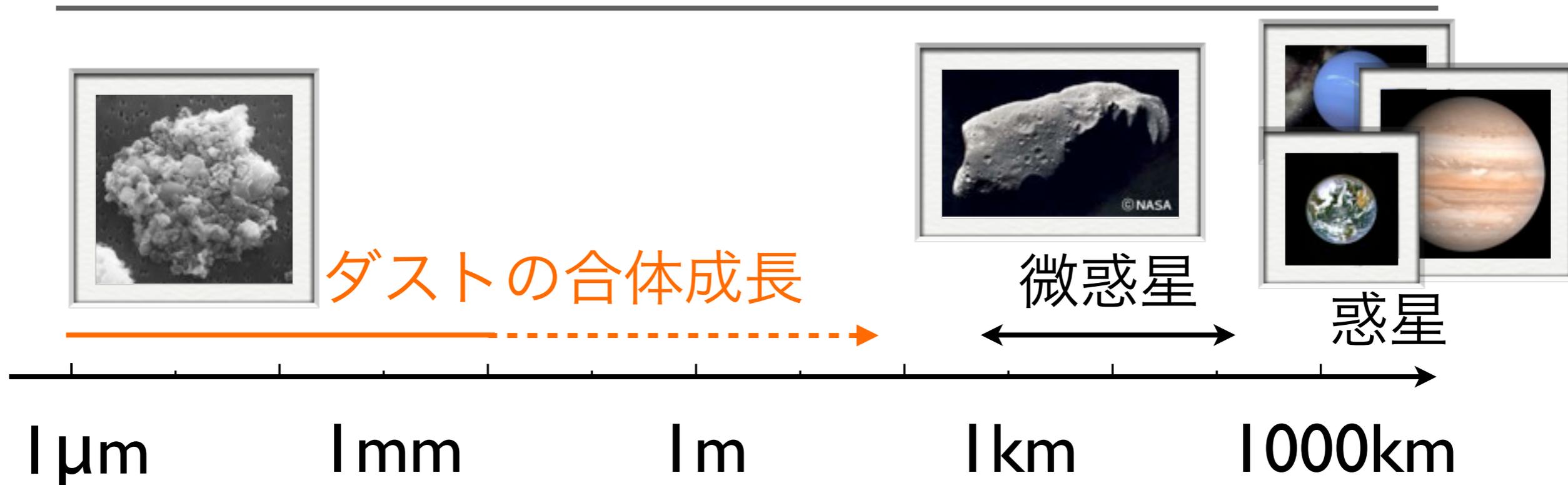


## 微惑星形成理論

- ダスト層で自己重力不安定？
- 直接合体成長？

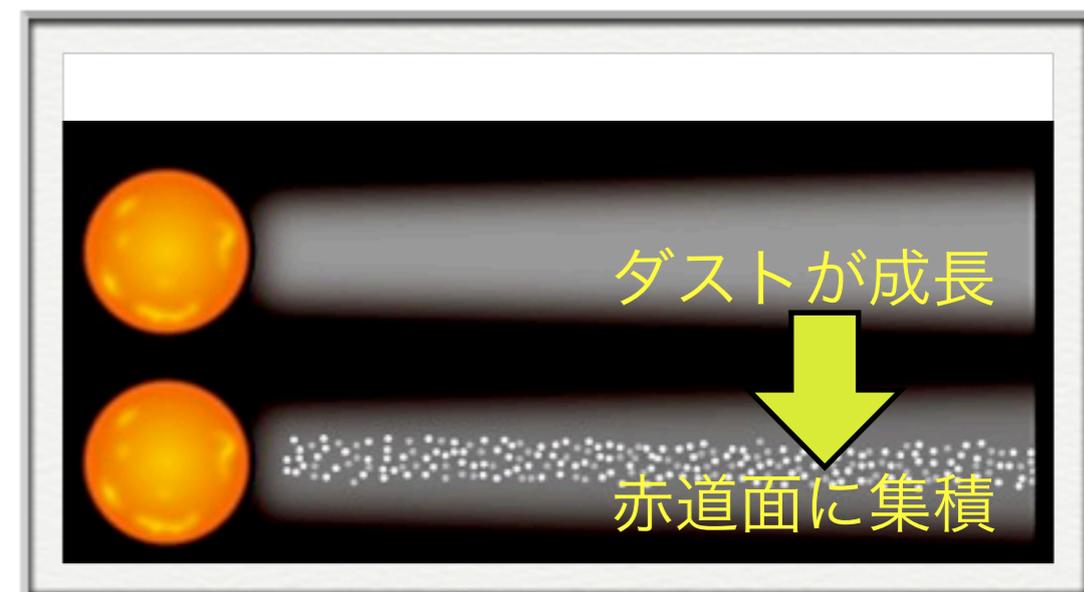


# ● ダストの合体成長



## 微惑星形成理論

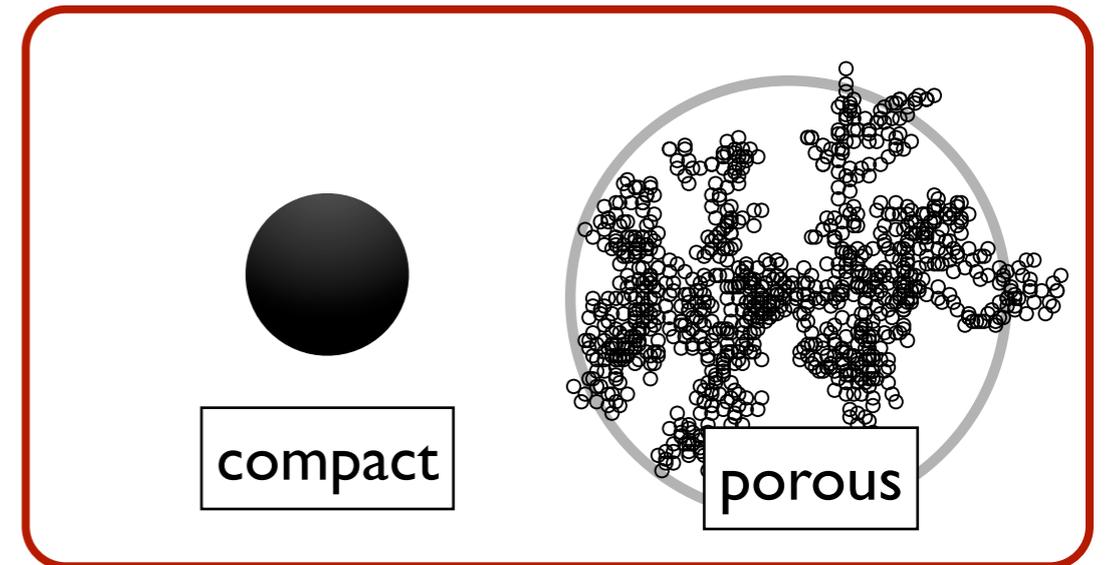
- ダスト層で自己重力不安定？
- 直接合体成長？



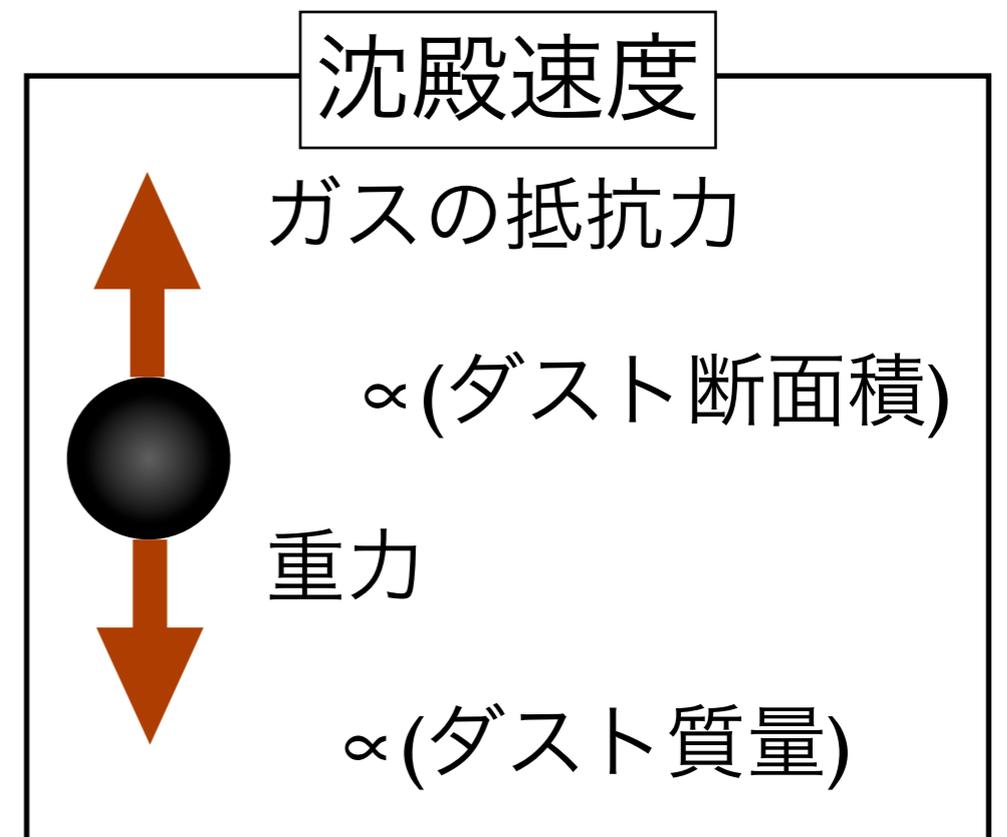
本当にダスト層は形成されるのか

# ● 空隙率

- 過去の研究はcompactダストを仮定
  - 実際は合体成長の過程でporousな成長をする
- 空隙率の影響
  - 沈殿速度が低下
  - 成長率の変化



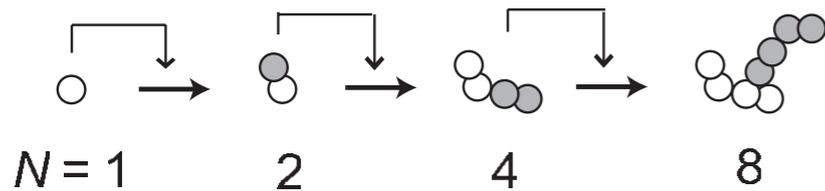
本研究では、空隙率が円盤内ダスト進化に及ぼす影響を調べる



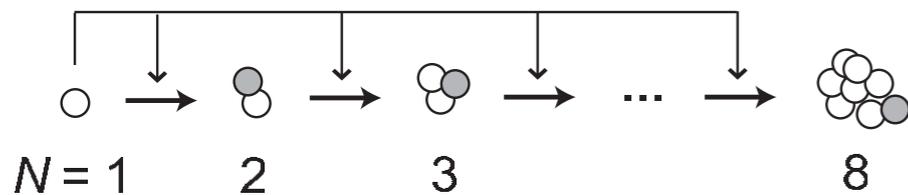
# ● 空隙率モデル (Okuzumi + 09)

## 合体成長するダストの質量-体積 関係のモデル

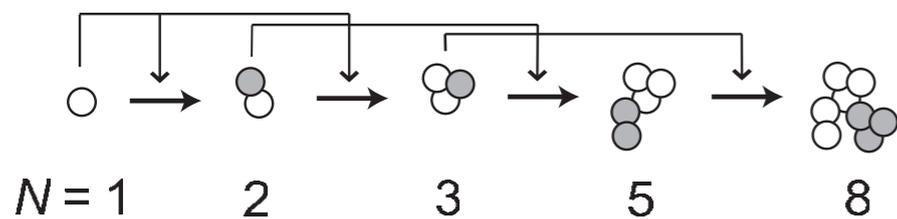
(a) BCCA



(b) BPCA



(c) QBCCA ( $\epsilon = 0.6$ )

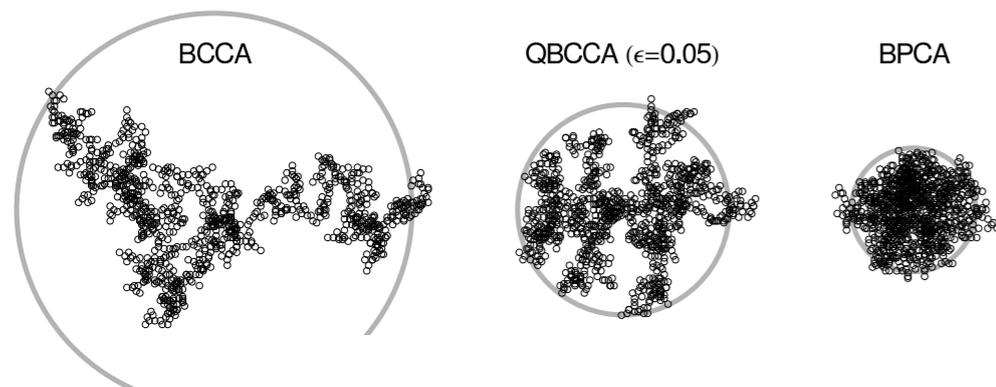


□ BCCA ( $D \approx 2$ ), BPCA ( $D \approx 3$ ) の2極限では良く知られていた

□ Quasi-BCCA (Okuzumi + 09)

- 衝突するダストの質量(体積)比に応じて空隙率が進化

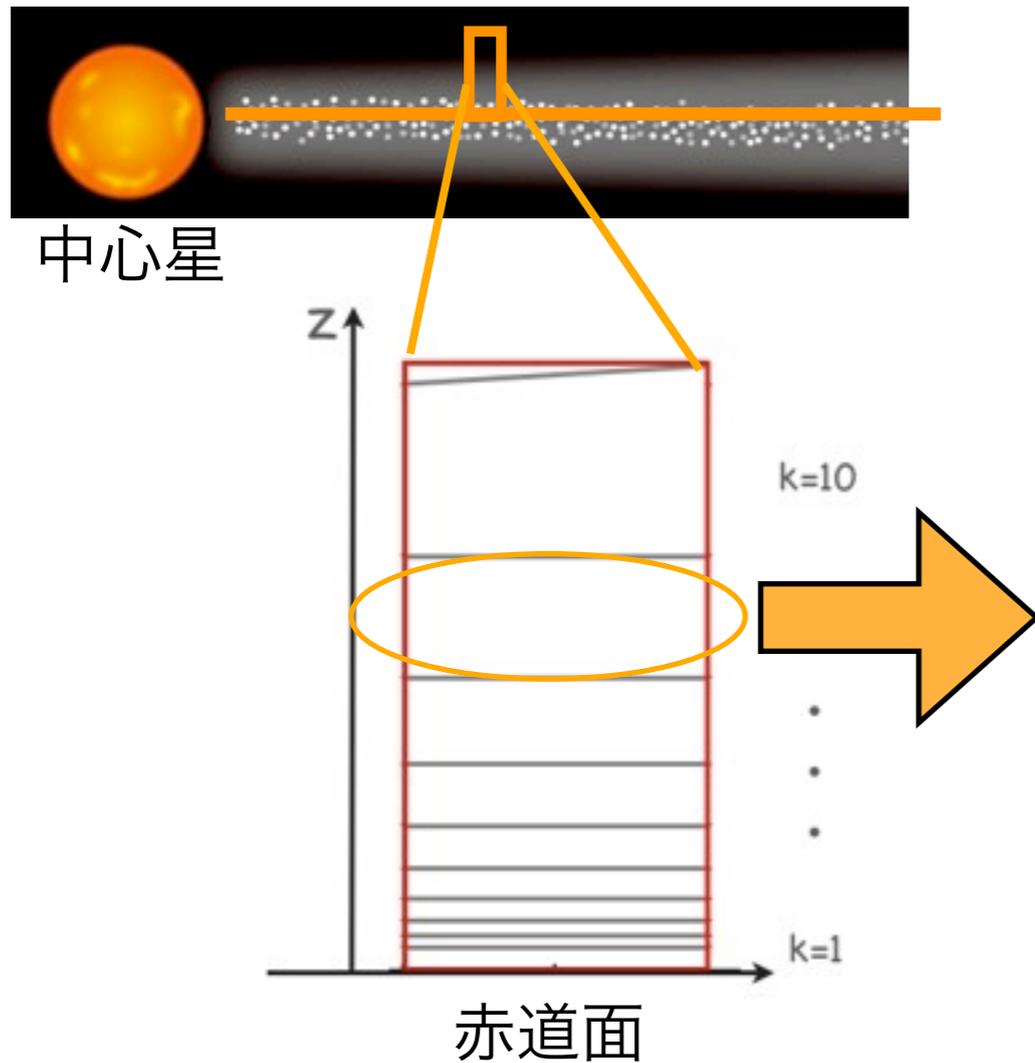
$$V_{1+2} = V_1 + (1 + \chi)V_2, \quad \text{但し} \quad \chi = f\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$



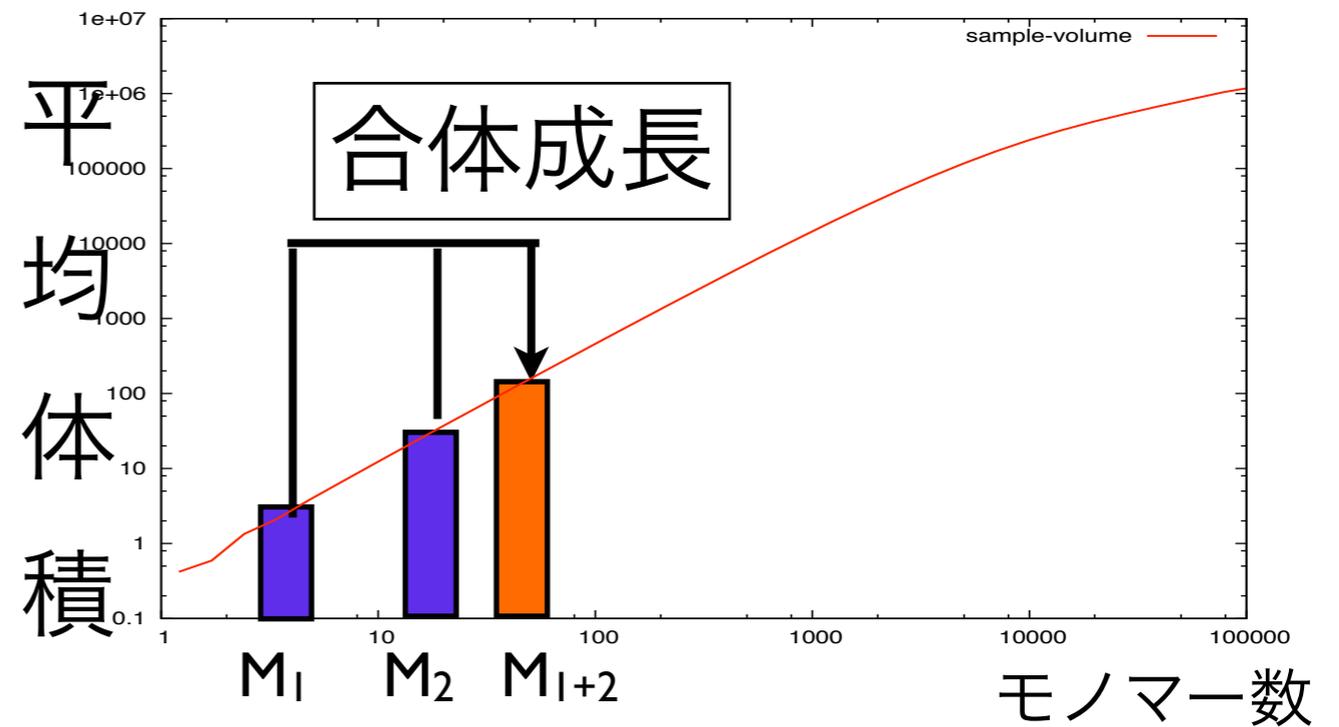
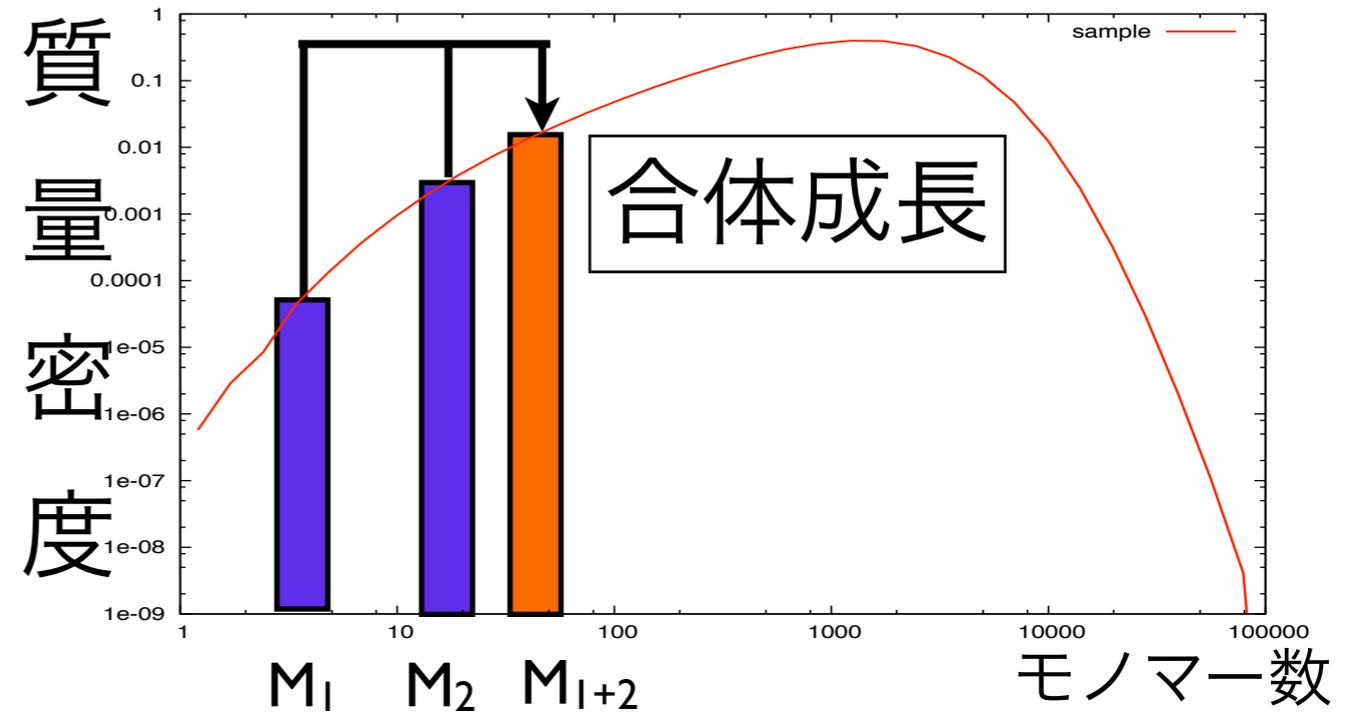
本研究ではQBCCA modelを用いて円盤内ダストの空隙率進化を計算

# 本研究

# ● 計算モデル



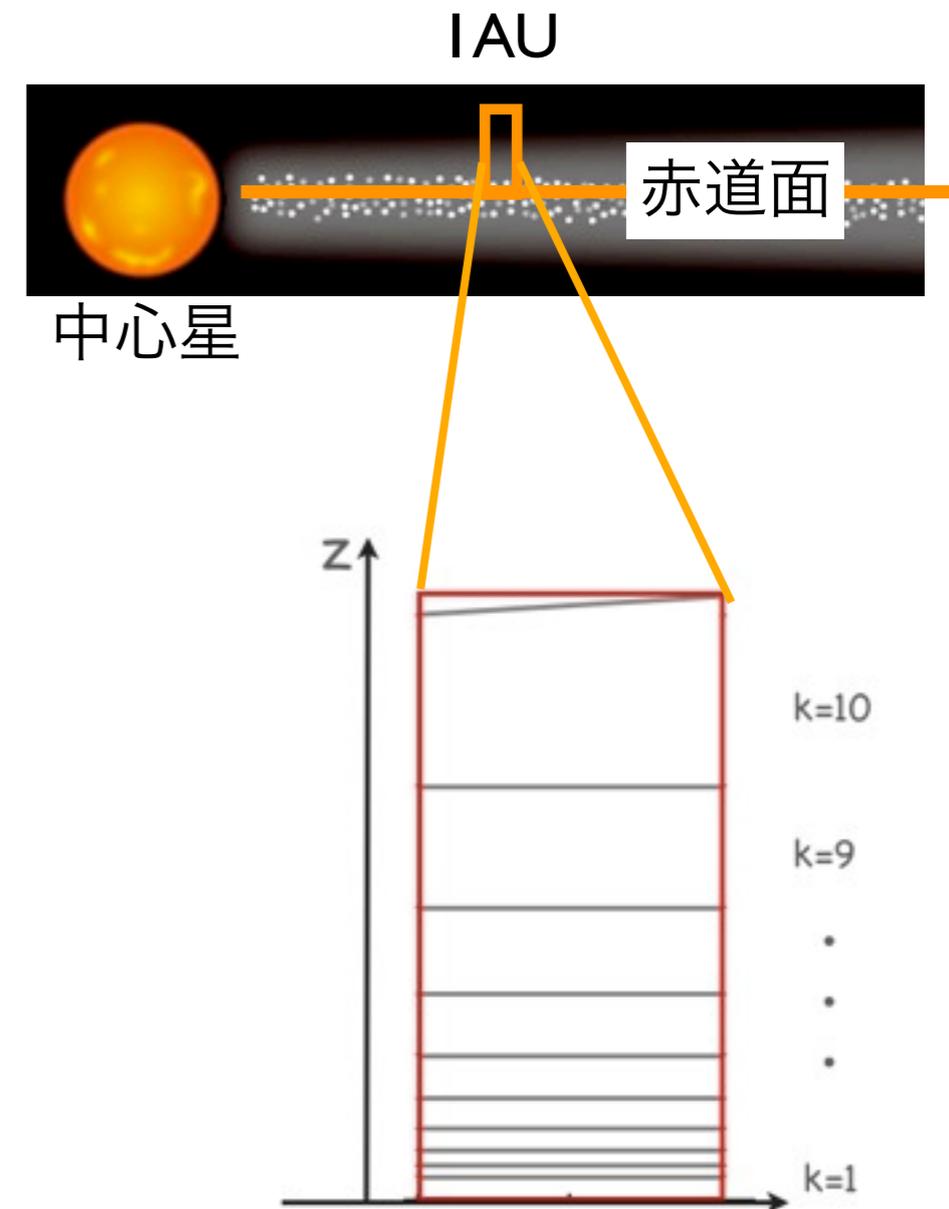
(衝突確率)=(断面積) $\times$ (速度差)  
 速度差としてブラウン運動・  
 沈殿速度差を考慮



→2つの合体成長方程式を同時に解く

# ● 計算設定

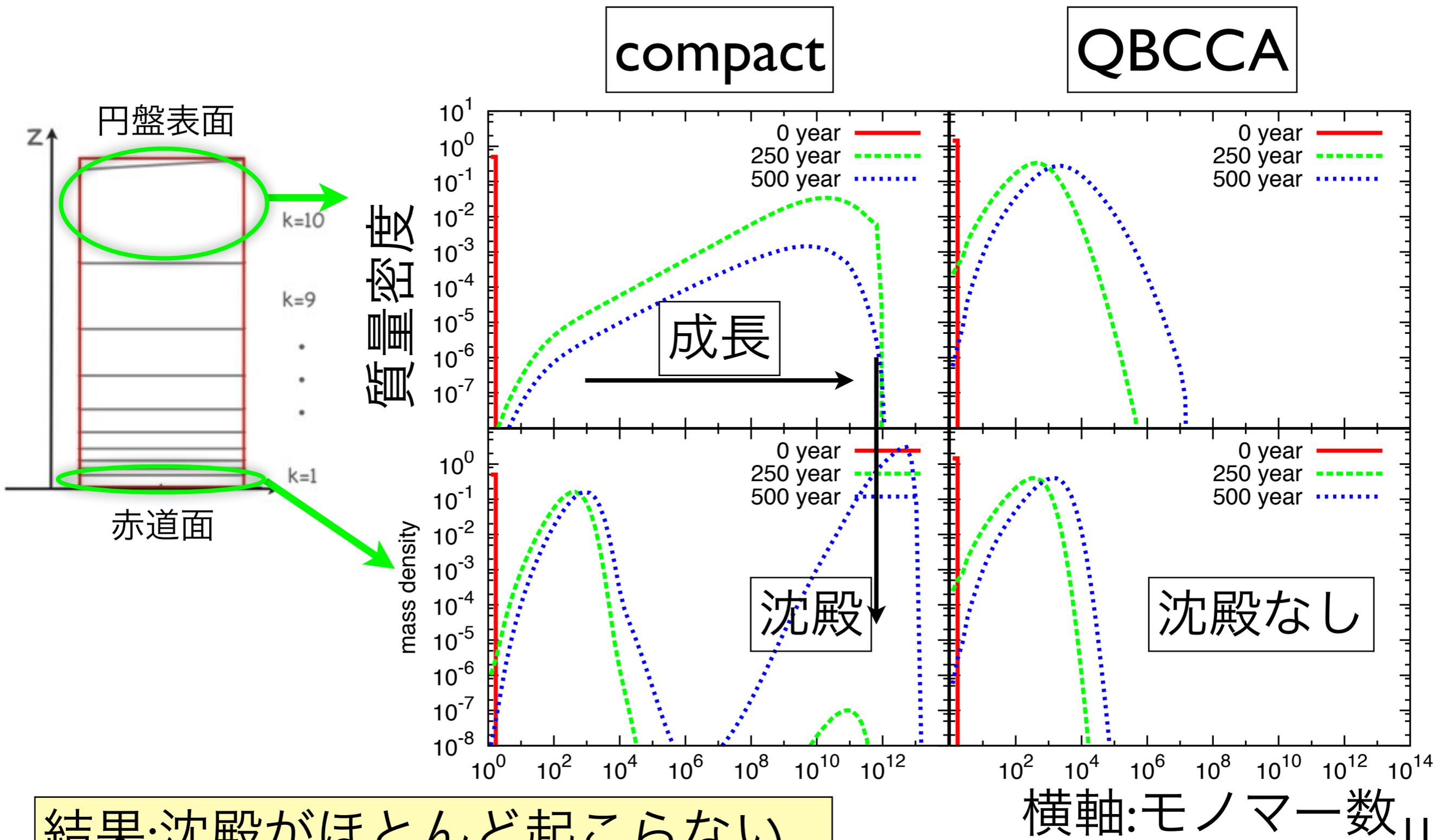
- 最小質量太陽系円盤の地球軌道
- モノマー数を50グリッド、空間(z方向)10グリッドに設定
- ガスは静止, z方向一様分布
- 初期ダスト:質量がガスの0.01倍、コンパクトな $1\mu\text{m}$ ダストのみ
- 高さ方向沈殿を考慮(QBCCAモデルで初めて)



沈殿が起こるかどうかに着目して計算

# 結果

# ● 結果：質量密度分布



結果:沈殿がほとんど起こらない

横軸:モノマー数

# ● 議論：フラクタル次元

□ (質量)  $\propto$  (半径)<sup>D</sup>

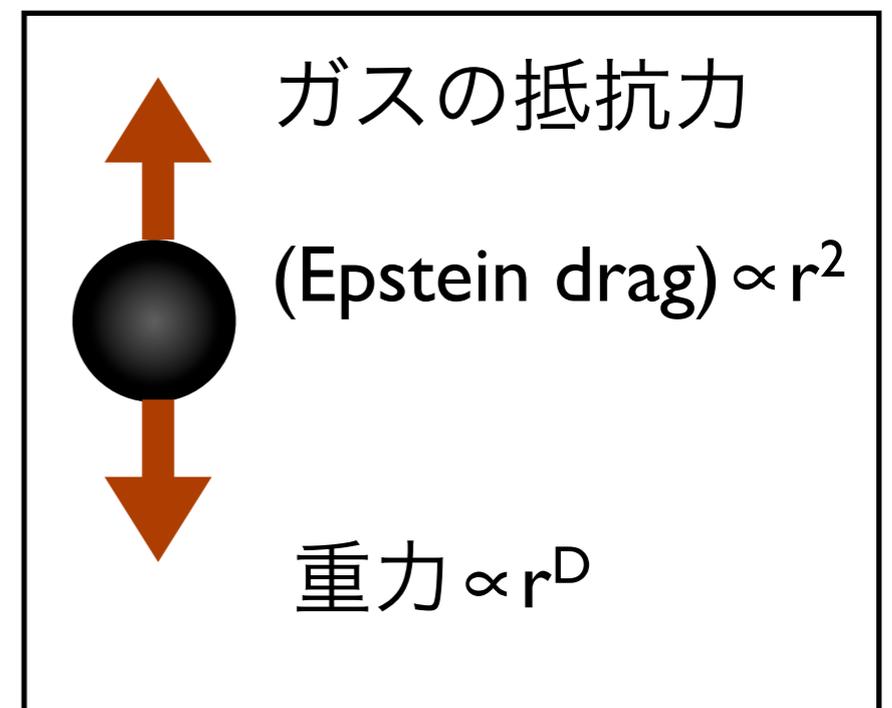
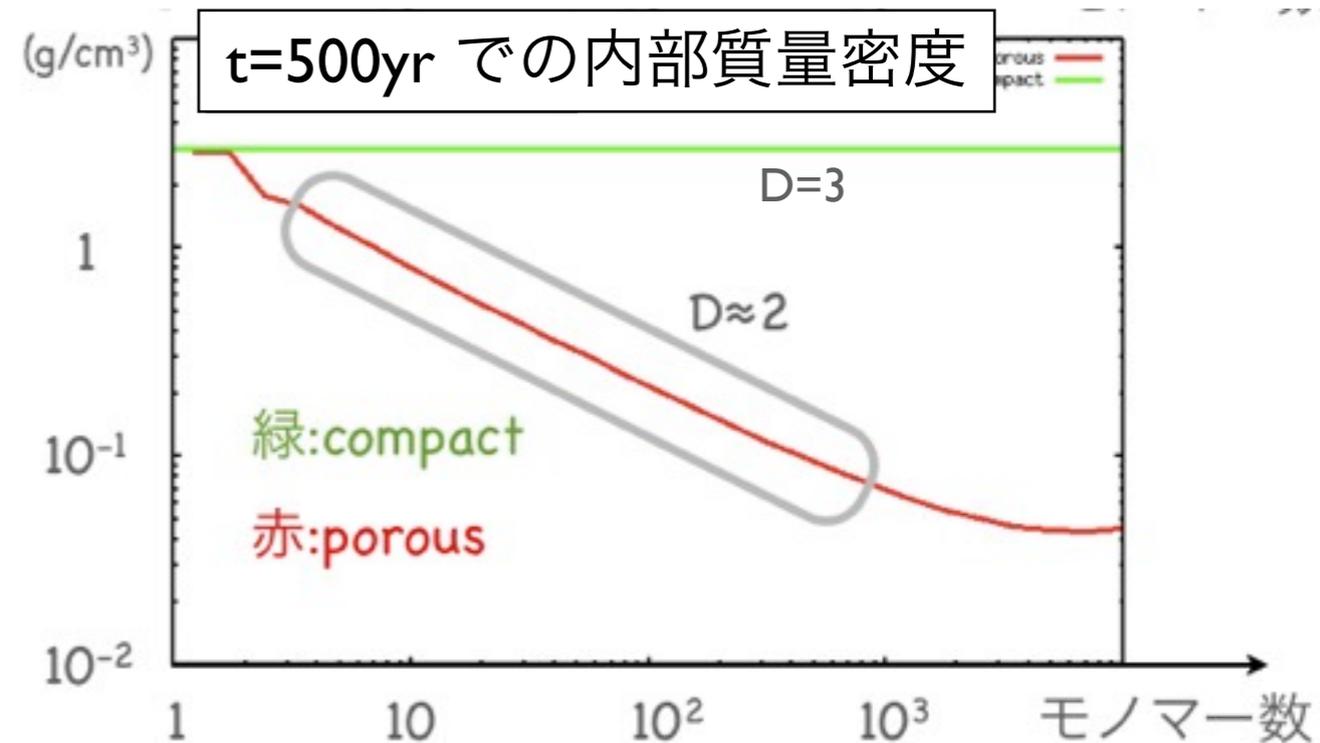
□ 沈殿速度

$$v_{\text{sett}} = \frac{3\Omega_K^2 z}{4\rho_{\text{gas}} v_{\text{th}} \sigma_{\text{aero}}} \frac{m}{\sigma_{\text{aero}}} \propto r^{D-2}$$

□ 本結果はほぼD $\approx$ 2

- 沈殿速度は半径に依存しない
- 成長しても沈殿速度が小さく、ダスト間の速度差も小さい

ダスト沈殿にはフラクタル次元が重要なパラメータ



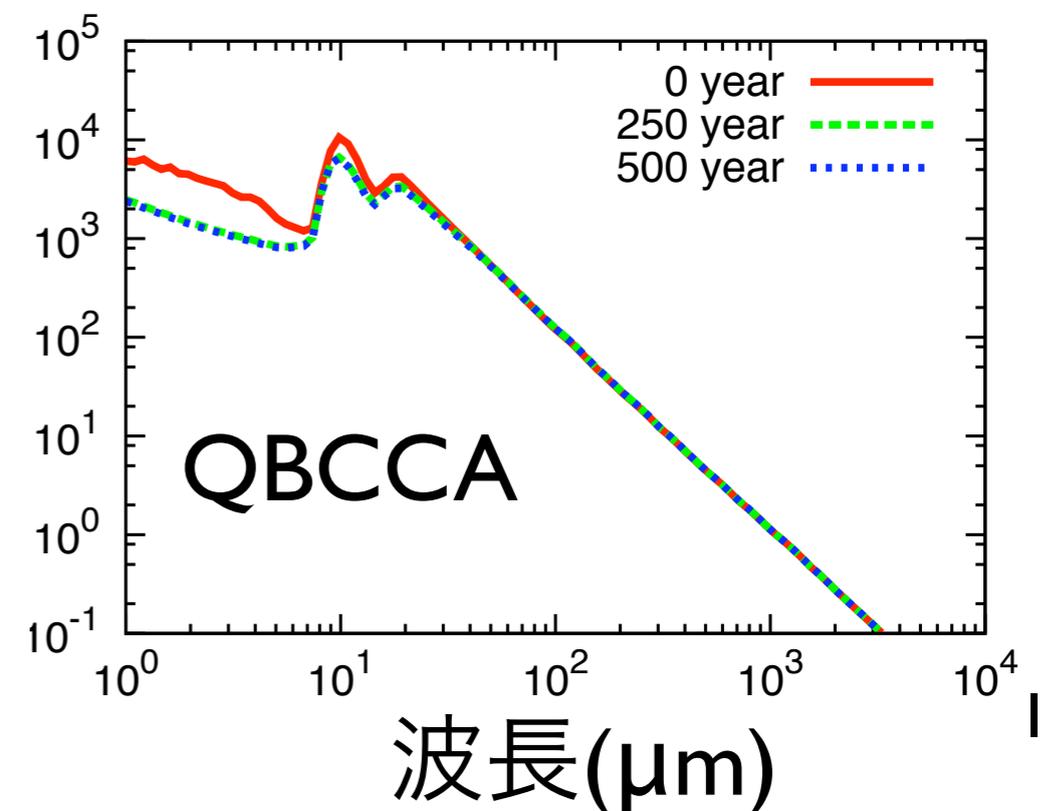
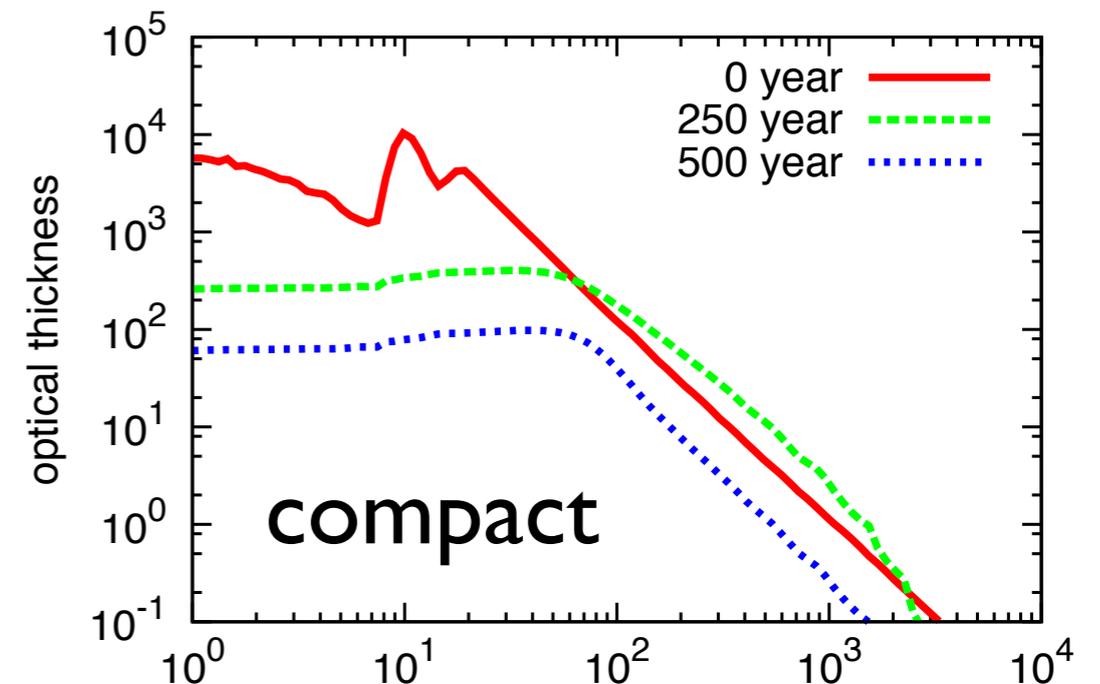
# ● 議論：光学的厚さ

## □ 計算手法

- 光学的厚さを高さ方向積分
- 組成はシリケイトを仮定
- MG-Mie理論を採用

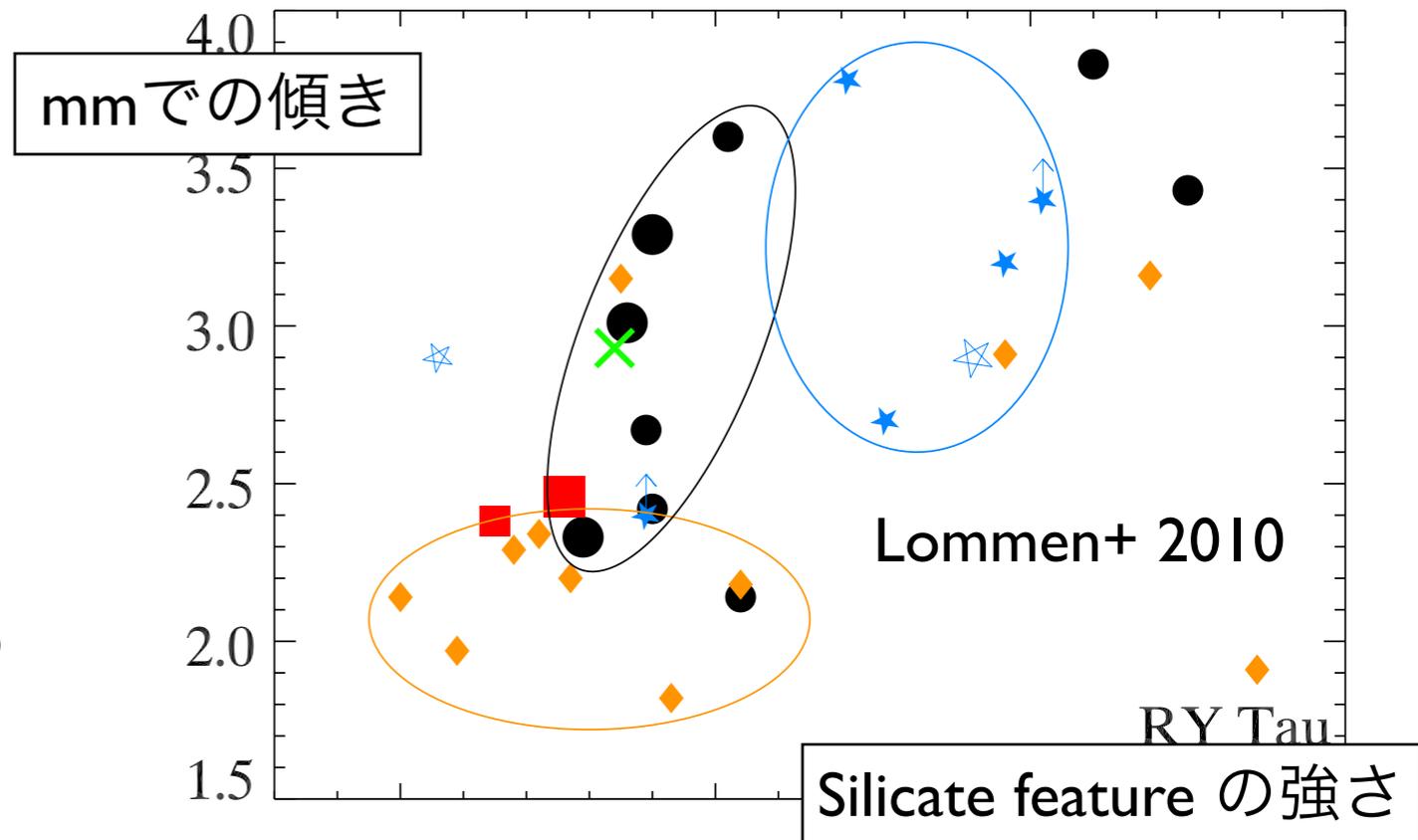
## □ 結果

- compactではシリケイトの特徴的構造がダスト成長とともになくなる
- porousでは合体成長してもほとんど形が変わらない



# ● 観測との比較 (Lommen+ 2010)

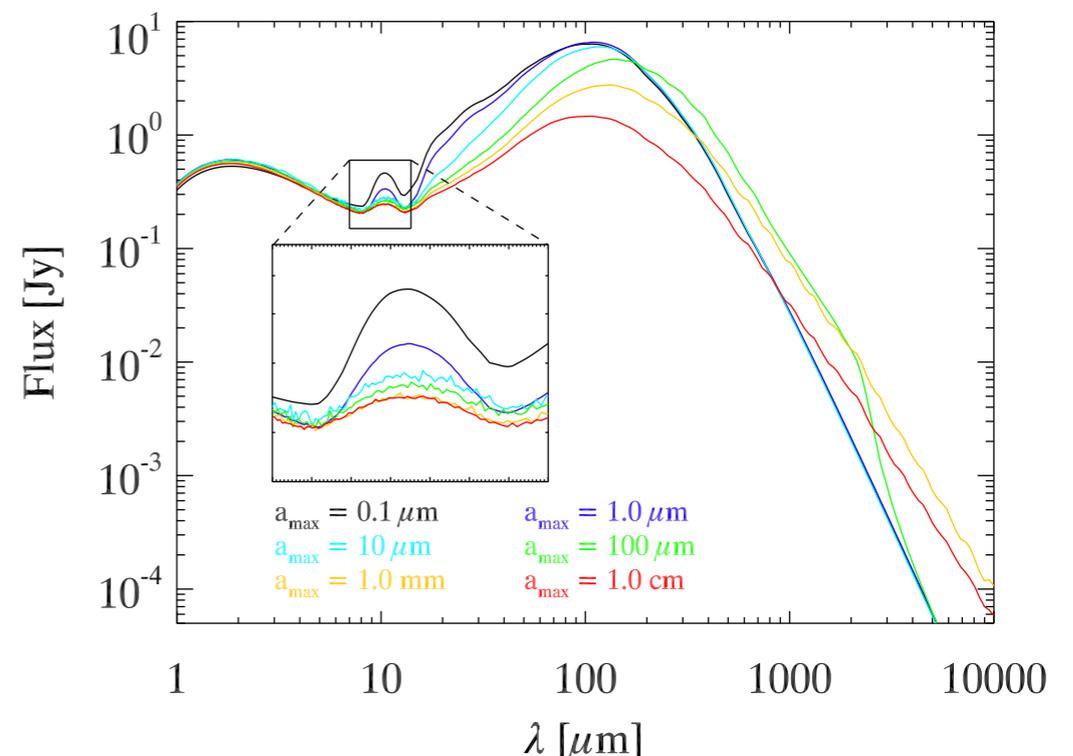
- 観測 : 5つの星形成領域中の円盤からのダスト放射を解析
- 一般的に、ダストが成長するにつれ  $10\ \mu\text{m}$  Silicate featureが小さくなりミリ波のSEDの傾きが緩やかになる



## □ 本研究との比較

- $10\ \mu\text{m}$  Silicate featureは成長が早すぎるのでcompactモデルでは再現できない

\*ただし、比較するためには円盤全体の放射Fluxを計算する必要がある



# ● まとめ

---

- 空隙率進化するダストの合体成長・沈殿過程をシミュレーションし、地球軌道での計算結果を解析した。
- 円盤内ダスト進化
  - compactな場合は500年程度で約1cmに成長し沈殿するのに対し、QBCCAモデルの場合は成長速度が遅く沈殿もほとんど起こらない
  - →ダスト進化にはフラクタル次元が大きな影響を及ぼす
- 光学的厚さ
  - compactな場合、光学的厚さは10 $\mu$ mのSilicate featureやミリ波・サブミリ波での傾きが変化するのに対し、QBCCAモデルの場合は光学的厚さはほとんど変化しない。
- 今後はガス分布や円盤上層部での成長を吟味する必要がある