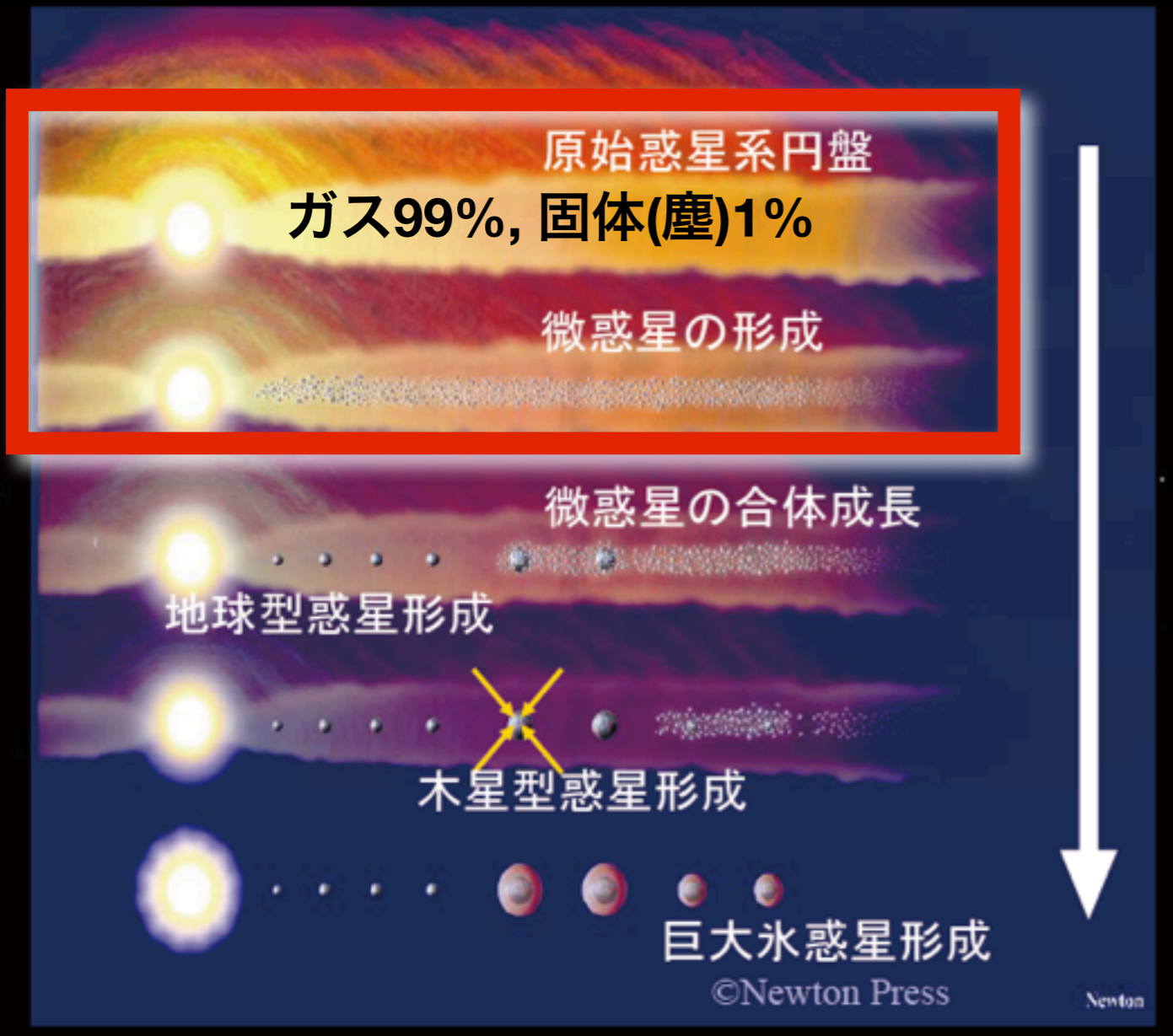


微惑星形成

奥住 聡

微惑星形成

惑星系形成標準モデル (コア集積モデル)



ダスト (<math><\mu\text{m}</math>)



微惑星 (>km)

「いつ?」

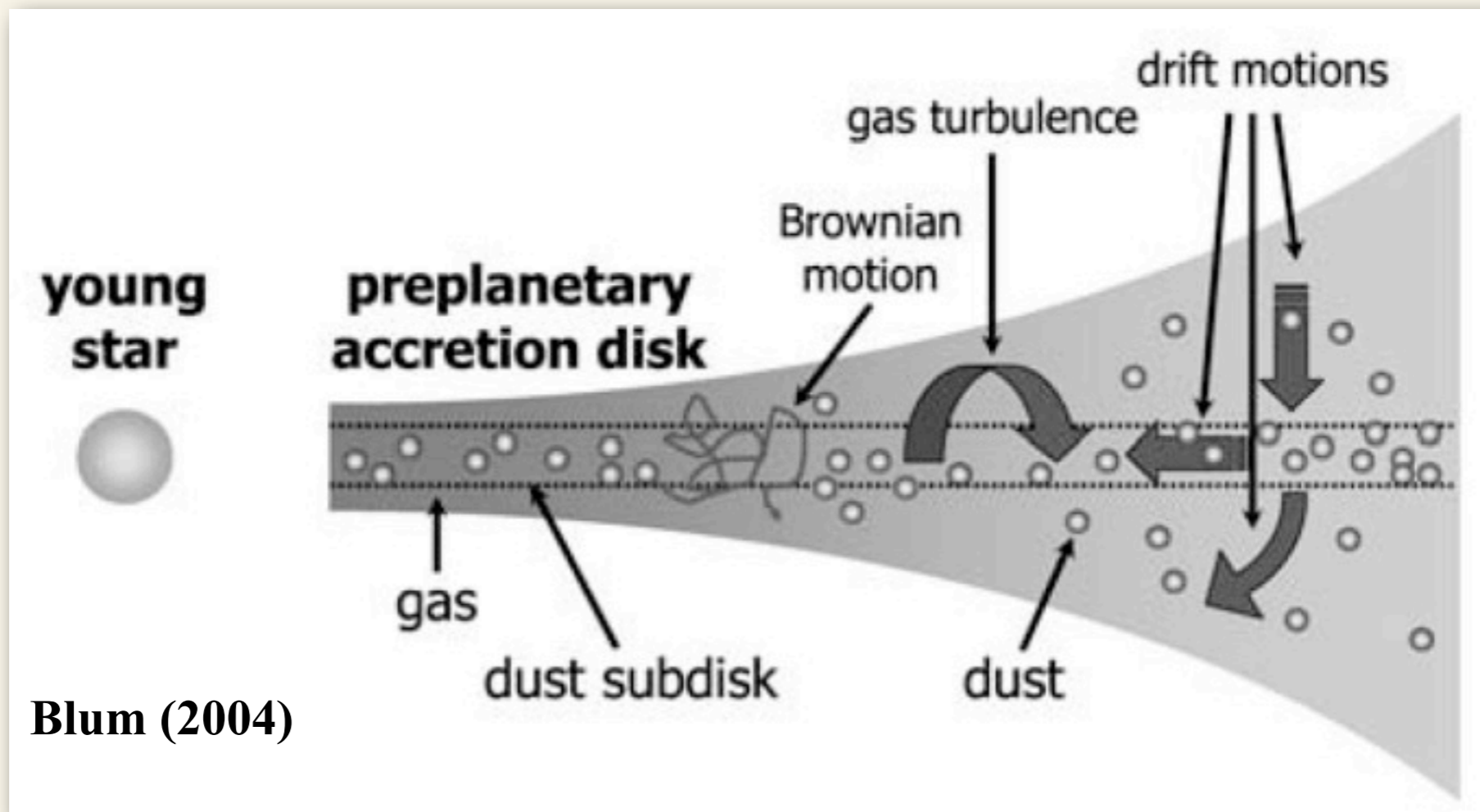
「どこで?」

「どのように?」

「どんなものが?」

ダスト進化の基本素過程

- ✓ **ダスト粒子の衝突** (合体/跳ね返り/破壊, 内部構造進化)
- ✓ **ダスト粒子の運動** (赤道面沈殿, 中心星落下, 乱流拡散/濃集)
- ✓ **ダスト集団の不安定性** (重力不安定, 2流体不安定)



微惑星形成の理解に必要な素過程

● **ダスト(およびその塊)の衝突**

- 衝突結果(outcome): 合体 / 跳ね返り / 破壊, 内部構造変化
- パラメータ依存性 (速度, サイズ, サイズ比, 内部密度, 組成)

● **ガス円盤内でのダストの運動**

- 層流 → よくわかっている (中心星落下)
- 乱流 → 部分的にわかっている (拡散, 濃集)
- 音波 → ほとんどわかってない

● **ガス円盤の構造 (環境条件)**

- 温度 (組成を決める)
- 密度構造 (ダストの移動方向を決める)
- 乱流構造

● **初期条件 (円盤形成の情報)**

微惑星形成の古典的問題

衝突破壊問題

- 衝突速度は、円盤乱流がなければ最大で数十 m/s 程度。
- そのような高速度で付着合体できるのか？
- 円盤乱流はどのくらい状況を厳しくするか？

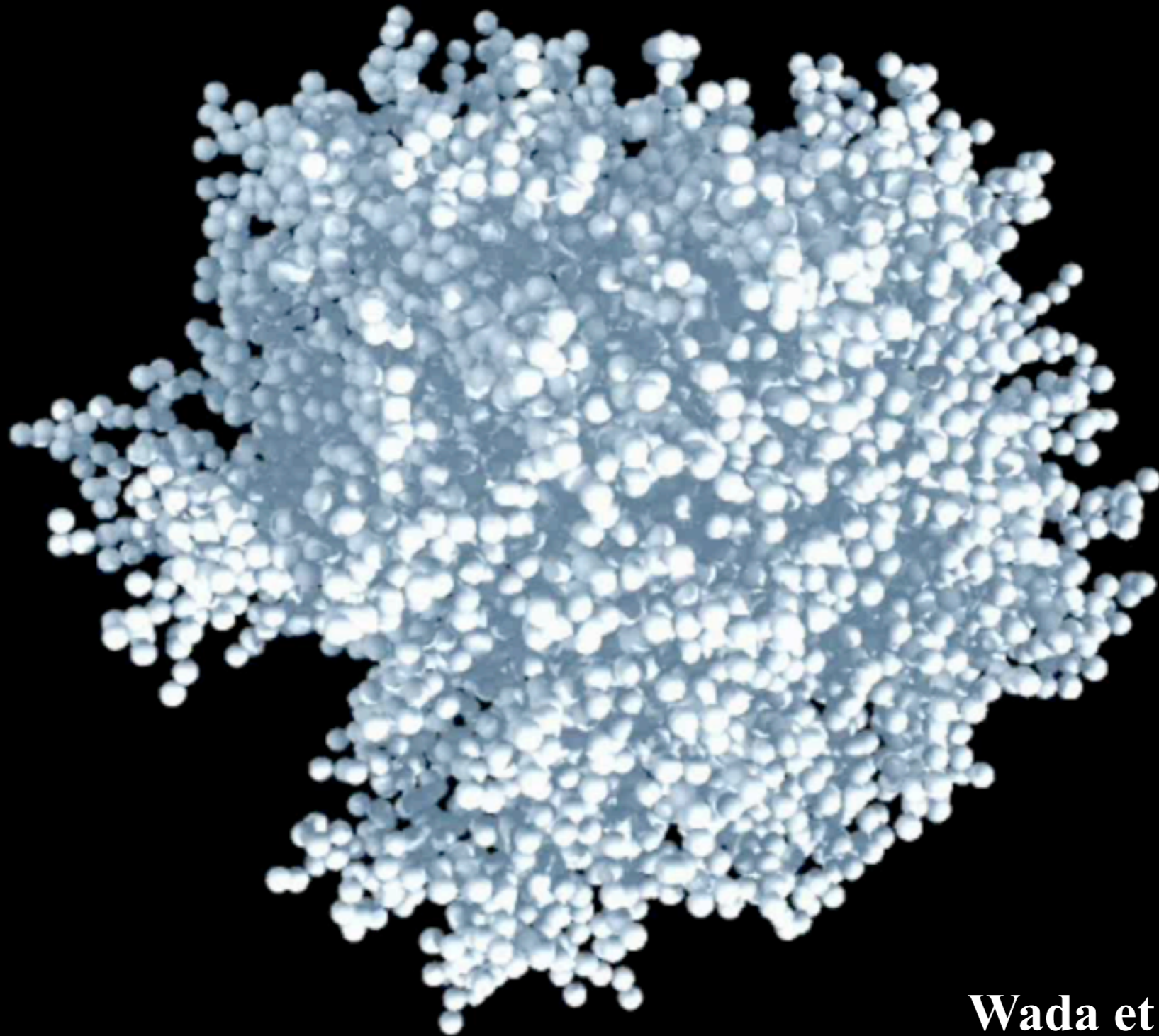
中心星落下問題

- 中間的サイズのダストは 1 AU / 100年で落下する。
- それより短い時間スケールで成長できるか？
- 落下を食い止める円盤構造は自然に作られうるか？

ダスト重力不安定の困難

- 乱流拡散によって容易に安定化される。
- 小スケールでの乱流濃集は効くか？

ダスト衝突数値実験



Wada et al. (2009)

ダスト成長可能速度に対する現状の理解

等サイズ($0.1\mu\text{m}$)の粒子で構成された、等サイズのアグリゲイトの衝突に対する臨界破壊速度

rock: $\approx 6 \text{ m/s}$

ice: $\approx 60 \text{ m/s}$

Wada et al. (2009)

これに対し、層流円盤中でのダストの最大衝突速度は約 30m/s (ガスの温度や圧力分布にもよりますが。)

岩石質ダストは成長し続けられない

氷ダストは、(乱流が強過ぎなければ)成長し続けられる

ダスト内部構造進化 (低密度化)

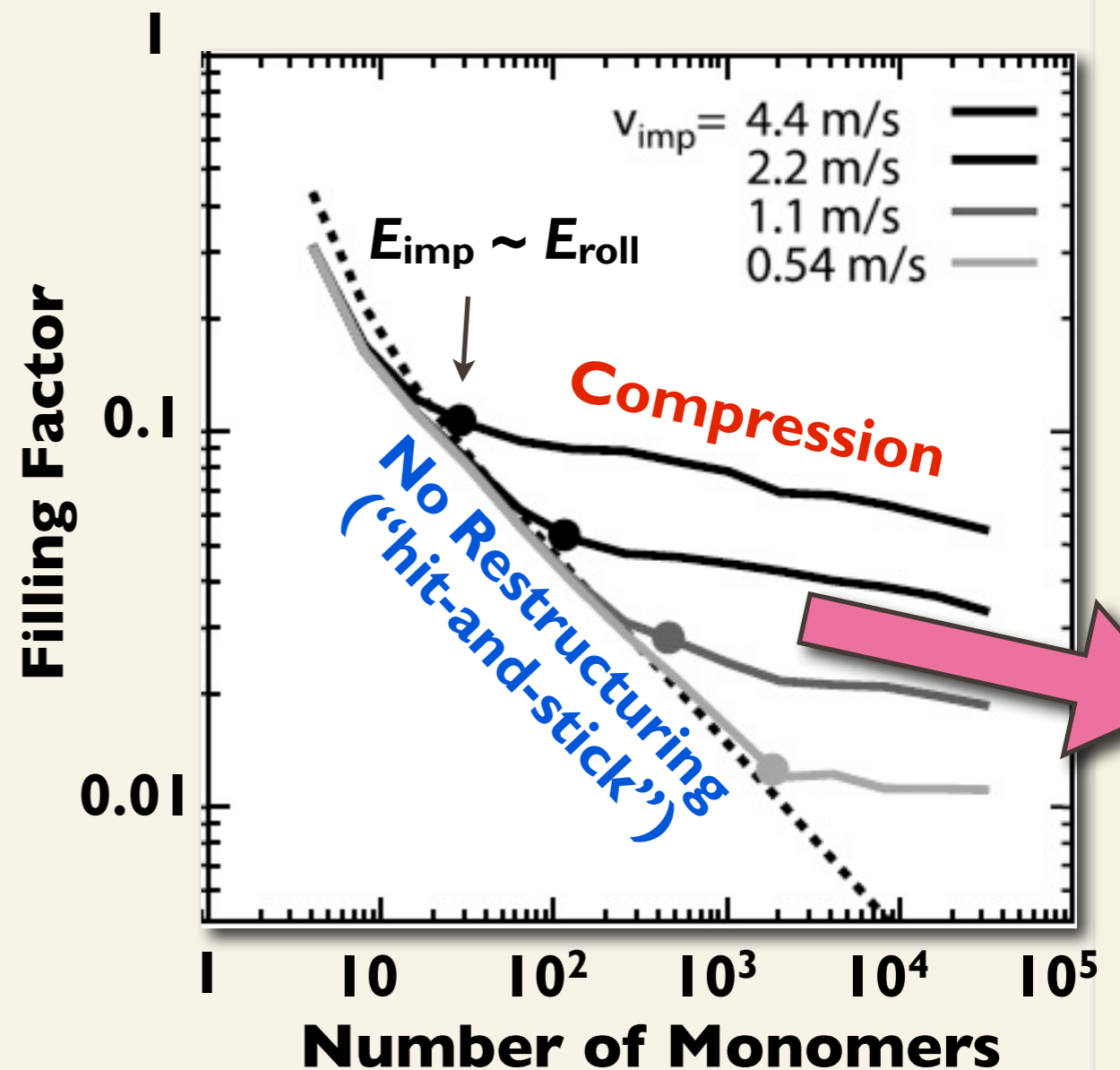


Suyama et al. (2008)

Collisional Compaction is Inefficient !

Suyama, Wada, & Tanaka (2008)

Suyama, Wada, Tanaka, & Okuzumi (2012)



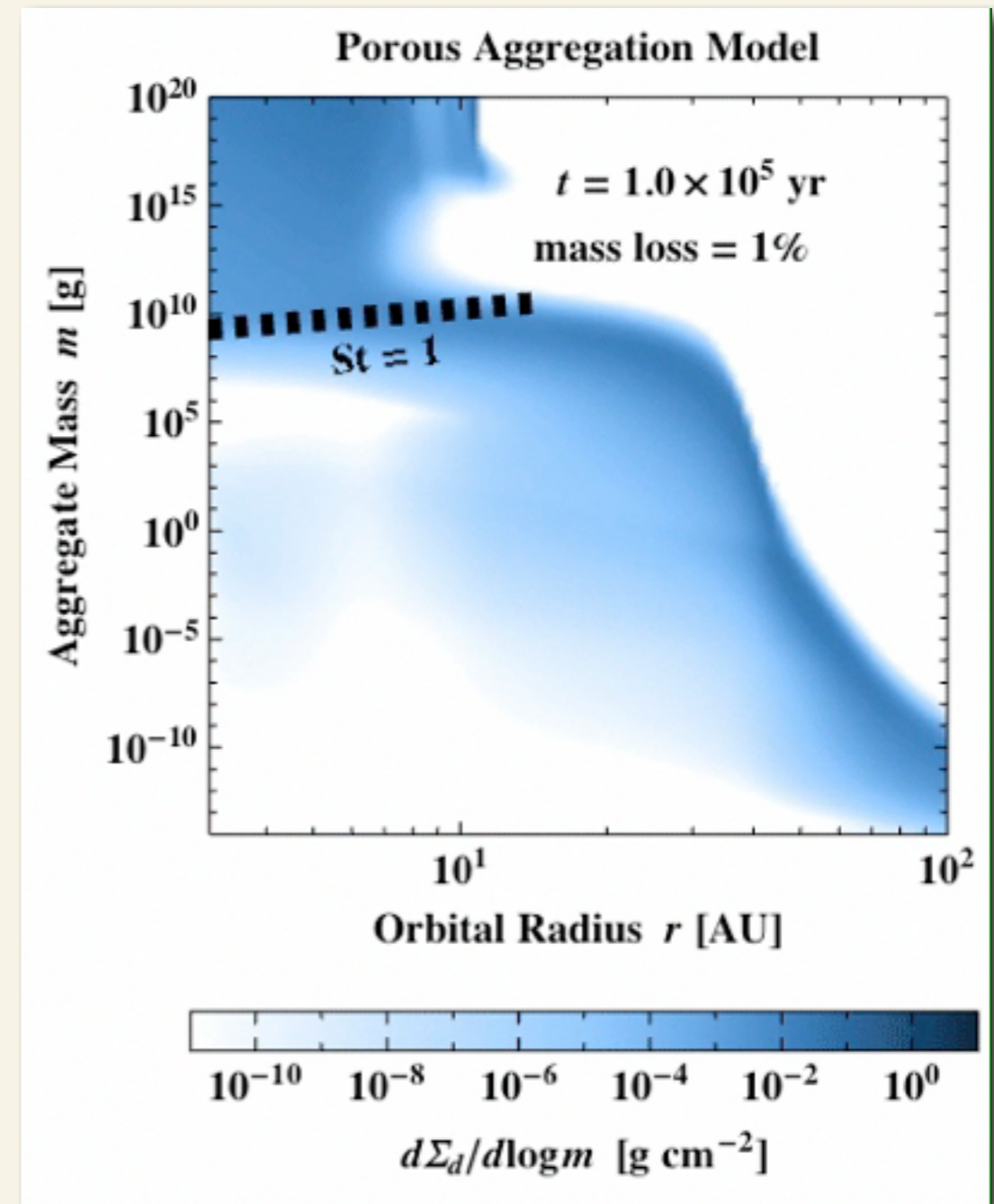
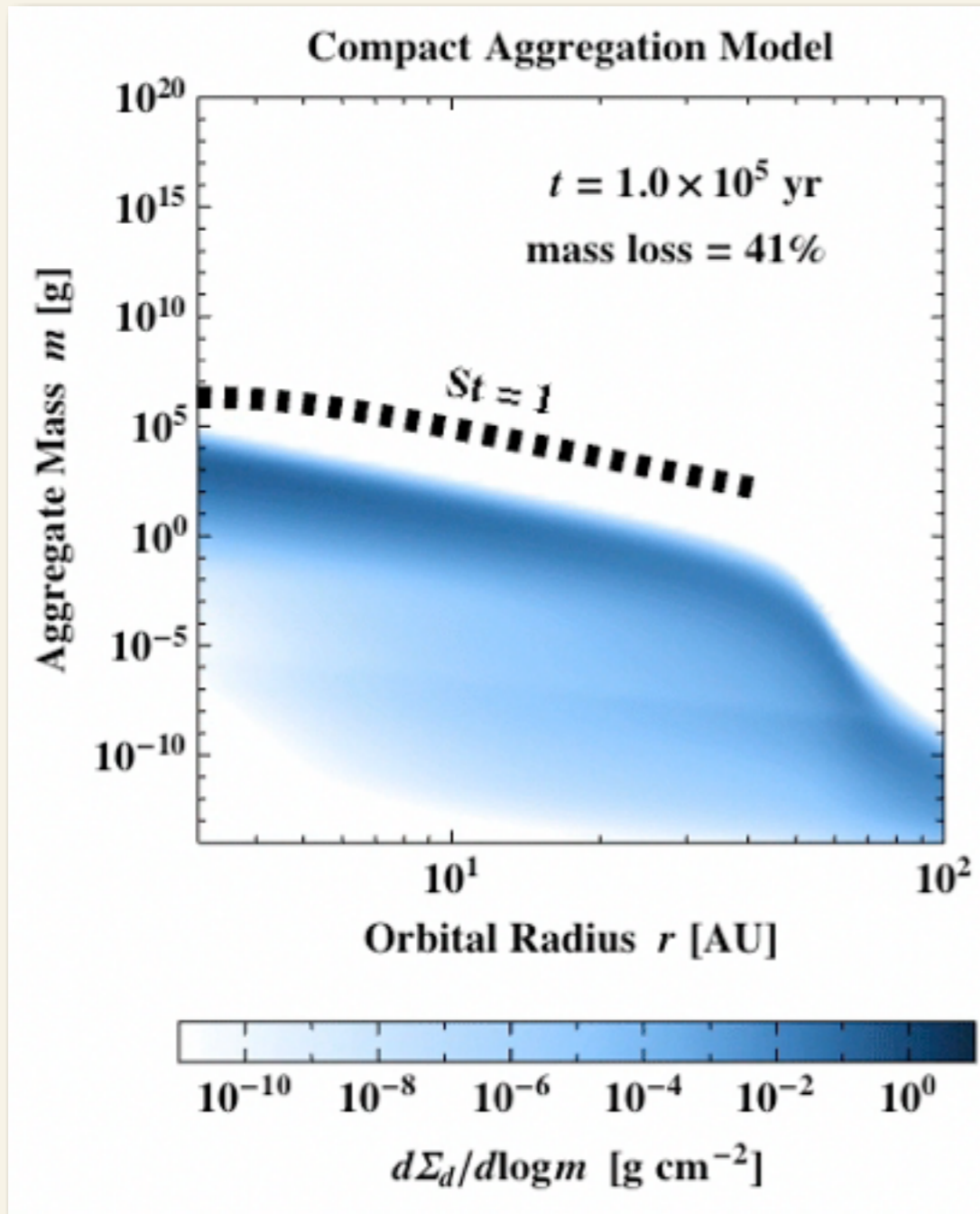
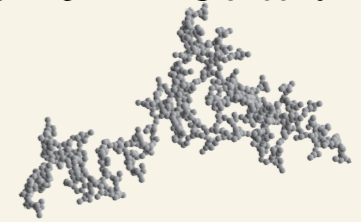
The filling factor can be $\ll 0.1$
even after the onset of collisional compression!

低密度化に伴う氷ダスト高速成長 (Okuzumi et al. 2012)

Compact



Porous



氷微惑星形成については2大問題は解決しました

岩石質微惑星の形成はどうか

岩石質ダストの低い臨界破壊速度 (少なくとも等サイズ衝突)

- ➡ 明らかに単純な衝突合体ではうまく説明できない。
- ➡ 氷微惑星とは別の (もっと面倒な?) 機構で形成されたと考えざるを得ない。

例えば、

**ダストの成長、移動(動径方向)、
2流体不安定によるダスト濃集、
ダスト重力不安定を全部組み合わせる**

ダスト濃集領域の重力不安定

- ダストをロッシュ密度以上に濃集すれば重力的に束縛される:

$$\rho_{\text{roche}} \sim \frac{M_*}{r^3} \sim 10^3 \rho_g$$

- ダストを平均場的にこのレベルに濃集するのは簡単でない (乱流拡散)
- 局所的、散発的にでいいから、濃集領域を作る方がより楽 (次スライド)

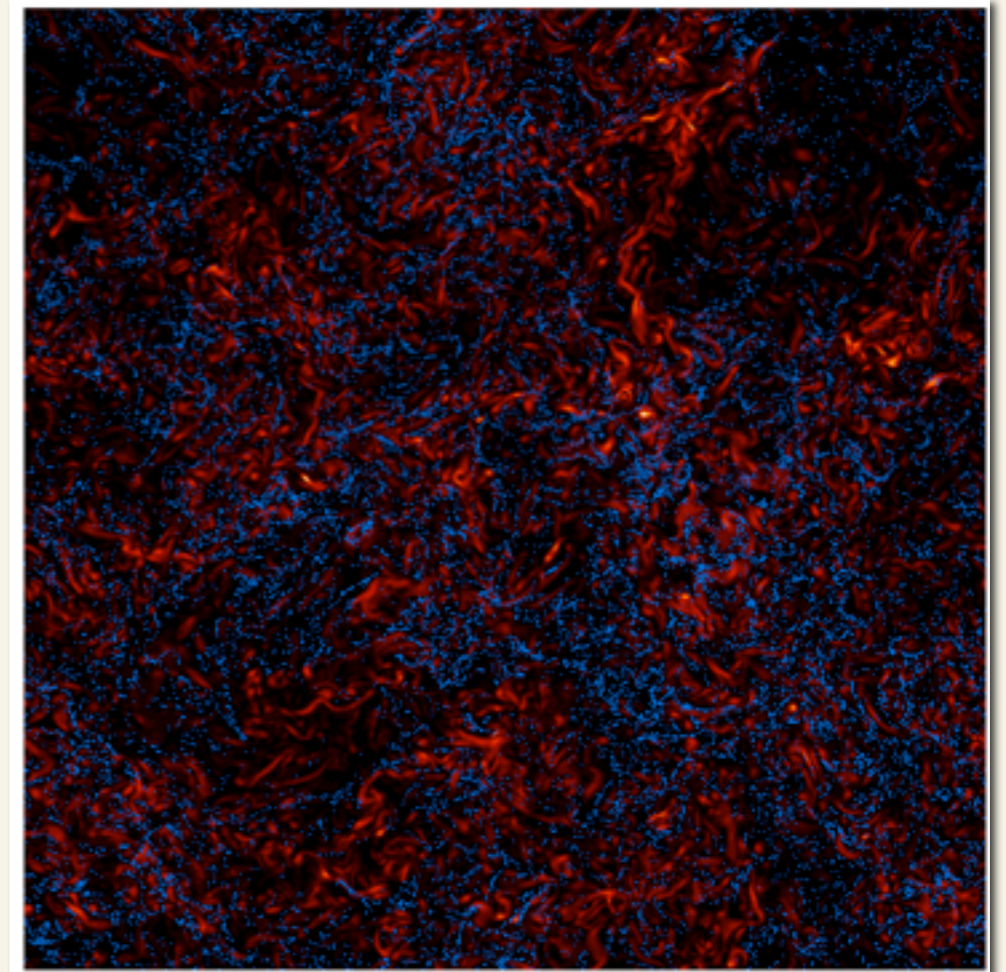
乱流中でのダスト濃集

- 最小渦の空間スケールに、最小渦の運動時間と同程度の制動時間を持つ固体(~mmサイズ)が選択的に集まる。
(現実的には 最小渦スケール ~ 1km)



粒子

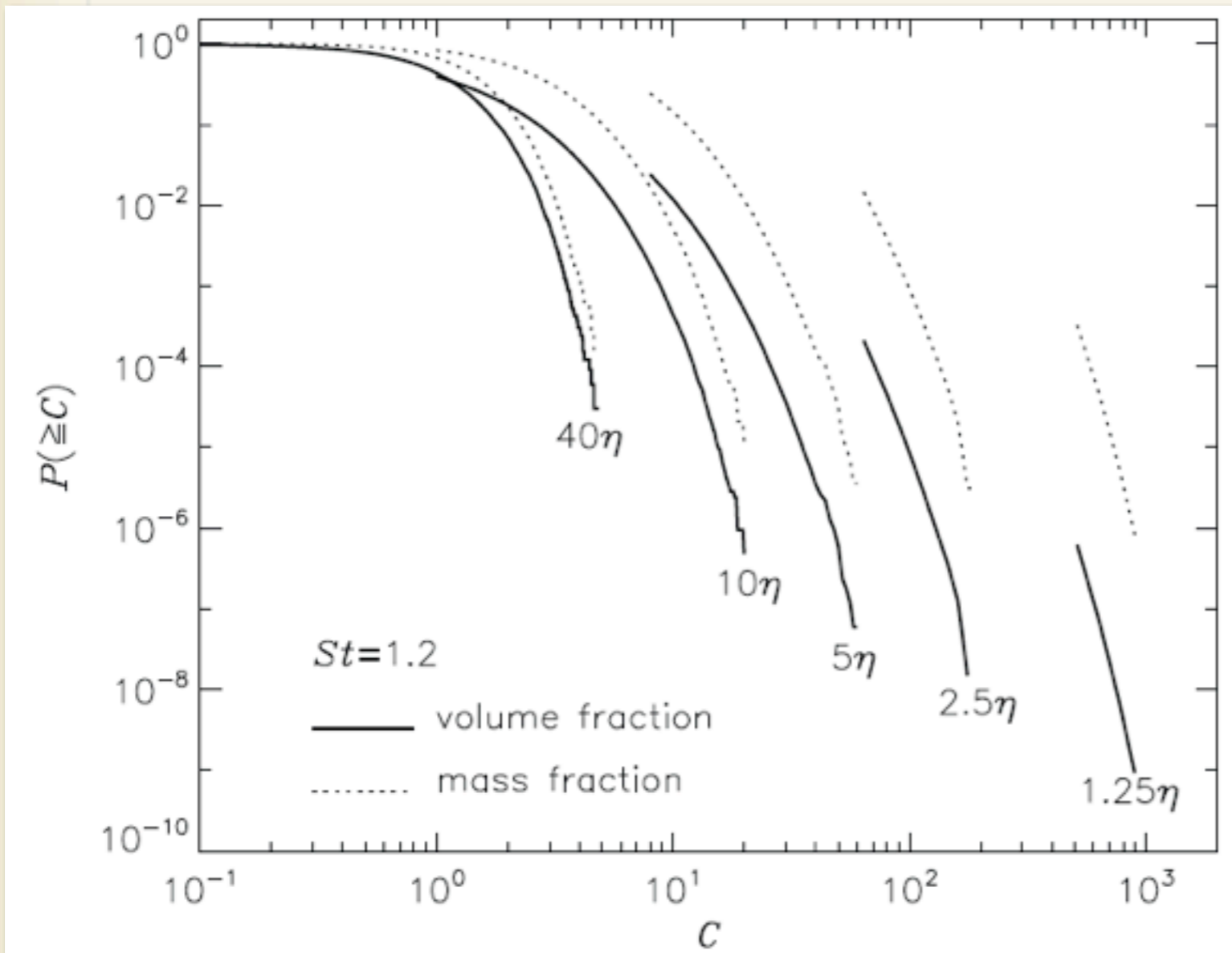
Pan et al. 2011



粒子 渦度

乱流中でのダスト濃集

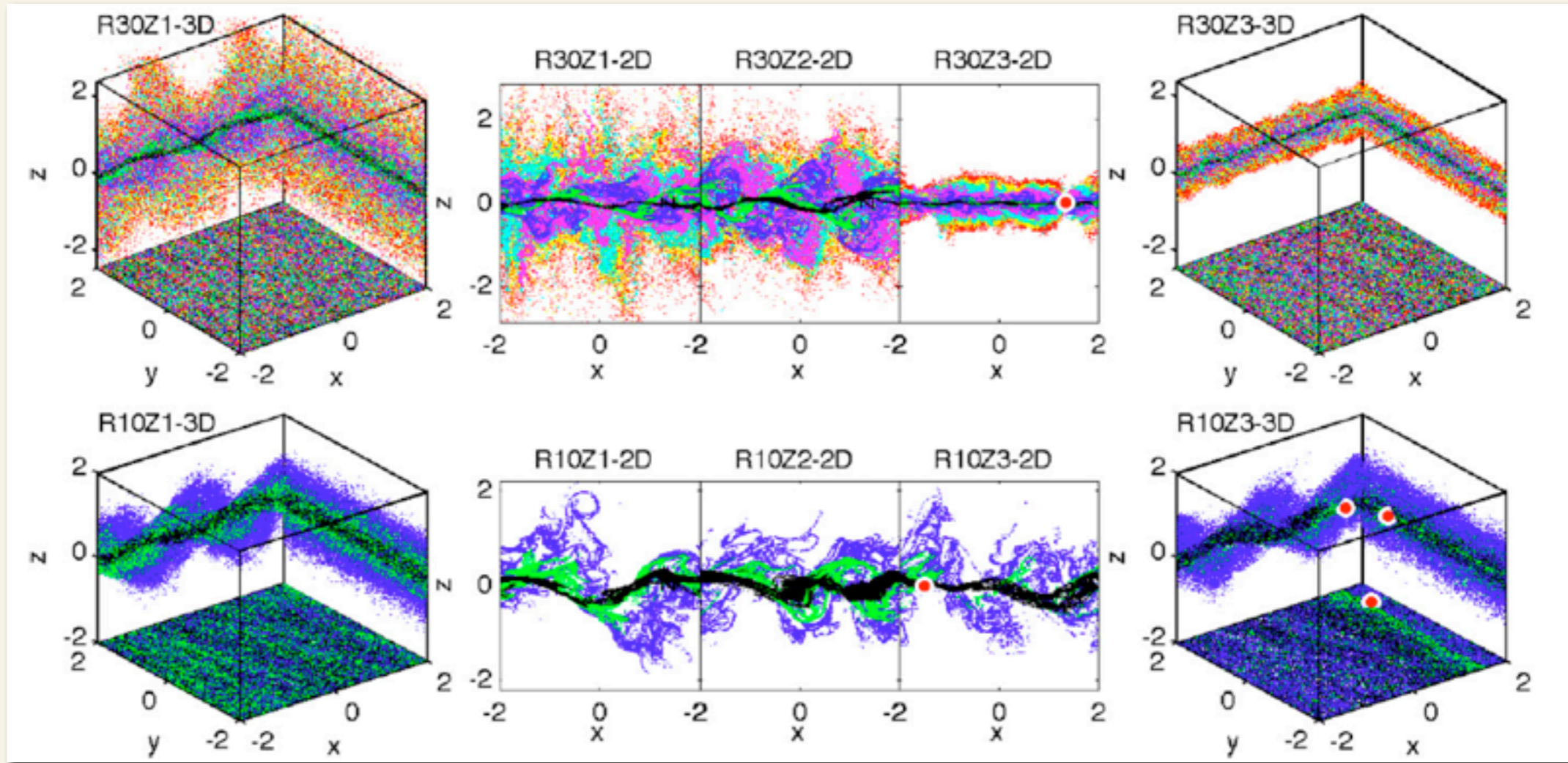
η : 最小渦スケール
(ほぼグリッドサイズ)



ストリーミング不安定

ダスト/ガスの2流体不安定 → ダストが濃集 (Youdin & Johansen 2007)

ダストサイズ大



ダスト面密度大

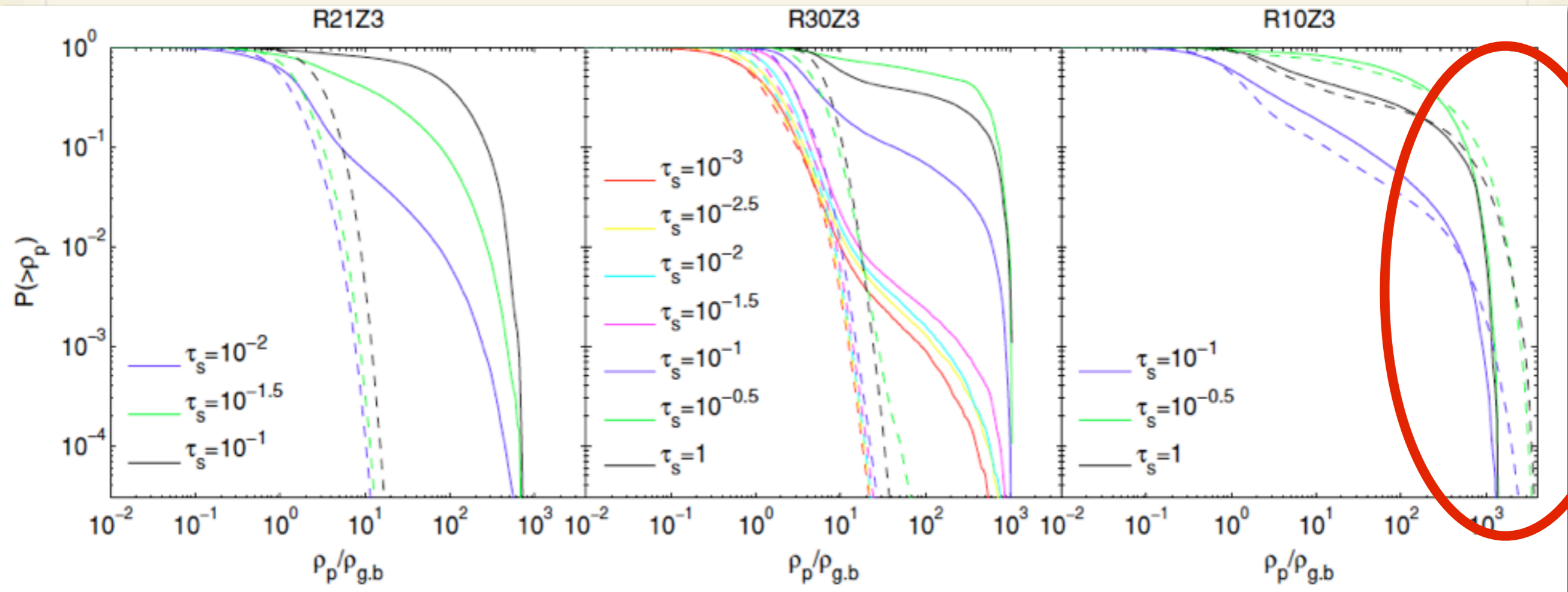
Bai & Stone (2012)

(局所計算, 長さ単位 $\sim 0.05H$, 粒子数 10^6 , 計算時間 $\sim 500\Omega^{-1}$)

ダスト濃集累積頻度分布

注：点線だけ見てください。

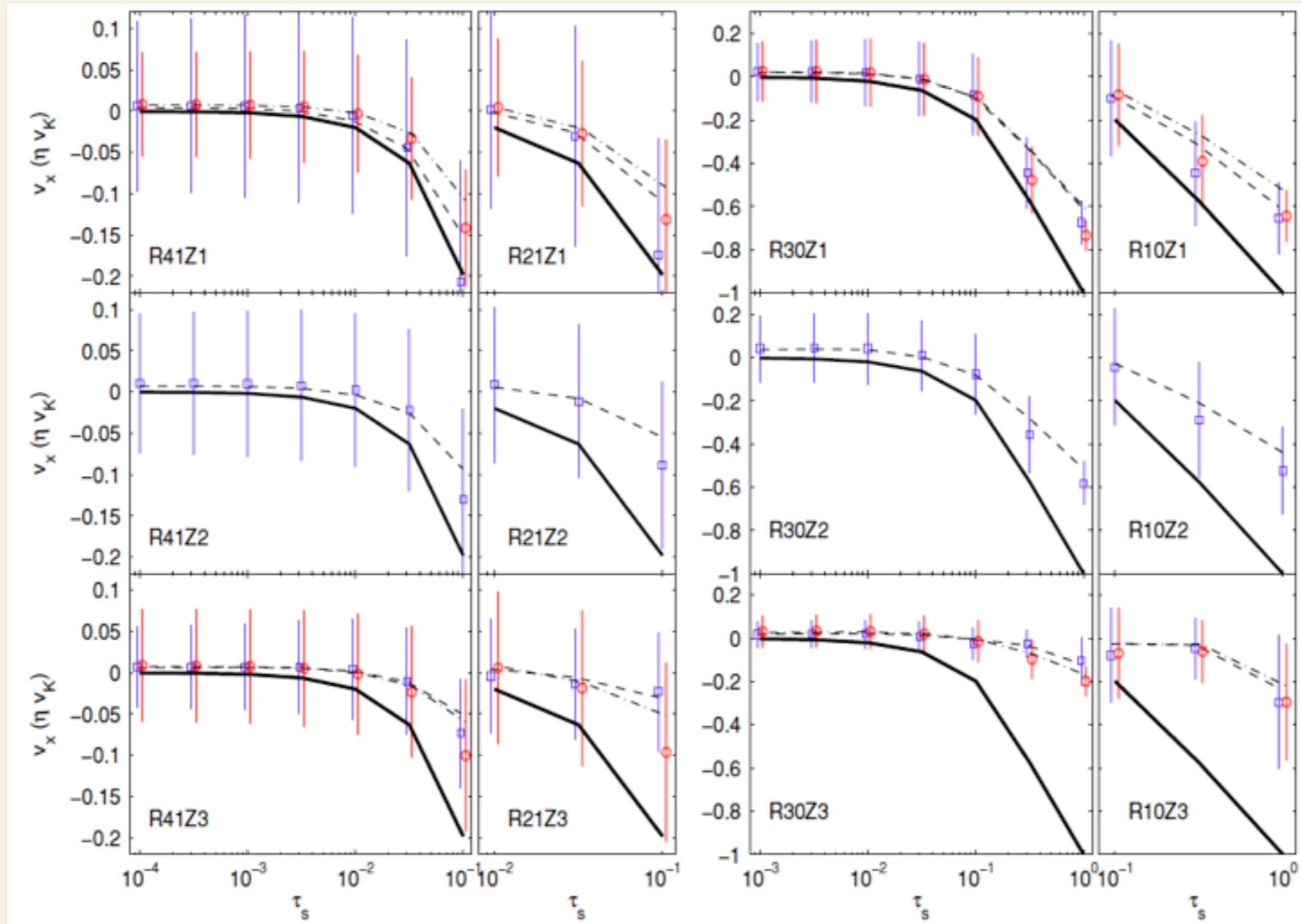
ロッシュ密度超過



ダストサイズ大 (ダスト面密度=0.03×ガス面密度)
でかいダスト(~m), 高いダスト面密度($\Sigma d/\Sigma g > 0.03$) があれば
重力束縛されるダスト濃集領域が作られる

動径移動速度

ダスト面密度大



ダストサイズ大

この手の計算でダスト成長は
考慮されたことが無い。

- ダスト成長時間 $\sim 100T_K$

➡ 数千ケプラーくらい回せば
ダスト進化がきいてくるはず。

