

原始惑星系円盤の乱流とダスト進化

奥住 聰 (東京工業大学)

内容

- 微惑星形成・成長に対する乱流の影響

- 相対速度の励起（空気力学的／重力的）
- 乱流拡散
- 高圧領域へのダスト濃集

- 具体的に取り扱う乱流

- コルモゴロフ乱流
- 磁気回転不安定性 (MRI) 駆動の乱流
- 自己重力不安定性駆動の乱流
- ストリーミング不安定駆動の乱流

ダストから微惑星へ： 2大シナリオと問題

乱流による巻き上げ

ダスト層重力不安定

直接合体成長

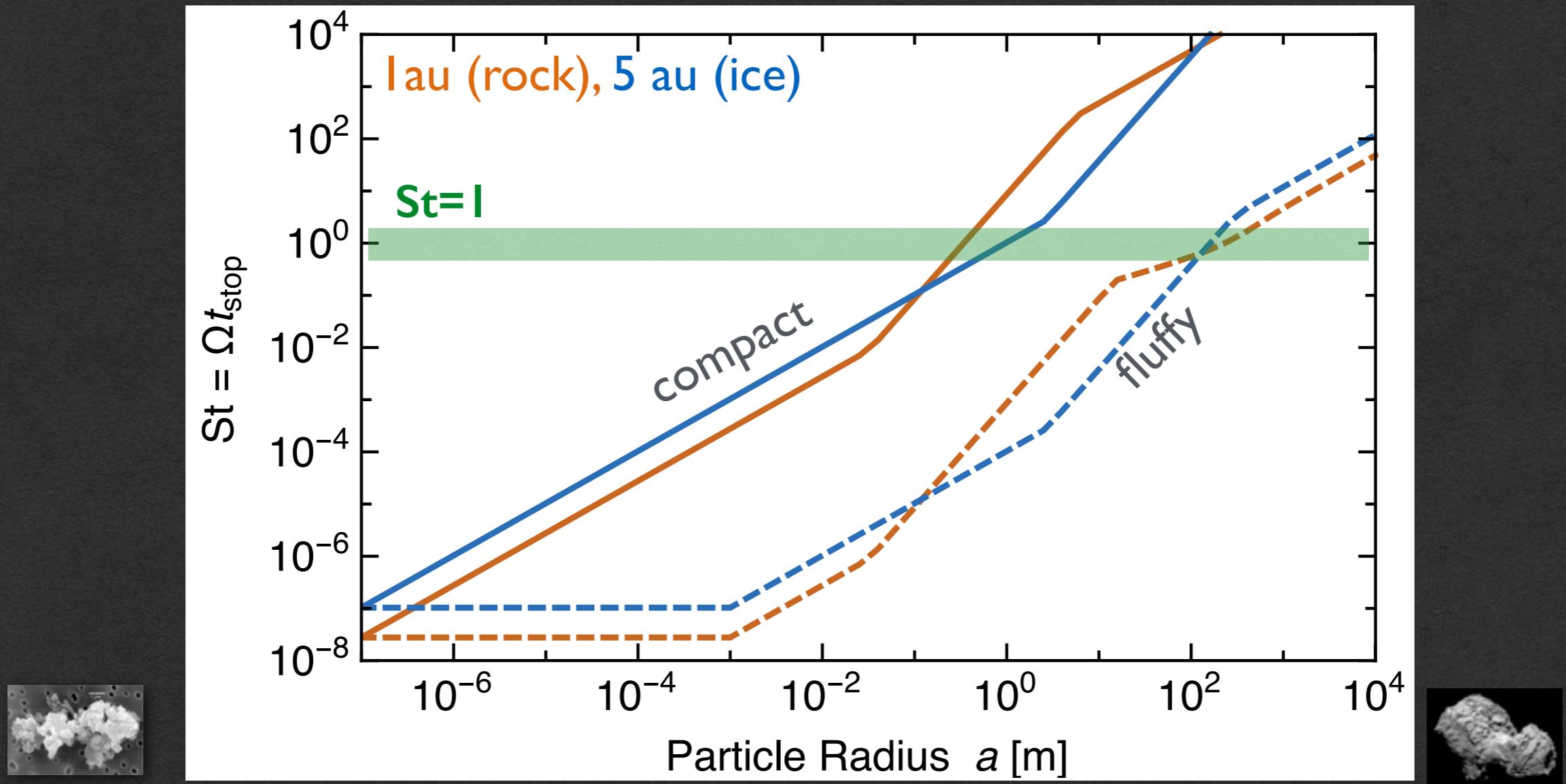


跳ね返り (bouncing barrier) Guttler+10; Zsom+10,11; Wada+11

静電反発 (charge barrier) Okuzumi 09; Okuzumi+11a,b; Matthews+12

ダストの制動時間 (stopping time)

- $St = \Omega * t_{stop}$ (l/Ω で規格化した制動時間, “Stokes number”)
- compact particles: 大雑把に $St \sim a / (l \text{ m})$ at $St \lesssim 1$
- “fluffy” aggregates: $St \sim 1$ for $a \sim 100 \text{ m}$ (Okuzumi+12, Kataoka+13b)

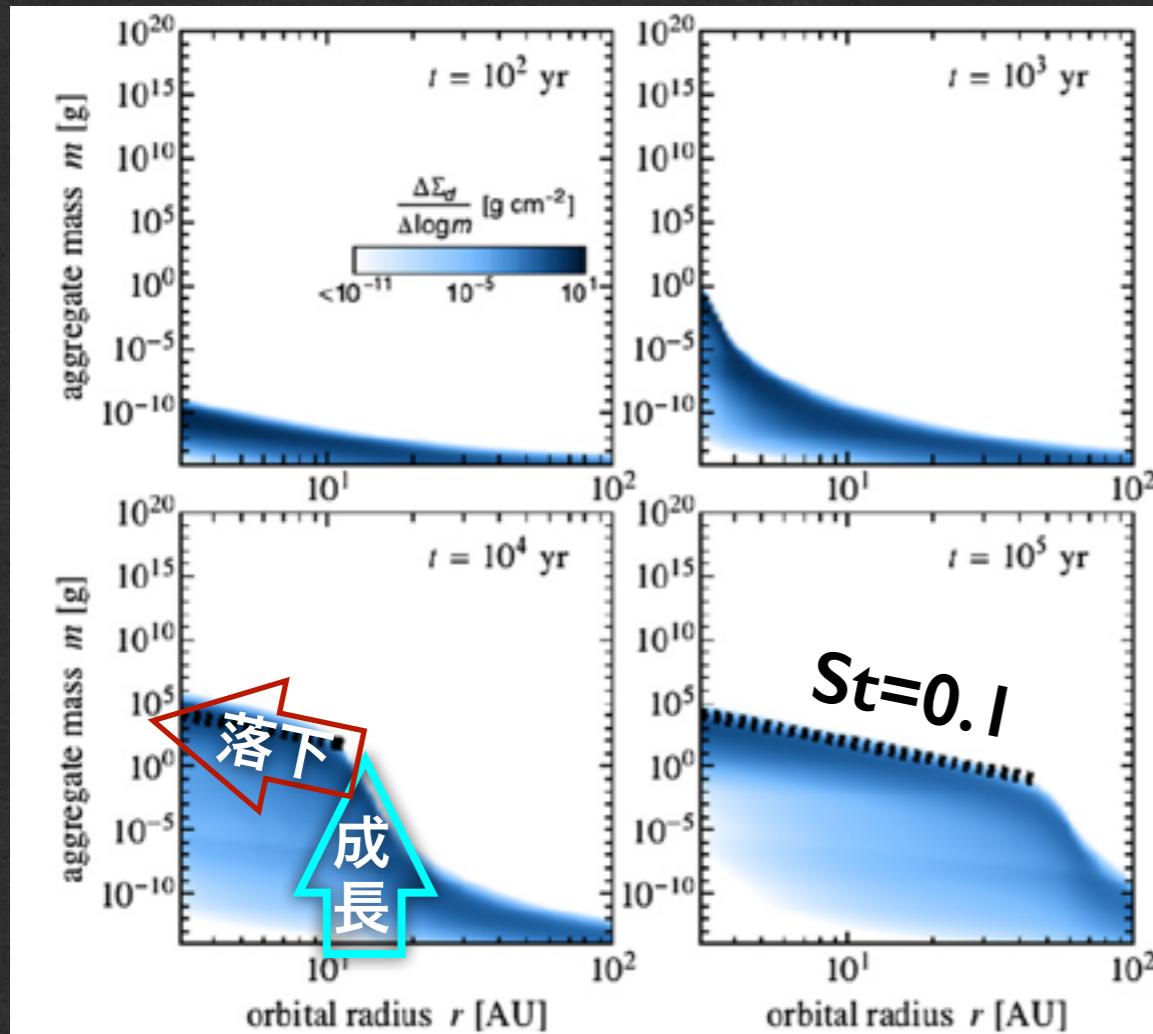


fluffy: $\rho_{int} = \rho_{mat} * \max\{ (a/0.1 \mu\text{m})^{-1}, 10^{-4} \}$ (mimics Kataoka+13b)

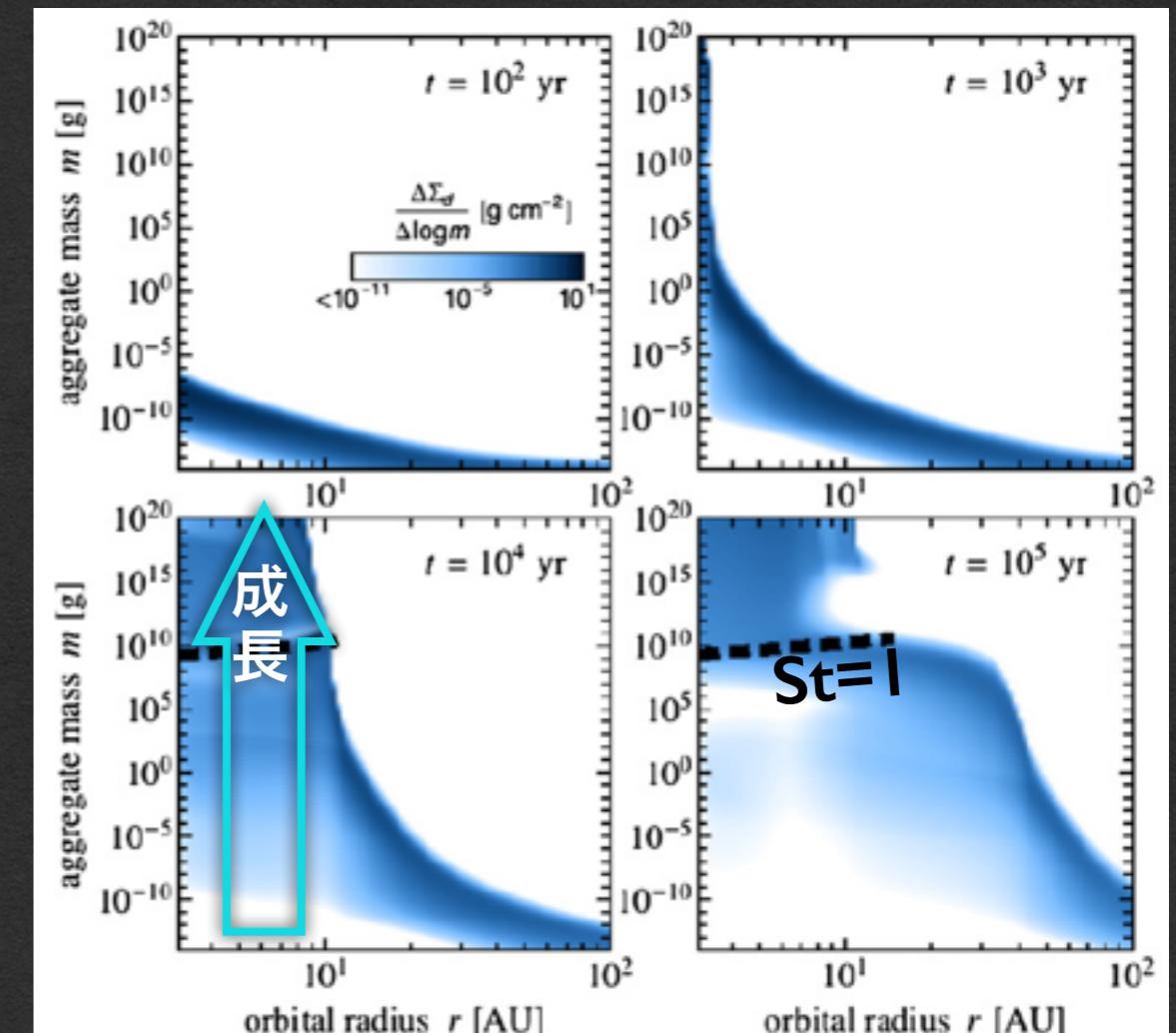
ダスト進化にともなうStの進化

氷ダストの合体成長（破壊無し）+中心星方向の落下 (Okuzumi et al. 2012)

compact particles



fluffy aggregates

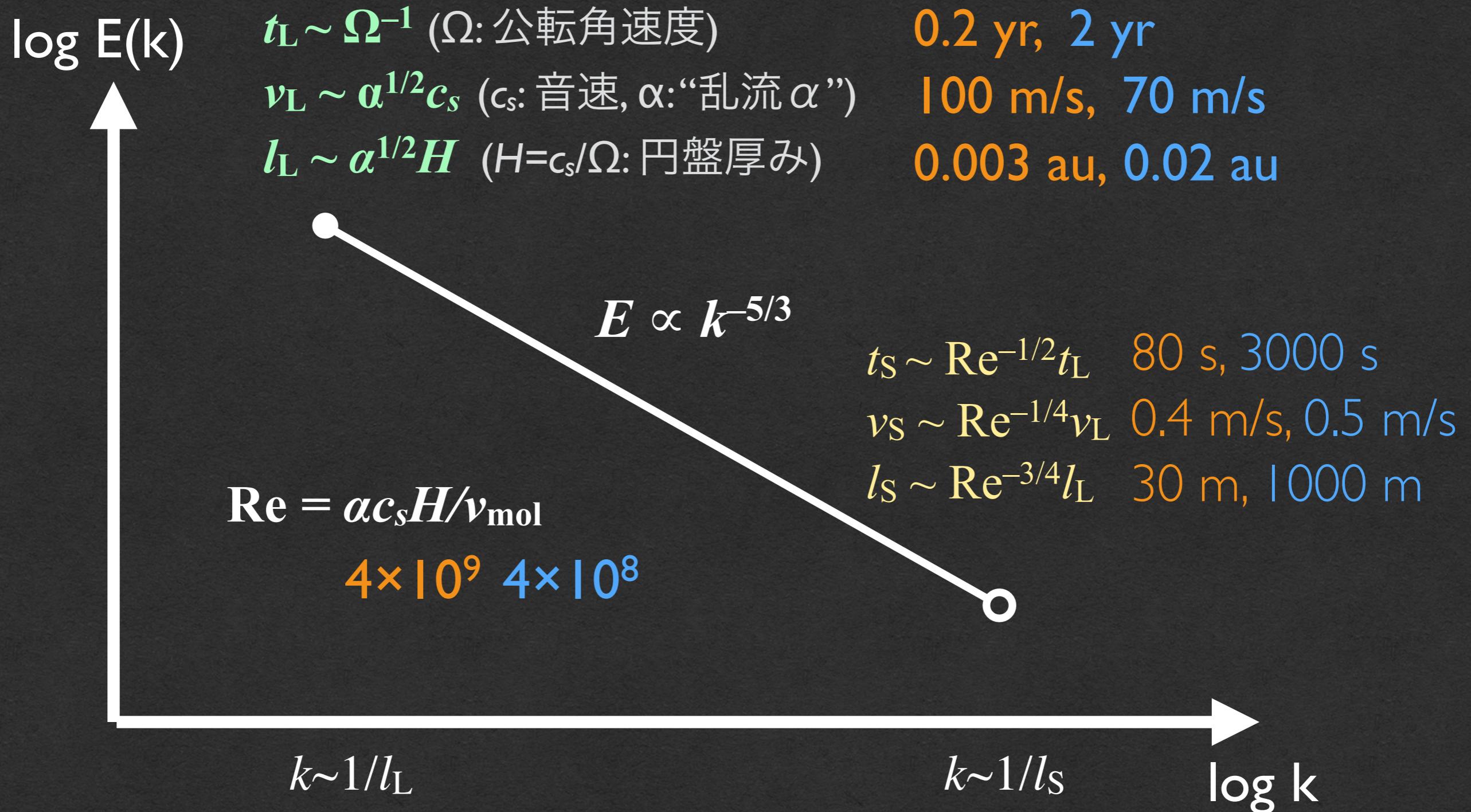


- ダスト落下の壁 $\Rightarrow St \sim 0.1$ で成長が頭打ち
- 乱流速度、物質強度によっては $St \sim 0.001 \dots 1$ で破壊が起こる (あとで)

⇒ St~0.001-1 のダストの乱流応答の理解が重要

- 微惑星形成・成長に対する乱流の影響
 - 相対速度の励起（空気力学的／重力的）
 - 乱流拡散
 - 高圧領域へのダスト濃集
- 具体的に取り扱う乱流
 - コルモゴロフ乱流
 - 磁気回転不安性 (MRI) 駆動の乱流
 - 自己重力不安定性駆動の乱流
 - ストリークミング不安定駆動の乱流

円盤乱流のスケール



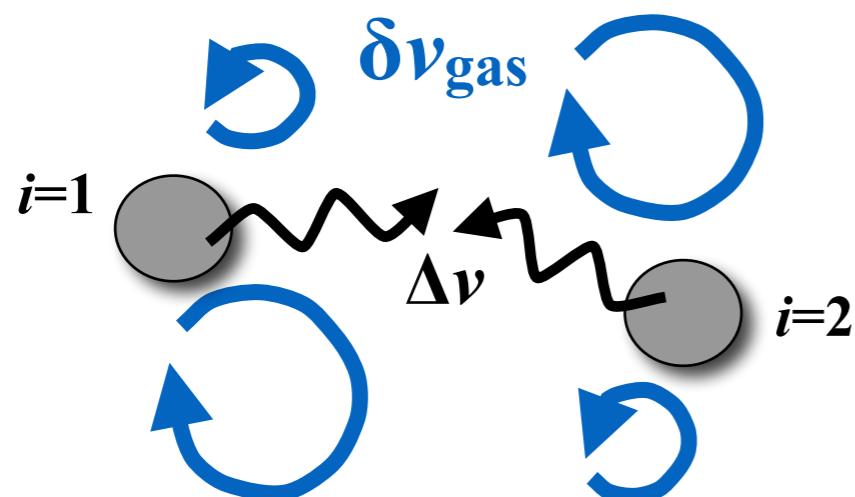
NOTE: values for **1 au**, **5 au** in optically thin minimum-mass solar nebula (Hayashi 1981) with $\alpha=0.01$

乱流による固体のランダム運動の励起

(1) 空気力学的効果

(Volk et al. 80; Ormel & Cuzzi 07; and more)

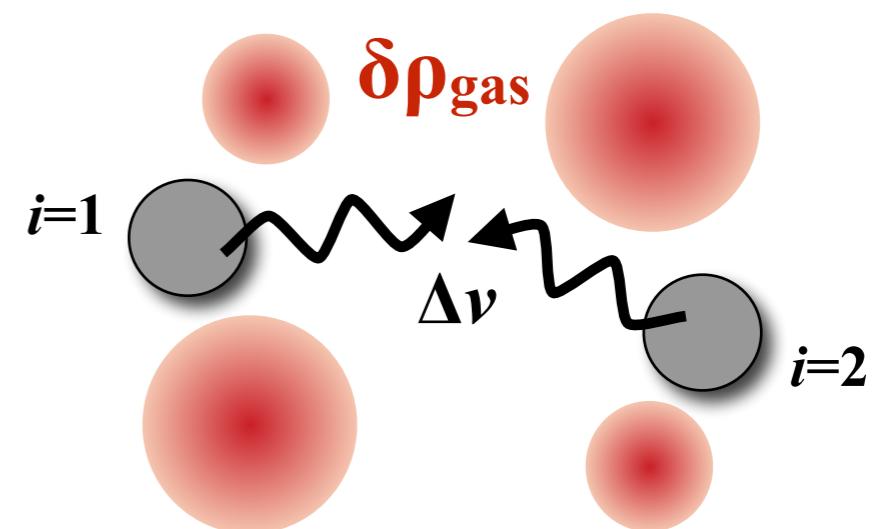
δv_{gas} → 摩擦力が揺らぐ



(2) 重力的效果

(Nelson 05; Ogihara et al. 07; and more)

$\delta \rho_{\text{gas}}$ → 重力場が揺らぐ

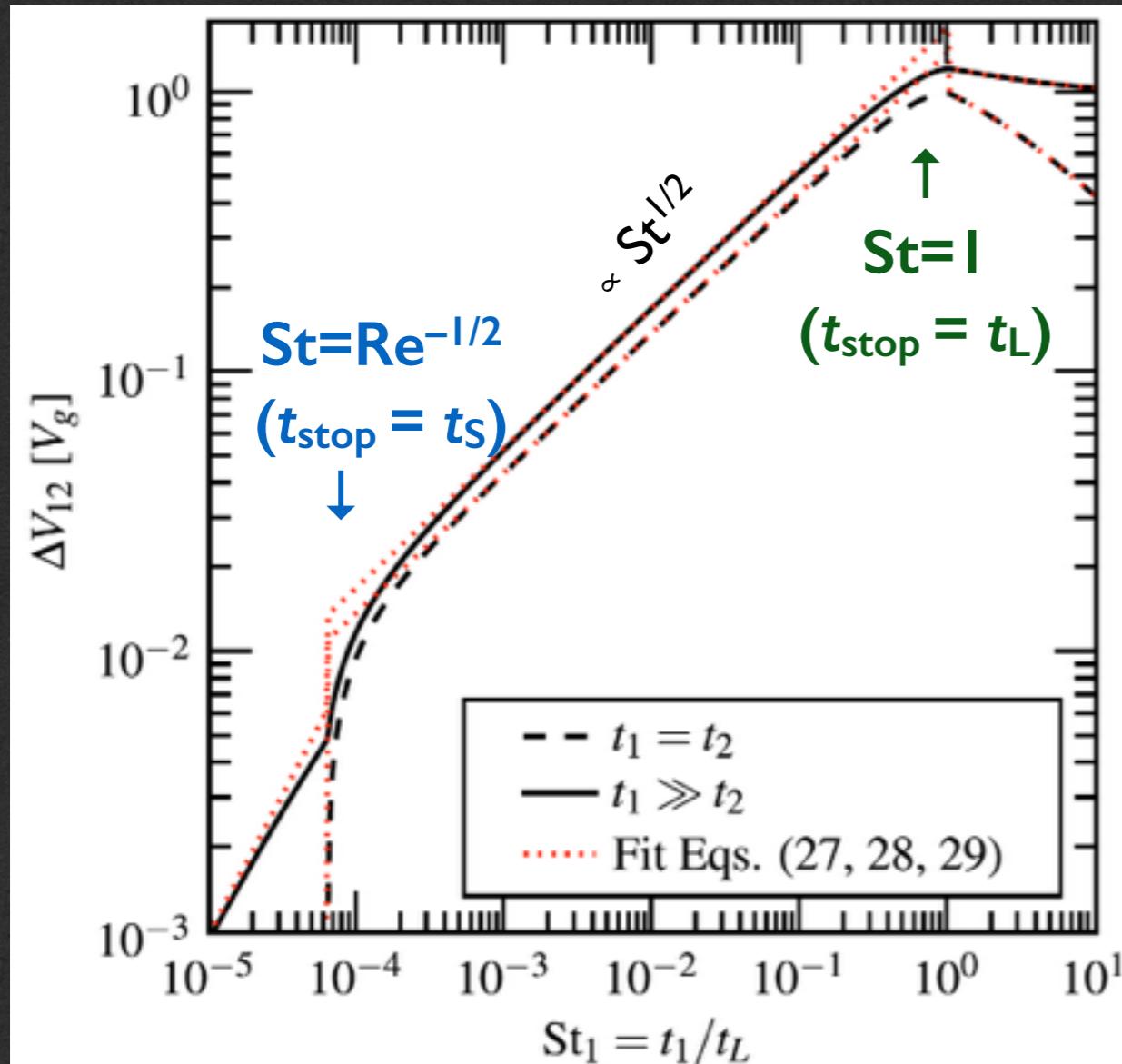


$$\dot{\delta v}_p = -\frac{\delta v_p - \delta v_{\text{gas}}}{t_{\text{stop}}} - \nabla \delta \phi_{\text{grav}}$$

$$\nabla^2 \delta \phi_{\text{grav}} = 4\pi G \delta \rho_{\text{gas}}$$

乱流相対速度：空気力学的効果

- Kolmogorov 則を仮定した解析計算
(Volk et al. 1980; Markiewicz et al. 1991; Ormel & Cuzzi 2007)



Ormel & Cuzzi (2007)

For similar-sized particles,

$$\Delta v \sim (v_s/t_s) t_{\text{stop}} \quad St \lesssim Re^{-1/2}$$

$$\Delta v \sim St^{1/2} v_L \quad Re^{-1/2} \lesssim St \lesssim 1$$

$$\Delta v \sim St^{-1/2} v_L \quad St \gtrsim 1$$

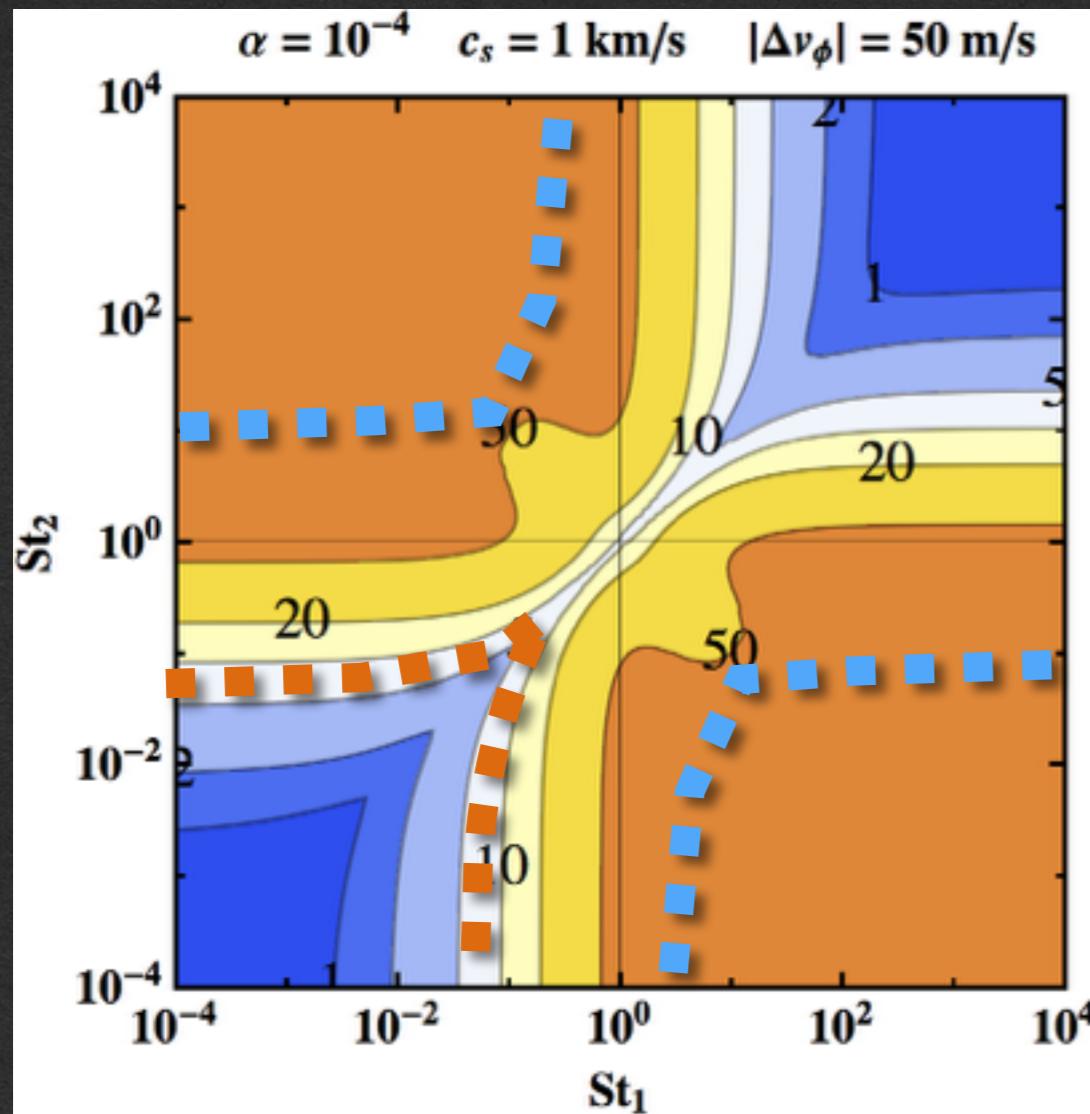
渦の速度: $v_k \sim [kE(k)]^{1/2} \propto k^{-1/3}$

相關時間: $t_k \sim 1/(kv_k) \propto k^{-2/3}$
 $\Rightarrow v_k \propto t_k^{1/2}$

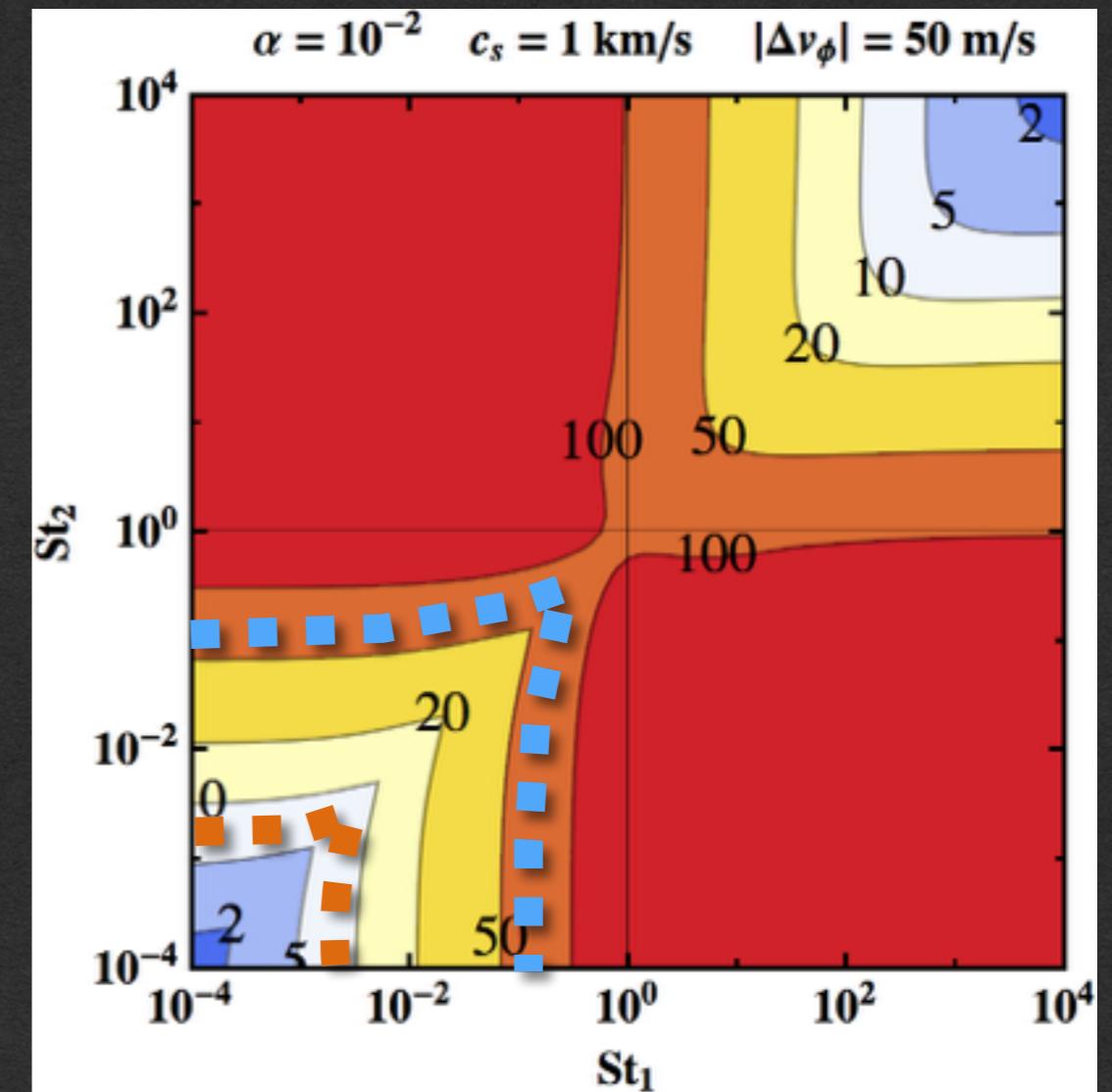
比例係数を復元: $v_k \sim (\Omega t_k)^{1/2} v_L$

ダストの衝突速度(乱流+その他)

$$v_L = 10 \text{ m/s } (\alpha=10^{-4})$$



$$v_L = 100 \text{ m/s } (\alpha=10^{-2})$$



臨界破壊速度: 岩石 ~ 6 m/s, 氷 ~ 60 m/s (Wada et al. 2009)

岩石: $St \sim 0.1$ に壁

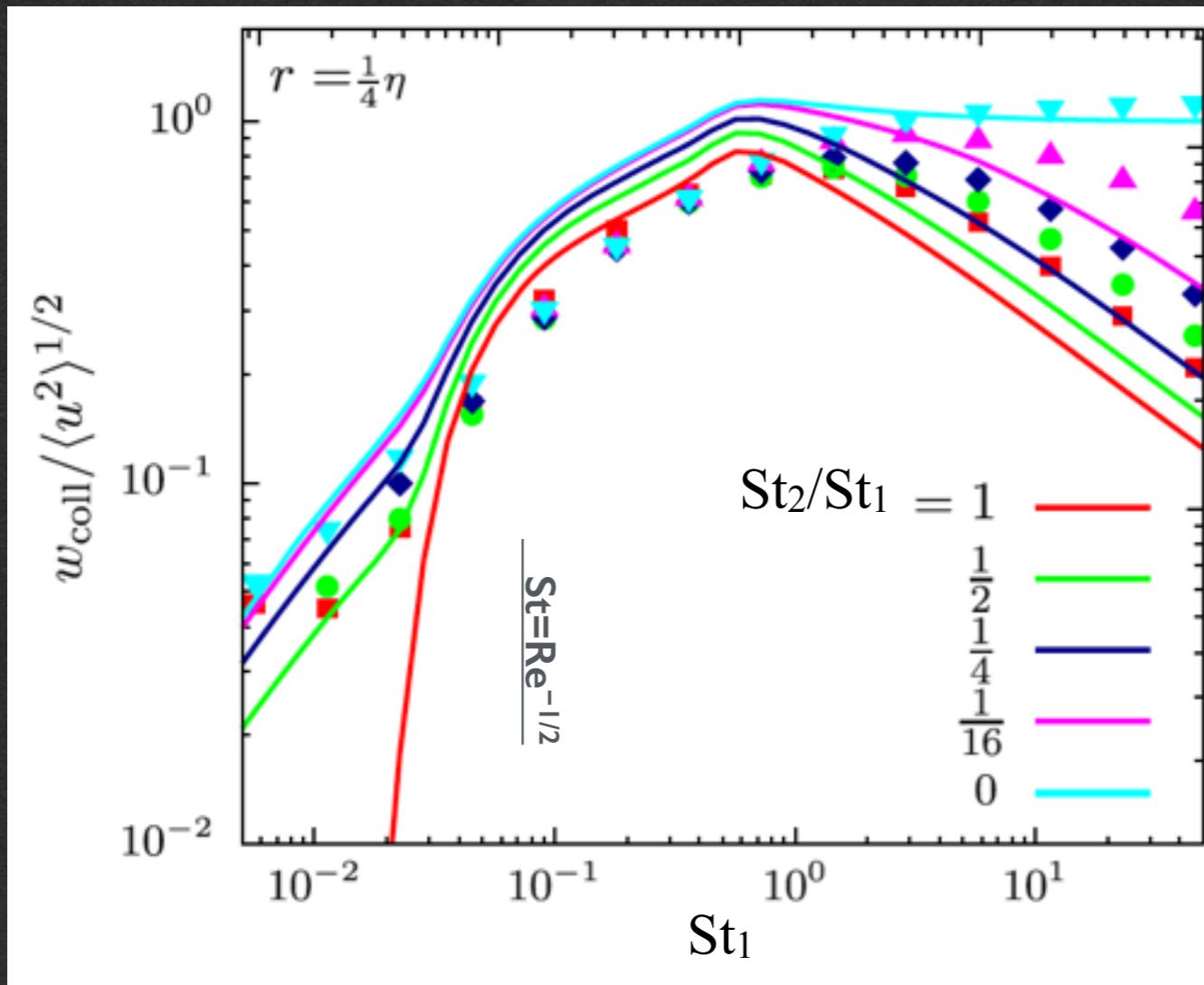
氷: 成長経路あり

岩石: $St \sim 10^{-3}$ に壁

氷: $St \sim 0.1$ に壁

乱流相対速度モデルの検証 (流体計算)

forced turbulence in box, resolution = 512^3 , Re=10³ (Pan & Padoan 2015)



rms collision velocity

$$=[\langle |\Delta v|^3 \rangle / \langle |\Delta v| \rangle]^{1/2}$$

points: simulation data

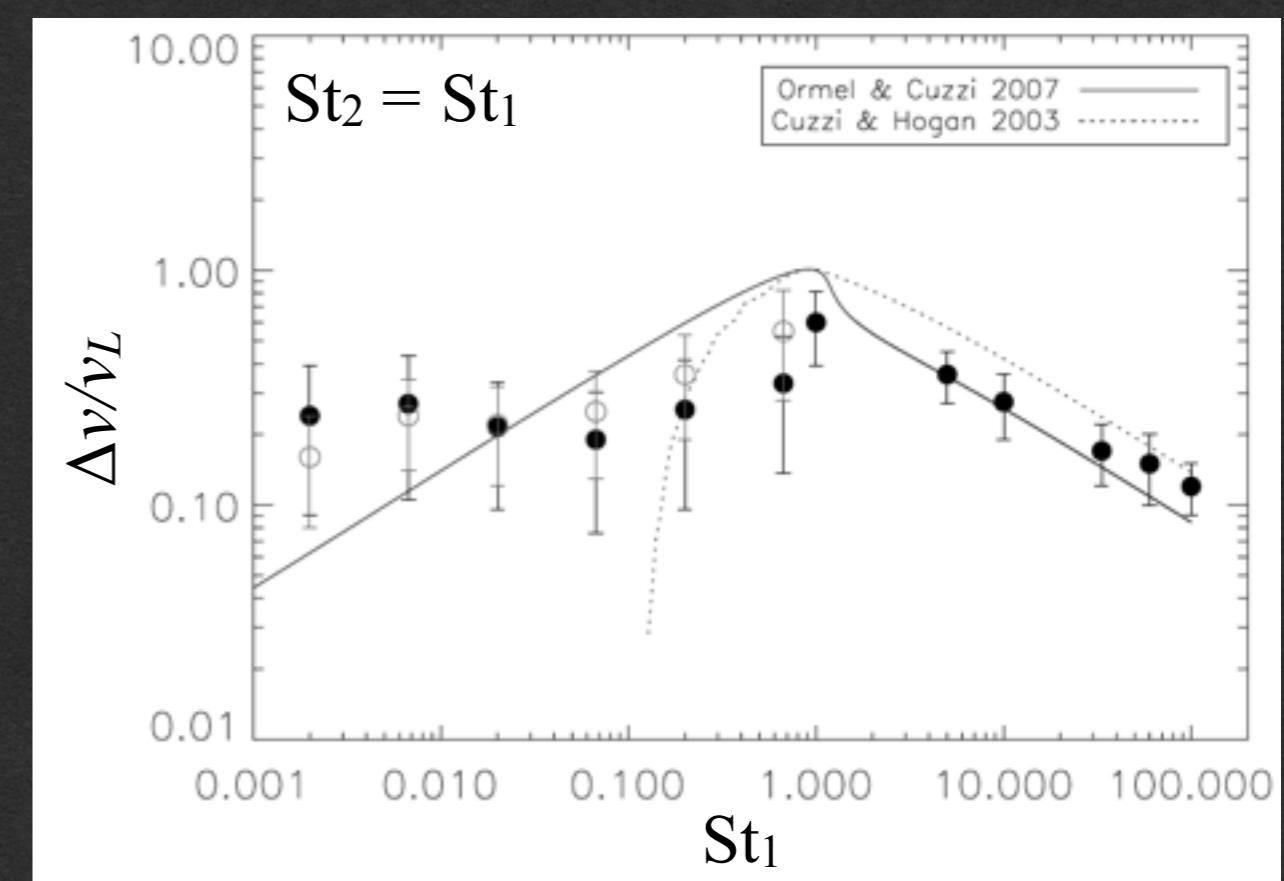
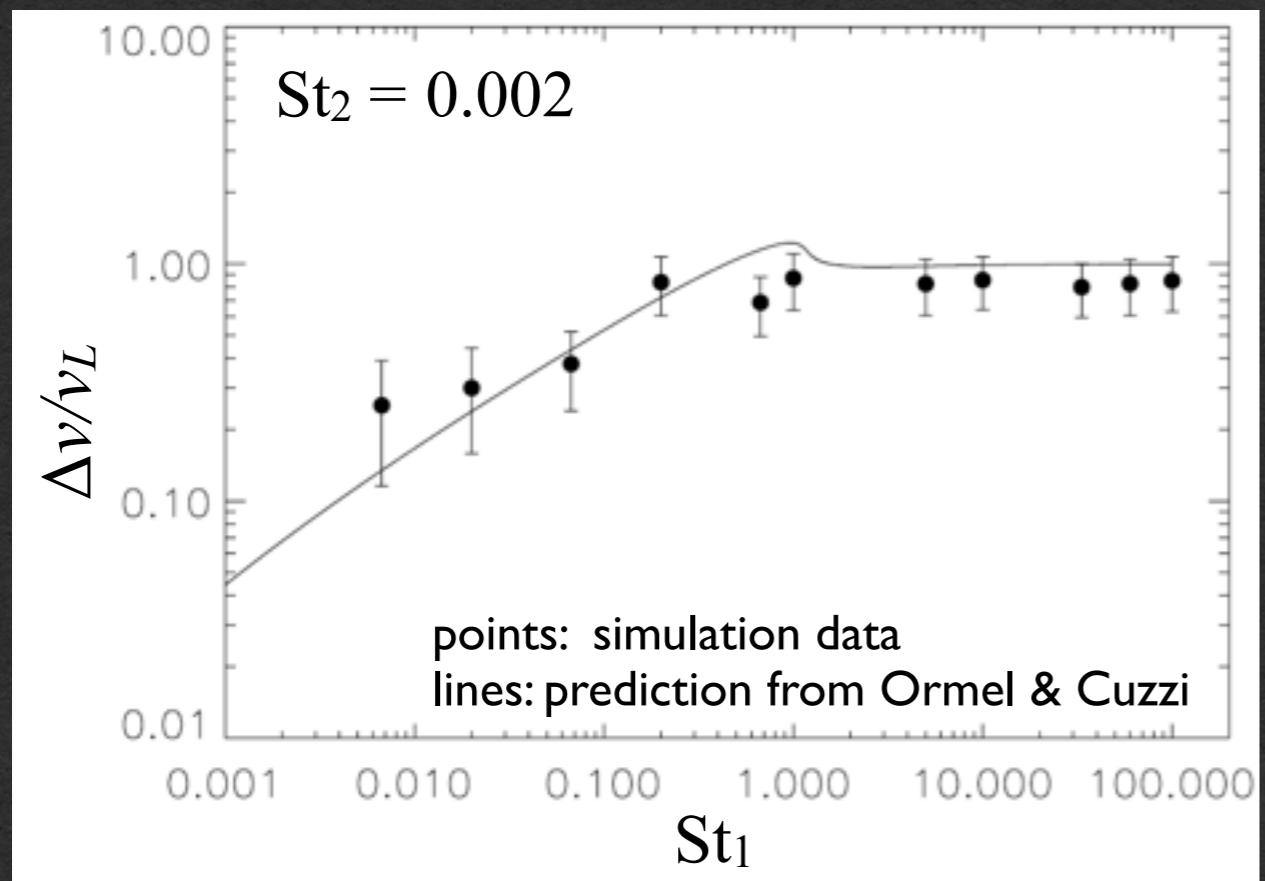
lines: Markiewitz model ($n=1$)

- 中間サイズ ($Re^{-1/2} < St < 1$) で、モデルが衝突速度を過小評価 (factor > 0.5)
- 等サイズ衝突 ($St_1 = St_2$) の衝突速度の予測は非常によい (「偶然」)

乱流相対速度モデルの検証 (MHD計算)

ideal MHD, $90 \times 90 \times 144$, local unstratified shearing box

(Carballido et al. 2010)

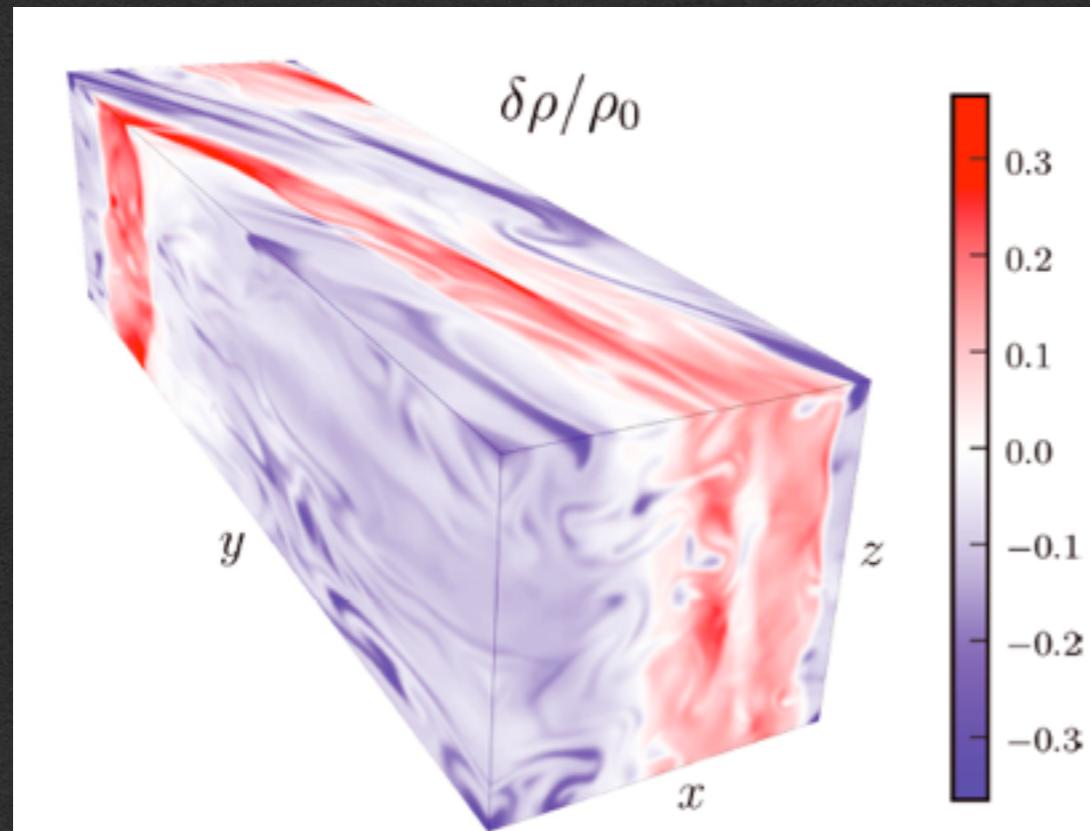


注: $St_1 < 1$ のデータは不正確
(低分解能、かつ 制動長 << サンプリング距離)

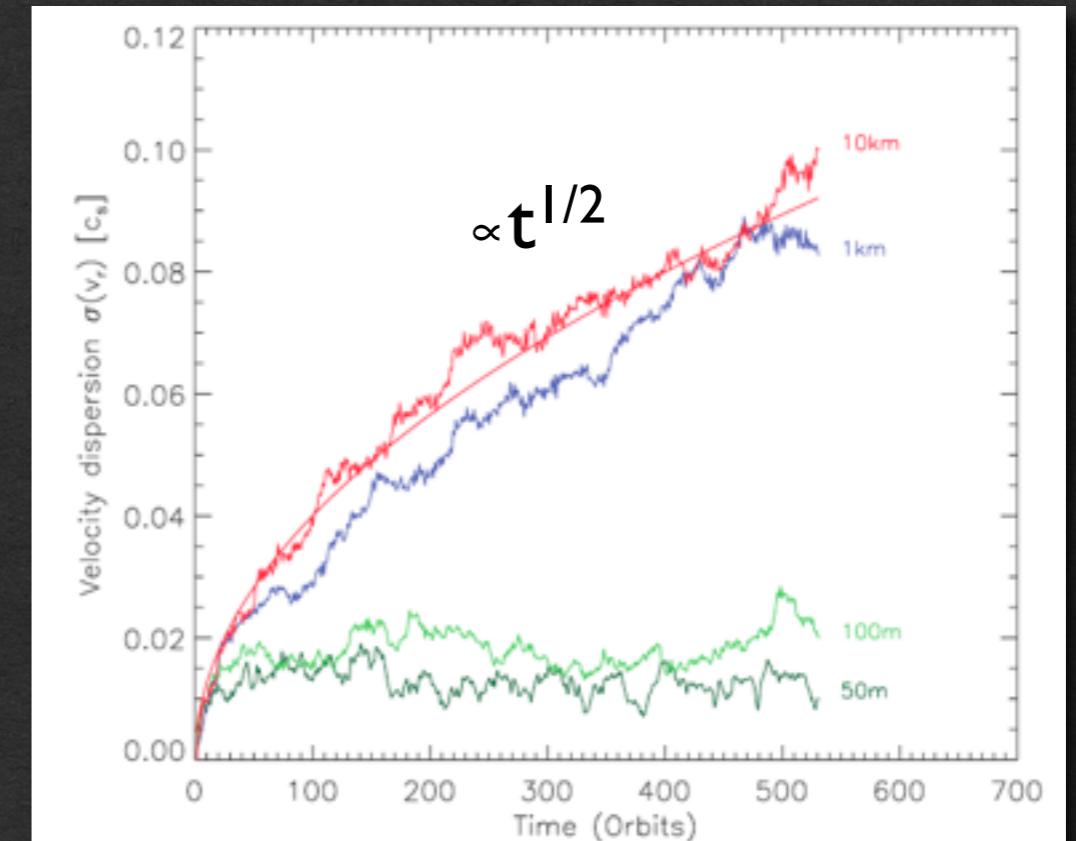
乱流相対速度：重力的效果

(Ida et al. 2008; Nelson & Gressel 2010; Gressel et al. 2011, 2012; Okuzumi & Ormel 2013; Ormel & Okuzumi 2013)

density wave excited by MRI turbulence
(Heinemann & Papaloizou 2009b)



particle random velocity versus time
(Nelson & Gressel 2010)



天体の離心率 e の拡散係数 (based on formula by Okuzumi & Ormel 2013)

$$\frac{de^2}{dt} \approx \left(\frac{\delta\Sigma}{\Sigma} \right)^2 \left(\frac{r^2 \Sigma}{M_*} \right)^2 \Omega$$

$\delta\Sigma$: surface density fluctuation

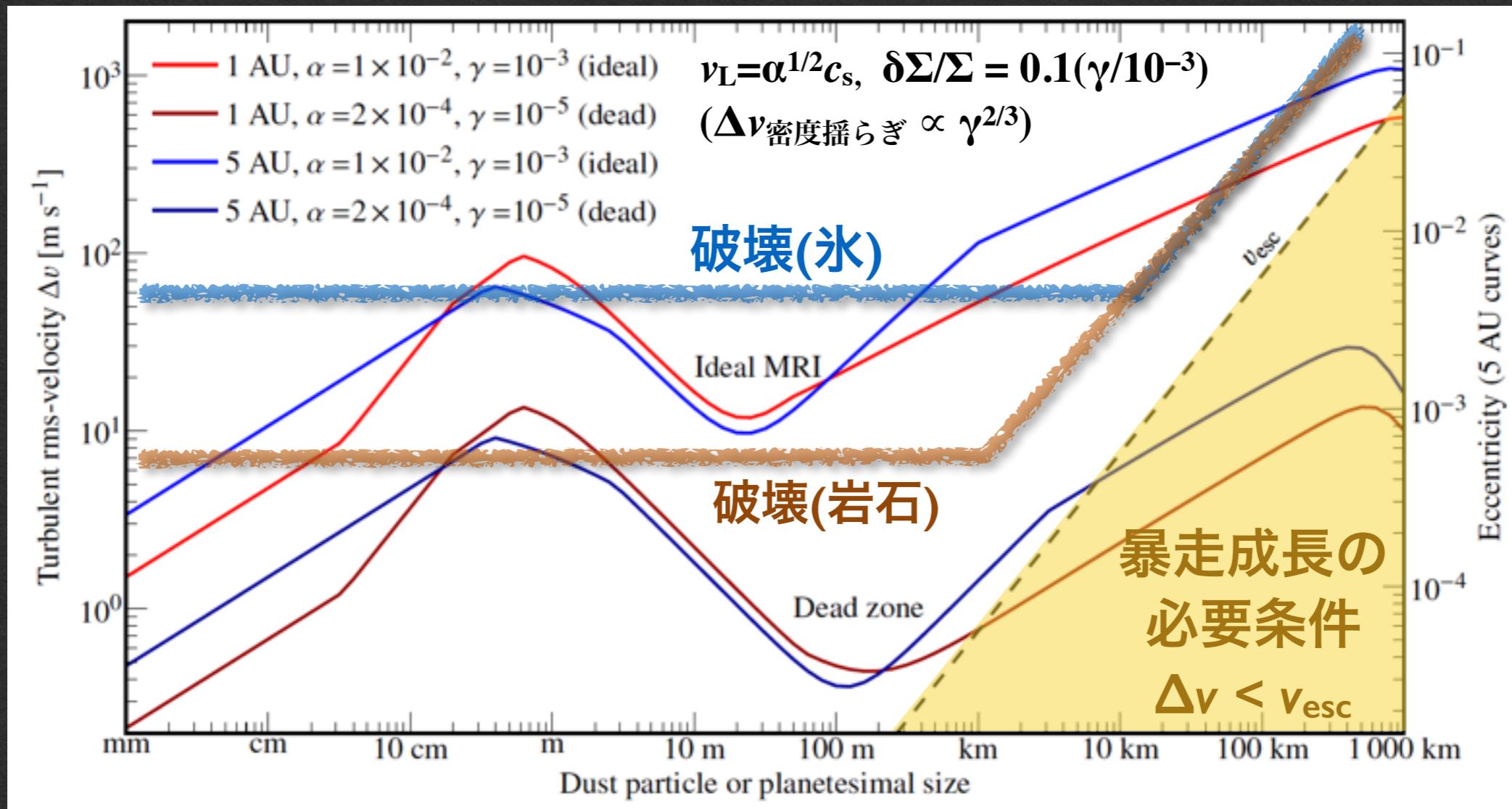
Σ : background surface density

r : distance from star

M_* : stellar mass

重力的效果まで考慮した乱流相対速度

- サイズ $\gtrsim 10\text{-}100\text{ m}$ で Δv が再び上がる (重力効果)
- 微惑星の暴走成長を遅延 (Nelson & Gressel '10; Ormel & Okuzumi '13)
- kmサイズの微惑星の衝突破壊も引き起こす (e.g., Ida et al, 2008)

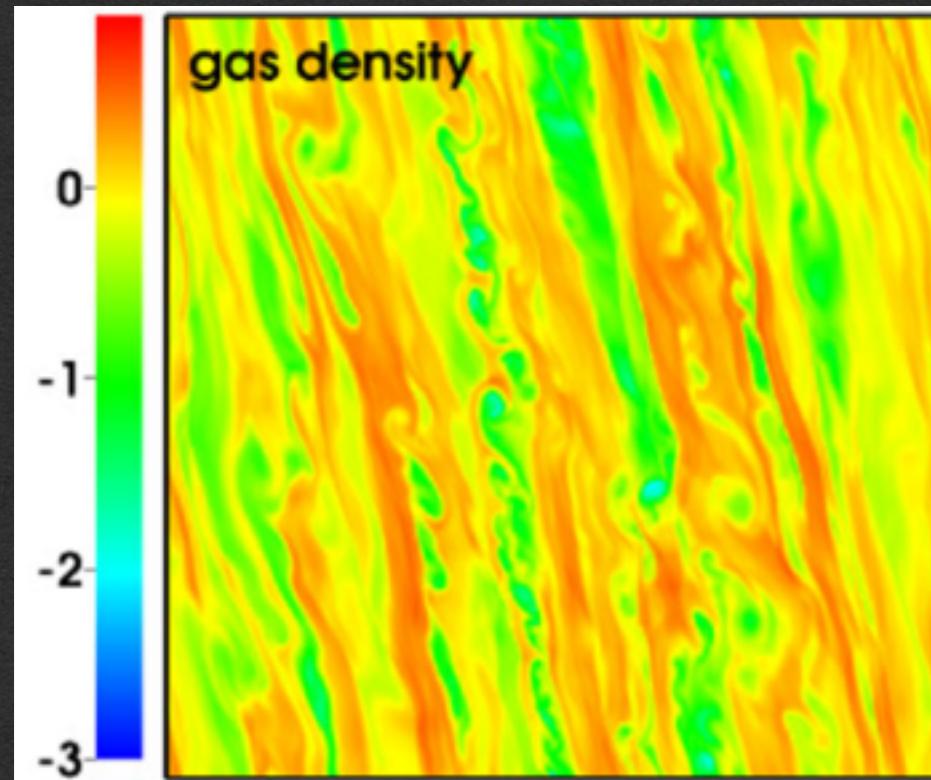


重力不安定円盤中の相対速度

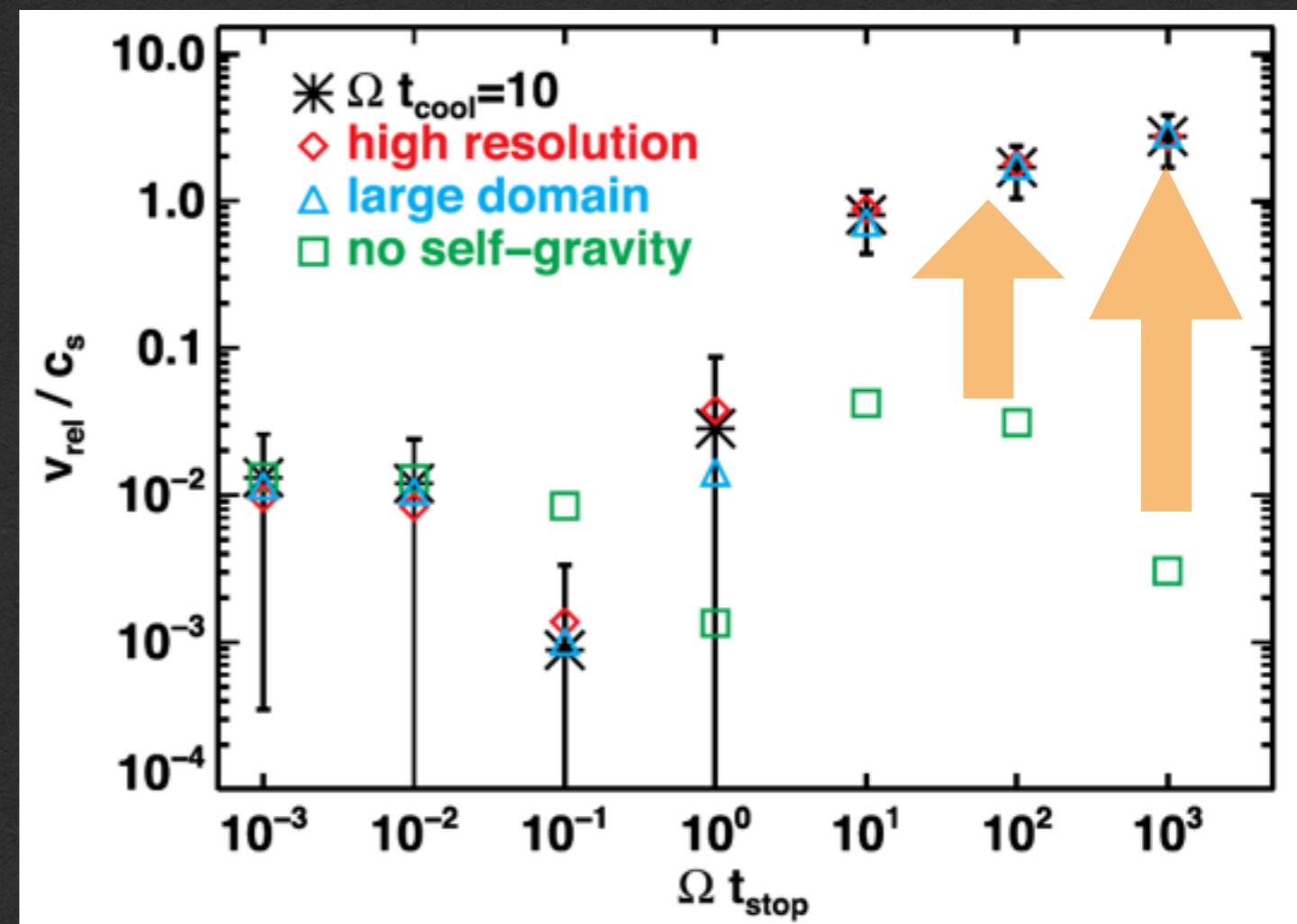
Booth & Clarke (2016); Shi, Zhu, Stone, & Chiang (2016)

- $\delta\Sigma/\Sigma \sim 1$ (*cf.* $\delta\Sigma/\Sigma \sim 0.1$ in MRI turbulence)
- $St \gtrsim 10$ で天体相対速度が音速 ($\sim 0.5\text{--}1 \text{ km/s}$) に達する
- 直接合体で微惑星を作るのは無理だろう (but see below)

$\log(\delta\Sigma/\Sigma)$



Shi et al.(2016)



- 微惑星形成・成長に対する乱流の影響
 - 相対速度の励起（空気力学的／重力的）
 - 乱流拡散
 - 高圧領域へのダスト濃集
- 具体的に取り扱う乱流
 - コルモゴロフ乱流
 - 磁気回転不安性 (MRI) 駆動の乱流
 - 自己重力不安定性駆動の乱流
 - ストリークミング不安定駆動の乱流

ダスト濃集域の重力不安定の条件

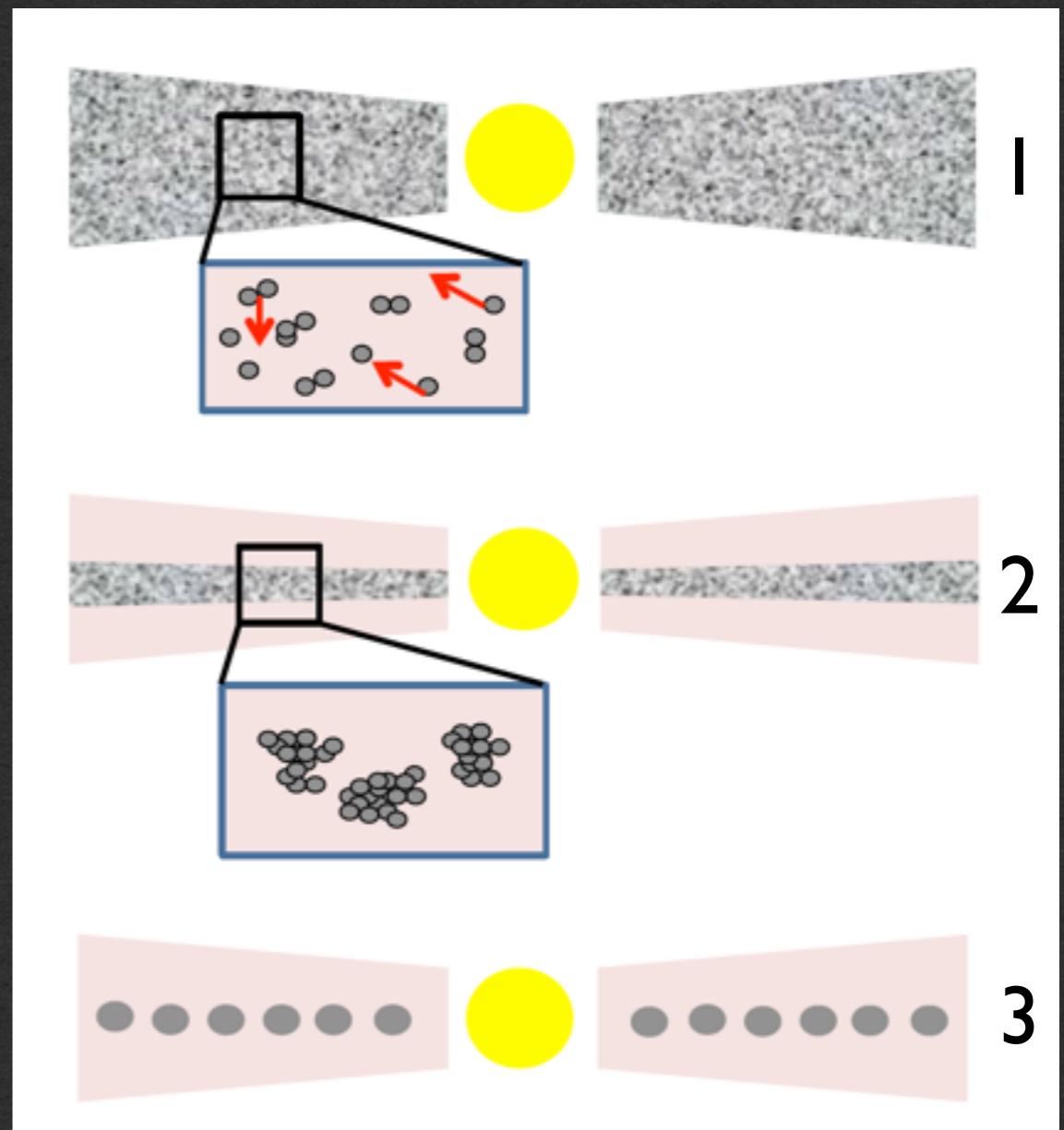
(京都モデル, Goldreich & Ward 1976)

- ・ロッシュ密度条件

$$\rho_{\text{dust}} \gtrsim \frac{\Omega^2}{G} \sim 5Q_{\text{gas}}\rho_{\text{gas}}$$

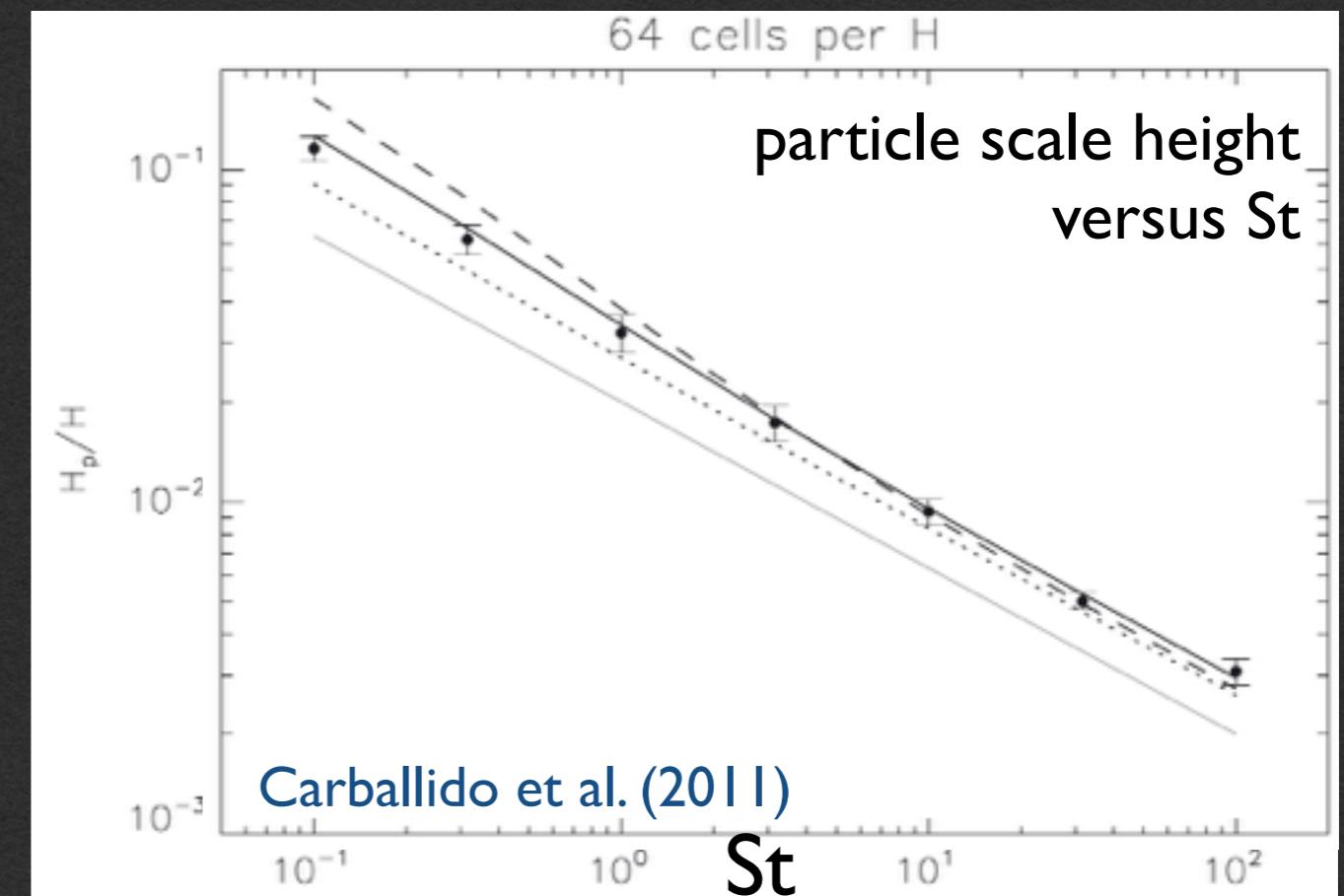
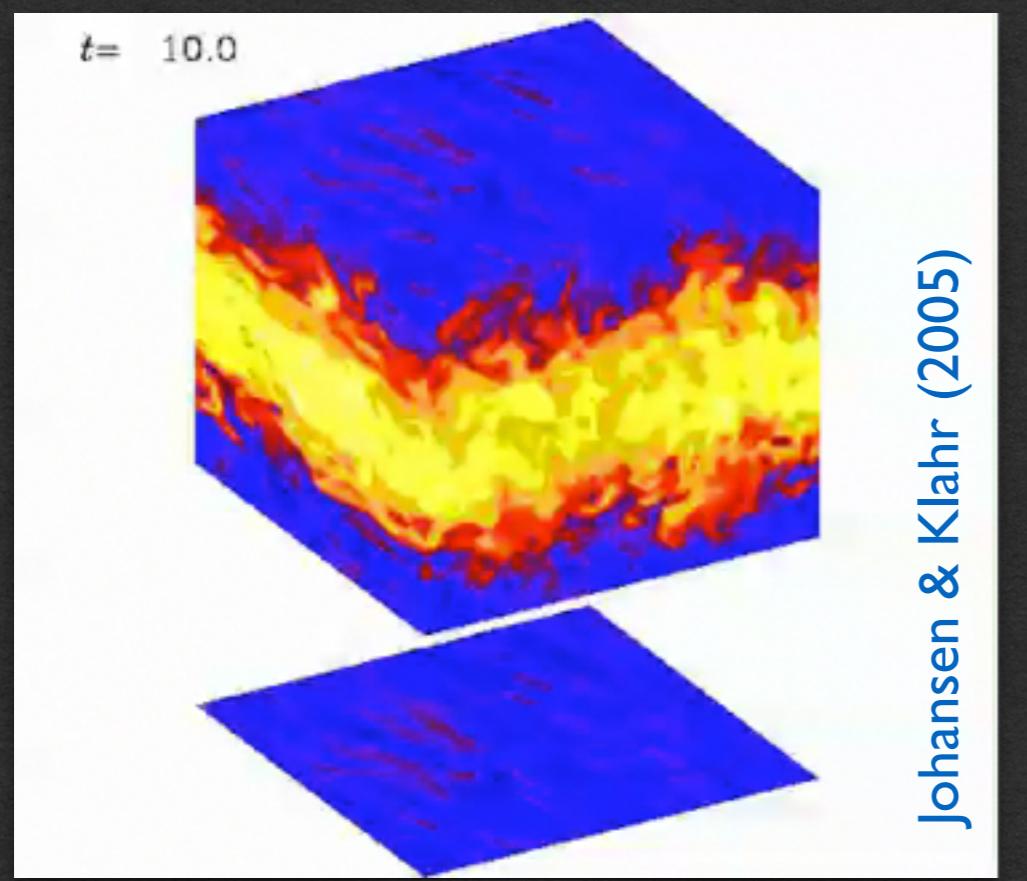
最小質量円盤($5Q_{\text{gas}} \sim 100$)では、

$\rho_{\text{dust}} > 100\rho_{\text{gas}}$ が必要！



ダスト沈殿層の乱流拡散

- In ideal MRI (e.g., Johansen & Klahr 2005; Carballido et al. 2011)
- With resistivities (e.g, Fromang & Papaloizou 2006; Okuzumi & Hirose 2011; Zhu et al. 2015)



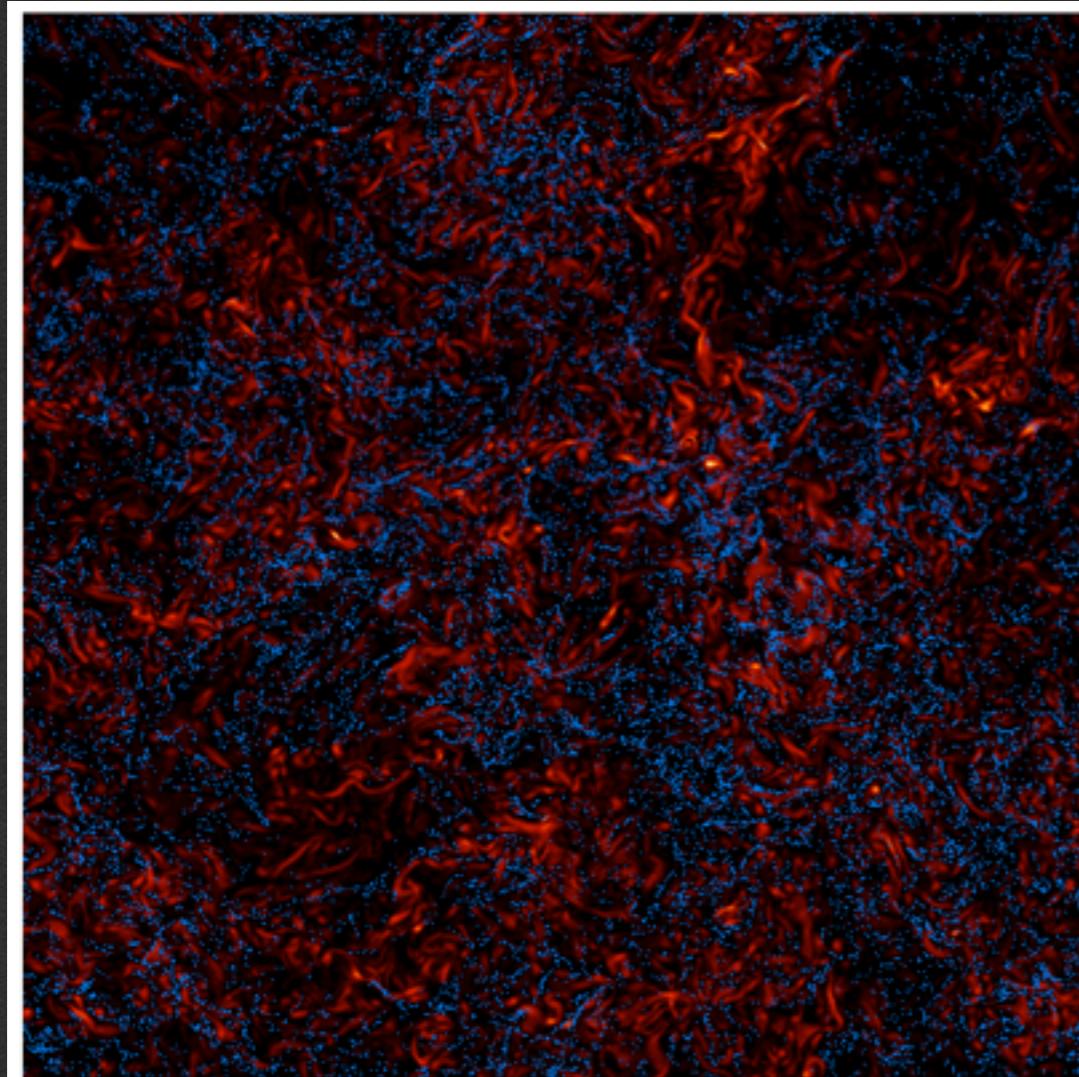
$$H_p = \sqrt{\frac{D_{g,z}}{\Omega St} \frac{1 + St}{1 + 2St}} \approx \sqrt{\frac{\alpha}{3St} \frac{1 + St}{1 + 2St}} H_{\text{gas}}$$

Dubrulle et al. (1995)
Youdin & Lithwick (2007)

$D_{g,z} \approx 0.3\alpha c_s H$ (e.g., Fromang & Papaloizou 2006; Okuzumi & Hirose 2011)

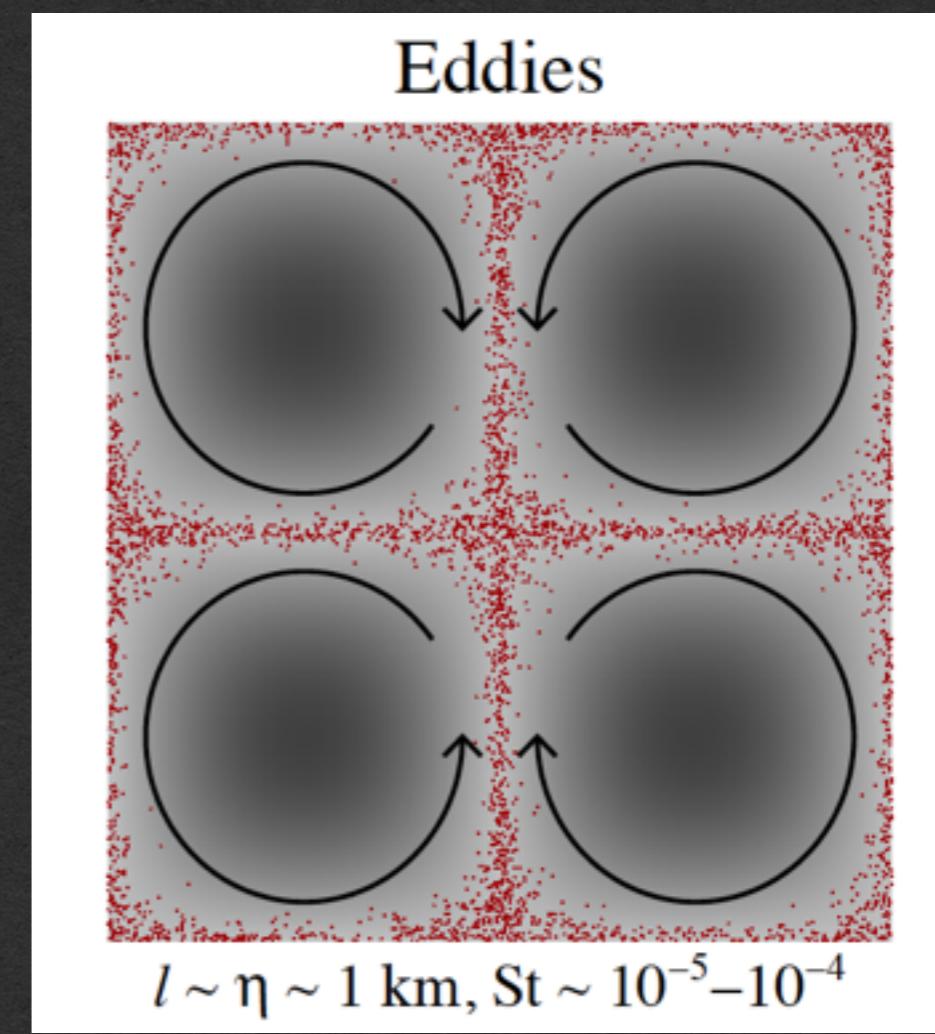
最小渦によるダストの選択的濃集

最小渦の狭間に、 $t_{\text{stop}} \sim t_s$ (サイズ $\sim 0.1\text{--}1\text{ mm}$) の粒子が選択的に集まる
(最小渦の遠心力による掃き出し効果)



粒子 涡度

Pan et al. 2011



$$l \sim \eta \sim 1\text{ km}, St \sim 10^{-5}\text{--}10^{-4}$$

Johansen et al. 2014

ガスの高圧領域へのダスト濃集

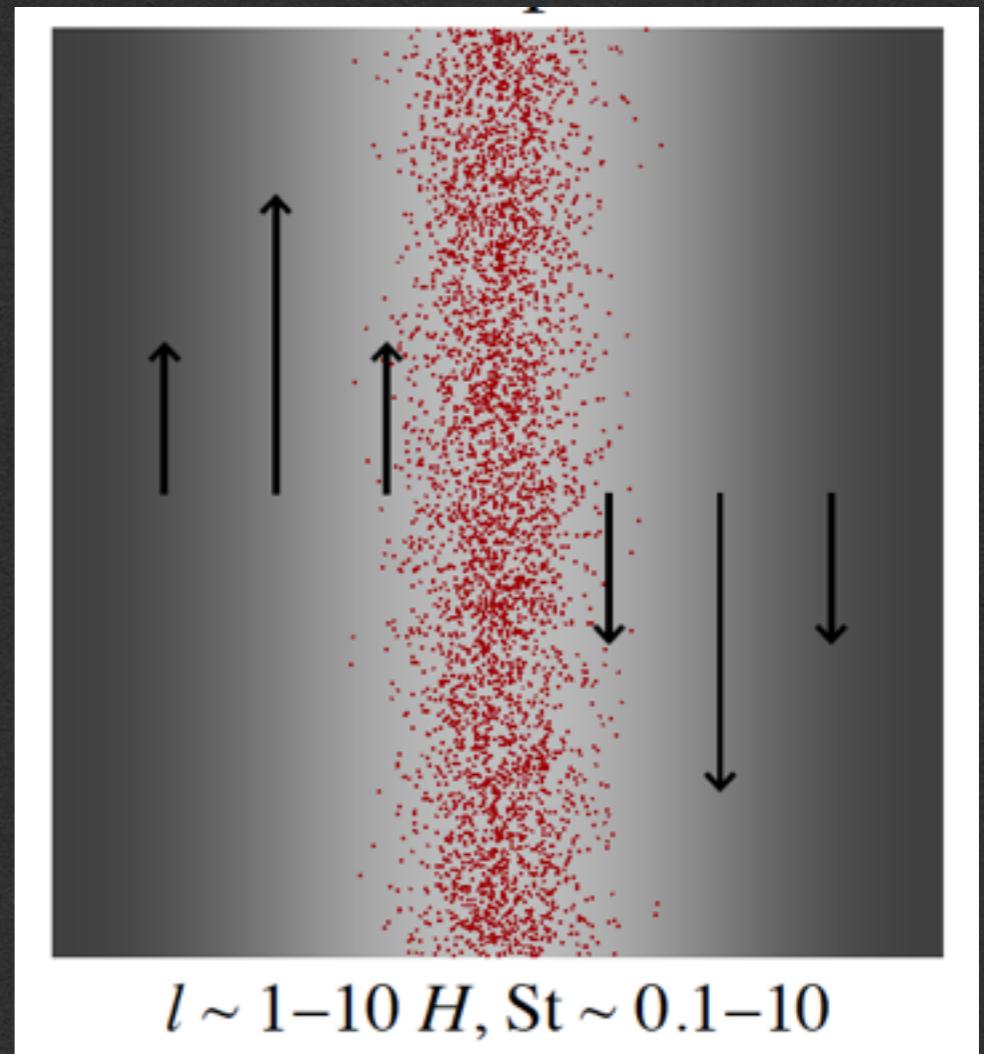
- 円盤内でダストは高圧方向にドリフトする (例: ダスト落下)

$$|v_{\text{drift}}| \propto \frac{2\text{St}}{1 + \text{St}^2} |\nabla P|$$

- $\nabla P_{\text{背景}} \sim P_{\text{背景}}/r$
- $\nabla \delta P \sim \delta P/\lambda$ (λ : 密度構造の波長)

$\Rightarrow \delta P/P_{\text{背景}} \sim \lambda/r (\sim H/r)$ であれば、
ダストは中心星落下に打ち勝って
局所高圧領域に濃集する

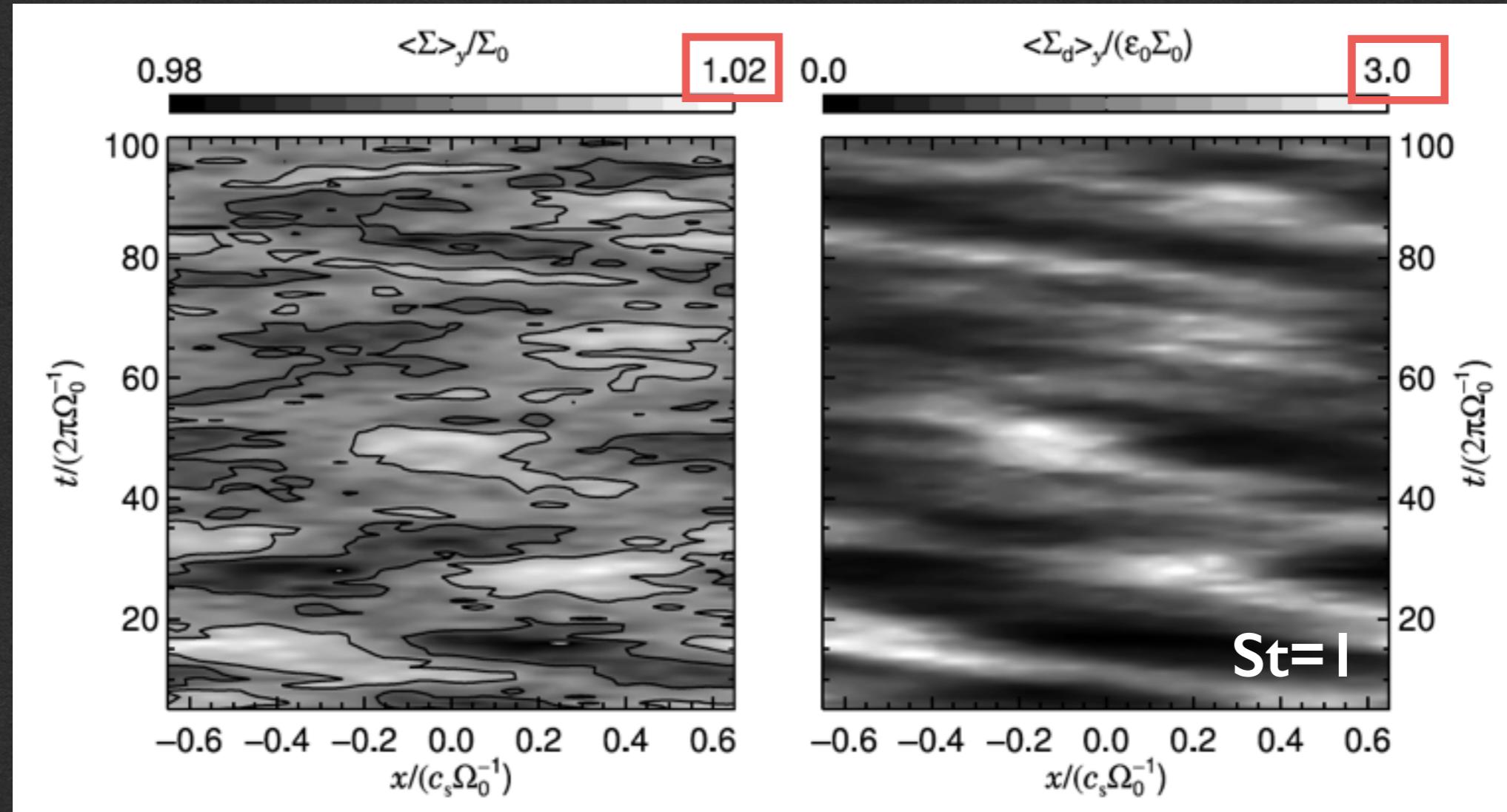
低圧 高圧 低圧



円盤乱流のガス密度揺らぎへのダスト濃集

3D MRI-driven turbulence, no back-reaction

(Johansen & Klahr, & Henning 2006)



クランプの体積密度 ~ 10 倍 × 平均密度

(沈殿を考慮しても、 $\rho_{\text{dust,clump}} \sim 1-10 \rho_{\text{gas}}$; see Johansen et al. 2007)

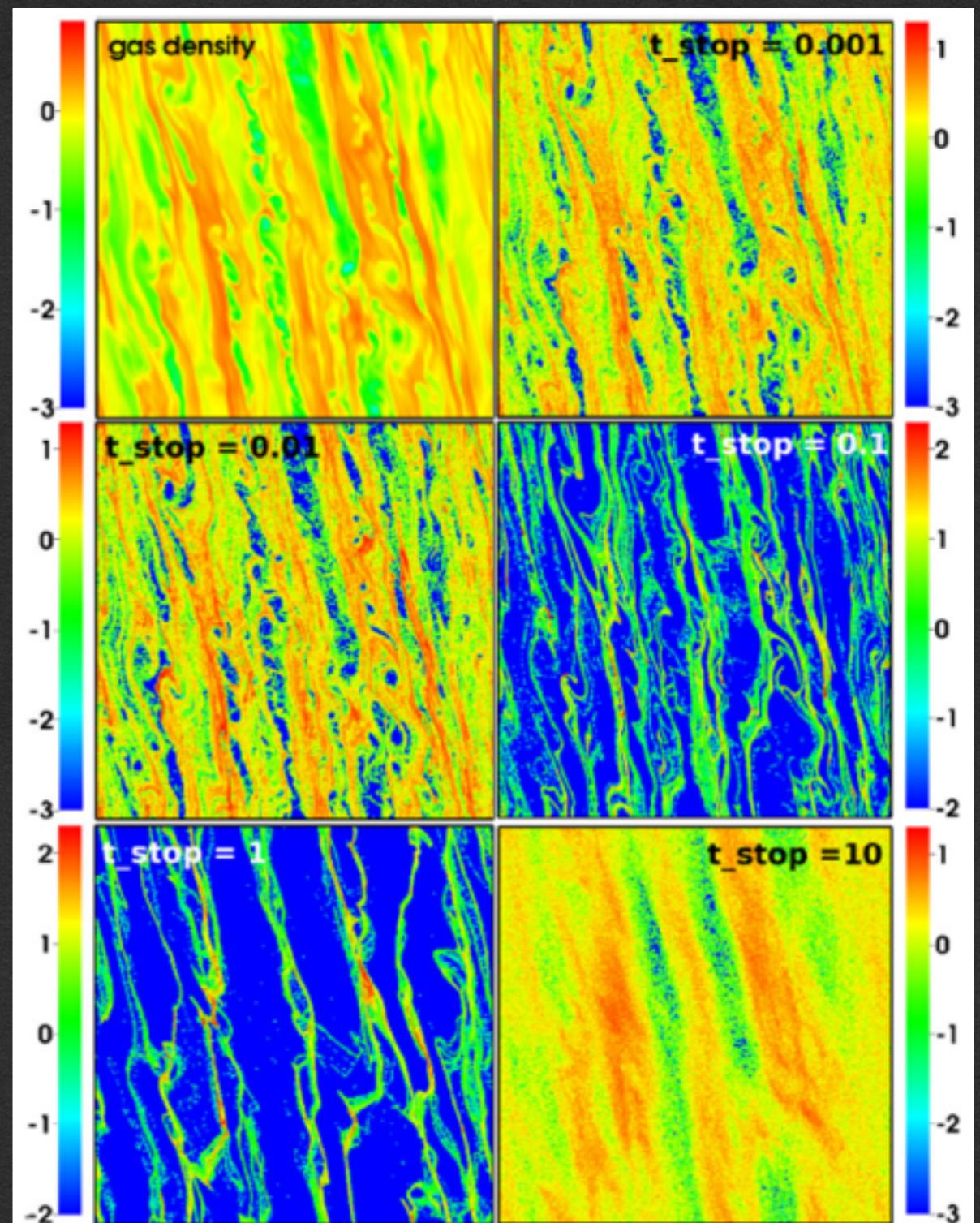
重力不安定乱流での濃集→微惑星形成

Gibbons et al. (2012, 2014, 2015); Booth & Clarke (2016); Shi et al. (2016)

$$\delta P/P \sim 1 \quad (\delta \Sigma_{\text{gas}}/\Sigma_{\text{gas}} \sim 1)$$

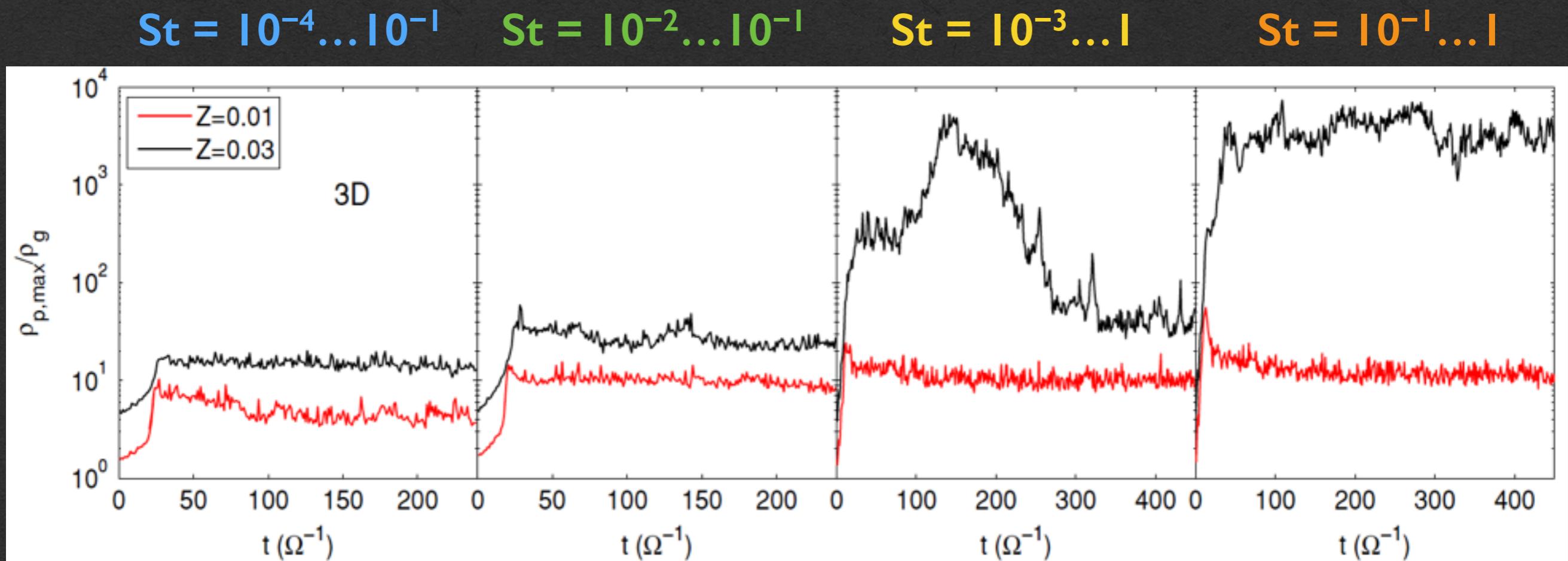
$$\Rightarrow v_{\text{drift}} \sim c_s!$$

- $St=0.1-1$ であれば、
クランプの濃集度は $\sim 10-100$
- $Q_{\text{gas}} \sim 1$ のガス円盤なので、
クランプはこの濃集度でも
重力的に束縛する
(Gibbons et al. 2014)



ストリーミング不安定によるダスト濃集

- ダストの落下が引き起こす不安定性 (e.g., Youdin & Goodman 2005)
- 大きなダスト ($St > 0.1$) かつ 高いダスト面密度 ($Z = \sum_d / \sum_g > 0.03$) なら、自己重力で束縛されるクランプ ($\rho_d / \rho_g > 10^2$) が形成
(e.g., Johansen et al. 2009; Bai & Stone 2010; Carrera et al. 2015)



Bai & Stone (2010a)

課題（まとめに代えて）

- (言うまでもなく)どの乱流がいつ・どこで起こるか?
 - 近年「MRIが起こる領域」はどんどん狭まっている
 - GI, SIを起こすような「大ダスト濃集領域」をどう作るか
 - 高気圧領域(圧力バンプ、渦)の安定性? (e.g., Taki+16)
 - 濃集するダストとガスのダイナミクス(3D,高解像度)が重要
- $St \sim 10^{-3} \dots 1$ のダストの乱流相対速度の正確な評価
 - 現実的な乱流(MRI, GI, SI, ...)で、高解像度の計算
 - せめて $St \sim 0.01 - 0.1$ ($Re \sim 10^2 - 10^4$ で慣性領域を十分に分解)
 - そもそも現実乱流のスペクトルが正確にわかっていない
(cf: MRI乱流 Lesur & Longeretti 2011; Walker et al. 2016)