

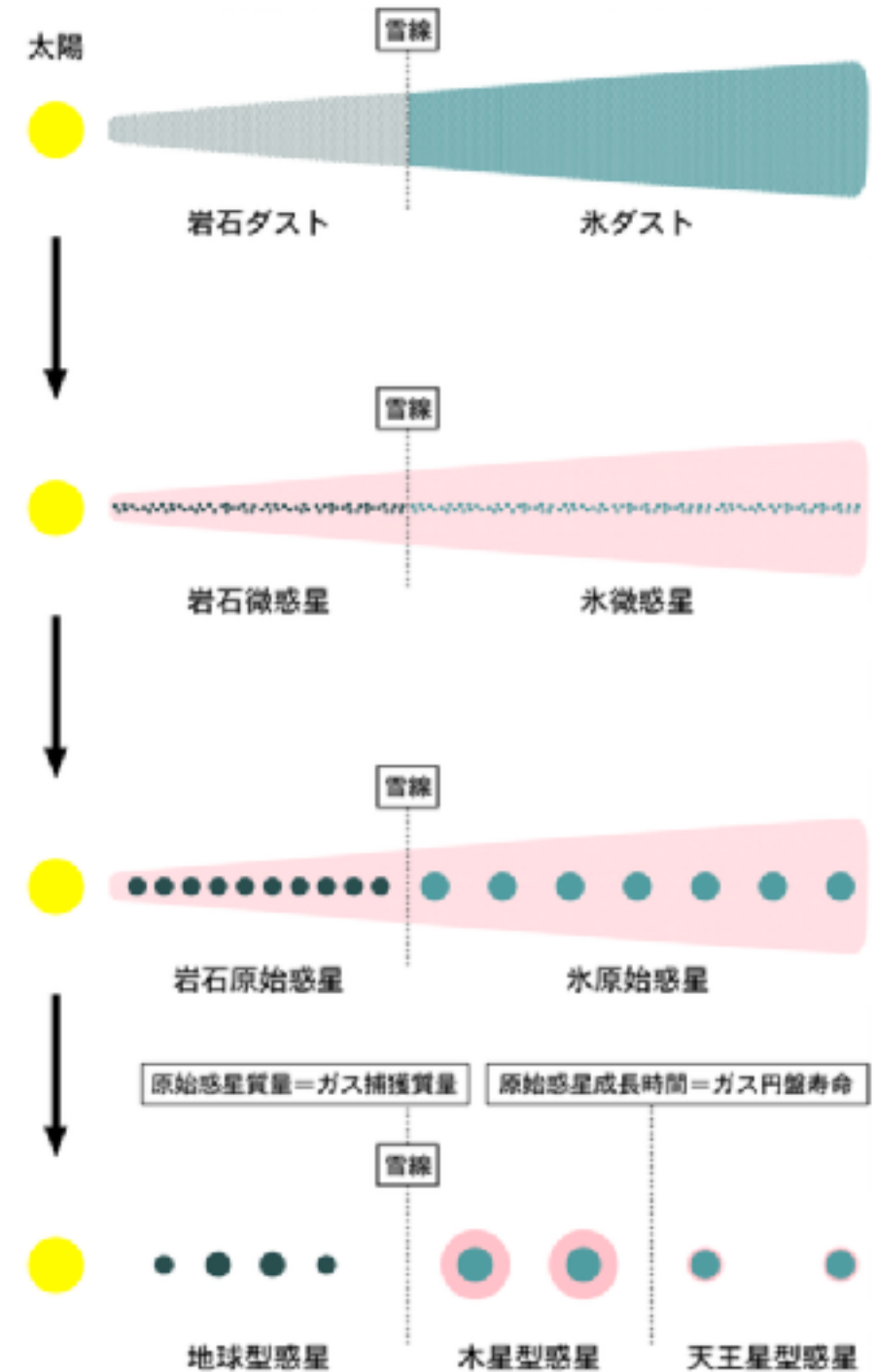
ダスト・ガス相互作用による流体不安定と微惑星形成

道越秀吾（京都女子大学）

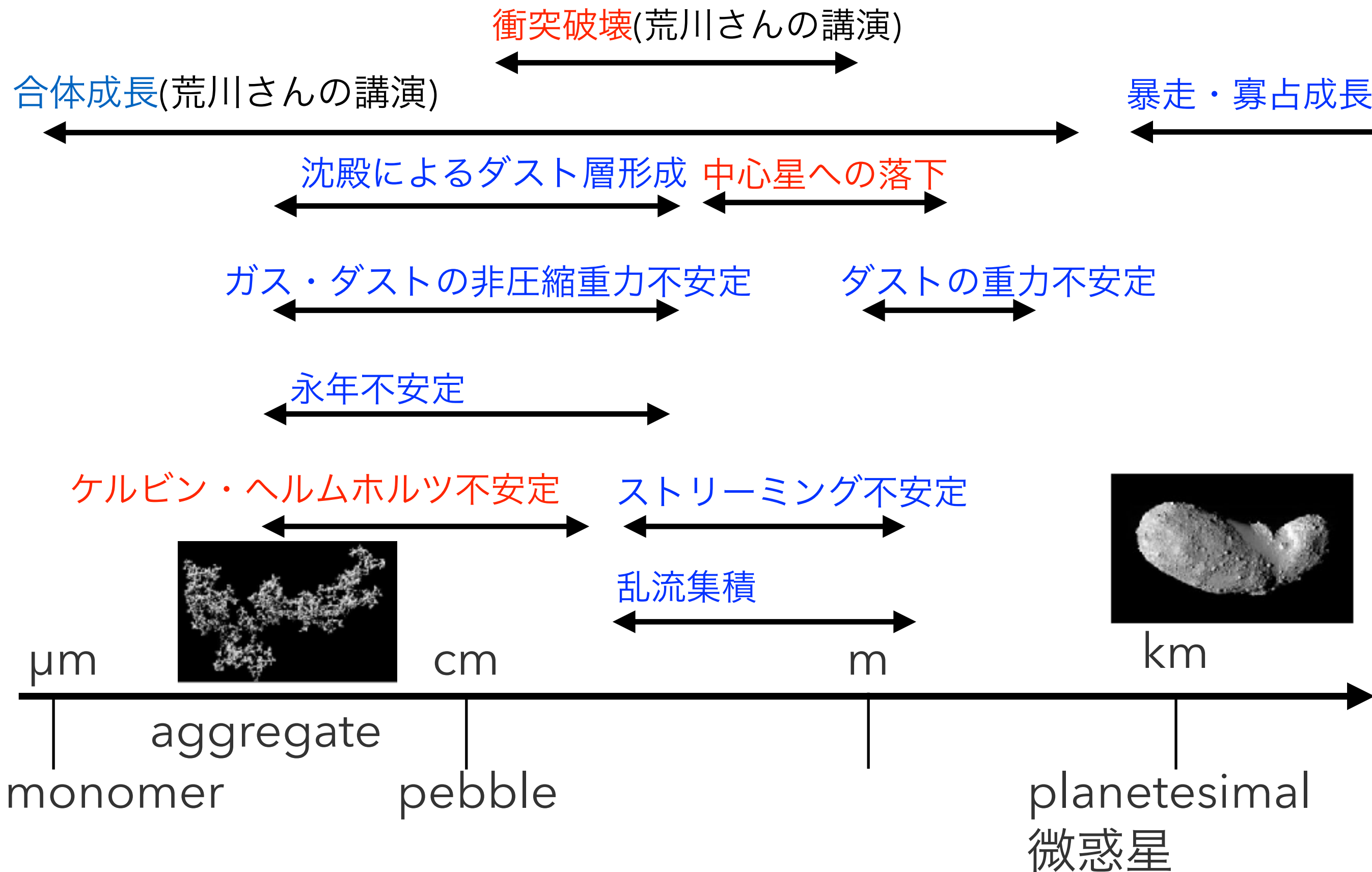
微惑星

微惑星仮説

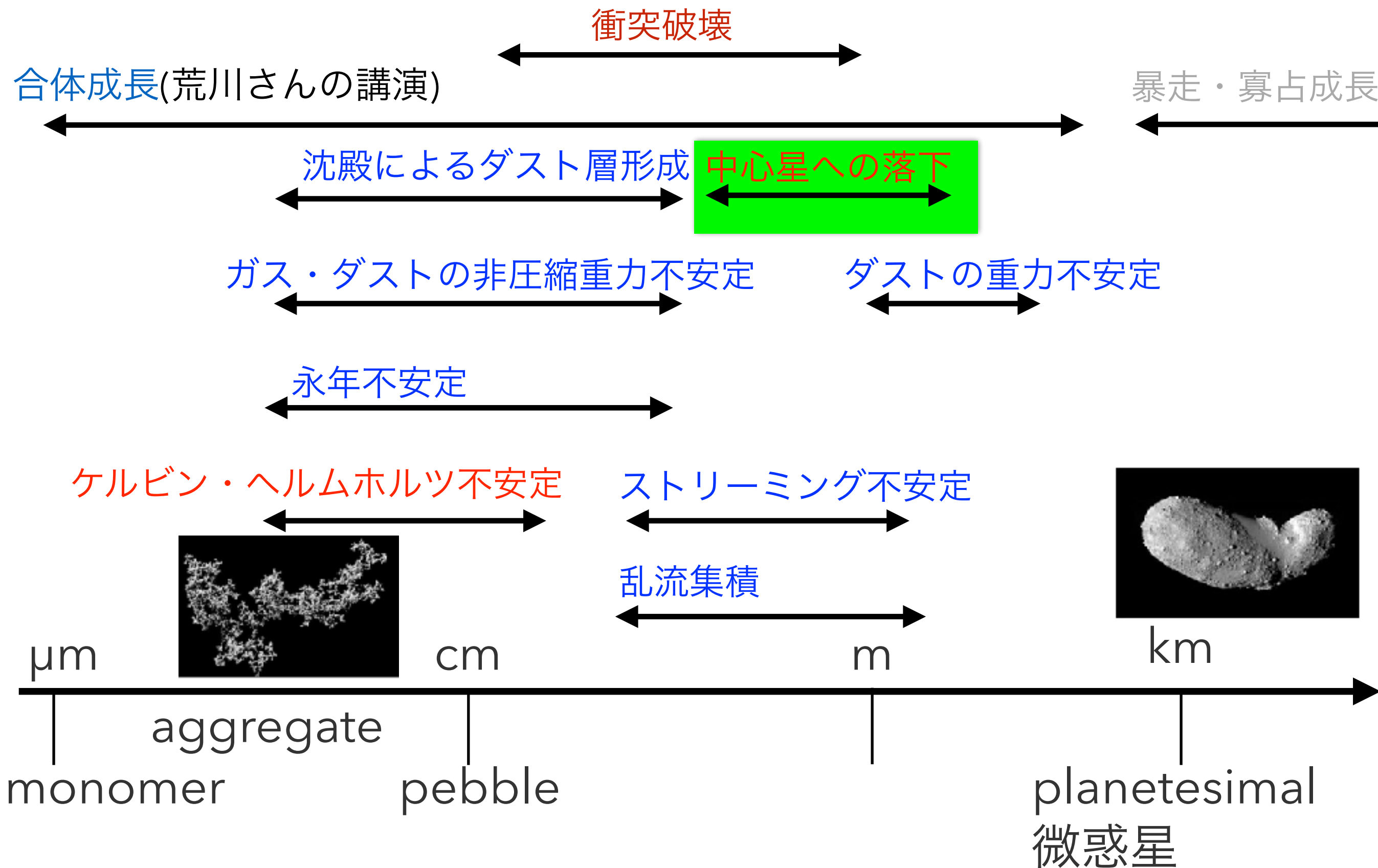
- ダスト ($\sim 1\mu\text{m}$)からキロメートル程度の小天体 (微惑星) が形成
- 微惑星は合体して原始惑星を形成
- 原始惑星から固体惑星、ガス捕獲で巨大ガス惑星を形成



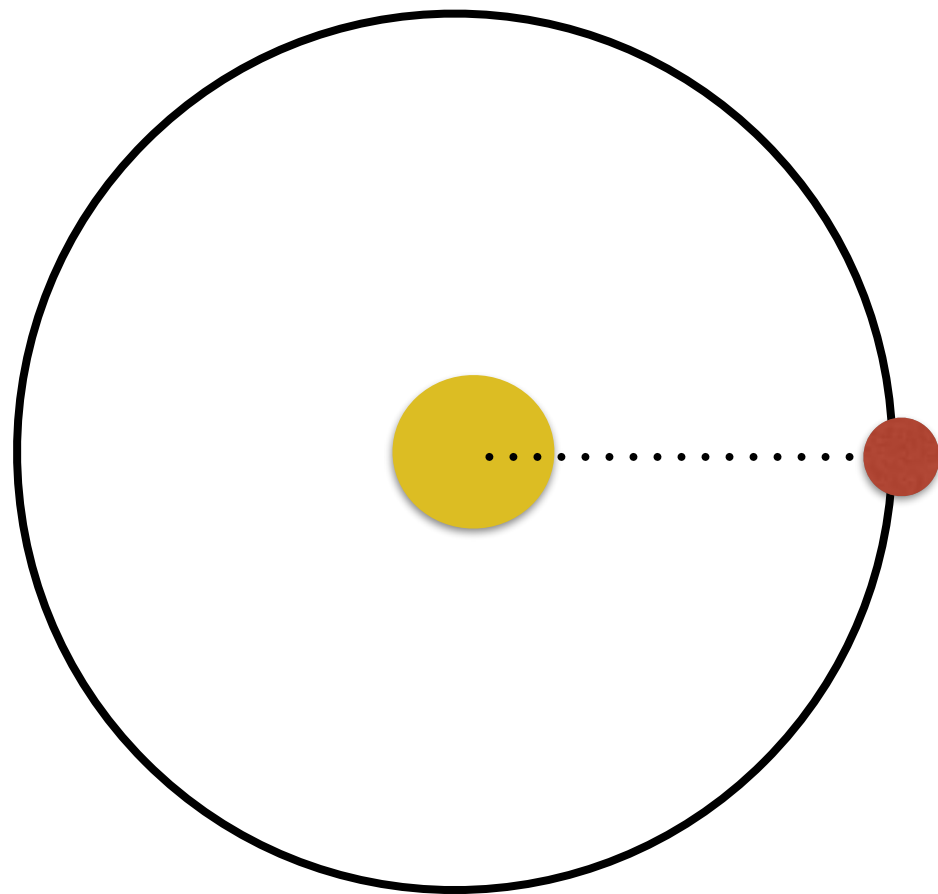
ダストの成長段階と主要プロセス



中心星への落下

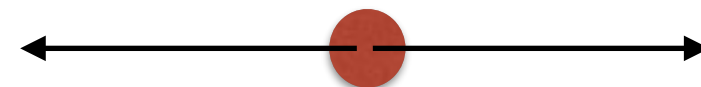


ダストとガスの公転速度について



回転系で考えると・・・

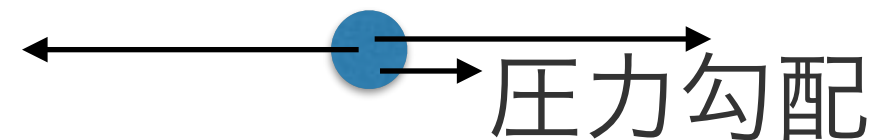
ダストの力の釣り合い
重力 遠心力



$$\frac{GMm}{r^2} = m\Omega^2 r$$

ガスの公転速度
・ 外向きの圧力勾配

ガスの力の釣り合い
重力 遠心力



遠心力がわずかに小さい → ガス公転速度が遅い

ガスとダストの公転速度

摩擦による相互作用を無視した場合

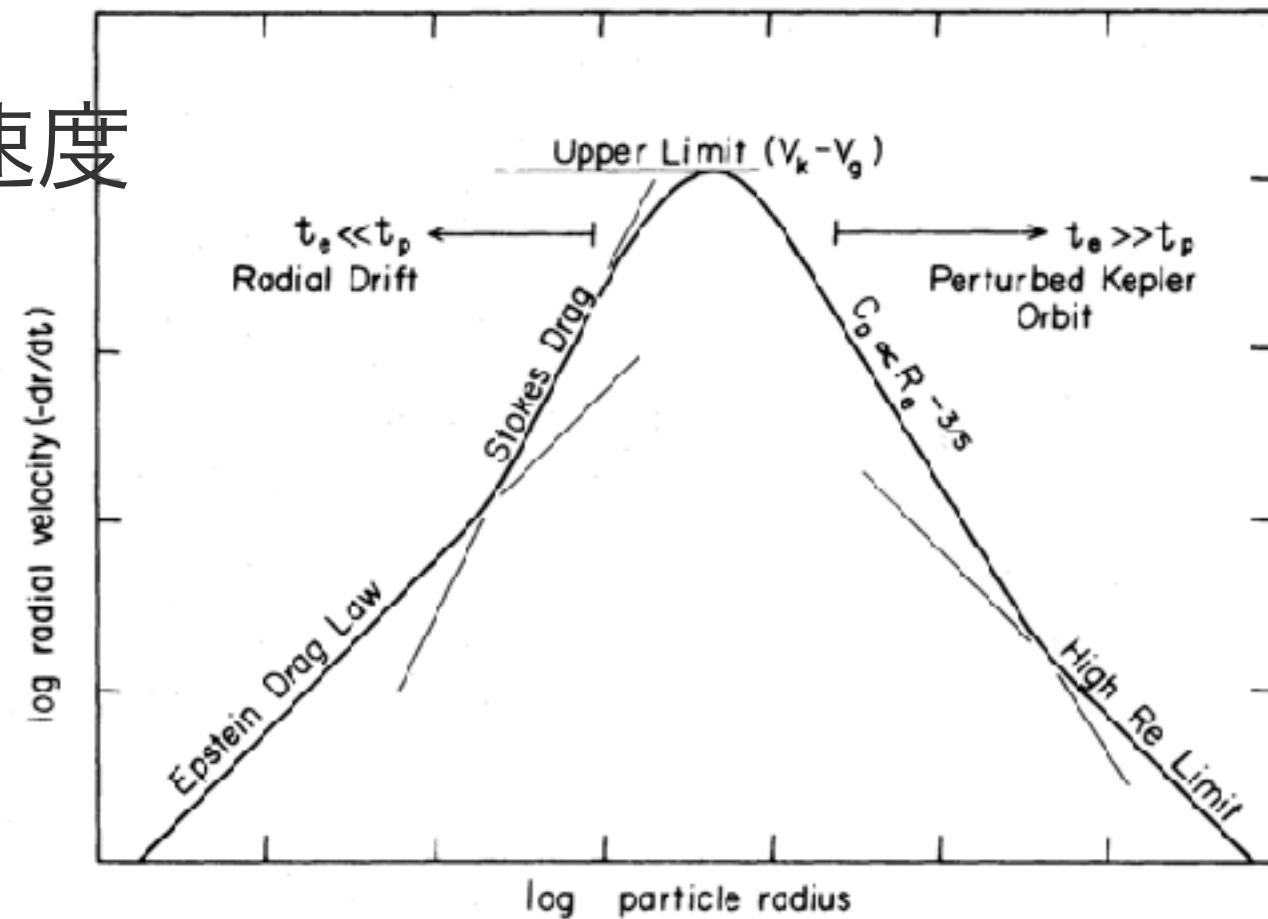
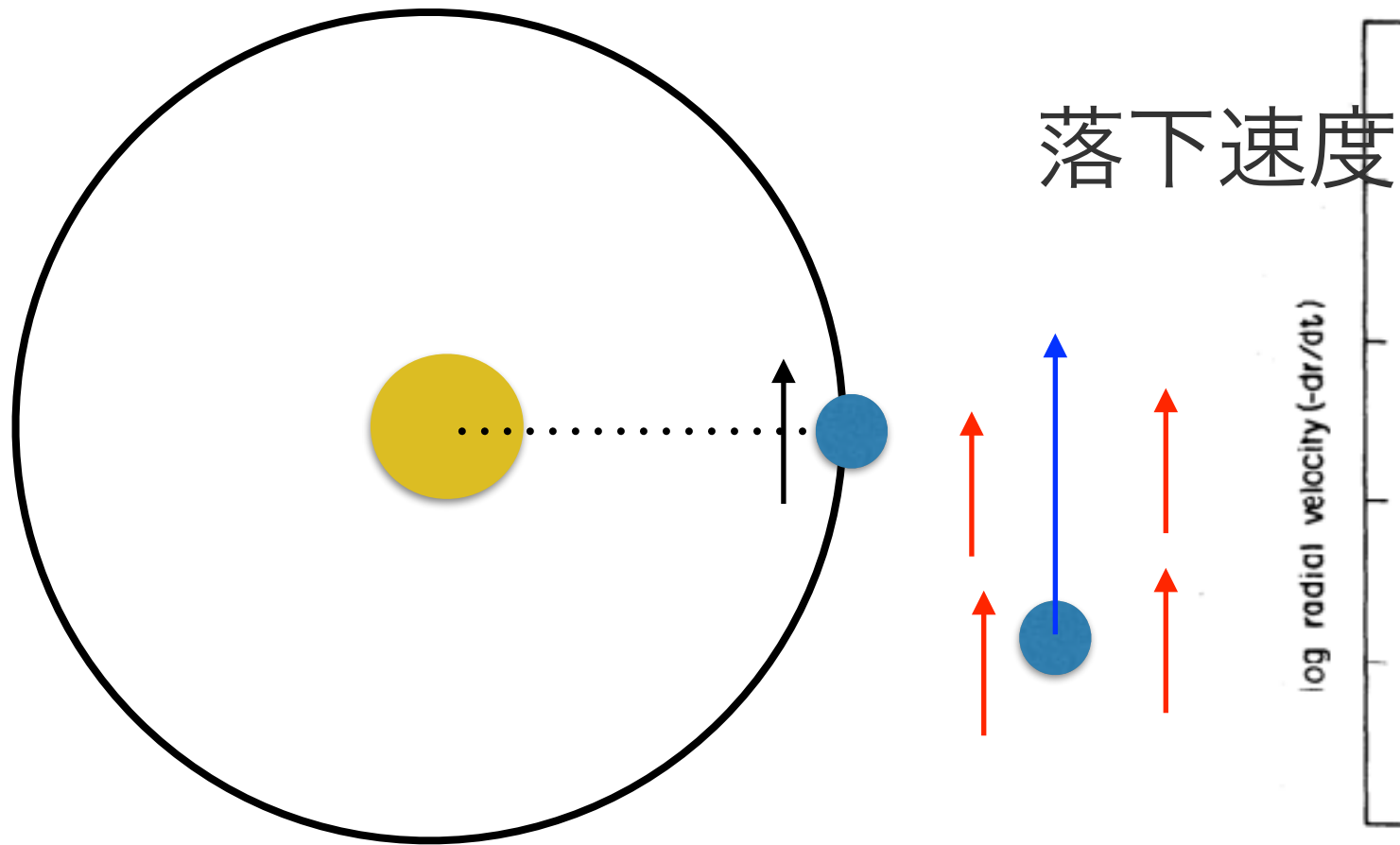
$$\text{ダスト速度} \quad v_d = v_K$$

$$\text{ガス速度} \quad v_g = v_K(1 - \eta)$$

$$\eta \sim 10^{-3} \text{ (圧力勾配できまる)}$$

- ・ ガス速度はケプラー速度より0.1%程度遅い
- ・ 実際は相互作用は無視できない
- ・ 相互作用を考慮すると $v_K(1 - \eta)$ と v_K の間になり
解析解がある(Nakagawa, Sekiya, Hayashi 1986)

向かい風による中心星への落下



- ・ 周囲のガスが遅く公転
- ・ ダストは向かい風を受けて角運動量を失う
- ・ 徐々に中心星へ落下

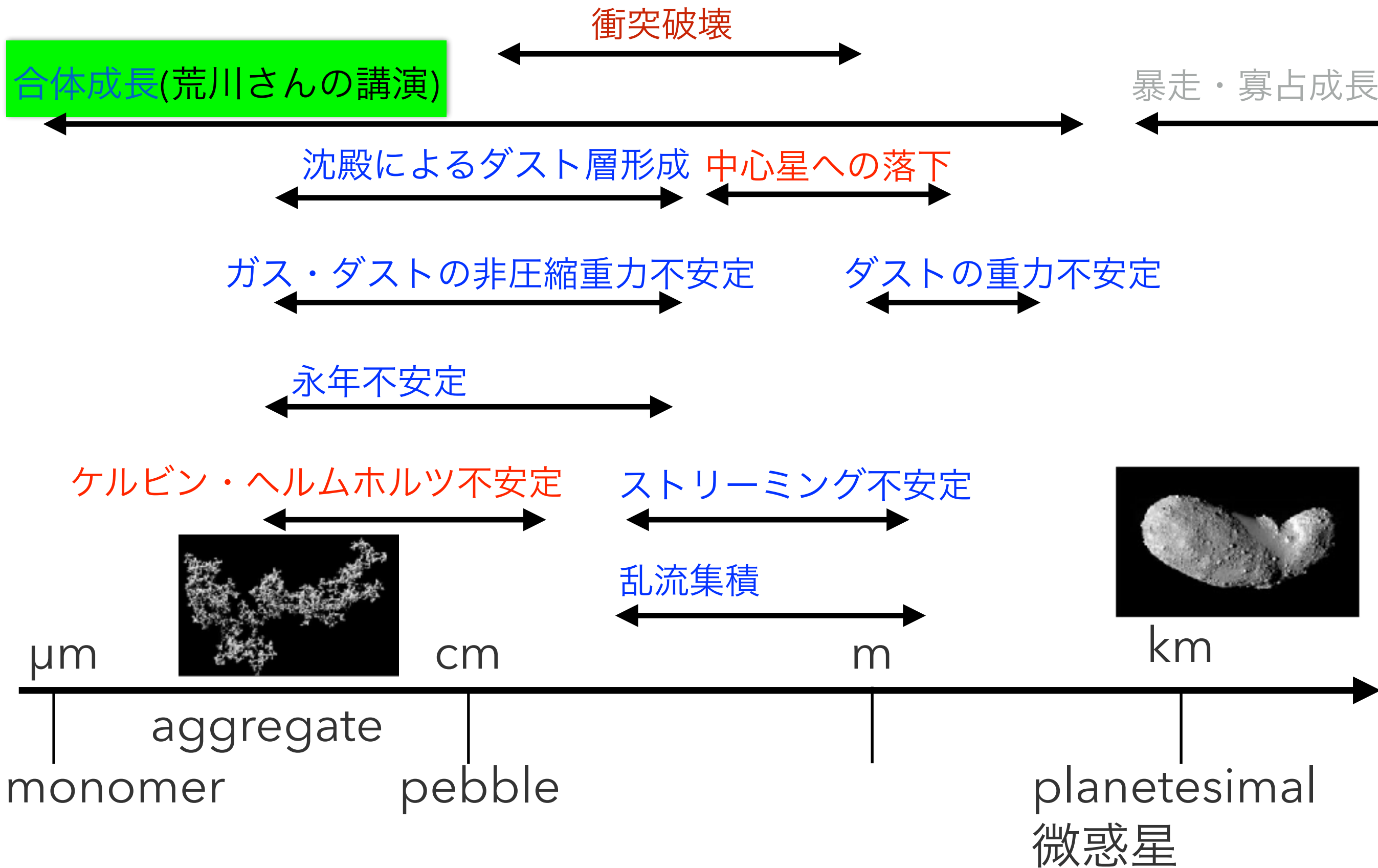
サイズ

Weidenschilling 1977

メートルサイズの天体は100～年程度で落下

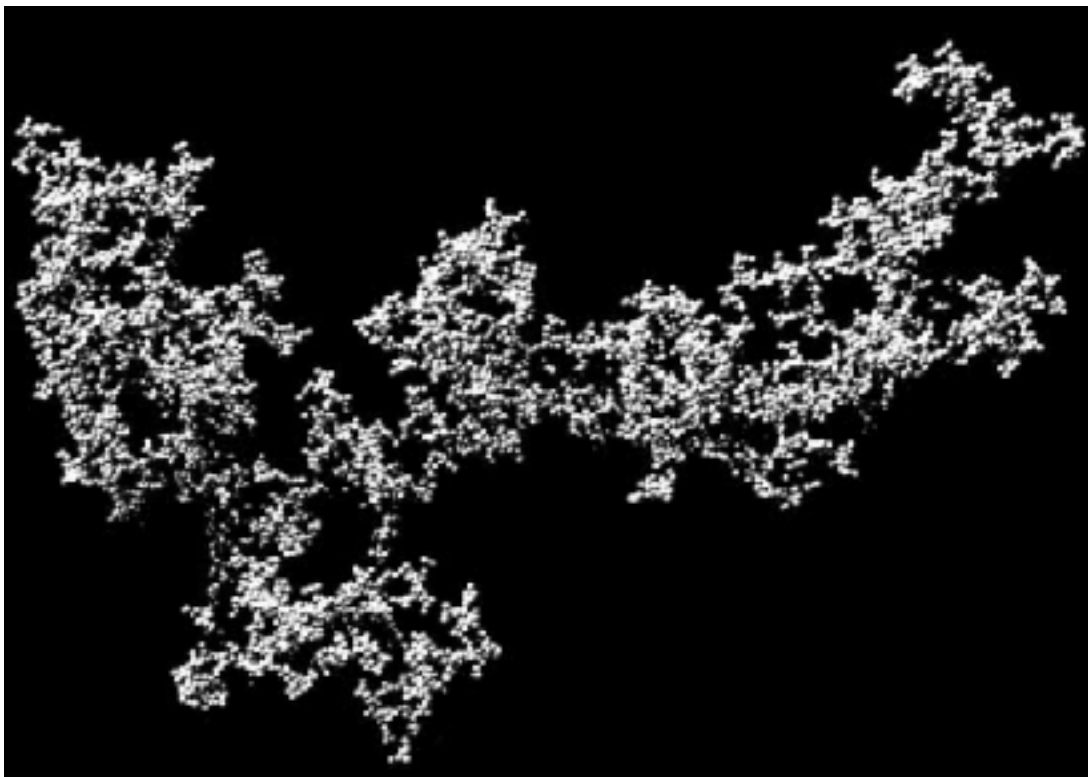
(Adachi et al. 1976, Weidenschilling 1977)

ケルビン・ヘルムホルツ不安定

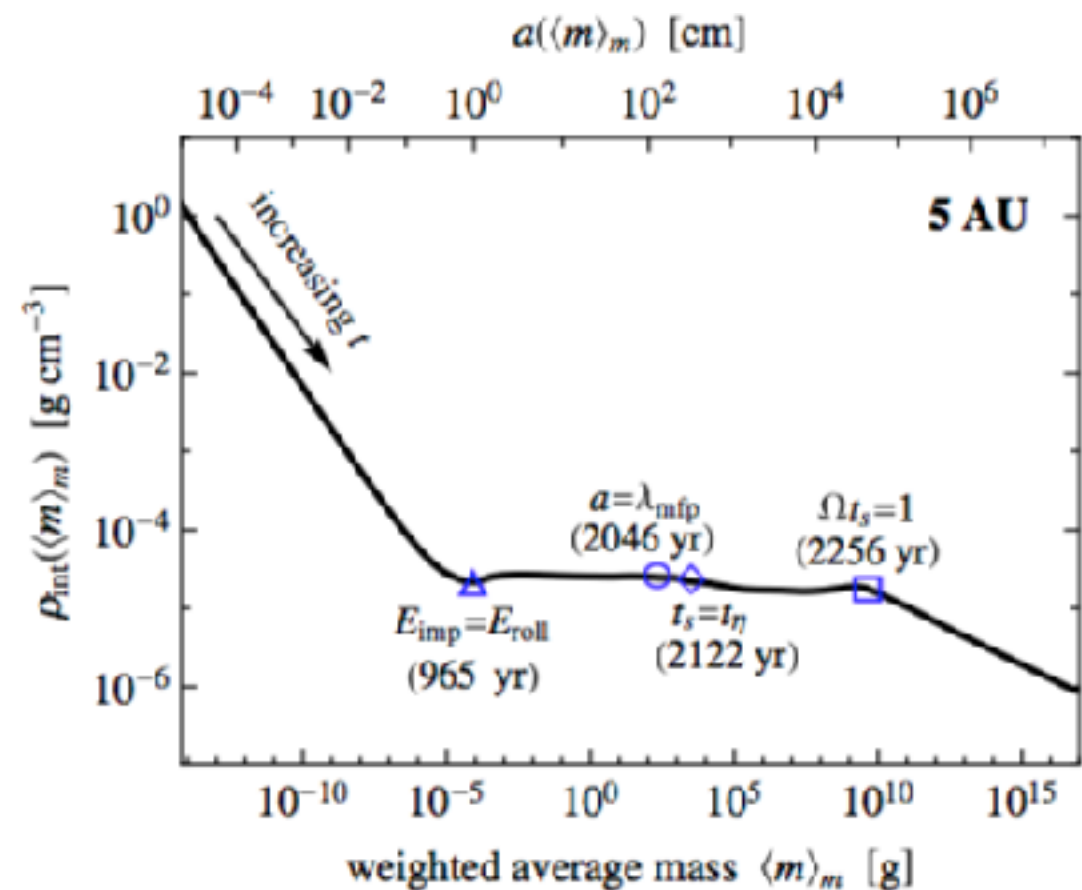


ダストの合体成長

- ・ダストモノマー ($\sim 0.1\mu\text{m}$) の合体でアグリゲート形成
- ・成長するほど密度が低くなる

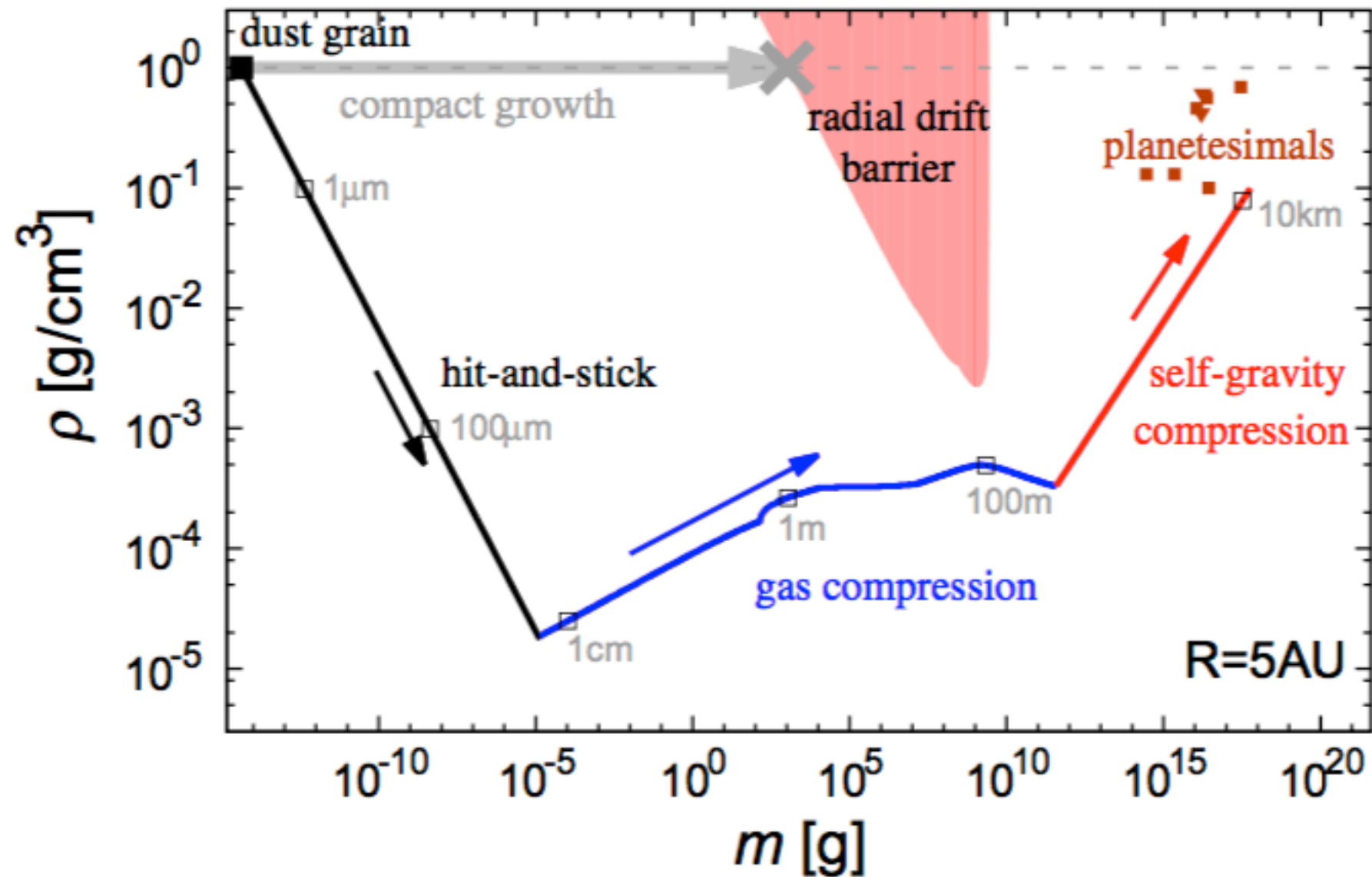


Wada et al. 2008



Okuzumi et al. 2008

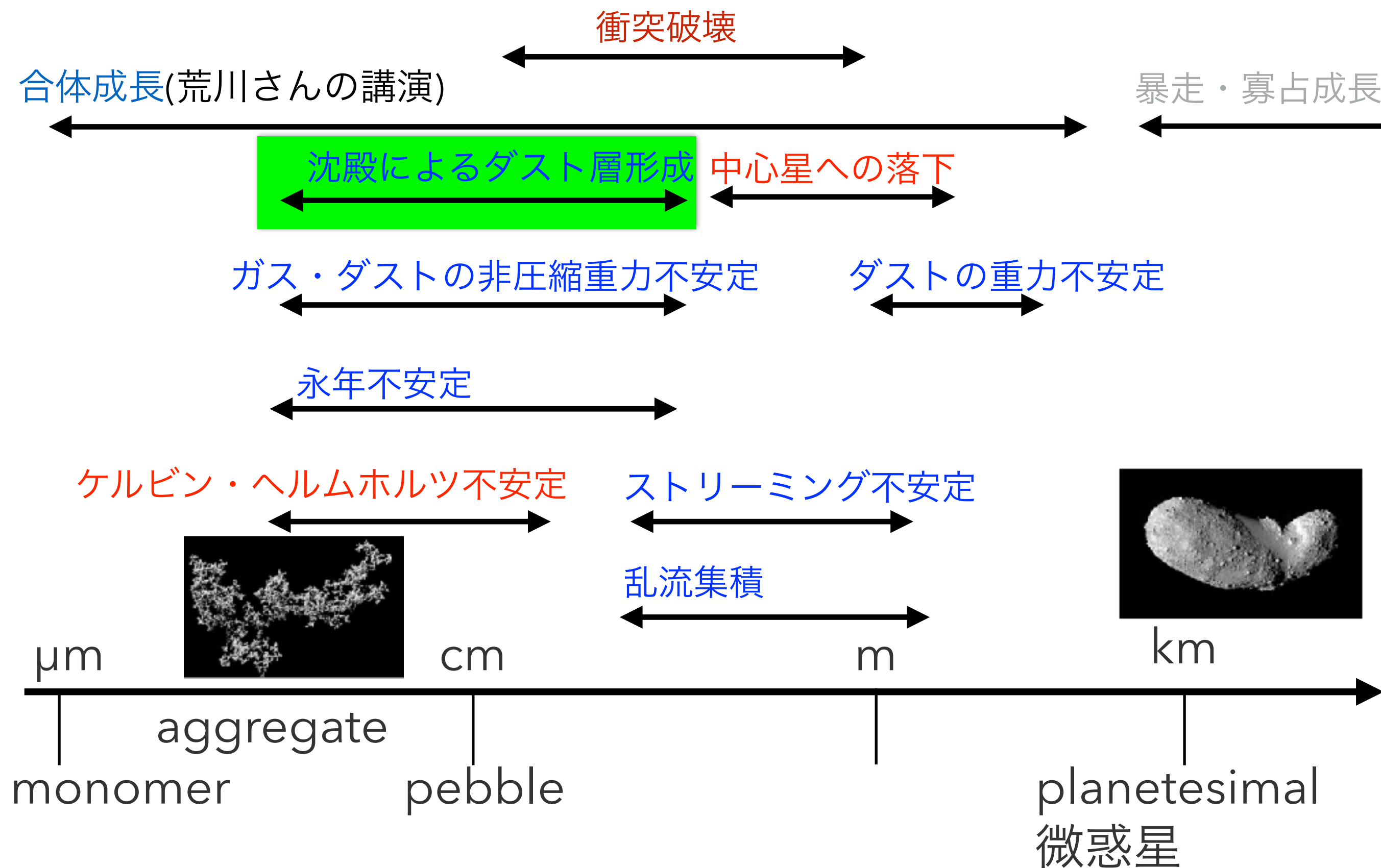
合体成長だけでも微惑星形成可能



Kataoka et al. (2013)

- ・ 最終的には密度が高まり微惑星が形成される
- ・ 「中心星落下問題」が回避可能

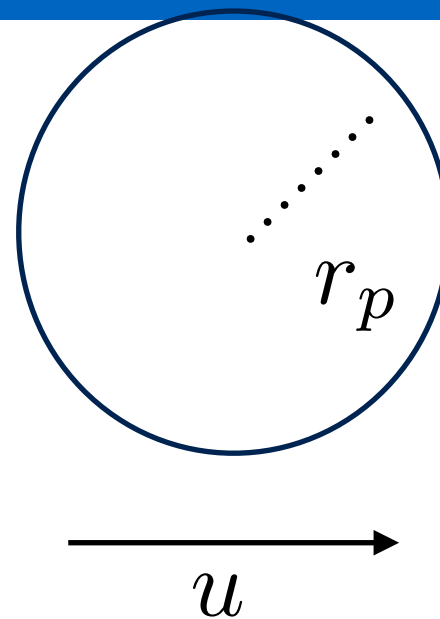
沈殿によるダスト層形成



ダストの摩擦則

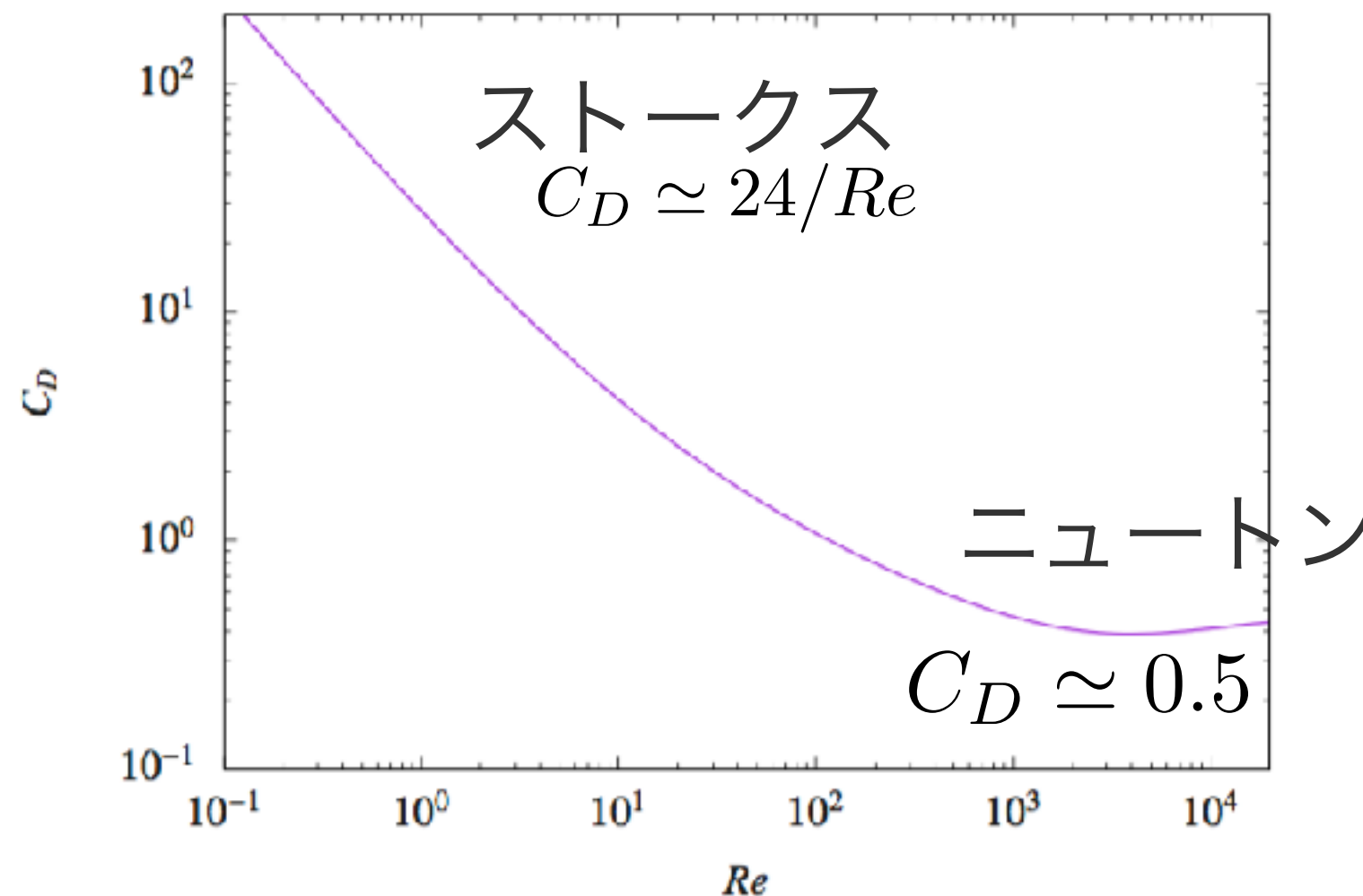
$$F_d = \frac{C_d \rho_g u^2 \pi r_p^2}{2}$$

ρ_g ガス密度



摩擦係数

$$C_D = \begin{cases} \text{Epsitein法則} & \\ \frac{8v_{\text{th}}}{3u} & (r_c < 9l/4) \\ \text{ストークス} & (r_c > 9l/4) \\ \text{ニュートン} & \end{cases}$$



ストークス数、ストッピングタイム

- 摩擦係数が決まると摩擦でダスト・ガス相対速度がなくなる時間が分かる（ストッピングタイム）

$$t_s = \frac{2m_d}{\pi C_D r_d^2 \rho_g u},$$

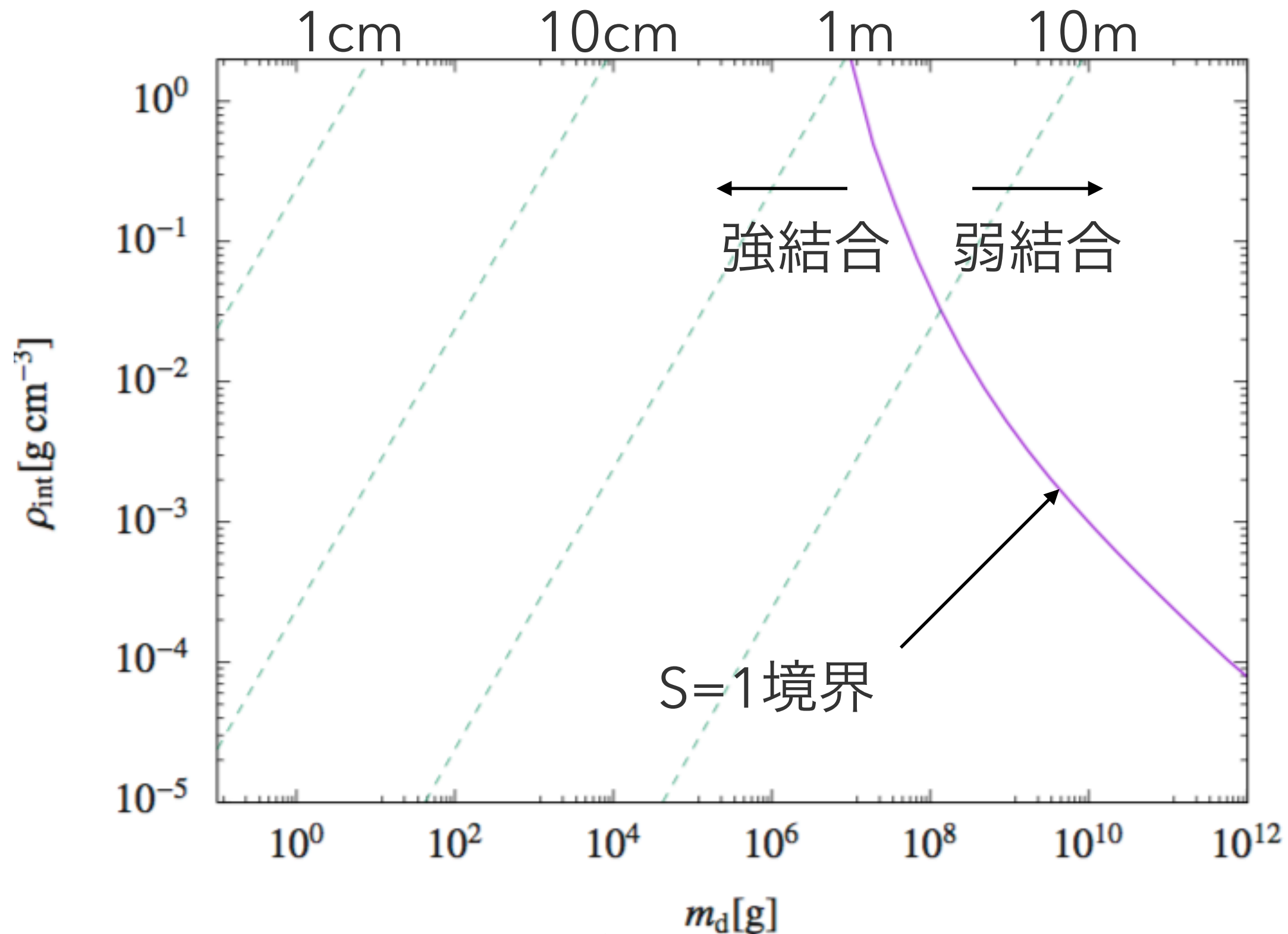
- この時間と回転周期の関係がダイナミクスを特徴づける

$$S = t_s \Omega \sim t_s / T_K$$

ストークス数

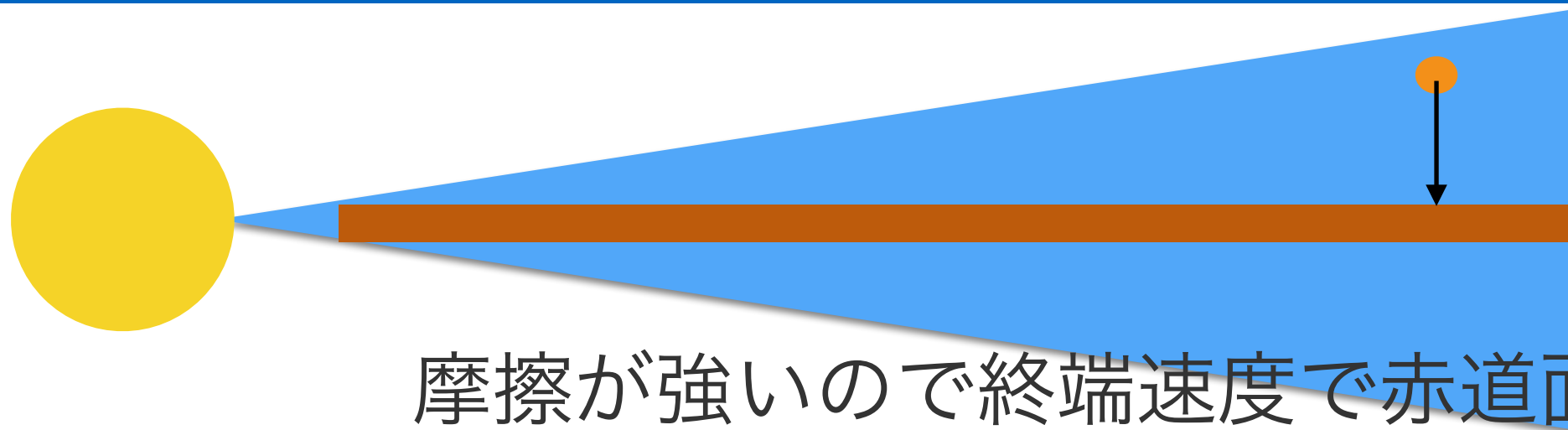
- S が1より小さい時、摩擦が強い状態

ストークス数 1 境界



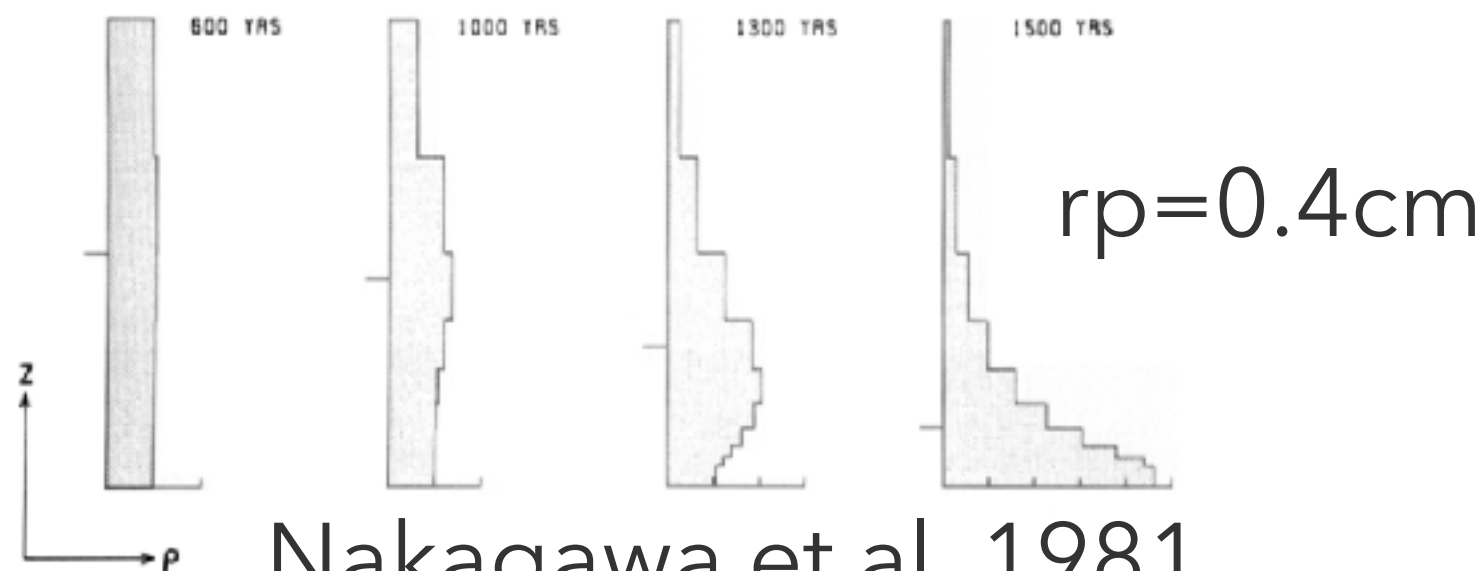
成長するとガスの結合は弱くなる

ダストの沈殿



$$g = -\Omega^2 z$$

摩擦が強いので終端速度で赤道面に落ちていく

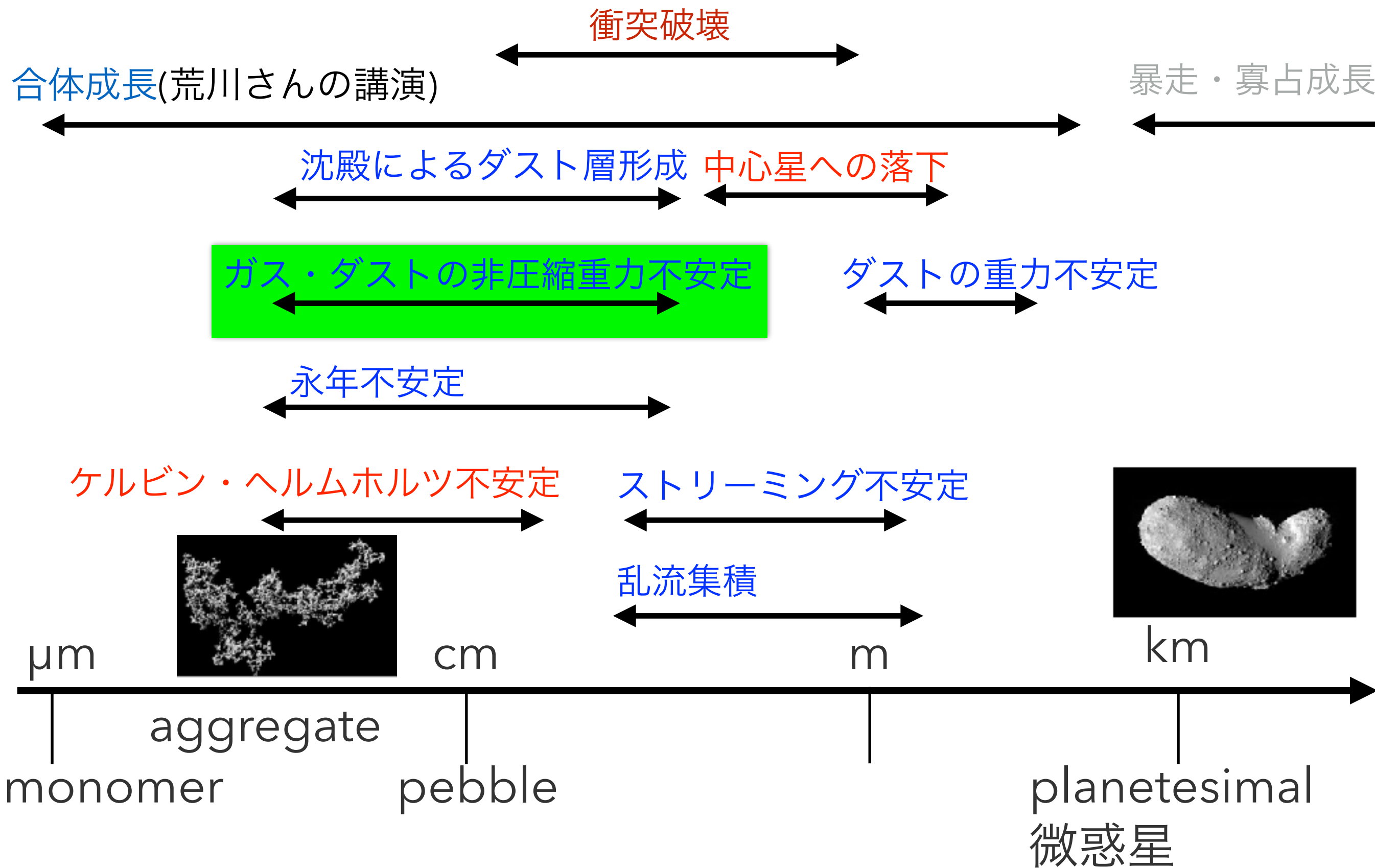


沈殿に要する時間はストークス数に反比例

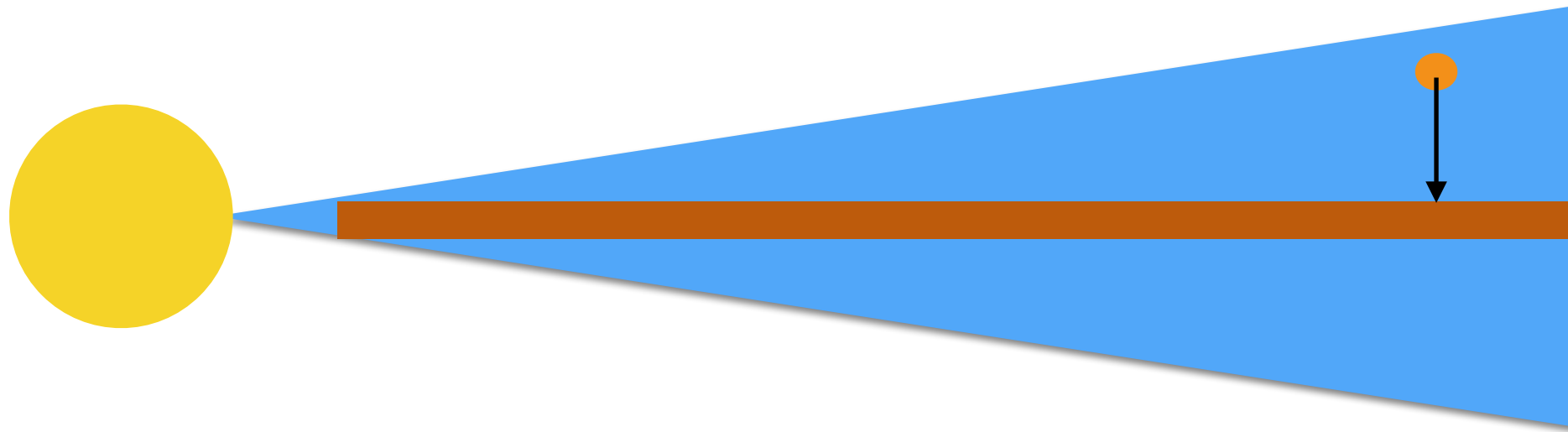
$$t_{\text{sed}} \Omega = 1/S$$

$$t_{\text{sed}} = 170 \left(\frac{r}{\text{cm}} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_p}{\text{g/cm}^3} \right)^{-1} \text{ years}$$

ガス・ダストの非圧縮重力不安定



重力不安定の発生



$$g = -\Omega^2 z$$

沈殿により、ダスト層の密度が高まる

$$\rho_d > \rho_C \simeq \frac{M_*}{a^3}$$

ロツシュ密度

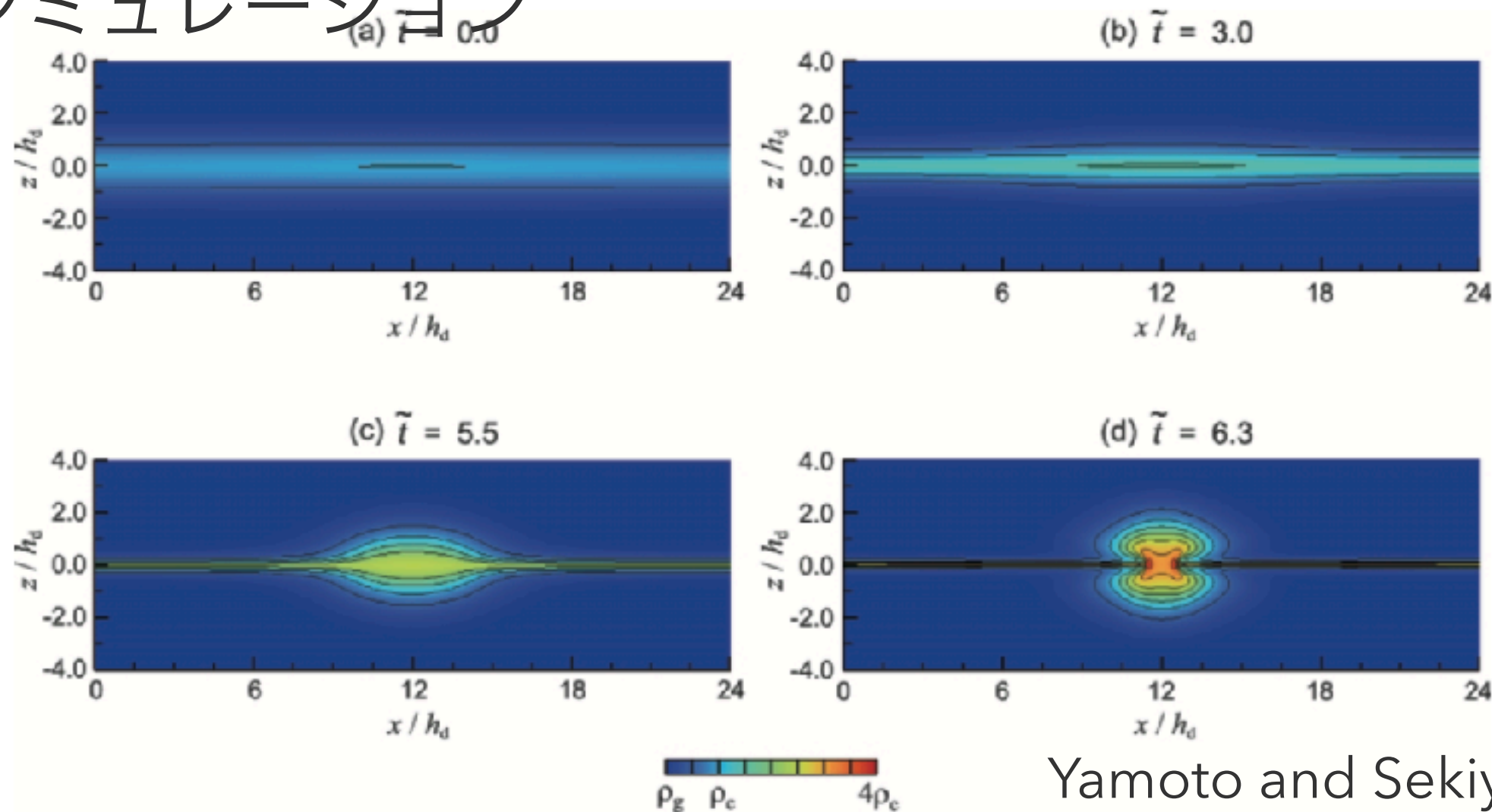
を超えるとダスト層の自己重力が重要になる(Sekiya 1983)

$$\rho_d \gtrsim 100\rho_g$$

ガス密度の100倍を超えた場合

非圧縮の重力不安定の新線形発展

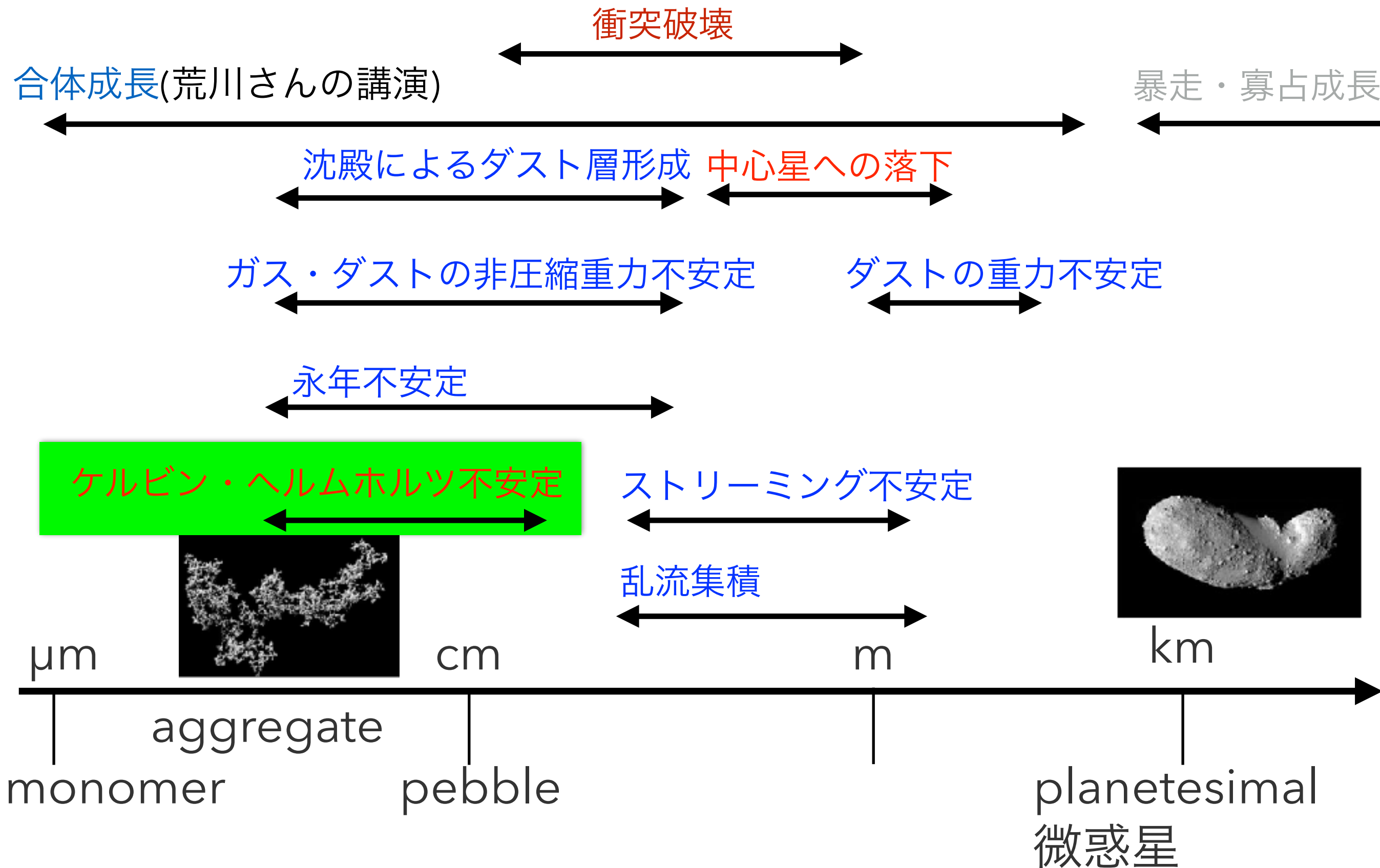
2Dシミュレーション



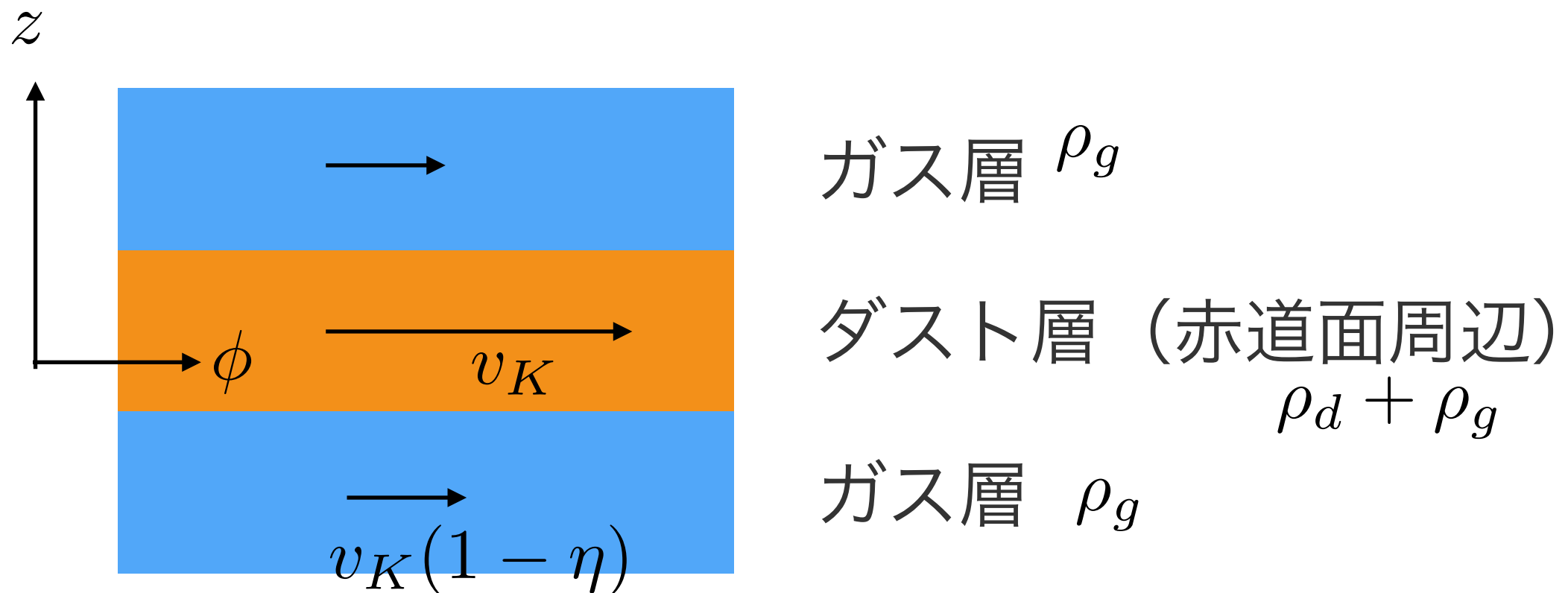
Yamoto and Sekiya (2004)

- ・ガスと強く結合しているのでほぼ非圧縮流体とみなせる
- ・ダストを多量に含んだガスの塊ができる
- ・この中で微惑星が形成される？(Cuzzi et al. 2008)
- ・課題 3D解析では何が起きるか？

ケルビン・ヘルムホルツ不安定



ダスト層形成による速度シアの発生



- ・ 中心のダスト層はケプラー速度で公転する
- ・ ガス層は少し遅く公転する

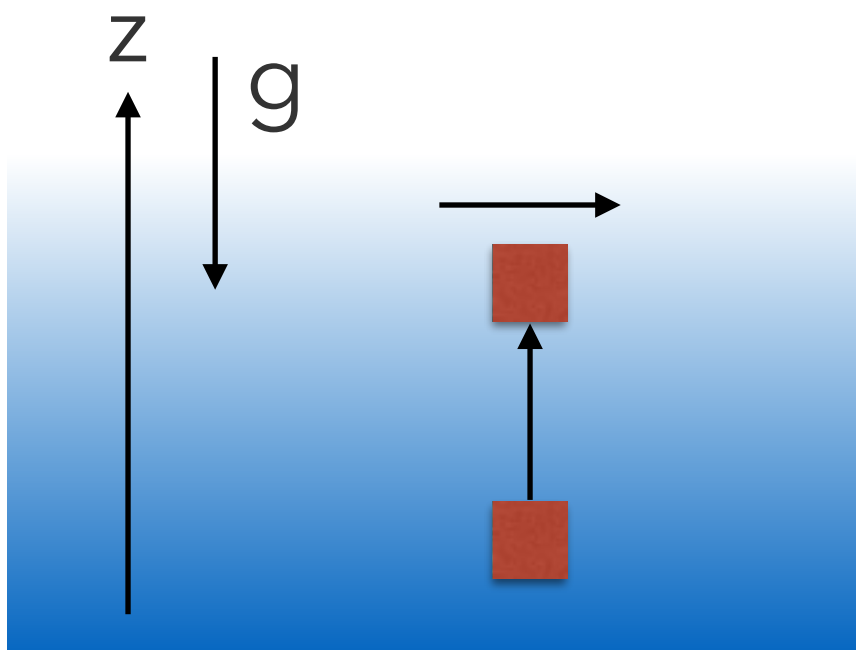
ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の可能性
(Weidenschilling 1980, Michikoshi and Inutsuka 2006)

KH不安定のメカニズムと発生条件

不安定条件

$$J = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho/dz}{(dU/dz)^2} < \frac{1}{4}$$

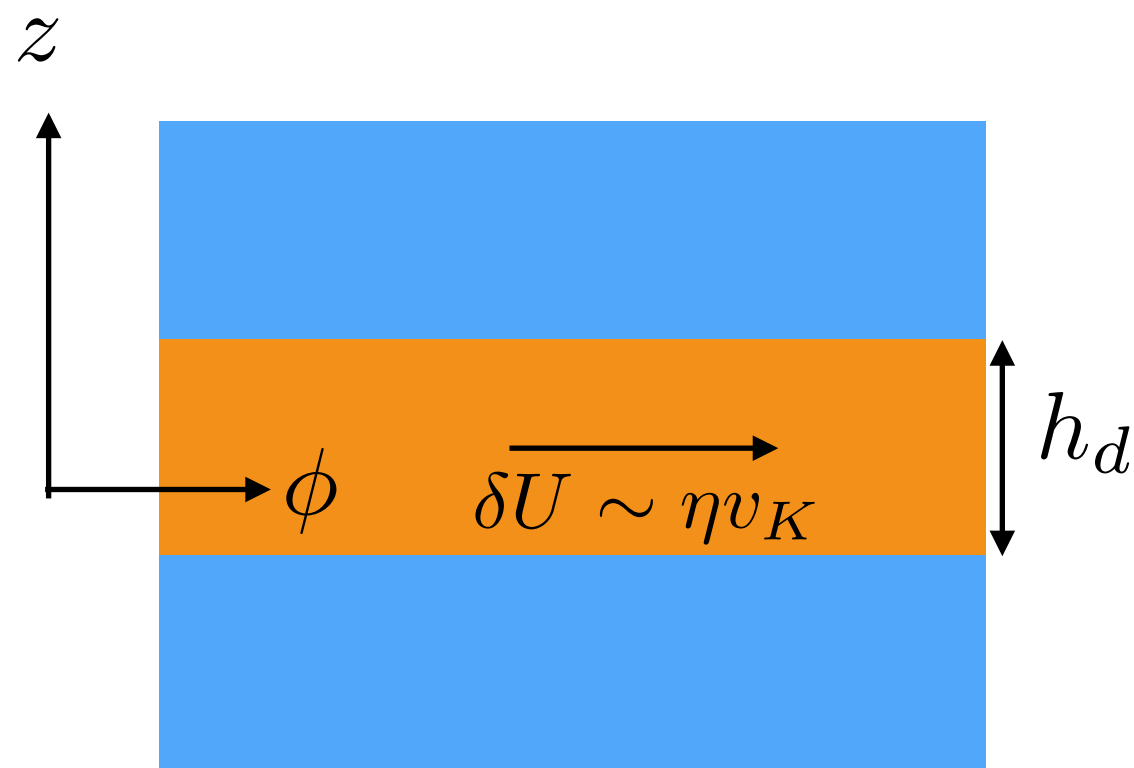
リチャードソン数



Chandrasekhar (1961)の説明

- ・ KH不安定は相対運動のエネルギーでかき混ぜる機構
- ・ 完全にかき混ぜたときに、力学的エネルギー変化が減少するかどうかから上記条件が導出される

KH不安定の準平衡状態



$$J = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho/dz}{(dU/dz)^2} \sim \frac{\Omega^2}{\delta U^2} h_d^2$$

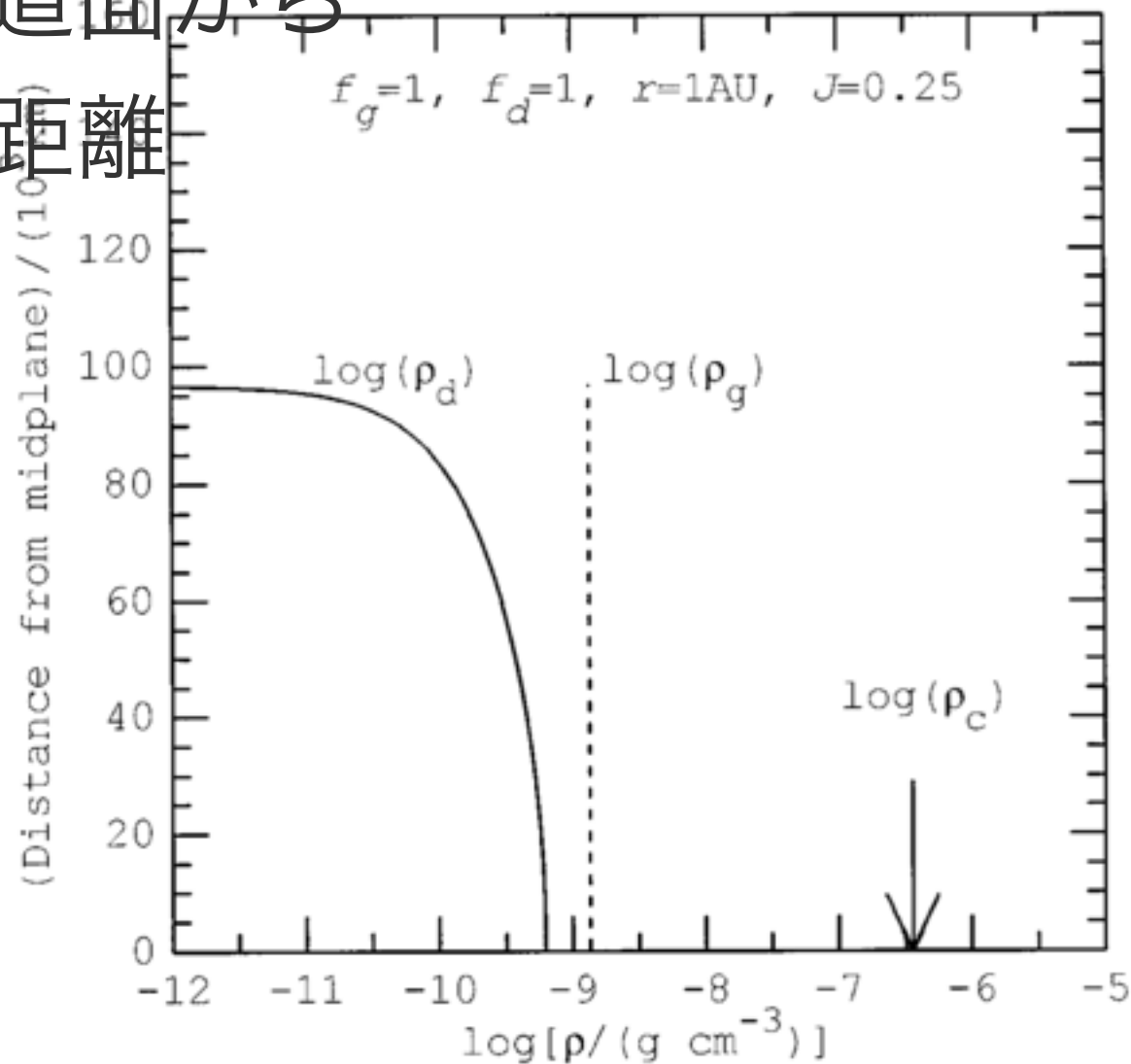
$J < 1/4$ でKH不安定

ダスト層の厚みが $J=1/4$ に調整される (Sekiya 1998)

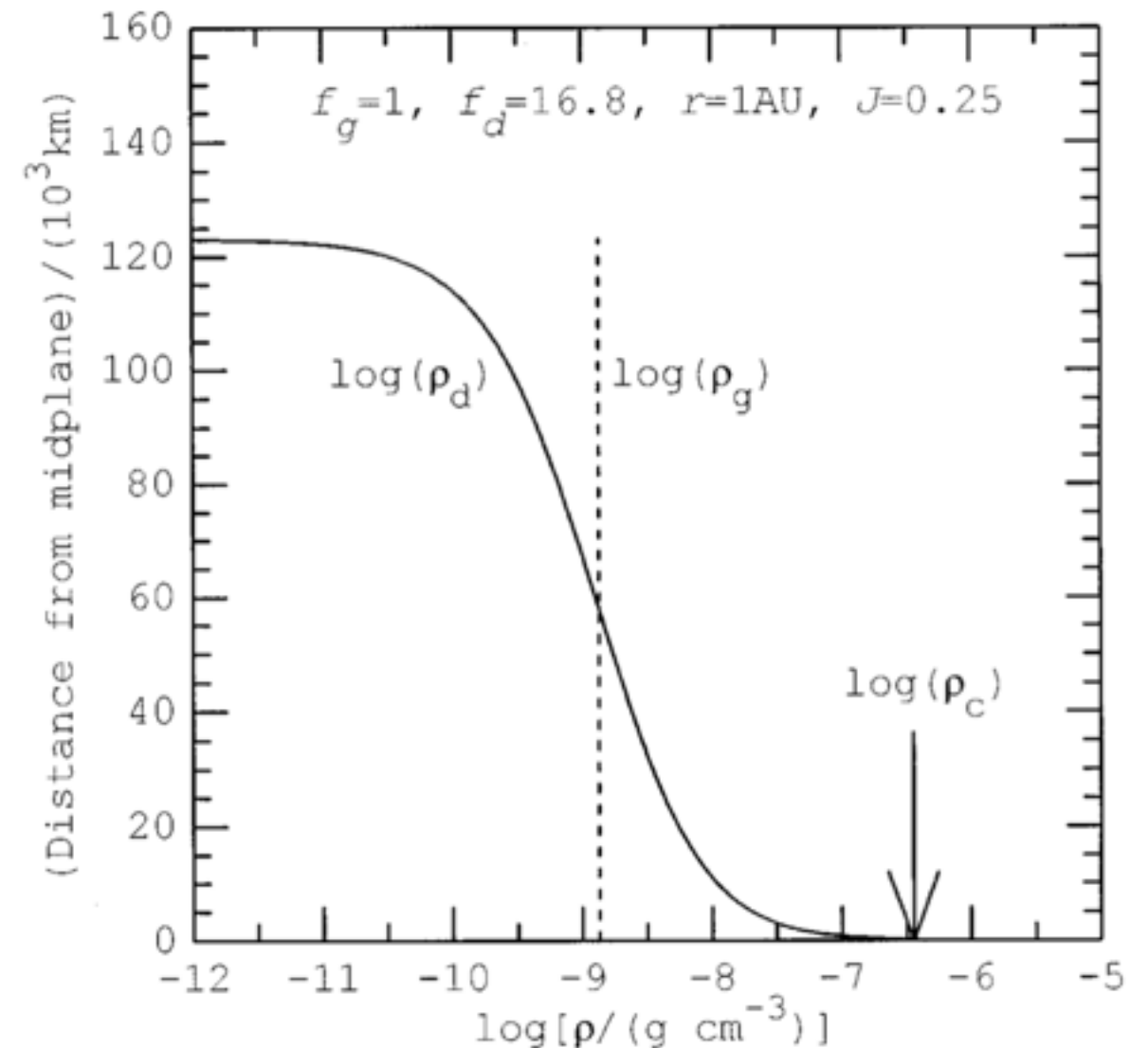


J=1/4となるようなダスト層の密度構造

赤道面から
の距離



密度

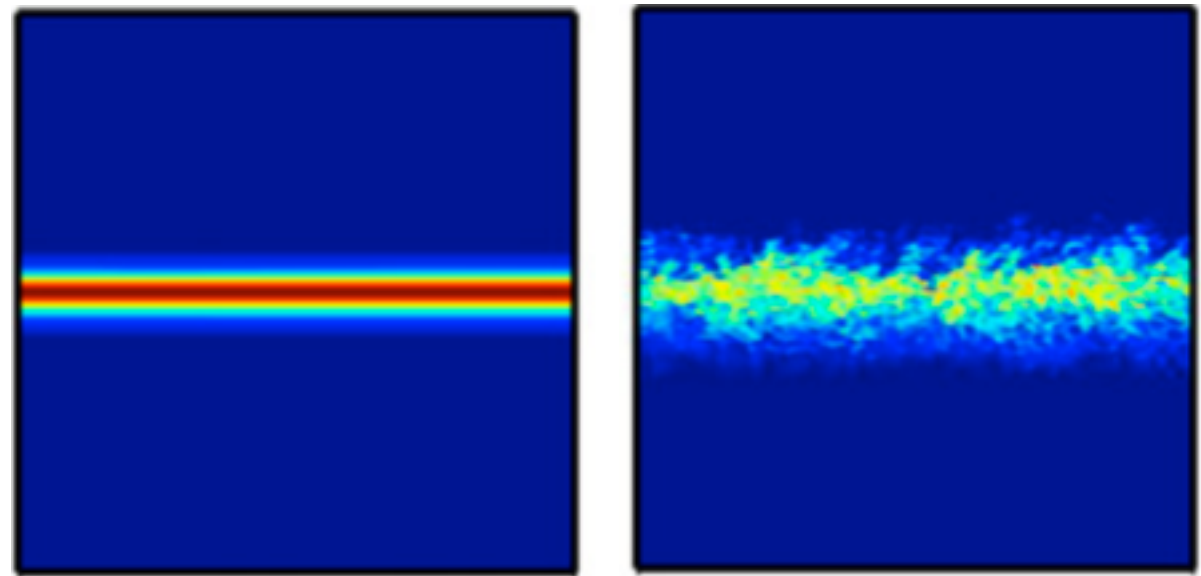


密度

ダスト層全体で $J=1/4$ となるような鉛直方向の密度分布が存在することが示された(Sekiya 1998)

KH乱流はGIを妨げるか？

- ・ 標準モデル（ダストガス比 $\sim 1\%$ ）ではGIは無理
- ・ ダストガス比が標準モデルの5 ~ 20 倍まで増えればGI可能
(Sekiya 1998)



Barranco et al. 2009

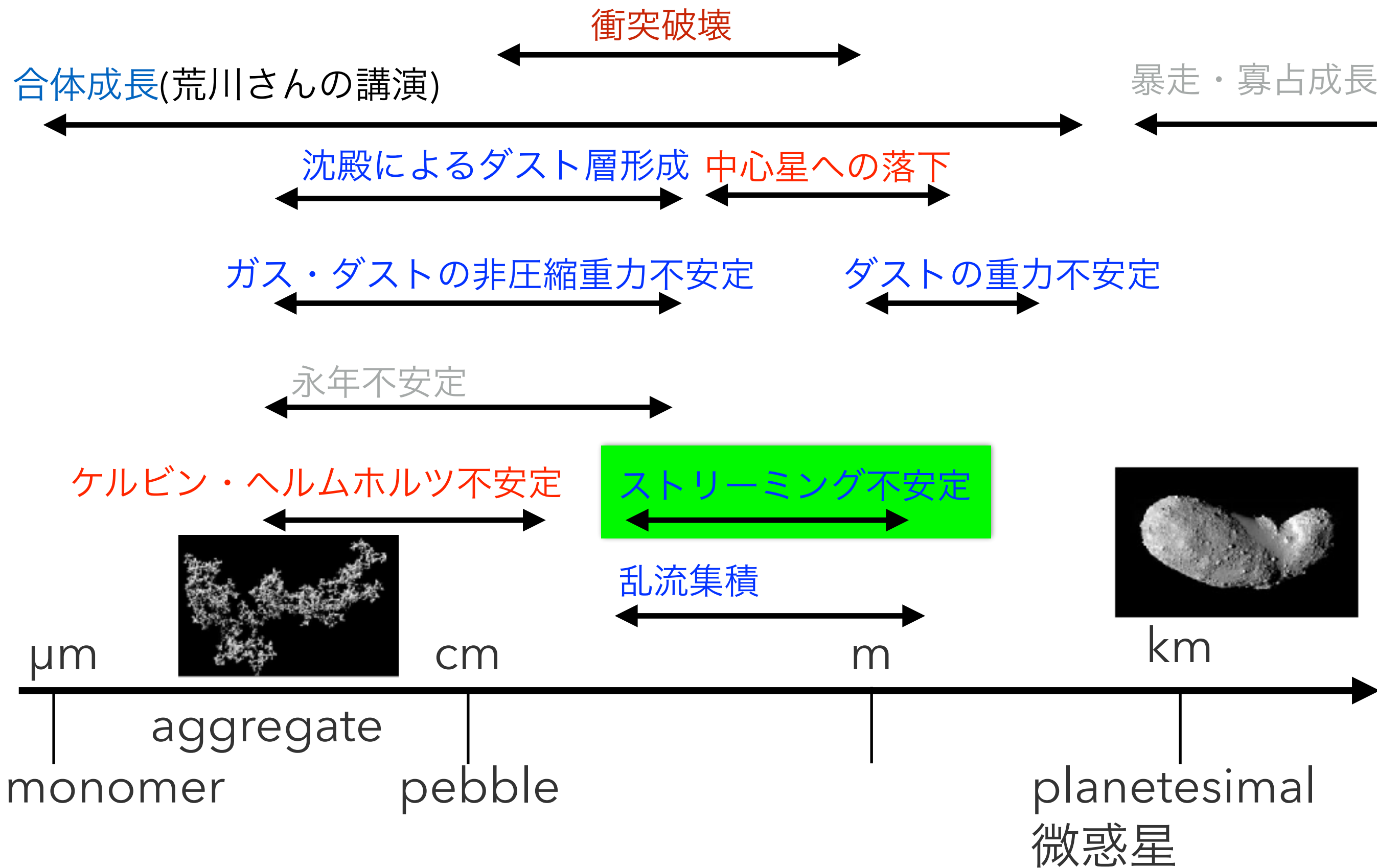
- ・ ダストガス比を上げるメカニズムとセットならKH不安定を乗り越えてGIが発生

ダストガス比の増加

- 全体ではダストガス比が1%であったとしても、局所的にダスト量が増加すればよい
- たとえば・・・
- Radial pileup (Youdin and Chiang 2004)
- Secular GI (Youdin 2011, Michikoshi et al. 2012)
- 円盤のガス散逸

今後の課題 KHI->GIへの一貫したシミュレーション
ダスト・ガス比条件の検証

ストリーミング不安定



ストリーミング不安定(SI)の要点

- ダストの中心星への落下が原因で発生
- 線形解析で不安定（過安定）（Youdin and Goodman 2005）
- シミュレーションによると非線形段階でダスト集積が発生(Johasen and Youdin 2007)
- 自己重力も考慮すると微惑星が形成(Johasen et al. 2007)

SIの線形解析

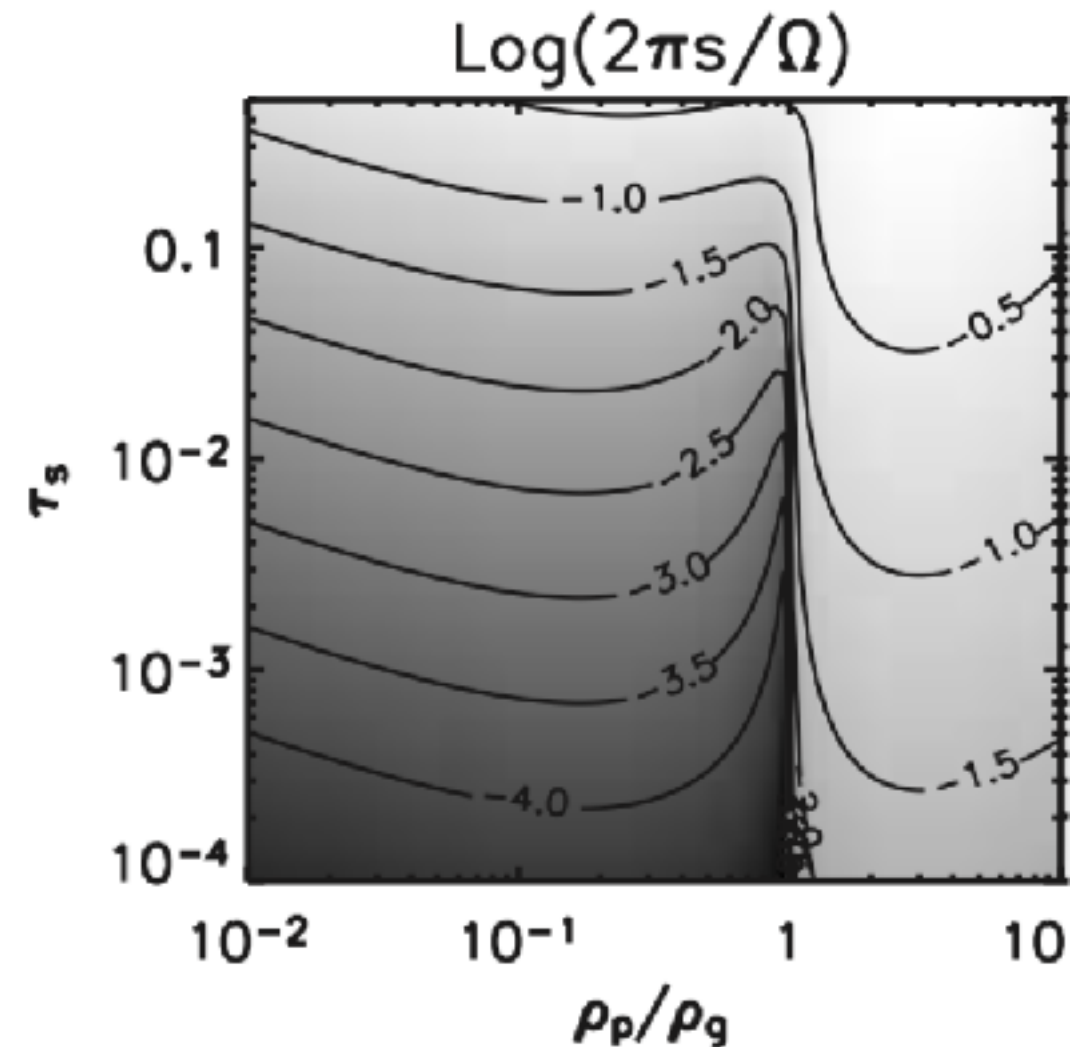
$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mathbf{V}_p) = 0,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_g = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_p}{\partial t} + \mathbf{V}_p \cdot \nabla \mathbf{V}_p = -\Omega_K^2 \mathbf{r} - \frac{\mathbf{V}_p - \mathbf{V}_g}{t_{\text{stop}}},$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial t} + \mathbf{V}_g \cdot \nabla \mathbf{V}_g = -\Omega_K^2 \mathbf{r} + \frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{\mathbf{V}_p - \mathbf{V}_g}{t_{\text{stop}}} - \frac{\nabla P}{\rho_g},$$

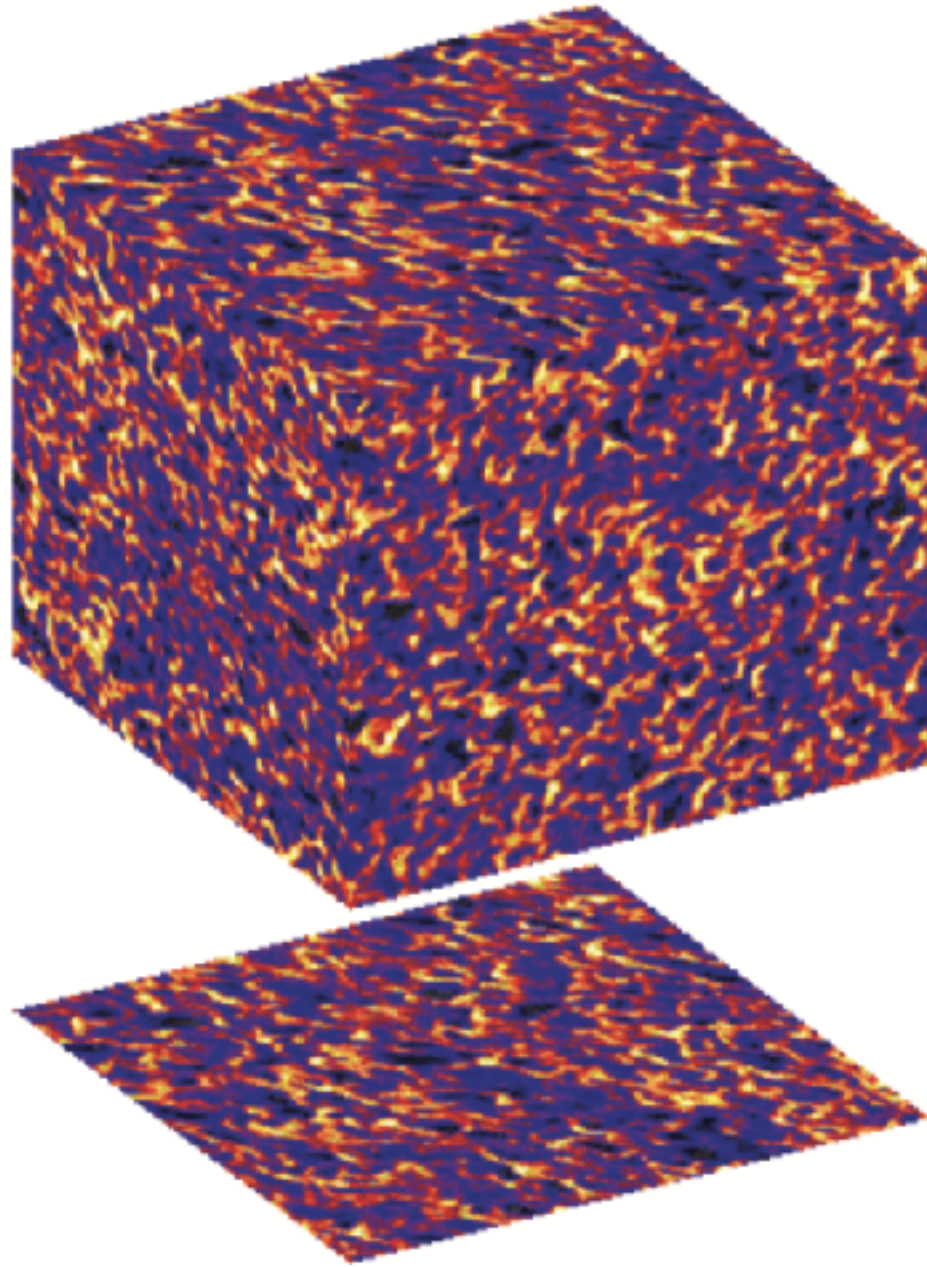
- ・ 自己重力は不要
- ・ xz面の二次元解析（軸対称）



Youdin and Goodman (2005)

- ・ ストークス数とダスト量が大きいくほど不安定成長率が増加

SIの非線形段階

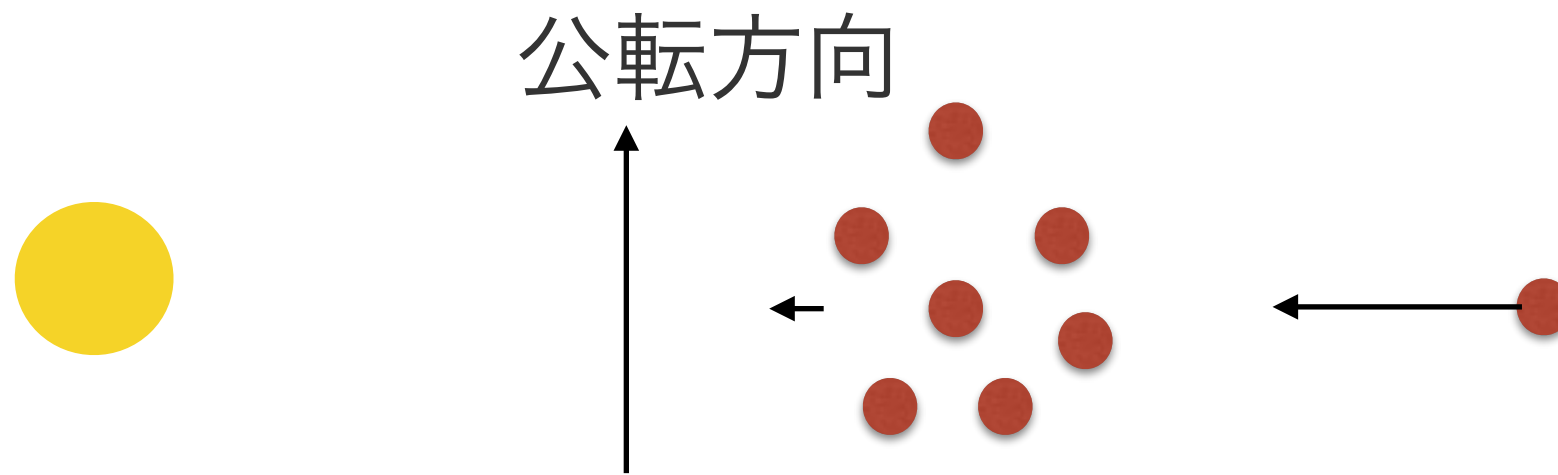


Johansen and Youdin 2007

高密度のダストクランプが形成

SIの非線形領域の物理的解釈

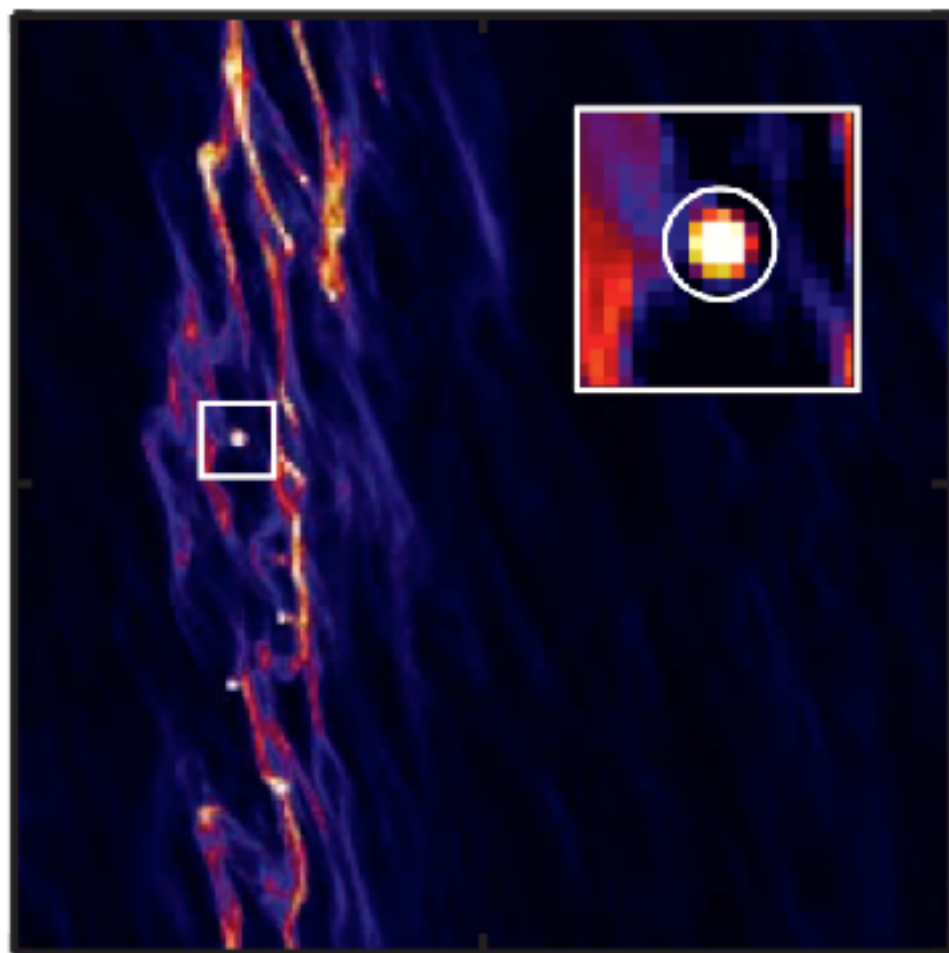
- 「交通渋滞」による解釈 (Youdin and Johansen 2007)



ダストが多い領域は
バックリアクションで
Radial driftも小さくなる

- 線形領域の解釈には議論がある (Jacquet et al. 2011)
- 圧力摂動極大へのダスト集積のポジティブフィードバック

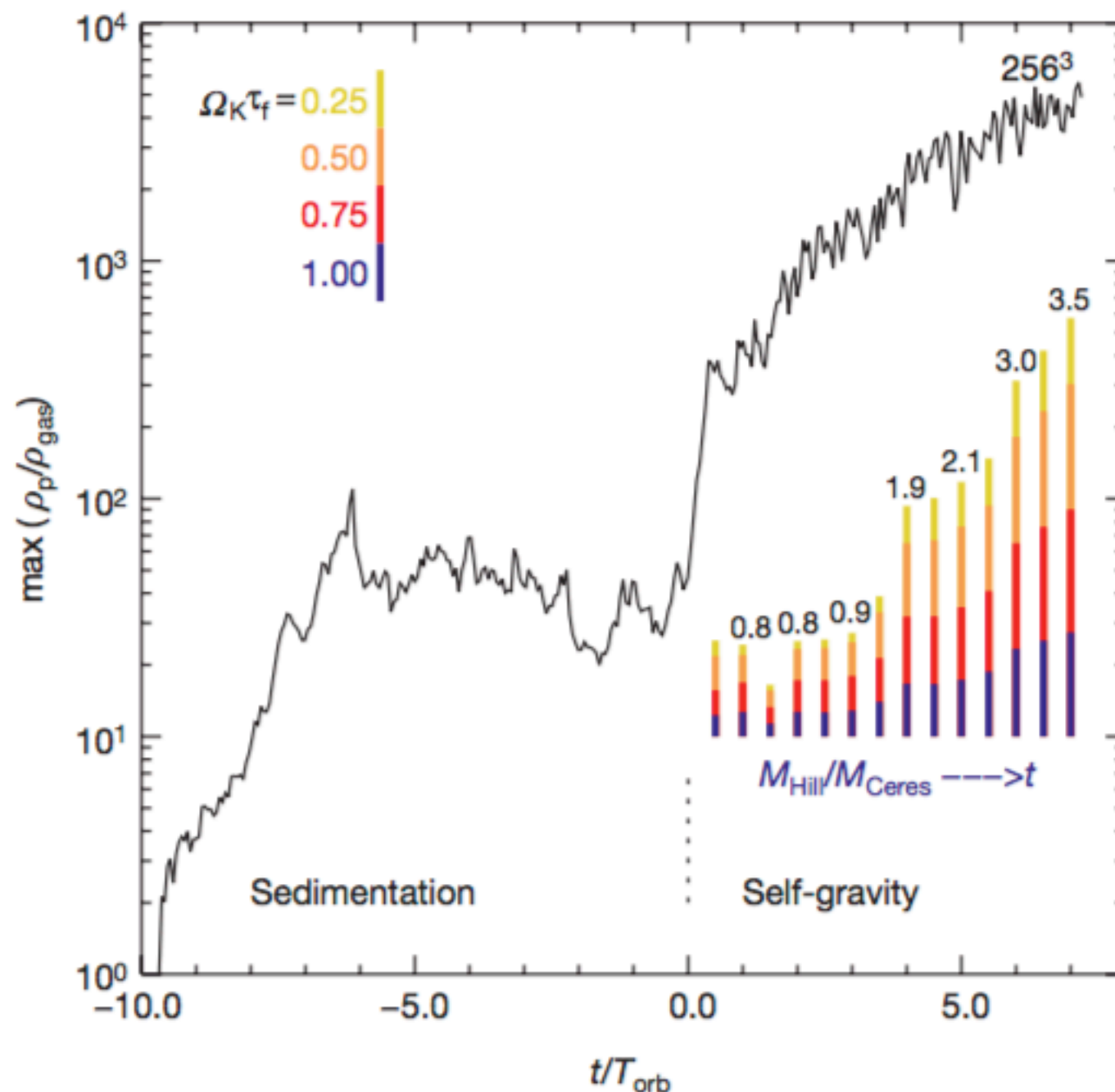
ストリーミング不安定による微惑星形成



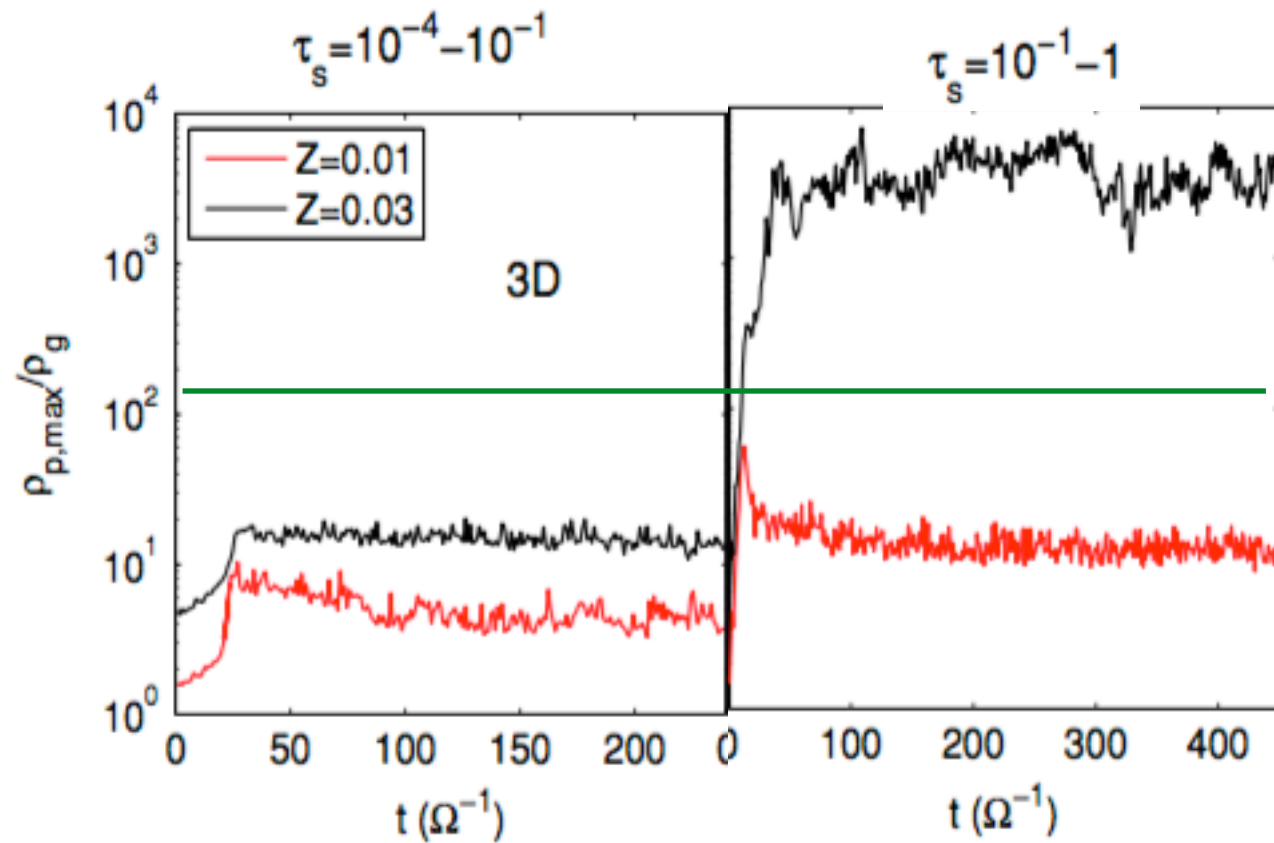
$t = 7.0 T_{\text{orb}}$

- Johasen et al. 2007

ストリーミング不安定 → 重力不安定を経て
100kmサイズ超の天体ができる



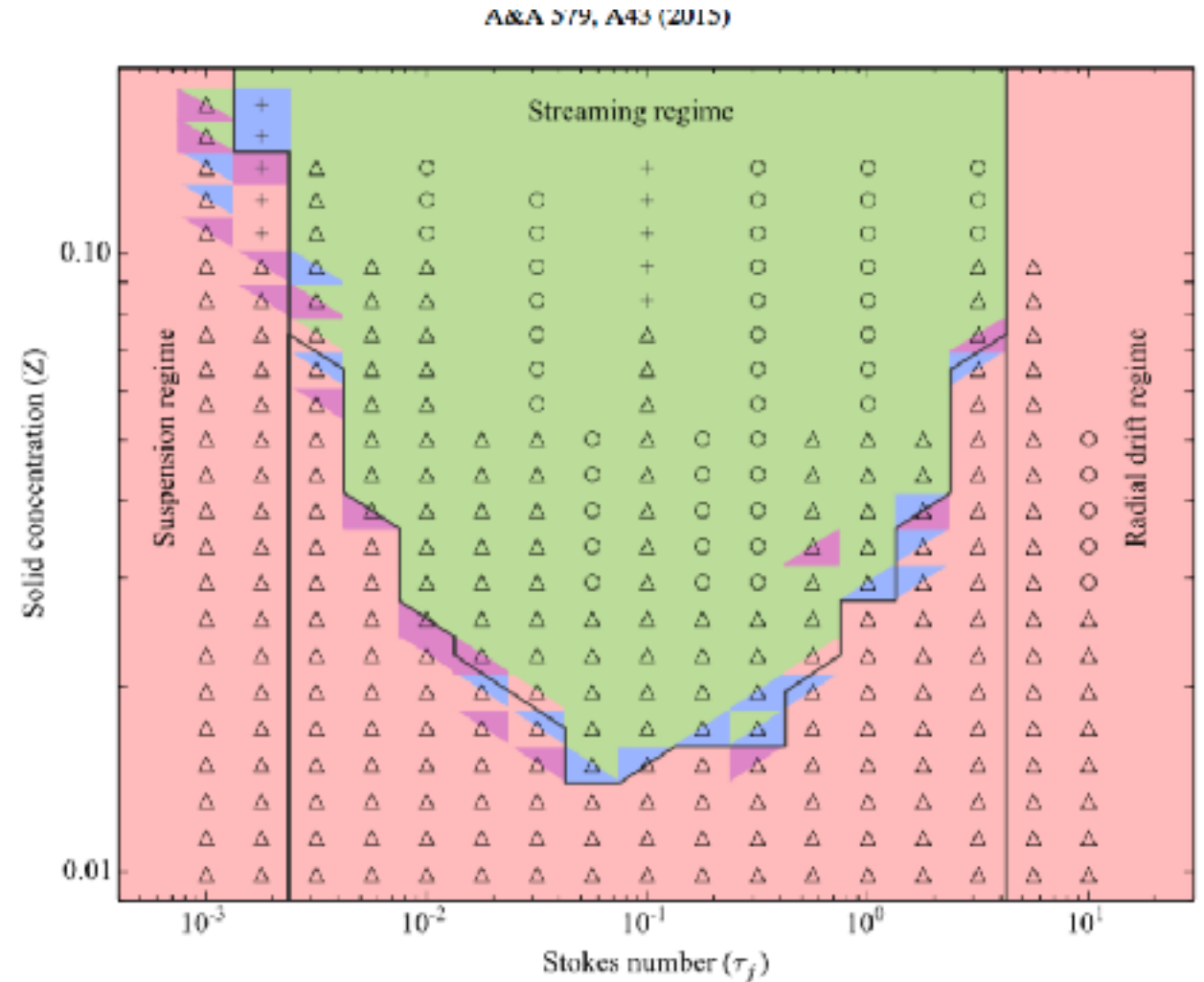
SIによる微惑星形成条件



Bai and Stone 2010

SIによる微惑星形成の条件

- $Z > \sim 0.03$ 、ストークス数 $S \sim 0.1$

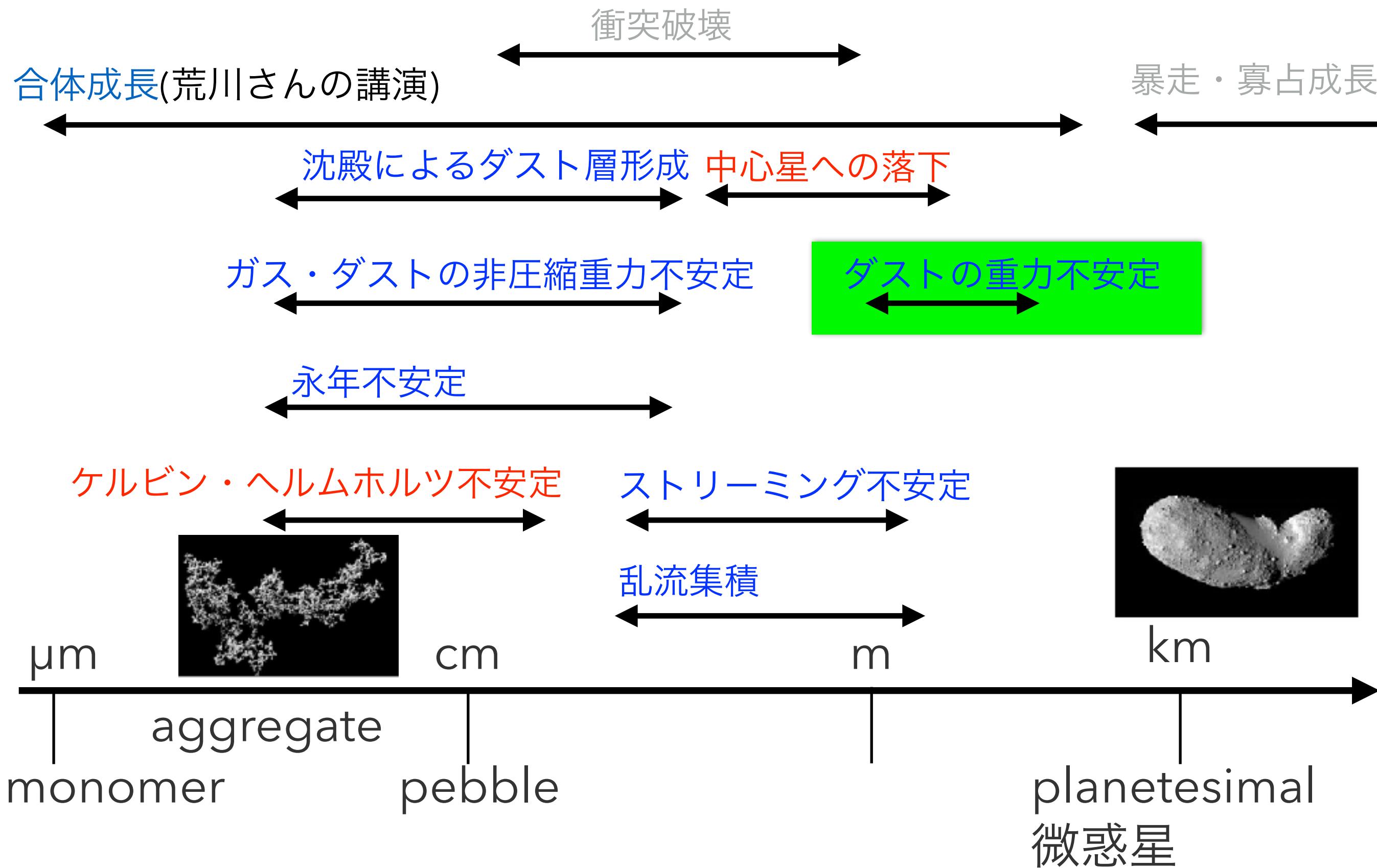


Carrera et al. 2015

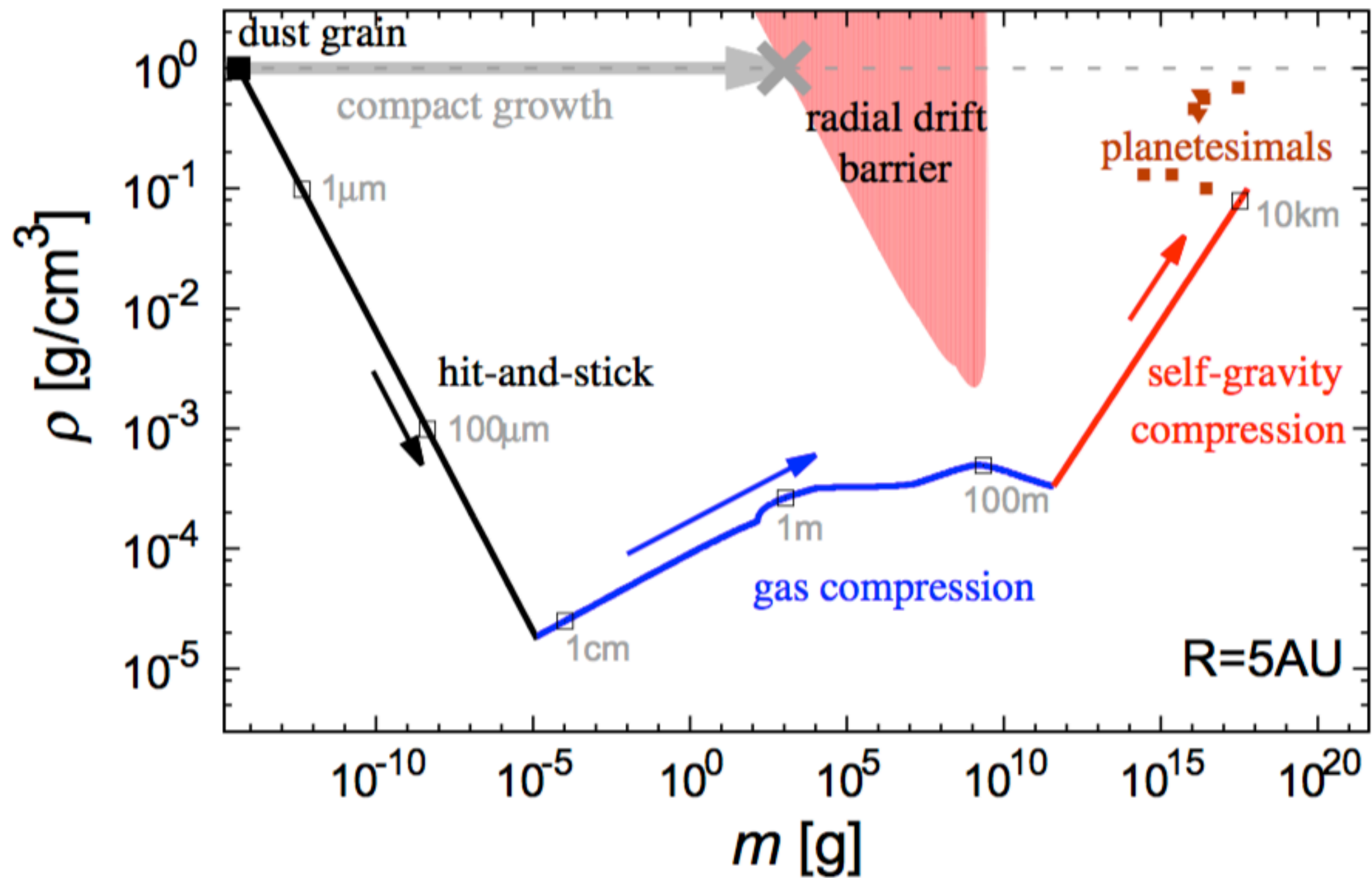
課題 ・ ダスト成長を同時に考慮するとどうか？

- ・ また線形領域を含めた物理素過程の理解を深める必要あり

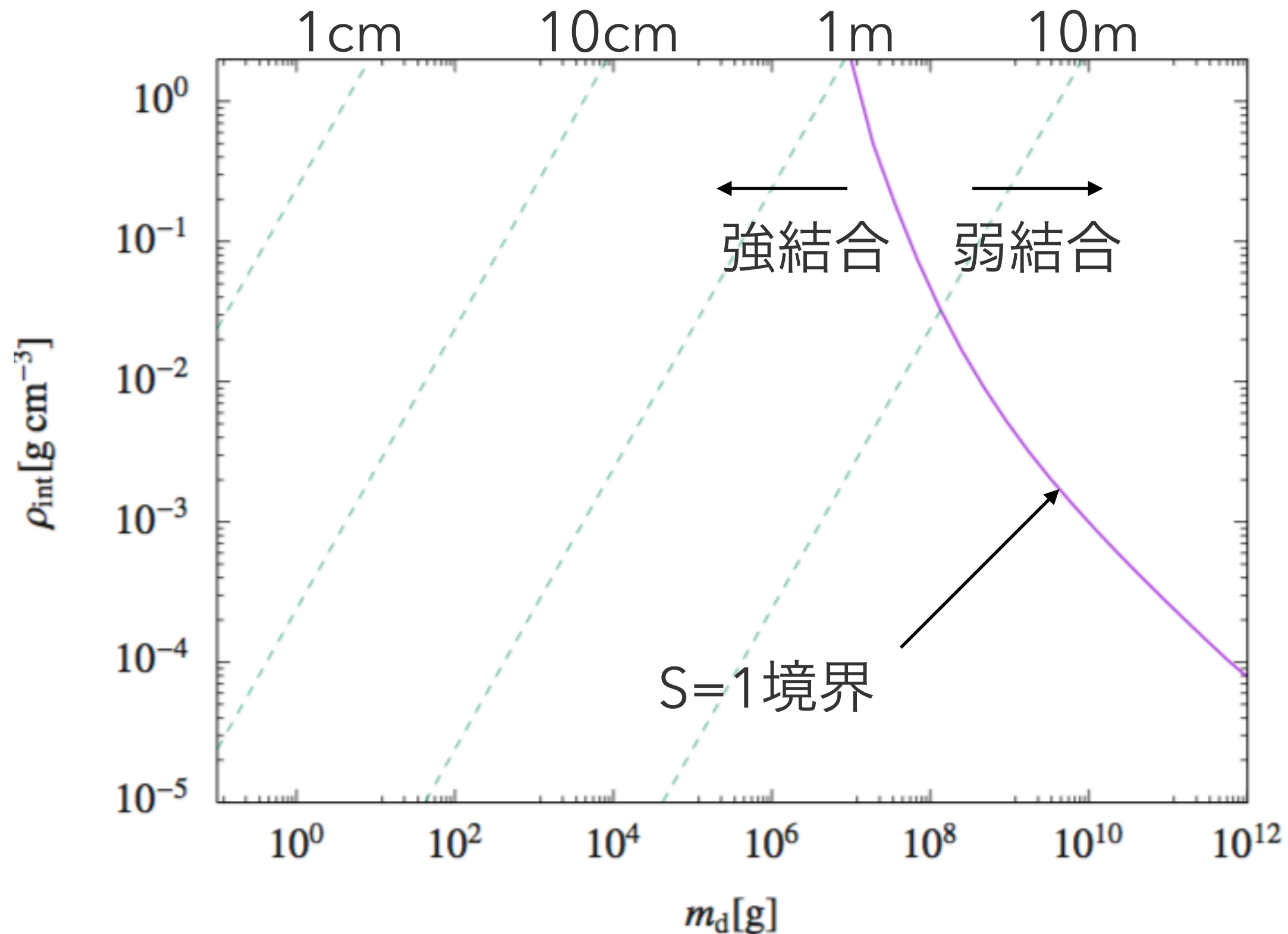
ダストの重力不安定



ダスト成長の最終段階



ストークス数1境界



成長するとガスの結合は弱くなる

不安定条件

- ・ ダストとガスの摩擦による結合が弱いため、ガスをすり抜けてダストは重力収縮できる
- ・ ダストを圧縮流体とみた不安定条件

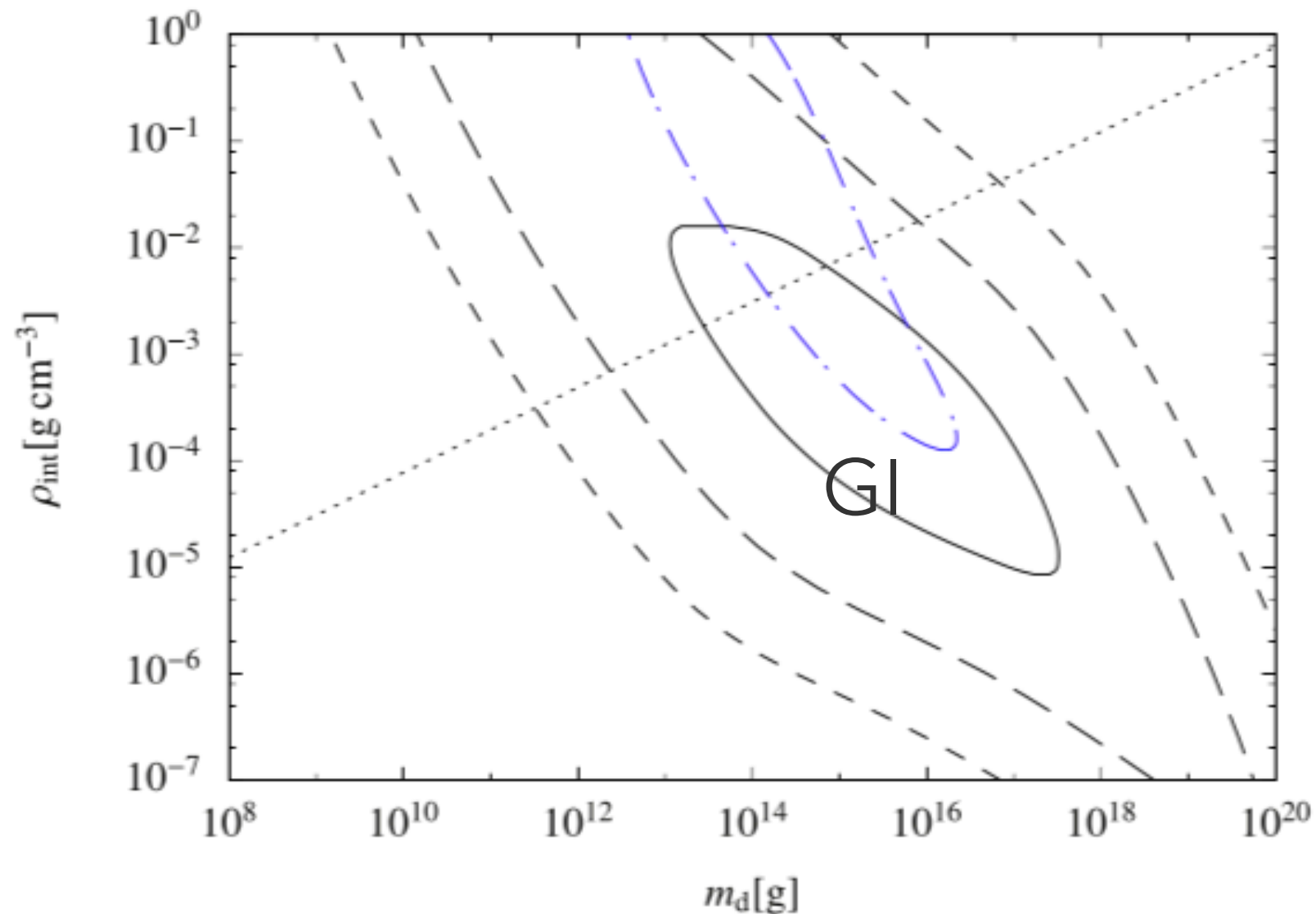
Toomre Q (Toomre 1964)

$$Q = \frac{v\Omega}{3.36G\Sigma} < 1$$

v :速度分散, Σ :ダスト面密度

ダスト速度分散(~圧力) が弱まると重力不安定

ダストの重力不安定



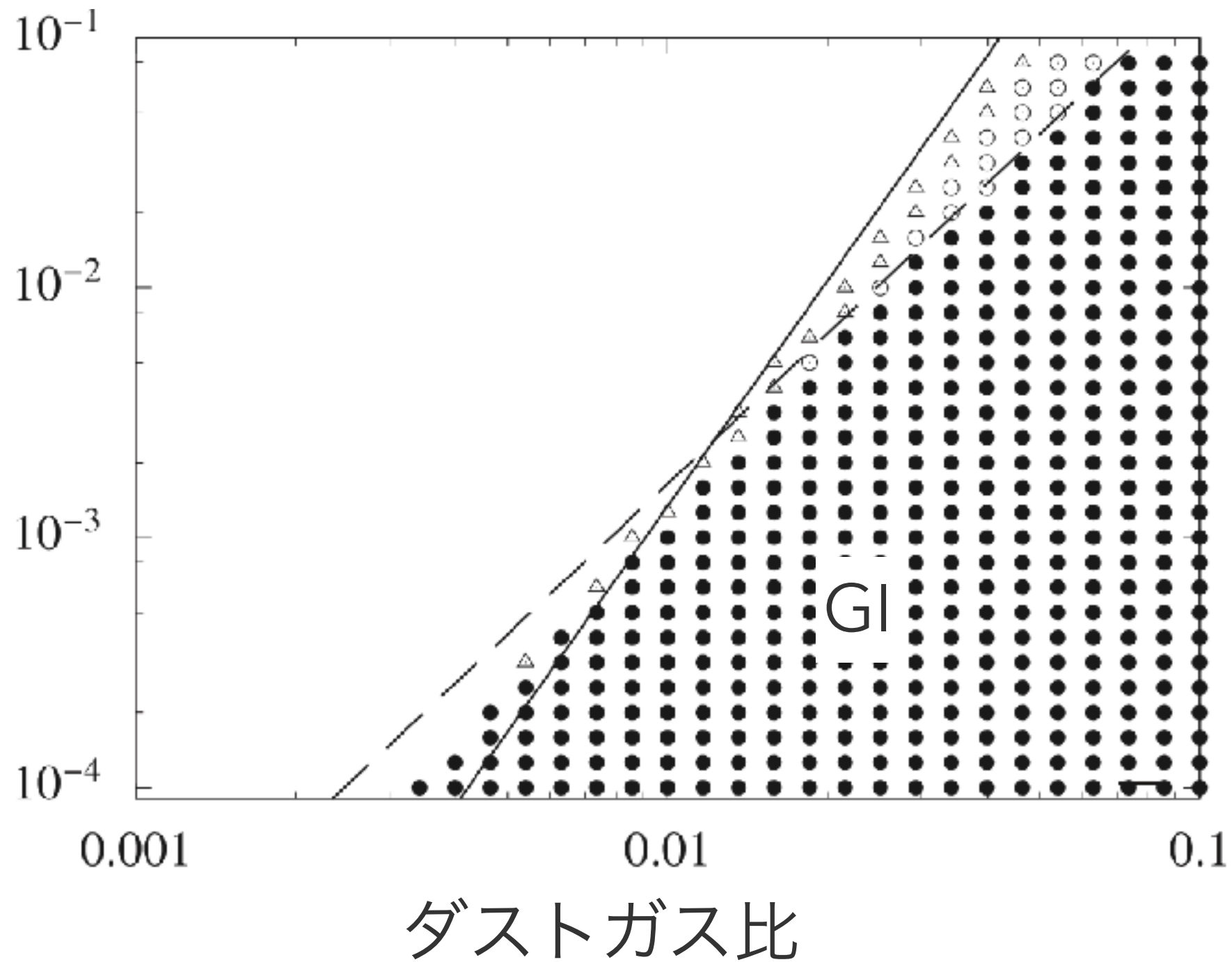
Michikoshi and Kokubo 2016, 2017

摩擦が弱いので、乱流があってもダストは影響を受けにくい
速度分散が小さくなりダストだけでGIが発生

GIが起きる条件

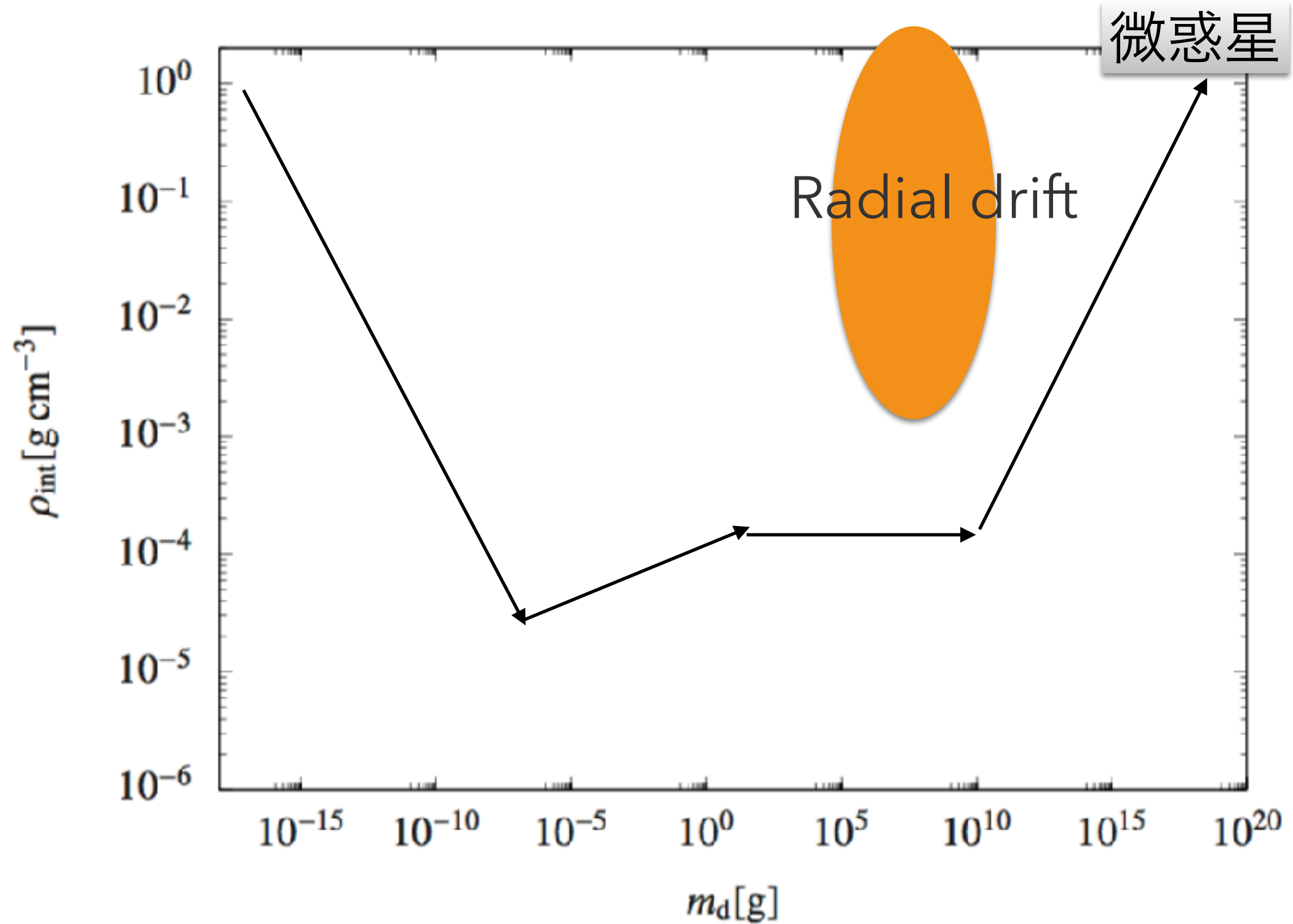
乱流強さ

$$\alpha = v_t^2 / c_s^2$$

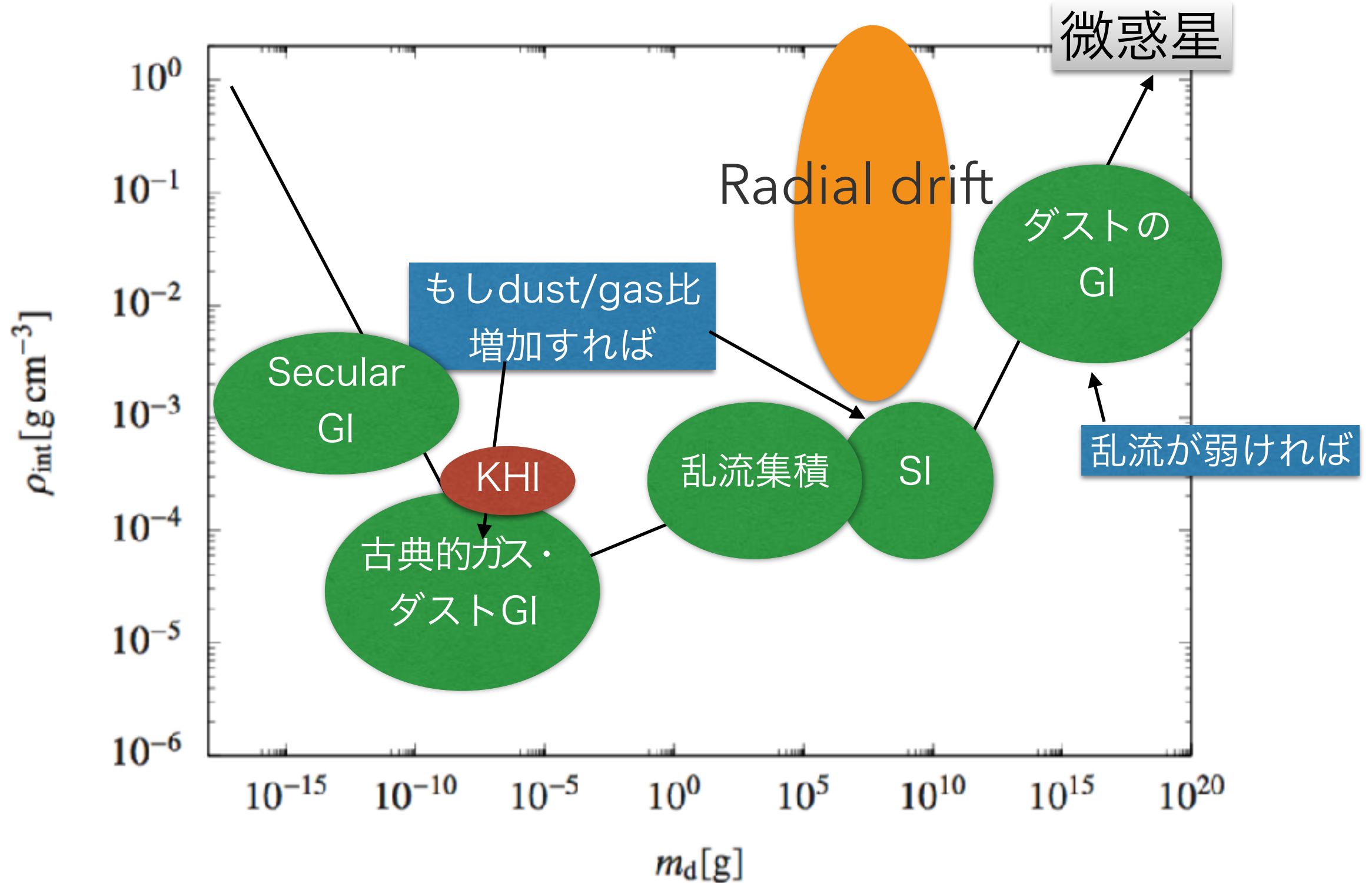


乱流が強くなければGI発生

まとめ



微惑星形成に関して検討すべき事項



環境に応じた総合的な理解が必要

まとめ

| | サイズ | 備考や課題 |
|--------------|----------|---------------------------------------|
| 合体成長 | 全サイズ | ・ 岩石ダストは破壊バリアを越える必要あり |
| 永年不安定 | 1mm~ | ・ 乱流中で本当に発生するか |
| ガス・ダストの重力不安定 | 1mm~10cm | ・ ダストガス比 > 5~10% |
| 乱流集積 | 1cm-1m | ・ ダストが集まった後の進化が課題 |
| ストリーミング不安定 | 1cm-1m | ・ ダストガス比 > 3~5% ・ 物理素過程とダスト成長の兼ね合い |
| ダストの重力不安定 | 1m-100m | ・ 乱流強さ $\alpha < 10^{-3}$ |

全項共通：環境や外的要因による乱流の効果はどうか？