

惑星形成理論への招待

奥住 聡

(名古屋大学 大学院理学研究科)

概要

● 第一部：標準的惑星系形成論概論 (~20分)

- 地球を作るとは、質量40桁にわたって固体を成長させることである
- 前期過程：微惑星形成（分子間力による固体集積）
- 後期過程：原始惑星 & ガス惑星コア形成（重力集積）

● 第二部：惑星形成の問題 (~30分)

- 形成過程随所に未解決問題がある
- 特に、ダスト/微惑星の付着成長に対する乱流の問題について、素過程の解説と講演者の研究の紹介を行う

● 第三部：惑星形成理論への招待 (~5分)

そのまえに、講演者自己紹介

奥住 聡 (おくずみ さとし)

- 京都大学 人間・環境学研究科 相関環境学専攻 博士 (2010年3月)
- 現在、名古屋大学 理学研究科 物理Ta研究室 学振SPD (2010年4月より)
- 専門：惑星形成理論、特に固体成長の素過程の研究
(ダスト衝突成長、ダストを含む円盤電荷化学、ダストを含む磁気流体力学)

● 夏の学校の実績

SS2005: 相対論・宇宙論分科会 ポスターアワード受賞

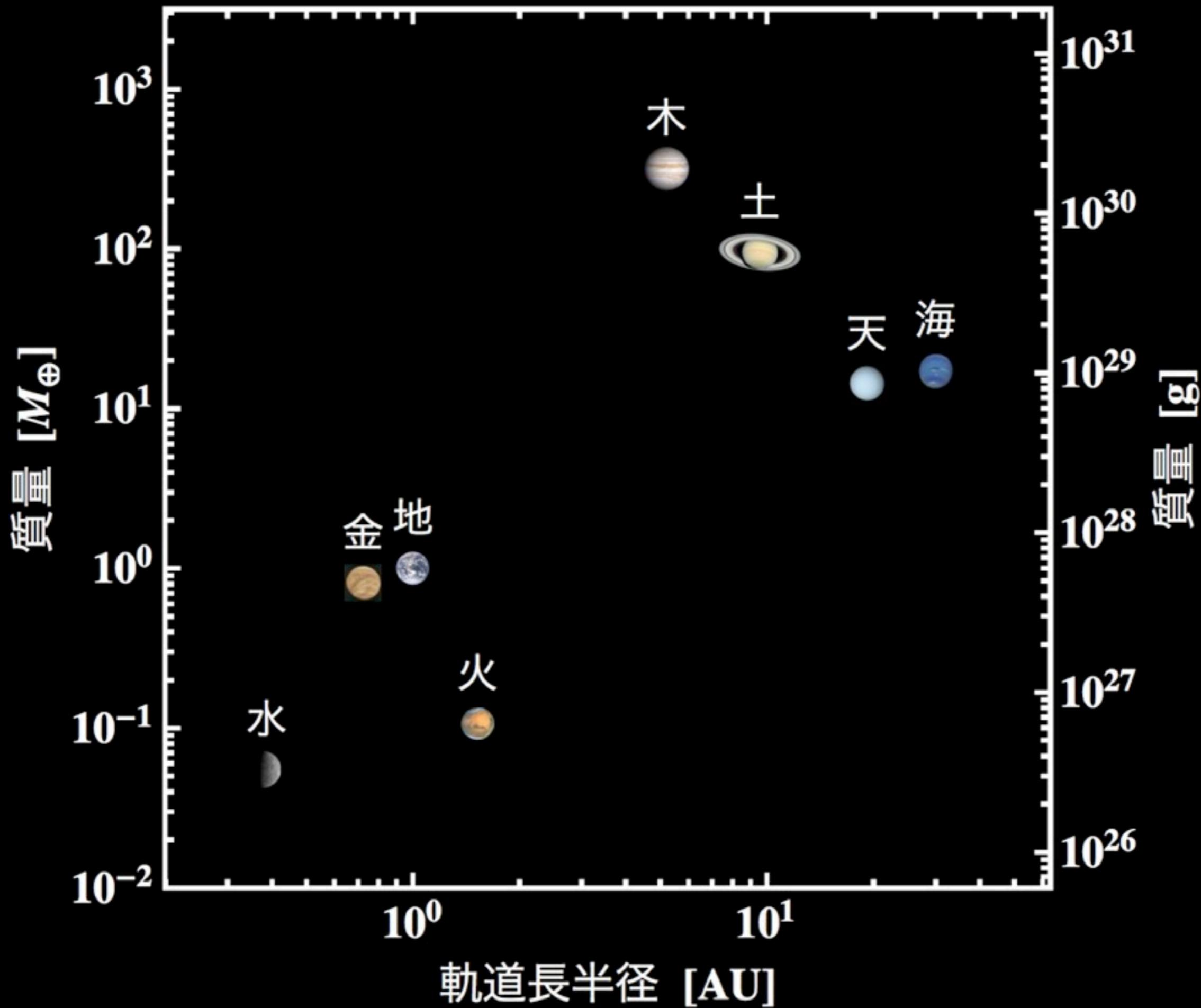
SS2006: 相対論・宇宙論分科会 ポスター

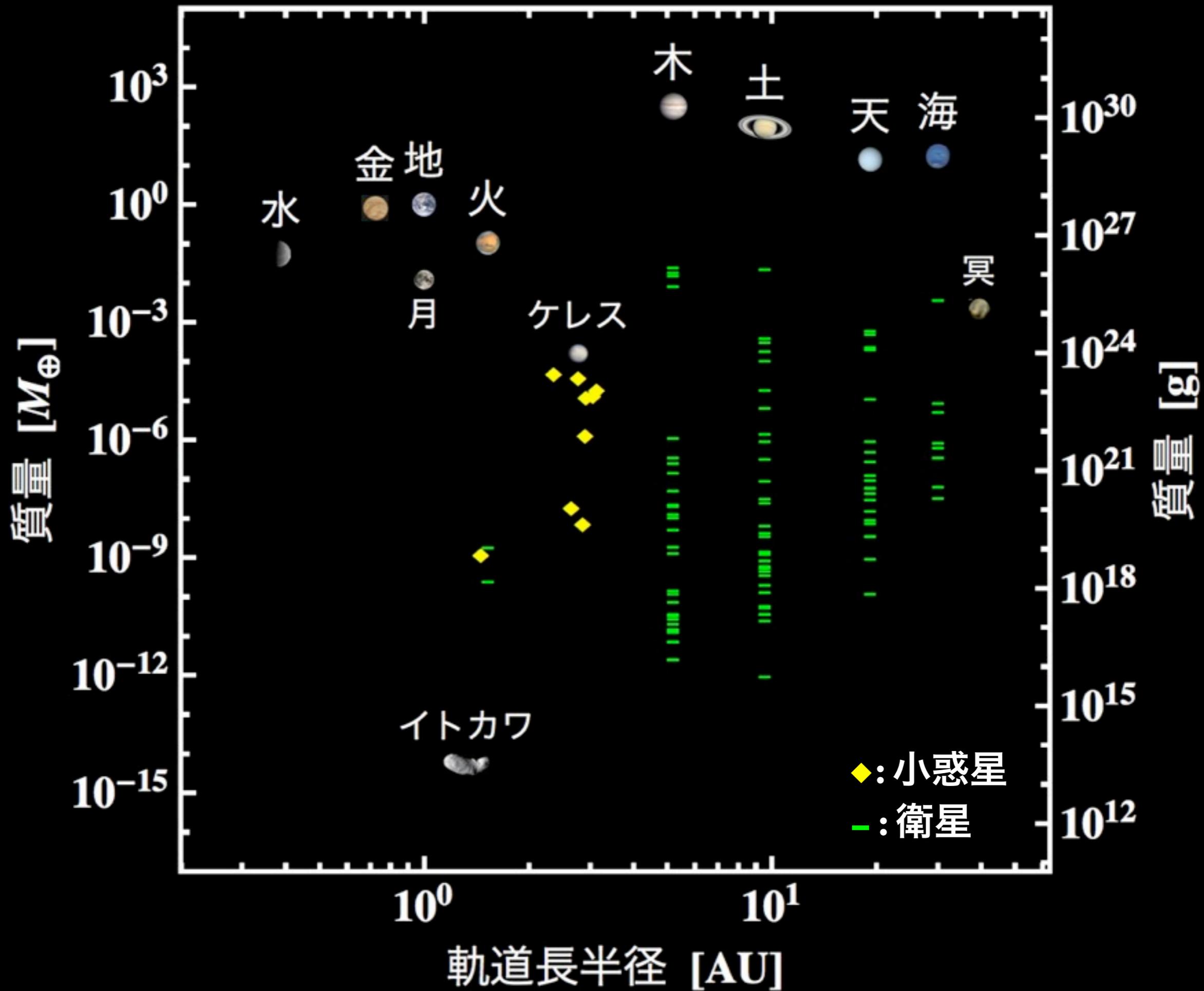
SS2007: 事務局 (会場係末端、招待講演者送迎。奈良で鹿を轆きかけた)

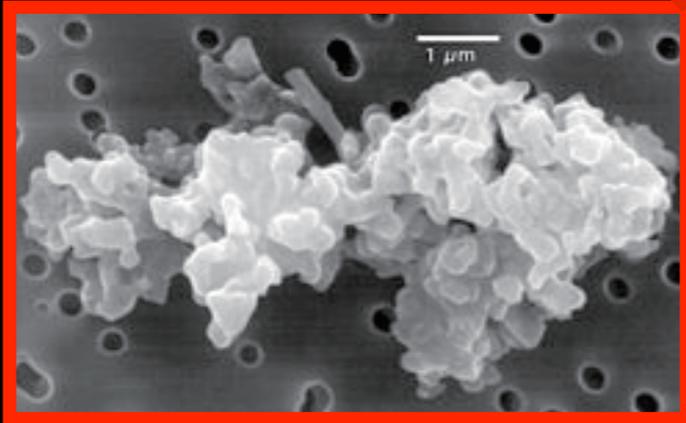
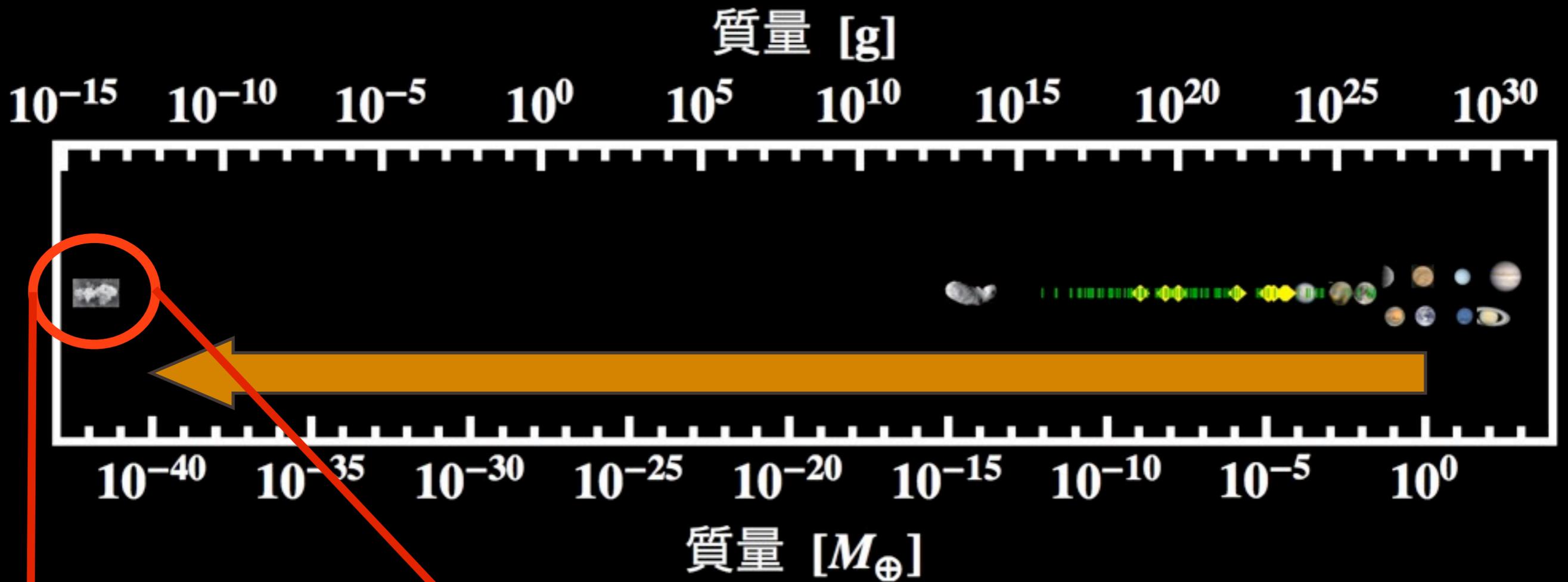
SS2009: 惑星分科会 口頭発表

第1部

標準的惑星形成シナリオ





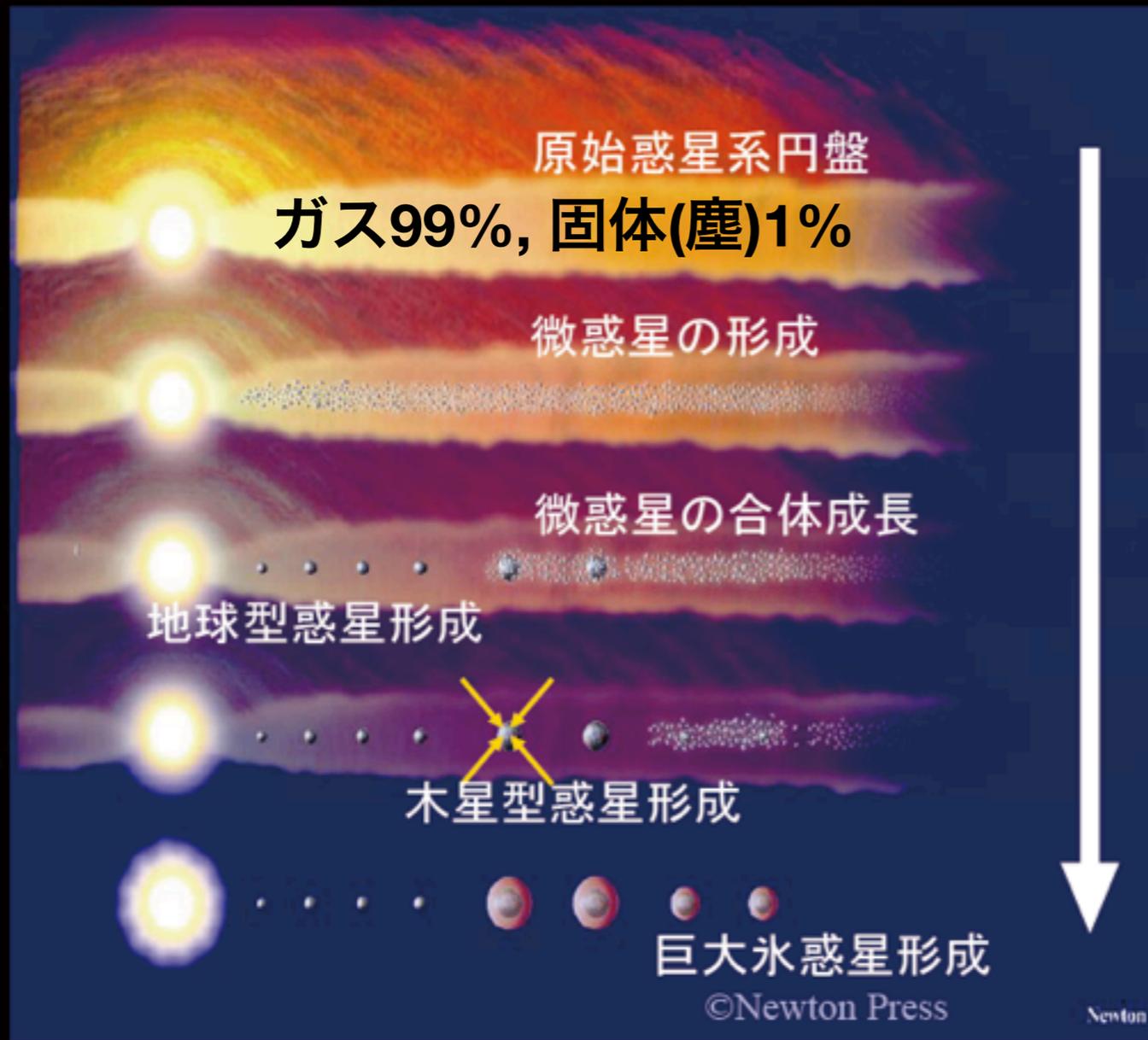


塵粒子(ダスト) = 天文学者にとっての「固体」

ダストから惑星まで、質量にして40桁にわたるギャップ！
このギャップを埋めることが惑星形成論の1つの大目標

標準的惑星形成シナリオ

惑星系形成標準モデル (コア集積モデル)



ダスト (0.1 μm)



微惑星 (>~10km)



惑星(10,000km)

前期過程：微惑星形成 (質量~30桁)

(A) 重力不安定説 (京都モデル, Goldreich & Ward 1973)

(1) 合体成長段階 ($\mu\text{m} \rightarrow \text{cm}$; 質量~15桁)

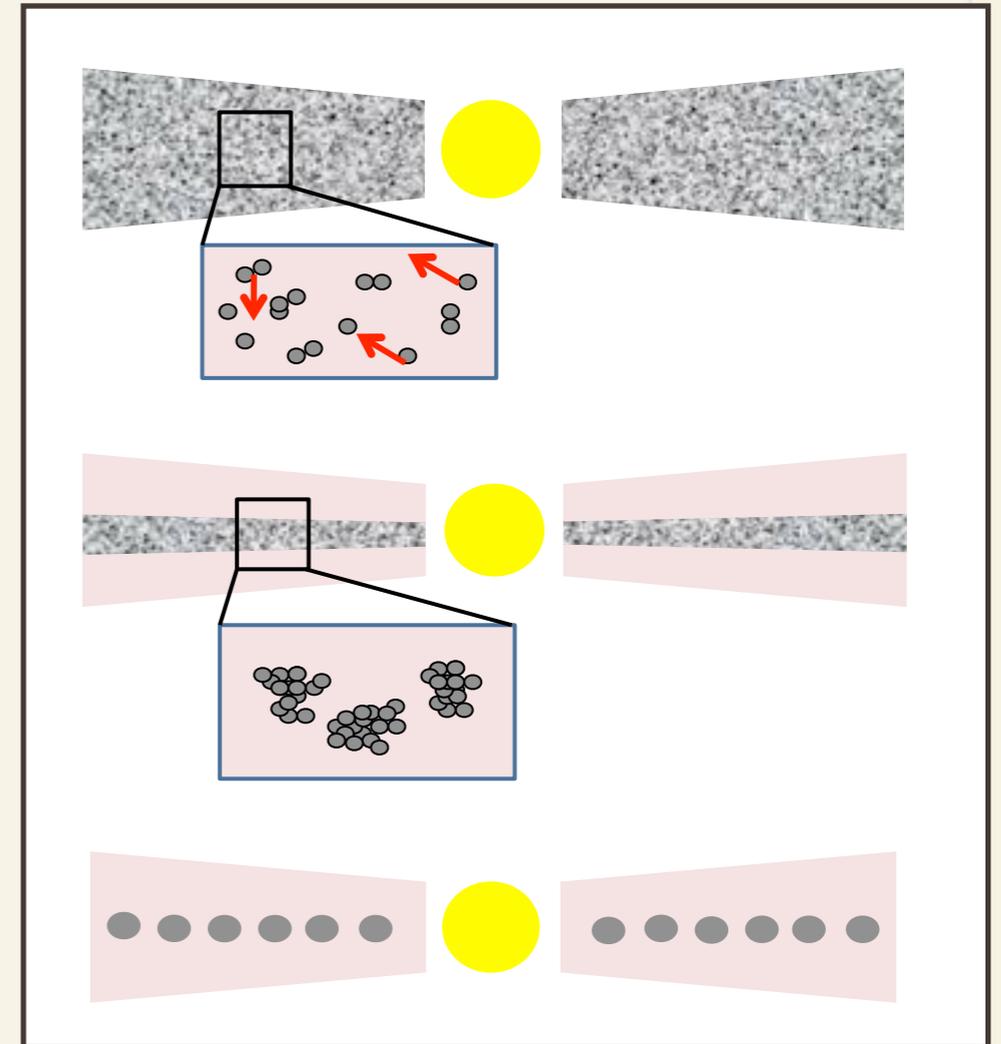
ダスト粒子が衝突付着を通じて塊へと成長。徐々にガス抵抗を失う。

(2) 沈澱段階 (~cm)

ダスト塊が中心星重力の影響で赤道面に濃集、ダスト層を形成。

(3) 重力不安定段階 ($>\text{cm} \rightarrow \text{km}$; 質量~15桁)

ダスト層が自己重力によって分裂収縮。
kmサイズの固体天体 (微惑星) となる。



(B) 直接合体成長説 (Weidenschilling など)

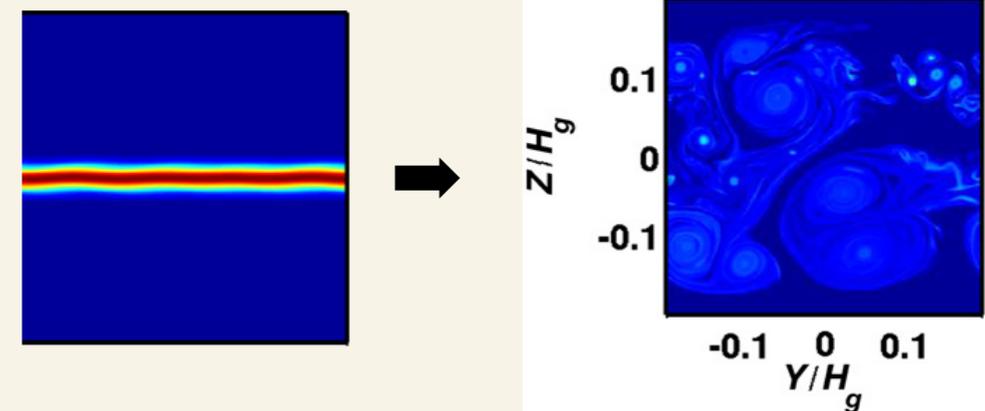
重力不安定を経由せずに、衝突合体のみを通じてkmサイズにまで成長。

微惑星形成の「壁」

重力不安定説の問題点：

🌠 ダスト層巻き上げの「壁」

- ガス乱流がダストの沈澱を妨害。
- 沈殿自体も乱流を作る(KH不安定)



Barranco 09

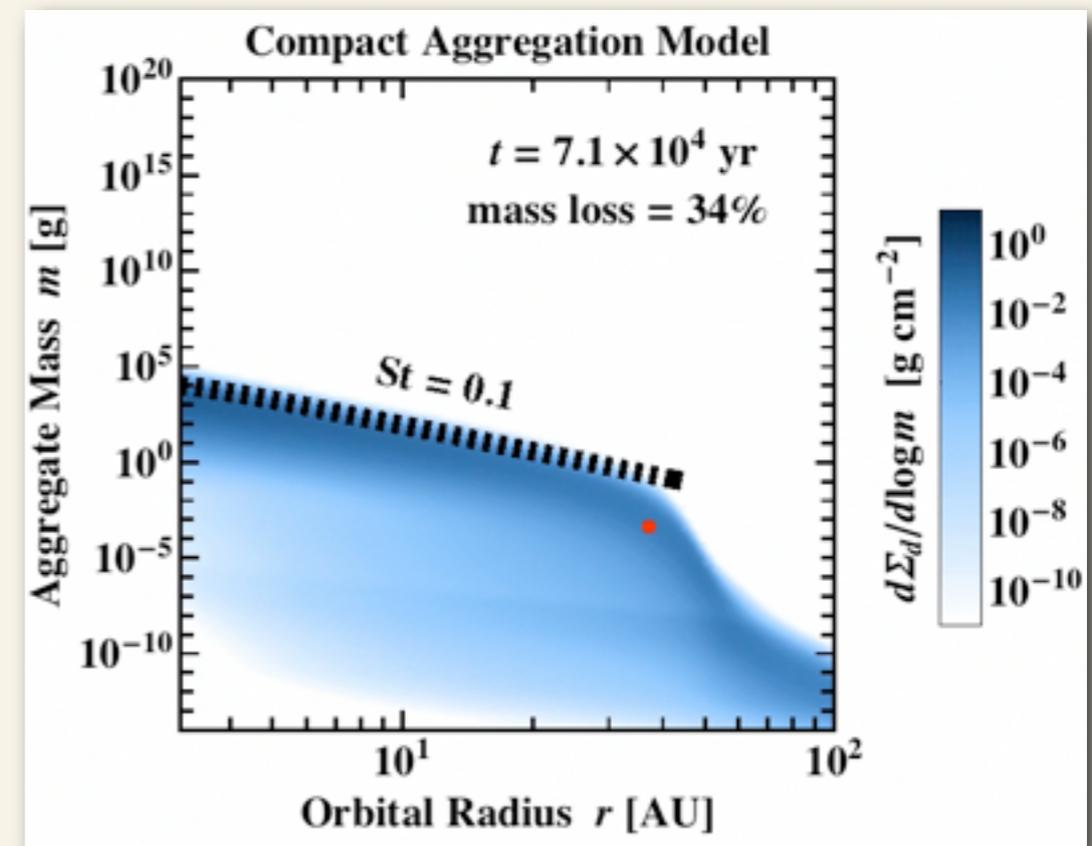
直接合体成長説の問題点：

🌠 中心星落下の「壁」

- ガスから受ける向かい風により、ダストが軌道角運動量を失う。
- 落下より速く成長すれば問題無し。
(Okuzumi et al. 2012)

🌠 衝突破壊の「壁」

- 巨視的(>cm)ダスト塊が衝突して壊れる。特に乱流があると深刻。



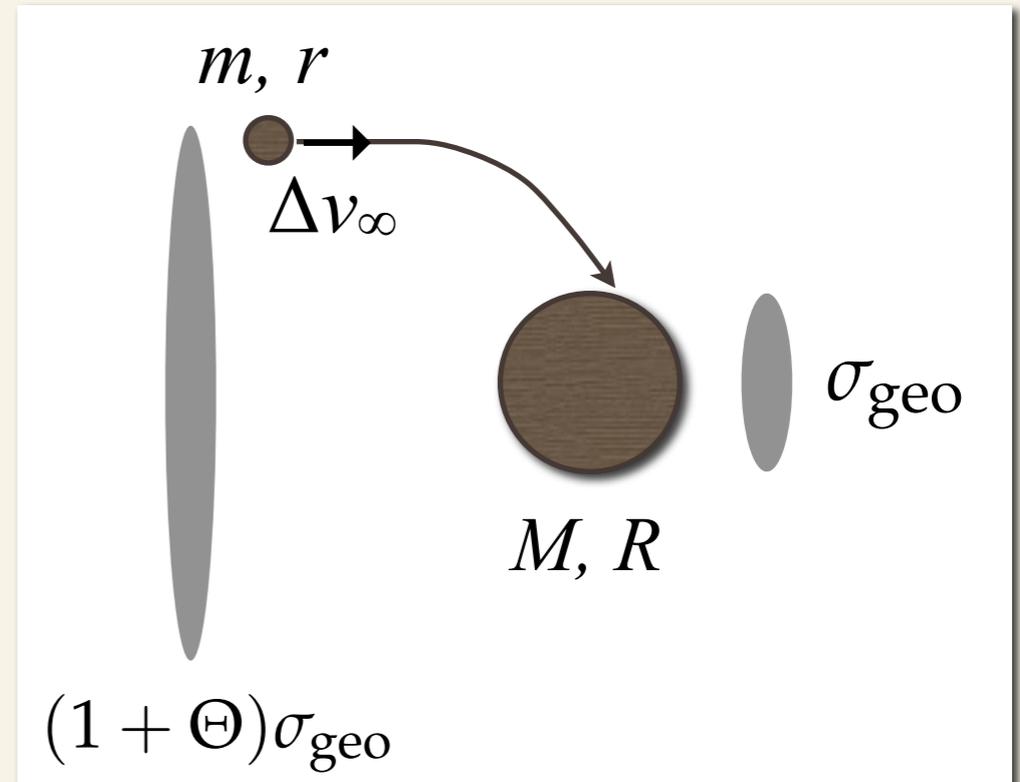
後期過程：微惑星の重力集積 (質量~10桁)

重力相互作用する2体の衝突断面積は、幾何断面積より $(1+\Theta)$ 倍だけ大きい。

$$\text{重力集中因子 } \Theta = \frac{v_{\text{esc}}^2}{(\Delta v_{\infty})^2}$$

Δv_{∞} : (遠方での) 相対速度

$$v_{\text{esc}} \equiv \sqrt{\frac{2G(M+m)}{R+r}} \sim 10 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right) \text{ m s}^{-1} : \text{脱出速度}$$



- 固体サイズが十分大きく ($R, r \gg 1\text{m}$)、重力散乱以外の相対速度駆動源がなければ、 $\Theta > 1$ になる (重力集積)
- 「 $\Theta \gg 1$ 」かつ「 Δv_{∞} が R の増加とともに増えない」とき、大きい微惑星は小さい微惑星よりも速く成長する (暴走成長)

暴走・寡占成長モデル

(Kokubo & Ida 98, 00, 02)

● 暴走成長段階

成長すればするほど重力集中因子が増大。

➡ 大きい微惑星が他を引き離して成長。

このような天体を**原始惑星**と呼ぶ。

● 寡占成長段階

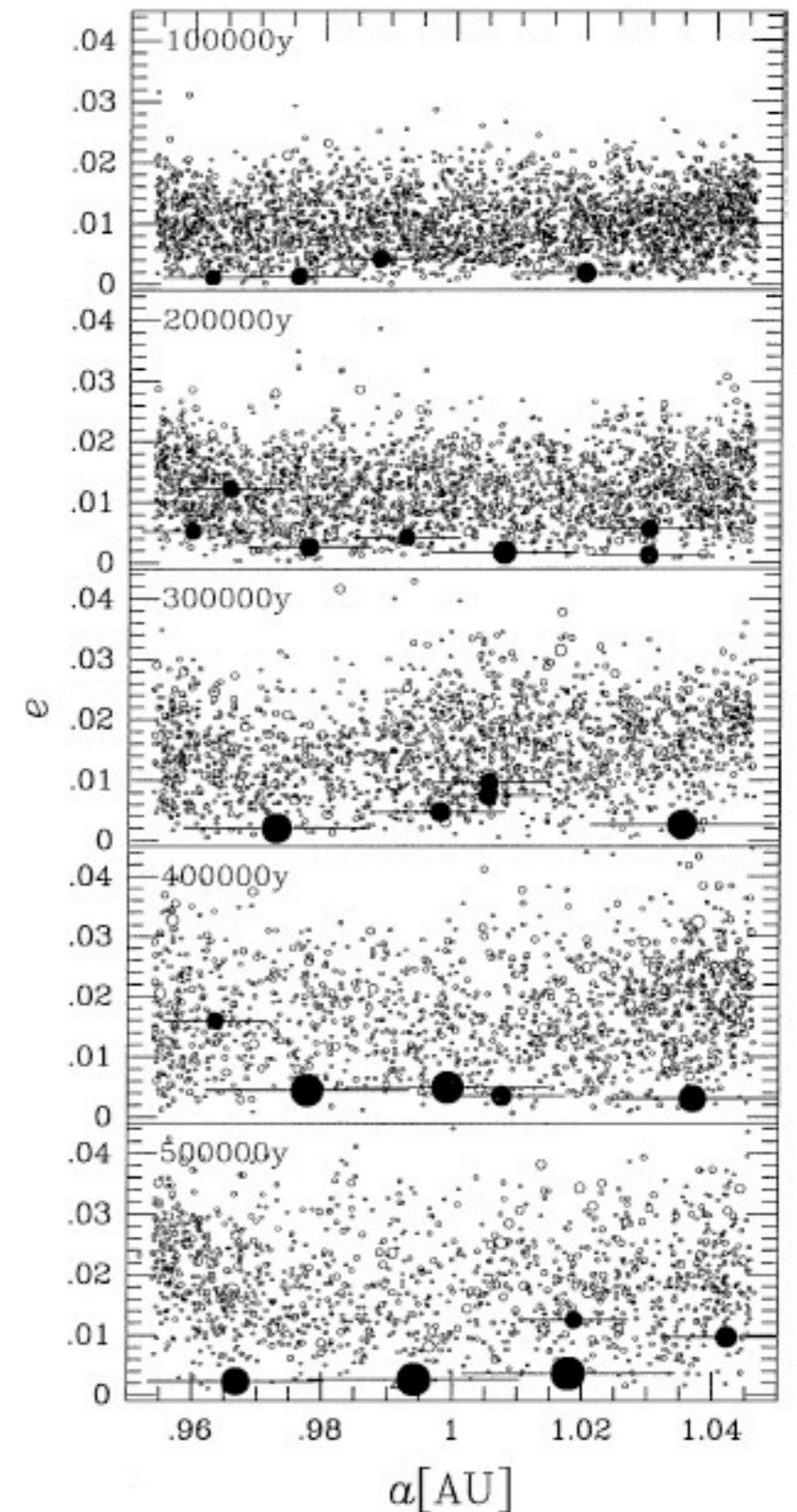
原始惑星が微惑星の離心率を上げ始める。

➡ 集中因子の増加が止まる ➡ 暴走成長終了。

原始惑星の最終質量 (**孤立質量**) は、

$$M_{\text{iso}} \approx 0.2M_{\oplus} \left(\frac{\Sigma_d}{10 \text{ g cm}^{-2}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^3$$

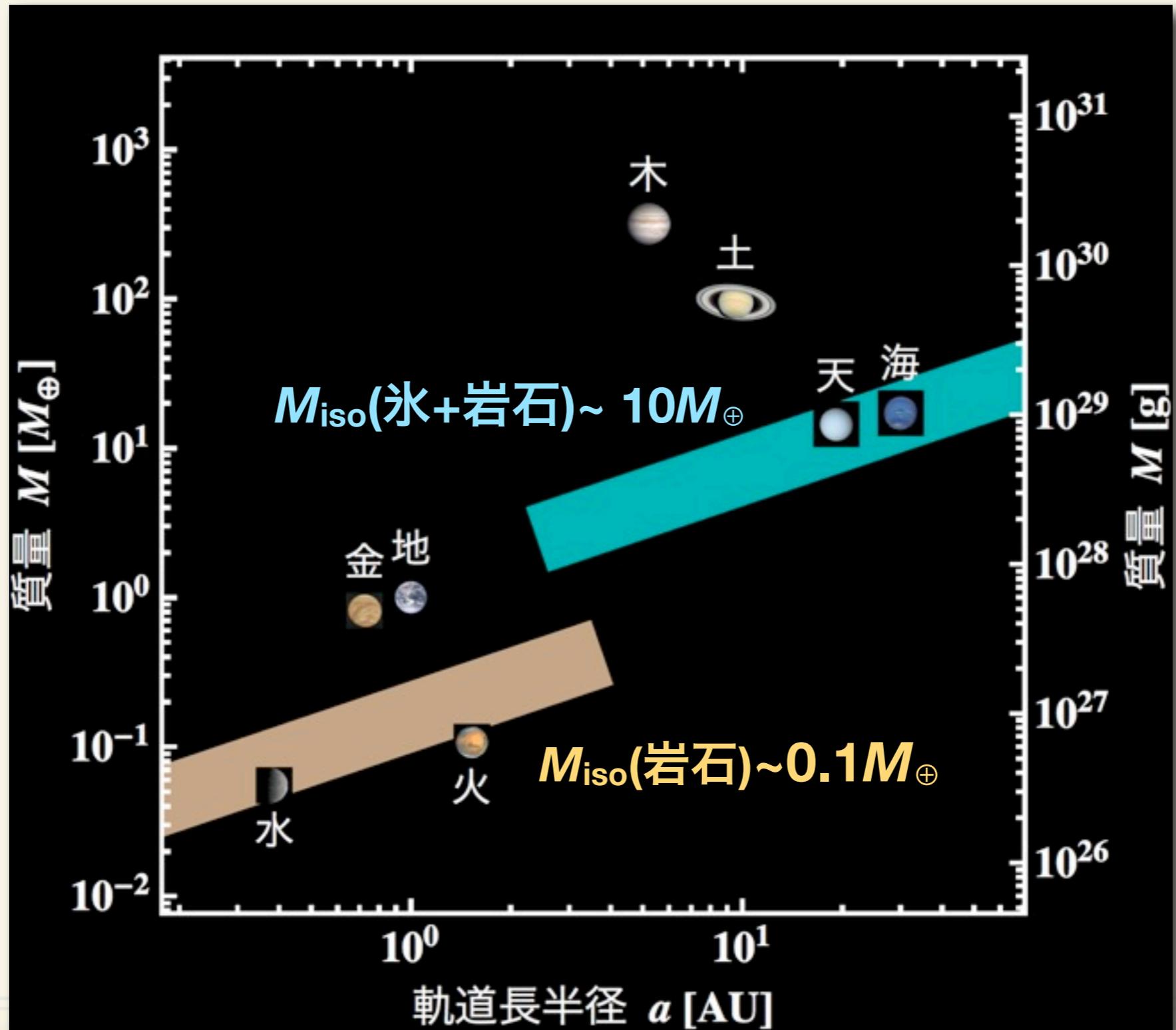
Σ_d : 固体の円盤面密度



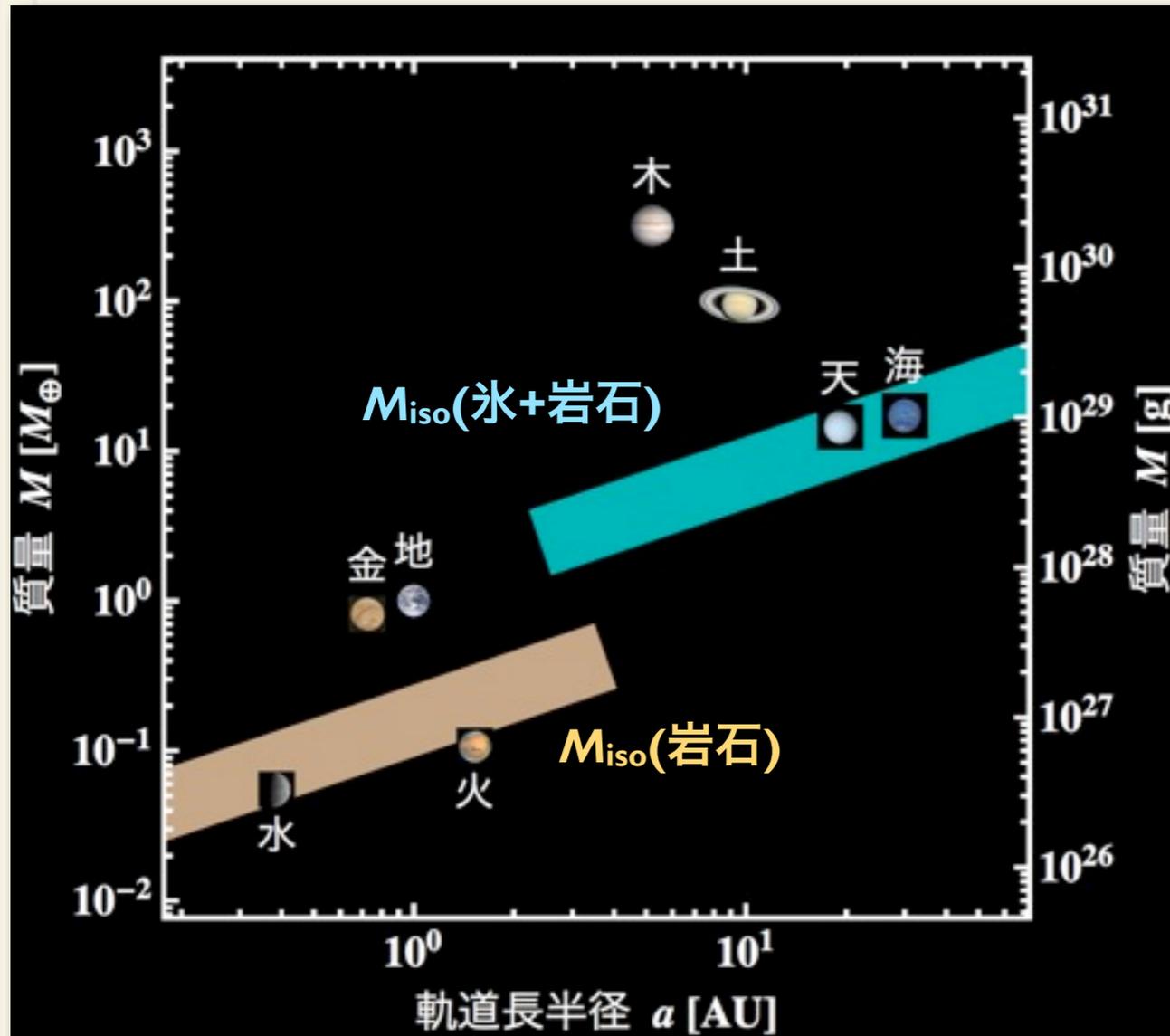
(Kokubo & Ida 00)

$$M_{\text{iso}} \approx 0.2 M_{\oplus} \left(\frac{\Sigma_d}{10 \text{ g cm}^{-2}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^3$$

Σ_d として林モデル (Hayashi 81)を採用。



寡占成長モデルに基づく太陽系形成



● 金・地： $M_{iso} \sim 0.1M_{金,地}$

→ ガス円盤散逸後の原始惑星衝突によって最終質量に至った（巨大衝突）

● 水・火： $M_{iso} \sim M_{水,火}$

→ 原始惑星の生き残り？

● 木・土 $M_{iso} \sim 5-10M_{\oplus}$

→ “原始惑星がガス惑星の核(コア)になった”（コア集積モデル）
（しかし実際の木星が固体コアを持つかは不明）

● 天・海 $M_{iso} \sim M_{天,海}$

→ 原始惑星の生き残り？

（しかし予想される形成時間はかなり長い）

おお、太陽系の起源を説明しているように見える

第2部

標準的惑星形成シナリオの困難

特に

固体の衝突破壊問題について

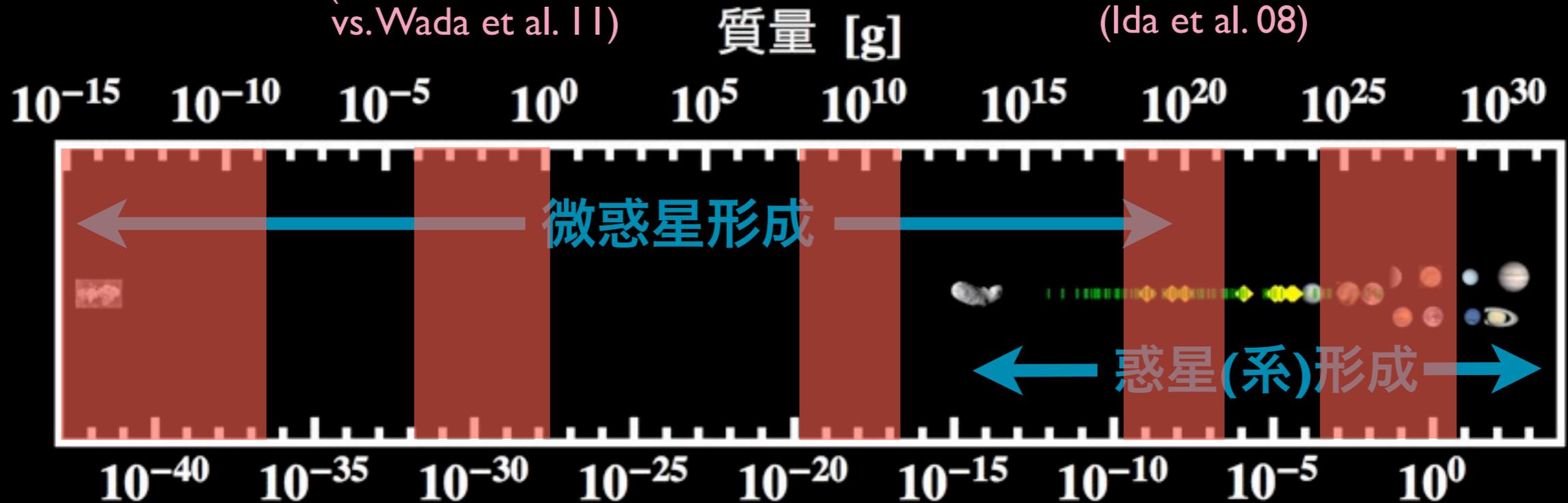
惑星形成は、実は、壁(barrier)だらけである

跳ね返りの壁？

(Zsom et al. 10, 11;
vs. Wada et al. 11)

衝突破壊の壁(微惑星ver.)

(Ida et al. 08)



静電反発の壁

(Okuzumi 09;
Okuzumi et al. 11ab)

(私のD論)

中心星落下の壁

衝突破壊の壁(ダストver.)

(Brauer et al. 08)

乱流巻き上げの壁

惑星移動の壁

(e.g., Tanaka et al. 02)

私の研究対象

第2部の内容

固体塊の成長と破壊

- 前期過程にしる後期過程にしる、固体を成長させなければならない。
- 「固体が成長する」とは？ 基本的には、**付着エネルギーを下回る衝突エネルギーで衝突すること。**

- 付着エネルギー：分子間力と自己重力で決まる。
 - ➔ **固体粒子の接触力学、粒子塊の構造力学**

- 衝突エネルギー：固体の相対速度で決まる。
 - ➔ **円盤のガスおよび固体のダイナミクス**

固体微粒子の付着

(Johnson, Kendall, & Roberts 71; Chokshi et al. 93)

● 微粒子が接触すると、分子間力(引力)と弾性力(斥力)で決まる広さの吸着面を形成。

● 結合エネルギー (JKR理論)

$$E_{\text{break}} = \gamma \pi a^2$$

$$\text{吸着面半径 } a = \left(\frac{9\pi\gamma r^2}{4Y_*} \right)^{1/3}$$

γ : 表面吸着エネルギー [erg/cm²]

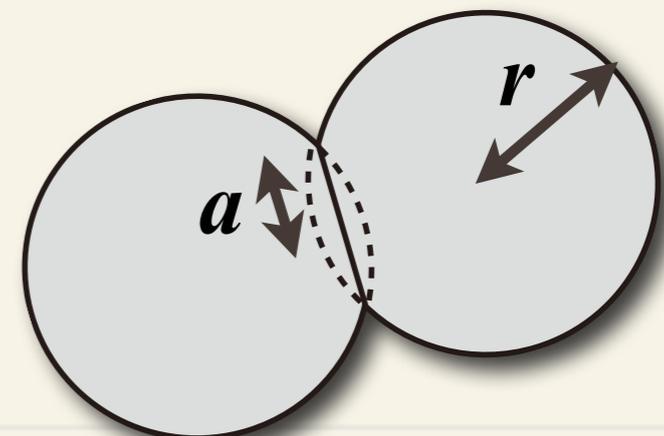
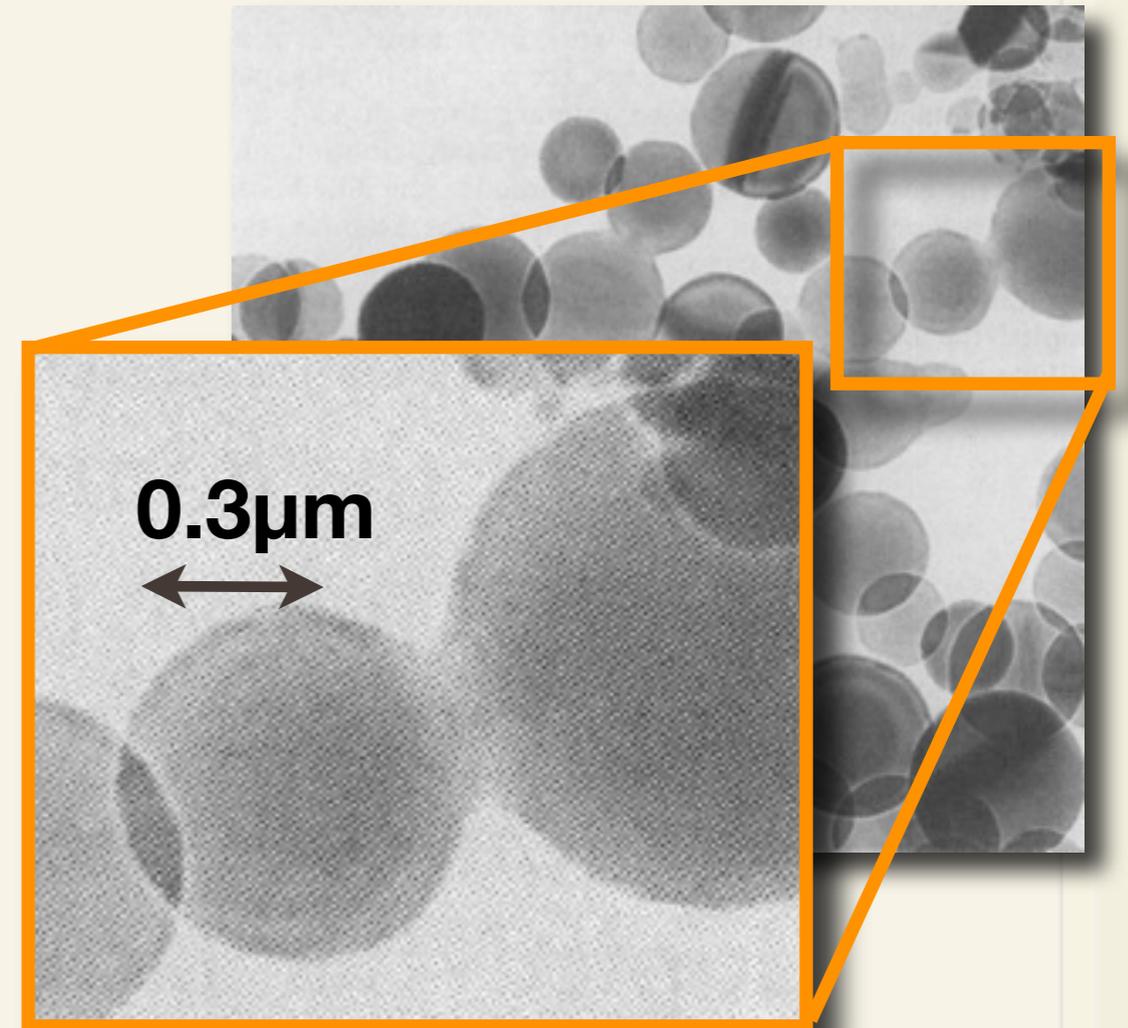
Y_* : 実効ヤング率 [dyn/cm²]

● 速度換算: $v_{\text{break}} = \sqrt{\frac{4E_{\text{break}}}{m}}$

● 岩石 $v_{\text{break}} \approx 1 \text{ m/s } (r/0.1\mu\text{m})^{-5/6}$

● 氷 $v_{\text{break}} \approx 10 \text{ m/s } (r/0.1\mu\text{m})^{-5/6}$

(参考: 10m/s = 36km/h)

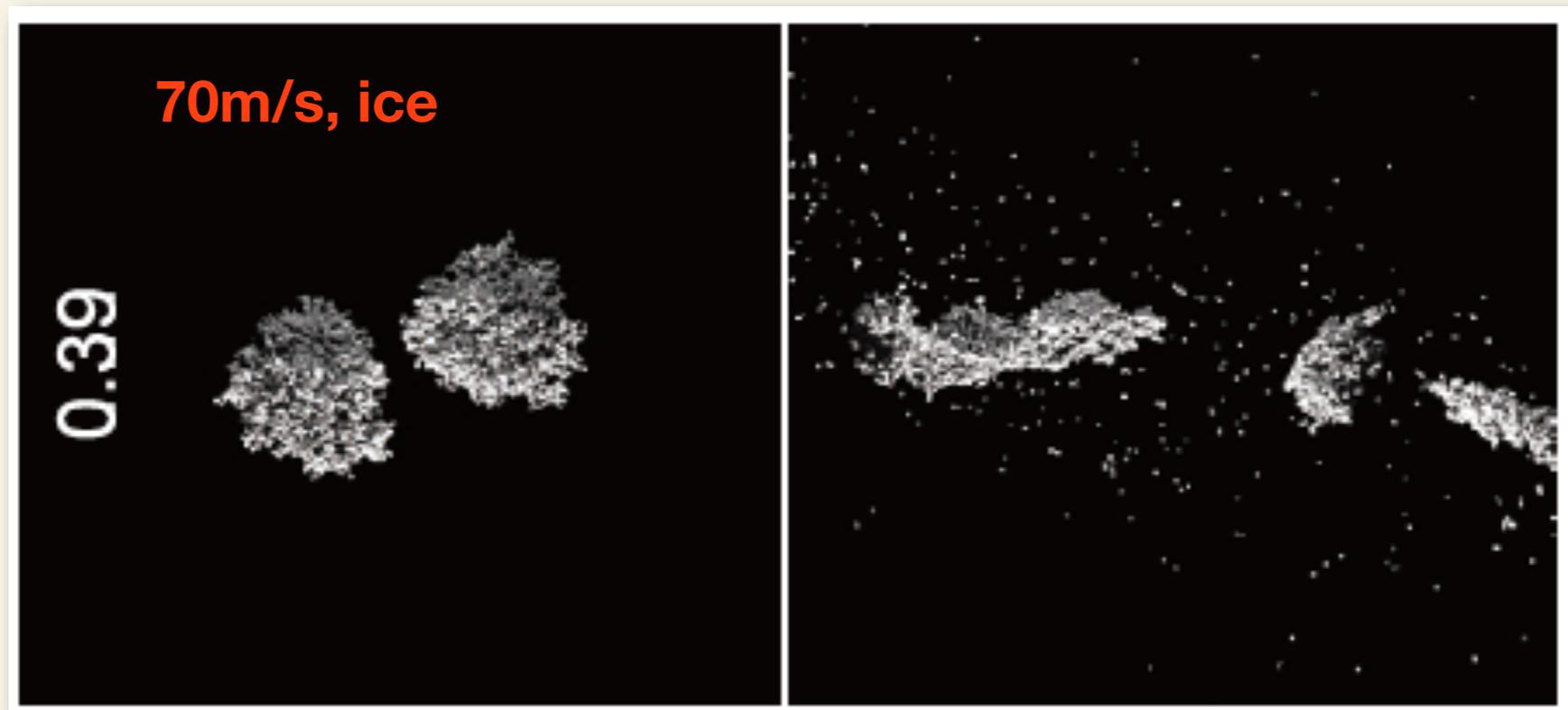


微粒子塊の衝突実験

微粒子の「塊」は、どのくらいの速度の衝突に耐えられるか？

➡ 塊どうしを衝突させて、最大破片の質量を調べる。

- **実験** (Blum & Wurm 00; Guettler et al. 10, ...) ←ドイツが頑張っている
- **N体** (Dominik & Tielens 97; Wada et al. 07,08,09, ...) ←日本が頑張っている

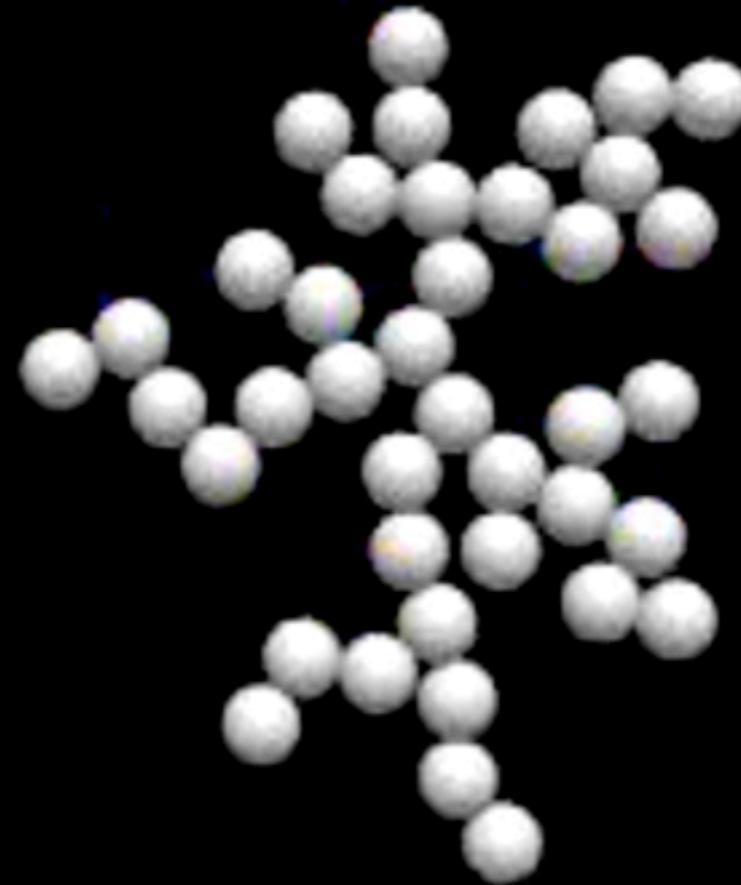
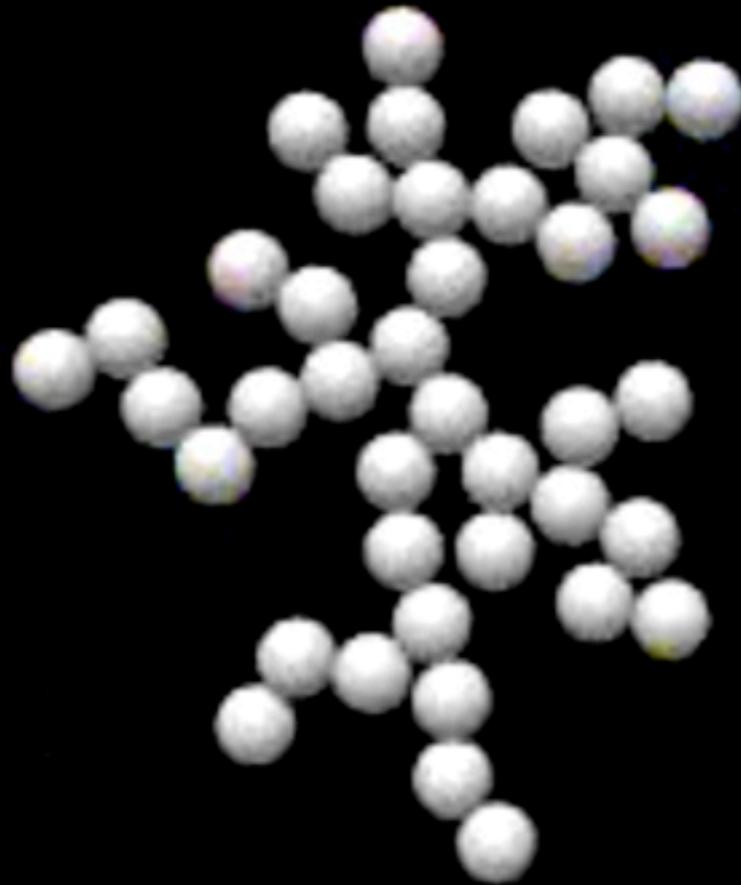


(Wada et al. 2009)

微粒子塊の衝突N体実験 (世界初の)

(Dominik & Tielens, 1997)

WAIT



$v = 100 \text{ cm/s}$

微粒子塊の衝突N体実験 (最先端の) (Wada et al. 2009)

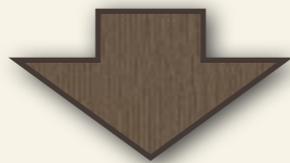


微粒子塊の臨界破壊速度

● 現状での大まかな結論:

「衝突エネルギーが $\lesssim 10E_{\text{break}}$ であれば、
付着優勢（最大破片はもとの塊より大きい）」

← 内部構造の再編成によって、 $10E_{\text{break}}$ くらいの
エネルギーを散逸できることを意味。



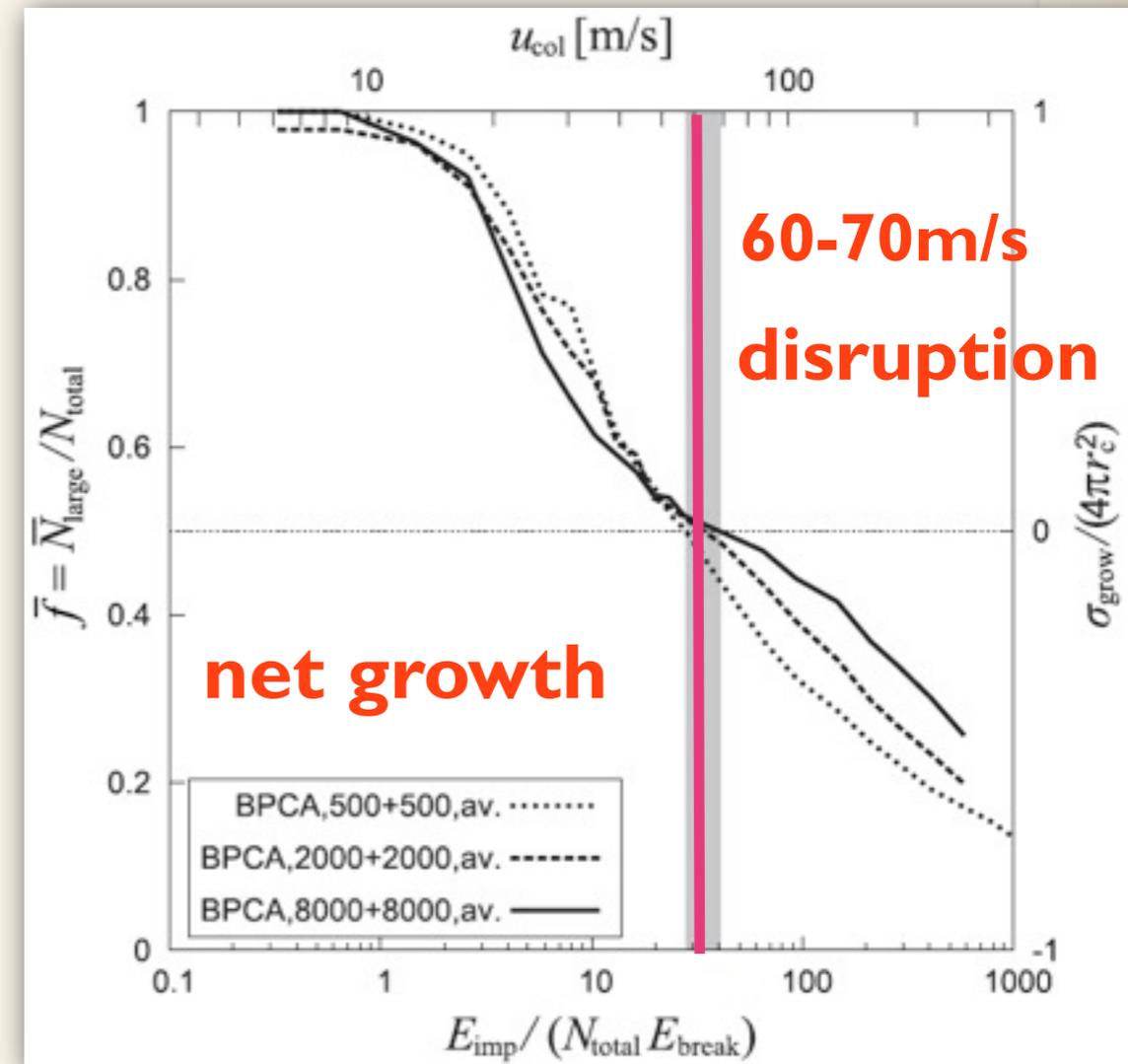
● ダスト塊の臨界破壊速度（最新値）

(Wada et al. 2009)

岩石: $\approx 4-7 \text{ m/s}$

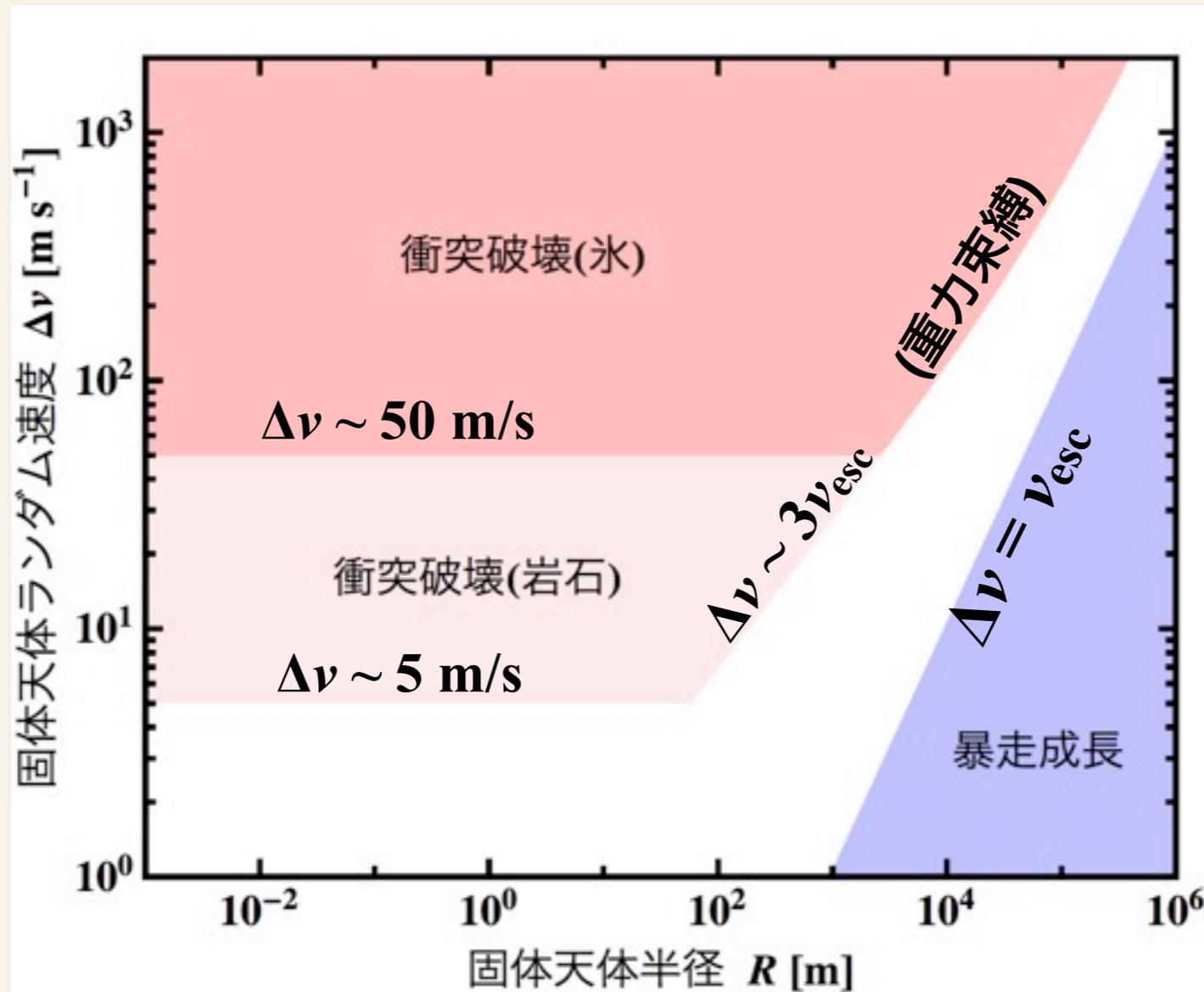
氷: $\approx 40-70 \text{ m/s}$

(等サイズ衝突、微粒子半径 $0.1 \mu\text{m}$, 空隙率90%の場合)



Wada et al. (2009)

衝突破壊速度 vs 固体半径



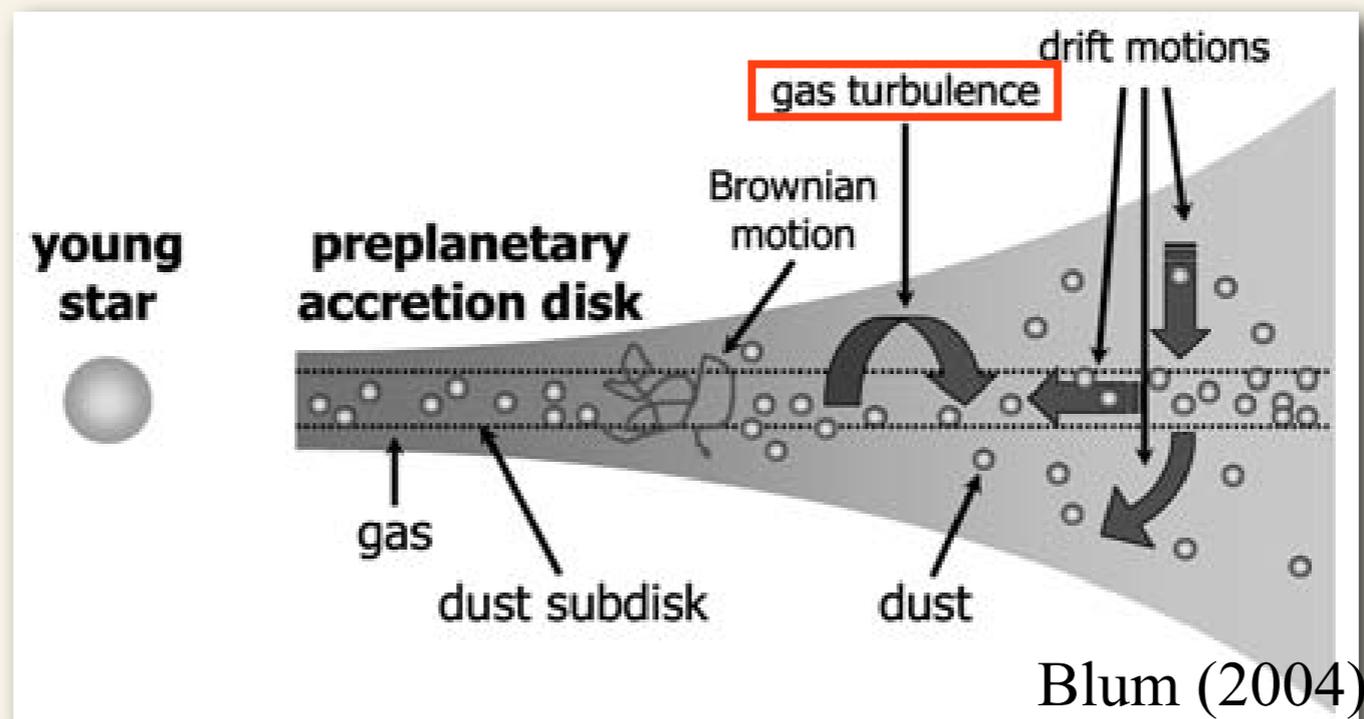
注：束縛強度は、まだ広いパラメータ範囲では明らかになっていない。

(例えば、衝突サイズ比依存性、構成粒子サイズ分布、構成粒子形状、)

原始惑星系円盤での固体の相対速度

● 固体の相対速度の主な駆動機構

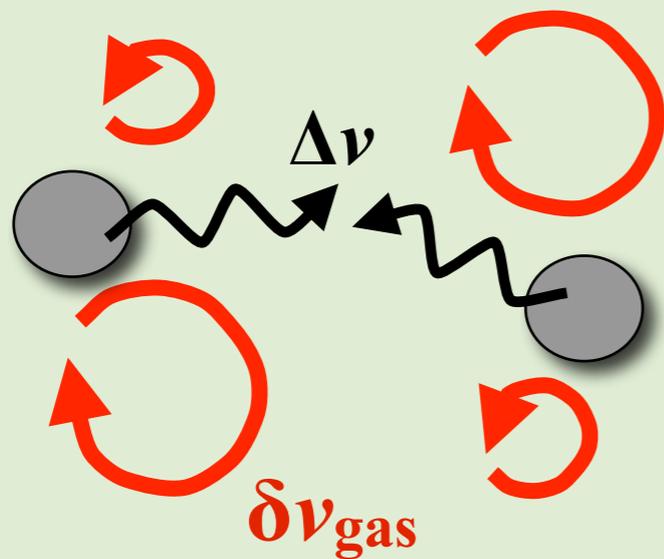
- ▶ ブラウン運動： μm サイズの微粒子のみ重要。 $\ll 1 \text{ m/s}$
- ▶ 赤道面沈殿： cm サイズくらいまで重要。 $\lesssim 1 \text{ m/s}$
- ▶ 中心星落下： m サイズくらいまで重要。 $\lesssim 25\text{-}50 \text{ m/s}$
- ▶ 重力散乱： km サイズくらいから重要。 $\lesssim v_{\text{esc}}$
- ▶ **円盤乱流**



乱流による固体のランダム運動の駆動

(1) 速度分散駆動

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



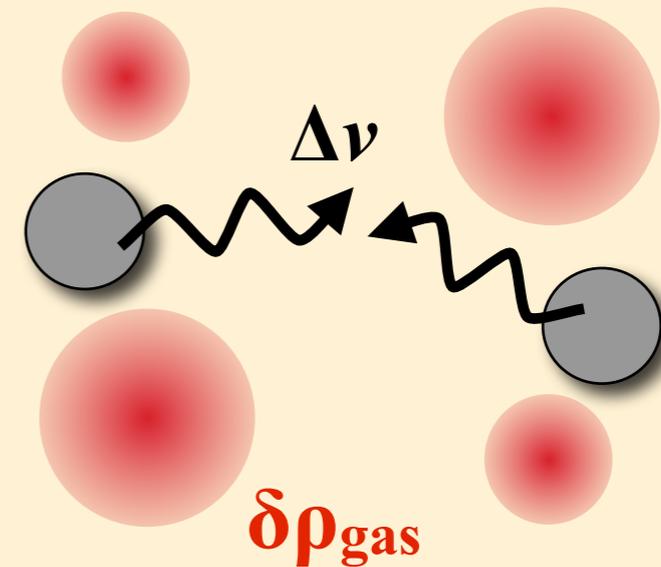
摩擦力が揺らぐ → ランダム力を受ける

$$\frac{d}{dt} \delta v_i = - \frac{\delta v_i - \delta v_{\text{gas}}}{t_{\text{stop}}}$$

- 比較的小さい(<10m)固体に効く

(2) 密度分散駆動

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



重力場が揺らぐ → ランダム力を受ける

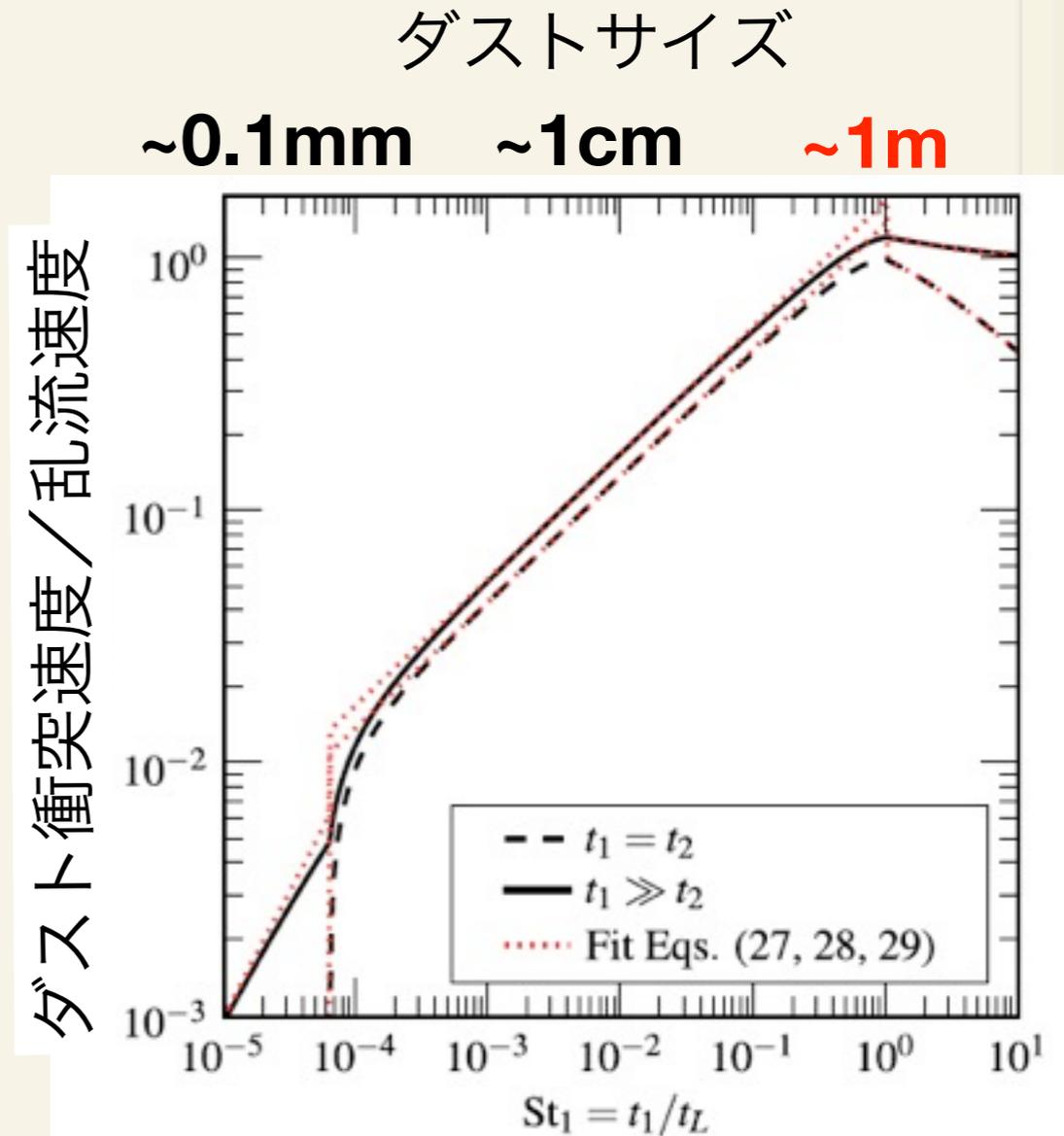
$$\frac{d}{dt} \delta v_i = - \nabla \delta \phi_{\text{gas}} - \frac{\delta v_i}{t_{\text{stop}}}$$
$$\nabla^2 \delta \phi_{\text{gas}} = 4\pi G \delta \rho_{\text{gas}}$$

- 大きい(>10m)固体に効く

ガス乱流によるダスト衝突速度の誘起

- ダストの摩擦制動時間と、乱流渦の運動時間（~ケプラー時間）の比で決まる。
- 時間比が1 (ダストサイズ ~ 1m) のとき、衝突速度は最大になり、このとき

(衝突速度) \approx (ガス乱流速度)

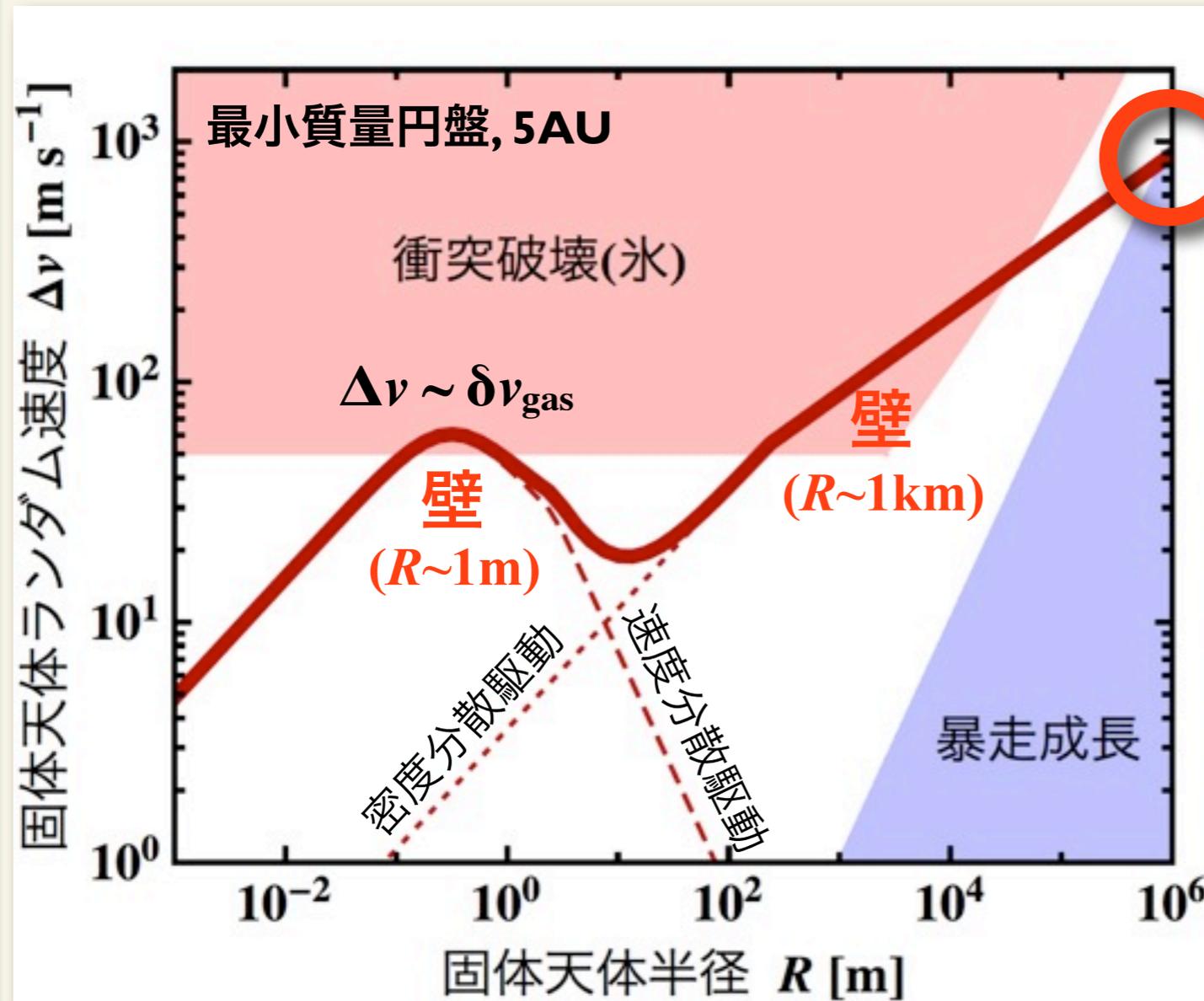


Ormel & Cuzzi (2007)

ダストが成長し続けるためには、(臨界破壊速度) > (ガス乱流速度)

強い乱流下での固体成長

$\delta v_{\text{gas}} = 0.1c_s$, $\delta\rho_{\text{gas}} = 0.1\rho_{\text{gas}}$ の場合 ($\alpha=10^{-2}$ に相当)



帰結1:

$R \sim 1\text{m}$, 1km に成長の壁

(固体がシリケートだと、
この効果はより強烈に効く)

帰結2:

$R \sim 1000\text{km}$ まで微惑星の
暴走成長が起こらない

(その分、惑星形成が遅れる)

原始惑星形成シナリオに重大な影響

(Ida et al. 08; Nelson & Gressel 10)

磁気回転不安定性(MRI)

では、現実的な乱流強度は？ → 素過程から決めるしかない。
ここでは、例として**磁気回転不安定性 (MRI)** を取り上げる。

MRI = 「磁化した差動回転円盤は不安定である」

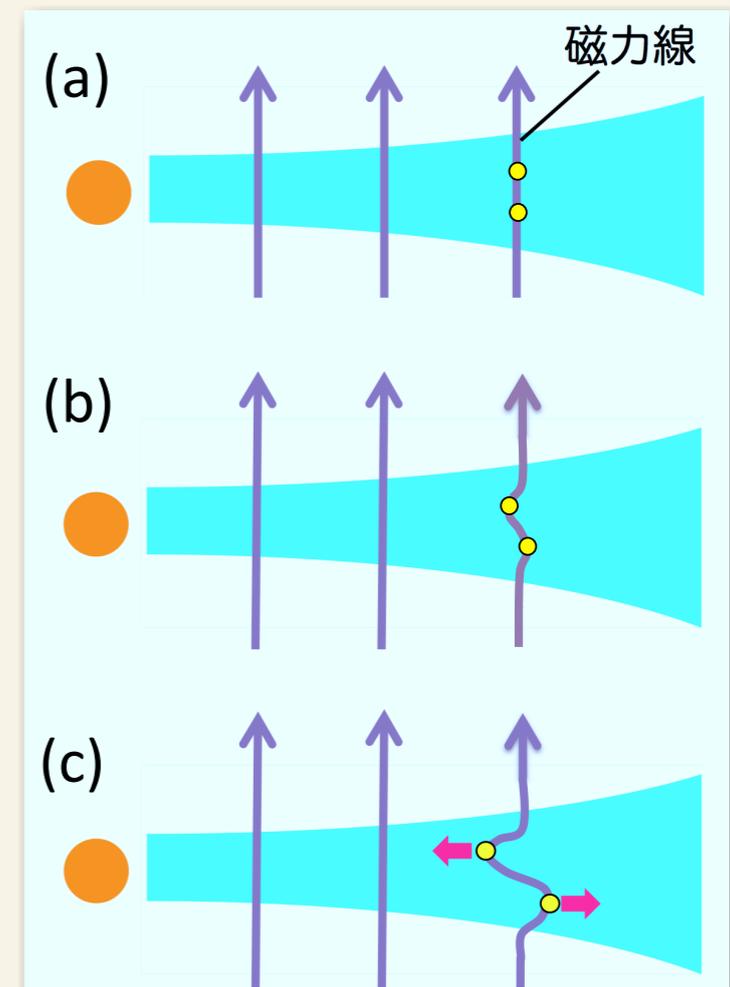
(Balbus & Hawley 1991; Chandrasekhar 1961; Velikov 1959)

● MRIのメカニズム：

磁気張力を通じた、流体素片間の角運動量
交換 (cf. バネで連結された2質点)

● MRIの発動条件

- (1) 円盤が(強すぎない)磁場に貫かれている
- (2) 円盤ガスが十分に電離している



藤井悠里 修論

MRI駆動の磁気乱流

- MRIは円盤ガスの乱流を引き起こす。

(局所計算 Hawley et al. 95; 成層計算 Miller & Stone 00; 大局計算: Flock et al. 11)

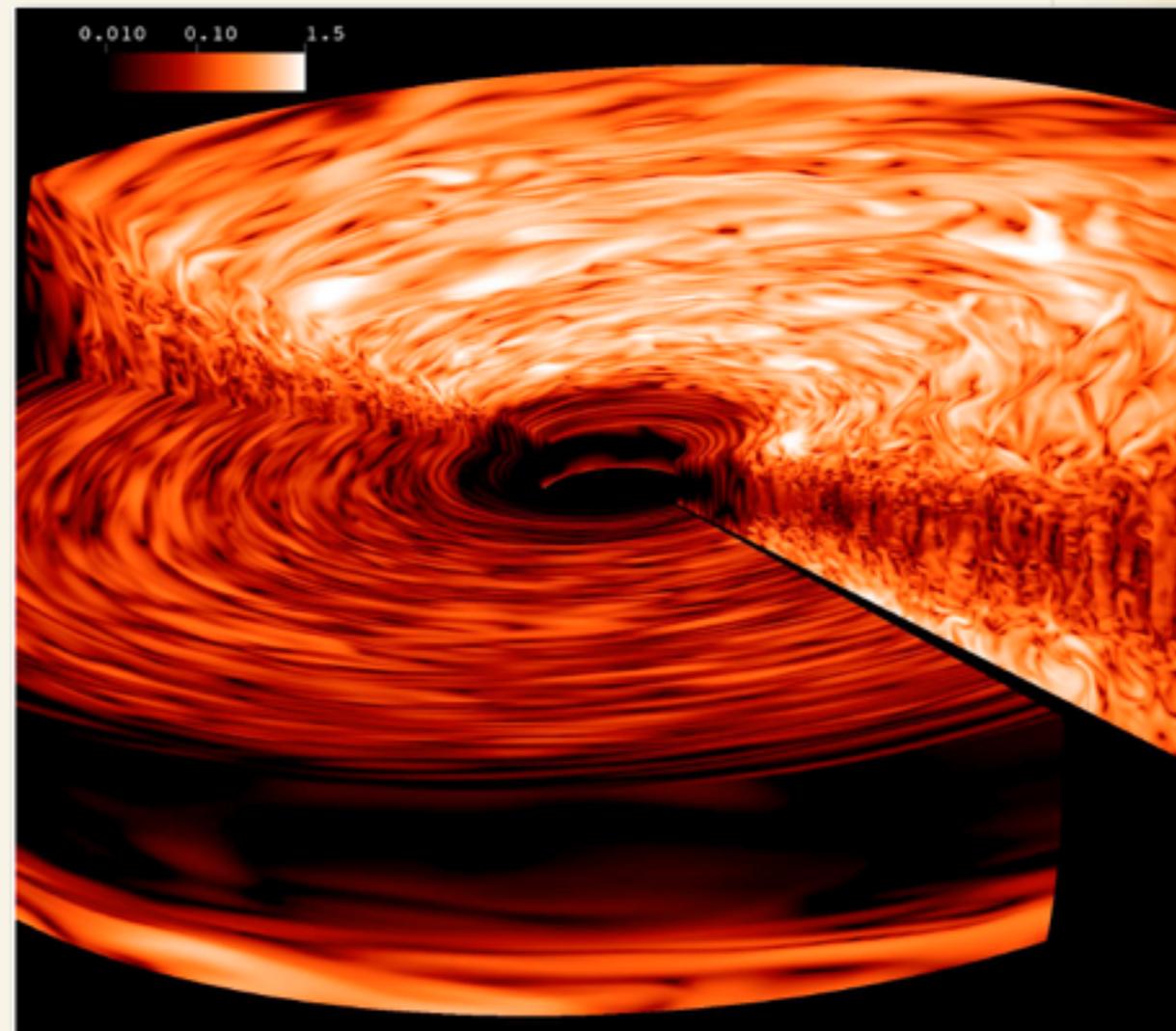
- 十分に電離しているとき(理想MHD)、円盤赤道面でのガスの速度分散は

$$\delta v_{\text{gas}} / c_s \approx \delta \rho_{\text{gas}} / \rho_{\text{gas}} \gtrsim 0.1$$

(円盤を貫く磁場が強いとき、“>”となる)

$T \sim 300\text{K}$ なら、 $\delta v_{\text{gas}} \gtrsim 100\text{m/s}$

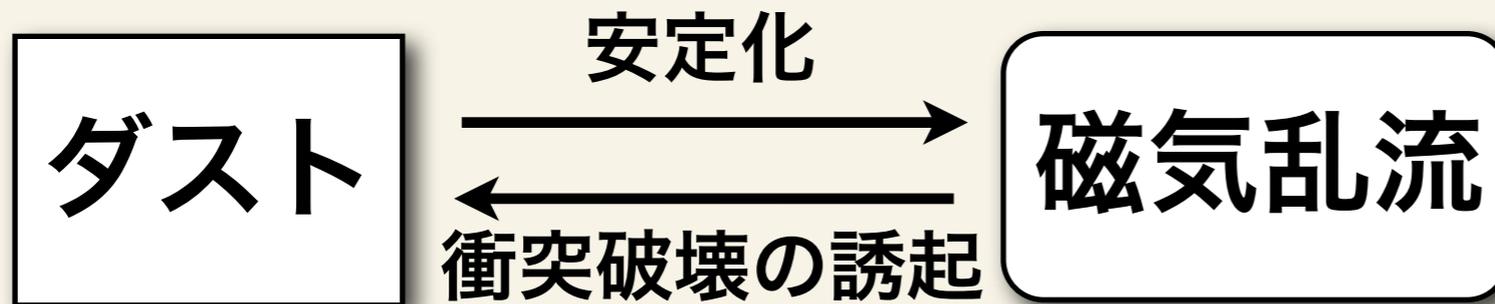
十分発達したMRI乱流は困る



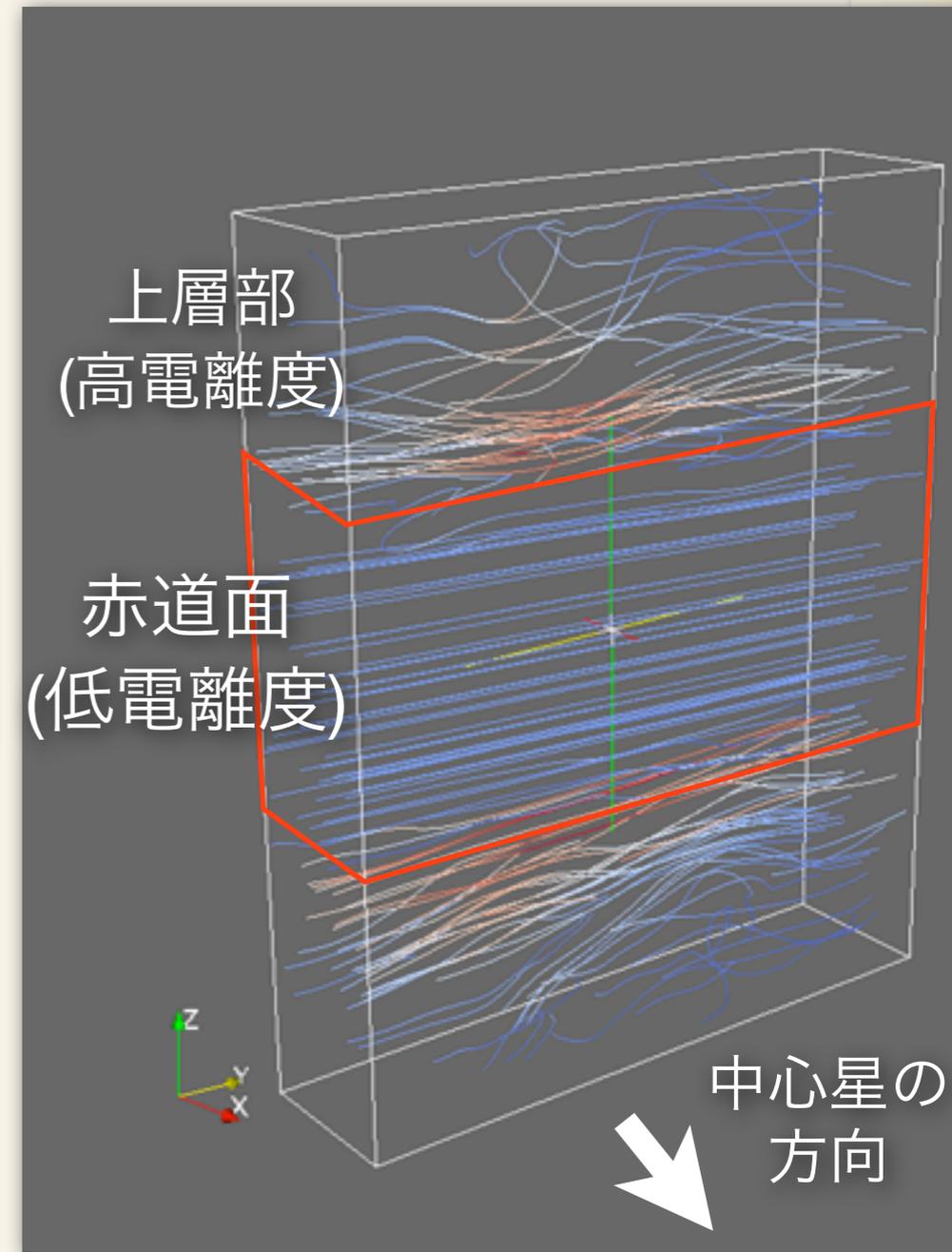
Flock et al. (2011)

研究紹介：ダストとMRI乱流の共進化

- MRIは低電離度領域で安定化される。
「**デッドゾーン**」 (Gammie 1996)
- ガスの電離度は、**ダストの総表面積に反比例** (微小ダストは電離度を下げる)
(Sano et al. 2000)



本研究の目的：
ダストの成長/破壊とデッドゾーンの
進化を無矛盾に取り扱う理論モデル
の確立

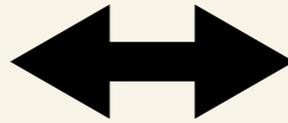


© 廣瀬重信さん

どういふことをやったか

ダストとMRI乱流の進化を同時に直接計算するのは、一般に困難。

MRI乱流の運動時間
~ 1 orbital period



ダストの衝突時間
(~デッドゾーンの進化時間)
~ 100-1000 orbital period



【我々の方針】

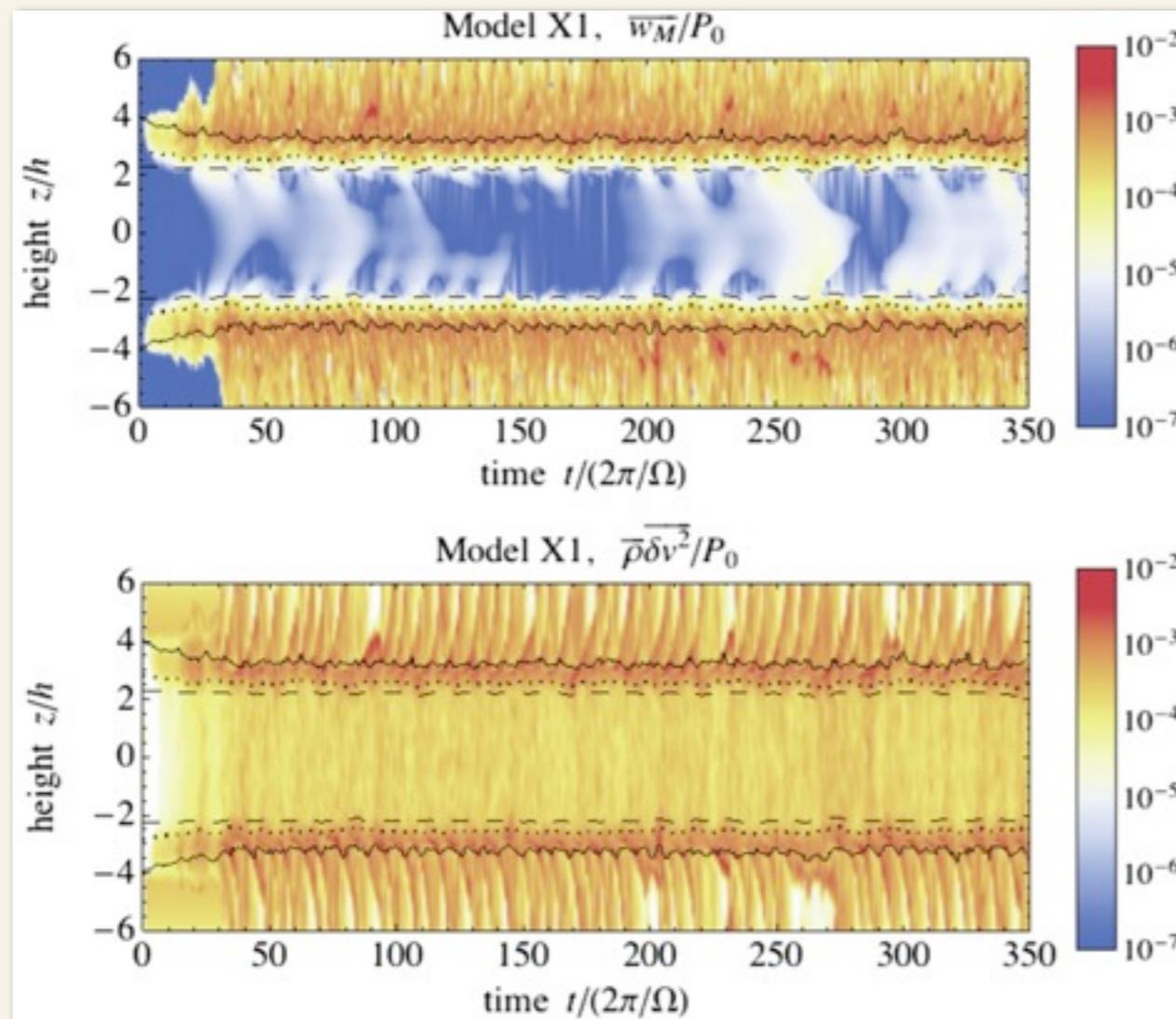
異なる時間スケールごとに（2段階に分けて）モデル化。

- * **Step 1: 固定デッドゾーンを持つ円盤内での乱流の準定常状態のモデル化**
(空間3次元局所成層MHD計算; Okuzumi & Hirose 2011)
- * **Step 2: デッドゾーンとダストサイズ分布の同時進化シミュレーション**
(鉛直1次元-質量1次元 ダスト衝突進化統計計算; Okuzumi & Hirose 2012)

Step I: MHD計算に基づく乱流の経験モデル化

Okuzumi & Hirose (2011)

- * 3次元・局所・等温・成層構造入り・オーム抵抗入りMHD計算
- * オーム抵抗(電離度)分布、鉛直磁束強度の異なる17通りのモデル
- * **ガス速度分散、密度分散、乱流ストレスなどの経験予測公式を導出**



乱流生成領域分布

(左図は磁気ストレス分布)



鉛直積分したストレス α_{core}

実際のガ斯拉ンダム運動分布

(左図は運動エネルギー揺らぎ分布)



速度分散、密度分散の赤道面值

$\delta v_{g,\text{mid}}, \delta \rho_{g,\text{mid}}$

Step I: MHD計算に基づく乱流の経験モデル化

Okuzumi & Hirose (2011)

速度分散分布の経験公式

$$\langle \delta v^2 \rangle = 0.8 \alpha_{\text{core}} c_s^2 \exp(z^2 / 2h^2)$$
$$\alpha_{\text{core}} = 510 \beta_z^{-1} \exp(-0.54 h_{\text{res}} / h) + 0.011 \exp(-3.6 h_{\Lambda} / h)$$

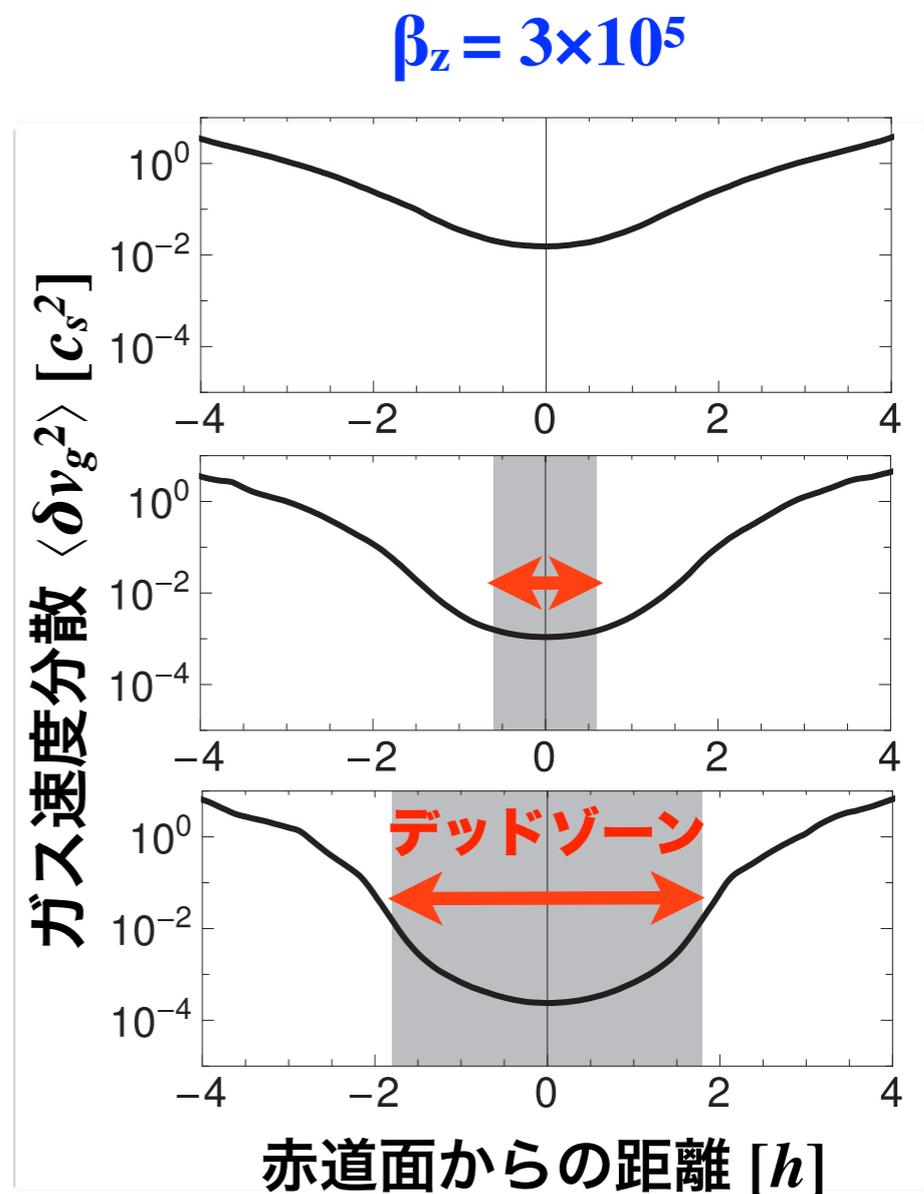
- $\beta_z^{-1} = \langle B_z \rangle^2 / 4\pi P_{\text{mid}}$ (磁束強度の指標)
- $h_{\Lambda}, h_{\text{res}}$: デッドゾーンの「厚み」
(~磁気レイノルズ数が1となる高さ)

ダストのサイズ/鉛直分布

→ 電離度 (オーム抵抗) の鉛直分布

→ デッドゾーンサイズ $h_{\Lambda}, h_{\text{res}}$

あと $\langle B_z \rangle$ を指定すれば $\langle \delta v_g^2 \rangle$ がわかる



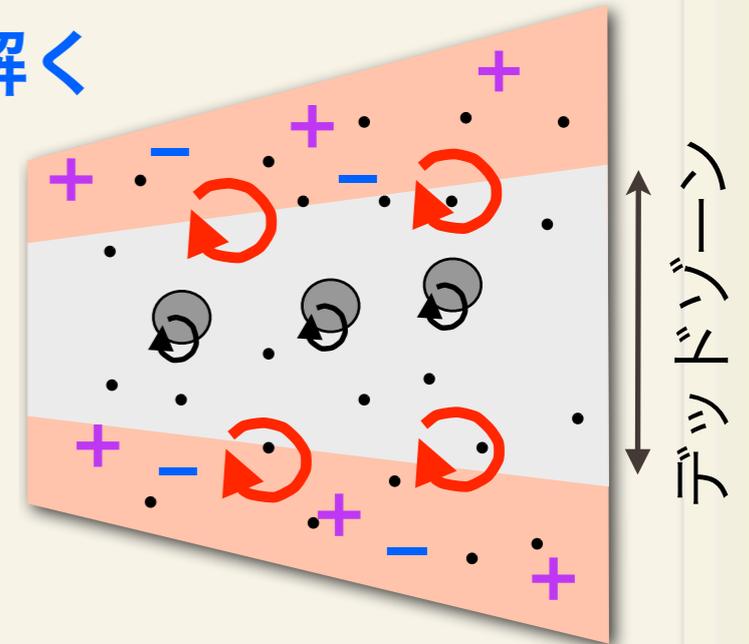
Step 2: ダストの合体成長/破壊シミュレーション

● ダストの鉛直サイズ分布関数 $n_d(m, z)$ の時間発展を解く

$$\frac{\partial n_d(m, z)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[-V_z n_d + n_g D_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{n_d}{n_g} \right) \right] + \int dm' dm'' \epsilon \pi (a' + a'')^2 |\Delta V| n_d(m') n_d(m'')$$

- $-V_z(m, z)$: 沈殿速度
- $\Delta V(m', m'', z, \langle \delta v_g^2 \rangle)$: 衝突速度 (乱流の効果入り; Ormel & Cuzzi 07)
- $D_z(m, z, \langle \delta v_g^2 \rangle)$: 鉛直拡散係数 (Youdin & Lithwick 07)
- $\epsilon(m', m'', \Delta V)$: 衝突結果を決める関数↓

$\Delta V > 10\text{m/s}$ で小規模破壊, $> 60\text{m/s}$ で大規模破壊 (氷ダスト, Wada+09)
(簡単のため、破片粒子はすべて $0.1\mu\text{m}$ 粒子と仮定)



● 各時刻の乱流強度 $\langle \delta v_g^2 \rangle$ をダスト分布(電離度分布)から決める

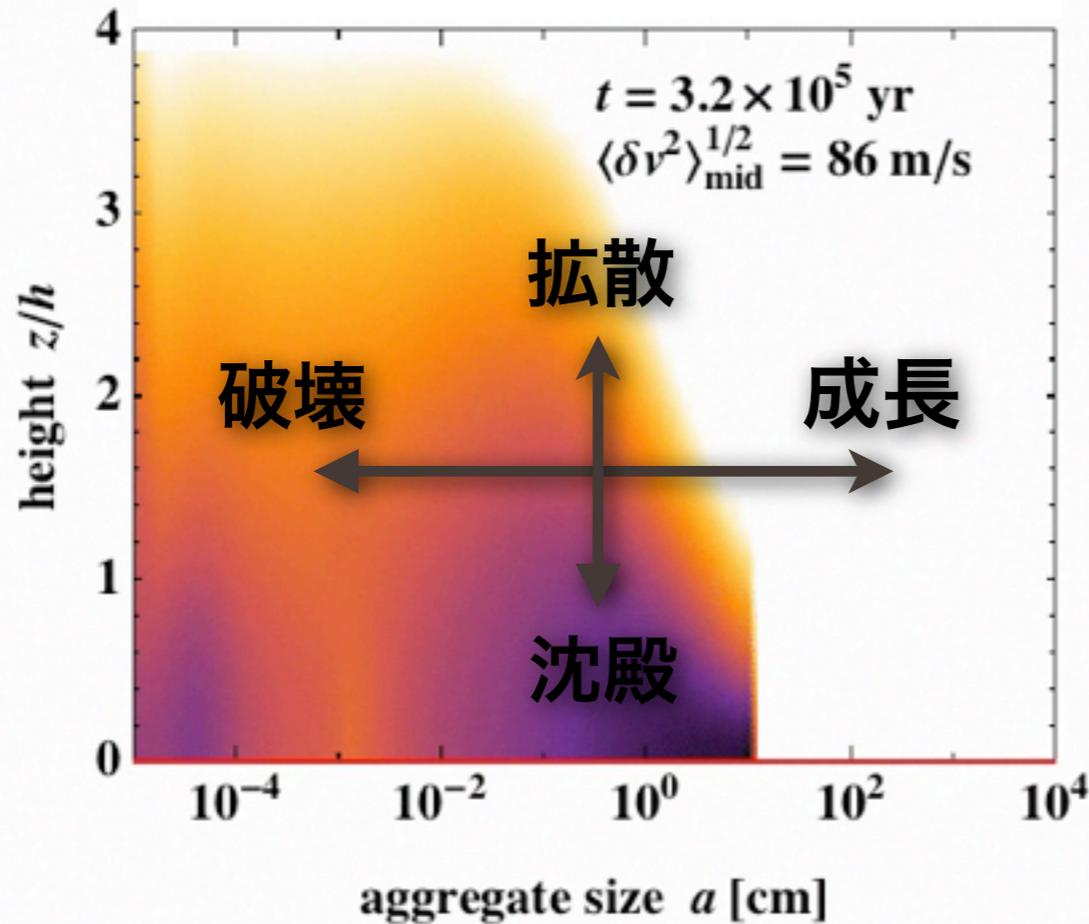
宇宙線による電離 + ダストによる荷電粒子捕獲 → 電離度分布 (解析解: Okuzumi 09)

→ オーム抵抗分布 → デッドゾーンの厚み → 乱流速度分散分布

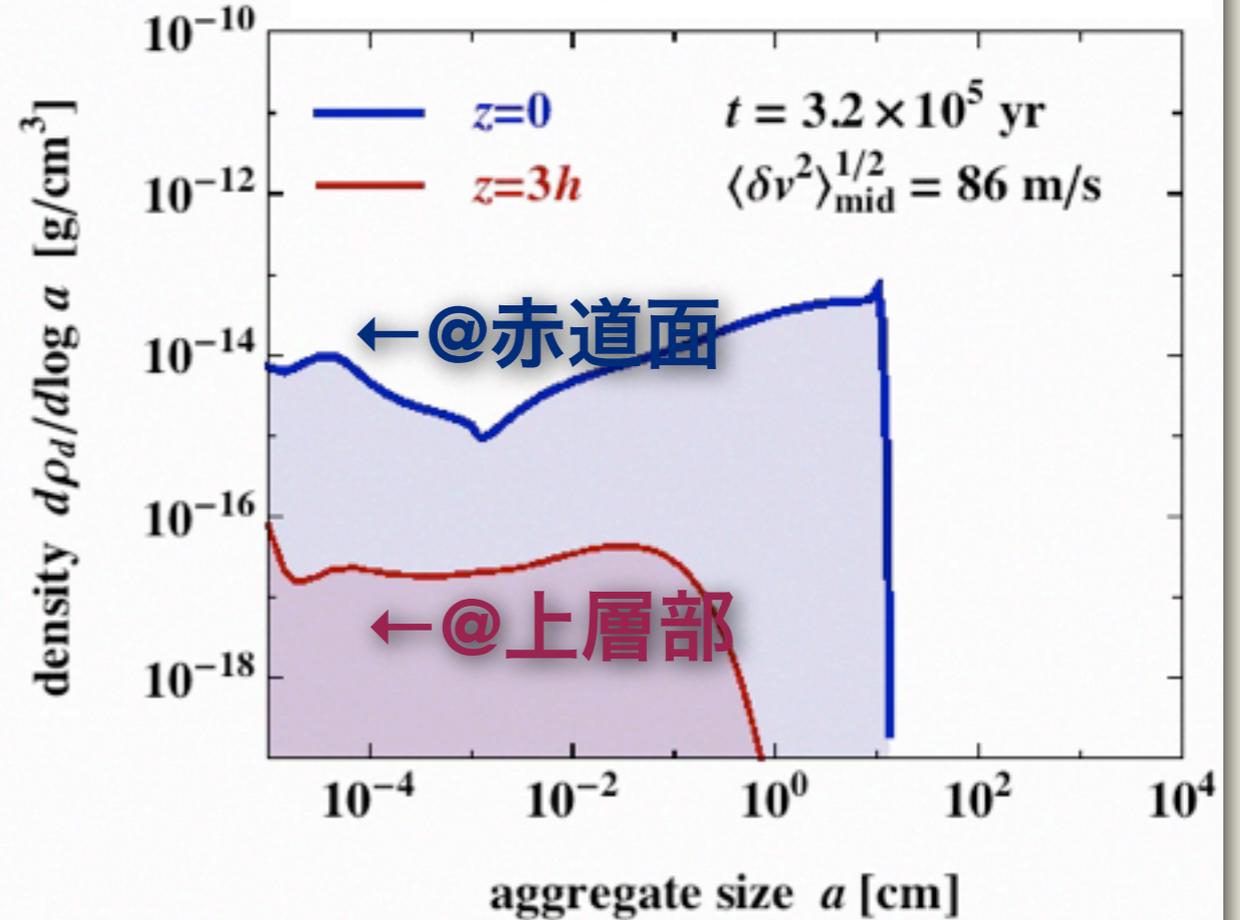
Run 1 : デッドゾーンなし

✓ 鉛直磁束 $\langle B_z \rangle = 6\text{mG}$ ($\Leftrightarrow \beta_{z0} = 50,000$) の場合

鉛直/サイズ分布



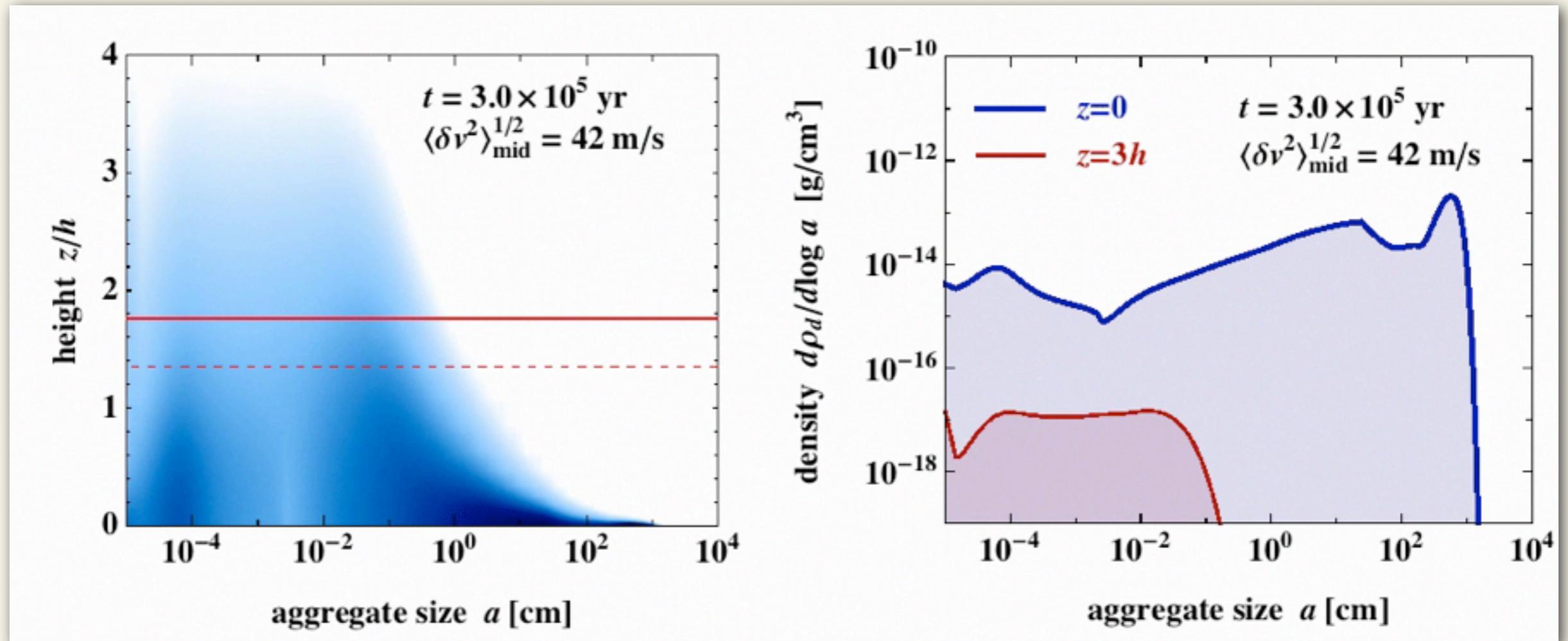
分布のスライス



● 乱流のランダム速度 > 大規模破壊速度

● 10cmより大きなダスト塊は形成されない (衝突破壊の壁)

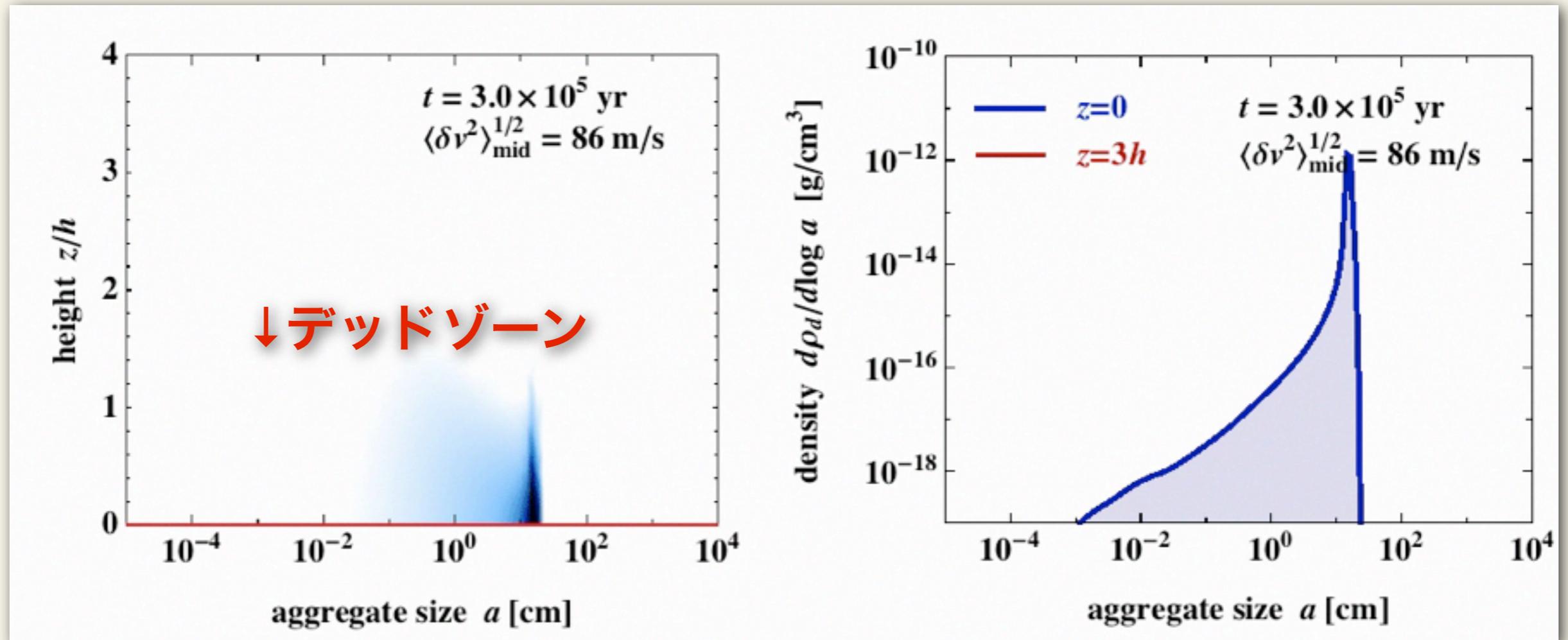
Run 2 : デッドゾーンあり、破片生成あり



- 破壊によって生じる微小ダストが広いデッドゾーンを維持
- 赤道面乱流速度 $\lesssim 40$ m/s \rightarrow 大きなダスト塊は成長し続ける
- 質量 \rightarrow 大きいダストが支配, 断面積 \rightarrow 小さいダストが支配

Run 3 : デッドゾーンあり、**破片生成なし**

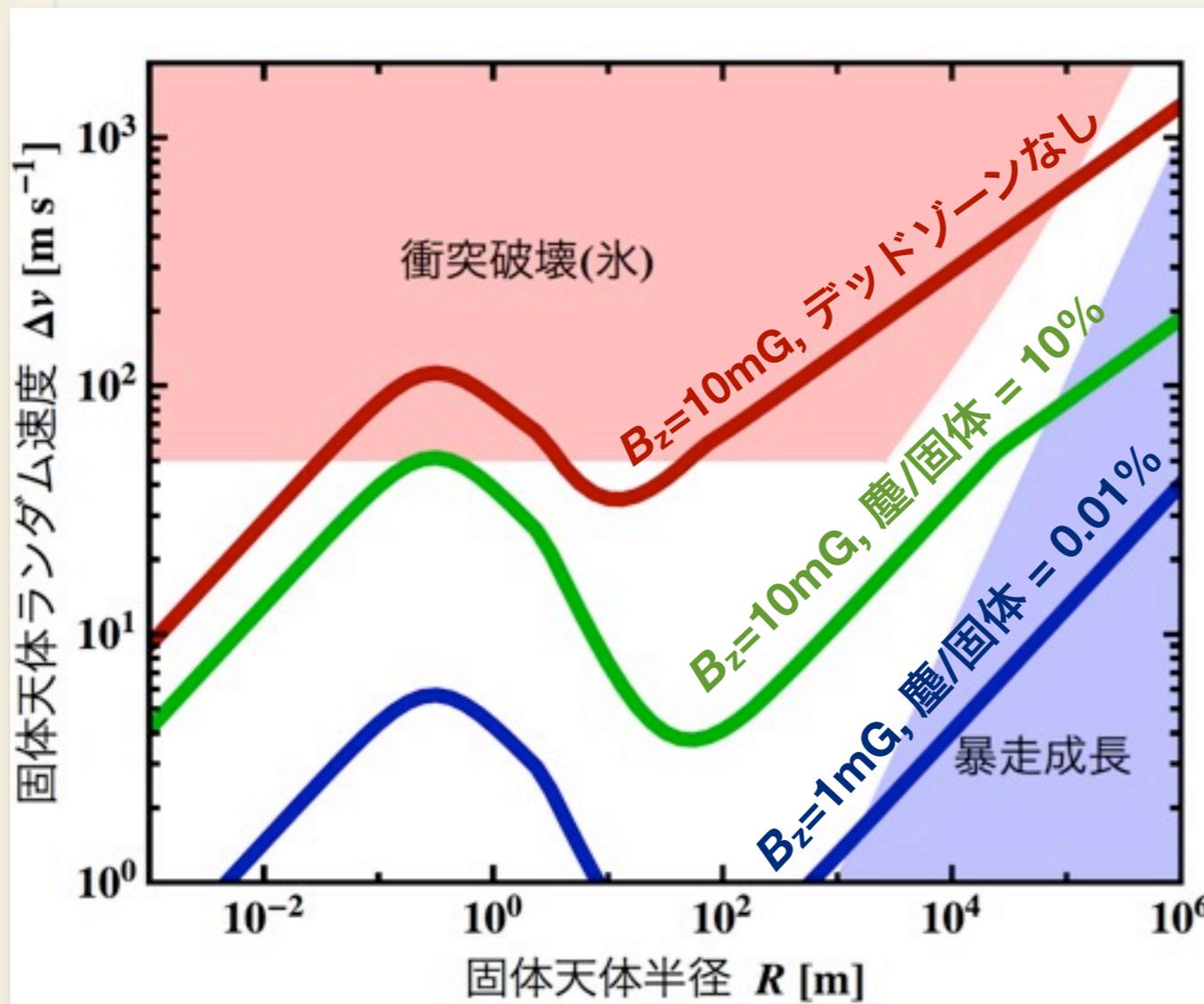
高速度衝突で「破壊」でなく「跳ね返り」を仮定した場合



🌐 ダスト成長 ➡ 電離度上昇 ➡ 乱流速度分散上昇 ➡ ダスト成長停止

デッドゾーンを考慮した原始惑星形成

体系的な局所3次元MHD計算から乱流強度を経験公式化し(Okuzumi & Hirose 2011),
デッドゾーンがある場合の固体の相対速度をさまざまな環境下で調べた。



Okuzumi & Hirose (2012)
Okuzumi & Ormel, in prep.

鍵となる物理量

- 円盤を貫く磁場の強度 B_z
- 微小な塵の量

特に、 B_z 依存性が大きい。

B_z の量は、円盤形成の過程で、ある程度決まってしまう可能性（磁場が分子雲コア由来だから）。

→ 惑星形成の運命が、初期条件（星形成・円盤形成過程）に依存している可能性を示唆

第二部のまとめ

● 固体の付着強度の現状の理解

- 岩石 (シリケイト) : 衝突速度 $< 5\text{m/s}$ なら成長可。
- 氷 : $< 50\text{m/s}$ なら成長可。

● 原始惑星系円盤のダストの運動

- 強い乱流があると、固体成長が大きく阻害される。
- 磁気流体不安定(MRI)は強い乱流の生成候補。
- 低電離度の効果を考えると、ダスト成長が可能になりうる。
- 岩石ダストの成長は、乱流が無くても阻害される (未解決！)

第3部

惑星形成理論への招待

惑星形成理論における人手不足

🌟 第2部で話した各素過程の解明だけでも人手不足：

＊ 微粒子塊の衝突・構造力学

- 衝突強度のN体計算 ... 世界で1人（和田浩二さん@千葉工大）
- 構造力学のN体計算（空隙率進化、静的圧縮強度） 片岡章雅さん
- 衝突・構造力学の微惑星形成への応用（統計計算）：私、片岡章雅さん@天文台
- 内部構造進化を考慮した円盤オパシティ進化：片岡さん、私

複数の重要な課題を、圧倒的に少ない人数で掛け持ち（もう手一杯）

＊ 円盤乱流中の固体のダイナミクス（拡散、相対速度をちゃんと調べるとか）

- MRI乱流のシミュレーション中で ... 欧州では何人か。日本はいまゼロ。
→ 私はMHD計算の専門家（廣瀬重信さん@JAMSTEC）にお願いしてやってもらった。
- 重力不安定乱流中：世界的にゼロ（私が知らないだけか？）
- 非オーム抵抗の効果、熱構造の効果：日本ではゼロ。

シミュレーションで欲しい情報がたくさんあるのに、する人がいない

私は途中から惑星形成に参入した

● 修士の研究：一応、ブラックホール物理

SS2005(M1): 流体とラバー管を用いたブラックホール物理の検証

SS2006(M2): 音響ブラックホールのリングダウン重力波

- 物理として面白かった（勉強になった）が、「重箱の隅」感は否めなかった。

● ブラックホールから惑星形成論への降着

- M1かM2のときに、指導教員に「惑星形成やらんか」と言われる。
- はじめはかなり乗り気でなかった（数値相対論がやりたかった）が、周りにやっている人が少なかったので、思い切ってやってみることに。

「素朴な疑問」からの新規参入

「ダストの成長に静電気は効かないのか？」という素人疑問

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 698:1122–1135, 2009 June 20
© 2009. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

doi:10.1088/0004-637X/698/2/1122

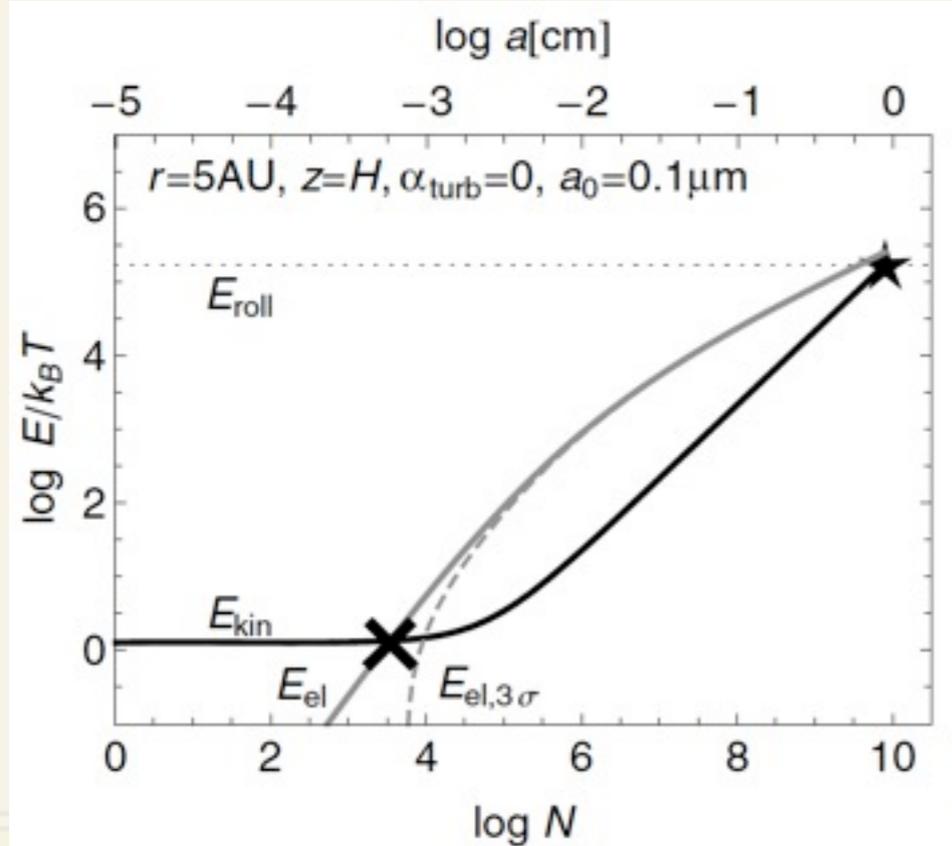
ELECTRIC CHARGING OF DUST AGGREGATES AND ITS EFFECT ON DUST COAGULATION IN PROTOPLANETARY DISKS

SATOSHI OKUZUMI

Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Yoshida nihonmatsu-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan;
satoshi.okuzumi@ax2.ecs.kyoto-u.ac.jp

Received 2009 January 19; accepted 2009 April 14; published 2009 May 27

Okuzumi (2009) [37 cites]



「原始惑星系円盤は電離環境なので、ダストは負に偏って帯電し、成長は阻害される」という単純明快な結論。

後に外国で“Charge barrier”と命名される。

当時の業界の専門家なら誰でも計算して示せる内容だったが、どういうわけか誰もやっていなかった。

まとめ

● 第一部：標準的惑星系形成論概論

- 地球を作るとは、質量40桁にわたって固体を成長させることである
- 前期過程：微惑星形成（分子間力による固体集積）
- 後期過程：原始惑星&ガス惑星コア形成（重力集積）

● 第二部：惑星形成の問題

- 形成過程随所に未解決問題がある
- 特に、強い乱流は惑星形成シナリオを大きく変えうる。

● 第三部：惑星形成理論への招待

- 「素朴な疑問」からの微惑星形成への新規参入も可能。