

原始惑星系円盤におけるダストの帯電と 合体成長の“壁”

京都大学 大学院人間・環境学研究科

奥住 聡

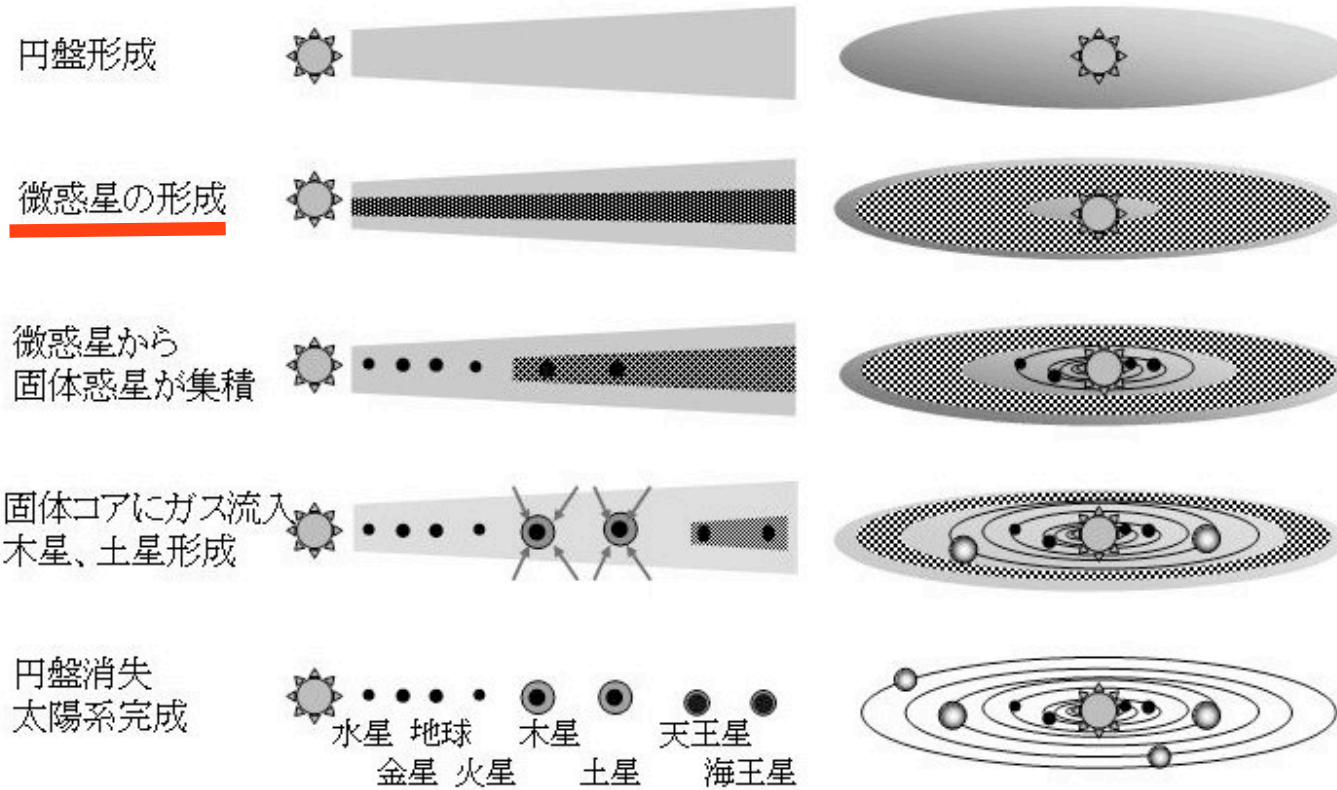
北海道大学 低温科学研究所 田中秀和

京都大学 大学院人間・環境学研究科 阪上雅昭

概要

- 原始惑星系円盤でのダストの**負帯電**
ダスト成長理論では(なぜか)無視されてきた素過程
成長を阻害する？ 問題ない？
- 帯電を考慮した合体成長シミュレーション
 - ▶ サイズ分布の進化は3通りの結末
- 原始惑星系円盤への応用
- 議論

太陽系形成標準モデル（京都モデル）



http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/STUDIES/basic_process.html

微惑星仮説: 「kmサイズの固体天体(微惑星)がその後できた」

微惑星形成シナリオは「壁」だらけ

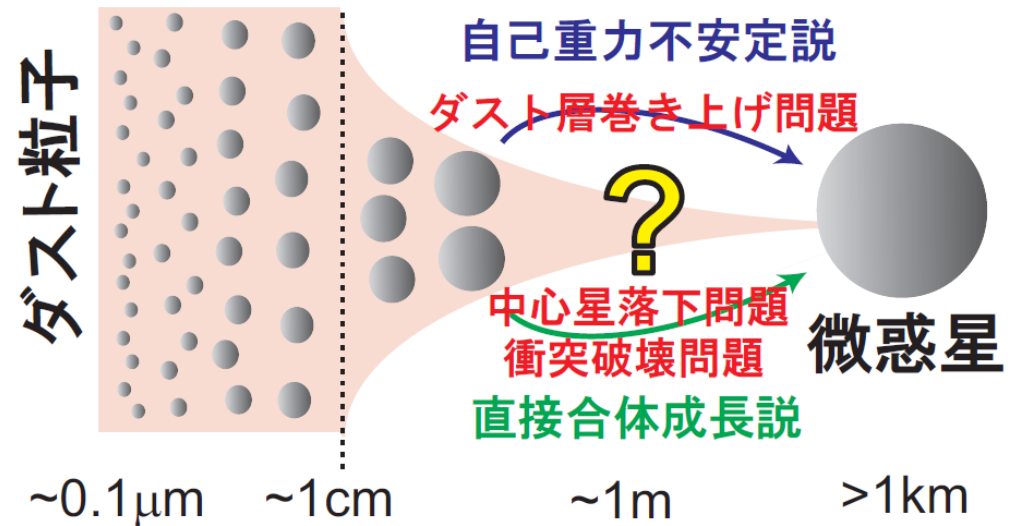
重力不安定説:

合体成長→沈澱→ダスト層分裂

重力不安定説:

合体成長→沈澱→合体成長

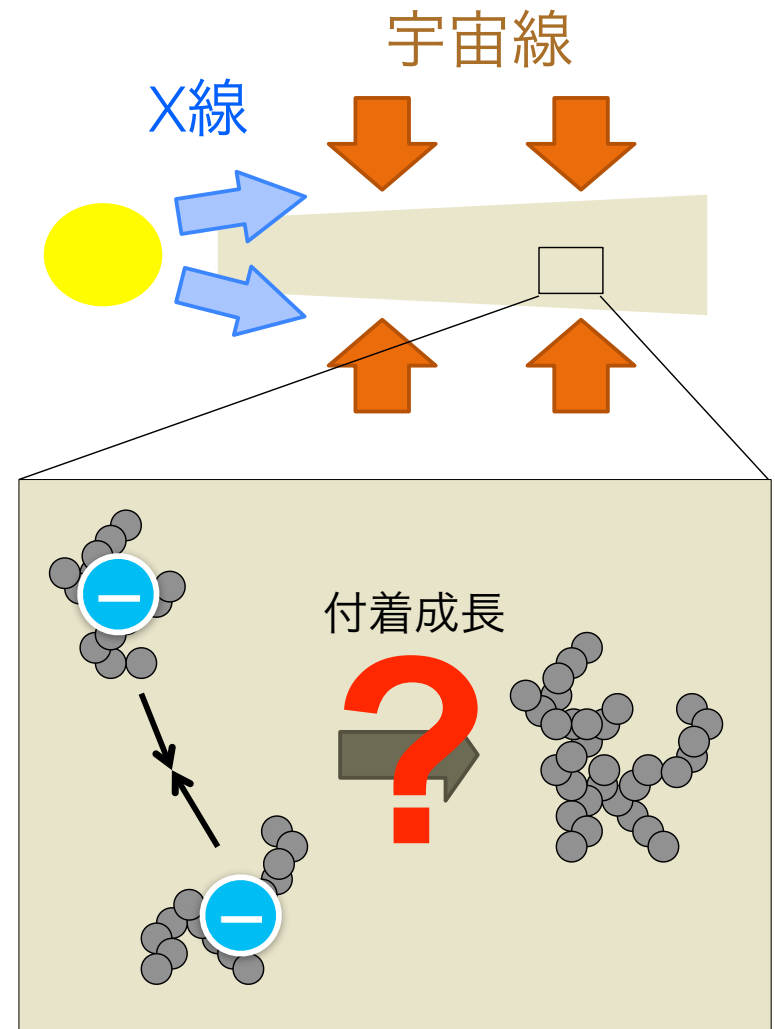
どちらの説も
ダストサイズ<1cmに
成長の“壁”あり



今日の話：
もっと初期の段階(<1cm)にも
成長の壁あり

今日の話：ダストの負帯電

- 原始惑星系円盤は**弱く電離**していると
考えられている (e.g., Umebayashi 83; Sano+ 00)。
(電離源：銀河宇宙線, 中心星X線, ...)
- 電離ガス環境下では、ダストは
電子やイオンを効率よく吸収。
平均的には負に帯電 (あとで)。



ダストの電子捕獲の重要性

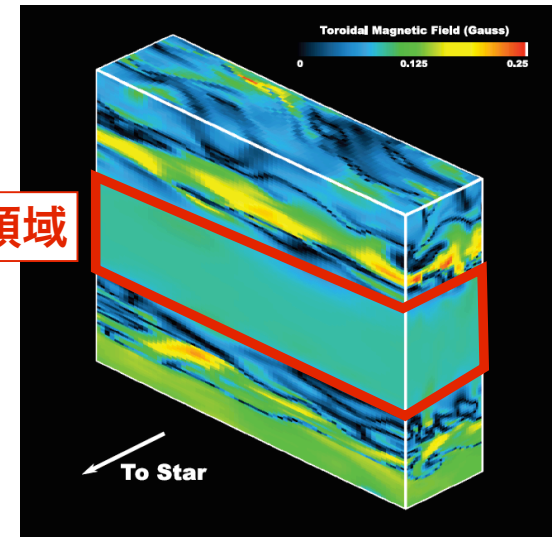
ダストの乱流殺し

磁気

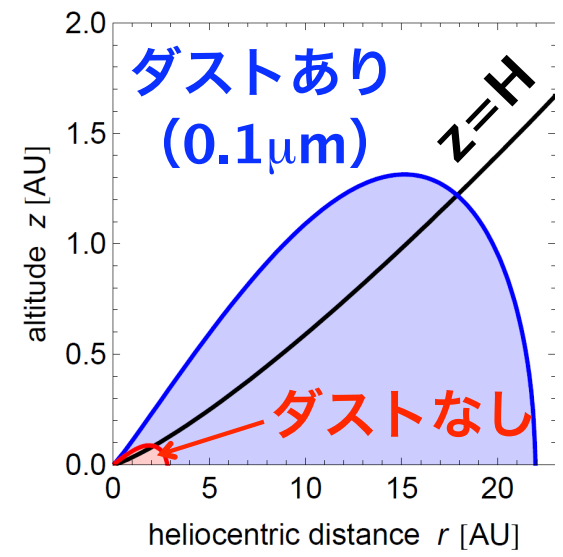
- 磁気回転不安定, **MRI** (Balbus & Hawley 91)
 - 差動回転する磁気流体特有の不安定性
 - 原始惑星系円盤での乱流機構の最有力候補
 - 低電離度領域では起こらない(不活性)
- 微小ダストは電離ガスを効率良く捕獲して電離度を大幅に下げる。
 - 広い乱流不活性領域 (Sano et al. 00)
- 層流化 → 破壊・ダスト層巻き上げを抑制

微小ダストの存在は、
ダストの進化自体にとって重要

ダスト入りMHD計算
(Turner & Sano 08)



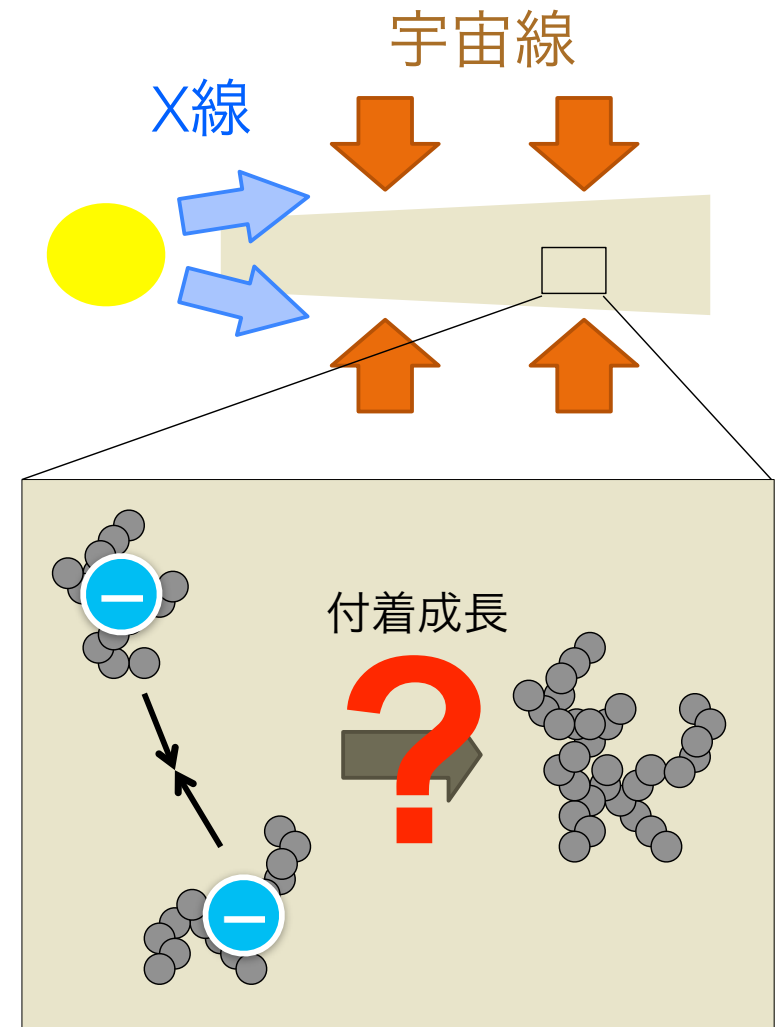
乱流不活性領域の分布



今日の話：ダストの負帯電と静電反発

- 原始惑星系円盤は**弱く電離**していると
考えられている(e.g., Umebayashi 83; Sano+ 00)。
(電離源：銀河宇宙線, 中心星X線, ...)
- 電離ガス環境下では、ダストは
電離電子を吸収して**負に帯電**する。
- 同符号に帯電→ダスト同士は静電反発
この効果はダスト成長理論で**完全に**
無視されてきた。

Question:
ダストの静電反発は成長に対して
無視できる？ 無視できない？



予備的考察: 中性プラズマ中でのダストの負帯電と静電反発

1: 「中性プラズマ中ではダストは負に帯電する」

(Spitzer 1941)

- ▶ 理由: 電子の熱速度はイオンよりも速いから!
(よりたくさんダストに入射)

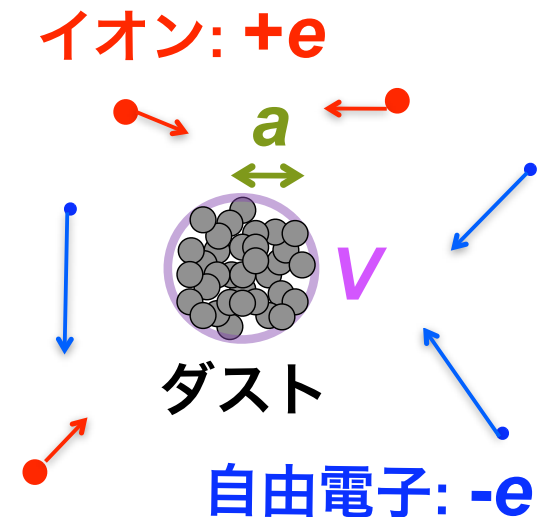
- ▶ 表面電位 V が

$$V \sim -\frac{k_B T}{e} \sim -10 \left(\frac{T}{100\text{K}} \right) \text{mV}$$

になるまで充電 (ダストのサイズに依らない)

- ▶ 球の静電容量 $C = a$ (CGS単位系)

$$\rightarrow \text{帯電量 } Q = CV = aV \sim -e \left(\frac{a}{0.1\mu\text{m}} \right) \left(\frac{T}{100\text{K}} \right)$$



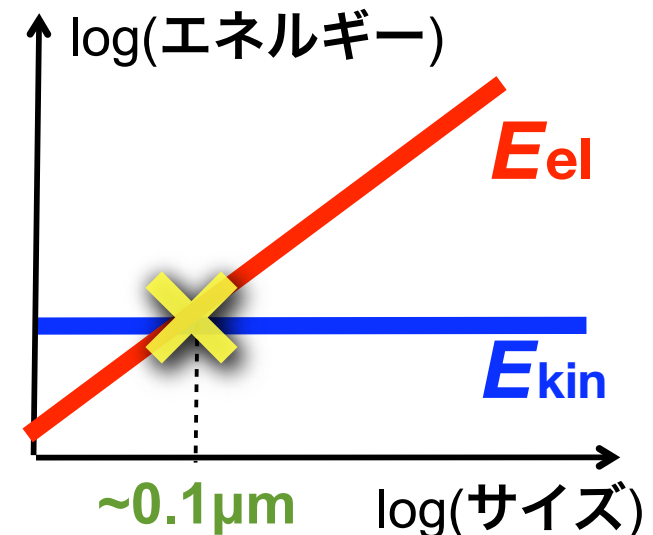
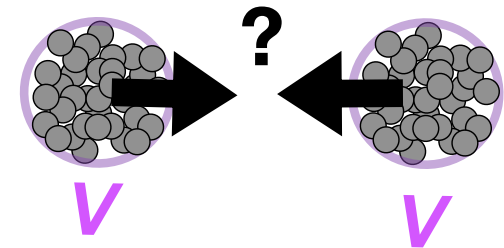
予備的考察: 中性プラズマ中でのダストの負帯電と静電反発

2: 「中性プラズマ中のダストは、 熱運動で合体成長し続けることができない」

- ▶ 相対運動エネルギー $E_{kin} \sim k_B T$
- ▶ 静電反発エネルギー (2体の帯電ダストを接触させるのに必要なエネルギー)

$$E_{el} \equiv \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} V^2 \sim k_B T \left(\frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{T}{100\text{K}} \right)$$

- ▶ 合体可能条件: $E_{kin} > E_{el}$
→ $a > 0.1 \mu\text{m}$ のダストは合体できない!
(@100K)



予備的考察: 中性プラズマ中でのダストの負帯電と静電反発

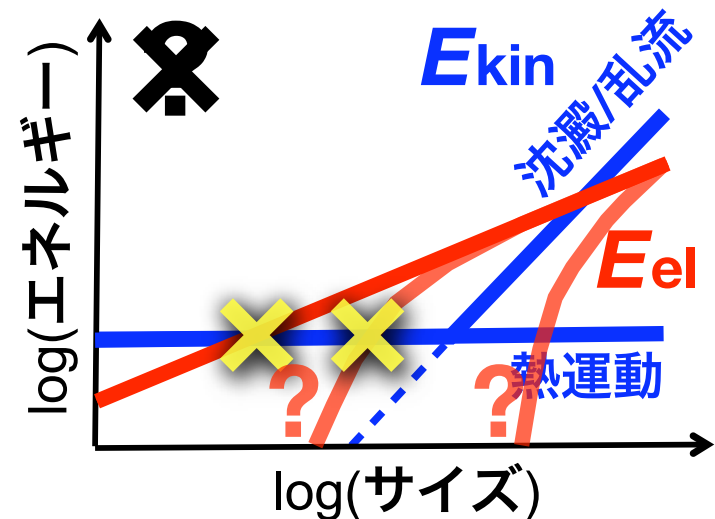
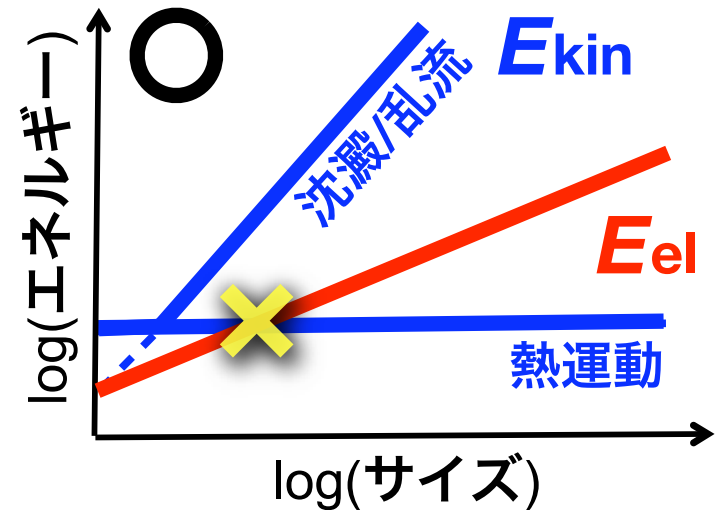
原始惑星系円盤では、次の2つの効果を考慮する必要がある:

▶ **ダストの非熱的な運動の効果**

- 赤道面沈澱, ガス乱流駆動, ...
- 運動エネルギーはサイズとともに増加。
→ 増加が十分早く起これば、合体し続けることが可能!

▶ **「電子欠乏効果」** (Okuzumi 09)

- 自由電子の数が不足すると、個々のダストの表面電圧が一様に下がる。
- 減少量は微小ダストの残留個数が決める。
→ サイズ分布を考慮した取り扱いが必要!



弱電離プラズマ中でのダストの帯電

ダストによる捕獲 >> 気相再結合
 → 荷電粒子の個数はダストが決めている。

- イオン, 電子の数密度 n_i, n_e
- ダストの表面電圧 V

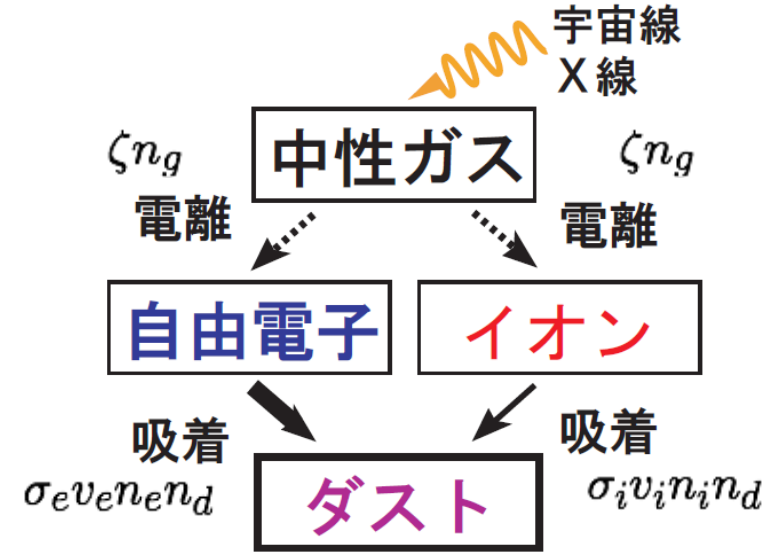
この3者を同時に決める問題

解析解(Okuzumi 09)

$$V \sim - \min \left\{ \frac{k_B T}{e}, \frac{en_i}{C_{tot}} \right\}$$

$$n_i \sim \frac{\zeta n_g}{S_{tot} u_i}$$

$$n_e \sim \frac{\zeta n_g}{S_{tot} u_e} \exp \left(\frac{-e|V|}{k_B T} \right)$$



ζ [/s]: ガス粒子の電離率

$C_{tot} = \int a n_d(a) da$ **ダスト総静電容量**
 (=半径の総和)

$S_{tot} = \int \sigma(a) n_d(a) da$ **総幾何断面積**

電子欠乏効果

$$V \sim - \min \left\{ \frac{k_B T}{e}, \frac{en_i}{C_{tot}} \right\}$$

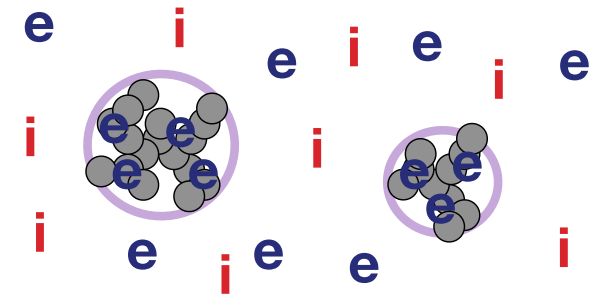
$$n_i \sim \frac{\zeta n_g}{S_{tot} u_i} \quad S_{tot} = \int \sigma(a) n_d(a) da$$

$$C_{tot} = \int a n_d(a) da$$

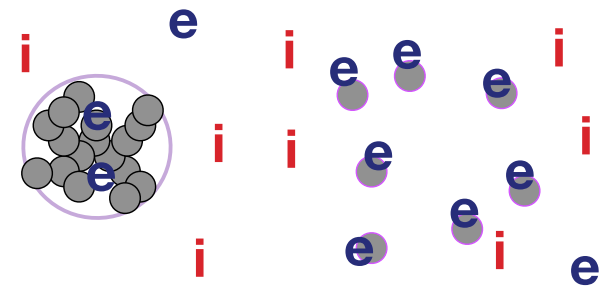
ダスト集団の総静電容量が大きすぎると、各ダストの充電が完了する前に自由電子が品切れになる。

総静電容量は小さいダストの個数で決まる
→ サイズ分布が本質的に重要

イオン-電子プラズマ
(中性プラズマ) $V \sim -\frac{k_B T}{e}$



イオン-ダストプラズマ
(非中性プラズマ) $V \sim -\frac{en_i}{C_{tot}}$



帯電を考慮したダストの成長シミュレーション

- ▶ サイズ分布の進化: 「合体成長方程式」を数値的に解く

(e.g., Nakagawa+81; Tanaka+05)

新しい点

- ▶ 衝突断面積に静電反発の効果を考慮

$$\sigma_{\text{eff}} = \pi(a_1 + a_2)^2 \left(1 - \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{kin}}} \right)$$

$$E_{\text{el}} = \frac{Q_1 Q_2}{a_1 + a_2} = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} V^2$$
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \Delta v^2$$

- 相対速度 Δv : 熱運動 + 沈澱/乱流(Weidenschilling 84) 外部変数: 加速度 g
- 表面電圧 V : 電子欠乏効果を含む解析解(Okuzumi 09) 外部変数: 電離率 ζ

- ▶ フラクタルダストモデルを適用 (Okuzumi, Tanaka & Sakagami, submitted)

- フラクタル次元 $D \sim 2$
- ダスト層形成前の比較的小さい($\sim \text{cm}$ @5AU)ダストの進化を想定

合体成長方程式 (coagulation eq., Smoluchowski eq.)

ダスト集団のサイズ (質量) 分布の時間発展を解く方程式。

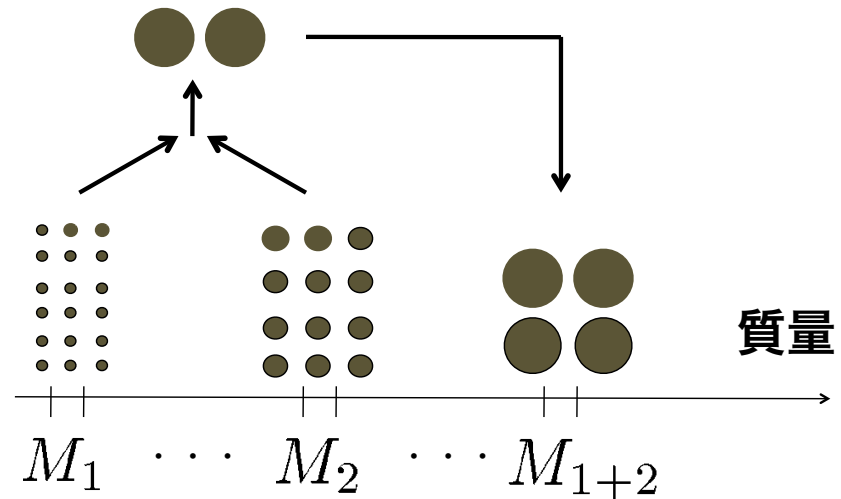
1D (質量 M の空間) の
coagulation eq.:

$$\frac{\partial f(M)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^M dM' K(M'; M-M') f(M') f(M-M') - f(M) \int_0^\infty dM' K(M; M') f(M')$$

$K(M_i; M_j) \equiv \langle \sigma_{\text{coll}} v_{\text{rel}} \rangle$
“Kernel” (ただの速度係数)

意味

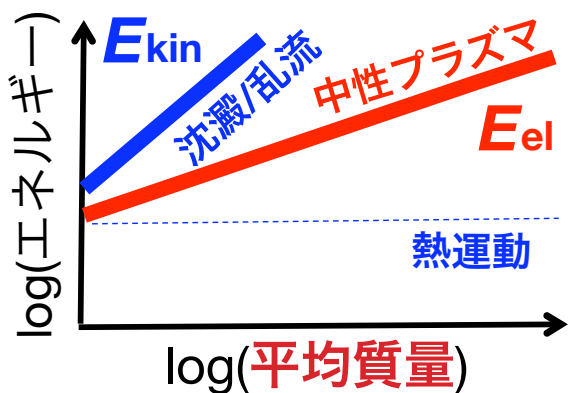
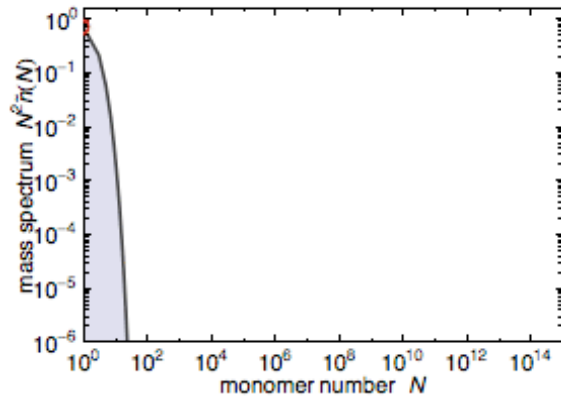
Δt あたりに衝突イベント
 $M_1, M_2 \rightarrow M_{1+2} \equiv M_1 + M_2$
が $K(M_1; M_2) f_1 f_2 \Delta t$ 回起こる。



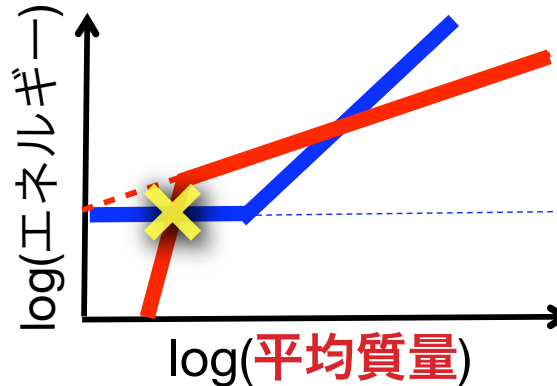
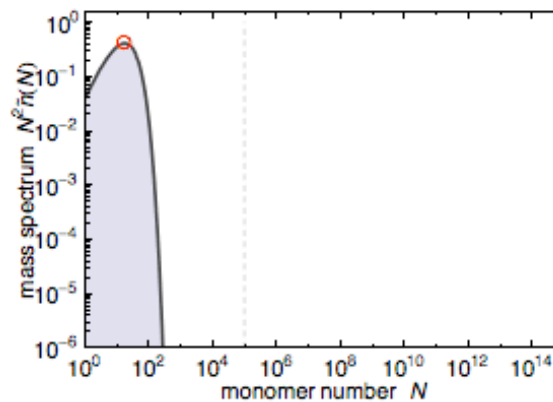
帯電ダストのサイズ分布進化の3形態

- ▶ 外部変数の取り方に応じて、進化の結末は3つのいずれかになる。
- ▶ 平均質量ダストの運動エネルギーと静電エネルギーの増え方の違いで決まる。

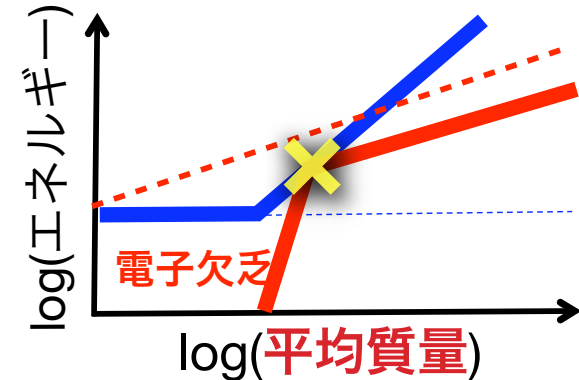
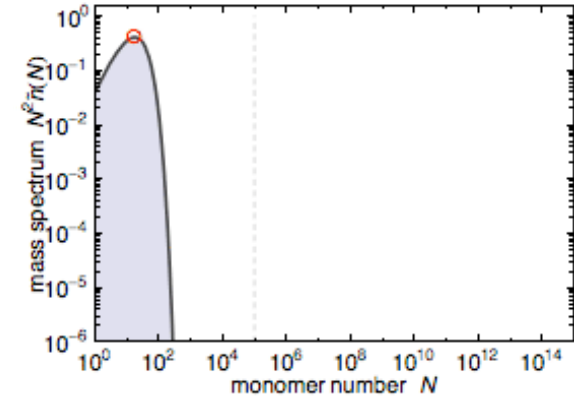
均一成長



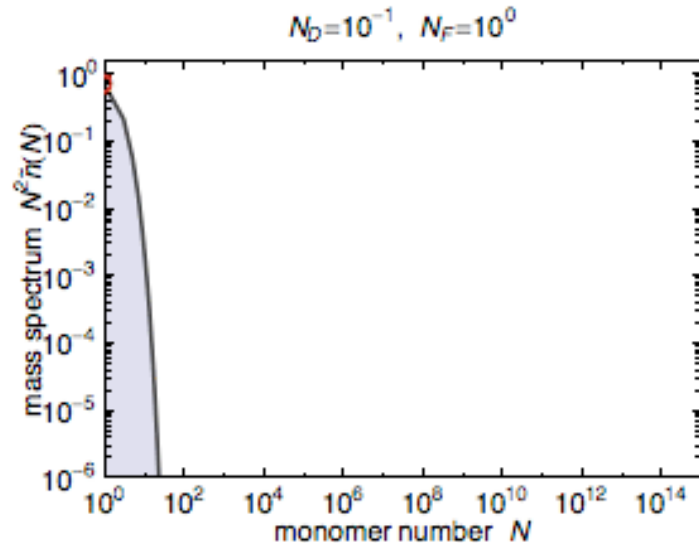
完全成長凍結



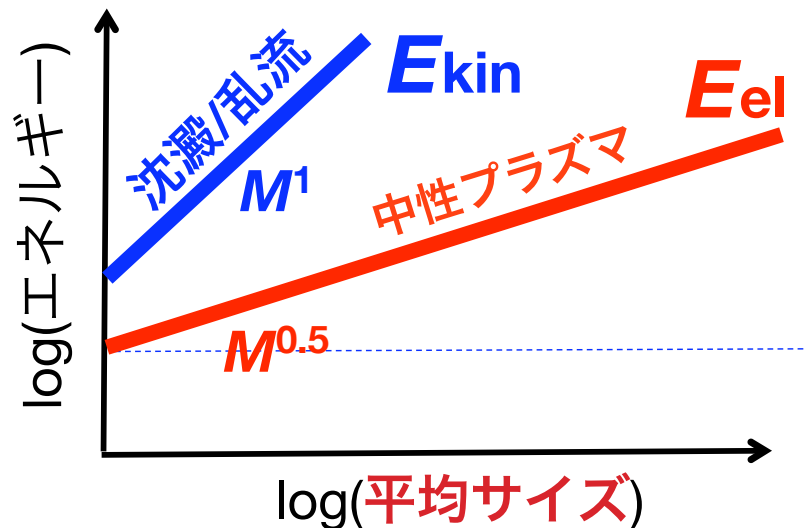
置き去り成長



分類 1 : 均一成長

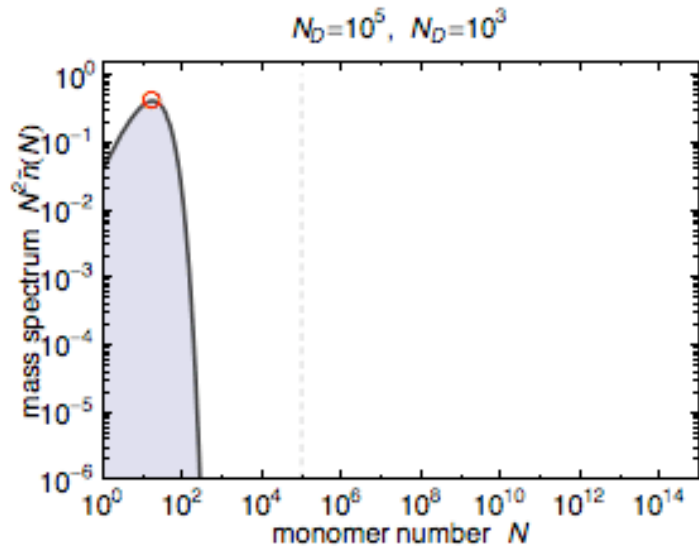


- ▶ 衝突エネルギーが常に静電エネルギーを上回る場合。
- ▶ 狭いサイズ分布を保ちながら一様に合体成長する。

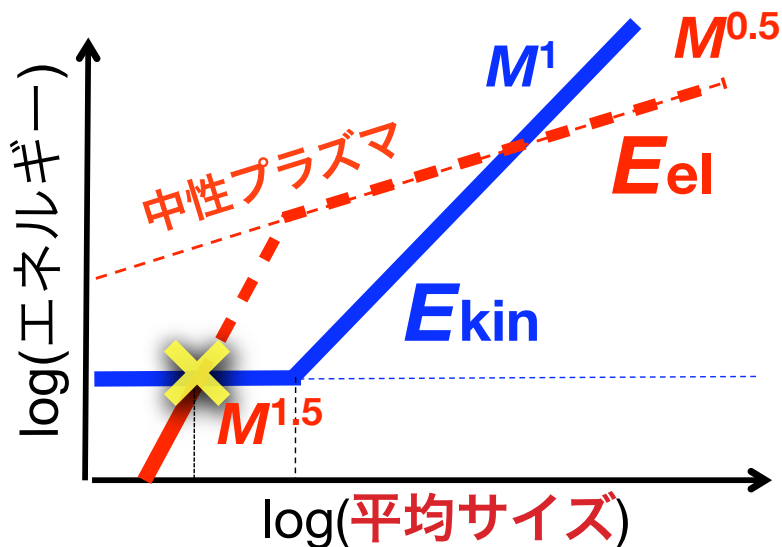


沈澱/乱流運動がダストの成長を可能にする

分類 2: 完全成長凍結

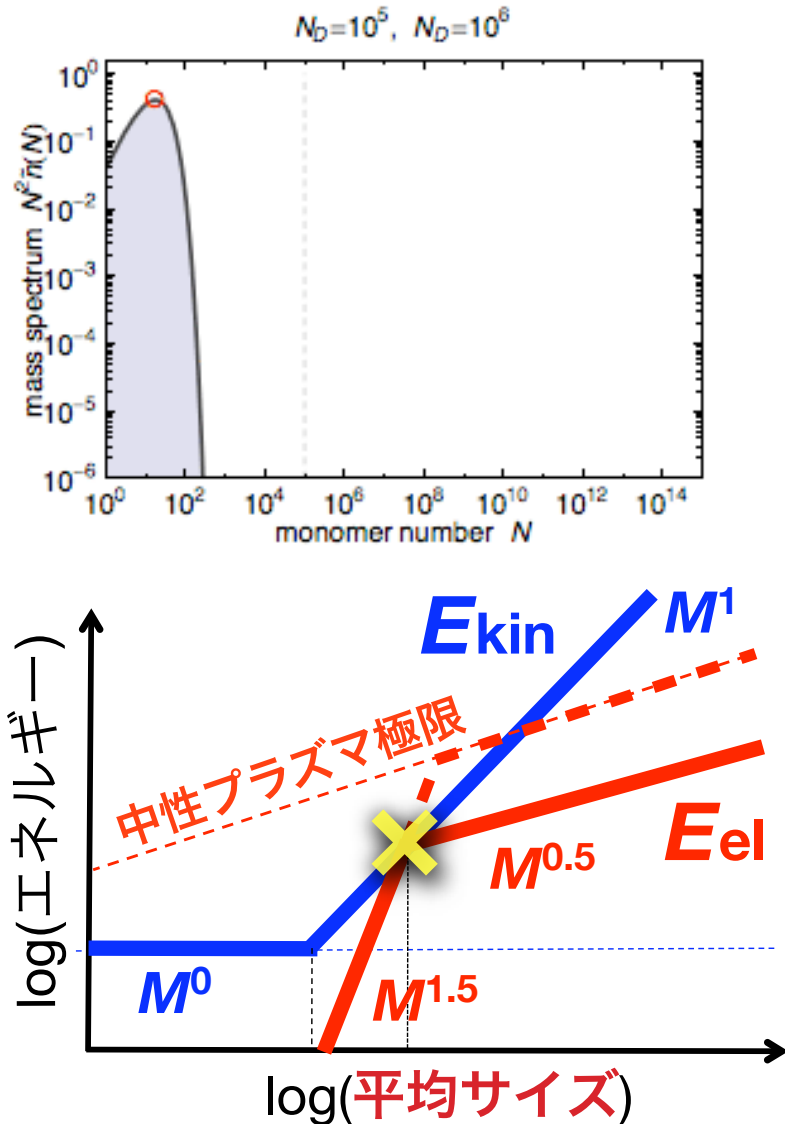


- 沈澱／乱流が運動エネルギーを支配する前に均一成長できなくなる場合。
- サイズ分布全体の進化が凍結。



沈澱/乱流運動と
電子欠乏効果のいずれも
十分に強くなければ、
成長は凍結

分類3: 置き去り成長

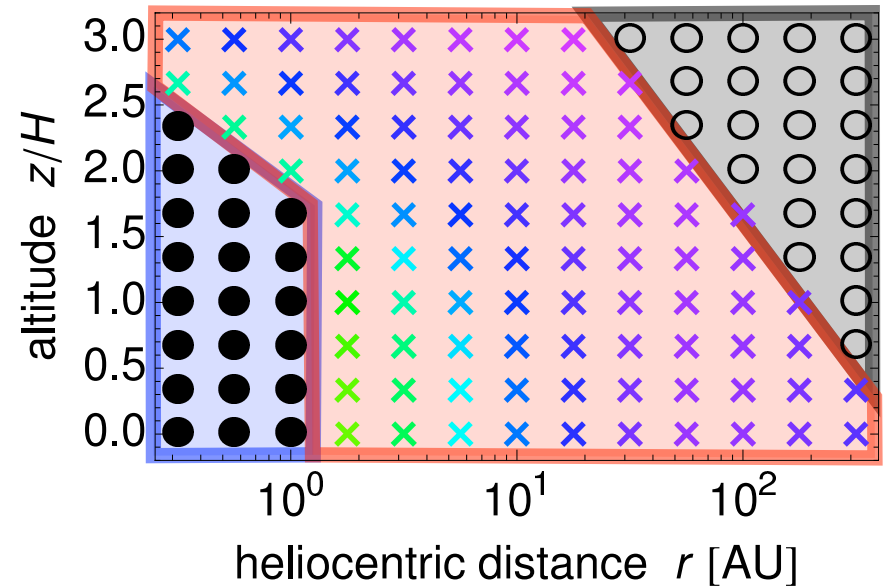


- 沈澱／乱流が運動エネルギーを支配してから衝突断面積がゼロになる場合。
- ◇ 比較的小さいダストの成長が凍結。
 - 総静電容量の減少が止まる。
 - 自由電子が欠乏したままになる。
 - 表面電位 V が低いまま固定。
- ◇ 残りのダスト：低電圧に保たれるおかげで成長し続けられる！！

電子欠乏効果(+サイズ分布)がダストの成長を可能にする

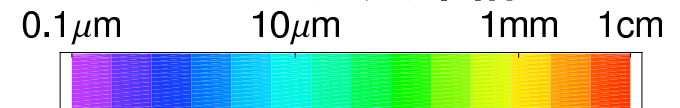
原始惑星系円盤への応用

- ✓ 最小質量円盤モデル (Hayashi 81)
- ✓ 電離源: **宇宙線**, X線, 放射性元素崩壊
(Umebayashi & Nakano 08; Igea & Glassgold 99)
- ✓ ダストは「その場」成長を仮定
(成長時間 \ll 沈澱時間, 中心星落下時間)
- ✓ 乱流: α モデル, $\alpha = 0.001$
(円盤が100万年で散逸する乱流強度)



- 均一成長
- × **完全成長凍結**
- **置き去り成長**

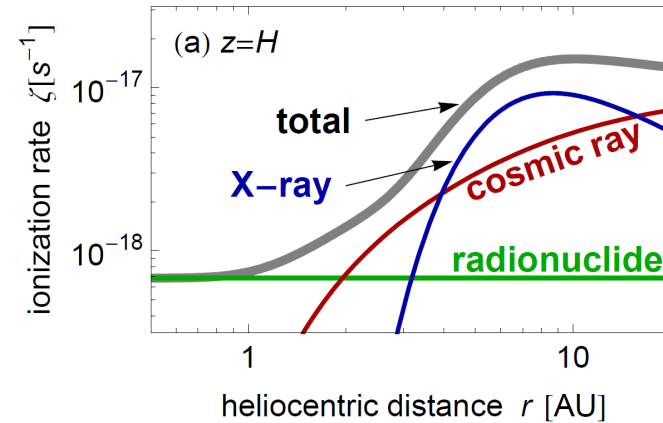
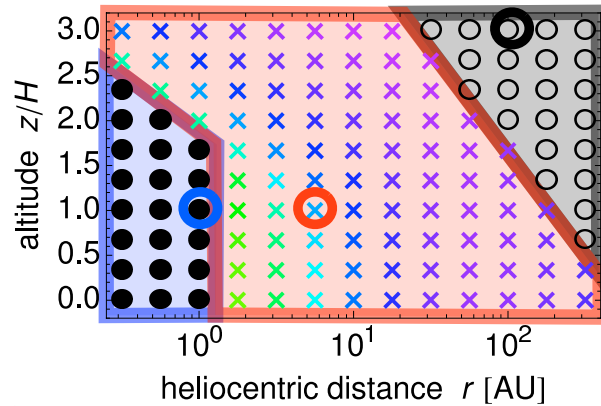
成長凍結サイズ



- ▶ **惑星形成領域の大部分で成長凍結**
- ▶ 均一成長は外縁(>100AU)のみで起こる
- ▶ **内縁(<1AU)では置き去り成長**

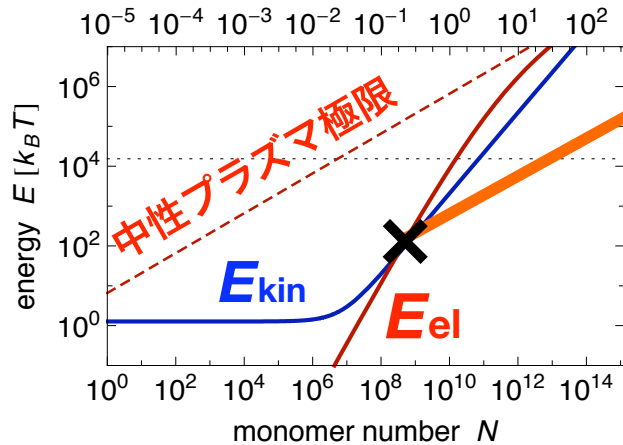
エネルギー比較

電離率分布： 動径(r)方向



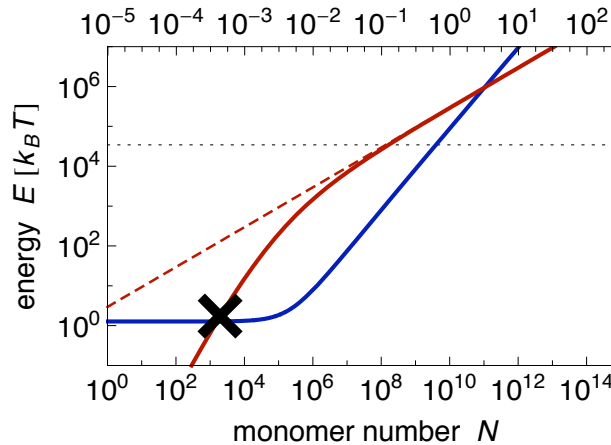
1AU, 1H

aggregate size a [cm]



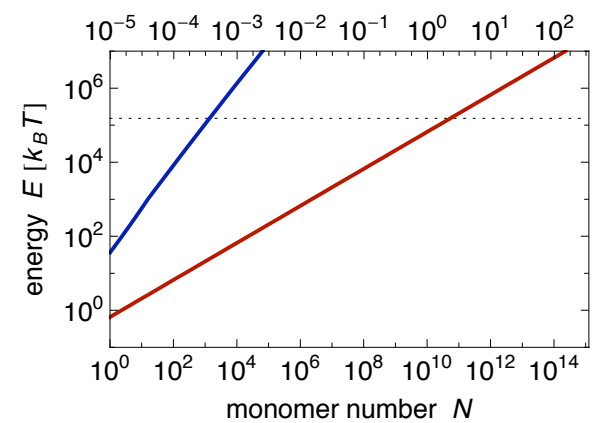
5AU, 1H

aggregate size a [cm]



100AU, 3H

aggregate size a [cm]

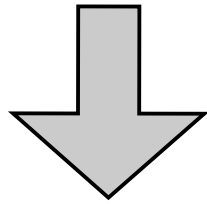


ガス密度濃い ←

← ガス密度薄い

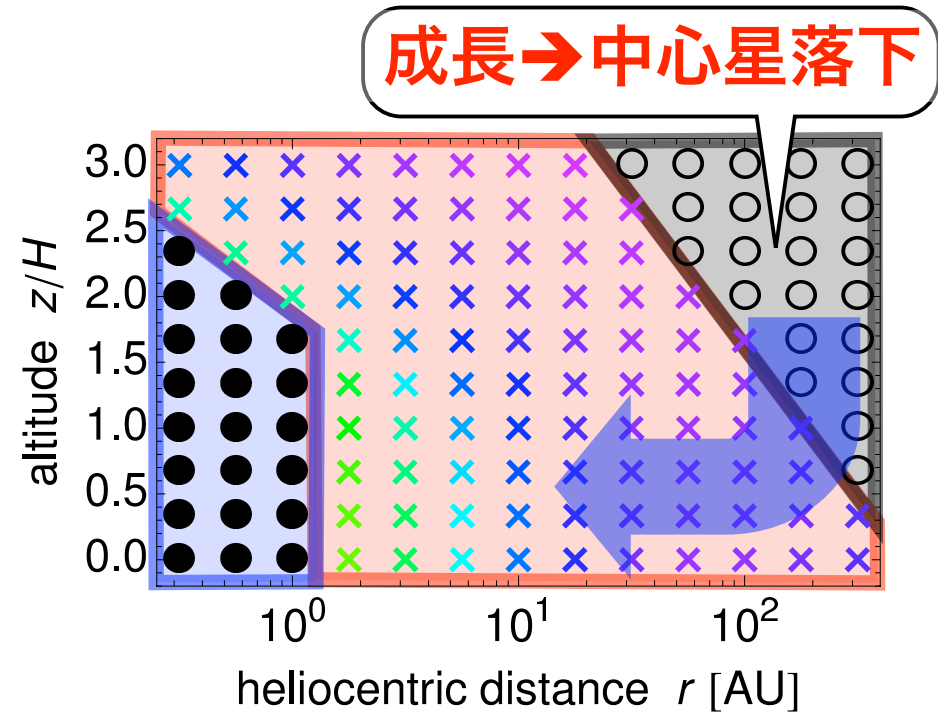
議論：ダストの outside-in 進化？

ひとつの成長戦略：
外縁部で一旦成長させておいて、
惑星形成領域へ大移動させる。



惑星形成領域で

成長凍結した微小ダスト
+ 成長し続ける巨大ダスト
の2層が共存？



議論：2極分化シナリオはうまくいくか？

- **材料の量**...問題ない

$$M_d(100\sim 200\text{AU}) \\ \sim 0.5M_d(1\sim 100\text{AU})$$

- **進化時間**...ぎりぎり問題ない

$$\text{約}100\text{万年}@100\text{AU} \\ (\text{c.f. } \text{約}1000\text{年}@1\text{AU})$$

- **凍結ダストは必要？**

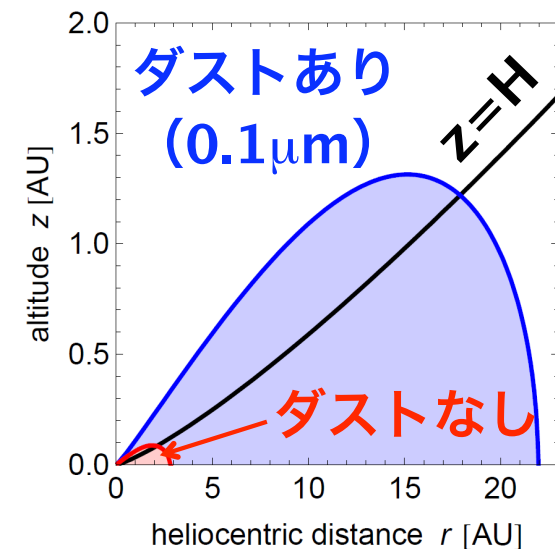
...**乱流殺し**として活躍してもらおう

▶ダストの円盤内での最大衝突速度

- 乱流なし $\rightarrow \Delta v_{\max} = \eta v_K \approx 50\text{m/s} < 60\text{m/s}$
- 乱流あり $\rightarrow \Delta v_{\max} \sim \sqrt{\alpha} c_s \sim 100\text{m/s} > 60\text{m/s}$

氷ダストの破壊速度
 $\approx 60\text{m/s}$ (Wada+09)

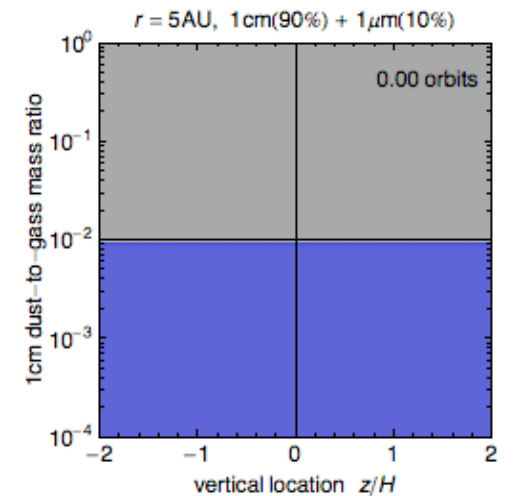
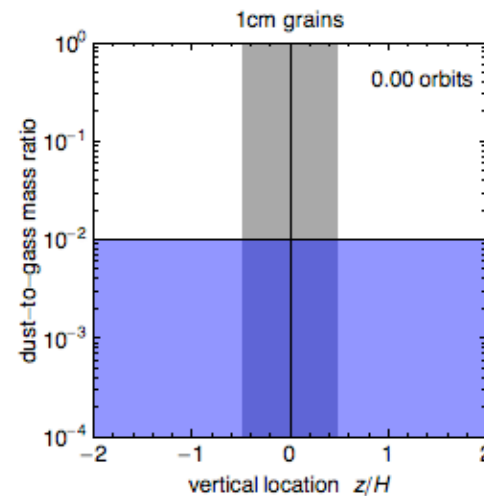
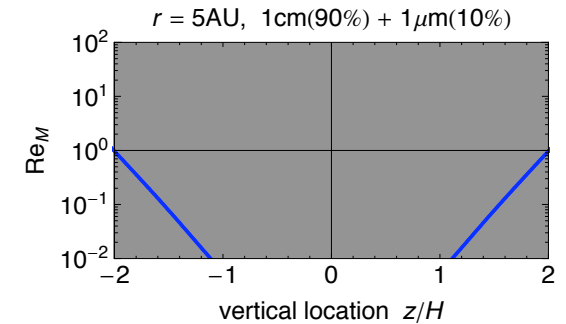
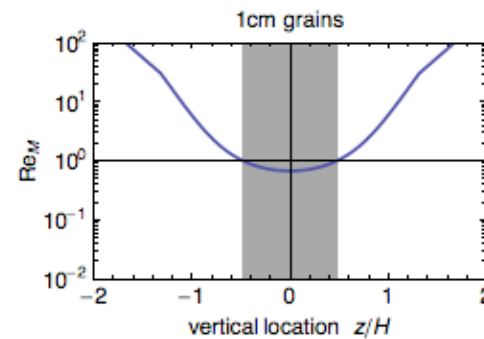
乱流不活性領域の分布



議論：2極進化はダスト層形成に有利！

MRI乱流とダスト沈澱の
モデル同時シミュレーション
(Okuzumi+, in prep.)

左：1cmダスト(石)のみ。
右：1cmダスト:90%
+ 1 μ mダスト(塵):10%



塵が磁気乱流を抑制し、石の赤道面濃集を促進

まとめ

- ダストから微惑星へ至るまでの成長経路は未解明
 - ダストのより現実的なモデル化が必要

- 円盤ガス中でのダストの**帯電**
 - 平均的には負に帯電→塵粒子どうしに静電反発
 - 静電反発は従来のダスト成長の描像をどの程度変えるか？

- ダストの合体成長によるサイズ進化を、帯電による静電反発を考慮してシミュレートした。
 - **円盤の内縁部(<1AU)または外縁部(>100AU)を除いてダストの成長は静電反発によって著しく阻害されることを発見**

その後のダスト進化： 2極分化成長？

原始惑星系円盤での微惑星形成シナリオ

■合体成長段階($\mu\text{m} \rightarrow \text{cm}$)

ガス円盤中のダスト粒子が分子間力などで互いに付着。

■沈澱段階(>cm)

ダストが中心星重力で赤道面に濃集、ダスト層を形成。

■重力不安定段階(>cm \rightarrow km)

ダスト層が自己重力で分裂・収縮を起こし、微惑星となる。

e.g. Goldreich & Ward (1973)

