

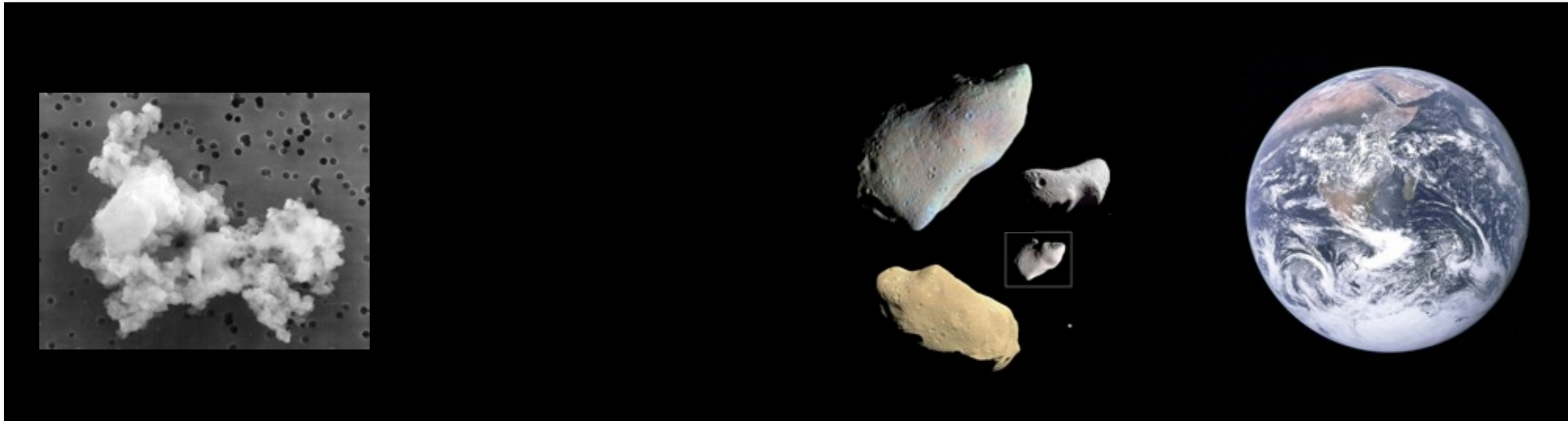
原始惑星系円盤におけるダストの合体成長に対する 静電反発の効果

名古屋大学 大学院理学研究科
奥住 聡

共同研究者: 田中秀和 (北大), 竹内拓 (東工大), 阪上雅昭 (京大)

Ref: Okuzumi 2009, ApJ, 698, 1122
Okuzumi et al. 2009, ApJ, 707, 1247
Okuzumi et al., 2011a/b, ApJ, 731, 95/96
奥住 2011, 天文月報, 104, 126

太陽系の固体天体



塵粒子
($\leq \mu\text{m}$)

小惑星(微惑星)
($\sim 1\text{km}$)

惑星
($\sim 1000\text{km}$)

10^{-14}g

10^{16}g

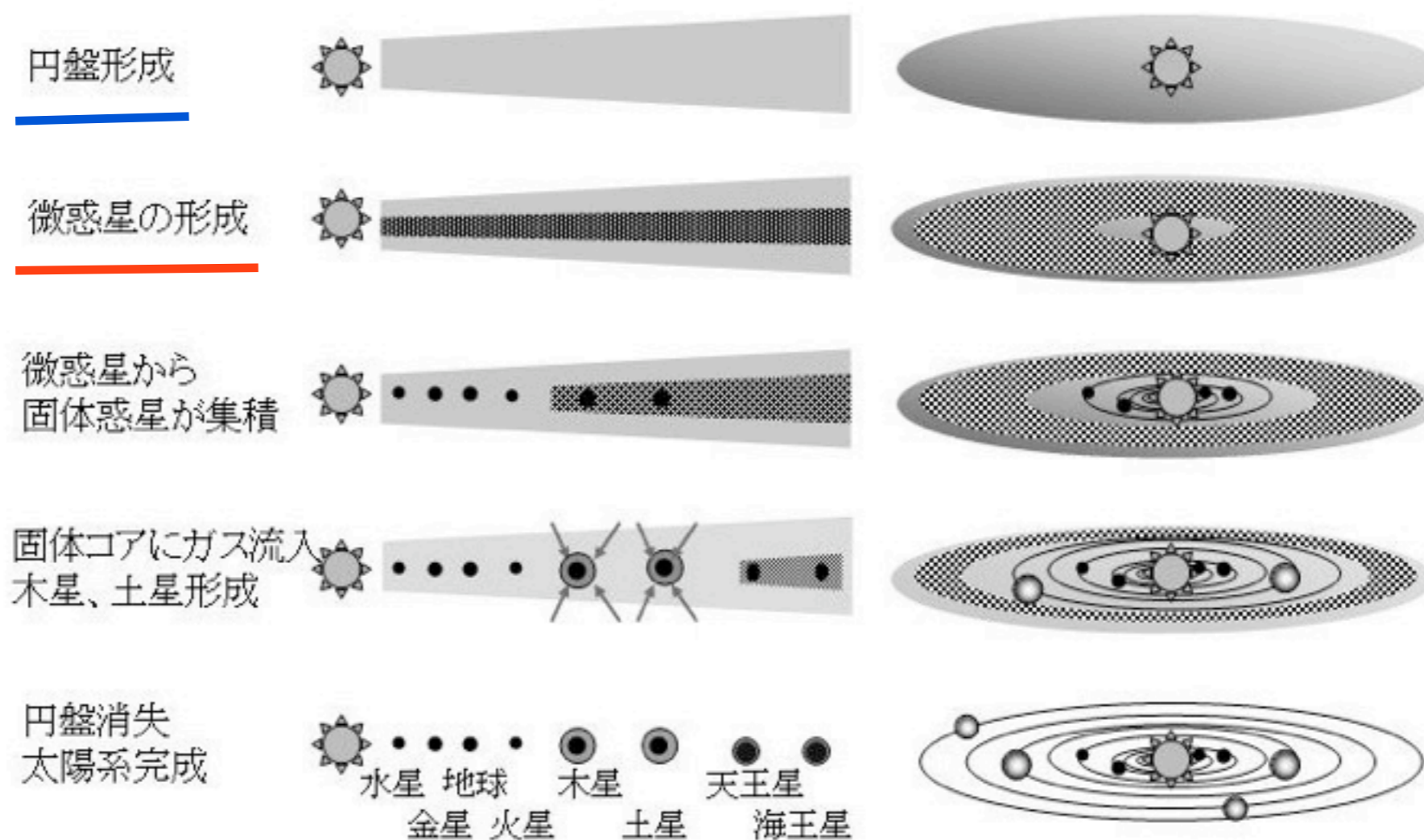
10^{27}g

~ 30 桁

~ 10 桁

どうやって成長したか？ → 惑星形成理論

コア集積モデル (京都モデル)



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

微惑星仮説:

「はじめに、(μm サイズのダストから)kmサイズの固体天体(微惑星)ができた」

微惑星形成は「壁」だらけ！！！！

重力不安定説の問題点：

ダスト層巻き上げの「壁」

- ガス円盤は乱流状態。
- 強い乱流があるとダストの沈澱層が薄くならない。

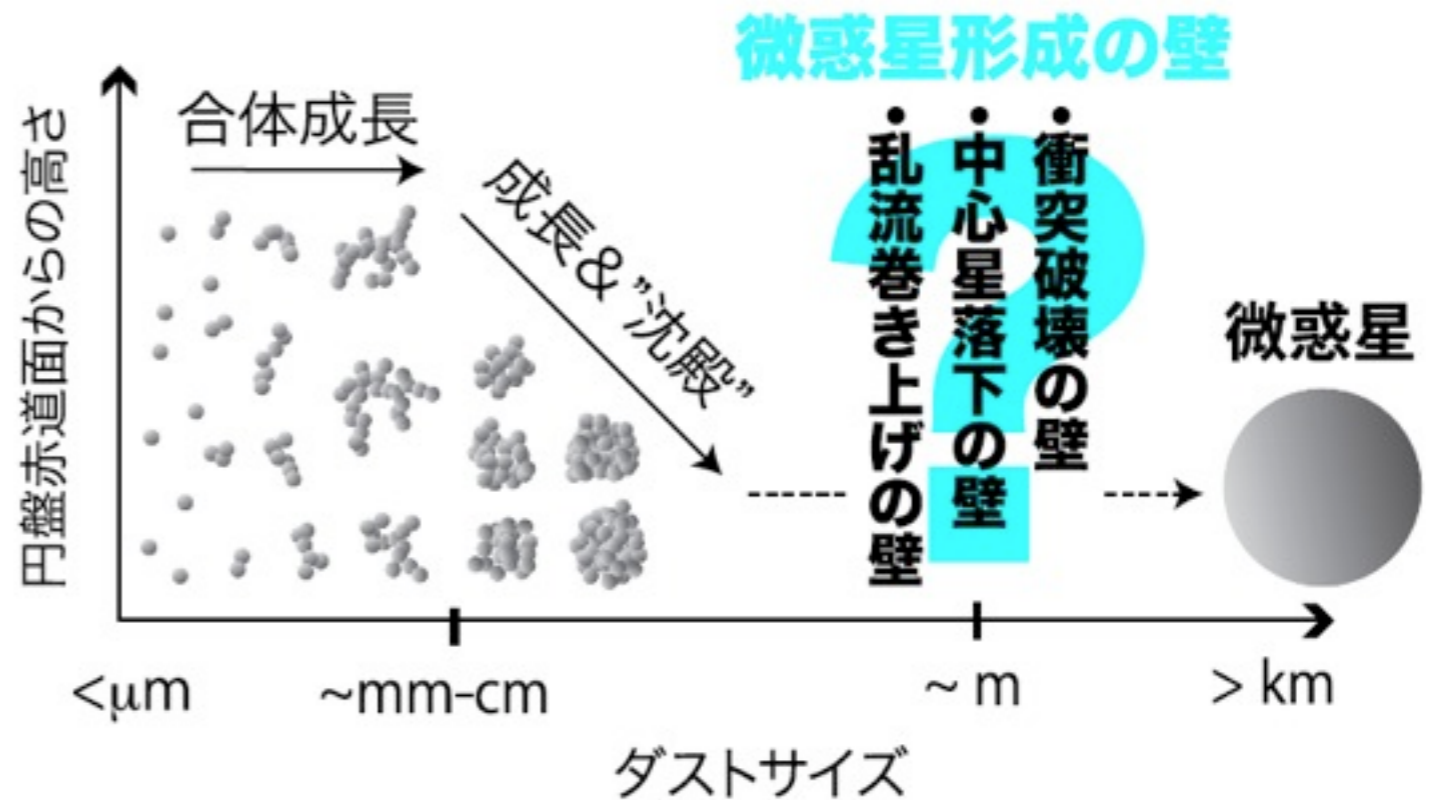
直接合体成長説の問題点：

中心星落下の「壁」：

- mサイズのダストが選択的に軌道角運動量を失う。

衝突破壊の「壁」：

- 成長と共に衝突速度増加
→ 合体せずに壊れる恐れ

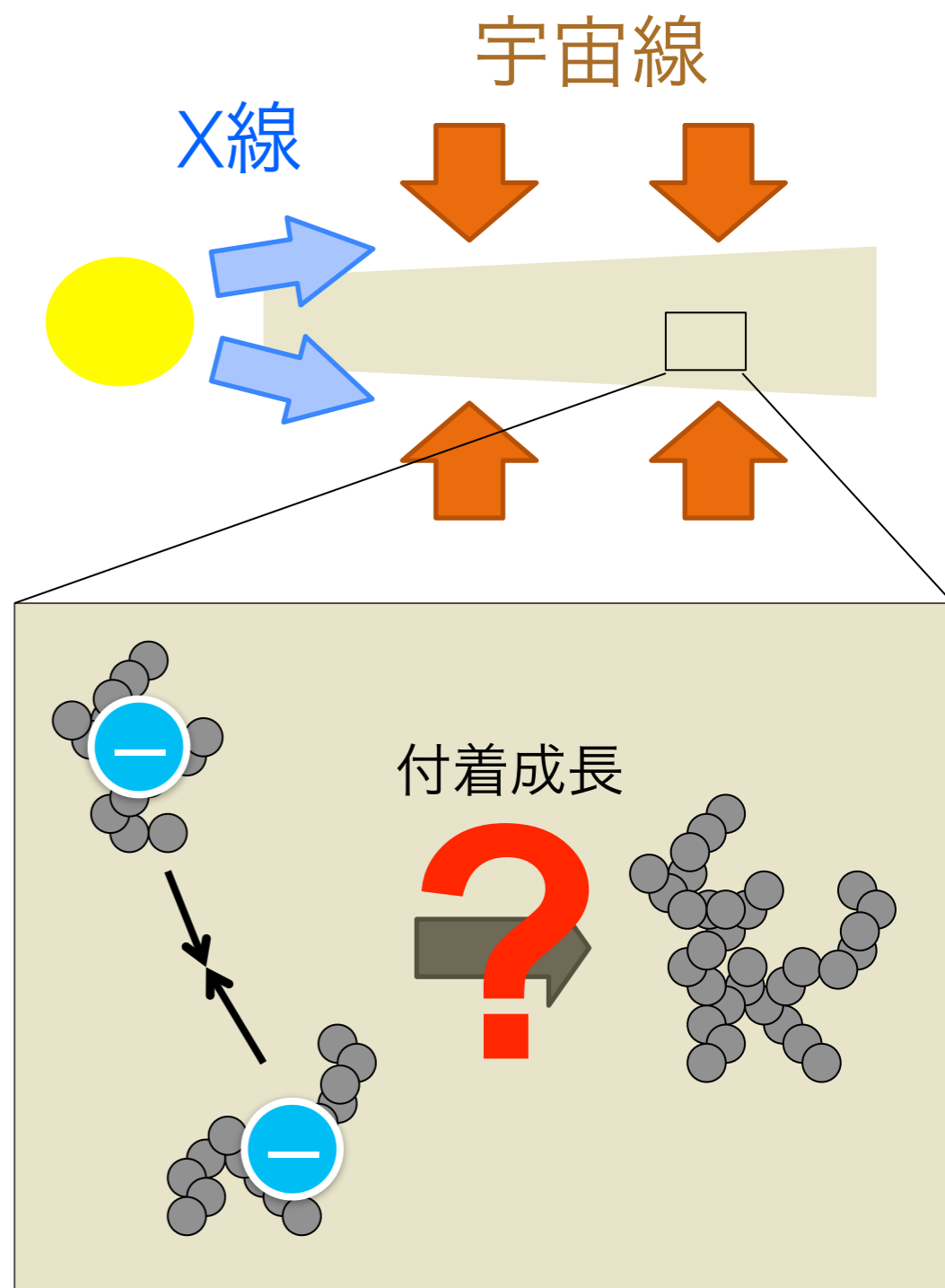


今日の惑星形成理論の
最大の未解決問題！！

導入：弱電離するガス円盤、帯電するダスト

- 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:
ダストの帯電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)

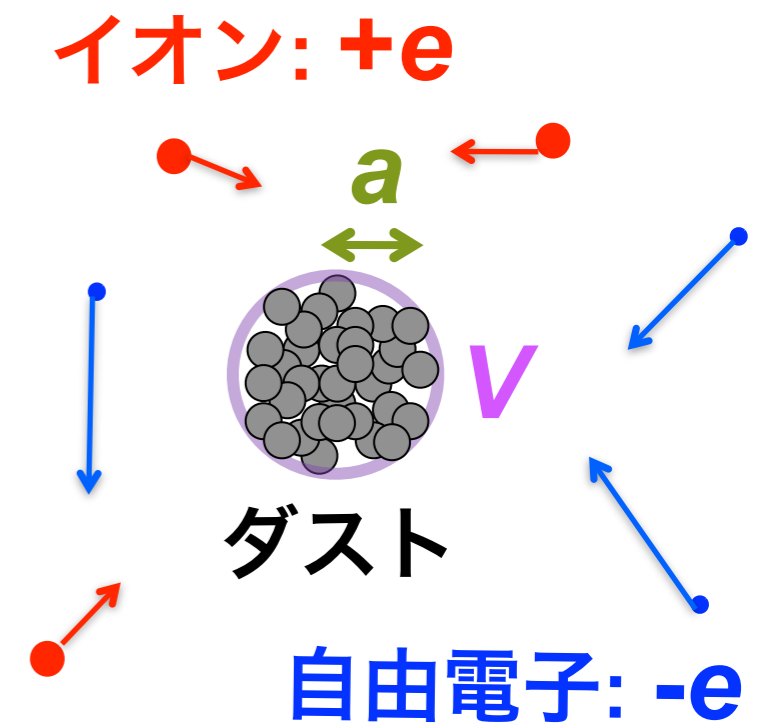
- ▶ 表面電位 V が

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

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)

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



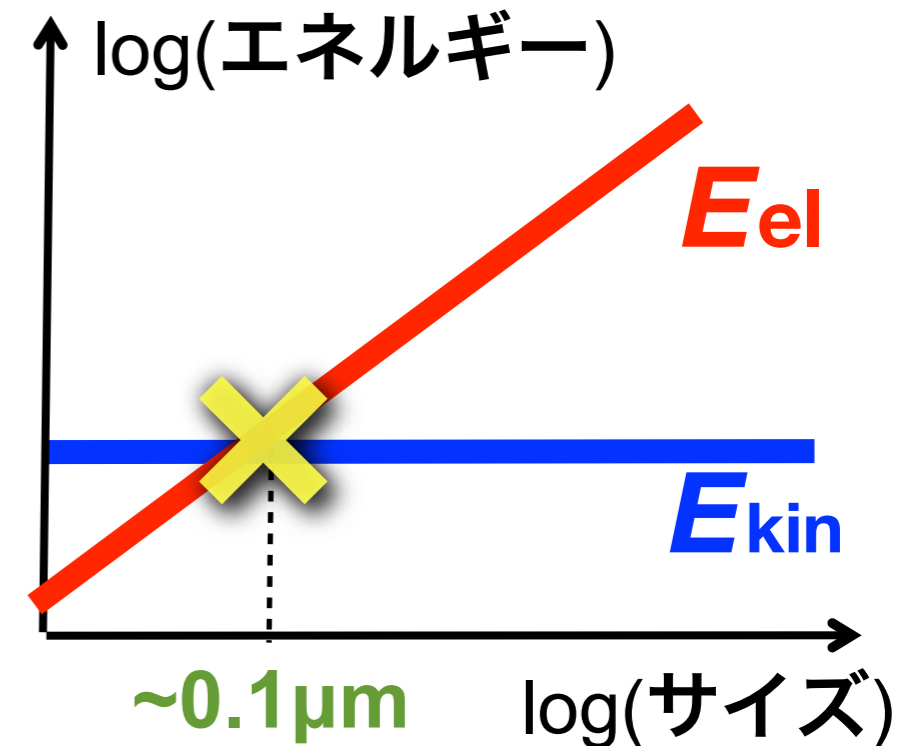
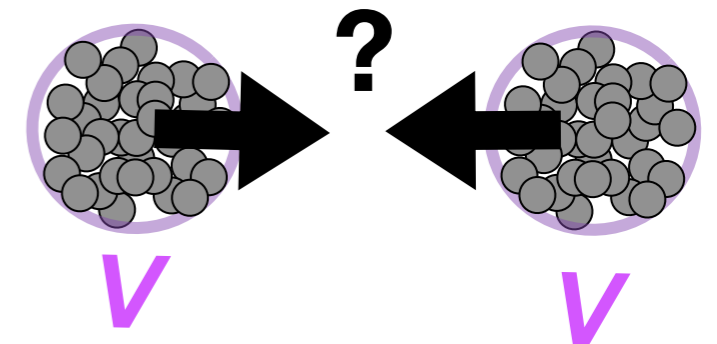
予備的考察: 中性プラズマ中でのダストの負帯電と静電反発

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)



本研究

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：

本研究

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, ...
 - 通常、運動エネルギーはサイズとともに増加。
- ➔ **運動エネルギーの増加が十分早く起これば、合体し続けられる**

本研究

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, ...
- 通常、運動エネルギーはサイズとともに増加。

➔ **運動エネルギーの増加が十分早く起これば、合体し続けられる**

▶ **「電子欠乏効果」** (Okuzumi 09)

- ガス電離が弱すぎると、電子がダストに十分に行き渡らない。
- このとき、表面電位は**ダストの総静電容量 (=半径の総和) に反比例。**

➔ **微小なダストがたくさんあると、大きなダストの静電反発が弱まる**

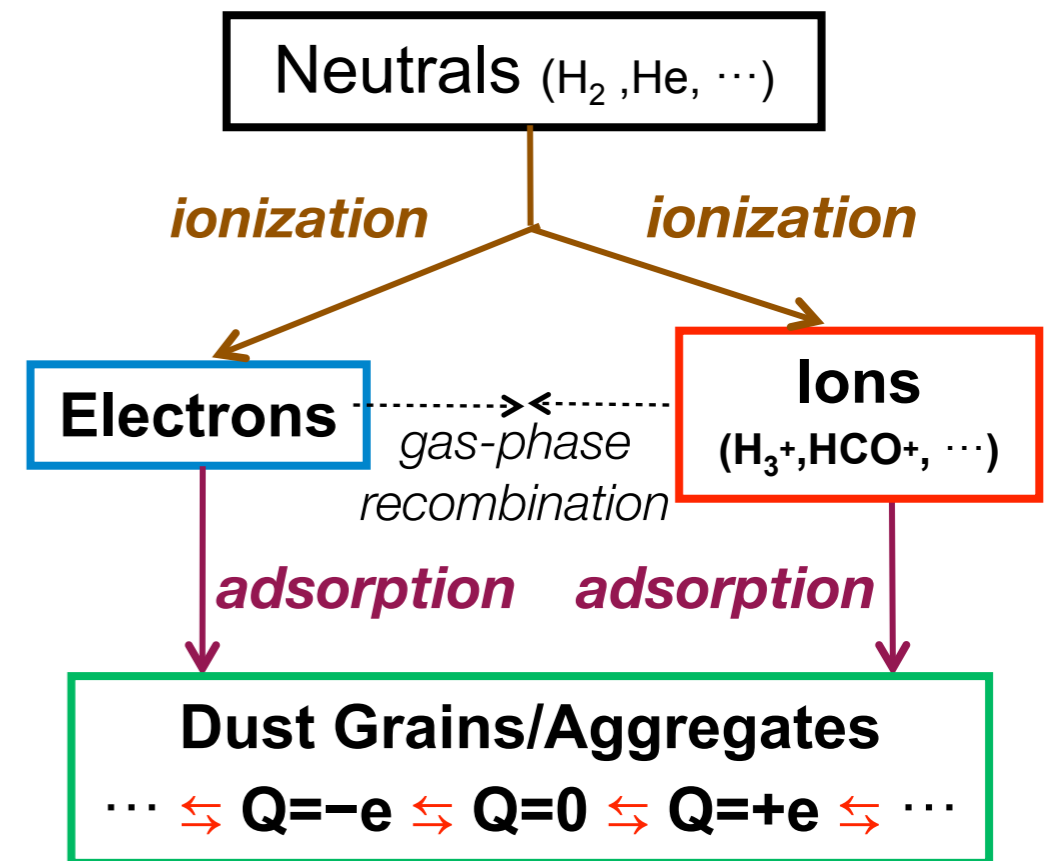
原始惑星系円盤中でのダストの帯電

- ✓ 原始惑星系円盤は弱電離
→ ダストの荷電粒子捕獲が周囲の電子・イオン密度を決める。
- ✓ 一般に「電子密度 ≠ イオン密度」
i.e., ガスだけ見ていると非中性

与えたダストのサイズ分布に対して

- イオン, 自由電子の数密度 n_i, n_e
- ダストの帯電分布関数 $n_d(Z)$

を同時に決定するという問題



原始惑星系円盤中でのダストの平衡帯電量

電離平衡方程式が解析的に解けることを発見 (Okuzumi 2009)

ダスト平均表面電位を $V (= eZ/a)$ とすると、解析解はおおざっぱに

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

$$n_i = \frac{\zeta n_g}{S_{\text{tot}} u_i} \frac{k_B T}{e|V| + k_B T}$$
$$n_e = \frac{\zeta n_g}{S_{\text{tot}} u_e} \exp \left(\frac{-e|V|}{k_B T} \right)$$

$$C_{\text{tot}} = \int a n_d(a) da \quad \text{ダスト総静電容量} \quad S_{\text{tot}} = \int \sigma(a) n_d(a) da : \text{総幾何断面積}$$

(=半径の総和)

- 中性ガスの電離率が十分高ければ、 $V \sim k_B T/e$ (Spitzer 1941)
- 電離率が低すぎると、**個々のダスト粒子の帯電量は系全体のダストの静電容量に反比例して減少する。**

電子欠乏効果

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

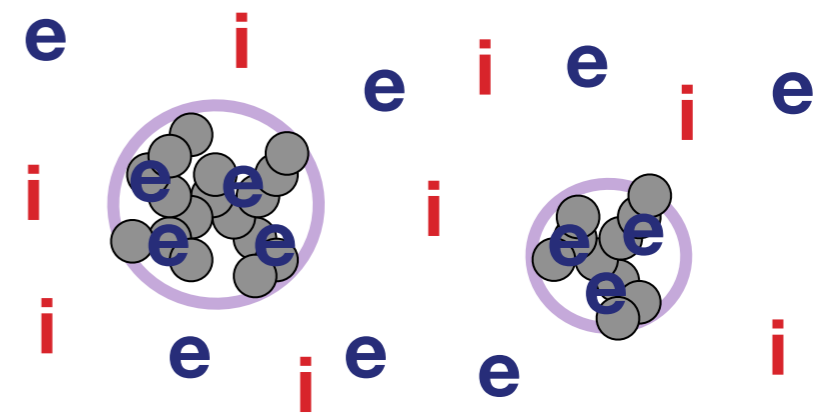
ダスト集団の総静電容量が大きすぎると、各ダストの充電が完了する前に自由電子が品切れになる。

品切れになると、準中性条件がイオンと帯電ダストの間で満たされるようになる：

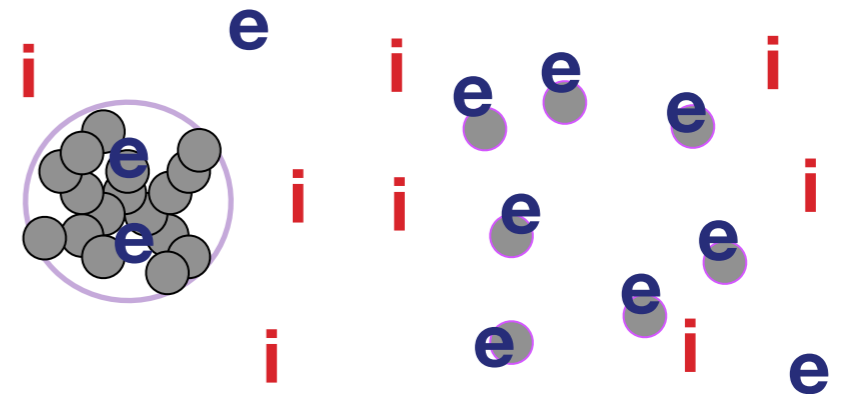
$$en_i \sim -C_{tot}V \quad (V < 0)$$

総静電容量は微小なダストの数で決まる
→ サイズ分布が本質的に重要

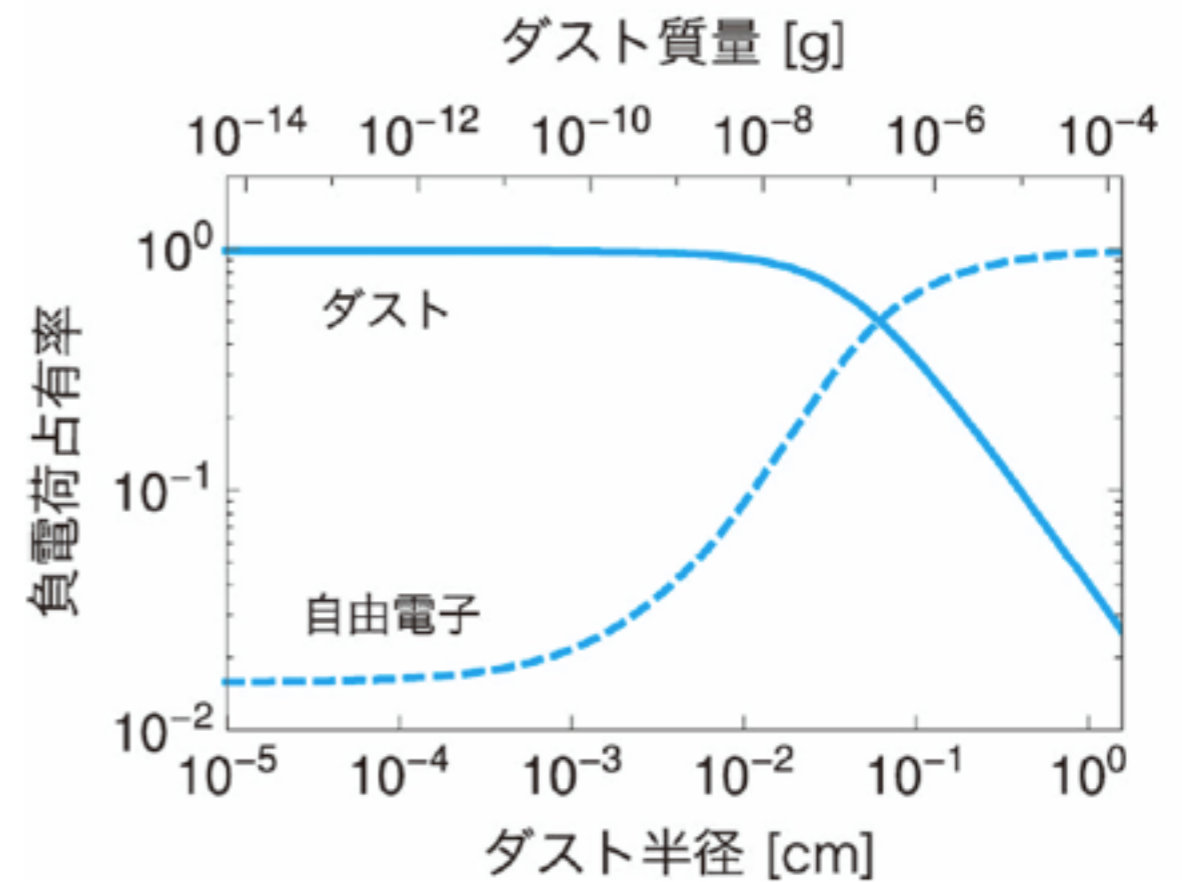
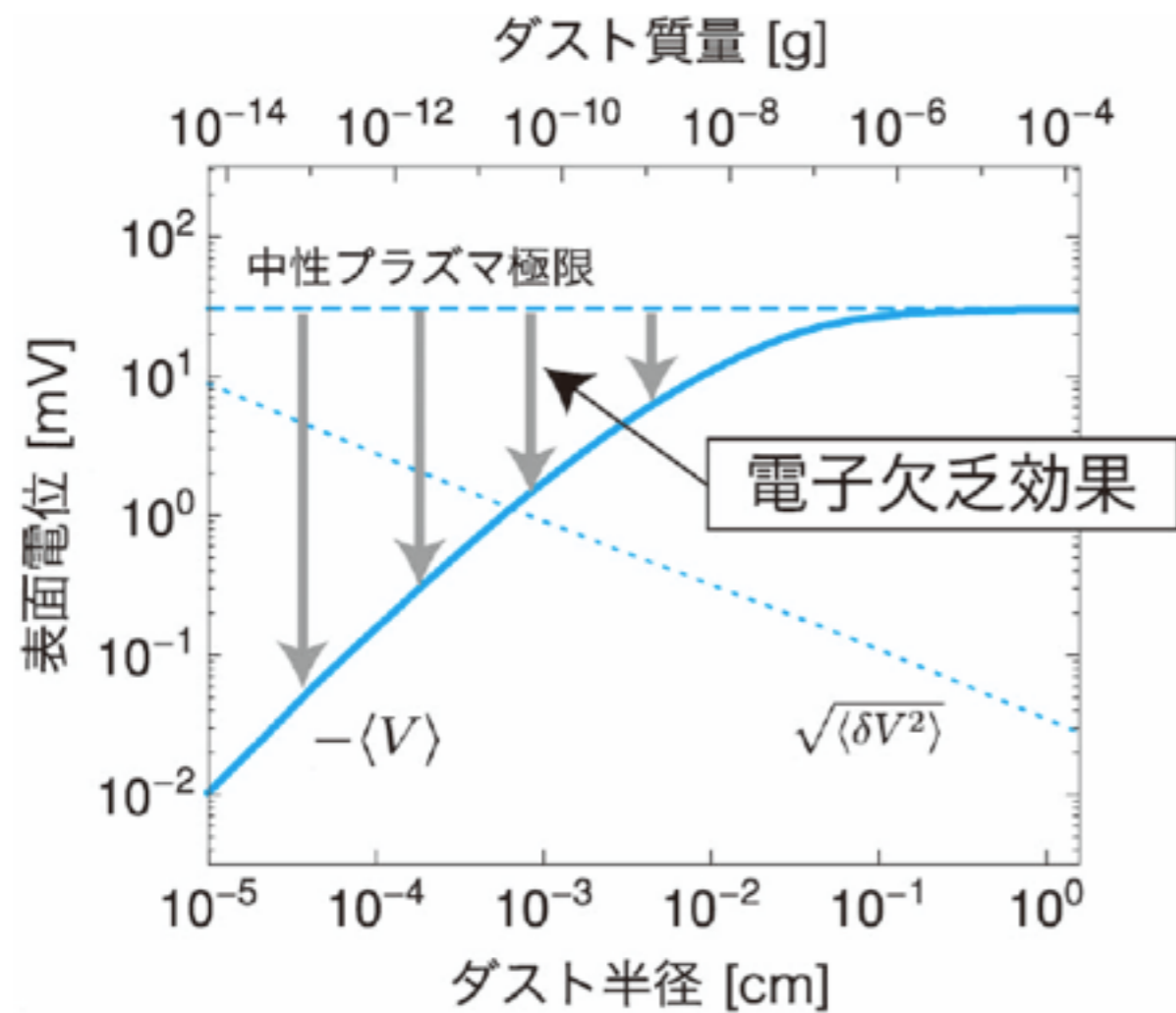
「イオン-電子プラズマ」 $V \sim -\frac{k_B T}{e}$



「イオン-ダストプラズマ」 $V \sim -\frac{en_i}{C_{tot}}$



電子欠乏効果：一例



帯電ダストの合体成長シミュレーション

(Okuzumi et al. 2011a)

▶ Uses **Smoluchowski equation** (e.g., Nakagawa+81)

▶ **Collisional cross section** *including Coulomb correction*:

$$\sigma_{\text{eff}} = \pi(a_1 + a_2)^2 \left(1 - \frac{E_{\text{el}}}{E_{\text{kin}}} \right) \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \Delta v^2 \quad E_{\text{el}} = \frac{Q_1 Q_2}{a_1 + a_2} = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} V^2$$

* Δv : **Relative velocity** = Brownian motion + **settling** + **turbulence**

* V : **Dust surface potential** ← analytic solution by Okuzumi (2009)

▶ **“Hit-and-stick” (fractal) aggregation model** (Okuzumi et al. 2009)

- no compaction nor fragmentation

- determines the porosity of collision products using an empirical formula obtained from N-body calculations

▶ **Local (0-dim.) simulation** (advection is neglected)

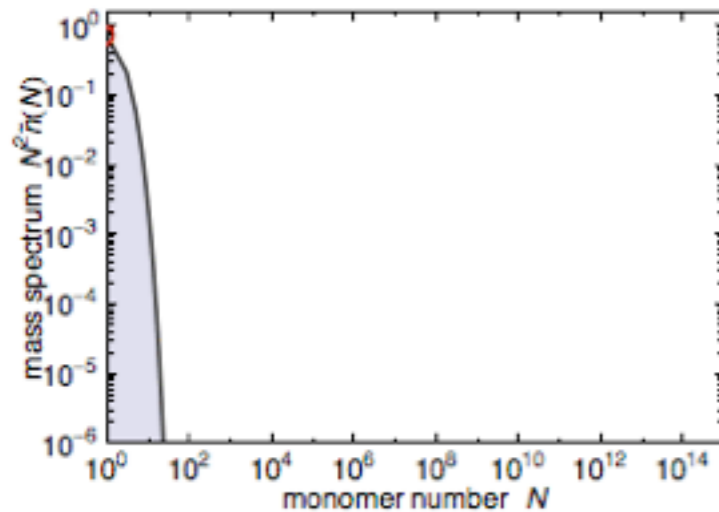
Key parameters: ionization rate ζ , “drift acceleration” g

Three Outcomes of Dust Growth

Okuzumi et al. 2011a

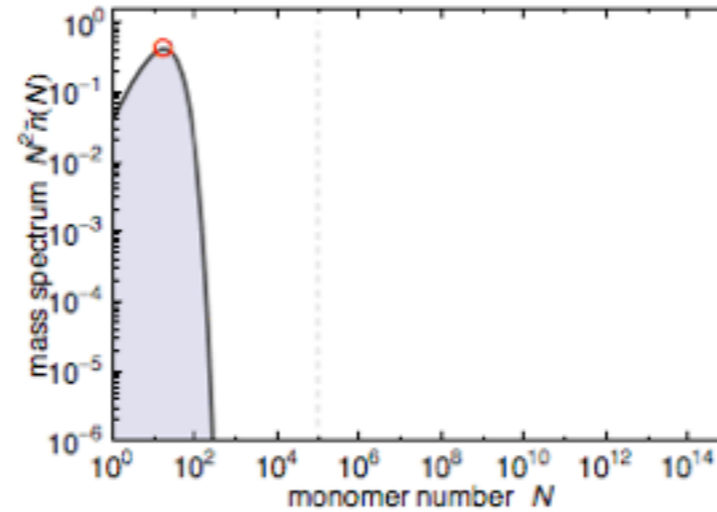
- 非熱的な運動と電子欠乏効果を考慮した、ダストの成長シミュレーション
- 主要なパラメータ： 加速度 g 、 電離率 ζ

均一成長解



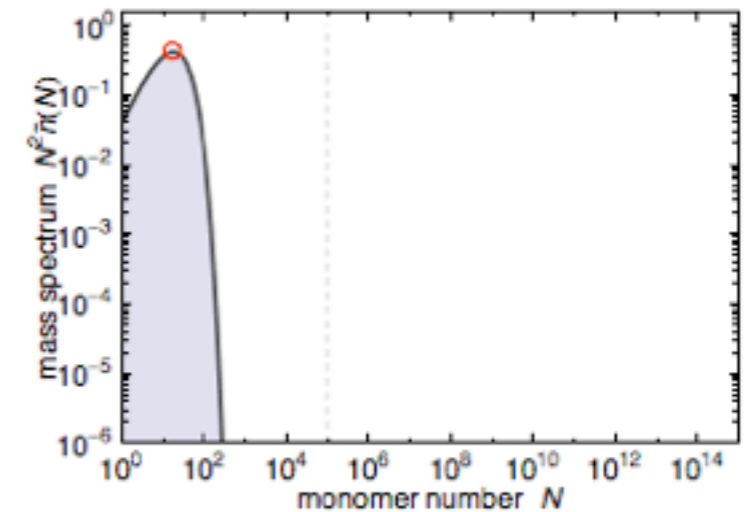
- ▶ Occurs when g is large
- ▶ Differential drift **assists** all aggregates to grow
- ▶ Relatively narrow size distribution is realized

置き去り成長解



- ▶ **Small g but small ζ**
- ▶ Small aggregates stop growing, **but growing ones dominate in total mass**
- ▶ **Electron deficiency effect!**

完全成長凍結

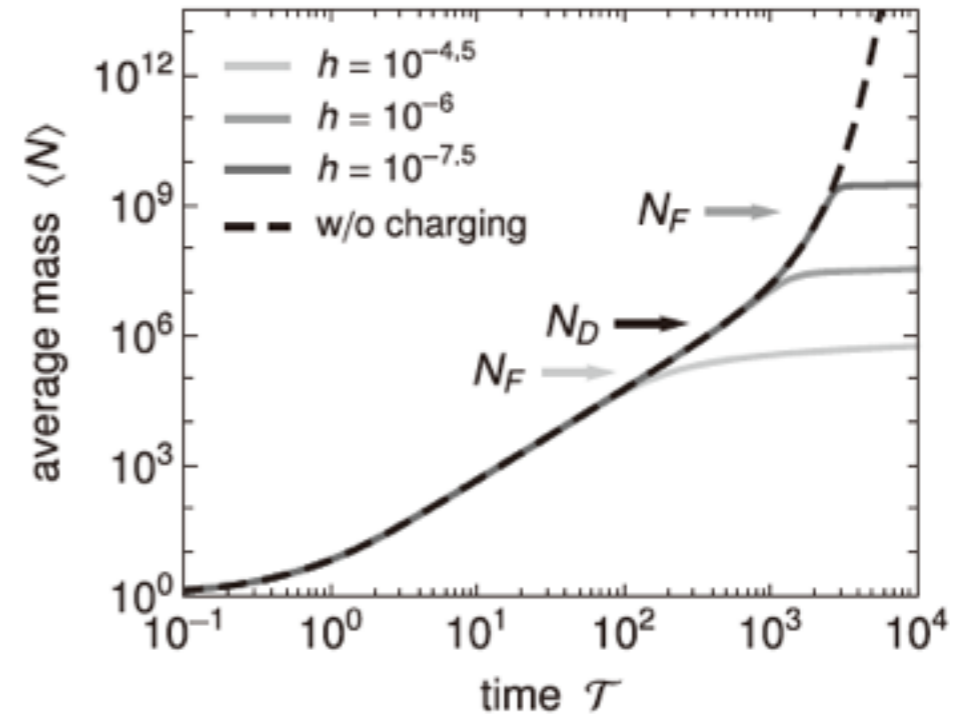
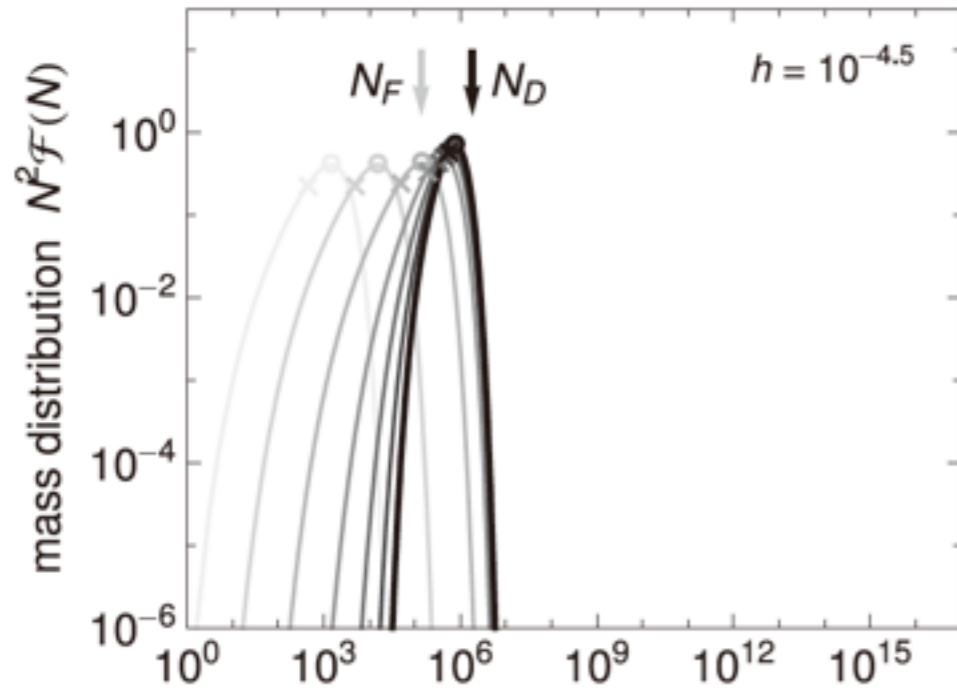


- ▶ **Small g and large ζ**
- ▶ **All aggregates stop growing at a certain size**

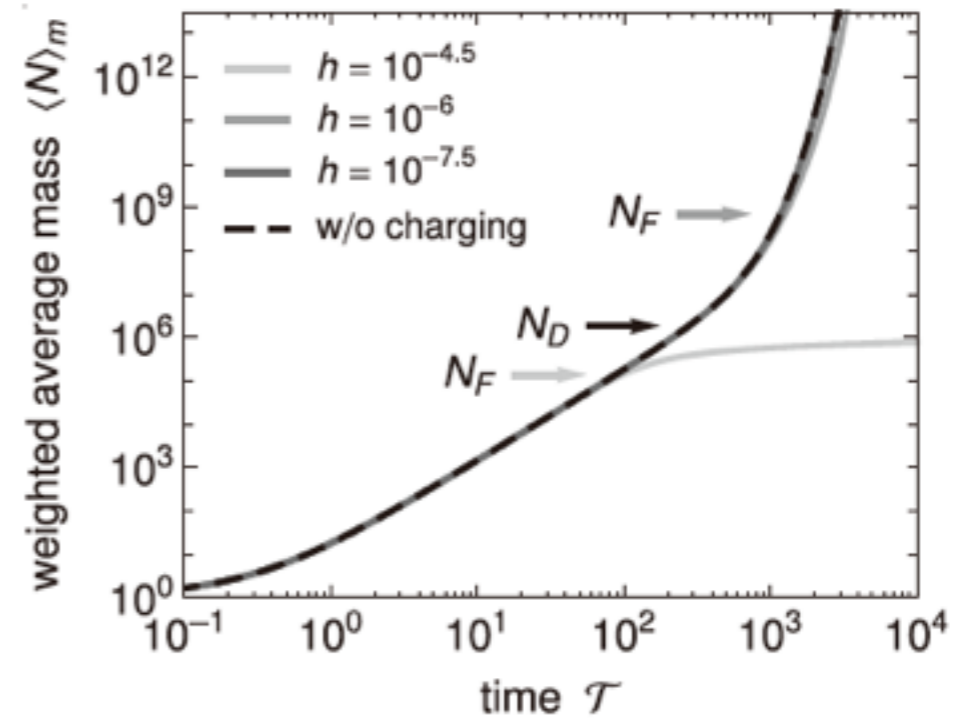
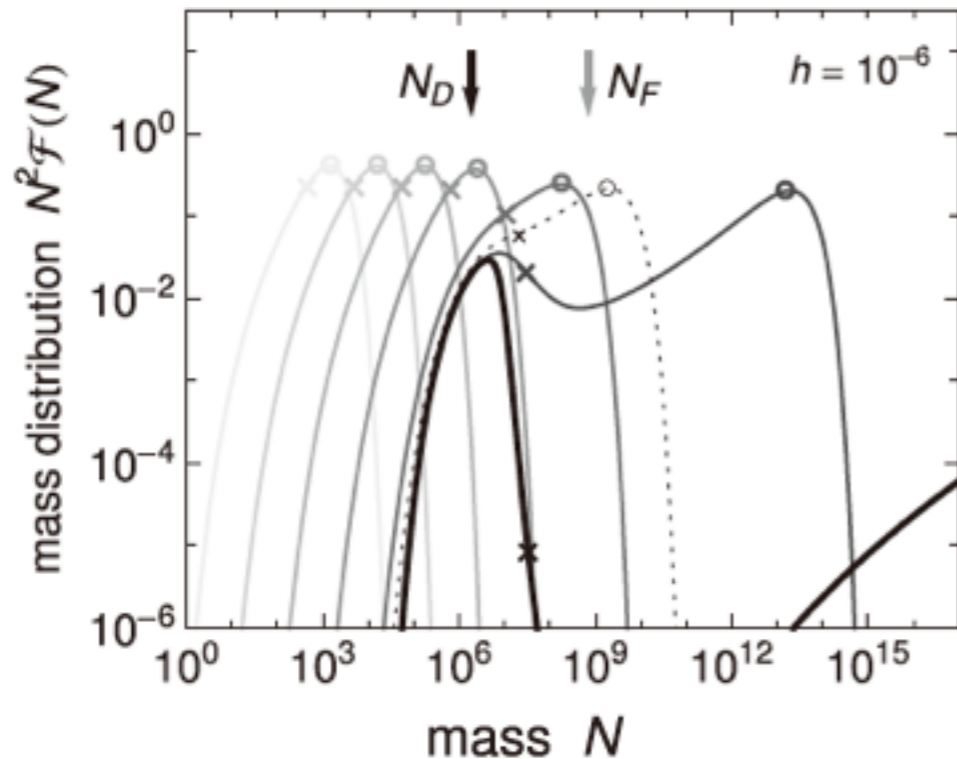
完全成長凍結 vs 置き去り成長

Okuzumi et al. 2011a

成長凍結



置き去り成長



原始惑星系円盤でのダストの静電障壁

Okuzumi et al. 2011b

▶ **ガス面密度が十分薄い ($\approx 0.1 \text{g/cm}^2$)**

→ 沈殿速度が(熱速度に比べて)早い

→ 静電反発を振り切って成長

▶ **ガス面密度が十分濃い ($\approx 100 \text{g/cm}^2$)**

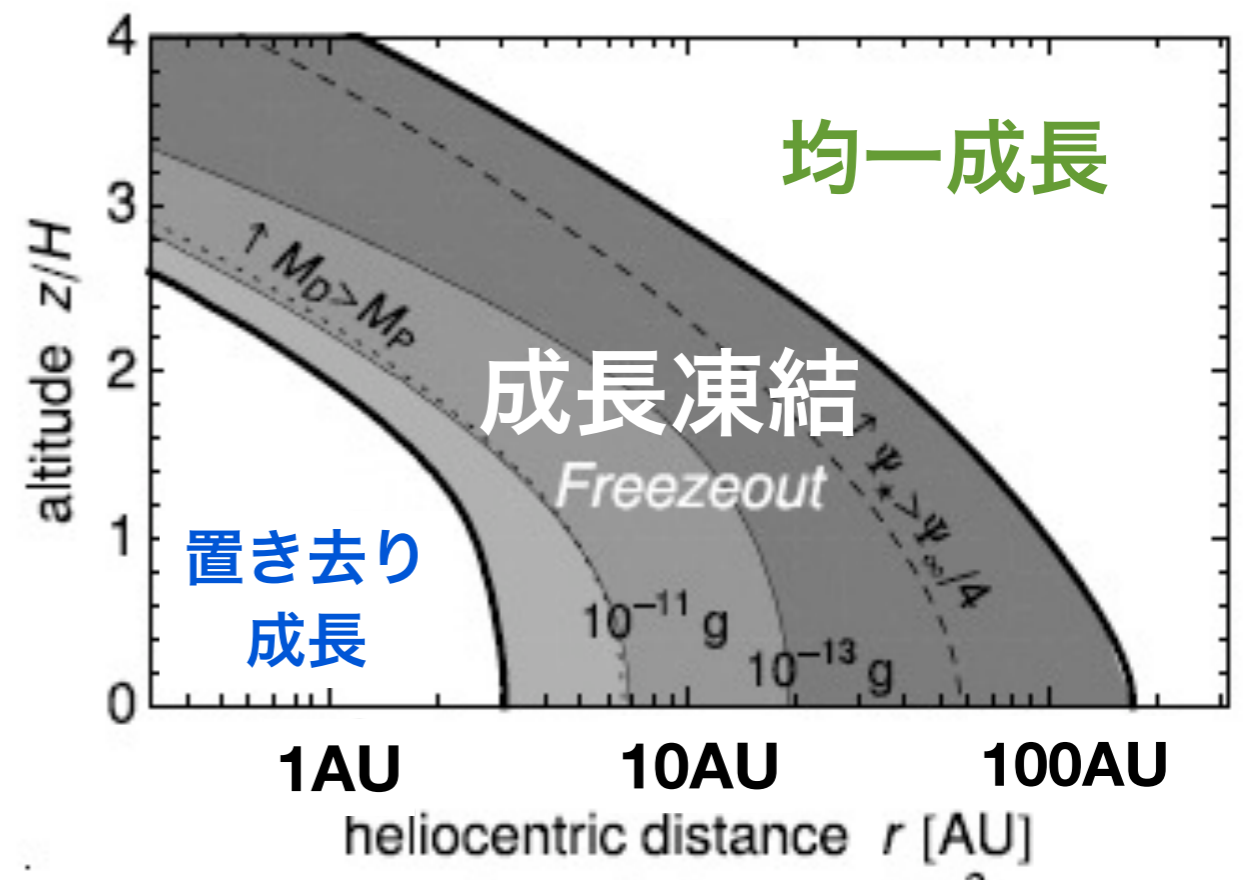
→ 電子がダストに十分行き渡らない

→ 置き去り成長

▶ **ガス面密度が中途半端**

→ どちらの効果も中途半端

→ あるサイズで成長停止



成長凍結領域: 数~100AU!!

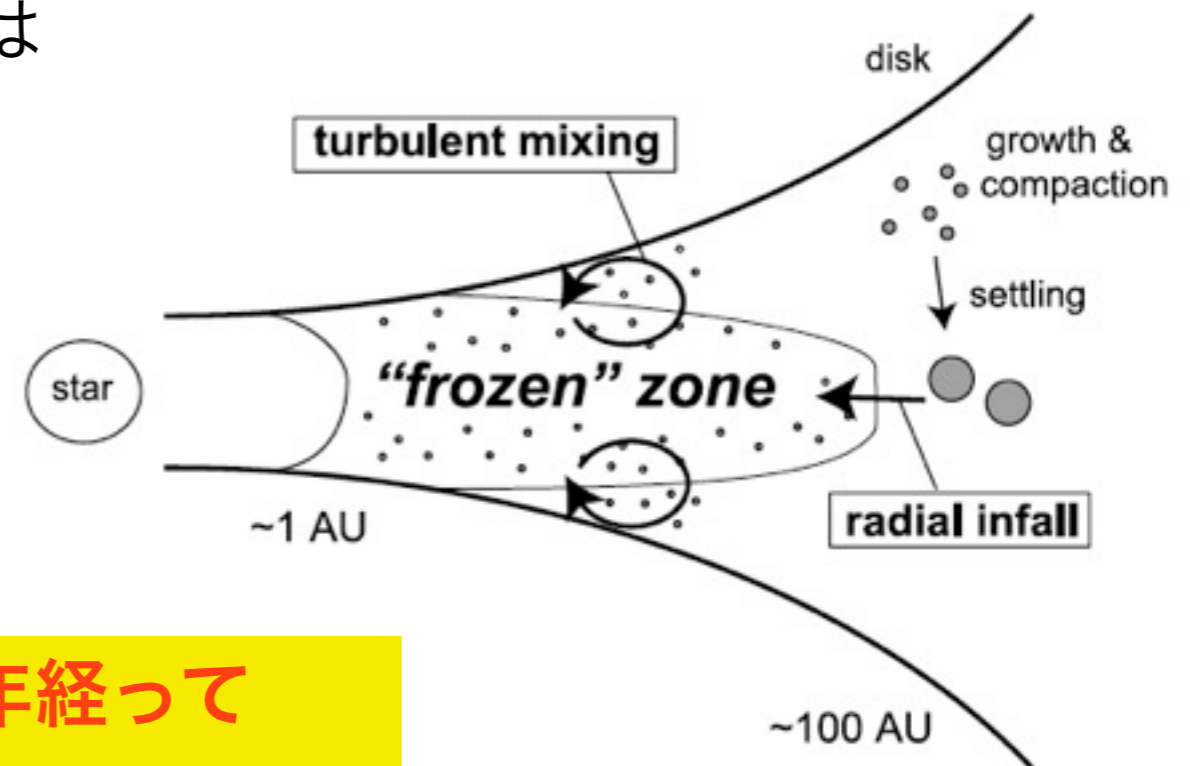
成長凍結ダストのサイズ: 1~100 μm !!

微惑星形成や円盤観測への示唆

巨視的なダストの供給/微視的ダストの消失は
どうやって起こりうるか？

- 100AU以遠からの固体の中心星落下
- 成長凍結領域まわりの乱流拡散

どちらも、**100万年弱**の時間がかかる。



→ **ダストの進化は、円盤形成から100万年経って
から始まることを示唆。**

(従来の理論では、1000年くらいで進化する)

円盤赤外観測とはむしろ整合的

- 中間赤外ピークは100万年のスケールで減衰 (e.g., Furlan+05)
- 理論計算をすると1万年くらいで中間赤外ピークが消失(Dullemond & Dominik 05)

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

□ 本研究の注目点：円盤ガス中でのダストの**帯電**

円盤内の電離ガスを捕獲して、負の平均電荷を帯びる

従来のダスト成長の描像をどの程度変えるか？

□ **ダスト成長に対するの静電反発の壁**

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

今後の課題

遠方から落下してくるダストと成長凍結ダストの衝突進化

→円盤大局計算が必要

