

13.5 固体の成長

高橋・佐藤研B4 有川佳奈

13.5.1 タイムスケール制約

原始太陽系円盤における固体の成長について知るには...

→当時の物質を直接調べればいい！

- 始原隕石：太陽系で最も古い岩が含まれる

年齢4.56Gyrのものがほとんど（第8章）

→最初の固体惑星物質が分子雲コアの崩壊のタイムスケールと似たタイムスケールで形成されたと示唆できる短命同位体 ^{26}Al の発見

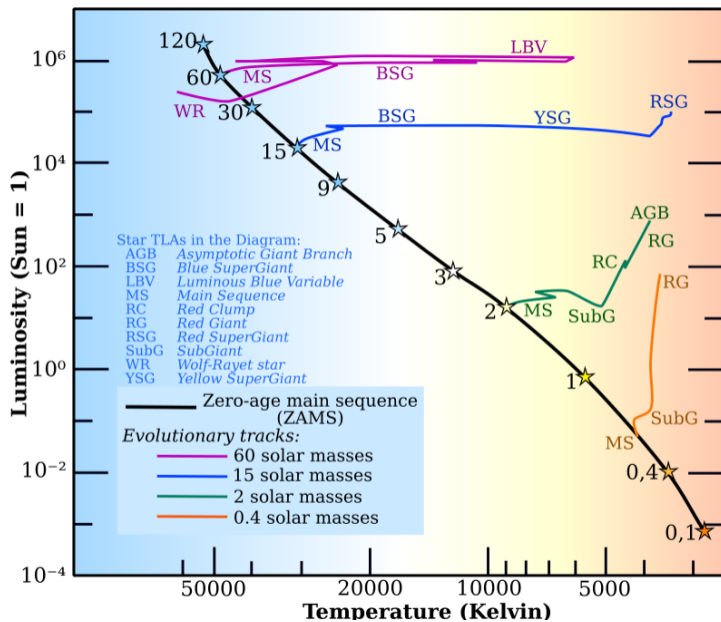
- 隕石で確認された短命の同位体は...

- AGB星で生成された可能性がある

- 初期の太陽系でアクティブな原始太陽によって原始太陽系円盤の内部にある固体粒子に粒子を照射することによって生成されたと示唆される

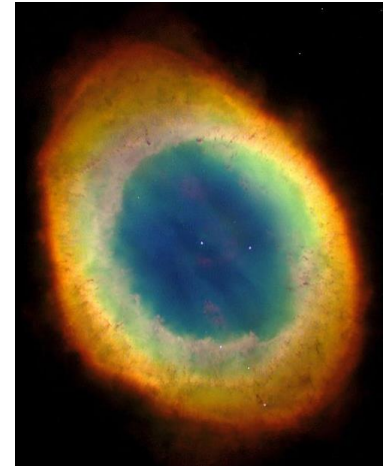
AGB (漸近巨星分枝) 星とは？

- 中・小質量星 ($0.8 \sim 8M_{\odot}$) の進化末期の姿
- HR 図上で赤色巨星分枝に漸近的に近づくように進化する星
→ Asymptotic Giant Branch 星



<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BC%B8%E8%BF%91%E5%B7%A8%E6%98%9F%E5%88%86%E6%9E%9D>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%83%91%E6%98%9F%E7%8A%B6%E6%98%9F%E9%9B%B2#:~:text=%E6%83%91%E6%98%9F%E7%8A%B6%E6%98%9F%E9%9B%B2%EF%BC%88%E3%82%8F%E3%81%8F%E3%81%9B%E3%81%84%E3%81%98%E3%82%87%E3%81%86,%E5%89%8D%E3%81%AE%E6%AE%B5%E9%9A%8E%E3%81%A7%E3%81%82%E3%82%8B%20%E3%80%82>



くじら座ミラ

[https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%A9_\(%E6%81%92%E6%98%9F\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9F%E3%83%A9_(%E6%81%92%E6%98%9F))

13.5.1 タイムスケール制約

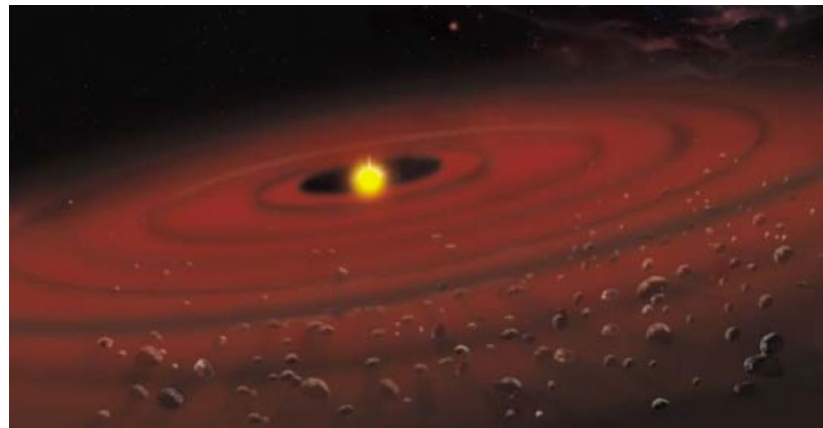
- 星間粒子は、赤道面に落下するときの降着衝撃の際にかなり熱くなる
 - ほとんどの星間粒子は原始惑星系円盤（少なくとも内部）に到達する前に完全に蒸発する可能性がある
- いくつかの隕石に含まれるほぼ純粋な ^{22}Ne 、およびいくつかの異なる元素で測定された同位体比
 - いくつかの星間粒子が太陽系星雲内での旅を生き延び、隕石材料に含まれたことを意味

隕石中の短命同位体その他同位体比は、原始惑星系円盤の様子や小惑星形成のタイムスケールを知る手掛かりになる

13.5.2 惑星形成

- 円盤のガス状の物質が冷えると様々な化合物が凝縮して微細な粒子になる

→太陽組成の円盤の場合、**ケイ酸塩**と**鉄化合物**が最初に凝縮



<http://www.imart.co.jp/yuukyuu-sekai-p2.html>

- 惑星系の外側領域（低温の領域）では、大量の水の氷や他の物質の氷が結露する可能性がある（13.4.3）

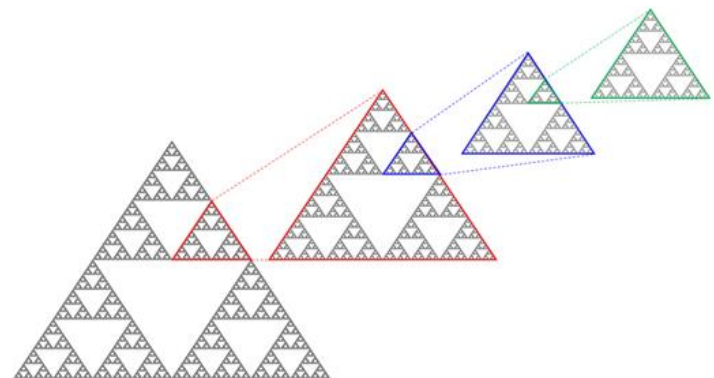
→この領域では、星間物質と恒星の大気からの既存の凝縮物もかなり

あったかもしれない（じゃあ内側領域にはほとんど無かったの...??）

13.5.2 固体粒子の成長

- 固体粒子は主に**相互の衝突**によって進行
 - 粒の凝縮に関連する力学的および化学的なプロセスはよくわかっていない
 - 煙突？の研究と数値モデルからのデータは、ファンデルワールス力によって一緒に保持されている緩く詰められたフラクタル構造が形成されることを示唆
(原文：Data from smokestack studies and numerical models suggest that loosely packed fractal structures which are held together by van der Waals forces may be formed.)

※フラクタル:一部が全体と自己相似な構造を持っている図形



13.5.2 固体粒子の成長

→煙突?の研究と数値モデルからのデータは...

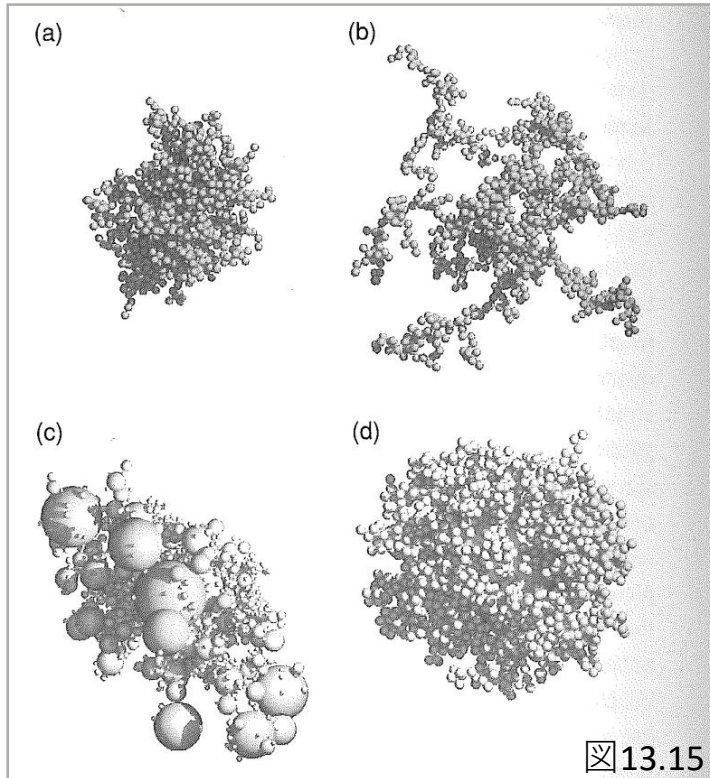


図13.15

- (a) 1024個の単分散球状粒子を含むBPCA;
単純なBPCAプロセスでは、フラクタル次元が3.0の集計が生成される
- (b) 1024個の単分散球状粒子を含むBCCA;
これらの集合体のフラクタル次元は1.9.
- (c) 指数が-3.15のべき乗則サイズ分布に従う2001年の球形構成粒子を含むBPCA.
- (d) 大きな球状コアに凝集した2000の単分散球状粒子を含むBPCA. (Blum et al.1994)

※BPCA:弾道粒子クラスター凝集プロセス

シード粒子は、ランダムな衝撃パラメーターと衝突する単一粒子の蓄積と、線形軌道上のランダムな離脱（ヒットアンドスティックプロセス）により成長

BCCA:弾道クラスター-クラスター凝集プロセス
等質量集合体の凝固を介して進行

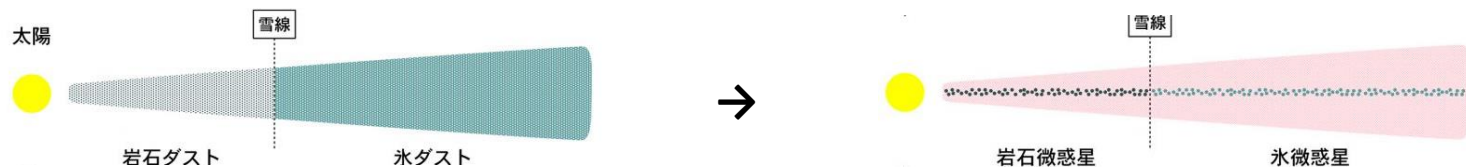
ただし、ほとんどの原始隕石は約1mmのコンドリュールを含むため、この研究の主題とは異なる (§8参照) この章ではこれを考えない

13.5.2 固体粒子の成長

- **小さな粒子の運動**は、ガスと強く結びついている

? 太陽系の原始惑星系円盤に存在すると考えられているパラメータの場合、1cm未満の気体と固体粒子の間の結合はエプスタインの抗力の法則 (eq. 2.55) によって十分に説明される

- 粒子が凝縮する → ダストが円盤の赤道面に向かって沈降する (星の重力の垂直成分により)



<http://www.exoplanetkyoto.org/study/formation/>

- 粒子の加速式

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{\rho_g c_s}{R\rho} v_z - n^2 z, \quad (13.14)$$

v_z : z方向 (ディスクの中央平面に垂直) での粒子の速度, $\rho_g(z)$: ガス密度, ρ : 粒子の密度, R : 粒子の半径, c_s : 局所的な音速 = 熱ガス速度 (したがって $c_s \propto T^{1/2}$), ケプラーの軌道角速度 $n = \sqrt{GM_\odot/r^3}$

13.5.2 固体粒子の成長

- 粒子の加速式

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{\rho_g c_s}{R\rho} v_z - n^2 z, \quad (13.14)$$

v_z : z方向（ディスクの中央平面に垂直）での粒子の速度, $\rho_g(z)$: ガス密度, ρ : 粒子の密度, R : 粒子の半径,
 c_s : 局所的な音速 = 熱ガス速度（したがって $c_s \propto T^{1/2}$ ）, ケプラーの軌道角速度 $n = \sqrt{GM_\odot/r^3}$

ここで、検討されている小さな粒子はガスに対して非常にゆっくりと移動

- 平衡沈降速度

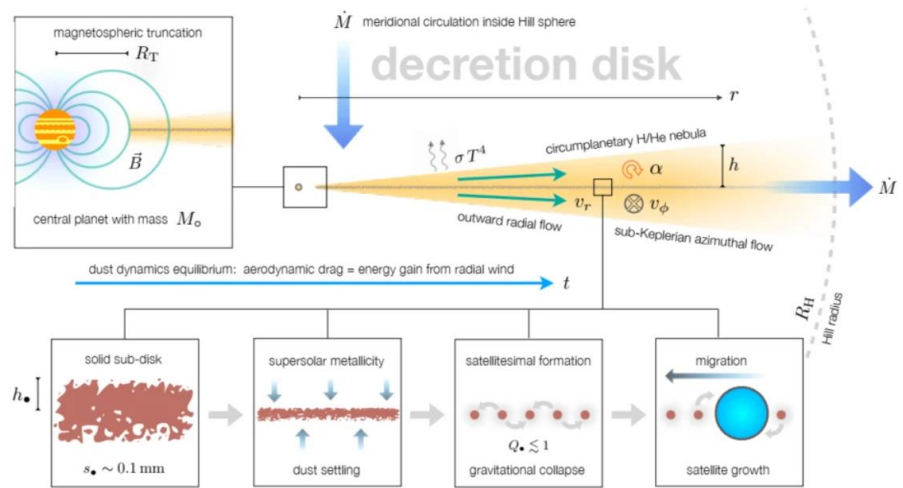
$$v_z = -\frac{n^2 z \rho R}{\rho_g c_s}. \quad (13.15)$$

所定の密度の粒子の場合、沈降速度は粒子半径に比例し、赤道面から遠い粒子（ ρ_g が小さい（eq. 13.10a））は、赤道面に近い粒子よりもはるかに速く沈降する

13.5.2 固体粒子の成長

- ・沈降速度は、赤道面のガススケールの高さ約1/10以内に1 μm サイズの粒子が円盤赤道面の半分まで落下する or 距離の99.9%の場合？、約 10^5 年間かかる

- ・太陽中心距離が1 AUの場合
 ディスクの温度：約500~800 K,
 中立面付近のガス密度： $\rho_g \approx 10^{-9} \text{gcm}^{-3}$,
 H_2 が優勢な星雲の熱速度： $c_s \approx 2.5 \times 10^5 \text{cms}^{-1}$
- ・密度が1 gcm^{-3} の1 μm 粒子の場合
 $v_z \approx 0.03 (z / \text{Hz}) \text{ cms}^{-1}$



<https://arxiv.org/pdf/2005.08330.pdf>

- ・このような長い整定時間は、隕石の年代測定に基づくタイムスケールと一致しない
 →追加のプロセスが機能している必要がある！！

13.5.2 固体粒子の成長

- 追加のプロセス内容

円盤の赤道面への**沈降中の粒子の衝突成長**を考える

→式13.15のRが増加

→沈降時間が数桁短縮される

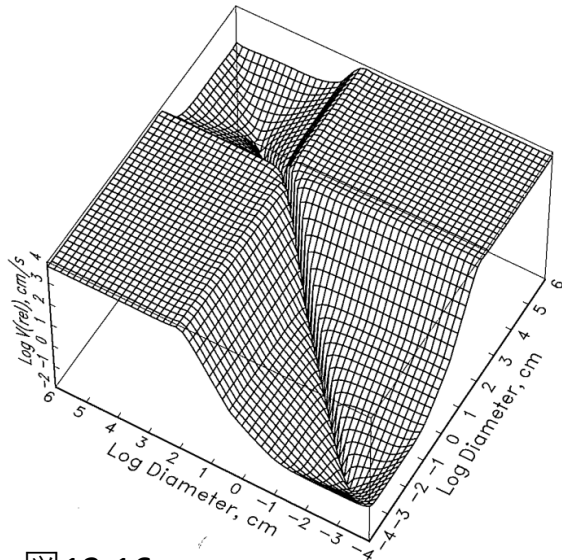
→異なる沈降時間により、異なるサイズの粒子間の衝突率が増加

- 現在のモデルは（太陽系星雲の地球型惑星領域の推定パラメーターに対して）固体物質の大部分が1 AUで $\leq 10^4$ 年以内に巨視的なサイズの物体に凝集したことを示唆
- これらの物体のほとんどは、凝縮された材料の密度がガスの密度に匹敵するか、それを超える、ディスクの赤道面の周りの比較的薄い領域に限定

13.5.2 固体粒子の成長

より大きなスケールでの場合...

- cmサイズの粒子からkmサイズの微惑星への成長
→様々な物体間の**相対運動**に依存
- 原始惑星系円盤内の（サブ）cmサイズの物質の運動
→**ガス**と強く結びついている（図13.16）



部分的に圧力をかけたガス状の原始惑星系円盤内を周回する密度 2 gcm^{-3} の粒子のペア間の一定の相対速度（ cms^{-1} 単位）の等高線は、粒子サイズの関数として表示される

1 μm から10 kmまでのサイズが表示される

相対速度は、熱運動（主にサイズが10 μm 未満）に加えて、ガス抵抗によって引き起こされる半径方向および横方向の速度によるもの
ディスクパラメータは、乱流のない最小質量の太陽系星雲における1 AUの中立面に対するもの

ガス密度 $\rho_g = 3.4 \times 10^{-9} \text{ gcm}^{-3}$ 、 $T = 320\text{K}$ 、 $\Delta v = 61.7 \text{ ms}^{-1}$

等高線図の狭い「谷」は、同じサイズの物体が同じ速度を持っているという事実から生じる

（提供：Stuart J.Weidenschilling）

図13.16

13.5.2 固体粒子の成長

- 原始惑星系円盤内のガスは、半径方向の圧力勾配により恒星の重力に逆らって部分的に支えられている
→ガスが星を一周する速度はケプラー速度よりわずかに低い
- ガスが感じる「有効」重力の式

$$g_{\text{eff}} = -\frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}^2} - \frac{1}{\rho_g} \frac{dP}{dr_{\odot}}. \quad (13.16)$$

円軌道の場合、有効重力は遠心加速度 $g_{\text{eff}} = -r_{\odot} n^2$ でバランスを取る必要がある
圧力勾配は重力よりもはるかに小さく、ガスの角速度 n_{gas} を次のように近似できる

$$n_{\text{gas}} \approx \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}^3}} (1 - \eta), \quad (13.17)$$

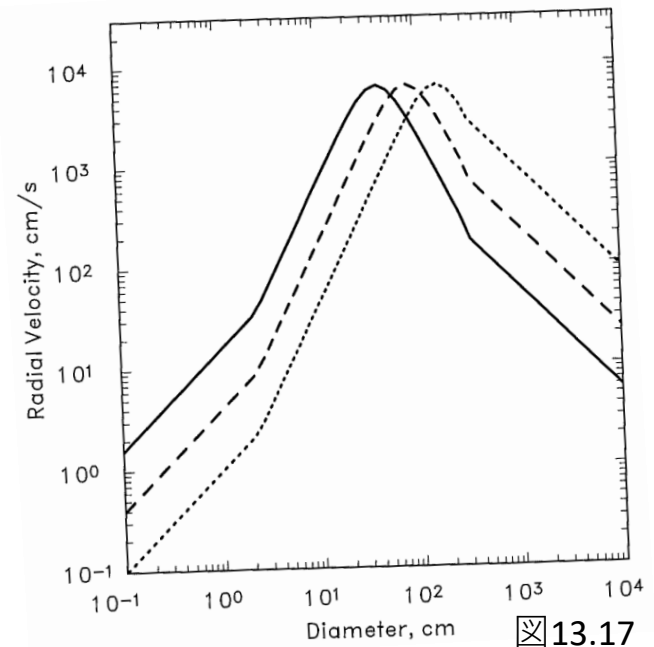
$$\eta \equiv \frac{-r_{\odot}^2}{2GM_{\odot}\rho_g} \frac{dP}{dr_{\odot}} \approx 5 \times 10^{-3}. \quad (13.18)$$

13.5.2 固体粒子の成長

- 推定された原始惑星系円盤パラメーターの場合、ガスの回転はケプラー速度よりも約0.5%遅いため、軌道の角運動量の一部が取り除かれ、星に向かってらせん状になる

- **小さな粒子**：ドリフト（移動）が少なくなる
(ガスと強く結合しているため、遭遇する向かい風が非常に遅いため)
- **kmサイズの微惑星**：内側にゆっくりと移動する
(表面積と質量の比が小さいため)
内向きドリフトのピーク速度は、1つの軌道周期でほぼ独自のガス質量と衝突する粒子で発生する (図13.17)
- **太陽系星雲の地球型惑星領域のmサイズの天体**：
最速の速度で内側に移動する

- 1 AUのmサイズのボディは、約100年で太陽に近づくように内側に螺旋を描くと考えられる



惑星を形成するために生き残った物質は、かなり迅速にcmからkmのサイズへの移行を完了する必要がある

13.5.2 固体粒子の成長

- このサイズ範囲の成長を説明する2つの対立仮説

①星雲が静止している場合、塵や小さな粒子が重力による不安定性によって固まった結果、微惑星が形成される説

$$M_{\text{planetesimal}} \sim \frac{16\pi^2 G^2 \sigma_\rho^3}{n^4}, \quad (13.19)$$

σ_ρ : 不安定性が発生したときの粒子層の表面質量密度

- 太陽系星雲の内側の領域に形成される微惑星は半径が1 km以下で、より大きな微惑星は太陽からより遠くで形成された
 - ※ただし、現在のモデルでは、ガスと固体の相互作用により、粒子層が重力的に不安定になるほど薄くなるのを防ぐために十分な乱流が発生したことが示唆されている
- ②ダストサブディスクが重力的に不安定になることはなく、むしろ乱流星雲の成長は、単純な2体衝突によって継続する説

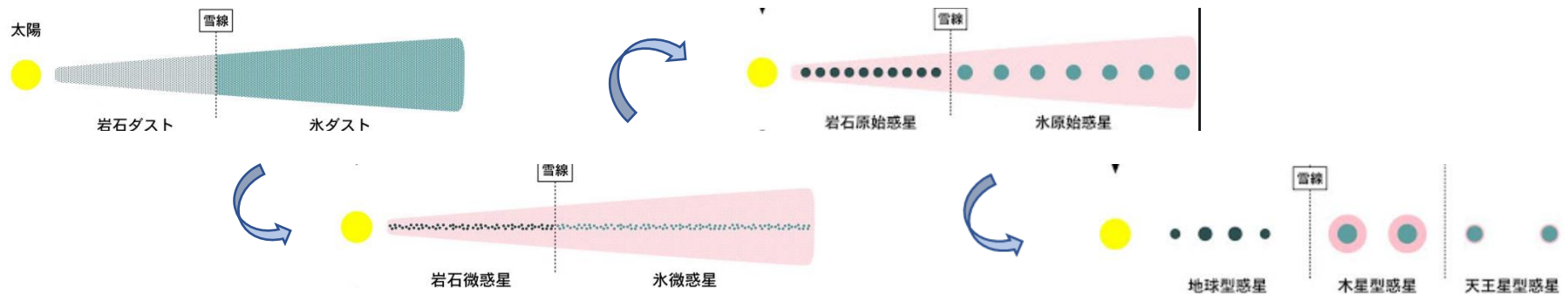
13.5.2 固体粒子の成長

- 乱流の原始惑星系円盤内で固体サイズがmmからkmへと成長すると、特定の問題が発生
 - このサイズ範囲での粒子間衝突の物理学はよく理解されていない
 - mサイズの粒子のガスによる軌道崩壊の割合が高いことは、このサイズ範囲での成長が非常に迅速に発生する必要があることを意味する
- 固体粒子は渦（乱流の一時的なノードとして機能する）内に集中し、より急速な成長につながる可能性がある
- 粒子のごく一部が偶然の状況によって固体の微惑星に成長する可能性があり、これらの微惑星はその後、小さな粒子で質量の何倍も掃引される可能性がある
- 微惑星形成の異なるモデルは、微惑星の初期母集団に対して多種多様なサイズ分布を生み出す
 - 一部のシナリオでは、1 kmをはるかに超える惑星が期待される

13.5.2 固体粒子の成長

まとめ？

- ・ 微惑星の大きな半径方向の動きは、隕石の組成に見られるいくつかの異常の説明を提供する可能性がある
- ・ 単一の隕石の同位体的に異なる成分は、異なる太陽中心距離で別々に凝縮され、固体としてまとめられたに違いない



<http://www.exoplanetkyoto.org/study/formation/>

- ・ ただし、現在の惑星形成の理論は明らかに単純化しすぎていることに注意