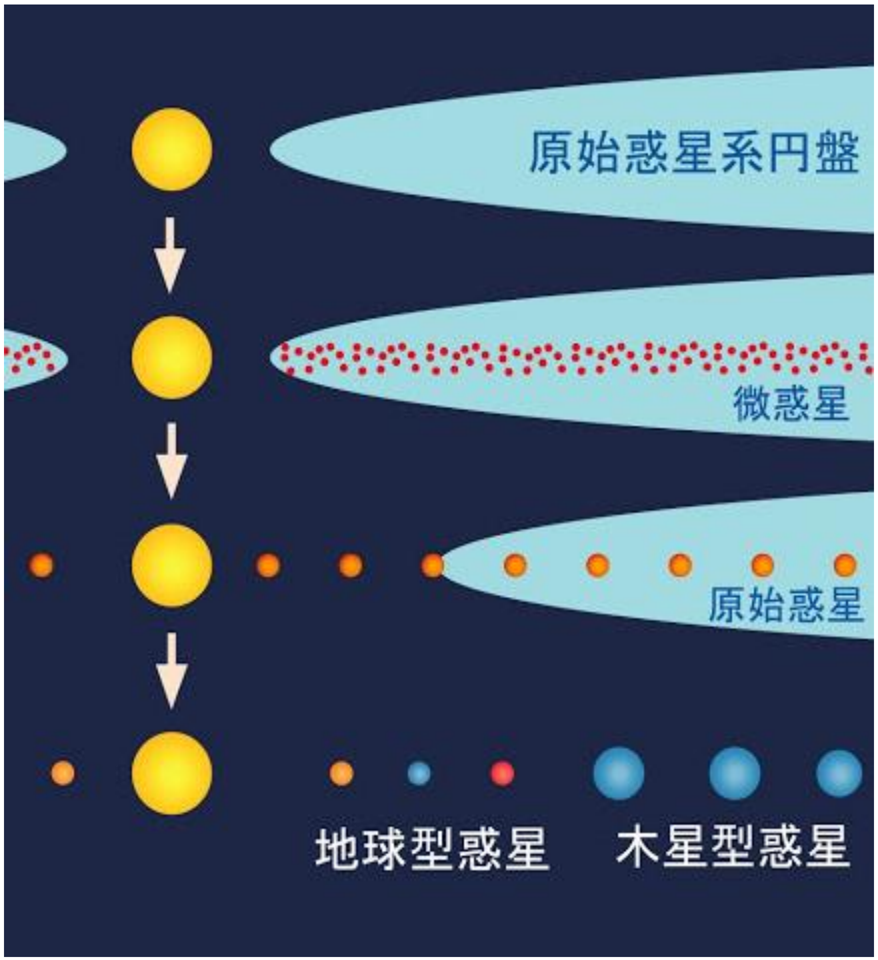
13.5.3 微惑星から惑星胚子が形成されるまで

作った人：中西健人(M2)

節の概要



http://taurus.astr.tohoku.ac.jp/~hidekazu/naiyou.html

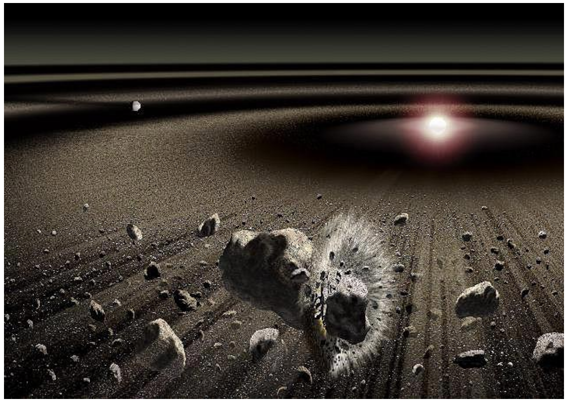
①微粒子⇒微惑星
…主に**静電気力**や**重力**で進行

②微惑星⇒原始惑星
…①とは異なる術理で進行

- 本節では微惑星が数千kmの「**惑星の胚子(原始惑星)**」へと成長する過程を説明する

節の概要

(凄く大雑把な微惑星進化の概略)



https://subarutelescope.org/old/Pressrelease/2004/10/15_1/j_index.html

微惑星：10m~数km
たくさんある

衝突・合体による暴走的成長

惑星の胚子：2~3000km?
数百個

https://botanical-life.work/2493/hobby/%E5%AE%87%E5%AE%99/

原始惑星：数10^3~10^4km
比較的少数

- 微惑星の集積を引き起こすのは
①重力的な相互作用　②物理的な衝突
- 凄くざっくり言うと**「他よりも大きくて」「遅い」**微惑星がより速いスピードで成長する(何でかはこれから説明する)

微惑星の速度場

- 微惑星の速度場は成長率を決める重要なファクターの一つ
- 速度場は主に「重力相互作用」「衝突」「ガス摩擦」の影響を受ける
  - 微惑星速度場のランダム性や、離心率などの軌道要素が変化

微惑星の衝突と集積

- 微惑星同士が衝突した場合、両者が合体する
  ⇒微惑星の成長

- 衝突後に微惑星が合体するか(あるいは分裂する、跳ね返るか)は、**微惑星の物理的性質及び衝突時の運動エネルギーに依存**

基本的な物理：二物体の衝突

物体1
質量m_1, 半径R_1

物体2
質量m_2, 半径R_2

- 上の物体1, 2が衝突する際の速度v_iは以下の通り

$$v_i = \sqrt{v^2 + v_e^2}\ (> v_e)$$

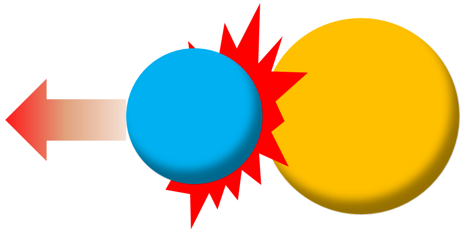
ただしvは1が2より十分離れた位置にある時の、2に対する1の速度、v_eは二物体の**(相互)脱出速度**で、

$$v_e = \sqrt{\frac{2G(m_1 + m_2)}{R_1 + R_2}}$$

  - この関係式はエネルギー保存から簡単に求まる

基本的な物理：二物体の衝突

物体1
質量m_1, 半径R_1



物体2
質量m_2, 半径R_2

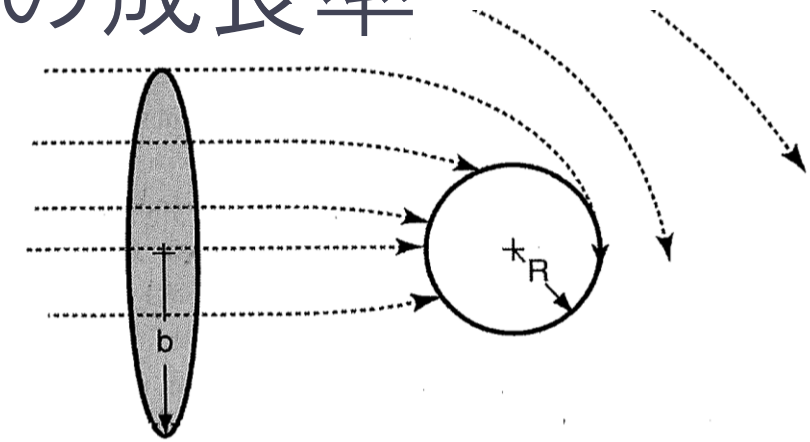
- 衝突後の速度はεv_iで表される(εは跳ね返り係数)
  - $\varepsilon v_i > v_e \Rightarrow$ 衝突後両物体は互いの重力圏から脱出
  - $\varepsilon v_i < v_e \Rightarrow$ 即座に再衝突し、いずれ合体する

- 基本的に微惑星の相対速度は、大きい微惑星(≒惑星胚子)からの脱出速度よりも小さい

⇒惑星胚子は衝突した物体のほぼ全てを取り込む

⇒⇒つまり衝突率=成長率と考えられる

惑星胚子の成長率



- 最も単純なモデルにおける胚子質量の成長率は

$$\frac{dM}{dt} = \rho_s v \cdot \underbrace{\pi R^2 \left\{1 + \left(\frac{v_e}{v}\right)^2\right\}}_{\text{実質的な衝突断面積}}$$

ただしρ_sは小惑星群の体積密度、vは胚子と微惑星の相対速度である

  - bは角運動量保存より求める

惑星胚子の成長率

- 簡単のため質量成長率をρ_sではなく、円盤の面密度σ_ρで表したい
- 微惑星円盤の鉛直方向のガウススケールハイトH_zを用いると

$$\sigma_\rho = \sqrt{\pi}\rho_s H_z = \sqrt{\frac{\pi}{3}}\rho_s \frac{v}{n}$$

- この時胚子半径の成長率は

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dM/dt}{4\pi\rho_p R^2} = \sqrt{\frac{3}{\pi}}\frac{\sigma_\rho n}{4\rho_p}\left\{1 + \left(\frac{v_e}{v}\right)^2\right\}$$

惑星胚子の暴走成長

$$\frac{dM}{dt} = \rho_s v \cdot \pi R^2 \left\{1 + \left(\frac{v_e}{v}\right)^2\right\} \ldots (*)$$

$$v \geq v_e \Rightarrow (*) \propto R^2$$

$$v \ll v_e \Rightarrow (*) \propto R^4$$

- 上式より(他の微惑星よりも大きい)惑星胚子は、周囲の微惑星を圧倒する速度で成長する(**暴走成長**)
  - 惑星胚子がその重力圏内にある物質を消費し尽くすまで暴走成長は続く

惑星胚子の暴走成長

- 軌道上の物質を全て集積した場合の惑星胚子の質量(暴走成長の上限)は、

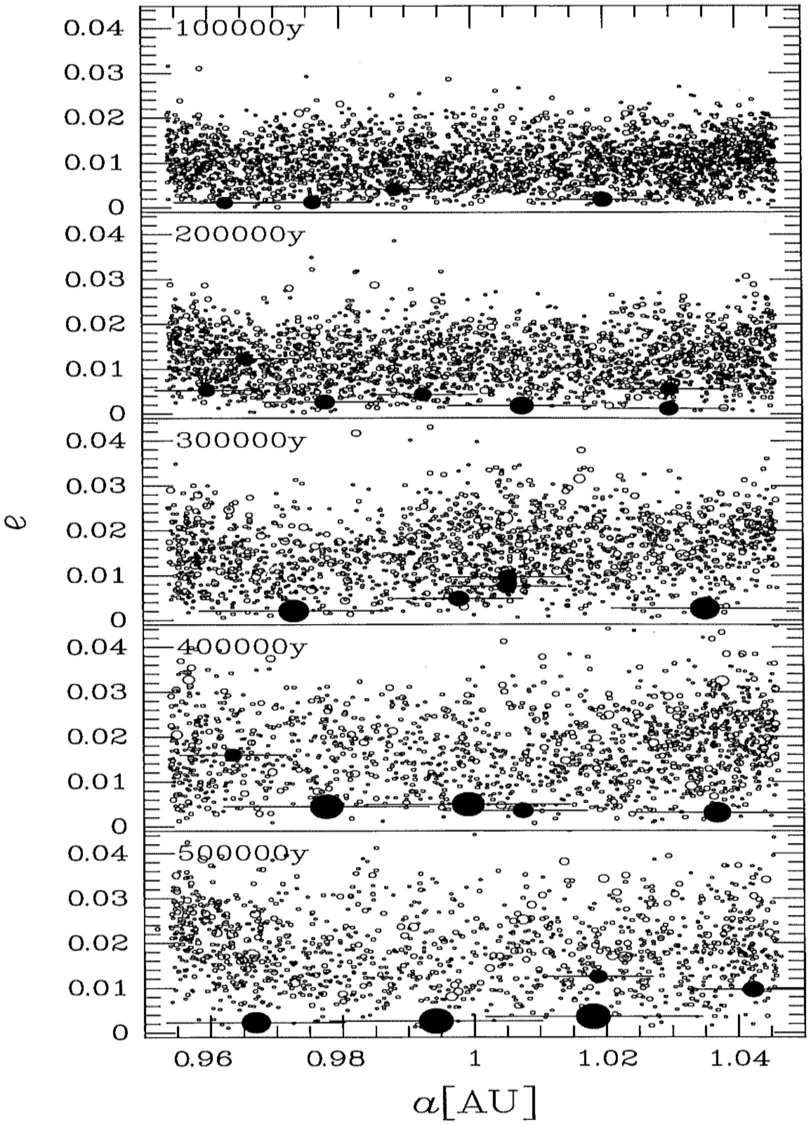
$$M = \int_{r_\odot-\Delta r_\odot}^{r_\odot+\Delta r_\odot} 2\pi r' \sigma_\rho(r') dr' \approx 4\pi r_\odot \Delta r_\odot \sigma_\rho(r_\odot)$$

ただし$r = r_\odot$は太陽から胚子までの距離で、$[r - \Delta r_\odot, r + \Delta r_\odot]$が胚子の集積範囲である

- 暴走成長期後は成長速度は鈍化し、似たような大きさの原始惑星が多数並ぶ(**寡占成長**)
  - N体計算によれば、寡占成長で地球型惑星の範囲内に生まれる原始惑星は、**現在と比べ数が多く質量も小さい**

⇒原始惑星同士の巨大衝突を示唆?

シミュレーション結果



- N体シミュレーションのスナップショット
  - ○は微惑星、●は惑星胚子を表す
  - 横軸は軌道等半径、縦軸は離心率