

Astrophysics of Planet Formation[1]

C1SB2064 辻 勇吹樹

2024 年 5 月 10 日

Regimes of Planetesimal-Driven Growth

半解析的手法の紹介

より正確な半解析的理論手法 (N 体系の結果と良い一致)

- 無衝突ボルツマン方程式への衝突項の追加
- Hill 方程式を使った 3 体問題の天体力学

微惑星の成長

- 秩序 (orderly) 成長
質量のバラつきは変わらずに全体として質量が大きくなる。
- 暴走 (runaway) 成長
少数の天体が急速に成長し、残りは置いていかれる。
- 寡占 (oligarchic) 成長
各領域での暴走成長が止まると質量分布は二極化する。

微惑星が惑星サイズまで成長するまでにいくつかの成長過程がある。例えば

$$\frac{dM}{dt} \propto M^\beta \quad (1)$$

という簡単な状況を考えると [3]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{M_1}{M_2} \right) = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{1}{M_1} \frac{dM_1}{dt} - \frac{1}{M_2} \frac{dM_2}{dt} \right) \propto \frac{M_1}{M_2} (M_1^{\beta-1} - M_2^{\beta-1}) \quad (2)$$

より $\beta > 1$ ならば質量比がどんどんと大きくなってしまう。多数の微惑星でも同様に考えると、ごく少数の天体が圧倒して成長することを示す。これが暴走 (runaway) 成長である。一方、 $\beta < 1$ では質量比は小さくなる。すなわち全体として成長が進むが暴走成長のように質量のばらつきが変わらない。これが秩序 (orderly) 成長である。5.2.1 節での議論から $\frac{dM}{dt}$ は衝突断面積 Γ に比例するので、今回の例では $\Gamma \propto M^\beta$ となる (5.2.1 節の暴走成長時では $\beta = 4/3$ (5.34 式))。また暴走成長のときは $\Gamma \propto M^{(2/3)} v_{esc}^2 / \sigma^2 \propto M^{4/3} / \sigma^2$ となるので、速度分散が

$$\sigma \propto M^{1/2} \quad (3)$$

よりも小さな質量依存性となったときに暴走成長は止まることになる。特に σ が原始惑星による散乱によって決まるようになると $\sigma \propto v_{esc}$ となり $\beta = 2/3 < 1$ となる。

Ida&Makino(1993)[2] による説明では、質量比が臨界点に達した後、原始惑星による散乱によって $e, i \propto M^{1/3}$ で成長し、(速度分散が大きくなって) 惑星の成長速度が抑えられる。原始惑星の質量の倍化時間 T_{grow} が

$$T_{grow} = \left(\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \right)^{-1} \propto M^{-1/3} \langle e_m^2 \rangle \quad (4)$$

($\langle e_m^2 \rangle$: 微惑星の e の 2 乗平均) で与えられ、5.3 節より $\langle e_m^2 \rangle$ は粘性加熱 (viscous stirring) による増加とガス抵抗 (gas drag) の減少のバランスで与えられる。それぞれを考慮すると暴走成長で $\langle e_m^2 \rangle \propto m^{4/15}$ 、寡占成長で $\langle e_m^2 \rangle \propto m^{1/18} M^{1/3}$ となり、 $\langle e_m^2 \rangle$ の増加が抑えられる。

参考文献

- [1] Philip J. Armitage. *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge University Press, 2 edition, 2020.
- [2] Shigeru Ida and Junichiro Makino. Scattering of planetesimals by a protoplanet: Slowing down of runaway growth. *Icarus*, 106(1):210–227, 1993.
- [3] 茂井田, 泰史 中本, 彰三 須藤, and 真 岡. 惑星形成の物理 : 太陽系と系外惑星系の形成論入門. Number 6 in 基本法則から読み解く物理学最前線. 共立出版, 2015.