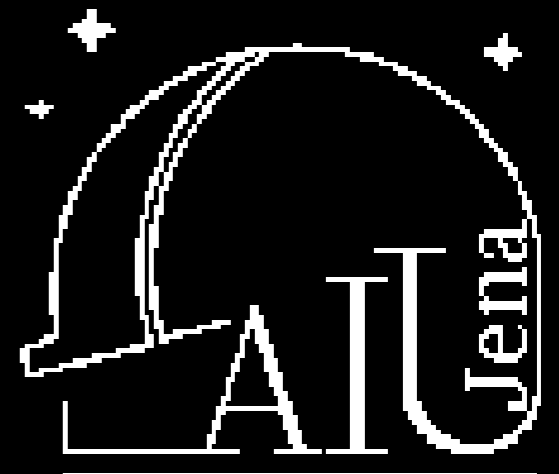


破壊を考慮した 惑星形成



seit 1558

イエナ大学
小林 浩



衝突カスケード

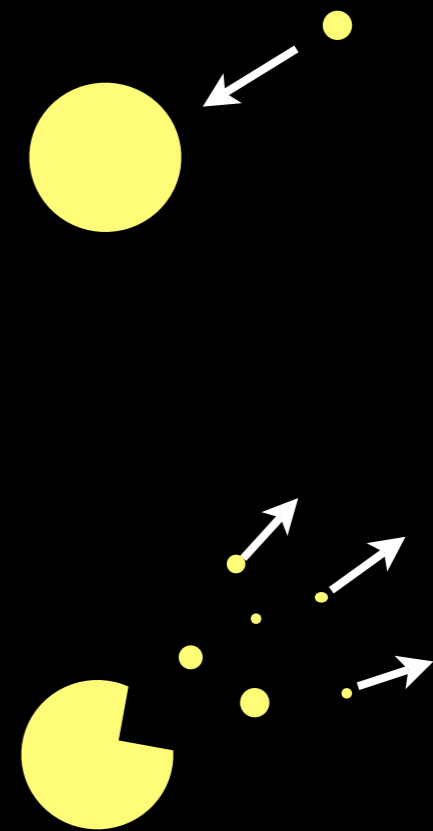
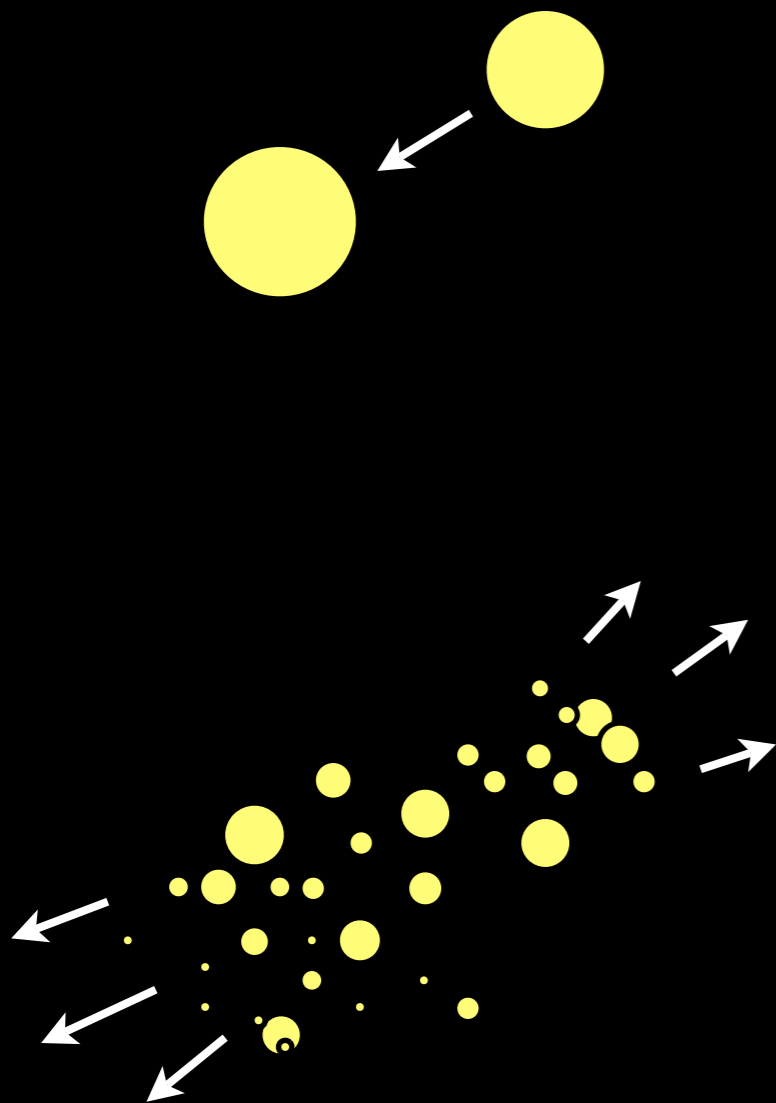
- 惑星形成後期になると、微惑星の衝突速度が原始惑星の重力により大きくなり、微惑星は衝突・破壊を起こす。
- 破片は次々に衝突を繰り返し、小さくなる。
- 小さい天体はガス抵抗により消失する。
- その結果、衝突カスケードは天体の面密度を減少させる。

破壊の種類

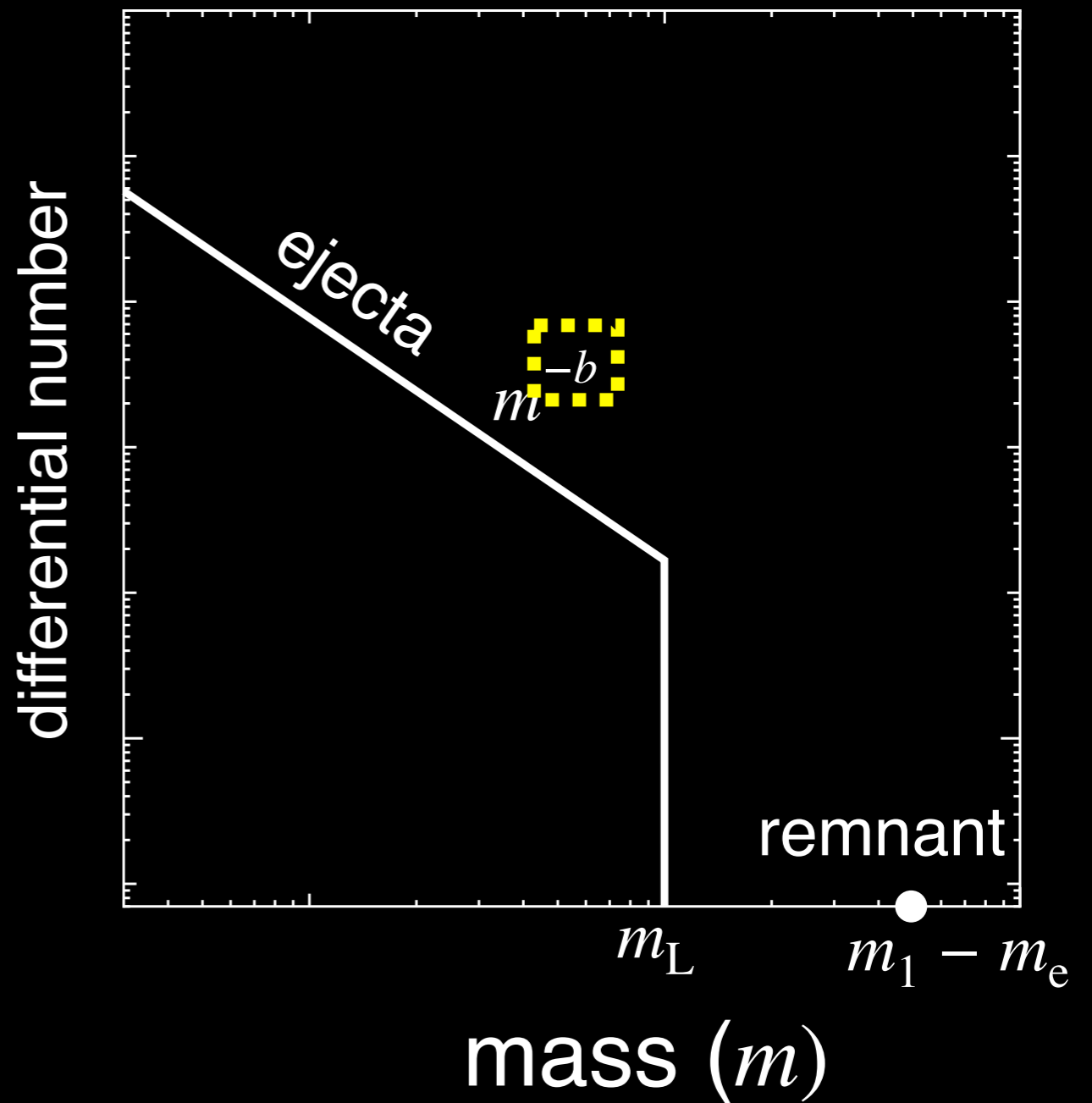
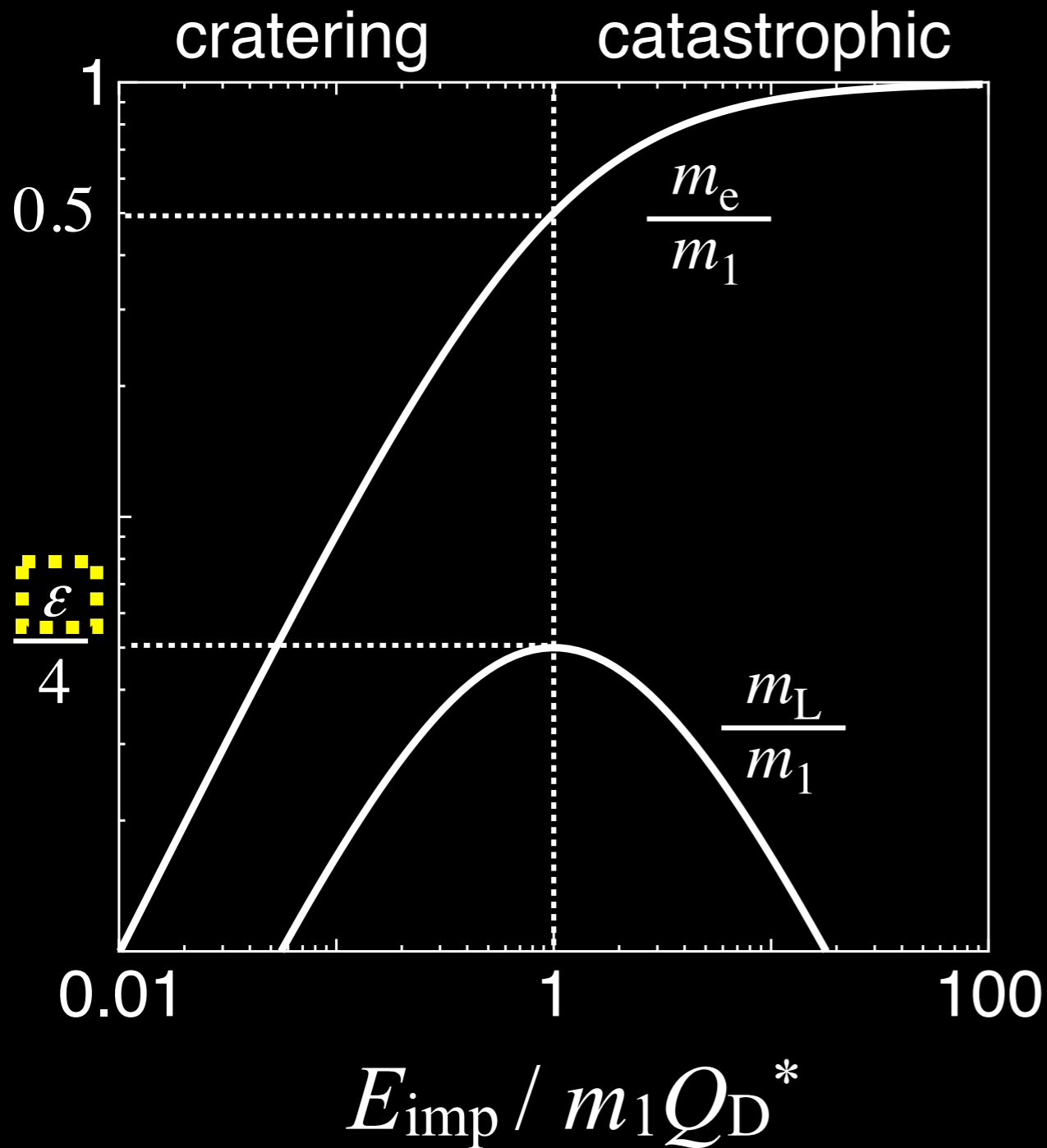
catastrophic

cratering

Q_D^*



破片のモデル



面密度減少

- cratering と catastrophicのどちらが重要？
- 一回の衝突破片の分布の影響は？

解析的に面密度減少時間を導出し、
モデル依存性を明らかにする！

基礎方程式

質量保存則

$$\frac{\partial mn_s(m)}{\partial t} + \frac{\partial F(m)}{\partial m} = 0$$

質量フラックス (Tanaka et al. 1996)

$$F(m) = -\Omega_K \int_m^\infty dm_1 \int_0^\infty dm_2 m_1 f(m, m_1, m_2) P_{\text{col}} n_s(m_1) n_s(m_2) \\ + \Omega_K \int_0^m dm_1 \int_0^\infty dm_2 m_1 [1 - f(m, m_1, m_2)] P_{\text{col}} n_s(m_1) n_s(m_2),$$

$m_1 f(m, m_1, m_2)$: m_1 と m_2 の衝突の結果、 m_1 から生成される質量 m より小さい天体の総質量

減少時間

$$\Sigma = \frac{\Sigma_0}{1 + t/\tau_{\text{dep}}}$$

仮定： $v^2/Q_D^* \gg 1$ かつ $v^2/Q_D^* \propto m^{-p}$

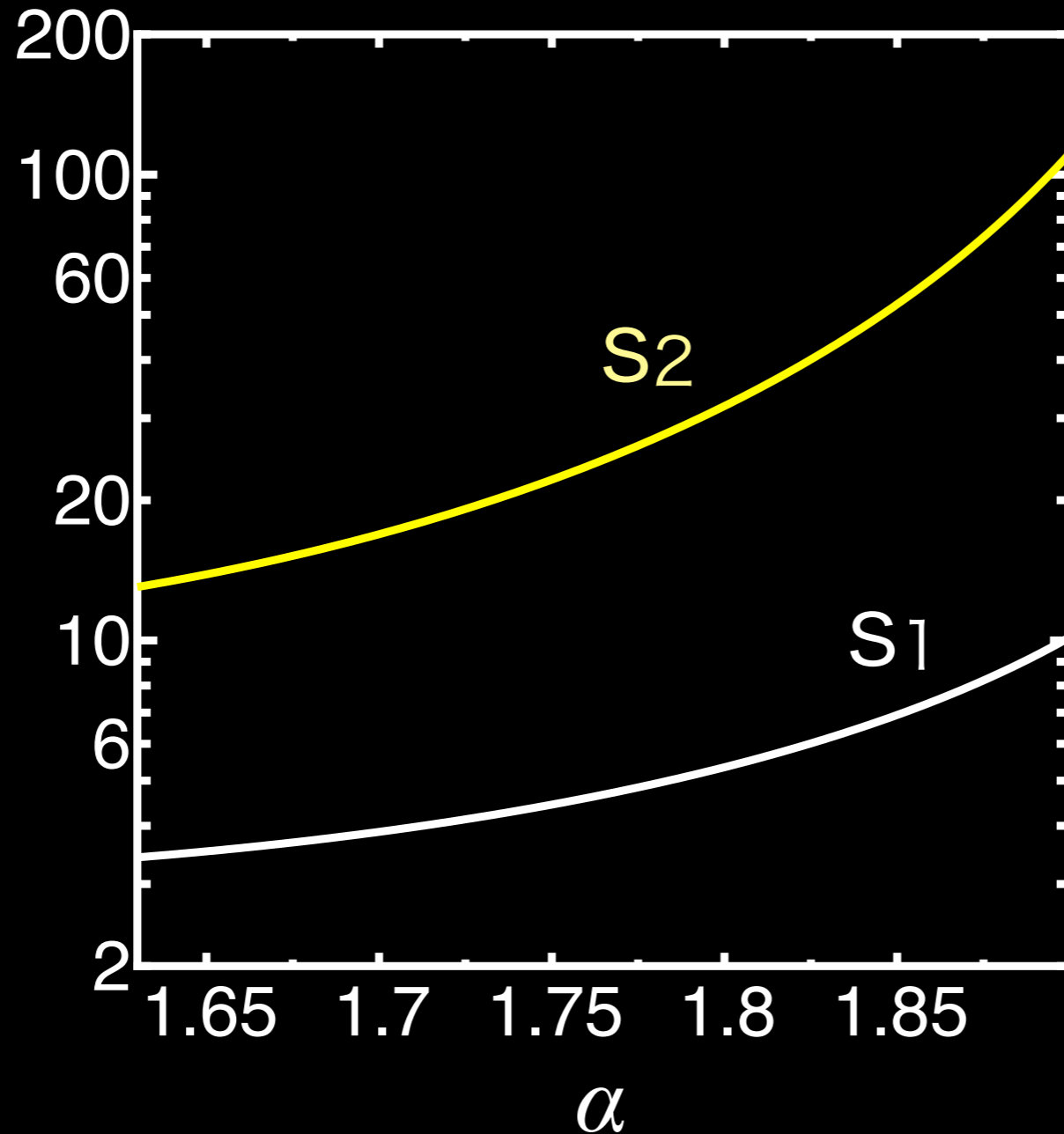
衝突時間

(e.g., Wyatt et al. 2007)

$$\tau_{\text{dep}} = \frac{m_{\text{max}}^{\frac{1}{3}}}{(2 - \alpha)^2 \Sigma_0 h_0 \Omega_K} \left(\frac{v(m_{\text{max}})^2}{2Q_D^*(m_{\text{max}})} \right)^{-\alpha+1} \times \left[\left(-\ln \epsilon + \frac{1}{2-b} \right) s_1(\alpha) + s_2(\alpha) \right]^{-1}.$$

$$\alpha = (11 + 3p)/(6 + 3p) \quad (\text{e.g., O'Brien and Greenberg 2003})$$

S1 V.S. S2

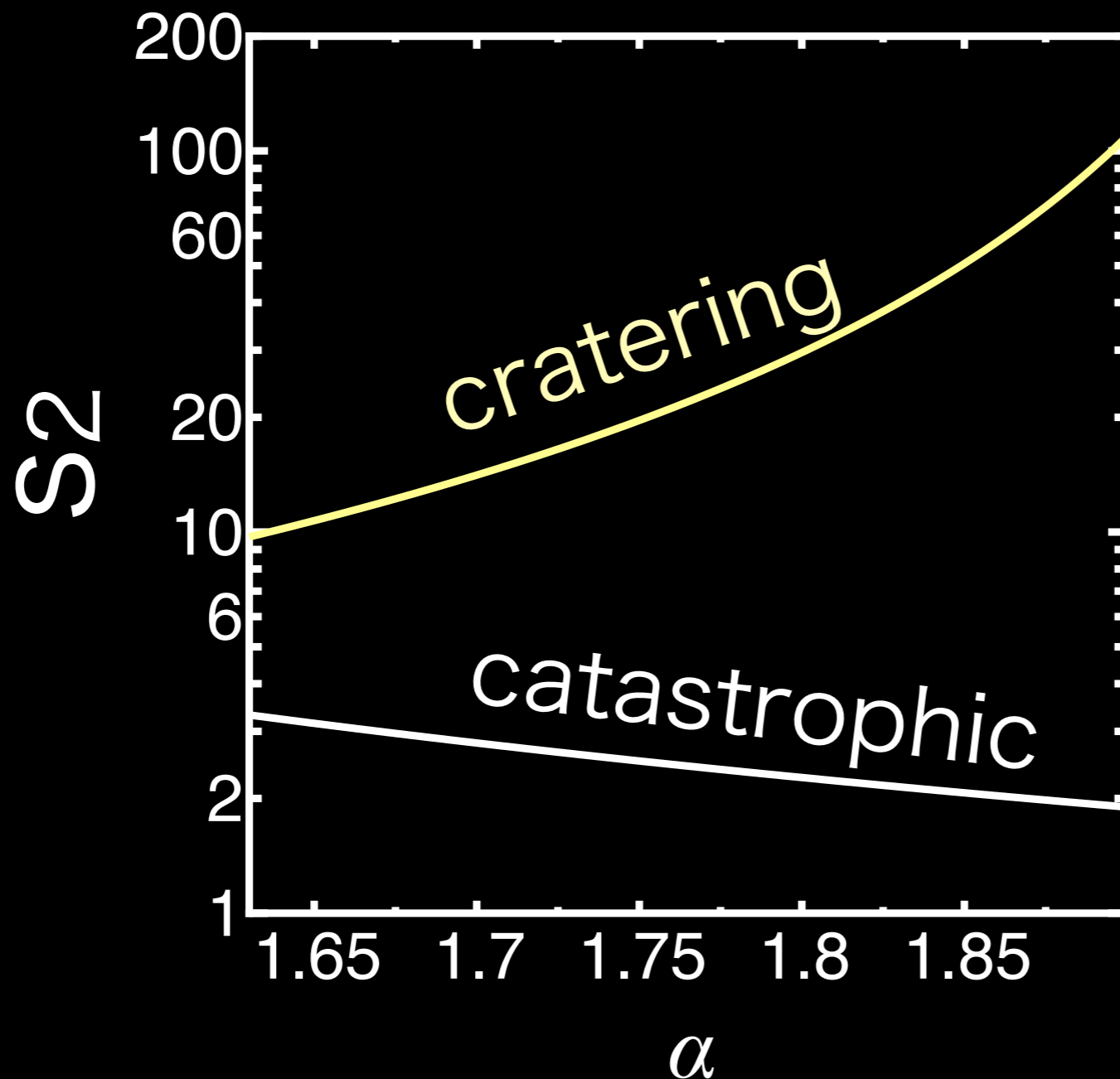


$$\frac{v^2}{Q_D^*} \propto m^{-p}$$
$$\alpha = \frac{11 + 3p}{6 + 3p}$$

(e.g. O'Brien and Greenberg 2003;
Kobayashi and Tanaka 2009)

破片の分布などは、 τ_{dep} を変えない。

cratering v.s. catastrophic



$$\frac{v^2}{Q_D^*} \propto m^{-p}$$
$$\alpha = \frac{11 + 3p}{6 + 3p}$$

(e.g. O'Brien and Greenberg 2003;
Kobayashi and Tanaka 2009)

4-50 倍crateringの方が効く

シミュレーションとの比較

破壊しきい値

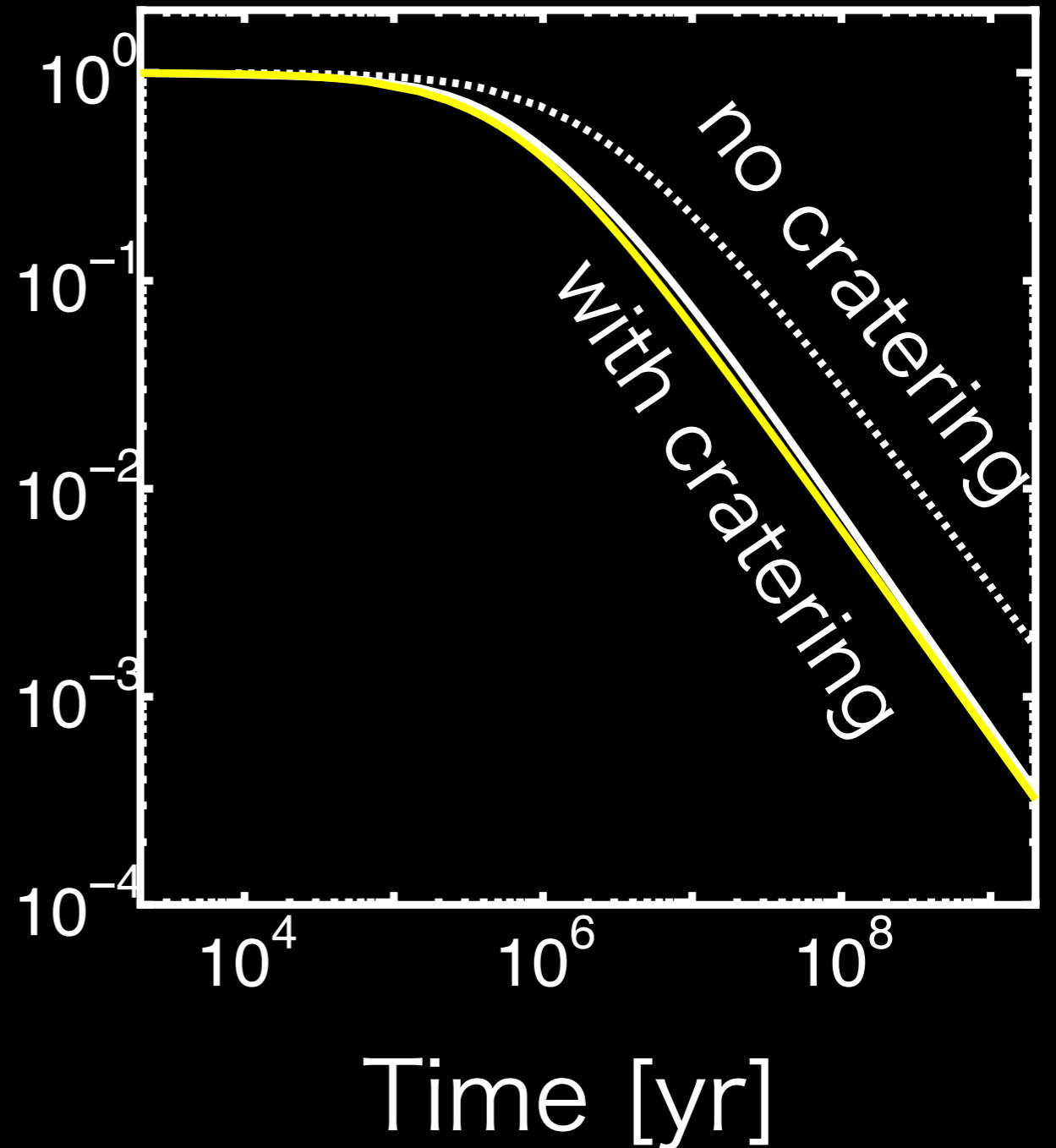
$$Q_D^* = 3.5 \times 10^7 \left(\frac{r_1}{1 \text{ cm}} \right)^{-0.38} + 0.3 \left(\frac{\rho}{1 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left(\frac{r_1}{1 \text{ cm}} \right)^{1.36} \text{ [erg/g]}$$

(Benz and Asphaug 1999)

$$v = 3 \text{ km/s}$$

初期総質量: M_{Earth}

面密度/初期面密度



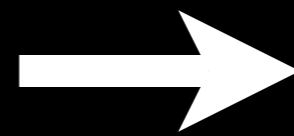
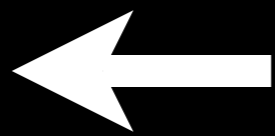
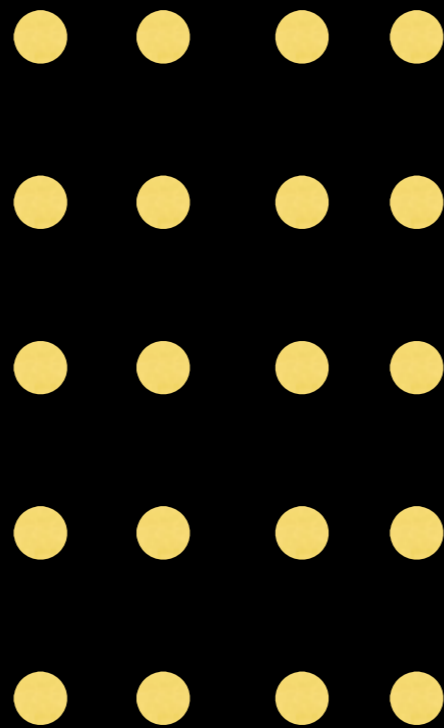
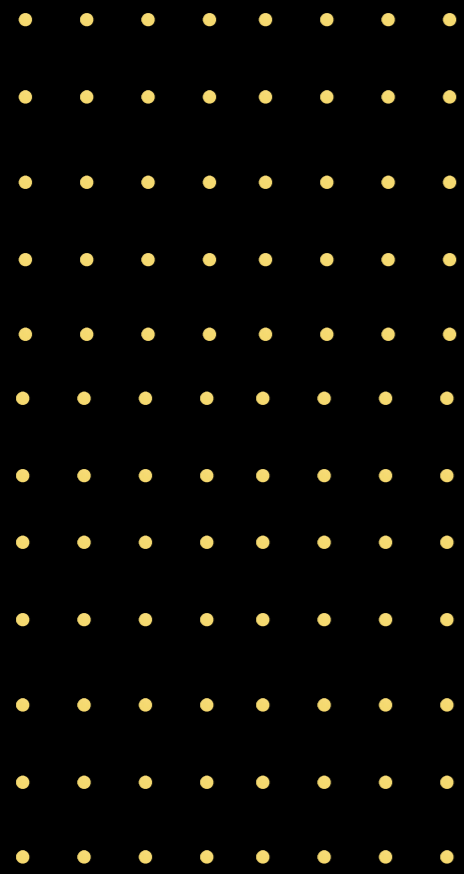
惑星形成での破壊

破壊を考慮した惑星形成

破片

微惑星

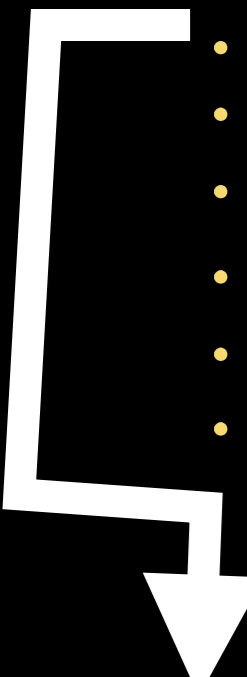
原始惑星



$F_{\text{破壊}}$

$F_{\text{成長}}$

消失



破壊込みの惑星成長

原始惑星(M)の成長

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M}{\tau_{\text{grow}}(M, \Sigma)}$$

Kokubo and Ida (2002)

面密度(Σ)の減少

$$\frac{d\Sigma}{dt} = -\frac{\Sigma}{\tau_{\text{dep}}(M, \Sigma)}$$

Kobayashi and Tanaka (2009)

惑星の最終質量

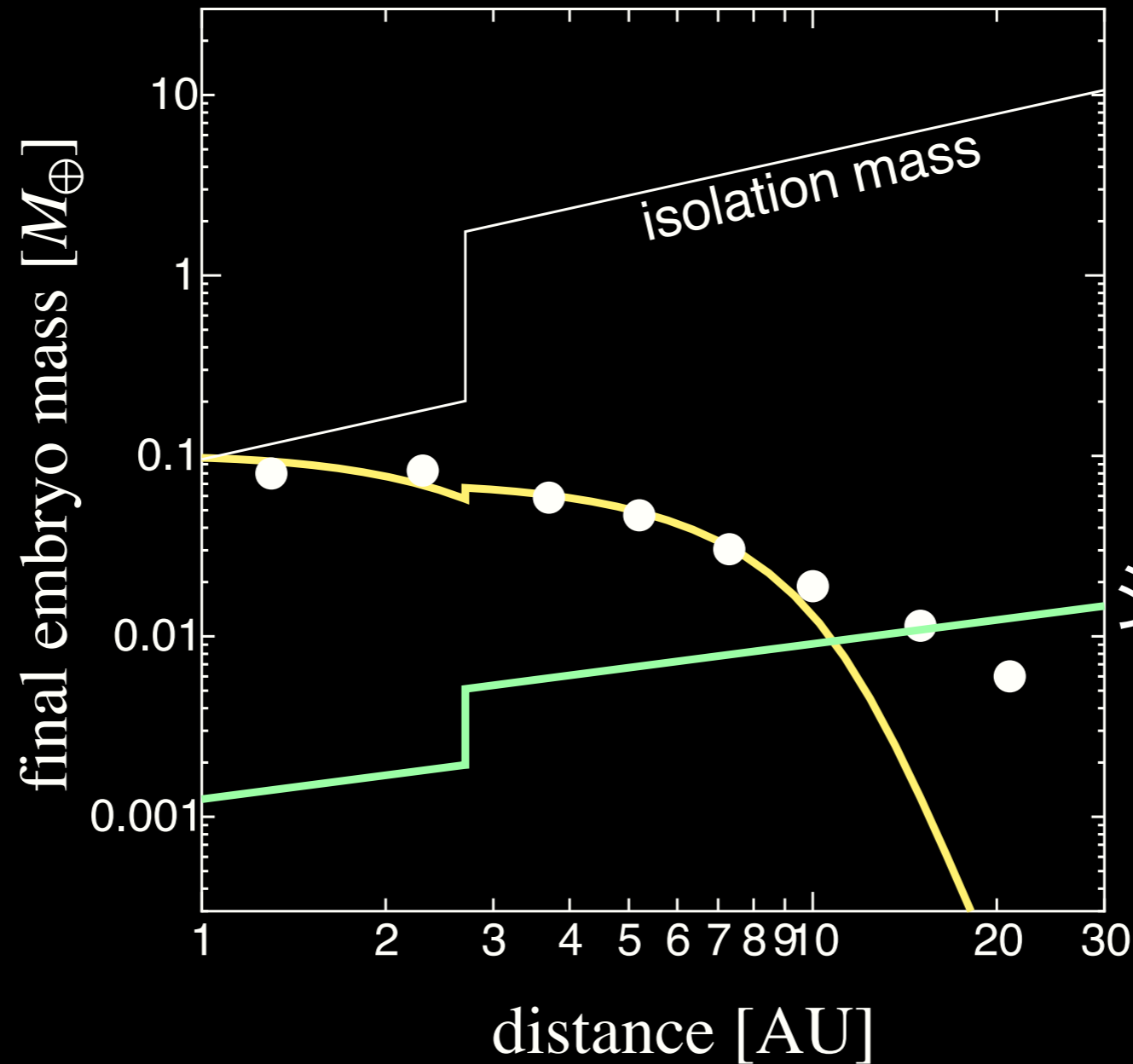
計算条件

林モデル

ガスの寿命

1千万年

1億年後



ガス中

ガス無し

シミュレーション

結論

- 衝突カスケードによる面密度減少時間を導出。
- Crateringはcatastrophicより4-50倍重要である。
- 天体消失時間を用いて原始惑星質量を解析的に見積もった。
 - 最終質量は火星質量程度。