

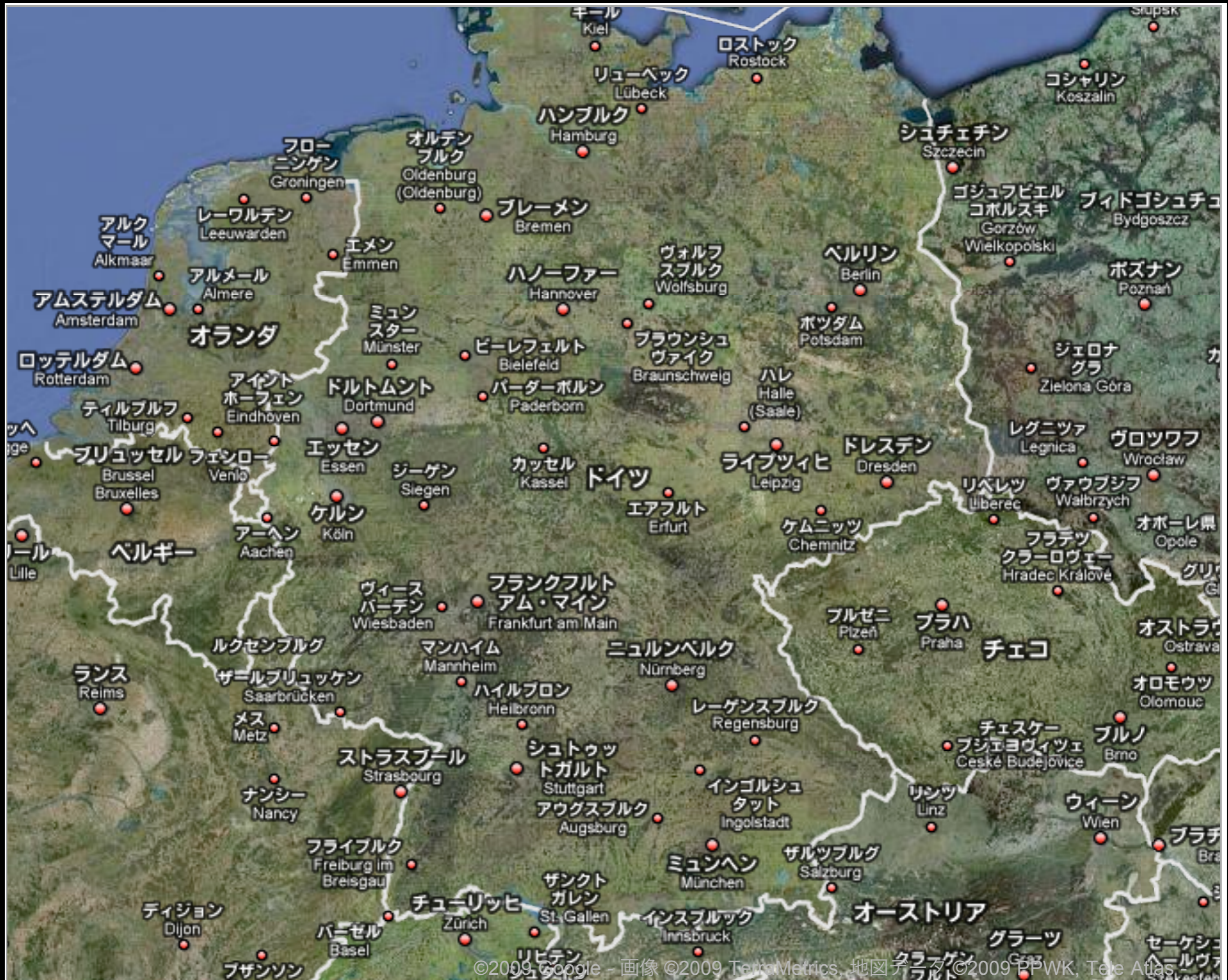
破壊を考慮した 惑星形成



seit 1558

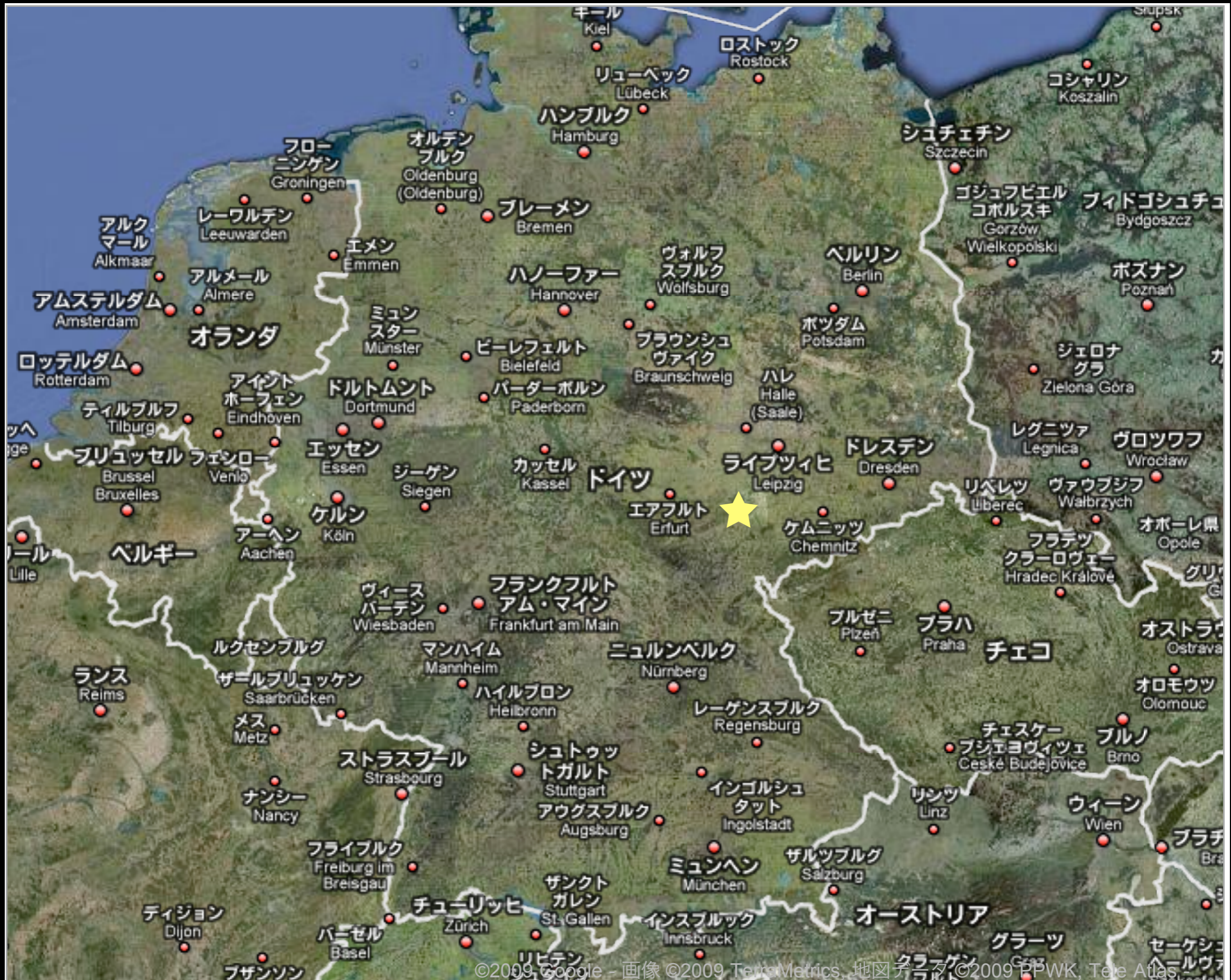
イェナ大学
小林 浩





©2009 Google - 画像 ©2009 TerraMetrics, 地図データ ©2009 PPWK, Terra Atlas

google map



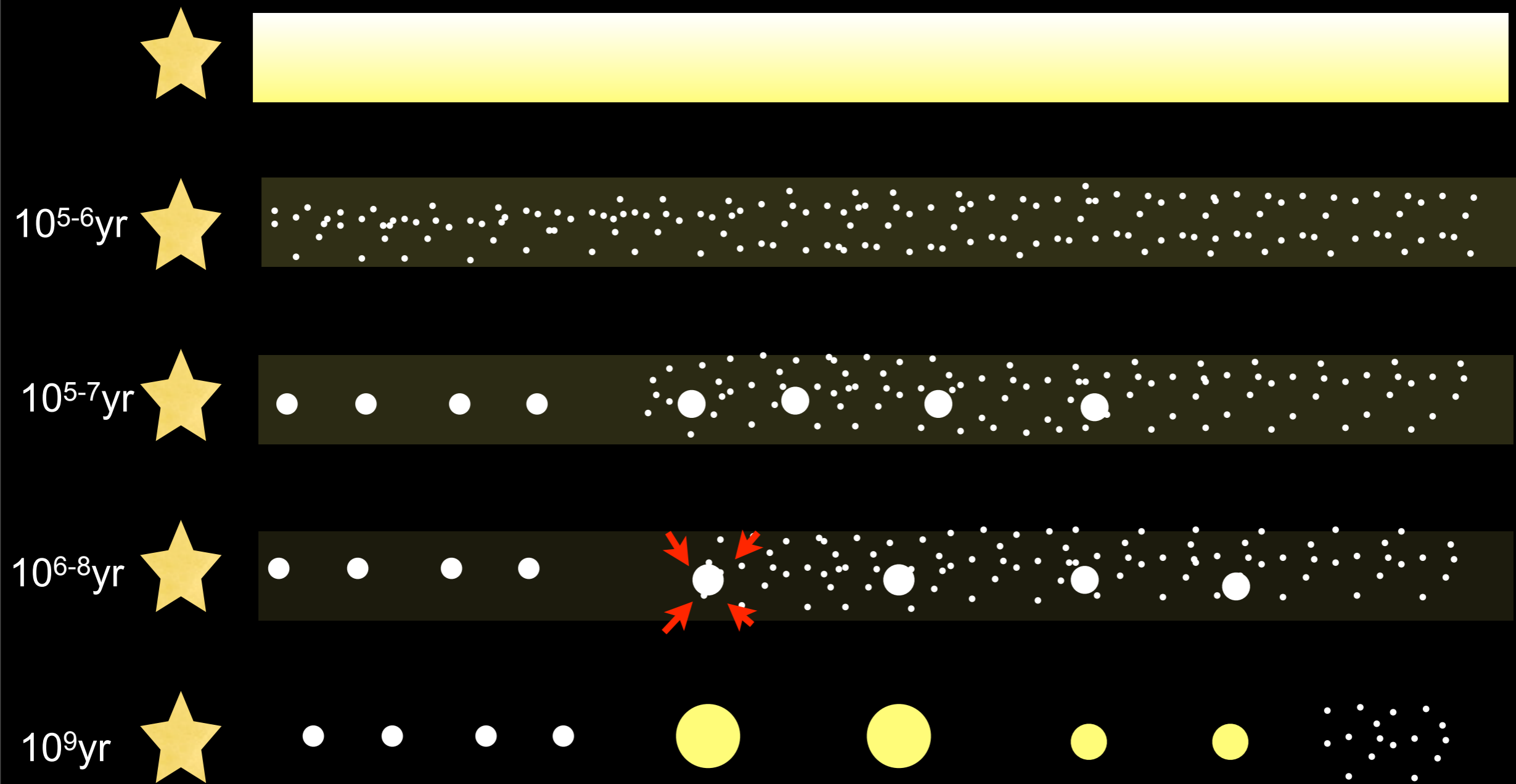
©2009 Google - 画像 ©2009 TerraMetrics, 地図データ ©2009 PPWK, Terra Atlas

google map

内容

- 惑星形成における破壊
- cratering v.s. catastrophic
- 破壊を考慮した惑星形成
- まとめ
- 議論：ガス惑星形成

惑星形成標準モデル



破壊の重要性

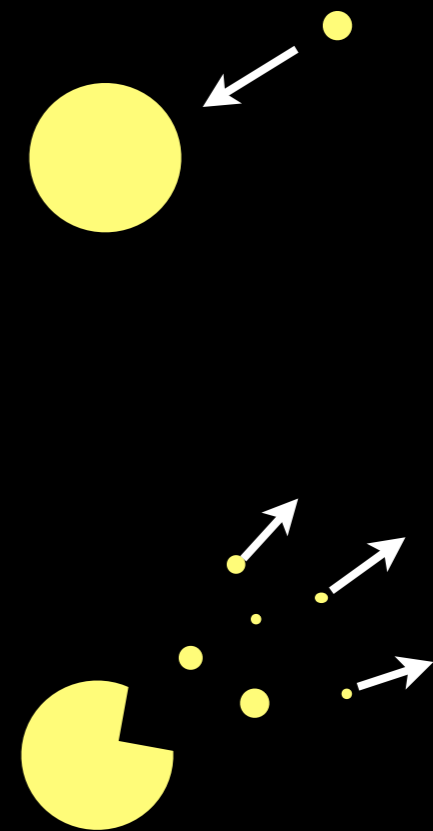
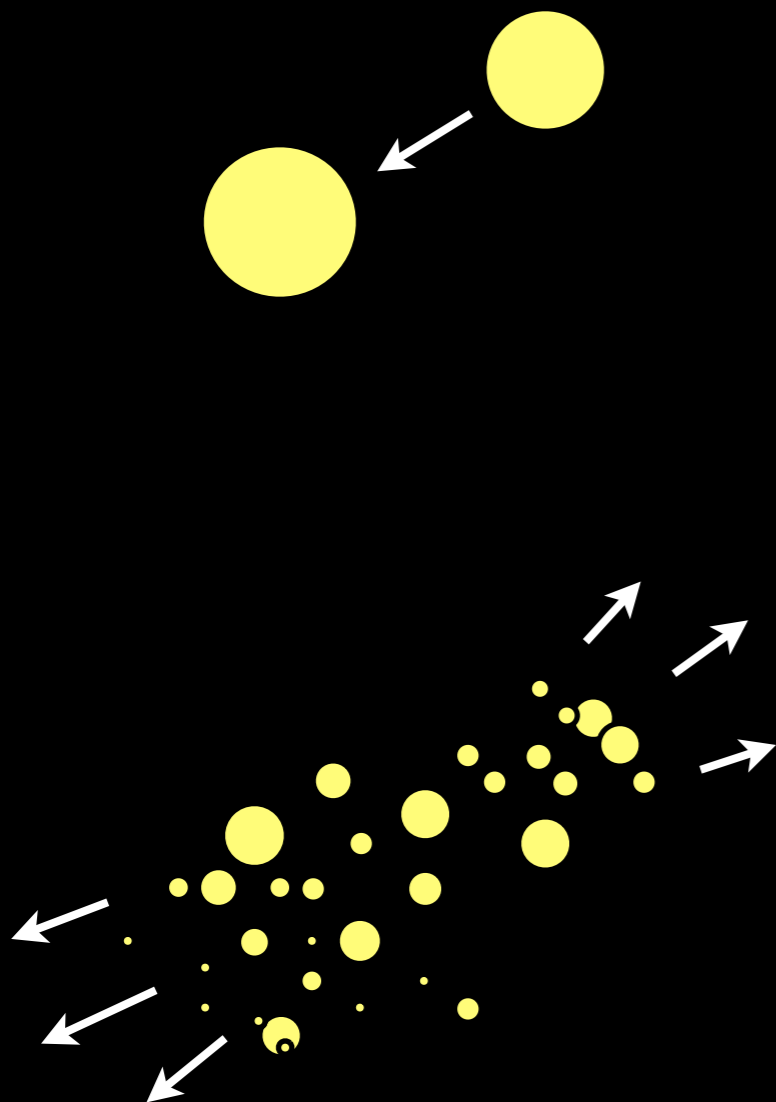
- 惑星形成後期になると、微惑星の衝突速度が原始惑星の重力により大きくなり、微惑星は衝突・破壊を起こす。
- 破片は次々に衝突を繰り返し、小さくなる。
- 小さい天体はガス抵抗により消失する。
- その結果、衝突カスケードは天体の面密度を減少させる。

破壊の種類

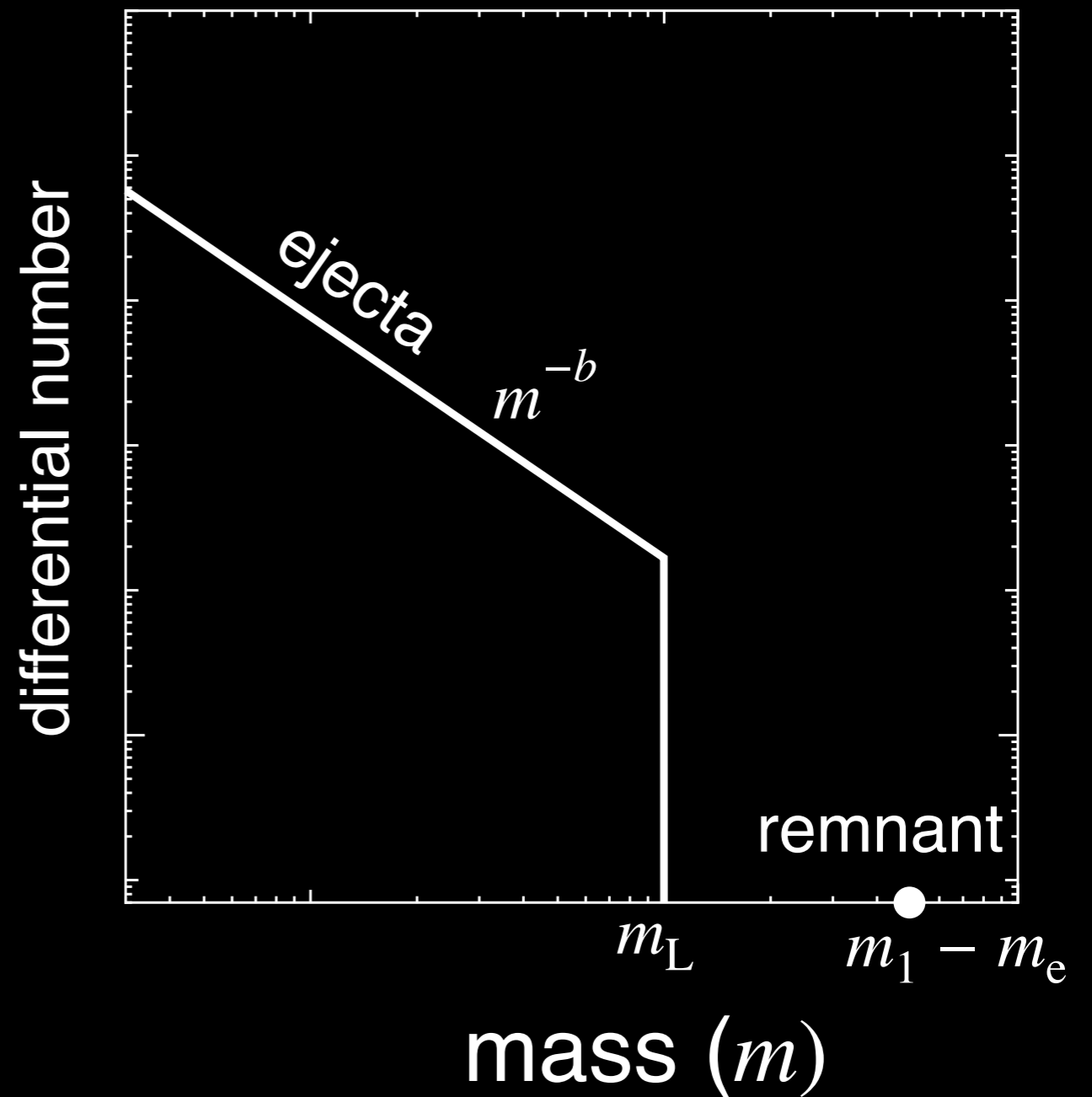
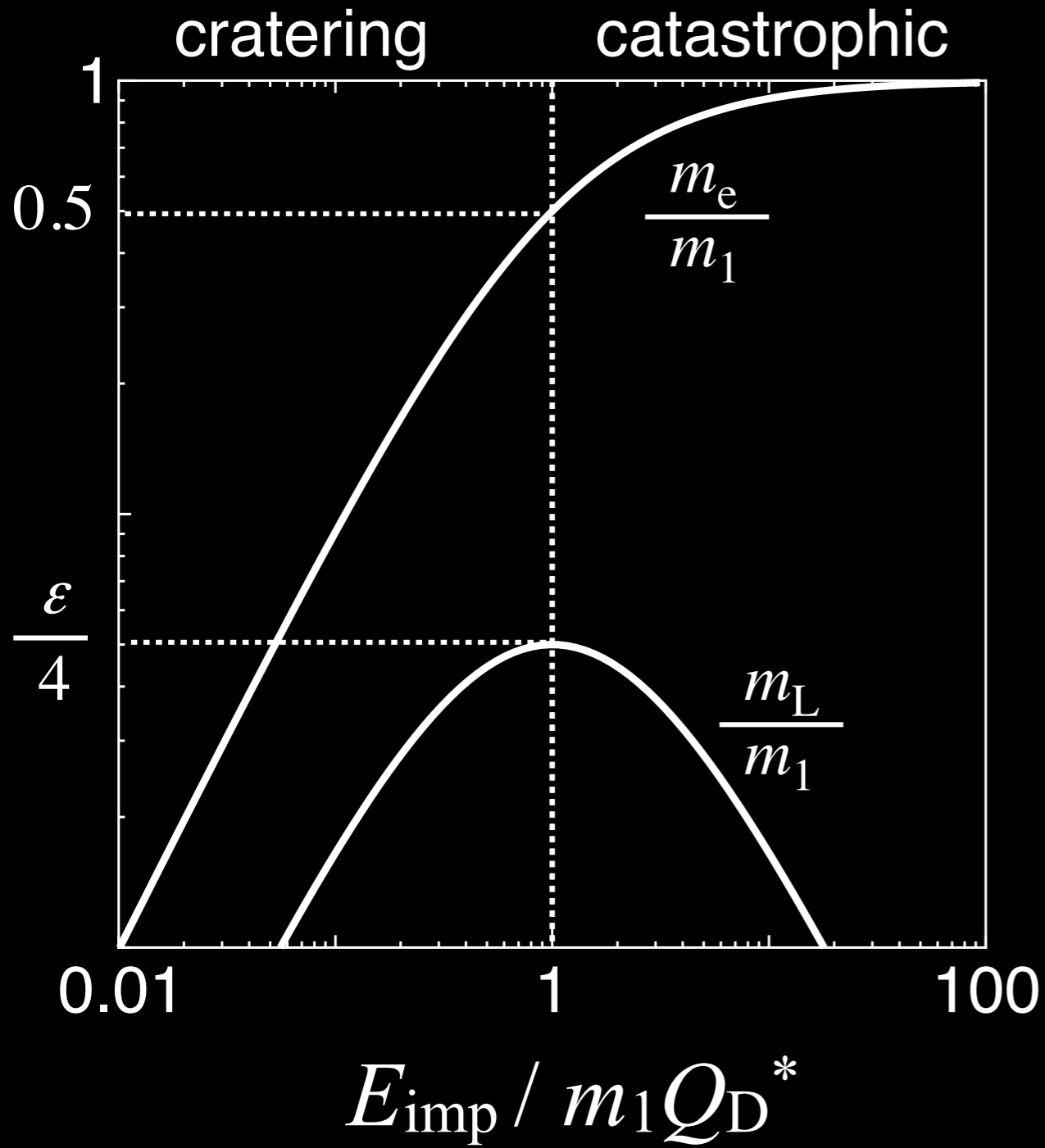
catastrophic

cratering

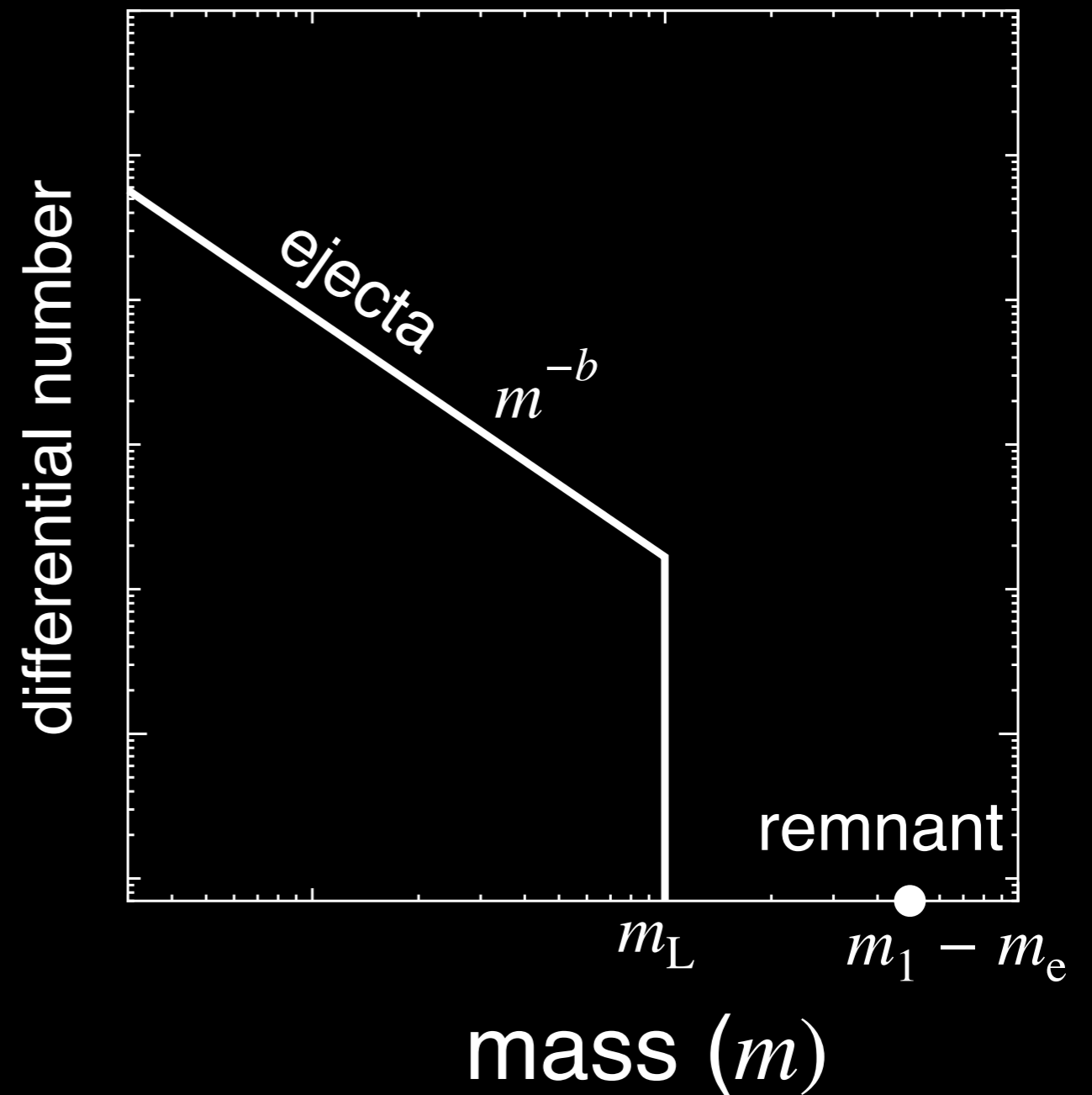
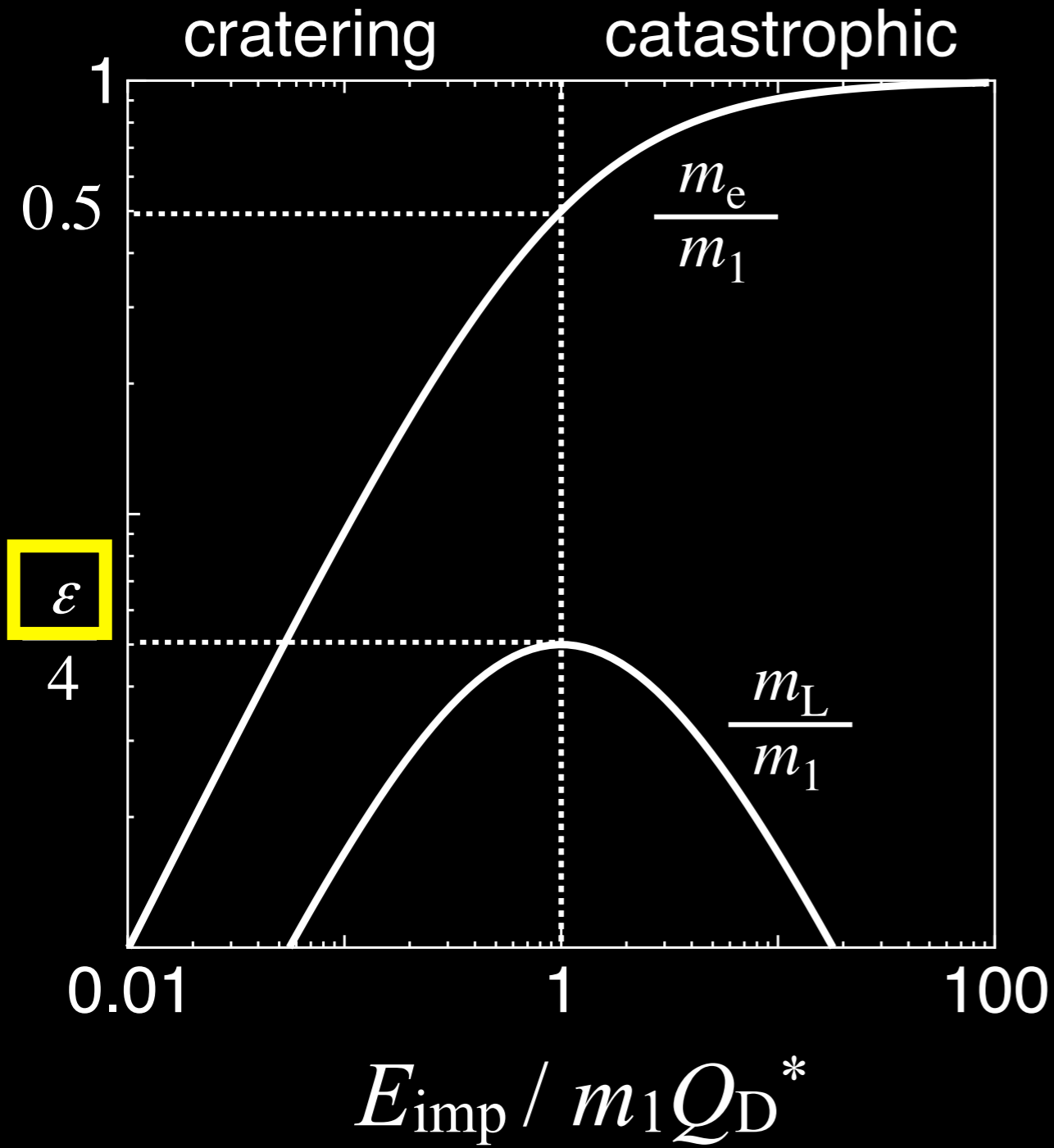
Q_D^*



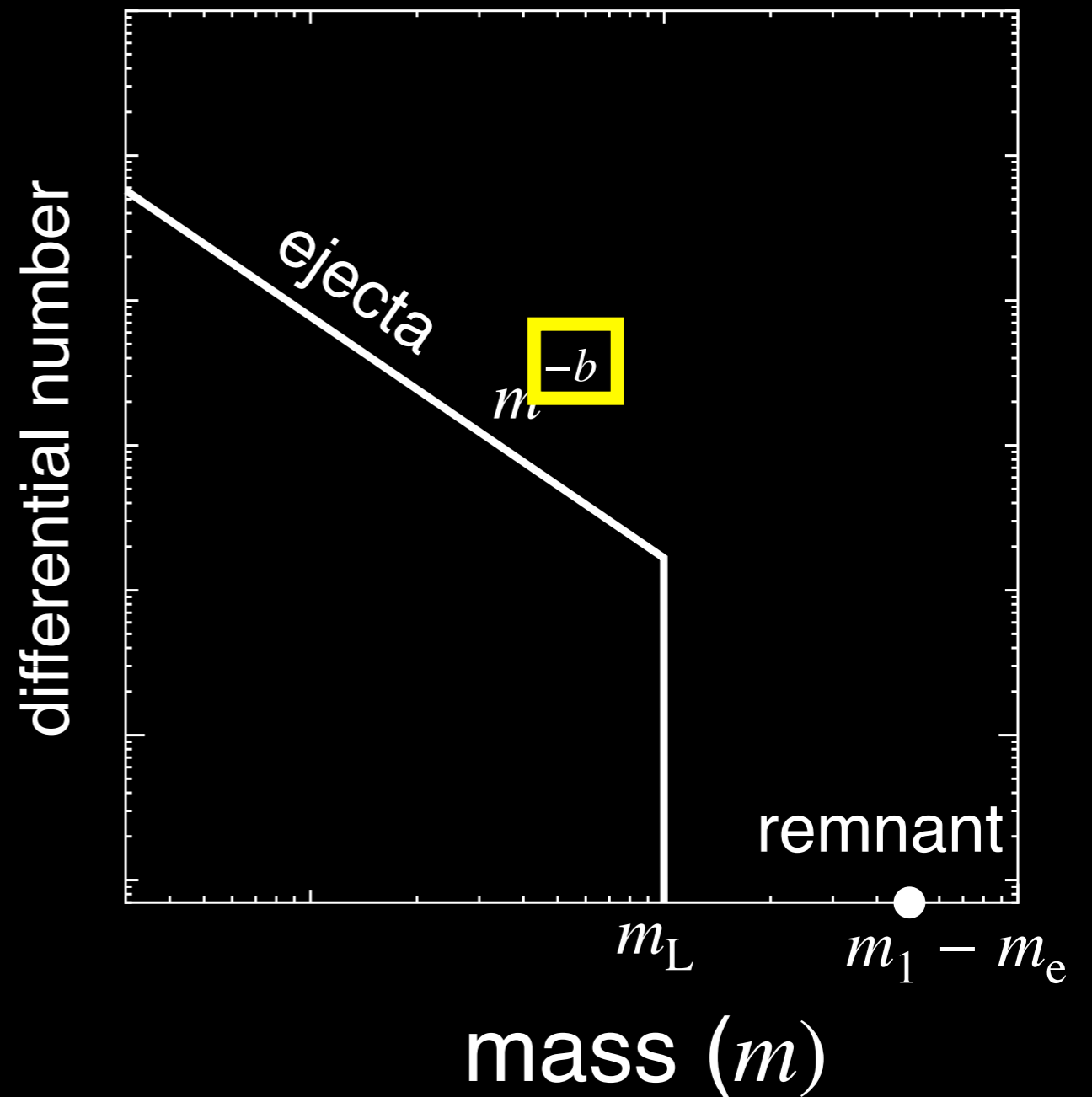
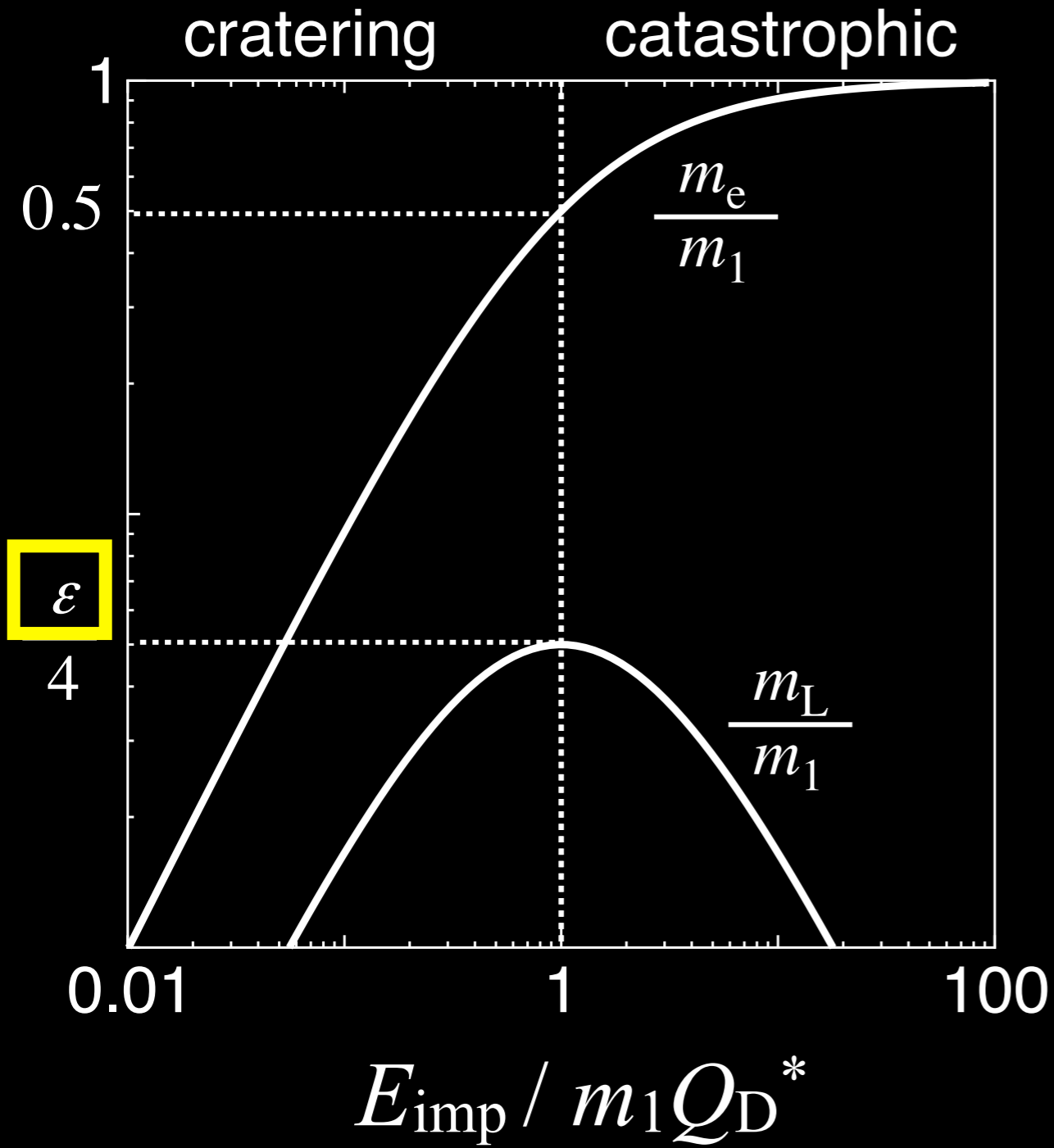
破片のモデル



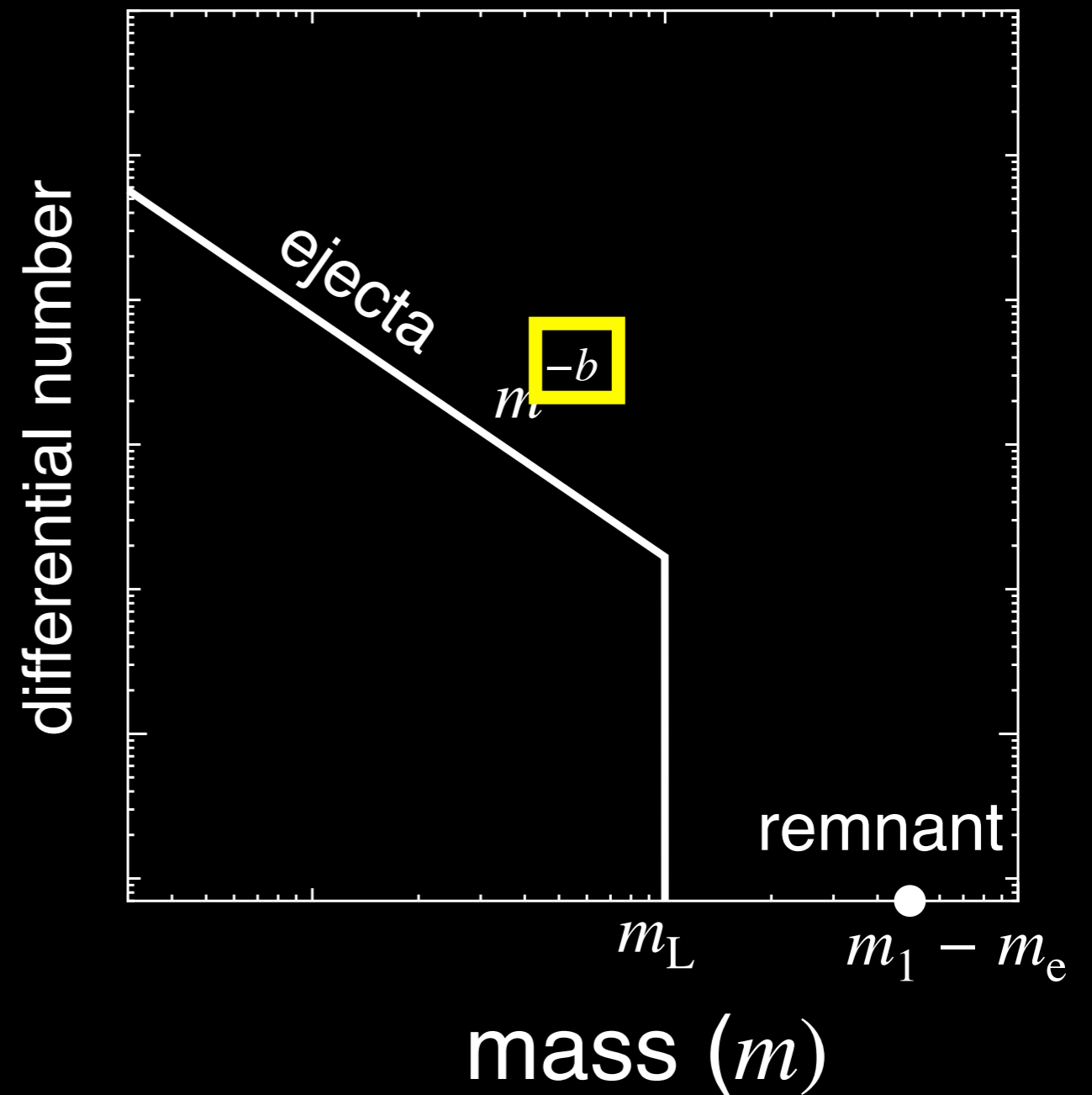
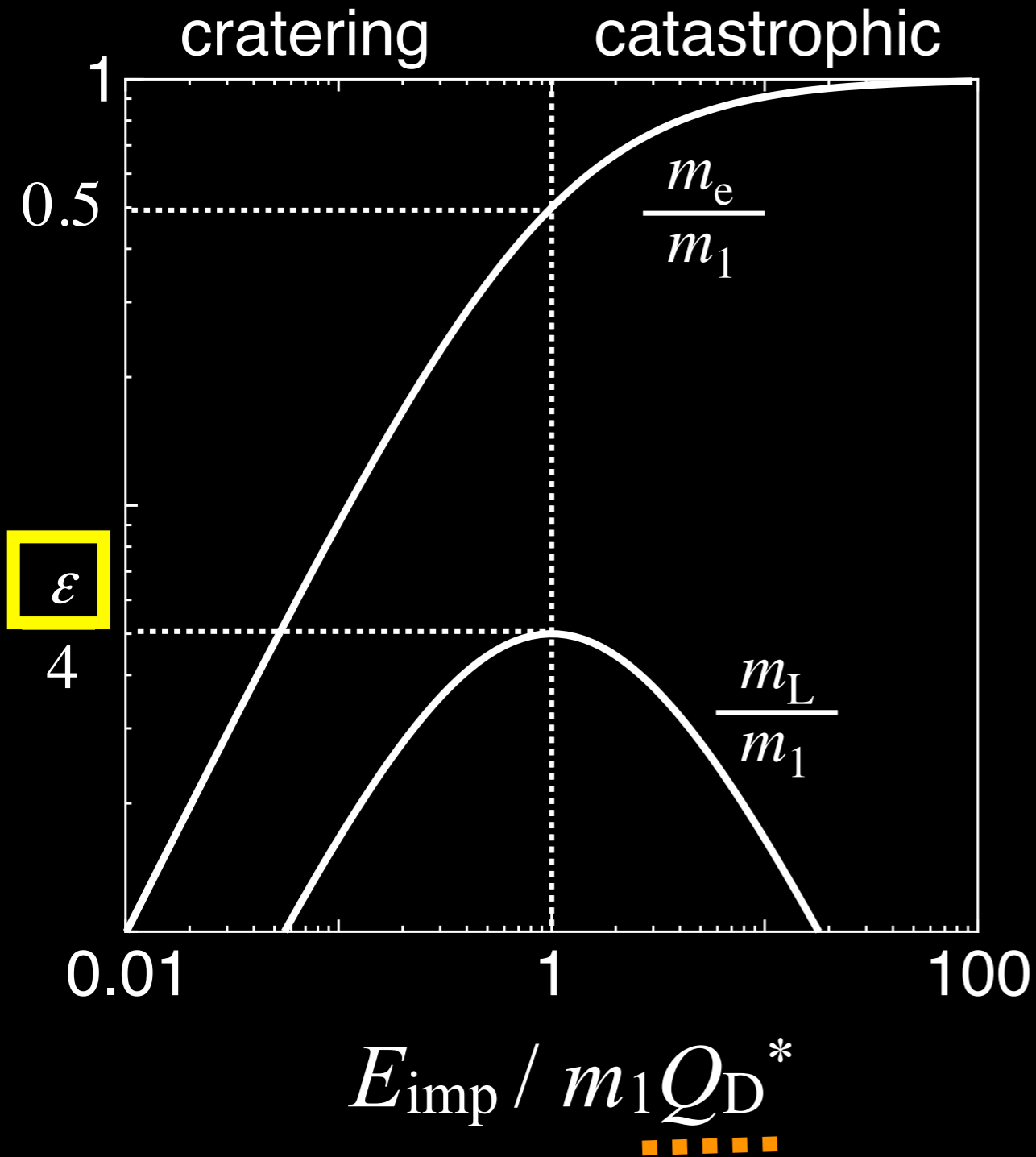
破片のモデル



破片のモデル



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

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

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

減少時間

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

減少時間

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

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

減少時間

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

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

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

減少時間

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

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

衝突時間

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

減少時間

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

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

衝突時間

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

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

減少時間

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

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

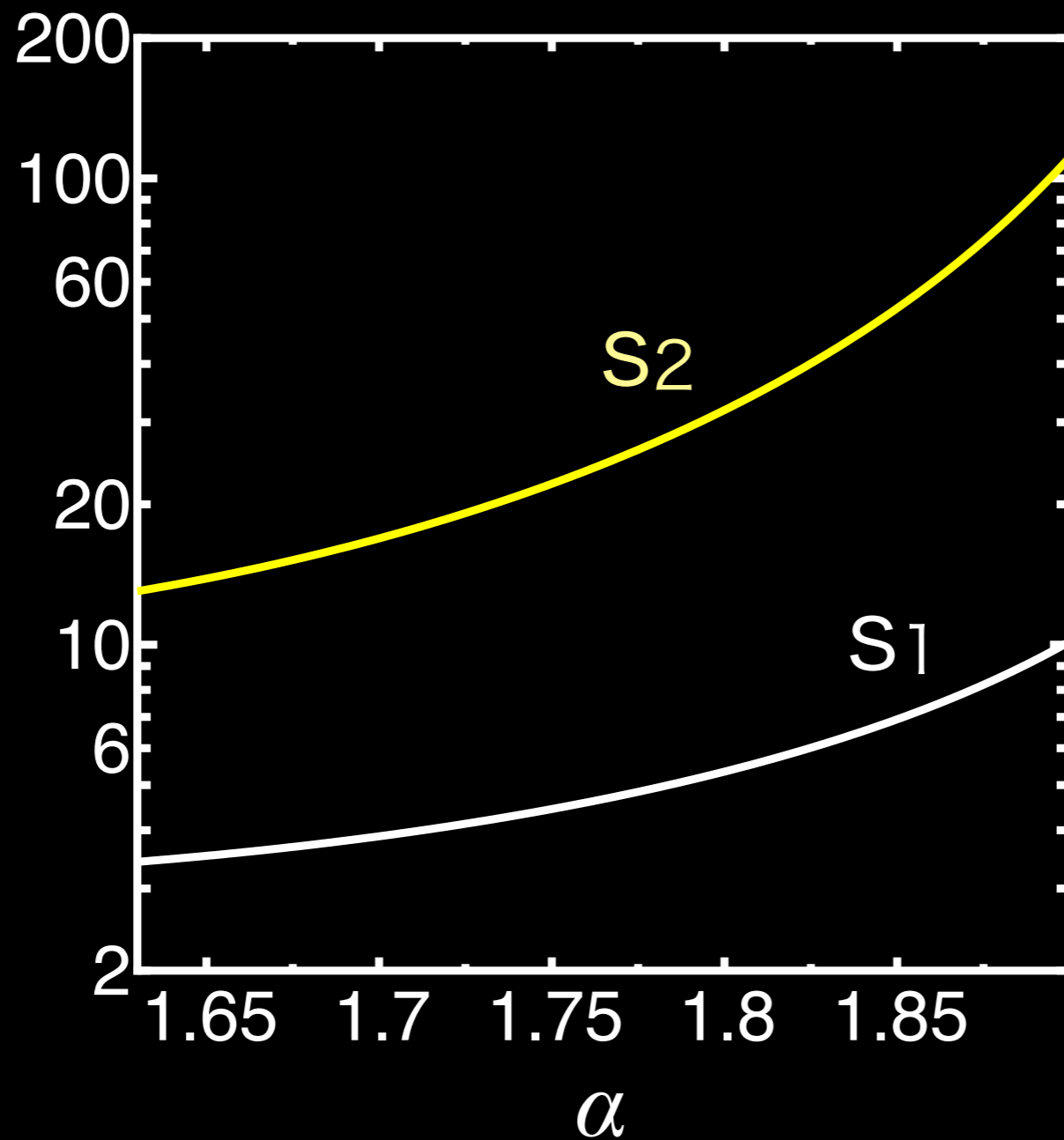
衝突時間

(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

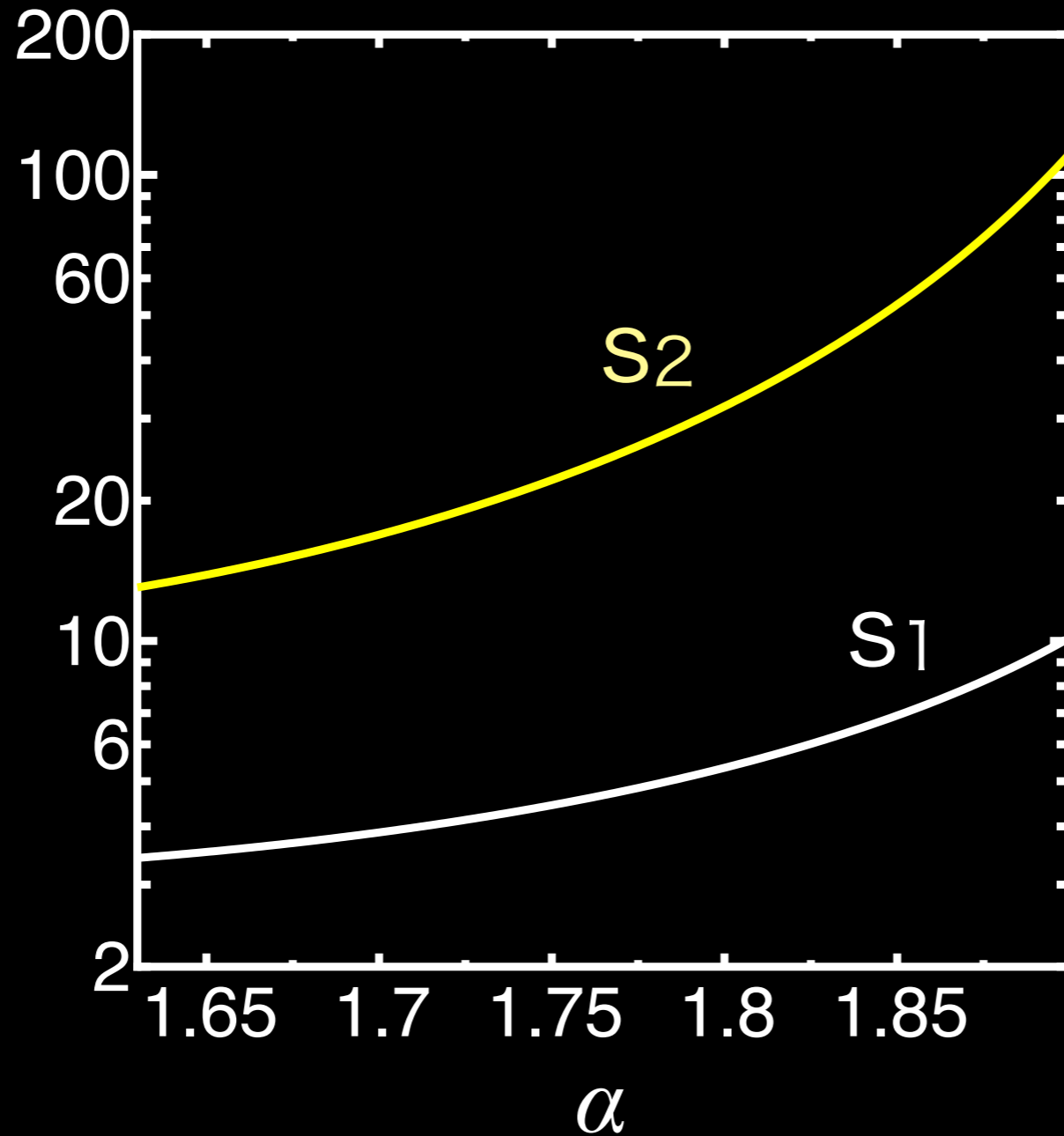


$$\frac{v^2}{Q_D^*} \propto m^{-p}$$

$$\alpha = \frac{11 + 3p}{6 + 3p}$$

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

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。

mass depletion

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

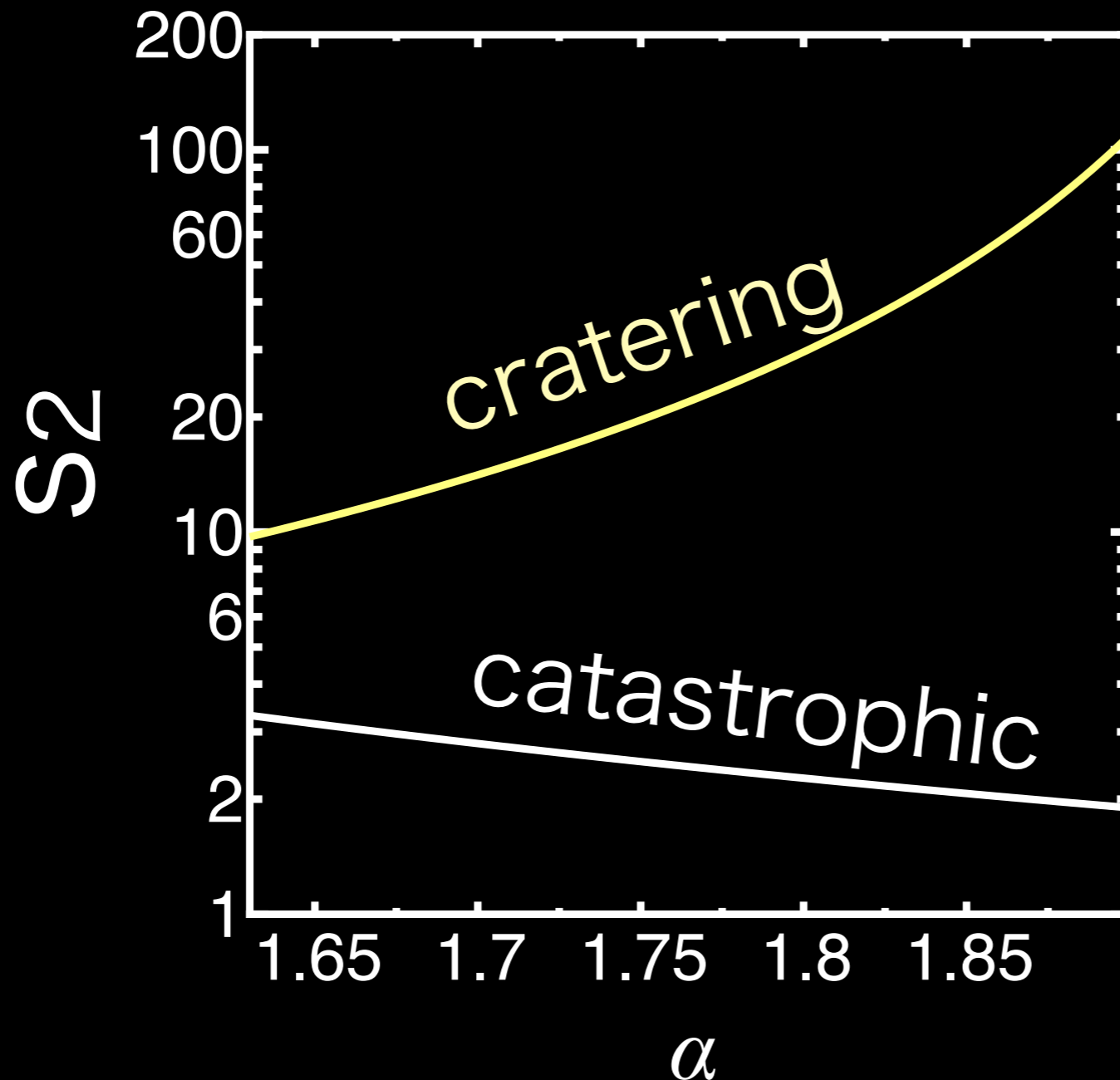
$$\tau_{\text{dep}} = \frac{m_{\text{max}}^{\frac{1}{3}}}{(2 - \alpha)^2 \Sigma_0 h_0 \Omega_{\text{K}}} \left(\frac{v(m_{\text{max}})^2}{2Q_{\text{D}}^*(m_{\text{max}})} \right)^{-\alpha+1} \\ \times \left[\left(-\ln \epsilon + \frac{1}{2 - b} \right) s_1(\alpha) + s_2(\alpha) \right]^{-1}.$$

mass depletion

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

$$\tau_{\text{dep}} = \frac{m_{\text{max}}^{\frac{1}{3}}}{(2 - \alpha)^2 \Sigma_0 h_0 \Omega_K} \left(\frac{v(m_{\text{max}})^2}{2Q_D^*(m_{\text{max}})} \right)^{-\alpha+1} \\ \times \left[\left(\frac{1}{-11\epsilon + \frac{1}{2-b}} \right) s_1(\alpha) + s_2(\alpha) \right]^{-1}.$$

cratering v.s. catastrophic



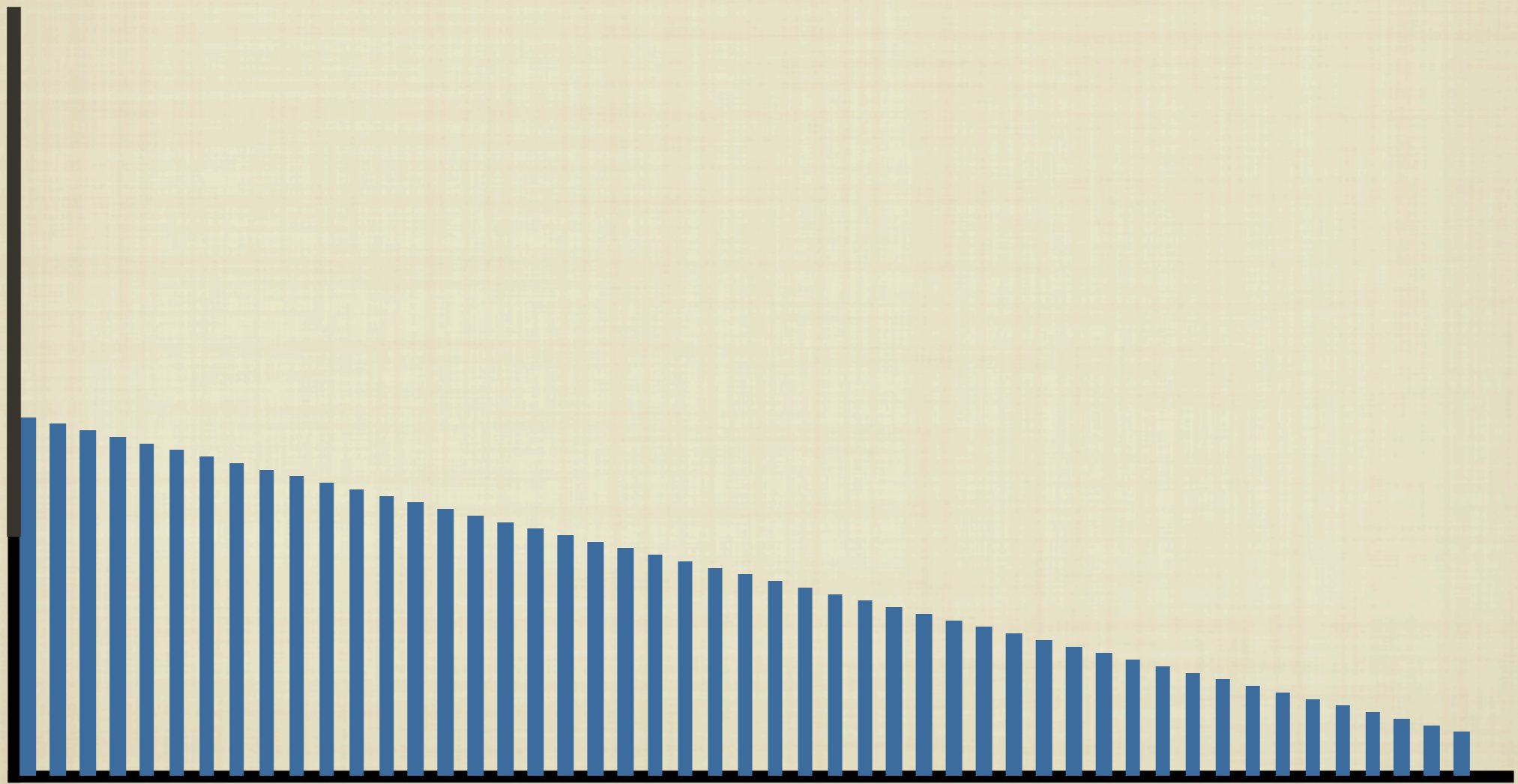
$$\frac{v^2}{Q_D^*} \propto m^{-p}$$
$$\alpha = \frac{11 + 3p}{6 + 3p}$$

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

4-50 倍crateringの方が効く

統計的シミュレーション

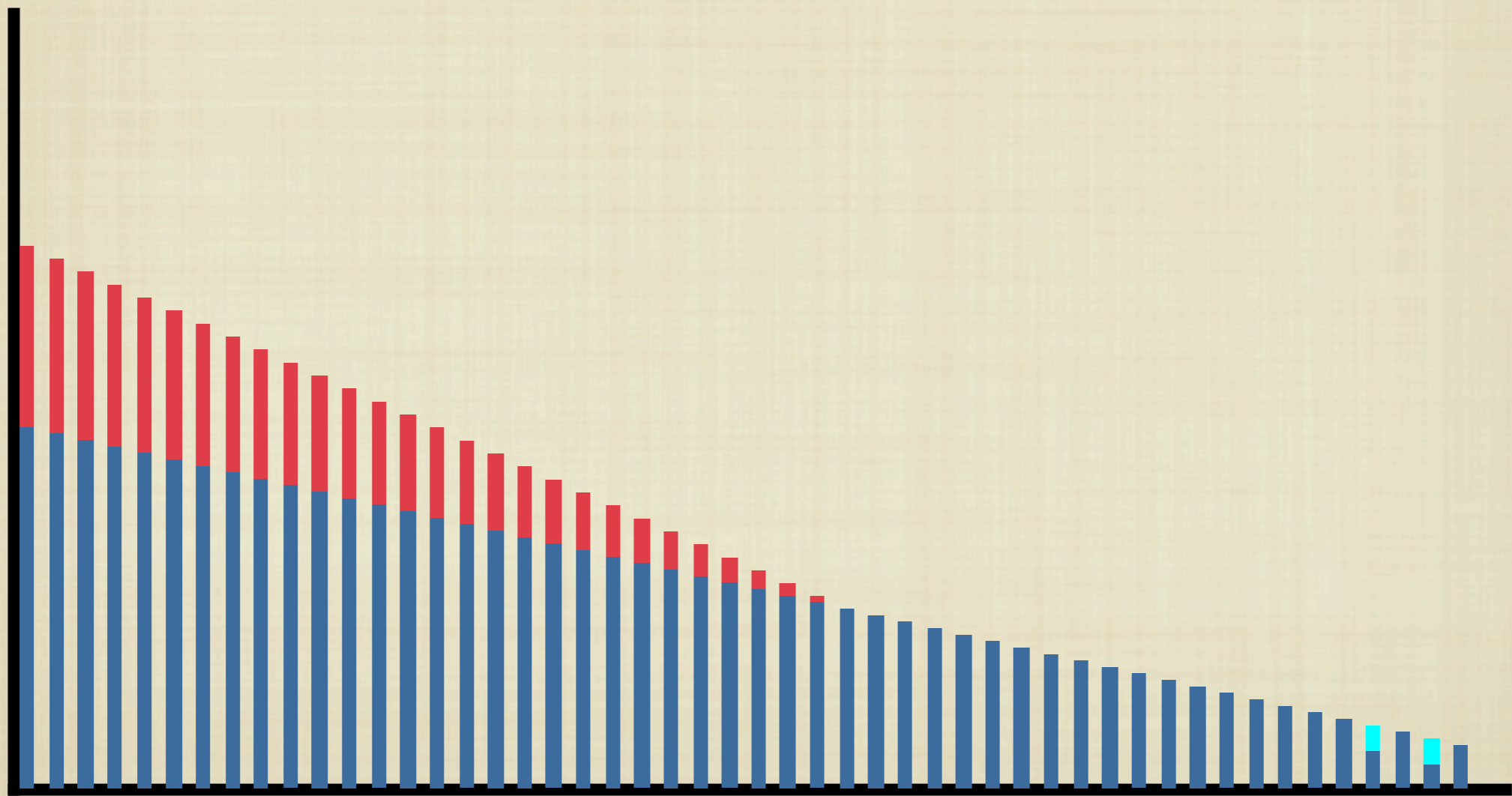
個数



質量

統計的シミュレーション

個数



質量

シミュレーションとの比較

破壊しきい値

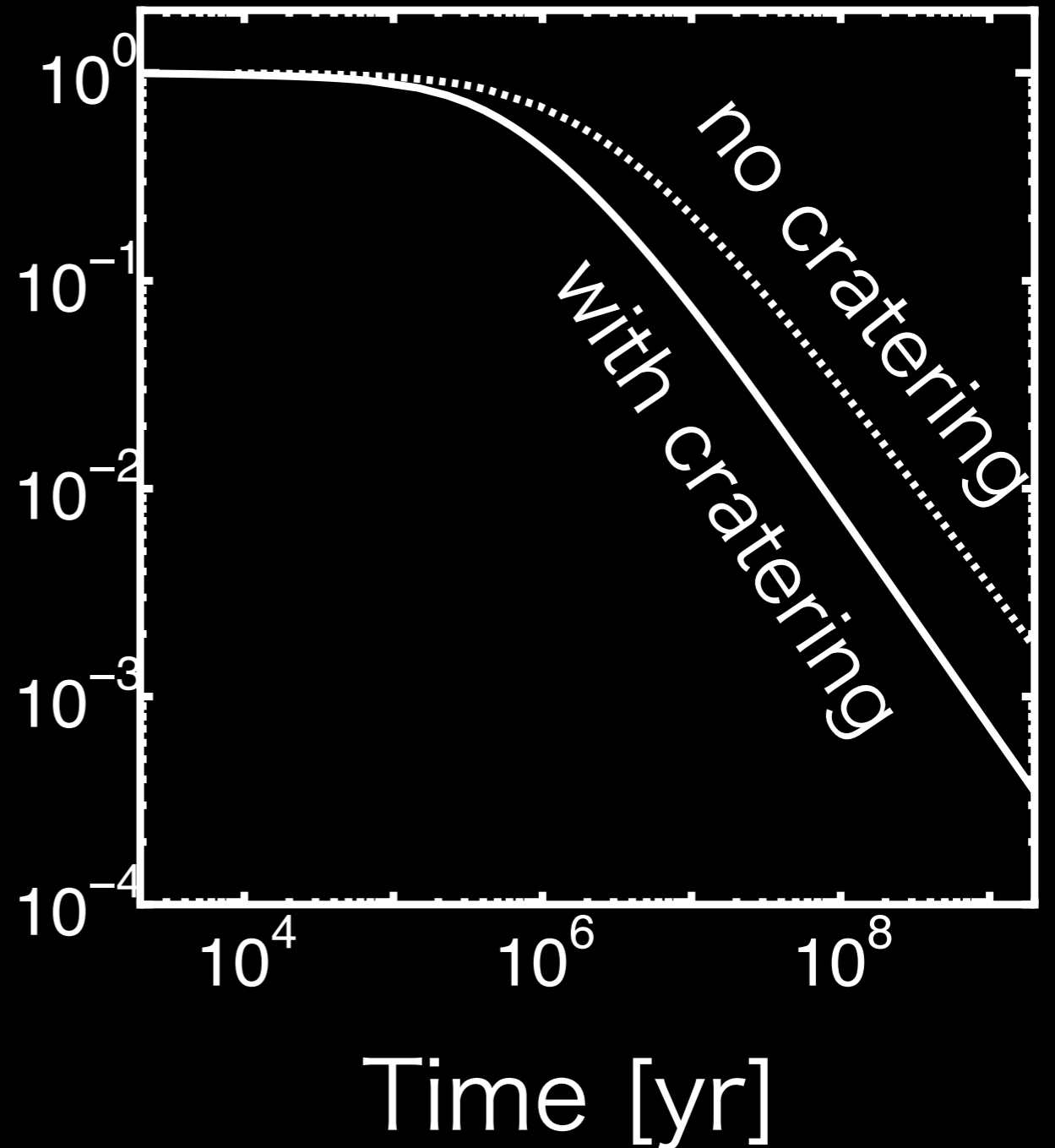
$$Q_D^* = 3.5 \times 10^7 \left(\frac{r_1}{1 \text{ cm}} \right)^{-0.38} + 0.3 \left(\frac{\rho}{1 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left(\frac{r_1}{1 \text{ cm}} \right)^{1.36} \text{ [erg/g]}$$

(Benz and Asphaug 1999)

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

初期総質量: M_{Earth}

面密度/初期面密度



シミュレーションとの比較

破壊しきい値

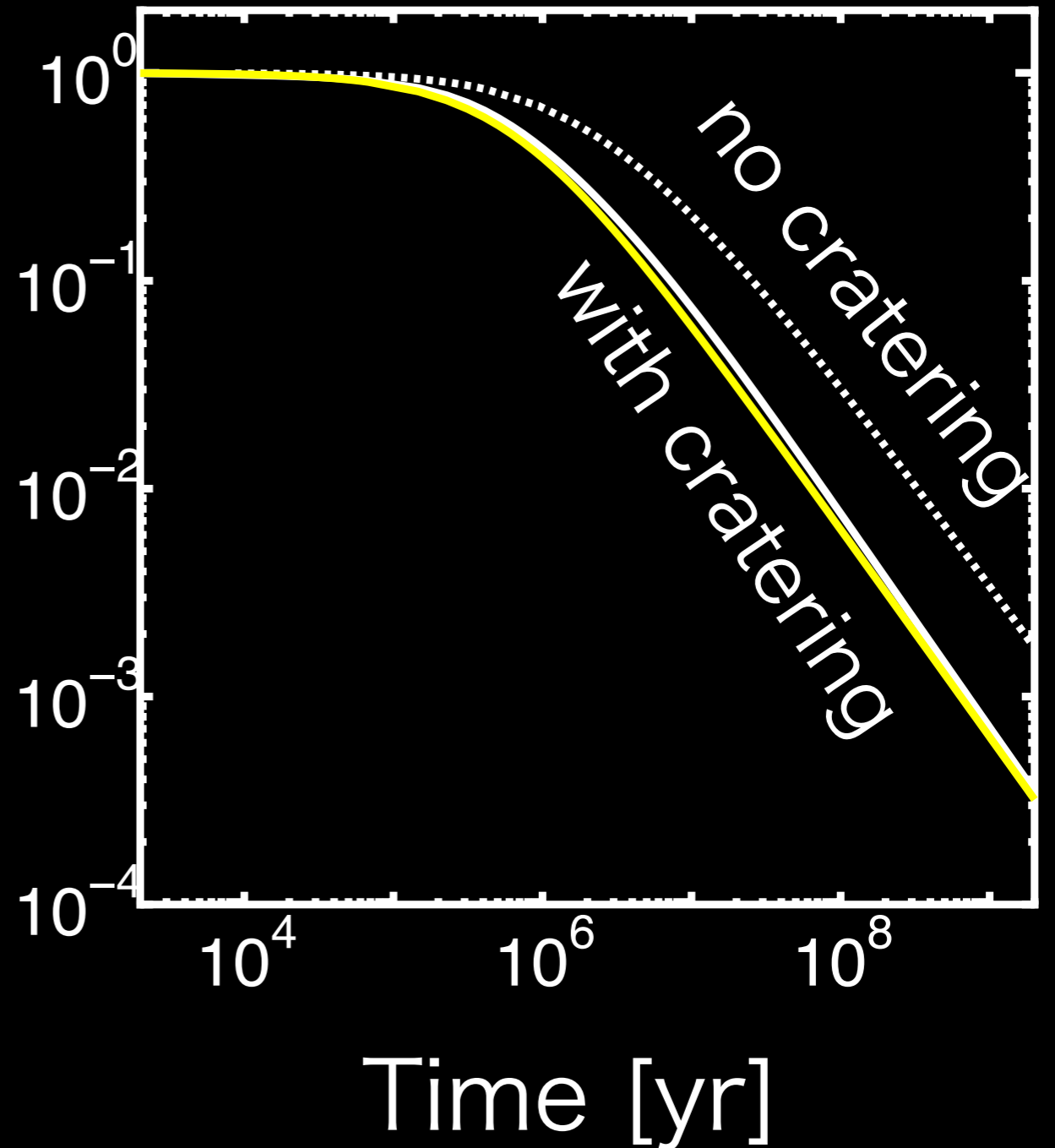
$$Q_D^* = 3.5 \times 10^7 \left(\frac{r_1}{1 \text{ cm}} \right)^{-0.38} + 0.3 \left(\frac{\rho}{1 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left(\frac{r_1}{1 \text{ cm}} \right)^{1.36} \text{ [erg/g]}$$

(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

統計的シミュレーション

統計的シミュレーション

- 質量座標を細かいビンに切り、ビンの中の天体の数の衝突による進化を計算する。

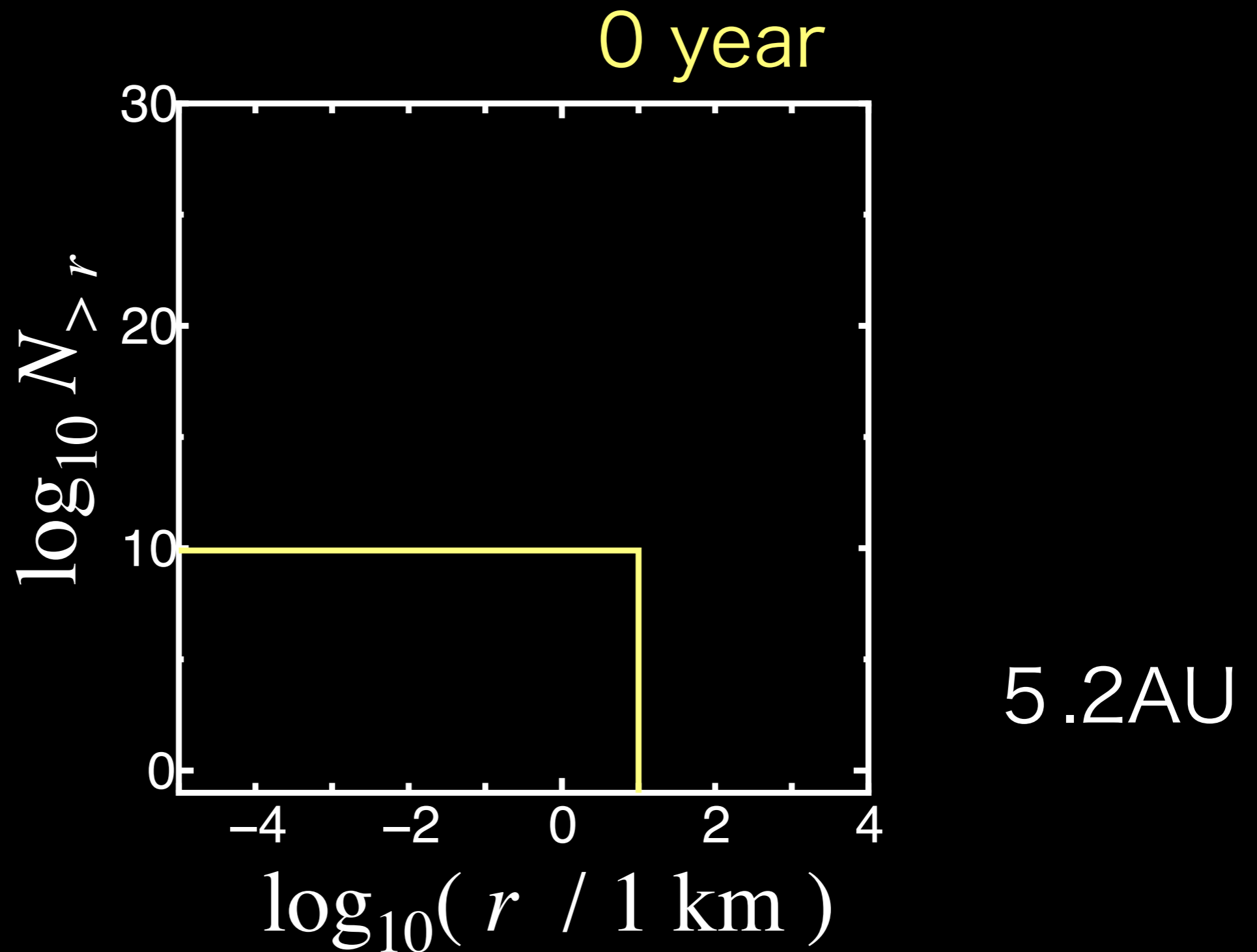
統計的シミュレーション

- 質量座標を細かいビンに切り、ビンの中の天体の数の衝突による進化を計算する。
- ビンの天体の速度(離心率、傾斜角)も天体の質量分布の進化に応じて変化するので、同時に計算する。

統計的シミュレーション

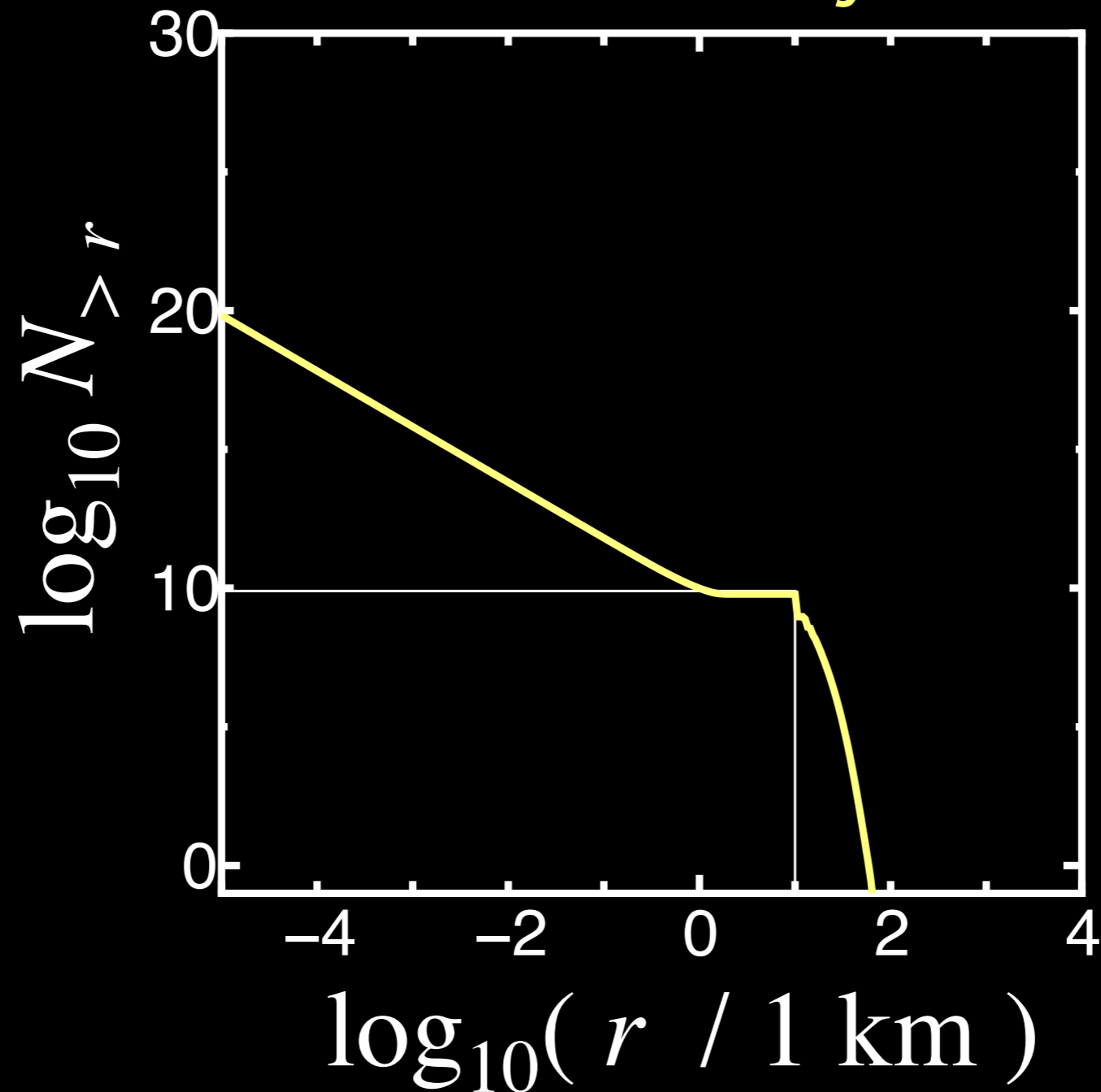
- 質量座標を細かいビンに切り、ビンの中の天体の数の衝突による進化を計算する。
- ビンの天体の速度(離心率、傾斜角)も天体の質量分布の進化に応じて変化するので、同時に計算する。
- 動径方向にもメッシュを切り、天体のガス抵抗の移動による変化も計算する。

惑星形成中の質量分布



惑星形成中の質量分布

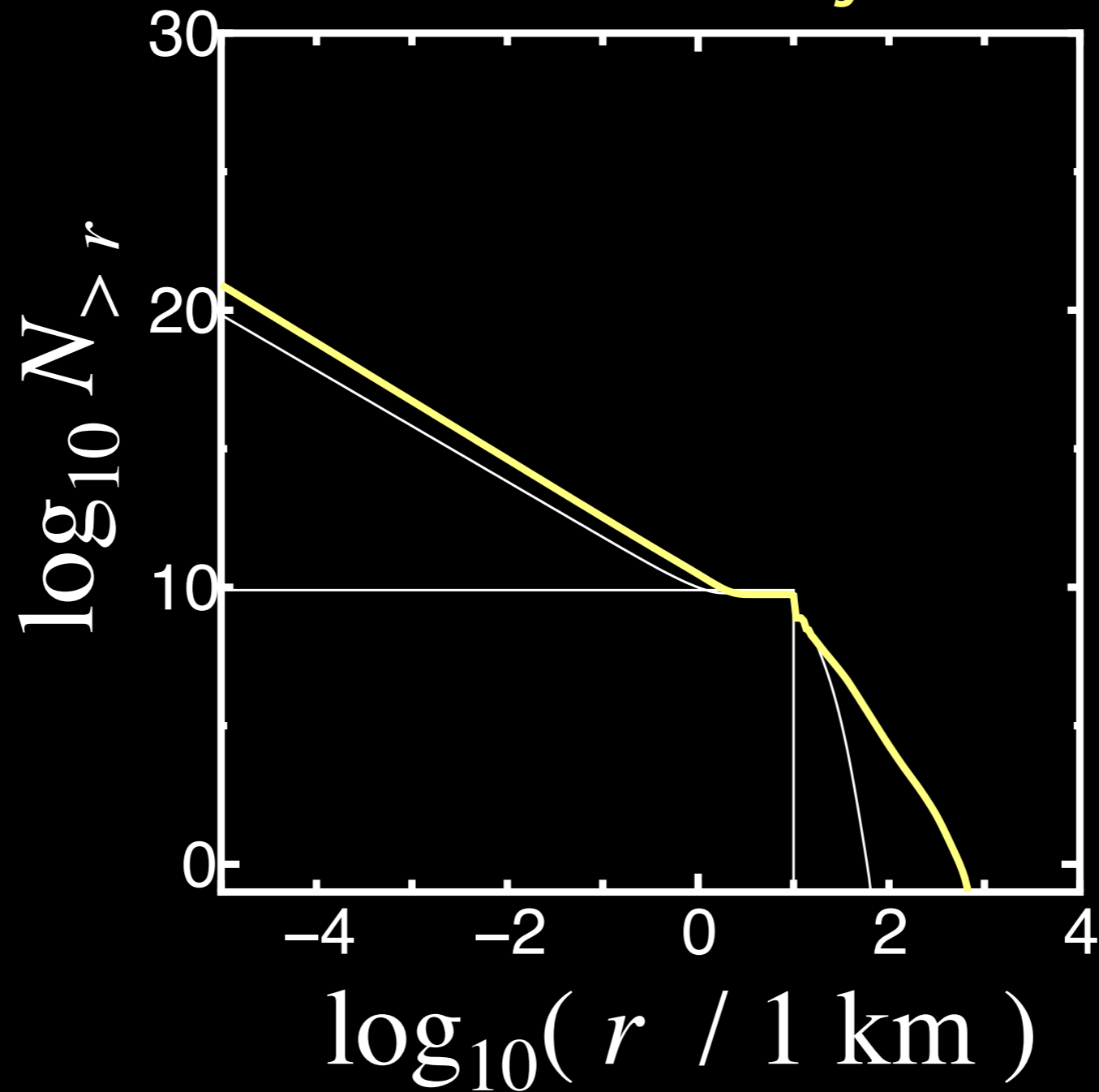
3.2×10^4 year



5.2AU

惑星形成中の質量分布

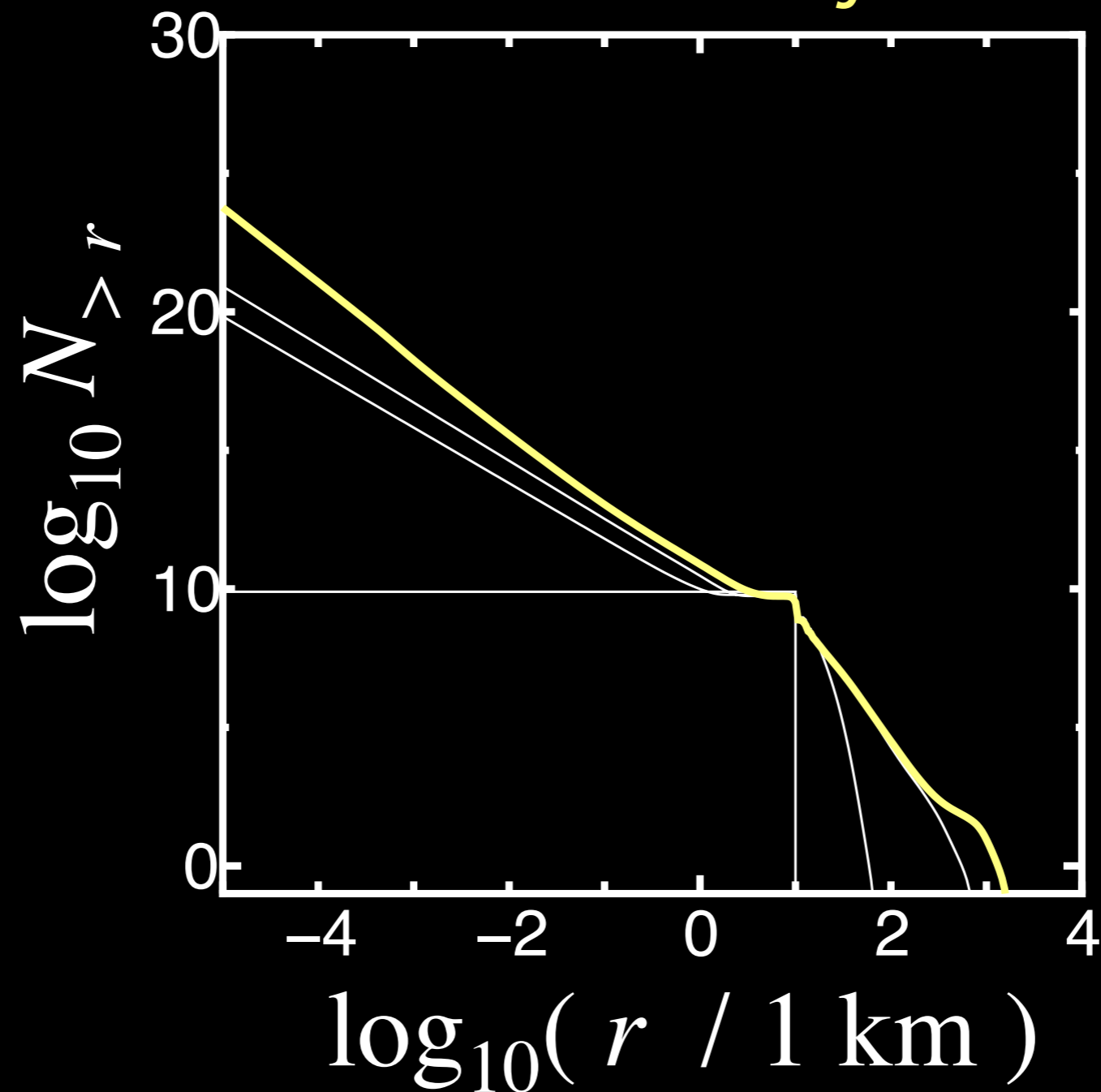
2.6×10^5 year



5.2AU

惑星形成中の質量分布

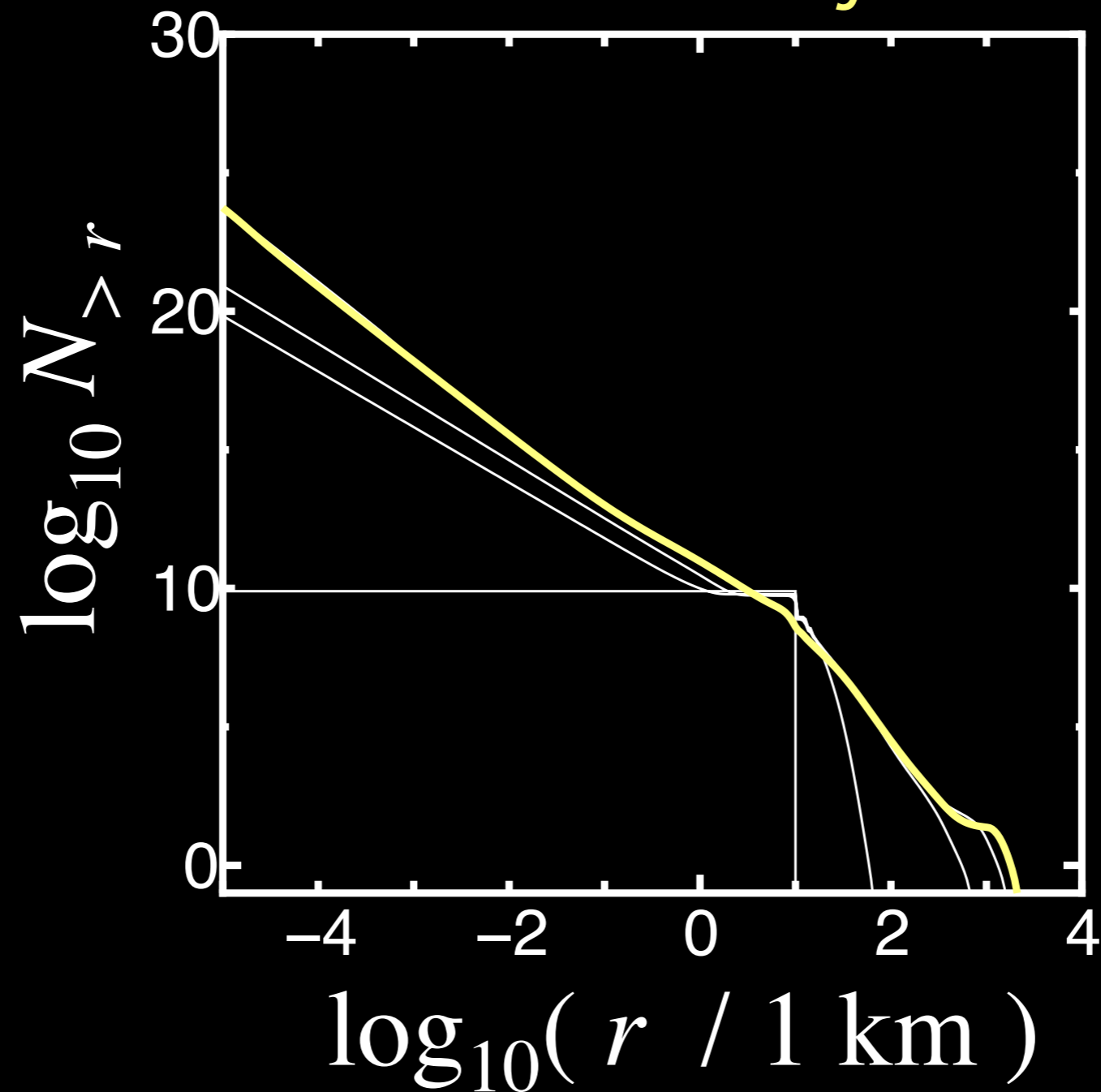
5.0×10^5 year



5.2AU

惑星形成中の質量分布

1.2×10^6 year



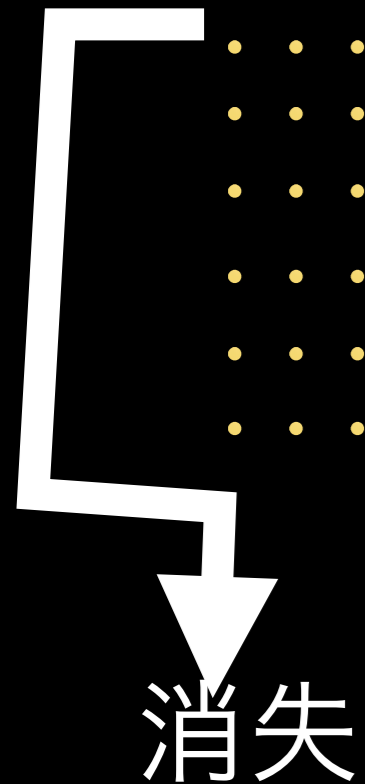
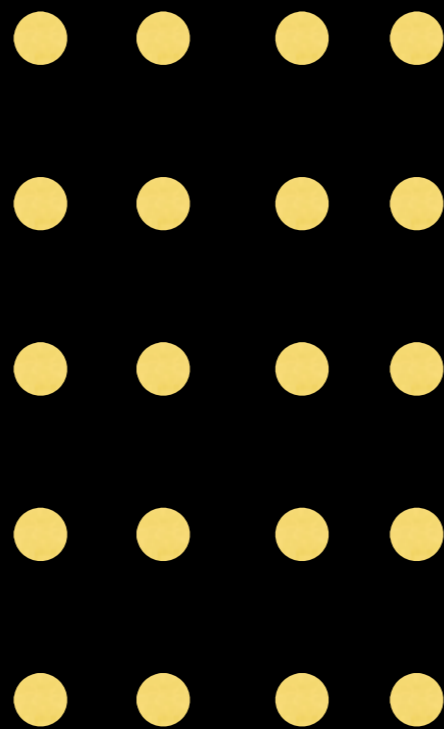
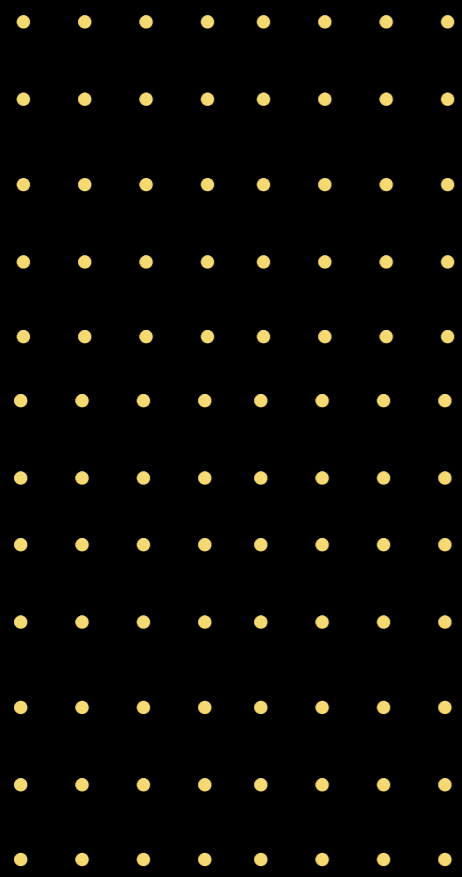
5.2AU

破壊を考慮した惑星形成

破片

微惑星

原始惑星



消失

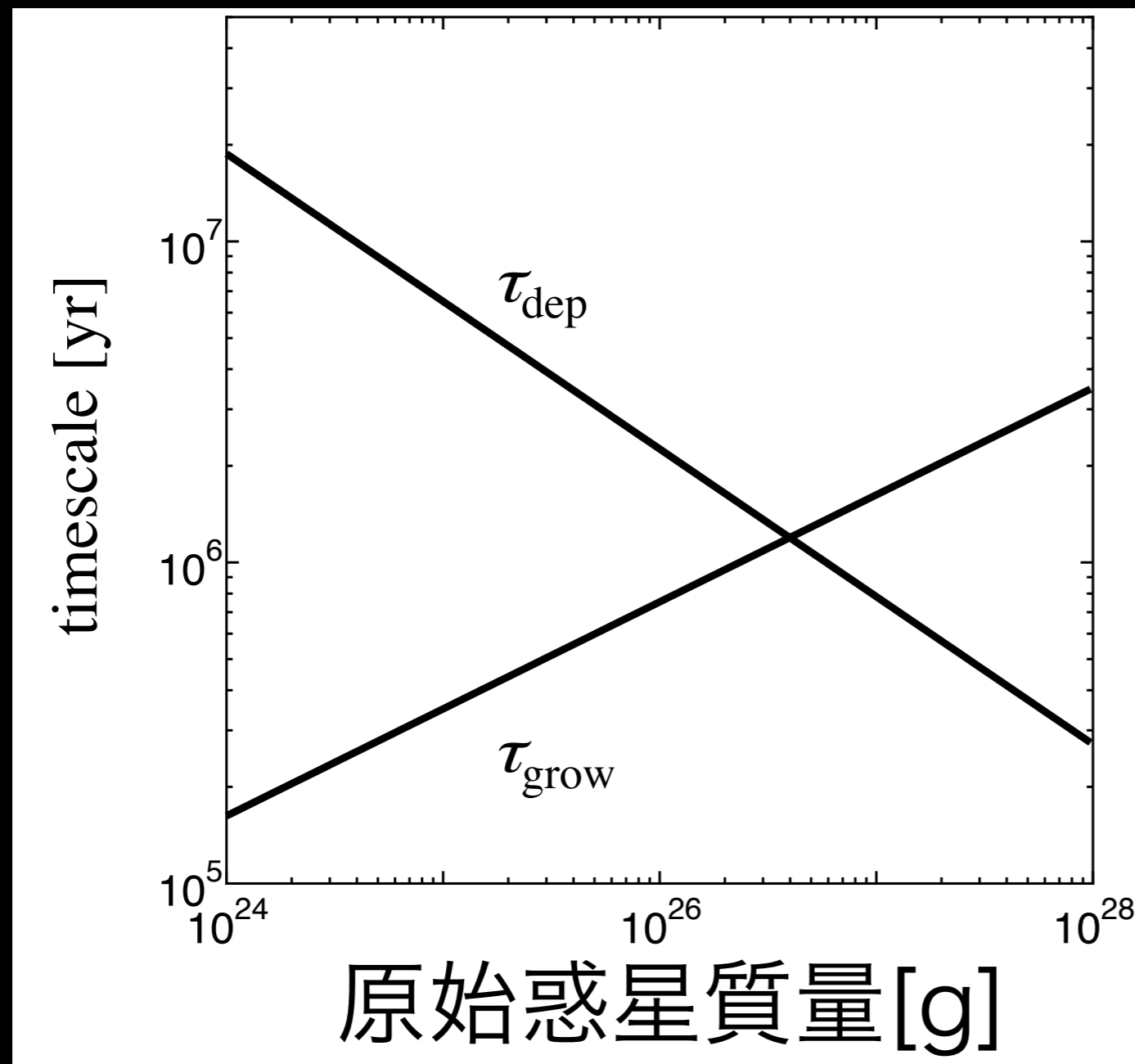
τ_{dep}

Kobayashi and Tanaka (2009)

τ_{grow}

Kokubo and Ida (2002)

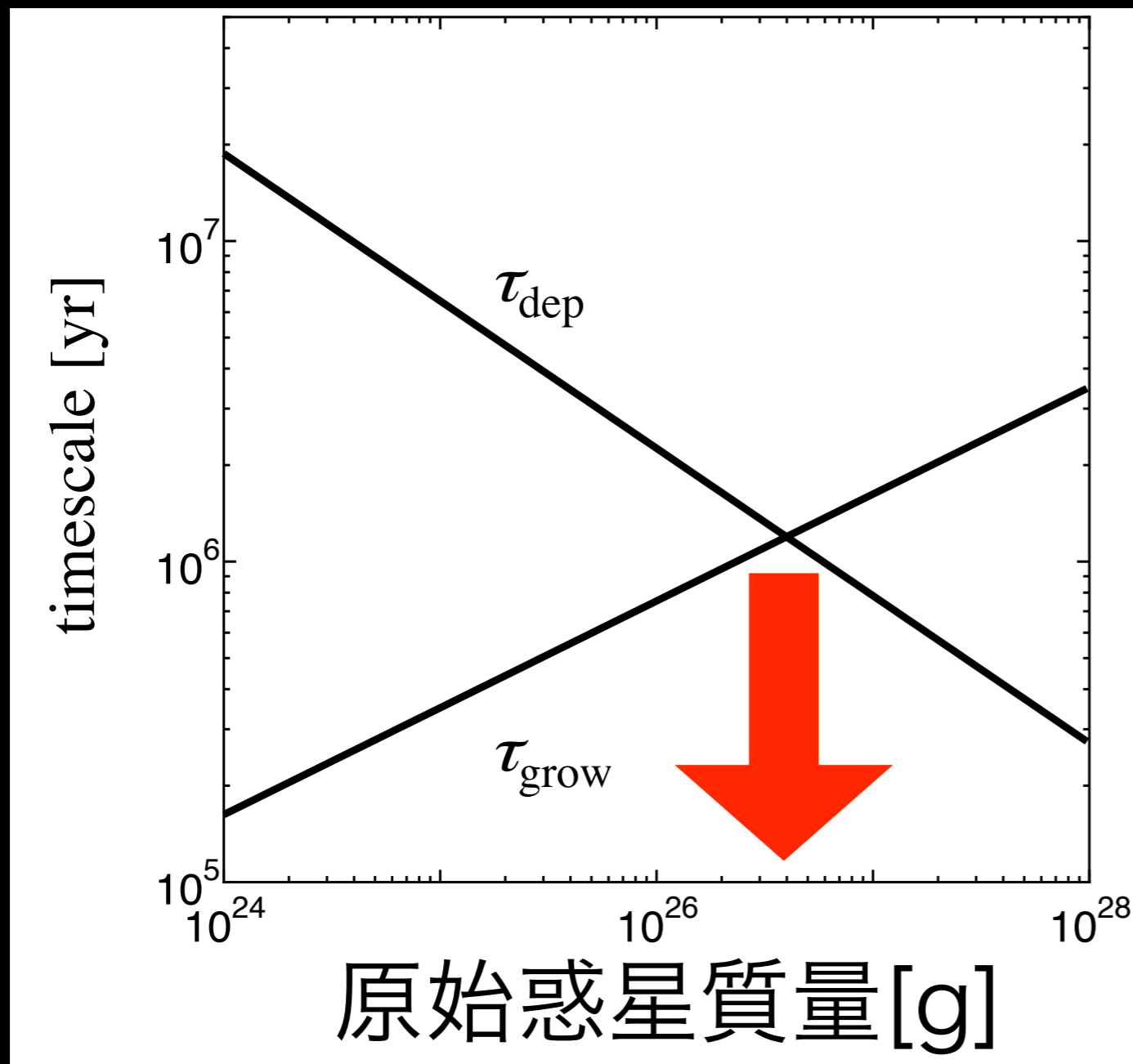
最終原始惑星質量



$$\tau_{\text{grow}} \gg \tau_{\text{dep}}$$

no more growth

最終原始惑星質量



$$\tau_{\text{grow}} \gg \tau_{\text{dep}}$$

no more growth

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

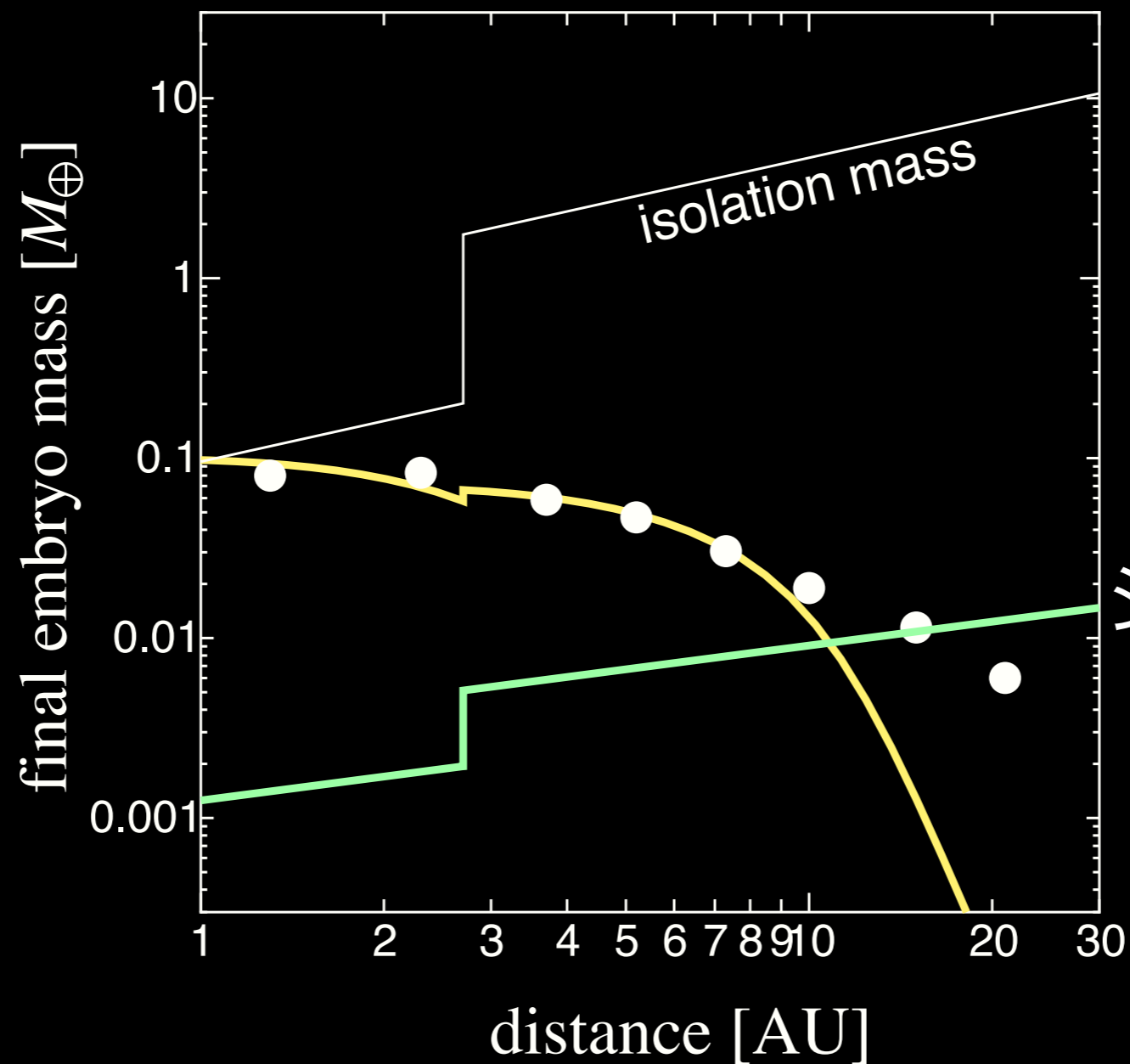
計算条件

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

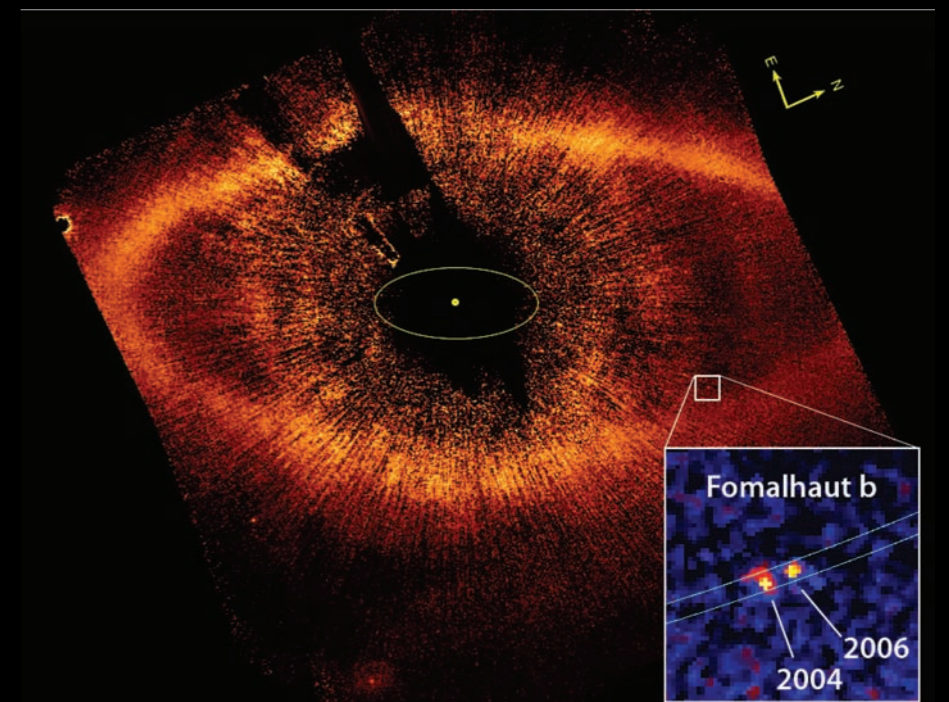
- 衝突カスケードによる面密度減少時間を導出。
- Crateringはcatastrophicより4-50倍重要である。
- 天体消失時間を用いて原始惑星質量を見積もった。
 - 最終質量は火星質量程度。

ガス惑星形成

ガス惑星とデブリ円盤

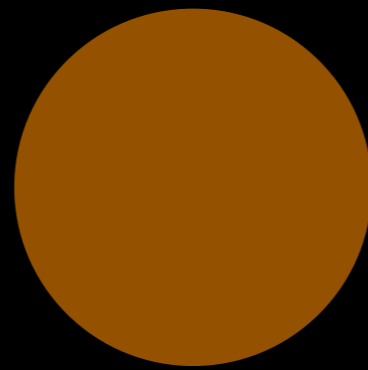
- 惑星形成時の破片がデブリ円盤を作る (e.g., Kenyon and Bromley 2008)
- ガス惑星とデブリ円盤が観測されている (Kalas et al. 2008)

破壊(デブリ円盤)を考慮
したガス惑星形成が重要



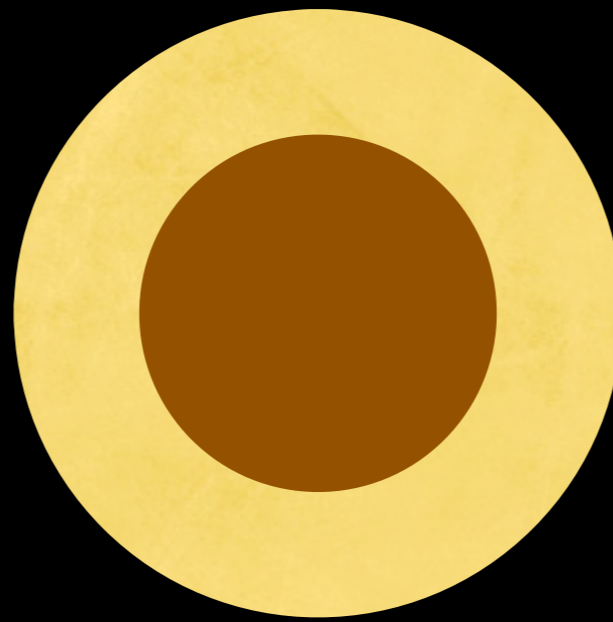
Kalas et al. Science **322**,1345 (2008)

ガス惑星形成の 臨界コア質量



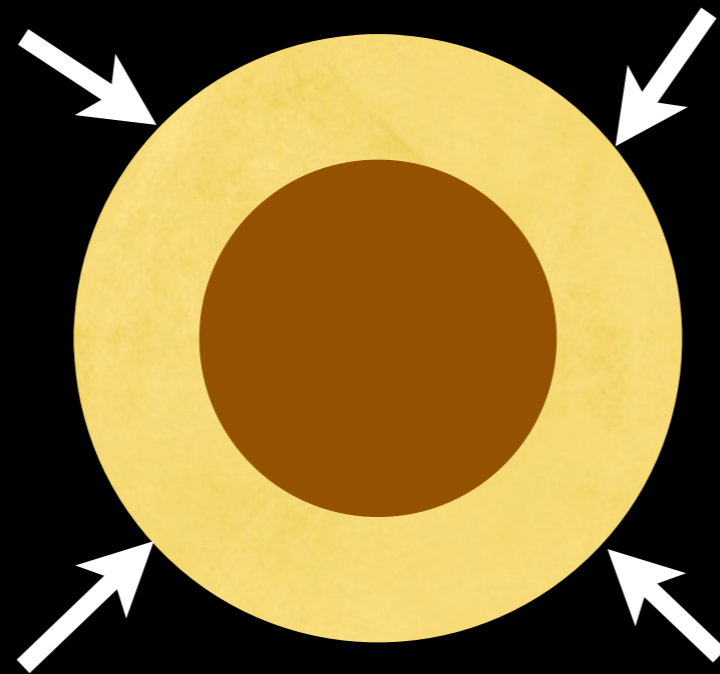
$M_{\text{core}} \geq 10M_{\oplus}$ で静水圧平衡の大気を持たなくなり
ガス惑星形成 (e.g., Ikoma et al. 2001)

ガス惑星形成の 臨界コア質量



$M_{\text{core}} \geq 10M_{\oplus}$ で静水圧平衡の大気を持つてなくなり
ガス惑星形成 (e.g., Ikoma et al. 2001)

ガス惑星形成の 臨界コア質量



$M_{\text{core}} \geq 10M_{\oplus}$ で静水圧平衡の大気を持つてなくなり
ガス惑星形成 (e.g., Ikoma et al. 2001)

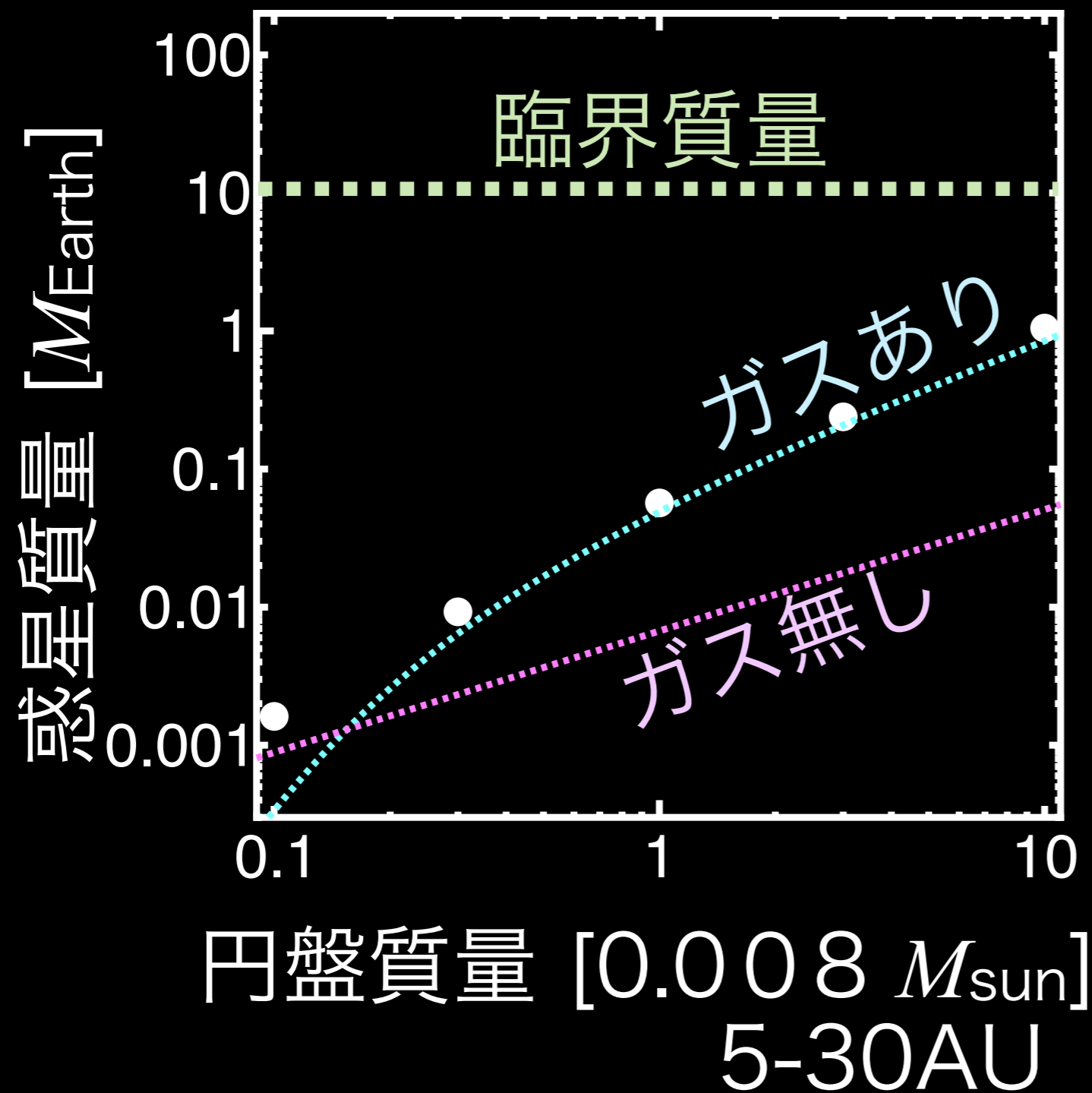
ガス惑星形成の 臨界コア質量



$M_{\text{core}} \geq 10M_{\oplus}$ で静水圧平衡の大気を持たなくなり
ガス惑星形成 (e.g., Ikoma et al. 2001)

原始惑星質量

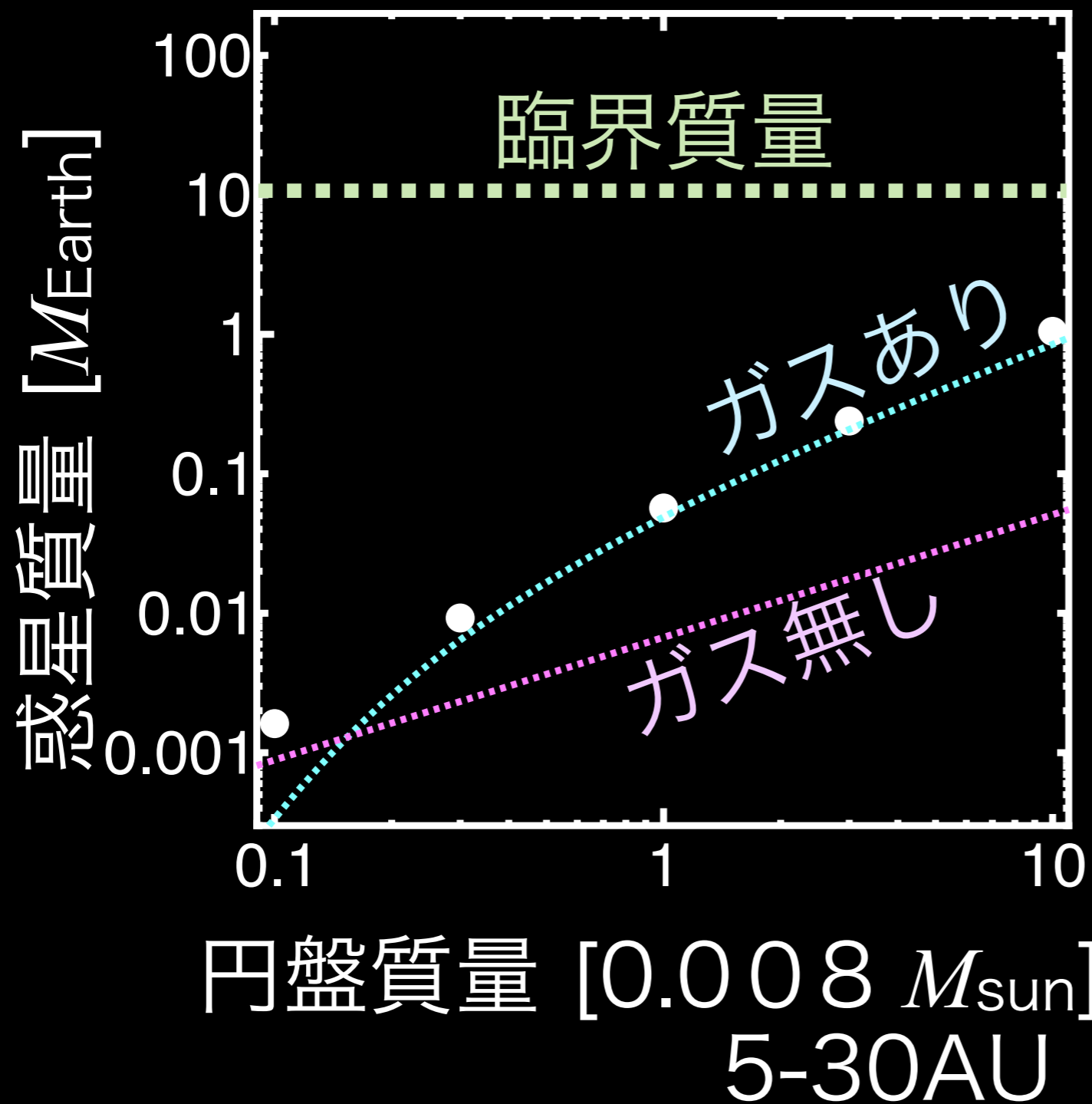
at 5 AU



見積もりと同程度の
天体ができる。

原始惑星質量

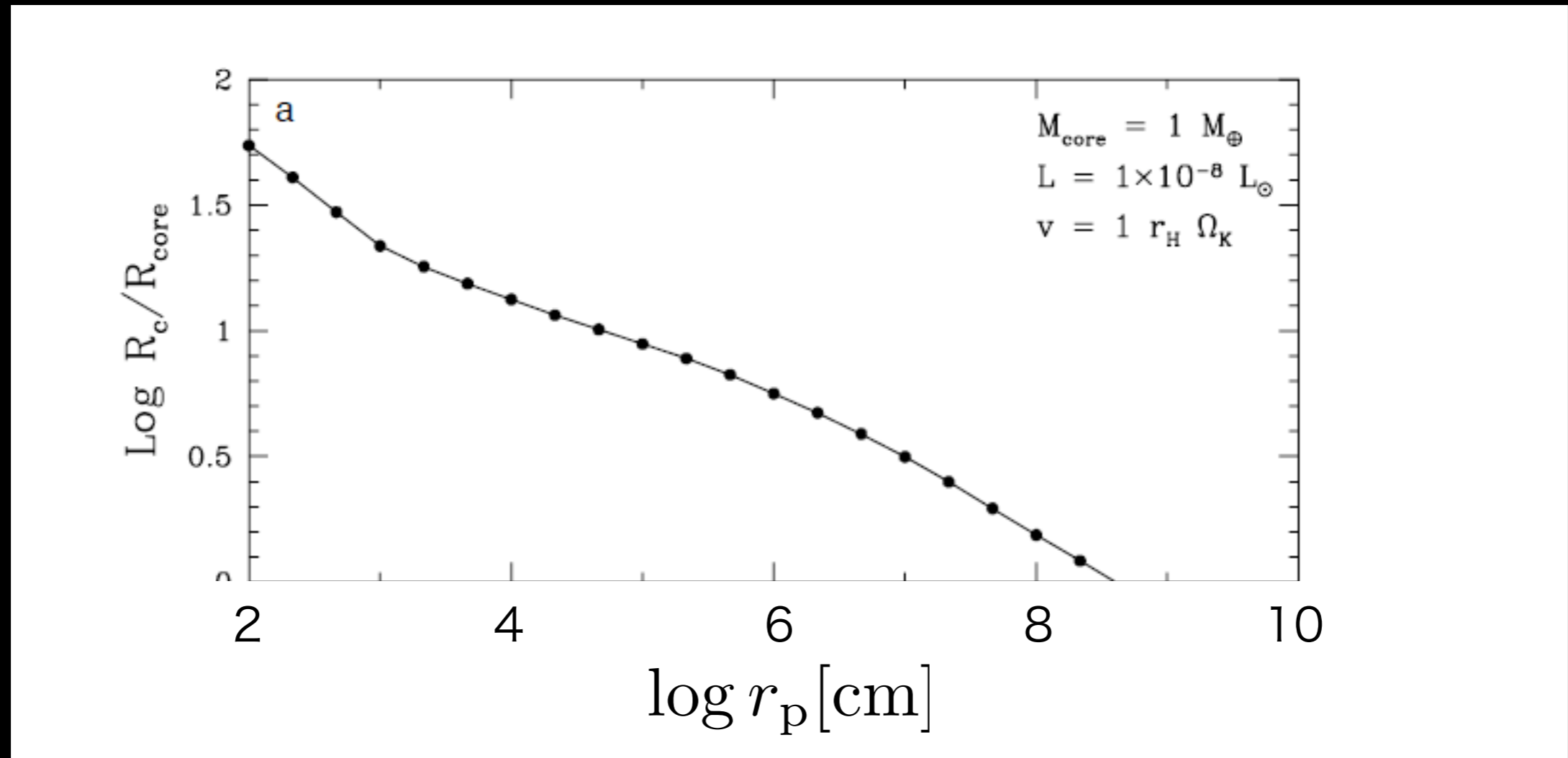
at 5 AU



見積もりと同程度の
天体ができる。

臨界惑星核質量は
超えられない。

大気の効果



Inaba and Ikoma (2003)

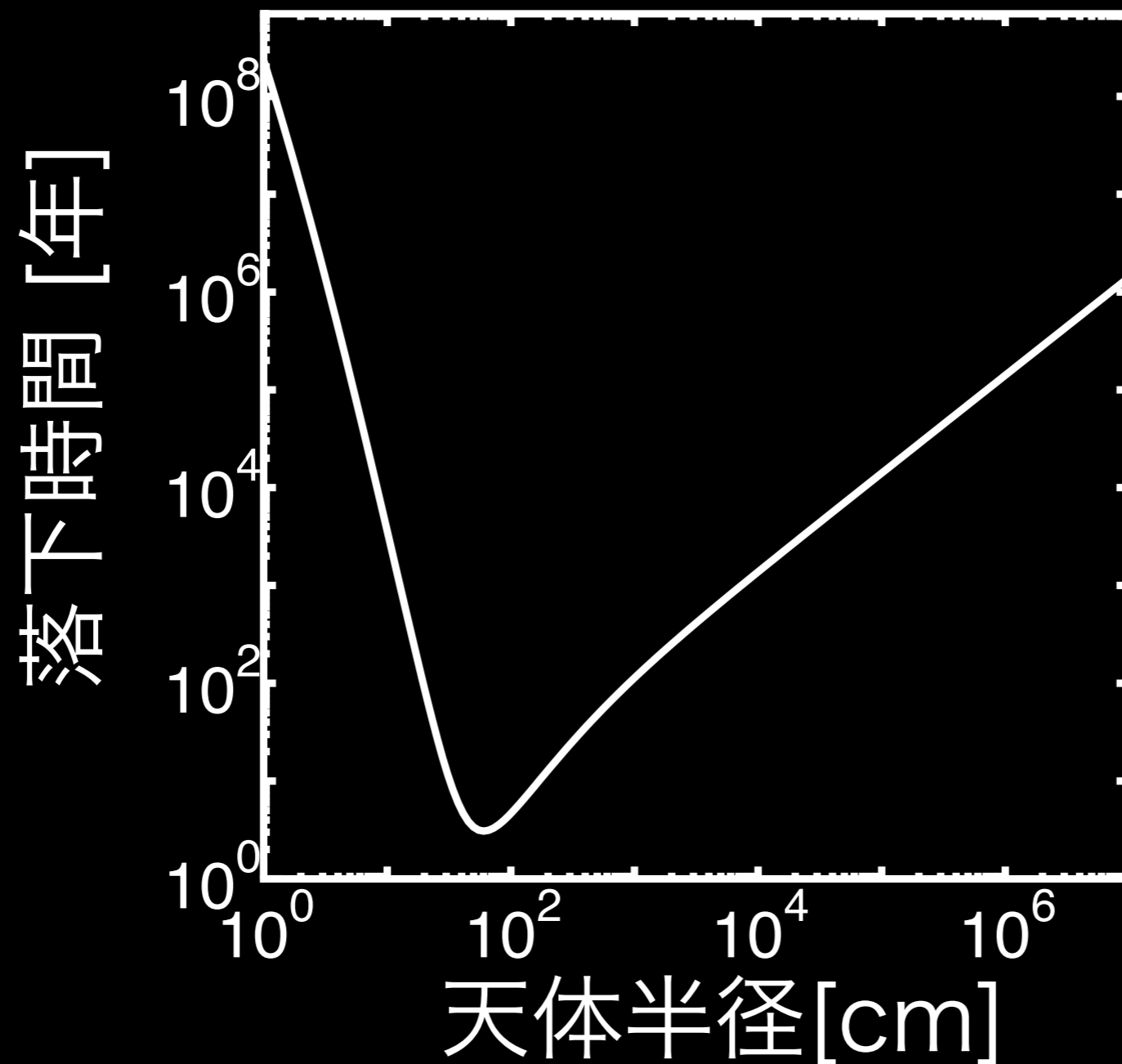
R_c : collisional radius

R_{core} : target radius

r_p : projectile radius

小さい天体の重要性

Kenyon and Bromley (2009)

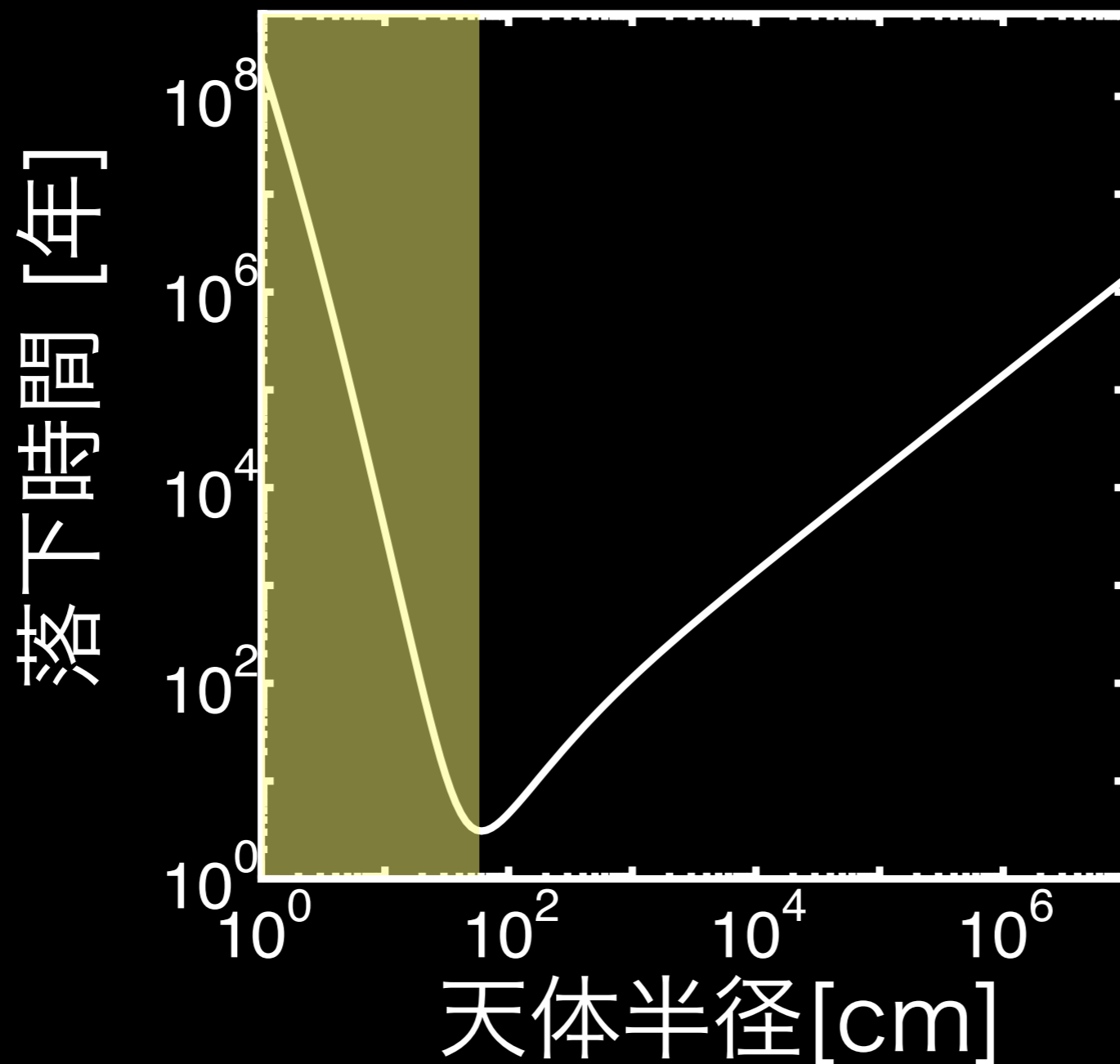


at 5 AU

$S_{\min} = 1 \text{ cm}$

小さい天体の重要性

Kenyon and Bromley (2009)

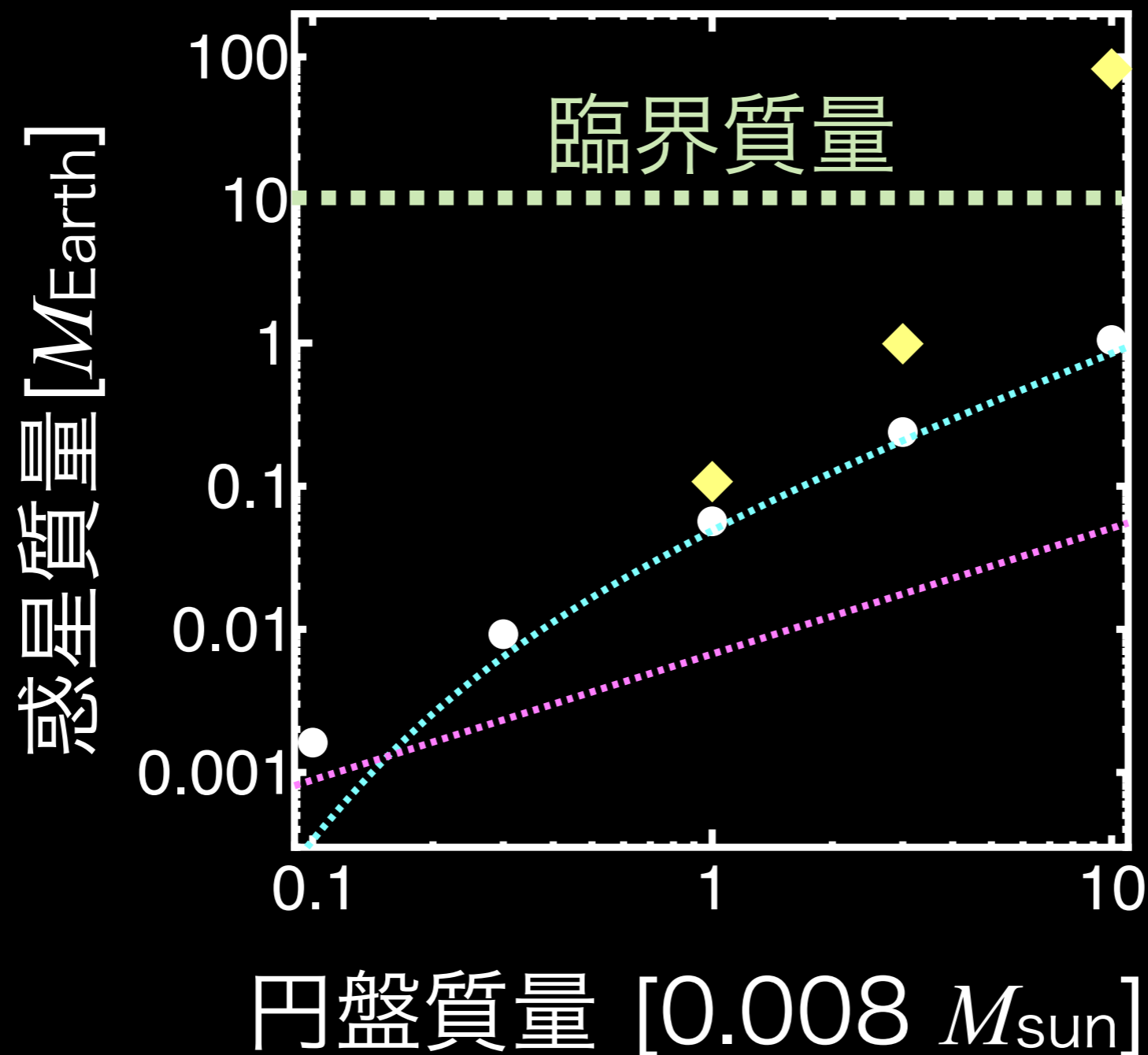


at 5 AU

$S_{\min} = 1 \text{ cm}$

ガス惑星のための惑星核形成

at 5 AU



今後の研究

- 大気の効果でガス惑星はできる (Inaba et al. 2003)。
- どのような条件で大気の効果は有効か。
- 大気の効果を含めた、原始惑星の質量はどのように表現されるか。

Thank you for your attention.
Danke für Ihre Aufmerksamkeit.
ご清聴ありがとうございました。