

惑星形成と円盤進化

小林 浩 (名古屋大学)

内容

惑星形成と円盤進化

付着力とトップシェイプ小惑星

ダストから惑星形成

円盤風と惑星形成

デブリ円盤とガス進化、衝突進化

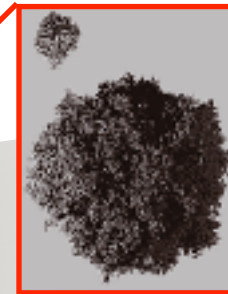
A02班の研究

A01班(円盤形成)

雪線

岩石ダスト濃集

氷ダスト合体成長



岩石微惑星局在

氷微惑星



スーパーアース

ハビタブル惑星



惑星移動



ガス惑星



氷惑星

ペブル集積

円盤進化

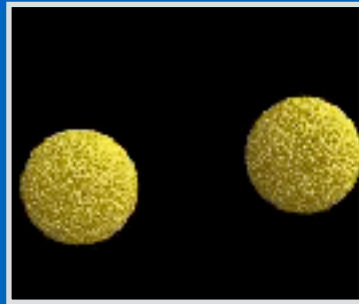
B02班

A03班(大気形成)

惑星形成と衝突史

円盤進化

衝突シミュレーション



(Sugiura, HK, et al. 2018)

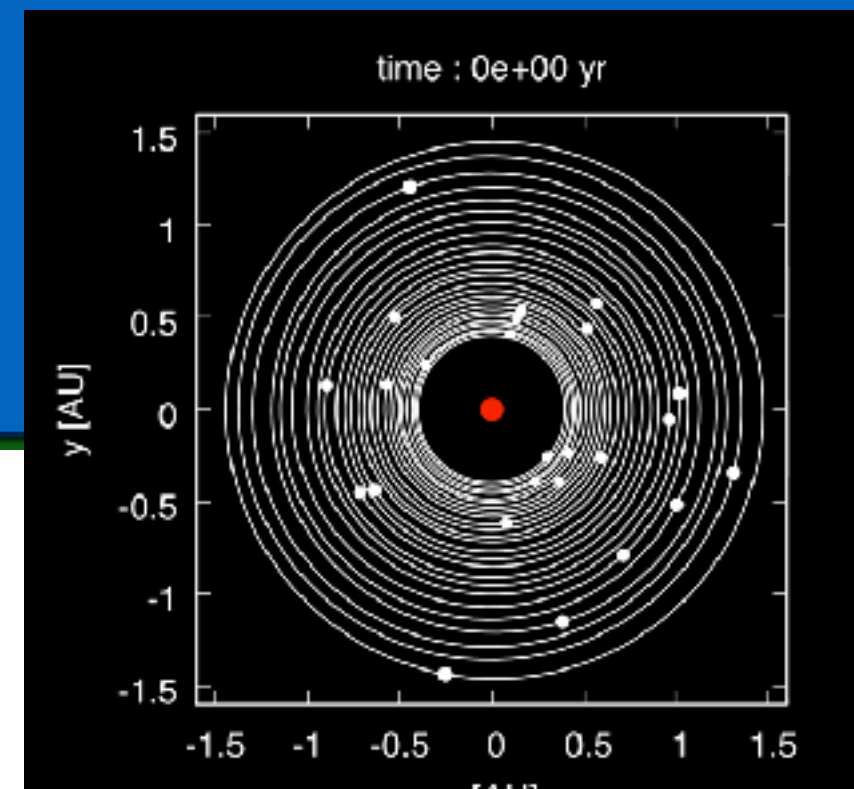


(Suyama et al. 2008)

統計シミュレーション

- 天体質量分布
- 広い質量幅

N体シミュレーション



ダスト成長と付着力

- 半径 r のモノマーを切り離すのに必要なエネルギー E_{break} (Johnson et al. 1971)

$$E_{\text{break}} = 23[\gamma^5 r^4 (1 - \nu^2)^2 / Y^2]^{1/3}$$

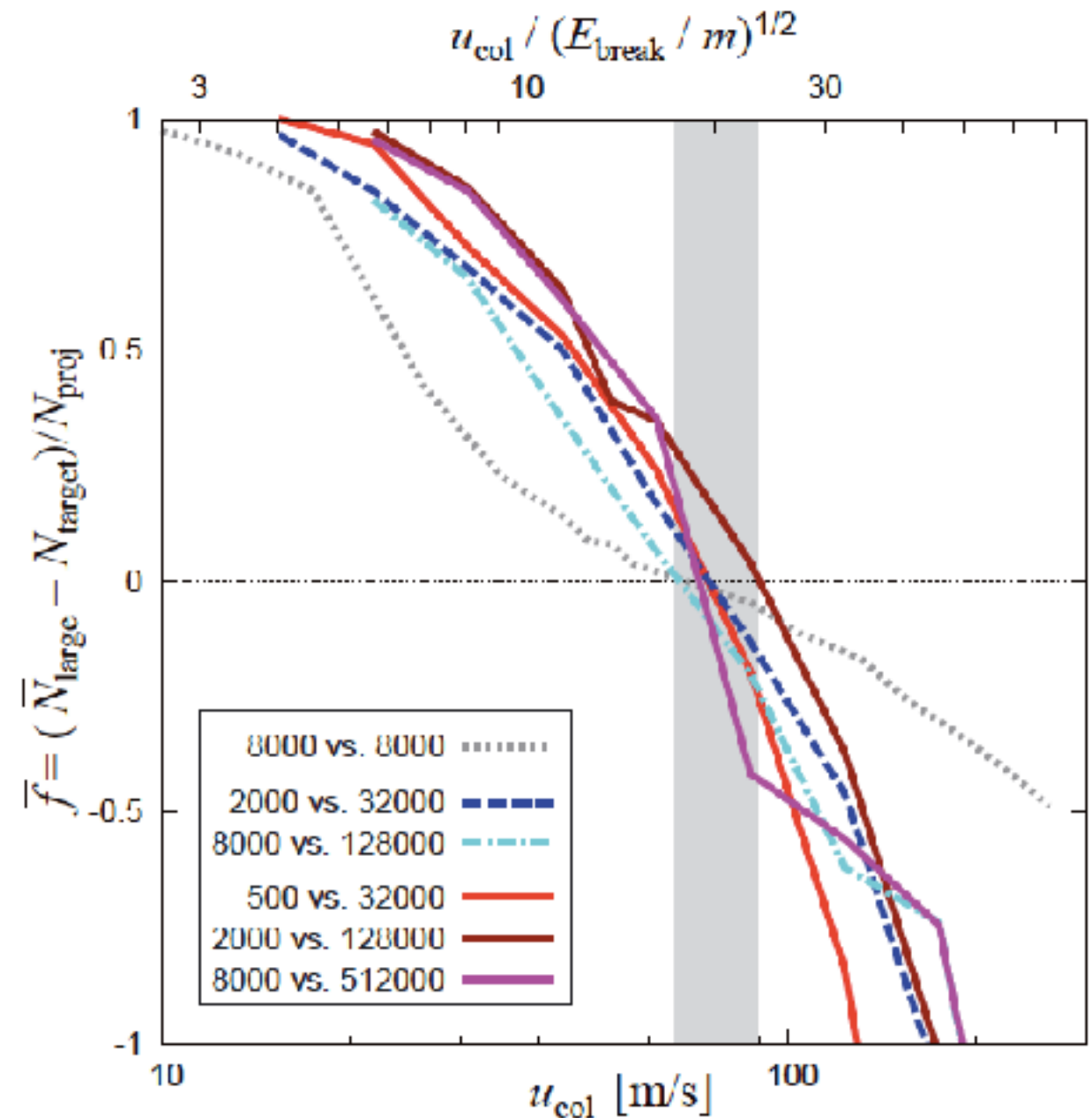
ここで、 γ は表面エネルギー、 Y はヤング率、 ν はポアソン比

- アグリゲイトの臨界衝突速度 (Wada et al. 2013)

$$v_{\text{col,crit}} = 20 \sqrt{E_{\text{break}} / m}$$

6m/s (シリケイト: $r = 0.1 \mu\text{m}$, $\gamma = 25 \text{mJ m}^{-2}$, $Y = 54 \text{GPa}$, $\nu = 0.17$, $\rho = 2.6 \text{g cm}^{-3}$)

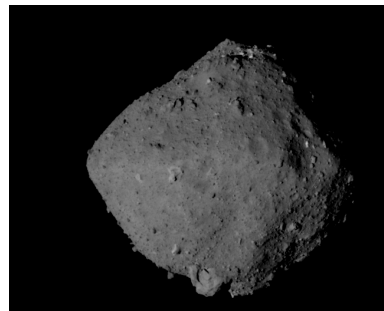
80 m/s (氷: $r = 0.1 \mu\text{m}$, $\gamma = 100 \text{mJ m}^{-2}$, $Y = 7 \text{GPa}$, $\nu = 0.25$, $\rho = 1 \text{g cm}^{-3}$)



岩石と氷でダスト成長に差があるのか？

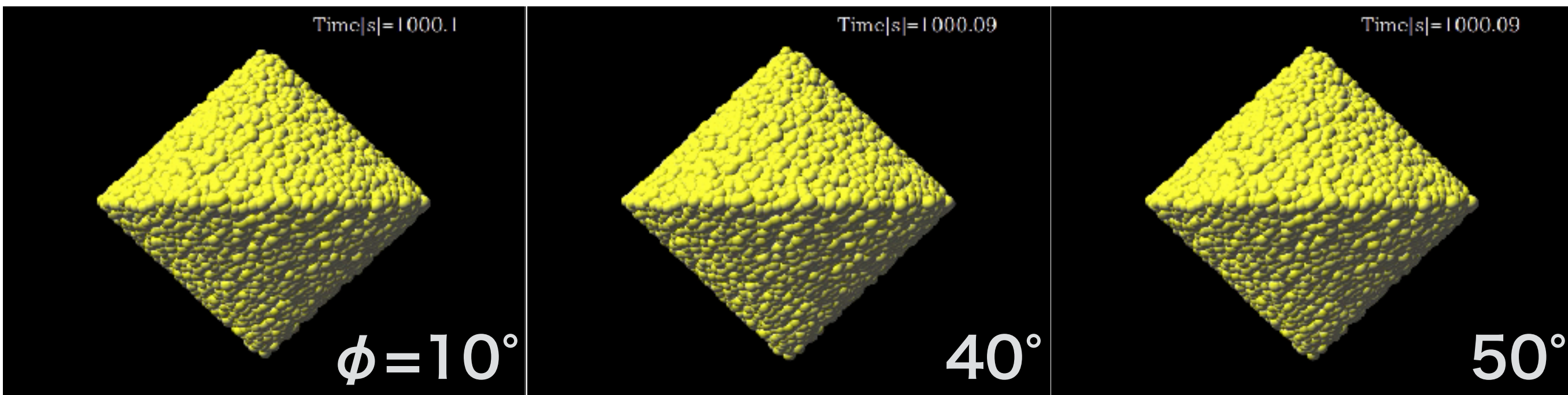
天体の形状と付着力

- 平衡形状では摩擦力も付着力も同じ役割
- RyuguやBennuのそろばんの珠形状(Top shape)を保つためにはどの程度の付着力が必要か？



自転周期4時間

摩擦係数： $\mu = \tan(\phi)$



(Sugiura, HK, Watanabe, et al. in prep.)

付着力の大きさに制限 $\Leftrightarrow$ ダストの付着成長に制限

微惑星形成後の惑星形成

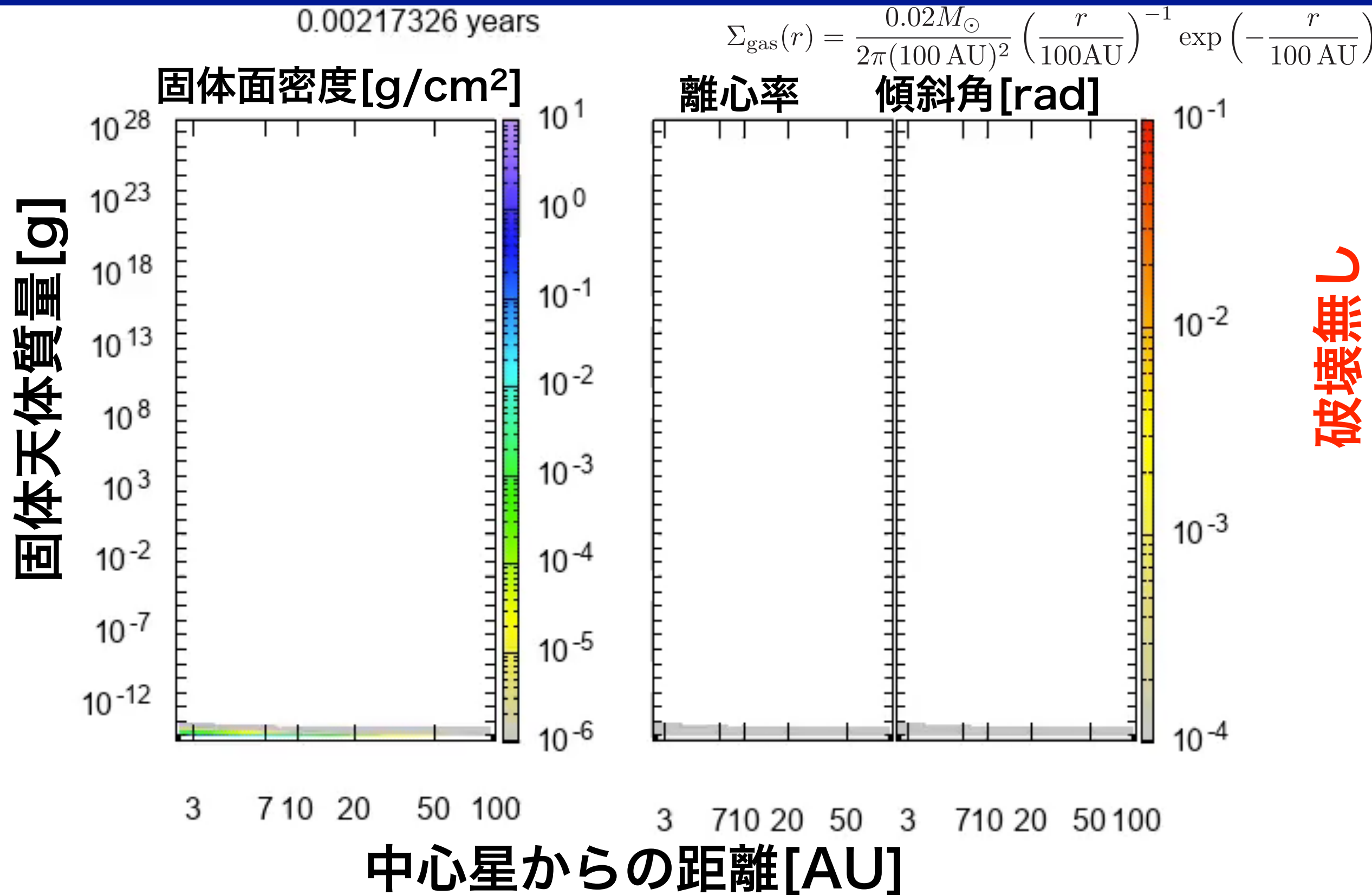
- 高空隙率ダストは落下せずに衝突成長可能

(Okuzumi, Tanaka, HK, Wada 2012)

- その後の成長は？
- 効率のいい小石集積は起きるか？
- 原始惑星系円盤からデブリ円盤への変遷を理解できるか？

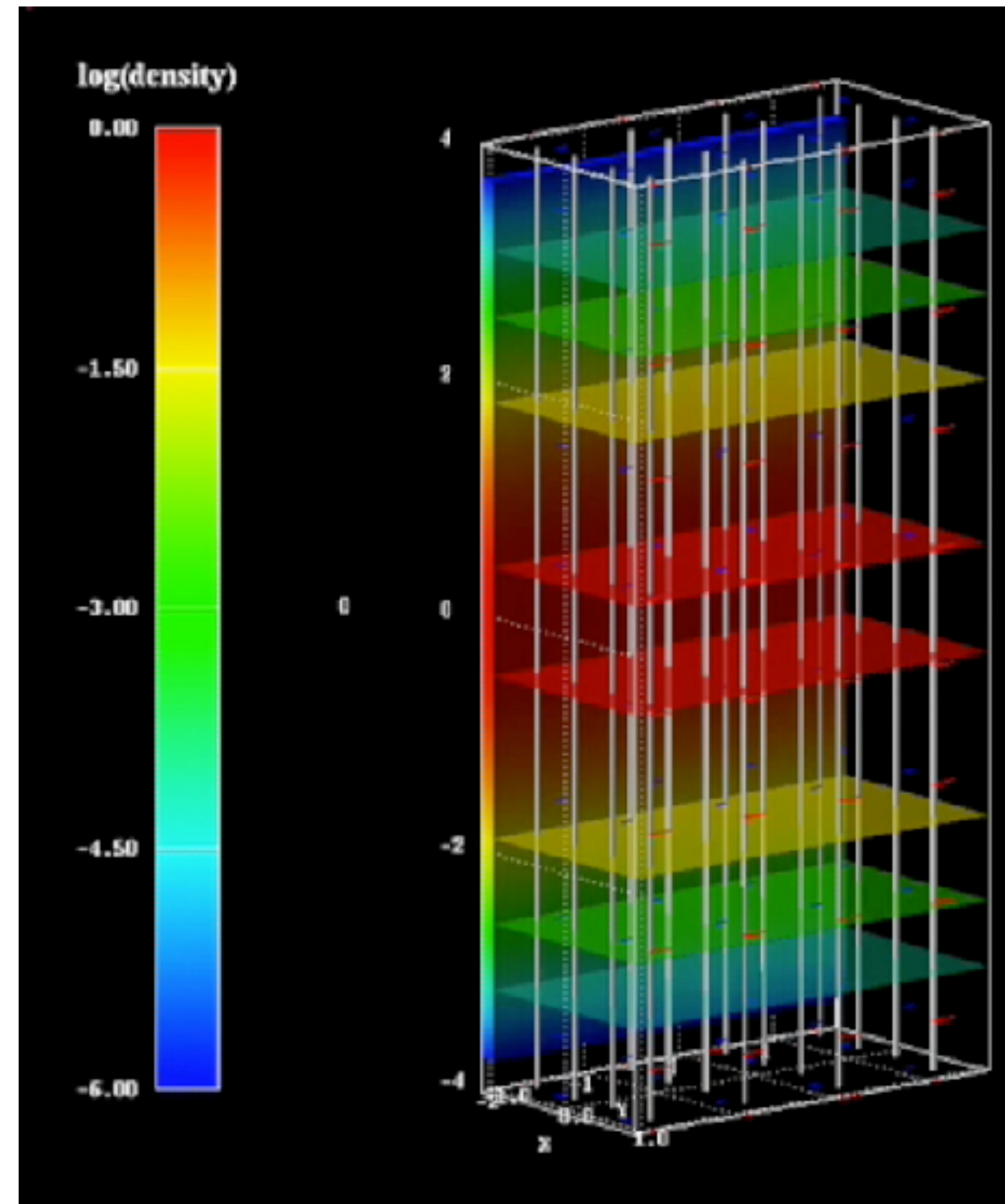
0.1 μm -10,000kmの成長を~100AU円盤で追う

微惑星形成後の惑星形成



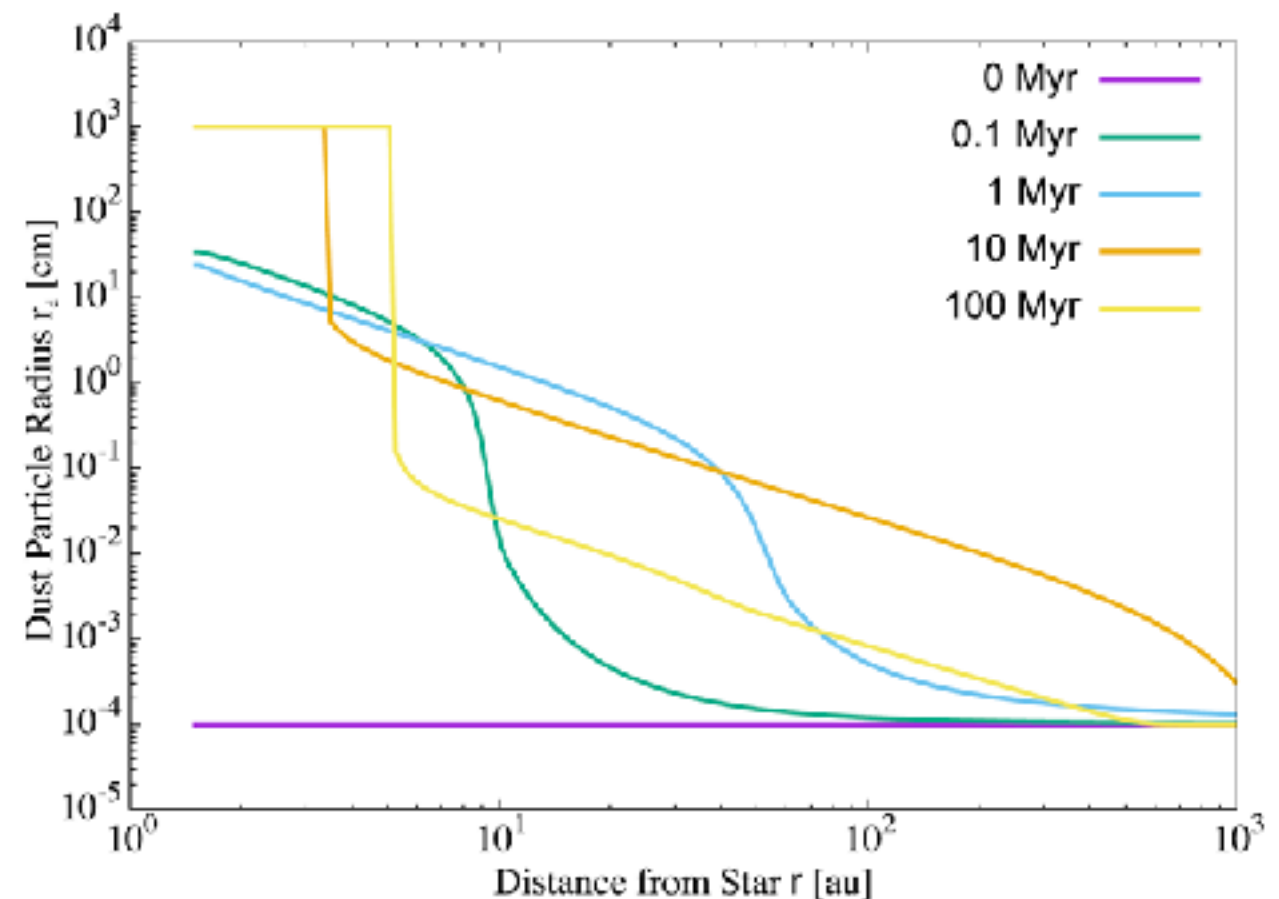
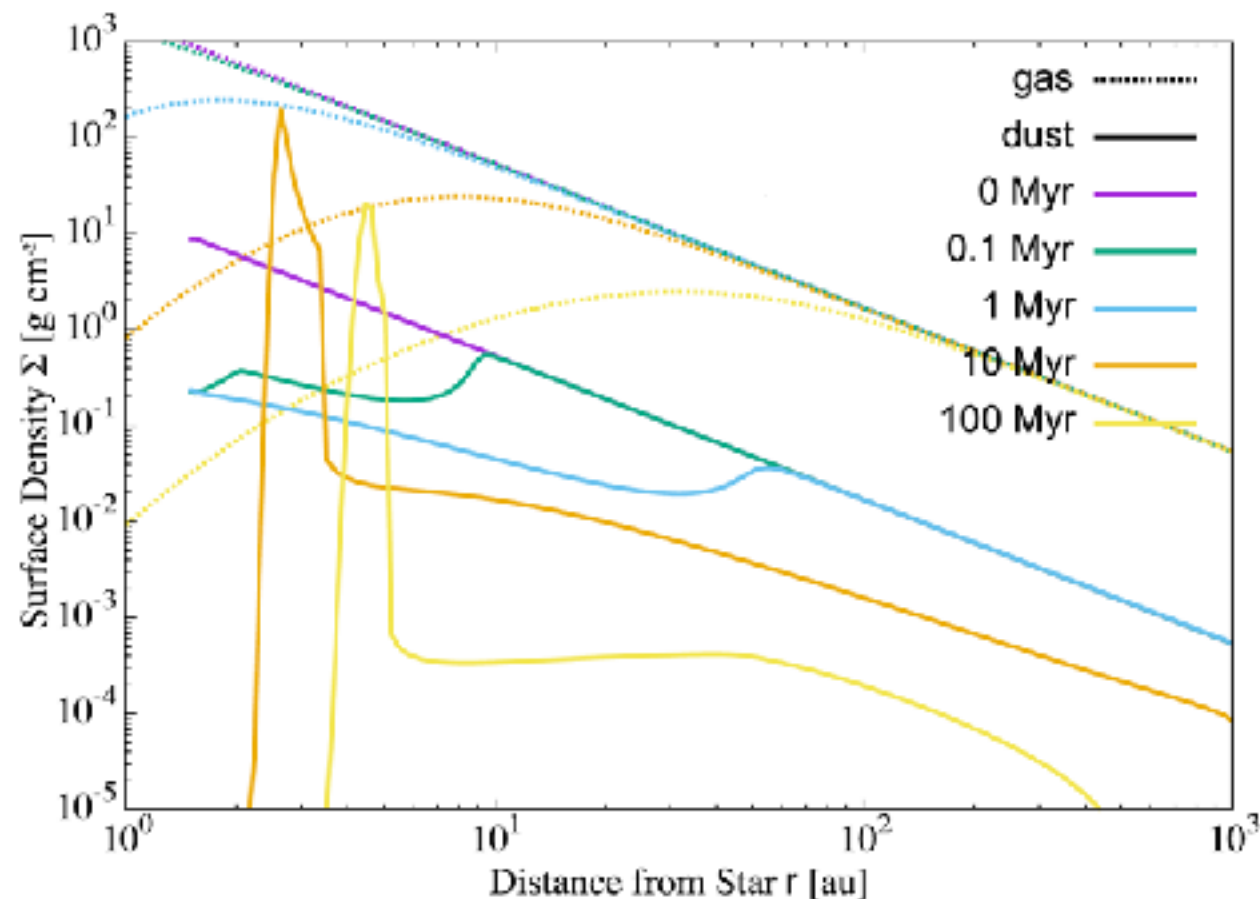
円盤散逸と惑星形成

- 円盤風による面密度進化
(Suzuki et al. 2010)
- 内側からえぐれていく。
- 円盤観測との比較
(Takahashi & Muto 2018)
- 地球型惑星形成への影響
は？
微惑星-原始惑星進化
(Ogihara et al. 2013..2018)



円盤風と惑星形成

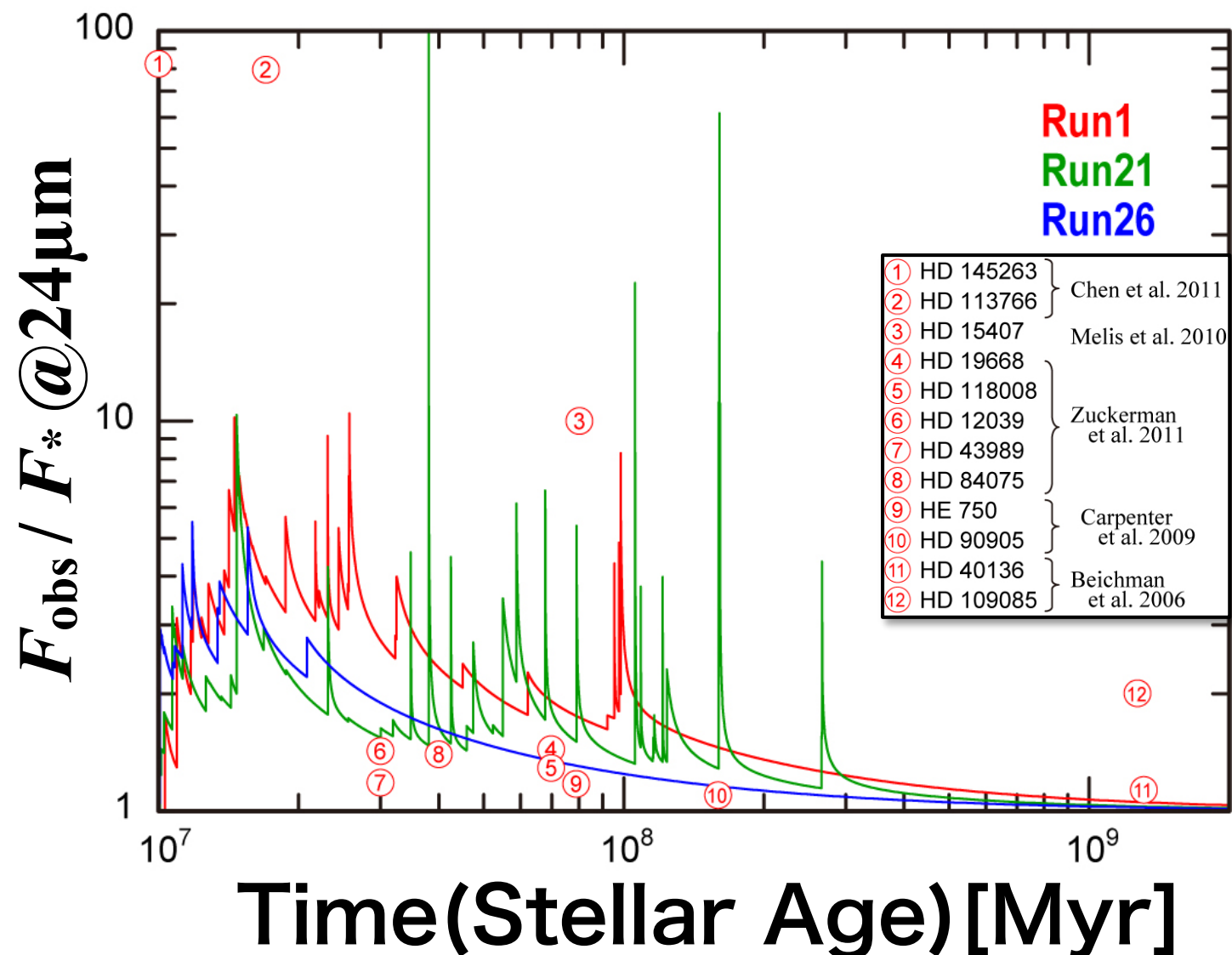
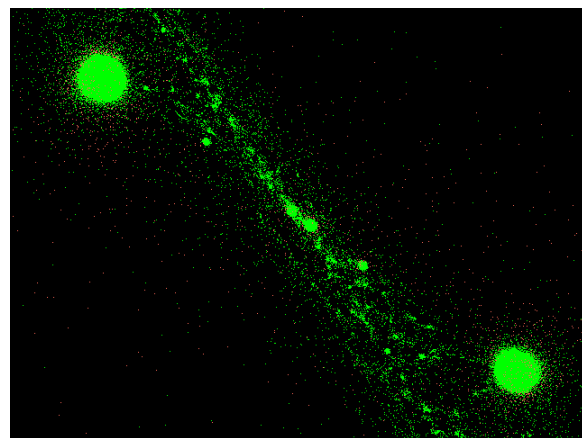
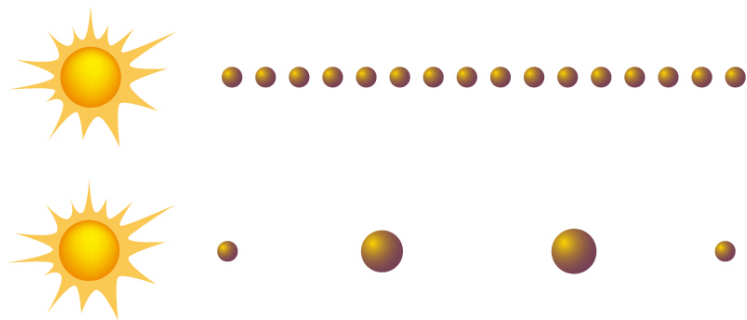
- 円盤風を考慮した円盤でのダスト成長(Kuwabara, Suzuki, HK, Taki, in prep.)
圧力極大での振る舞い(Taki, HK, ...)
- その結果の遷移円盤観測との比較を視野に。



地球型惑星形成とデブリ円盤

- デブリ円盤は中心星近傍(~ 0.1 AU)から数100AUまで観測されている。
- 地球型惑星形成は数AUサイズ(~ 300 K)の暖かいデブリ円盤を説明。

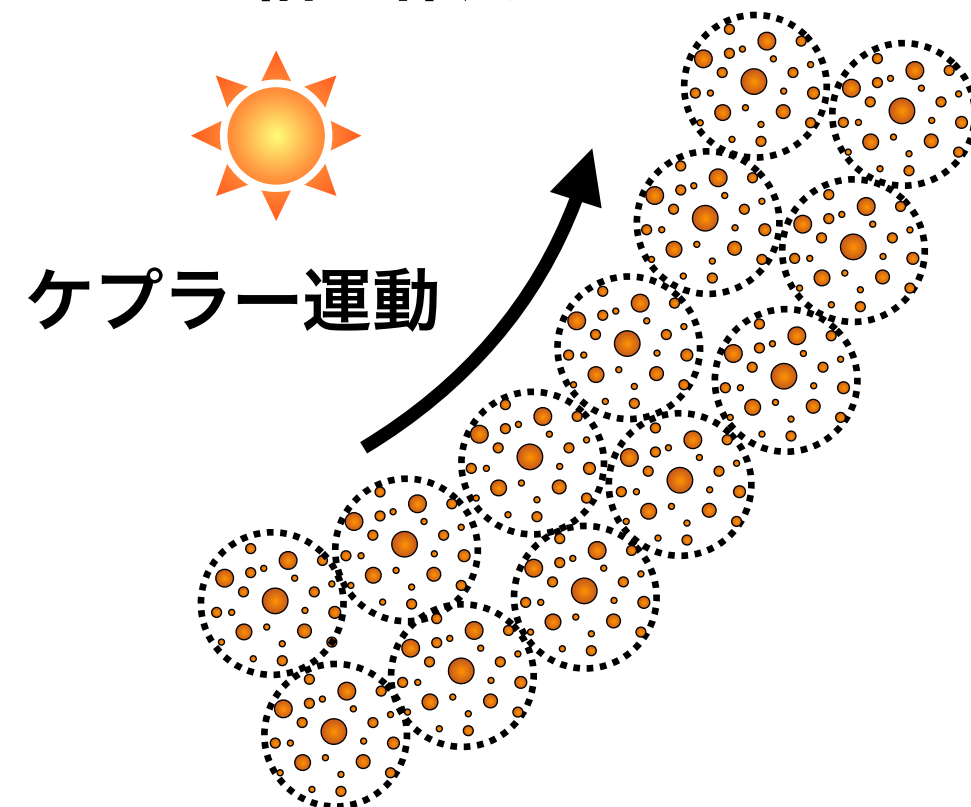
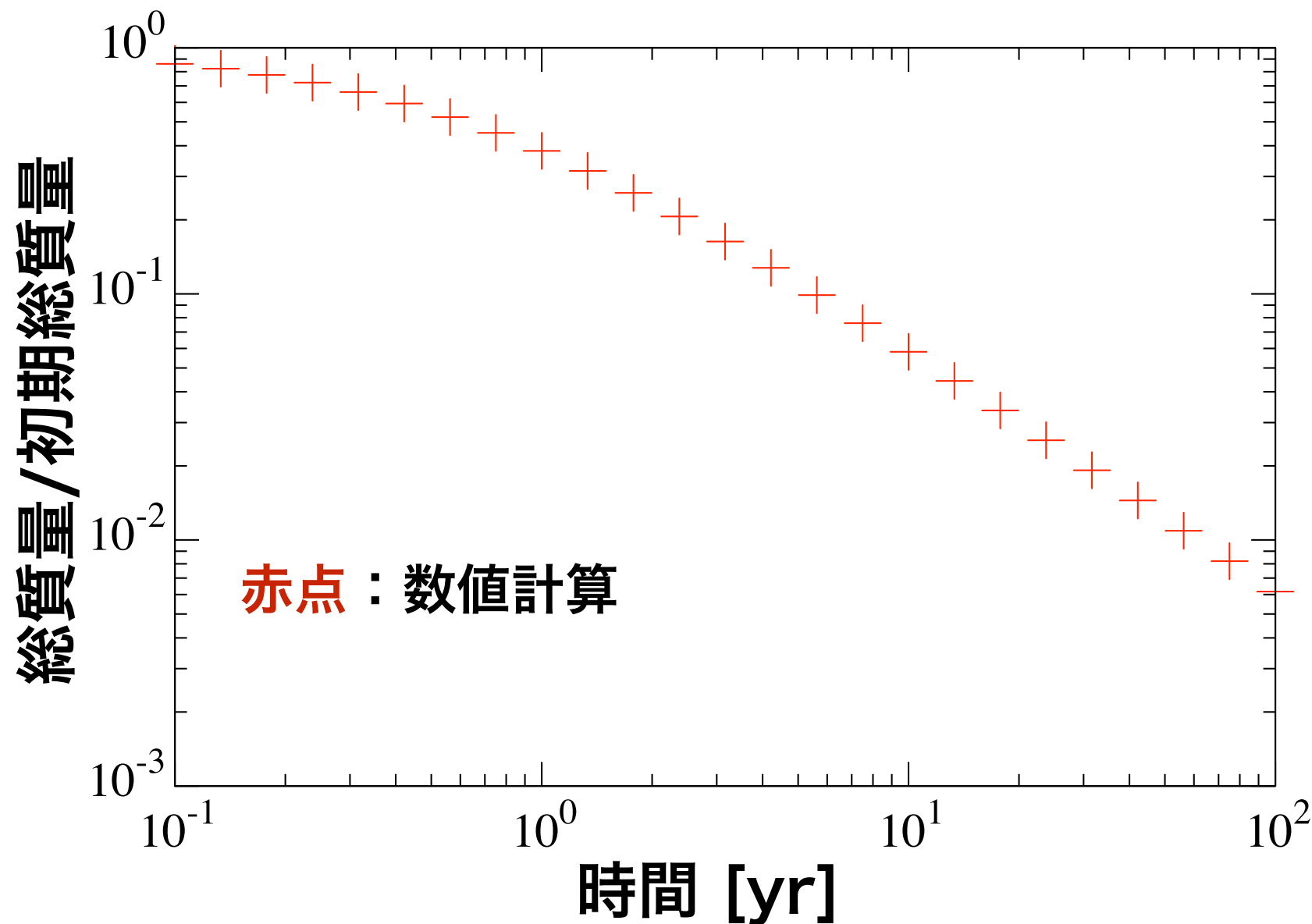
(Genda, HK, Kokubo, 2015)



N体計算で衝突カスケード

初期条件

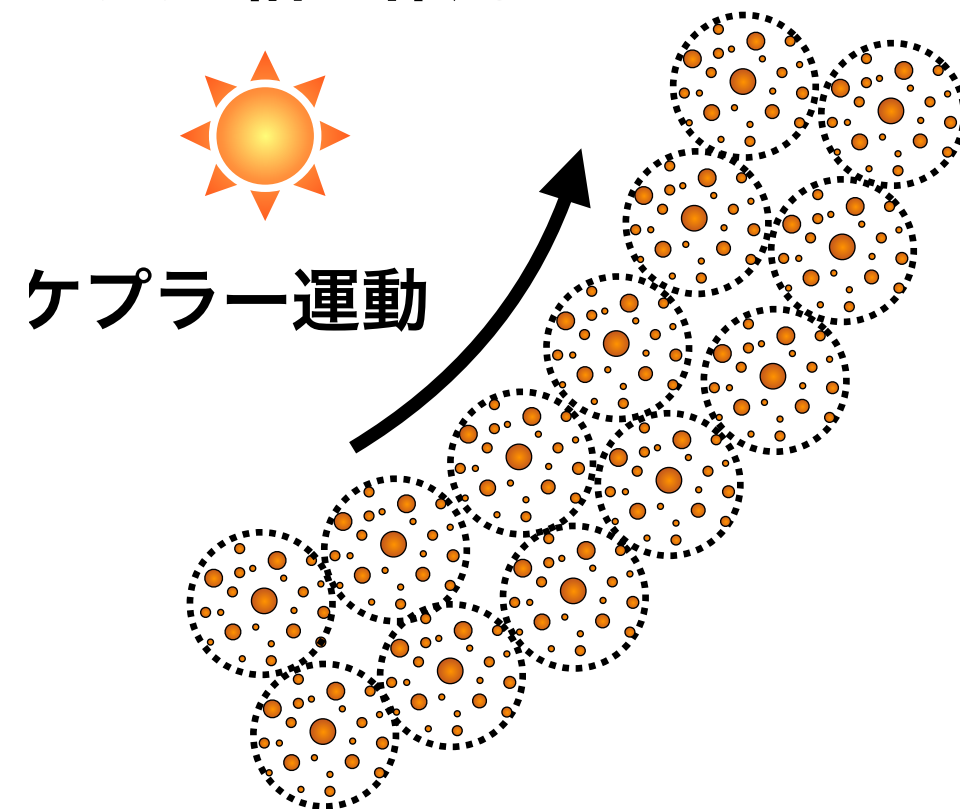
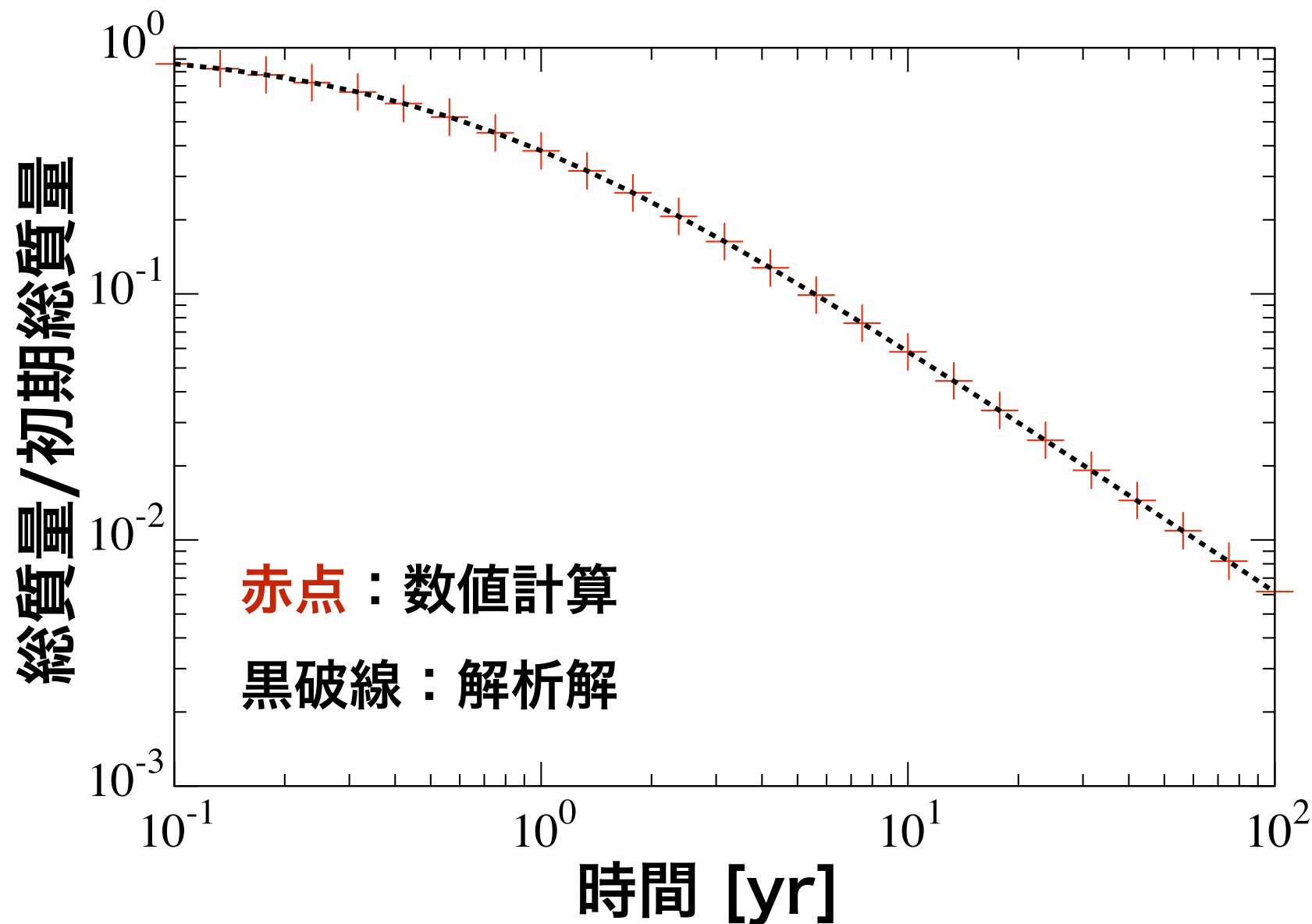
- ・ スーパー粒子2000体
- ・ 1 ± 0.025 AU に分布
- ・ 総質量 = 10地球質量
- ・ 離心率 = 0.01
- ・ 最大微惑星質量 = 10^{16} g
- ・ 地球型惑星なし
- ・ 重力相互作用なし



破壊入りN体計算

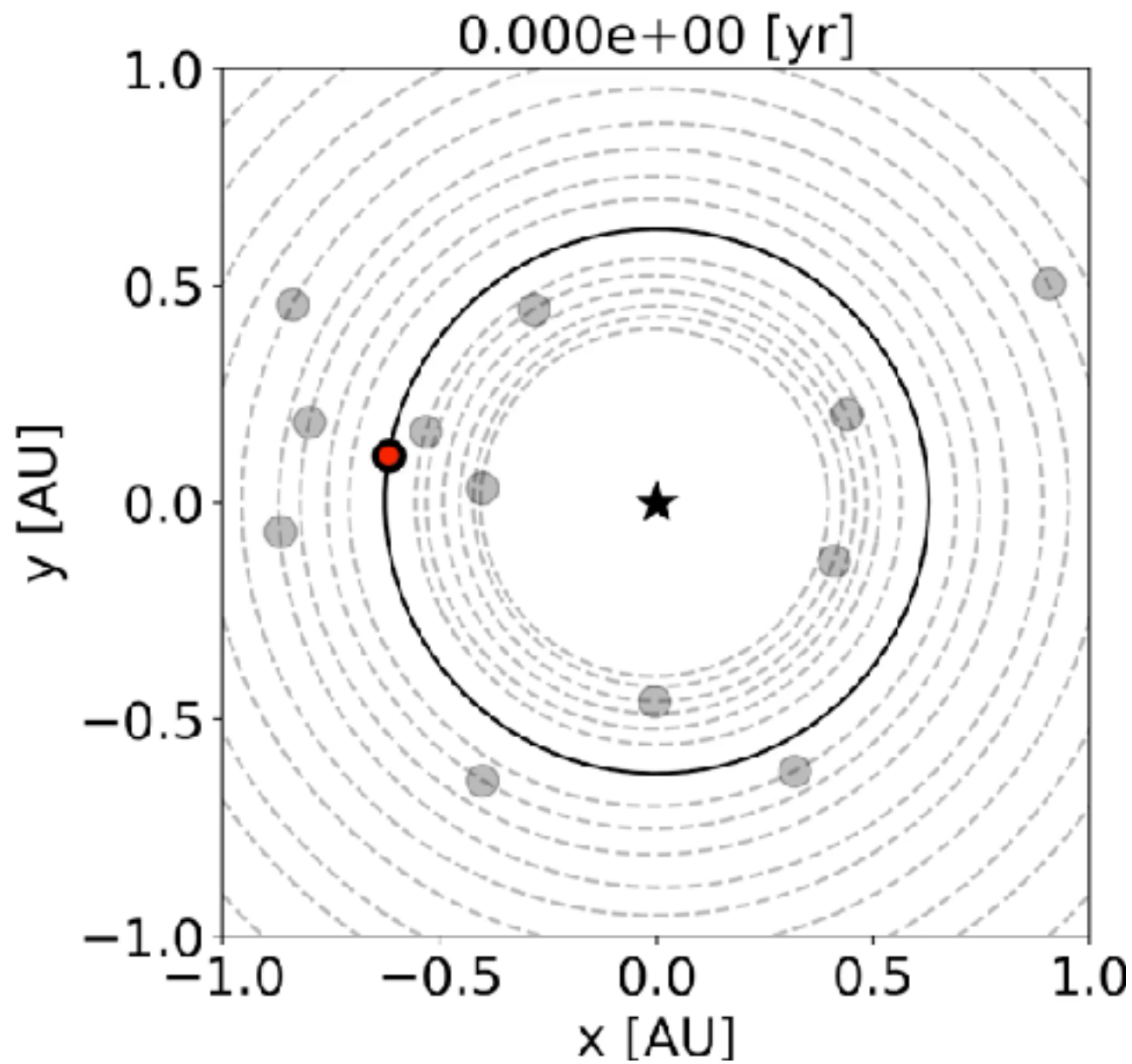
初期条件

- ・ スーパー粒子2000体
- ・ 1 ± 0.025 AU に分布
- ・ 総質量 = 10地球質量
- ・ 離心率 = 0.01
- ・ 最大微惑星質量 = 10^{16} g
- ・ 地球型惑星なし
- ・ 重力相互作用なし

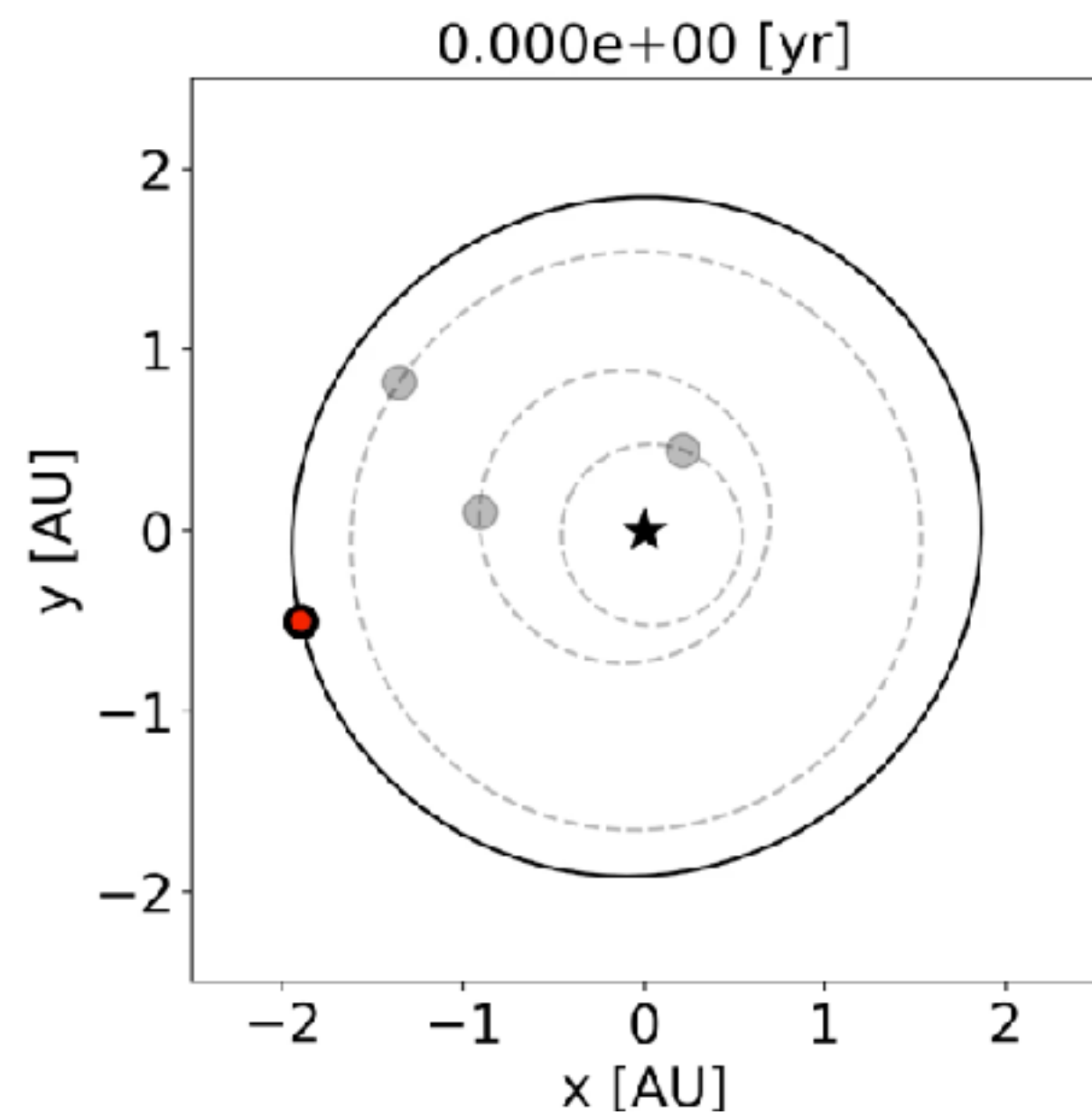


巨大衝突による破片放出

巨大衝突ステージ前半



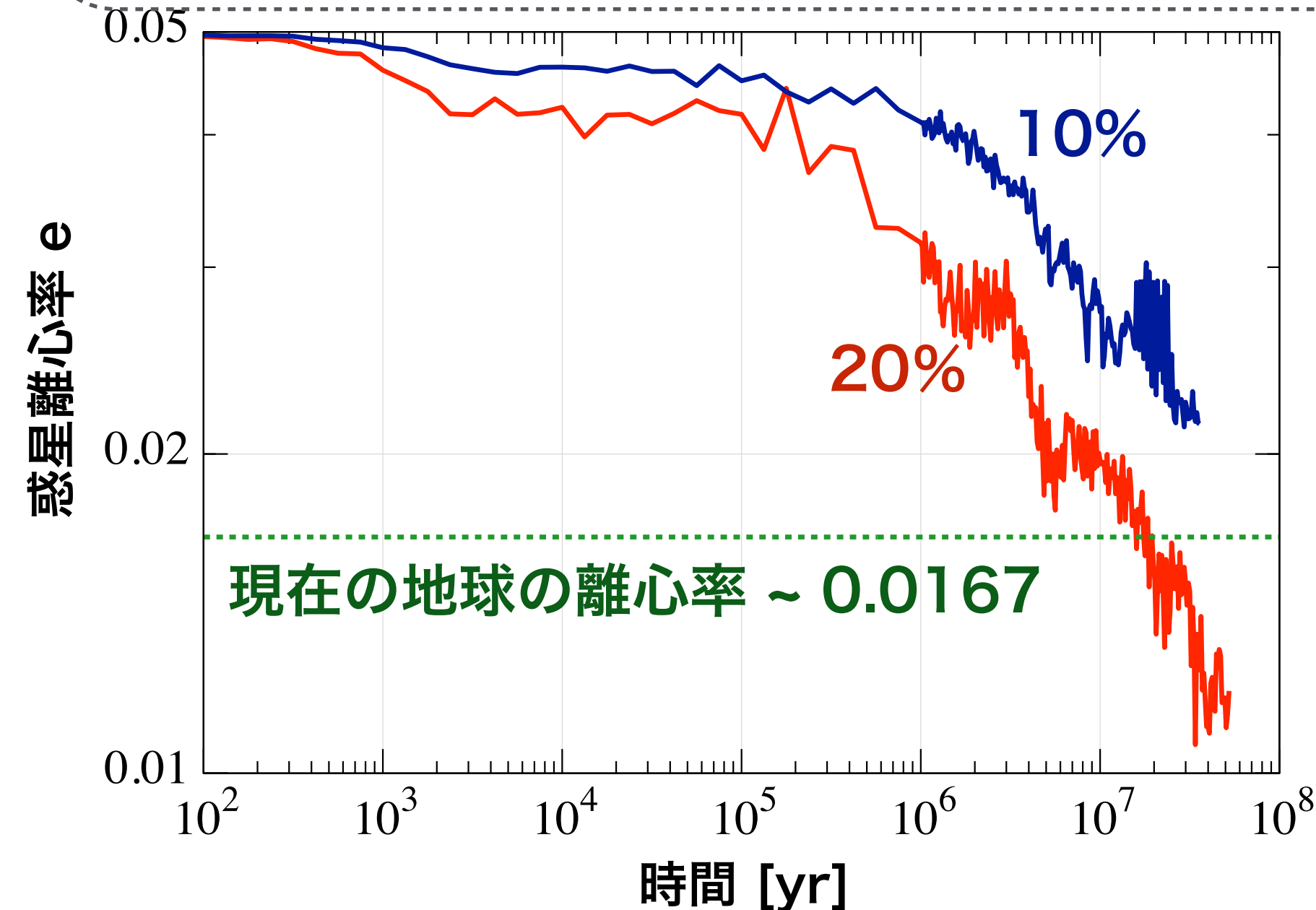
巨大衝突ステージ後半



衝突破片と原始惑星軌道

$e_{\text{惑星},0} = \langle e_{\text{微惑星},0}^2 \rangle^{1/2} = 0.05$ 惑星（地球質量）1体 スーパー粒子100体

破片総質量：地球質量の**10%** & **20%** 最大破片質量： 10^{-3} 地球質量



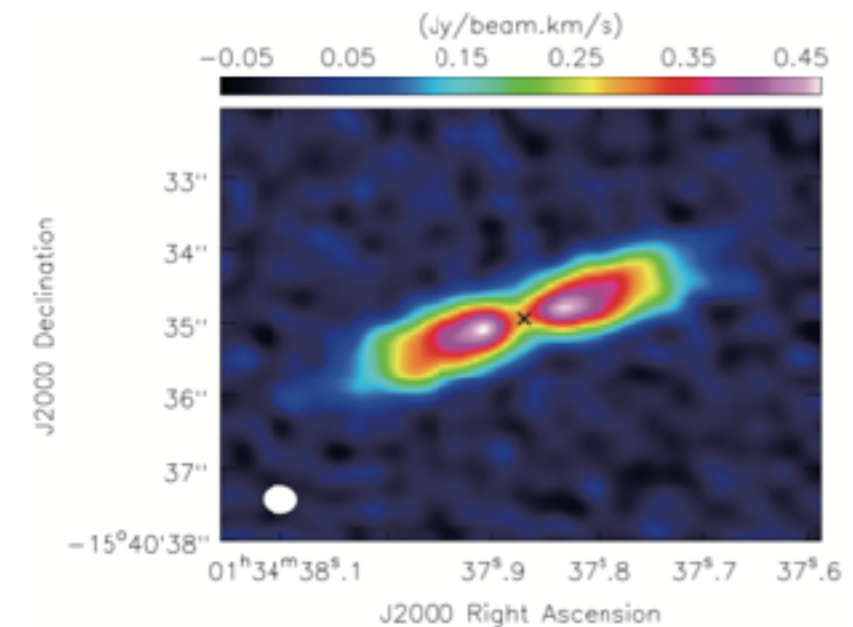
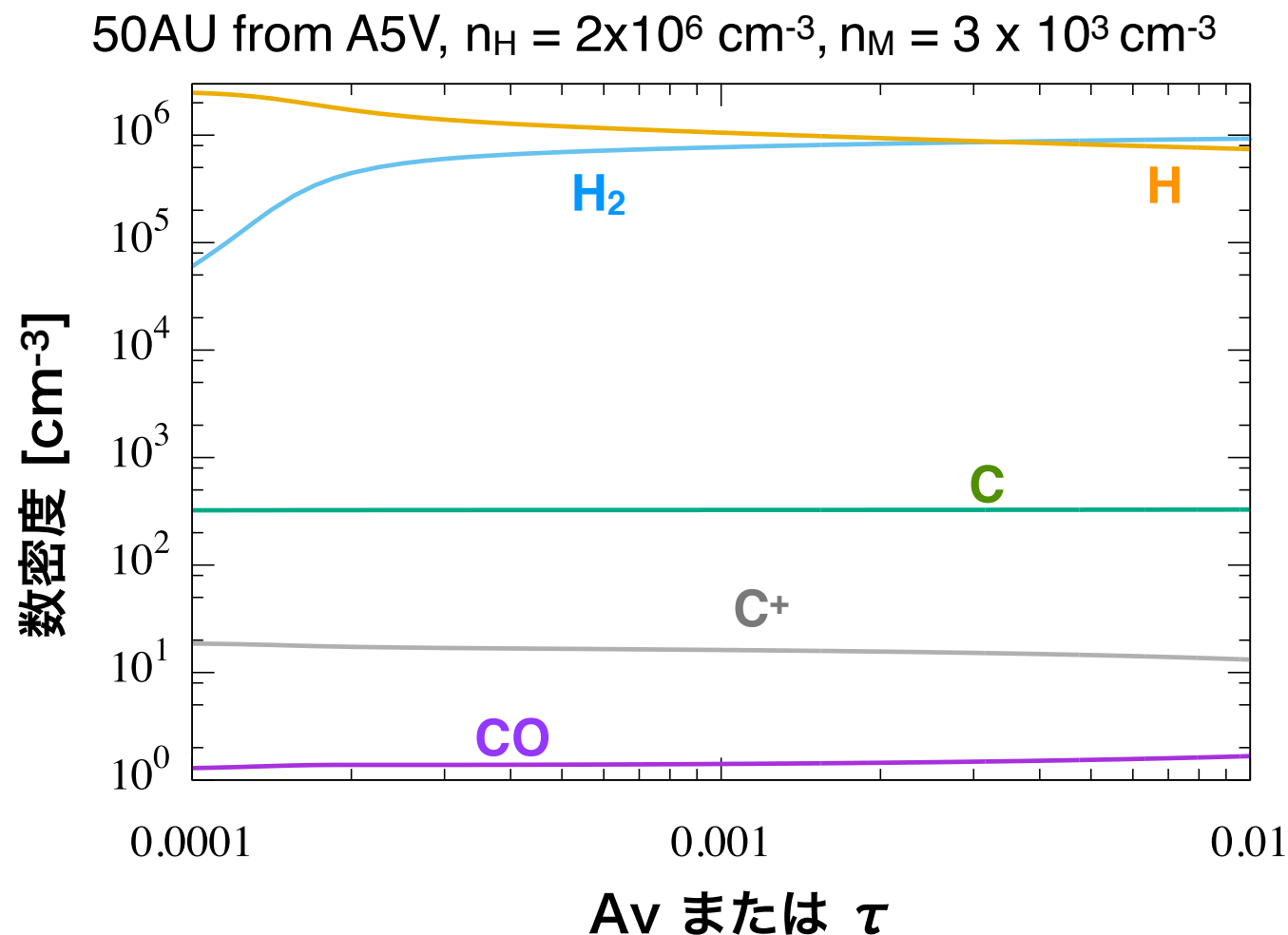
平均は天体質量の**18%**
(Genda et al., 2015)

巨大衝突起源の最終円盤
との重力相互作用

地球型惑星の離心率を下げることに成功！

ガス進化とデブリ円盤

- 近年デブリ円盤でもガス(CO, C_I)が観測
- ガス散逸の情報が得られないか？
- 1次元PDR計算(Meudon PDR code)



49Ceti (CO 3-2)

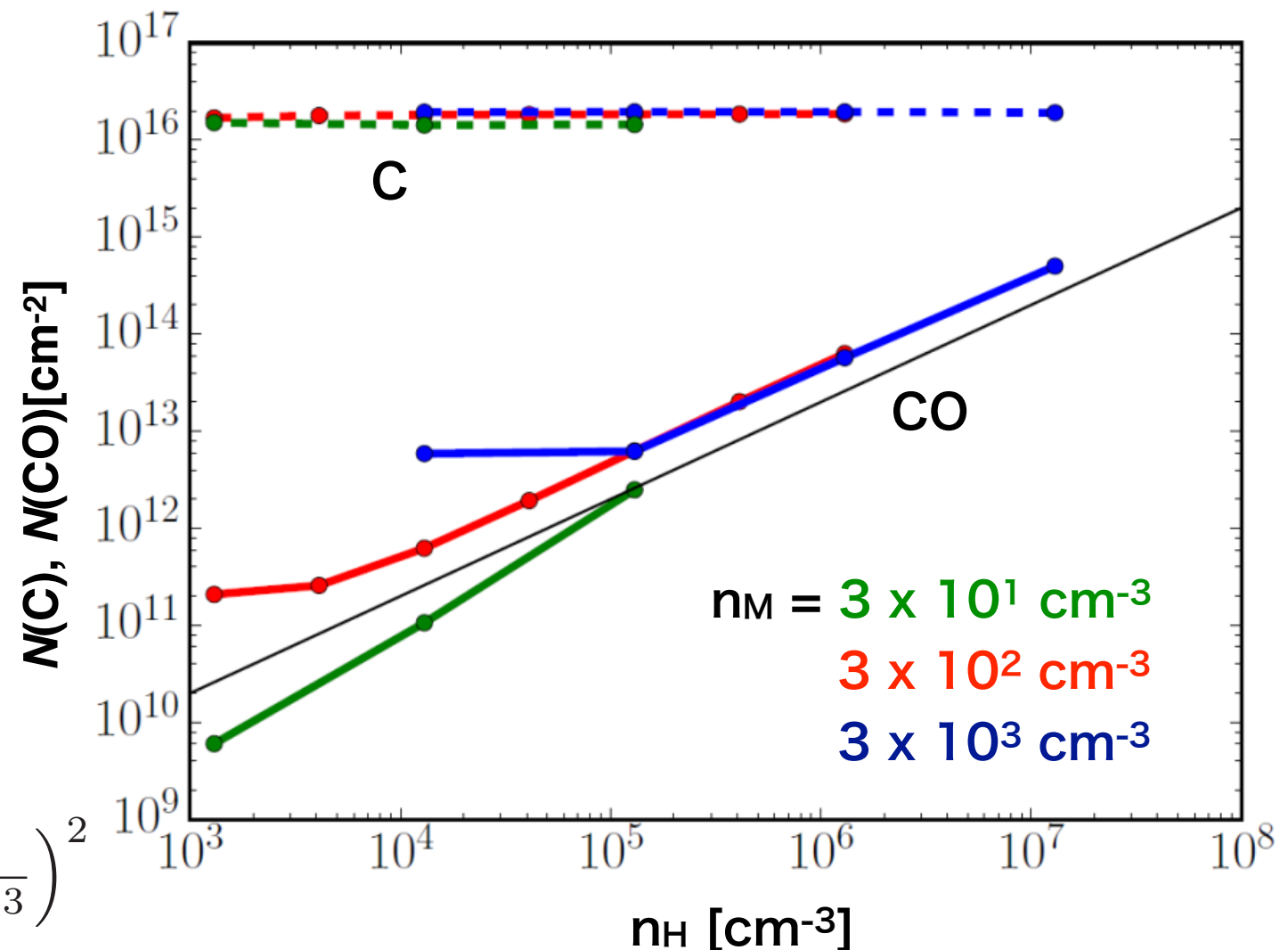
CO/C比とH存在量

- COは100年程度で解離
- H, C, Oが絡みながら化学反応し、COが再生成
- $n(\text{CO}) \propto n_{\text{H}} n_{\text{C}} n_{\text{O}}$
- CO/C比と水素数密度の関係 (Iwasaki & HK)

$$\frac{N(\text{CO})}{N_{\text{C}}} \sim 5 \times 10^{-3} \chi^{-1} \left(\frac{\mathcal{A}_{\text{C}}}{\mathcal{A}_{\text{C,ism}}} \right) \left(\frac{n_{\text{H}}}{10^6 \text{ cm}^{-3}} \right)^2$$

$$\mathcal{A}_{\text{C}} = n_{\text{H}}/n_{\text{C}}$$

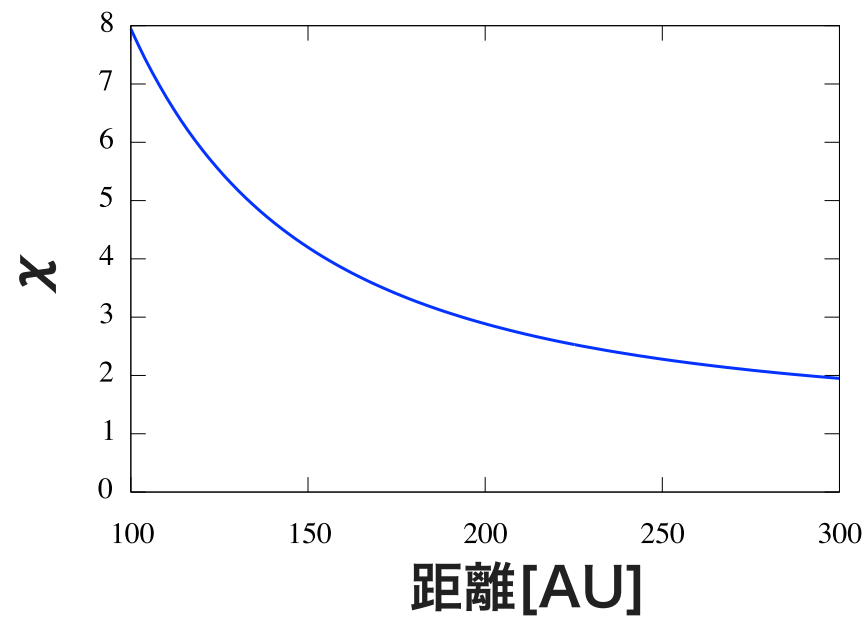
$$\chi = \chi_{\text{ISRF}} + \chi_{\text{star}} \left(\frac{R_{*}}{r} \right)^2$$



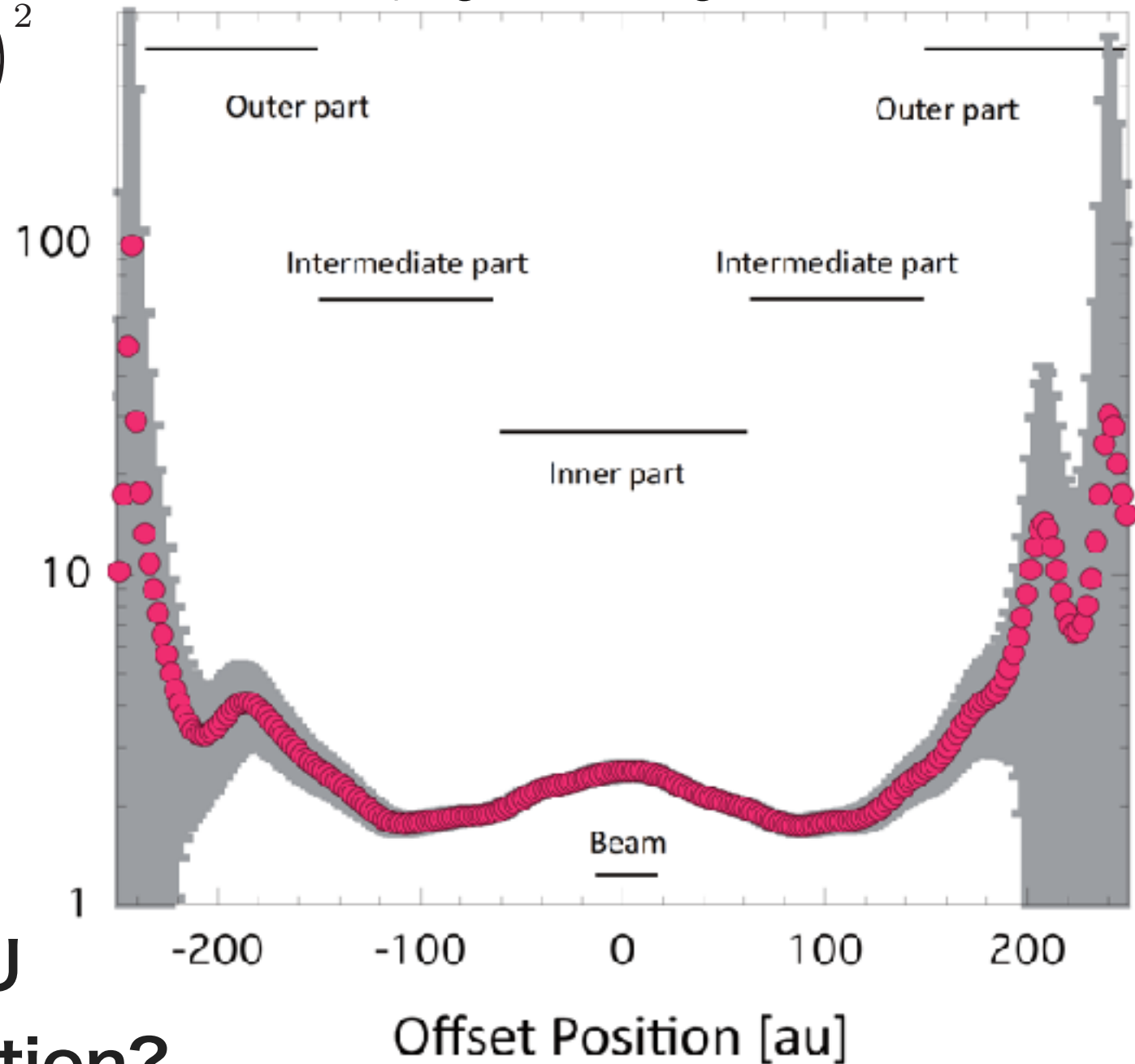
49Ceti

(Higuchi, Saigo, HK, et al. 2019)

$$\frac{N(\text{CO})}{N_{\text{C}}} \sim 5 \times 10^{-3} \chi^{-1} \left(\frac{\mathcal{A}_{\text{c}}}{\mathcal{A}_{\text{c,ism}}} \right) \left(\frac{n_{\text{H}}}{10^6 \text{ cm}^{-3}} \right)^2$$



[C I]/CO Intensity Ratio



- $n_{\text{H}} \sim 0.7 \text{ cm}^{-3} @ 100\text{AU}$
 $\sim 0.01 \text{ cm}^{-3} @ 250\text{AU}$
external photo-evaporation?

研究計画まとめ

- 惑星形成と円盤進化を結びつける
- ダスト物性と小惑星探査の結びつけ
- ダストから惑星への広質量レンジでの計算
- 円盤風とダスト成長の関係
- 巨大衝突ステージとデブリ円盤
- デブリ円盤ガスと原始惑星系円盤散逸