

# N体計算から見た地球型惑星形成 における困難

森島龍司 (コロラド大学)

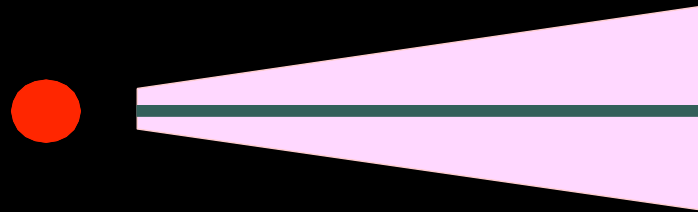
# 参考文献

- Morishima, R., Stadel, J., Moore, B., 2010  
From planetesimals to terrestrial planets: N-body simulations with the effects of nebular gas and giant planets. *Icarus* 207, 517-535
- 惑星科学会2008年秋期大会でも、大まかな結果は紹介
- 現在やり始めたことも少し紹介

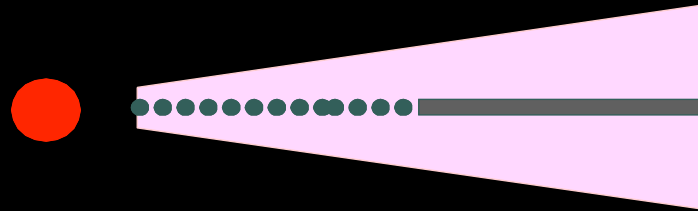
# 地球型惑星形成の制約条件

1. 質量の空間分布における局所集中
  - 地球と金星がほとんどの質量を占め、軌道間距離が0.3AU(26.5ヒル半径)と短い
  - 火星質量は地球質量の1/10、小惑星の総質量は5/10000
2. 小さな軌道離心率 (~0.03;地球と金星)
  - 巨大衝突ステージで原始惑星が軌道交差する時、離心率大
  - 残っていたガスか微惑星によるダンピングが必要
3. 若い月年齢
  - Hf-W, U/Pbなどの同位体システム ~100 Myr (Touboul et al. 2007, Allegre et al. 2008)
  - 月形成のメカニズムは巨大衝突説が最有力

# 太陽系形成標準モデル



- 微惑星(10kmサイズ)の形成



- 暴走成長による原始惑星の形成 (~100万年)



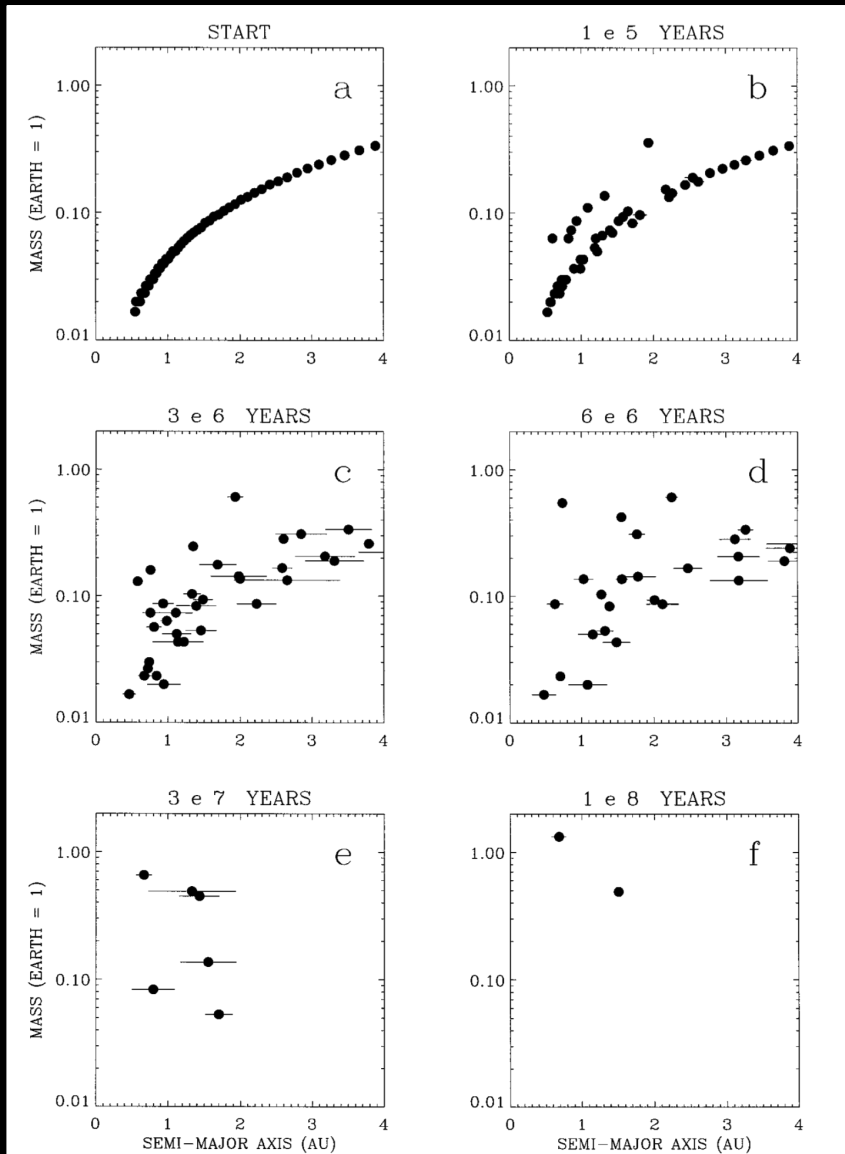
- 木星の形成、ガスの散逸、原始惑星同士の衝突(巨大衝突)の開始 (~1000万年)



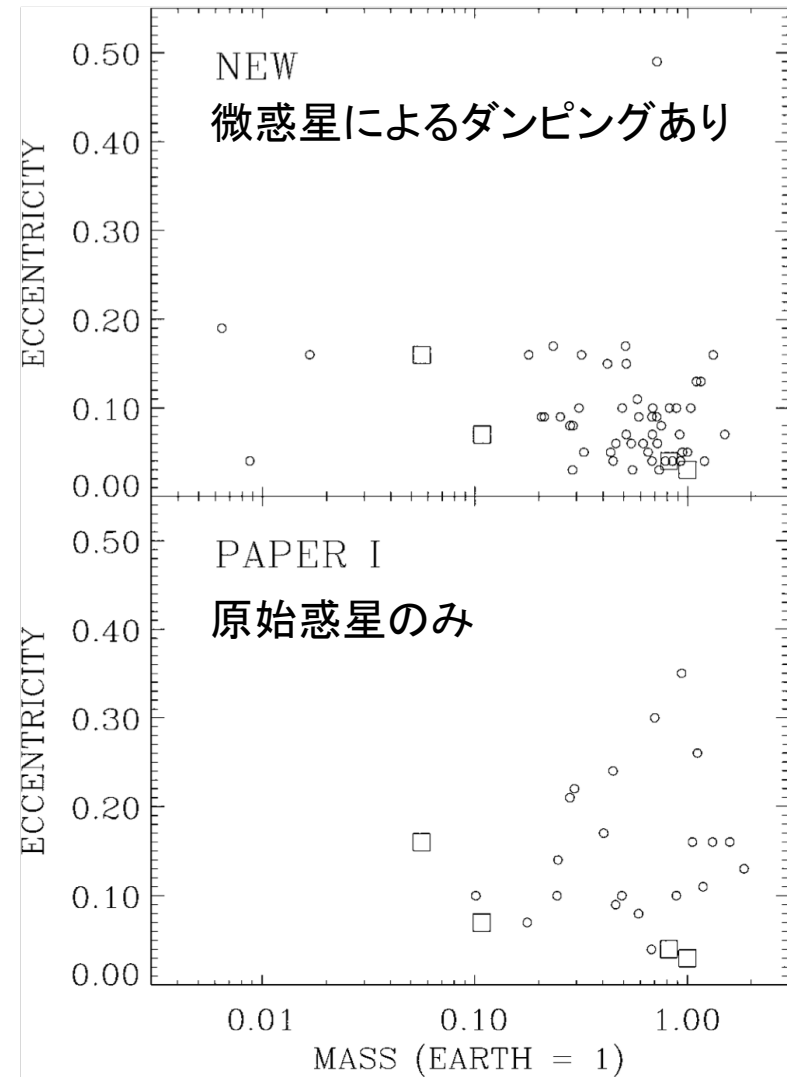
- 月形成の巨大衝突 (~1億年)



# 先行研究1:原始惑星のみの集積と微惑星の効果

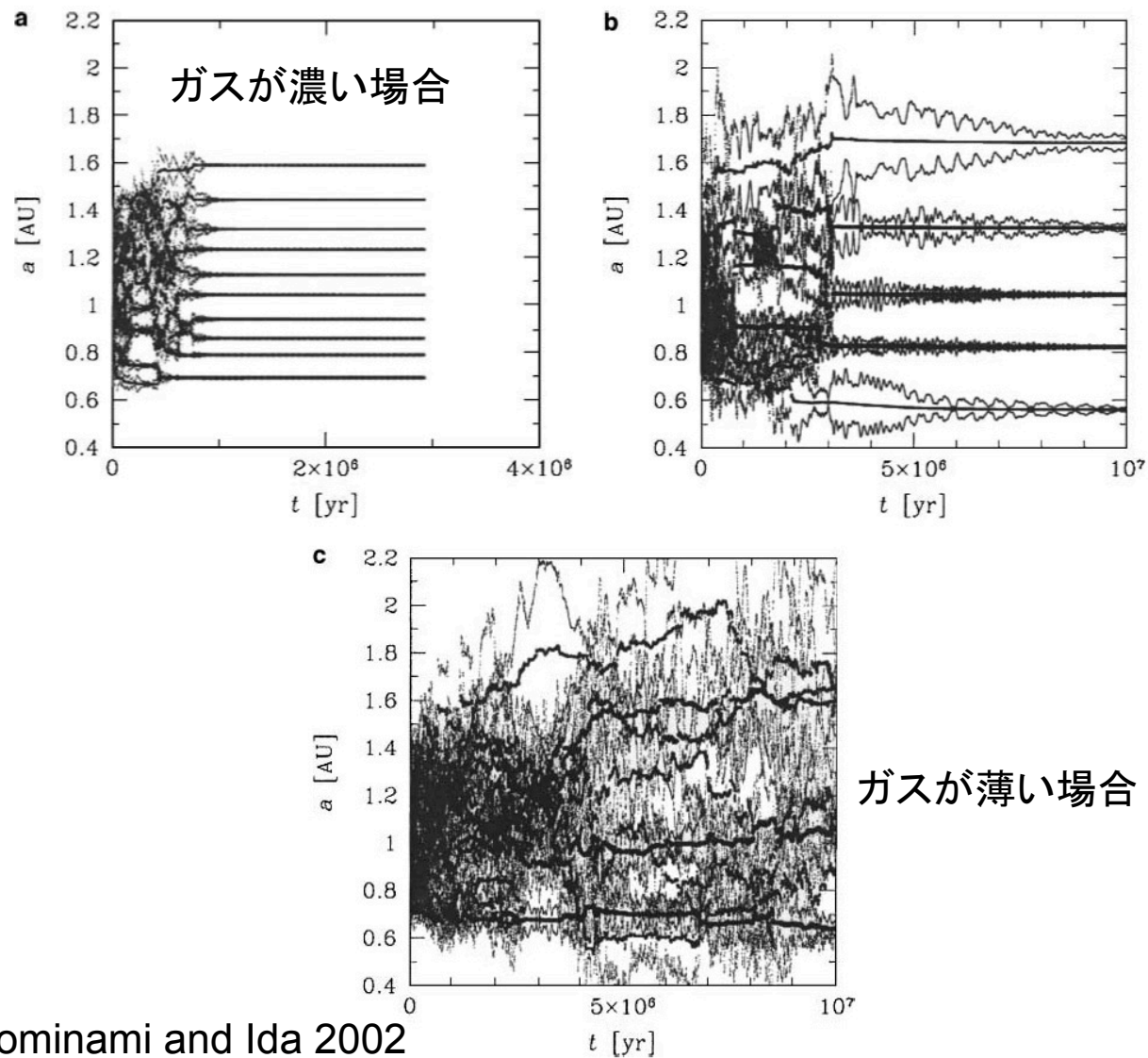


Chambers et al. 1998



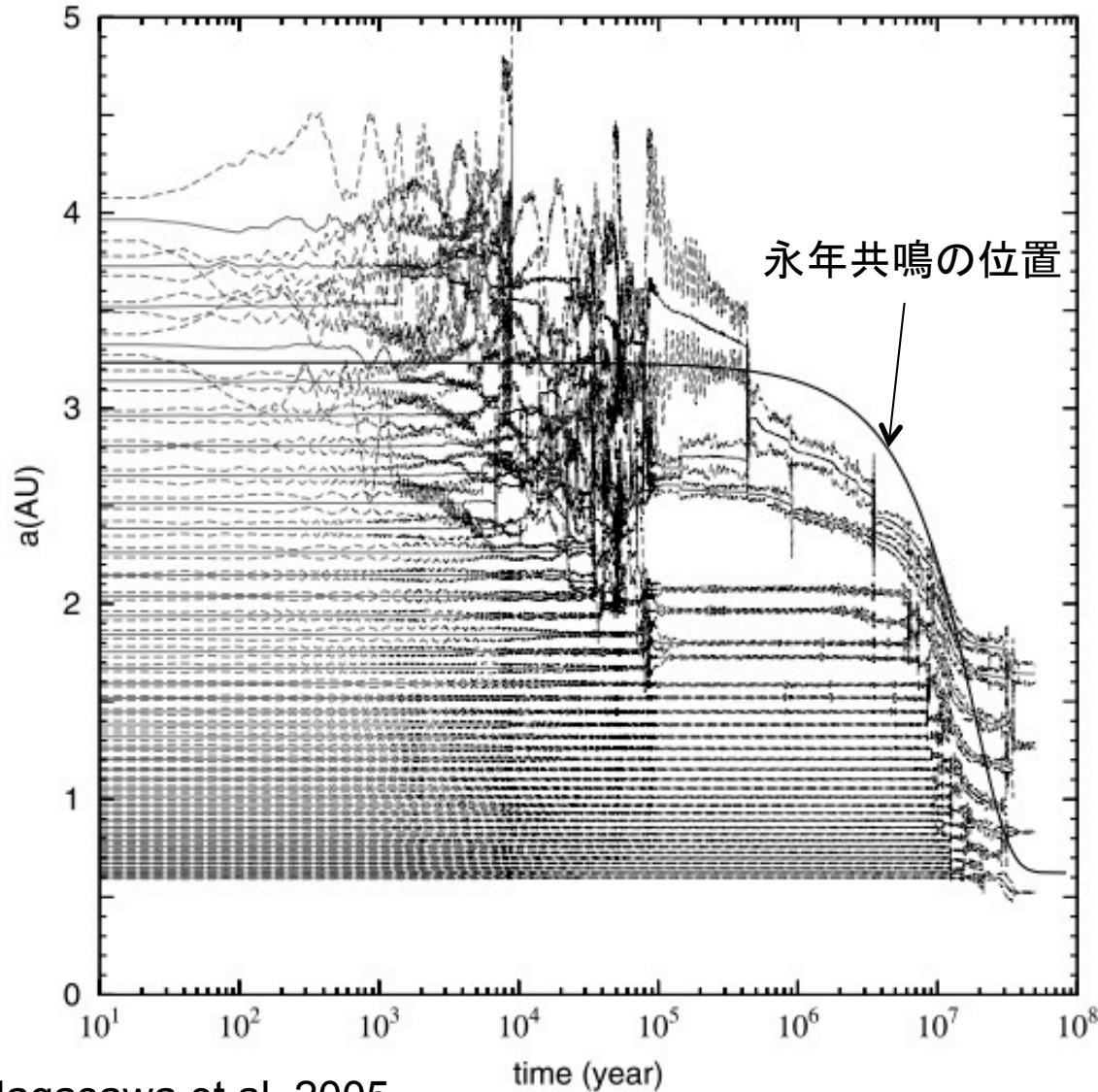
Chambers 2001

## 先行研究2: ガスの効果



ガスの散逸させ方に  
チューニングが必要

# 先行研究3: 木星とガスの効果の組み合わせ



Nagasawa et al. 2005

永年共鳴によりガスが濃い  
間に原始惑星の衝突が起こる

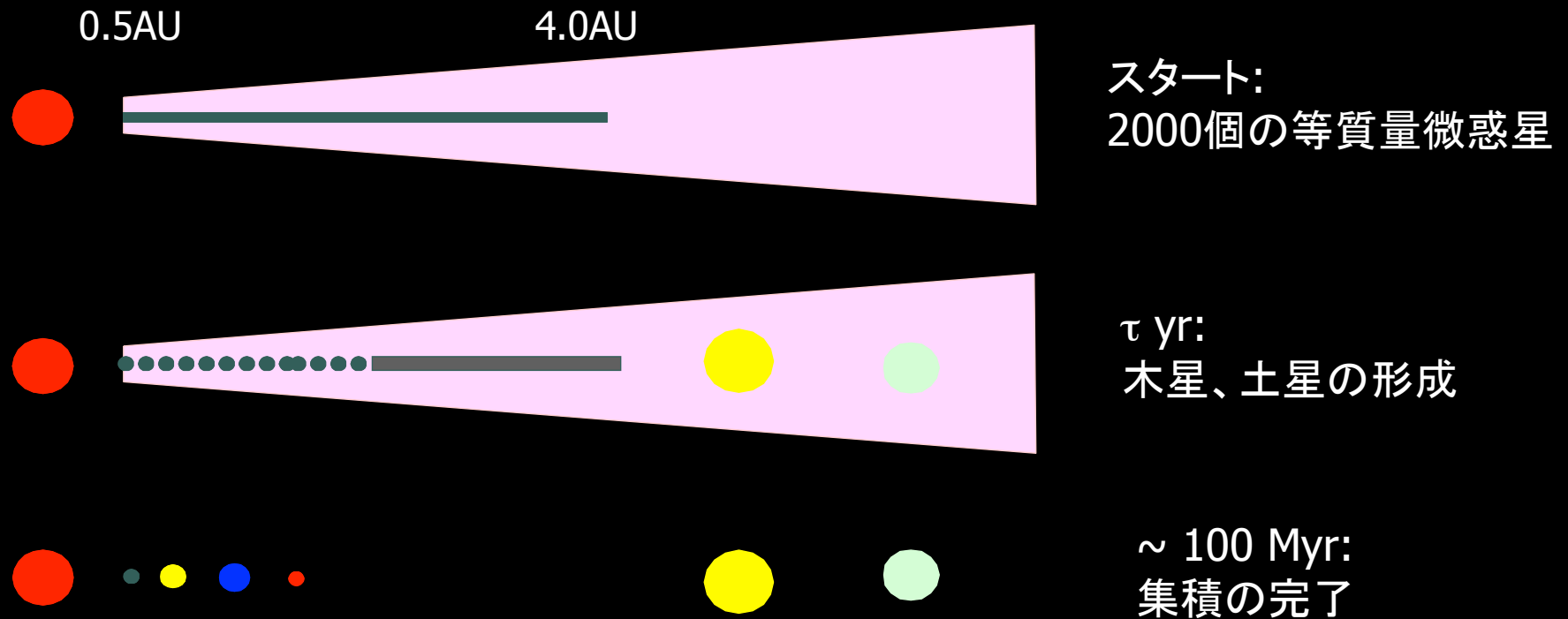
地球と金星の短い軌道間隔  
を再現できる現在の所唯一の  
メカニズム

# 先行研究の問題点

- ガスの効果を入れた研究 (Kominami and Ida, 2002, 2004, Nagasawa et al. 2005, Ogihara et al. 2007, Thommes et al. 2008)
  - 100 My もの間、ガスが残っているか？ 観測からは  $<10\text{Myr}$  (e.g., Pascucci et al. 2006)。
  - 長時間ガス中で、原始惑星が Type I migration から生き残れるか？
- 微惑星の効果を入れた研究 (Chambers 2001, O'Brien et al. 2006, Raymond et al. 2006, 2009, Morishima et al. 2008)
  - 初期条件での微惑星のサイズ、空分布は任意。微惑星総質量が同じでも、遠くより近くに小さい微惑星があればダンピングは強い。
  - ガスの効果を完全に無視。木星形成後しばらくはあったはず。

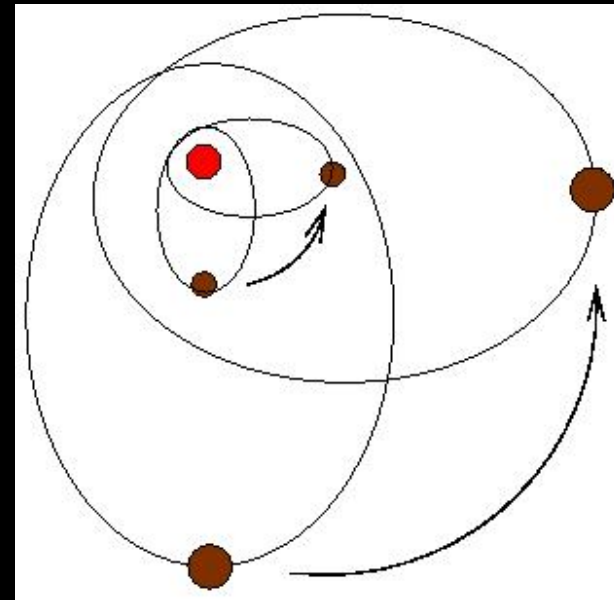
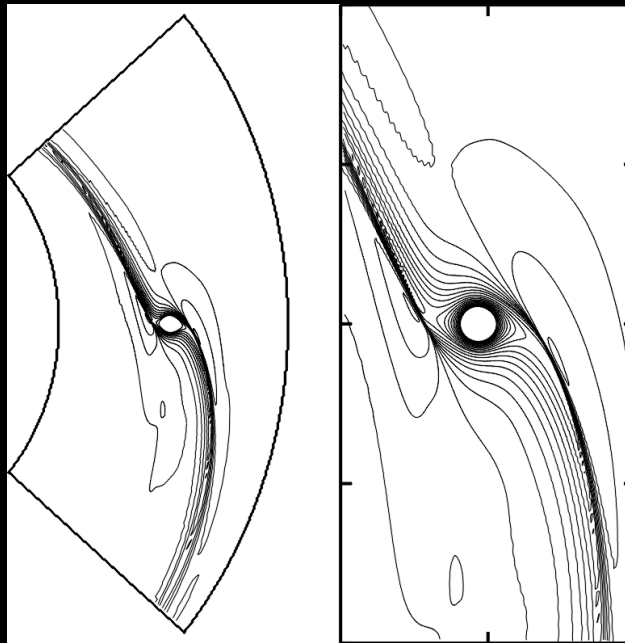
# 本研究におけるN体計算

考えられうる全ての効果(乱流除く)を入れて、  
力任せにパラメータスタディ



# ガスの効果

1. 空力的抵抗 (小さい微惑星に重要)
2. 重力的抵抗 (大きい惑星に重要)、Type I migration
3. ガスディスク全体の重力  
ガスの散逸に伴う木星との永年共鳴の移動 (Nagasawa et al. 2005)



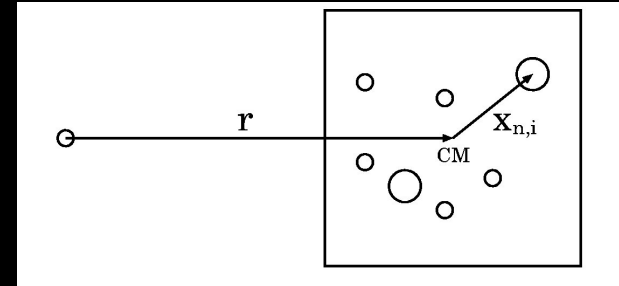
Tanaka et al. (2002)

# 並列N体コード “PLANET-Z”

- 空間領域(重力計算): 並列ツリー法 PKDGRAV (Stadel 2001,2008)  
遠方粒子群の重力を4次まで多重局展開

$$\Psi = \gamma M_0 + \underbrace{\frac{\partial \gamma}{\partial x_i}}_0 M_1 + \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x_i \partial x_j} M_2 + \dots,$$

$$M_0 = \sum_n m_n, \quad M_1 = \sum_n m_n x_{n,i}, \quad M_2 = \sum_n m_n x_{n,i} x_{n,j}, \dots$$



- 時間領域: 混合変数シンプレクティック法 SyMBA (Duncan et al.1998)

(1)  $V_0 \rightarrow V_{1/2}$  ( $K_0(\tau/2)$ )  
多粒子からの重力  
(太陽重力除く)

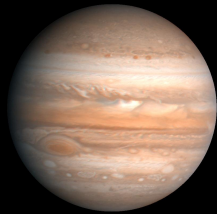
(2)  $X_0 \rightarrow X_1$  ( $D(\tau)$ )  
ケプラー軌道に  
沿った移動

(3)  $V_{1/2} \rightarrow V_1$  ( $K_0(\tau/2)$ )

近接散乱では,  $D(\tau) \rightarrow [K_1(\tau/6)D(\tau/3)K_1(\tau/6)]^3$  ( $K_1$  は近傍粒子からの重力)

# パラメータ

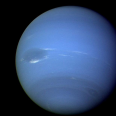
- ガスの散逸時間:  $\tau = 1, 2, 3 \text{ Myr}$   
 $\tau > 3 \text{ Myr}$ だと, 最終的な惑星質量が小さくなりすぎる
- 固体物質の初期総質量: 5 and 10  $M_{\text{Earth}}$
- 木星と土星の軌道:



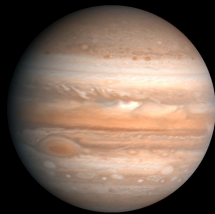
$$a_j = 5.2 \text{ AU}$$
$$e_j = 0.048$$



$$a_s = 9.5 \text{ AU}$$
$$e_s = 0.055$$



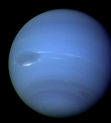
現在の JS 軌道  
(EJS: Eccentric JS)



$$a_j = 5.45 \text{ AU}$$
$$e_j = 0.0$$



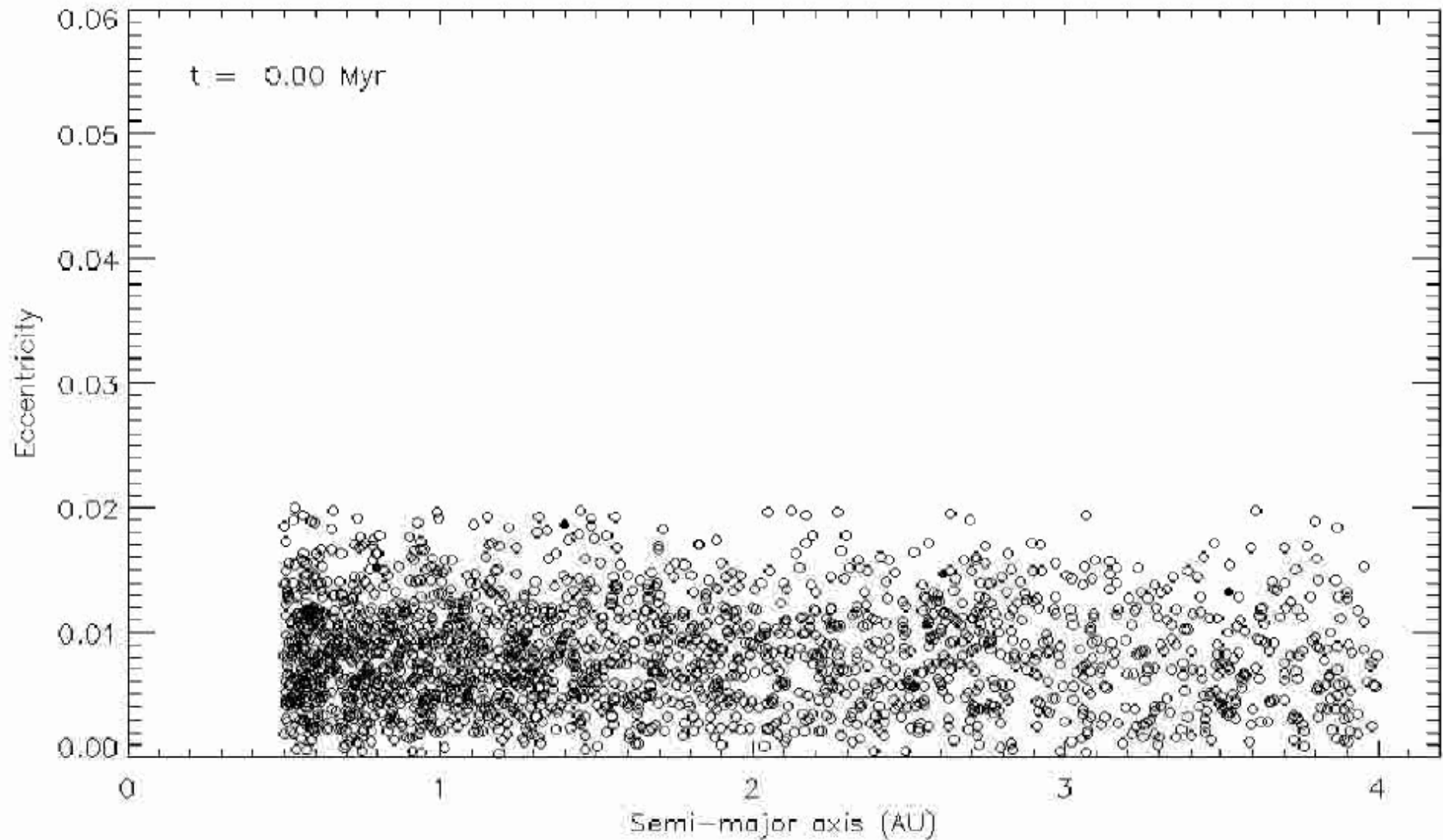
$$a_s = 8.18 \text{ AU}$$
$$e_s = 0.0$$



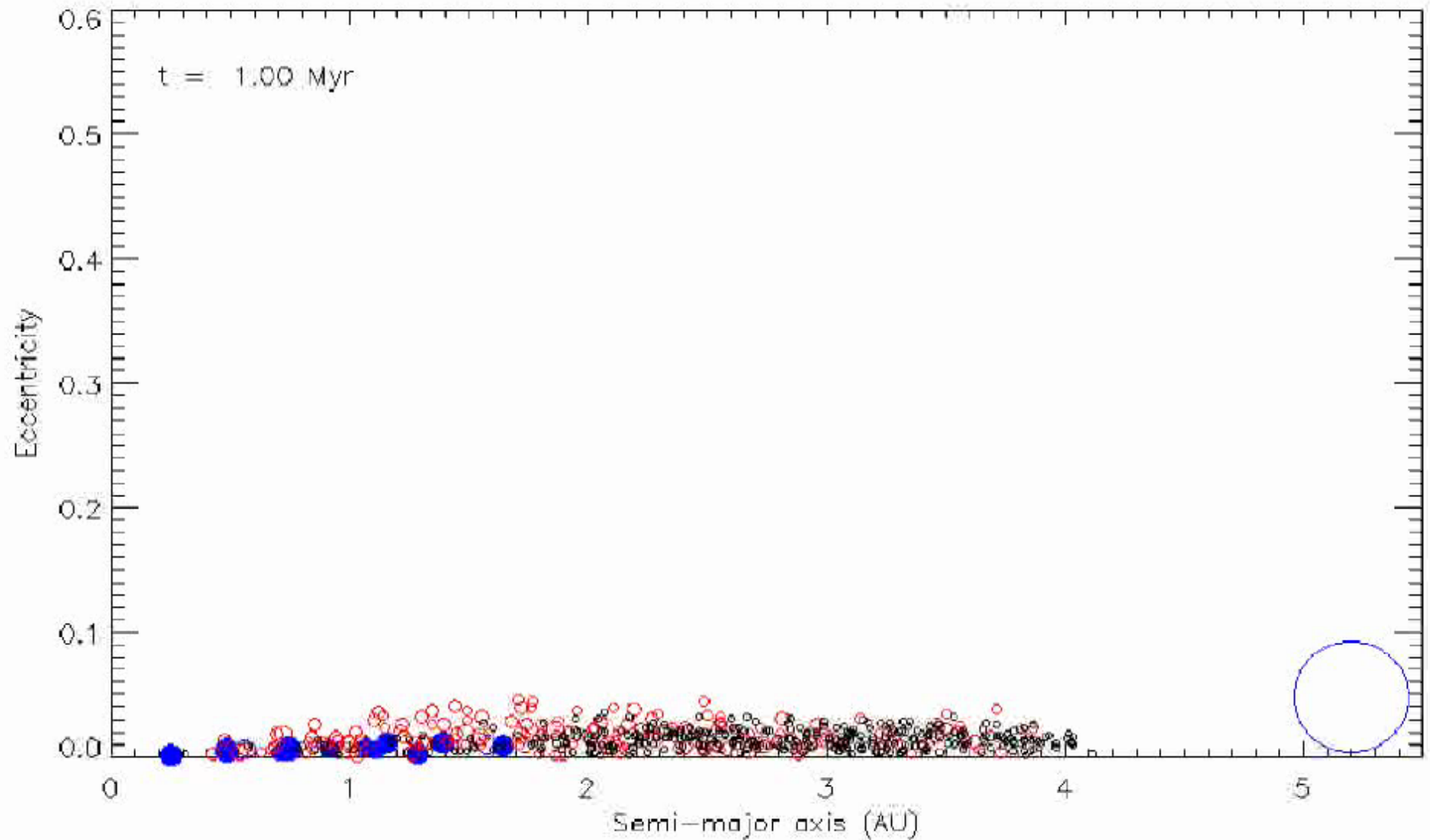
Nice model JS 軌道  
(CJS: Circular JS)

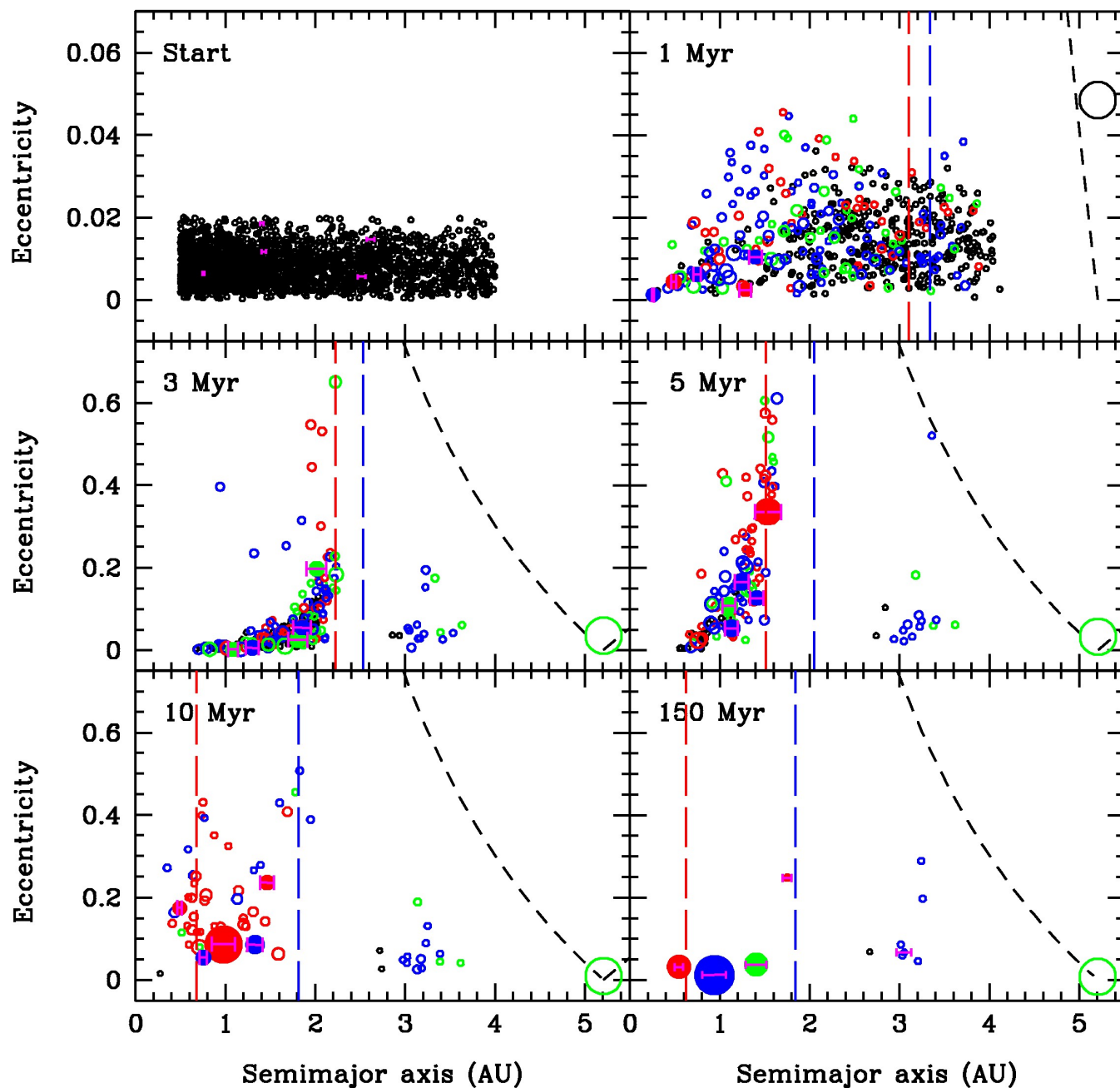


# 暴走成長ステージ ( $\tau = 1\text{Myr}$ , $M_{\text{total}} = 5M_{\text{Earth}}$ )



# 現在の木星土星の軌道の場合(EJS)





現在の木星、土星  
の軌道の場合

( $\tau = 1\text{Myr}$ )

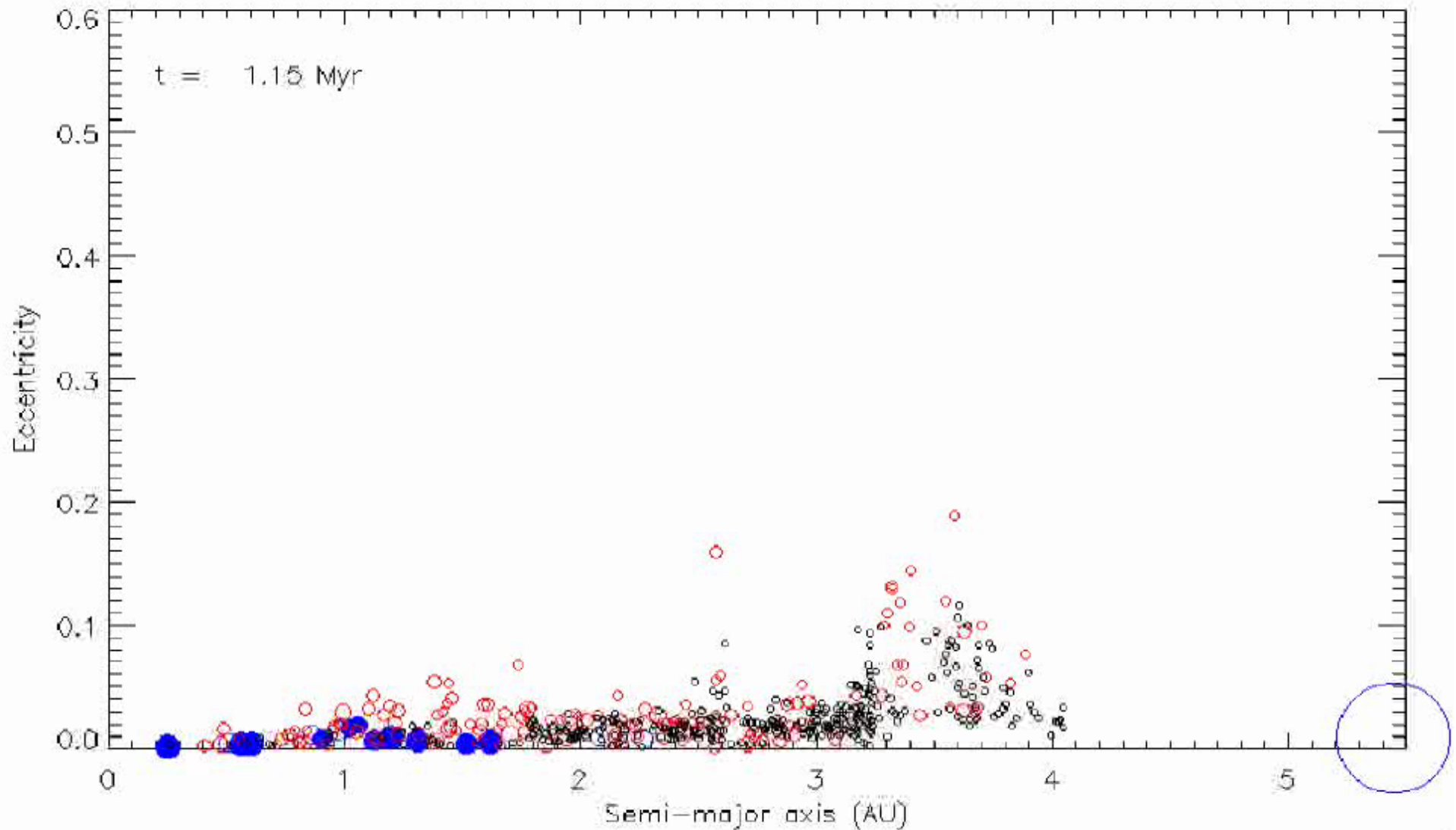
$M_{\text{total}} = 5M_{\text{Earth}}$ )

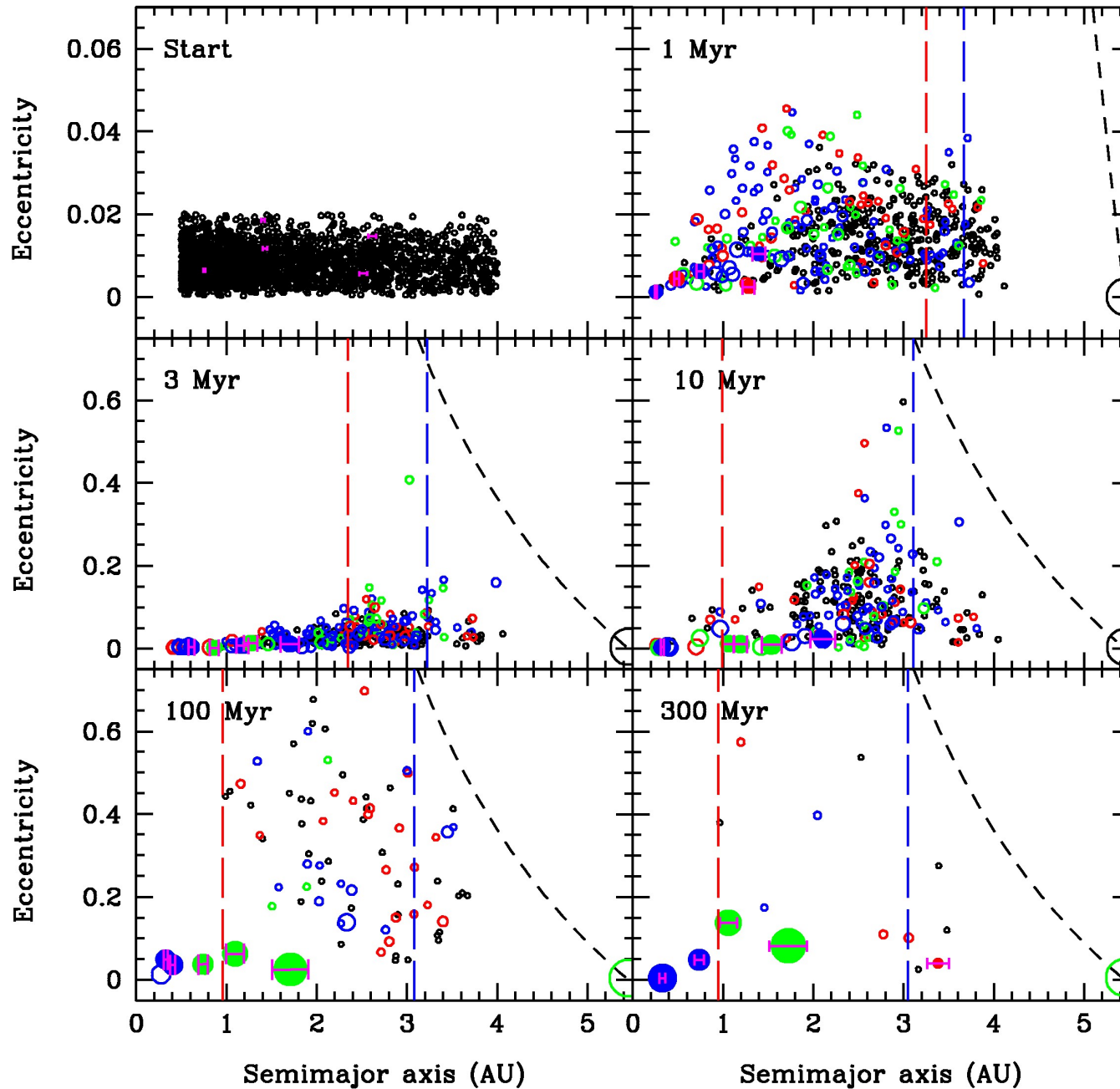
永年共鳴(赤線)が  
3 から0.6AUに移動

集積は速い

天体の色は自転を表す:  
赤(速)、青(中)、緑(遅)、  
黒(0)

# Nice modelの木星土星軌道の場合(CJS)





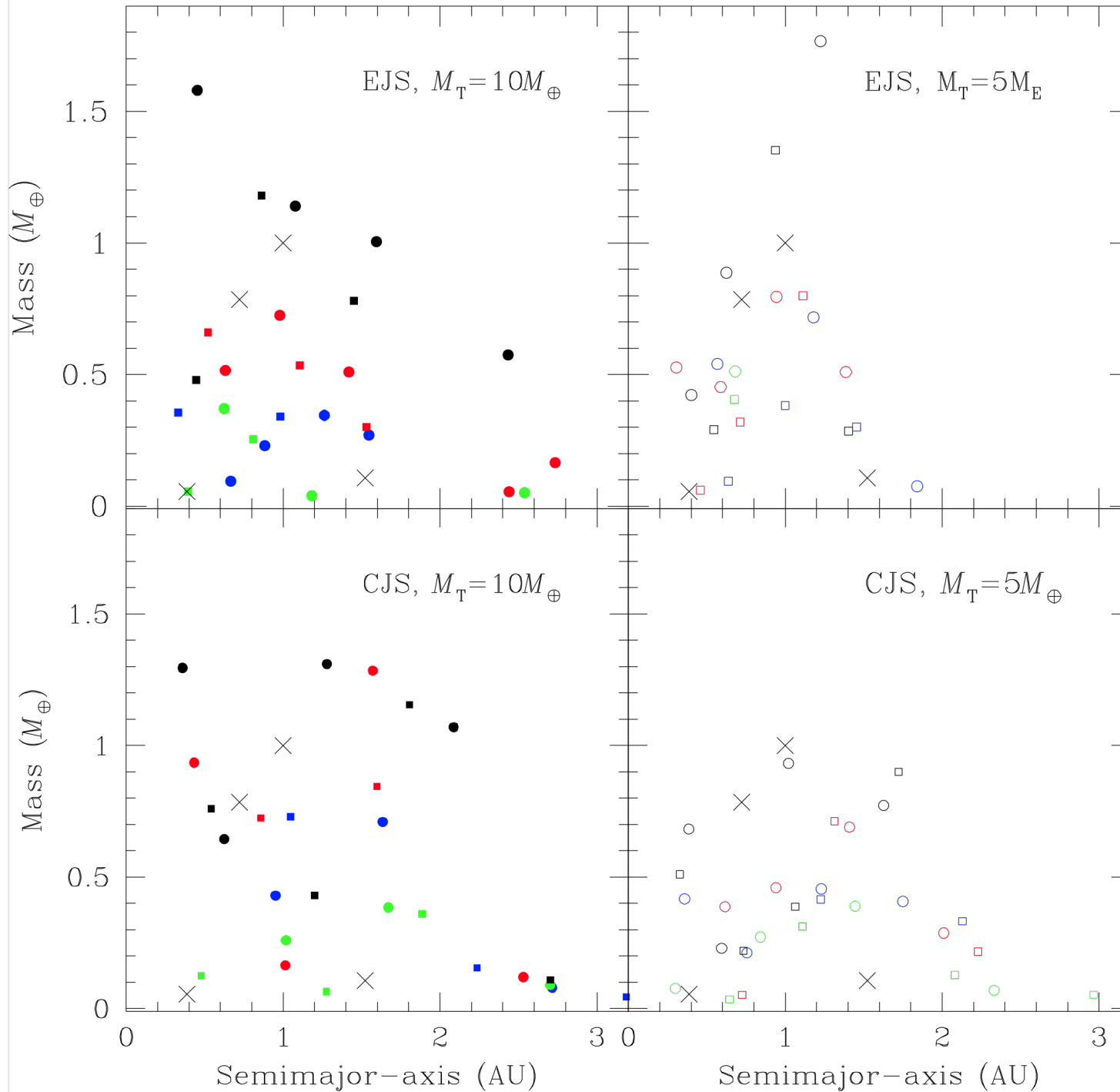
Nice modelの木星、  
土星軌道の場合

( $\tau = 1\text{Myr}$   
 $M_{\text{total}} = 5M_{\text{Earth}}$ )

永年共鳴の影響  
小さい

遅い集積

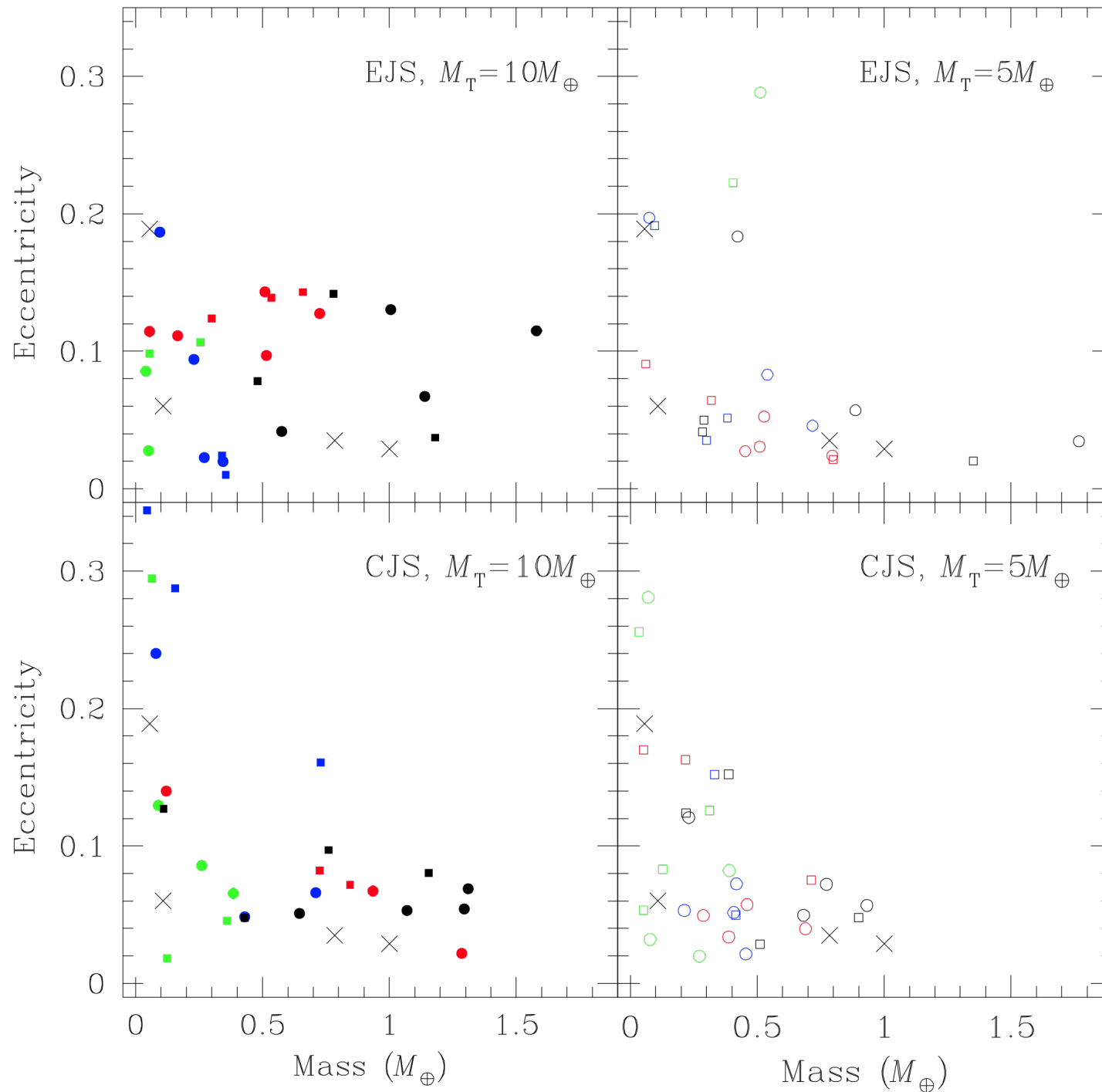
地球サイズの惑星が、  
2AU付近に必ず形成



## 空間質量分布

Nice model JSでは  
火星軌道付近に  
地球サイズの惑星  
が形成

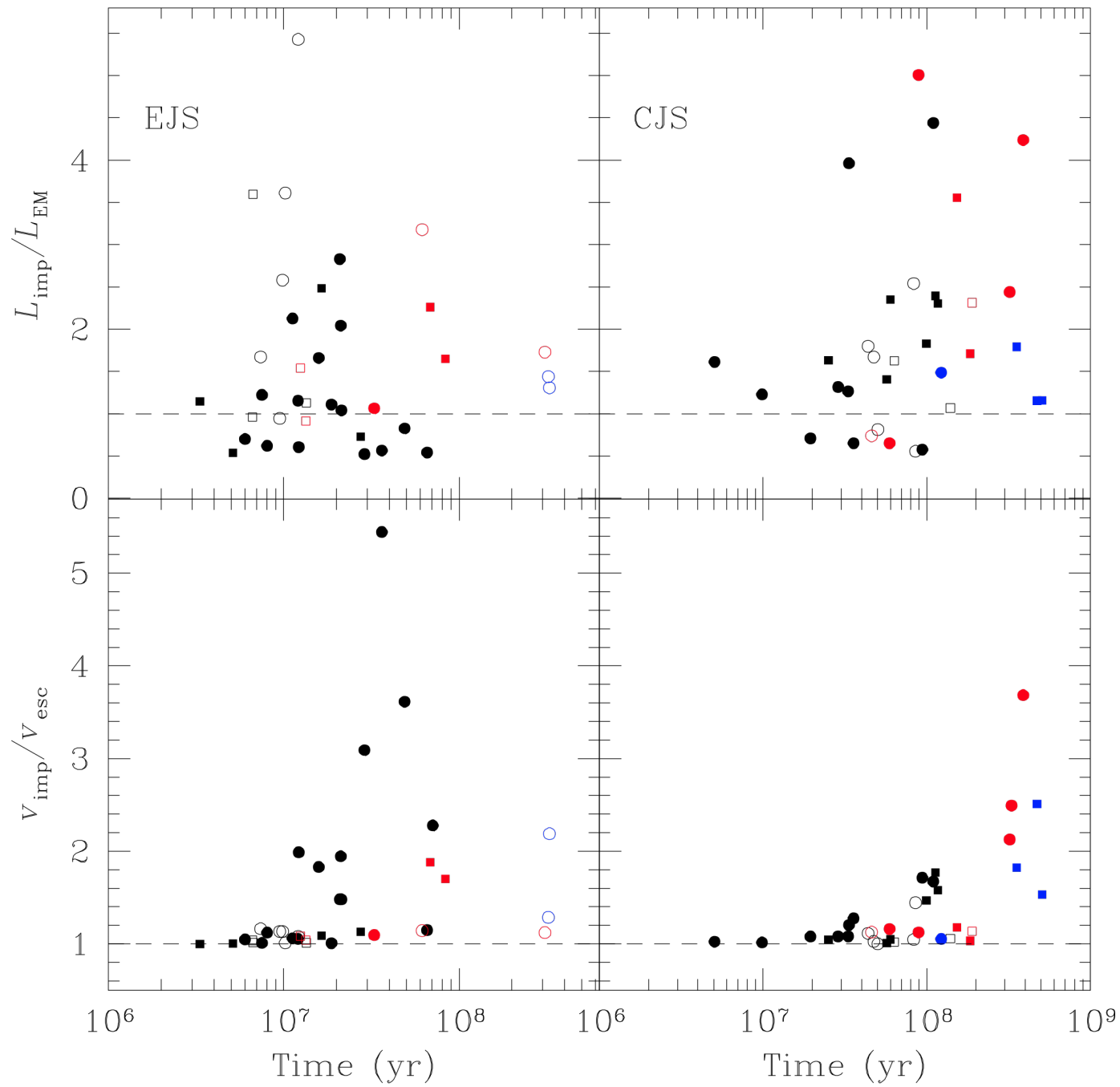
色はガスの散逸時間  
黒 1 Myr、赤 2 Myr  
青 3 Myr、緑 5 Myr



## 軌道離心率

空間質量分布と  
相関あり

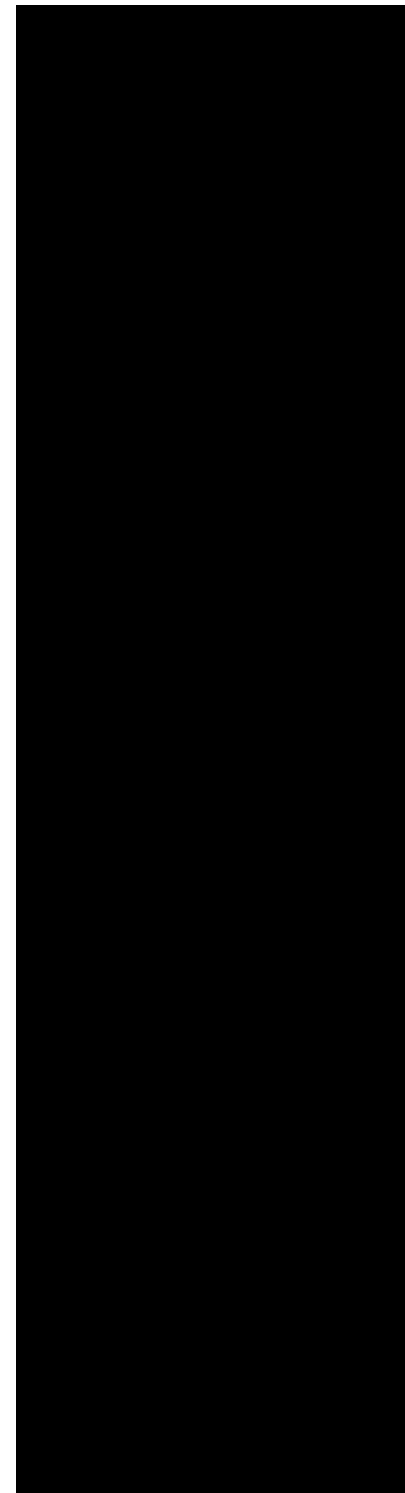
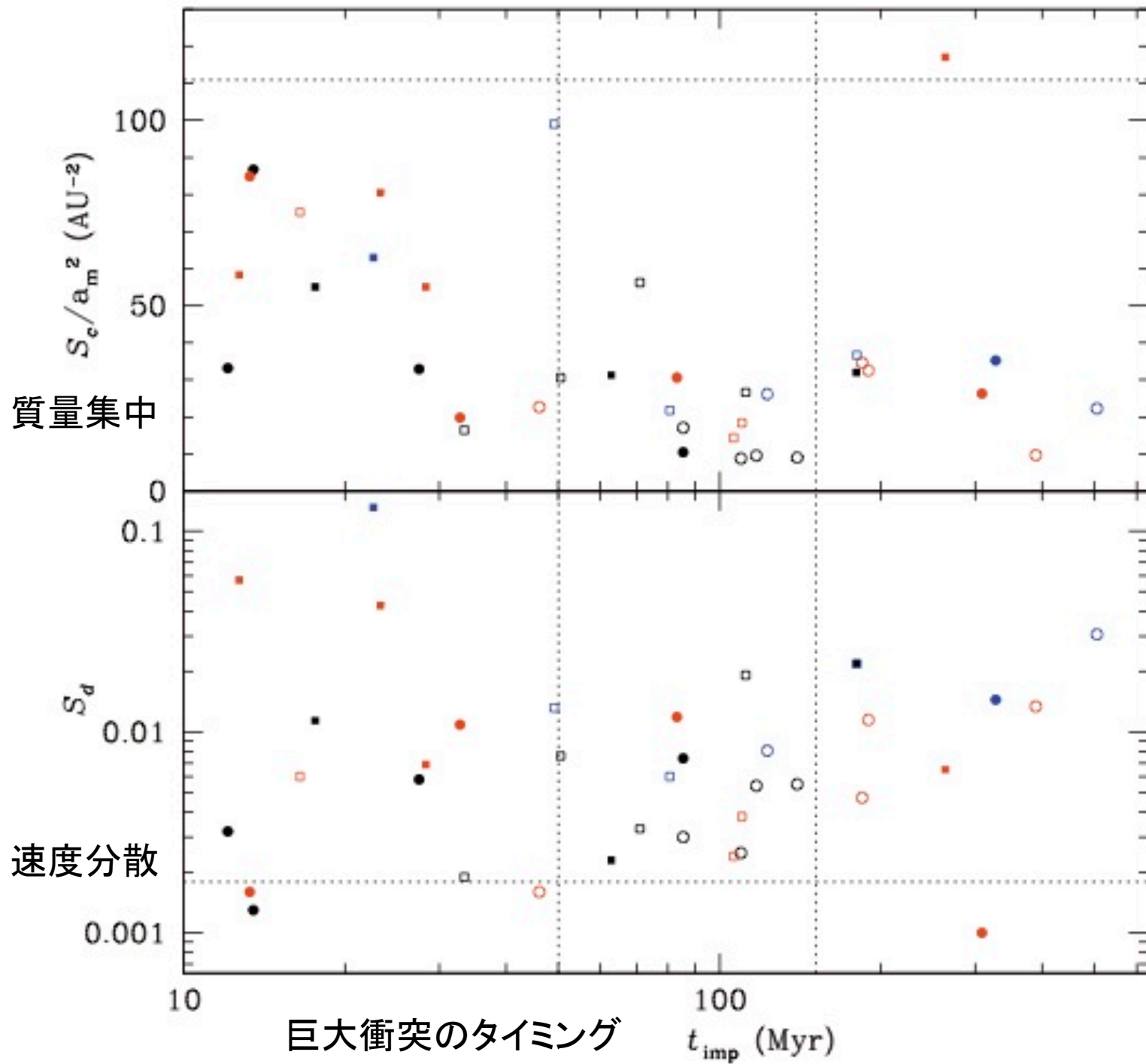
外側に大きな惑星  
があると、 $e$ は大きくなりやすい。



# 巨大衝突の タイミング

EJS ~ 10 Myr  
CJS ~ 100 Myr





# まとめ

木星、土星の軌道が地球形成問題の鍵

	現在JS軌道	Nice model JS軌道
空間質量分布	○	×
小さい離心率	△	△
巨大衝突時間	△	◎

局所集中した空間質量分布と遅い巨大衝突時間はトレードオフの関係にあり、両者を同時に満たすのは非常に困難。

# 考えられうるシナリオ

- 現在JS軌道の場合
  1. ガスの散逸時間  $> 10$  Myr、かつ惑星がガス中で落下しない  
(Nagasawa et al. 2005, Thommes et al. 2008)
  2. 木星形成直後にガスが散逸、永年共鳴の影響は弱く集積時間が多少長くなる。微惑星のダンピングは十分か？  
(Raymond et al. 2009)
- Nice Model JS軌道の場合
  3. 微惑星形少し成時に小惑星帯の質量がすでに相当減少、地球軌道付近に質量集中。集積が速すぎる問題がある。  
(Morishima et al. 2008)

## 考えられうるシナリオ2

4. 100My頃に、木星型惑星の軌道がCJSからEJSに変化したことにより、月形成が誘発された？

- Nice ModelではLate Heavy Bombardment (~800My) を起こすメカニズム (Gomes et al. 2005)
- 木星型惑星の軌道不安定が起こるタイミングは不確定 (Batygin and Brown 2010)
- 仮にこれで月形成が誘発されたとしても、100Myには1AU付近の微惑星はすでに枯渇。どうやって、地球型惑星の離心率を下げるか？

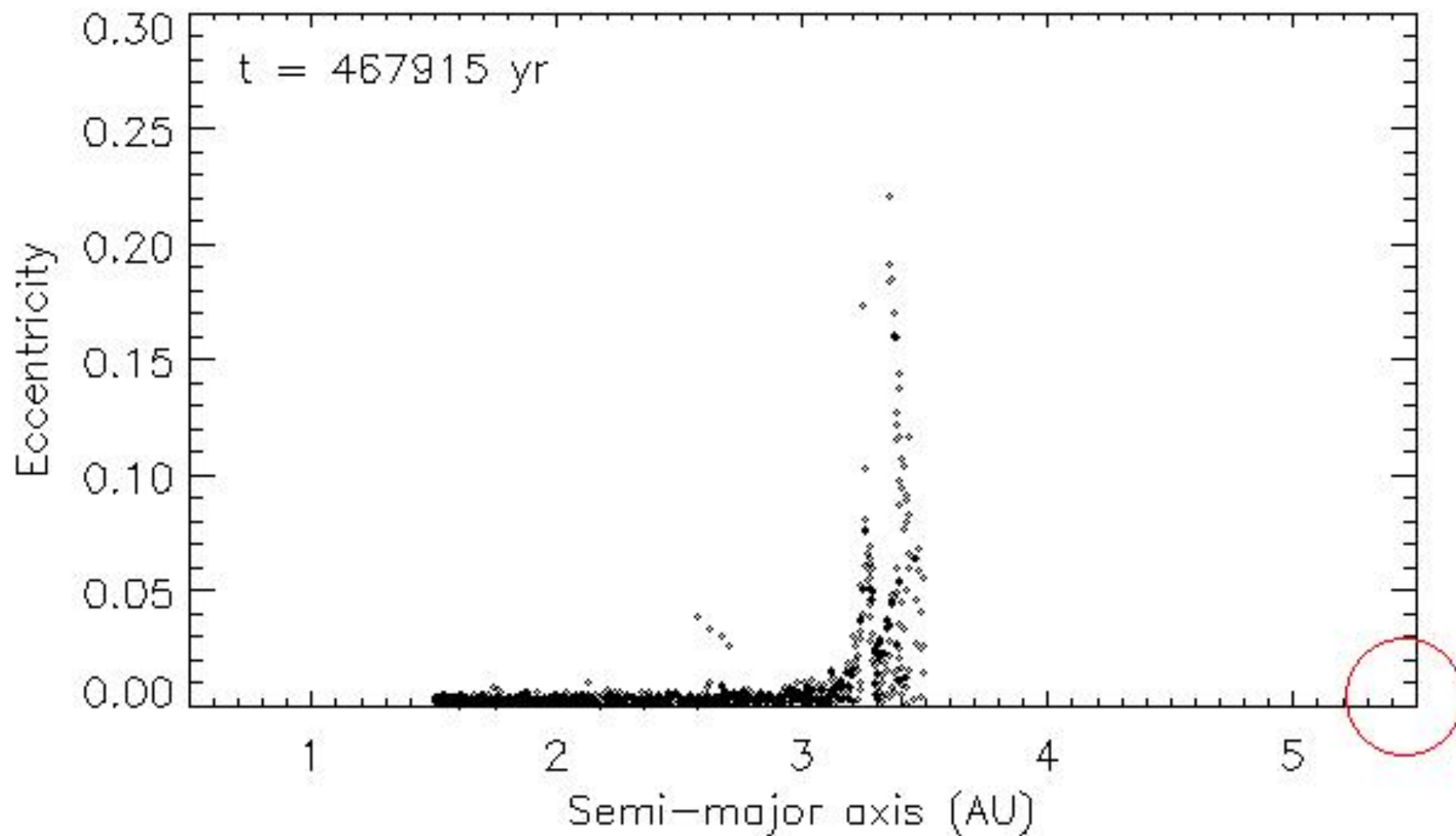
# 小惑星の衝突拡散

- 木星は離心率を増加させるが、軌道長半径は変化させない
- 小惑星同士の衝突により、空間的に拡散する

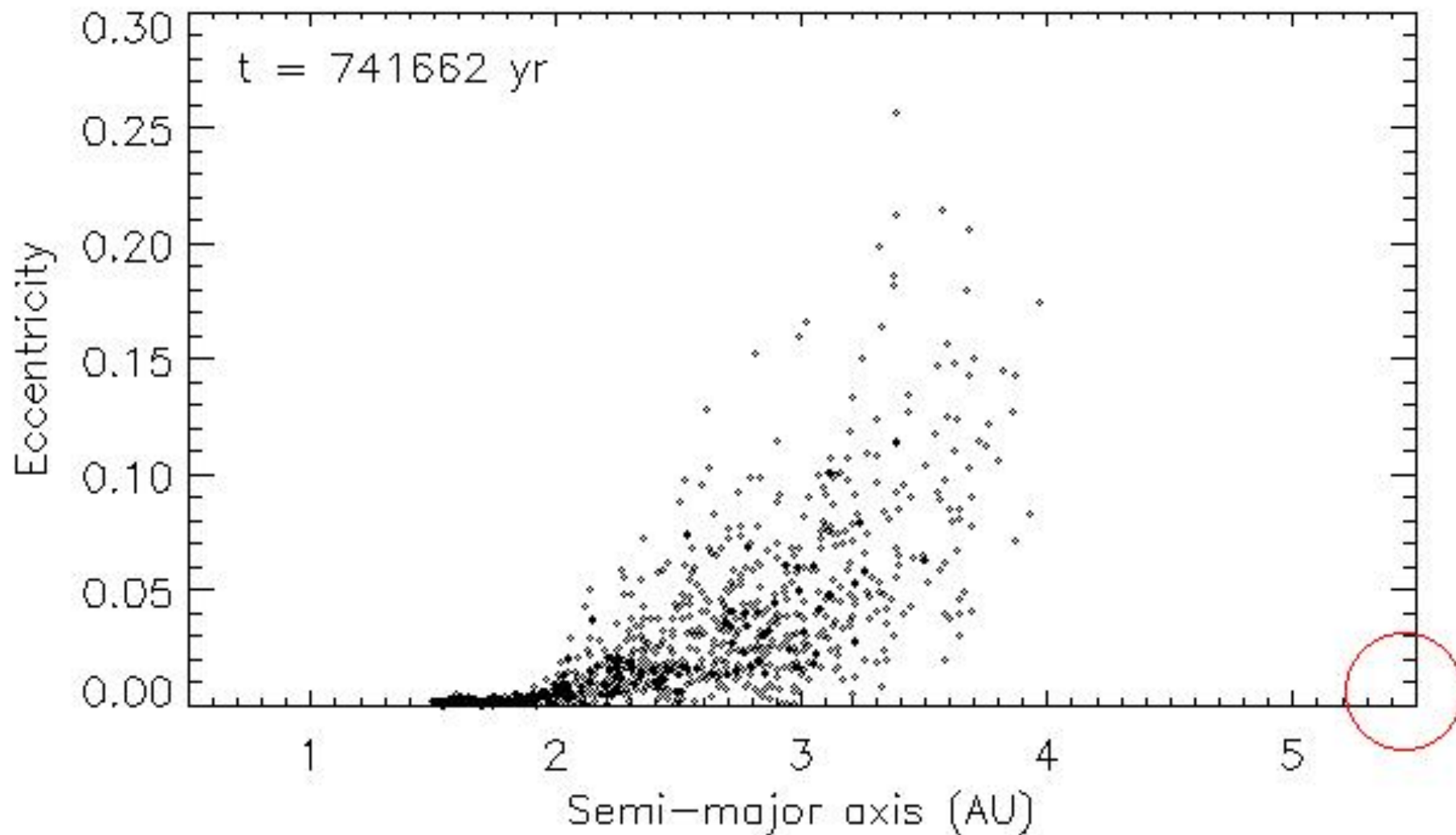
$$\nu = 0.15 \frac{v_r^2}{\Omega} \frac{\tau}{1 + \tau^2}, \quad t_{\text{diff}} = \frac{a^2}{\nu} \sim \frac{T_{\text{orb}}}{e^2 \tau}$$

- 拡散時間は小惑星の離心率と光学的厚さに依存
- 破壊が進めば光学的厚さは増加
- 小惑星の半径を大きくして、相互重力を無視したテスト計算を以下で紹介

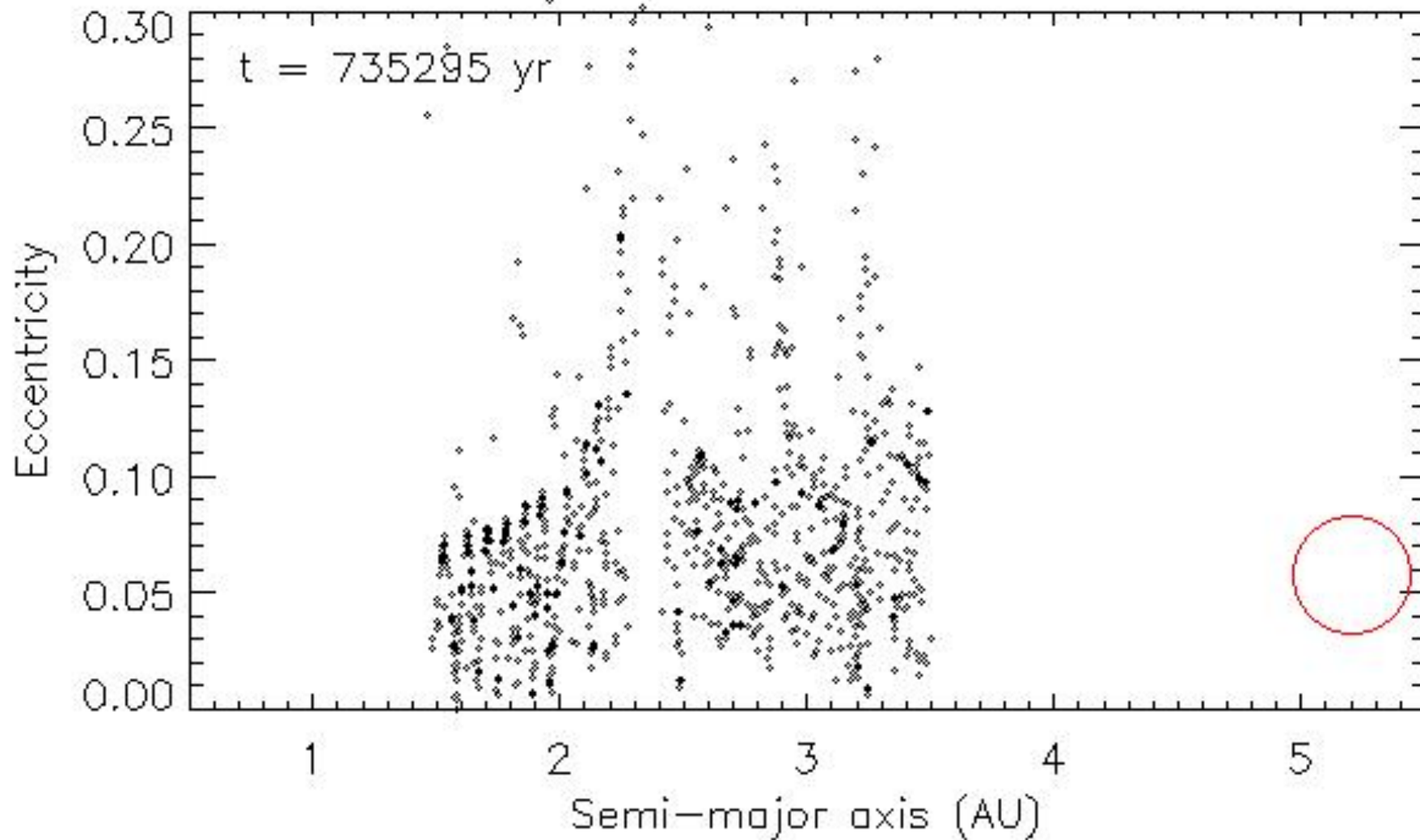
# CJS, $\tau=10^{-8}$ の場合



# CJS, $\tau=10^{-5}$ の場合

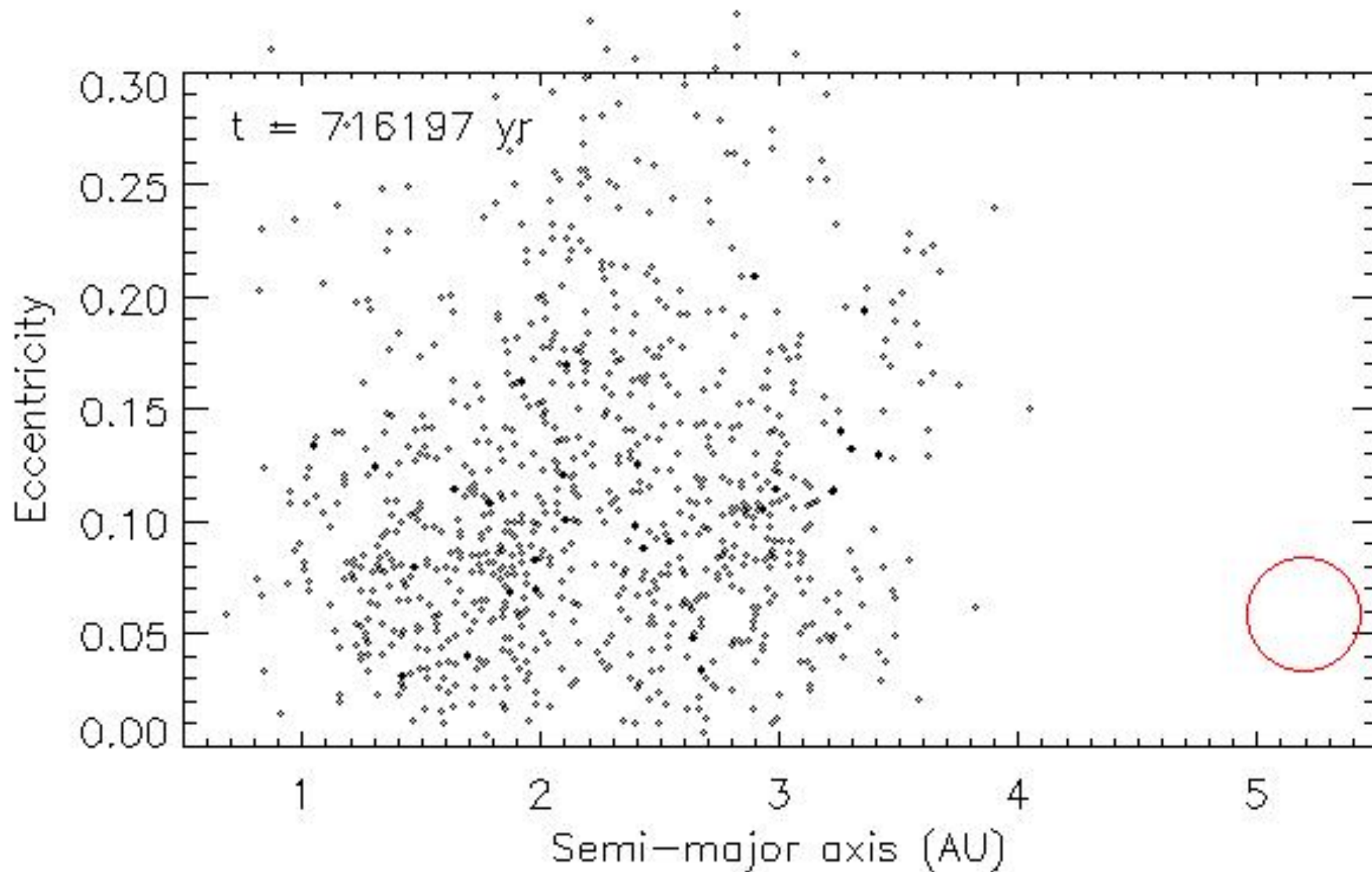


# EJS, $\tau=10^{-8}$ の場合

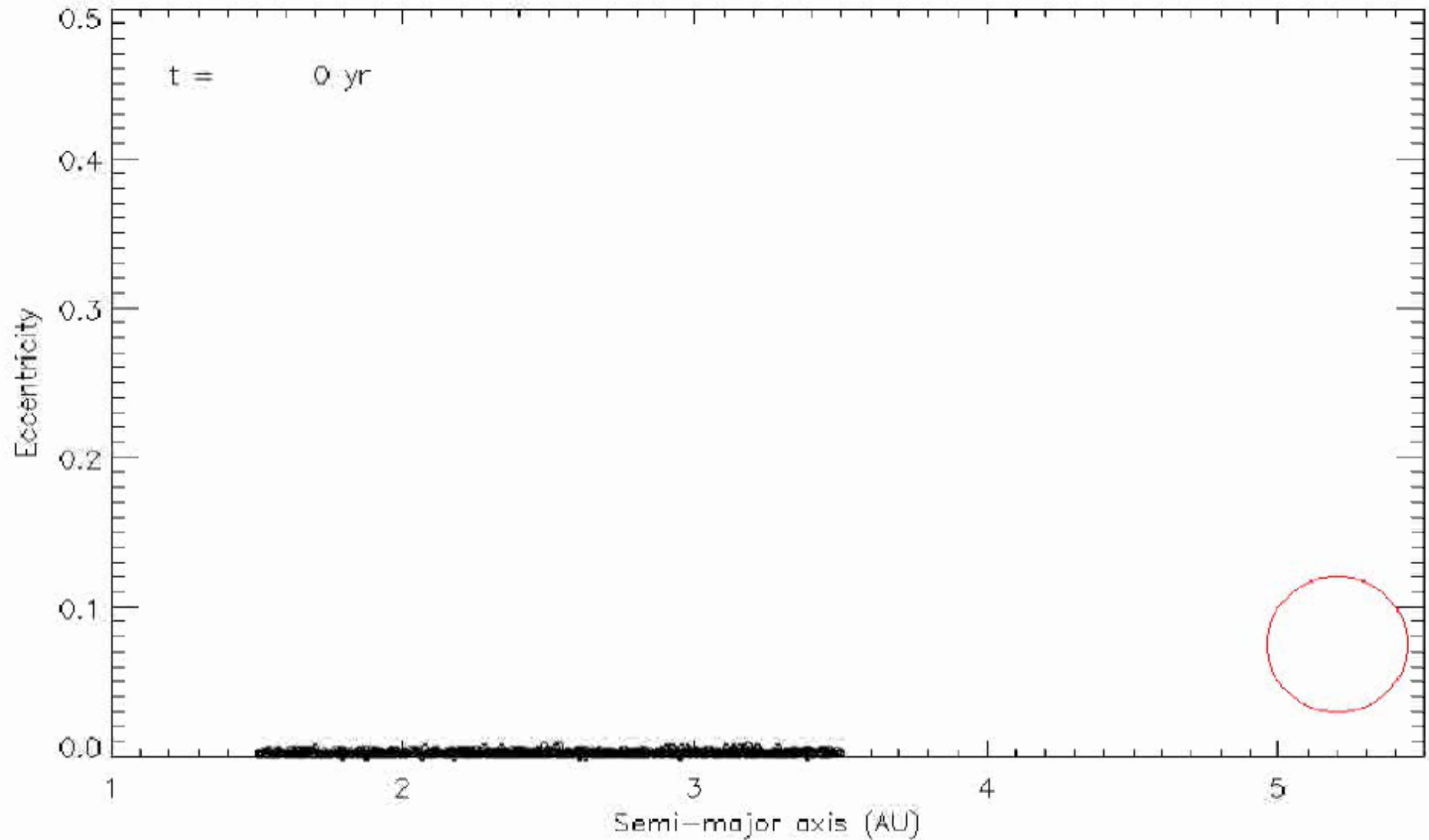




# EJS, $\tau=10^{-5}$ の場合



# EJS, $\tau=10^{-4}$ の場合



## まとめ2

- 木星の軌道離心率と小惑星帯の光学的厚さがある程度大きいと、小惑星の破片が地球軌道付近に短時間で拡散してくる
- これが地球型惑星の形成に及ぼす影響は現在調査中