

微惑星連星の進化、集積から探る冥王星や 円盤外側の惑星の形成・起源

小南淳子

東工大ELSI, ポスト「京」萌芽課題研究員



K computer

牧野淳一郎(神戸大学)
台坂博(一橋大学)、藤本正樹(JAXA)



(全部で44枚)

本講演は冥王星に特化しているものではありません。

しかし、研究会の趣旨が冥王星なので冥王星系のお話から入っていきます。

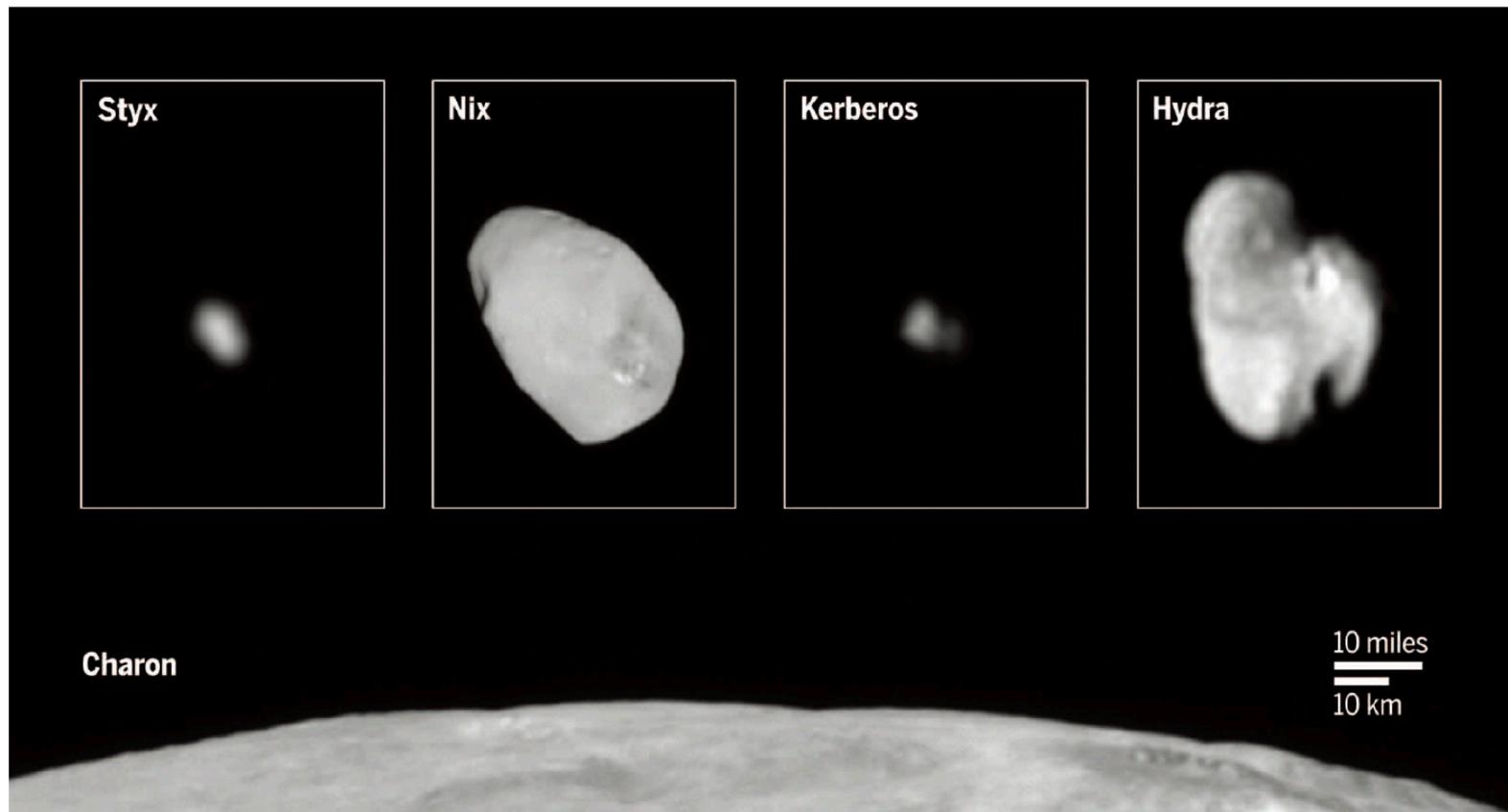
冥王星系

New Horizon で色々わかった



Brozovic et al. (2015)
Walsh & Levison (2015)

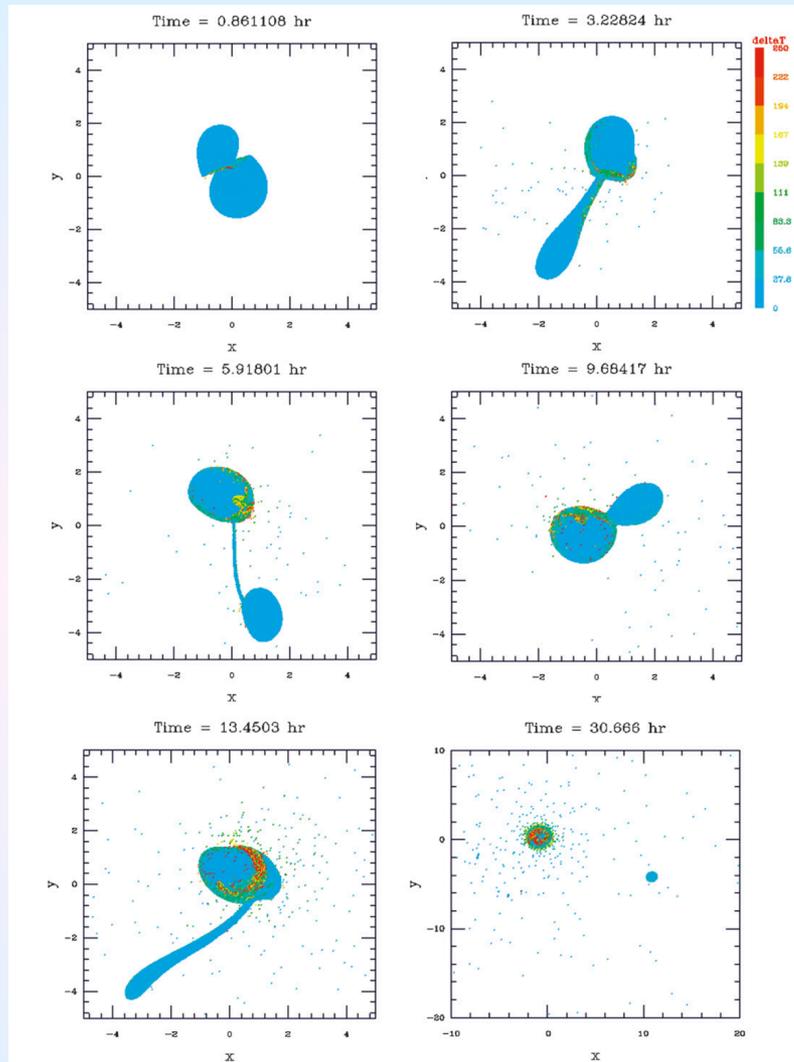
冥王星の衛星たちの大きさの比較



Weaver et al. (2016)

カロンが大きくて、他は細長く、とても小さい。
これもNew Horizon でわかったこと。

巨大衝突説



どのようにしてカロンなどが形成されたのかという一説に巨大衝突説があります。

SPHで計算。
カロン以外の衛星を再現するのが難しい。

後ほどの関根さんの講演

Canup (2011)

そもそも大きい物を円盤外側でつくるのは難しい

概要

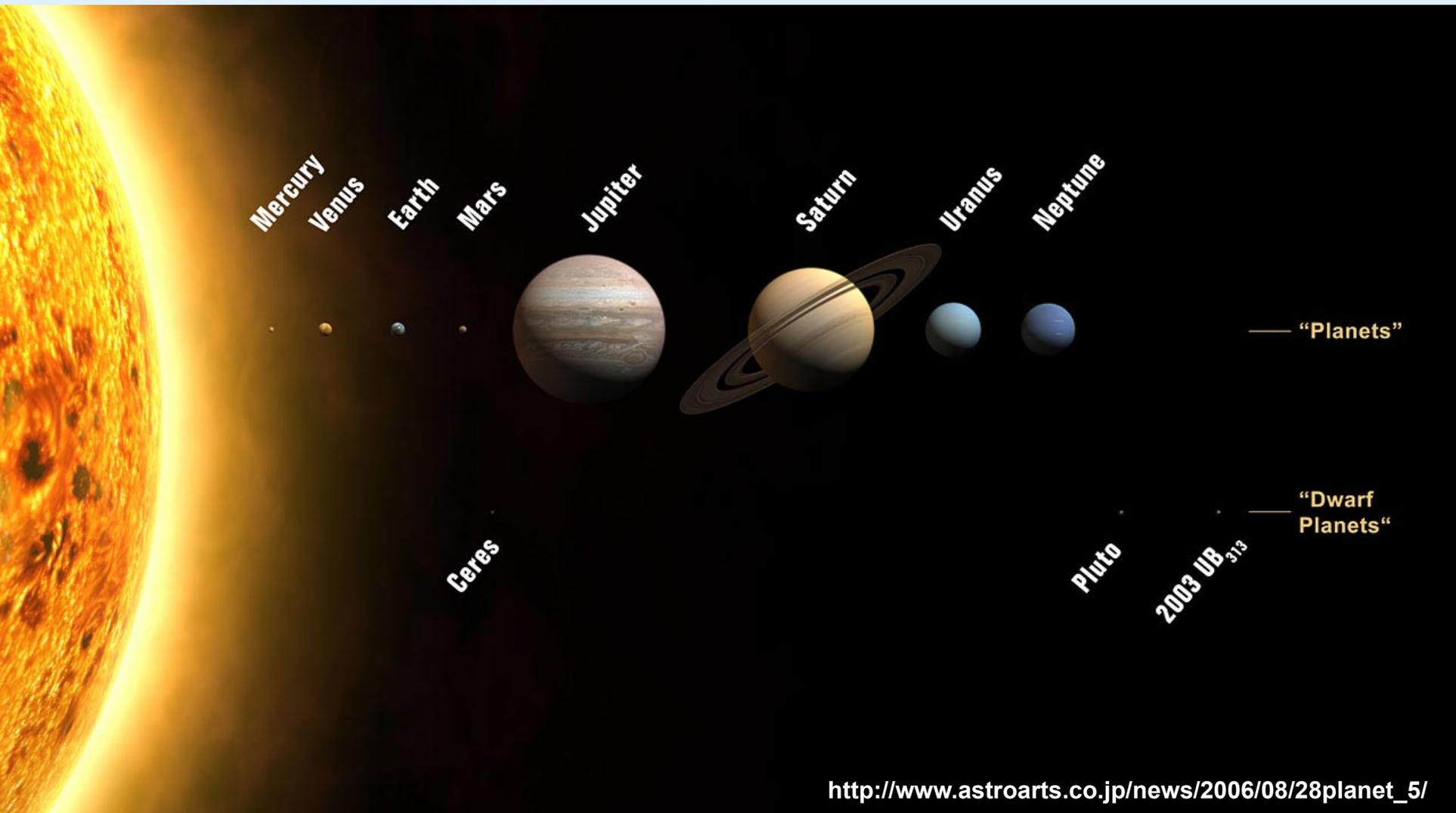
大きい天体を円盤外側で形成させるのは難しい。

一方で微惑星連星は円盤外側では頻繁に形成される。
その微惑星連星は微惑星どうしの衝突確率を変化させる。

円盤内側で大きい天体を形成→外側へ移動という方法もある。

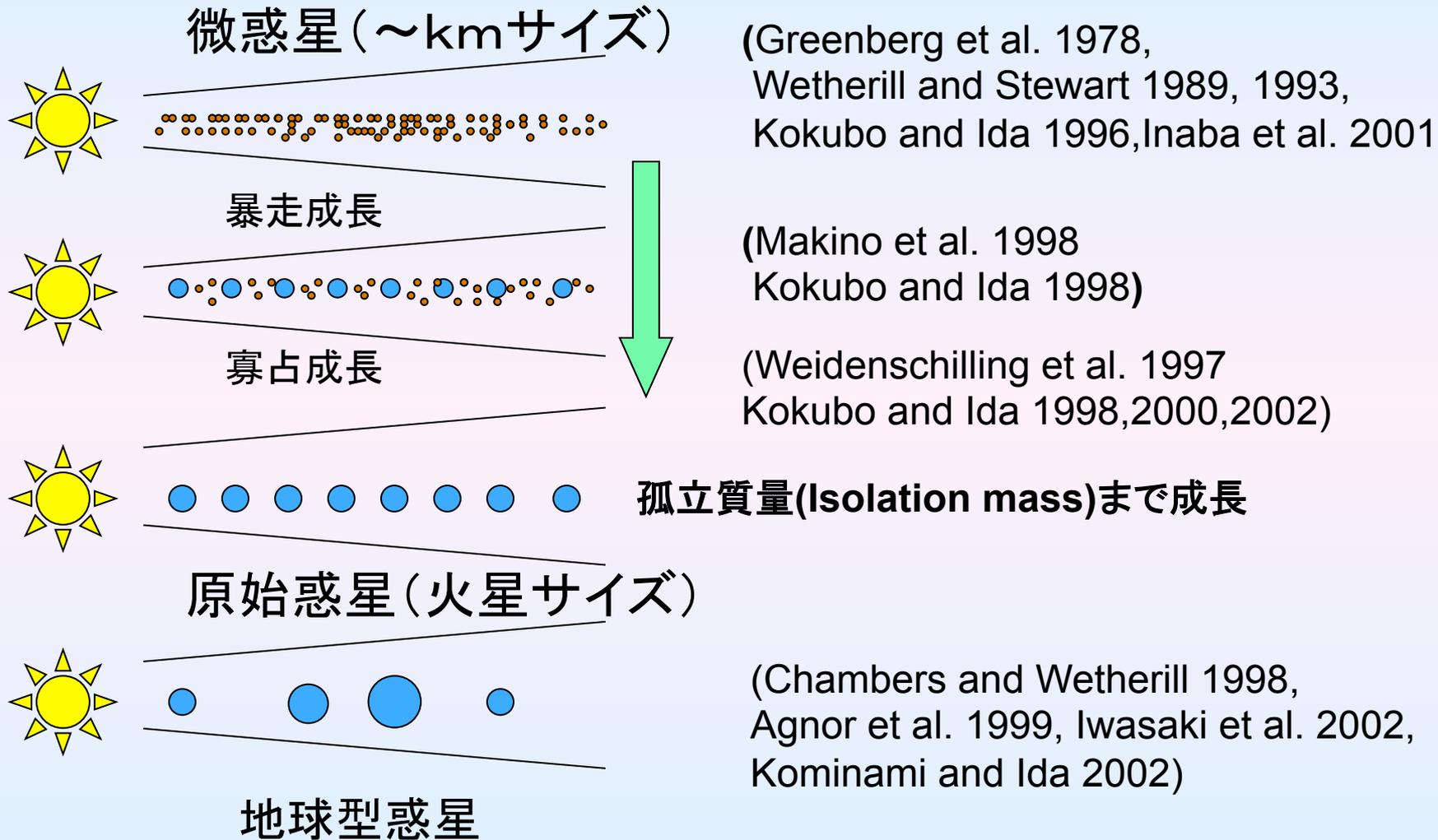
本講演では最新のシミュレーション結果と共に円盤外側での惑星形成について議論していく。

太陽系



その場形成を仮定すると、形成されるまで時間がかかりすぎてしまう

現在広く認められている集積シナリオ



ガス惑星のコアが形成されるまでの時間

原始惑星がガス惑星のコアまで集積するための時間(30AU付近)

$$t_{\text{formation}} \sim 10^{10} \text{ years}$$

$$t_{\text{solar.system}} \sim 10^9 \text{ year} < t_{\text{formation}}$$

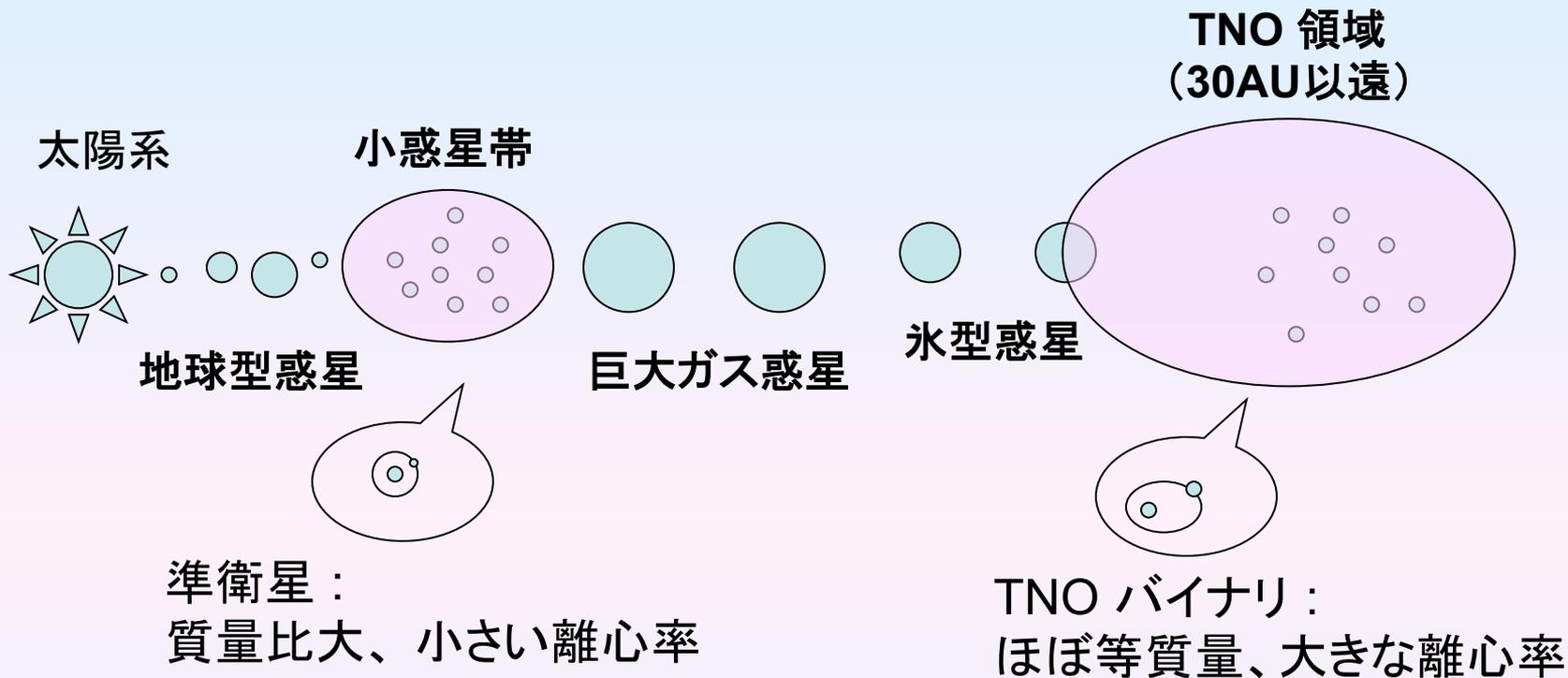
$$t_{\text{gas.disk}} \sim 10^6 \text{ year} < t_{\text{formation}}$$

- 円盤内側(より速く惑星形成ができる場所)で惑星を作って外側に移動させるメカニズムがある可能性
- 円盤外側で集積効率が上がることはあるのか。

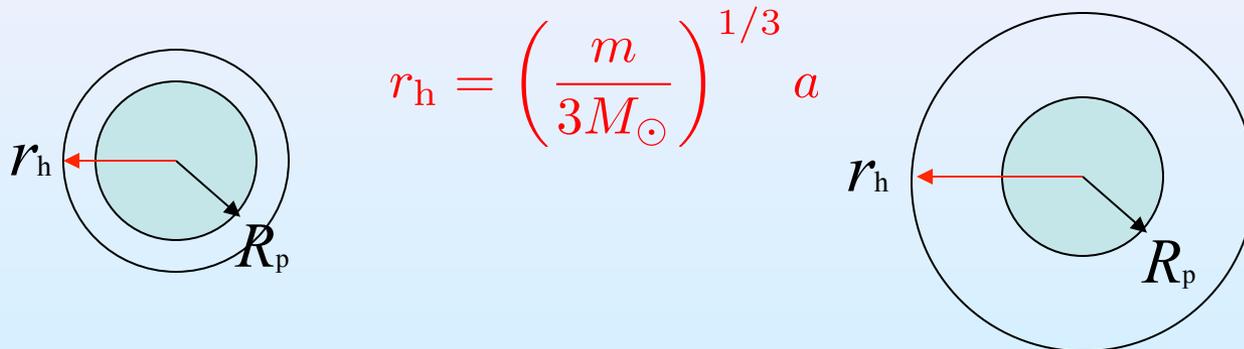
円盤外側での微惑星連星形成 による集積への影響

(Kominami, Makino & Daisaka 2011, Kominami & Makino 2014)

円盤の内側と外側の違い

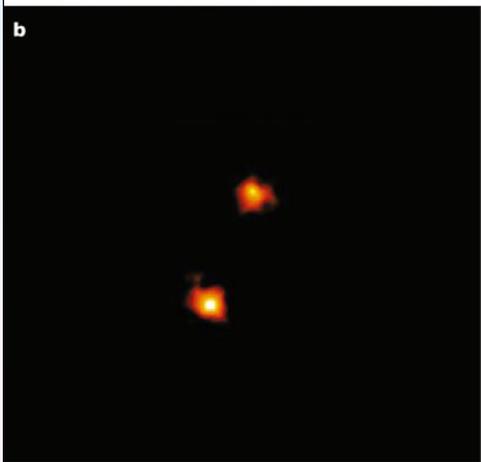


大きな物理的違いは **ヒル半径**/物理半径 の値が違う



TNOバイナリ

1998WW31



(Veillet et al. 2002)

太陽からの距離 ~ 44.5 AU
総質量 $\sim 2 \times 10^{18}$ kg
バイナリの周期 ~ 570 days
バイナリ離心率 ~ 0.8
バイナリの微惑星間距離 ~ 22300 km
(数百 $\times r_p$)

**TNO バイナリの数は 79 となっていて
観測されている TNO の $\sim 10\%$ がバイナリとなっている**

小惑星帯の準衛星との違い:
等質量、大きな離心率
大きな微惑星間距離

問題点

バイナリを考慮した微惑星集積はこれまで検証されていなかった

目的

微惑星連星があるとき集積プロセスにどのような影響を与えるかを明らかにする。

手法

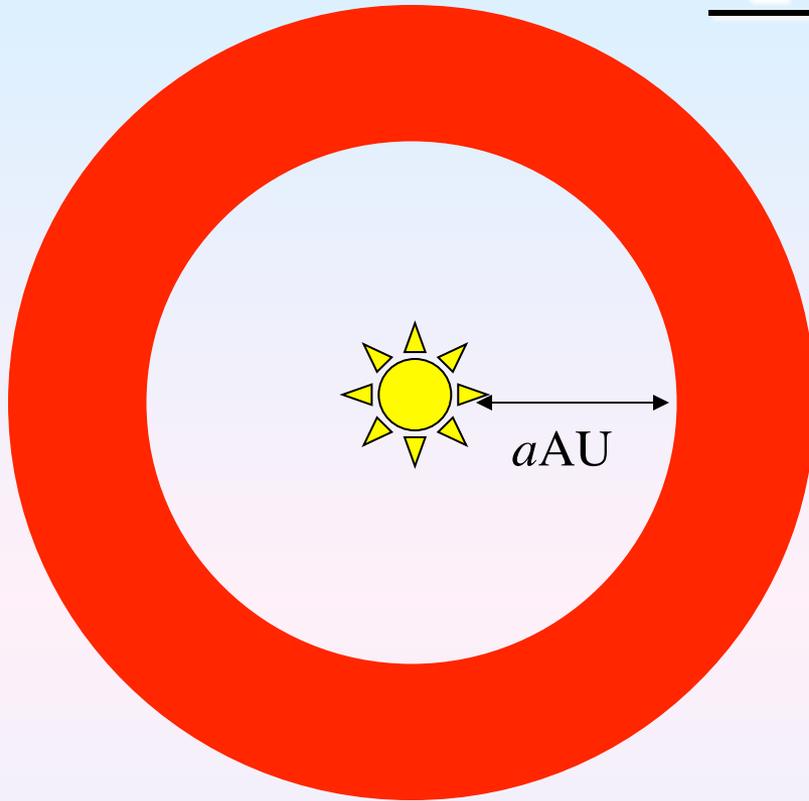
- N体計算、4次エルミート法

- 運動方程式
$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -GM_\odot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} - \sum_{i \neq j} \frac{GM_j(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3}$$

- 完全衝突合体

- GRAPE-DR を使用

モデル



$$m = 3 \times 10^{22} - 3 \times 10^{24} \text{ g}$$

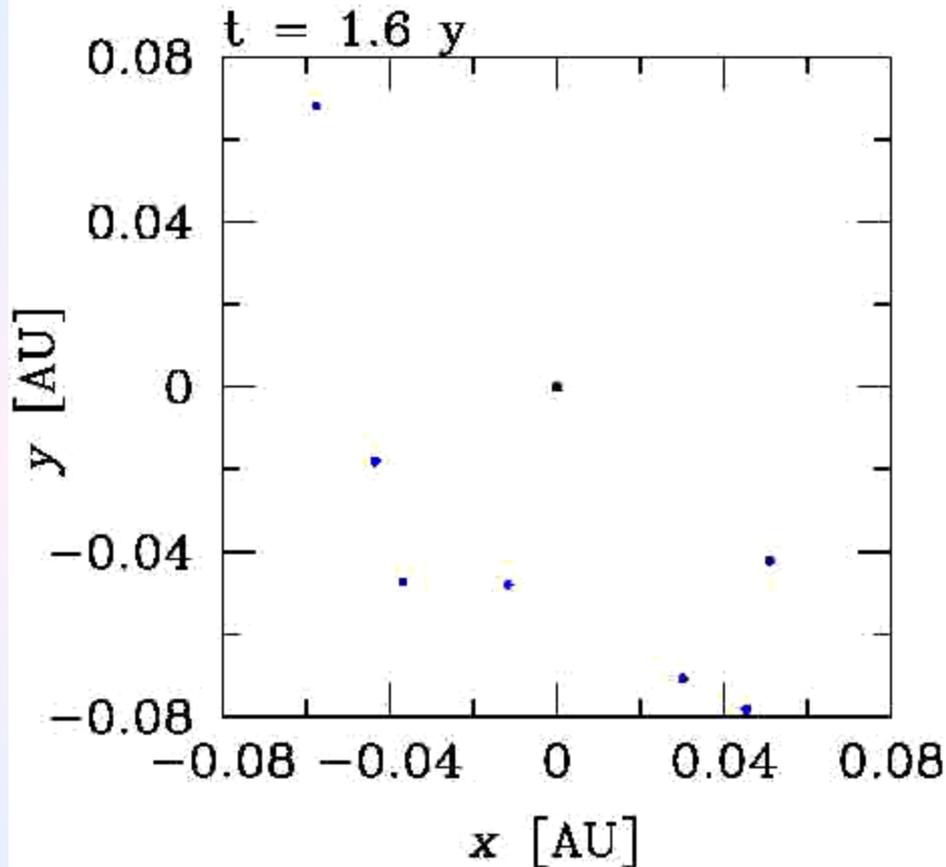
$$\text{Eccentricity of } m_{\text{large}} = \eta \left(\frac{m_{\text{large}}}{3M_{\odot}} \right)^{1/3}$$

エネルギー等分配を仮定して：

大きいものは離心率は小さく、
小さいものは離心率は大きく設定。

N_{init}	$a(\text{AU})$	η
38282	30 – 30.2	0.05, 0.1, 0.2, 0.4
1712	1 – 1.007	0.05
11926	3 – 3.02	0.05
21999	10 – 10.07	0.05

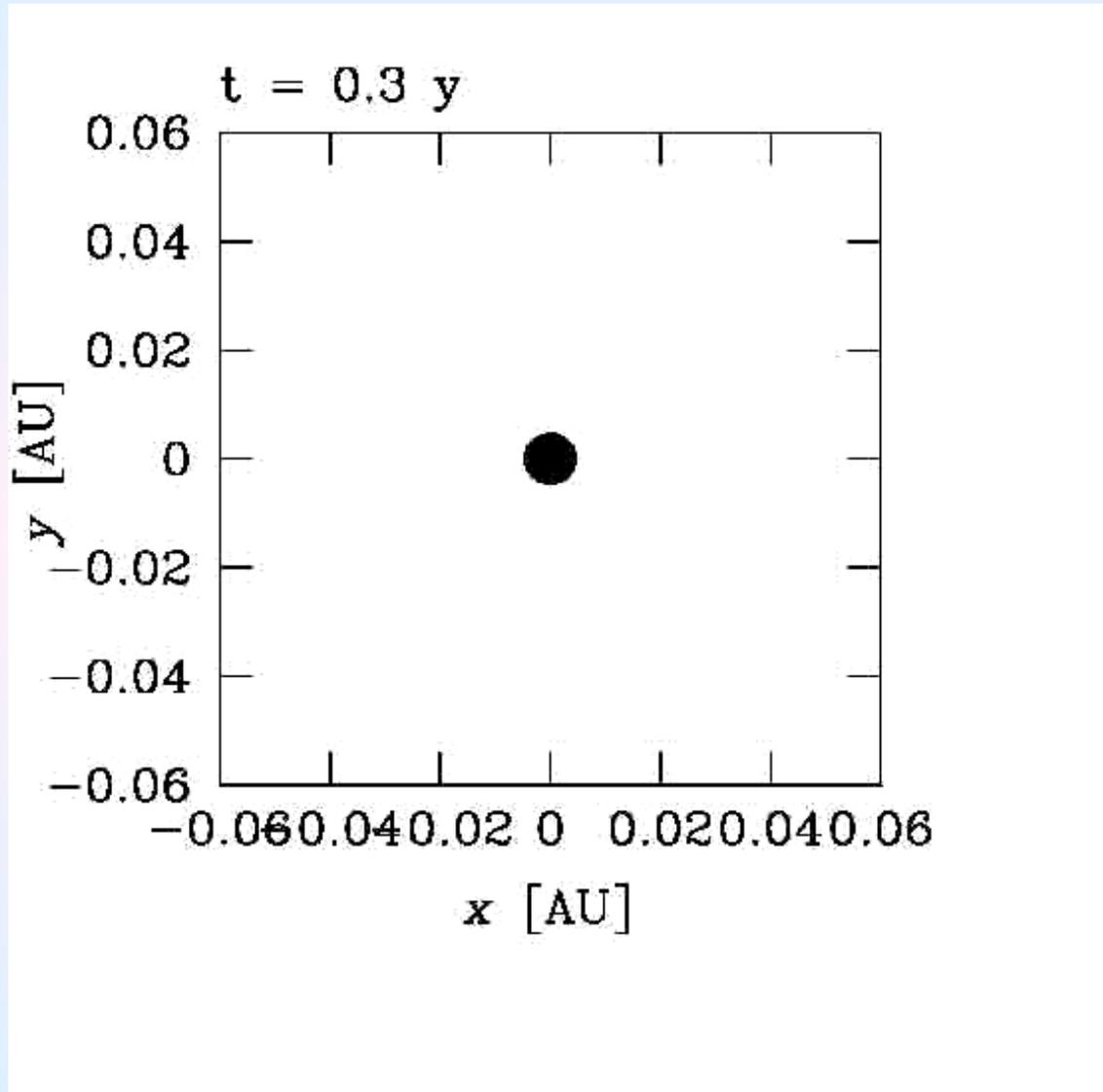
Binary formation example



バイナリを構成している微惑星の一つを原点としている。

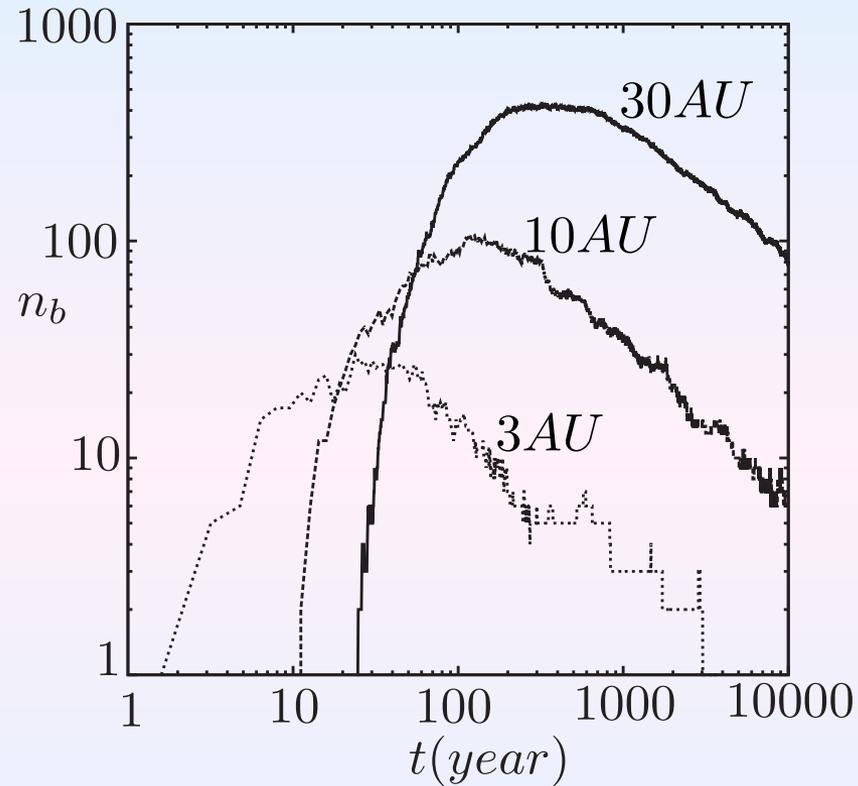
3体相互作用が起こり、赤点と黒点が重力的にバウンドされる。

Binary formation example



質量比が付いていても、バイナリは形成される。

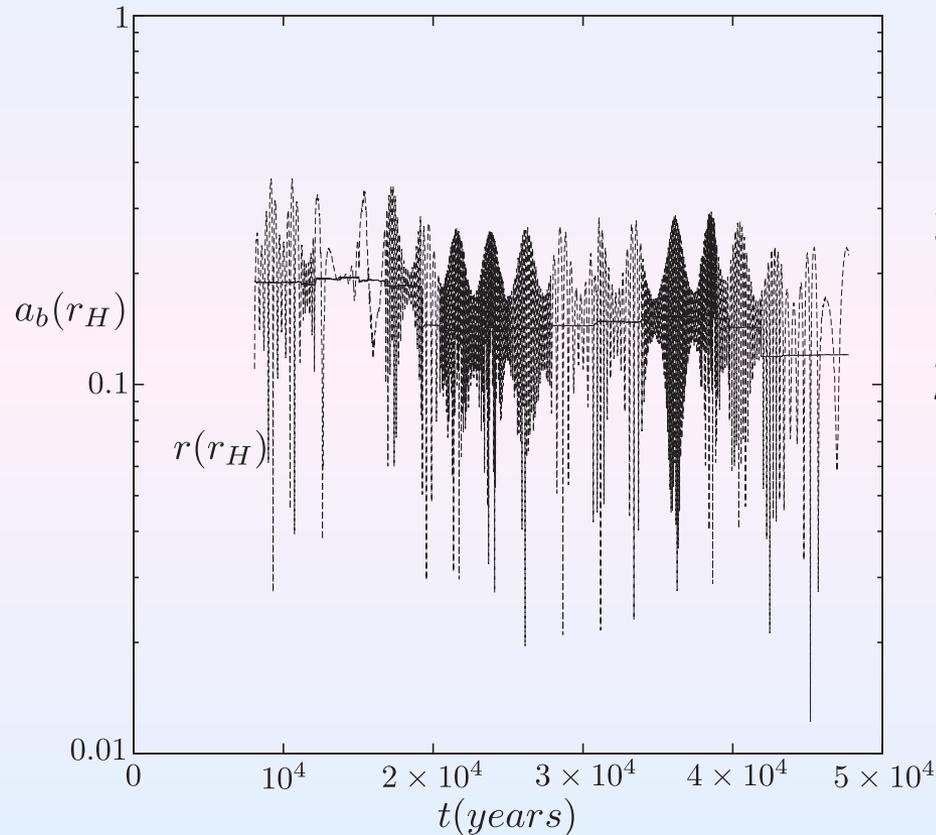
様々な場所での連星の数(1,3,10,30AU)



外側ほど連星が多い

バイナリ形成後の衝突

バイナリは3体相互作用を起こすときに2体が衝突することがある。



**3 body encounter
1 get ejected
2 get collided**

微惑星どうしの衝突の2割がバイナリ経由の衝突

衝突確率の増加の解析的な見積もり

$$P = \frac{1}{\max(H, H')} \pi r^2 \left(1 + \frac{v_{\text{esc}}^2}{v_{\text{rel}}^2} \right) v_{\text{rel}} \quad (\text{Makino et al. 1998})$$

P_b バイナリ形成確率

P_{L3} 3体目がバイナリと遭遇する確率

$$P_{c,\text{bin}} = \frac{P_b}{\max(H, H')} \pi a_b^2 \left(1 + \frac{v_{\text{esc,b}}^2}{v_{\text{rel}}^2} \right) P_{L3} v_{\text{rel}}$$

$$v_{\text{esc,b}} \sim \sqrt{\frac{2Gm}{a_b}}, \quad v_{\text{rel}} \sim e \sqrt{\frac{Gm}{r}}, \quad a_b \sim r_{\text{Hill}}/10$$

$$\frac{P_{c,\text{bin}}}{P} = P_b \frac{a_b^2}{r^2} \left(\frac{1 + 2r/e^2 a_b}{1 + 2/e^2} \right) P_{L3} \sim P_b P_{L3} \frac{a_b}{r}$$

仮定

質量の大きいものはバイナリになりやすいので、 $P_b \sim 1$ として、
バイナリはいずれ衝突を起こすとすると、 $P_{L3} \sim 1$

$$P_{\text{total}} \sim 10P$$

円盤外側でのシミュレーションの まとめ

円盤外側では微惑星連星が形成されやすい

微惑星連星は衝突確率をあげることがわかった

衝突確率は数倍になることがわかった

**中心星からの距離により、円盤内での力学的
進化は変わってくる。**

なので広い領域のシミュレーションが必要となってくる

ガス惑星のコアが形成されるまでの時間

原始惑星がガス惑星のコアまで集積するための時間(30AU付近)

$$t_{\text{formation}} \sim 10^{10} \text{ years}$$

$$t_{\text{solar.system}} \sim 10^9 \text{ year} < t_{\text{formation}}$$

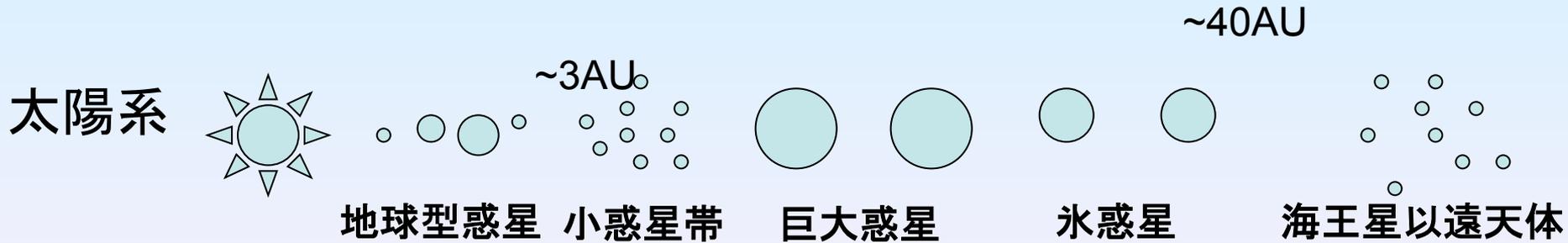
$$t_{\text{gas.disk}} \sim 10^6 \text{ year} < t_{\text{formation}}$$

- 円盤内側(より速く惑星形成ができる場所)で惑星を作って外側に移動させるメカニズムがある可能性
- 円盤外側で集積効率が上がることはあるのか。

内側で惑星を作り、外側へ移動させる

(Kominami, Daisaka, Makino & Fujimoto, 2016)

アイスライン



水が氷になる温度(150-170K)

円盤が光学的に薄いとして、中心星からの放射と($\pi d^2 L_*/4\pi r^2$)
円盤内の粒子の黒体放射($4\pi d^2 \sigma T^4$)がつりあうとして

$$T \simeq 2.8 \times 10^2 \left(\frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-1/2} \left(\frac{L_*}{L_\odot} \right)^{1/4}$$

現在の太陽系では 2.7 AU くらいにアイスラインがある

アイスラインは円盤の粘性降着率や中心星の進化により、
現在の位置とは違う所にあった可能性がある

(Oka et al. 2011)

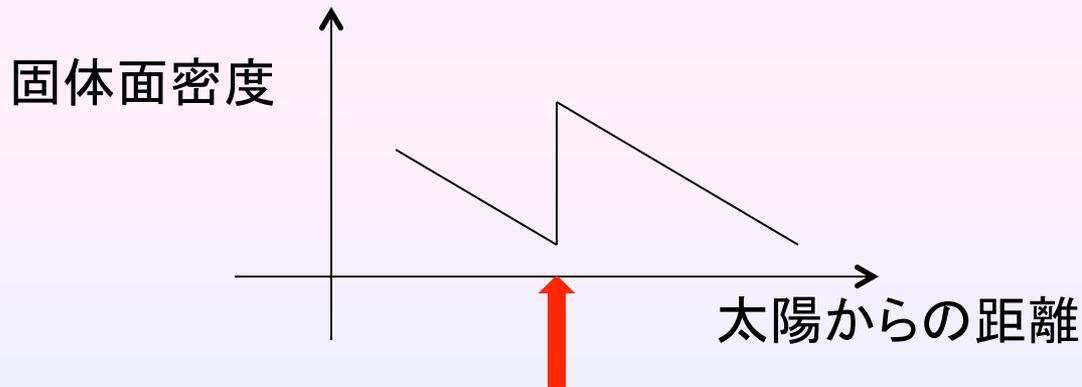
固体面密度

標準モデルの固体面密度について
(現在の太陽系の惑星をくずくずにしてならしたモデル)

$$\sigma_{\text{dust}} = 7.1 \times \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-3/2} [\text{g cm}^{-2}] \quad \text{for } 0.35\text{AU} < a < 2.7\text{AU},$$

$$\sigma_{\text{dust}} = 30 \times \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-3/2} [\text{g cm}^{-2}] \quad \text{for } 2.7\text{AU} < a < 36\text{AU},$$

(Hayashi et al. 1985)

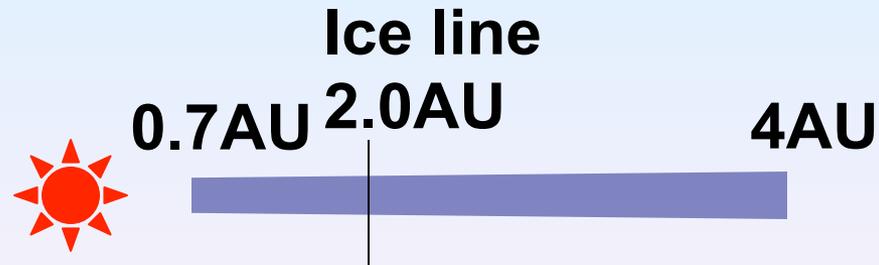


アイスライン (2.7AU)

ここ以遠では水分が氷となり固体面密度が不連続に増加

面密度が多いと衝突確率が上がり、集積が起こりやすくなる

シミュレーションの初期条件



- ・ 微惑星総数 = 82362
- ・ 最小質量モデルの固体面密度
- ・ 一つ一つの微惑星質量 10^{24} g
- ・ 離心率と軌道傾斜角はレーリー分布
 $\langle \tilde{e}^2 \rangle^{1/2} = 2$ $\langle \tilde{i}^2 \rangle^{1/2} = 4$
(Kokubo and Ida 1998)

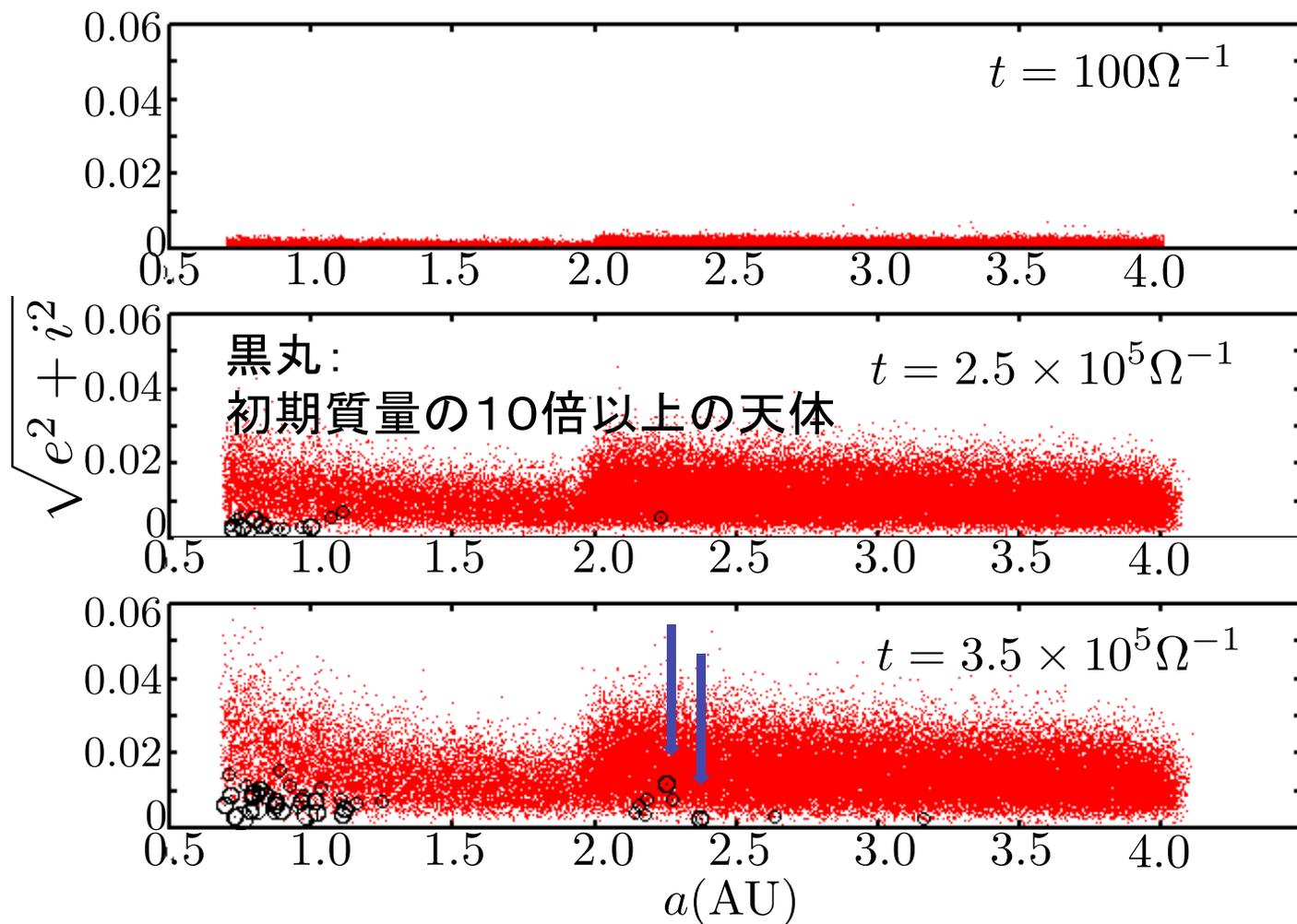


800 compartment
~80000 nodes



Improved version
of K computer,
but with smaller scale

アイスライン以遠での暴走成長天体の形成



暴走成長天体は内縁だけでなく、アイスライン以遠でも形成される

原始惑星の外側移動の計算

アイスラインでの面密度増加

- 数ヒル以内の微惑星は原始惑星に食べられてしまう
- 徐々にガスをまとっていく

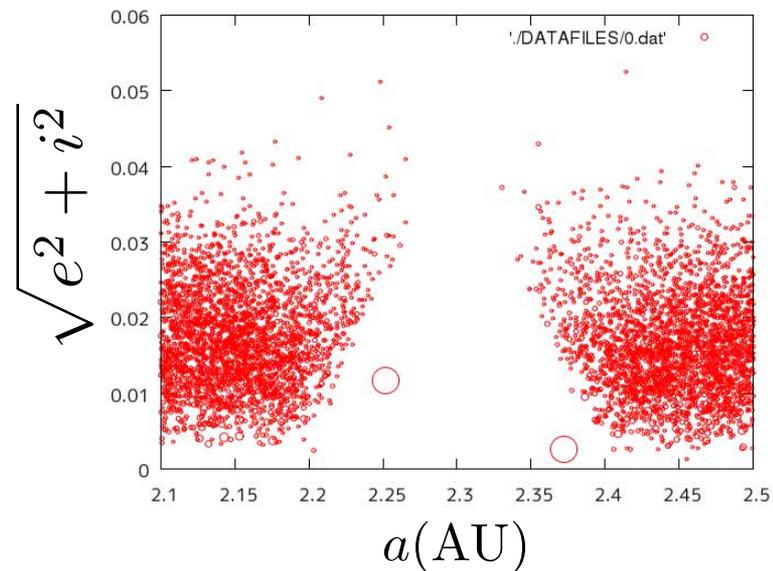
0.1地球質量まで質量をふやし、
微惑星円盤にギャップを作る

微惑星と原始惑星の質量比が
100くらい

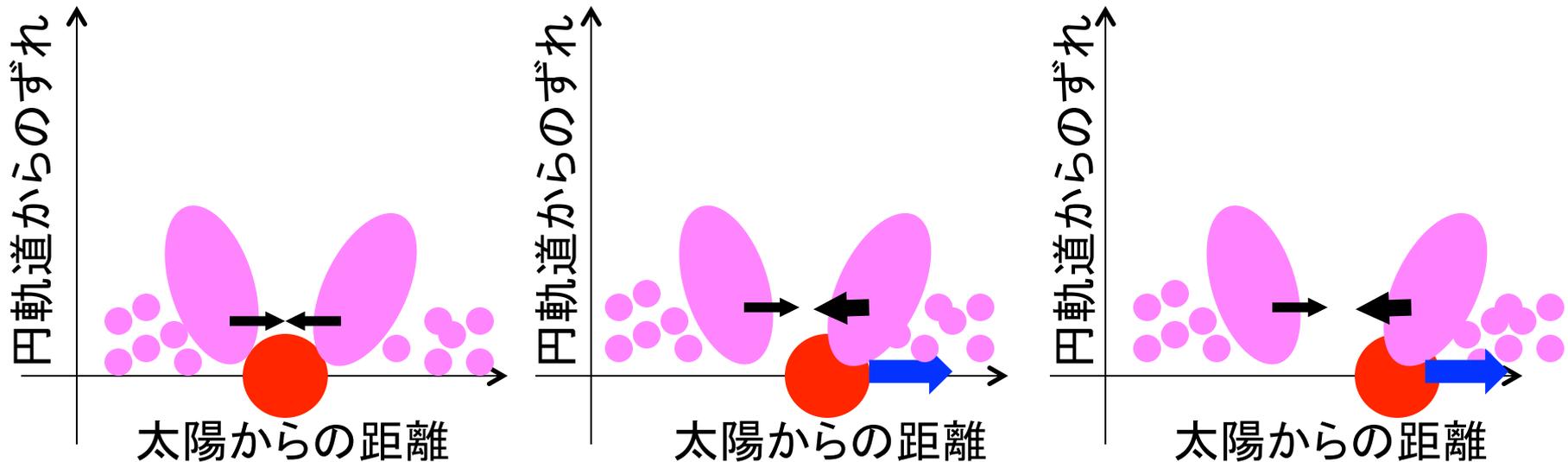
→ Planetesimal Driven Migration

(e.g. Ida et al. 2000, Minton & Levison 2014, Kominami et al. 2016)

ある惑星の両側に密度構造ができ、非対称なトルクが
働くため惑星が一方に移動する現象



微惑星による惑星の外側移動 のメカニズム



原始惑星が微惑星を散乱。
微惑星の分布は対称。

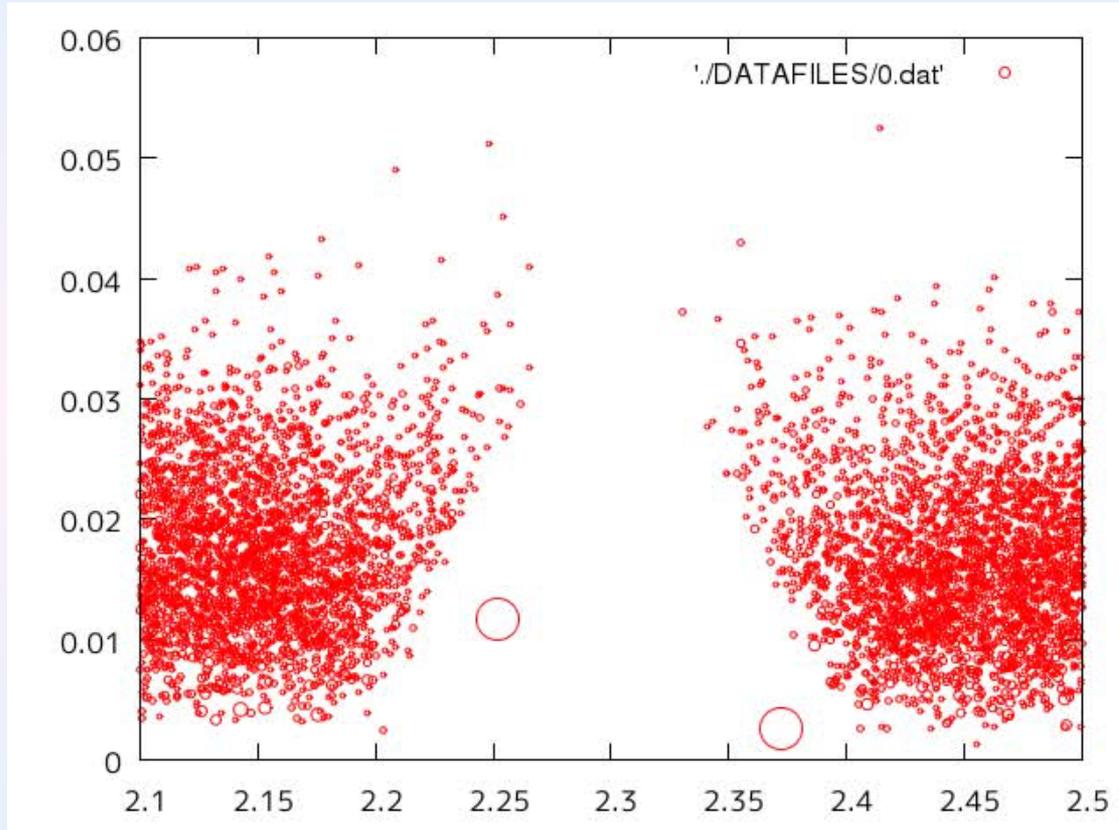
「キック」が与えられて
微惑星の分布が非対称

動いた先でも右側の
微惑星の方が多い。
非対称は続く。

微惑星の非対称な分布ができ、微惑星の多い方から少ない方へ、原始惑星が重力散乱で微惑星をとばし、原始惑星が1方向へ動く。

Planetesimal Driven Migration

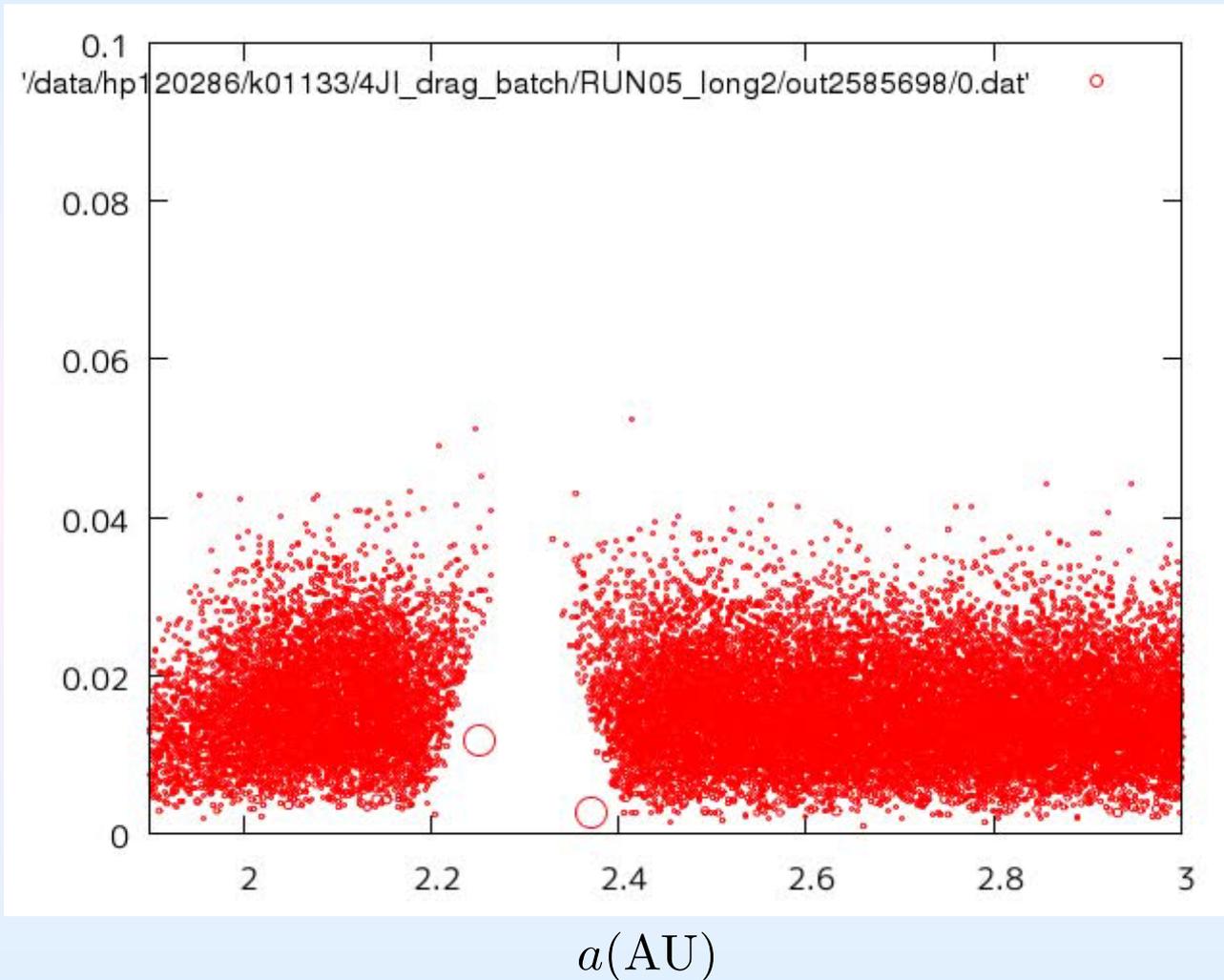
(Ida et al. 2000, Minton and Levison 2014, Kominami et al. 2016)



一つ一つの微惑星が原始惑星の重力により原始惑星の外側(内側)の微惑星が内側(外側)に飛ばされ、原始惑星は角運動量を得て外側(内側)へ動く。

もっと長いシミュレーション

$$\sqrt{e^2 + i^2}$$



外側の原始惑星は外側に、内側の原始惑星は内側に動く様子が見られる。

しかし、ここで大きな問題
「タイプ1惑星移動」

ガス円盤があることで起こる惑星移動

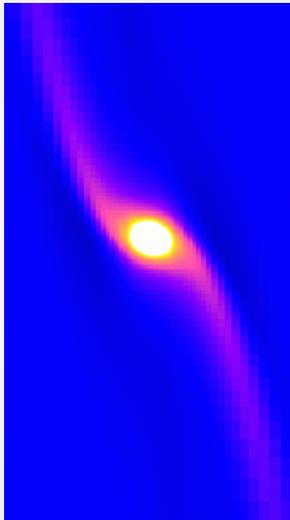
円盤ガスがあることで惑星には2つの効果が働く

(1) ガス抵抗: **内側へ移動**

(Adachi et al. 1976, Tanaka & Ida 1999)

(2) 円盤からの重力相互作用: **内側へ移動**

(e.g. Ward 1986, Tanaka et al. 2002, Tanaka and Ward 2004)



惑星が重力でガス円盤に波をたてる

↓
両側の波からトルクがかかる

↓
角運動量が取られて内側に移動

(Morohoshi and Tanaka 2003)

原始惑星の
「Type-I 移動」

(1) ガス抵抗 → 質量が小さいと効く

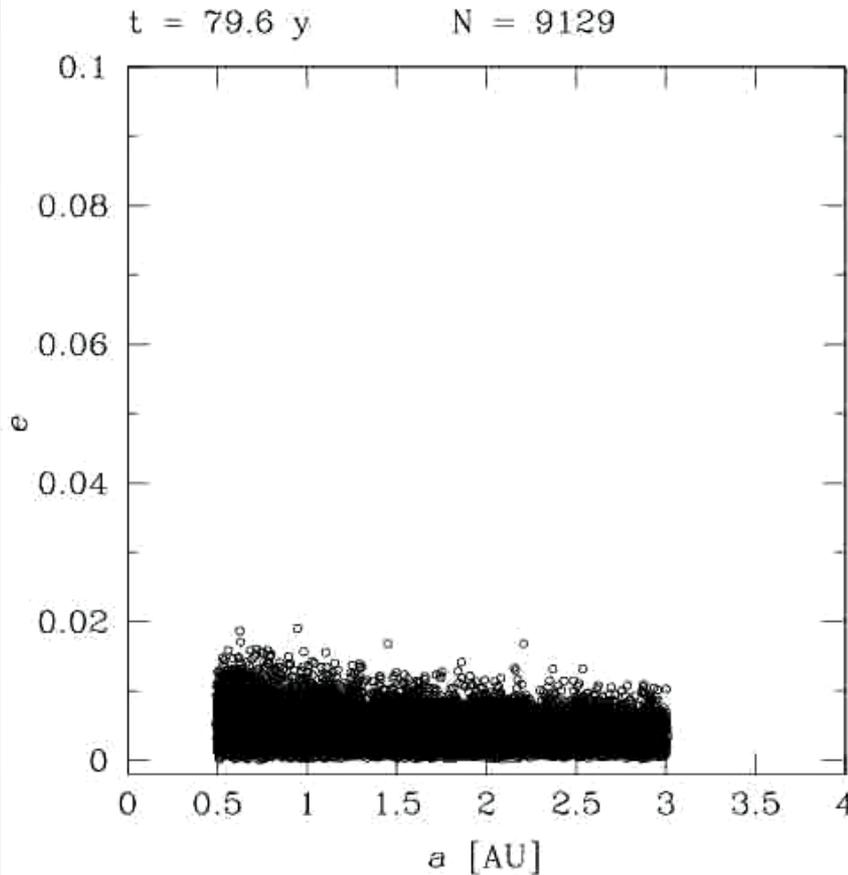
(2) 円盤からの重力相互作用 → 質量が大きいほど効く

月質量以上になると原始惑星はタイプ1移動で中心星に落ちる

ガス抵抗 & タイプ1惑星移動入りの昔の計算

(Kominami & Ida 2005) $m_p = 10^{25} \text{g}$ $n_{\text{init}} \sim 10000$

円軌道からのずれ(離心率)

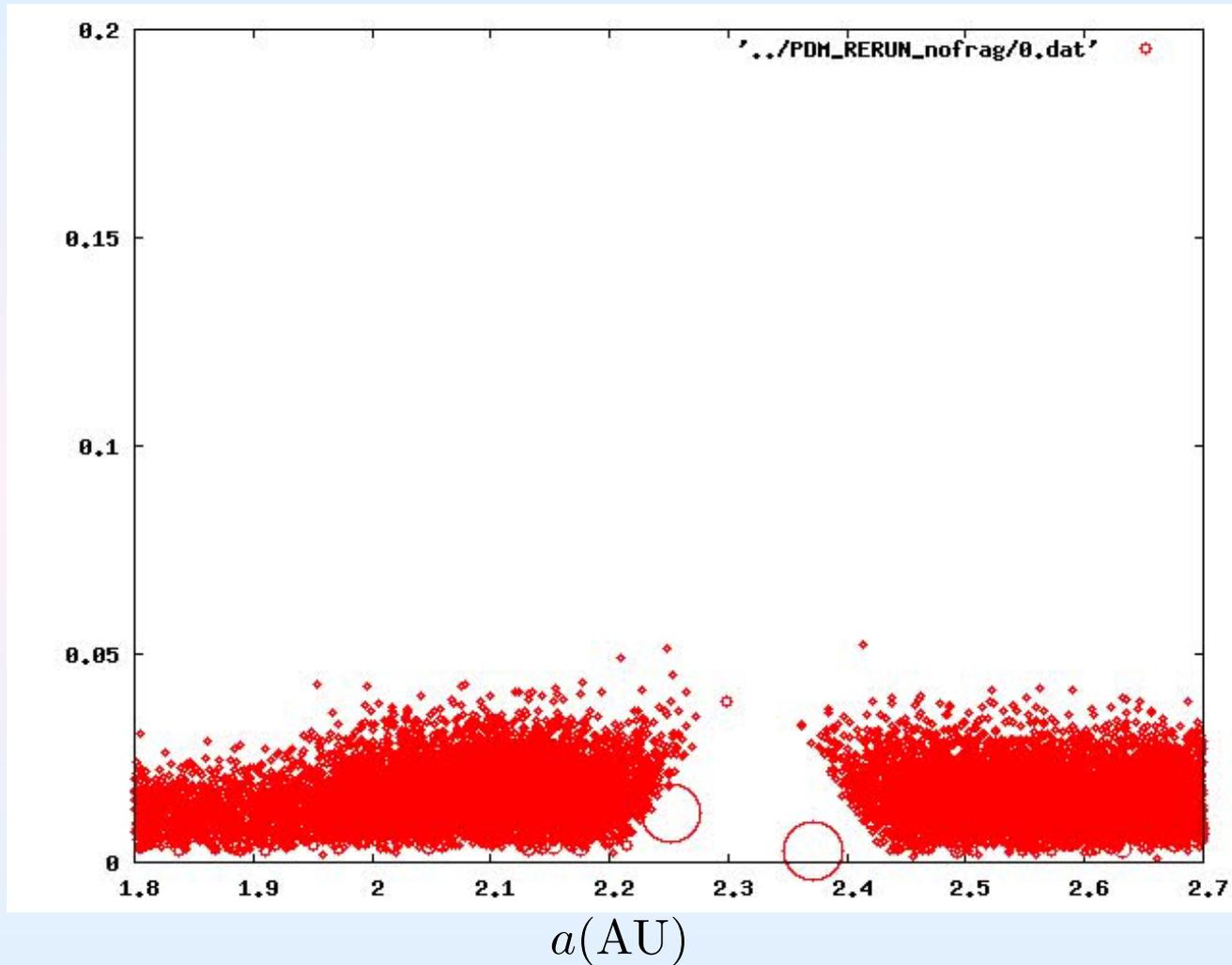


GRAPE-6A
を使って計算

中心星にどんどん惑星がおちていく。

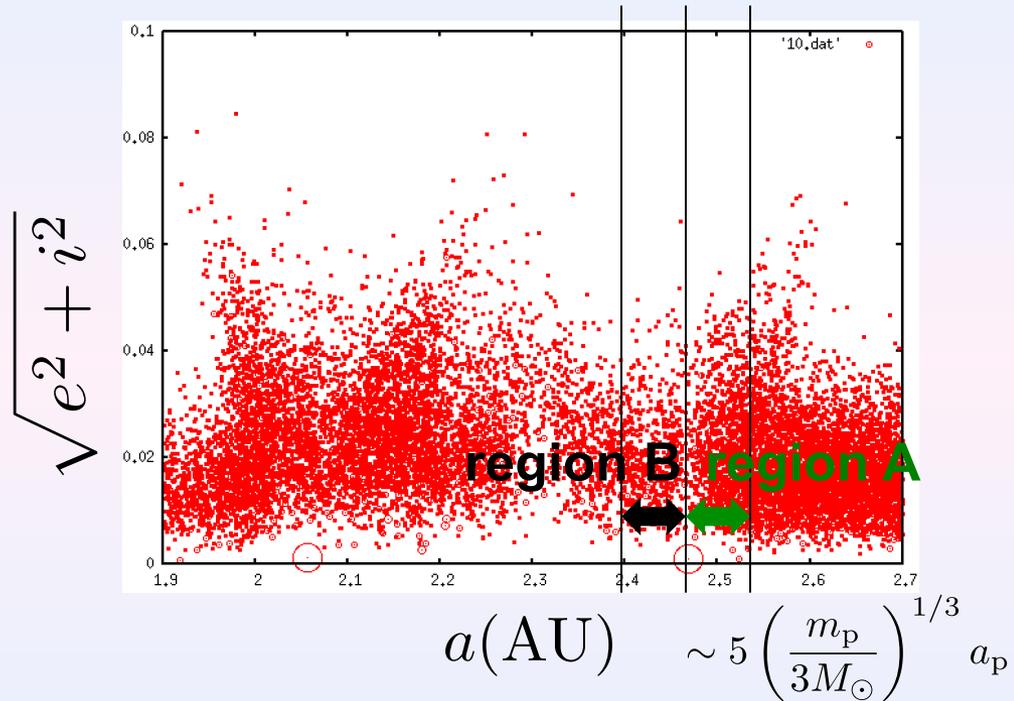
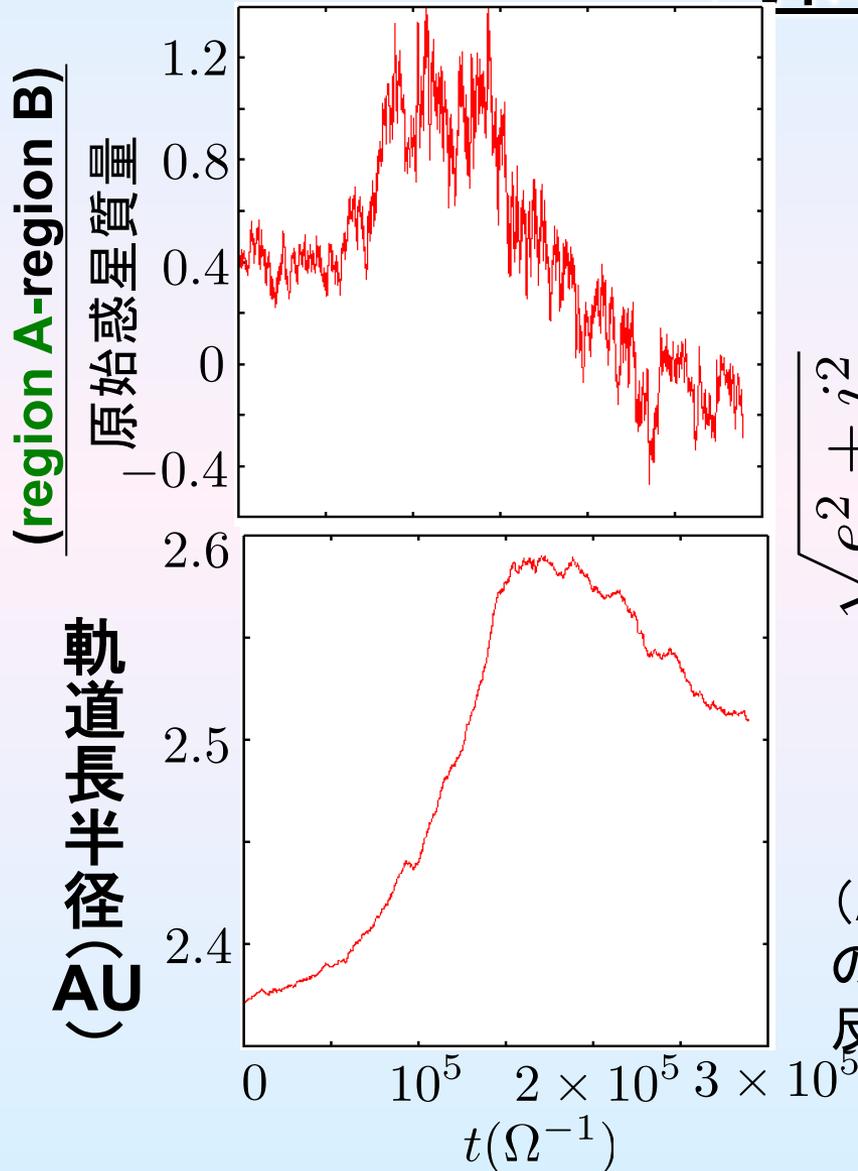
タイプ1を入れると落ちる動画

$$\sqrt{e^2 + i^2}$$



原始惑星はタイプ1に負けて、結局中心に落ちて行ってしまふ。

原始惑星の近くにある微惑星の総質量の 時間進化



(Aの領域の微惑星) > (Bの領域の微惑星) の時、外側移動が起こる。
反対になると、内側移動となる。

微惑星と原始惑星の質量比

では、タイプ1に負けておしまい、ということ？

そうではない

惑星移動は原始惑星と微惑星の質量比が決める



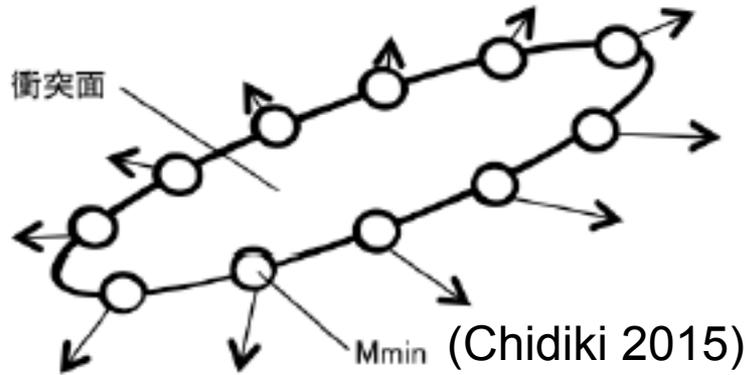
ということは、破壊を入れて破片を生成させたら
結果は変わるのでは？



衝突破壊を入れると質量比が付いてくる

もしかしたらタイプ1惑星移動が防げるかもしれない

衝突破壊モデル



破片の速度は $m_{\text{imp}} + m_{\text{tar}}$ の Escape Velocity の 1.05 倍とする

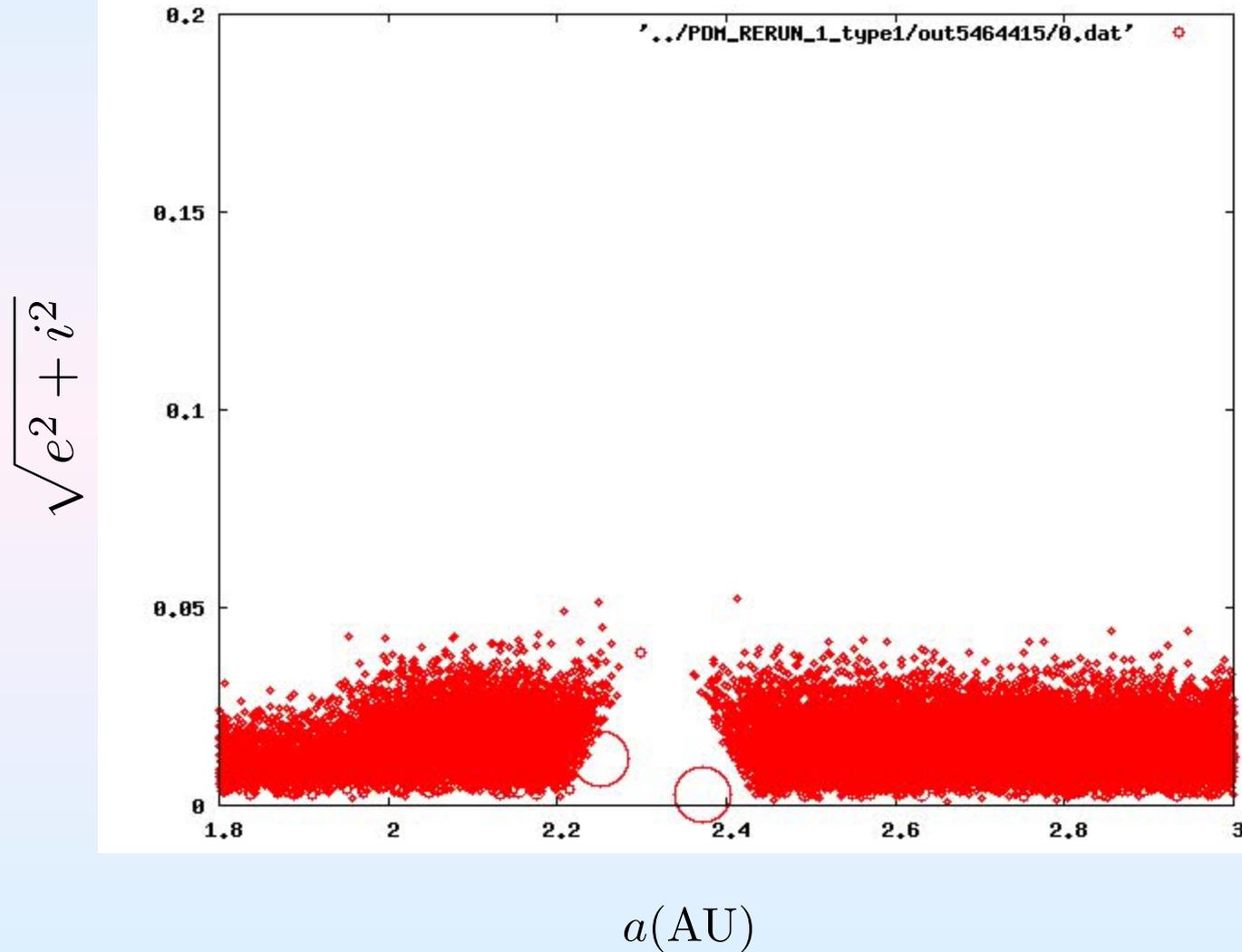
衝突粒子は衝突時の相対位置ベクトルと相対速度ベクトルの張る面において、合体粒子を中心とした円周上に等間隔で配置する。

$$m_{\text{tar}} > m_{\text{imp}}$$

- 1, 破片質量の最小質量を設定する ($m_{\text{min}} = b \cdot m_{\text{init}}$)
- 2, 重心に合体粒子をおく. $m_{\text{k}} = (1 - a)m_{\text{imp}} + m_{\text{tar}}$
- 3, 破片の総質量は am_{imp}
- 4, 破片の数は $n_{\text{f}} = \frac{am_{\text{imp}}}{m_{\text{min}}}$
- 5, もし、 $n_{\text{f}} = 0, 1$ の時は完全衝突合体とする

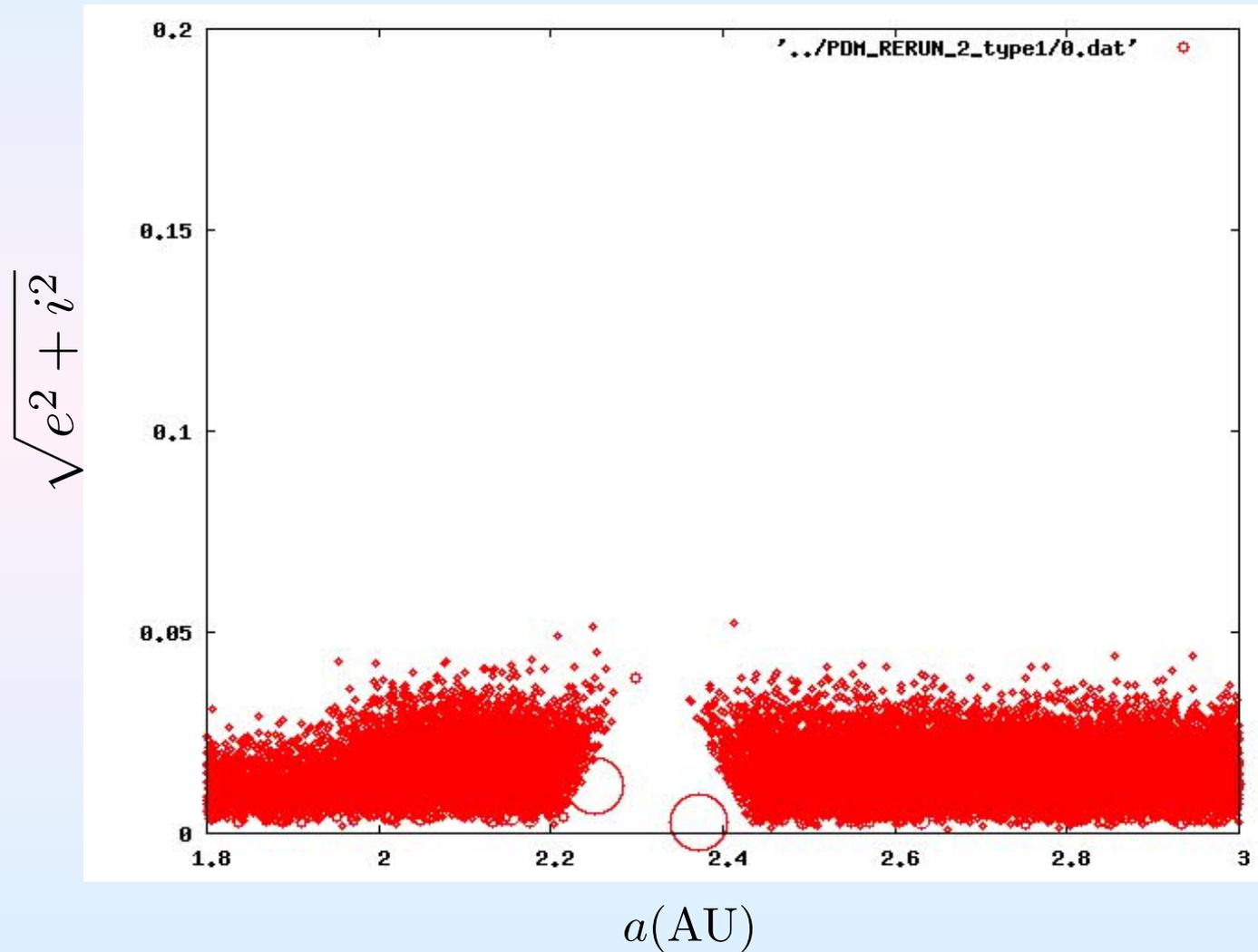
衝突破壊を入れてタイプ1惑星移動も入れた場合

$$a = 0.5, b = 1/3$$

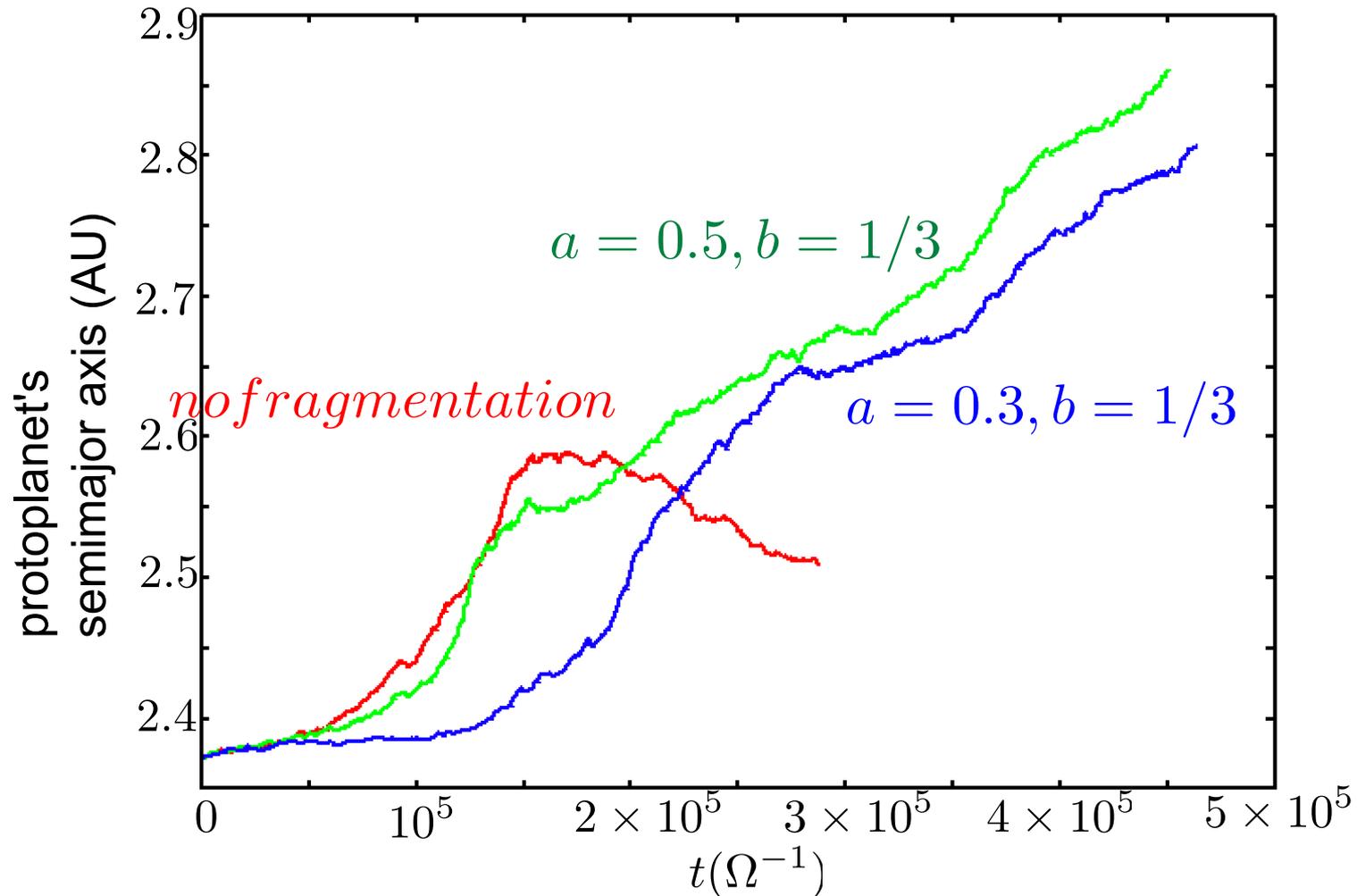


衝突破壊を入れてタイプ1惑星移動も入れた場合

$$a = 0.3, b = 1/3$$

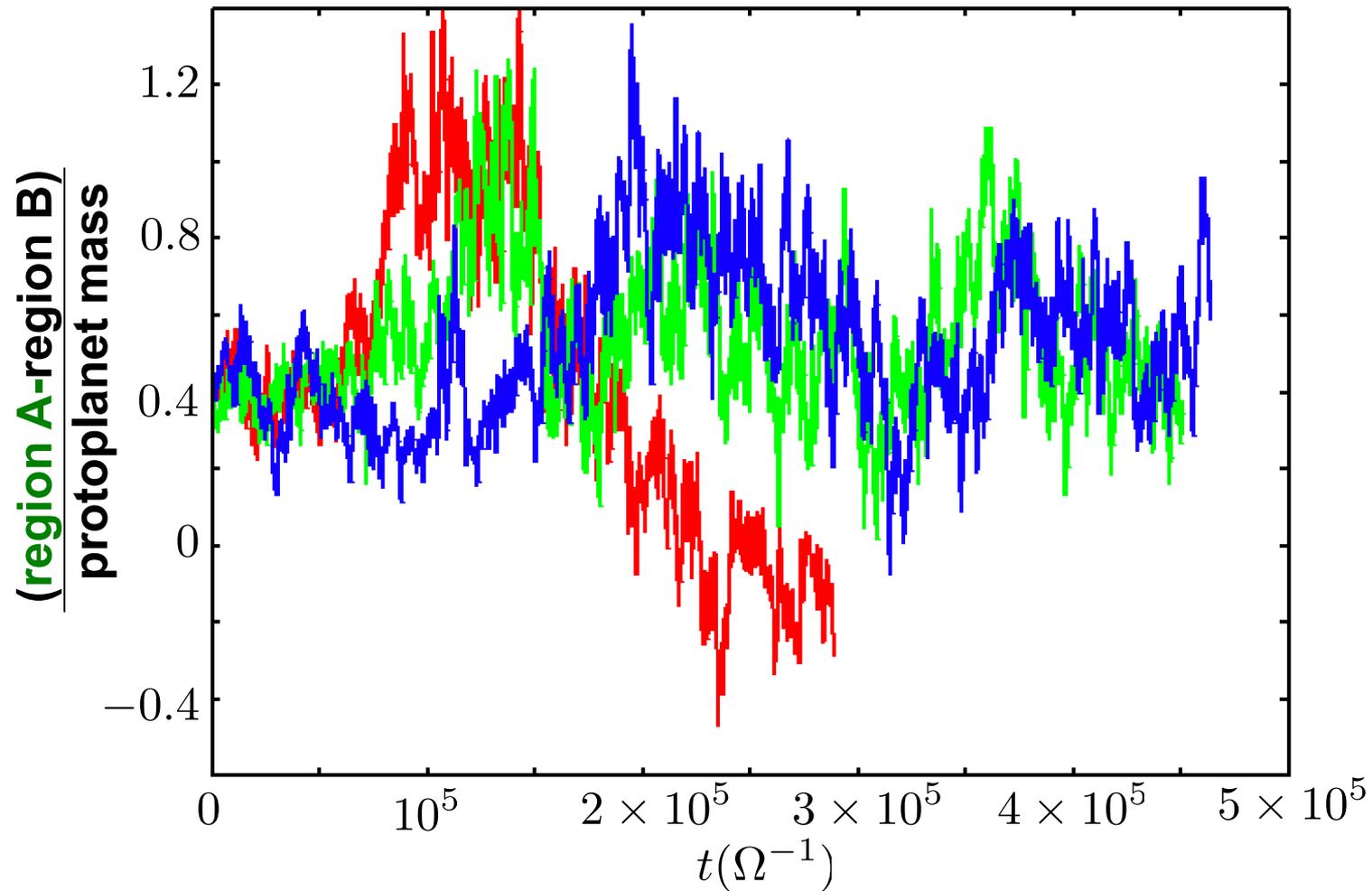


軌道長半径の時間進化



衝突破壊を入れると、タイプ1惑星移動に打ち勝ち、外側移動が続く。

原始惑星の近くにある微惑星の総質量の時間進化



衝突破壊を入れると (領域 A- 領域 B) は常に正

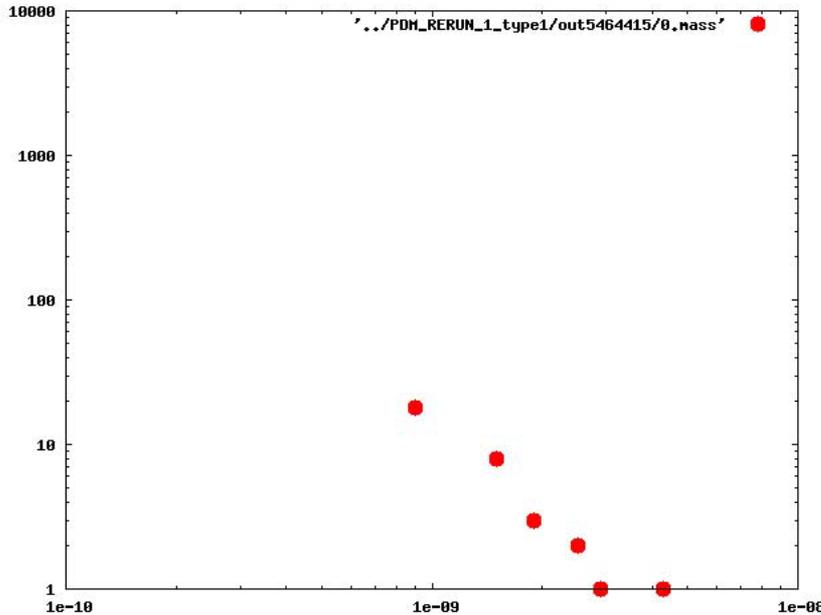
外側移動をうながしている微惑星

領域 A の質量分布

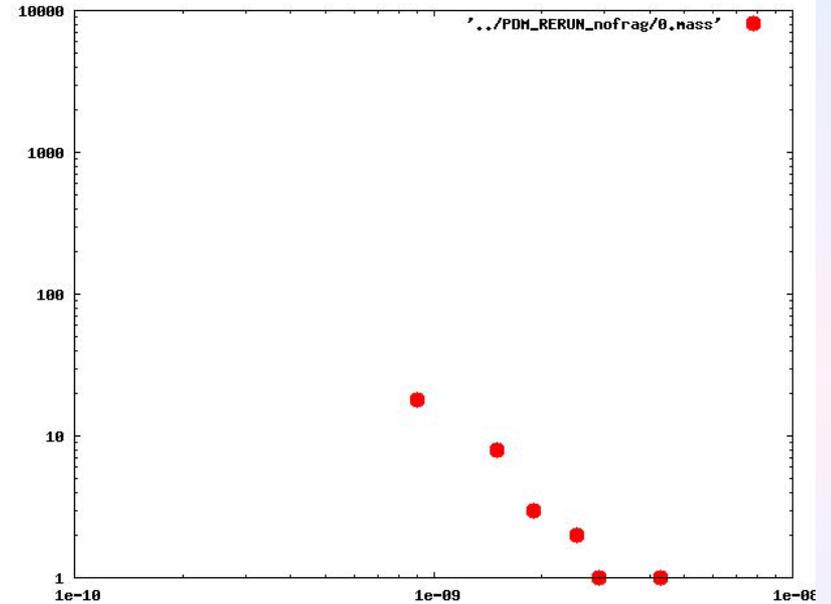
衝突破壊あり

完全合体

微惑星の数



微惑星質量



微惑星質量

衝突破壊有りの場合、小さい微惑星も形成されるが、完全合体の場合は、大きい物が成長をし、PDMを妨げる。

まとめ

大きい天体を円盤外側で形成させるのは難しい。

微惑星連星は円盤外側では頻繁に形成される。

その微惑星連星は微惑星どうしの衝突確率を変化させる。

円盤内側で大きい天体を形成→外側へ移動という方法もある。

衝突破壊も惑星の軌道進化に大きな影響を及ぼす。

円盤外側の惑星形成についてはまだまだやることは色々あります