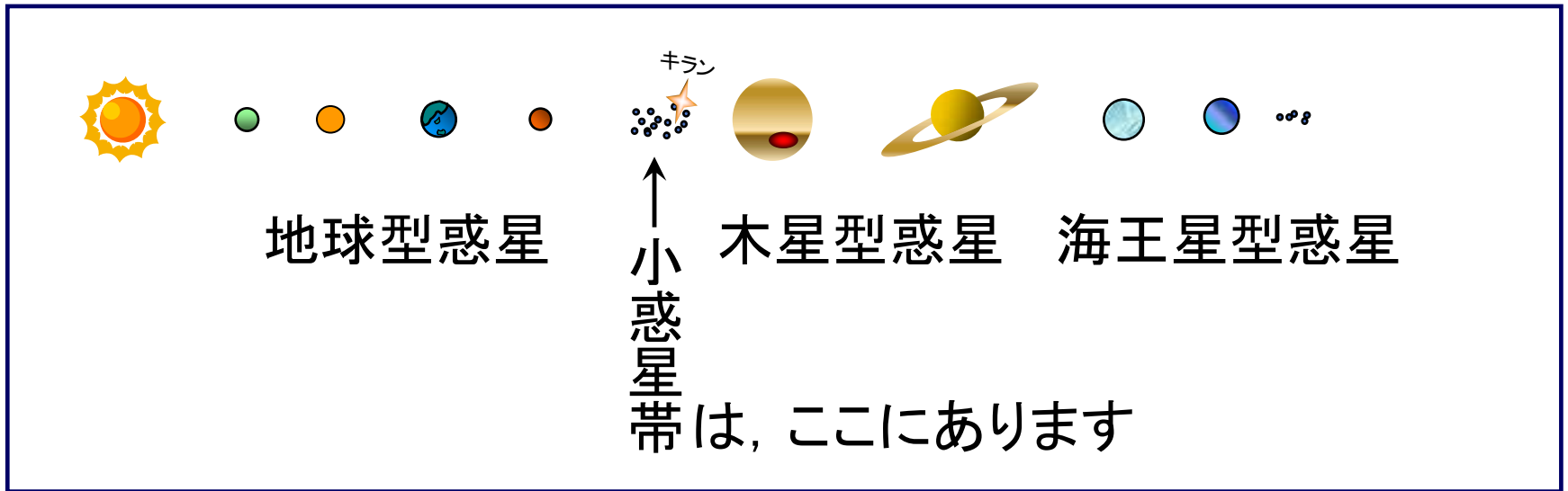


# 力学進化からのサイエンス

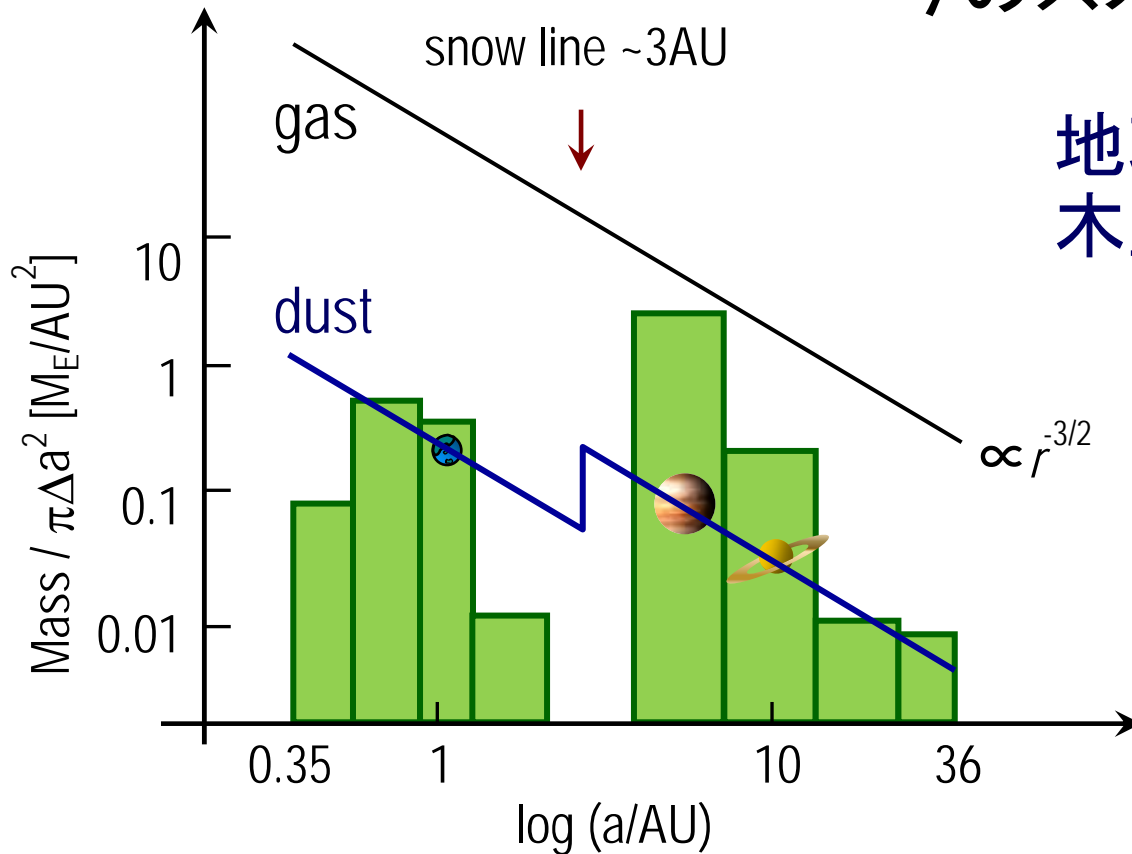
長沢真樹子 (東工大)

# 小惑星の位置づけ

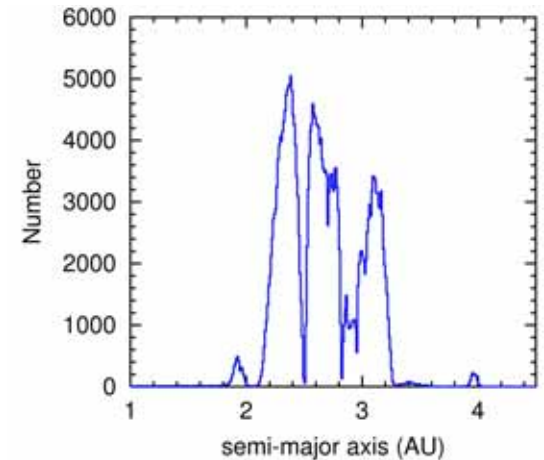


これは微妙な位置. なぜなら...

# 小惑星の位置づけ



今のスノーラインのあたりで、  
形成論の上で  
地球型惑星のエリアか  
木星型惑星のエリアか  
どう考えるか  
わからないから

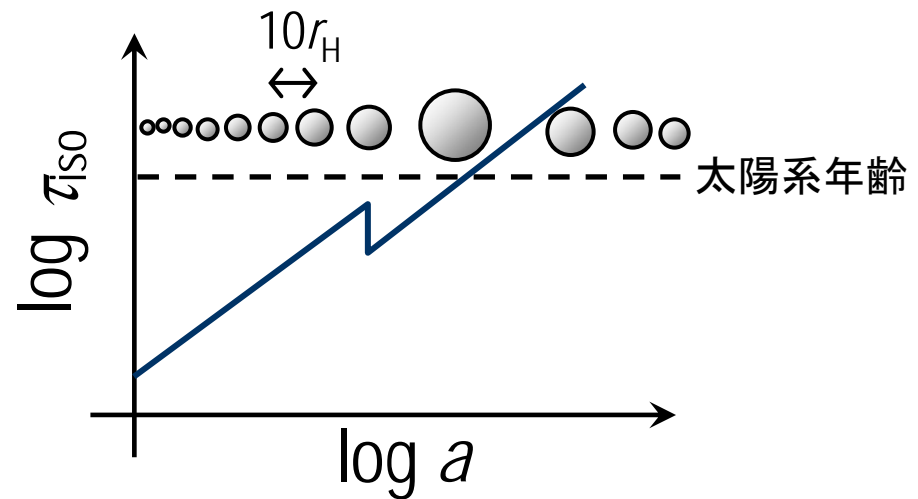
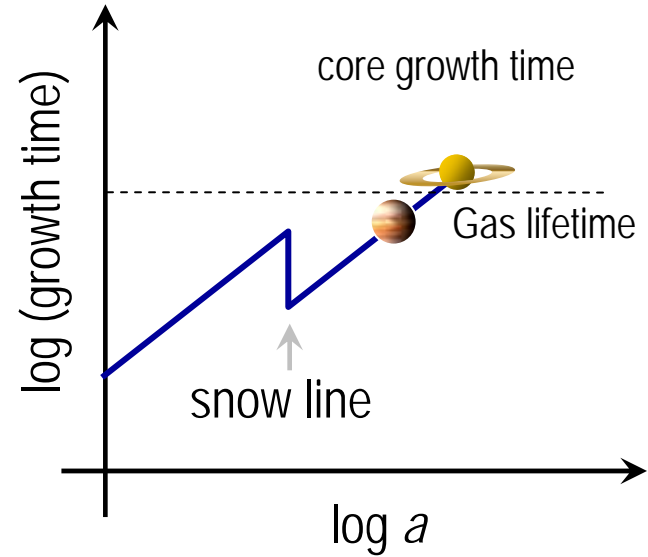
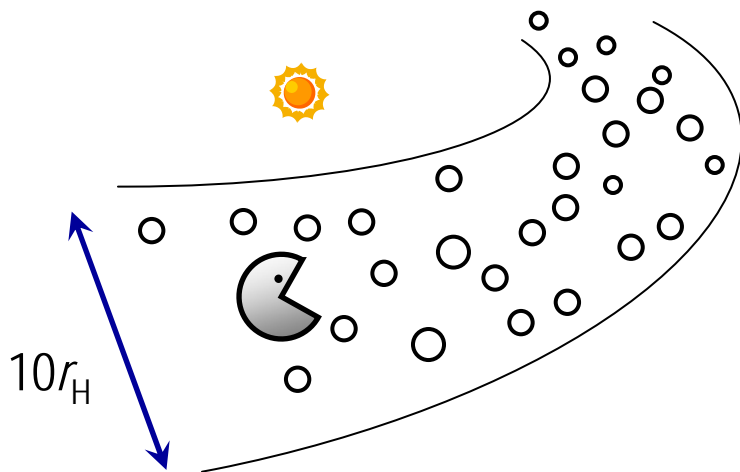


いや、だから小惑星なのかも

# 小惑星の位置づけ

$$M_{\text{iso}} \propto a^{3/4}$$

$$\tau_{\text{iso}} \propto a^3$$



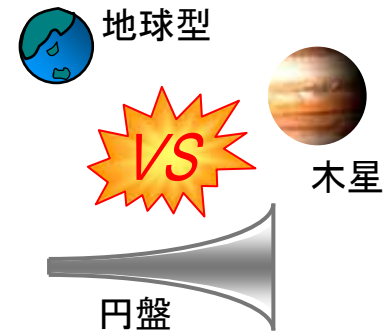
なんで「かけら」なのよ？

たぶん微惑星を並べて合体成長を計算しても、幸せにすべての特徴を備えた小惑星ができたりしない

# 小惑星の位置づけ

小惑星がなんでゴミみたいなのは、  
トリックがあって、  
地球型惑星と木星型惑星の形成進化と  
深い関係がある

と、みんな考えている(はずだ).



# 小惑星の位置づけ

---

小惑星がなんでゴミみたいなのかは、  
トリックがあって、  
地球型惑星と木星型惑星の形成進化と  
深い関係がある

だからそのトリックを知るのに  
なぜ"小"惑星なのか、なぜあんな軌道なのか、  
なぜ枯渇してるのか、なぜ100kmバンプがあるのか  
なぜゾーニングしてたりするのか、母天体はいくつ  
くらいあったのか、いつできたのか、惑星形成理論を  
制約する小惑星のエトセはすべて知りたい。  
改めて言うまでもないことだけど。

今回のテーマとして・・・

# 小惑星の位置づけ

惑星形成論上で不明な、  
地球が先か、木星が先か、  
の鍵を握っている。

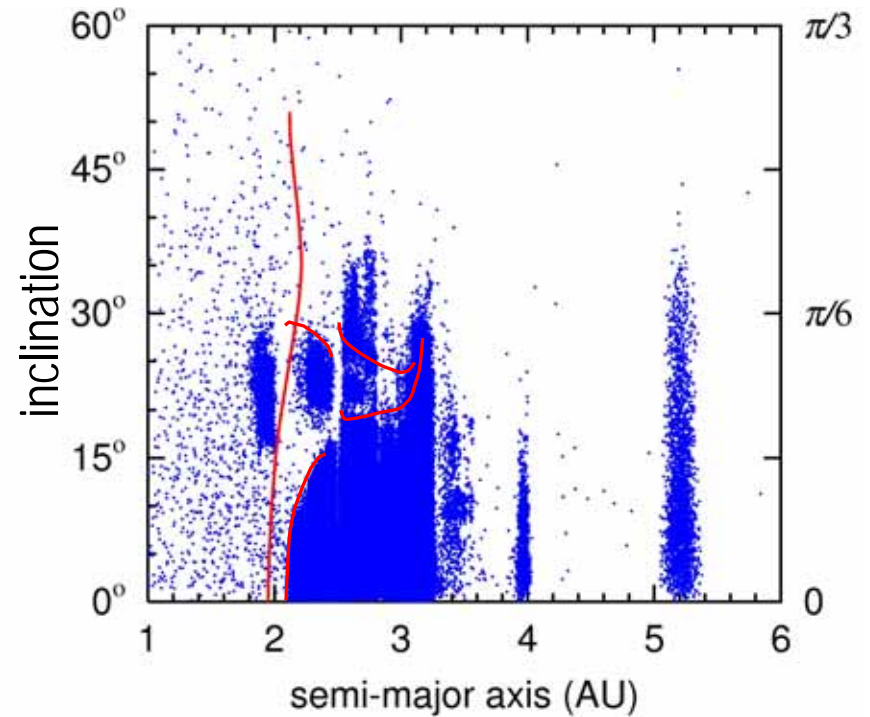
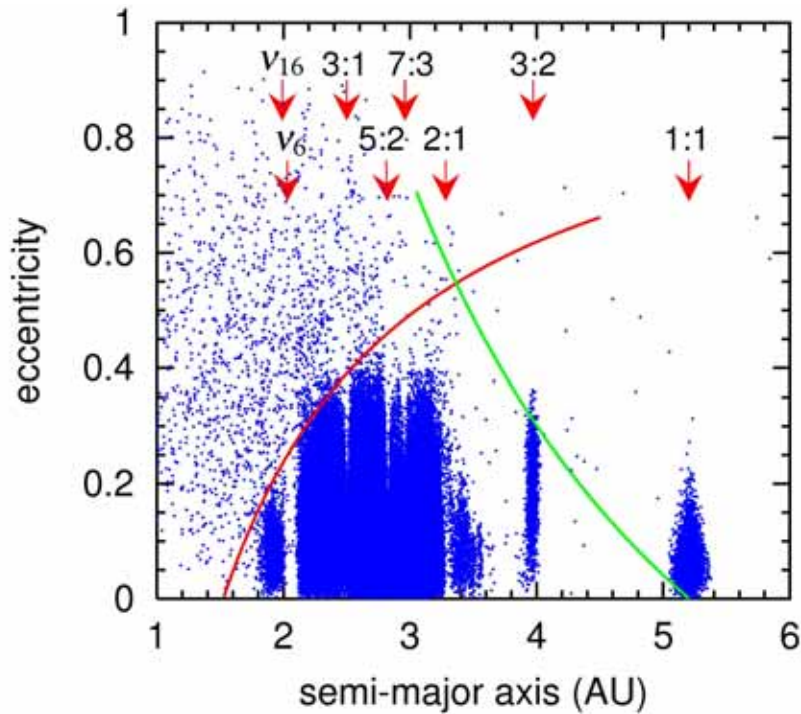


確かにそれは知りたい問題

# サイエンスイントロ

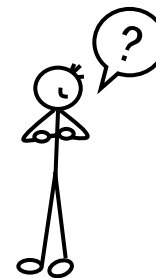
## 小惑星の軌道おさらい

番号のついた小惑星の離心率と軌道傾斜角と共鳴





# よく言われてる謎

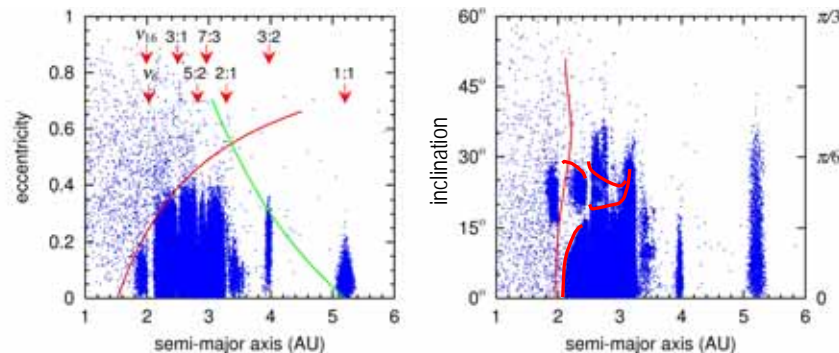


- ・簡単には説明できない大きさの離心率, 軌道傾斜角

$$\langle e^2 \rangle^{1/2} \sim 0.17, \langle i \rangle^{1/2} \sim 0.19 \text{ (rad)}$$

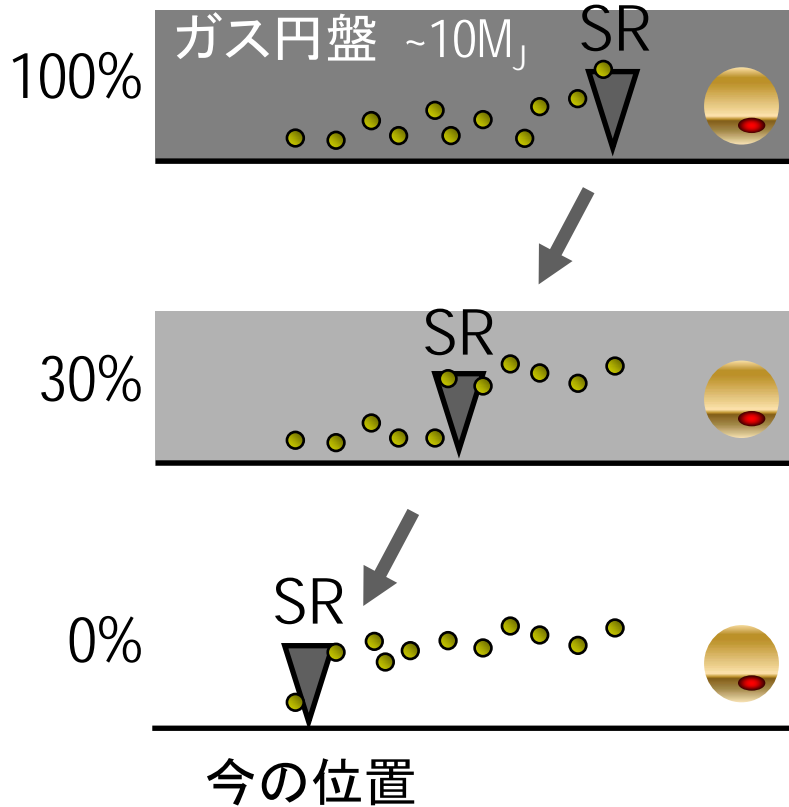
- ・惑星領域と比べて少ない総質量

a few  $\times 10^{24}$ g : 林モデルの0.1%



# 永年共鳴の移動？

Ward et al. (1976)



原始惑星系円盤 ~ 10M<sub>J</sub>

ガス円盤のポテンシャルが  
永年共鳴の位置を決める  
(現在とは違う場所で永年共鳴)

ガス円盤の散逸,  
質量ごとに異なる地点で共鳴

永年共鳴は今の位置に  
向かって移動する

永年共鳴が通る場所の天体の  
離心率, 軌道傾斜角が上昇する

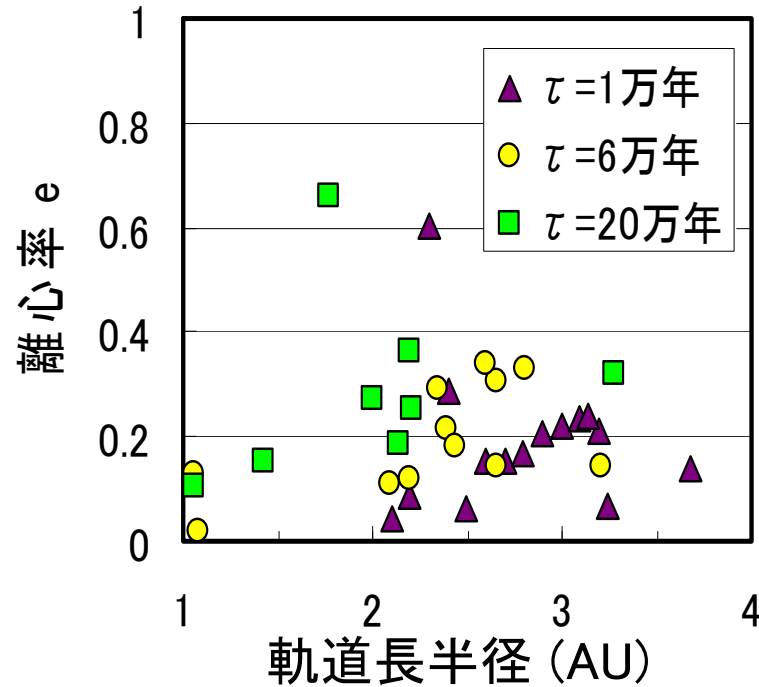
$e, i$

木星の存在が必要 .

共鳴が小惑星帯を通るか否かは円盤の晴れ方による .

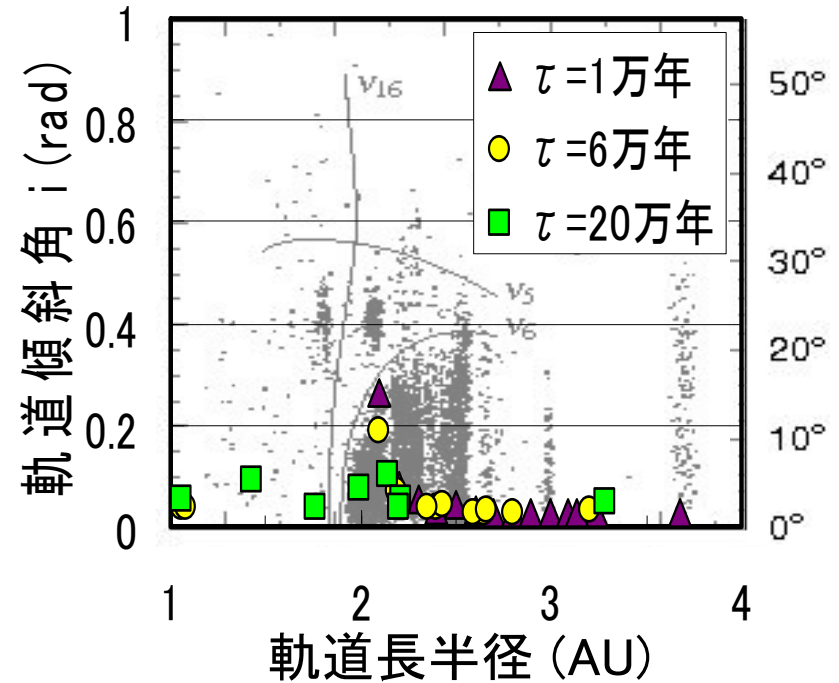
# 全域で一様な散逸

## 数値計算結果



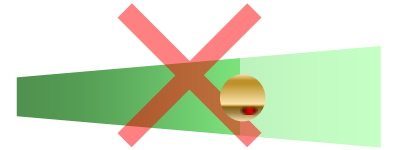
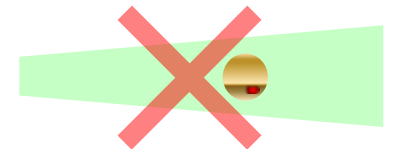
$$\rho(r, z, t) = \rho_0(r, z) \exp(-t/\tau)$$

$\tau$  円盤散逸の時間スケール



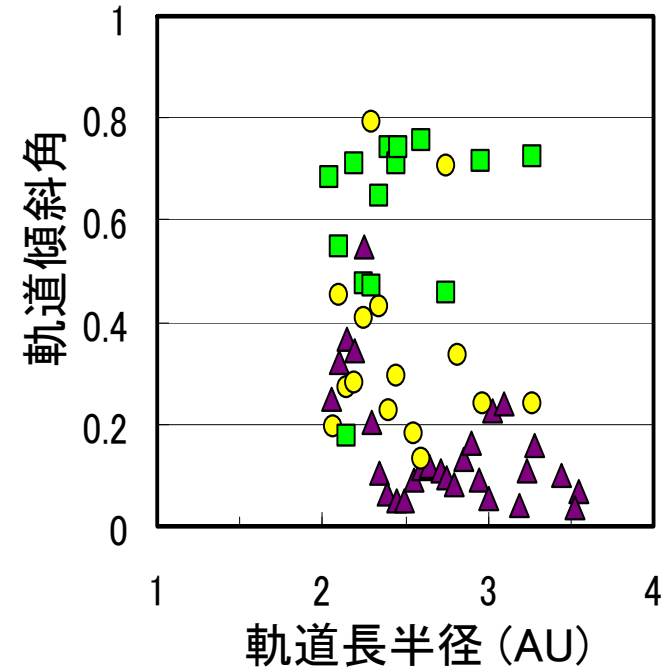
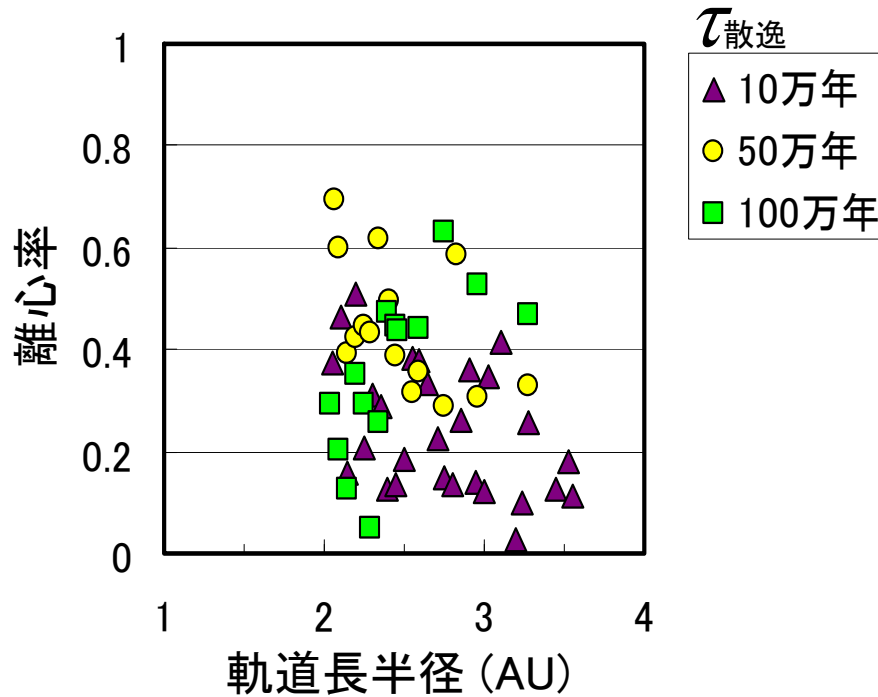
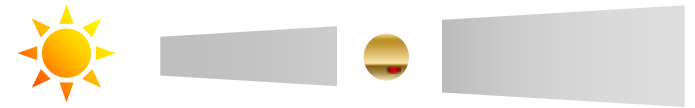
離心率の上昇による枯渇はOK  
軌道傾斜角はちっとも上昇しない

土星軌道の外側が先に散逸してはだめ

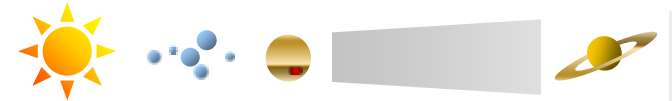


このたぐいの散逸方法はだめ

# 内側が先に散逸する場合



- 軌道傾斜角は、小惑星近傍のガスが薄くなった後、土星付近の円盤の散逸時に**土星との永年共鳴によって上昇**.

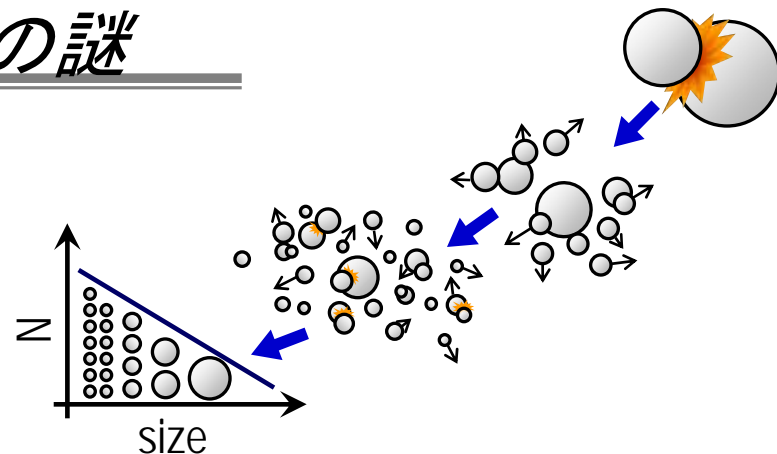
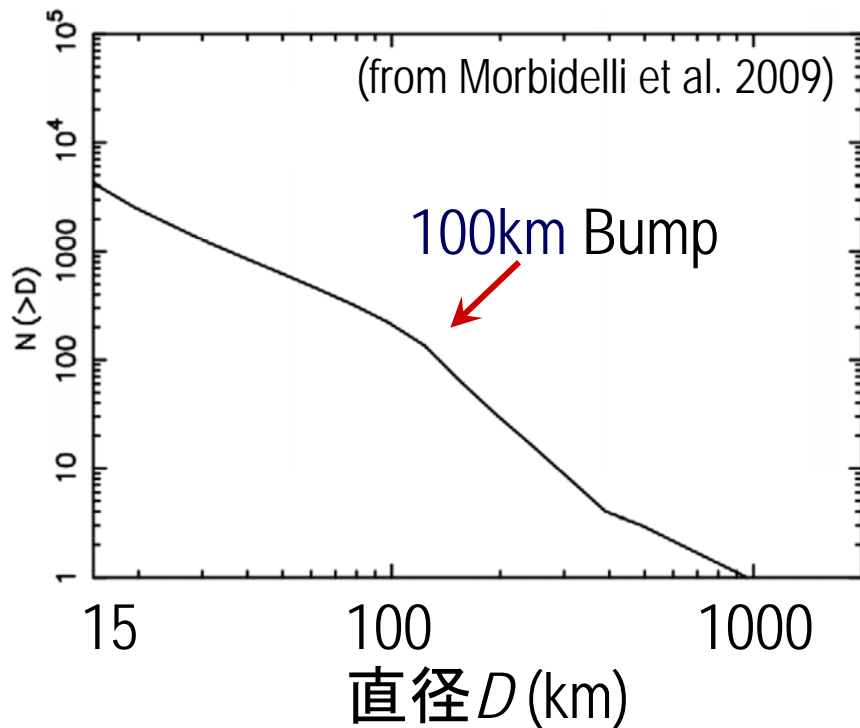


小惑星の枯渇と軌道傾斜角は、地球型惑星の領域のガス円盤が外側に先んじて散逸する2段階散逸を強く支持する。

原始惑星がかき回すときと比べ、小惑星はあんまし混ざらない。

# 余禄 小惑星サイズ分布の謎

現在のメインベルト小惑星の  
直径の累積数分布



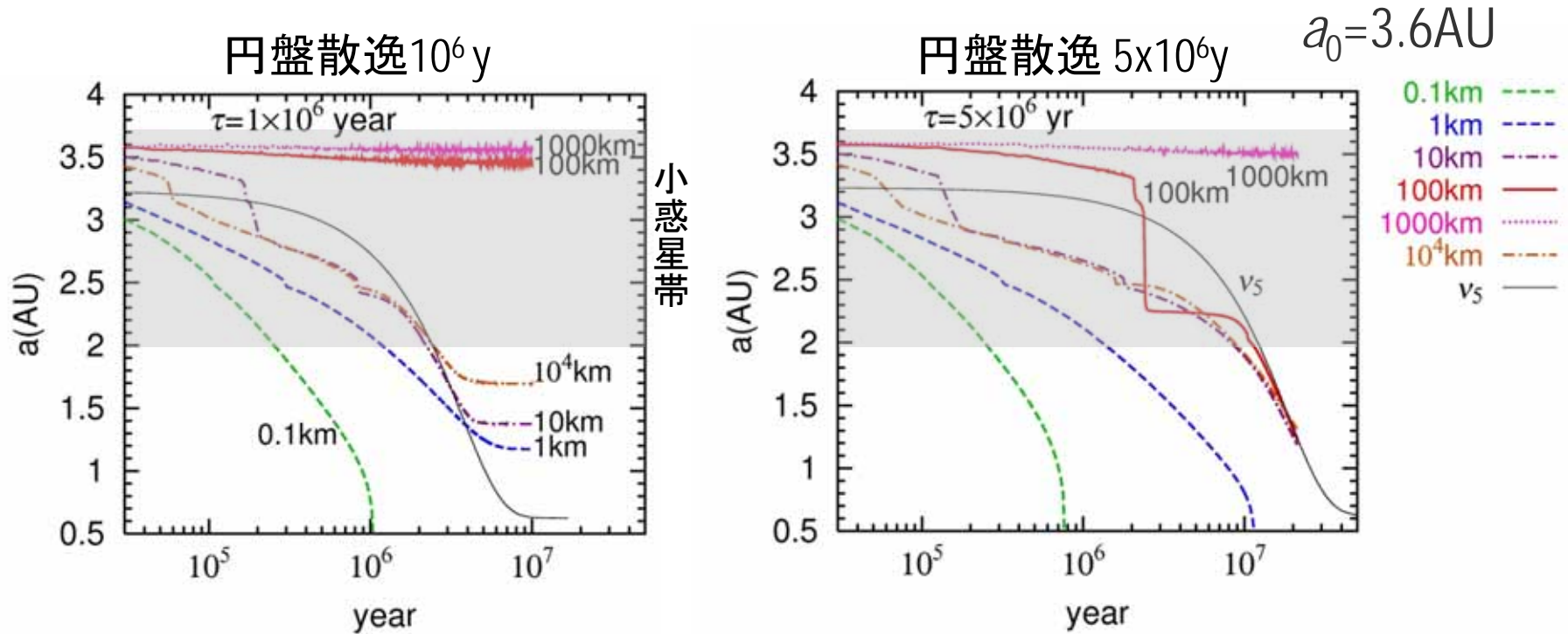
- Morbidelli et al. (2009)  
微惑星が~1000kmサイズに形成され, 衝突進化すると100kmが卓越する.

なぜもとの小惑星は  
100-1000km 卓越?

- 重力不安定で100-1000kmだけができた?
- 他の要因?

こっち

# いろいろなサイズの小惑星の $a$ 進化



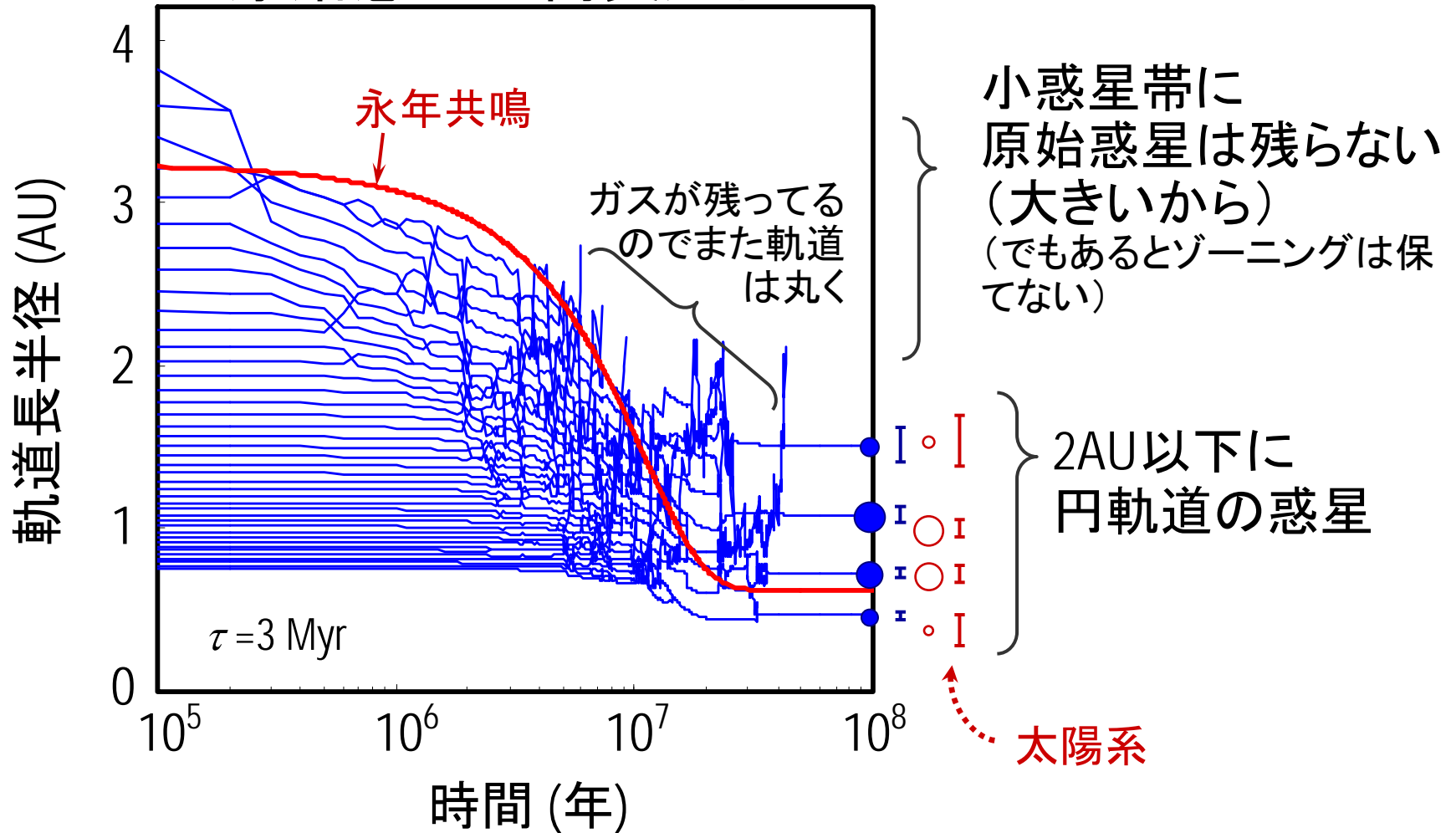
- $D < 1$ km: 木星があるだけでガス抵抗で失われる
- $D < 10 \sim 100$  km: 永年共鳴の通過のときにガス抵抗で失われる
- $D > 1000$ km: 永年共鳴の通過のときに重力抵抗で失われる

→  $D \sim 100 \sim 1000$ km程度の小惑星が選択的に残される  
木星形成とガス散逸が初期のサイズ分布をコントロール

→ 小惑星枯渇. あんまし減らしすぎると衝突進化できないが

# じゃあ、地球型惑星

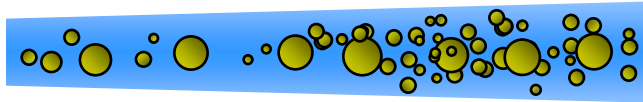
## 原始惑星の衝突進化



太陽系類似の惑星系の形成

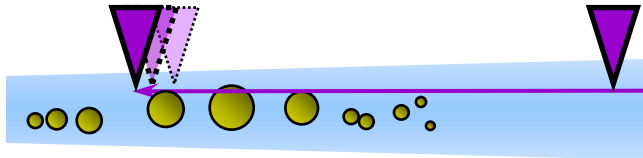
# まとめると？

## 1. 原始惑星と木星コアの成長→木星の完成, ギャップ形成



土星はまだなくてもいい

## 2. 内側のガスの散逸: $\sim 10^6$ - $10^7$ 年→木星の共鳴の移動

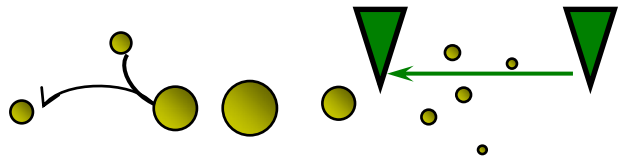


水星には来ない

終わりまでには土星が必要

永年共鳴+重力抵抗で円軌道の地球型惑星. 小惑星は枯渇. 衝突進化も.

## 3. 外側のガスの散逸→土星の共鳴の移動(地球は安全)

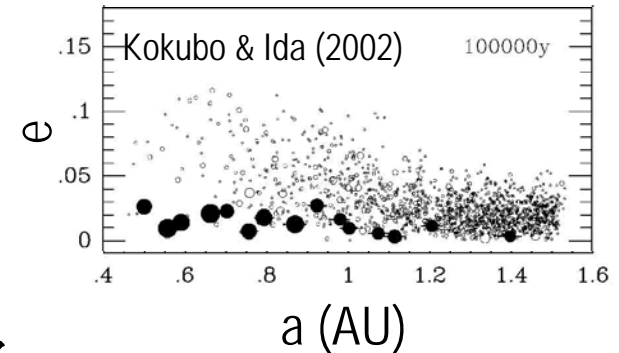


巨大衝突で水星完成 ∴ 大きな離心率. 水星サイズの問題は未調査

小惑星の  $e, i$  上昇



# このシナリオの要請すること



1. 木星完成前に原始惑星ができています.
2. でも小惑星帯には100km-1000kmのものもある.  
(破片でもいい. 原始惑星があってもいいがゾーニング問題)
3. 木星完成後にガスが(内側から先に)晴れる  
(完成前に10%くらいになっててもOK).

つまり？

小惑星, そんな雰囲気できてる？

# まとめ

---

小惑星の軌道を励起し、数を減らし、100kmサイズを多くし、ゾーニングを保つのに、（これらは遠くからの観測の情報）

小惑星成長→木星→ガス散逸→小惑星の枯渇  
+地球型惑星の完成

というモデルがあり、物質的に証明できるとうれしいな。

…ついでにゾーニングが何かよく教えてほしい。