

太陽系形成の標準シナリオとその課題

小久保英一郎 (国立天文台)

目次

太陽系の特徴

- 天体の分類と特徴

太陽系形成の標準シナリオ

- ダストから微惑星へ
- 微惑星から原始惑星へ
- 原始惑星から惑星へ

残されている問題

- 標準シナリオの課題
- 最近の進展

大域的移動モデル

- Nice モデル
- grand tack モデル
- 連鎖集積モデル

太陽系の特徴

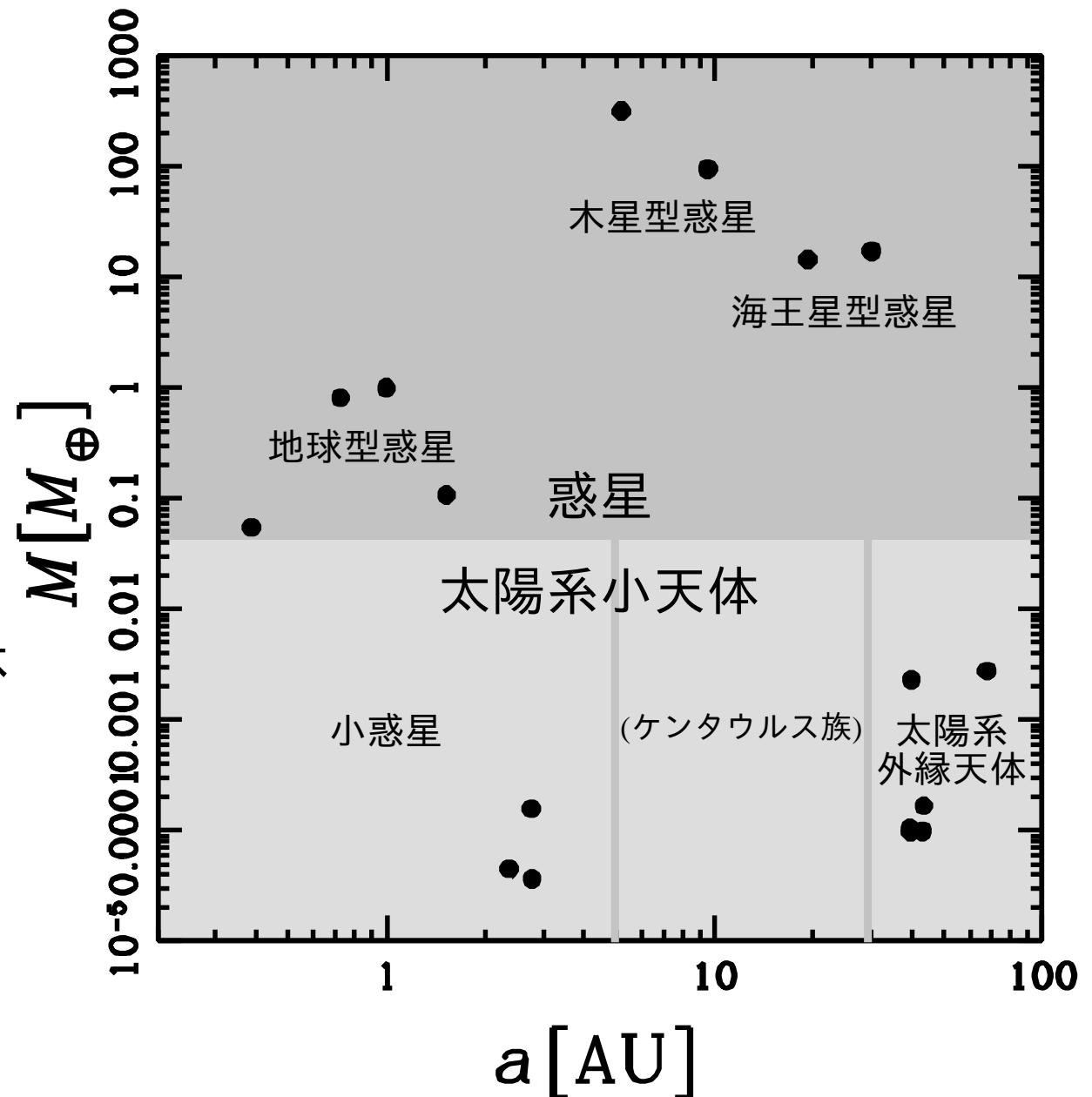
太陽系の天体

太陽公転天体

- 惑星
 - 地球型惑星
 - 木星型惑星
 - 海王星型惑星
- (準惑星)
- 太陽系小天体
 - 小惑星
 - 太陽系外縁天体
 - 彗星(核)

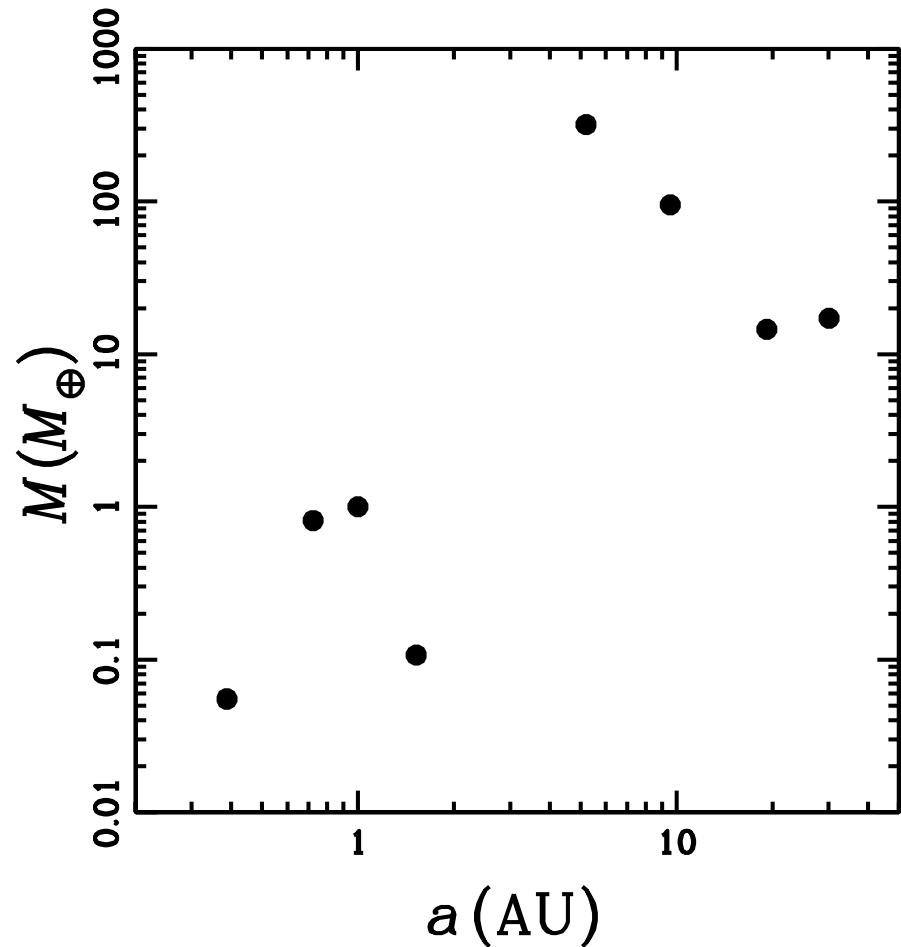
惑星公転天体

- 衛星
- 環

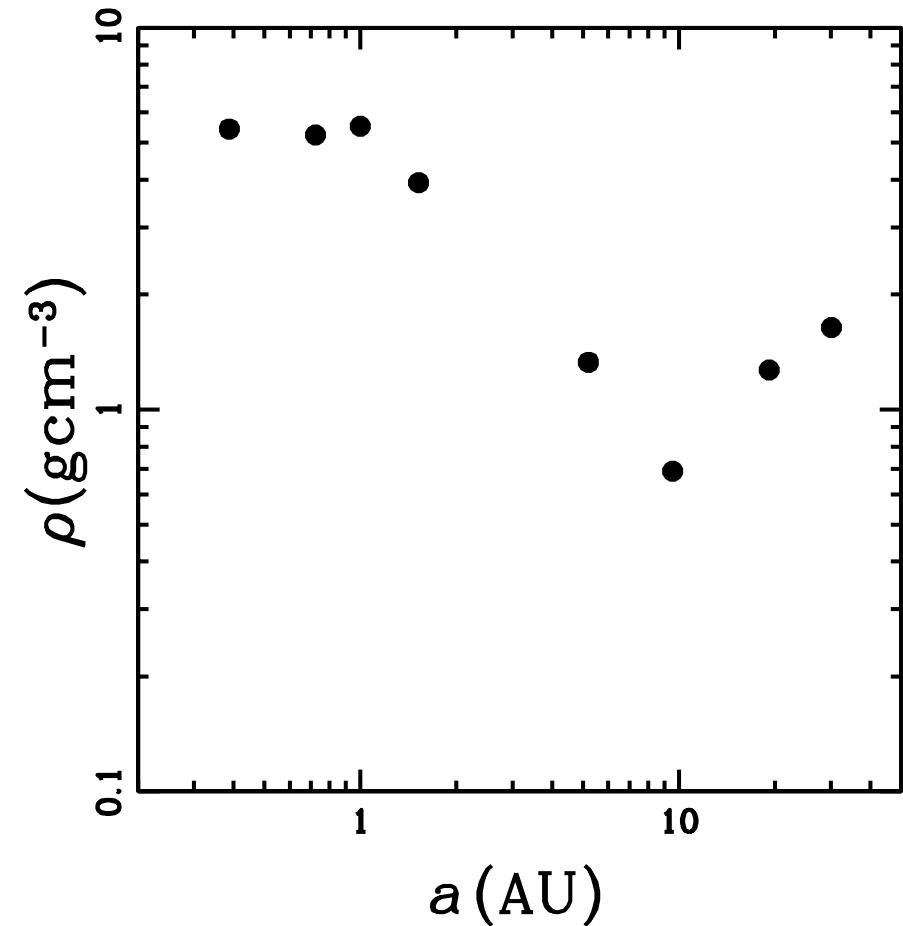


惑星の特徴: 質量と密度

軌道長半径-質量

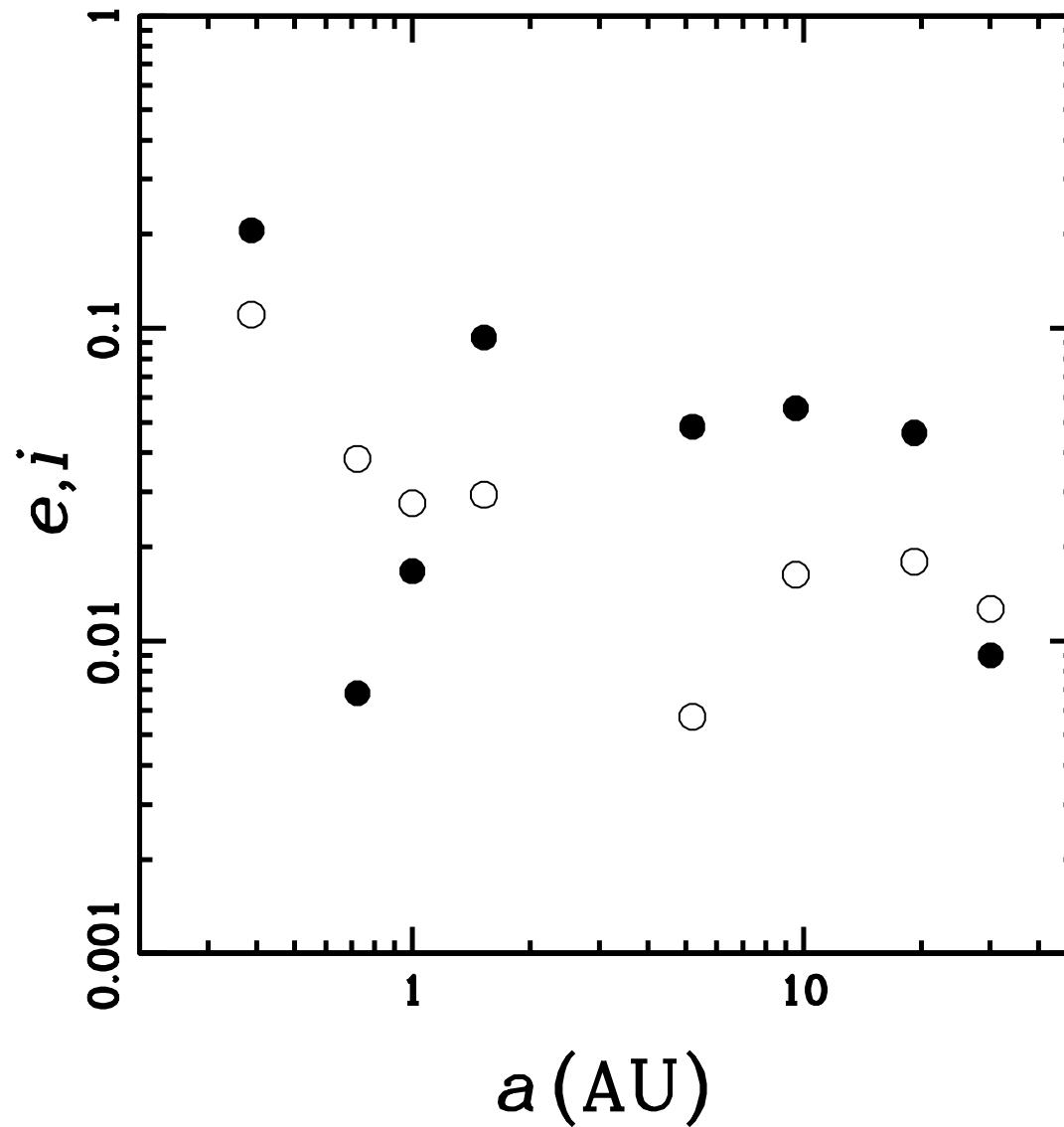


軌道長半径-密度



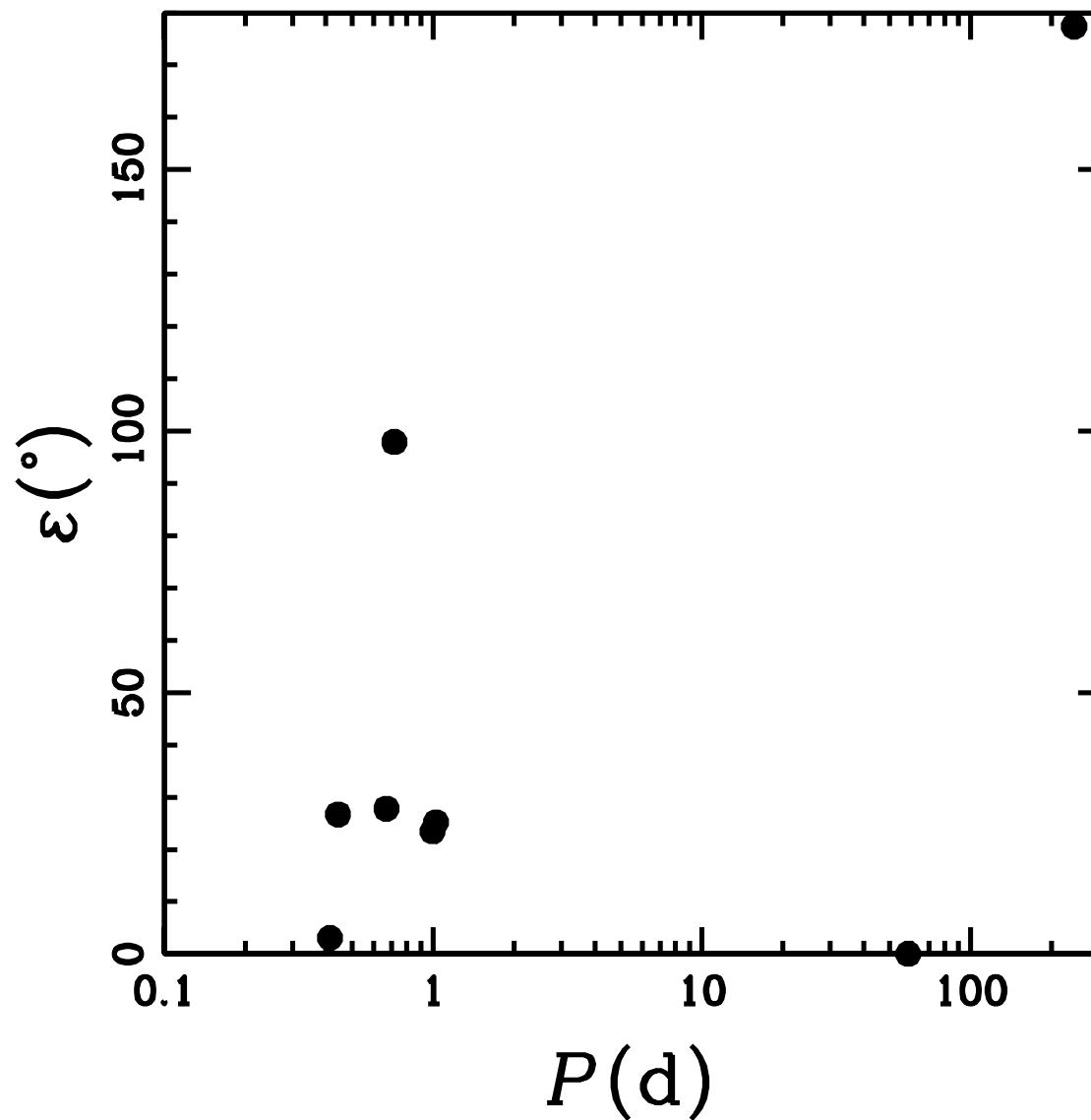
惑星の特徴: 軌道要素

軌道長半径-軌道離心率 (\bullet), 軌道傾斜角 (\circ)



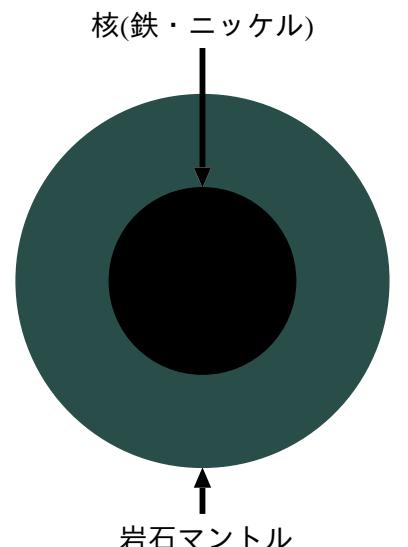
惑星の特徴：自転

自転周期-自転軸傾斜角

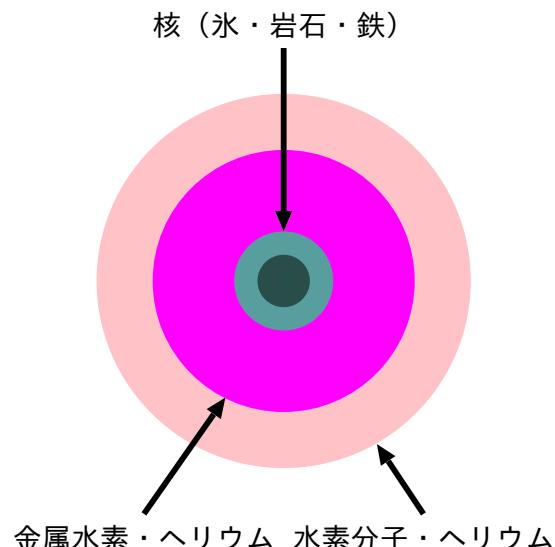


惑星の分類

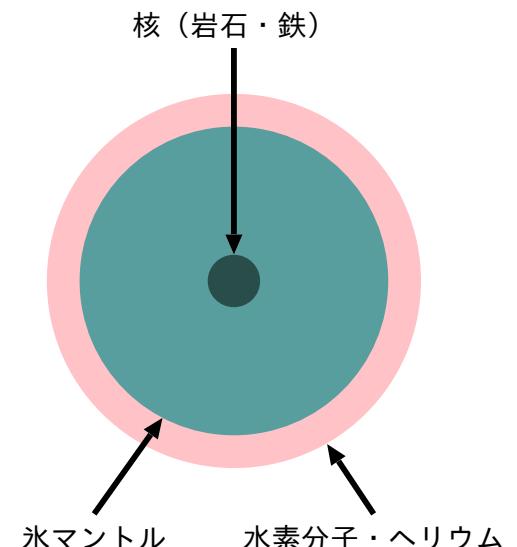
種類	地球型	木星型	海王星型
別名	岩石惑星	ガス惑星	氷惑星
惑星	水星, 金星, 地球, 火星	木星, 土星	天王星, 海王星
存在範囲 (AU)	0.4-1.5	5-10	20-30
質量 (M_{\oplus})	$\sim 0.1-1$	~ 100	~ 10
密度 (gcm^{-3})	3.9-5.5	$\simeq 1$	$\simeq 1$
主成分	岩石・鉄	ガス (H_2, He)	氷 ($\text{H}_2\text{O}, \text{CH}_4, \text{NH}_3$)



地球型惑星

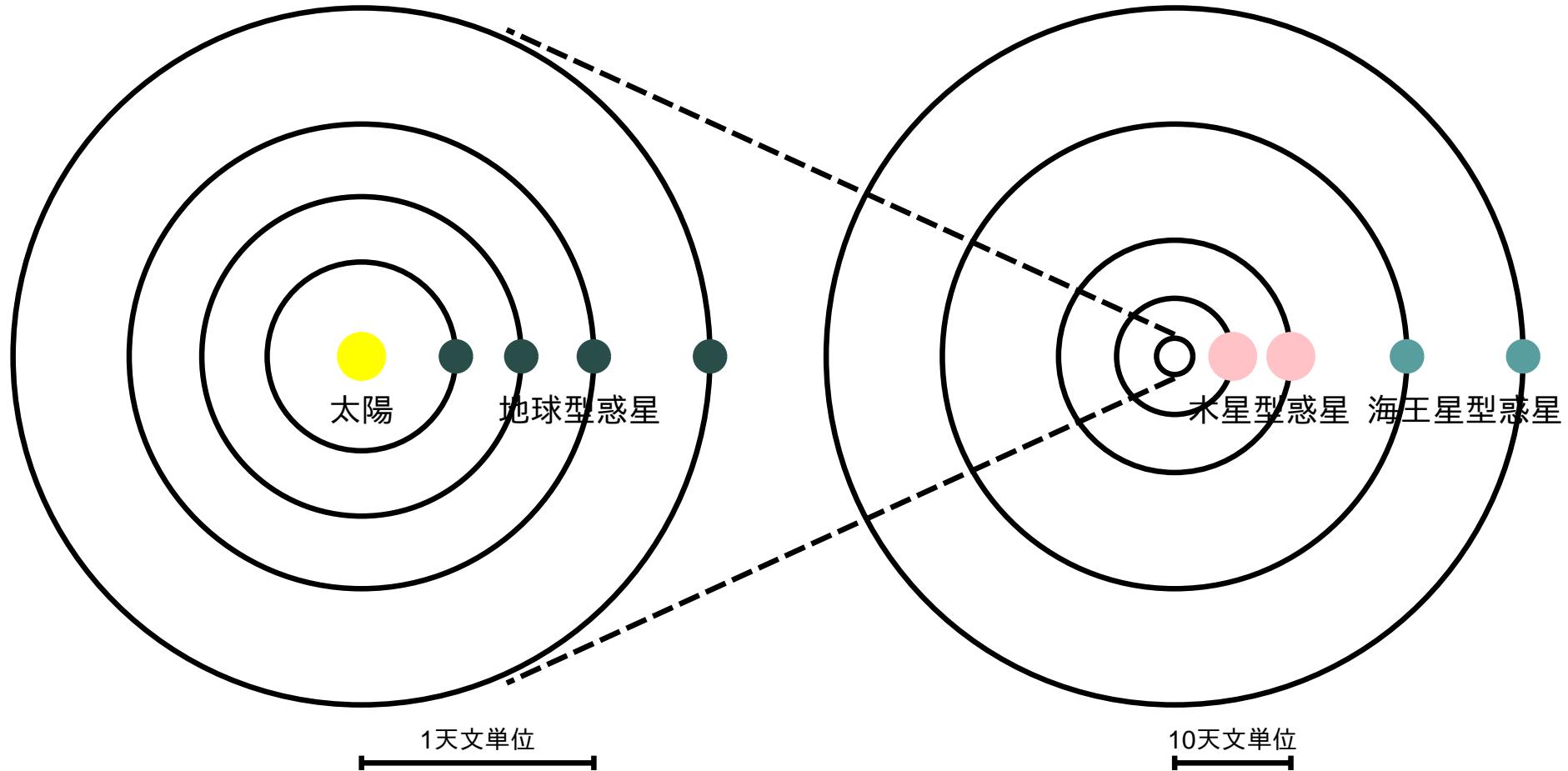


木星型惑星



海王星型惑星

惑星系の構造



小天体の分布

小惑星帯

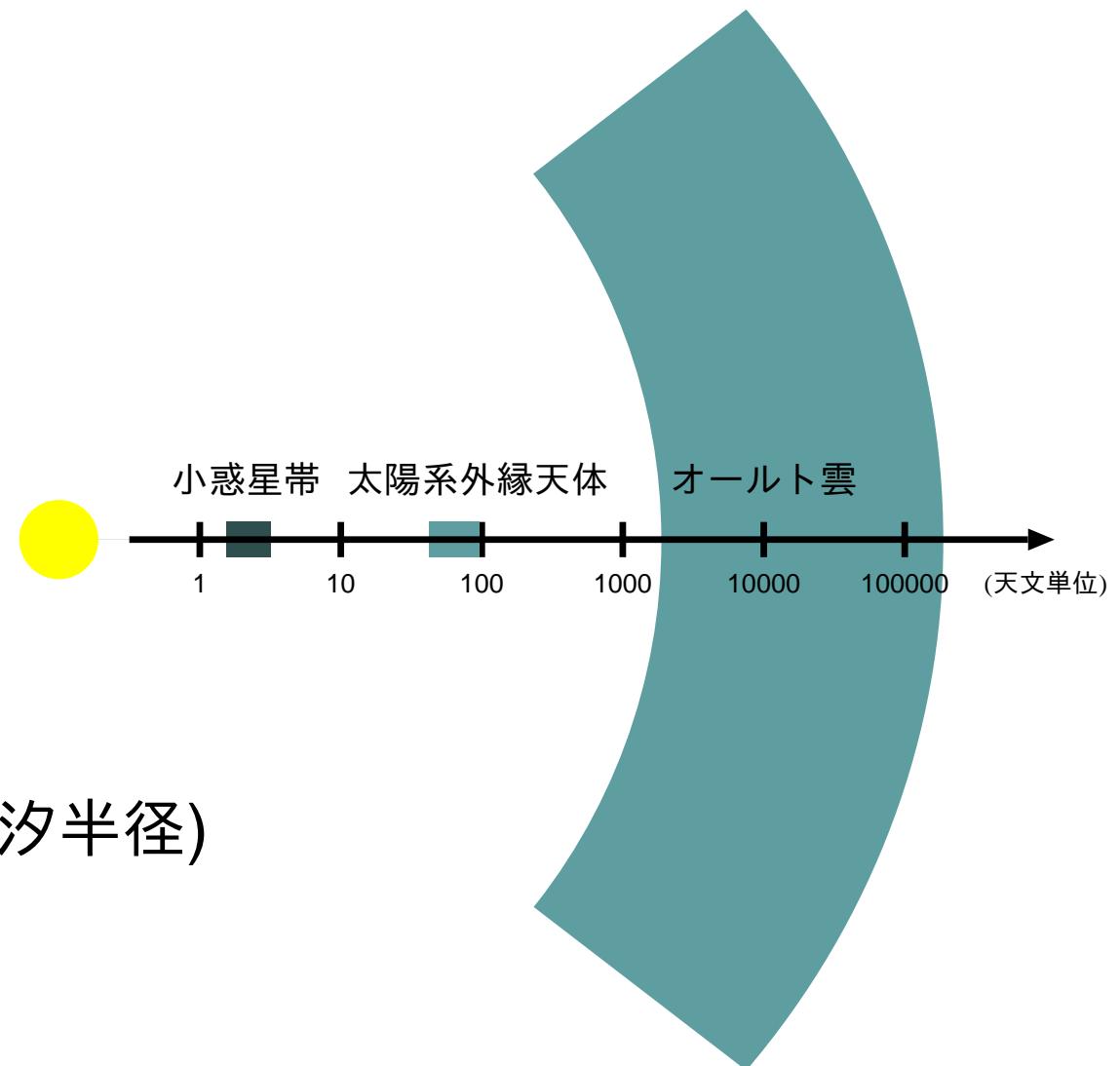
- $\simeq 2\text{-}3 \text{ AU}$
- 環状
- 隕石の供給源

太陽系外縁天体

- $\simeq 30\text{-} \text{ AU}$
- 円盤状?
- 短周期彗星の供給源

オールト雲

- $\sim 10^3\text{-}10^5 \text{ AU}$ (太陽潮汐半径)
- 球殻状
- 長周期彗星の供給源



太陽系の概要

大きさ

- 惑星領域半径 $\simeq 30 \text{ AU}$
- 太陽潮汐半径 (オールト雲半径) $\simeq 2 \times 10^5 \text{ AU}$

天体数

- 惑星 8 個
- 小天体 (小惑星, 太陽系外縁天体, 彗星) 無数

質量と角運動量

- 惑星の質量 $\simeq 10^{-3} M_\odot$
- 惑星の軌道角運動量 $\simeq 190$ 太陽自転角運動量

惑星

- 組成: 岩石 (地球型), ガス (木星型), 氷 (海王星型)
- 軌道: 同一平面同方向円軌道

太陽系形成の標準シナリオ

標準シナリオの基本概念

円盤仮説

- 惑星系は恒星周りの小質量の円盤 (原始惑星系円盤) から形成される。
- 円盤はガスとダストから構成される。

微惑星仮説

- ダストの集積によって微惑星が形成される。
- 微惑星の集積によって固体惑星が形成される。
- 固体惑星 (核) にガスが降り積もることによってガス惑星が形成される (核集積モデル)。

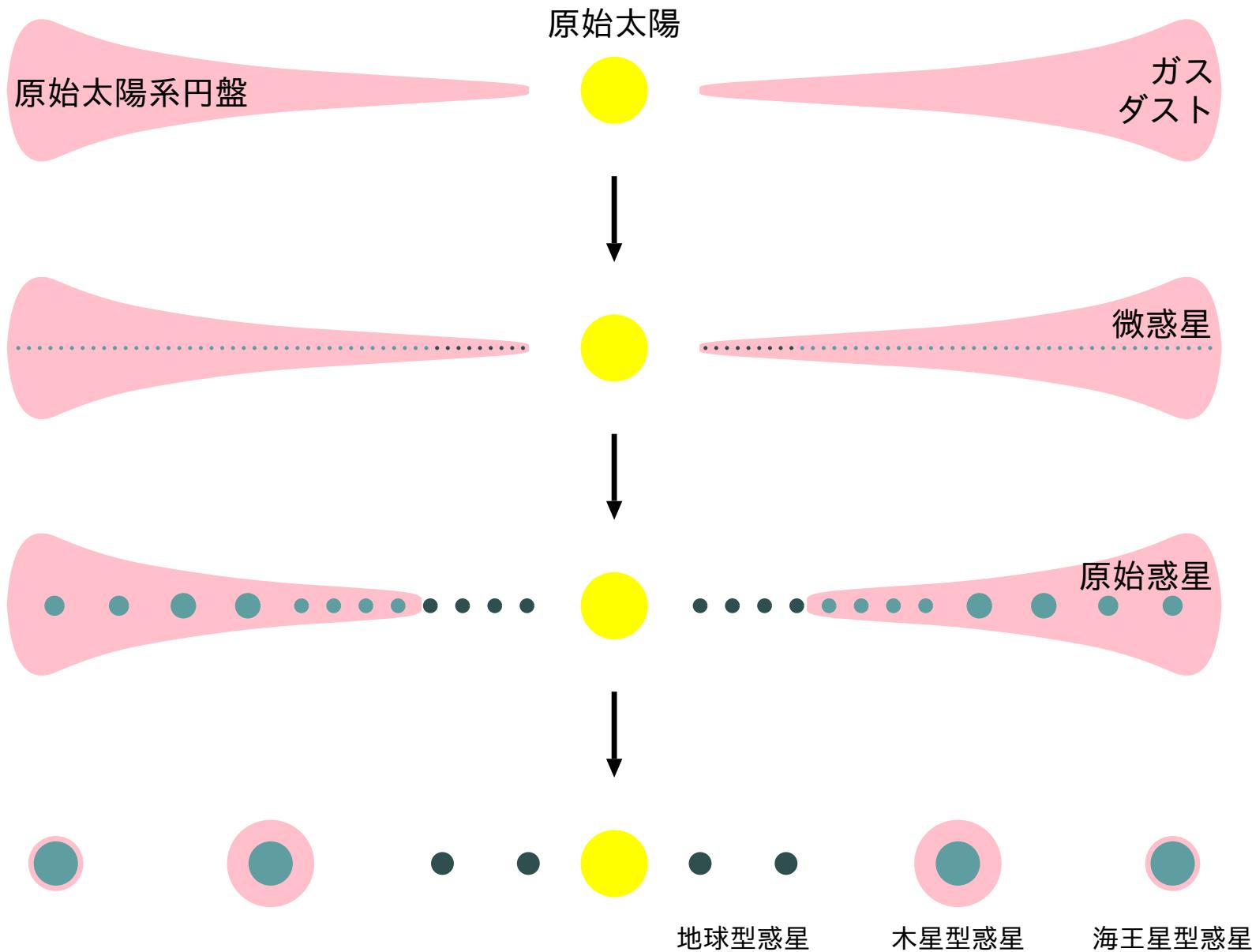
(Safronov 1969, Hayashi+ 1985)

林先生と Safronov 博士



林忠四郎の自叙伝 (2009)

標準シナリオの概要



最小質量円盤(復元円盤)モデル

構成原理

$$\Sigma_{\text{dust}} \simeq 10 \left(\frac{a}{1 \text{AU}} \right)^{-3/2} \text{gcm}^{-2}$$

- 物質の最小移動
- 固体成分(ダスト)惑星集積率 100%
- 太陽系元素存在度

雪線

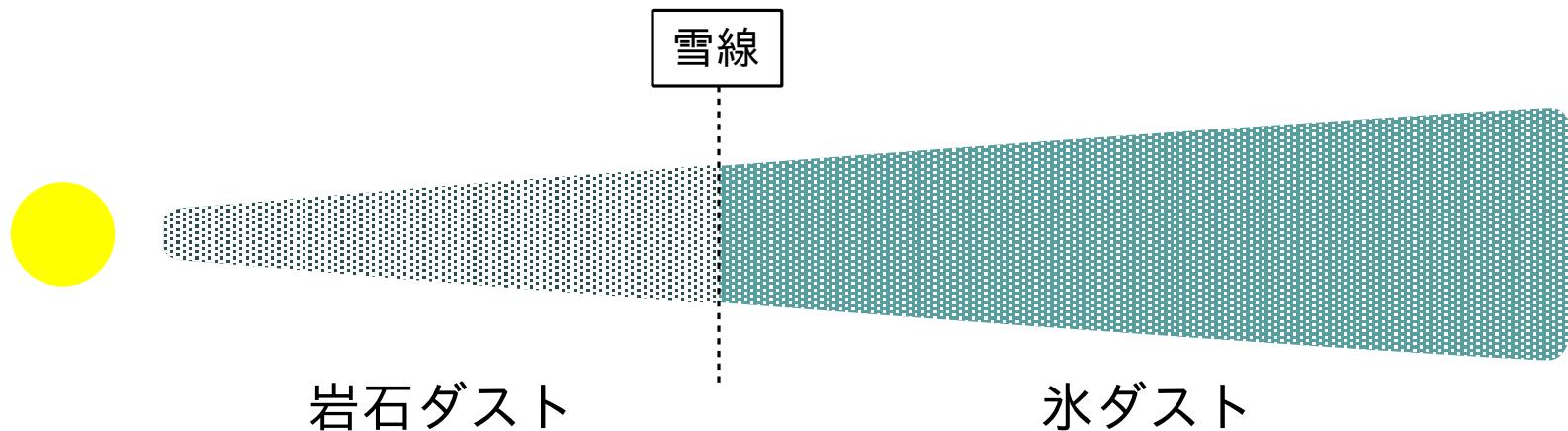
$$a_{\text{snow}} = 2.7 \left(\frac{T_{\text{snow}}}{170 \text{K}} \right)^{-2} \text{AU}$$

- 温度が H_2O 凝結温度 $T_{\text{snow}} \simeq 170 \text{K}$ になる太陽からの距離
- $a > a_{\text{snow}}$ では H_2O が氷となりダスト成分が 3-4 倍増加
- 岩石天体と氷天体の基本的な境界

(Hayashi 1981)

注意: 最小質量円盤モデルは作業仮説

ダスト



サイズと総質量

- $r \sim 0.1\text{-}1 \mu\text{m}$
- $M_{\text{tot}} \sim 10^{-4} M_{\odot}$

組成

- 雪線内: 岩石質 (珪酸塩)
- 雪線外: 氷質 (氷、珪酸塩)

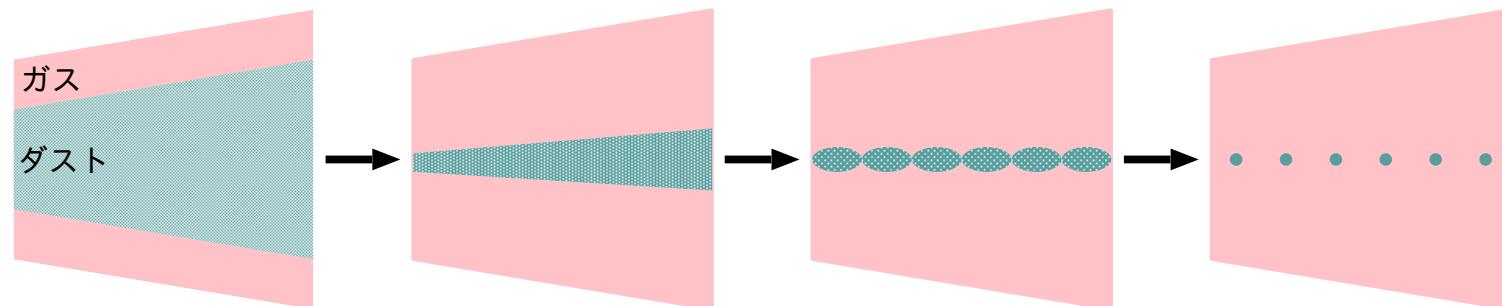
ダストから微惑星へ

ダストの付着成長 (e.g., Weidenschilling & Cuzzi 1993)

- ダストの 1 対 1 合体成長で微惑星を形成
- 破壊障壁、落下障壁?

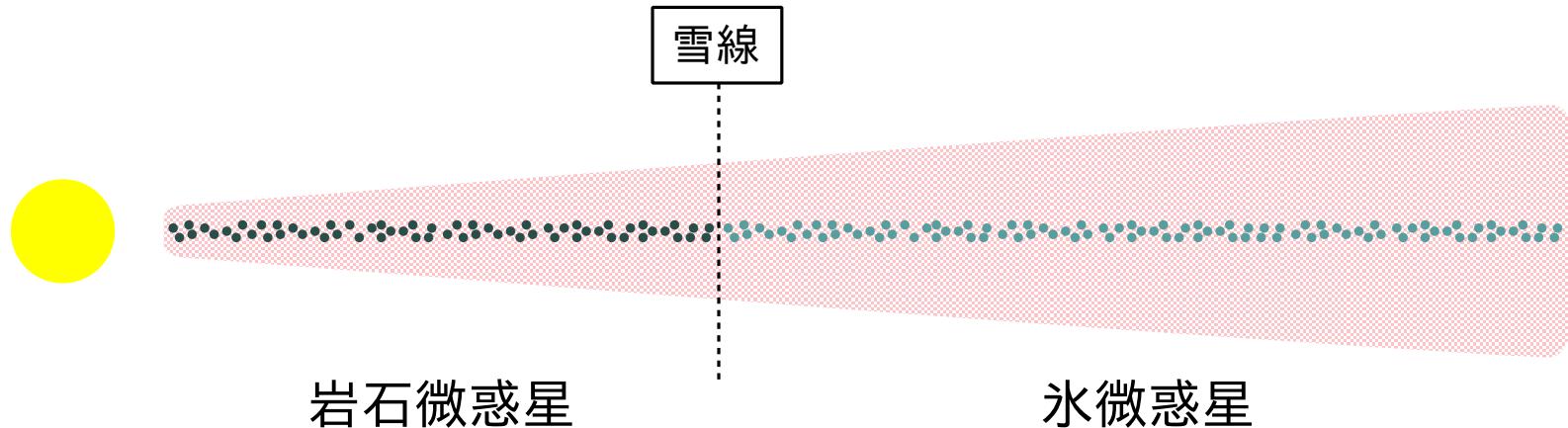
ダスト層の重力不安定 (e.g., Goldreich & Ward 1973)

- ダスト層の重力不安定による分裂と収縮から微惑星を形成
- ガス乱流?



ダスト層の重力不安定の概念図 (円盤の一部の断面図)

微惑星



個数

- $N \sim 10^{11}$

質量(サイズ)

- $m \sim 10^{18}\text{-}10^{21} \text{ g}$ ($r \sim 1\text{-}10 \text{ km}$) (軌道半径とともに増大)

組成

- 雪線内: 岩石質
- 雪線外: 氷質

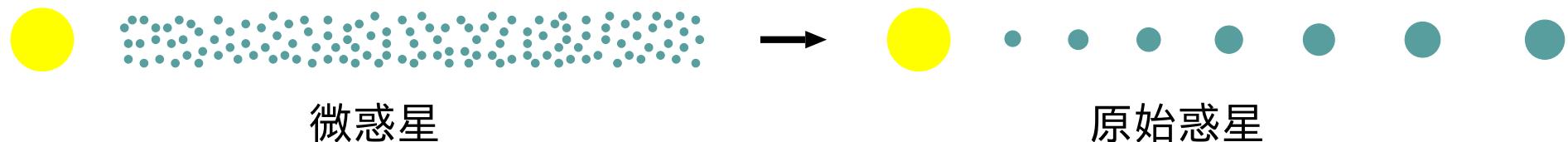
微惑星から原始惑星へ

微惑星の暴走的成長 (e.g., Wetherill & Stewart 1989, EK & Ida 1996)

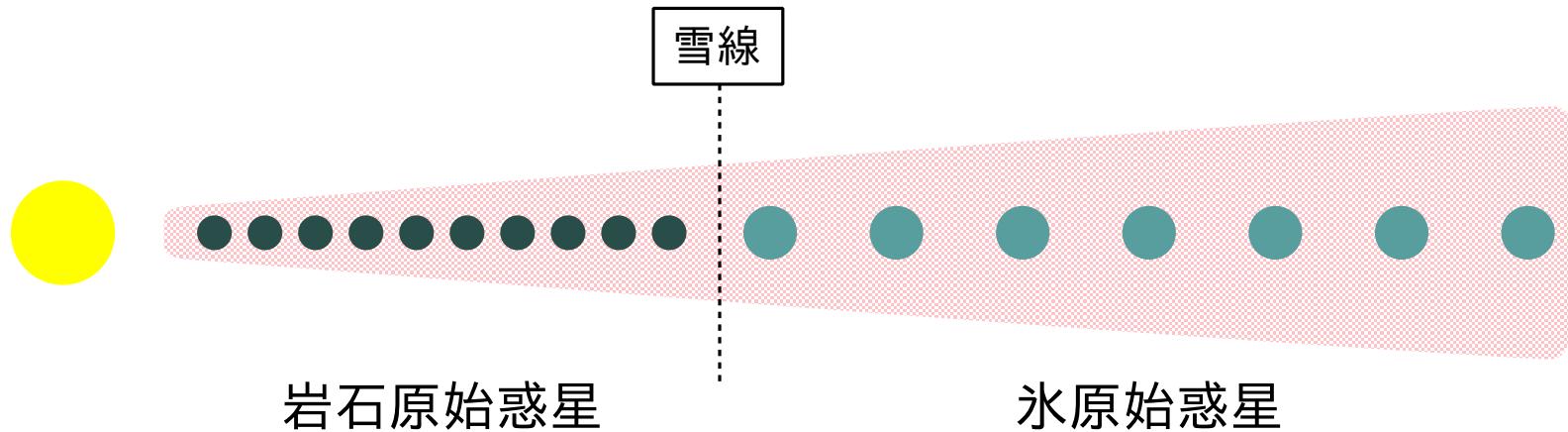
- 重力フォーカシングによって大質量の微惑星ほど速く成長する
- $v \propto m^{-1/2}$, $ndm \propto m^{-8/3}dm$

原始惑星の寡占的成长 (e.g., EK & Ida 1998, 2002)

- 臨界質量以上の原始惑星 (暴走的成長微惑星) は秩序的に成長する
- 原始惑星はヒル半径に比例した軌道間隔を保つ



原始惑星



個数と孤立質量

- $N \sim$ 数 10
- $M_{\text{iso}} \sim 0.1\text{-}10 M_{\oplus}$ ($\propto a^{3/4}$)

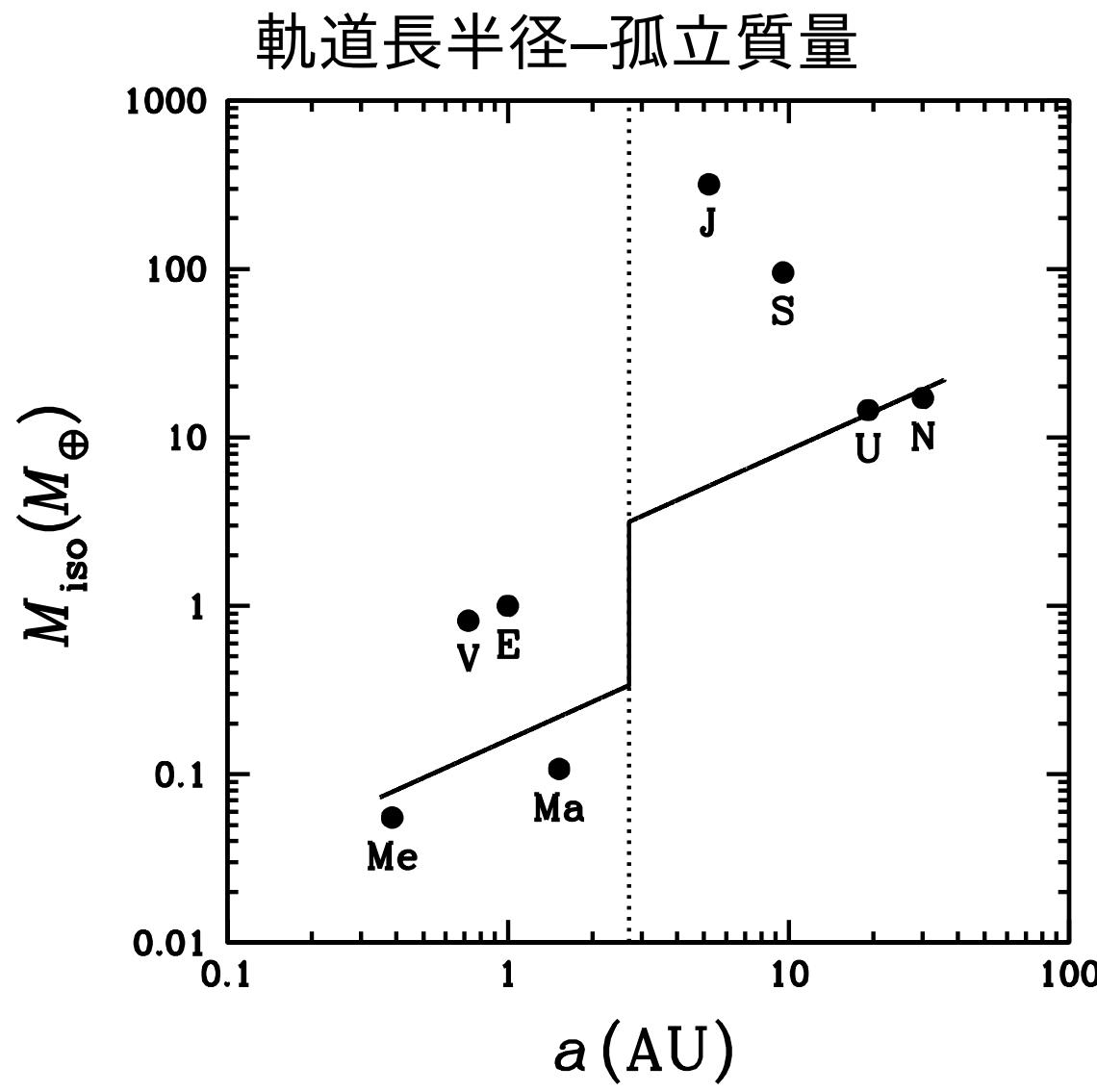
組成

- 雪線内: 岩石質
- 雪線外: 氷質

成長時間

- $t_{\text{grow}} \sim 10^6\text{-}10^9$ 年 ($\propto a^3$)

原始惑星の孤立質量



(EK & Ida 2000)

原始惑星から惑星へ

地球型惑星 (e.g., Chambers & Wetherill 1998, EK+ 2006)

- 金星・地球: 原始惑星どうしの**巨大衝突**
- 水星・火星: 原始惑星の生き残り

木星型惑星 (e.g., Mizuno 1980, Machida+ 2010, Tanigawa+ 2014)

- 核(原始惑星)の重力による**ガス降着**

海王星型惑星 (e.g., EK & Ida 2000)

- 木星型になれなかった原始惑星

木星型惑星の形成条件 (e.g., Ikoma+ 2000)

- 原始惑星質量 $>$ 臨界核質量 ($\simeq 10M_{\oplus}$) \Rightarrow **木星型領域内側境界**
- 原始惑星形成時間 $<$ ガス円盤寿命 ($\simeq 10^7$ 年) \Rightarrow **木星型領域外側境界**

小天体の起源

小惑星帯

- 微惑星の生き残り
- 高速衝突によって破壊された原始惑星 ← 惑星摂動

太陽系外縁天体 (e.g., Fernandez & Ip 1984)

- 微惑星の生き残り ← 小面密度、惑星摂動

オールト雲 (e.g., Higuchi+ 2007)

- 巨大惑星によって遠方に散乱された微惑星
- 銀河系潮汐力、恒星遭遇によって分布が球殻状化
- (オールト雲天体の 10 倍以上の天体が系外に放出 → 浮遊彗星; Higuchi & EK 2015)

小天体 = 惑星になれなかつた微惑星

残されている問題

残されている問題

微惑星形成

- 形成機構: 付着成長? 不安定性?

地球型惑星形成

- なぜ近接惑星がない? なぜ火星は小さい?

小惑星帯の形成

- なぜ質量が少ない?

木星型惑星形成

- ガス円盤寿命内に形成可能?

海王星型惑星形成

- 太陽系年齢内に形成不可能? 内側で形成後外側に移動?

ガス円盤の散逸

- いつどうやって散逸したか?

...

標準シナリオの課題

標準シナリオの仮定

- 最小質量、連續分布円盤(雪線除く)
- その場形成

原始太陽系円盤の理解

- 構造(非一様性、不連續性)?
- 形成と初期進化?

原始惑星・惑星の移動の理解

- 惑星とガス円盤の重力相互作用によって中心星に落下?
- 惑星系の軌道不安定性によって拡散?

衝突破壊・破片の効果

- 微惑星の破壊進化?
- 破片-惑星の相互作用?

最近の進展(1)

微惑星形成

- 圧力バンプ (e.g., Johansen+ 2009, Taki+ 2016)
- ストリーミング不安定 (e.g., Youdin & Goodman 2005, Johansen+ 2007)
- 高空隙率ダストの付着成長 (e.g., Wada+ 2008, Okuzumi+ 2012, Kataoka+ 2013, Arakawa & Nakamoto 2016)
- 高空隙率ダスト層の重力不安定 (Michikoshi & EK 2016)

惑星集積

- ペブル (小石) 集積 (e.g., Lambrechts & Johansen 2012)
- 局所分布 (環) からの集積 (e.g., Hansen 2009)
- 不完全合体の効果 (e.g., EK & Genda 2010)
- 衝突破壊・破片の効果 (e.g., Kobayashi & Tanaka 2010)

最近の進展(2)

原始惑星・惑星の移動

- 現実的な円盤でのI型移動 (e.g., Paardekooper+ 2010)
- 円盤風のI型移動への影響 (e.g., Suzuki+ 2016, Ogiara, EK+ 2017)

大域的移動モデル

- Nice モデル (e.g., Tsiganis+ 2005)
- grand tack モデル (e.g., Walsh+ 2011)

小石集積 (Lambrechts & Johansen 2012)

動機

- ガス惑星の固体核をガス円盤寿命内に形成

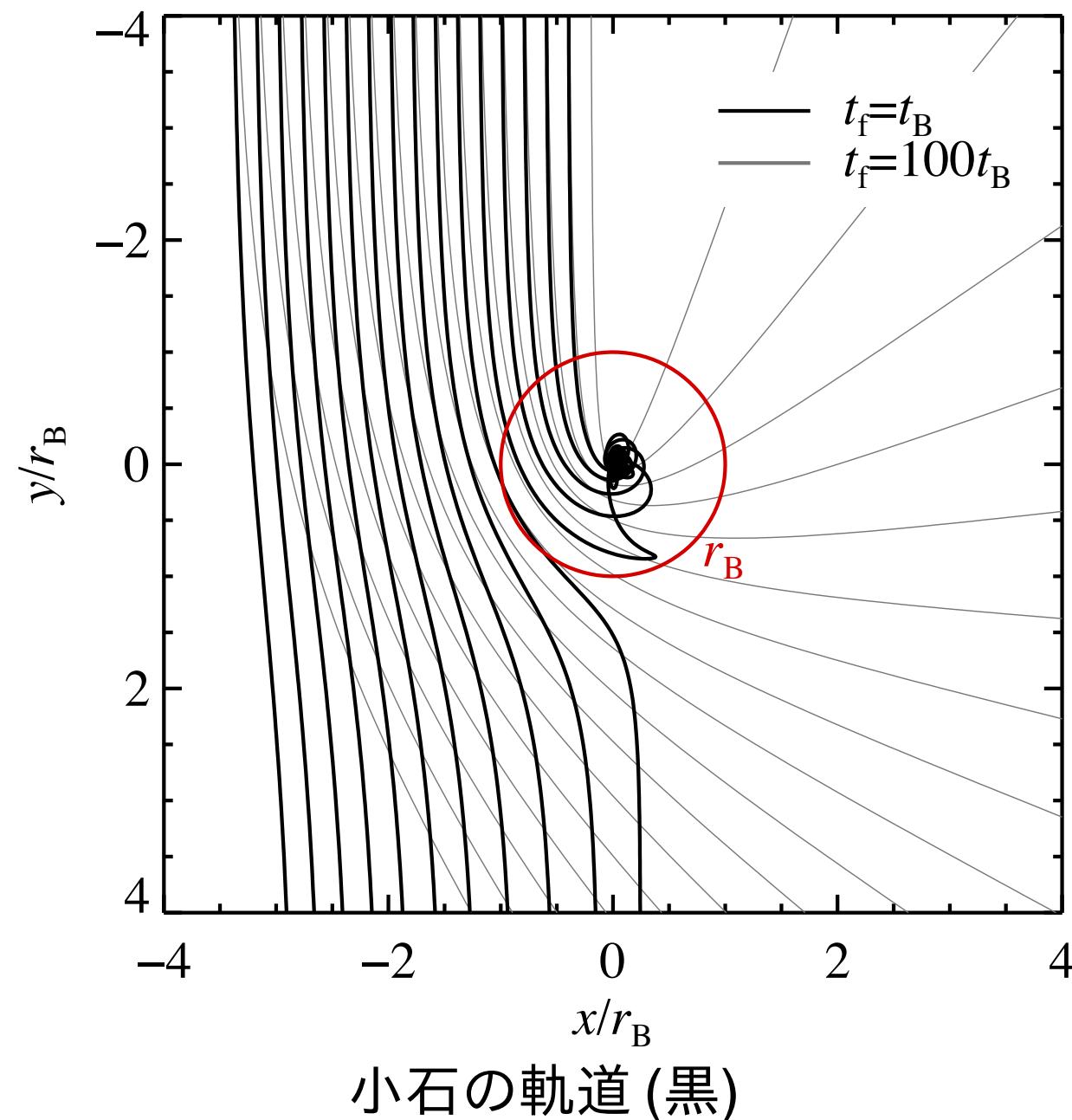
シナリオ

- ダストは小石サイズ ($\sim \text{mm-cm}$) に成長
- ストリーーミング不安定によって巨大微惑星 ($\sim 1000 \text{ km}$) が形成
- 微惑星は小石を集積して高速成長

長所

- 木星型惑星領域で固体核の形成を ~ 1000 倍加速

小石集積 (Lambrechts & Johansen 2012)



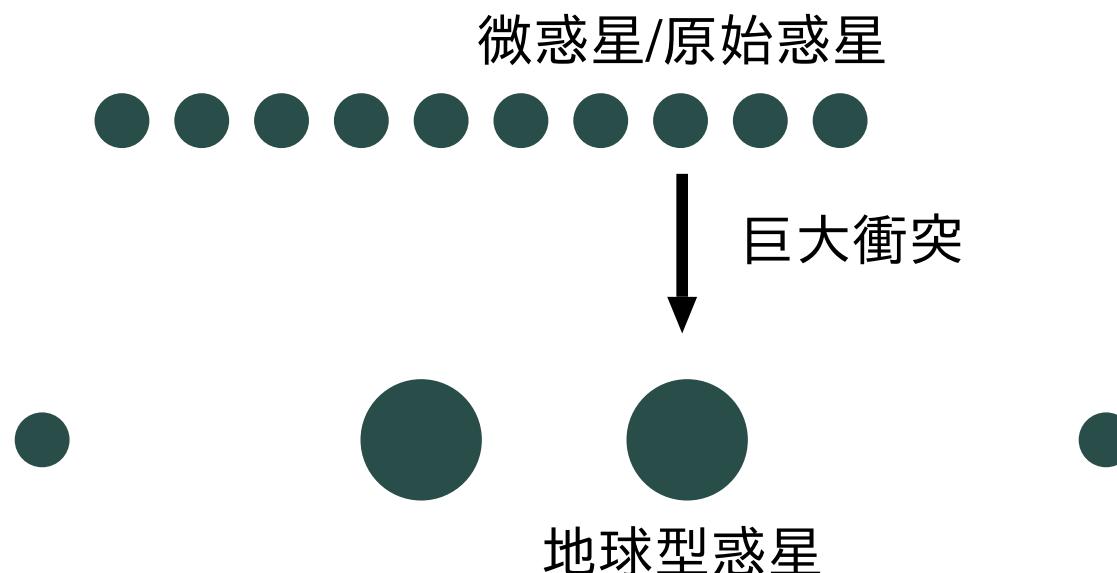
局所集積 (Hansen 2009)

動機

- 太陽系地球型惑星: $0.4 \text{ AU} \lesssim a \lesssim 1.5 \text{ AU}$
- 小さな火星

モデル

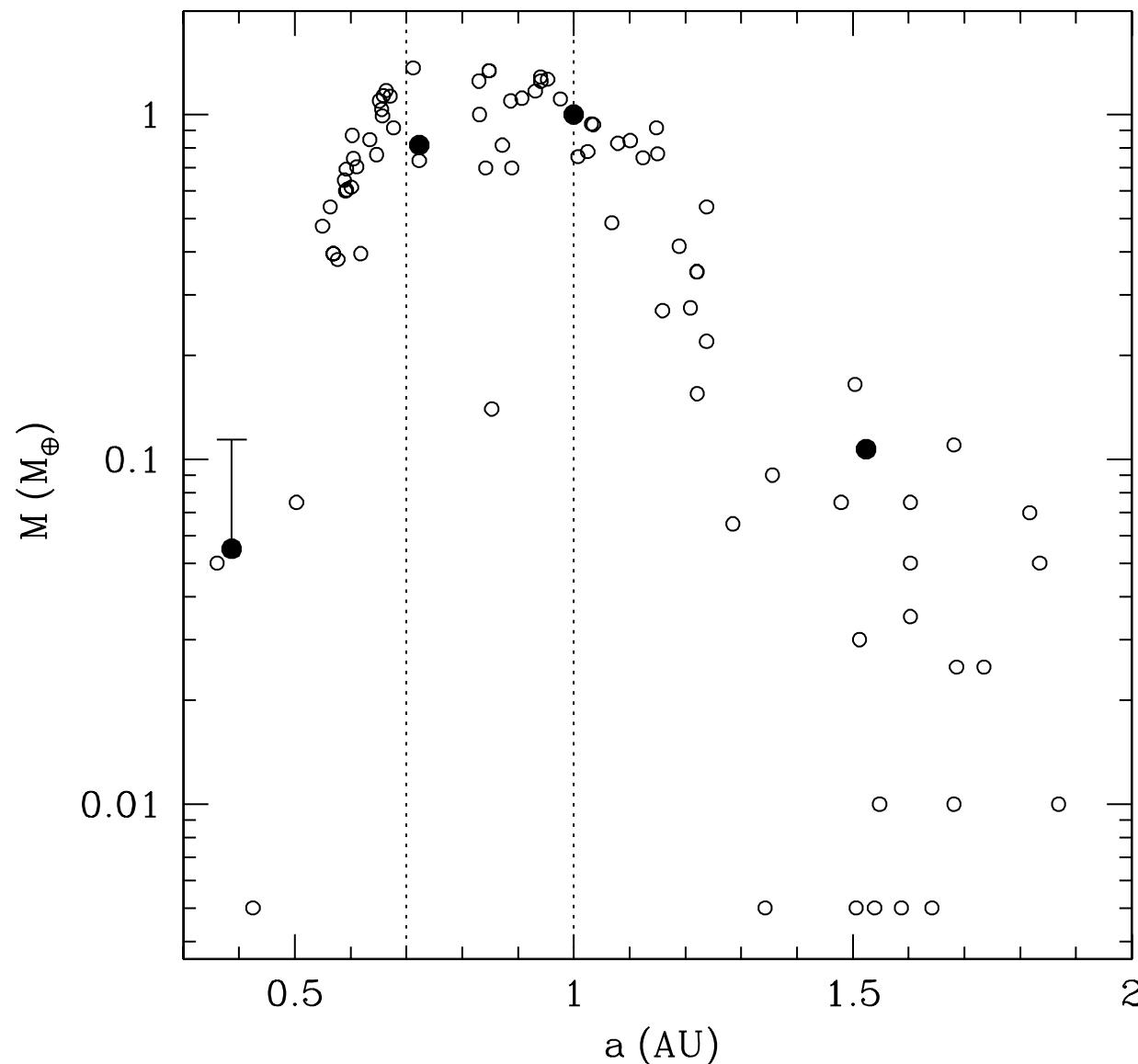
- 細い環 ($0.7 \text{ AU} \lesssim a \lesssim 1.0 \text{ AU}$) からの形成



長所

- 質量集中、質量分布を説明

局所集積(Hansen 2009)



形成された地球型惑星の特徴

円盤風とI型移動 (Ogihara+ 2017)

動機

- 近接地球型惑星の形成条件

モデル

- 円盤風によって進化するガス円盤でのI型移動と集積

長所

- I型移動を抑制もしくは反転!

大域的移動モデル

最近の形成モデル

Nice モデル

- 木星型惑星と海王星型惑星の形成と軌道進化
- コンパクトに形成して広がる(拡散する)

(Tsiganis+ 2005)

Grand Tack モデル

- 地球型惑星と小惑星帯の形成
- 木星と土星の移動によって分布を制限する

(Walsh+ 2011)

Nice モデル (Tsiganis+ 2005)

動機

- 後期重爆撃の時期の説明

シナリオ

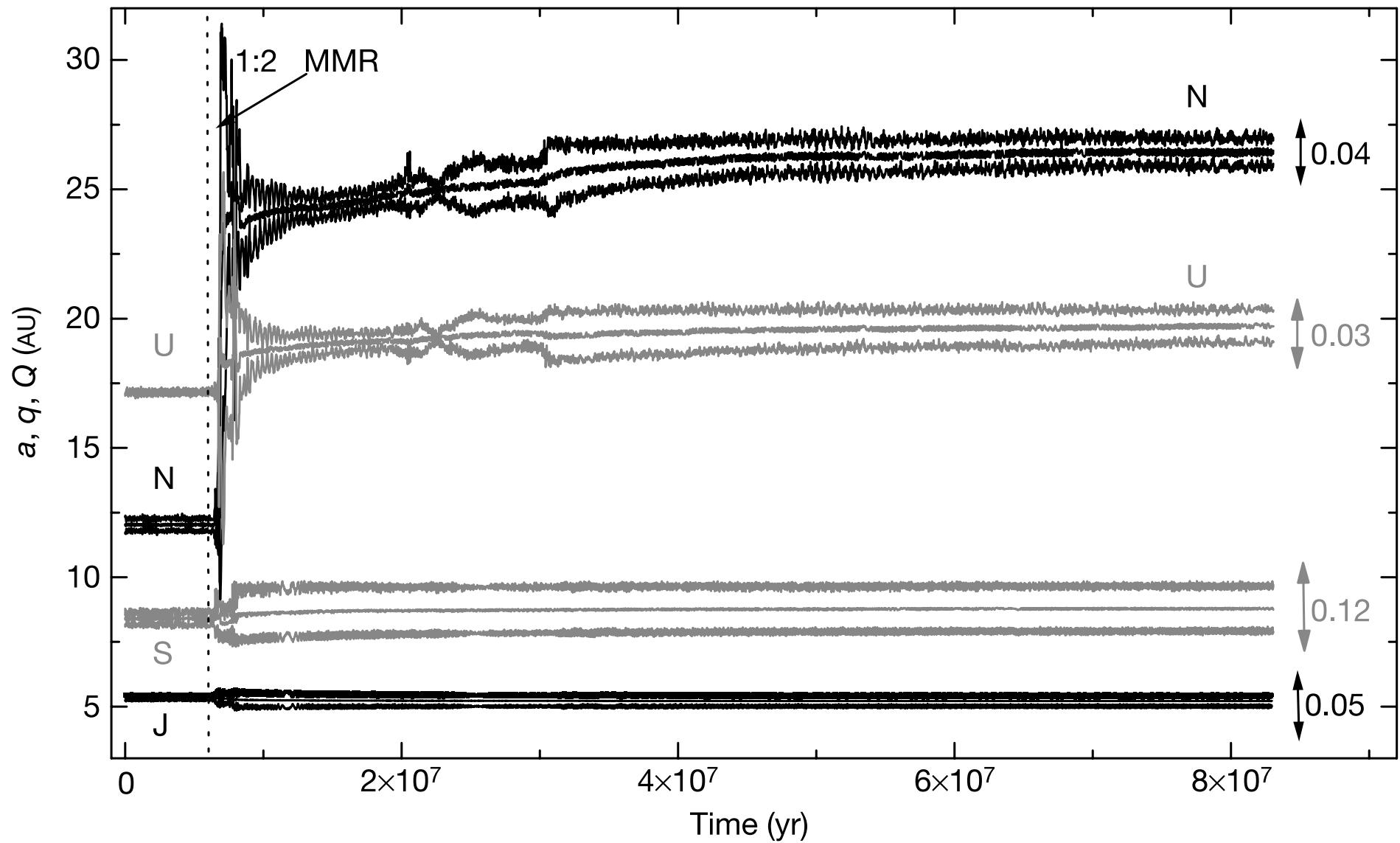
- コンパクトな巨大惑星系の形成
- 重力相互作用による惑星の軌道拡散
- 木星-土星系が平均運動共鳴通過、惑星の e, i 増加

長所

- 巨大惑星の軌道構造を説明 (Tsiganis+ 2005)
- 木星トロヤ群の捕獲を説明 (Morbidelli+ 2005)
- 不規則衛星の捕獲を説明 (Nesvorný 2007)
- 後期重爆撃を説明 (Gomes+ 2005)

注意: Nice モデルにはいくつかの派生版がある

Nice モデル (Tsiganis+ 2005)



巨大惑星の軌道進化

Grand Tack モデル (Walsh+ 2011)

動機

- 小さい火星問題

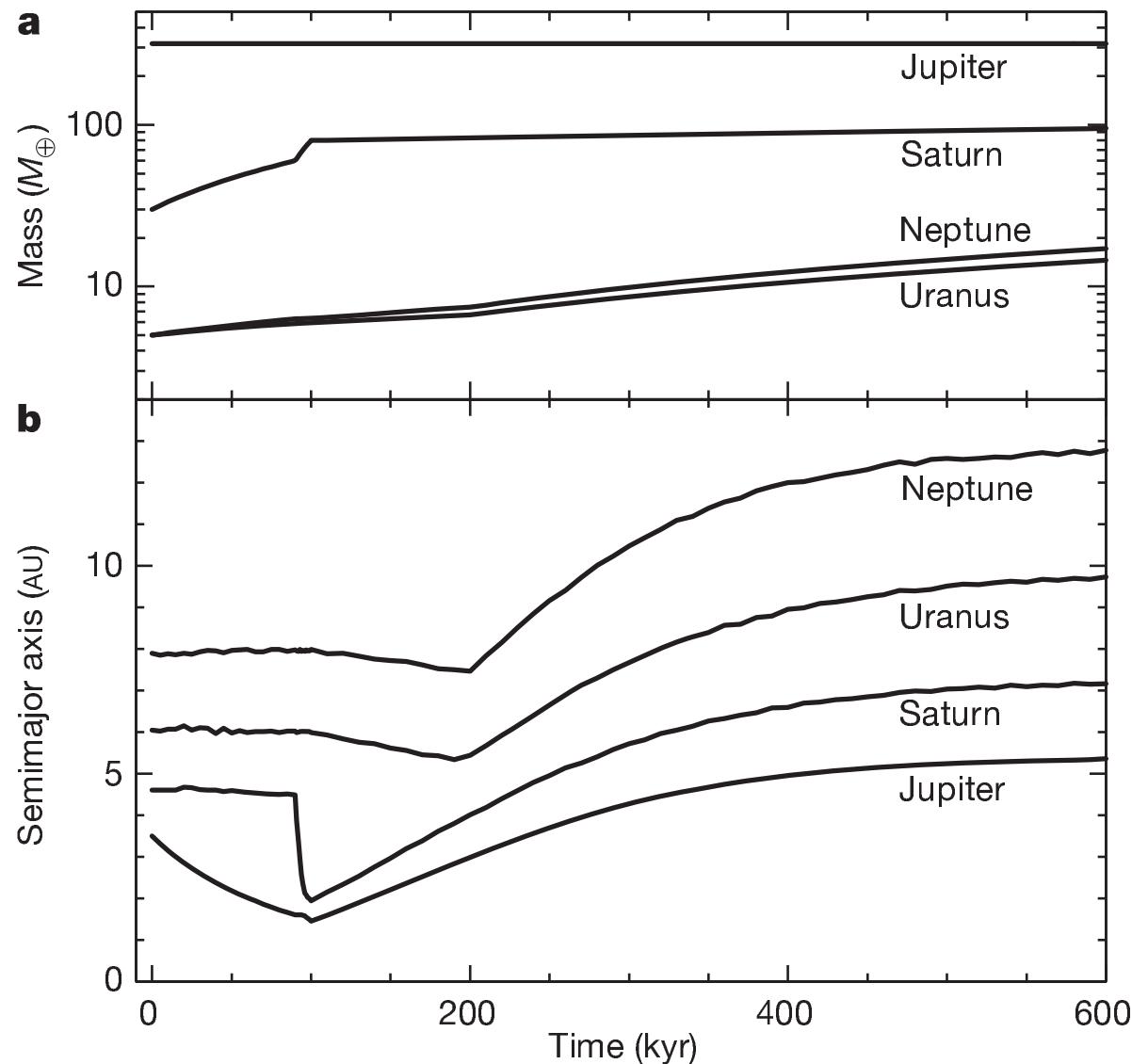
シナリオ

- 木星、土星の内側移動
- 木星による内側円盤の打ち切り (木星 1.5 au → 外縁 1 au)
- 土星が木星に追いつきギャップ重複、移動方向反転 (grand tack) (→ Nice モデル初期条件)

長所

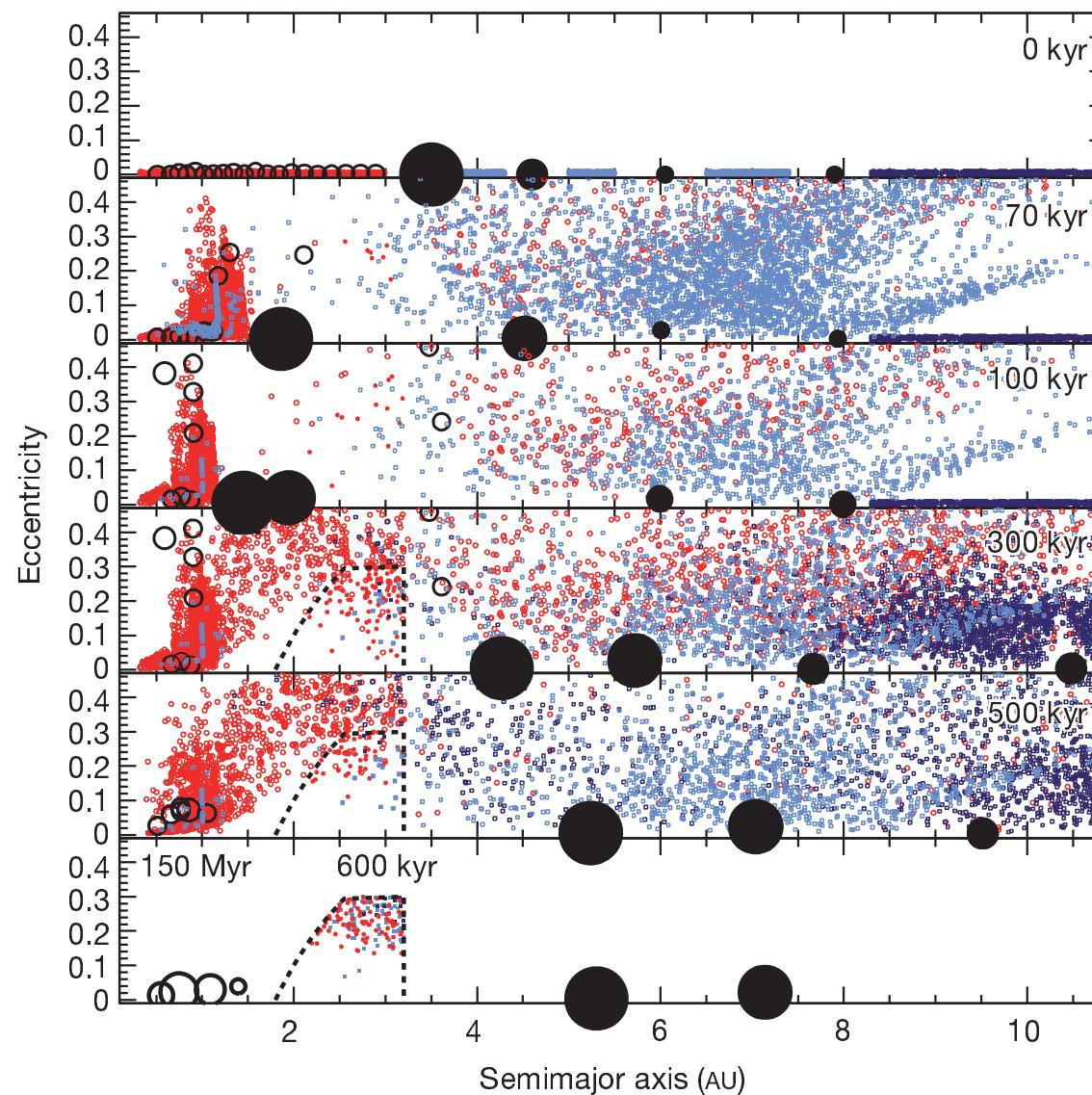
- 内側円盤の打ち切り → 小火星形成 (Hansen 2009)
- 小惑星帯の物質の枯渇と分布 (内側 S 型、外側 C 型) の説明
- 地球への水供給

Grand Tack モデル (Walsh+ 2011)



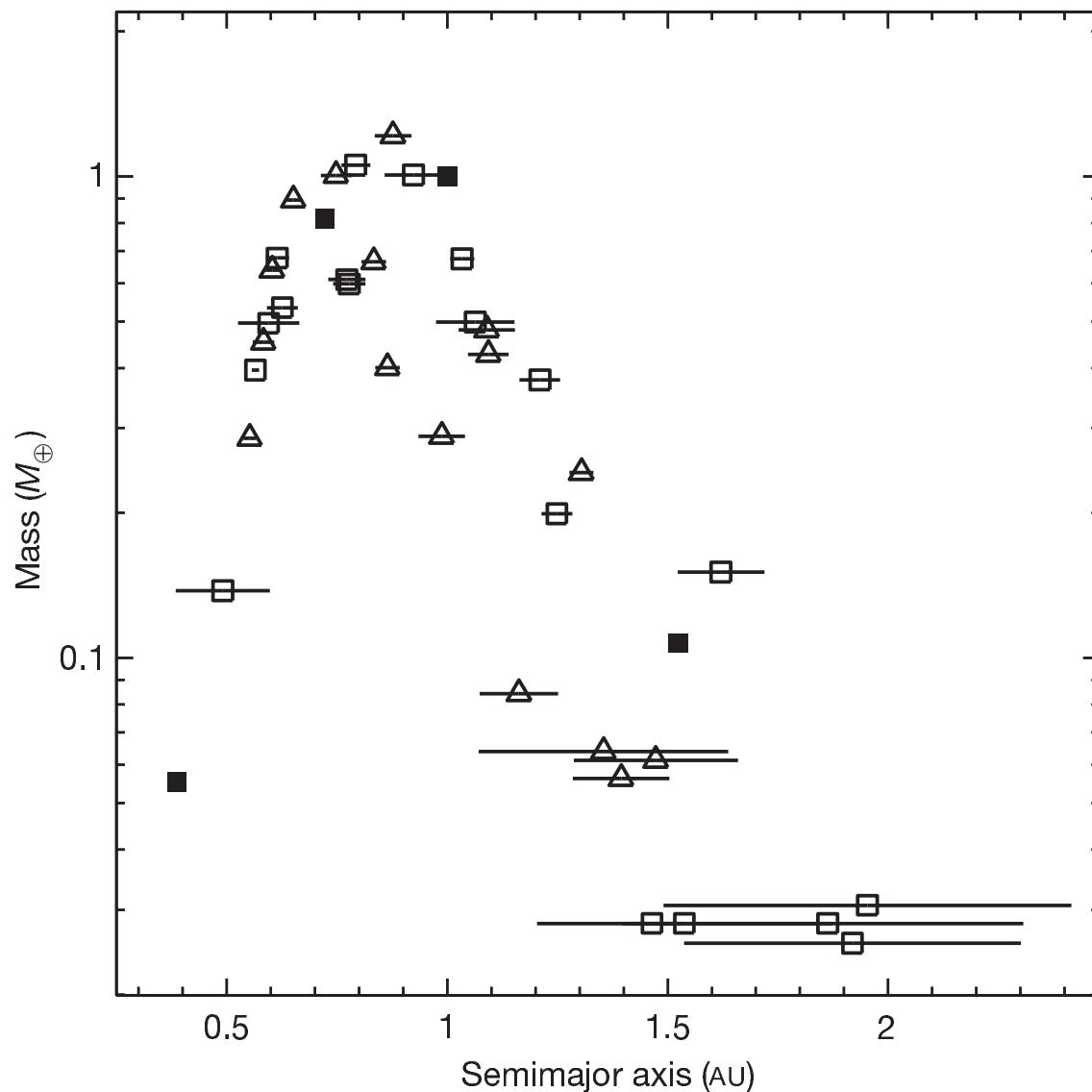
惑星成長移動モデル

Grand Tack モデル (Walsh+ 2011)



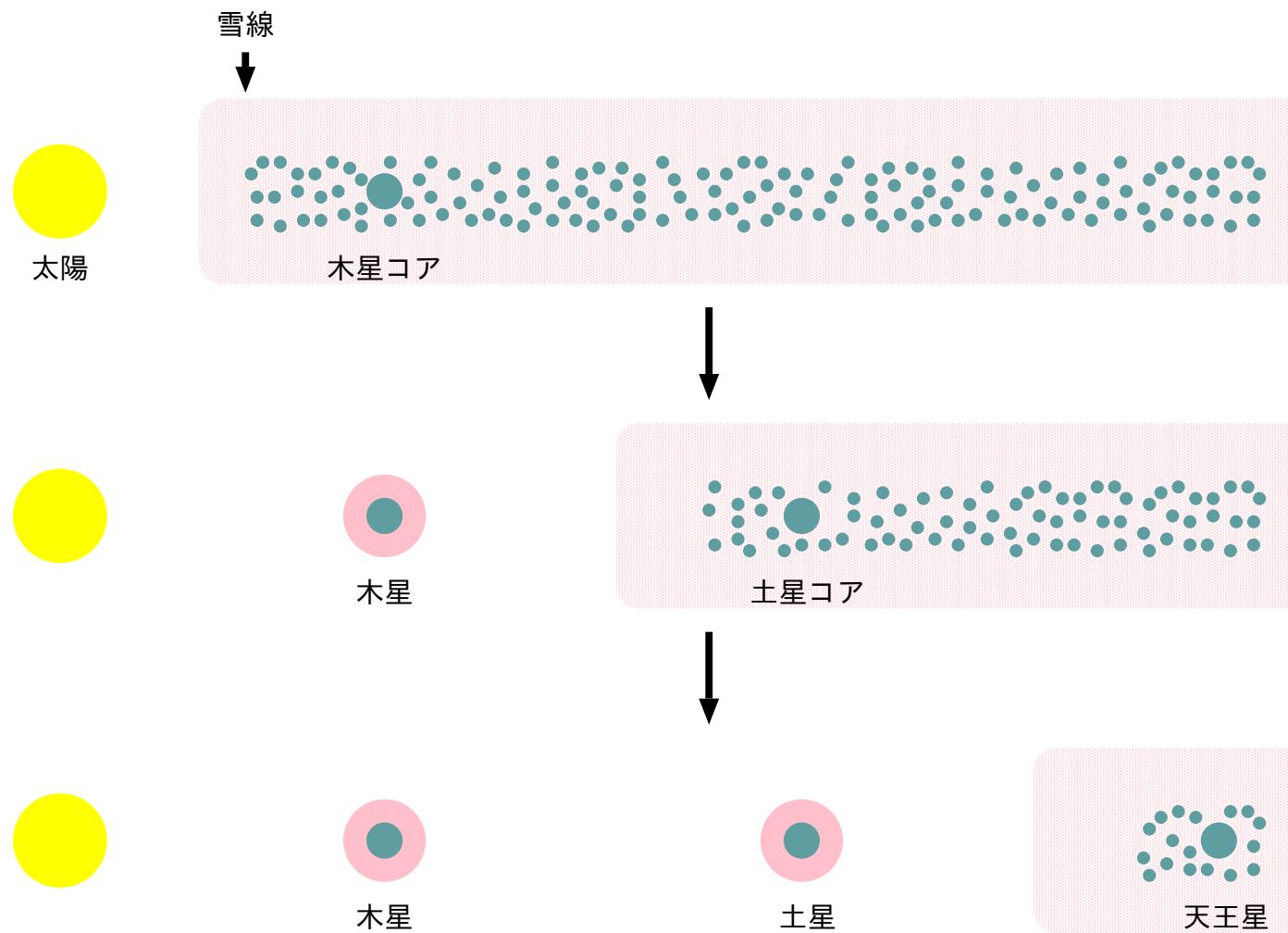
系の時間進化

Grand Tack モデル (Walsh+ 2011)



形成された地球型惑星の特徴

作業仮説:連鎖集積シナリオ



外側: 雪線 → 第1ガス惑星 → 第2ガス惑星 → 氷惑星
内側: 雪線 → 第1ガス惑星 → 地球型惑星領域外側掃除

基本問題

雪線(面密度のジャンプ)の影響

- 第1ガス惑星(木星)の形成場所はどのようにして決まるか
- 雪線: $a_{\text{snow}} \simeq 3\text{au}$, 木星軌道長半径: $a_J = 5.2\text{au}$, $a_{\text{snow}} \neq a_J$!?
- (雪線内側では集積が阻害されるか)

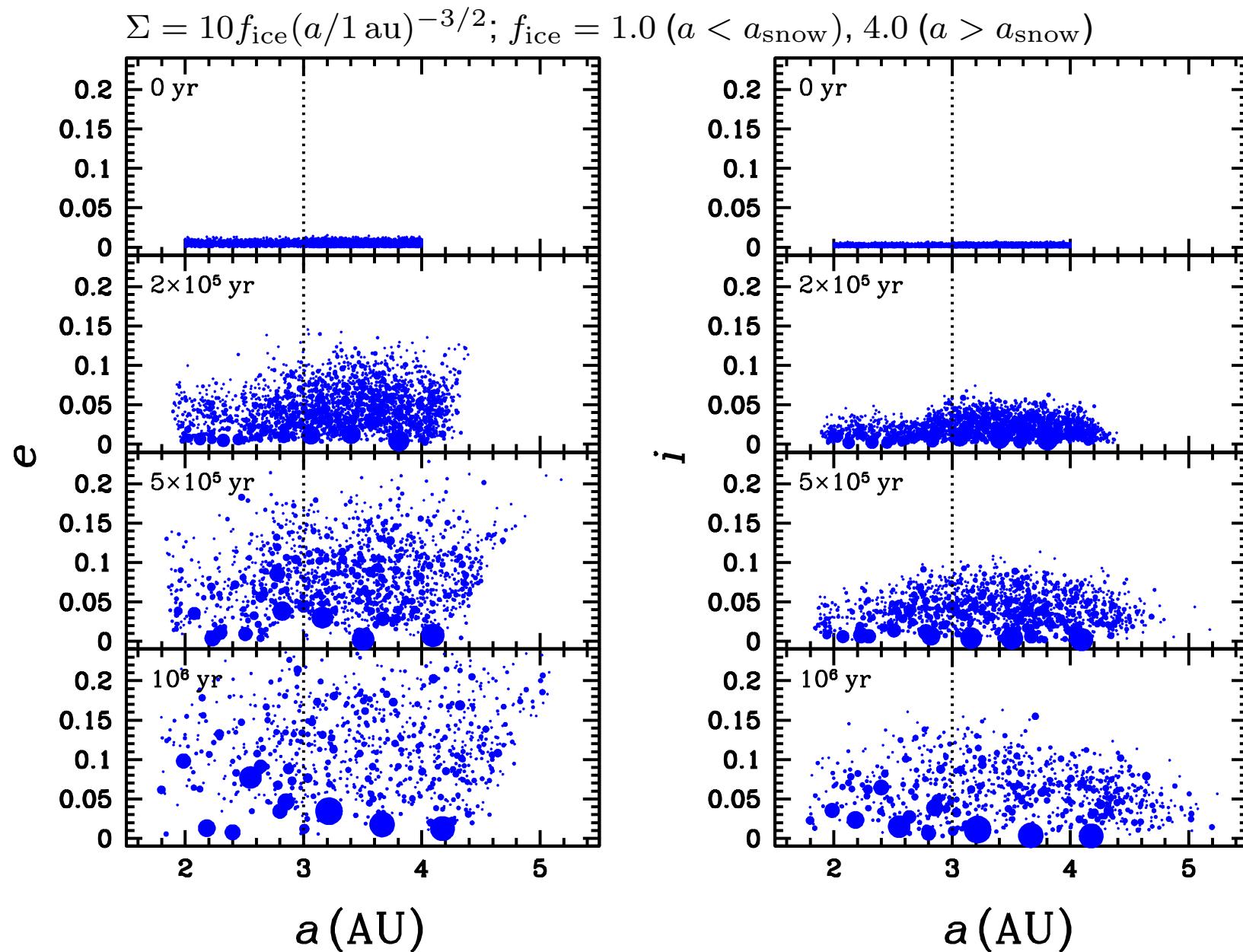
素過程: 面密度差のある微惑星系の緩和・集積過程

第1ガス惑星の影響

- 第2ガス惑星(土星)の形成場所はどのようにして決まるか
- 集積の加速は可能か
- (惑星内側を掃除するか)

素過程: (成長する)巨大惑星のある微惑星系の緩和・集積過程

雪線を含む領域での原始惑星集積



まとめ

標準形成シナリオ – 連続円盤でのその場形成

- 最小質量(復元)円盤
- 形成過程: ダスト → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星
- 形成時間: $\sim 10^7\text{-}10^9$ 年
- 雪線, 原始惑星質量・形成時間, ガス円盤寿命 → 惑星種

課題 – 素過程の再検討

- 初期円盤の構造と進化?
- 微惑星の正体?
- 原始惑星・惑星と(ガス, 微惑星, 小石/破片)円盤の相互作用?

まとめ

標準形成シナリオ – 連続円盤でのその場形成

- 最小質量(復元)円盤
- 形成過程: ダスト → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星
- 形成時間: $\sim 10^7\text{-}10^9$ 年
- 雪線, 原始惑星質量・形成時間, ガス円盤寿命 → 惑星種

課題 – 素過程の再検討

- 初期円盤の構造と進化?
- 微惑星の正体?
- 原始惑星・惑星と(ガス, 微惑星, 小石/破片)円盤の相互作用?

太陽系形成シナリオの現状

- 小石 vs. ふわふわ vs. 古典微惑星
- 大域的移動モデルの台頭
- 混沌!?