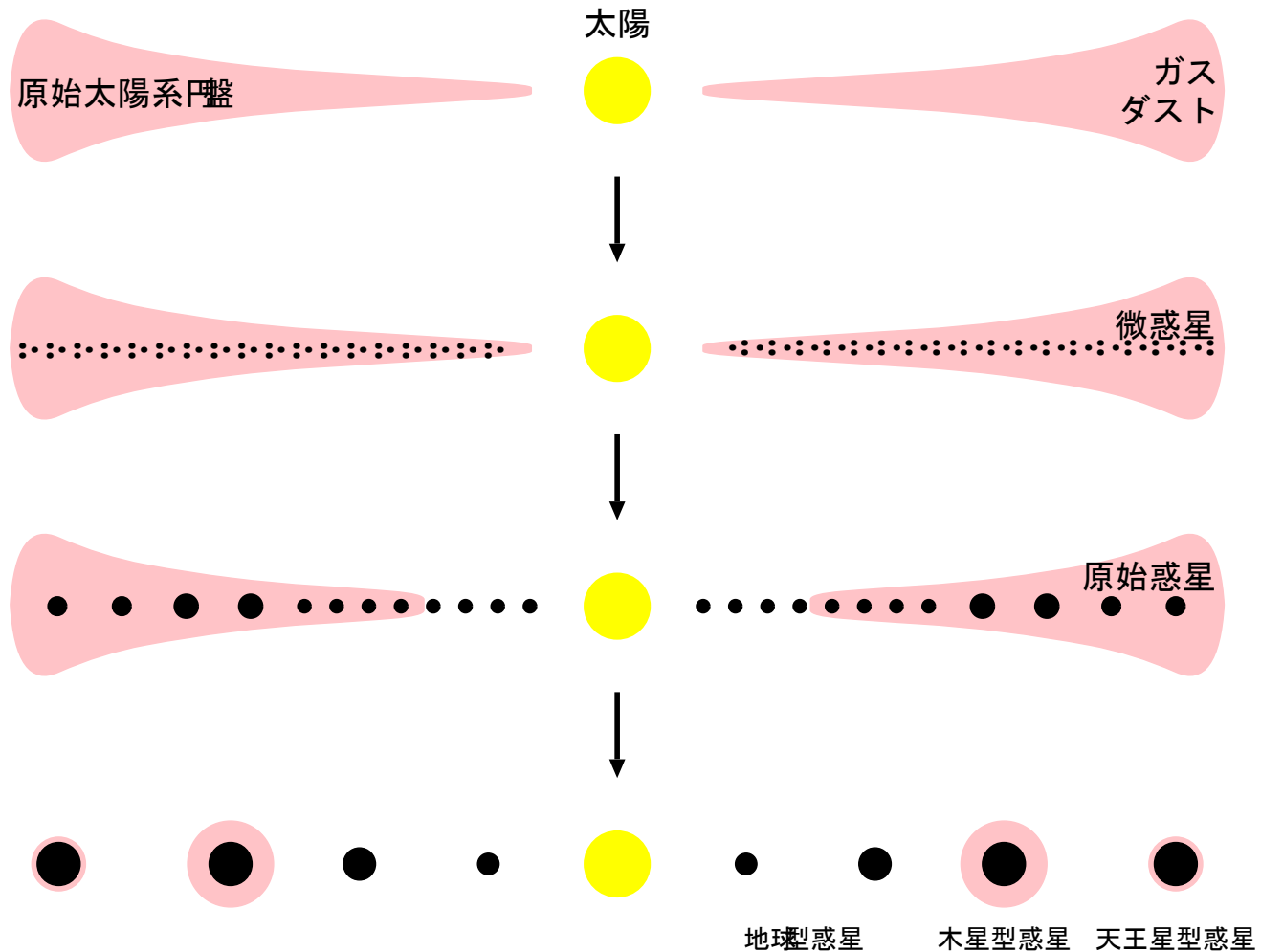


# 惑星系の起源 - 京都モデルとその後



小久保英一郎 (国立天文台)

# 履歴書

## 入門

1992: 東京大学教養学部宇宙地球科学教室杉本研究室

## 家系図

- 林 — 杉本 — 小久保 (専用計算機,  $N$ 体シミュレーション)
- 林 — 中澤 — 井田 — 小久保 (惑星系形成論)

# 目次

太陽系

京都モデル

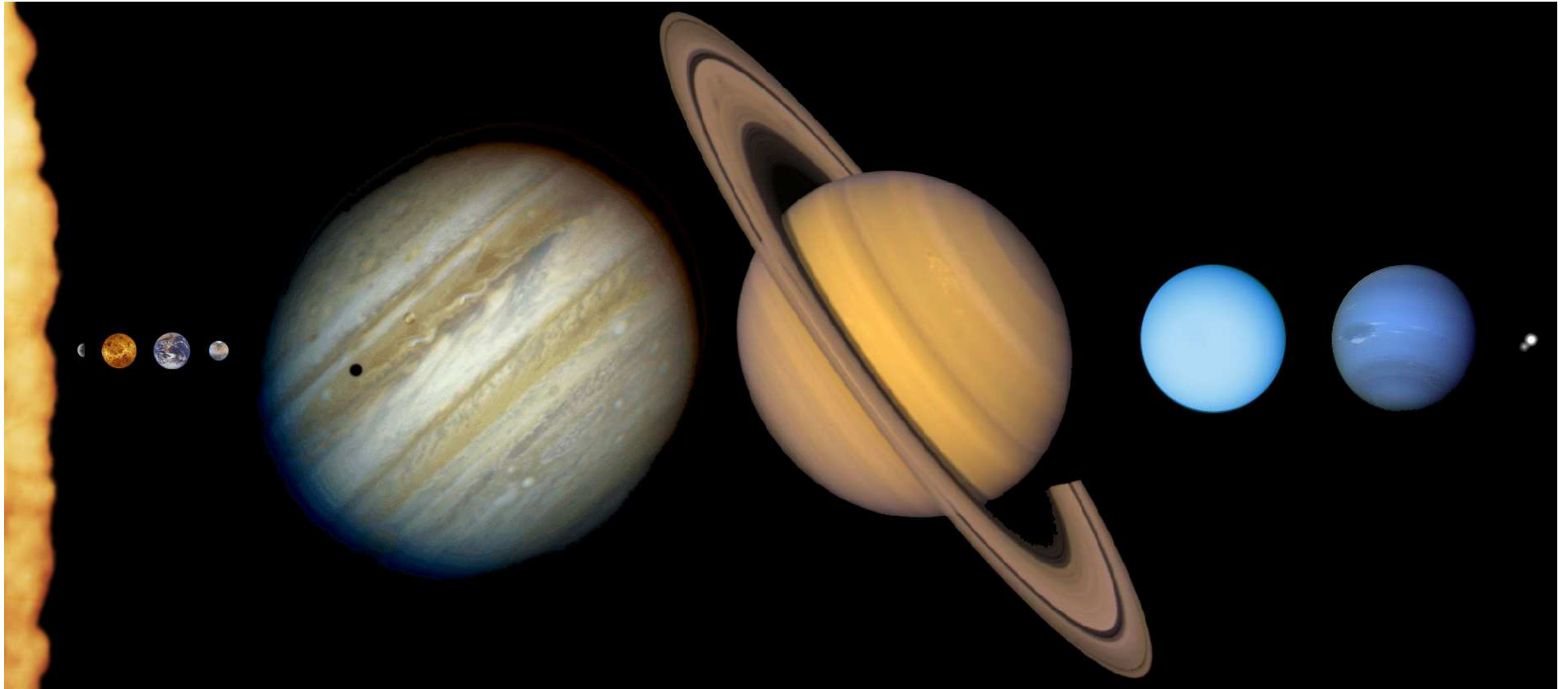
系外惑星系

太陽系形成論からその先へ

参考:

- 林先生との対話 (2004, 2007, 2009)
- 自叙伝

# 太陽系の惑星



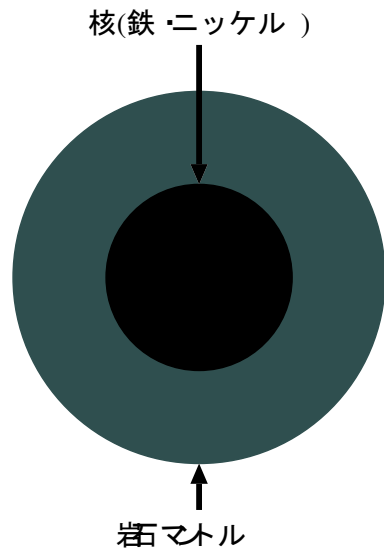
地球型惑星

木星型惑星

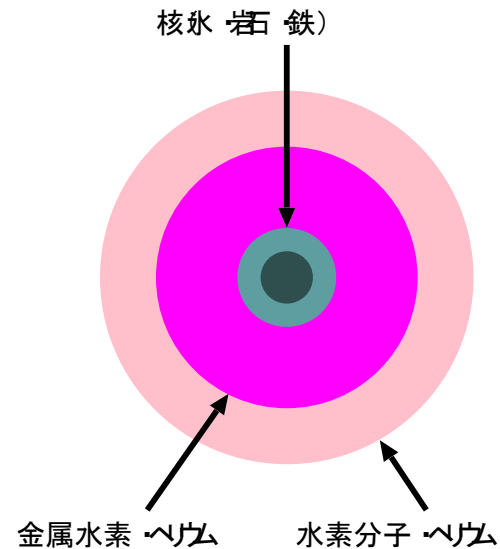
天王星型惑星

# 惑星の分類

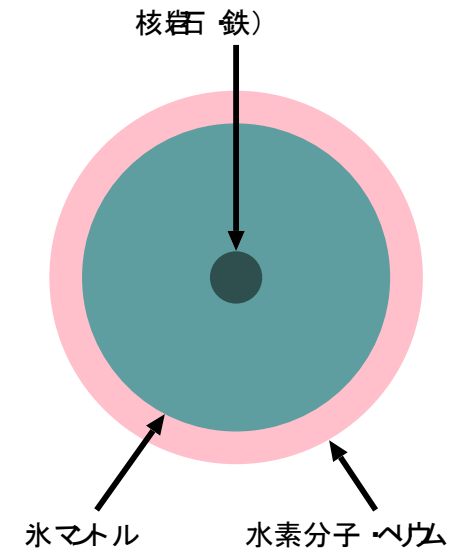
種類	地球型	木星型	天王星型
別名	岩石惑星	ガス惑星	氷惑星
存在範囲 (AU)	0.4-1.5	5-10	20-30
質量 ( $M_{\oplus}$ )	~ 0.1-1	~ 100	~ 10
主成分	岩石・鉄	ガス ( $H_2$ , He)	氷 ( $H_2O$ , $CH_4$ , $NH_3$ )



地球型惑星



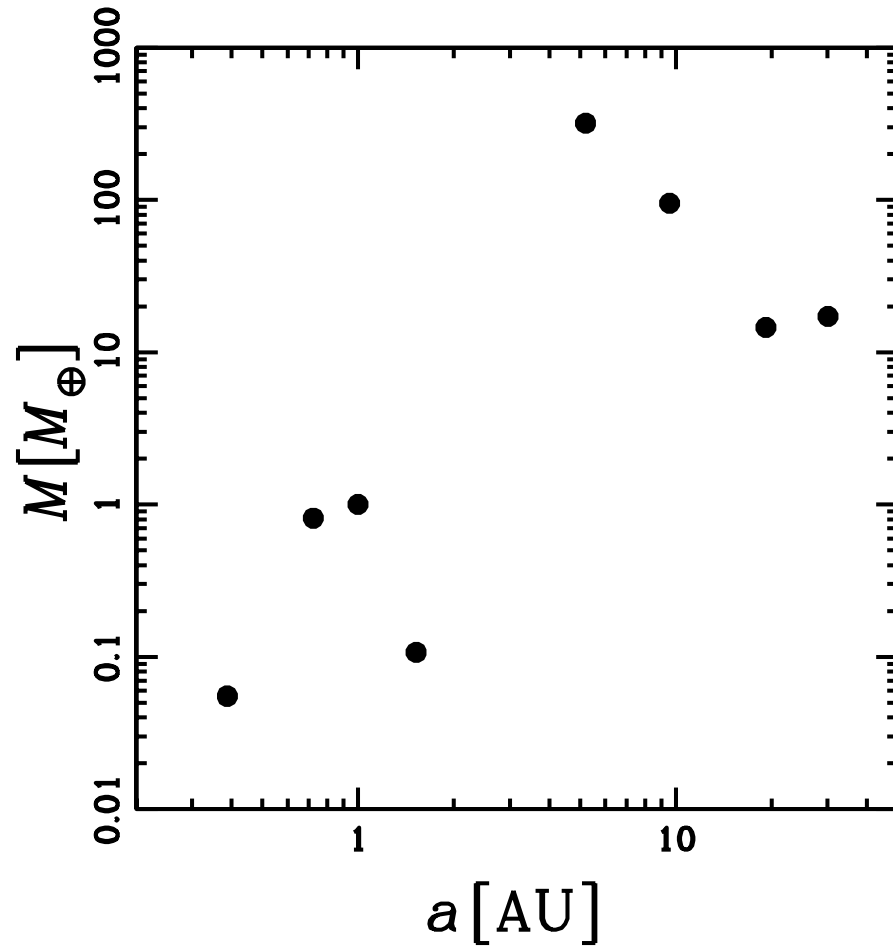
木星型惑星



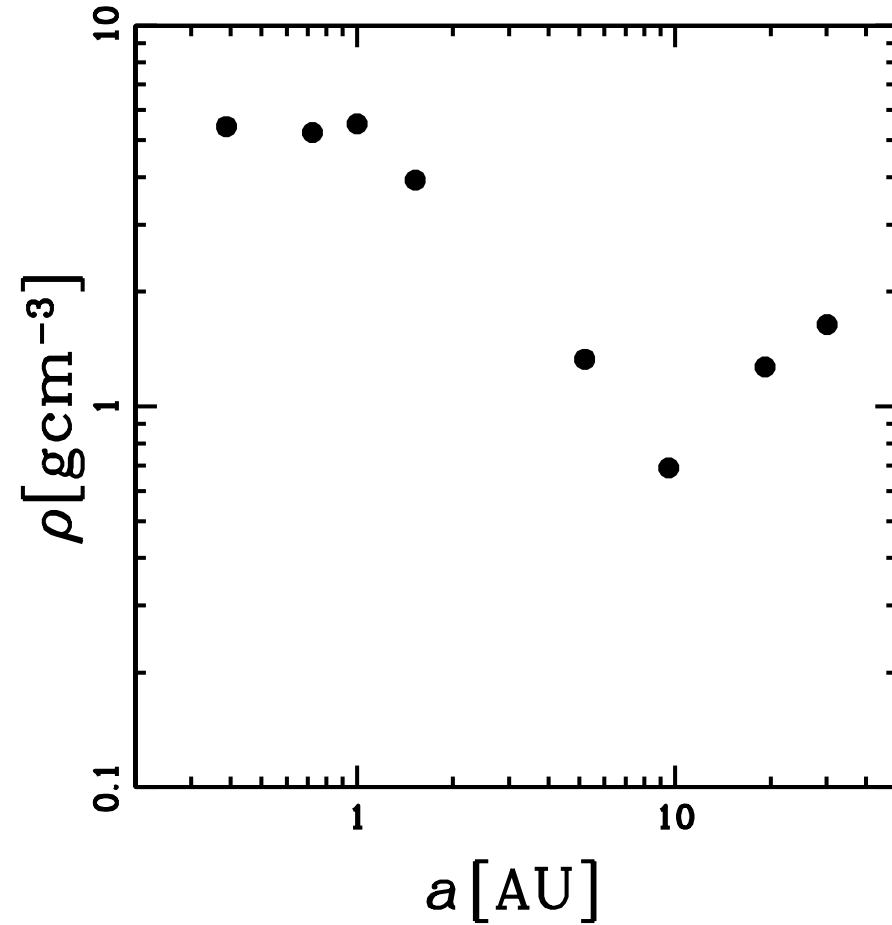
天王星型惑星

# 惑星の特徴：質量と密度

軌道長半径-質量

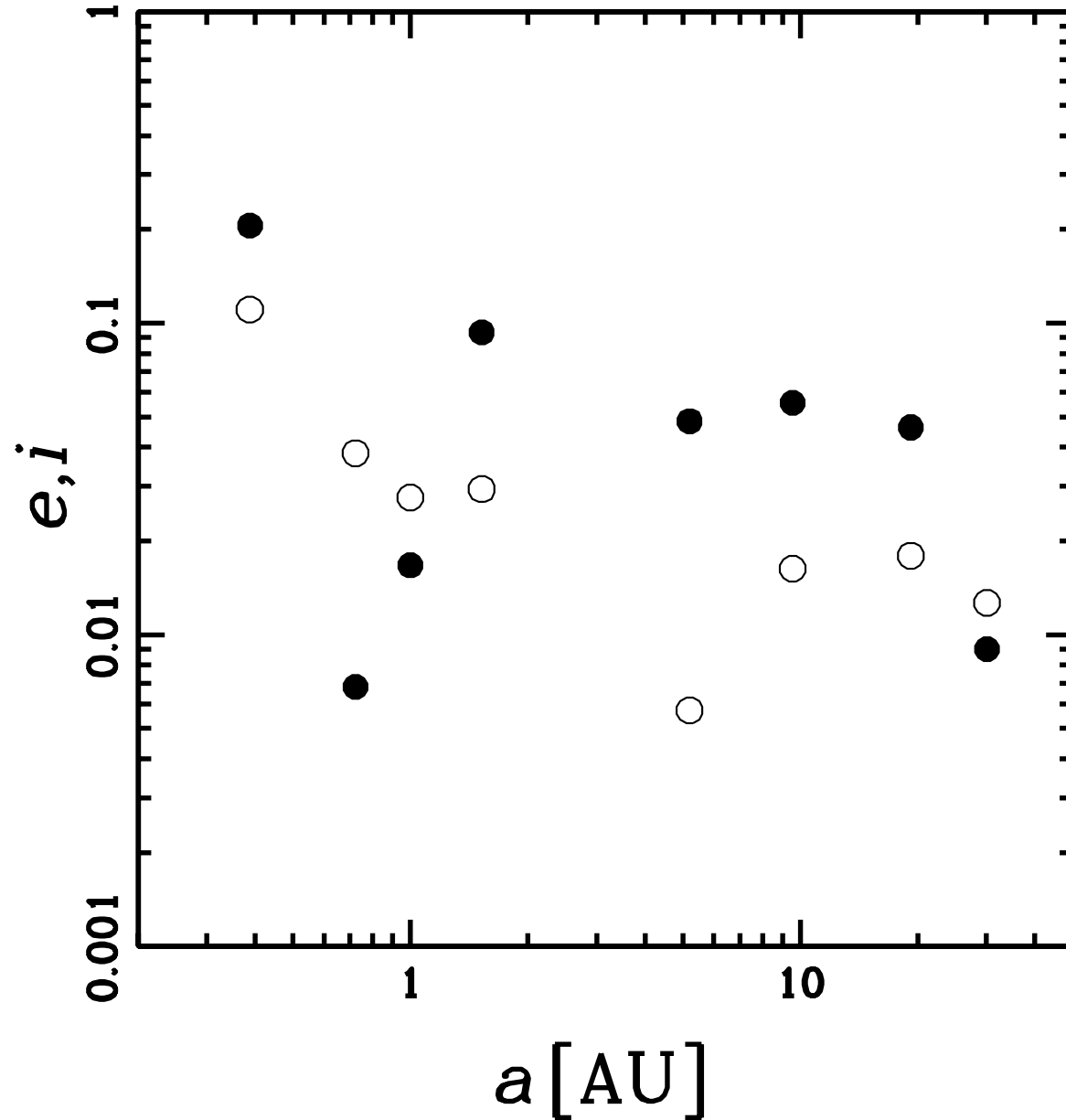


軌道長半径-密度



# 惑星の特徴：軌道要素

軌道長半径-軌道離心率 (●), 軌道傾斜角 (○)



# 太陽系の概要

## 大きさと惑星数

- 惑星領域  $\lesssim 30$  AU
- 8 個の惑星 (+ 無数の小天体)

## 質量と角運動量

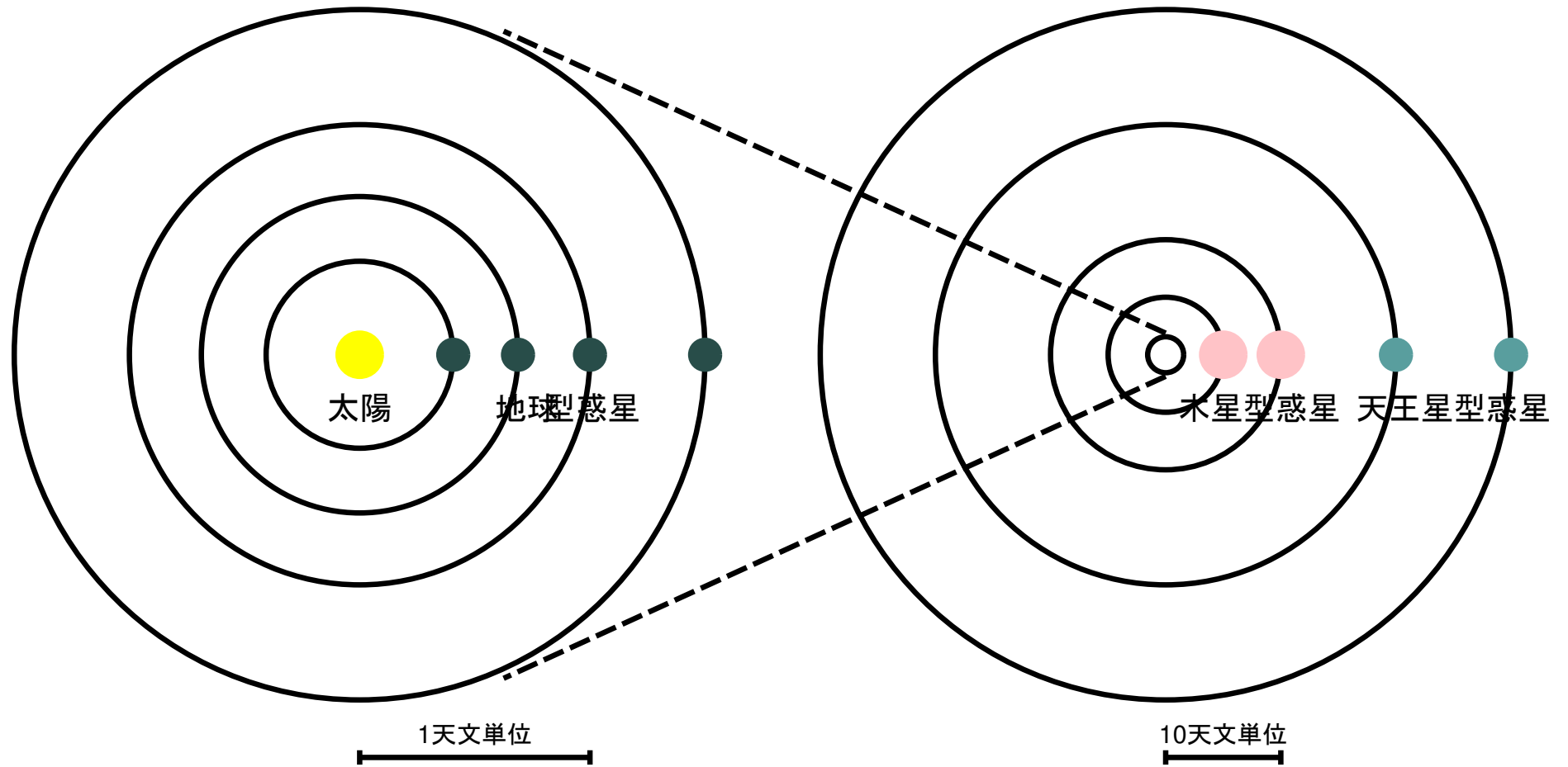
- 惑星の質量  $\simeq 10^{-3} M_{\odot}$
- 惑星の軌道角運動量  $\simeq 190$  太陽自転角運動量

## 惑星

- 組成: 岩石 (地球型), ガス (木星型), 氷 (天王星型)
- 軌道: ほぼ同一平面で円軌道



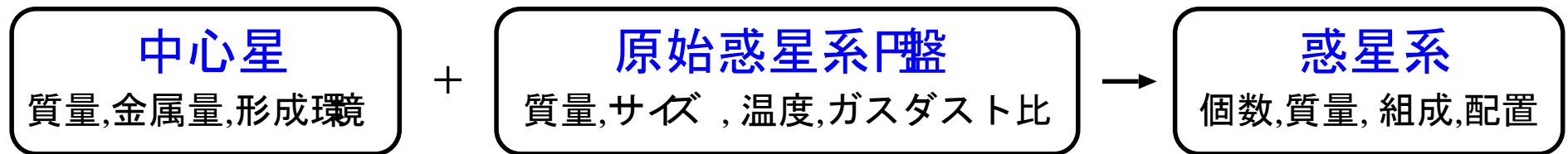
# 太陽系の構造



# 惑星系形成論

## 目標

原始惑星系円盤から惑星系までの形成理論を構築する



- 太陽系の起源
- 系外惑星系の起源
- 第2の地球の存在可能性

# 「太陽系の起源」研究の始まり

## 開始年

- 1969 年

## 開始理由

太陽系の研究に踏み切った理由は、

- 原始太陽の光度や表面温度の時間変化が「林フェーズ」の研究によってほぼ明らかかになったこと、
- また 1960 年代からの電波・赤外線・X線などによる HI 雲・分子雲などの観測によって、星雲に含まれるダストの量や大きさなどがわかるとともに、
- 人工衛星による重力場の精密測定によって木星がダスト成分のコア (質量は地球の約 10 倍の程度) を持っていることが明らかになったこと

などである。昔の起源論とは違って、具体的な知識を基にした実証的な研究が初めて可能になったと判断したのである (林 2009)。

# 「太陽系の起源」問題とは？

## 「進化」とは？

一般に進化ということは、比較的簡単な形態をもった多体集団の系が、非可逆過程を通じて、複雑かつ異質的な形態に移行することである。

## 「太陽系の進化」とは？

太陽系の場合、単純な初期形態は希薄な星間ガスの雲である。この巨大な原子集団の進化は、個々の原子・分子・光子などの相互作用に関する微視的な法則と、重力が主役である巨視的な運動法則の両者によって規定されていて、その一方を簡単に無視することはできない。

林 (1978)

# 太陽系の起源のモデル

## 20世紀以前

- Kant (1755), Laplace (1796): 星雲説

## 20世紀以降

- Safronov (1969)
- Cameron (1978)
- Hayashi et al. (1985)

モデル	円盤質量 ( $M_{\odot}$ )	惑星構成要素	固体惑星集積環境	別名
Cameron	$\simeq 1$	原始ガス惑星	-	円盤不安定
Safronov	$\simeq 0.01$	微惑星	ガスなし	-
京都	$\simeq 0.01$	微惑星	ガス中	核集積

# 林先生と Safronov 博士



林忠四郎の自叙伝 (2009)

# 京都モデルの基本概念

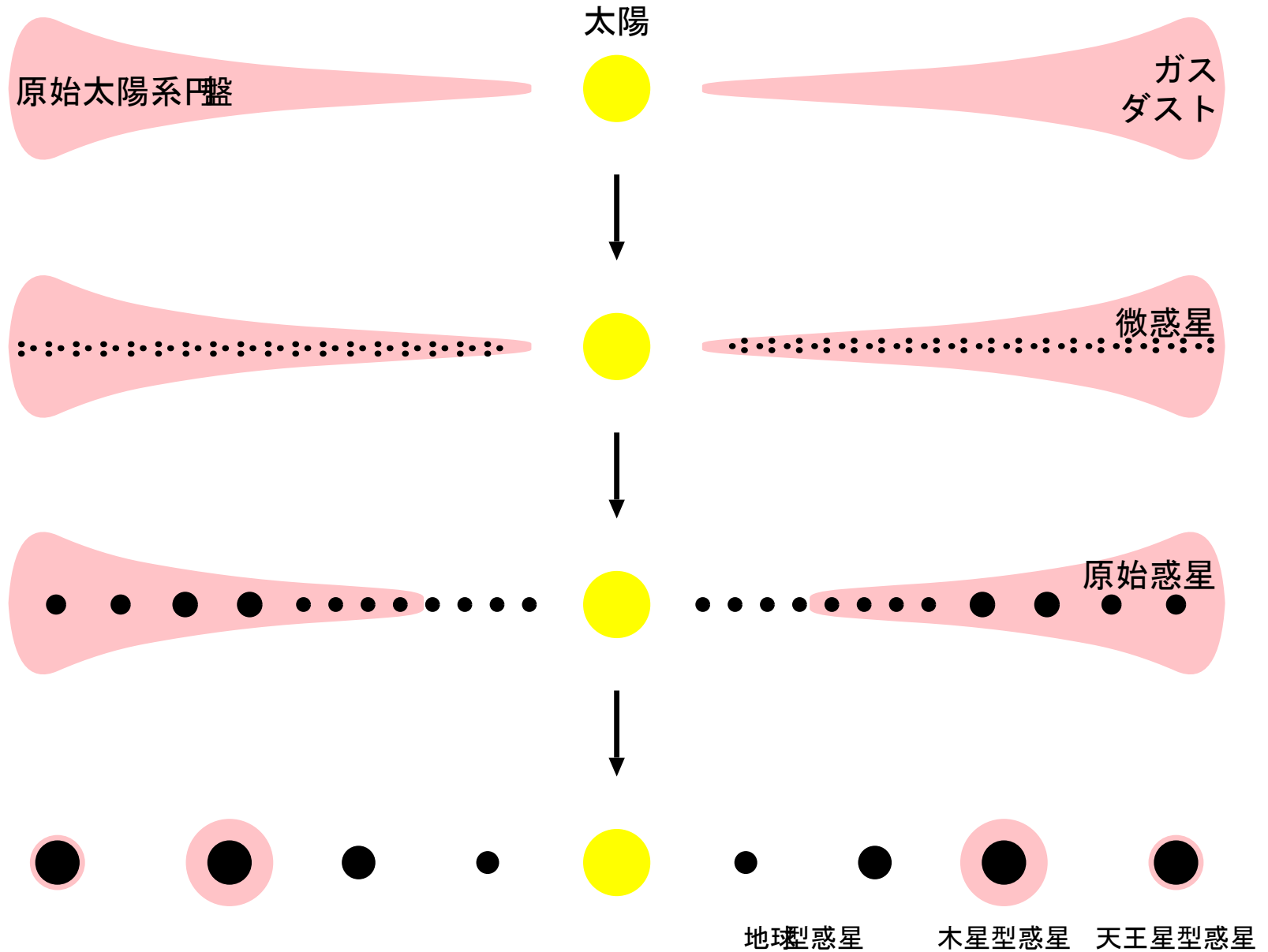
## 円盤仮説

- 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)。

# 太陽系形成標準シナリオ





# 京都モデルの主要論文

## 原始太陽系円盤

- Kusaka et al. (1970)[87] ★: 光学的に厚い円盤 (日下モデル)
- Hayashi (1981)[430] ★: 最小質量円盤モデル (林モデル)

## 微惑星形成

- Hayashi (1972): ダスト層の重力不安定による微惑星形成

## 微惑星の運動と集積

- Hayashi (1976): Hill 方程式
- Adachi et al. (1976)[186] ★: ガス抵抗による微惑星の軌道進化
- Nakagawa et al. (1983)[89] ★: ガス中での微惑星成長

## ガス惑星形成

- Mizuno et al. (1978)[53]: ガス降着の臨界コア質量

## 京都モデル概説

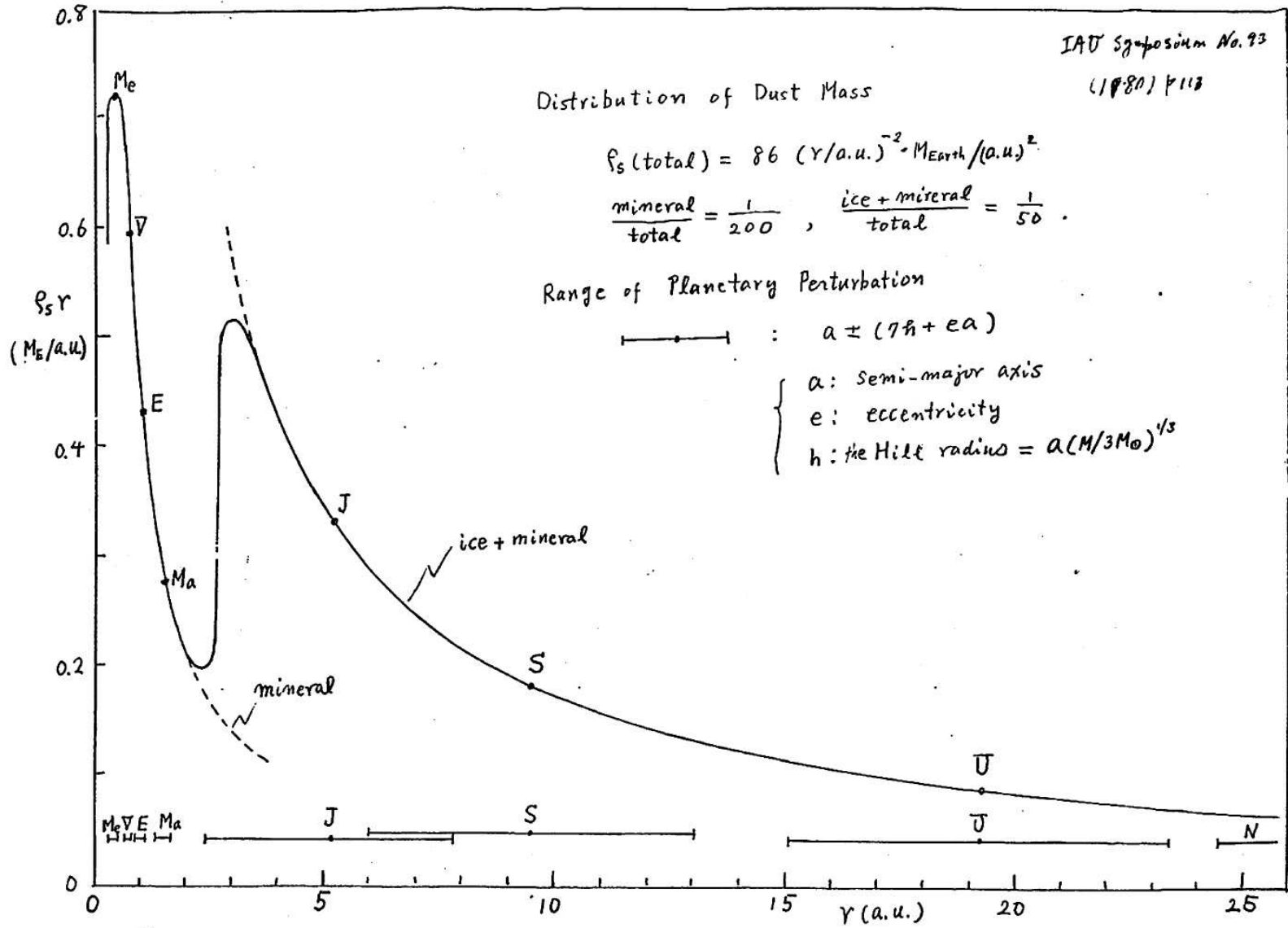
- Hayashi et al. (1985)[257] ★

# 京都モデルの研究者たち



星形成・太陽系の起源~ 京都モデル、その後の展開と将来展望~ (2004)

# 最初の林モデル



Hayashi (1980)

# 最小質量円盤モデルの構成方法

## 構成原理

- 最小移動 (その場形成)

$$\Sigma_{n,\text{solid}} \simeq M_{n,\text{solid}} / \pi (a_{n+1} a_n - a_n a_{n-1})$$

- ガス惑星と氷惑星のコア質量は  $15M_{\oplus}$  (コア集積モデル)

$$M_{n,\text{solid}} = 15M_{\oplus} \quad (n = 5-8)$$

- 1.55–7AU のダストは木星コアへ集積 (小惑星帯も連続分布)

$$(a_5 a_4)^{1/2} = 1.55 \text{AU}$$

- 太陽組成

Hayashi (1981)

# 最小質量円盤モデル

## 面密度分布

$$\Sigma_{\text{dust}} \simeq \begin{cases} 7.1 \left(\frac{a}{1\text{AU}}\right)^{-3/2} \text{gcm}^{-2} & [a < a_{\text{snow}}] \\ 2.7 \left(\frac{a}{5\text{AU}}\right)^{-3/2} \text{gcm}^{-2} & [a > a_{\text{snow}}] \end{cases}$$
$$\Sigma_{\text{gas}} \simeq 1.7 \times 10^3 \left(\frac{a}{1\text{AU}}\right)^{-3/2} \text{gcm}^{-2}$$

## 雪線

$$a_{\text{snow}} = 2.7\text{AU}$$

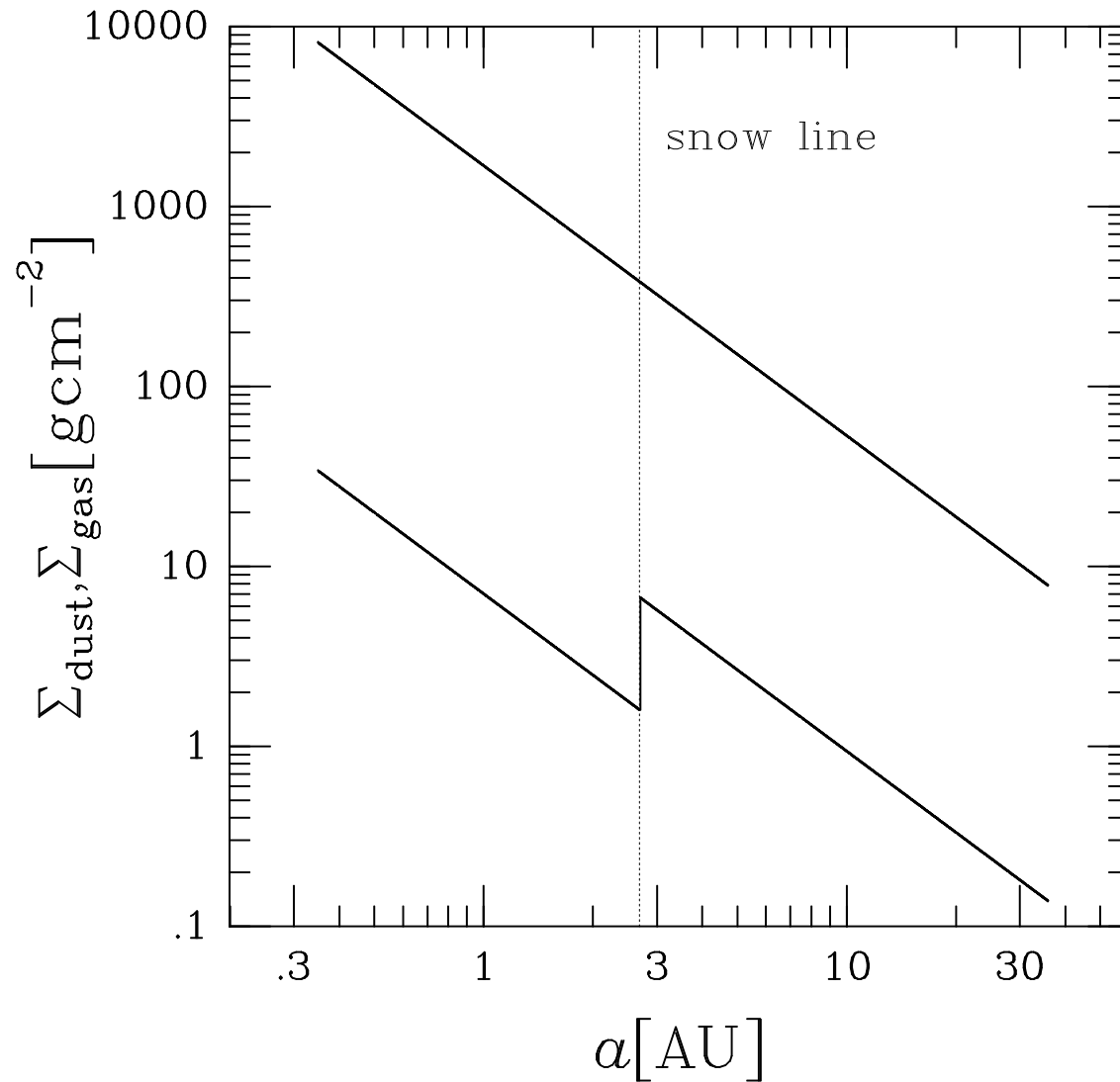
## サイズ

$$0.35\text{AU} \leq a \leq 36\text{AU}$$

## 質量

$$M_{\text{disk}} = 0.013M_{\odot}$$

# 最小質量円盤モデル



物理的に意味のある初期条件を提示!

Hayashi (1981)

# Hill 方程式

## Hill 座標系

局所回転直交座標系

## Hill 方程式

$$\ddot{x}_i - 2\Omega_0 \dot{y}_i = 3\Omega_0^2 x_i + \frac{Gm_j(x_j - x_i)}{r_{ij}^3}$$

$$\ddot{y}_i + 2\Omega_0 \dot{x}_i = \frac{Gm_j(y_j - y_i)}{r_{ij}^3}$$

$$\ddot{z}_i = -\Omega_0^2 z_i + \frac{Gm_j(z_j - z_i)}{r_{ij}^3}$$

## Hill 半径

$$r_H = \left( \frac{m_1 + m_2}{3M_\odot} \right)^{1/3} a$$

## 特徴

- Hill スケーリング ( $r_H, \Omega_0^{-1}$ )
- 重力相互作用がないときに解析解が存在

# 京都モデルの進展

## より現実的な系へ

- 自由空間 → 外場
- 一様空間 → 非一様空間
- 1次元 → 3次元
- 線形 → 非線形

## 新たな展開

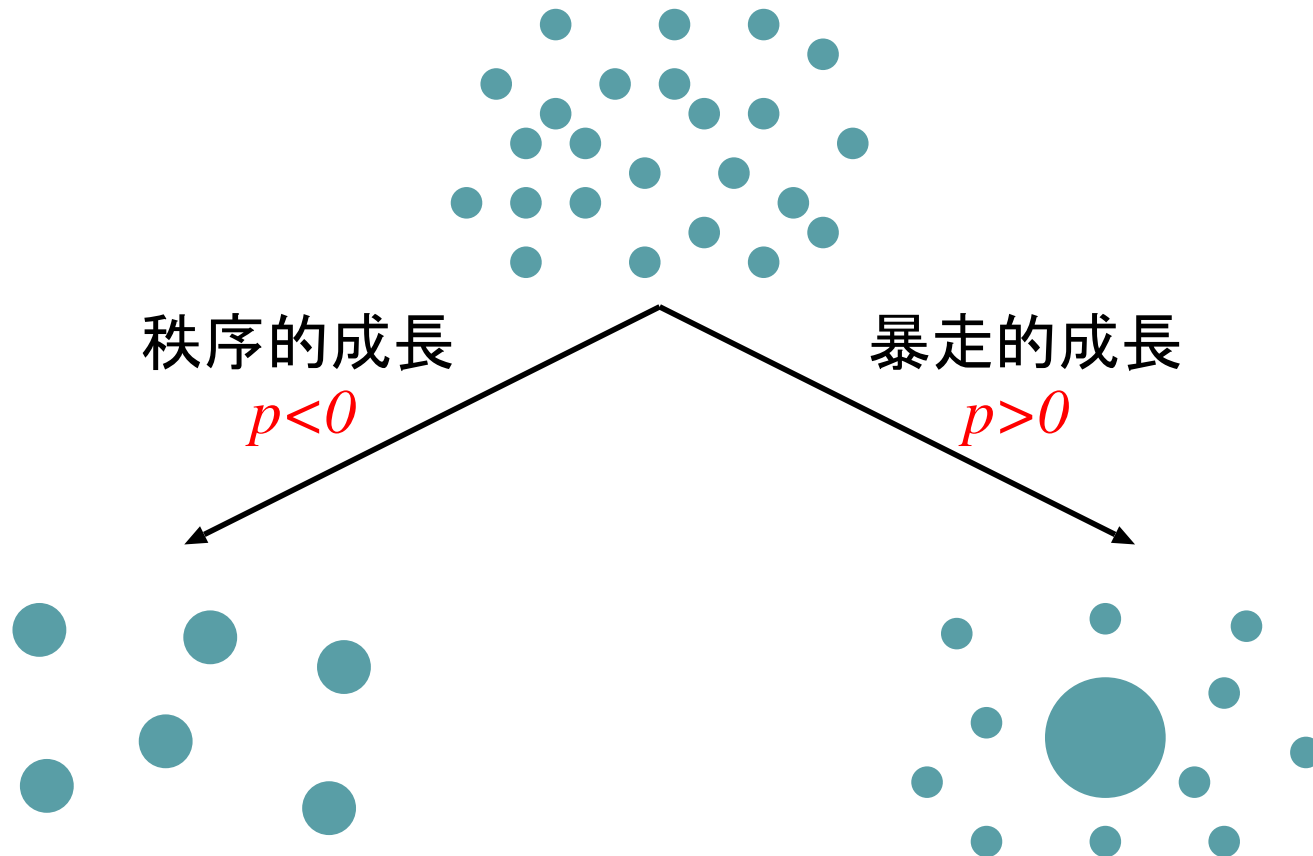
- ダストの合体成長
- ダスト層の不安定性
- 微惑星の暴走的成長・原始惑星の寡占的成長
- ガス円盤と(原始)惑星の重力相互作用
- (原始)惑星の半径方向の移動
- (系外惑星の発見を受けて全段階で見直しが進行中)



# 惑星の成長モード

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{M_1}{M_2} \right) = \frac{M_1}{M_2} \left( \frac{1}{M_1} \frac{dM_1}{dt} - \frac{1}{M_2} \frac{dM_2}{dt} \right)$$

相対成長率:  $\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \propto M^p$



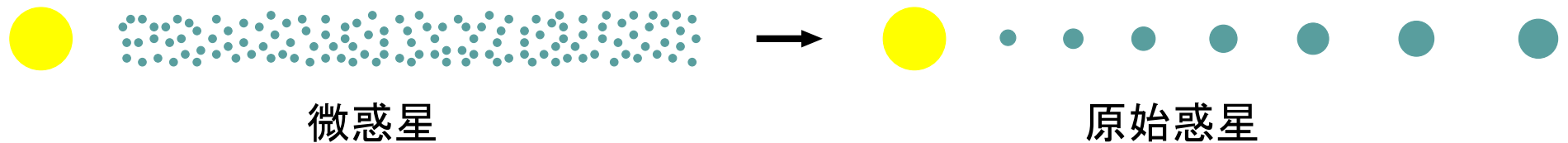
# 微惑星から原始惑星へ

## 微惑星の暴走的成長

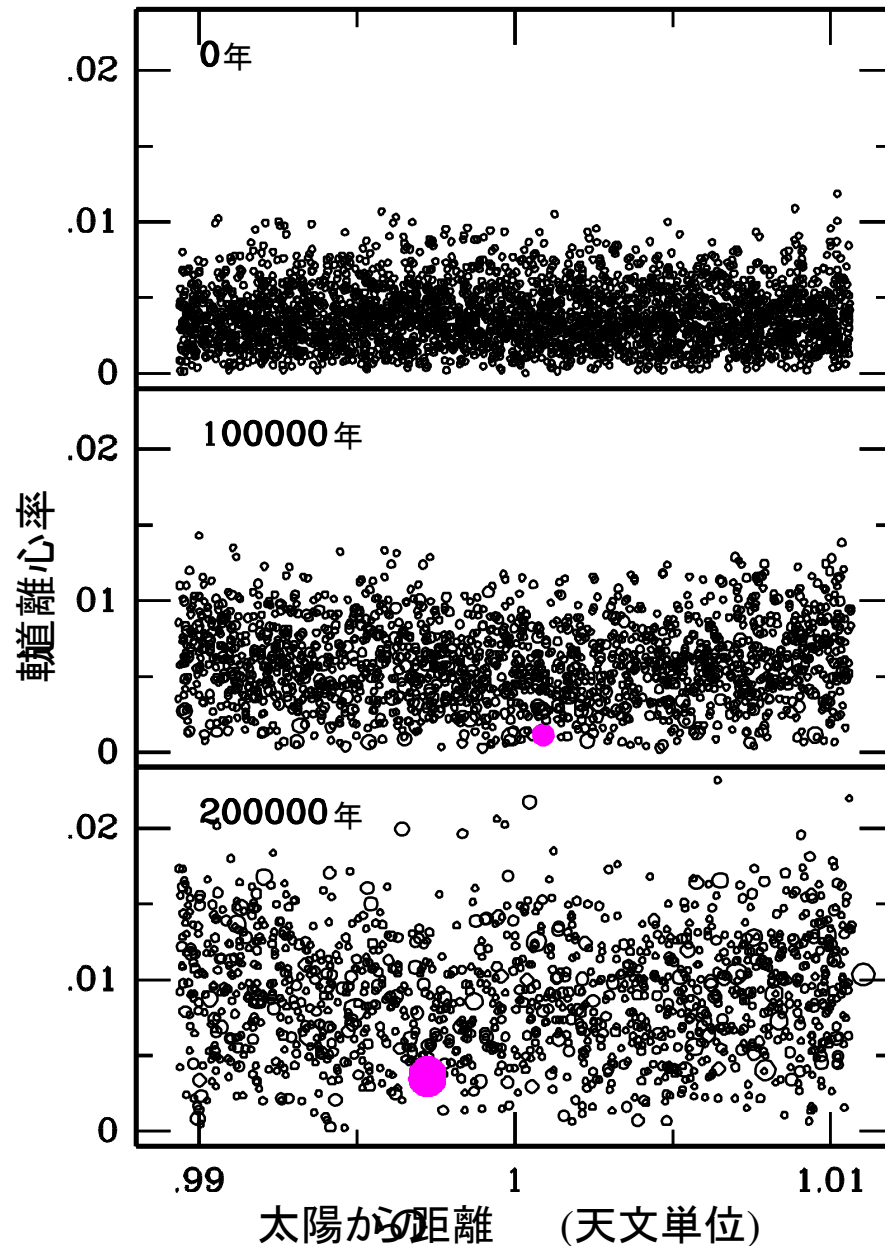
- 重力フォーカシングによって大質量の微惑星ほど速く成長する

## 原始惑星の寡占的成長

- 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



# 微惑星の暴走的成長



## 暴走的成長

- 暴走的成長の条件

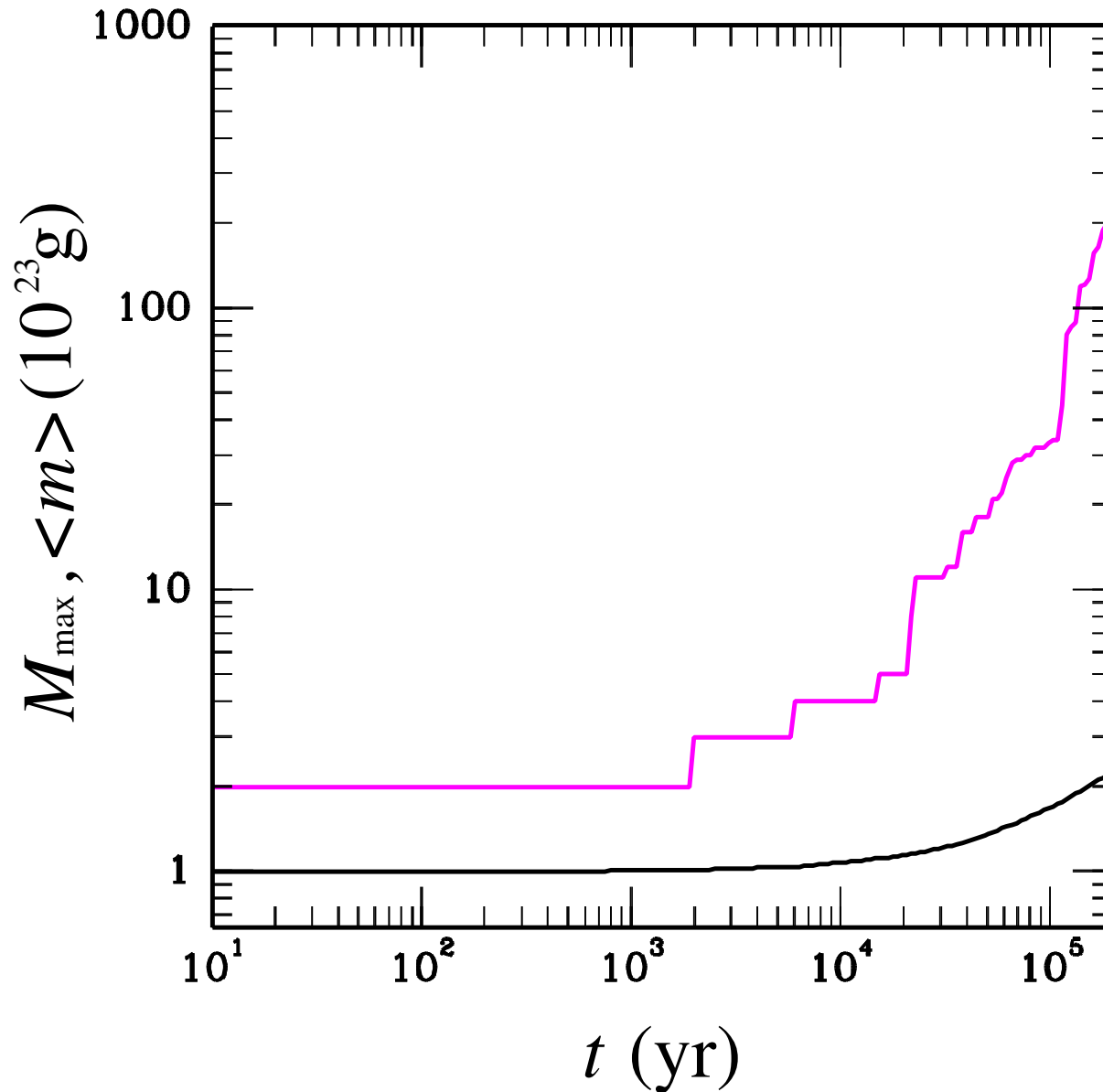
$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \propto M^{\frac{1}{3}} v_{\text{ran}}^{-2} \propto M^{\frac{1}{3}}$$

$$(v_{\text{ran}} < v_{\text{esc}}, v_{\text{ran}} \neq f(M))$$

## 微惑星分布

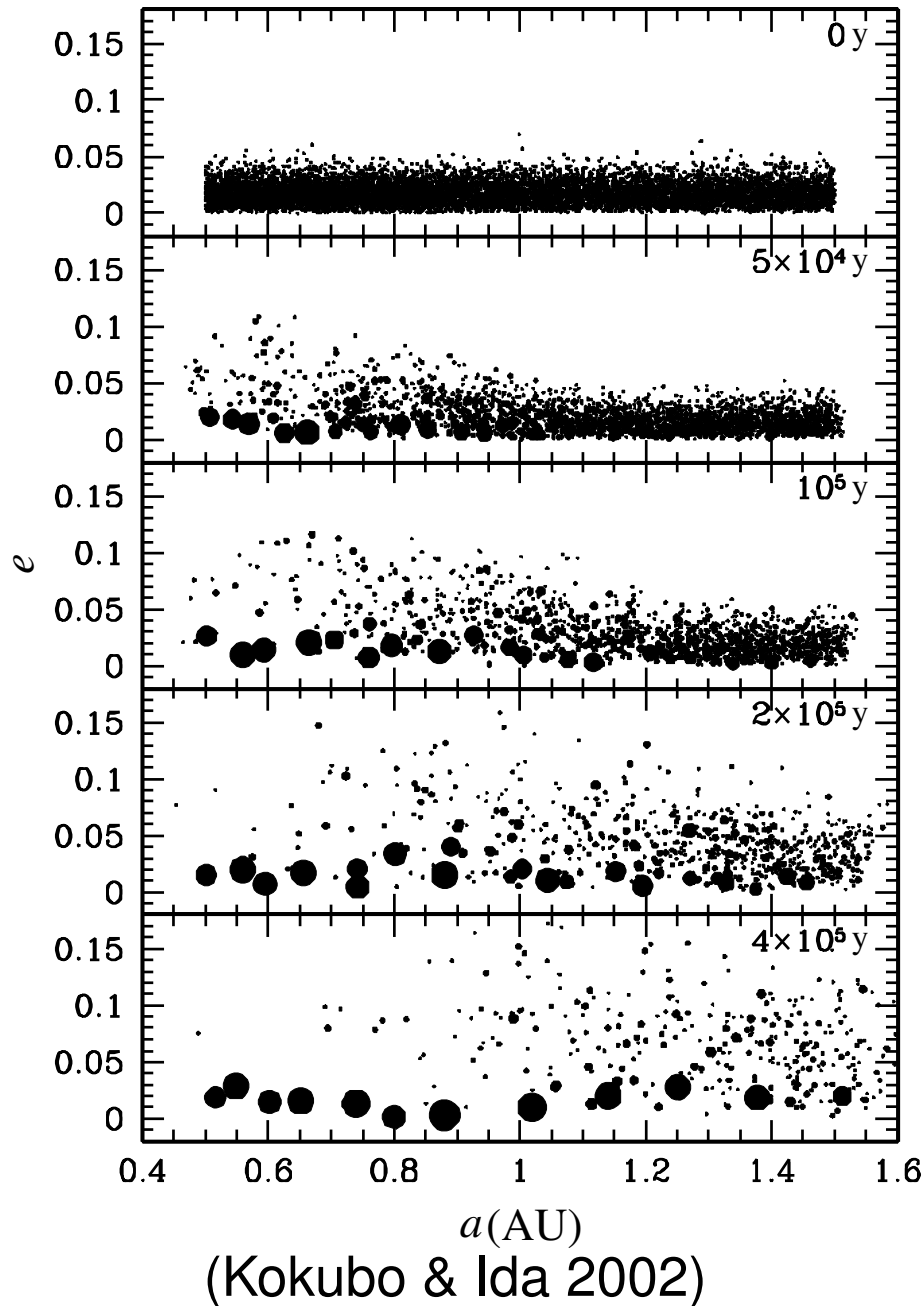
- ランダム速度:  $v \propto m^{-1/2}$
- 質量分布:  $ndm \propto m^{-8/3} dm$

# 微惑星の暴走的成長



最大質量: 実線、平均質量: 点線

# 原始惑星の寡占的成長



## 暴走的成長の鈍化

原始惑星 ( $M \gtrsim 100m$ ) による周囲の  
微惑星の重力散乱

$$v_{\text{ran}} \propto r_{\text{H}} \propto M^{1/3}$$

⇓

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \propto M^{1/3} v_{\text{ran}}^{-2} \propto M^{-1/3}$$

## 秩序的成長!

(Ida & Makino 1993)

## 軌道反発

軌道間隔:  $b \simeq 10r_{\text{H}}$

(Kokubo & Ida 1998)

# 原始惑星の孤立質量

## 地球型惑星領域

- $M \simeq 0.1M_{\oplus} \lesssim M_{\text{地球型}}$
- 岩石 = 地球型惑星組成

原始惑星どうしの巨大衝突

## 木星型惑星領域

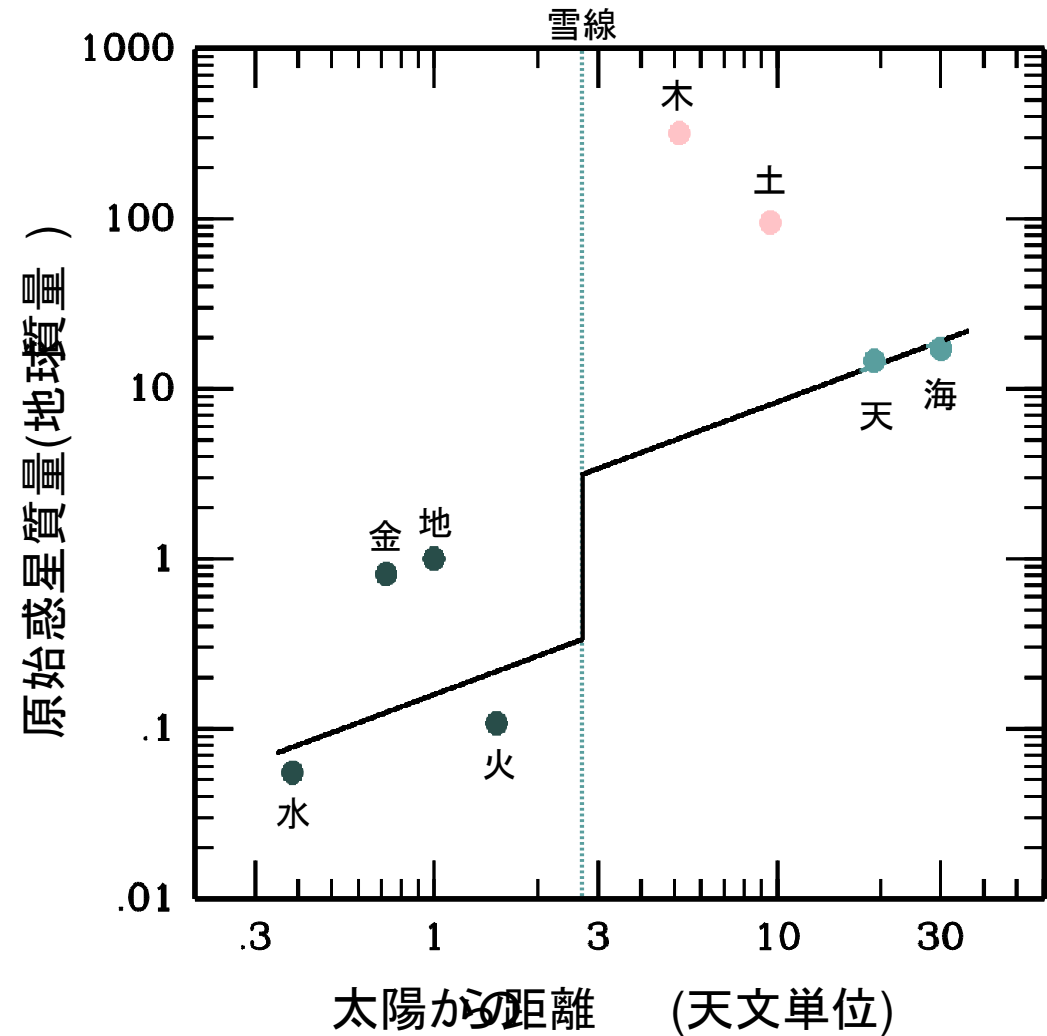
- $M \simeq 10M_{\oplus} \ll M_{\text{木星型}}$
- 氷  $\neq$  木星型惑星組成

原始惑星によるガス降着

## 天王星型惑星領域

- $M \simeq 15M_{\oplus} \simeq M_{\text{天王星型}}$
- 氷 = 天王星型惑星組成

天王星型惑星は原始惑星



# 系外惑星の発見

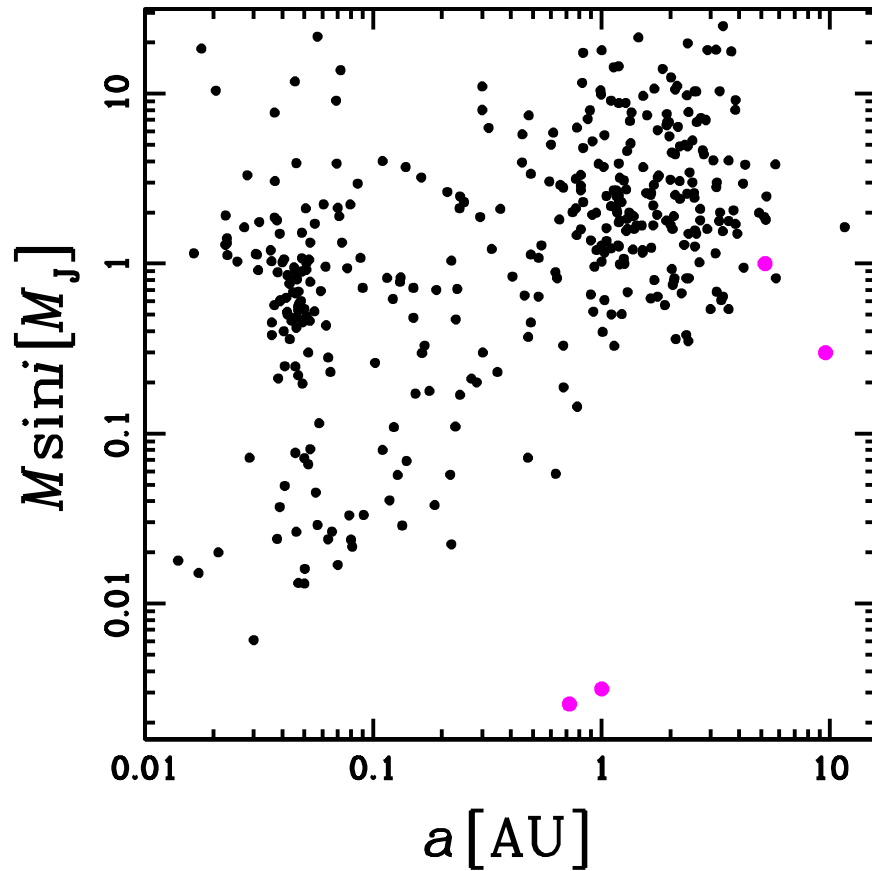
## 観測

- 1995: 51 Peg b の発見 — 新時代の始まり!
- 2010: 450 個以上の惑星 — 木星型惑星の普遍性!

## 惑星の多様性

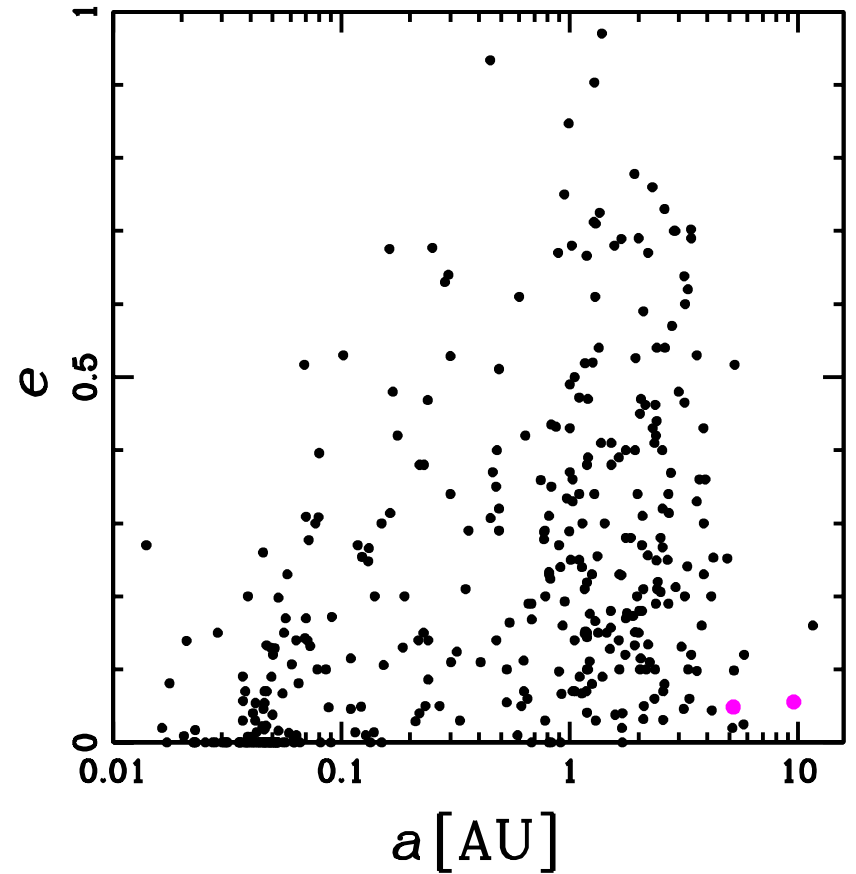
- hot jupiters/灼熱巨大惑星 (ガス惑星)
- eccentric planets/大離心率惑星 (ガス惑星)
- solar-system type planets/太陽系型惑星 (ガス惑星)
- hot neptunes/灼熱氷惑星 (氷惑星?水惑星?)
- super earths/超地球 (岩石惑星?)
- 多惑星系

# 系外惑星系の特徴



軌道による分類

種類	$a(\text{AU})$	$e$
灼熱ガス惑星	$\lesssim 0.1$	$\lesssim 0.1$
大離心率惑星	$\gtrsim 0.1$	$\gtrsim 0.1$
太陽系型惑星	$\gtrsim 1$	$\simeq 0$



質量による分類

種類	$M(M_J)$
灼熱ガス惑星	$\simeq 1-10$
灼熱氷惑星	$\simeq 0.1$
超地球	$\lesssim 0.1$



# 惑星系の多様性の起源

## 初期条件の違い

- 原始惑星系円盤の大きさ・質量分布・ガスダスト比

## 境界条件の違い

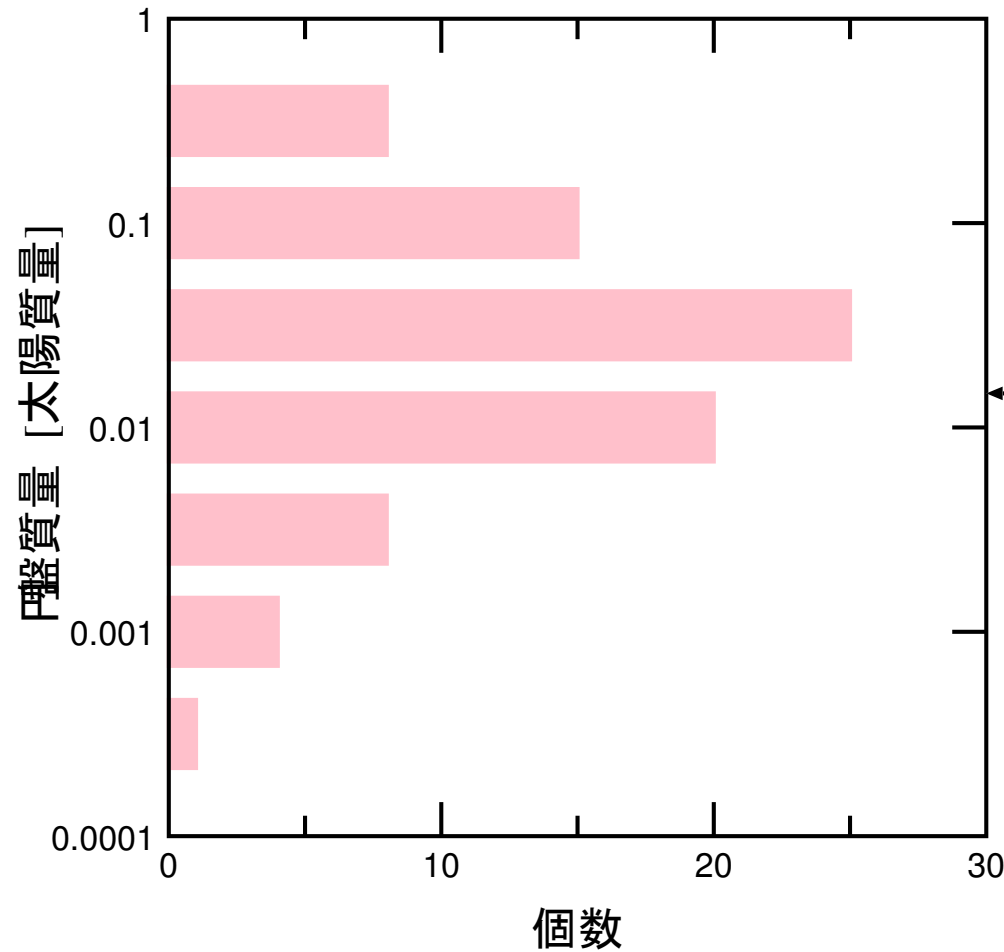
- 中心星の種類・進化段階
- 孤立星、連星、星団
- 銀河系環境

## 多様性を生み出す形成過程

- 惑星の移動 (微惑星・ガス円盤との相互作用)
- 惑星どうしの重力散乱

# 原始惑星系円盤の多様性

おうし座、へびつかい座 (Beckwith & Sargent 1996)



質量

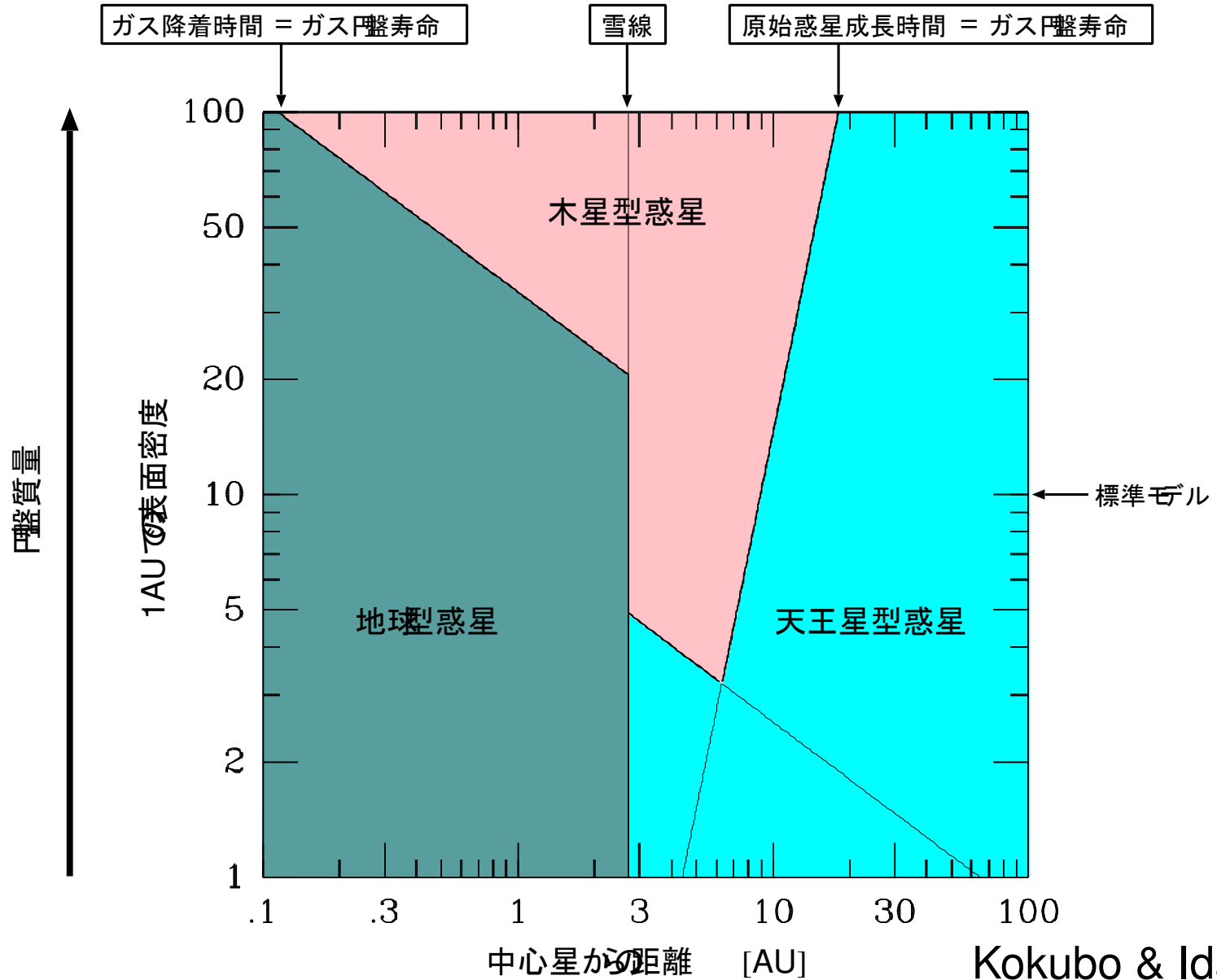
$$M_{\text{disk}} \sim 10^{-3} - 10^{-1} M_{\odot}$$

質量分布

?

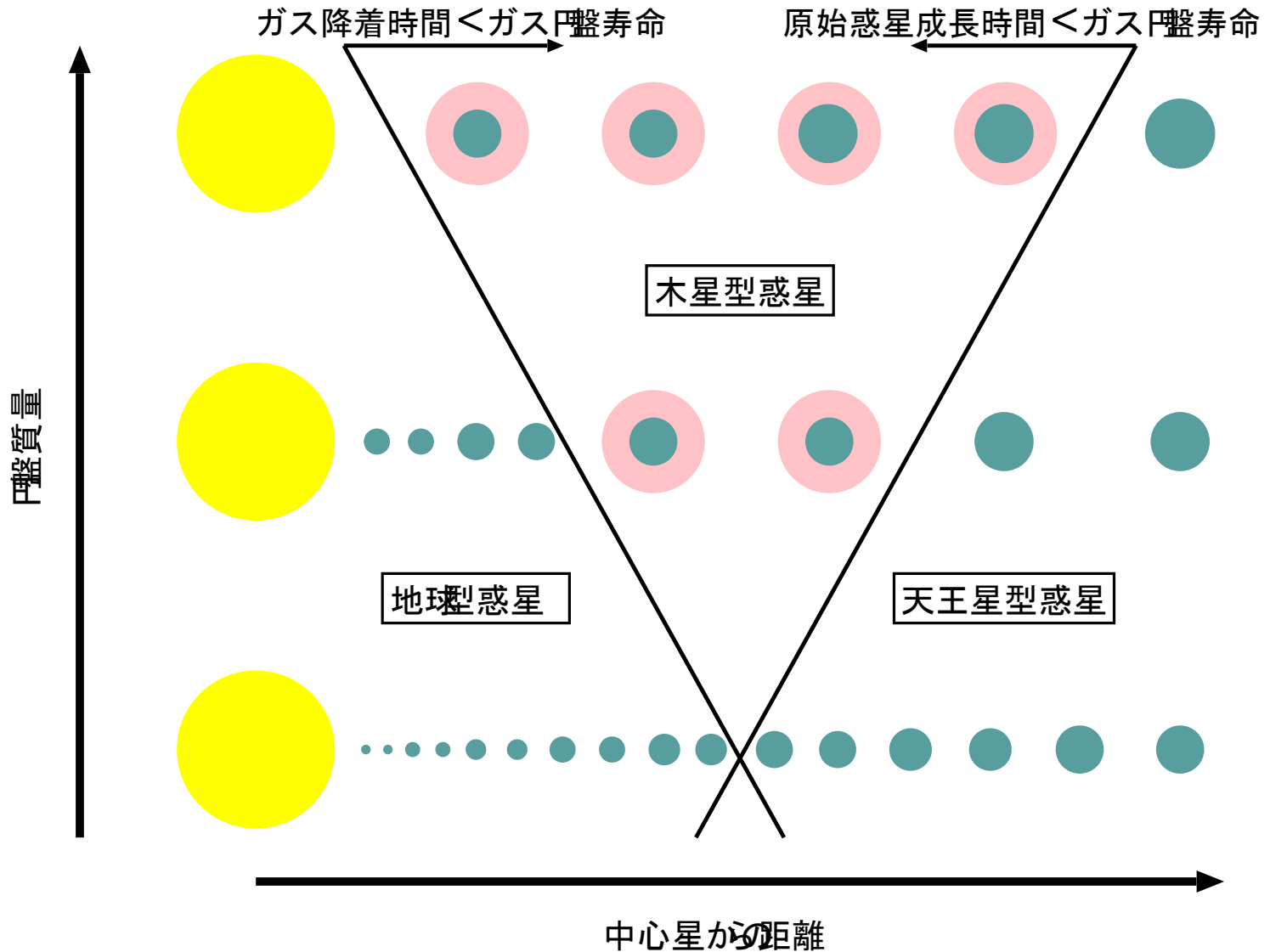
# 惑星の住み分けモデル

原始惑星の寡占的成長 (Kokubo & Ida 1998) + ガス降着 (Ikoma+ 2000)



# 惑星系の初期円盤質量依存性

大質量円盤系  $\Rightarrow$  軌道進化  $\Rightarrow$  灼熱巨大惑星・大離心率惑星



# 今後の展望

## 原始惑星系円盤の普遍性と多様性

- 若い星の $\simeq 50\%$ に存在
- 多様な形と質量

## 惑星系の普遍性と多様性

- G 型星の $\simeq 5\%$ に存在 (2010 年 5 月現在:  $>400$ )  
(F,K,M 型星にも存在)
- 多様な惑星
  - 灼熱巨大惑星 (中心星にとっても近い大型惑星)
  - 大離心率惑星 (彗星のような軌道の惑星)
  - ...

太陽系形成論から一般 (汎銀河系) 惑星系形成論へ

# 一般惑星系形成論へ向けて

## 目標

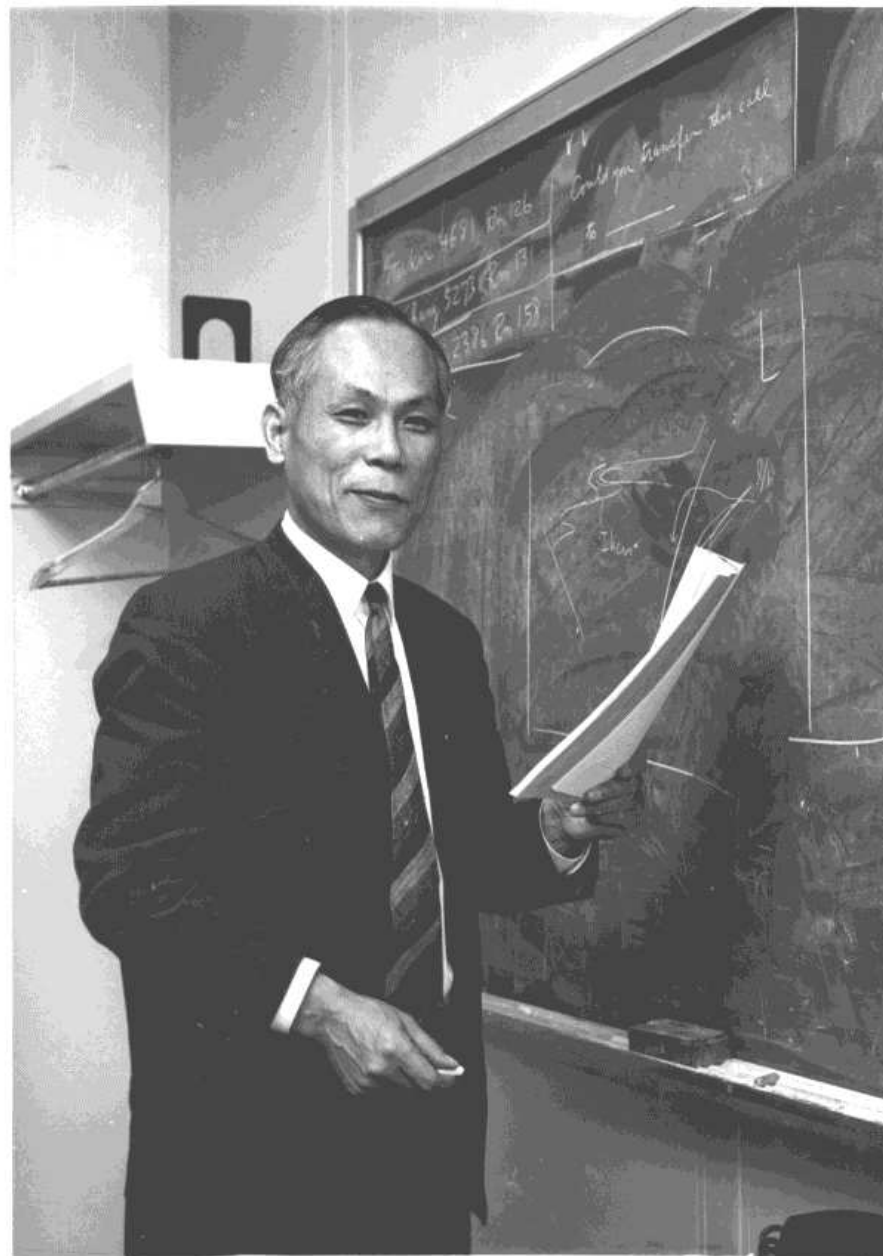
- 多様な惑星系の起源を原始惑星系円盤からの自然な物理的進化過程として記述する。

## 手法

- より現実的なシミュレーションによる素過程の再検討
- 理論の総合化と観測との比較

## 課題

- 星形成論との接続
- 惑星進化論 (含む生命の起源) との接続
- 太陽系物質科学との調和



NASA G-68-10,414

「宇宙物理は我々の生活に直接役に立つものではないが、自然の因果関係の存在を明確にした点で役に立っている」(林 1988)