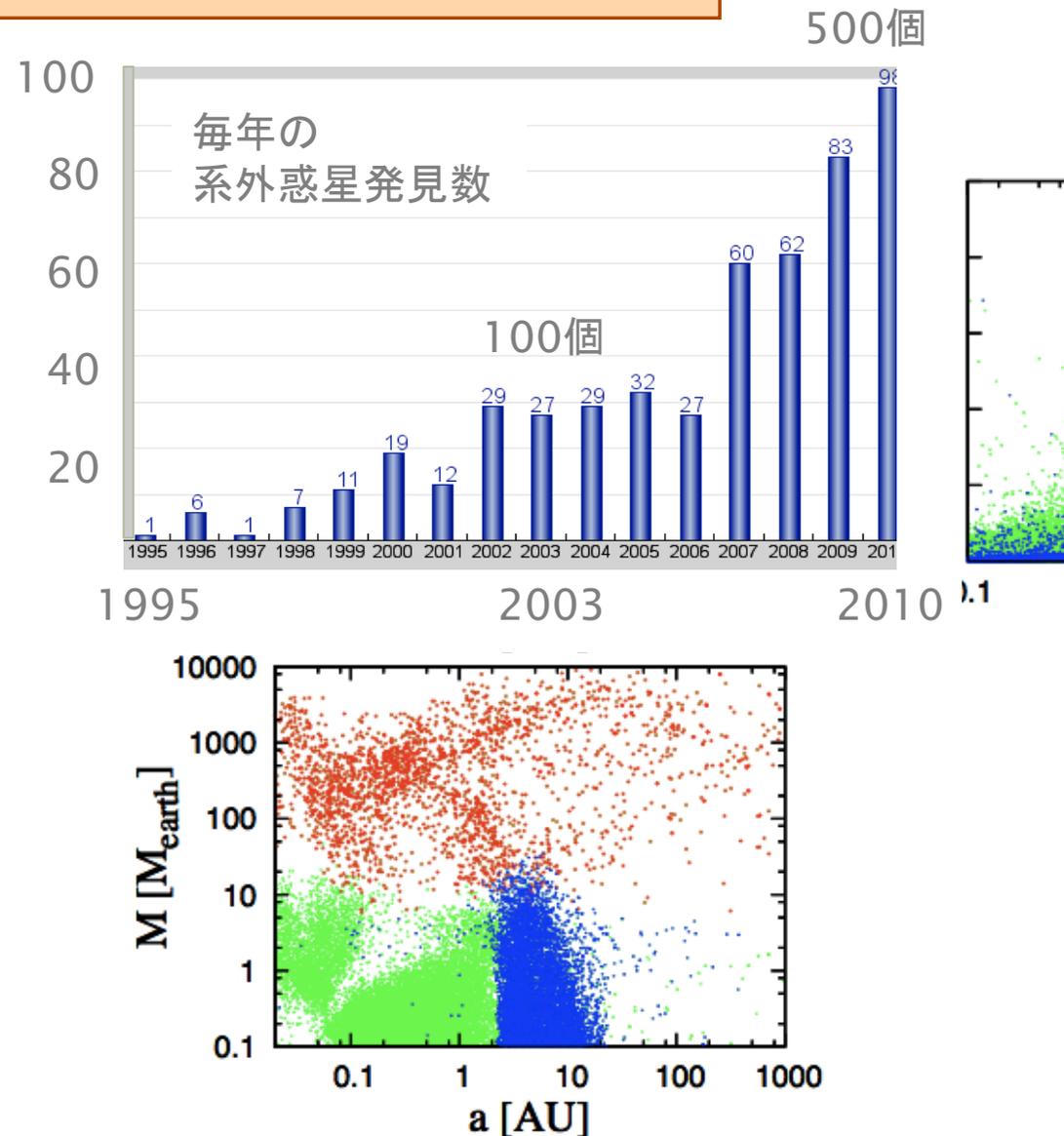


# 太陽系/系外惑星系形成論

井田 茂 (東工大)

## Talk Outline

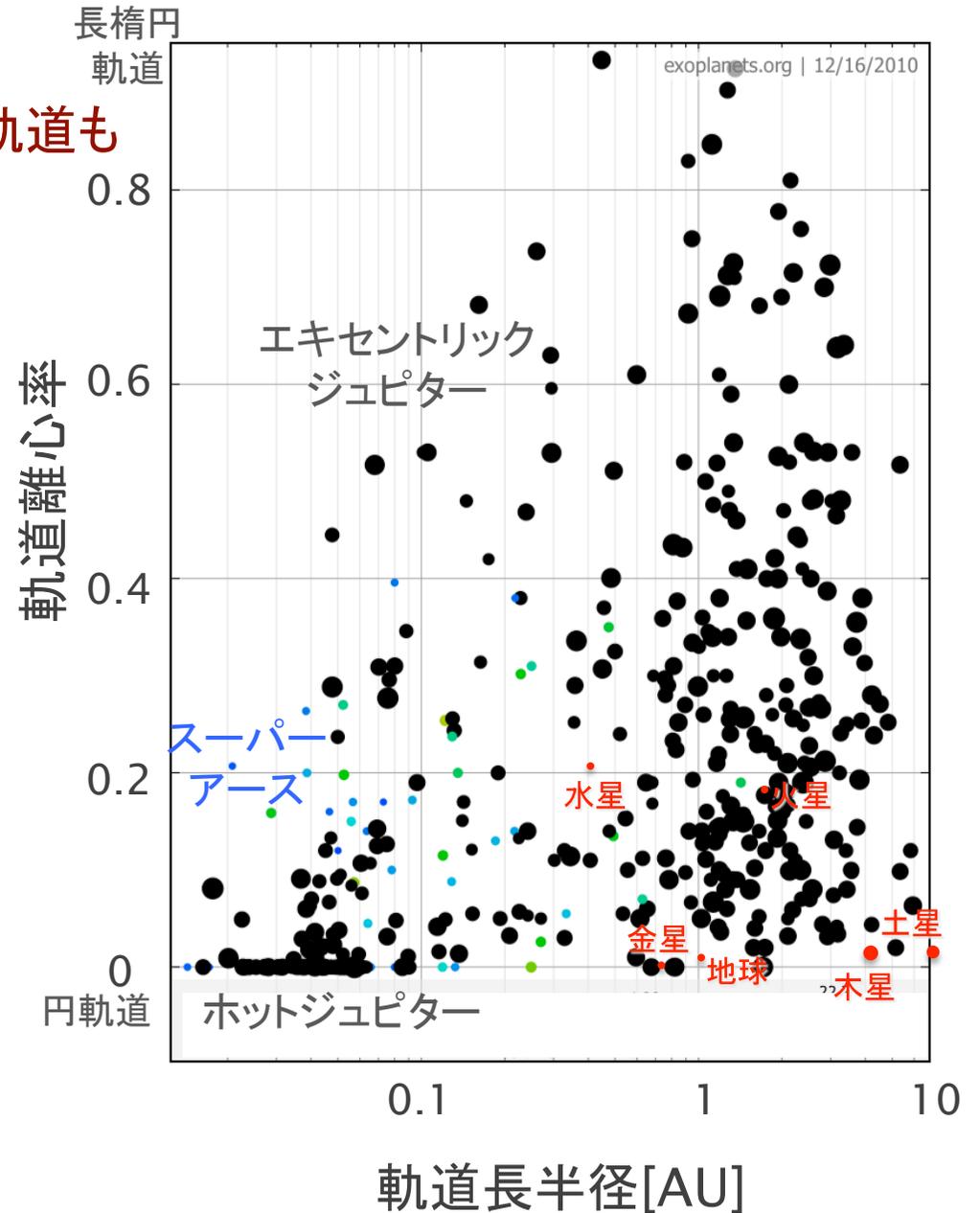
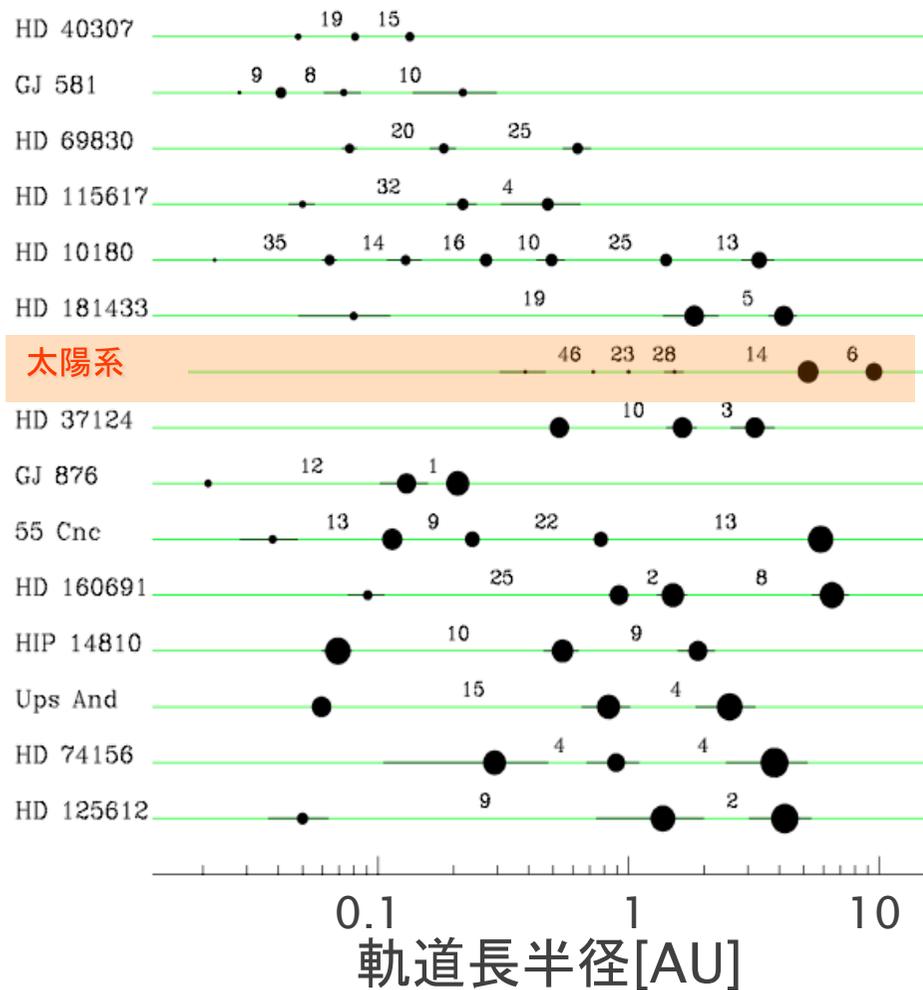
- 観測の進展
  - 遍在性と多様性
- 新しい物理メカニズム:次々提案
  - 形成論の大幅拡大と混沌
- 理論モデルの予言の観測実証
  - 中心星自転に逆行公転する惑星
  - 軌道、質量分布
- これから
  - 原始惑星系円盤の形成進化
  - 総合化、統一化
  - ハビタブル惑星を軸として生命へ



# 観測の進展

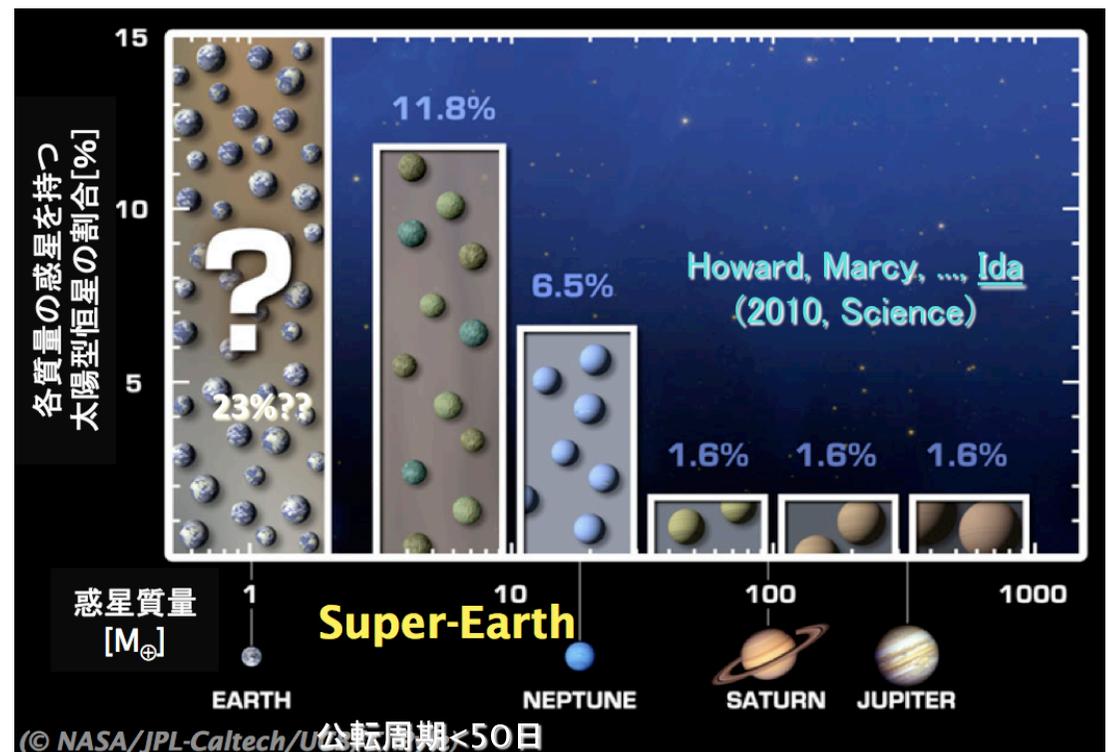
## 惑星系のアーキテクチャ

- ガス惑星、地球型惑星の個々の軌道も全体の配置も多様



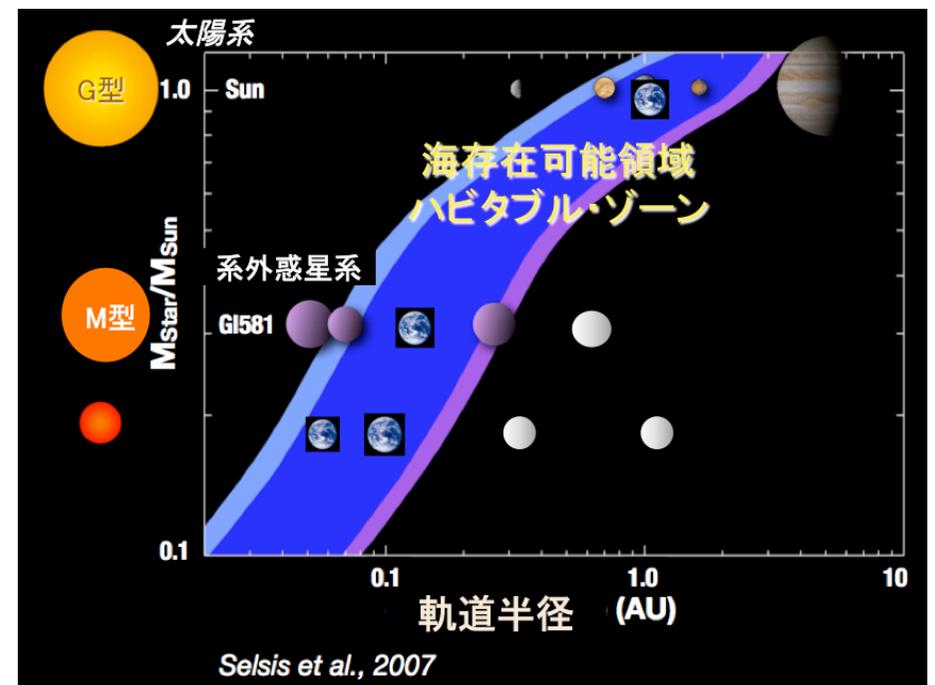
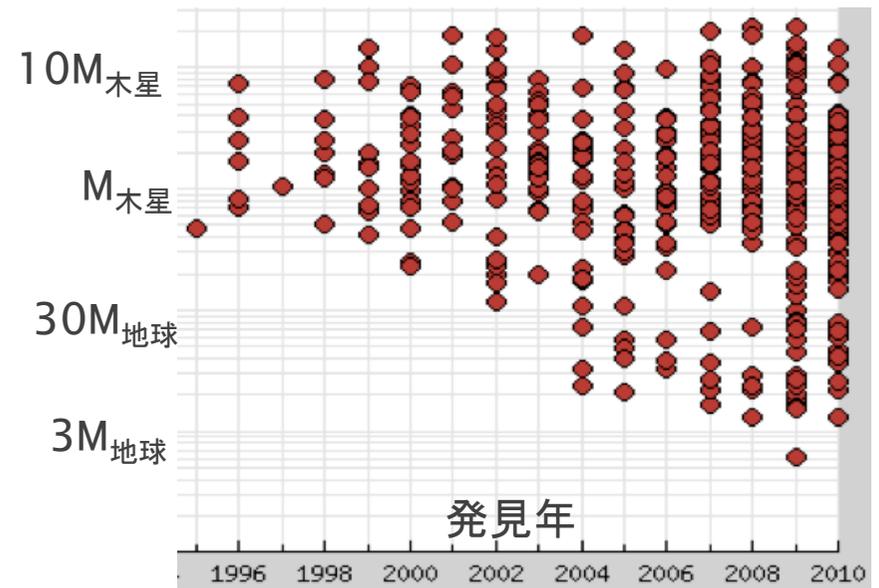
# 観測の進展

- 惑星系のアーキテクチャ
  - ガス惑星、地球型惑星の個々の軌道も全体の配置も多様
- 制御サンプルによる統計的議論
  - 太陽型星の20-40%以上に公転周期<50日の地球型惑星 - 遍在



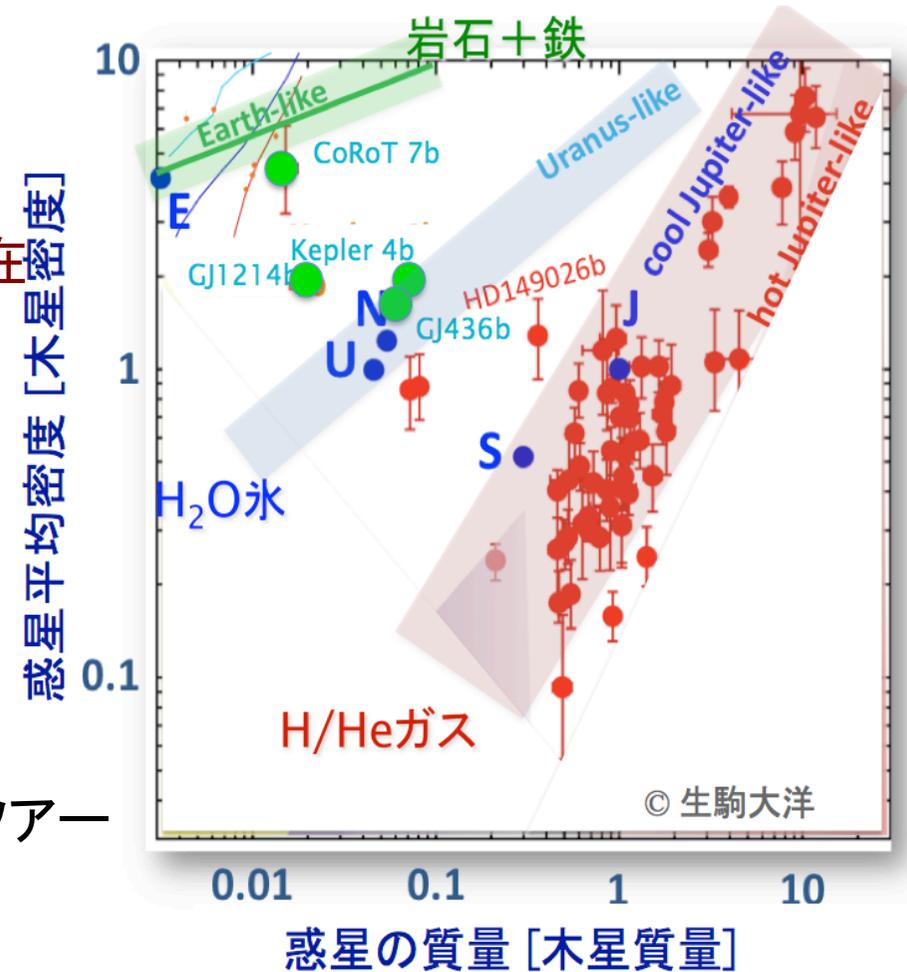
# 観測の進展

- 惑星系のアーキテクチャ
  - ガス惑星、地球型惑星の個々の軌道も全体の配置も多様
- 制御サンプルによる統計的議論
  - 太陽型星の20-40%以上に公転周期<50日の地球型惑星 - 遍在
- より小型惑星へ [中心星に近いもの] (super-Earths, Earthsへ)
  - 視線速度、トランジット、重力レンズ
  - M型星のハビタブル惑星 (e.g., GJ581c,g)



# 観測の進展

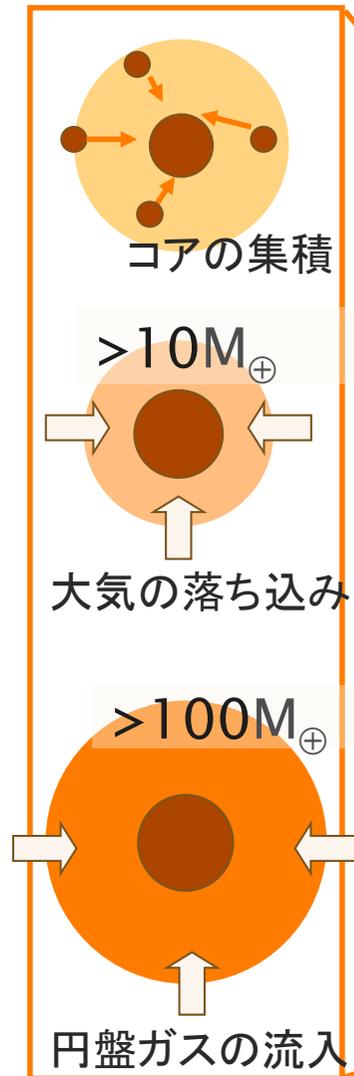
- 惑星系のアーキテクチャ
  - ガス惑星、地球型惑星の個々の軌道も全体の配置も多様
- 制御サンプルによる統計的議論
  - 太陽型星の20-40%以上に公転周期<50日の地球型惑星 - 遍在
- より小型惑星へ [中心星に近いもの] (super-Earths, Earthsへ)
  - 視線速度、トランジット、重力レンズ
  - M型星のハビタブル惑星 (e.g., GJ581c,g)
- 惑星組成、大気
  - 視線速度法+トランジット法、スピッツァー
- 恒星自転軸と惑星公転軸の傾き
  - 逆行惑星の発見



# 京都モデル - standard

e.g., Hayashi et al. (1985)

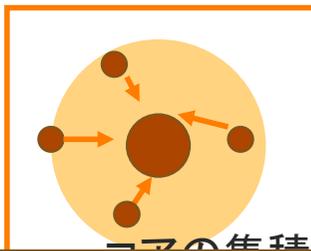
Mizuno process



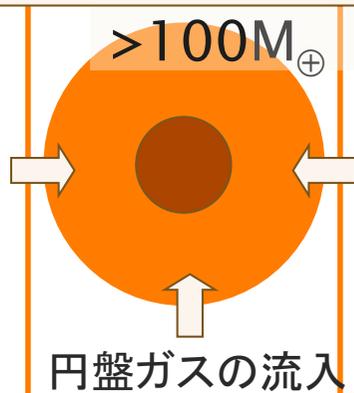
# 京都モデル - standard

e.g., Hayashi et al. (1985)

Mizuno process



このままでは系外惑星の多様性を説明できないのは明らか  
→ 大幅な拡張が必要



原始惑星系円盤

Hayashi model

H/Heガス (99wt%) + ダスト (1wt%)

微惑星 (~km)

$10^4$  y

体成長

ガス惑星コア  $10^6$  y

$10^7$  y

コアへのガス集積

ガス惑星

$10^8$  y

©Newton Press

Newton

# 新たな物理：京都モデルの大幅拡張

短周期系外惑星の発見  
→ 内縁：潮汐, 磁場, 共鳴



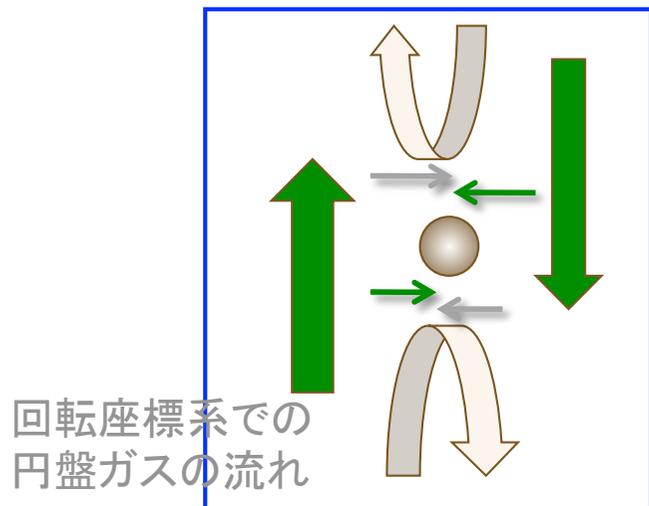
円盤乱流の観測  
→ 微惑星形成問題  
ダスト落下問題

短周期系外惑星の発見  
→ 惑星落下問題

Kozai以外は  
全て円盤絡み



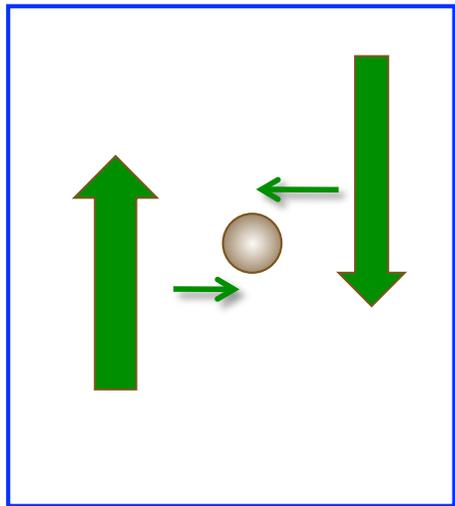
# 新たな物理：例 惑星軌道移動



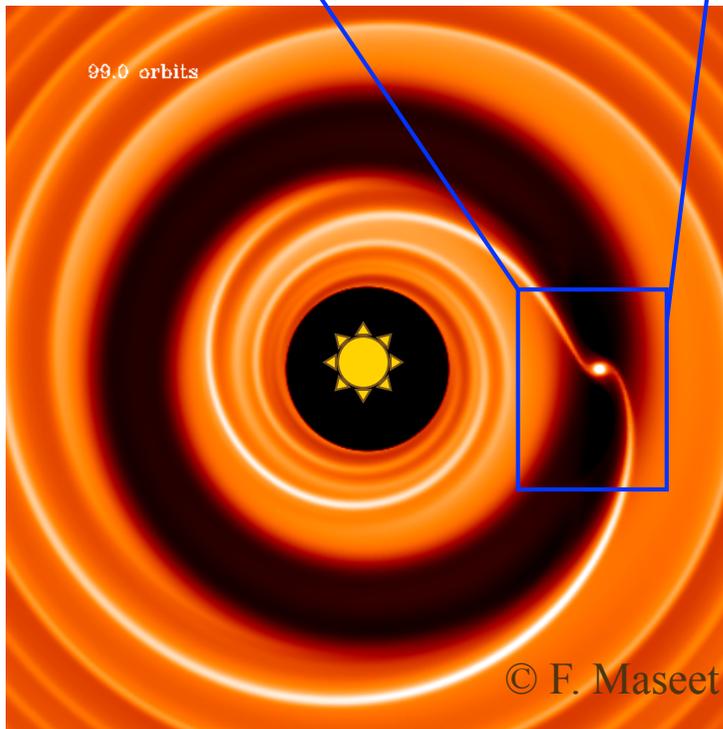
- $M_{\text{ガス}} \sim 100M_{\text{固体}}$   
→ ガス円盤との重力相互作用で  
惑星軌道変化
- 同じ程度の4つのトルクの  
微妙な差し引きの残差で  
惑星軌道変化
- 線形領域 ( $M < 10M_{\oplus}$ )  
Tanaka, Takeuchi, Ward (2002)  
必ず内向移動 高速  
→  $1M_{\oplus}$  @1AUの地球  
 $10M_{\oplus}$  @5AUの木星コア  
<  $10^5$ yr で落下! [ $\leftrightarrow$  円盤寿命  $> 10^6$ yr]  
惑星落下問題

192.0 orbits

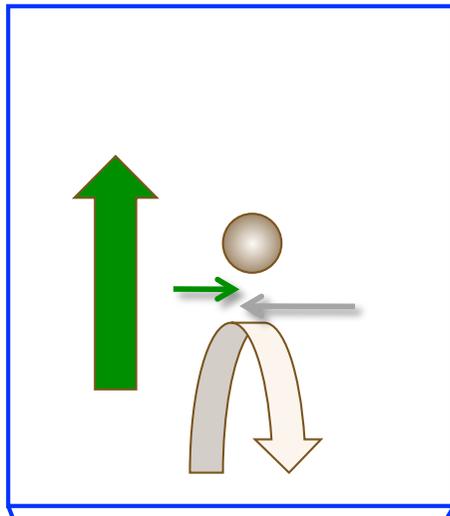
# 新たな物理：例 惑星軌道移動



- 線形領域 ( $M < 10M_{\oplus}$ ) タイプ I  
必ず**内向移動 高速**
- 非線形領域 ( $M > 50M_{\oplus}$ ) タイプ II  
惑星重力でギャップ形成  
→ 円盤降着と共に**ゆっくり内向移動**  
Lin & Papaloizou (1986)



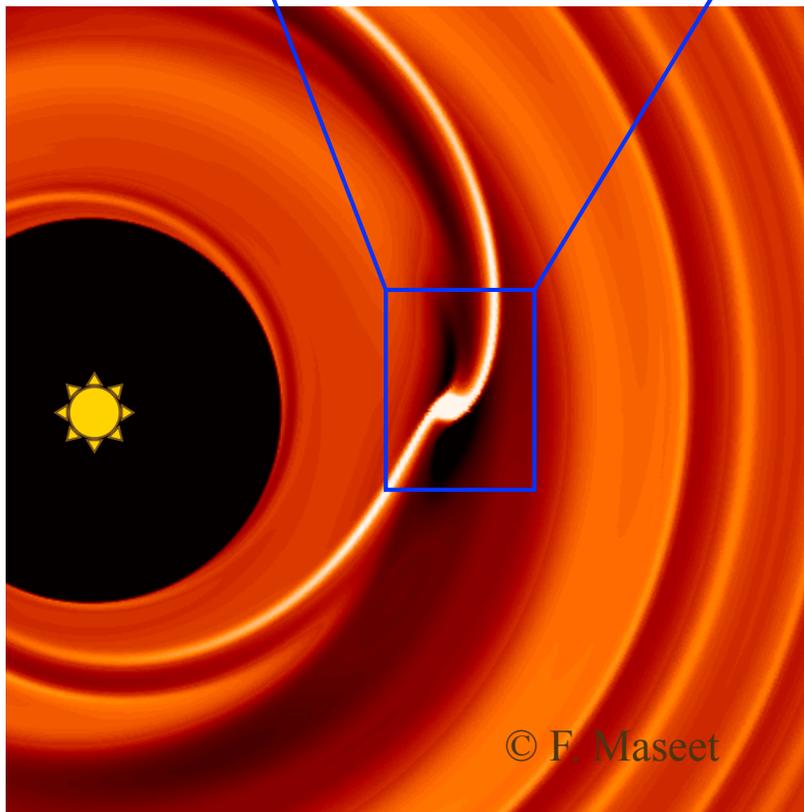
# 新たな物理：例 惑星軌道移動



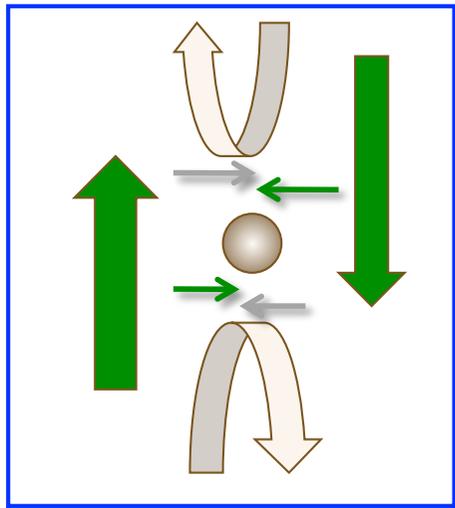
- 線形領域 ( $M < 10M_{\oplus}$ ) タイプ I  
必ず**内向移動 高速**
- 非線形領域 ( $M > 50M_{\oplus}$ ) タイプ II  
惑星重力でギャップ形成  
→ 円盤降着と共に**ゆっくり内向移動**
- 非線形領域 ( $M \sim 30M_{\oplus}$ ) タイプ III  
不完全ギャップ  
→ **極めて高速 内向or外向移動**  
Artymowicz (2004) (予測不可能)

\*微惑星円盤とでもおこる? ( $M > M_{\oplus}$ ) Ida + (2000)

- 円盤自身が作る密度ギャップ  
(内縁、MRI乱流の活性/鎮静境界)  
→ **移動ストップ migration trap**  
Masset + (2006)



# 新たな物理：例 惑星軌道移動



- 線形領域 ( $M < 10M_{\oplus}$ ) タイプ I  
必ず**内向移動 高速**

Tanaka, Takeuchi, Ward (2002)

- 円盤温度勾配、流体素片熱輸送、  
乱流拡散 Paardekooper + (2009)  
→ **高速で内向or外向移動**

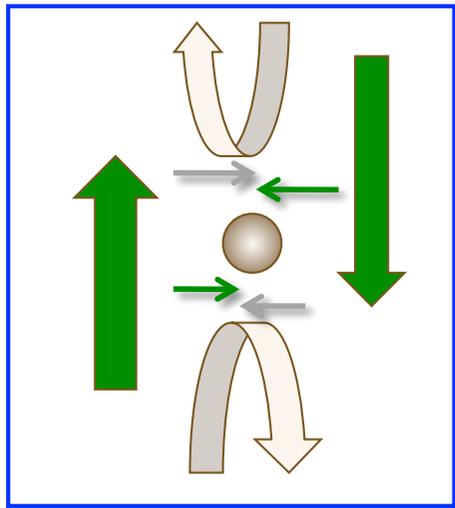
円盤の温度分布、光学的厚さ(ダスト成長)  
MRI乱流状態などで、移動方向は変わる

- 乱流の密度揺らぎの重力摂動で  
ランダム運動 Nelson (2004)

**全くの混沌状態**

192.0 orbits

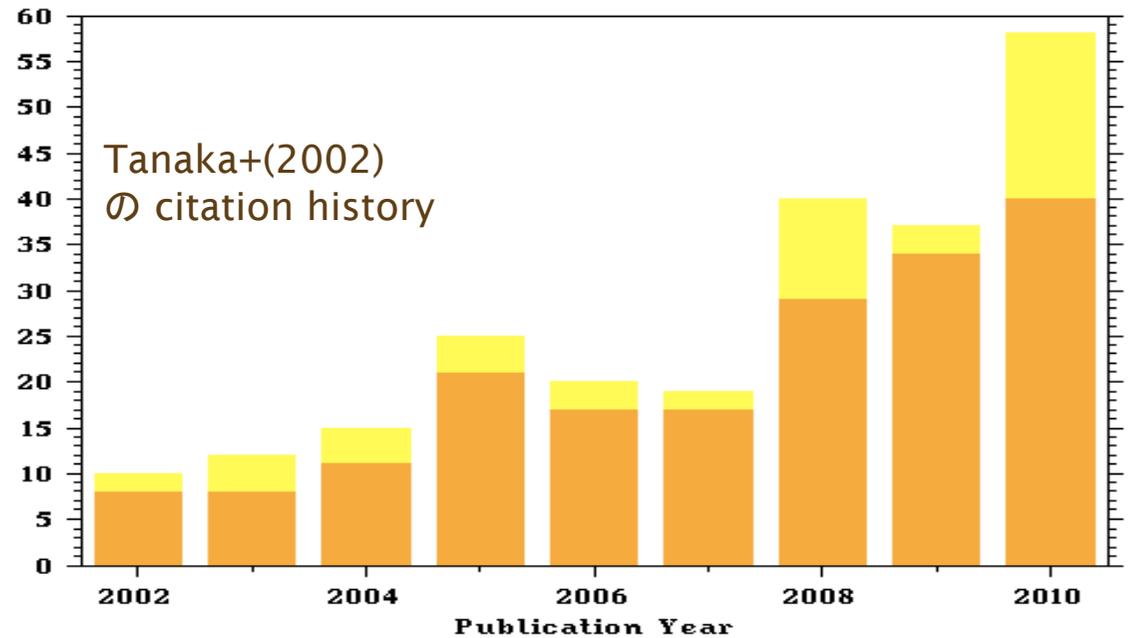
# 新たな物理：例 惑星軌道移動



## ■ 線形領域 ( $M < 10M_{\oplus}$ ) タイプ I

Tanaka, Takeuchi, Ward (2002)

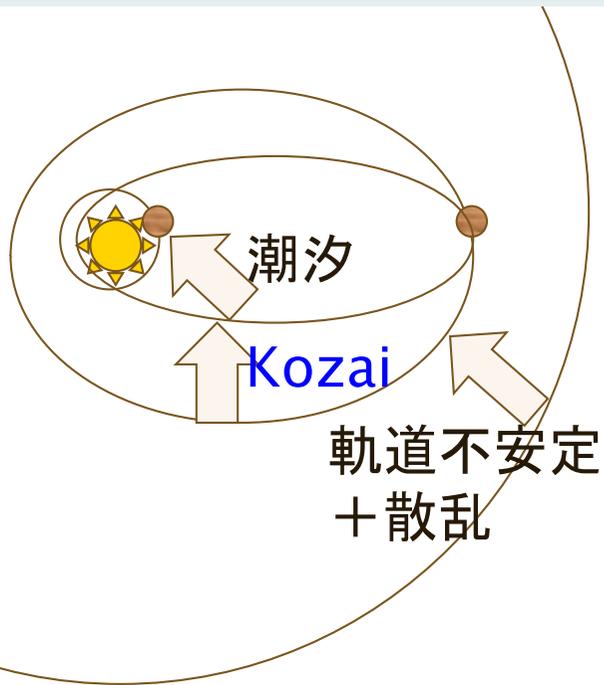
Citations/Publication Year for 2002ApJ...565.1257T



全くの混沌状態

192.0 orbits

# 新たな物理：例 散乱＋Kozai＋潮汐



## ■ 軌道不安定＋Kozai＋潮汐で ホットジュピター形成

Nagasawa, Ida, Bessho (2008)

(軌道不安定が起これば30%の高確率)

➤ 楕円のホットジュピターも形成

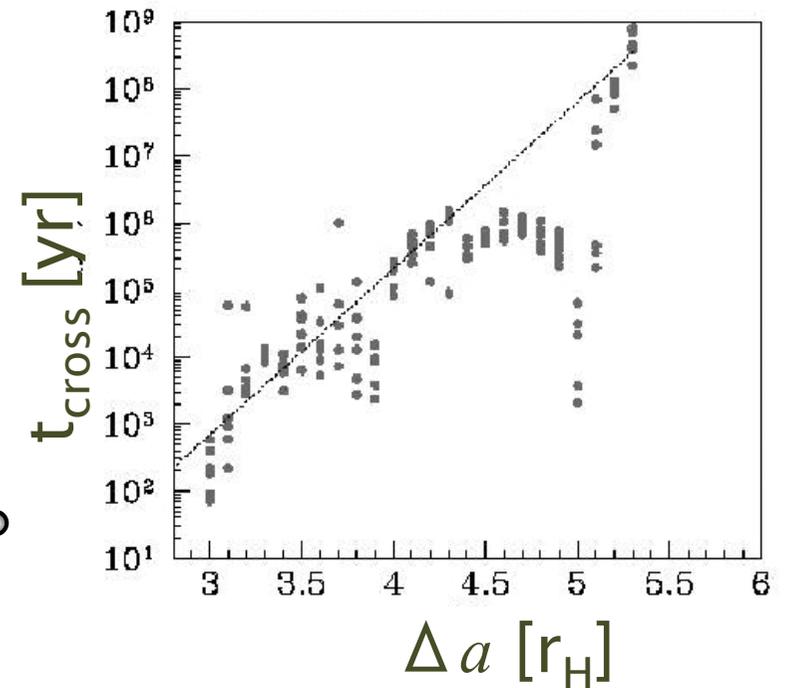
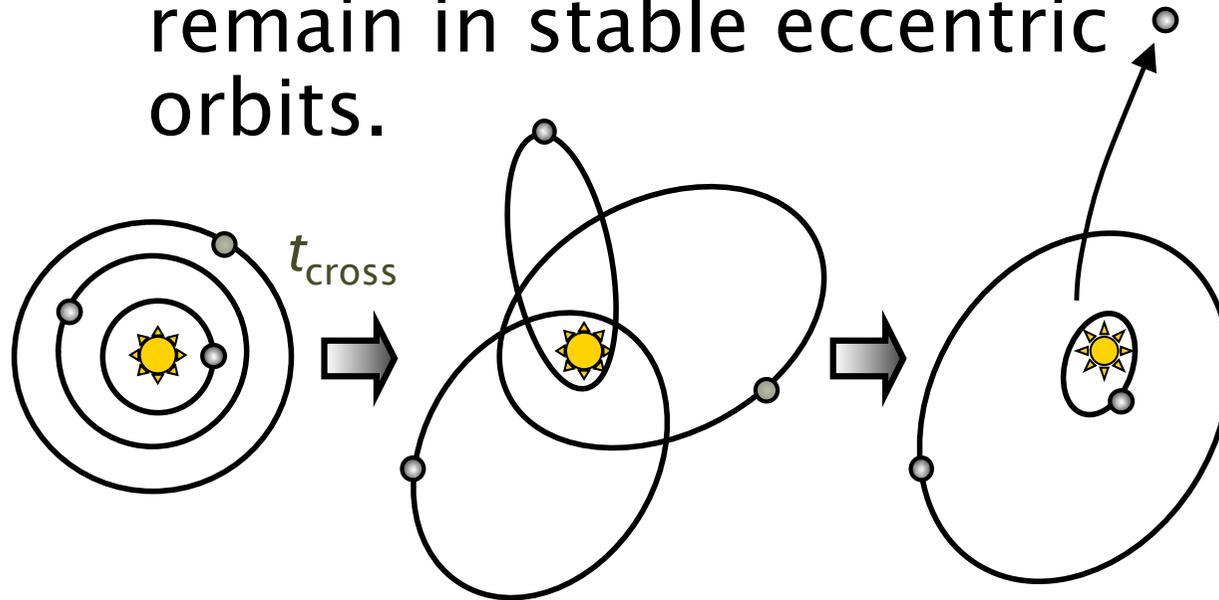
➤ 逆行のホットジュピターも形成！

[予言後1年で続々発見！ e.g., Narita+(2009)]

# Origin of eccentric jupiters

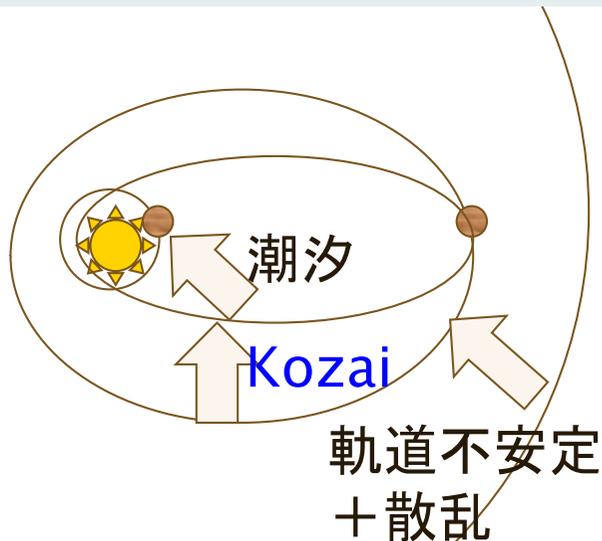
Weidenschilling & Marzari (1996), Lin & Ida(1997),...

- If more than 3 giant planets form on circular orbits
- Orbit crossing starts on  $\tau_{\text{cross}}$
- One is ejected. The others remain in stable eccentric orbits.



Marzari &  
Weidenschilling (2002)

# 新たな物理：例 散乱+Kozai+潮汐



## ■ 軌道不安定+Kozai+潮汐で ホットジュピター形成

Nagasawa, Ida, Bessho (2008)

(軌道不安定が起これば30%の高確率)

➤ 楕円のホットジュピターも形成

➤ 逆行のホットジュピターも形成！

[予言後1年で続々発見！ e.g., Narita+(2009)]

## ホットジュピターの起源

➤ タイプ-II 軌道移動？

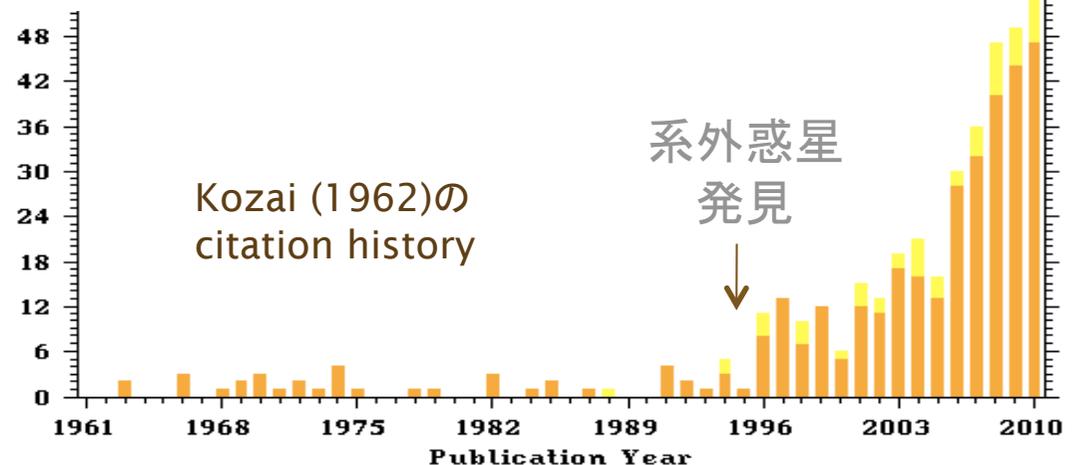
➤ Nagasawa process？

## ホットジュピターの消滅

(潮汐、蒸発...)もあり、混沌

$$\text{Kozai: } L = \sqrt{GM_* a(1-e^2)} \cos i \quad \text{保存}$$

$i$ : 摂動天体の軌道面との傾斜角



# 統一化：Population synthesis model

Ida & Lin (2004a,b,2005,2008a,b,2010), Mordasini et al. (2009a,b)

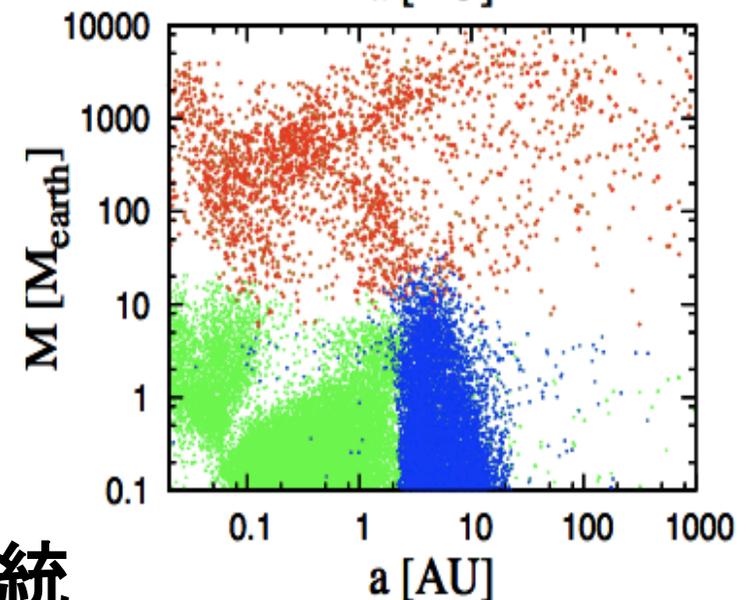
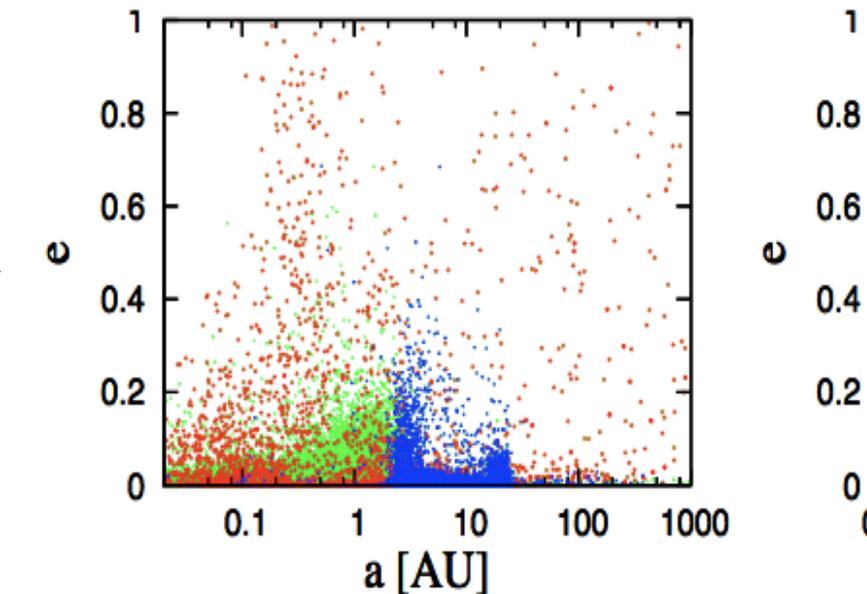
- 惑星形成の各過程をつなぎ、観測と直接比較可能な系外惑星の分布導出
  - 観測データを説明、将来観測の予測、理論モデルの較正
  - 各過程の詳細数値計算を本質を残しつつ簡潔なモデル化をする
  - 惑星成長移動を積分し(決定論的過程)、確率論的過程を加える

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M}{\tau_{\text{planetesimal}}} + \Delta M_{\text{embryo}} + \frac{M}{\tau_{\text{gas}}}$$

$$\frac{da}{dt} = -\frac{a}{\tau_{\text{migration}}} + \Delta a_{\text{scatt/coll}}$$

$$\frac{de}{dt} = \Delta e_{\text{scatt/coll}}$$

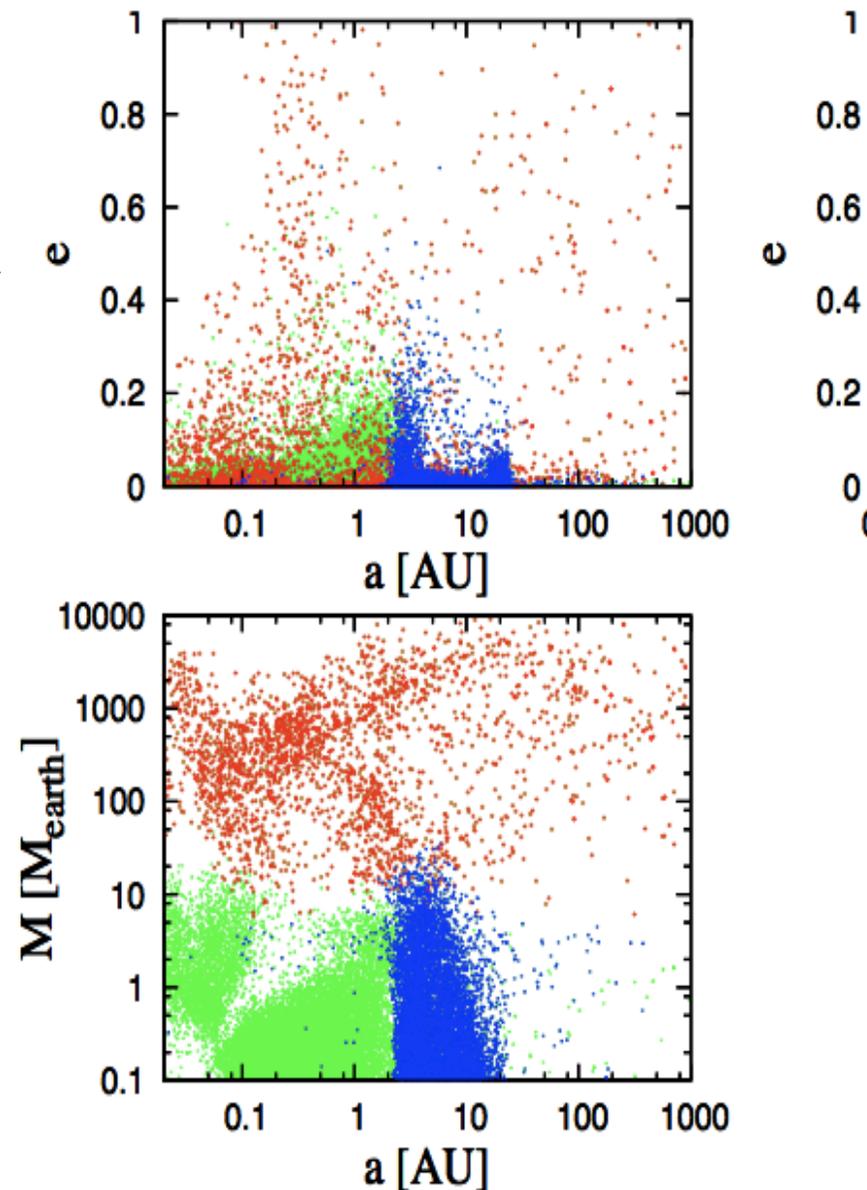
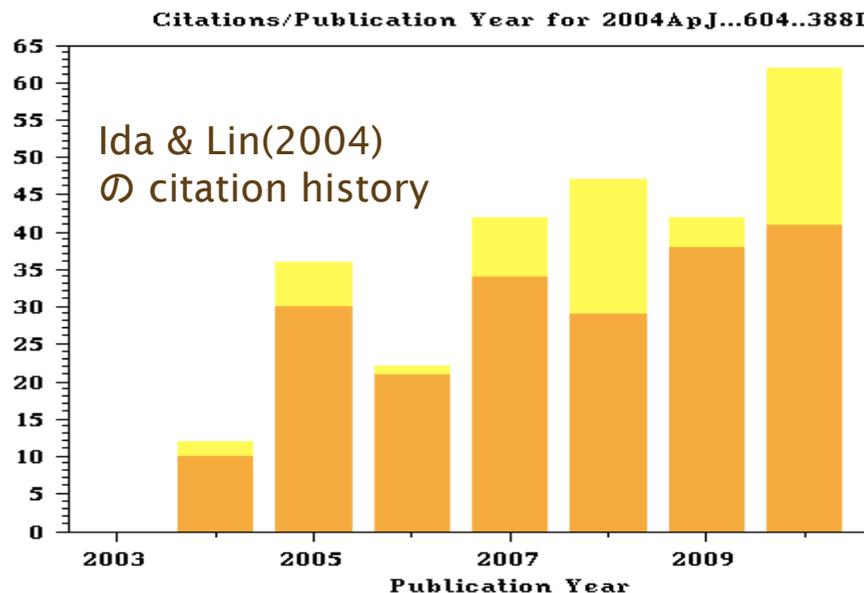
京都モデルの伝統



# 統一化：Population synthesis model

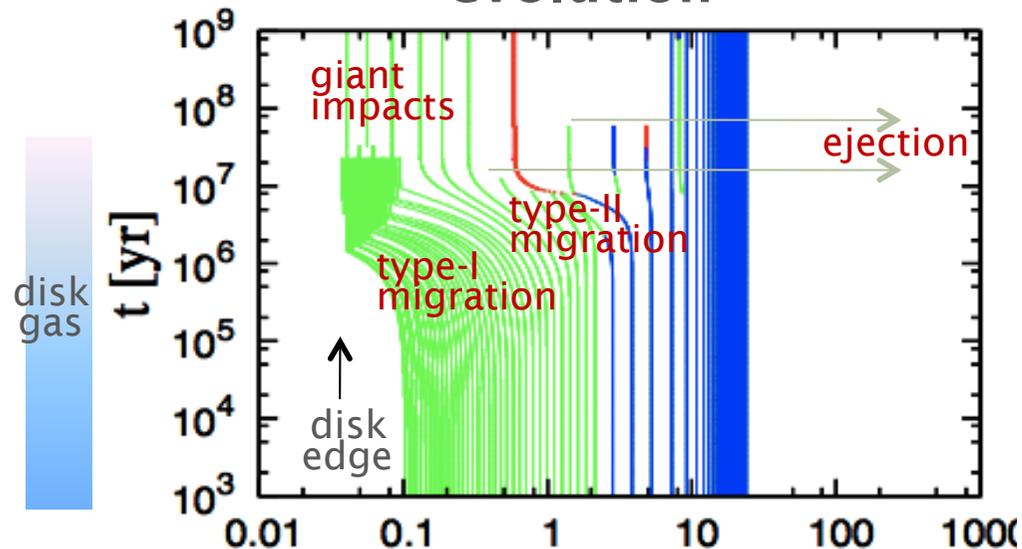
Ida & Lin (2004a,b,2005,2008a,b,2010), Mordasini et al. (2009a,b)

- 惑星形成の各過程をまとめ、観測と直接比較可能な系外惑星の分布導出
  - 観測データを説明、将来観測の予測、理論モデルの較正
  - 各過程の詳細数値計算を本質を残しつつ簡潔なモデル化をする
  - 惑星成長移動を積分し(決定論的過程)、確率論的過程を加える



# 統一化：1個の円盤での計算例

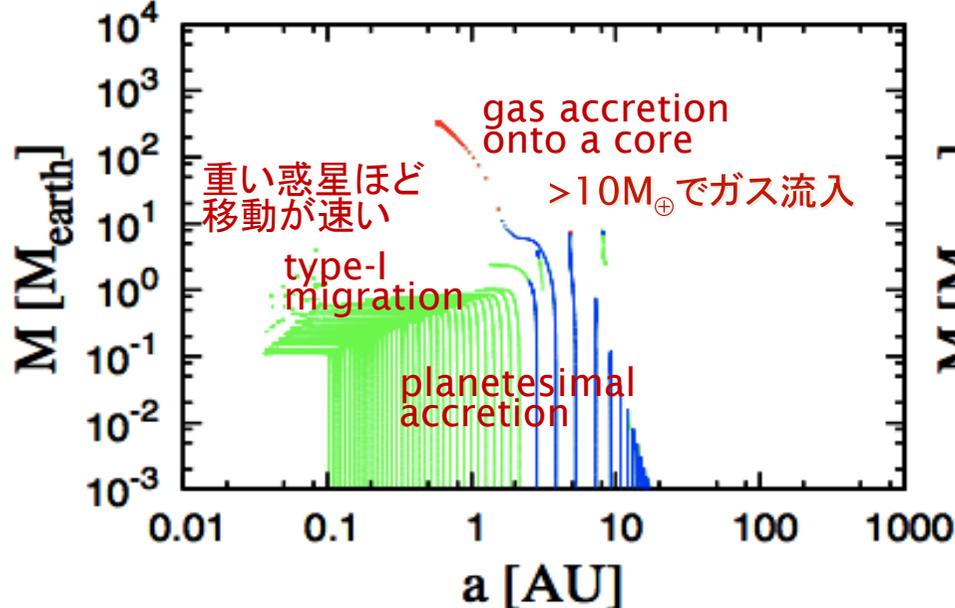
## evolution



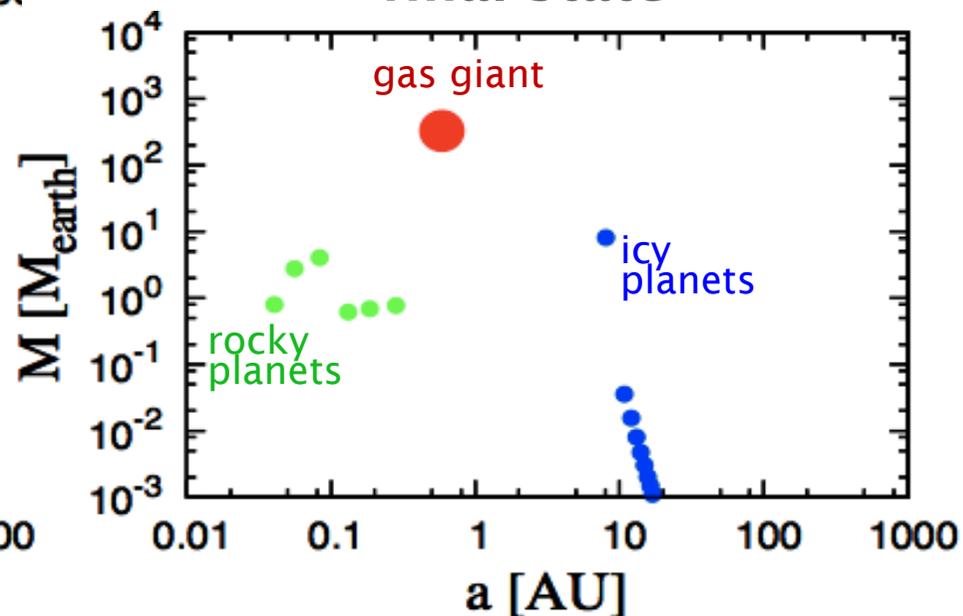
$$M_* = M_\odot$$

$$M_{\text{円盤}} = 0.03 M_\odot$$

type-I migration:  
 $C_1 = \dot{a} / \dot{a}_{\text{Tanaka}} = 0.1$



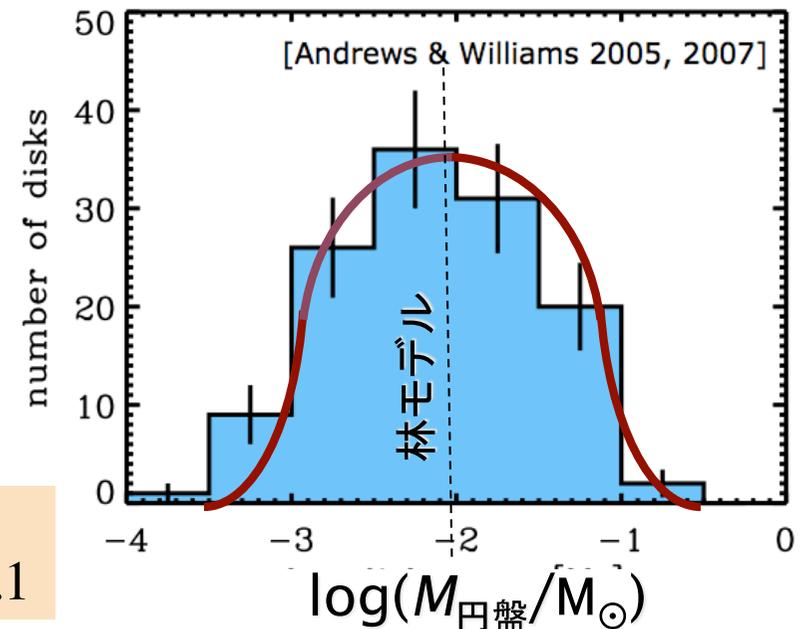
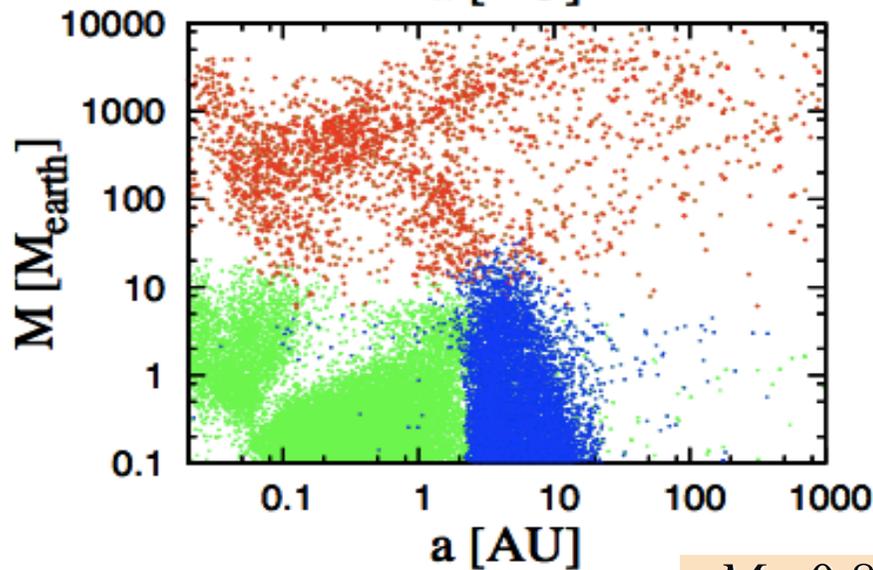
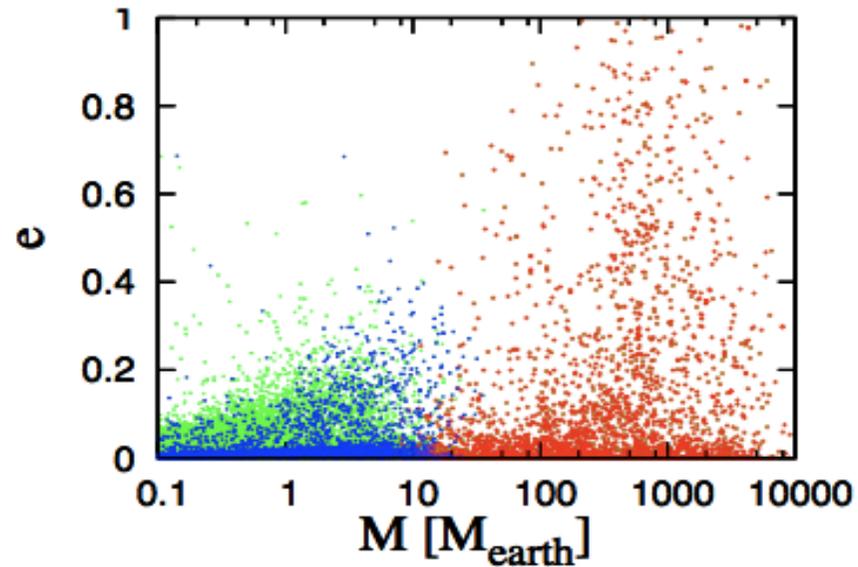
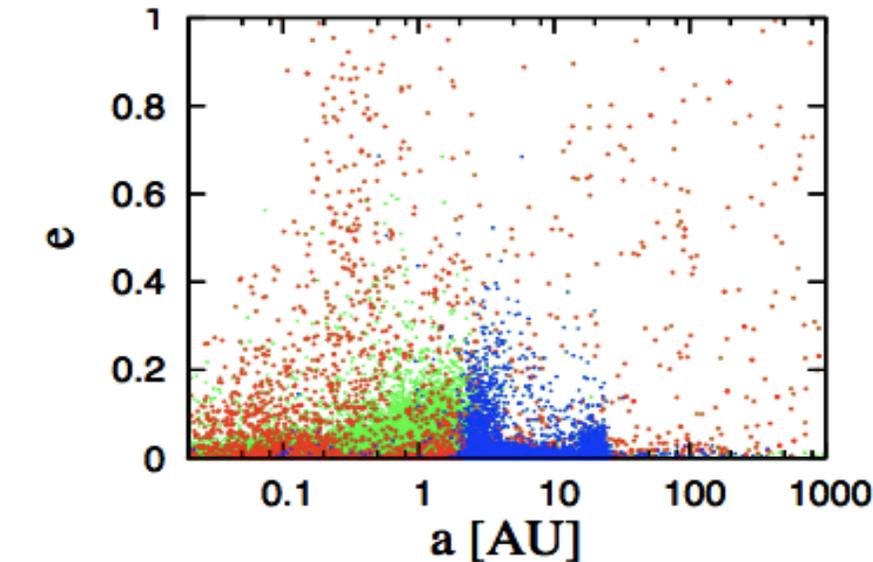
## final state



0.6 sec on Mac air

# 統一化：3000個の円盤の全惑星分布

Ida & Lin (in prep)



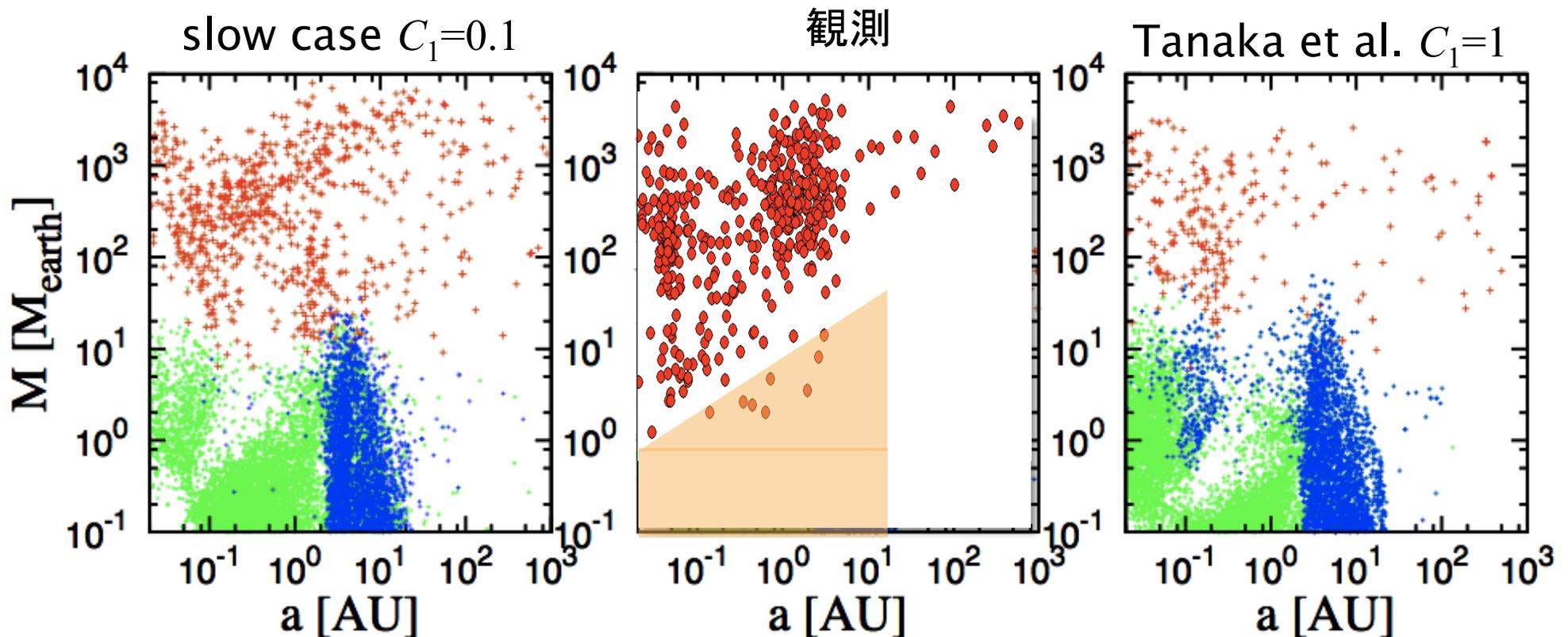
45 min on Mac air

$$M_* = 0.8 - 1.25 M_{\odot}$$
$$C_1 = \dot{a} / \dot{a}_{\text{Tanaka}} = 0.1$$

# 統一化：タイプ-I 惑星移動のテスト

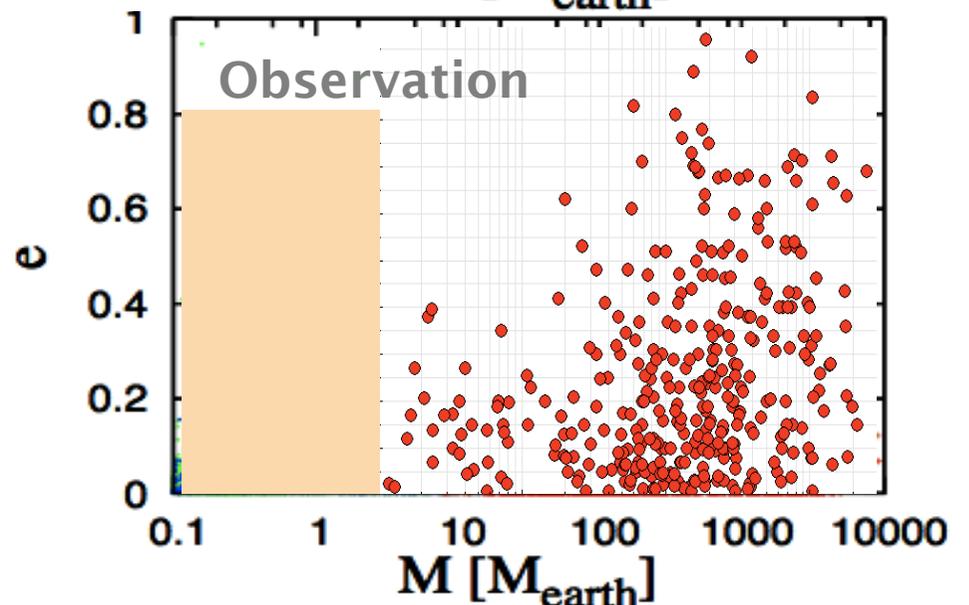
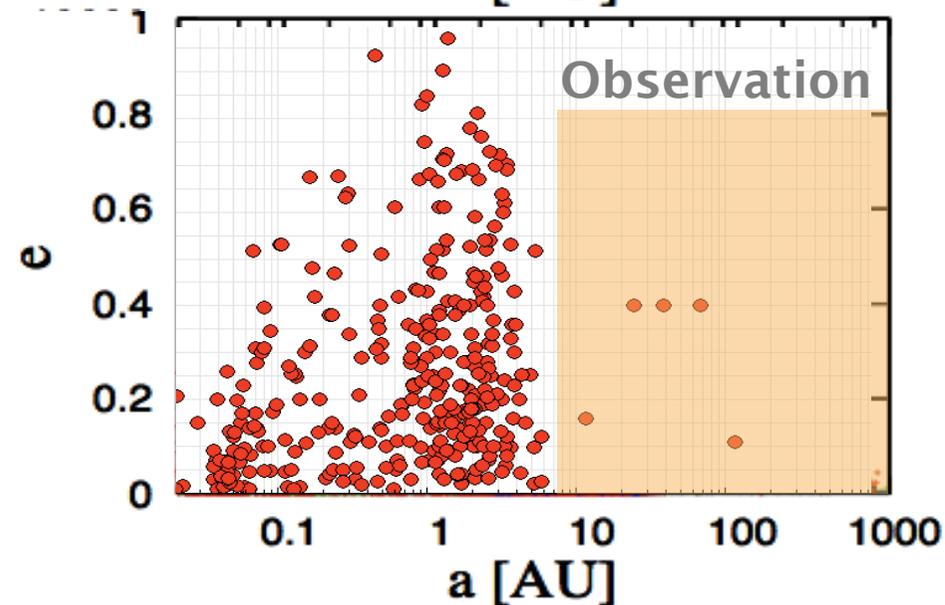
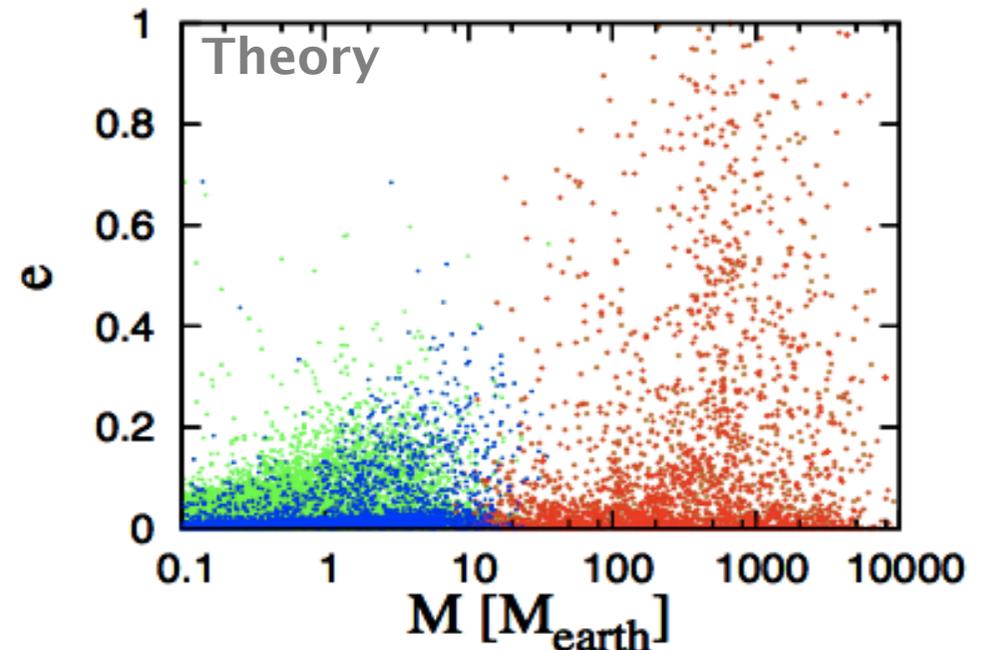
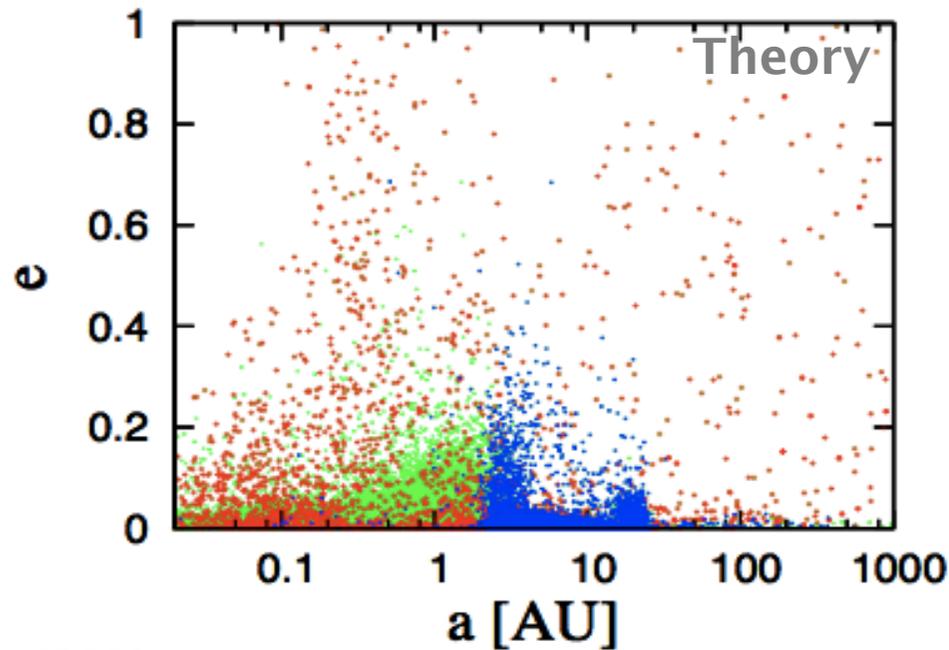
- Tanaka et al. formula ( $C_1=1$ )
  - 地球型惑星は  $> 1\text{AU}$  では残っている (multi-generation)
  - 明らかにガス惑星の存在確率が低い
- $C_1 < \sim 0.1$  or 外向き移動、trap が必要

$$C_1 = \dot{a} / \dot{a}_{\text{Tanaka}}$$



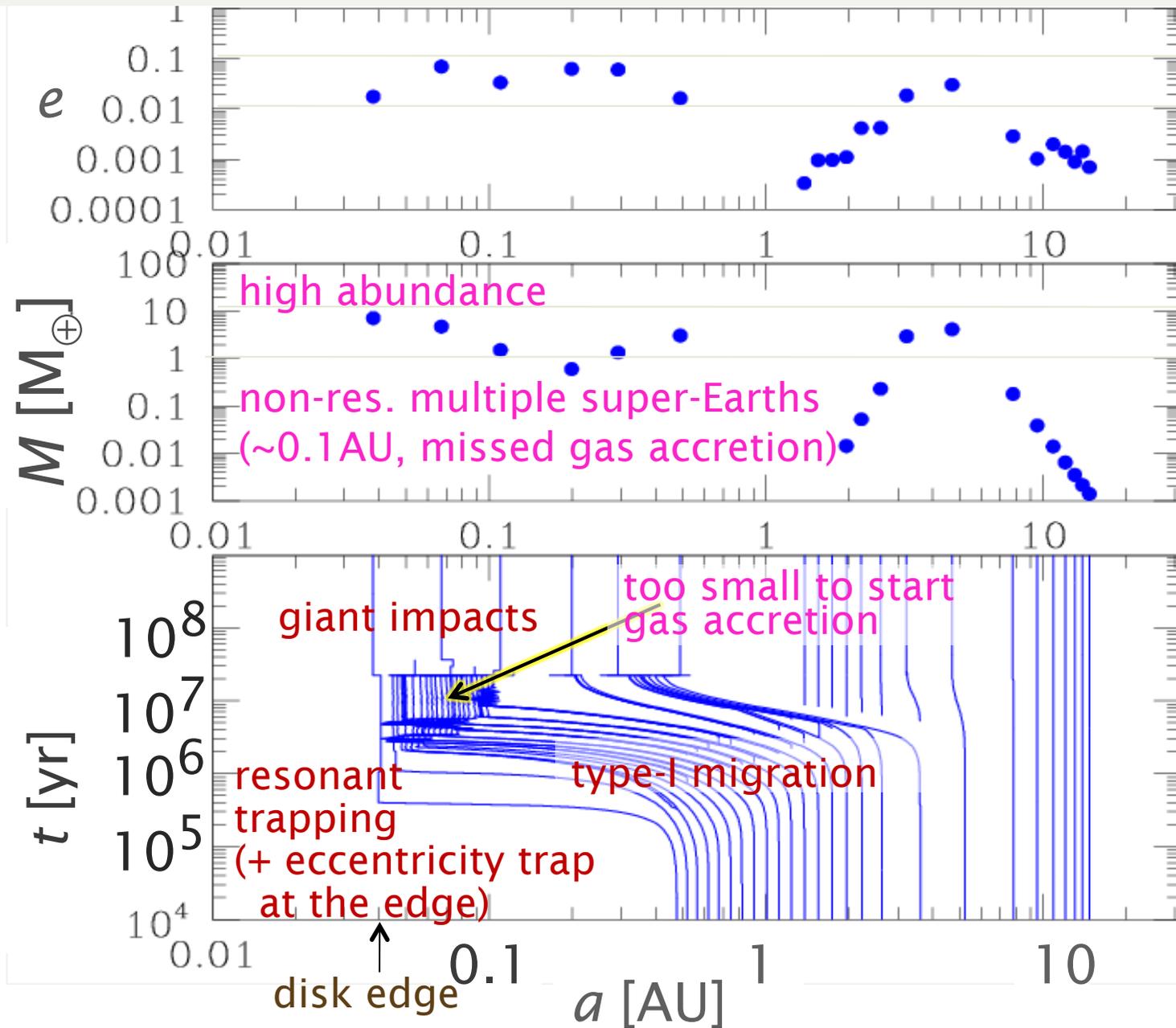
# 統一化：軌道不安定モデルのテスト

軌道不安定+タイプ-II惑星移動：軌道離心率の観測データを再現



# 短周期非共鳴複数super-Earthsの形成

## 観測データを再現



-  $C_1$ に依存しない  
 - 円盤質量が小さくても可能

$$\propto \exp\left(-\frac{t}{3 \times 10^6 \text{ y}}\right)$$

disk gas

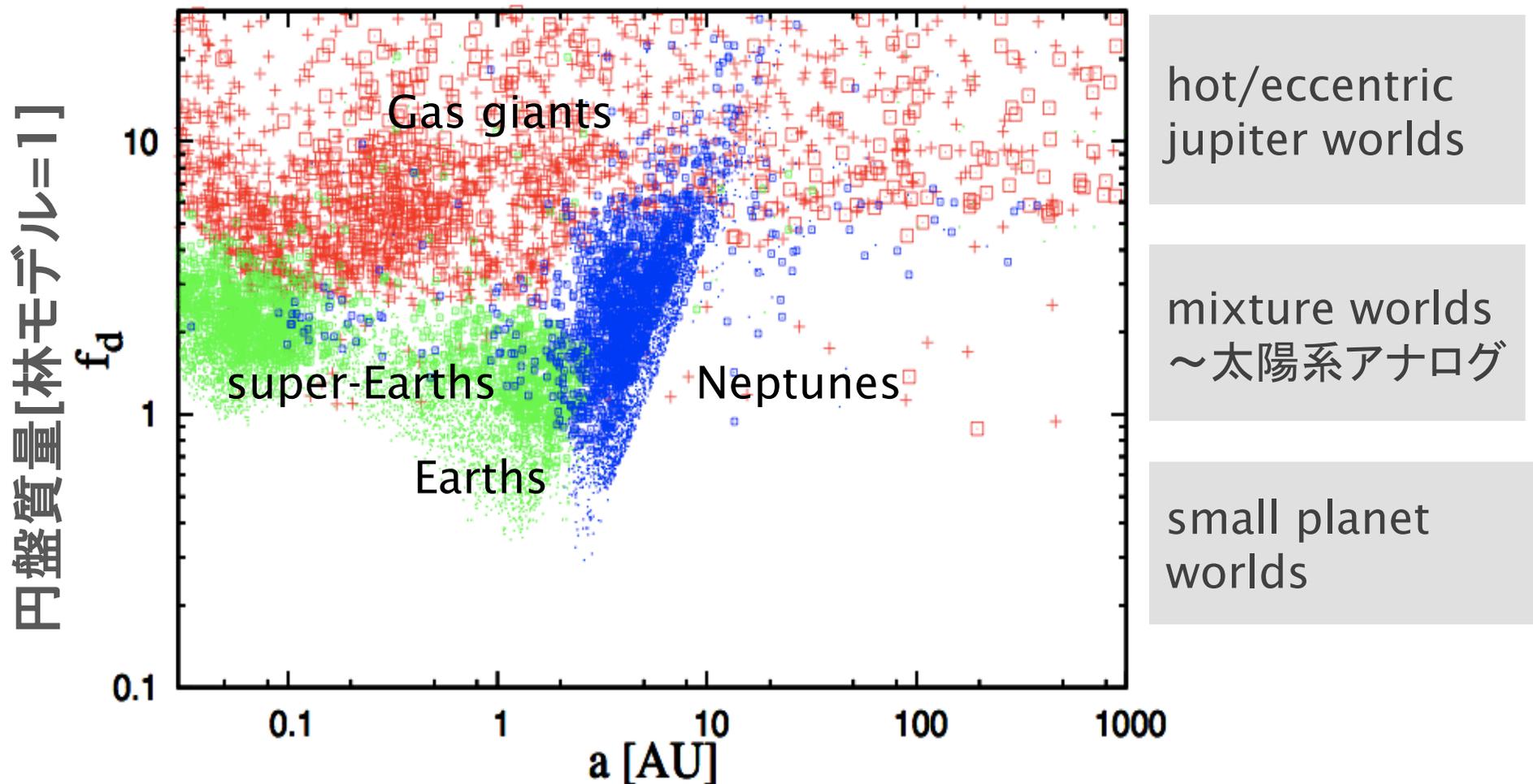
# 統一化：系外惑星の多様性の起源

Kokubo & Ida (2002), Ida & Lin (2008, in prep)

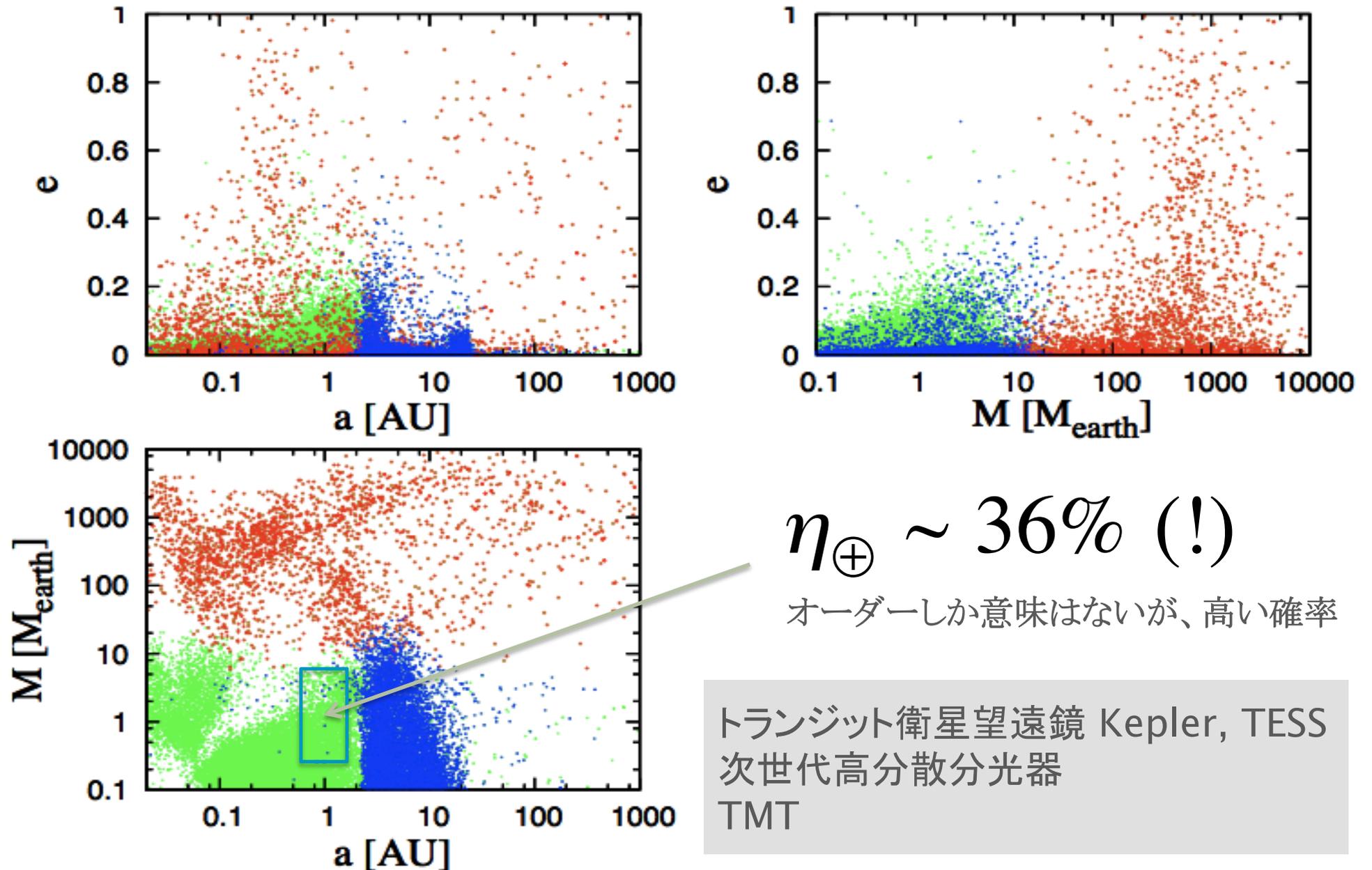
重い円盤：多数のガス惑星が軌道変化 → 他の惑星を除去

軽い円盤：Earthsもガス惑星コアも作れない

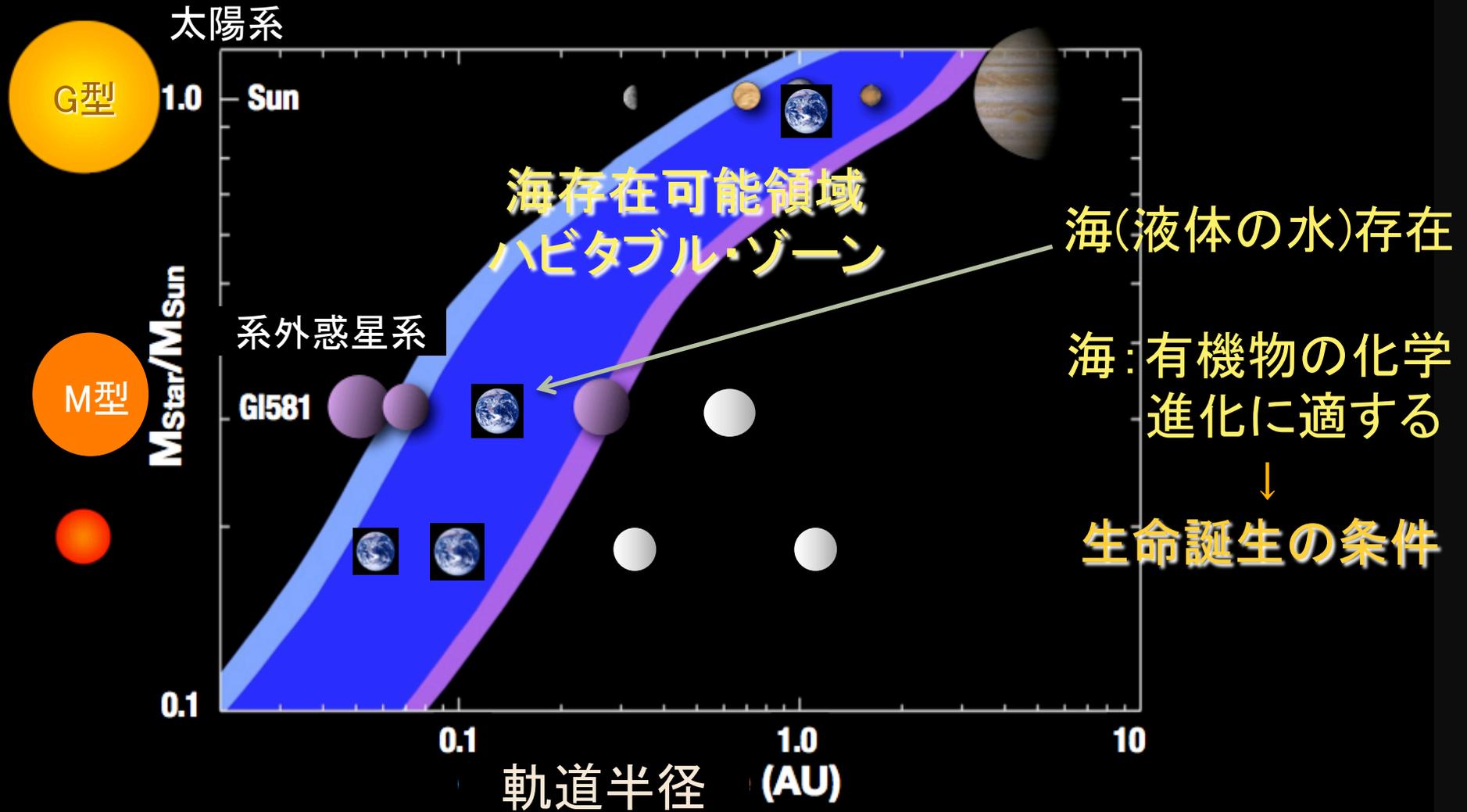
中間の円盤：ガス惑星の軌道変化なし → 共存



# これから : Habitable Planets



# Habitable Zone



Selsis et al., 2007

# これから：系外のEarthsのバイオマーカーの観測

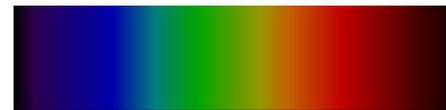
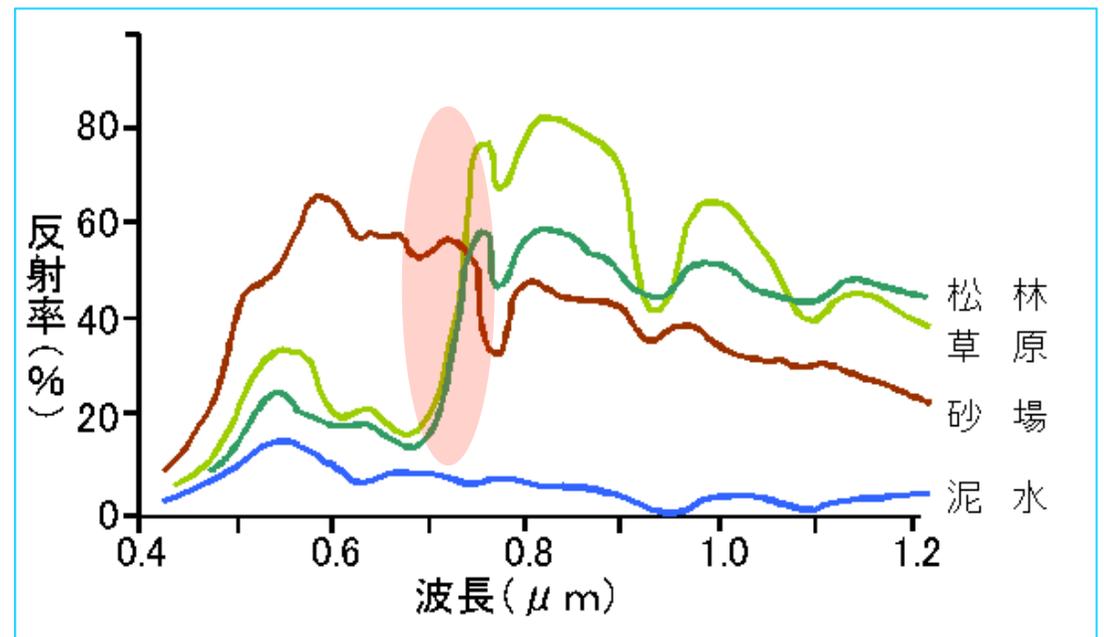
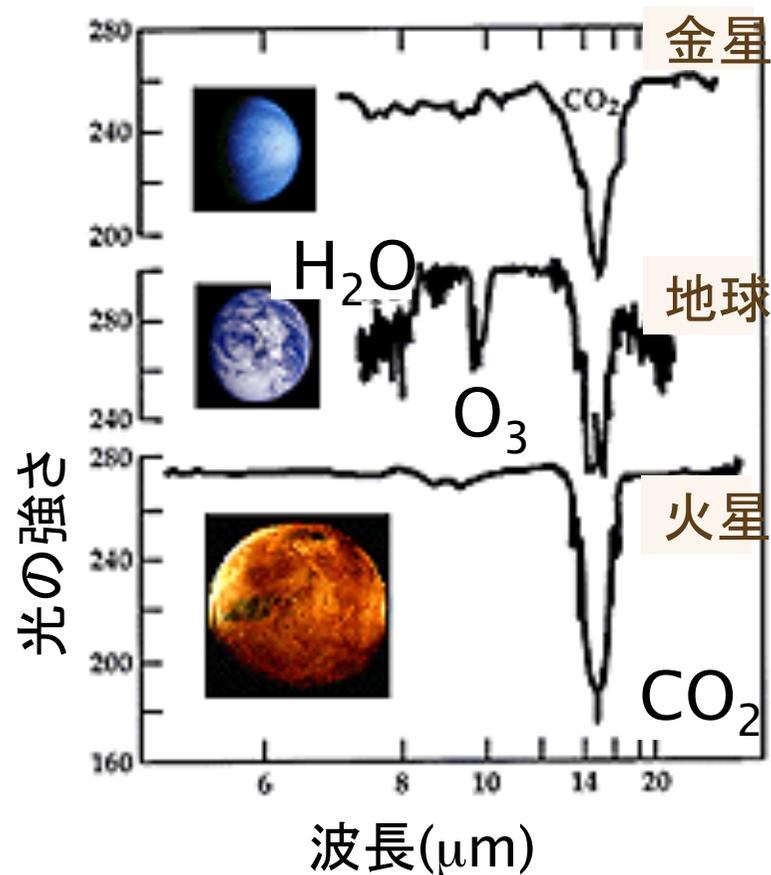
## 将来の赤外衛星望遠鏡での惑星大気分光観測

遠赤外での  $O_3$  吸収線

←→ 光合成生命(原核生物)?

近赤外での高反射 (レッドエッジ)

←→ 植物(高等陸上生物)?



# まとめ

- 観測の急進展
  - これまでの15年もこれからの15年も
- 新しい物理メカニズム:次々提案
  - 形成論の大幅拡大と混沌
  - 卒論、修論レベルで新メカニズム発見
- 集約/統一へ、観測と連携へ
  - Population synthesis model
- これから
  - 原始惑星系円盤が鍵
    - ALMA、大規模シミュレーションでどこまで迫れるか？
  - ハビタブル惑星
    - 地球科学、生物学との連携が必須
- 日本の現状:京都モデルの伝統は風前の灯火？
  - 欧米の急激な研究者人口増大に対して、理論研究グループは小さなものが東工大、名大にあるだけ...
  - 観測も水をあけられている... (HiCIAOに期待)