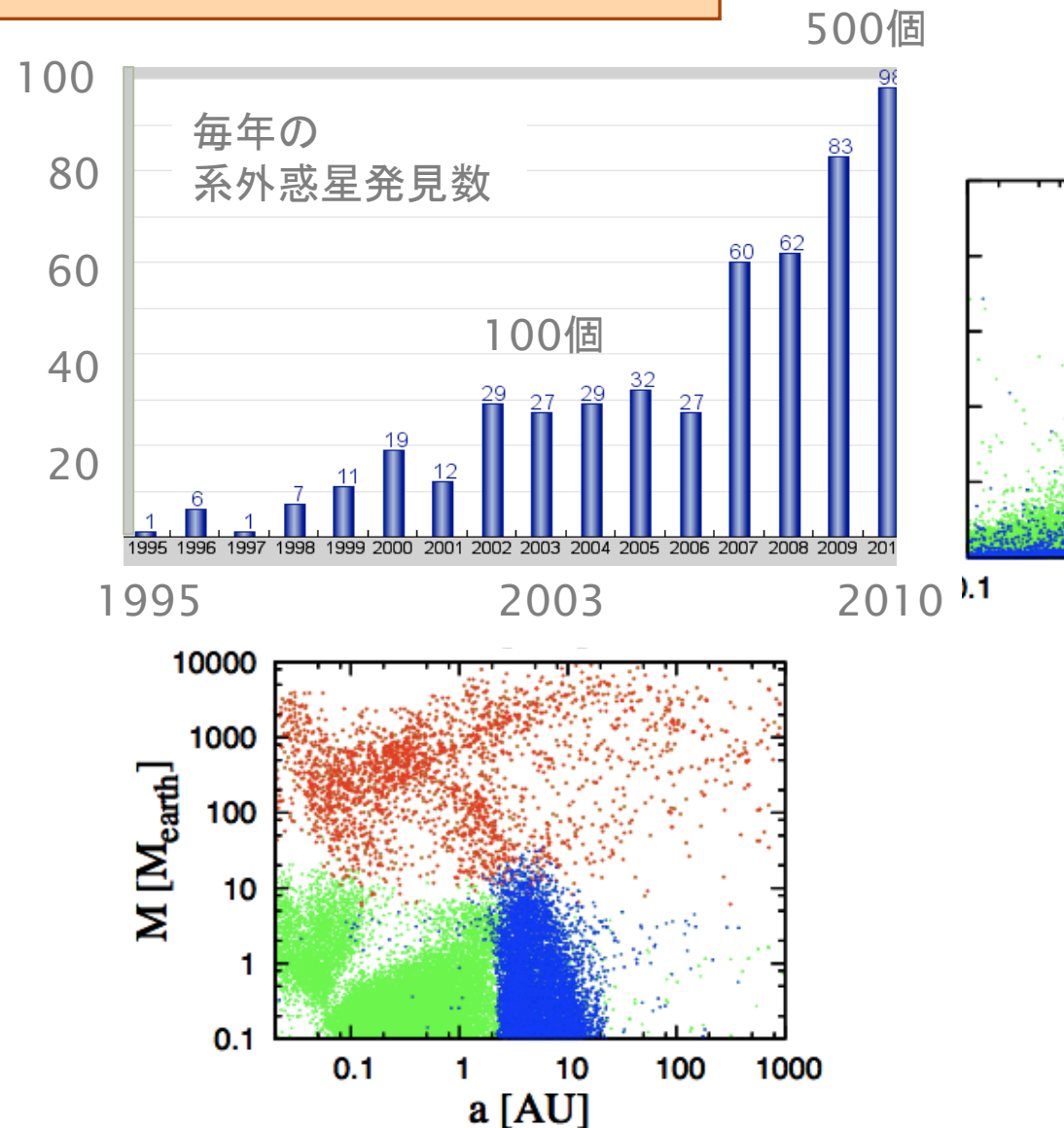


太陽系/系外惑星系形成論

井田 茂 (東工大)

Talk Outline

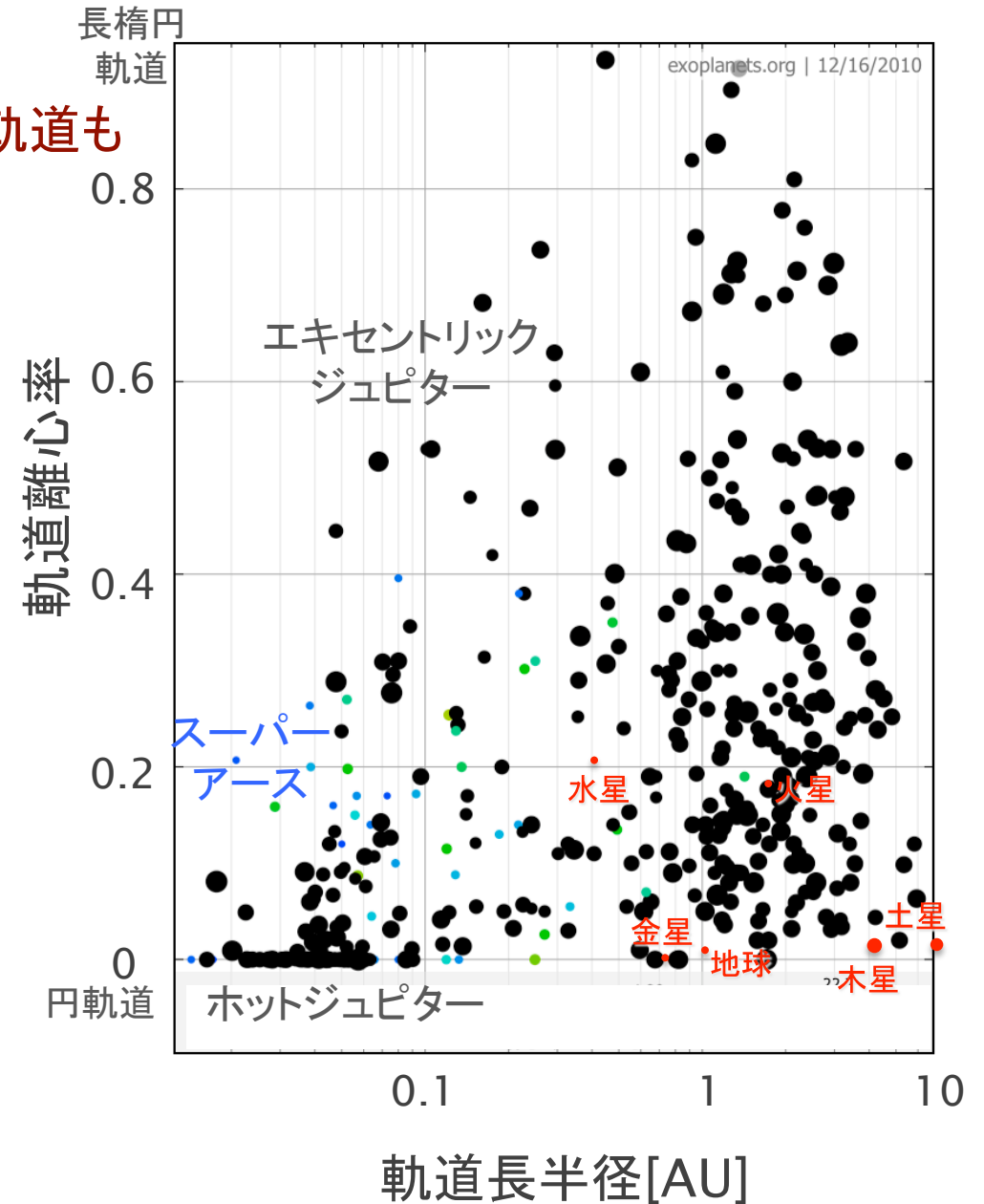
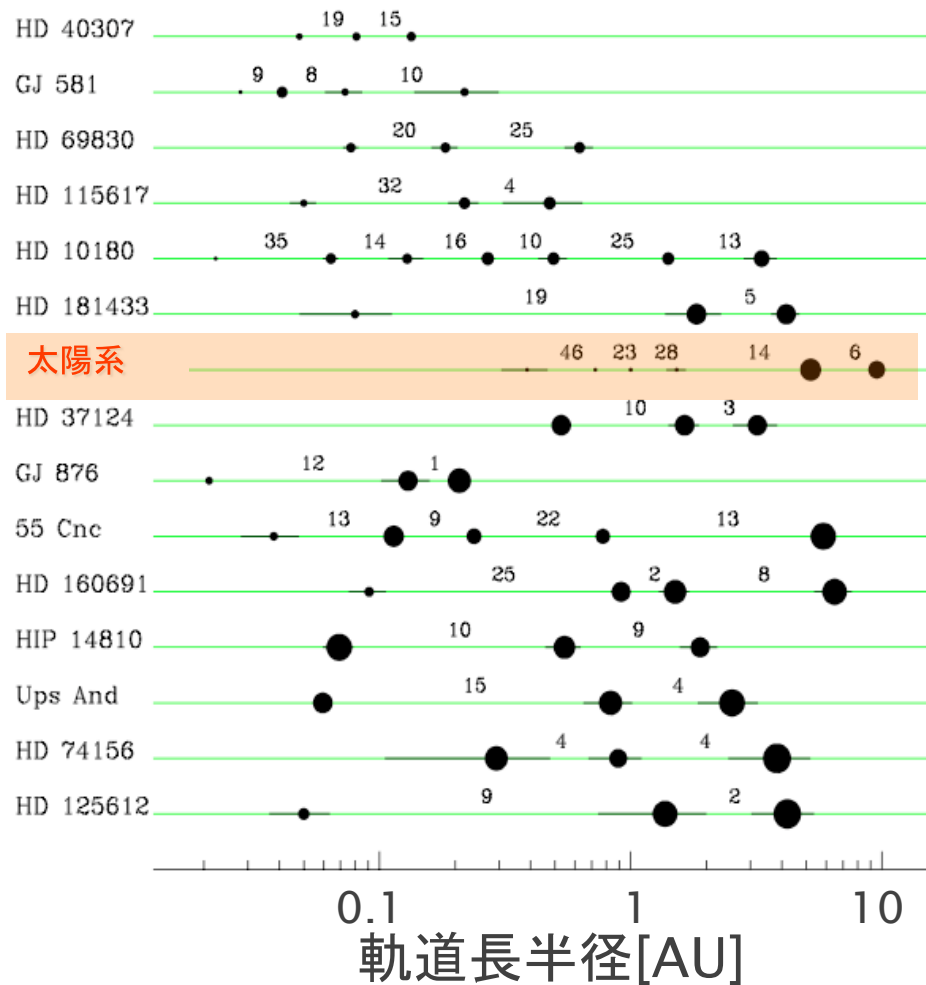
- 観測の進展
 - 遍在性と多様性
- 新しい物理メカニズム:次々提案
 - 形成論の大幅拡大と混沌
- 理論モデルの予言の観測実証
 - 中心星自転に逆行公転する惑星
 - 軌道、質量分布
- これから
 - 原始惑星系円盤の形成進化
 - 総合化、統一化
 - ハビタブル惑星を軸として生命へ



観測の進展

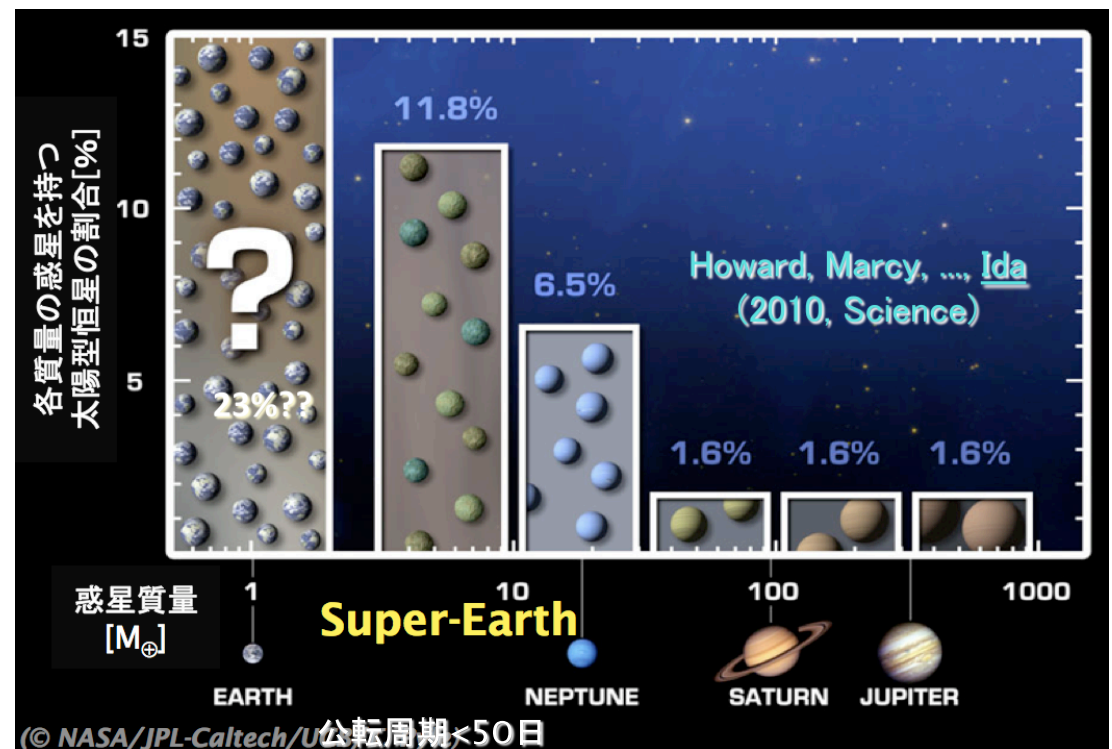
惑星系のアーキテクチャ

- ガス惑星、地球型惑星の個々の軌道も全体の配置も多様



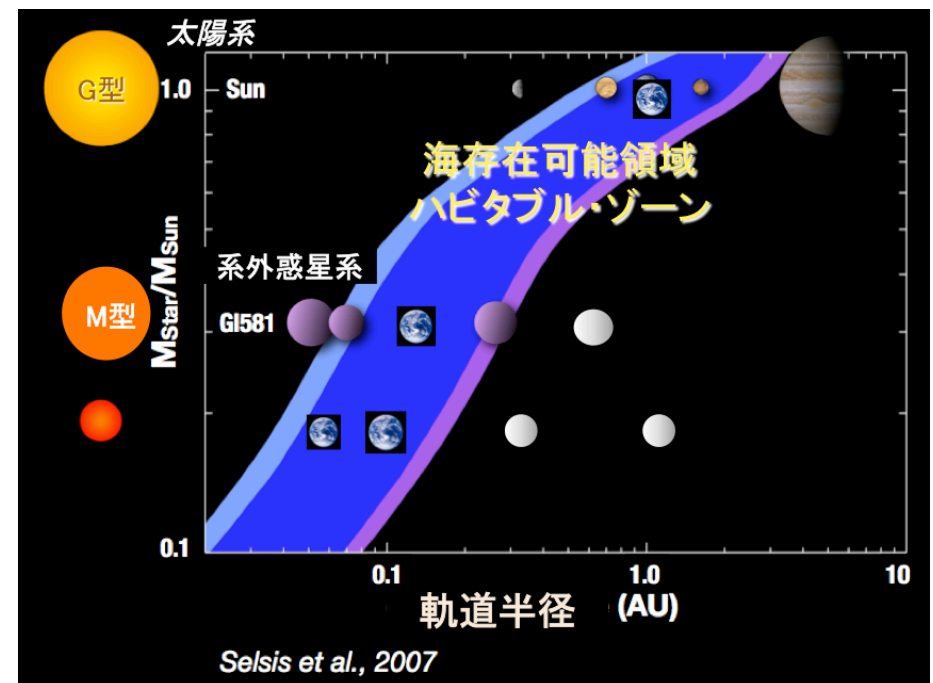
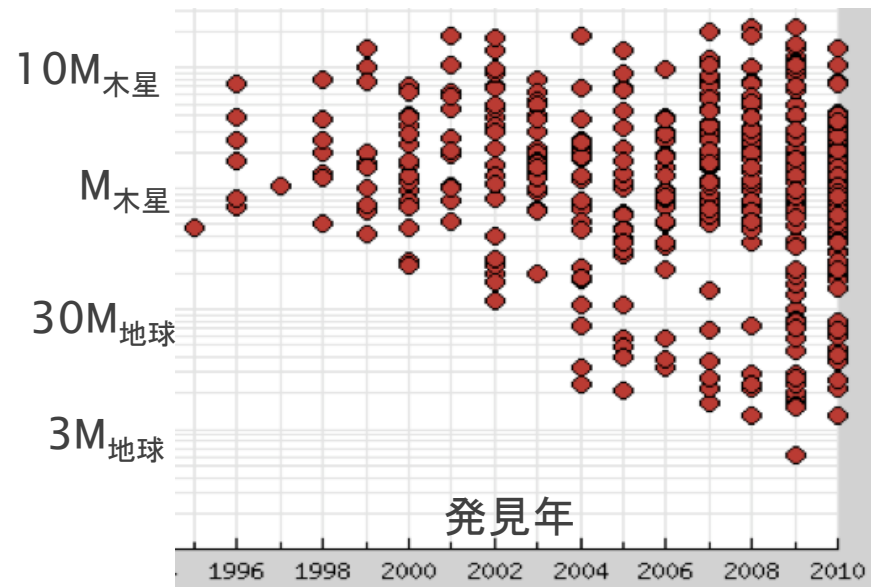
観測の進展

- 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



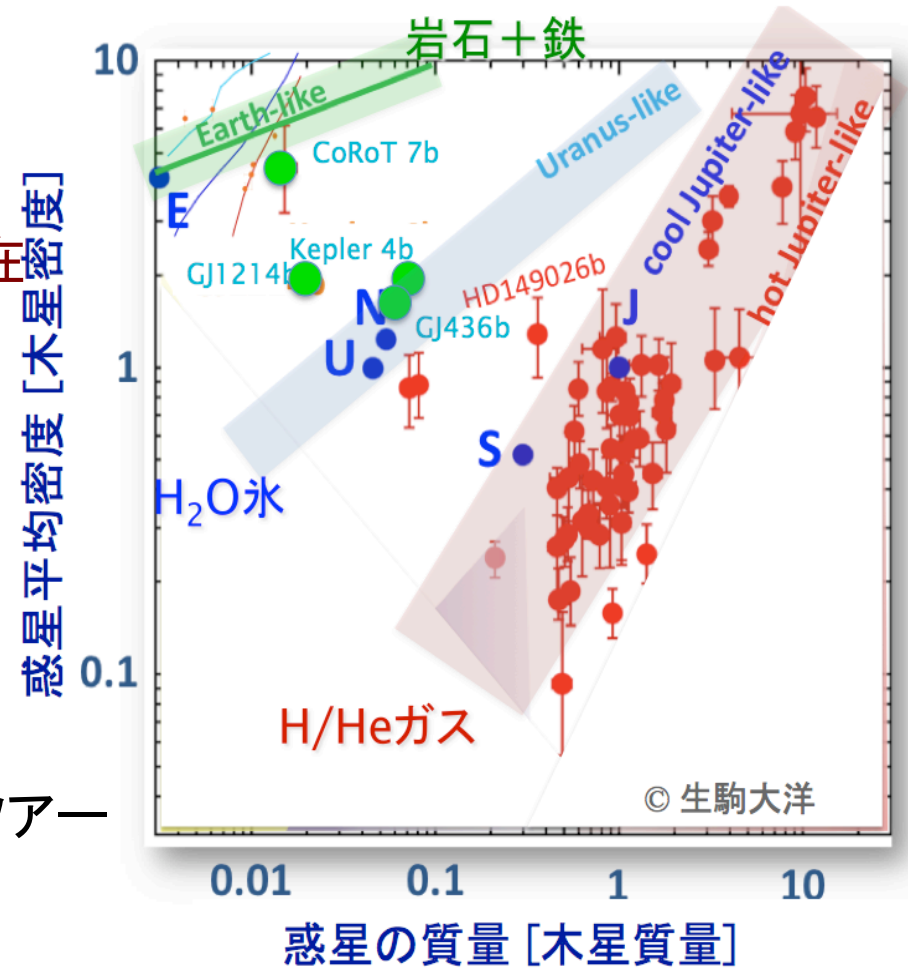
観測の進展

- 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

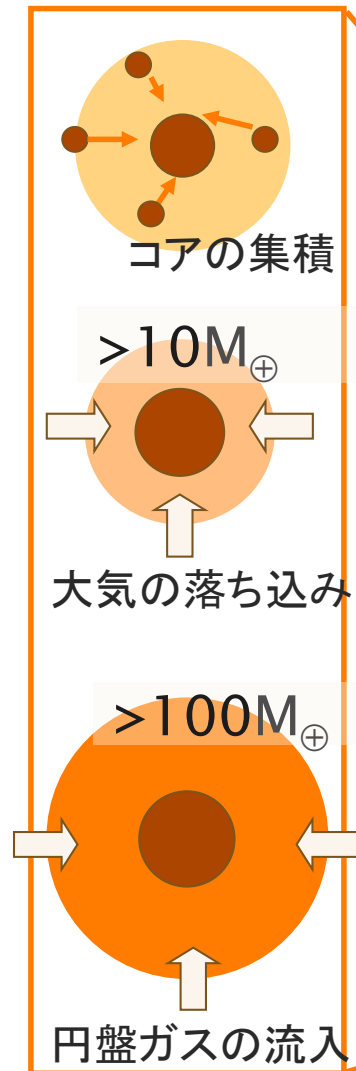
- 惑星系のアーキテクチャ
 - ガス惑星、地球型惑星の個々の軌道も全体の配置も多様
- 制御サンプルによる統計的議論
 - 太陽型星の20-40%以上に公転周期<50日の地球型惑星 - 遍在
- より小型惑星へ [中心星に近いもの] (super-Earths, Earthsへ)
 - 視線速度、トランジット、重力レンズ
 - M型星のハビタブル惑星 (e.g., GJ581c,g)
- 惑星組成、大気
 - 視線速度法+トランジット法、スピッツァー
- 恒星自転軸と惑星公転軸の傾き
 - 逆行惑星の発見



京都モデル - standard

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

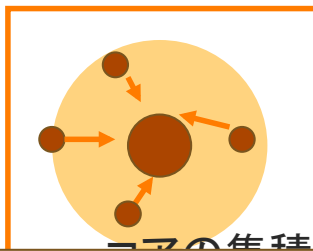
Mizuno process



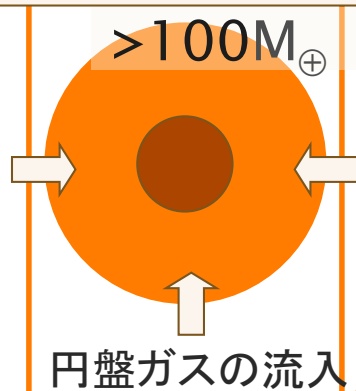
京都モデル - standard

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

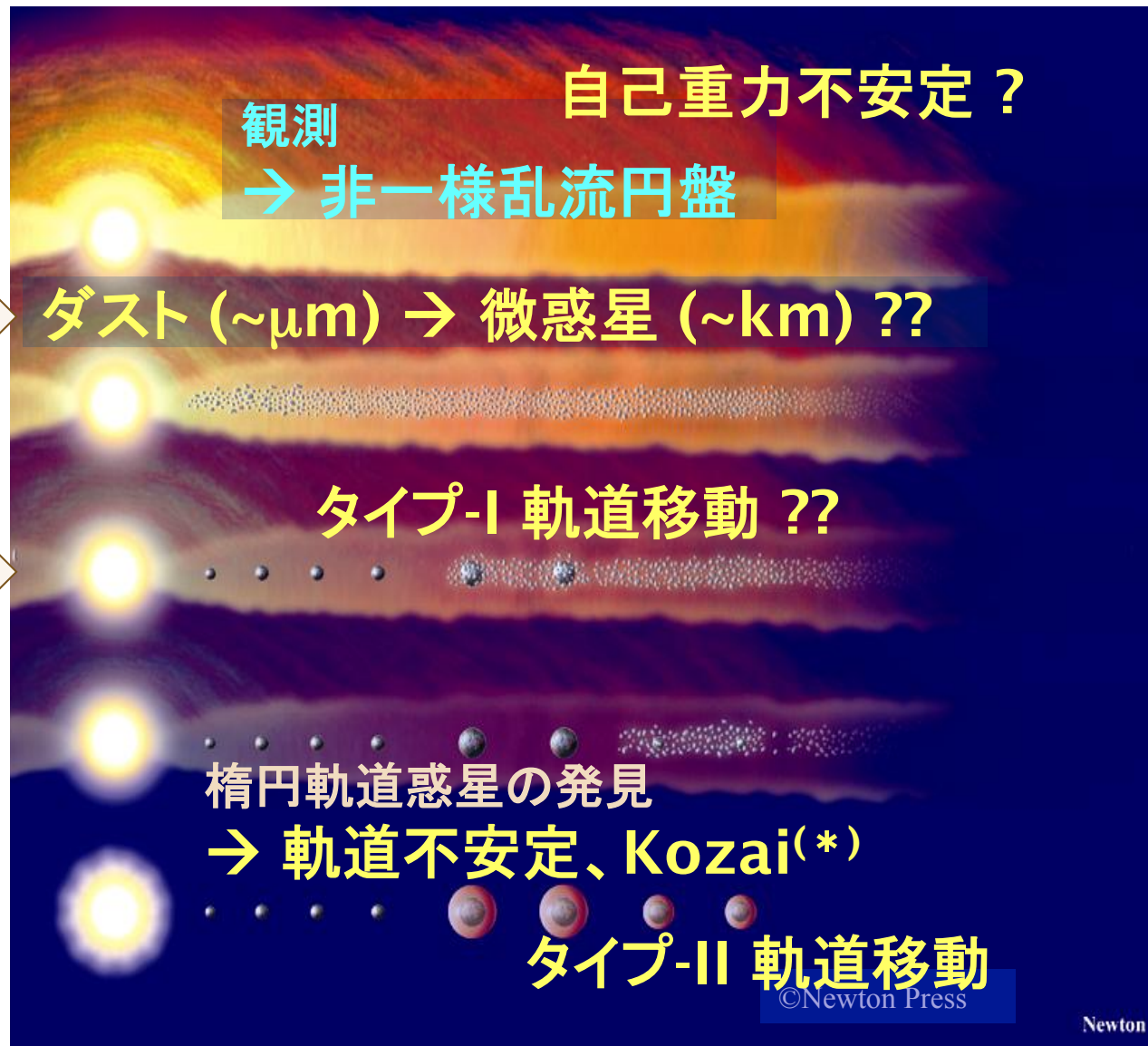
短周期系外惑星の発見
→ 内縁：潮汐, 磁場, 共鳴



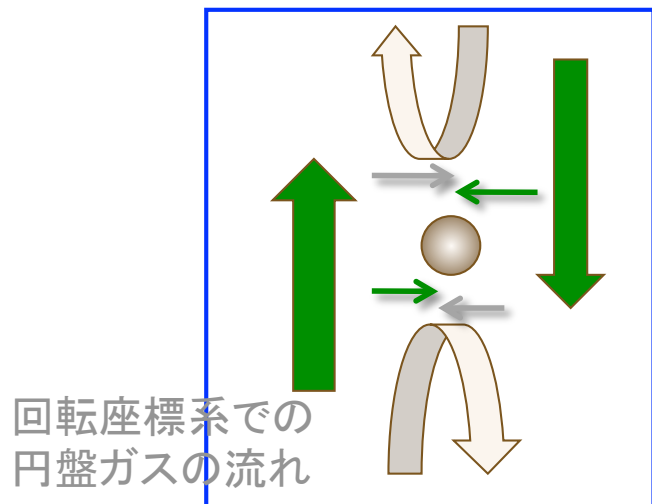
円盤乱流の観測
→ 微惑星形成問題
ダスト落下問題

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



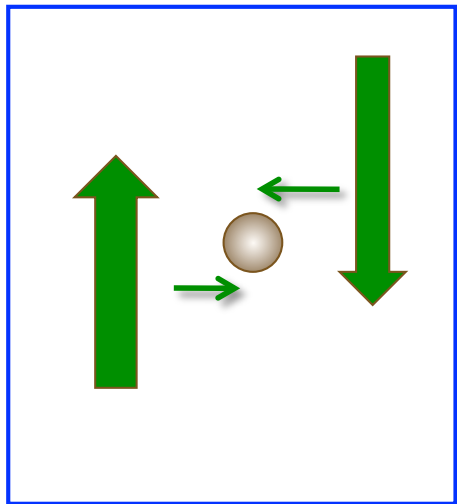
新たな物理：例 惑星軌道移動



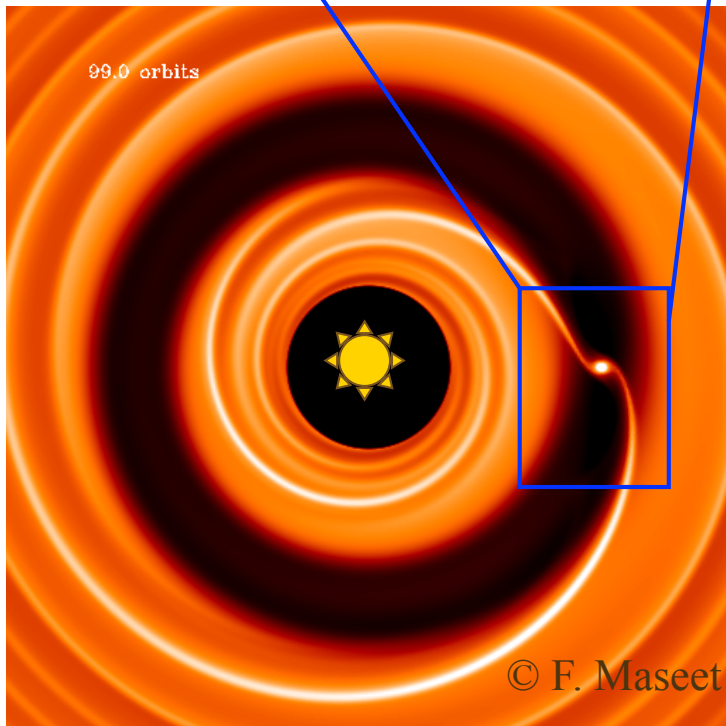
- $M_{\text{ガス}} \sim 100M_{\text{固体}}$
→ ガス円盤との重力相互作用で
惑星軌道変化
- 同じ程度の4つのトルクの
微妙な差し引きの残差で
惑星軌道変化
- 線形領域 ($M < 10M_{\oplus}$)
Tanaka, Takeuchi, Ward (2002)
必ず内向移動 高速
→ $1M_{\oplus}$ @1AUの地球
 $10M_{\oplus}$ @5AUの木星コア
< 10^5 yr で落下! [\leftrightarrow 円盤寿命 $> 10^6$ yr]
惑星落下問題

192.0 orbits

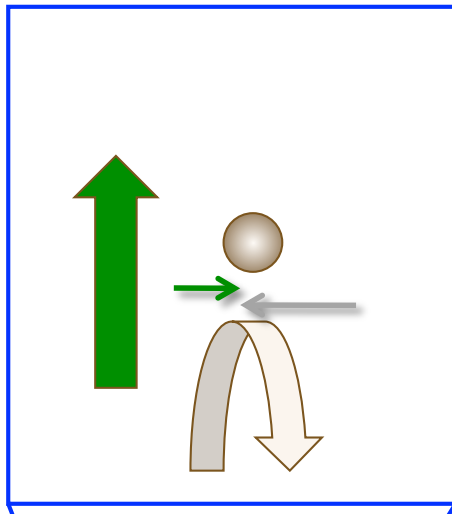
新たな物理：例 惑星軌道移動



- 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)



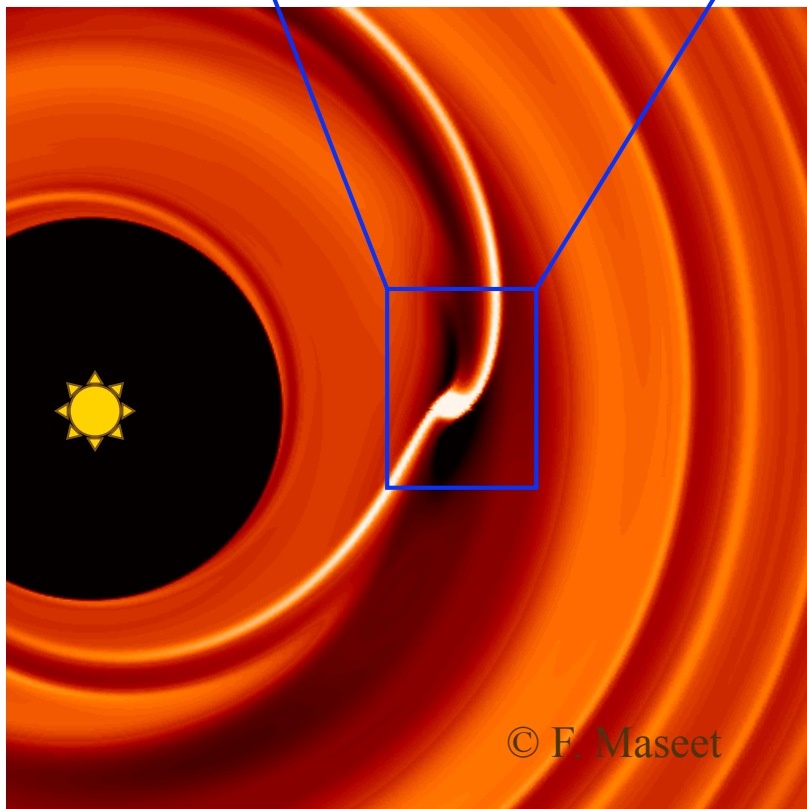
新たな物理：例 惑星軌道移動



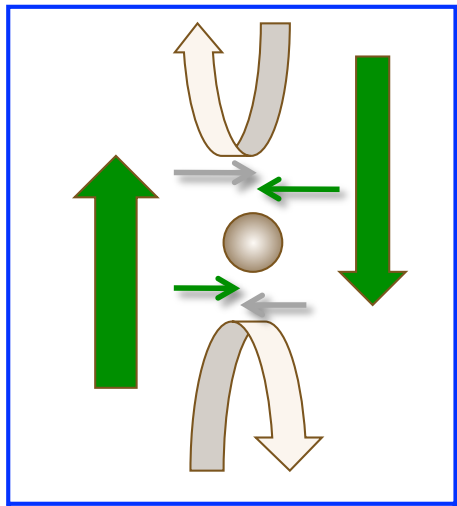
- 線形領域 ($M < 10M_{\oplus}$) タイプ I
必ず**内向移動 高速**
- 非線形領域 ($M > 50M_{\oplus}$) タイプ II
惑星重力でギャップ形成
→ 円盤降着と共に**ゆっくり内向移動**
- 非線形領域 ($M \sim 30M_{\oplus}$) タイプ III
不完全ギャップ
→ **極めて高速 内向or外向移動**
Artymowicz (2004) (予測不可能)

*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**

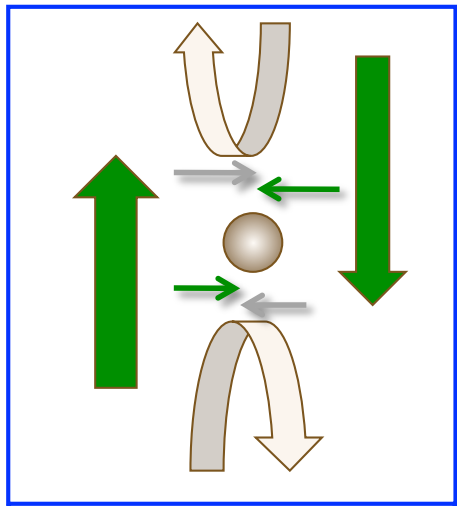
円盤の温度分布、光学的厚さ(ダスト成長)
MRI乱流状態などで、移動方向は変わる

- 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

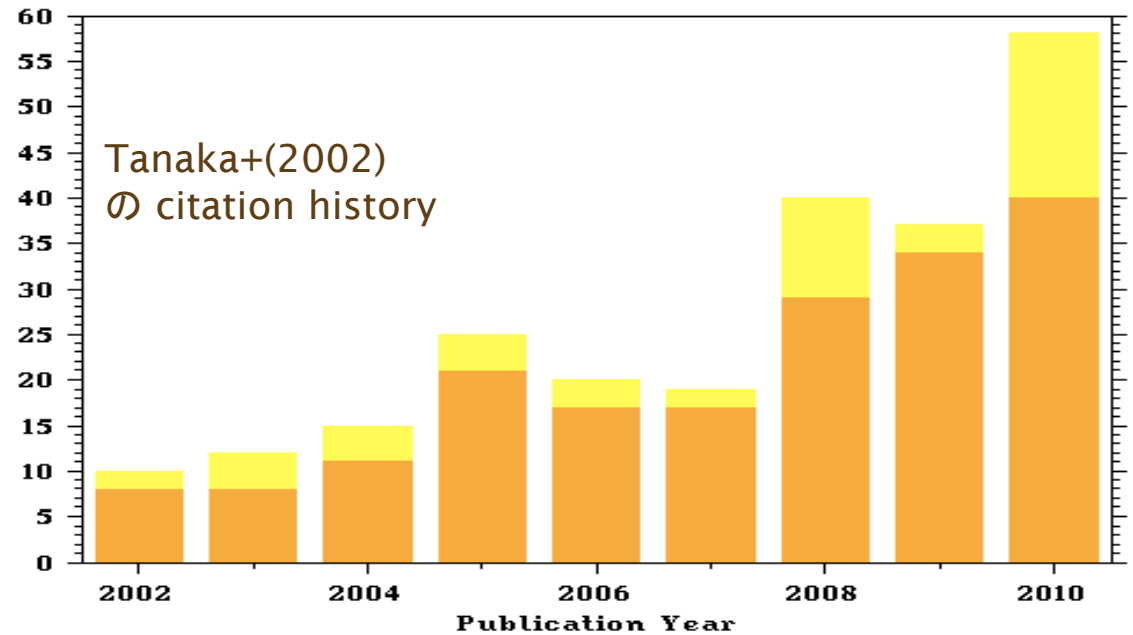
新たな物理：例 惑星軌道移動



■ 線形領域 ($M < 10M_{\oplus}$) タイプ I

Tanaka, Takeuchi, Ward (2002)

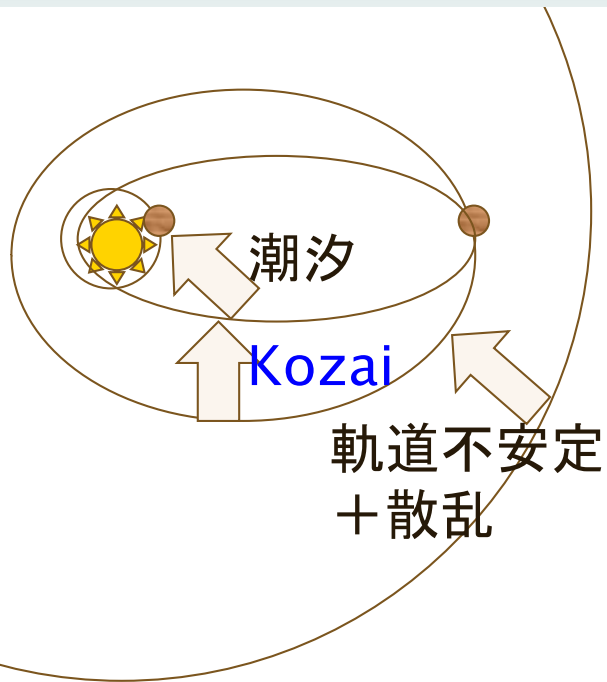
Citations/Publication Year for 2002ApJ...565.1257T



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

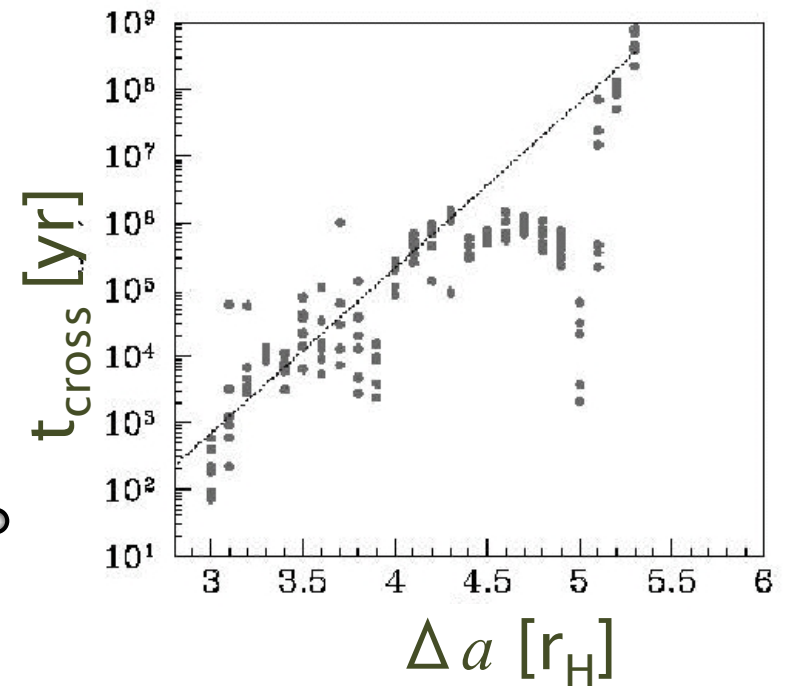
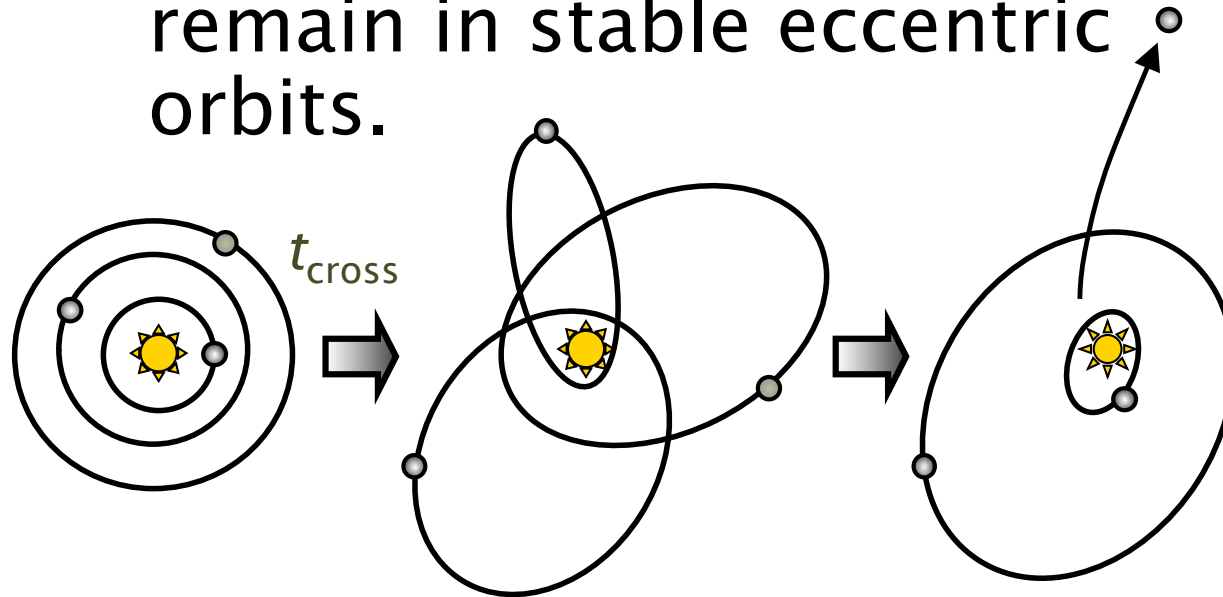
➤ 逆行のホットジュピターも形成！

[予言後1年で続々発見！ e.g., Narita+(2009)]

Origin of eccentric jupiters

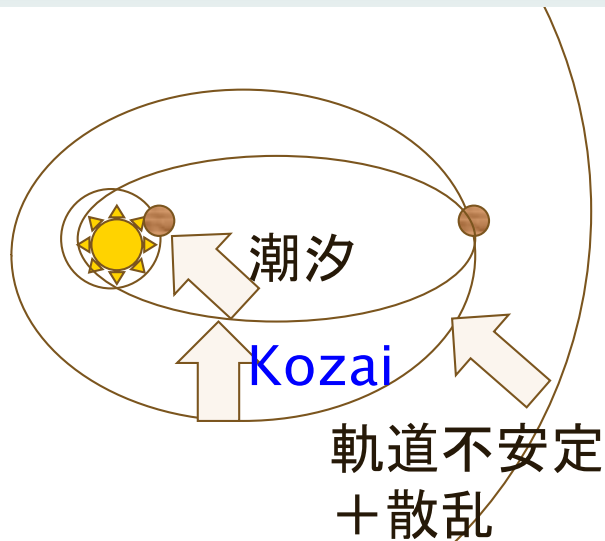
Weidenschilling & Marzari (1996), Lin & Ida(1997),...

- If more than 3 giant planets form on circular orbits
- Orbit crossing starts on τ_{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？

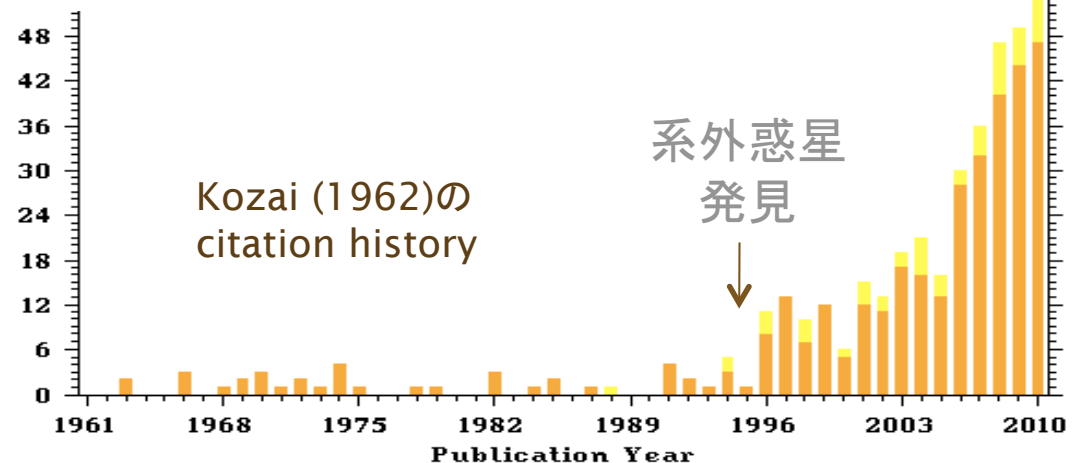
➤ Nagasawa process？

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)

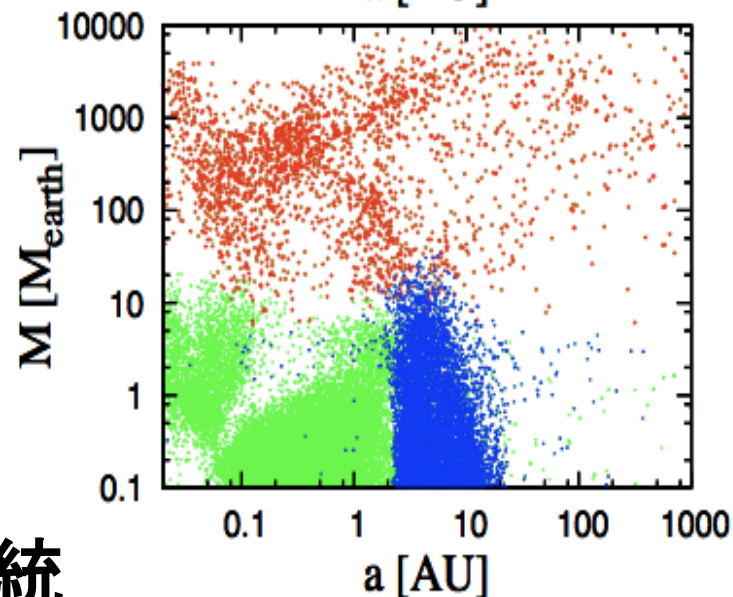
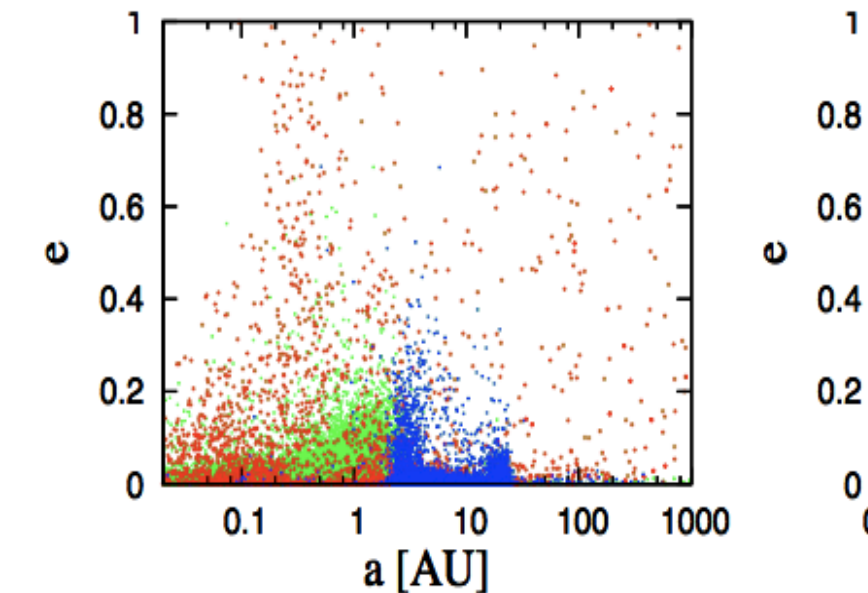
- 惑星形成の各過程をつなぎ、観測と直接比較可能な系外惑星の分布導出
 - 観測データを説明、将来観測の予測、理論モデルの較正
 - 各過程の詳細数値計算を本質を残しつつ簡潔なモデル化をする
 - 惑星成長移動を積分し(決定論的過程)、確率論的過程を加える

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

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

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

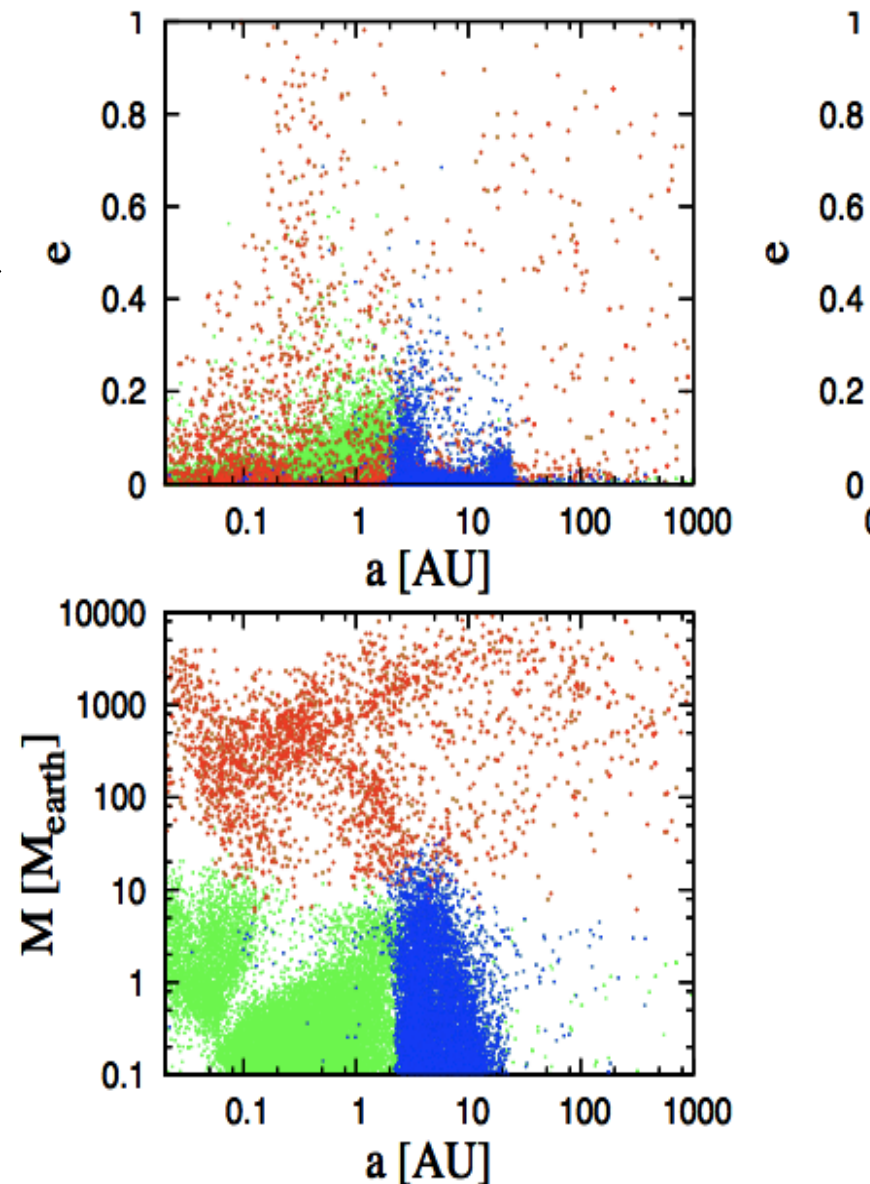
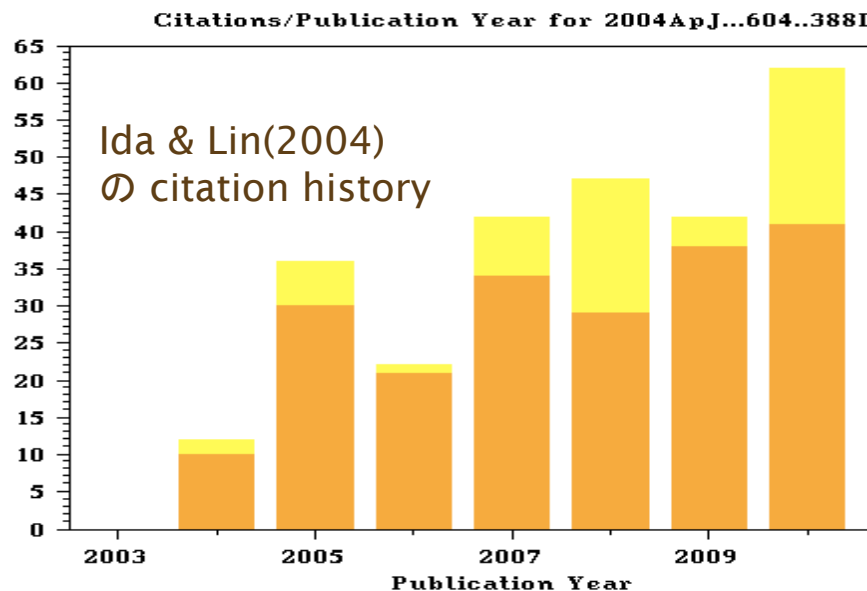
京都モデルの伝統



統一化：Population synthesis model

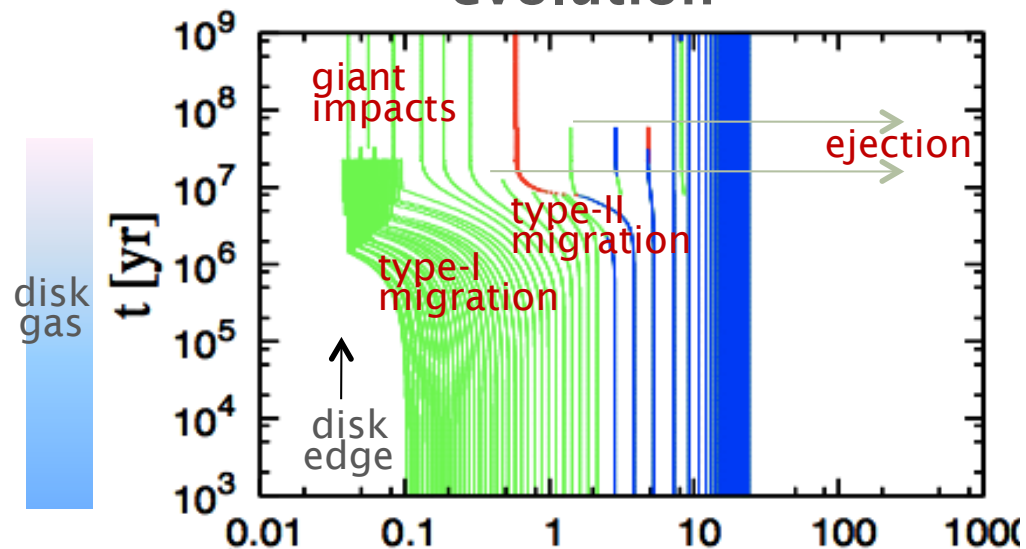
Ida & Lin (2004a,b,2005,2008a,b,2010), Mordasini et al. (2009a,b)

- 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

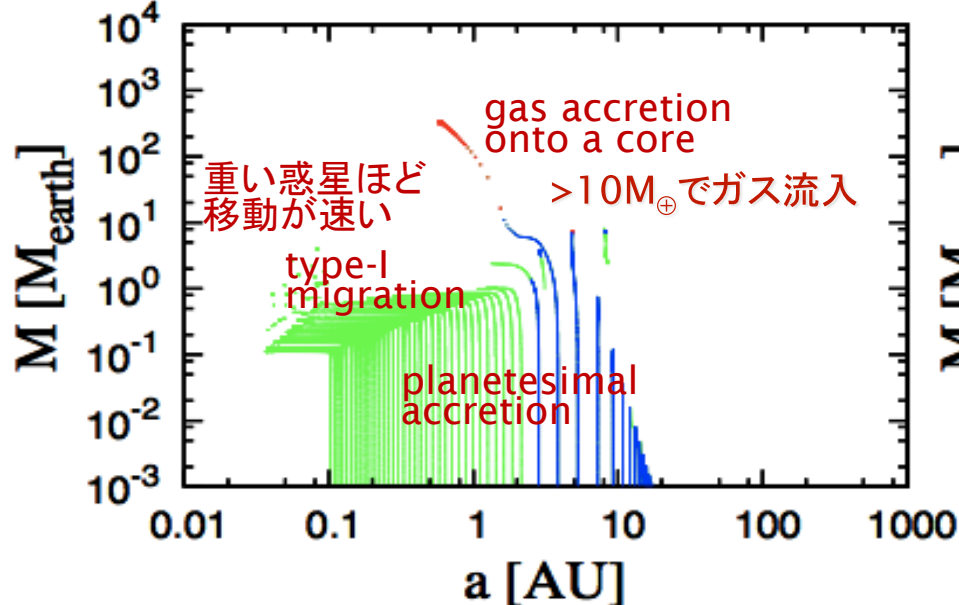
evolution



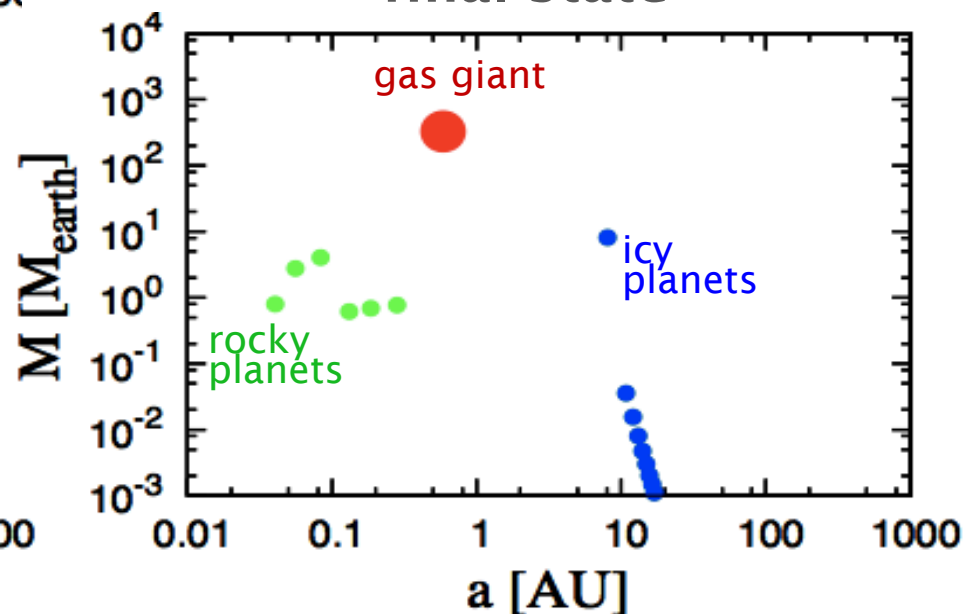
$$M_* = M_\odot$$

$$M_{\text{円盤}} = 0.03 M_\odot$$

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



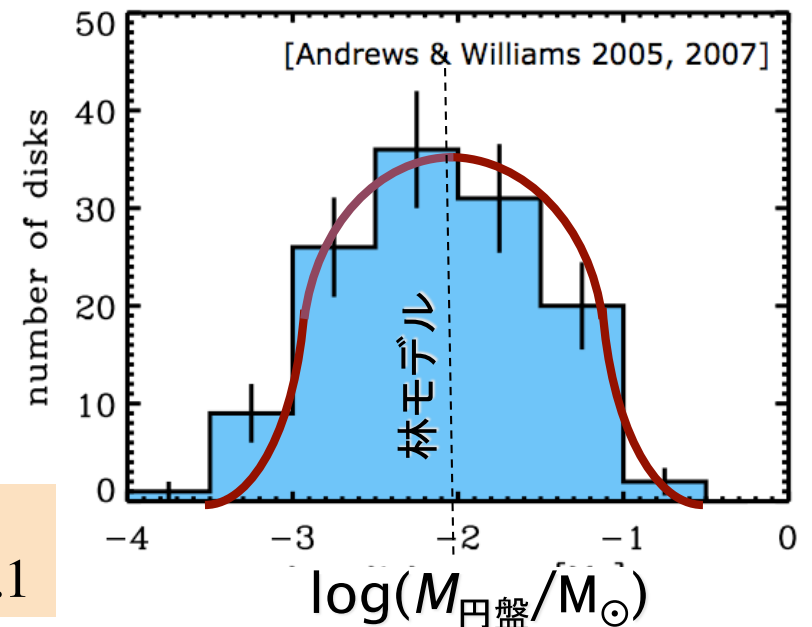
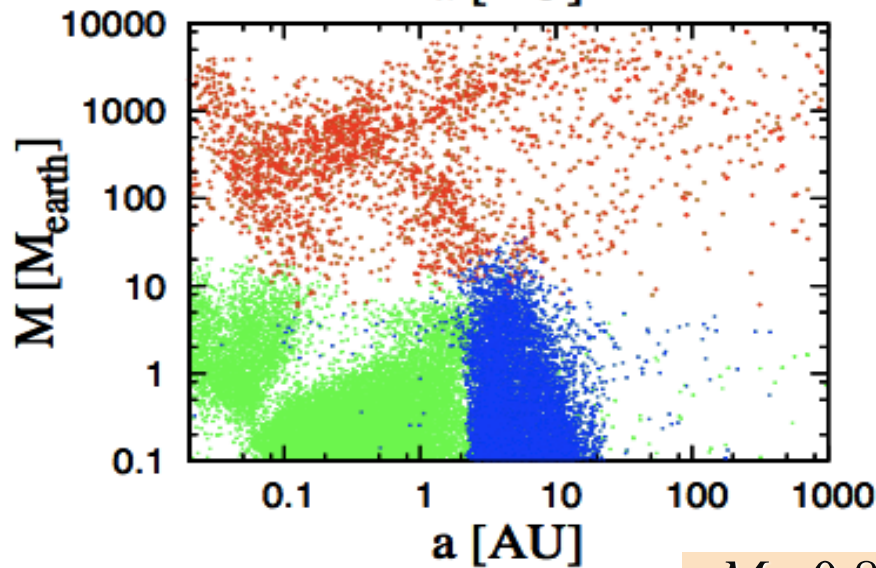
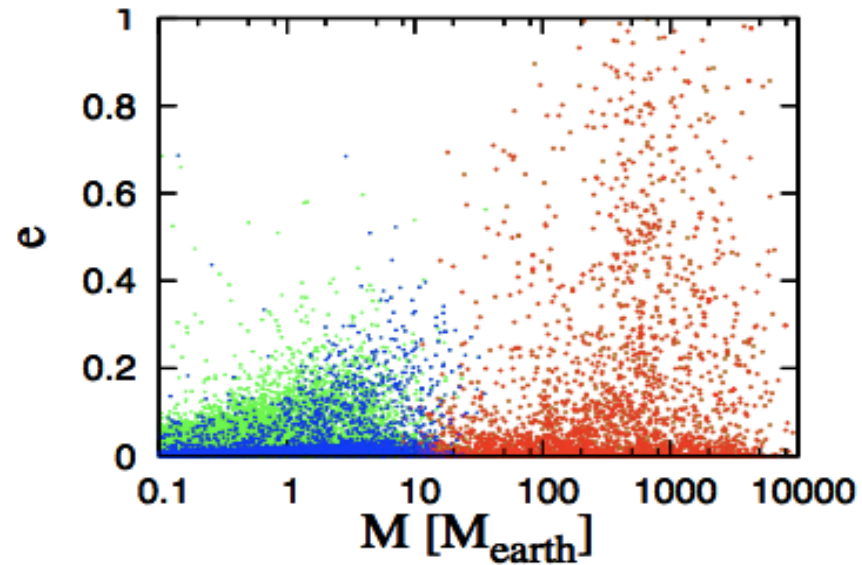
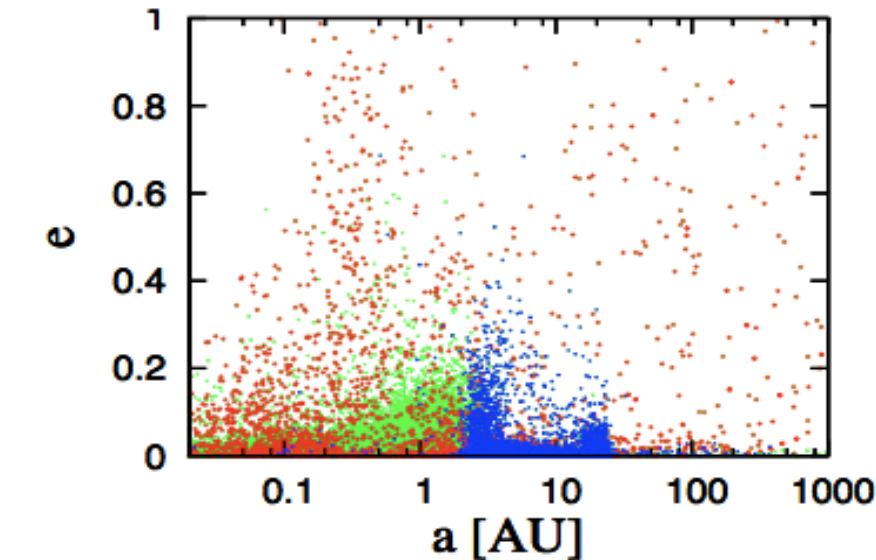
final state



0.6 sec on Mac air

統一化：3000個の円盤の全惑星分布

Ida & Lin (in prep)



$$M_* = 0.8 - 1.25 M_{\odot}$$

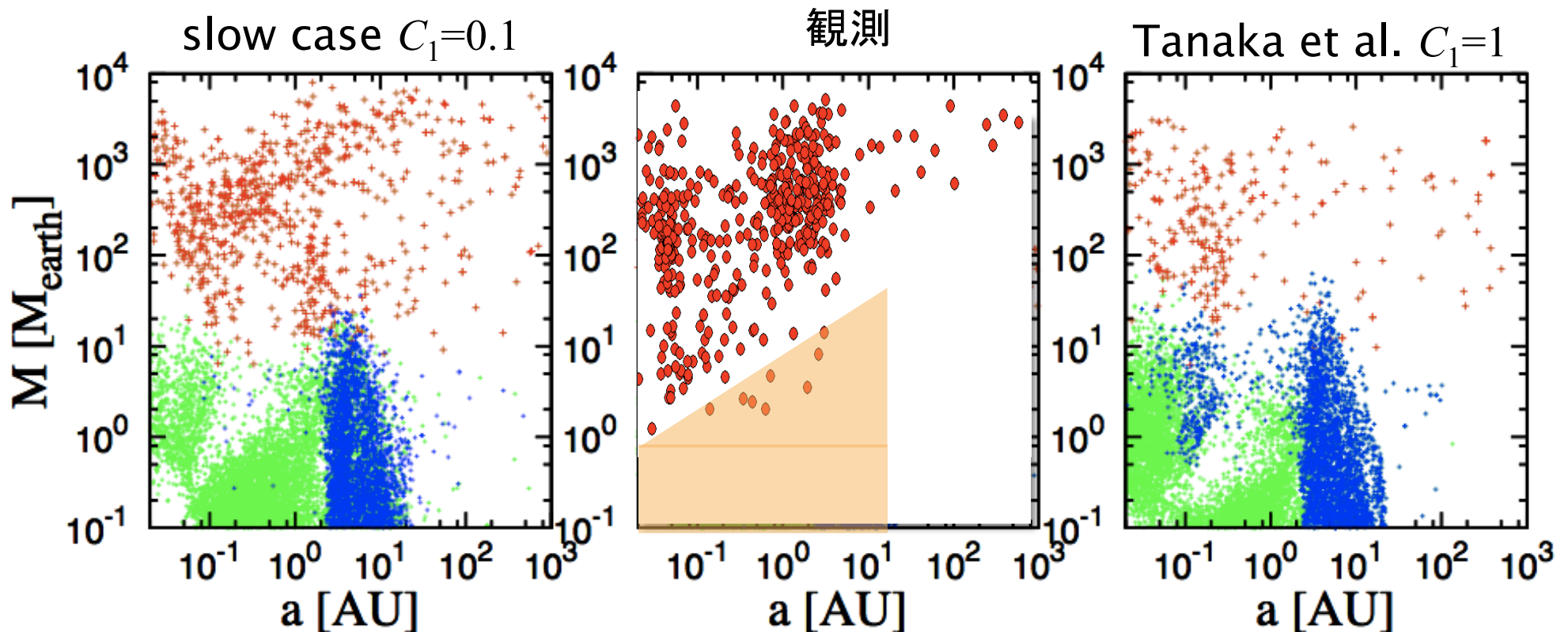
$$C_1 = \dot{a} / \dot{a}_{\text{Tanaka}} = 0.1$$

45 min on Mac air

統一化：タイプ-I 惑星移動のテスト

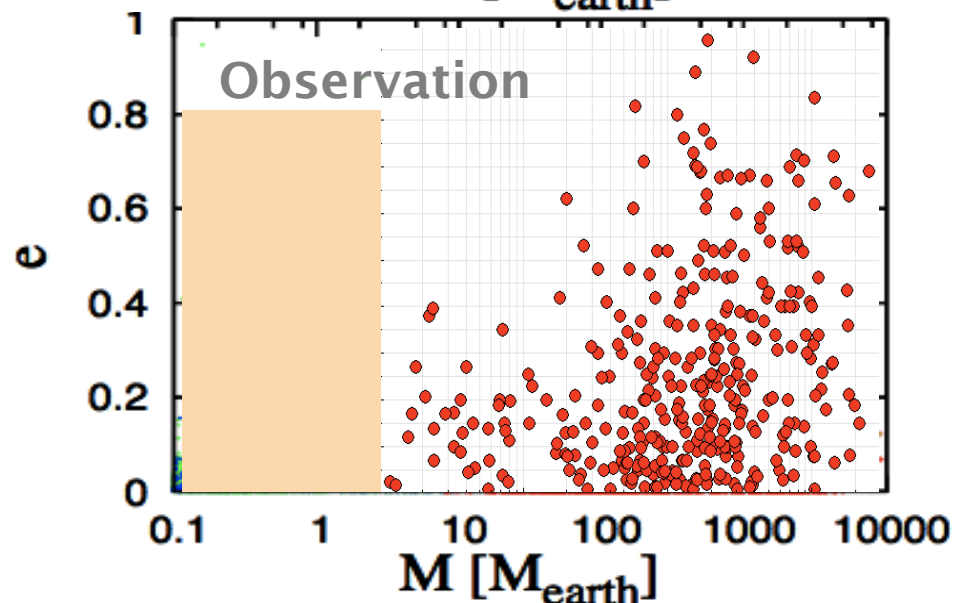
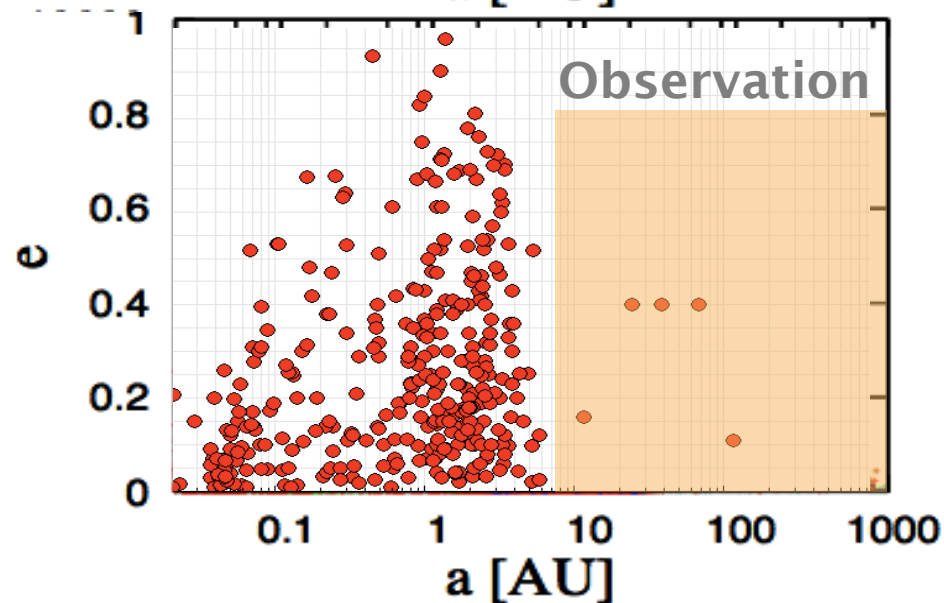
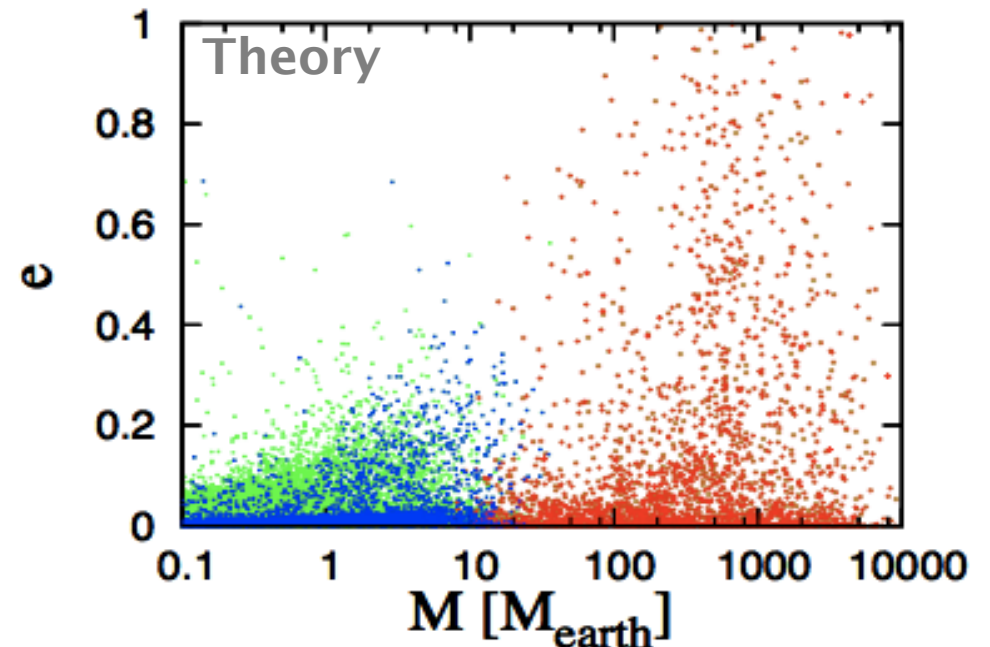
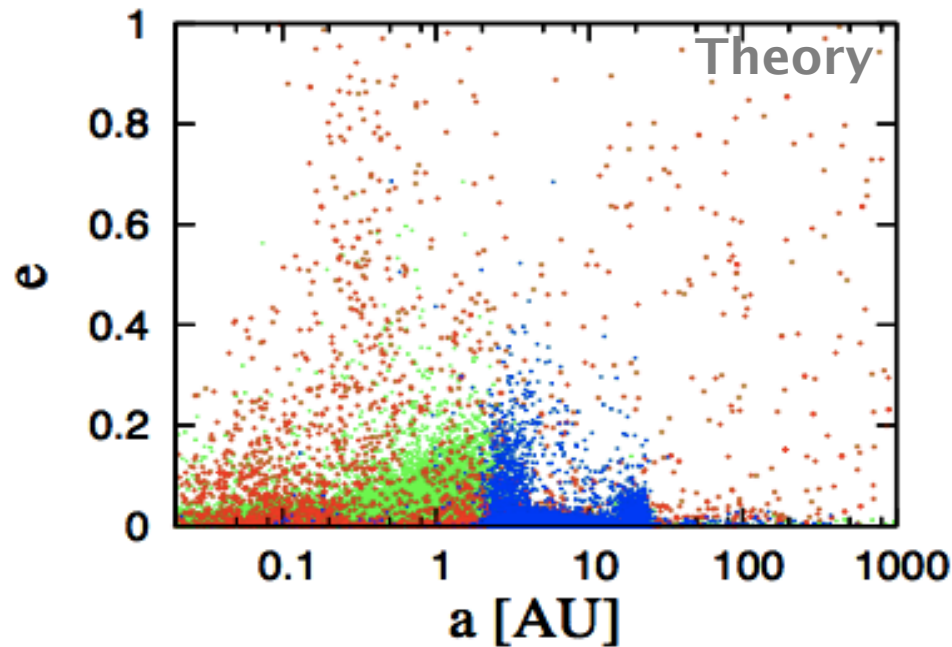
- Tanaka et al. formula ($C_1=1$)
 - 地球型惑星は $> 1\text{AU}$ では残っている (multi-generation)
 - 明らかにガス惑星の存在確率が低い
- $C_1 < \sim 0.1$ or 外向き移動、trap が必要

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



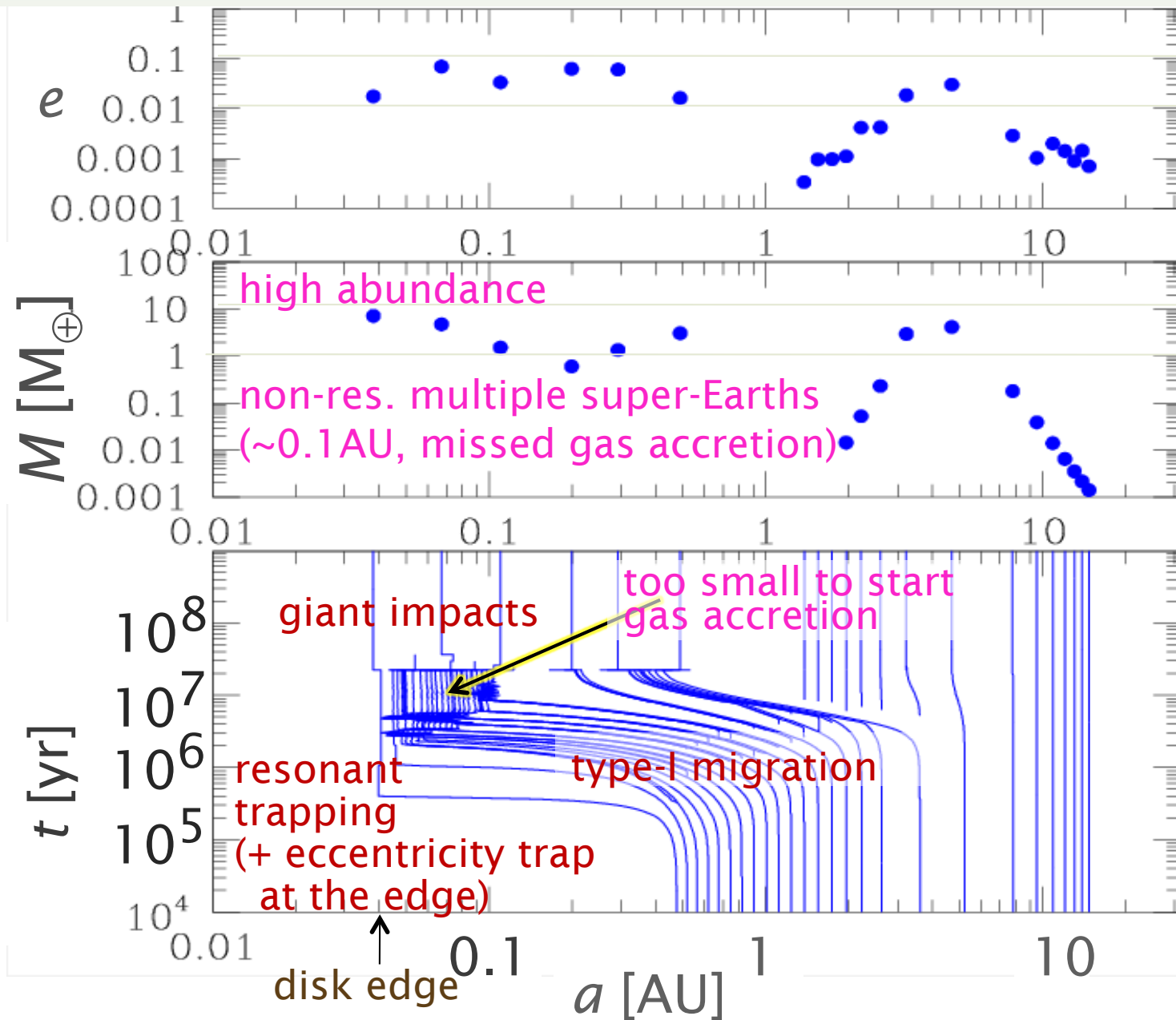
統一化：軌道不安定モデルのテスト

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

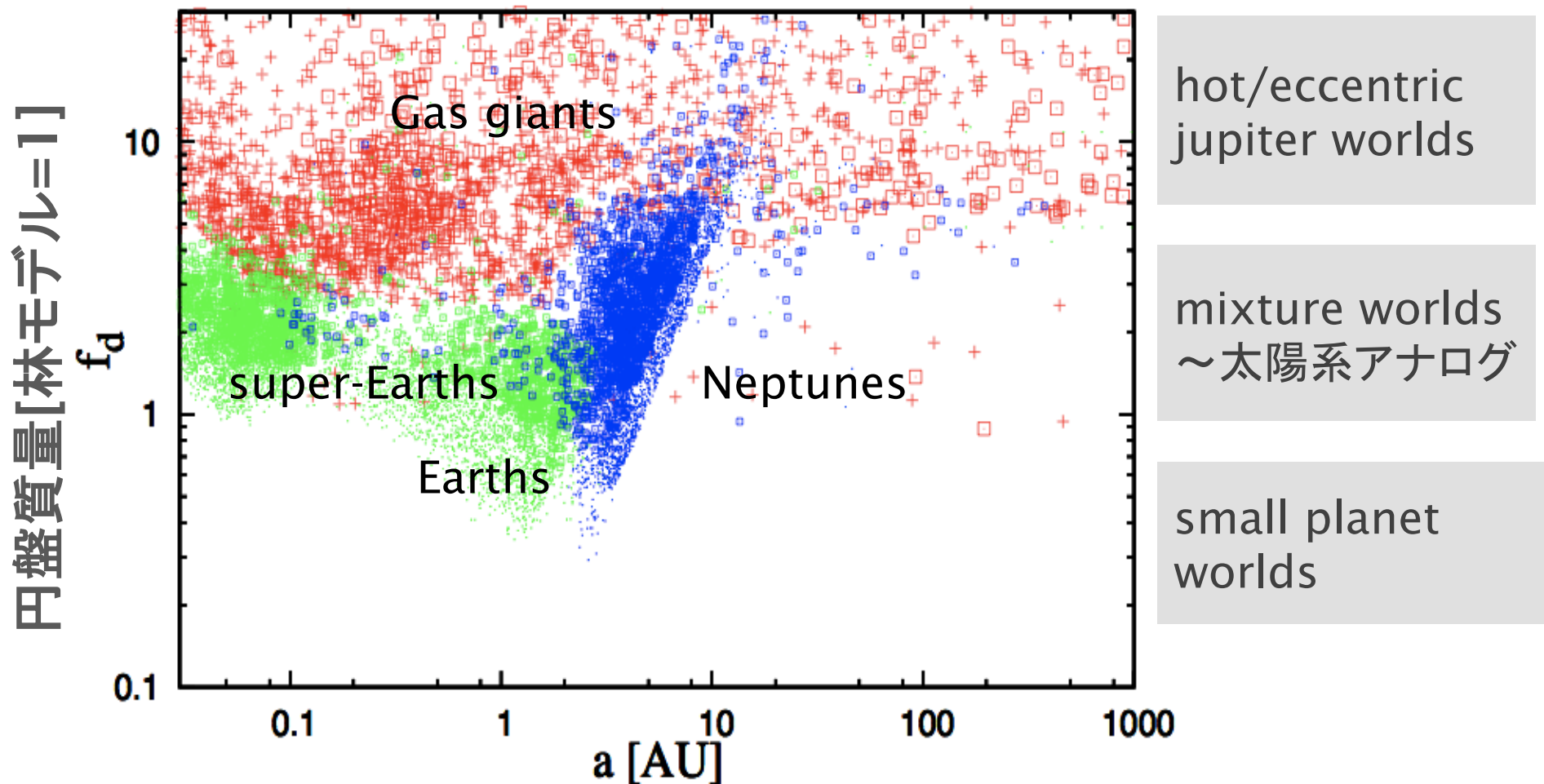
統一化：系外惑星の多様性の起源

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

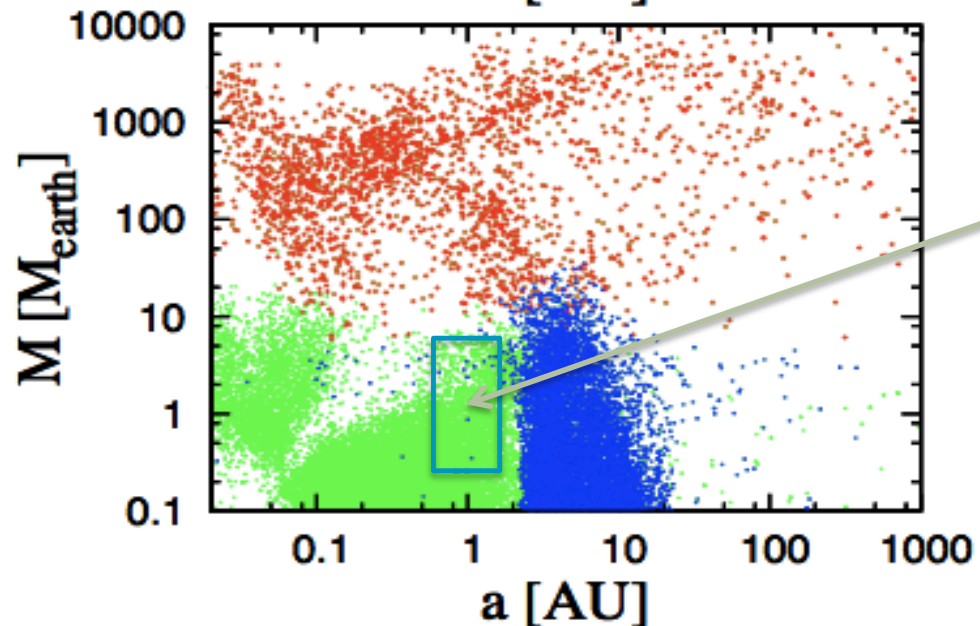
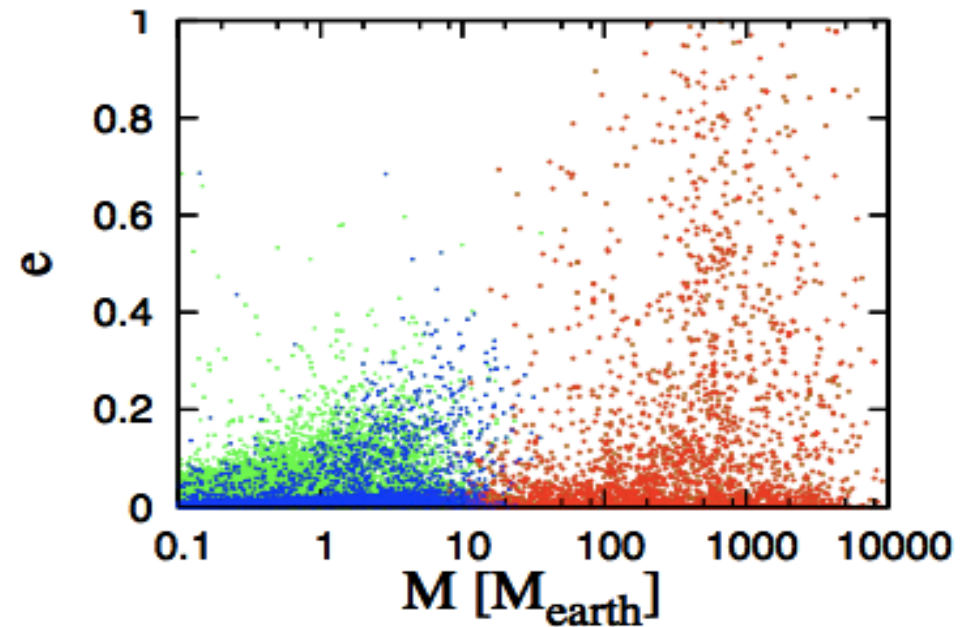
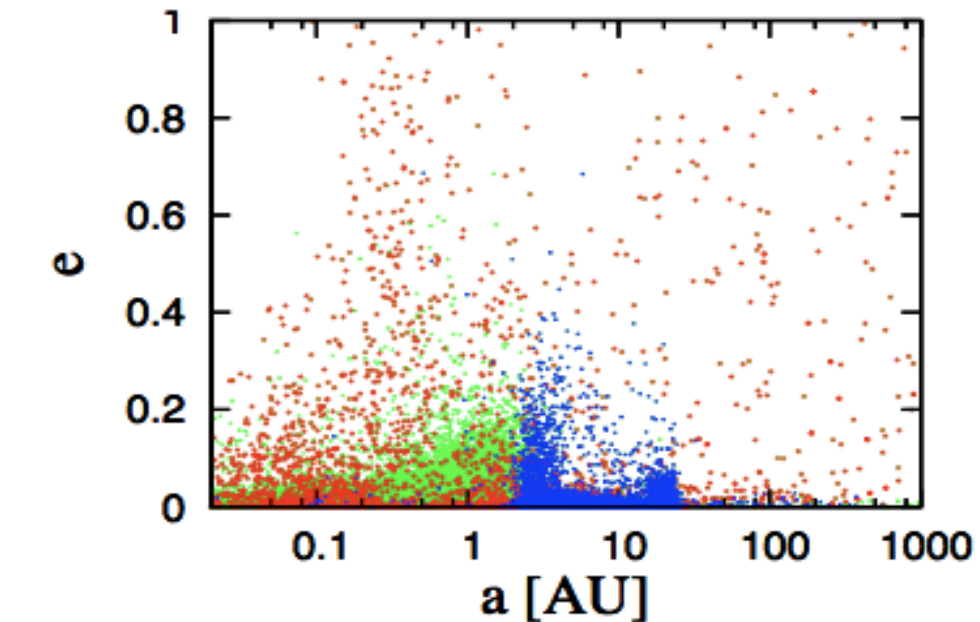
重い円盤：多数のガス惑星が軌道変化 → 他の惑星を除去

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

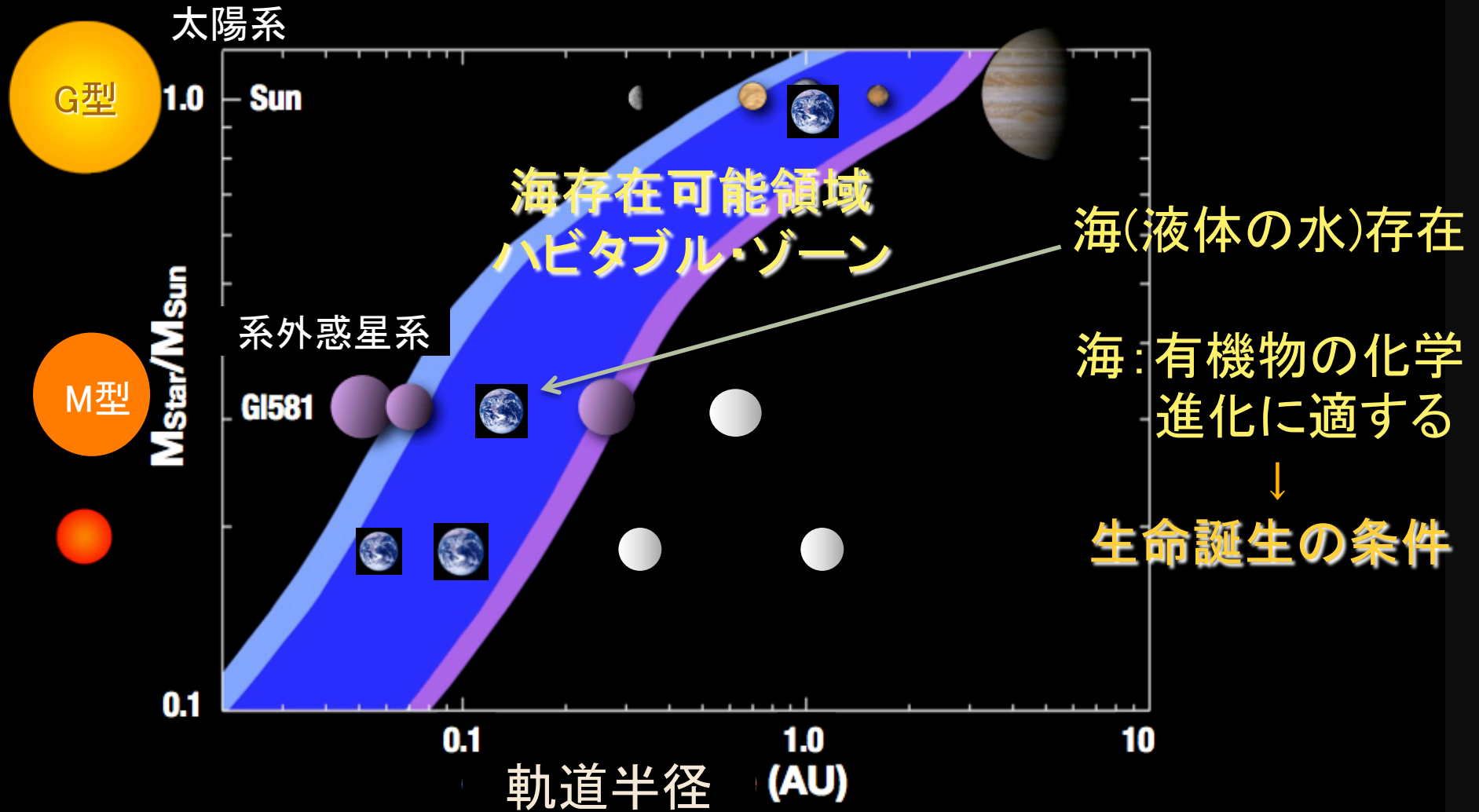


$$\eta_{\oplus} \sim 36\% (!)$$

オーダーしか意味はないが、高い確率

トランジット衛星望遠鏡 Kepler, TESS
次世代高分散分光器
TMT

Habitable Zone



これから：系外のEarthsのバイオマーカーの観測

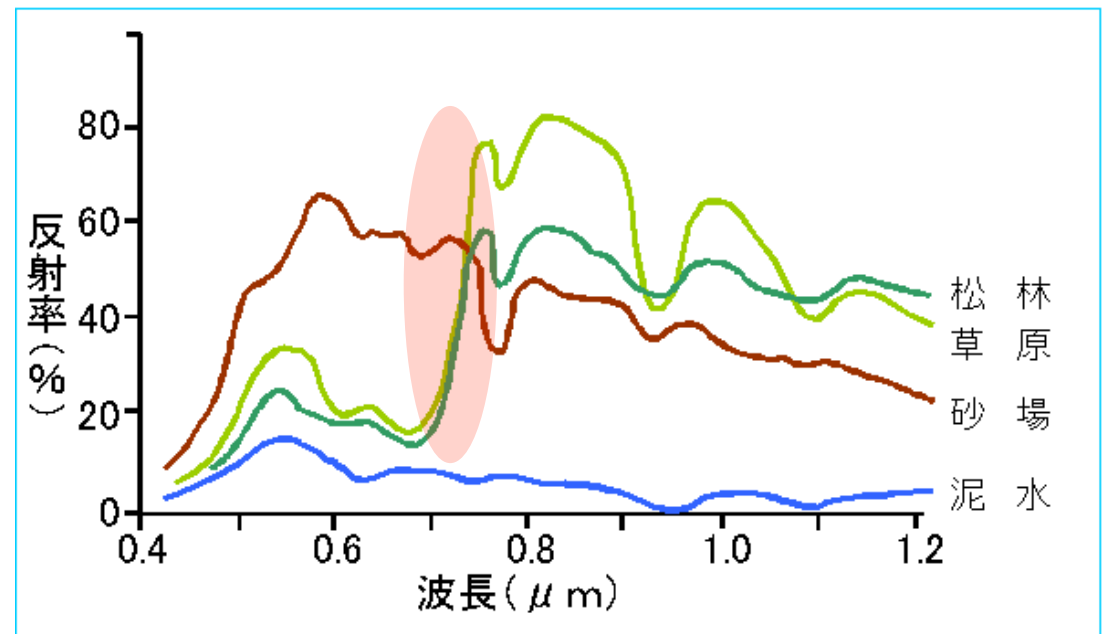
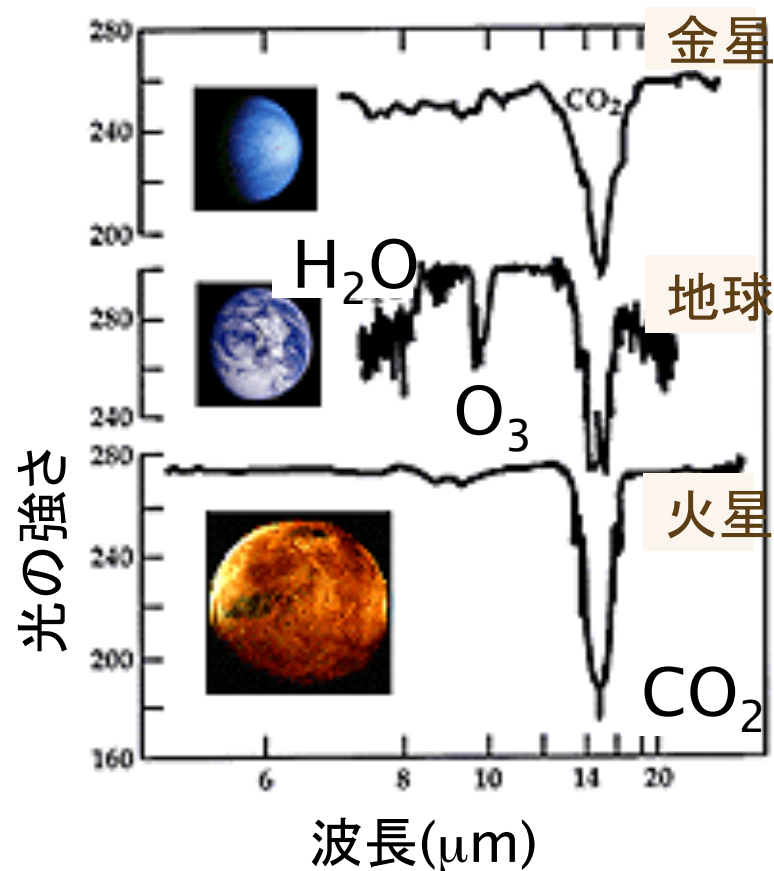
将来の赤外衛星望遠鏡での惑星大気分光観測

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)