

A large, glowing white sphere is the central focus, positioned in a modern building atrium. The sphere is surrounded by a warm, golden light that fills the space. The building's architecture features glass railings and structural beams, creating a sense of depth and perspective. In the foreground, the silhouettes of several people are visible, looking towards the sphere. The overall atmosphere is one of awe and wonder.

惑星形成理論の現状と課題

井田 茂 (東工大・ELSI)

OUTLINE

- 系外惑星の観測が示すこと
 - 惑星系の多様性(ガス惑星の軌道、惑星の並び方)
 - 地球型惑星の遍在性(close-in: 太陽型星の50%以上)
 - 惑星の組成の多様性
- 惑星形成理論モデルの現状と問題点
 - 円盤内縁: 中心星潮汐・磁場 共鳴, 蒸発 - unknown
 - 乱流円盤中での微惑星形成 - 奥住
 - 軌道移動と軌道捕獲 → 「局所形成モデル」?? - 遍在性
 - 惑星系多様性 - 原始惑星系円盤の多様性 - 星形成の多様性
- 惑星形成理論のこれから
 - Population synthesis - 略
 - 再び大規模シミュレーション(N体、SPH、...)
 - 円盤ガス自体、ダスト/惑星と円盤ガスのカップリング

系外惑星の観測が示すこと

地球型惑星は遍在

- 太陽型星が「地球型惑星 ($M_{\oplus} < M < 30M_{\oplus}$)」を持つ確率

HARPS (地上からの視線速度観測), *Kepler* (宇宙からのトランジット観測)

- ~20% 軌道周期50日以内

- ~50% 軌道周期100日以内 [太陽系はこの範囲外]

→ ダスト落下問題、惑星落下問題(type I migration)はフツーに克服できているはず

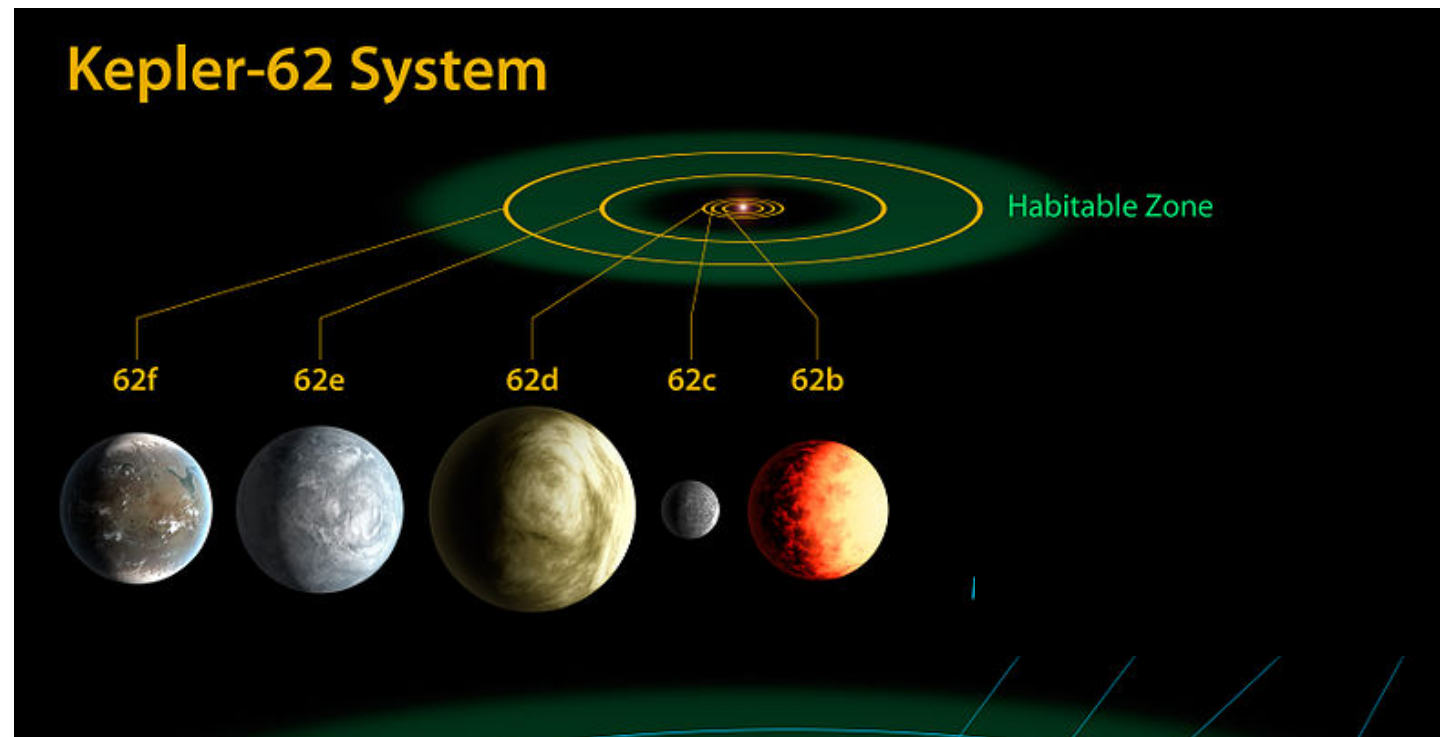
→ でも close-in なので、type I migration は、なきや困る

系外惑星の観測が示すこと

ハビタブルゾーンの惑星は？

- 発見された地球型惑星のほとんどは close-in, multiple
- 太陽型星の $\sim 1\text{AU}$ の観測はまだ難しい: 要注意
- Kepler 62: 1. close-in, multiple planets
2. habitable zone planets
これらの軌道は separated

→ 地球型惑星には2つの種族？（太陽系は後者のみ？）

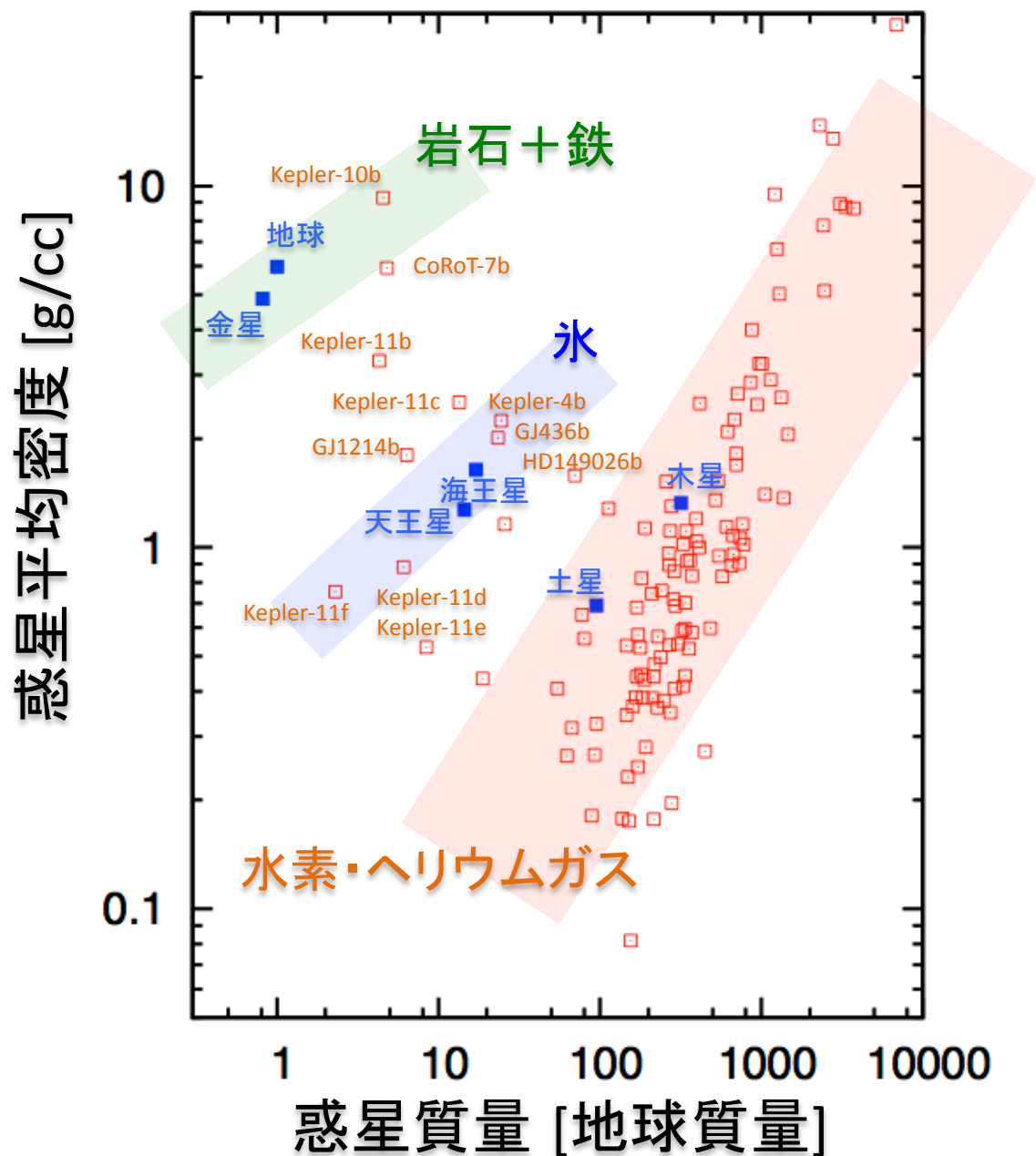


系外惑星の観測が示すこと

組成には多様性？

- 全体密度 (← ドップラー + トランジット)
- 主成分H₂Oとフィットする惑星多数
 - 1000km以上の深い海？ 形成過程？
 - H/He大気が10wt%もあれば、岩石 + 鉄で説明可能 (Ikoma et al.)
 - transit 惑星なら大気成分観測可能

スーパーアース：岩石？ 氷？



ドップラー法(質量)
+
トランジット法(断面積)
↓
密度
↓
組成の推定

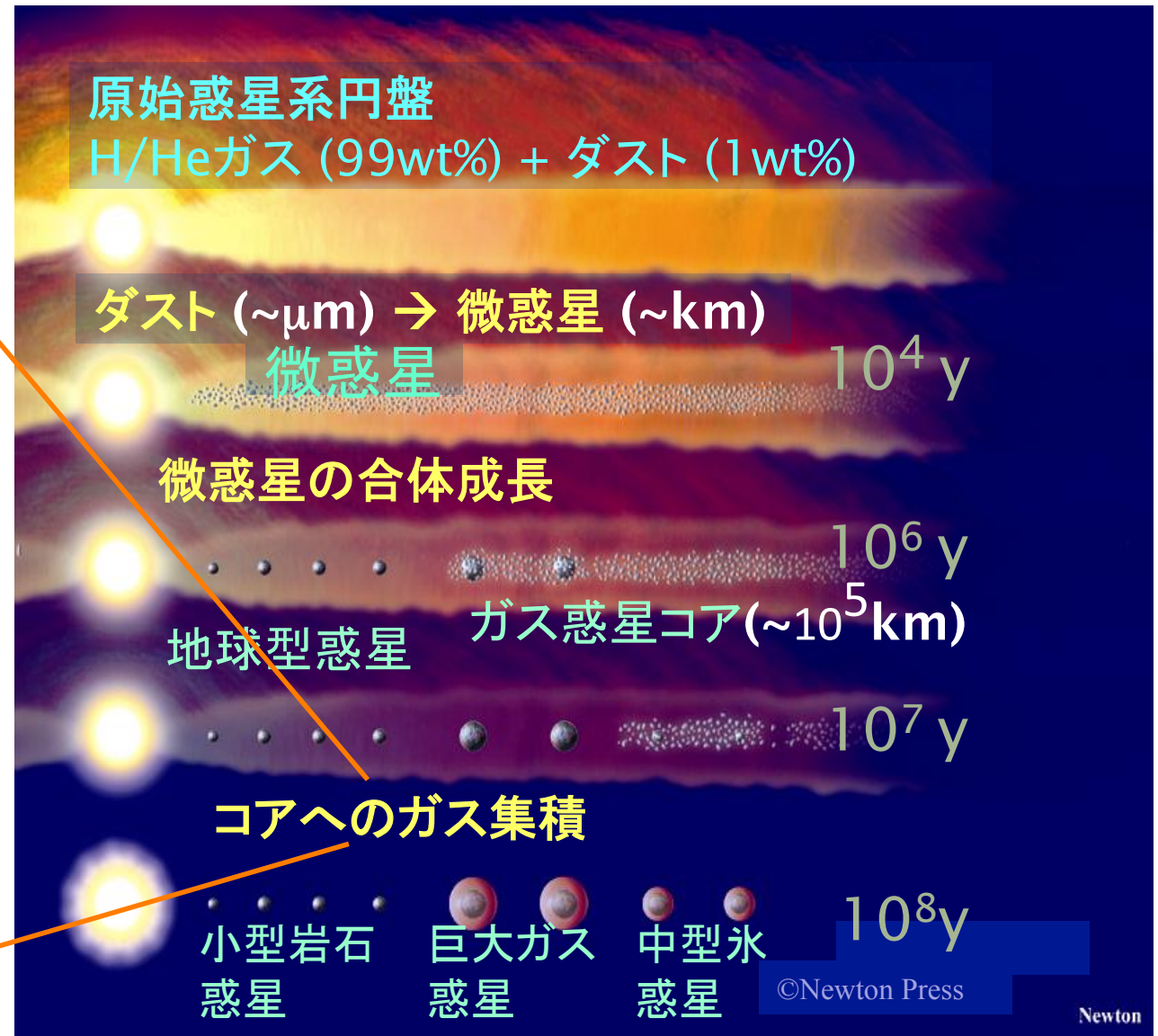
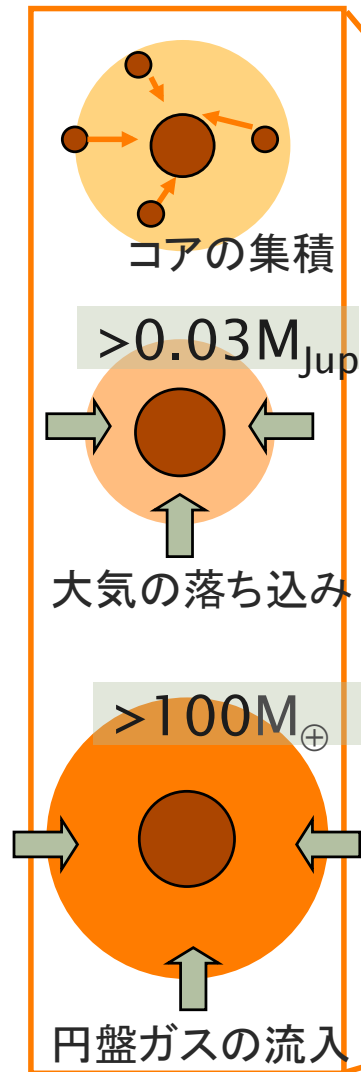


Theory: Solar System

京都モデル - standard

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

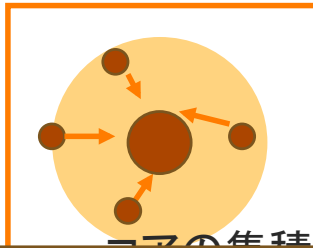
Mizuno process



京都モデル - standard

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

Mizuno process



原始惑星系円盤

Hayashi model

H/Heガス (99wt%) + ダスト (1wt%)

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

微惑星 (~km)

10^4 y

体成長

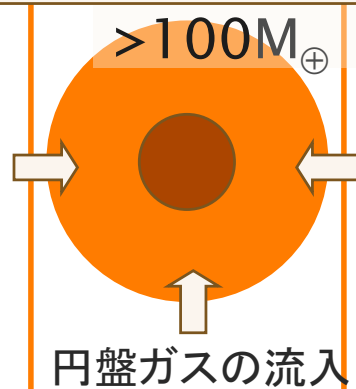
ガス惑星コア 10^6 y

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：標準モデルの大幅拡張

短周期系外惑星の発見

→ 内縁：潮汐, 磁場,
共鳴, 蒸発



円盤乱流の観測

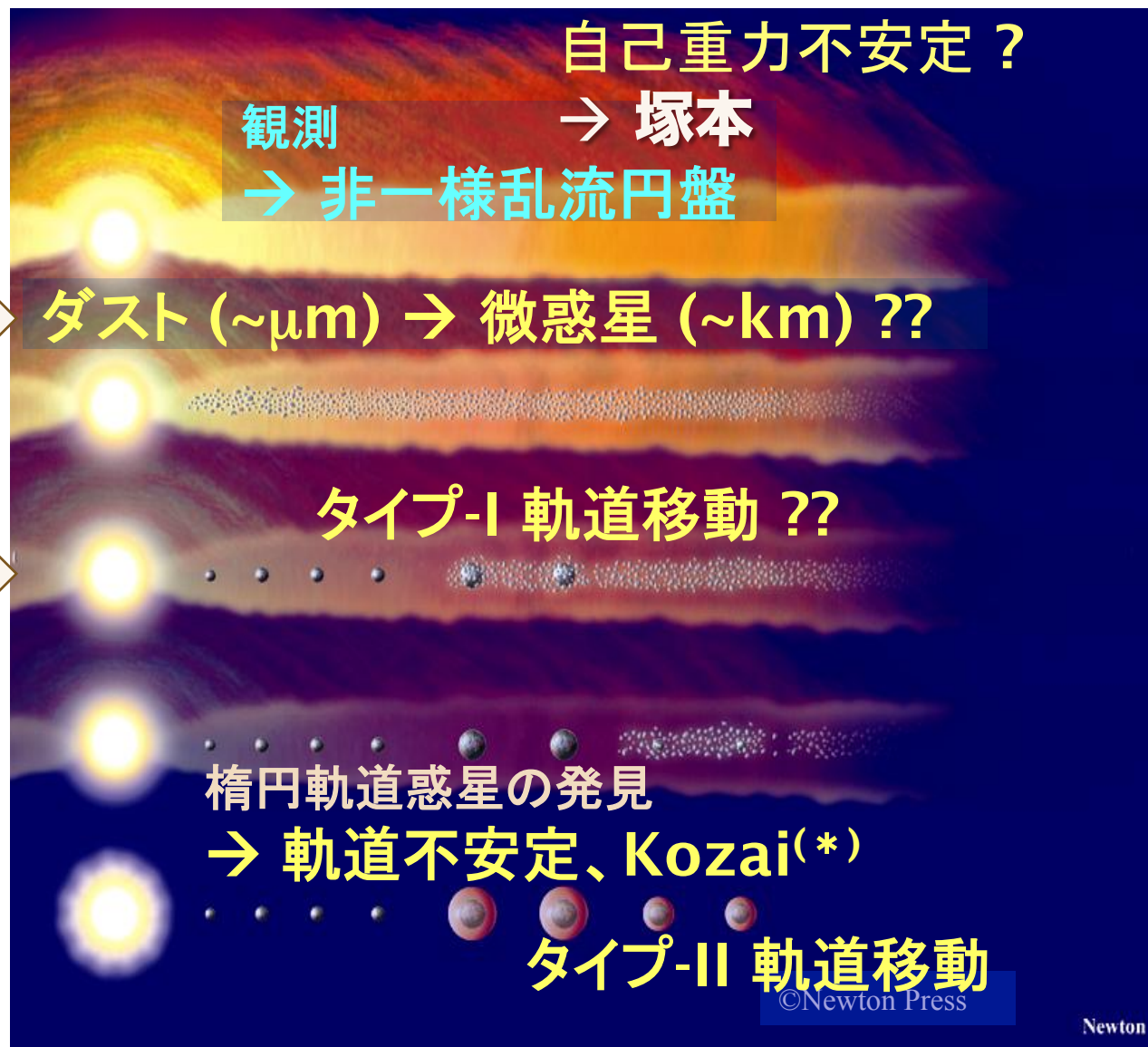
→ 微惑星形成問題
ダスト落下問題

短周期系外惑星の発見

→ 惑星落下問題

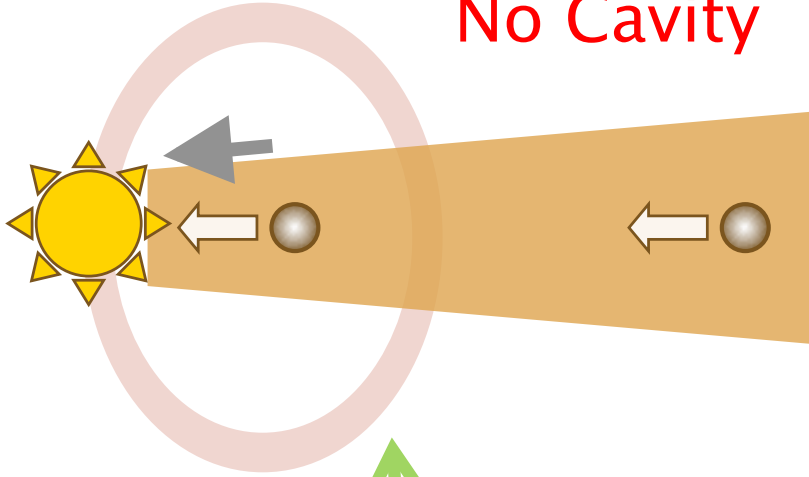
◆ 多様性は説明可能だが
統一的説明はまだ

◆ 太陽系の説明が困難
混沌としてきた

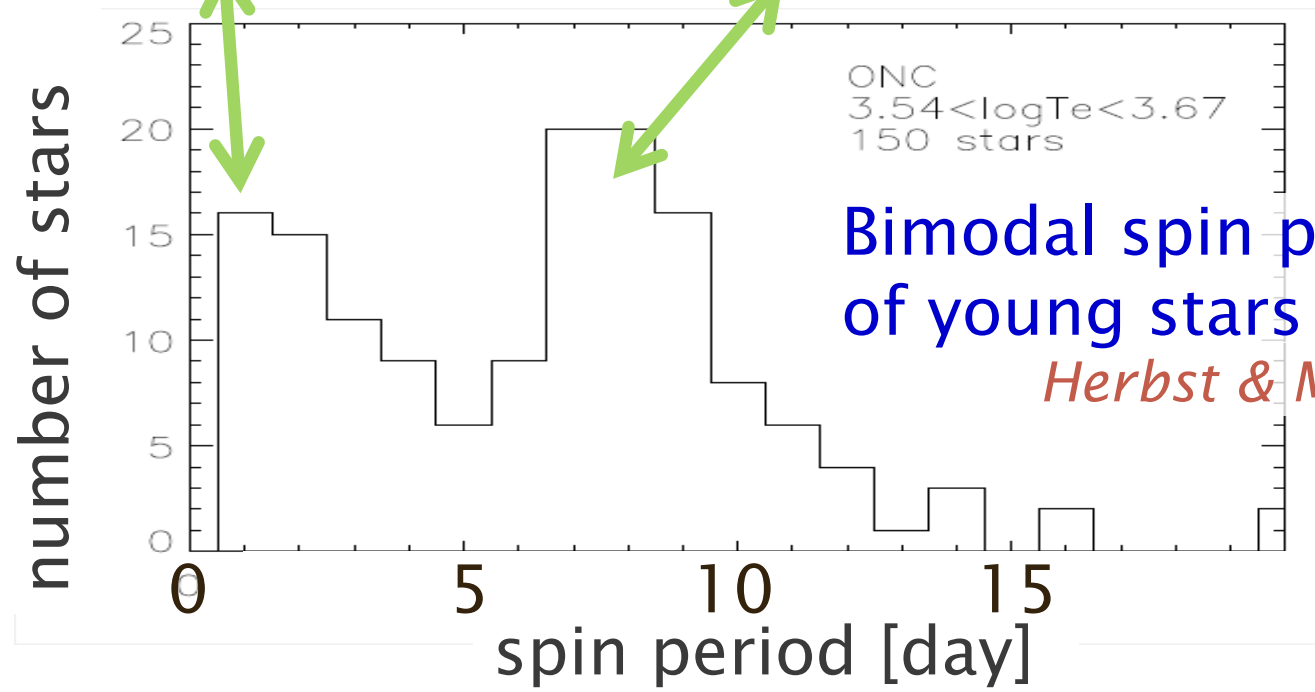
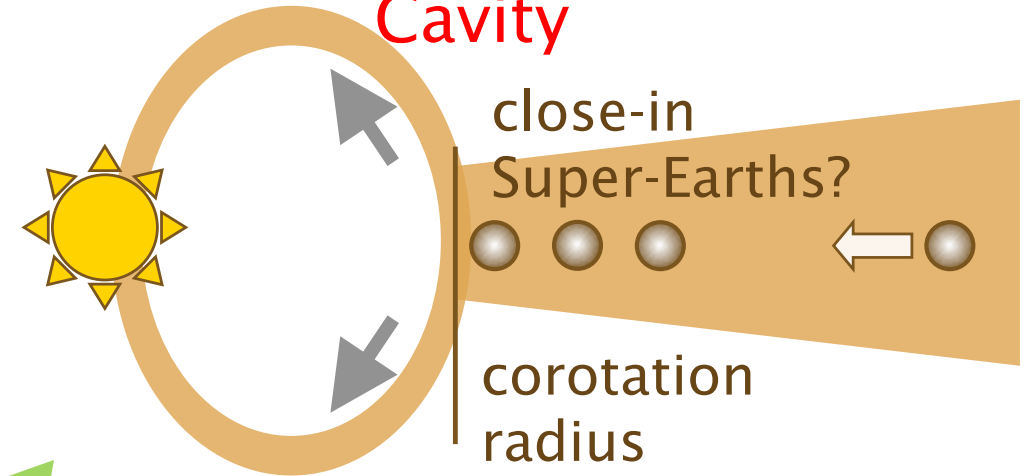


円盤 inner cavity? (0.05-0.1 AU)

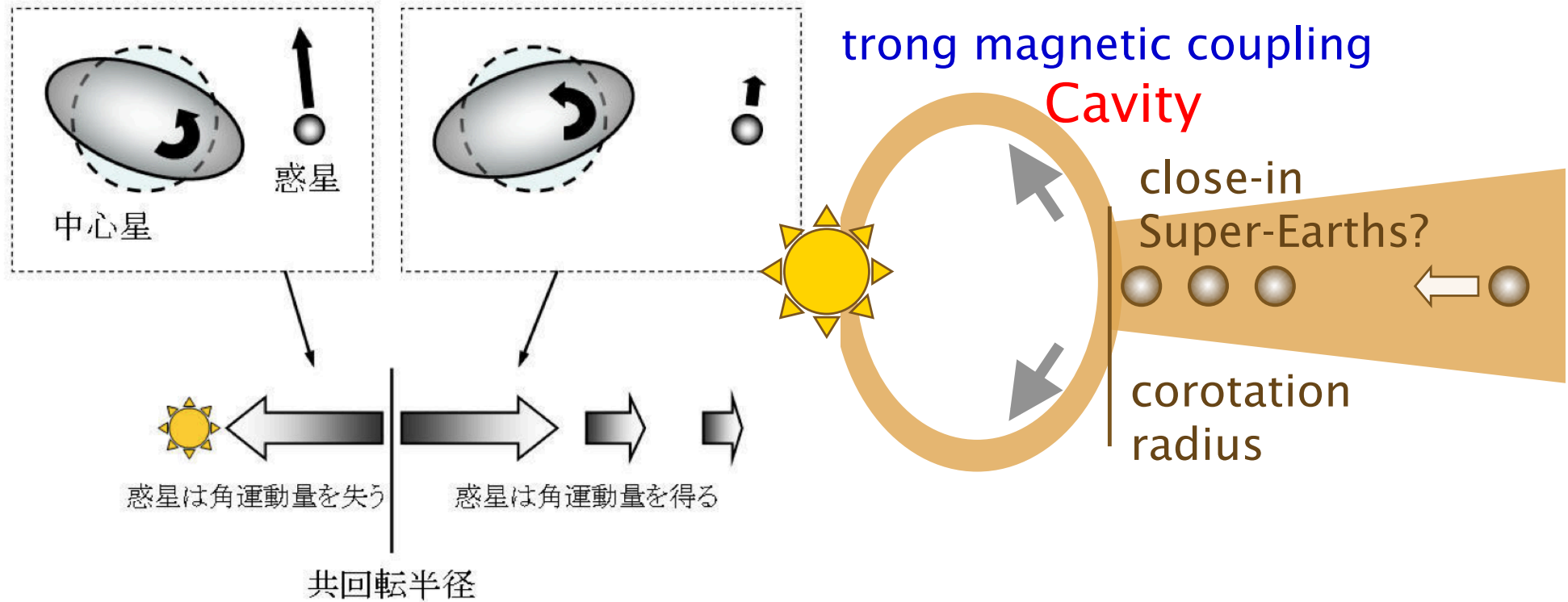
weak magnetic coupling
No Cavity



strong magnetic coupling
Cavity



円盤内縁 - 中心星の潮汐も重要



$$t_a \approx 10^8 \frac{Q_{star}}{10^5} \frac{M_{planet} / M_{star}}{10^{-3}} \left(\frac{a}{5R_{star}} \right)^{6.5} \text{ years}$$

乱流円盤中での微惑星形成

■ 古典的微惑星形成 – ダスト層の自己重力不安定

$$h/r \sim M_{\text{dust}}/M_{\text{star}} \sim 10^{-5}-10^{-4}$$

■ ダスト層はそんなに薄くならない

- 外部乱流 (← 中心星への降着、赤外超過観測)

Magneto-Rotational Instability? ← ダスト成長、分布とカップル

- 自己生成乱流 – Kelvin-Helmholtz Instability

■ ダストの衝突合体成長？

- メーター・サイズでは100年で中心星の落下
(自己重力不安定モデルではメーター・サイズを回避)
- 急速成長は難しい – 衝突破壊、反発、電荷
(氷ダストでは奥住モデル)

■ 乱流、円盤構造不連続を使ってダストをためて

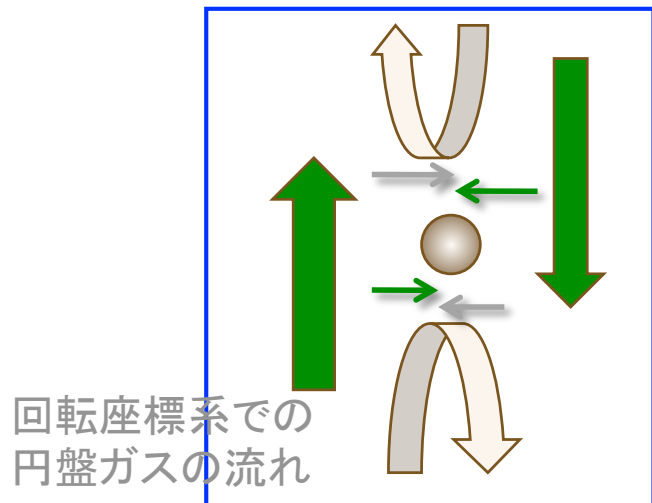
自己重力不安定？ 乱流渦、streaming instability、pressure bump, ..

いろいろなアイデアが入り乱れている



Theory: Orbital Migration

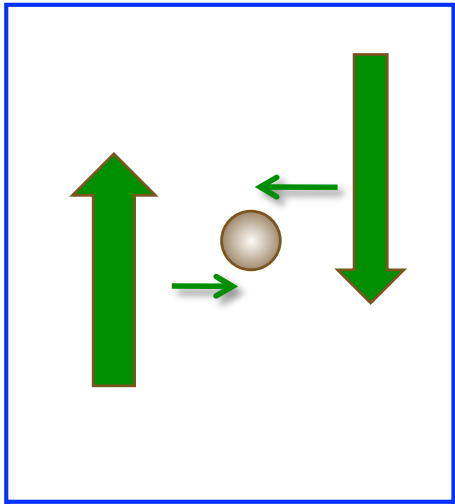
新たな物理：惑星軌道移動



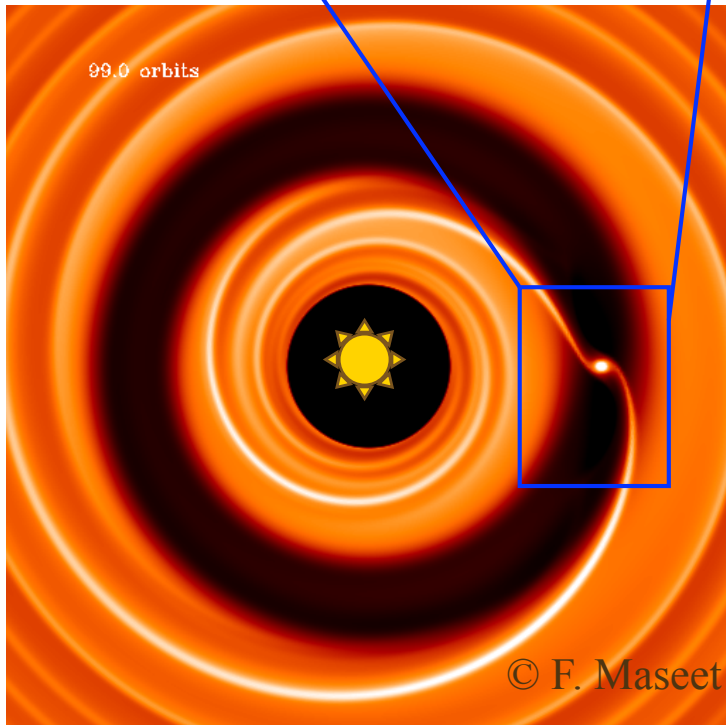
- $M_{\text{ガス}} \sim 100M_{\text{固体}}$
→ ガス円盤との重力相互作用で
惑星軌道変化
- 同じ程度の4つのトルクの
微妙な差し引きの残差で
惑星軌道変化
- 線形領域 ($M < 10M_{\oplus}$)
Tanaka, Takeuchi, Ward (2002)
必ず内向移動 高速
→ $1M_{\oplus}$ @1AUの地球
 $10M_{\oplus}$ @5AUの木星コア
< 10^5 yr で落下! [\leftrightarrow 円盤寿命 $> 10^6$ yr]
惑星落下問題

192.0 orbits

新たな物理：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)



→ 円盤に inner cavity があれば、
そこで移動が止まる？

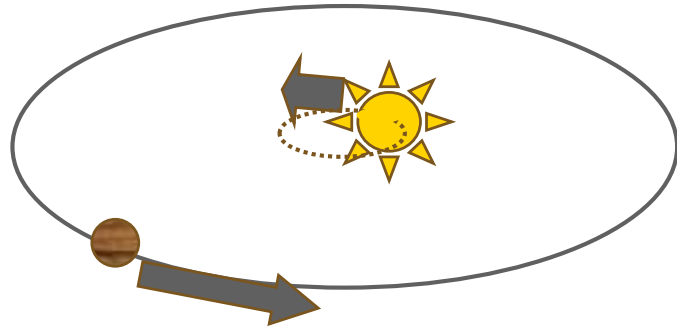
→ **Hot Jupiters の起源?**

[それはそれで問題: 殆どの巨大惑星が
HJになってしまうはず。]

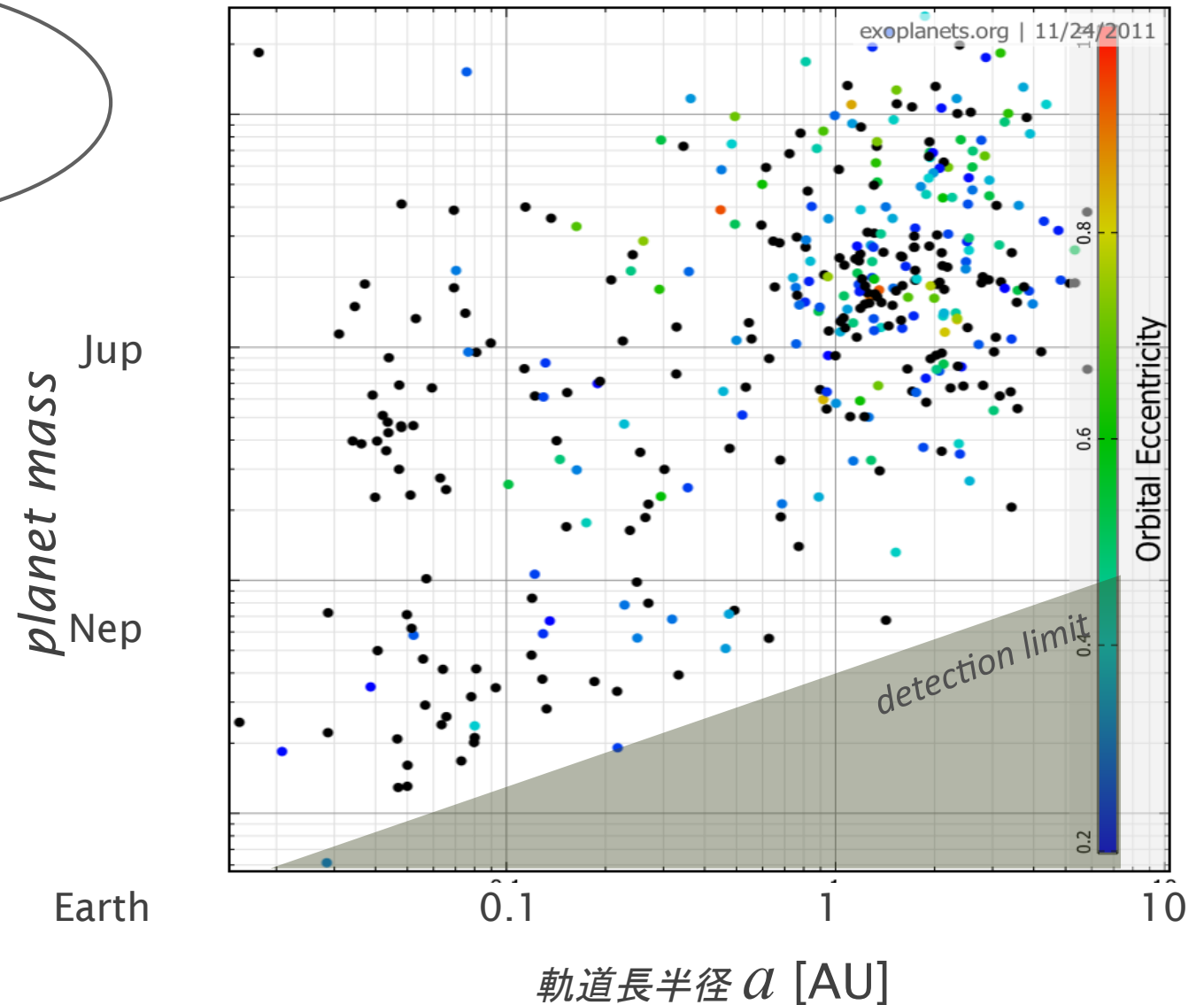
木星は極めて幸運？

いや、観測データは大半の巨大惑星が
あまり動いていないことを示す]

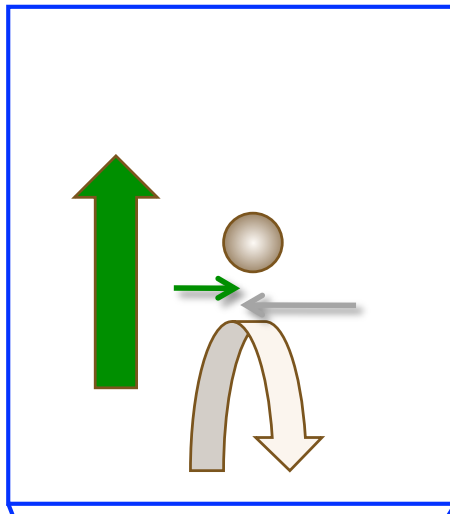
Pile-up of Jupiters at >1 AU



Doppler (Radial Velocity)



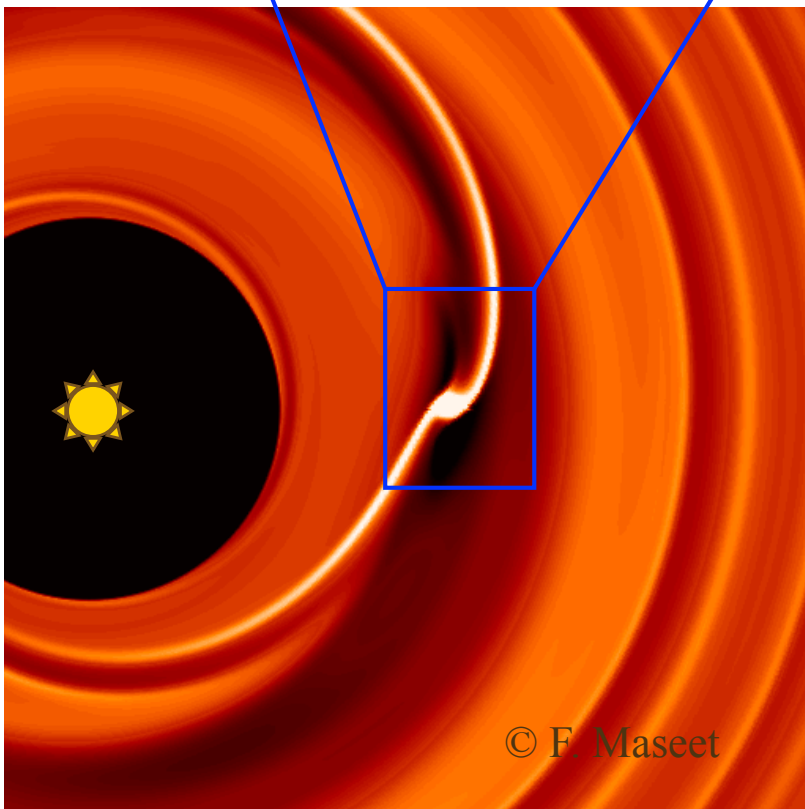
新たな物理：惑星軌道移動



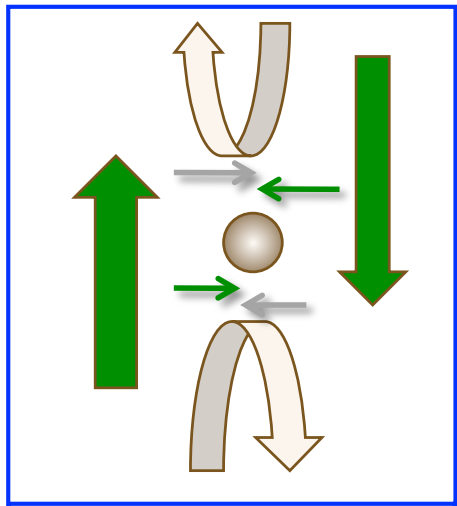
- 線形領域 ($M < 10M_{\oplus}$) タイプ I
必ず**内向移動 高速**
- 非線形領域 ($M > 50M_{\oplus}$) タイプ II
惑星重力でギャップ形成
→ 円盤降着と共に**ゆっくり内向移動**
- 非線形領域 ($M \sim 30M_{\oplus}$) タイプ III
不完全ギャップ
→ **極めて高速 内向or外向移動**
Artymowicz (2004) (予測不可能)

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

- 円盤自身で作る密度ギャップ
(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：惑星軌道移動



- 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), Ida et al. (2008),
Okuzumi + Ormel (2013a,b)

全くの混沌状態

- 系外惑星系の多様性どころか太陽系の形成さえ説明不可能？

192.0 orbits

惑星の局所形成仮説?

ちゃんとした論文は出ていないが、多くの人が何となく思っている

円盤にはいろいろな不連続があっ**ていい** - migration を止めろ
migration trap = 密度不連続 or optically thick/thin 境界



円盤内縁

Ogihara & Ida (2009)
Ogihara, Duncan, Ida (2010)
Ogihara, Nimmo, Ida (2012)
円盤内縁でスーパーアース集積
↔
観測されている
ホット・スーパーアースの遍在性
[太陽系には存在しない:
内縁はなかった?]

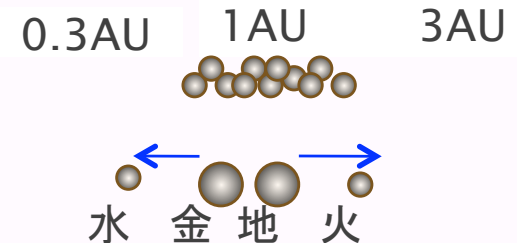
dead zone 内縁?

Hansen (2009)
Kokubo & Ida (準備中)
コンパクトな原始惑星分布
から開始した巨大衝突で
水金地火が再現
↔ 小惑星帯の欠乏

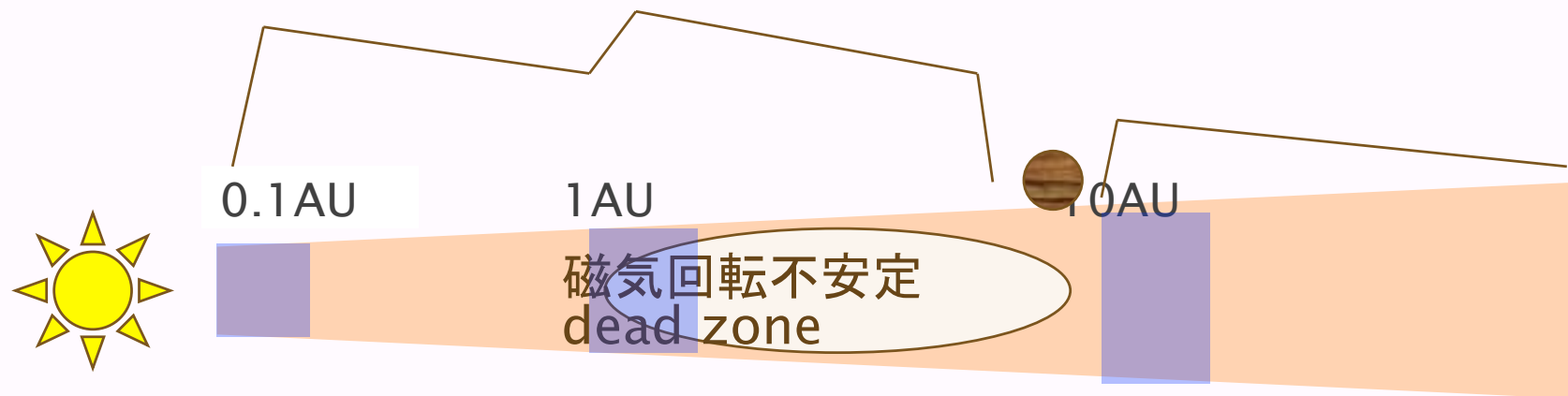
月と地球の酸素同位体比
の同一性の問題も解決?

dead zone 外縁?

Kato et al. (2010, 2011)
Hasegawa & Pudritz (2012)
optically thick/thin 境界
Kretke & Lin (2012)



木星による土星の加速的誘導形成



- 木星-土星の形成の矛盾
 - 木星はホットジュピターにならなかった
 - 木星は散逸しかけの円盤で形成 [Ida & Lin \(2008\)](#)
 - 普通の見積もり: 土星コアの形成時間は木星の十倍
 - 土星は円盤ガスを吸う時間がない
- [Kobayashi, Ormel & Ida \(2012\)](#)
木星形成により、~ 9AU に新たな強力な trap 形成
 - 100万年で土星が形成。天王星、海王星もいける？
 - [Hori & Ikoma \(2011\)](#): 土星コアが大きすぎ? → 急速集積すればOK

惑星の局所形成仮説が正しいとすると

migration trap が habitable zone に存在するか？

- M型星、晩期K型星（低温星：habitable zone が中心星のそば）

→ 中心星近傍の円盤構造

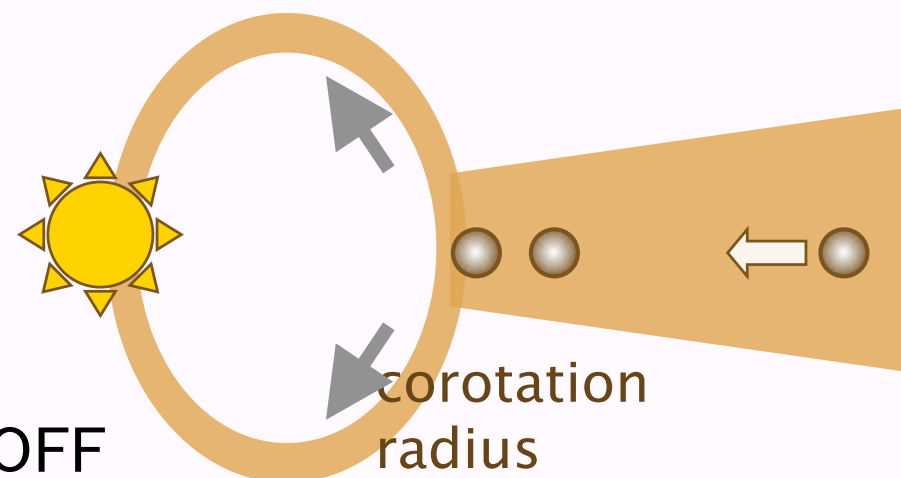
磁場-ガス相互作用

前主系列進化

- 太陽型星(G型星)

→ 磁気回転流体不安定のON/OFF

電離率、ダスト成長



巨大惑星の役割？

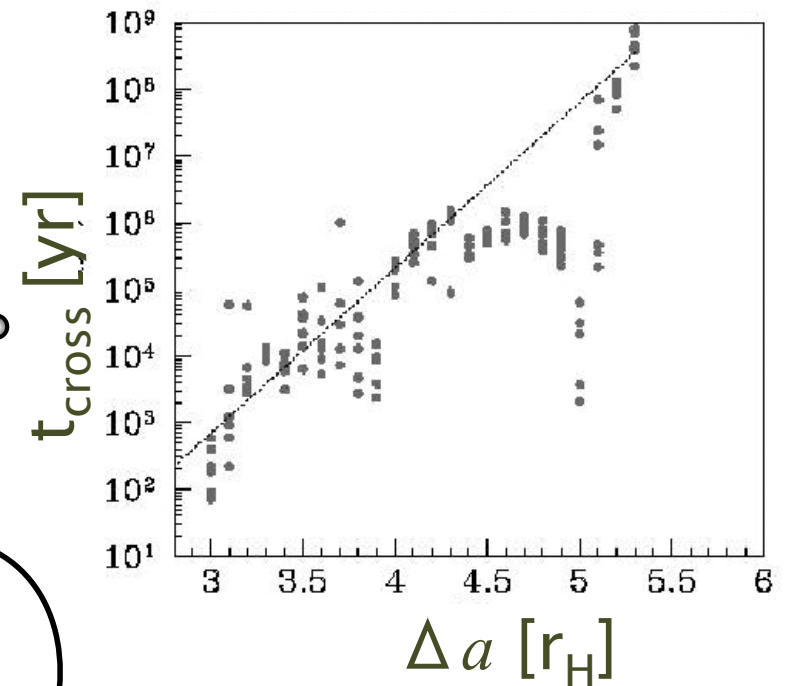
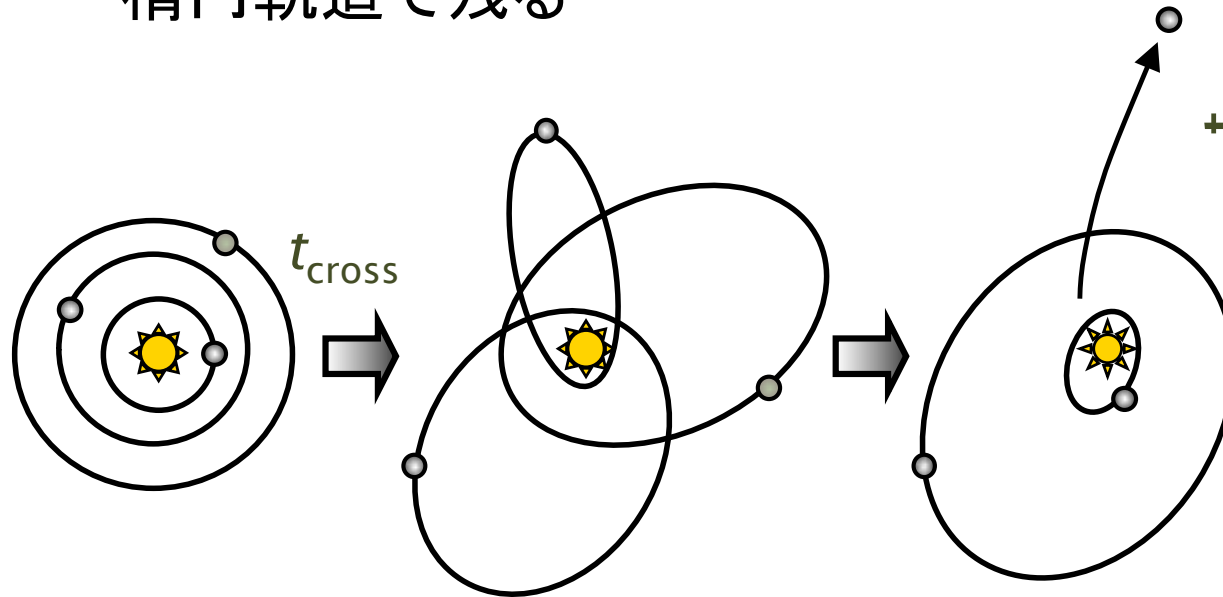
- 内側のHZ惑星の軌道離心率、自転軸傾斜角
- 小惑星帯、彗星 -- HZ惑星のH₂O起源？

← 巨大惑星形成の migration trap

新たな物理：軌道不安定

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

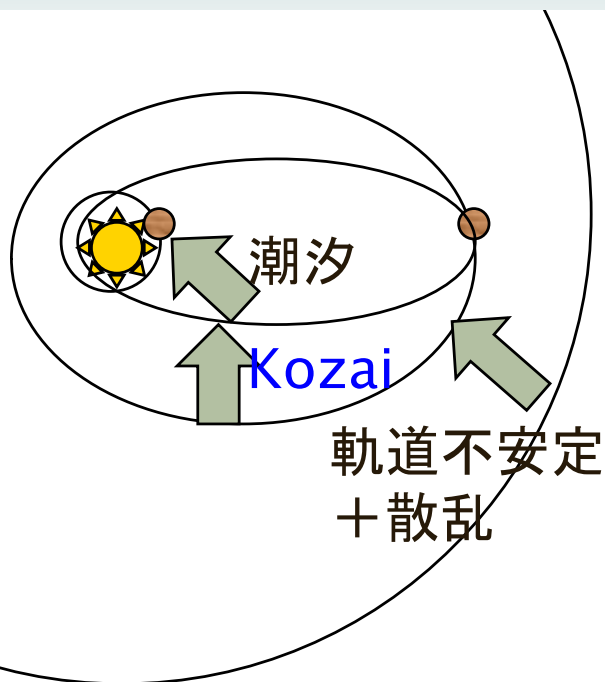
- 3つ以上の巨大惑星が円軌道で形成
- 軌道が一定時間(τ_{cross})後に急に楕円になり、軌道交差開始
- ひとつが射出され、残りが安定な楕円軌道で残る



Marzari &
Weidenschilling (2002)

→ Origin of eccentric jupiters ?

新たな物理：散乱＋遠方巨大惑星(Kozai)+潮汐



■ 軌道不安定＋遠方巨大惑星+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？

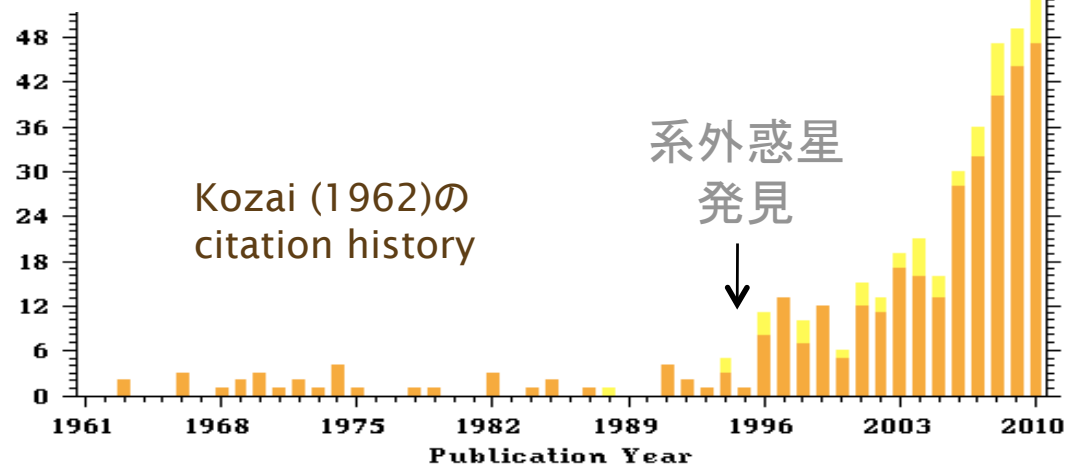
➤ Nagasawa process？

ホットジュピターの消滅

(潮汐、蒸発...)もあり、混沌

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

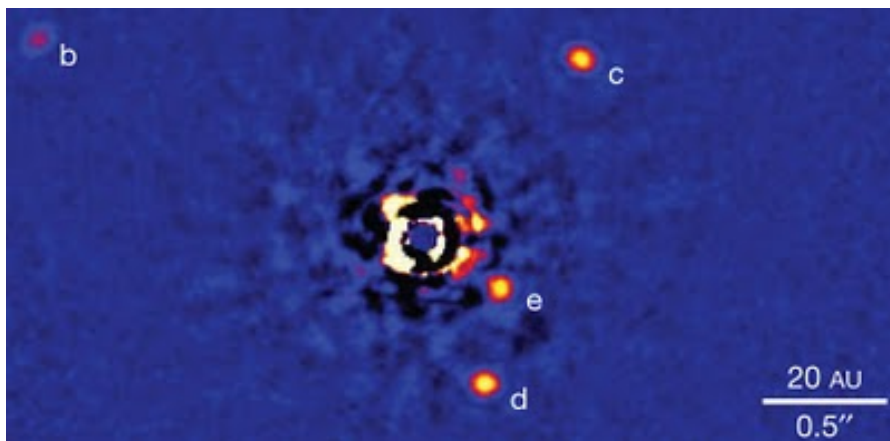
i : 摂動天体の軌道面との傾斜角



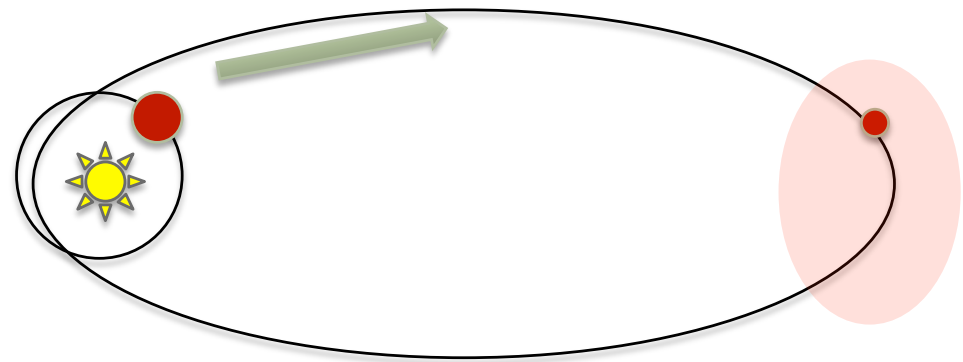
Formation of distant (>30AU) jupiters by core scattering & *in situ* gas accretion

標準コア集積モデル

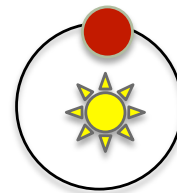
- コアのその場形成 **NO**
- jupiter-jupiter 散乱 **NO**
 - high e , relatively low M
- コア散乱+その場ガス集積 **OK**



scattering of a core ($\sim 10M_{\oplus}$)
by a jupiter in inner region

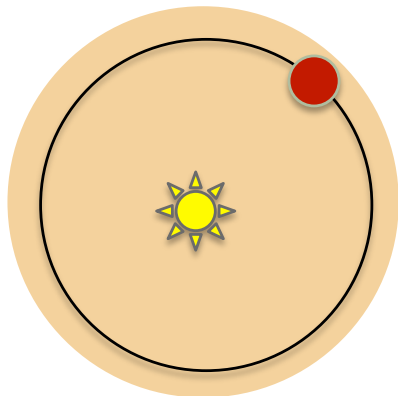
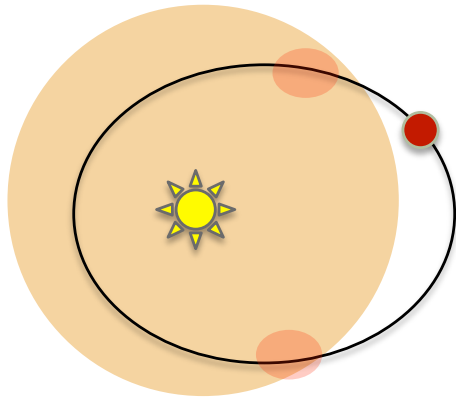
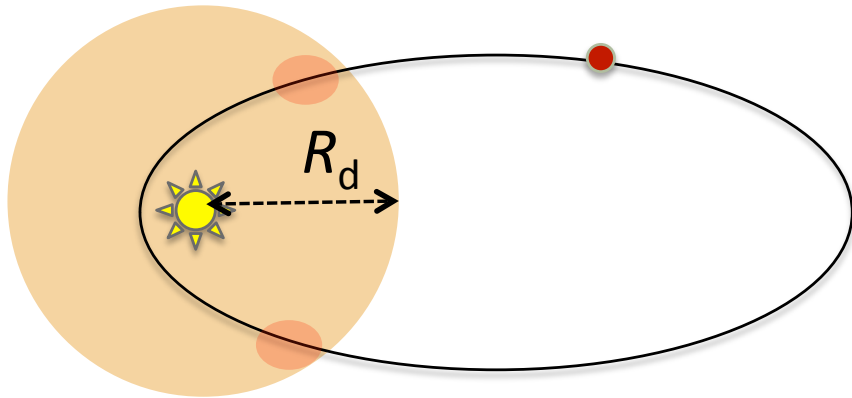


accrete gas near apocenter
[high angular momentum gas]
→ e : damped until $\sim 100M_{\oplus}$



Thommes et al., in prep

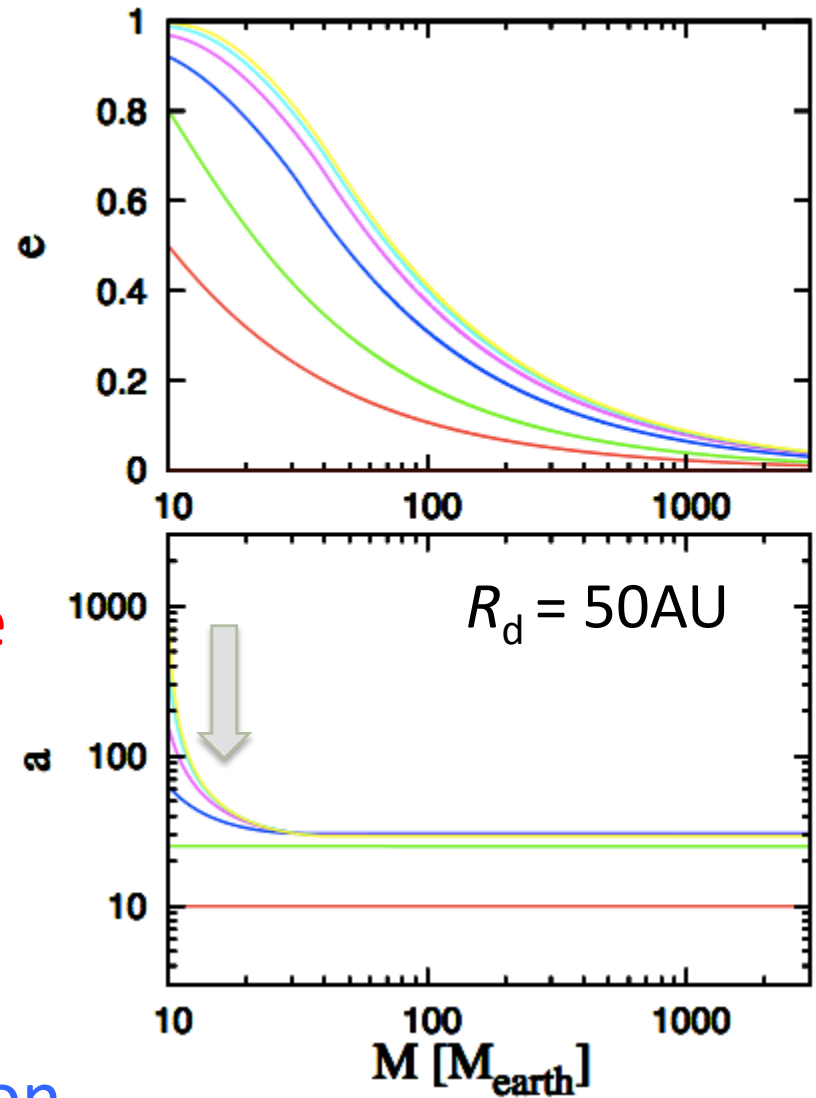
pileup of jupiters at disk outer edge



$a \rightarrow R_d$:
pileup at
disk outer edge

↕
Hot Jupiters
at inner edge

disk size distribution
→ a -distr. of distant jupiters
should be examined by future obs.



Ida et al., in prep

今後、必要なシミュレーション

■ グローバル

➤ 惑星は移動、遠方巨大惑星の影響

- ✓ 例えば 0.1-10AU (力学時間は3桁かわる) をカバーするN体計算
 - ✓ 10^{5-6} 力学時間 100万體？
 - ✓ 円盤を同時に解くのは別の計算でいい
- これをやるだけで、業界にインパクト大 (100Tflops・年でいける?)

■ 流体-固体: 円盤ガスとダスト、円盤ガスと惑星

➤ 乱流円盤中でのダストから微惑星の形成

- ✓ 自己重力不安定 vs 直接合体
- ✓ 磁気回転流体不安定 ← 電離率、ダスト成長

➤ 円盤と惑星の重力相互作用

- ✓ 輻射も重要
- ✓ 磁気回転流体不安定
- ✓ 長楕円軌道の惑星と円盤との相互作用 (円盤自己重力不安定)

➤ 円盤熱構造、質量分布の進化と惑星形成を同時に解く

[中心星の進化も同時み解く]



Theory: 統一化、包括化
Population Synthesis Model
↔ 観測データ

統一化：Population synthesis model

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

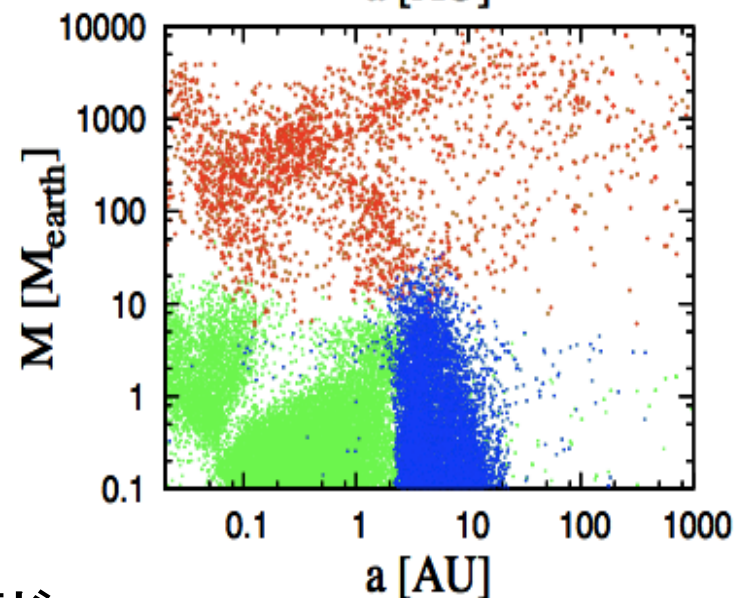
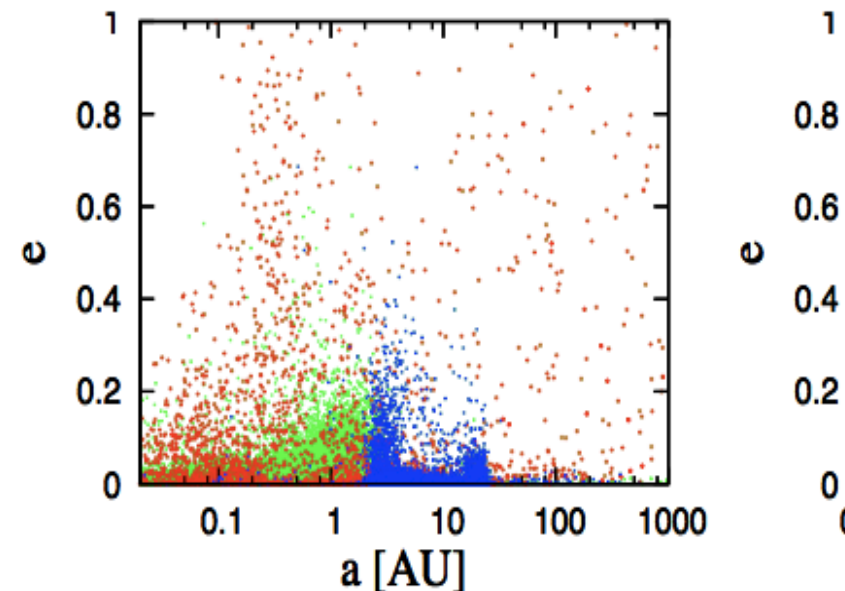
- 惑星形成の各過程をつなぎ、観測と直接比較可能な系外惑星の分布導出
 - 観測データを説明、将来観測の予測、理論モデルの較正
 - 各過程の詳細数値計算を本質を残しつつ簡潔なモデル化をする
 - 惑星成長移動を積分し(決定論的過程)、確率論的過程を加える

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

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

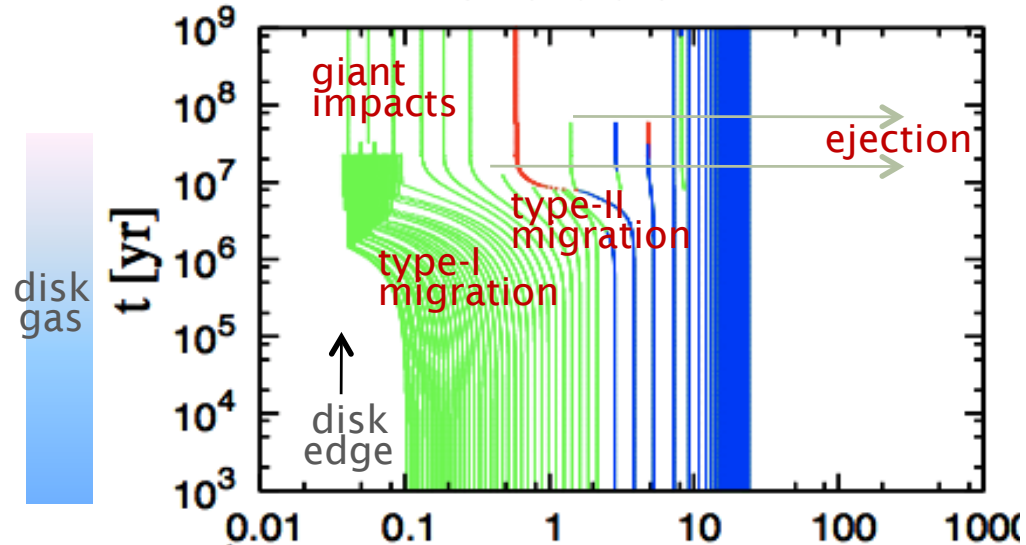
$$\frac{de}{dt} = \Delta e_{\text{scatt/coll}}$$

気象のGCMみたいな感じ

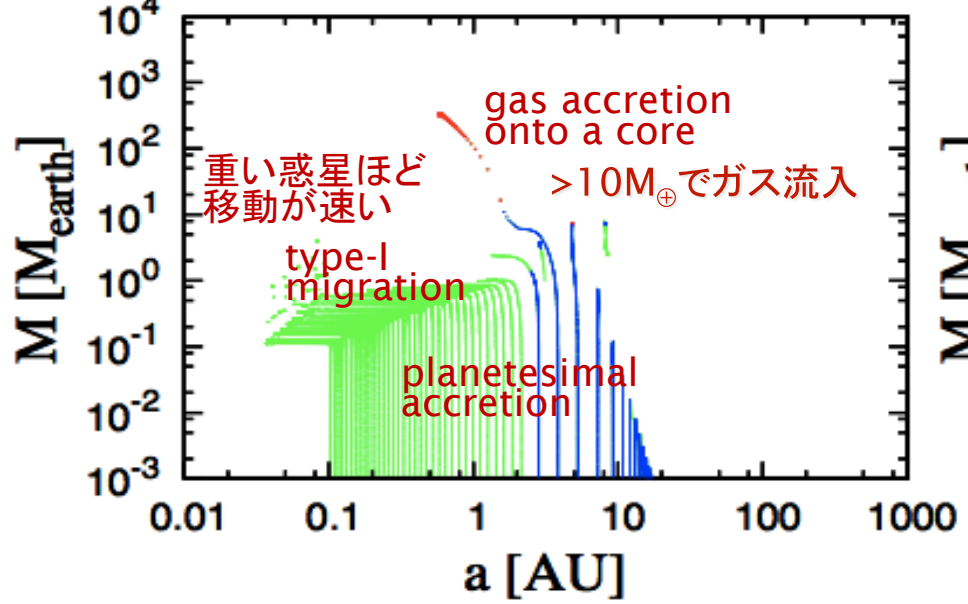


統一化：1個の円盤での計算例

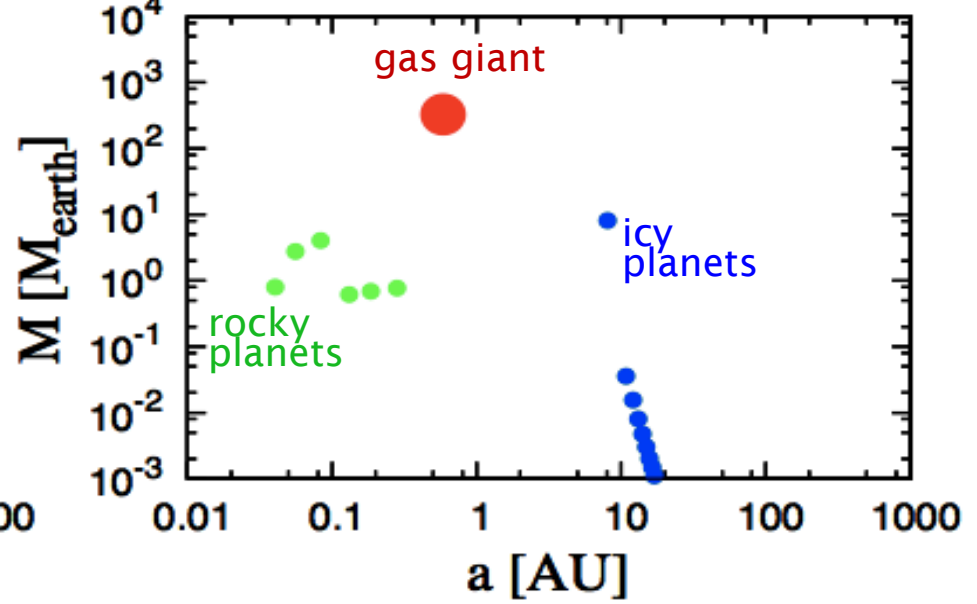
evolution



$M_* = M_\odot$
 $M_{\text{円盤}} = 0.03 M_\odot$
 type-I migration:
 $C_1 = \dot{a} / \dot{a}_{\text{Tanaka}} = 0.1$

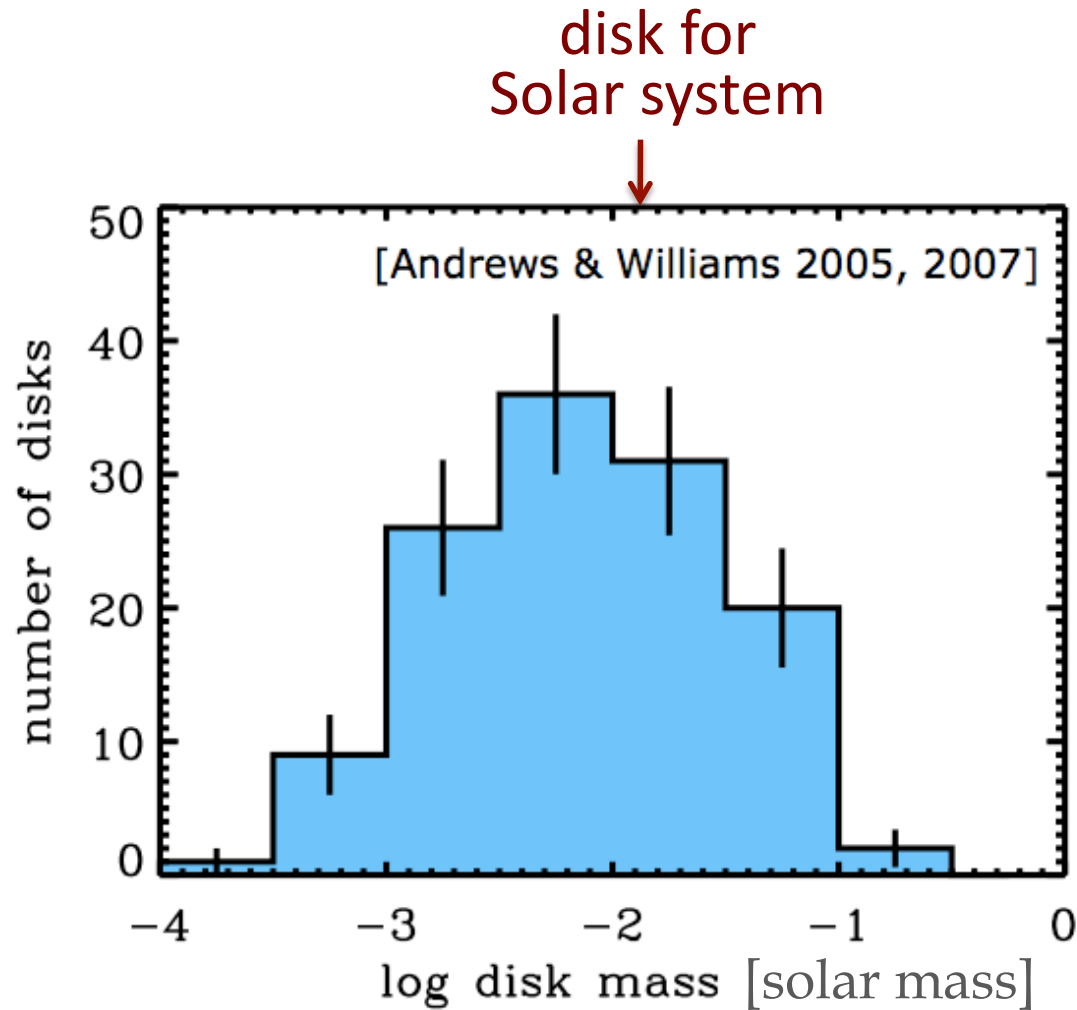


final state



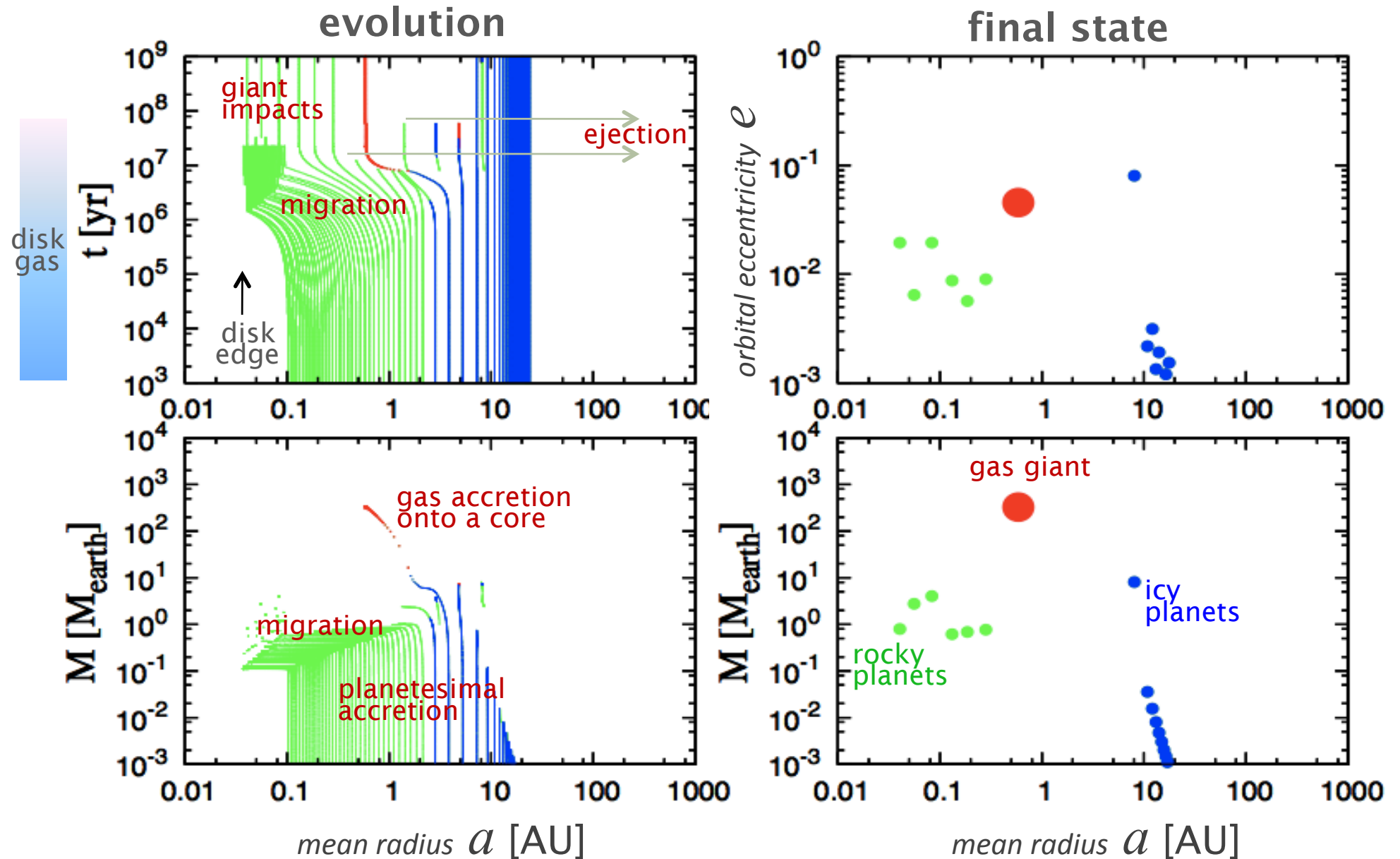
0.6 sec on Mac air

Dispersion of disk mass → diversity of planetary systems

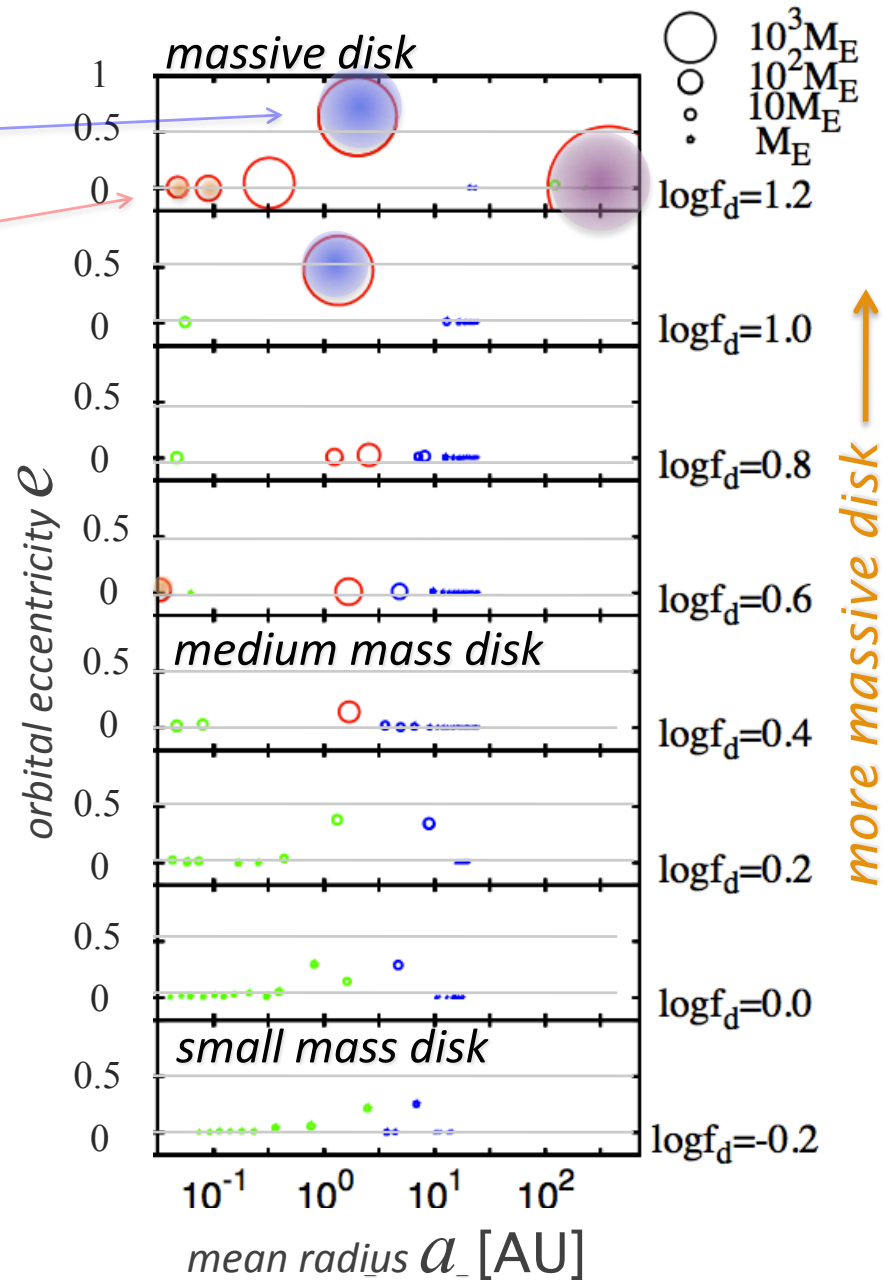
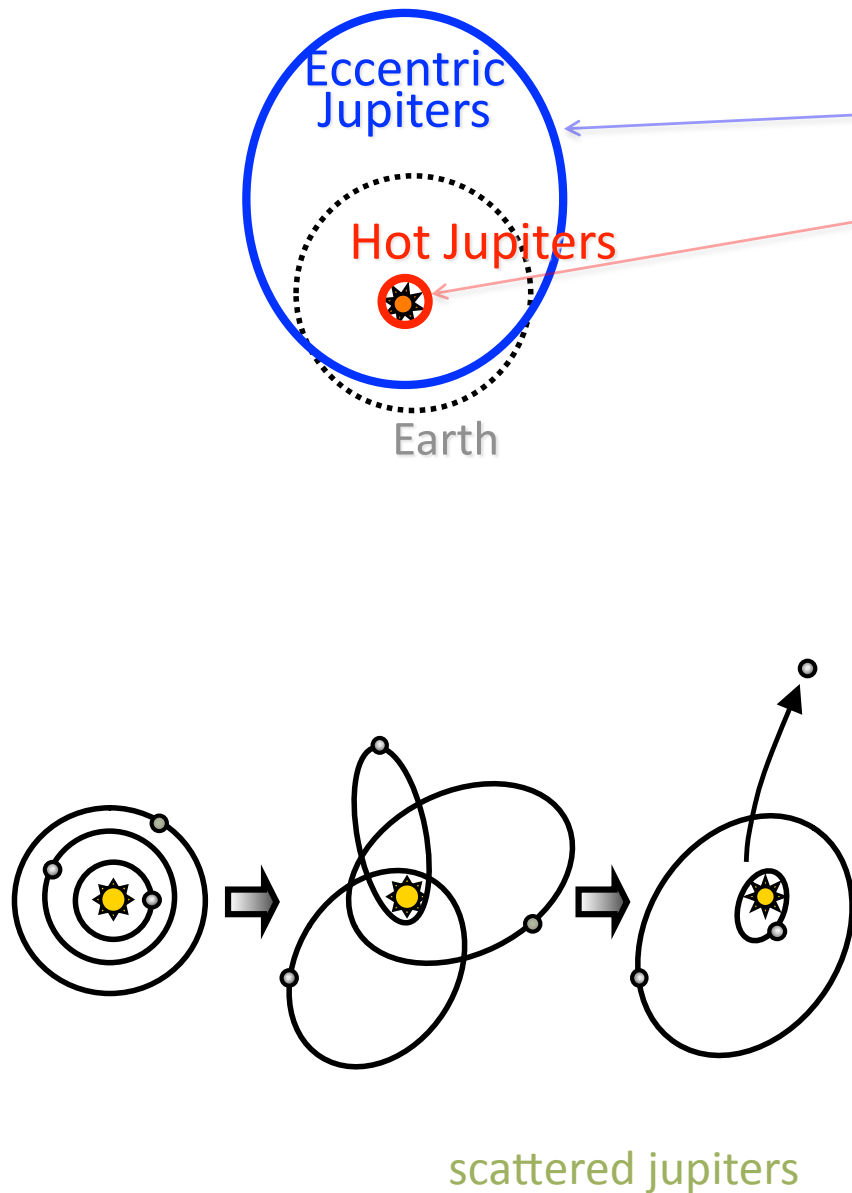


Observation of disks around young stars

formation of one particular system



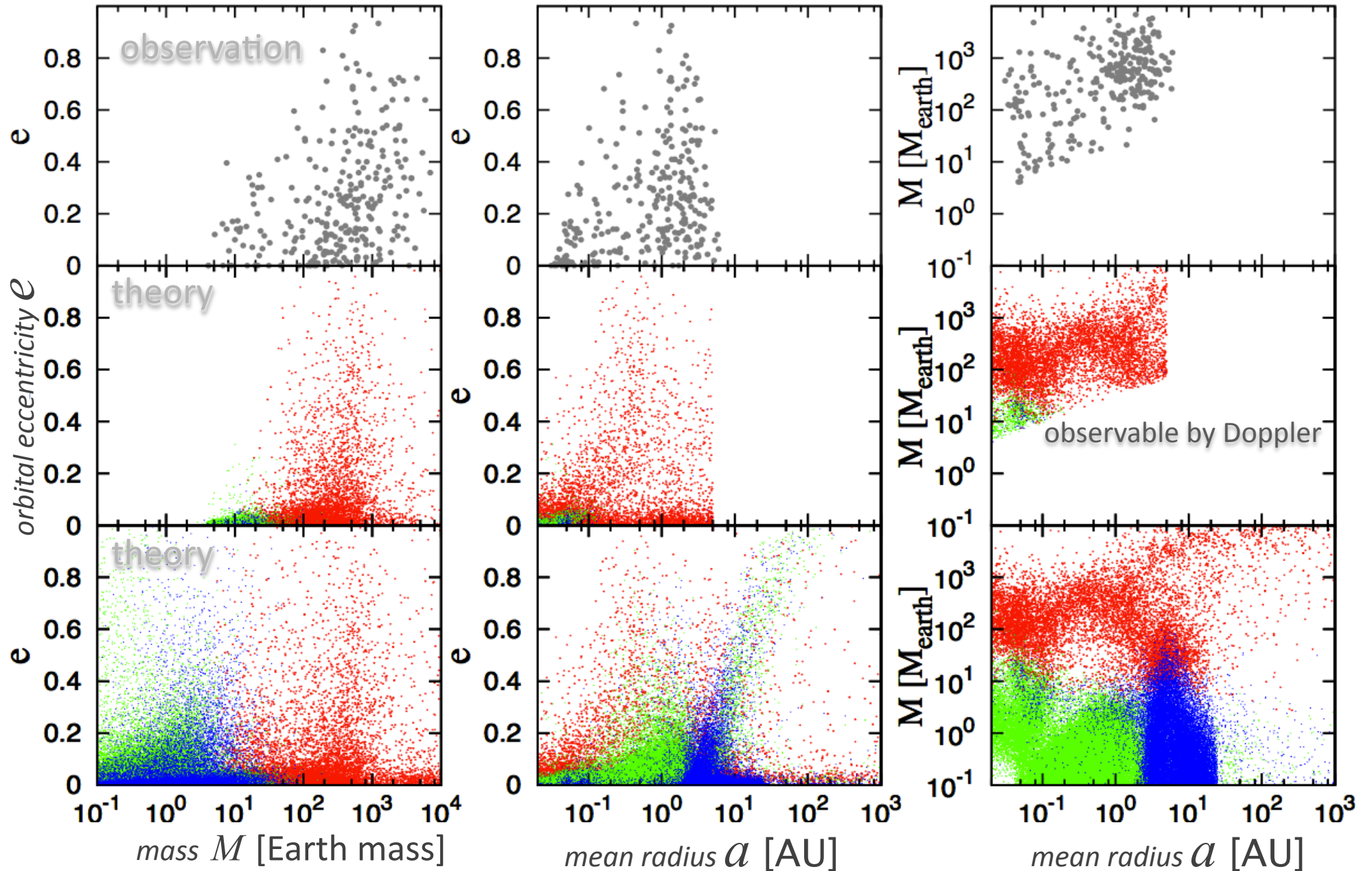
Systems from different mass disks



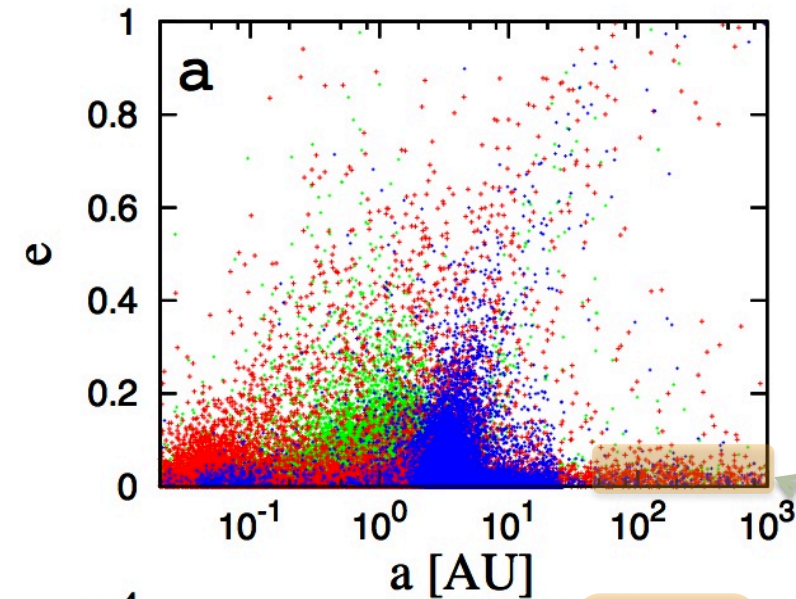
Population Synthesis

惑星の分布予測

10^4 systems; $\log M_{\text{star}} = 0+0.1$, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0+0.2$
 $\log M_{\text{disk}}/M_{\text{MSN}} = 0+1$, $\log t_{\text{disk}} = 6.5+0.5$
 $C_1=0.1$ (0.1xTanaka), $C_2 = 0.1$



Distant (>30AU) jupiters in nearly circular orbits [direct imaging]



core accretion model

■ *in situ* core formation **NO**

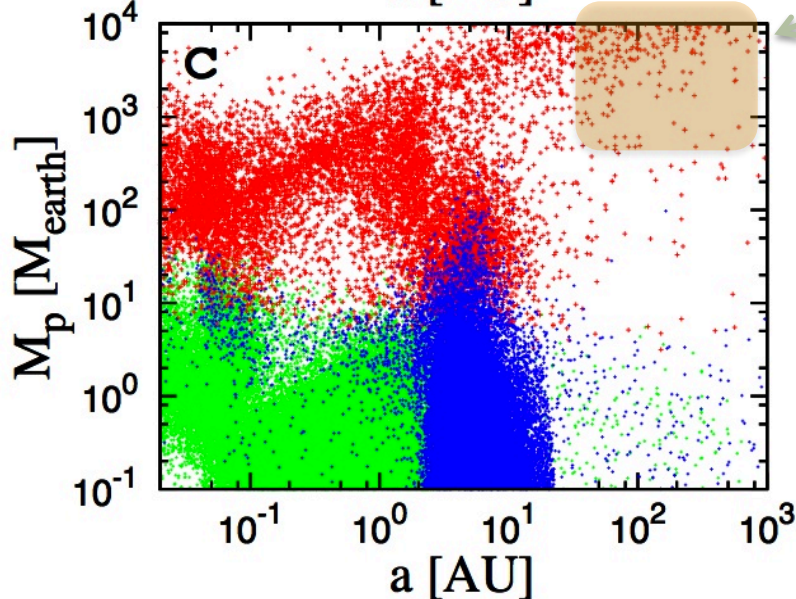
■ jupiter-jupiter scattering **NO**

→ high e , relatively low M

jups with $M > M_j$, $a > 100\text{AU}$, $e < 0.1$

■ 2 % of systems have such jupiters
[2, 3, 4 jup systems: 0.4%, 0.07%, 0.04%]
in this run

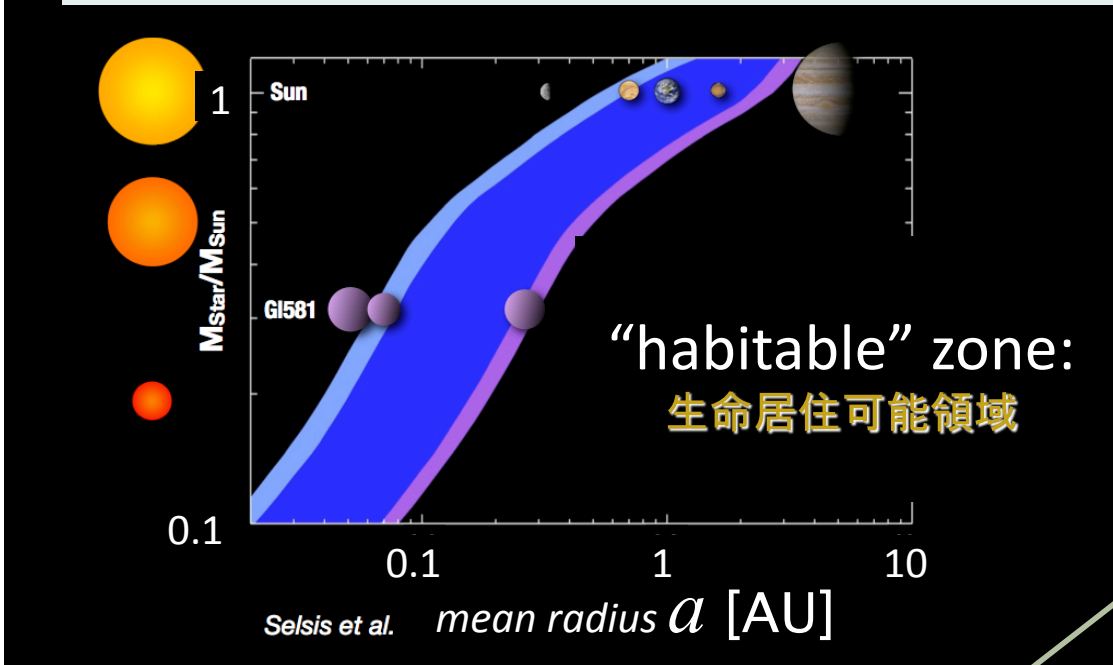
■ core-jupiter scattering
+ *in situ* gas accretion **YES**



$\eta_{\text{free-floating jups}}$:

much smaller than microlensing result

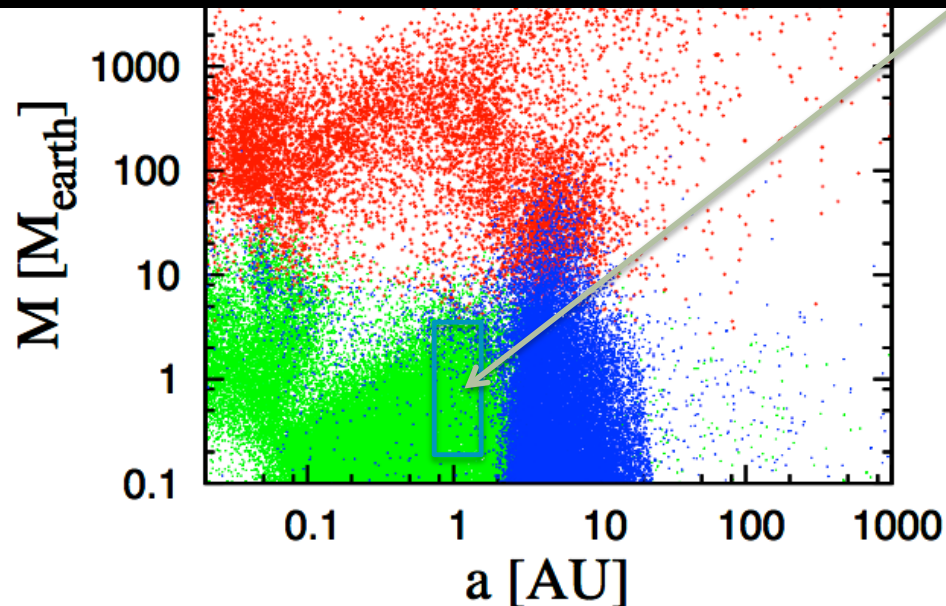
Prediction for “habitable” planets 生命居住可能惑星



predicted fraction of solar-mass stars having “habitable” planets

$$\eta_{\oplus} \sim 35\% (!)$$

yet to be observed;
many uncertain factors,
but very high

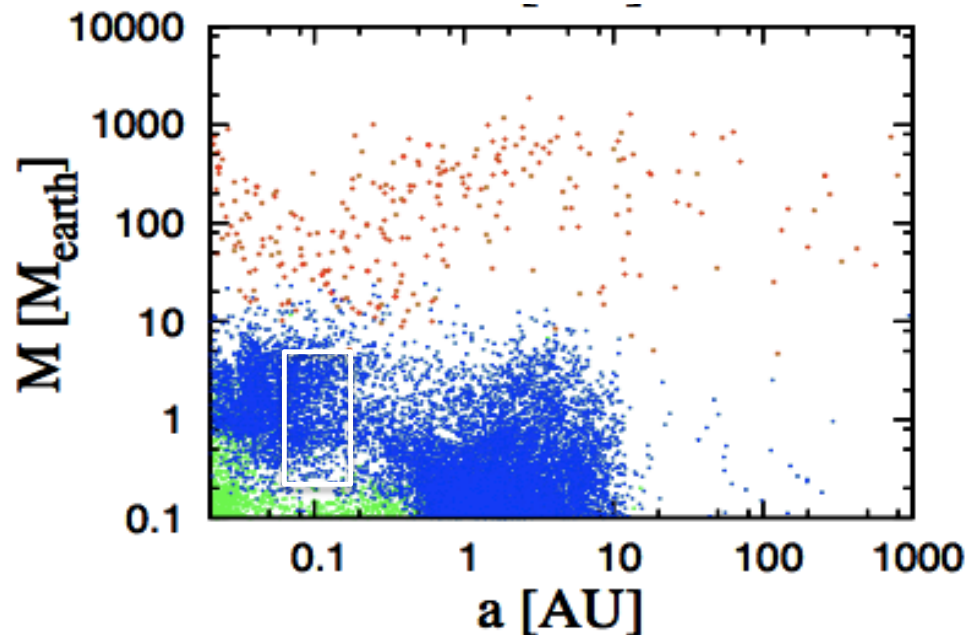


future target:
detection of habitable planets
detection of “bio-markers”
生命存在の指標

- Extra-Large Telescope
- Thirty-Meter Telescope

“Exotic” habitable planets around red dwarf stars

- M dwarfs – most abundant in our galaxy
 - faint → cold disk → habitable zone: close to a star
 - habitable planets: currently observable
 - mostly of H₂O? → ocean: > 1000km
 - spin-orbit locking
 - strong XUV flux & stellar flare on the day-side
- severe environmental conditions?



- On the Earths, life rapidly evolved when environment was very severe
 - 1st snowball Earth 全球凍結
prokaryote → eukaryote
原核生物 真核生物
 - 2nd snowball Earth
Cambrian explosion
カンブリア紀の生命大進化

Summary

- **系外惑星の観測の加速的進展で明らかになったこと**
 - diversity of gas giants
 - ubiquity of Super-Earths (& Earths)
- **惑星集積理論モデルの現状と問題点**
 - 部分的に観測データを説明できるが、わからない基礎物理も多数
 - 組み合わせたらどうなるのかもよくわからない
- **今後の惑星形成シミュレーション**
 - coupling between planets and disk gas
 - global simulation

