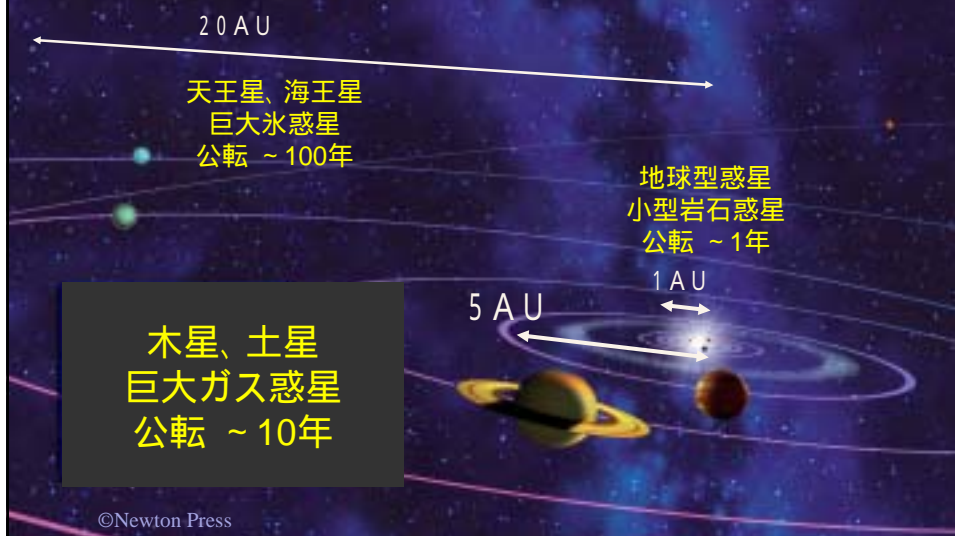


汎惑星形成論へ —生命居住惑星の存在確率— 井田 茂 (東工大・地球惑星)

- ▶ 1995年以来、約120個の系外木星型惑星の発見
 - ▶ 惑星存在確率 > 10%
 - ▶ 軌道の多様性(ホット・ジュピター、エキセントリック・プラネット、太陽系型)
- ▶ 系外惑星の観測 + 惑星形成理論
 - ▶ 系外木星型惑星の多様性をどう理解するのか？
 - ▶ 系外地球型惑星、特にハビタブル・ゾーンにあるものはどれくらい存在？

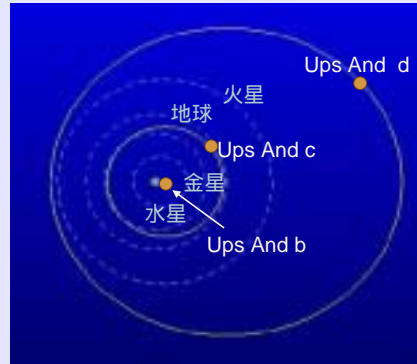
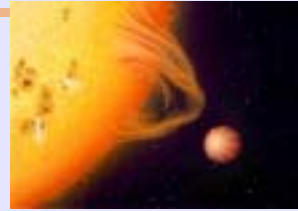
©Newton Press

太陽系の姿

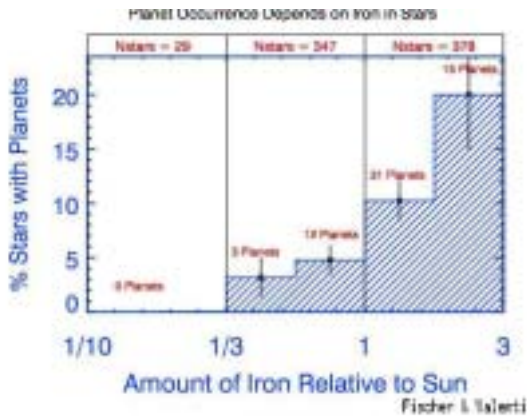


系外惑星の多様性

- 1995年以来、8年間で**120個!**
 - Doppler こからは transit? (e.g., OGLE)
 - 検出確率: 単一星で5~10%(多分 > 10%)
 - 多分、半分以上は multiple systems
- **異形の巨大ガス惑星たち**
 - **ホット・ジュピター** 20%
 - 灼熱、周期数日、自転ロック
 - **エキセントリック(楕円軌道)・プラネット** 70%
 - 激しい四季、地球型への影響
- **太陽系と同質な惑星系は?**
 - **木星、土星と似た惑星** 10%
 - 周期数年以上、円軌道



系外惑星の発見確率



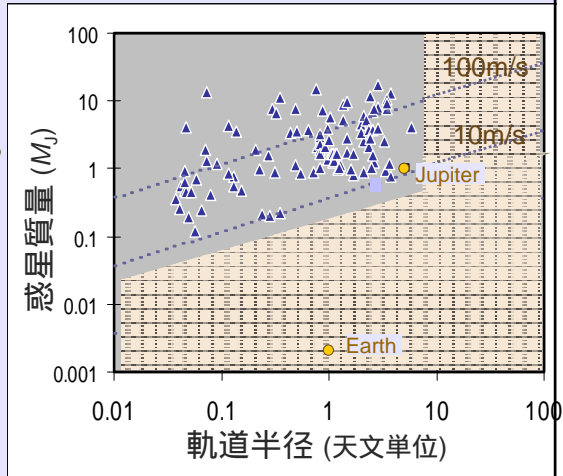
- G,K型(太陽質量程度)の主系列星
- 主に単一星 (連星でも発見)
- 60pc (200光年)以内

太陽系は特殊か標準か？

- 観測からは微妙
 - 大質量、小軌道半径の惑星が選択的に検出
 - 太陽系型はもっと多い？



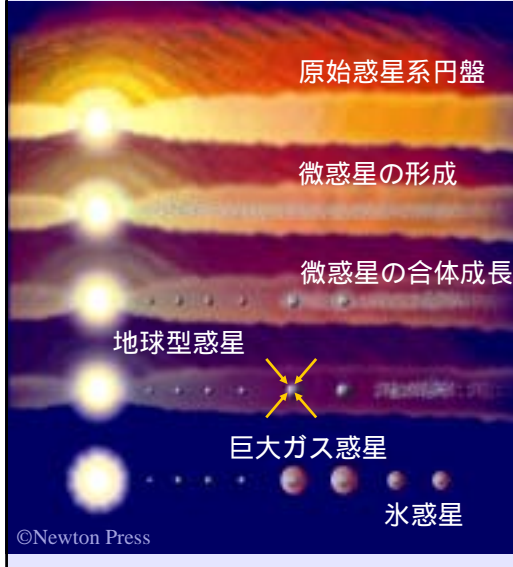
- 理論の出番
 - ・ 現状の観測結果をどう解釈？
 - ・ 系外地球型惑星の存在に対して何がいえる？



太陽系は特殊か標準か？

- 太陽系/地球は特殊か標準か？ 学界で議論沸騰
- 欧米の学者は「特殊」(唯一世界論)を好む傾向
- われわれの考え：以下の論理の帰結に従う
 - 現存の太陽系形成理論を拡張, 一般化
[この理論は太陽系をよく説明 積極的に活用]
 - ・ 1. 太陽系チューニングをはずす
 - ・ 2. 基本的枠組、キー・パラメータを取り出す
 - ・ 3. キー・パラメータの値をあり得る範囲でふる
 - ・ 4. それぞれの場合に基本的枠組みを適用
 - 結果として「標準」(多世界論)

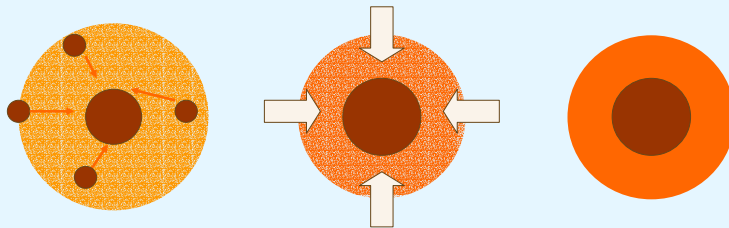
太陽系形成標準理論



- 原始惑星系円盤を出発点
 - 組成: H, He ガス 99 w.%
塵(固体) 1w.%
 - 質量: 太陽の1%
- 微惑星仮説
 - 固体成分が先に凝集し、ガス成分があとで付け加わる
- 1980年代にロシア、日本で枠組み確立 (京都モデル)
- 地球型惑星、巨大ガス惑星、氷惑星の形成領域を説明
- 惑星が円軌道で、軌道間隔が外に向かって広がるとを説明

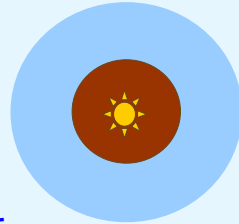
巨大ガス惑星の形成 (コア集積モデル)

- 石・氷コアが先にできて、H-Heガス(円盤ガス)が後からつけくわった
- 石・氷コアが $5-10M_{\oplus}$ になるとガス流入開始



巨大ガス惑星ができる場所

- コア質量は太陽から離れるほど大きい
 - 材料物質が多い
 - 領域大、3AUより遠方では氷凝結
 - 巨大ガス惑星は外側でできる
- 外側領域では成長が遅い
 - 十分な大きさのコアができたときには円盤ガスが消失 巨大になれない
天王星、海王星
- 巨大ガス惑星は、ほどほどの外側でできる (太陽系では、5 - 10天文単位)



汎惑星系形成理論への一般化

- 現存の太陽系形成理論を拡張, 一般化
[この理論は太陽系をよく説明 積極的に活用]
 - 1. 太陽系チューニング (円盤質量の仮定) をはずす
 - 2. 基本的枠組 (微惑星仮説、コア集積モデル)、キー・パラメータを取り出す
 - 3. キー・パラメータ (円盤質量) の値をあり得る範囲 (観測値の範囲) でふる
 - 4. それぞれの場合に基本的枠組みを適用
- 結果として「標準」(多世界論)

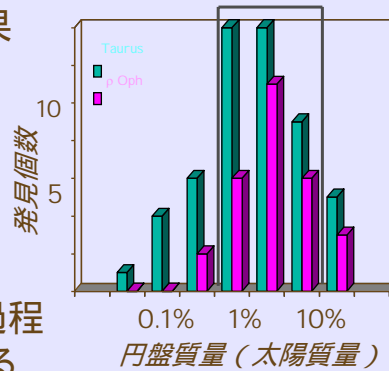


以下の計算、議論はわれわれのもの

キー・パラメータ：円盤質量？

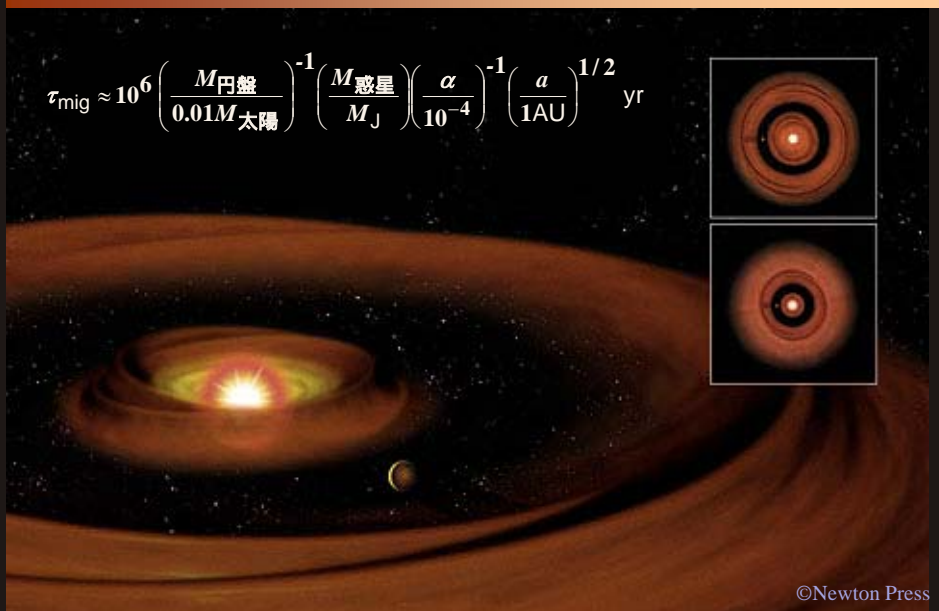
- Tタウリ星円盤の電波観測結果
 - 原始惑星系円盤の質量分布：
太陽質量の **0.1 - 30%**
 - ⇕
 - 太陽系円盤：太陽質量の **1%**
- 太陽系形成標準理論の物理過程を、他の質量の円盤に適用する
 - + 惑星移動の効果

Beckwith & Sargent (1996)



Orbital migration

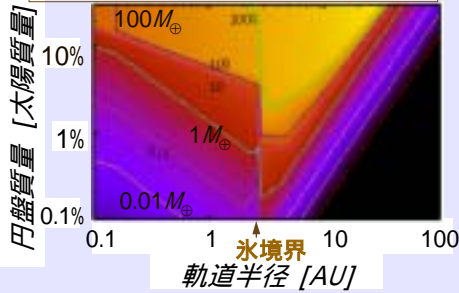
$$\tau_{\text{mig}} \approx 10^6 \left(\frac{M_{\text{円盤}}}{0.01 M_{\text{太陽}}} \right)^{-1} \left(\frac{M_{\text{惑星}}}{M_{\text{J}}} \right) \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{-1} \left(\frac{a}{\text{1 AU}} \right)^{1/2} \text{ yr}$$



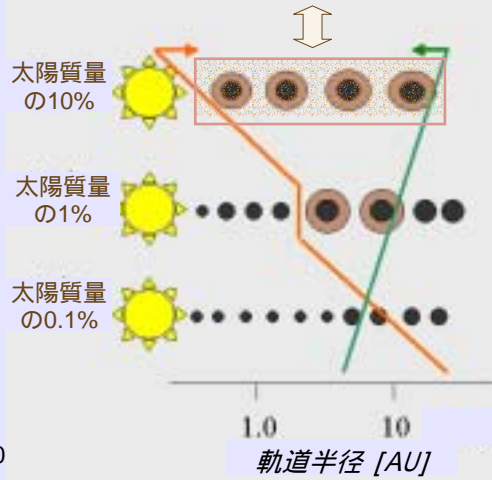
惑星系の多様性の理論的予測

- 円盤質量 = 太陽質量の1% (太陽系円盤):
氷境界のすぐ外側でのみ
- 太陽質量の5%以上:
氷境界の内側でも

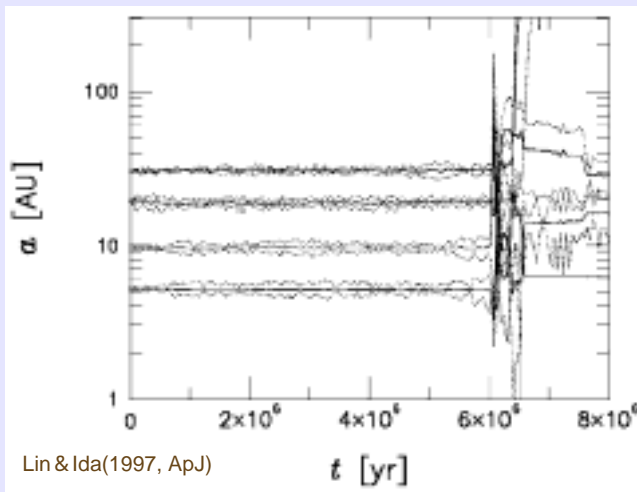
理論シミュレーションの結果
(Ida & Lin, 2004a, ApJ):
黄色の領域 = 巨大ガス惑星



観測されている
異形の系外惑星?



惑星系の長時間軌道不安定



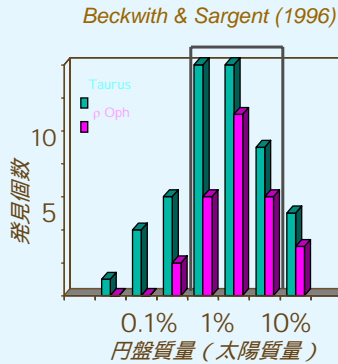
$$t_{\text{cross}} \propto 10^{(\Delta a / m^{1/4})}$$

観測される惑星分布の予測：モンテカルロ計算 方法

(Ida & Lin, 2004a, ApJ)

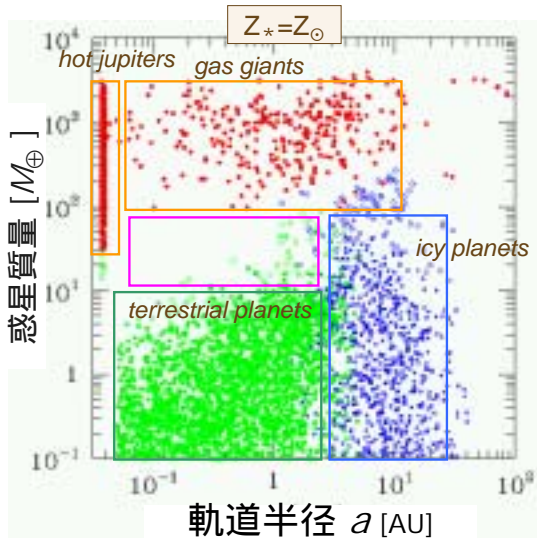
- 初期条件分布
 - 円盤質量：観測結果
 - 面密度は $a^{-3/2}$
 - a 分布: logで一様
 - 他のパラメータ
 - 円盤寿命 (円盤の観測結果)
 - $\text{disk} = 10^6 - 10^7 \text{ y}$
 - 中心星質量 (系外惑星の観測)
 - $M_{\text{star}} = 0.7 - 1.4 M_{\odot}$
 - 対応して, $a_{\text{ice}} = 2.7 (M_{\text{star}} / M_{\odot})^2$
 - 惑星移動 (あり、なし)

$$\tau_{\text{mig}} \approx 10^6 \left(\frac{M_{\text{円盤}}}{0.01 M_{\text{太陽}}} \right)^{-1} \left(\frac{M_{\text{惑星}}}{M_{\text{J}}} \right) \left(\frac{\alpha}{10^{-4}} \right)^{-1} \left(\frac{a}{1 \text{ AU}} \right)^{1/2} \text{ yr}$$



観測される惑星分布の予測：モンテカルロ計算 結果

(Ida & Lin, 2004a, ApJ)



- 巨大ガス惑星、地球型惑星、氷惑星の明確な住み分け

$$M_{\text{gas}} > 10 M_{\text{solid}}$$

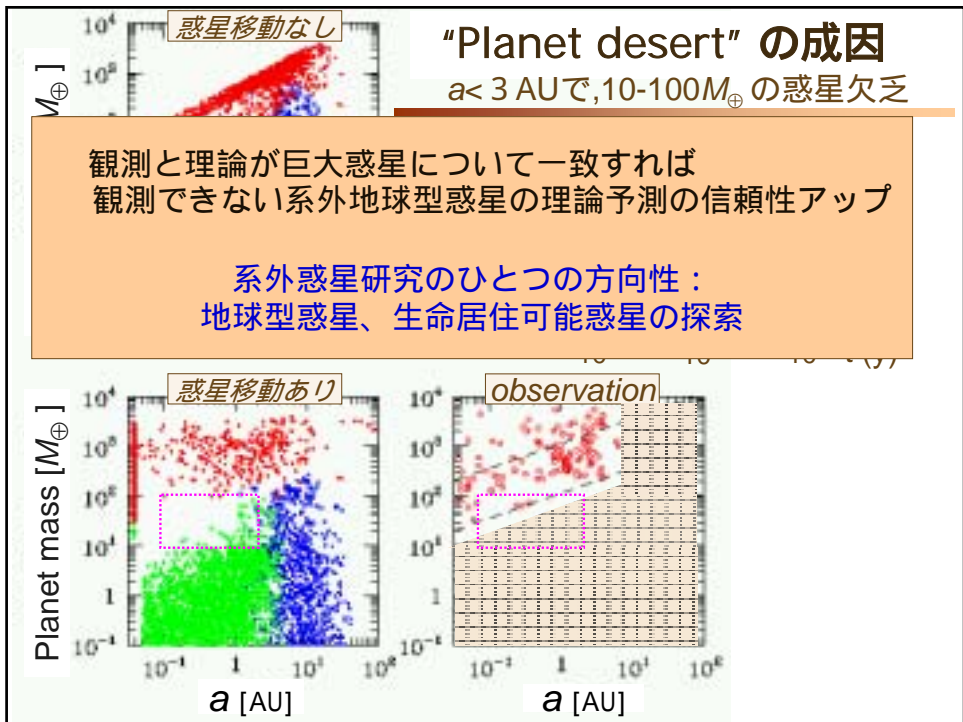
$$M_{\text{gas}} < M_{\text{solid}} \quad a > a_{\text{ice}}$$

$$M_{\text{gas}} < M_{\text{solid}} \quad a < a_{\text{ice}}$$

- 惑星砂漠

- $a < 3 \text{ AU}$

- $M = 10 - 100 M_{\oplus}$



地球型惑星が生命居住可能であるためには

- 大気の保持 $0.3 M_{\oplus} < M_{\text{惑星}} < 3 M_{\oplus}$
- 海洋存在 $a_1 < a_{\text{惑星}} < a_2$ (habitable zone)
 $a_{1,2} \propto L_{\text{中心星}}^{1/2} M_{\text{中心星}}^2$

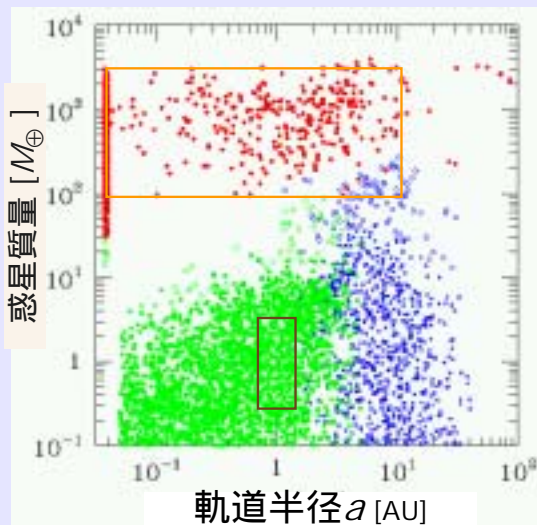
そのほかの生命居住条件

- 大気の保持 $0.3M_{\oplus} < M_{\text{惑星}} < 3M_{\oplus}$
- 海洋存在 $a_1 < a_{\text{惑星}} < a_2$ (habitable zone)
 $a_{1,2} \propto L_{\text{中心星}}^{1/2} M_{\text{中心星}}^2$
- 海洋の低温化 大気から二酸化炭素除去
プレートテクトニクス？

陸上生命

- 強い磁場 光合成 オゾン層
- 自転軸安定 逆行自転 or 巨大衛星存在
- 巨大ガス惑星 (彗星衝突の盾)？

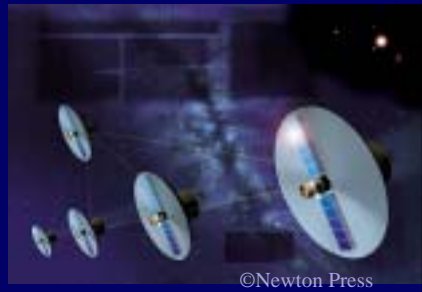
居住可能惑星の存在確率



- 理論予測：
居住可能惑星と巨大ガス惑星はほぼ同数
 - 現在の観測：200光年内の巨大ガス惑星
~ 120個
- ↓
- 200光年内に居住可能惑星が 100個 !?

居住可能惑星を求めて

- これまでの観測では巨大ガス惑星のみ
- 惑星形成理論で考える
 - 系外巨大ガス惑星の観測を統一的に説明できる理論
系外地球型惑星の形成の予測
- 天文観測で地球型惑星を見つける
 - トランジット: Corot (2006? フランス)、Kepler (2008? アメリカ)
 - 衛星干渉計: Darwin (2020? EU)、TPF (2020? アメリカ)、JTPF?
 - 生命活動の痕跡
(バイオマーカー)を探す
- 比較生命論
- SETI (フェルミのパラドックス?)



©Newton Press

結果: Z_* 依存性

$$M_{\text{core}} \propto f_{\text{dust}}^{3/2}$$

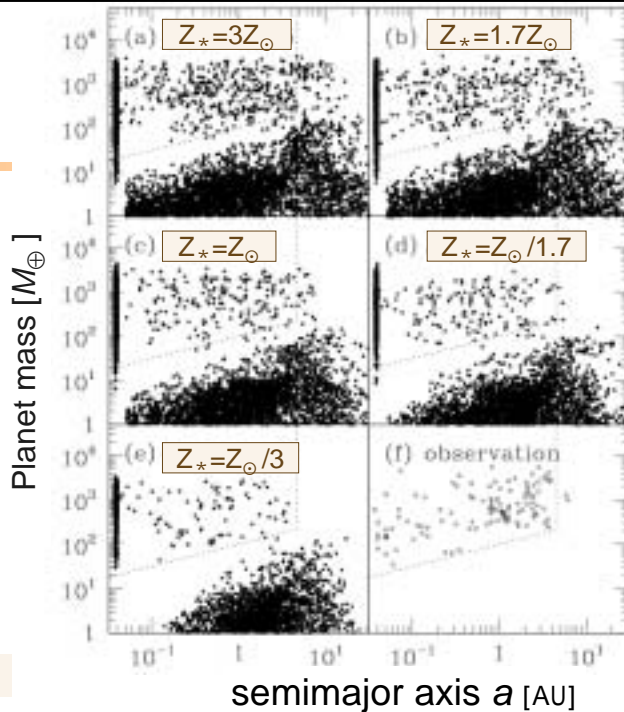
Kokubo & Ida 1998

more gas giants

$N_{\text{hot jup}}/N_{0.2-2\text{AU}}$
theory \gg obs.

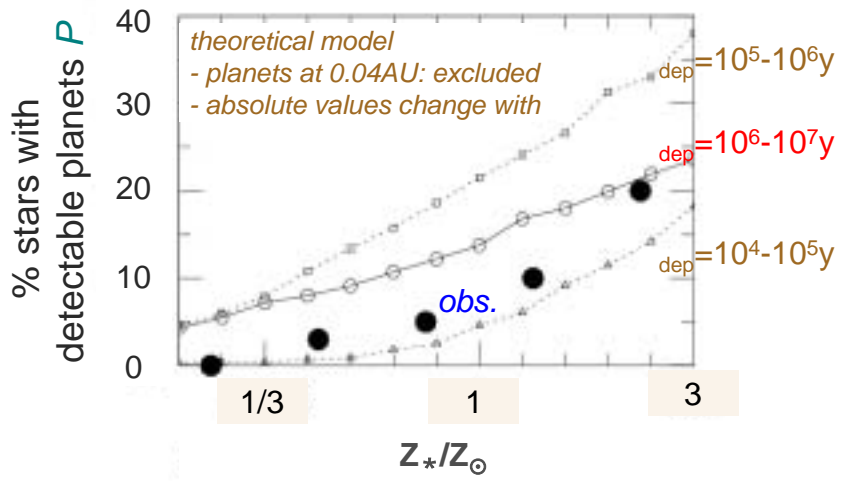
many hot jupiters
are accreted

Ida & Lin (2004b)



semimajor axis a [AU]

結果: Z_* 依存性



core accretion model reproduces the dependence
self-grav. instability model