

## 惑星系の多様性の起源

井田 茂

東工大・地球惑星

**Abstract.** これまでに発見された系外惑星は、その軌道分布に大きな多様性を示している。太陽系形成の標準理論を振り返り、このような惑星系の多様性を生み出す原因について考える。ダストや惑星の移動現象や軌道不安定などの惑星形成に内在する要因、惑星形成時に恒星が通過することによる重力擾動や近傍での大質量星の形成による影響などの外的要因が考えられる。内的要因は原始惑星系円盤の質量や重元素量がコントロールしているのかもしれない。

### 1. 系外惑星系の観測

2002 年 1 月現在、67 個の主系列星のまわりで 75 個の惑星が発見されている。

(e.g., <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>, <http://exoplanets.org/>)

発見された全ての惑星は、惑星がまわることによる中心星のゆれを測ったものである（ひとつつの惑星については、後述の transit 法でも確認）。中心星がゆれることにより、われわれの視線方向の運動が生まれ、それがその星からの光をドップラーシフトさせる。スペクトルの吸収線の分光観測により、このドップラーシフトを精密に測ることができる。

この方法は間接的ではあるが、惑星の軌道、(最小) 質量を精度よく決めることができる。惑星の質量と軌道長半径を  $M_p, a$ 、中心星の質量を  $M_c$ 、惑星軌道面に垂直な軸と視線方向のずれの角度を  $i$  とすると、惑星をもつ星のドップラー速度の振動の振幅  $V_r$  と周期  $\tau$  は、

$$V_r = \frac{G^{1/2} M_p \sin i}{M_c^{1/2} a^{1/2}} \quad (1)$$

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_c}} \quad (2)$$

と与えられる。観測によって  $V_r, \tau$  がきまるので、 $M_p \sin i, a$  がもとまる。また、振動の sin カーブからのずれによって、軌道離心率がきまる。

この中心星の視線方向速度をドップラーシフトを測る方法 (radial velocity 法、Doppler shift 法) の他にも、惑星が中心星を横切ることによって中心星が周期的に減光することを測る方法 (transit 法) や、中心星のゆれを位置観測したり (astrometry)、重力レンズによる惑星の検出の努力もされている。transit 法では、radial velocity 法ですでに確認されている惑星をひとつ独立に検出している。transit 法では惑星の軌道長半径の他、大きさや  $\sin i$  が求まる。重力レンズでは、すでに数個の発見の報告があった（まだ未確認だが）。

検出確率は太陽質量程度の单一星で、これまでの観測精度で数%である。Figures 1, 2 にこれまでに発見された系外惑星の質量、軌道分布を示す。Fig.1 では、中心星が太陽質量のときの  $V_r$  をいくつかプロットしてある。radial velocity 法では重い惑星が見つかりやすいので、これまで検出された惑星は木星のような巨大ガス惑星だと考えられる。発見された惑星のうち約 1/4 は "Hot Jupiter" と呼ばれる軌道長半径が非常に小さい ( $a < 0.1 \text{ AU}$ )

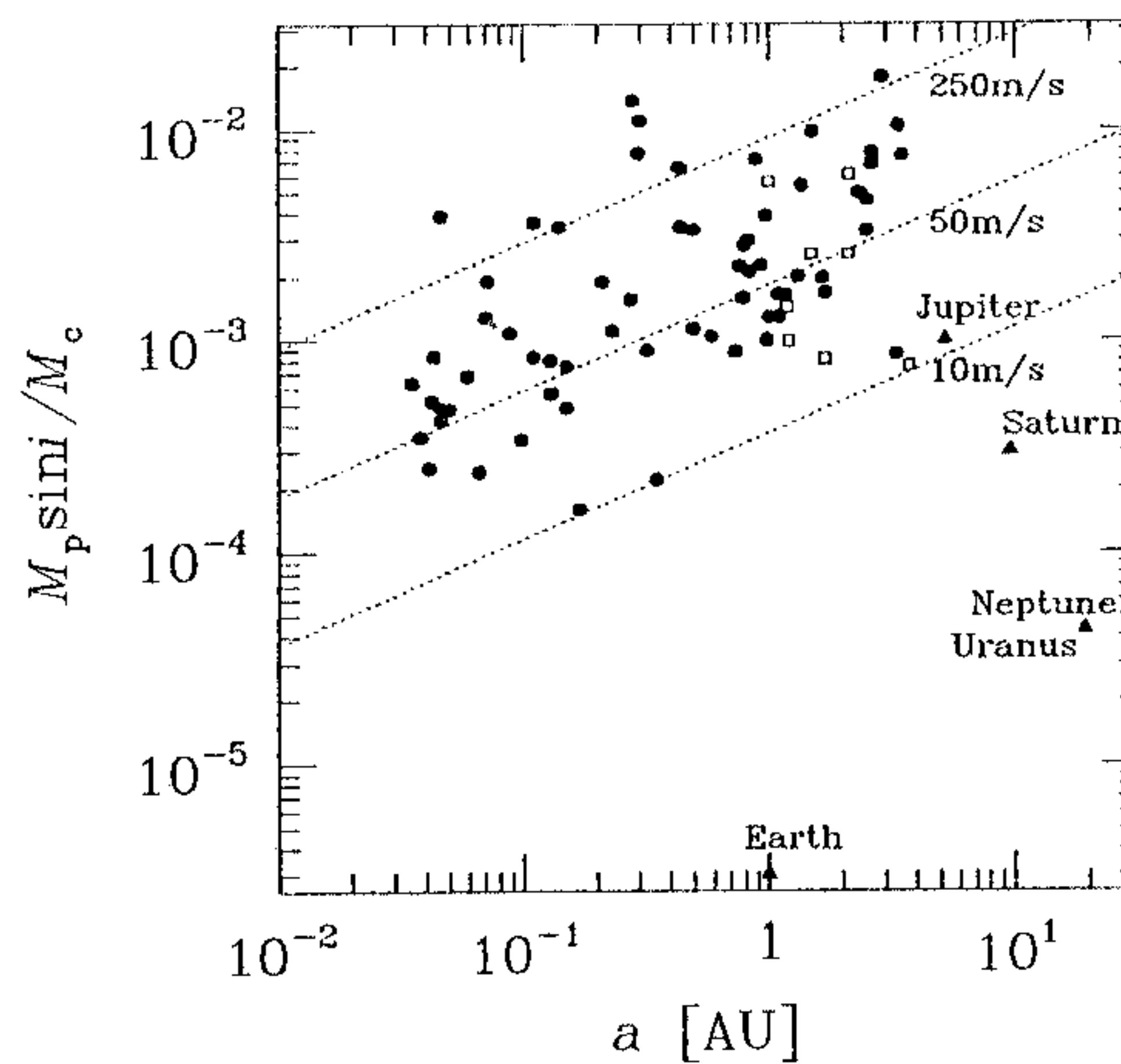


Figure 1. 発見された系外惑星の質量  $M_p$  (中心星質量  $M_c$  で規格化してある)、軌道長半径  $a$  の分布。系外惑星の質量には  $\sin i$  の不定性がある。白抜きの四角は軌道離心率  $e$  が小さく、 $a$  が比較的大きな、太陽系型巨大惑星を表す。太陽系惑星も三角形でプロットしてある。破線は中心星が太陽質量のときの  $V_r = 250, 50, 10$  m/s のラインを示す。

惑星で、約 2/3 は軌道離心率が大きな ( $e > 0.1$ ) 惑星である。太陽系の木星、土星のように軌道長半径が比較的大きく、軌道離心率が小さな ( $a > 1\text{AU}$ ,  $e < 0.1$ ) 惑星は全体の 1/10 にしか過ぎない。しかし、radial velocity 法では軌道長半径が小さいほど見つかりやすいので、今後、太陽系の木星、土星のような惑星の発見が増えていく傾向にあるだろう (現在の radial velocity 法の精度は 3 m/s 程度)。

## 2. 太陽系形成の標準理論とその問題点

太陽系形成の標準的モデルは以下のようになっている (e.g., Safronov 1969, Hayashi et al. 1985, 渡邊 & 井田 1997) : (1) 原始惑星系円盤が形成 (H, He ガスが全体の質量の 99 % を占め、残りが固体ダスト; 円盤質量は太陽質量の 1 % 程度)、(2) ダスト成分が円盤赤道面に沈殿し微惑星が形成、(3) 微惑星が衝突合体して成長して、地球型惑星と木星型惑星のコアができる、(4) 木星型惑星のコアが地球質量の数倍から 10 倍の質量に達すると、惑星大気がコアに崩壊し、まわりに円盤ガスが残っていれば、ガスが流入、(5) 原始惑星系円盤が消失。

T Tauri 星の観測によれば (e.g., Beckwith & Sargent 1996)、円盤質量は太陽質量の 0.1 %-10 % 程度に分布し、平均値は太陽質量の 1 %-3 %。また、円盤の寿命は  $10^7$  年程度。

この標準理論に従うと、巨大ガス惑星の形成については、(a) 一般に中心星から遠いほど、dust/gas 比 ( $= \gamma$ ) が大きなコアができるので ( $M_p \propto a^{3/4} \gamma^{3/2}$ )、遠いところで巨大ガス惑星が形成 ( $a > 2.7\text{AU}$  では  $\text{H}_2\text{O}$  の氷が凝縮するので、 $\gamma$  は大きくなる)、(b) 中心星から遠いほど、コアの形成に時間がかかる ( $\propto a^3$ ) ので、遠すぎると、コアが形成されたときには円盤が散逸していて、巨大ガス惑星はできない; それゆえ、天王星、海王星は巨大ガス惑星になれなかった、(c) 円運動している円盤ガスの流入で巨大ガス惑星ができるので、巨大ガス惑星の軌道は一般に円軌道に近くなる。

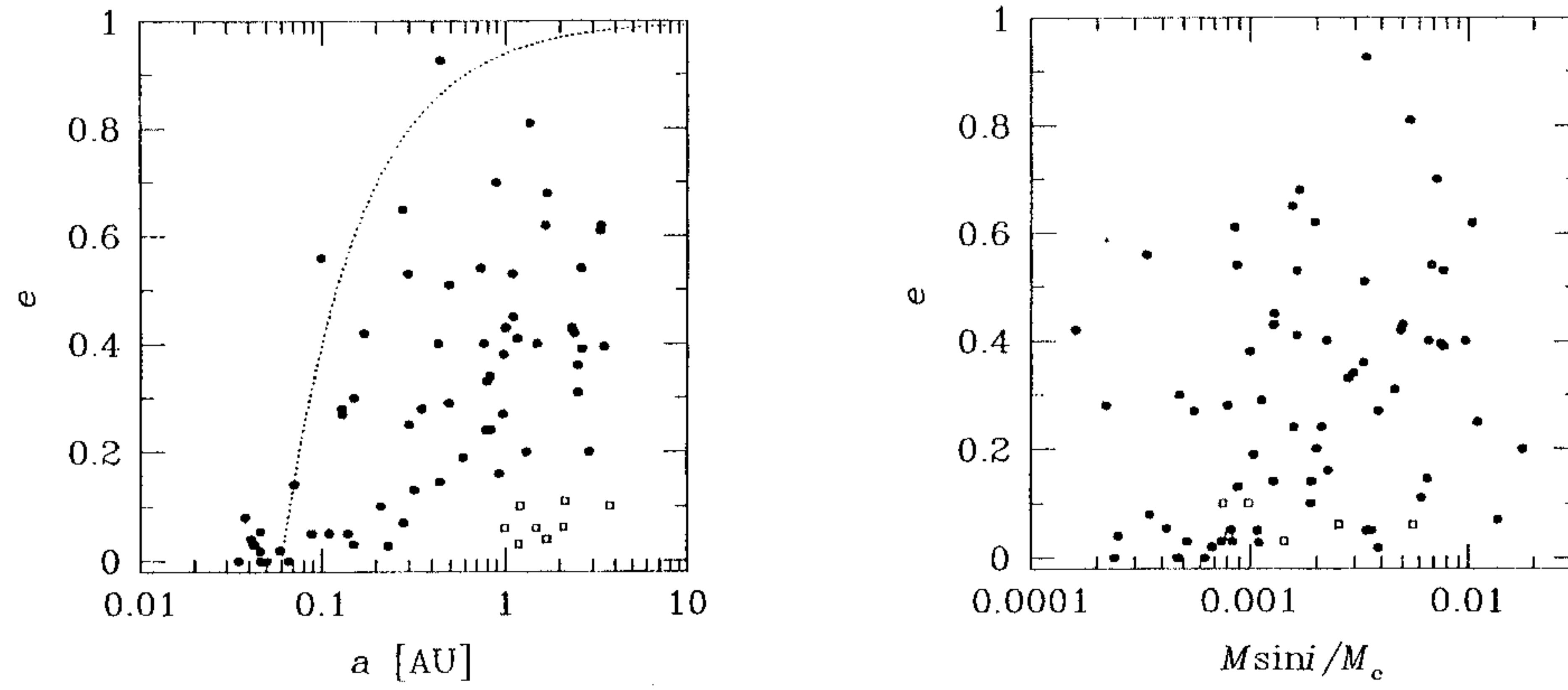


Figure 2. 発見された系外惑星の質量  $M_p$  (中心星質量  $M_c$  で規格化してある)、軌道長半径  $a$ 、軌道離心率の分布。 $e - a$  の図で破線の左上の領域は、近点距離が小さく、中心星の潮汐力で惑星軌道が  $10^9$  年程度で円軌道化されてしまう領域を示す。

ただし、上の結論は以下のようない仮定の上に成り立っている：

1. 原始惑星系円盤の質量は太陽質量の 1 %程度。
2. ダスト、微惑星、惑星などの固体成分は円盤の半径方向には移動しない。
3. 形成された惑星の軌道はずっと安定である。
4. 太陽系は孤立系である。

上記 1. は明らかに太陽系でのみ成り立つ仮定であって、他の系では成り立たない。観測的には、円盤質量は太陽質量の 0.1 %-10 %程度のばらつきがある。2. は実は太陽系形成の標準理論の大きな問題点である。理論的には、以下に述べるように、移動するほうが自然に見える。3. も微妙な問題で、他の系でも成り立つ保証はない。4. は程度の問題はあるが正しくないであろう。最近の観測によれば、星は集団で形成され、1 億年以上かけてだんだんとばらけていく。惑星形成が行なわれているころは近傍との星の重力散乱、または近くでできた星の紫外線やジェットなどが円盤に影響を与えるはずである。

### 2.1. ダスト、惑星落下問題 - Hot Jupiter の起源？

理論的には、ダストや惑星は円盤との相互作用で中心星方向に移動する可能性が予言されている。なぜ、太陽系ではそれがなかったのかが問題となっている。しかし、うらを返せば、このことが惑星系の多様性を説明する可能性がある。

円盤ガスは円盤の半径方向に圧力勾配があって、ケプラー回転速度より、 $\eta = 0.1\text{-}1\%$ だけ遅く回転しているので、ダスト粒子はガスとの間に相対速度を持ち、ガス抵抗を受ける (Hayashi et al. 1985, 渡邊 & 井田 1997)。サイズ  $D \ll 1\text{ m}$  のダスト粒子はガス抵抗が十分強くガスと共に運動し、 $D \gg 1\text{ m}$  のものはガス抵抗があまり効かず、ガスとはほとんど独立にケプラー回転をする。どちらの場合もダスト粒子は円盤半径方向には移動しないが、 $D \sim 1\text{ m}$  のものは中途半端にガス抵抗を受けて角運動量を失い、中心星方向に

$$V_{r,\text{drag}} \sim \eta V_{\text{kep}}, \quad (3)$$

( $V_{\text{kep}}$  はケプラー速度) という大きな速度で移動する。そのままならば円盤内の固体成分は急速になくなってしまう。これを避けるのためには、ダスト層の自己重力不安定で一

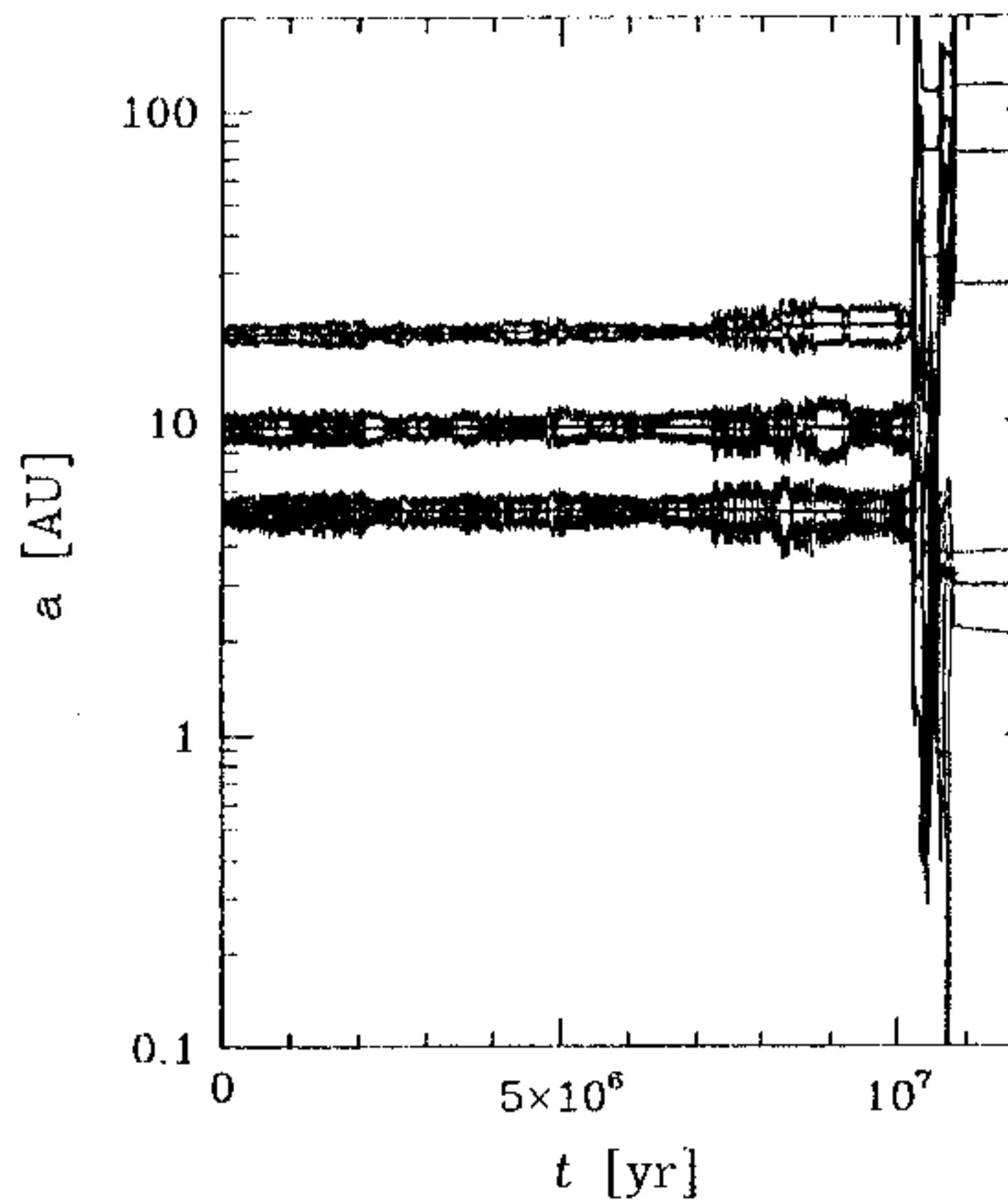


Figure 3. 巨大ガス惑星の長時間軌道不安定の例。現在の木星、土星、天王星の位置に木星質量の2倍の惑星を3つおいて計算した。それぞれの軌道を表す線は3本の線が重なっていて、真中は軌道長半径、上下の線は遠日点と近日点を表す。上下の線の幅が軌道離心率に比例している。はじめ円軌道に近い状態からスタートし、ずっと円軌道に近い状態だが、 $10^7$ 年後に急激に軌道離心率が上昇し、惑星同士は近接散乱をおこし、ひとつの惑星が系外にはねとばされ、のこりの2つの惑星は大きな軌道離心率をもって残る。

気に km サイズになるか (Hayashi et al. 1985, 渡邊 & 井田 1997)、落ちる前に急速に成長するかのどちらかである。乱流状態にある円盤でそのようなことが可能かどうかはよくわかっていない。

また、原始惑星が月質量 (地球質量の1/100) を越えると、原始惑星と円盤ガスとの重力相互作用が重要となり、原始惑星は角運動量を失って中心星方向に移動すると言われている。線形論 (Ward 1986, 1997) によると、移動速度は、

$$V_{r,\text{grav}} \sim \left( \frac{M_p}{M_\odot} \right) \left( \frac{M_{\text{disk}}}{M_\odot} \right) \left( \frac{r}{H} \right) V_{\text{kep}}, \quad (4)$$

である。ここで、 $r$  は中心星からの距離、 $H$  は円盤のスケールハイトで、 $r/H \sim 10$ 。 $V_{r,\text{grav}}$  は、地球質量、1AU で  $10^{-5} V_{\text{kep}}$  であり、かなり大きい。

惑星質量が地球質量の10倍を越えると、円盤ガスにギャップを開け (Lin & Papaloizou 1993)、円盤との相対運動がとまる。しかし、円盤自身がアクリーションディスクとして中心星に降着するので、やはり、その巨大惑星は中心星方向にギャップもろとも移動する。

これらのダスト、惑星、巨大惑星の移動は中心星に近いほど速いと見積もられている。したがって、もしこのような移動が円盤存在中に太陽系でおこったとすると、惑星の分布は円盤の外側に偏るはずである。しかし、太陽系の惑星の分布はそうなっていないので、太陽系では実際にはこのような移動がおきなかつたと考えられる。

一方、このような移動がおきて、その移動が円盤の内縁で何らかの効果で止まるとすると、0.05AU というような内側領域での巨大惑星 (Hot Jupiter) の存在を説明することができる (e.g., Lin et al. 1996)。しかし、この移動をおこしたりおこさなかつたりする物理パラメータは何なののかは明らかになっていない。

## 2.2. 楕円軌道惑星の起源？

一方、楕円軌道惑星の起源としては、現在有力なのは軌道不安定説である。近年のコンピュータシミュレーションによると、惑星が3個以上の惑星系では、初期に円軌道だった惑星軌道がある有限の時間で突然、楕円軌道化することが知られている(Fig.3)。その有限時間は経験的に  $\propto \exp(\Delta a/M_p^{1/4})$  ( $\Delta a$  は惑星の軌道間隔) のように  $\Delta a$  と  $M_p$  に非常に敏感に依存することがわかっている(Chambers et al. 1996)。つまり、巨大ガス惑星形成の微妙な違いで、中心星の主系列年齢以内で楕円軌道化する可能性がある。

太陽系では、このような軌道不安定がおきた形跡はない。どうのようなときに不安定をおこすのかの物理条件も明らかになっていない。

## 3. まとめ

これまでに発見された系外惑星には、その軌道分布に大きな多様性が見つかっている。巨大ガス惑星が、円盤の比較的外側で円軌道で形成されるであろうことは、たぶん正しいだろう。したがって、Hot Jupiterは、形成された惑星が円盤内縁部に移動（もしかしたら固体材料物質が円盤内縁部に溜って、そこで集積）してできたのだろう。楕円軌道惑星は、はじめ円軌道でできたものが長時間の重力擾動で楕円軌道化したものと考えられる。

そのような移動や不安定をコントロールする物理パラメータは、明らかになっていない。候補としては円盤質量、円盤の重元素比、円盤の寿命などが提案されている。円盤の重元素比が大きいと惑星は落下しにくくなるはずである。また、近傍で大質量星が形成されることによって、その紫外線で円盤が早い段階ではがされるということも、惑星落下を阻害する。いっぽう、あまり早くはがされると、巨大ガス惑星が形成されなくなる。

円盤質量については2桁以上のバラツキがあることが観測的に明らかになっている。固体惑星の質量は円盤質量の3/2乗に比例することがわかっている(Kokubo & Ida 1998, 渡邊 & 井田 1997)、円盤質量のバラツキは形成される惑星系に大きな多様性を生むであろう。

惑星系の多様性を統一的に説明する試みは今始まったばかりである。今後も急速に観測が進み、太陽系の木星、土星に対応するパラメータ領域の惑星分布も近いうちに明らかになるだろう。理論研究もそれに対応して急速に発展していくことが予想される。

## References

- Beckwith, S. V. W. & Sargent, A. I. 1993, in Protostars and Planets III, ed. E. H. Levy & J. I. Lunine (Tuscon: Univ. of Arizona Press), 521; 1996, Nature, 383, 139  
Chambers, J. E., Wetherill, G. W., & Boss, A. P. 1996, Icarus, 119, 261  
Hayashi, C., Nakazawa, K., & Nakagawa, Y. 1985 in Protostars and Planets II, ed. D. C. Black & M. S. Matthews (Tuscon: Univ. of Arizona Press), 1100  
Kokubo, E. & Ida, S 1998, Icarus, 131, 171  
Lin, D. N. C., Bodenheimer, P., & Richardson, D. 1996, Nature, 380, 606  
Lin, D. N. C. & Papaloizou, J. C. B. 1993, in Protostars and Planets III, ed. E. H. Levy & J. I. Lunine (Tuscon: Univ. of Arizona Press), 749  
Safronov, V. 1969, Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets (Moscow: Nauka Press)  
Ward, W. R. 1986, Icarus, 67, 164; 1997 Icarus, 126, 261  
渡邊誠一郎 & 井田 茂 1997, in 比較惑星学 (岩波書店), 131