

特集「比較惑星系形成論」

系外惑星系の多様性の起源へ向けて

井田 茂¹

この数年でたてつづけに20個あまりの「惑星候補天体」が他の星のまわりで発見されている。1999年春のアンドロメダ座 υ 星での3個の「惑星候補天体」発見は、これまでの「惑星候補天体」がやはり「惑星」であることを強く支持する。惑星系はこの銀河の星ではかなり普遍的に存在しているようだ。しかし、見つかった惑星系は太陽系とかけ離れた姿のものが多く、惑星形成理論は太陽系とともにこれらの異形の惑星系をも統一的に説明しなければならない。これまでの系外惑星の力学的データをまとめ、われわれがどう考えていくべきかを整理する。

1. 系外惑星はやはり「惑星」

1999年春、すでにひとつの「惑星候補天体」が発見されていた、アンドロメダ座 υ (ウブシロン)星で、さらに2個の「惑星候補天体」が確認され、この星には少なくとも3つの「惑星候補天体」がまわっていることがわかった。一般に、この系のように複数の天体が中心星をまわる系は惑星系であることはほぼ確実である。以下で述べるように、このことにより、他の一連の「惑星候補天体」も惑星であることがほぼ確実になったといえる。

ここで、「惑星」の定義をしておく。ここでは特に木星や土星のような巨大ガス惑星を考える。星は分子雲ガスの収縮で形成されるが、角運動量の保存により、収縮につれて回転が速くなる。結果

として、二重星や多重星が形成される場合と、中心星とガス円盤(原始惑星系円盤)が形成される場合とがある。原始惑星系円盤の中で形成されるのが「惑星」である[1], [2], [3]。円盤中で固体成分がガスから分離して集まり、微惑星を形成し、微惑星が衝突合体して成長する。それが、約10倍の地球質量を越えると円盤ガスが流入して巨大ガス惑星となる。太陽系ができたのと同じように惑星系ができるなら、一般にひとつの系に複数個の惑星ができるはずである。たとえ巨大ガス惑星ができなくても、地球型惑星は形成されるはずである。一方、二重星の伴星で、たまたま中心星に比べ非常に軽く、自らは光らないもの(褐色矮星)があったとすると、それは見た目は惑星のように見える。しかし、それは原始惑星系円盤を経由していないので、惑星とは呼べない。

非常に小さな伴星が複数個形成されるという多重星の形成の確率はかなり低いと思われるので、ひとつの系で複数あるかどうか「惑星」か「伴星」かの決めてになると考えられる。これまではひとつの星にひとつずつの「惑星候補天体」しか確認されておらず、それらが、非常に軽い伴星であるという可能性を完全には否定できなかった。ところが、アンドロメダ座 υ 星では3つの「惑星候補天体」が見つかった。この系はほぼ確実に惑星系であろう。

これまでに発見された「惑星候補天体」の多くは、0.05AU(ここでAUは太陽と地球の距離、

¹ 東京工業大学理学部地球惑星科学科

1.5×10^{13} cm) などというような中心星の極めて近くをまわっているもの (Hot Jupiters) や軌道離心率がかなり大きい ($e > 0.2$) もの (Eccentric Planets) である [3]. これまでの惑星検出の方法は, 惑星公転の反作用で中心星が微妙に周回するのを, その星からの光のドップラーシフトで測ったものである [3]. この方法では重い惑星が選択的に検出される. 太陽系でいえば, 木星や土星のような巨大ガス惑星に対応する.

木星や土星は太陽系の外側 (> 5 AU) の領域を円軌道でまわっていて, 系外「惑星候補天体」の多くを占める Hot Jupiters や Eccentric Planets とは似ても似つかない. したがって, 系外「惑星候補天体」は二重星の伴星として考えたいという意見も根強かった. それに対しては, 中心星との質量比の頻度分布をみると, 二重星の伴星の分布と系外「惑星候補天体」の分布には明らかなギャップがあるので (伴星は中心星質量の十分の一以上なのに対して「惑星候補天体」は百分の一以下), それらが同じ形成過程を経た天体と考えるのには無理があるとの反論がだされていた. さらに, 惑星系と考えざるを得ない, アンドロメダ座 ψ 星は1つの Hot Jupiters と2つの Eccentric Planets を持っている. したがって, 他の一連の似たような Hot Jupiters も Eccentric Planets もやはり「惑星」であると考えべきであろう.

2. 標準理論を拡張すべき

ドップラーシフト法では重い惑星とともに中心星に近い惑星が選択的に検出される. 実際には, 太陽系のような惑星系はかなりの数が存在し, 観測精度のさらなる向上につれてもっと発見されていくと想像される. しかしながら, これまで観測された星のうち, 約5%の星で Hot Jupiter, 別の約5%で Eccentric Planets が発見されていて, それら

はそこそこの存在確率があり, 「非常に稀なケース」として排除することはできない. われわれは, Hot Jupiters や Eccentric Planets を持つ系も「惑星系」と考え, それらの形成をわれわれの太陽系の形成と統一的に考えていかねばならない.

道はふたつある. これまでの太陽系形成の「標準理論」[1], [2], [3] を全く捨て去り, 根本的に惑星系形成理論を構築しなおすこと, もしくは「標準理論」を Hot Jupiters や Eccentric Planets の形成も統一的に説明できるように拡張, 一般化することである.

1980年代から電波観測などによると, 星形成の副産物として, 原始惑星系円盤が星のまわりに形成され (50%以上の確率), その平均質量は太陽質量の1/100程度で大きさは100AU程度であることがわかった [3], [4], [5]. これは太陽系形成の「標準理論」が想定している惑星形成の初期条件としての原始太陽系星雲とほぼ一致している. そして, 「標準理論」は (問題もいろいろあるが [2]), 太陽系のおおまかな姿を自然に説明することに成功している. したがって, 簡単に「標準理論」を否定することはできない. ここでは, 「標準理論」の一般化という方針で考えていく.

系外惑星系の観測, 理論化ははじまったばかりである. ここでは系外惑星系の形成の理論化のためにヒントとなる観測データ, これまでに提案された理論モデルを整理する.

3. 系外惑星の力学的特徴

図1は観測された系外惑星の質量の最小値と軌道長半径 a の関係である. 「最小値」というのは, ドップラーシフト法では, 視線方向のドップラー速度しかわからないため, 惑星の真の質量を M , 視線方向と軌道の回転軸とのなす角を θ とすると, $M \sin \theta$ という量しかわからないからである. しか

し、 θ がランダムに分布しているとする、 $M \sin \theta$ の分布と M の分布は平均ではファクター2も変わらない。中心星のなかにはM型星やK型星のように比較的軽いものも含まれているため、惑星質量は中心星質量 M_c で規格化してある。図には $M_c=1M_\odot$ のときのドップラー速度 10m/s, 50m/s, 250m/sの線もひいてある。現在の検出限界は数十m/sである。これを見ると、ドップラー速度 300-400m/s以下、 $M \sin \theta / M_c \leq 0.005$ の範囲（惑星質量の限界？）で、系外惑星はほぼ一様に分布しているように見える。質量の軌道長半径依存性はあまりみられない。以後、 $a < 0.2\text{AU}$ のもの（Hot Jupiter）を黒マリの印でプロットすることにする。

図2は軌道離心率 e の軌道長半径 a の関係である。中心星に近い（近点 $a(1-e)$ が小さい）惑星軌道は中心星との潮汐相互作用で、円軌道化される [6]。破線は惑星の散逸パラメータ $Q = 10^5$ のとき、数十億年で円軌道化されることを表している [6]。したがって、この線の左側の領域ではもともと大きな e であっても $e \ll 1$ に変化しているはずである。この図をみると、その円軌道化領域を除くと、軌道離心率の軌道長半径依存性は見られない。

軌道離心率 e と惑星質量の関係は図3に示してある。質量の小さいものは円軌道に近いものばかりであるが、これらはHot Jupiterなので、潮汐相互作用により円軌道化されている。ドップラーシフト法の特徴により、質量の小さいもので検出されているのは軌道長半径の小さいHot Jupiterばかりになる（図1参照）。Hot Jupiterを除いてみると、軌道離心率の質量依存性もやはりみられない。

図1, 2, 3で、三角印は伴星がある星の惑星である。これらの特殊性は見えない。

以上、系外惑星の軌道・質量分布をみてきたが、どういうプロットをしてもランダムである。この一様分布であるということが、Hot Jupitersや

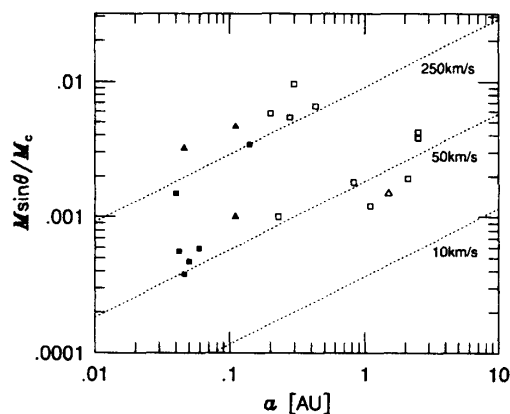


図1 観測された系外惑星に対して、軌道長半径 a の関数としての質量の最小値 $M \sin \theta$ をプロットした。惑星質量は中心星質量 M_c で規格化してある。破線は $M_c=1M_\odot$ のときのドップラー速度 10m/s, 50m/s, 250m/sを表す。黒マリの印は $a < 0.2\text{AU}$ のHot Jupiterを表し、シロスキの印は $a > 0.2\text{AU}$ のものである。三角印は伴星がある系の惑星である。

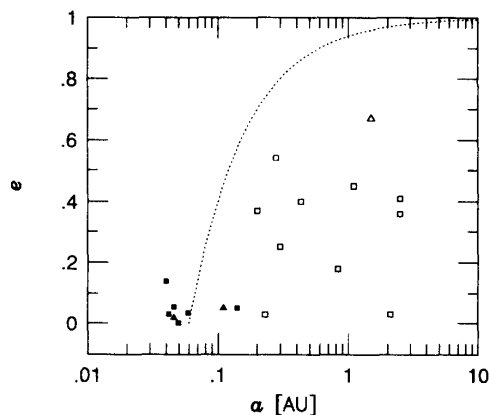


図2 系外惑星の軌道離心率 e と軌道長半径 a の関係。破線より左の領域では、惑星の軌道は数十億年（～主系列星の年齢）以内で円軌道化される（惑星の散逸パラメータ $Q = 10^5$ のとき）。

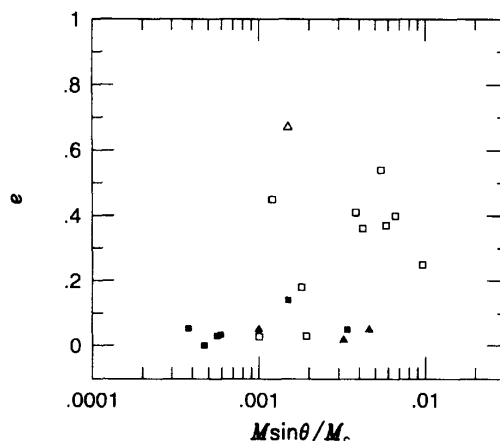


図3 系外惑星の軌道離心率 e と質量の関係。質量の小さいものは円軌道に近いものばかりであるが、これらはHot Jupiterなので、潮汐相互作用により円軌道化されている。

Eccentric Planets の形成モデルの制約条件となる。なぜなら、以下のように、あるモデルでは軌道・質量分布に必然的に強い相関関係を生み、そういうモデルは排除されることになるからである。

4. 異形の惑星の起源モデル

まずは、「標準モデル」による太陽系の巨大ガス惑星の形成を復習しておく。(1) 1/100 太陽質量の原始太陽系円盤の中で、固体成分が凝縮し、微惑星が形成される。(2) 微惑星は衝突合体を繰り返す、地球型惑星(固体惑星)ができる。(3) 円盤の外側では大きな固体惑星ができやすい ($M \propto a^2$ [2])。 (4) 固体惑星が地球質量の約10倍に達するとまわりのガスが流入し、固体コアのまわりに大量のガスがとりまき、巨大ガス惑星(木星、土星)が形成される。(5) やがて、ガス円盤は散逸する。

木星、土星は10倍地球質量の固体コアに、それぞれ、300倍、100倍地球質量のガスがとりまいている。ガス流入がおこると惑星質量は一気に増大する。一般に円盤の外側ほど、固体惑星の形成に時間がかかる ($t \propto a^3$ [2])。天王星、海王星では形成に時間がかかりすぎたため、先にガス円盤が散逸したので、ガスがほとんど流入せず、巨大になれなかった(固体コアの大きさは、木星、土星、天王星、海王星でほぼ同じである)。このシナリオに従うと、巨大ガス惑星は円盤のほどほどの外側の領域ででき、円軌道で回転しているガス円盤のなかで形成されるので、惑星軌道は円軌道になる。

これまでに提案されている、Hot Jupiter、Eccentric Planets の起源モデルの多くは、上の標準モデルを踏襲し、まず巨大ガス惑星が円盤の外側の領域で円軌道で形成されたあと、内側に移動したり、楕円軌道化するというものである。

4.1 Eccentric Planets の起源モデル

Eccentric Planets の起源モデルは

1. 惑星間重力相互作用による軌道不安定
2. 惑星-ガス円盤相互作用
3. 伴星の重力
4. 通過する星の重力がある。

そもそも不安定な軌道配置の惑星系は作られないが、ガス流入の過程での質量増加が不安定化をひきおこす可能性がある [7]。また、ガス流入しても安定だったとしても、長時間惑星間相互作用重力で、やがて不安定化する可能性がある [8]。近年の計算によると [9]、円軌道ではじまった惑星運動は、惑星間相互重力が相互重力の影響を受けても、ある一定時間は円軌道のままであるが、あるとき突如楕円軌道に変化し、惑星同士が近接散乱をおこす。どれだけ経ったら、このような軌道変動がおこるのかは惑星間の距離、惑星質量に非常に敏感に依存する。したがって、ガス惑星形成のちょっとした違いによって、すぐに軌道変動がおこる惑星系も作られる一方、太陽系のように最低100億年は安定と予測される惑星系も作られる。

ある惑星が系外にはじきとばされたり、衝突したりすると、惑星系は大きな離心率を持ったまま、安定化する。このモデルの問題点は、どのような状況ならば、中心星の年齢内に軌道不安定が起こるのかがいまだよくわかっていないということである。惑星に重力摂動を与えて、惑星の軌道離心率を大きくするものは他の惑星に限らない。原始惑星系ガス円盤は木星質量の100倍程度の質量を持つ。原始惑星系ガス円盤の重力が原因かもしれない [10]。しかし、この重力相互作用でどれだけの離心率を得られるのかはよくわかっていない。しかし、この重力相互作用は、一般に、木星質量以下の惑星には力学的摩擦として働き軌道離心率をさげ、それより大きな質量の惑星では、離心率が上がり、大きな惑星ほど大きな離心率を持つはず [10] といわれている。しかし、そのような相関

は図3では見られない。

ゆるい束縛の二重星の伴星で、伴星と惑星の軌道面傾斜角が大きい場合、その軌道面傾斜角が長時間の伴星と惑星の相互作用で、惑星の軌道離心率に転化されるという可能性もある [11]。しかし、これは長時間の微妙な相互作用のため、惑星が複数個あると、他の惑星重力の影響で乱され、このメカニズムは働きにくい。一方、ひとつの系に惑星系は複数個あるはずである。また、そもそも、上に見たように、Eccentric Planets の多くは単一星で発見されている。したがって、このモデルで Eccentric Planets を説明するのは難しい。

伴星ではなく、通り過ぎる他の星の重力摂動が重要かもしれない。一般に星は集団で形成される(オリオン座やおうし座の星生成領域などが例)。その集団は 10^4 年程度で分解していくと考えられている。したがって、現在、孤立した単一星でも形成時においては、他の星が比較的近くを通り過ぎた可能性がある。惑星系を持った星と他の星との最接近距離を q とすると、一般に $a < q/3$ の領域の惑星の離心率が大きくなげられる [12]。通り過ぎるのが二重星だった場合、もっと内側まで影響がでるかもしれない [13]。問題は 10^4 年での遭遇の q の最小値の期待値であるが、かなり密集した星生成領域で 200AU 程度と見積もられている [13] ので、これまでに見つかった軌道長半径の小さな Eccentric Planets をこのモデルで説明するのは難しい。(観測されている歪んだダスト円盤はこのモデルで説明されるかも知れない [12].)

4.2 Hot Jupiter の起源モデル

Hot Jupiters の起源モデルは

1. 惑星間重力相互作用による軌道不安定の後に中心星との潮汐相互作用で円軌道化
2. 惑星-ガス円盤相互作用による移動
3. in situ 形成

が考えられている。

上に述べたように、惑星間重力相互作用で軌道離心率 e が上昇して、近点距離 $a(1-e)$ が中心星半径の数倍にまでなる場合、中心星との潮汐相互作用でこの軌道はその近点距離程度の軌道長半径の円軌道になっていく。さきに述べたように、近点距離が 0.05AU 程度で惑星の散逸パラメータ Q が 10^4 程度の場合、数十億年で円軌道化される [6]。問題は数十億年もの間、近点距離をその位置に保ってられるかということである。 $a(1-e) \sim 0.05\text{AU}$ などというときは、 $e \sim 0.99$ などという値になっており、ちょっとした惑星重力で $e \sim 0.99$ からずれてしまえば、もうだめである。

ガス円盤の重力で惑星の軌道離心率が変化すると述べてきたが、軌道長半径も変化する。一般に軌道長半径は減少し、惑星は内側に動く。惑星質量が大きいほど、速く動く [15]。中心星のそばまで移動すると、潮汐相互作用で、それ以上の移動は食い止められる [16]。また、ガス円盤が中心星のそばで切れていけば、やはり、それ以上動かない [16]。中心星のロッシュ限界(中心星半径の数倍)の中まで惑星が入り込むと、質量放出をし、それに伴う角運動量輸送で、それ以上の移動が妨げられるというモデルもある [17]。問題は、惑星が内側に大きく動く場合と、あまり動かないで Eccentric Planets とか太陽系惑星のように残る場合が、どうわかれるのかよくわからない。また、アンドロメダ座 υ 星では、1つだけが動いてしまっていて、他の2つは動かなかったということになる。これをどう説明するかも問題である。

最後のモデルは、0.05AU などという場所で、巨大ガス惑星を作ろうとするものだが、標準モデルには反しない。固体成分がガス抵抗などで、中心星の近くに移動してきて、ガス円盤が中心星のそばで途切れいれれば、そこに溜る。その場所で、固体惑星が10倍の地球質量まで成長し、まわりの

ガスが流入して巨大ガス惑星ができるというものである。しかし、0.05AUなどという場所で、本当に十分なガスが流入していくのか、さらに固体成分が中心星のほうに移動して内側で巨大ガス惑星ができる場合と移動しないで外側で巨大ガス惑星ができる場合がどうわかれるのかなど問題は多い。

5. 惑星系の多様性の統一的説明を目指して

一体、何が惑星系の運命を決めるのであろうか？ Hot Jupiter, Eccentric Planets, そして太陽系型惑星への別れ道は何かを決めているのだろうか？ ひとつ考えられるのは、惑星形成の初期条件としての原始惑星系円盤の質量である。太陽系を作った原始惑星系円盤の質量は太陽質量の1/100程度と推定されているが、観測によると、原始惑星系円盤の質量は太陽質量の1/1000から1/10というバラツキがある [4]。この円盤の質量の違いが惑星系の多様性を生む可能性がある。できあがる固体惑星の大きさは円盤面密度 Σ の1.5乗に比例して大きくなる [2]。また、固体惑星の成長時間は Σ に反比例する [2]。このことは巨大ガス惑星の形成に大きく影響し、惑星系の運命と結びついているはずである。このあたりを統一的に明らかにすることが今後の課題であろう。

系外惑星の検出精度は飛躍的に良くなってきていて、Hot Jupiter, Eccentric Planets, そして太陽系型惑星の存在確率を統計的に議論できるのは遠くないであろう。一方、本号の他の記事にあるように原始惑星系円盤の観測も今後、急速に発展していく。系外惑星の統計と原始惑星系円盤の統計を理論がつなぐという形で、観測・理論が一体となって、惑星系形成の一般論を展開させていかねばならない。

参考文献

- [1] Hayashi C., Nakazawa, K. and Nakagawa, Y.,1985: in "Protostars and Planets II", eds. Black, D. C. and Matthews, Univ. of Arizona Press, 1100.
- [2] 渡邊誠一郎, 井田茂 1997: in 『比較惑星学』, 岩波書店, 131.
- [3] 渡邊誠一郎, 1999: 遊星人, 本号.
- [4] Beckwith, S.V.W. and Sargent, A.I.,1996: Nature 383, 139.
- [5] 百瀬宗武, 1999: 遊星人, 本号
- [6] Rasio, F.A., Tout, C.A., Lubow, S.-H., and Livio, M., 1996: Astrophys. J. 470, 1187.
- [7] Weienchilling, S.J. and Marzani, F., 1996:Nature 384, 619.
- [8] Lin, D.N.C. and Ida, S., 1997: Astrophys.J. 477, 781.
- [9] Chambers, J.E., Wetherill, G.W. and Boss, A.P., 1996: Icarus 119, 261.
- [10] Artymowicz, P. 1998: in "Brown Dwarfs and Extrasolar Planets", eds. Rebolo et al.
- [11] Holman, M., Touma, J., and Tremaine, S.,1997: Nature 386, 254.
- [12] Ida, S., Larwood, J., and Burkert, A.,1999: Astrophys. J., in press.
- [13] Laughlin, G. and Adams, F.C.,1999: Astrophys. J. 508, L171
- [14] Rasio, F.A. and Ford, E.B., 1996:Science 274, 954.
- [15] Ward, W. R., 1997: Icarus 126, 261.
- [16] Lin, D.N.C., Bodenheimer, P., and Richardson, D.C.,1996: Nature 380, 606.
- [17] Thrilling, D.E. et al.,1998: Astrophys.J. 500, 428.
- [18] Bodenheimer, P., Hubickyj, O, and Lissauer, J.J.,1999: Icarus, submitted.