



太陽系外惑星の発見：比較惑星系形成論の幕開け

井田 茂

〈東京工業大学理学部地球惑星科学科 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: ida@geo.titech.ac.jp

1995年秋からの1年であつたという間に10個の太陽系外惑星が発見された。その軌道、質量の多様性は惑星研究者らを驚愕させた。Keckの10m望遠鏡によるサーベイなども開始し、NASAでは惑星サーベイ専用の衛星望遠鏡の打ち上げも検討されている。非常に近い将来に、惑星系の統計的議論が可能となるだろう。太陽系外の他の惑星系の観測をふまえて、われわれの太陽系の形成進化を論じ、惑星系一般の形成を議論する「比較惑星系形成論」の幕開けである。

1. 1995年10月

筆者は1995年9月から1年間、カリフォルニア大学のリック天文台に滞在した。その1年が、リック天文台を中心舞台とした、惑星形成論にとって劇的な1年になろうとは……

1995年9月末のアメリカ惑星科学会で、スイスのMayorとQuelozが、中心星の微小なふらつきをドップラーシフトによって検出することで、ペガス座51番星のまわりに、木星質量程度の惑星を発見したと発表した¹⁾。これまでも、太陽系外の他の主系列星のまわりで惑星を発見したという報告はあったが、追試は成功せず、そのたびに否定されてきた。しかし、今度は違った。直後の10月早々にサンフランシスコ州立大学のMarcyが突然の記者発表をし、リック天文台での観測により、ペガス座51番星の惑星の追試に成功し、さらに別の星でも惑星を発見したと発表した。リック天文台の他のスタッフは、新聞で初めてそのニュースを知り、騒然となった。筆者の受け入れ教官のLin博士は、Marcyがハミルトン山のリック天文台の観測所から降りてくるところをつかまえ、「一体、どうなっているんだ」と詰問した。その時の彼の答えは、「惑星発見は間違いはない。そして、これで終わりじゃないよ。詳しくはいえないけど。」であった。

Marcyは1980年代から黙々と主系列星のドップラーシフトを観測し続けてきた男である。その言葉通り、彼はその後の1年の間に、さらに5個の惑星の新発見と1個の惑星の追試成功を発表した²⁾。

2. 発見された惑星系の驚くべき多様性

ドップラーシフト以外でも、フォトメトリーによって2個の惑星が見つかったとの報告もあった。この観測はまだ不定性が大きいだが、これを入れると、1年で、あつという間に10個の太陽系外惑星が発見されたことになる。(そのうちの多くは、別のチームによって、独立に確認されている。)ドップラーシフトによって発見された惑星のリストを表1に示す。どれも太陽に似た主系列星のまわりで発見されたものである。

ドップラーシフトによる観測は、惑星が中心星のまわりを公転するときの反作用で、中心星の運動がふらつくのを検出するというものなので、惑星質量の大きいもの、すなわち、太陽系でいえば、木星型惑星に対応するものだけが、見つかっている。驚くべきは、発見された惑星の多様性である。太陽系の木星型惑星は5-30 AU (1AUは太陽と地球の距離) に存在し、質量は木星質量 M_J の0.05-1倍、いずれもほぼ円軌道(離心率 < 0.06)を描いている。これに対して、ペガス座51番星などの

表 1: 太陽系外惑星のデータ

	中心星		惑星		
	スペクトル型	質量 (M_{\odot})	$M \sin \theta^{(*)}$ (M_J)	軌道長半径 a (AU)	離心率 e
ペガサス座 51 番星	G2-3V	1.0	0.47	0.05	0.012
かに座 55 番星	G8V	0.85	0.84	0.11	0.05
うしかい座 τ 星	F7V	1.2	3.9	0.05	0.015
アンドロメダ座 ν 星	F8V	1.2	0.68	0.06	0.15
おとめ座 70 番星	G4V	0.92	6.5	0.43	0.40
HD 114762	F9V	1.0	9	0.34	0.35
はくちょう座 16 番星	G2V	1.0	1.7	1.7	0.57
おおぐま座 47 番星	G0V	1.05	2.4	2.1	< 0.1
太陽	G2V	1.0	0.05-1.0	5-30	< 0.06 ^(**)

M_{\odot} : 太陽質量 $\simeq 2.0 \times 10^{33}$ g, M_J : 木星質量 $\simeq 2.0 \times 10^{30}$ g, AU: 天文単位 $\simeq 1.5 \times 10^{13}$ cm

(*) M : 惑星質量, θ : 視線に対する軌道傾斜角

(**) 木星型惑星 (木星, 土星, 天王星, 海王星) のデータ

まわりの4つの惑星は、中心星からの距離が0.05–0.1 AU程度と極めて小さい。水星が0.4 AUであることから、これらがいかに中心星に近い軌道なのかがわかるであろう。おとめ座70番星の惑星は、6.5 M_J 以上という大質量を持ち、離心率0.40という長楕円軌道を描いている。大きな離心率の惑星はあと2つ見つかっているが(0.35, 0.57)、太陽系でこんな離心率をもっているのは、(短周期)彗星くらいである。一方、おおぐま座47番星の惑星のように、太陽系の木星に近いものもある。ドップラーシフトによる観測では、質量が大きくても中心星から遠い惑星は見つかりにくいので、太陽系の木星型惑星のような惑星はもっとあると想像される。実際、フォトメトリーで発見したと報告されている2つの惑星は、ともに1 M_J 程度で、中心星からの距離が2.5 AUと10 AUということで、極めて木星や土星に似ている(フォトメトリーでは、逆に中心星から遠い方が見つかりやすい)。しかし、太陽系とは全く異なるタイプの惑星系もたくさんあることが明らかにになったのである。

Marcy は120個の主系列星のサーベイから、6個の新惑星を発見している。太陽系型木星型惑星は発見しにくいことを考慮すると、太陽のような星のまわりでは、かなりの確率で惑星系が存在すると考えられる。これは、ある程度は予測されていた。「京都モデル」などと呼ばれる、惑星形成の標準理論^{3), 4)}によると、われわれの太陽系は、太陽質量 M_{\odot} の $\frac{1}{100}$ 程度の質量のガス円盤から生まれたと考えられている。そのガス円盤の中で、必然的に、固体成分の凝縮、微惑星の形成と合体成長というプロセスがおこり、結果として惑星ができるとされている。1980年代から大きく発展した電波などでの若い星の観測によると、星形成の副産物として、50%などというかなりの確率で、ガス円盤が若い星のまわりに存在し、その平均質量は0.01–0.05 M_{\odot} であることがわかった⁵⁾。したがって、主系列星のまわりには、惑星系がかなり普遍的に存在するのではないかという期待はあった。しかし、これほどの多様性は、全く予想されていなかった。



3. 褐色わい星？ 木星型惑星？

発見された天体が、あまりに太陽系内木星型惑星からかけ離れた姿をしているので、木星型惑星ではなく、褐色わい星でないかという声がずいぶんあがっている。木星型惑星は、微惑星の合体成長の結果できた固体コアに、円盤ガスが落ち込んでガスエンベロープを形成して、できた⁴⁾ものであるのに対して、褐色わい星は、分子雲の収縮時に、主星と同時にその伴星としてできる。質量が核反応をおこすには足りず($< 80 M_J$)、自らは光らない。

褐色わい星の典型的質量を $40 M_J$ 程度と考えよう。ドップラーシフトでは、視線方向のゆらぎしかわからないので、 $M \sin \theta$ (θ は視線に対する軌道面の傾き) という質量の最小値しかわからない。したがって、見つかった惑星候補天体の実際の質量はかなり大きく (θ が小さく)、褐色わい星である可能性は否定できない。ひょっとしたら、発見されたもののうちのどれかは褐色わい星かも知れない。しかし、全部が θ が小さいというのは、確率的にありえないだろう。また、褐色わい星なら、 $M \sin \theta > 10 M_J$ というものがたくさん見つかって、 $20(?) M_J$ から $80 M_J$ という褐色わい星の質量範囲を連続的に埋めていいはずである。そういう大質量のものは、ドップラーシフトでは見つかりやすいはずなのに、ほとんど見つかっていない。(質量が $80 M_J$ 以上の恒星の伴星はたくさん見つかっている。) つまり多重星の低質量伴星と発見された天体には、質量のギャップがあるように見える。そういう難点から、惑星でも褐色わい星でもない、第3の天体だと主張する声もあるが、あまりにご都合主義だろう。ここでは、見つかった「惑星」はガス円盤の中で形成される木星型惑星であって、その多様性は、惑星形成の標準理論の拡張で説明可能だという、筆者らの説⁶⁾を中心に紹介する。

4. 木星型惑星の形成とその影響

実は、これまでに、惑星形成の標準理論の枠内

で、惑星系の姿を大きく変え、現在の太陽系を再現しなくなってしまうプロセスがいくつか指摘されてきた。これまでは、そのようなドラスティックなプロセスが、なぜわれわれの太陽系では起きなかったのかということが議論されてきた。裏を返せば、一般に惑星系では、その姿を大きく変えてしまうプロセスが存在する。具体的にいうと、

- (1) 内側の領域での木星型惑星の形成
- (2) 惑星の相互重力による惑星系の軌道不安定
- (3) 原始惑星系ガス円盤と惑星の重力相互作用である。

これらは、みな木星型惑星の形成と結びついている。固体コアにガスが落ち込むためには、固体コア質量が10倍の地球質量 M_E くらいになる必要があるといわれている^{4), 7)}。太陽系では、氷が凝結し、固体材料物質が豊富に存在する3 AU以遠でのみ、固体コア質量が $10 M_E$ に達し、木星型惑星が形成されるとされてきた。しかし、観測によると、ガス円盤の質量には太陽系で想定されている $0.01 M_{\odot}$ よりずっと重いガス円盤もたくさんあることがわかっている。そのような重いガス円盤では、1 AU などの中心星に近い場所で、木星型惑星が形成されてもおかしくない⁶⁾。(ガス捕獲をおこす質量が $10 M_E$ ということにも不定性があり、もっと小さくともいい^{6), 7)}。) 固体コアがガス捕獲をすると、質量が爆発的に増える。たとえば、木星では固体コアが $10 M_E$ 程度であるのに対して、ガス質量は $300 M_E$ もある。微惑星から固体惑星の集積という部分は、どの惑星系でもあまりかわらないだろう⁷⁾。しかし、その後、ガス捕獲がおこるかおこらないかで、惑星系の質量分布は大きくかわる。ガス捕獲による惑星質量の増大にともなって、惑星とガス円盤との相互作用も重要となる。惑星重力が増大すると、ガス円盤に密度波をたてるようになり、その結果として、惑星とガス円盤との間で角運動量交換が行われ、惑星は動径方向に大きく動いてしまう可能性がある⁸⁾。(一般には中心星の方に移動する。) また、惑星系の軌道安定性にも大きな影響を与え

る。「太陽系は安定か?」という問題は天体力学の伝統的な問題となっており、多くの計算がなされてきた。今のところ、太陽系は100億年くらいのオーダーでは安定だろうといわれている。しかし、もうちょっと惑星系の配置がちがっていたり、惑星質量がちがっていたらどうなるのであろうか? 近年の数値計算の結果⁹⁾によると、惑星系の軌道不安定がスタートする時間は、惑星質量や間隔に、べき関数の形で、非常に敏感に依存する。(ここで、「不安定」とは、軌道交差がおこり、近接散乱により、惑星軌道が大きく変化することを意味する。) 微惑星が徐々に集積していった結果としてできる固体惑星の段階では、そもそもすぐに不安定になるような系はできないかも知れないが、その後のガス捕獲はそれまでの集積プロセスにはおさまいなく、一気に質量を増やすプロセスである。したがって、ガス捕獲時のちょっとした違いによって、その後すぐに、軌道不安定をおこしてしまう惑星系もあるだろうと想像される。

具体的に例を示そう。木星型惑星のガス捕獲は、

惑星質量が大きくなって、その重力でガス円盤にギャップを作ったところで、停止すると考えられている⁶⁾。ガス捕獲の限界質量は、 $0.01 M_{\odot}$ 程度の光学的に薄い円盤では、

$$M_{\text{limit}} \sim 1 \times \left(\frac{a}{5[\text{AU}]} \right)^{3/4} M_J \quad (1)$$

で与えられる (a は太陽からの距離)^{6), 7)}。天王星、海王星の固体コアは $10 M_E$ 以上あり、ガス捕獲可能であったはずであるが、現在ガス量は少なく、総質量はそれぞれ $0.05 M_J$ 程度しかない。これは、天王星、海王星では固体コアの形成に時間がかかり(一般に固体惑星集積は遠方ほど時間がかかる)、ガス捕獲可能になった時には、ガス円盤がほとんど消失していたためといわれている。したがって、コアがもう少し早くできたか、ガス円盤がもう少し遅く消失したとすれば、天王星と海王星は、もっと質量が大きくなっていいはずである。また、ガス捕獲の限界質量は、ガス温度の $3/2$ 乗に比例している^{6), 7)}、質量が比較的大きくて、光学的に不透明なガス円盤では、ガス捕獲限界質量は木星質量より、大きくなりうる⁶⁾。そういったことを

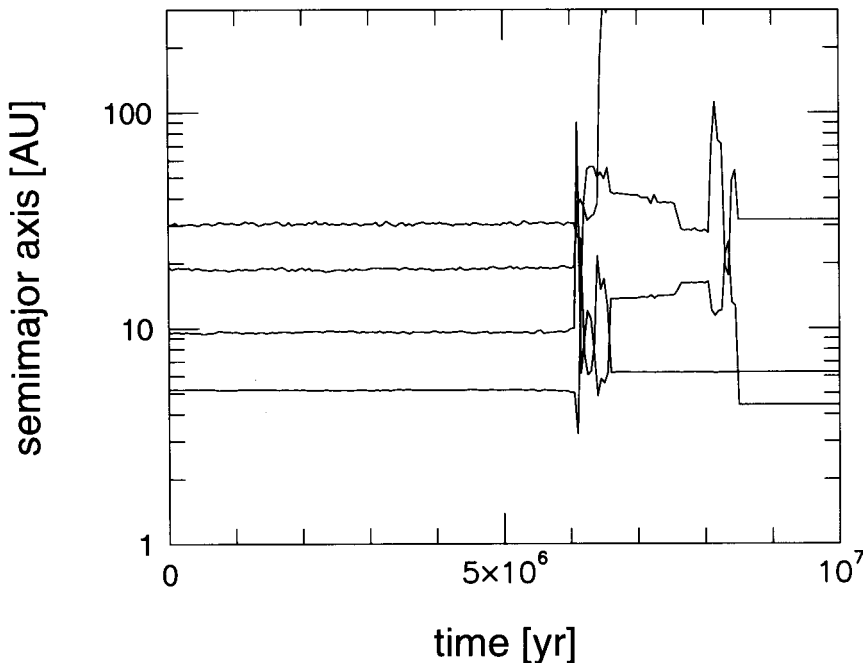


図1 惑星系の軌道不安定の例。太陽系木星型惑星(木星, 土星, 天王星, 海王星)の軌道配置で各惑星が $2 M_J$ の質量をもったときの、軌道長半径の時間進化。[Lin and Ida (1997) を改変]



想定して、現在の木星、土星、天王星、海王星の位置に、仮想的に $2 M_J$ の惑星をおいた軌道計算の結果が図 1 である⁶⁾。初期の離心率と軌道面傾斜角（ラジアン）は 0.01 以下にしてある。600 万年までは、軌道離心率は 0.01 以下、軌道長半径は 3 % 以下で変動しているだけであるが、600 万年後に突如、離心率が増大しはじめ、軌道不安定がはじまっている。100 億年でも安定といわれる、われわれの太陽系から、ガス捕獲プロセスを少し変えただけで、600 万年で軌道不安定がおこる系になってしまったのである。ある期間、軌道要素がほとんど変化せず、安定であるかのような状態が続いた後、突如、軌道不安定が始まるというのは、惑星系の軌道不安定の一般的な性質である。その軌道不安定開始までのタイムスケールは惑星系の質量などに、敏感に依存する。（このタイムスケールはリアプノフ時間よりずっと長いことに注意。）

5. 惑星系の多様性の起源

上にあげたプロセスが、発見された惑星系の多様性とうまく関わるかを考えてみる。まだ日が浅いため、確立した説明はないが、それだからこそ、面白いところである。

まず、ベガス座 51 番星などの短周期型惑星 ($a = 0.05 - 0.1$ AU) を考える。0.05–0.1 AU というかなり内側の領域では、少なくとも数 M_E 以上という、ガス捕獲開始に必要な固体質量を集めるのは難しいだろう。また、かりに集められたとしても、ガス質量が $1 M_J$ よりもずっと小さなところでガス捕獲が停止してしまう ((1)式)。したがって、これらの惑星は遠方で作って、内側に移動させるしかない。ひとつの移動方法は、さきに述べた、ガス円盤との相互作用である¹⁰⁾。この説で、一番難しいのは、その移動を 0.05–0.1 AU で止めることである。短周期型惑星は 4 個も発見されているのだから、止めるメカニズムは特殊なものであってはならない。中心星の潮汐力でくい止められるという可能性や、中心星磁場によってガス円盤が 0.05 AU 付近で途

切れていて、移動が止まるという可能性が指摘されているが¹⁰⁾、詳しい解析はこれからである。また、太陽系ではそのような大きな移動があったようには見えないが、それをどう説明するのも問題である。

次におとめ座 70 番星などの大離心率惑星について考える。この大きな離心率の起源は、ガス捕獲後の惑星系の軌道不安定であり、おとめ座 70 番星や HD114762 のまわりの惑星の大きな質量は、軌道交差による木星型惑星同士の衝突だとするのが、筆者らの説である⁶⁾。比較的質量の重いガス円盤では、1AU 以遠くらいで、木星型惑星が形成される。それらは、比較的の内側にあるので、コアは速く成長する。したがって、ガス捕獲を早めにスタートすることになるので、 M_{limit} まで十分にガス捕獲するだろう。 M_{limit} は、重いガス円盤では $1 M_J$ よりも幾分か大きくなる。筆者らの軌道計算⁶⁾によると、こういう系では、ガス円盤消失後 ($> 10^6$ 年)、主系列星の寿命内に軌道交差がはじまり、惑星は 0.5 などの大きな離心率を獲得する。軌道交差のなかで、内側の 2 つの惑星が合体することが多く、その他のものはかなり遠方にはじきとばされる。合体した惑星は、依然大きな離心率 (> 0.3) をもち、外側の惑星との重力散乱、衝突時の軌道エネルギーの散逸により、軌道長半径は 0.5 AU 程度にまで減少し得る。これらはおとめ座 70 番星や HD114762 の惑星の特徴をよく説明する。軌道交差は始まっているが、まだ合体していないものが、はくちょう座 16 番星の惑星に対応すると考えることもできる。

一方、木星型惑星がガス円盤との相互作用で、大きな離心率をもつと仮定すると、ギャップを飛び越してガス捕獲を続けて、大質量を獲得し、ガス円盤との角運動量交換で内側にも移動する。これが、おとめ座 70 番星や HD114762 のまわりの惑星であるとする説もある。しかし、ガス円盤との相互作用で、0.3 以上もの離心率を得るのはかなり難しそうである。



前者と後者の可能性の是非は、観測が進めば、決着がつく。発見された大離心率惑星の系で、さらに遠方に大きな離心率と軌道面傾斜角の他の惑星が見つければ、前者が支持される。一方、ガス円盤がまだ存在しているTタウリ星のまわりで、大離心率惑星が発見されれば、後者が支持される。(前者の可能性を支持する観測的証拠ができれば、後者の可能性が否定されると同時に、褐色わい星である可能性も否定される。)

さて、これらの発見された惑星候補天体がガス円盤の中で形成された「惑星」ならば、その多様性は、ガス円盤のいかなる性質を反映しているのだろうか？ これは、これからの大きな問題である。筆者らは、作業仮説として、惑星形成時のガス円盤の質量の差が惑星系の多様性を生むという可能性を指摘している⁶⁾。軽い円盤では、移動や軌道不安定のない太陽系型(太陽系、おおぐま座47番星)ができ、重い円盤では大離心率惑星、中間の円盤では短周期型惑星ができるというものであるが、詳細は省略することにする。

6. 第二の地球へ……

太陽系外惑星の発見は、間違いなく、この数十年来の天文学における最も重要な発見のひとつであろう。そして、この太陽系外惑星の観測は短いタイムスケールで更に飛躍的に発展するであろう。一方、惑星形成理論の基礎はすでに存在していて、理論もある程度、観測の急速な発展についていくことができるので、これからの観測と理論の応酬はエキサイティングなものとなるであろう。

これまでの発見は木星型惑星に限られているが、NASAの衛星望遠鏡の計画は明確に太陽系外地球型惑星、第二の地球、の発見を目標としている。地球型惑星の存在可能性は、大質量の木星型惑星の軌道進化に大きく影響をうけるであろうから、その辺のからみも面白い問題であろう。また、地球型惑星の統計的議論が可能となれば、生命の存在確率、生命の起源といった問題にも、当然議論は

進んでいくであろう。

参考文献

- 1) Mayor, M., Queloz, D., 1995, *Nature*, 378, 355
- 2) Marcy, G. W., Bulter, R. P., 1996, in *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, eds. C. B. Cosmovici, S. Bowyer, and D. Werthimer, in press
- 3) Safronov, V. S., 1969, *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*. (Nauka Press, Moscow)
- 4) Hayashi, C., Nakazawa, K., Nakagawa, Y., 1985, in *Protostars and Planets II*. eds. D. C. Black & M. S. Matthews (Univ. Arizona Press, Tucson), 1100
- 5) Beckwith, S. V., Sargent, A. I., 1996, *Nature*, 383, 139
- 6) Lin, D. N. C., Ida, S., 1997, *ApJ*, in press
- 7) 渡邊誠一郎, 井田茂, 1997, in *比較惑星学*. 松井孝典編, 岩波書店, 第3章
- 8) Lin, D. N. C. & Papalouizou, J. C. B. 1993, in *Protostars and Planets III*. eds. E. H. Levy & J. I. Lunine (Univ. Arizona Press, Tucson), 749
- 9) Chambers, J. E., Wetherill, G. W. Boss, A. P., 1996, *Icarus*, 119, 261
- 10) Lin, D. N. C., Bodenheimer, P., & Richardson, D. C. 1996, *Nature*, 380, 606

Discovery of extrasolar planets: Toward comparative studies of planetary system formation

Shigeru Ida

Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Since 1995 fall, 10 extrasolar planets have been discovered. Their orbital configurations have remarkable diversity. The survey with Keck 10m telescope has started and NASA is planning a space telescope specially purposed to find extrasolar planets, which will enable us to statistically discuss planetary systems. That is, we will be able to start "comparative studies of planetary system formation" soon.