

# 惑星系の多様性と普遍性

## — 太陽系外の惑星の発見 —

井田 茂<sup>1</sup>

「他の恒星の惑星系」、「他の惑星系での生命」といったことは、これまでは主にSFの題材であった。しかし、1995年秋からの1年で、たてつけに10個あまりの惑星が太陽系外主系列星のまわりで発見され、それらの主題は天体物理学や惑星科学が扱うものとなった。この発見は、この数十年來での最も重要な天文学的発見のひとつと言われ、ハワイの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。これらの観測も加わって、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。これからは、太陽系外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していくことが重要となるであろう。

### 1. 突然の太陽系外の惑星の発見ラッシュ

太陽系外の惑星の発見劇は1995年秋のアメリカ惑星科学会でのスイスのMayorとQuelozの発表に始まった。彼らは、ペガスス座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]。彼らの方法は、中心星のドップラーシフトによるものである。ある恒星のまわりを惑星がまわっているとしよう。正確にいうと、この恒星は系の中心に静止しているわけではなく、恒星・惑星の系の重心のまわりを、惑星の公転にあわせて、微妙に周回する。われわれか

ら見ると、恒星からの光はその運動にあわせてドップラーシフトをするので、それによって、惑星を間接的に検出できるわけである。ドップラーシフトの変化の周期が惑星軌道の周期なので、ケプラーの法則により、惑星の中心星からの距離がわかり、ドップラーシフトの大きさから、惑星の質量がわかる。ただし、視線方向の大きさしかわからないので、 $M \sin \theta$  ( $\theta$  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ことに注意がいる。

これまでも、「主系列星のまわりで惑星発見」の報告は幾度もあった。しかし、追試は成功せず、その度に惑星発見のニュースは否定されてきた。しかし、今回は違った。MayorとQuelozの発表の直後に、サンフランシスコ州立大学のMarcyが突然の記者発表をし、ペガスス座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。さらに、話はそれで終わらなかった。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研究者であった。彼はこれを機に一気にその結果を発表しはじめた。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(過去に追試が不発の終わった)惑星の追試成功を発表した[2]。

ドップラーシフト以外でも、フォトメトリーによって直接に2個の惑星が検出されたという報告もあった。これは、惑星表面で、中心星の光が微弱に反射しているのをとらえたというものである。この観測はまだ不定性が大きいですが、これを入れると、

<sup>1</sup>東京工業大学理学部地球惑星科学科

1年で、あつという間に10個の太陽系外の惑星が発見されたことになる(1996年11月現在)。これらのうちの多くは、別の観測チームによって、独立に検証されている。

このように、急激に惑星発見が報告された背景は、ドップラーシフトの観測精度が近年になって、30-40 m/sにまで向上し、ドップラーシフトでの「惑星の存在領域」に達したことである(次節参照)。

他のチームもたくさん参入し、より大型の望遠鏡でのより高精度のサーベイも始まっているので、惑星発見の報告はこれからも加速していこう。

## 2. 惑星系の多様性

発見が報告された惑星のリストを表1に示す。どれも太陽質量  $M_{\odot}$  程度(スペクトル型からの推定で0.8-1.2  $M_{\odot}$ )の主系列星のまわりで発見されたものである(ただし、Lalande 21185 の質量はもう少し小さいと推定される)。はじめの8個がドップラーシフトによって発見されたもので、次の2個が、フォトメトリーによって直接検出されたものである(同じ星のまわりに2個)。参考のため、太陽系のデ

ータもいれてある。

ドップラーシフトやフォトメトリーでは比較的大きい惑星、すなわち、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ものだけが、見つかっている。表1からもわかるように、発見された惑星の軌道や質量は驚くべき多様性をもっている。太陽系の巨大ガス惑星は5-10AU (1AUは太陽と地球の距離)に存在し、質量は木星質量( $M_J$ )の0.3-1倍で、軌道はほぼ円軌道(離心率  $< 0.06$ )である。これに対して、ペガスス座51番星などのまわりの4つの惑星は、中心星からの距離が0.05-0.1AU程度と極めて小さい。水星(0.4AU)よりもずっと内側である。また、おとめ座70番星などの3つの惑星は、離心率0.3-0.6という長楕円軌道を描き、うち2つは質量もきわめて大きい。一方、おおぐま座47番星や Lalande 21185 の惑星のように、太陽系の木星や土星に近いものもある。

ドップラーシフトによる観測では、質量が小さくても中心星から遠い惑星は見つかりにくい(中心星のブレ幅が狭くなる)。現在のドップラーシフトの観測精度が30-40 m/sであるのに対して、われわれの太陽系の木星を検出するためには、10 m/s

表1：太陽系外の惑星データ

	中心星 スペクトル型(*)	惑星		
		質量 ( $M_J$ )	軌道長半径 $a$ (AU)	離心率 $e$
ペガスス座 51 番星	G2-3V	> 0.47	0.05	0.012
かに座 55 番星	G8V	> 0.84	0.11	0.05
うしかい座 $\gamma$ 星	F7V	> 3.9	0.05	0.015
アンドロメダ座 $\nu$ 星	F8V	> 0.68	0.06	0.15
おとめ座 70 番星	G4V	> 6.5	0.43	0.40
HD 114762	F9V	> 9	0.34	0.35
はくちょう座 16 番星 B	G2V	> 1.7	1.7	0.57
おおぐま座 47 番星	G0V	> 2.4	2.1	0.01
Lalande 21185	M2V	~ 1 ~ 1.5	~ 2.5 ~ 10	? ~ 0
太陽	G2V	0.3-1.0	5-10	< 0.06(**)

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

(\*) スペクトルから推定される質量は F, G-type が 0.8-1.2  $M_{\odot}$  で、M-type はもう少し小さい。

(\*\*) 巨大ガス惑星(木星、土星)のデータ

の精度が必要となる。したがって、現在は中心星に近く質量の大きな惑星が選択的に発見されている。太陽系のガス惑星のような惑星は検出されてはいないが、かなりの数が存在するのではないかと想像される。(フォトメトリーでは、逆に遠い方が、中心星の光に邪魔されないので、みつきやすい。フォトメトリーでの観測の充実が望まれる。)しかし、太陽系とは全く様相が異なる惑星系もたくさんあることがわかったのである。これほどの多様性は、誰も予想していなかった。

### 3. 褐色わい星の可能性

発見された天体の多くが、太陽系のガス惑星とは、あまりに異なる軌道を持っているので、木星型のガス惑星ではなく、褐色わい星でないかという意見も多い。褐色わい星とは、普通の恒星と同じように分子雲の収縮によってできるが、質量が核反応をおこすには足りず( $< 80M_{\oplus} \simeq 0.08M_{\odot}$ ), 自らは光らないものである。星ができるときは、2重星としてできることも多いので、伴星の質量が主星にくらべてずっと小さく、褐色わい星である場合は、見た目はガス惑星が中心星のまわりをまわっているのと同じになる。見た目は、同じかも知れないが、木星型のガス惑星の形成過程は全く違う。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たのが、木星型ガス惑星である[3]。惑星ならば、一般に複数個でき、ガス捕獲をするに至らなかったものは地球型惑星として残るわけで、恒星と褐色わい星の2重星という系とは、全く別物である。

褐色わい星は、 $80M_{\oplus}$ 以下の質量なので、その典型的質量を $40M_{\oplus}$ くらいとしよう。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、 $M \sin \theta$ という質量の最小値しかわからない。したがって、ドップラーシフトで見つかった天体の $\theta$ は

たまたま小さく、実際の質量は褐色わい星と考えていいものになるという可能性はある。ひょっとしたら、発見されたもののうち、どれかはそうかも知れない。しかし、全部が全部 $\theta$ が小さいというのは、確率的にありえないだろう。これまで、褐色わい星と思われる、 $20-80M_{\oplus}$ という天体はほとんど見つかっていない。そういう大質量のものは、ドップラーシフトでは、みつきやすいはずなのである。つまり恒星の(褐色わい星などの)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。一方、「惑星」とは質量的に連続的につながっている。

この問題はいずれ観測が決着をつけるであろう。「惑星」ならば、一般に一つの恒星のまわりに複数個あるはずである。ここでは、見つかった天体はガス円盤の中で形成される木星型惑星であるとして話を進めることにする。

### 4. 惑星系存在の普遍性

他方、惑星の存在確率はかなり高いという可能性もでてきた。Marcyはドップラーシフトによる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。太陽系型ガス惑星は、現在のドップラーシフトの観測精度では、検出されにくいことを考慮すると、太陽のような星のまわりでは、かなり高い確率で惑星系が存在かも知れない。これは、期待していたことであった。「京都モデル」などの惑星形成の標準理論[3,4]では、われわれの太陽系は、太陽質量( $M_{\odot}$ )の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、それらの合体成長というプロセスを通して、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、惑星系は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。

この「惑星系はたくさん存在する」ということは、惑星形成論にとって、非常に重要である。「太陽系形成を考える際に常に大問題であったのが、われわれが知っている惑星系が太陽系のみであるため統計的な議論ができないということだった。われわれの太陽系のどの部分が惑星系一般に普遍的な性質で、どこがわずかな初期条件の違いや外部からの摂動といった偶然的な要素で決まる性質なのか決められない。」[6]という惑星形成論の致命的な問題点が、回避されるわけである。一方、発見された惑星系の多様性を、統一的に説明せねばならないという、新たな大きな課題がつけ加わったことにもなる。

木星型惑星の形成時間の問題や惑星間隔の問題[6]など、われわれの太陽系の再現もまだできていないのが惑星形成論の現状である。しかし、他の惑星系の形成の統計的議論を通して、われわれの太陽系の形成進化を論じ直すことによって、突破口が開けるだろう。様々な惑星系のひとつとして、われわれの太陽系の形成を考え、さらに惑星系一般の形成進化を論じる「比較惑星系形成論」の立場が重要となってくるであろう。

後半では、観測されている惑星系の多様性をどう理論的に説明したらよいかの試みを、筆者らの説[7]を中心に、紹介する。

## 5. 惑星軌道の多様性の起源

惑星系の多様性は形成のどの時点からはじまっているのだろうか？現在わかっている範囲では、微惑星から固体惑星の集積という部分では、ガス円盤の条件が大きく影響するプロセスは見あたらな

い。したがって、どのガス円盤でも似たような固体惑星ができそうである[6]。筆者らは、木星型のガス惑星の形成の時点で、惑星系の多様性がうまれるという考えをもっている[7]。

木星型のガス惑星は、固体のコアに円盤ガスが落ち込んでエンベロープを形成することによって、できる。ガスが落ち込むためには、固体コア質量が数倍から10倍の地球質量( $M_{\oplus}$ )くらいになる必要があるといわれている[3, 6, 7]。ガス捕獲をすると、質量が爆発的に増える。たとえば、木星ではガス質量は固体コア質量の30倍の $300M_{\oplus}$ もある。したがって、ガス惑星の誕生によって、惑星系の質量分布は大きくかわる。さらに、以下に述べるように、ガス惑星の強い重力が、その惑星自身の大きな軌道変化をひきおこし得る。これまでは、なぜ、太陽系では、そのようなドラスティックなプロセスが起きなかったのかということが議論されてきた。(これらのプロセスが太陽系でおきたとすると、現在の太陽系を再現しなくなってしまう。)裏を返せば、一般に惑星系では、木星型のガス惑星の誕生を機に、その姿を大きく変えてしまう可能性があるわけである。

ひとつは原始惑星系ガス円盤と惑星の重力相互作用である。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)。ペガス座51番星などの短周期型惑星( $a = 0.05-0.1\text{AU}$ )はこの効果によって、数AUの生まれた場所から移動してきたという可能性が指摘されている[9]。

0.05-0.1AUというかなり内側の領域では、少なくとも数 $M_{\oplus}$ 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 $1M_{\oplus}$ 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。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[8]。ガス捕獲の限界質量は、 $0.01M_{\oplus}$ 程度の光学的に薄い円盤では、

$$M_{\text{lim}} \sim 1 \times (a/5\text{AU})^{3/4} M_{\oplus} \quad (1)$$

で与えられる( $a$ は太陽からの距離)[6,7]。ガス質量は、 $0.05\text{-}0.1\text{AU}$ では、到底  $1M_{\oplus}$ に達しないので、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。

ガス円盤との相互作用で移動させるのは簡単かも知れないが、問題は、その移動を $0.05\text{-}0.1\text{AU}$ 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 $0.05\text{AU}$ 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[9]、詳しい解析はこれからである。

軌道を大きく変えるもうひとつのプロセスは惑星の相互重力による惑星系の軌道不安定性である。「太陽系は安定か?」ということは天体力学の伝統的な問題であり、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、別の惑星系で、もうちょっと惑星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[10]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」とは軌道離心率が大きくなって、惑星が近接散乱をおこすようになり、惑星軌道長半径(すなわち惑星の配置)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かまいなく、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、その後比較的短い時間スケールで、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。実際、[7]では具体例を示している。天王星、海王星の固体コアは $10M_{\oplus}$ 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、数 $M_{\oplus}$ ( $\sim 0.01M_{\oplus}$ )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、コア形成とガス円盤の消失のタイミングがずれれば、天王星と海王星は、もっと質量が大きくなることもあるはずである。そういった場合には、主系列星の寿命よりはるかに短い時間で軌道不安定がおこってしまう(図1)。

おとめ座70番星などの大離心率惑星の起源は、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[7]。比較的質量の重いガス円盤では、 $1\text{AU}$ 以遠くらいで、木星型ガス惑星が形成される。太陽系では、氷が凝結し、固体材料物質が豊富に存在する $3\text{AU}$ 以遠でのみ、固体コア質量が $10M_{\oplus}$ に達し、木星型惑星が形成されるとされているが、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 $0.01M_{\oplus}$ 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、 $1\text{AU}$ などの中心星に近い場所で、ガス惑星が形成されてもおかしくない[7]。それらは、比較的的内側にあるので、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、限界質量まで十分に

ガス捕獲するだろう。ガス限界質量は、重いガス円盤では $1M_J$ よりは幾分大きくなる。筆者らの軌道計算(図2)によると、こういう系では、ガス円盤消失後( $\geq 10^6$ 年)、主系列星の寿命内に軌道交差がはじまり、惑星は大きな離心率( $\geq 0.5$ )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0.5AU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。軌道交差は始まったが、合体せずに終わったのが、はくちょう座16番星Bの惑星に対応すると考えることもできる。

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、ガス円盤のどのような物理条件を反映しているのだろうか？どのようなガス円盤ならどのような惑星系が形成されるのだろうか？これは、これからの大きな問題である。筆者らは、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[7]。軽い円盤では、移動や軌道不安定のない太陽系型ガス惑星ができ、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。惑星形成論の使命としては、収縮する分子雲コアの物理条件(質量、角運動量など)によって、どのようなガス円盤ができ、その結果どのような惑星系ができるかということ、最終的には明らかにしなければならないだろう。

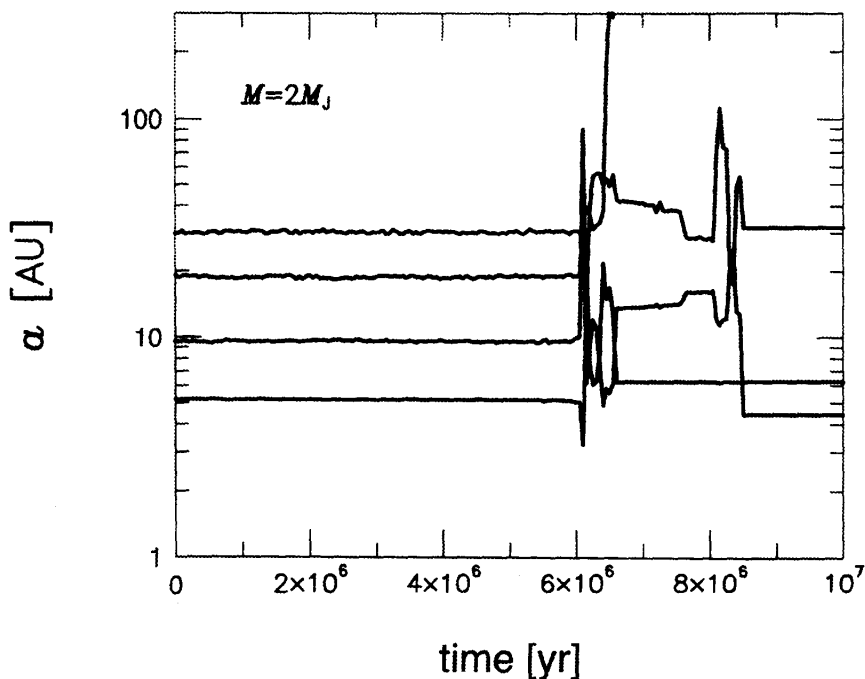


図1. ガス惑星の系の軌道不安定の例。太陽系木星型惑星(木星、土星、天王星、海王星)の軌道配置で各惑星が $2M_J$ の質量をもったときの、軌道長半径の時間進化。初期の離心率と軌道面傾斜角(ラジアン)は0.01以下にしてある。600万年までは、軌道離心率は0.01以下、軌道長半径は3%以下で変動しているだけであるが、600万

年後に突如、離心率が増大しはじめる。その結果、軌道長半径は離れていても、惑星同士の近接散乱が可能となる。近接散乱がおこると、軌道長半径が大きく変化して、惑星配置が大きく乱れ、軌道不安定がはじまる。[Lin and Ida (1997) を改変]

## 6. 地球型惑星, そして生命

太陽系外の惑星の発見は、間違いなく、惑星科学はじまって以来の大発見であろう。そして、この太陽系外の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。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。

木星型のガス惑星があるなら、その系には地球型惑星も形成されるはずである。ただ、問題はガ

ス惑星の軌道進化があったときに、地球型惑星が生き残れるかである。短周期型ガス惑星が、中心星から比較的遠いところでできて、内側に移動してきたとする。ガス惑星の内側には、2:1や3:2の強いレゾナンスがある。レゾナンスの場所では、粒子はガス惑星との会合場所が毎回同じで、同じ向きの重力散乱を受けるといふ共鳴状態にあり、結果としてガス惑星の重力の影響が非常に強く効く。したがって、レゾナンスはガス惑星と共に内側に移動しながら、粒子を内側にはじきとばしてはまた追いつくという形で、粒子を次々とつかまえていくことになる(移動速度が非常に速くない限り)。

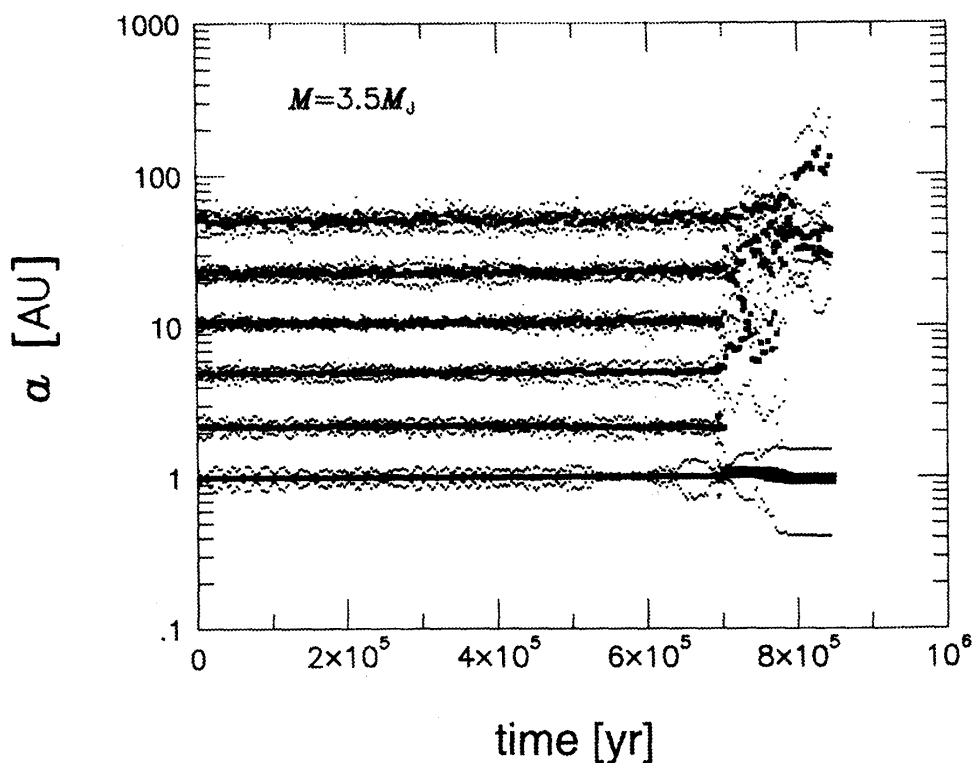


図2. ガス惑星系の軌道交差, 不安定の例. 1-50AUに $3.5M_{\odot}$ の質量のガス惑星を6つにおいて軌道計算をした。このようなガス惑星系の形成は、比較的重いガス円盤では妥当である。黒塗りの四角が軌道長半径 $a$ で、点が近点と遠点をあらわす(近点と遠点の距離が $2ea$ なので、それが離心率 $e$ の大きさをあらわす)。計算時間節約のため、初期の離心率は0.1程度にしてある。(実際はもう少し時間がたってから不安定がおこるはず。) この計算では、

70万年後に離心率が増えはじめ、軌道交差がはじまっている。軌道交差開始のすぐあとに、内側の2つの惑星が衝突合体をして、 $7M_{\odot}$ の質量の巨大惑星が形成されている(大きな黒塗りの四角)。外側の惑星はさらに遠方にはじきとばされている。合体惑星の離心率は0.5-0.6である。この計算の時間範囲では、軌道長半径は、0.9AU程度であるが、外側の惑星との遠距離散乱で、少しずつ内側に移動している。[Lin and Ida (1997) を改変]

一般に地球型惑星は、ガス惑星よりも中心星に近い領域に形成されるので、レゾナンスにつかまり、一緒に内側にひきずりこまれ、中心星に落ちてしまうだろう。一方、大離心率ガス惑星系では、その内側にある地球型惑星は大質量のガス惑星と近接散乱をおこして、系外にはじき飛ばされてしまうだろう。したがって、太陽系型の惑星系でしか、地球型惑星は生き残れないように思える。このような「地球型惑星の生き残り条件」も今後のおもしろい話題であろう。

まだ確実ではないかも知れないが、火星で生命がかつて存在したかもしれないという痕跡も火星起源隕石中で発見されている。太陽系内惑星での生命の存在の議論が進み、一方、天文観測や理論的計算の進展により、太陽系外での地球型惑星の統計的議論が可能となれば、この宇宙における生命の存在確率、生命の起源といった問題が、本格的に議論されはじめることになるであろう。

## 参考文献

- [1] Mayor, M. and Queloz, D., 1995: A Jupiter-Mass Companion to a Solar Type Star. *Nature* **378**, 355-359.
- [2] Marcy, G. W. and Bulter, R. P., 1997: The Lick Observatory Planet Search. in *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe* (Cosmovici, C. B., Bowyer, S., and Werthimer, D., Eds.), in press.
- [3] Hayashi, C., Nakazawa, K., and Nakagawa, Y., 1985: Formation of the Solar System. in *Protostars and Planets II* (Black, D. C. and Matthews, M. S., Eds.), Univ. Arizona Press, Tuscon, 1100-1153.
- [4] Safronov, V. S., 1969: *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*. Nauka Press, Moscow
- [5] Beckwith, S. V. and Sargent, A. I., 1996: Circumstellar Disks and the Search for Neighbouring Planetary Systems. *Nature* **383**, 139-144.
- [6] 渡邊誠一郎, 井田茂, 1997: 比較惑星系形成論. 【比較惑星学】(松井孝典編), 岩波書店, 第3章
- [7] Lin, D. N. C. and Ida, S., 1997: On the Origin of Massive Eccentric Planets. *Astrophys. J.*, in press.
- [8] Lin, D. N. C. and Papalouzou, J. C. B., 1993: On the Tidal Interaction between Protostellar Disks and Companions. in *Protostars and Planets III*. (Levy, E. H. and Lunine, J. I., Eds.), Univ. Arizona Press, Tuscon, 749-836.
- [9] Lin, D. N. C., Bodenheimer, P., and Richardson, D. C., 1996: Orbital Migration of the Planetary Companion of 51 Pegasi to Its Present Position. *Nature* **380**, 606-607.
- [10] Chambers, J. E., Wetherill, G. W., and Boss, A. P., 1996: The Stability of Multi-Planet Systems. *Icarus* **119**, 261-268.