

太陽系外の惑星系の軌道変化

長沢 真樹子¹, D. N. C. Lin², 井田 茂³

1. 天文学者、天を見れば

1.1 いろいろな惑星系

太陽系外の惑星の発見が続々と報告されている。2002年10月24日現在、87の惑星系で101個の惑星が太陽系外で発見されている[1]。これらの惑星は、惑星がめぐることによって恒星の位置がわずかに揺れ動き、その星の光がドップラーシフトを起こすことを利用して見つけ出された。しかし現在、系外惑星の検出の主流は、星面を惑星が通過する時に星が暗くなることを利用する遮蔽技術に移りつつあるといえるかもしれない。この技術によって、惑星の発見数は飛躍的に増大すると考えられる。ドップラーシフトを用いた観測には、太陽系で言えば水星の位置に木星があるといったような、恒星を大きく動かす惑星ばかりが見つかりやすい偏りがある。また、地球に向かう方向の運動しかわからないため、惑星の最低質量しか決められないなど、いくつかの制限がある。しかし、なんであれ、100を超える数の惑星が見つけれられているのだから、すでに統計的な議論を始められるくらいの惑星が見つまっていると言っていだろう。

太陽系外で発見された惑星はどのようなものだっただろうか？これは、太陽系こそ宇宙における惑星系の典型例だと思っていた私達の足元をひっくり返すようなものだった。その状況を図1に示す。軌道長半径(主星からの惑星の距離)を地球と太陽の距離(1AUという)を単位として横軸にとり、離心率(惑星軌道の円からのずれを表す量で、0が円、1に近いほど

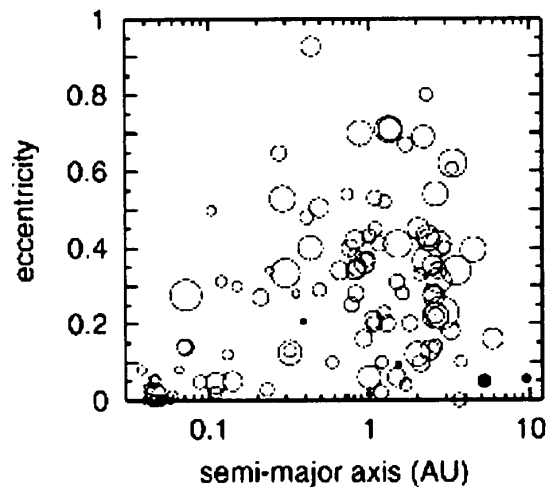


図1: 観測で見つかった101個の太陽系外の惑星の軌道長半径(横軸)と離心率(縦軸). 白丸が太陽系外の惑星系で黒丸が土星軌道までの太陽系の惑星. 白丸の大きさは惑星の大きさに比例している.

扁平な楕円になる)を縦軸にとって、発見された惑星をプロットしたものである。白丸(系外惑星)の円の大きさは、観測からわかる最低質量の1/3乗に比例している。比較のために、土星軌道より内側の太陽系の惑星を黒丸で示してある。残念なことに地球質量の惑星は、ドップラーシフトの観測では観測限界以下であるため見つけることができない。また、他の系外惑星と同じスケールで図1に描くと地球型惑星は印刷限界以下で見ることができない。そこで太陽系の地球型惑星の縮尺は、系外惑星の数百倍にして見えるように描いてある。中心星のごく近くにある惑星の離心率が小さいのは、中心星との潮汐相互作用によってエネルギーが失われたことに対応している。先に述べたように、変わった惑星ほど見つかりやすいのであるが、それを割り引いたとしても、太陽系最大の惑星である木星と比べてさえ、系外惑星たちのなんと

1 アメリカ航空宇宙局 エームズ研究所

2 カリフォルニア大学 リック天文台

3 東京工業大学

大きく、地球型惑星のうちで一番離心率の大きい水星と比べてさえ、なんとエキセントリックなことか。このような惑星は、これまで太陽系で培われて来た惑星形成論の範疇では説明がつかないのである。

1.2 原始惑星系円盤からの惑星形成

惑星形成は、原始惑星系円盤に沈殿した塵が微惑星を作ることから始まる([2]など)。太陽系の本星型惑星領域は、太陽から遠く温度が低いいため、地球型惑星の領域に比べて固体の塵の量が格段に多く、微惑星が大きく成長しやすい。衝突合体を繰り返して大きくなった微惑星がある質量を越えると、微惑星は原始惑星系円盤のガスを捕獲してガス惑星となる([3]など)。このとき、円盤ガスと微惑星の潮汐相互作用で軌道沿いのガス円盤にガスのなくなった溝ができ、惑星の成長はここでほぼストップする([4]など)。ガス惑星が形成された後、原始惑星系円盤は散逸して、現在のような円盤のない惑星系が出来上がる。もともとの原始惑星系円盤が重いものであれば、惑星の全部が木星型という惑星系も出来るし、軽いものであれば、できる惑星はすべて地球型にもなりうる。このようにして惑星が出来るとは、大筋では関係分野のみながほぼ認めるものであり、系外惑星系の惑星も同様に原始惑星系円盤から塵やガスが集積して出来たと考えられている。しかし、太陽系の形成に関しては、例えば、塵がうまく微惑星になり始めないとか、太陽系年齢以内に惑星ができないとか、できた惑星が現在のものと違うとか、細かい点で解決すべき問題が山積している。長年にわたり、多くの惑星科学者が手を変え品を変えてこれらの問題に取り組んできたが、劇的な打開策はいまだに得られていない。そこで系外惑星の研究から、これら太陽系の問題への新しい鍵の発見が期待されている。惑星形成を調べるにはいろいろな切り口があるが、系外惑星でわかっているのは、ほぼその軌道だけである。そこで、軌道から考えていくことにしよう。

1.3 複数惑星系

87の惑星系に101の惑星があることは、複数の惑星を持つ系があることを意味する。2個以上の惑星をもつ系を複数惑星系と呼ぶことにしよう。この論文の中心課題は、原始惑星系円盤の散逸に伴う複数惑星系の惑星の軌道進化にある。今のところ一つの惑星しか報告されていない惑星系でも、半分以上に2つ目の惑星の存在を示すデータが出はじめているから、今後短期間のうち複数惑星系は続々増えるだろう。複数惑星系のうち、軌道が比較的良好な精度で求められ、なおかつ中心星との潮汐相互作用で軌道が変化しきっていない惑星を図1から抜き出したのが図2である。黒丸で示したものは木星と土星である。三角は2つの惑星の周期が整数比の特殊な関係にある惑星系(GJ876とHD 82943)である。これらの惑星配置は特別なエネルギー交換を伴い、それだけでも大変面白いものであるから、また別のところで論じることにし、ここでは、それ以外のもっと平凡な惑星系について考えることにしよう。

複数惑星系は安定でなければならない。これが、我々の立脚する大前提である。一つの惑星だけが中心星を回っている系との最大の違いはここにある。一つの惑星はどんなに離心率が大きかろうと、どんなに質量が大きかろうと、恒星を安定して回りつづ

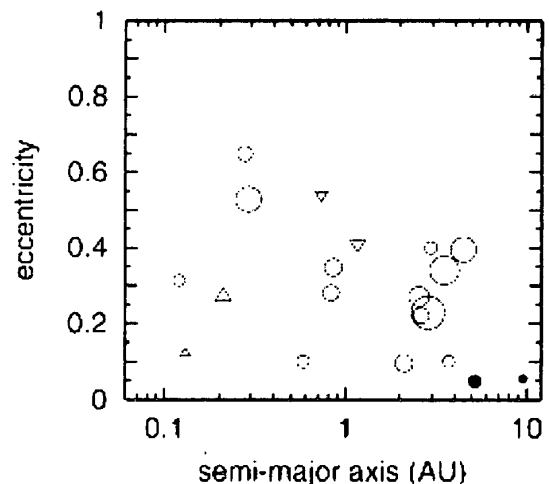


図2: 2つ以上の惑星を持つ惑星の軌道長半径(横軸)と離心率(縦軸)。三角は周期の差が整数比になっている惑星系でGJ876(内側の2つ)とHD82943(外側の2つ)。黒丸は木星と土星。

ける。それ以上に考慮が必要な点はない。しかし複数惑星系では、木星クラスより大きい2個以上の大惑星が、地球型惑星のように密接した配置で、しかも大きな離心率をもって安定して存在しなければならない。これを考える立場としては、(a)何らかの作用で惑星が安定な配置になった、(b) 安定な配置の惑星系だけが残った、の二通りが考えられる。どちらにせよ、2惑星+中心星の系はいわゆる3体問題なので、基本的にカオティックであり、軌道要素を変えてたくさんの軌道を調べることにあまり意味はない。複数惑星系のたどる一般的な軌道進化の傾向を調べる方が大切である。系外複数惑星系のうち、早期に発見されて一番有名なのがアンドロメダ座ウブシロン星を回る3つの惑星である。この惑星系の安定性は、非常に良く調べられている ([5], [6] など)。ただ、多くの研究は、今後の安定性を調べることに捧げられ(それも重要ではあるが)、この軌道がどこからもたらされたかについてはかなり無頓着である。しかし、実のところ、今の軌道が昔のままのものであると考えるのは、かなり危険である。

2. 原始円盤，散逸するとき

さて、原始惑星系円盤内で惑星ができれば、その軌道が現在の惑星系と同じであるかという、必ずしもそうではない。悲しいことだが、惑星系は、原始惑星系円盤の散逸によるポテンシャルの大変化という試練を受けねばならない。原始惑星系円盤は、太陽系生成の最小質量モデル[7]においてさえも木星の10倍の質量を持っている。これがしだいに散逸するのだから、惑星の力学的な運動が変化しないはずはない。近い将来、複数系外惑星系がたくさん報告される時に、原始惑星系円盤や惑星の形成過程の謎に光明を投げかける第一歩となるように、この論文では、発見されている複数惑星系がたどって来た軌道進化を調べ、それをもとに、複数惑星系のうち、どのような惑星系がどういった軌道進化するのかを探っておこう。この章では、恒星を回る2つの惑星

の軌道が、原始惑星系円盤の散逸によってどのように変化するのかを説明しよう。

2.1 原始惑星系円盤のモデル，惑星系のモデル，その他の仮定

では、まず、以下で、どのようなモデルに基づいて計算を行うかをざっと述べる。T-Tauri星の観測から、原始惑星系円盤はだいたい 10^6 - 10^7 年程度で散逸することが知られている。「太陽系では」現在の惑星系を再現するのに少なくともどのような原始惑星系円盤が必要かもわかっている。しかし、系外惑星系では、小さな惑星や恒星から遠い惑星は見つかっていない。ましてや、どのような質量分布の円盤がどのくらいの期間でどのように散逸したかは誰も知らない。しかし幸いなことに、軌道の変化を見るのに、円盤の細かい条件はあまり関係しない。そこで、ここでは、最小質量モデルの5倍の質量の円盤が惑星軌道の外側に広がっているという仮定で話を進めよう。詳細は省くが、大きな質量の惑星が出来たのだから、円盤は初期の太陽系円盤より質量が大きく、大きな質量の惑星が互いに近い距離で運動しているのだから、惑星よりも内側の円盤はかき乱され、ごく初期のうちに散逸したであろうということが考えの背景にある。モデルの正当性、モデルが結果へどう影響するかについては[8]を参照してもらいたい。いくつかの惑星系で運動の特徴を比較するために、一番惑星に近い円盤の端は、どの系でも一様に、外側の惑星から1.6倍の距離にあるとしよう。

1つだけの惑星が恒星を回っているとき、その運動は楕円である。楕円軌道上で恒星に一番近い点を近星点(近点)という。ここに別の惑星が加わると、この楕円軌道は時間とともに恒星の周りをゆっくりと回る。つまり、近星点が星の周りを回るようになる。これは永年変動の一種である。永年と言うくらいだから、近星点が星を回る時間スケールはとても長い。太陽-木星-土星系の場合、近星点の一周には約5万年かかる。地球が太陽を回るのに比べると5万倍の

長さである。しかし、原始惑星系円盤散逸の時間スケールはさらに長い。円盤があると上記の永年運動の周期はもっと長くなるが、それでも、円盤散逸の時間スケールの方がさらに長い。このように円盤の散逸がゆっくりであると、惑星の軌道の変化は、ある意味で断熱的なものとなる。

惑星系では、二つの惑星が原始惑星系円盤と同じ平面内を運動しているとしよう。実際の惑星系を例にとるときは、惑星の質量はドップラーシフトの観測からわかる最低値であるとする(視線方向角度90度の仮定)。たとえ惑星軌道面の向きと地球から見た視線方向との違いによって質量がその何倍かであったとしても、その分だけ円盤の質量も大きいと考えれば、以下の話のつじつまは合う。アンドロメダ座ウブシロン星は3つの惑星を持つが、一番内側の惑星は比較的小さく軌道も離れているので、ここでは無視する。太陽系では、一番大きい木星と土星の系を参考例にしよう。

2.2 軌道の進化、アンドロメダ座ウブシロン星の場合

まず、原始惑星系円盤の散逸によって、惑星系の軌道がどう変わるかを紹介する。わかりやすい例として、アンドロメダ座ウブシロン星の外側の2つの惑星c, dを取り上げよう。

図3-1は現在の軌道を円盤のない状態で積分した結果である。図3-1の左側の2つのパネルがそれぞれ、二つの惑星の近星点経度の差(上)と離心率(下)の時間変化を表している。外側の惑星を実線で、内側の惑星を点線で示す。離心率は、外側の惑星で大きく、内側の惑星で小さい。数千年周期で見られるの振動は永年変動による周期的な変化である。近点経度差($\Delta\omega$)は0の周りを小さな振幅で振動している。近点経度差の変化がある範囲にとどまっていることは、2つの惑星の近星点がいずれもほぼ同じ位置関係にあることである。つまり0付近を振動しているならば、2惑星の近星点は中心星から見て常にほぼ同じ方向にある。このような運動を「近点の連動」と言う。太陽系の惑星ではこの近点の連動は見られ

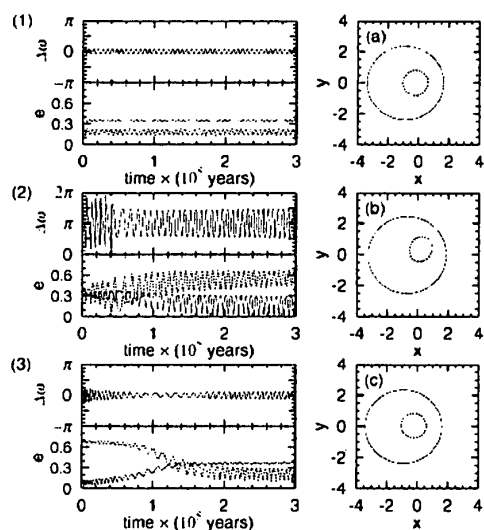


図3：アンドロメダ座ウブシロン星周りの惑星(c,d)の軌道進化。左側が近星点経度の差($\Delta\omega$)と離心率(e)の軌道進化で、右側が最終状態の軌道を真上から見たもの。1.現在の軌道を数値積分したもの。2.現在の軌道が原子惑星系円盤の散逸で受ける軌道進化。3.円盤散逸の結果、現在の軌道に至る軌道進化例。

ず、これはかなり興味を引かれる特徴である。この系を真上から見た軌道(図3-1の右側のパネル)からも、近星点が同じ方向にあるのがわかる。

さて、この現在の軌道に上記の原始惑星系円盤を加え、この円盤を散逸させてみる。この計算例が図3-2のセットである。円盤が散逸するとともに、軌道の離心率と近星点経度が変化する。近星点の経度差は、当初は $-\pi$ から π のすべての範囲にわたって変動を続ける。つまり、原始惑星系円盤を加えると、今の軌道要素では近点連動をしないのである。そのうちに近星点は連動を始めるが、このときの連動は0周りではなく π 周りである。つまり、2惑星の近星点は中心星から見て反対方向にある。そして、現在よりはるかに振動が大きい。これに伴い、離心率の揺れの振幅も最初から最後まで大きい。近星点が π 周りに連動を始めるのと同時に、内側の惑星は離心率が大きくなり、外側の惑星は小さくなる。そして、円盤散逸後の軌道(図3-b)は、残念ながら現在のものに近いとはいえない。

これはつまり、現在の軌道が何か別の軌道からもたらされたことを示している。そこで、例えば、内側、

外側の惑星の初期離心率をそれぞれ0.7, 0.05, とし
て計算をしてみる(実をいうと, 後述するように, 筆者
は適当な結果が得られる初期条件の範囲をすでに
知っているのだが). 軌道長半径は, 現在の値を使う.
この計算結果を図3-3に示す. 最初内側の惑星cの
離心率はかなり大きい, 円盤が散逸するにつれて
小さくなる. 入れ替わりに, 外側の惑星dの離心率が
大きくなる. これは, 円盤を触媒にして, 内側の惑星
cの角運動量を外側の惑星dがもらったことに対応す
る. 見よ, 今度は, 円盤散逸後の惑星軌道は, 現在
のものに近いではないか(図3-c).

ここからわかるのは, 軌道長半径を除く惑星の軌
道要素は, 原始惑星系円盤の散逸によって容易に変
わりうることである. それでは, どのような場合に, ど
のように軌道は変化するのであろうか?

2.3 惑星系の特徴を語るハミルトニアン等高線図

それを知るのに, それぞれの惑星系で一つ一つ,
軌道要素の進化を闇雲に数値積分して調べるのもひ
とつの方法ではあるが, もう少し生産的な方法はない
か. こう考えた時に登場するのが, ハミルトニアン
等高線図である.

2つの惑星が2次元平面で運動していると, 変数
はそれぞれ4つ(位置と速度, あるいは離心率, 軌道
長半径, 近星点, 時間)であわせて8つである. しか
し, 上の例で見たように, 今回のような場合に時間変
化するのは, ほぼ離心率の比と近点経度の差だけで
ある. そこで, 2つの惑星の離心率の比(ε)と近点経
度の差($\Delta\omega$)を二つの軸として, それが時間でどう
変化するかを見てみよう. 典型的な3つの例として,
図4に, アンドロメダ座ウブシロン星周りの惑星系(4-
a), HD168443星周りの惑星系(4-b)と木星-土星系(4-
c)を示した. 黒丸が軌道計算した結果である. 黒丸
の動きをみると, どれだけ時間が経とうとも, 離心
率の比と近点角度の差は同じ線の上を, $-\pi$ から π へ,
あるいは, どこかの周りをぐるぐると動くだけである.
図の中の線は, 系のハミルトニアンを等高線で描い

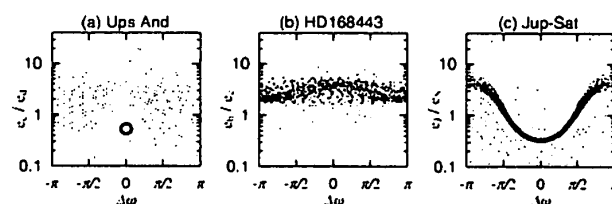


図4: 典型的な3つのハミルトニアン等高線図. (a)アンドロメダ座
ウブシロン星の惑星, (b)HD168443の惑星, (c)木星-土星.
点線がハミルトニアン等高線, 黒点が観測値を軌道積分し
た結果. 縦軸は離心率比, 横軸は近星点経度の差. ほぼ等
高線に沿って運動する.

たものである. つまり, 何の事はない, 惑星は, 等エ
ネルギー線に添って運動しているだけなのである.

等高線には2種類ある. $\Delta\omega$ が0, あるいは π の
周りを回っているもの(つまり近星点が運動している
もの)と, 値が $-\pi$ から π の間で変化しているもので
ある. ある系を考えた場合, 近星点が運動している
状態は, 2つの惑星の最短距離がもっとも大きかった
り($\Delta\omega=0$ の場合), 離心率の変化がもっとも小さか
ったりと, 系を安定にする傾向があるので, 系外惑
星系のように大質量, 高離心率の系では, この近星
点連動が頻繁に見られてもおかしくない. 観測され
ているものでは, アンドロメダ座ウブシロン星, おお
ぐま座47番星, HD12663星周りの惑星がこの連動
軌道にある. 正直に言う, おおぐま座47番星の場
合はまだ観測誤差が大きいので, 連動軌道にあると
100%の断言はできない.

ハミルトニアン等高線図は, 縦軸をlogスケールで
書いた場合回転対称になる. 境となっている値は,
 $\Delta\omega = \pi/2$, $\varepsilon = \gamma$ である. ここで,

$$\gamma \equiv \left(\frac{\text{外側の惑星の質量}}{\text{内側の惑星の質量}} \right)^2 \left(\frac{\text{外側の惑星の軌道長半径}}{\text{内側の惑星の軌道長半径}} \right)^4$$

である. 図4で0まわりの連動軌道が π 周りのものよ
り下にあるのは, $\gamma > 1$, つまり, 大雑把に言って外側
の惑星の方が内側の惑星より質量の大きい惑星系で
ある. 木星-土星系の場合(図4c)はハミルトニアン等
高線図の形状が逆であるから, 内側の惑星の質量が
大きい($\gamma < 1$)ことがわかる. 木星と土星は近点連動

をしていないが、等高線図上で連動軌道の占める割合が少ないわけではなく、ちょっと軌道要素が違えば、近点連動が起きていたとしても不思議はない。一般的に言って、より質量比、惑星の軌道長半径の比が1に近いほど、連動軌道の占める割合は大きくなる。

外場が変化しなければ、等高線自体が時間変化をすることはない。しかし、原始惑星系円盤が散逸する場合は、円盤ポテンシャルの変化によって、等高線の変化がもたらされる。ハミルトニアン等高線図がどのように変化するかを見れば、一つ一つの軌道計算をしなくとも、どのような惑星系がどのように進化するかを知ることができる。

2.4 円盤散逸と等高線の変化

では、ハミルトニアン等高線は時間によってどう変化するのだろうか？

原始惑星系円盤の散逸のいくつかの段階のハミルトニアン等高線図を並べて見比べて見てみよう。図5は、アンドロメダ座ウブシロン星の惑星系の等高線図で、左から右に向かって、時間が進んでいる。図上の百分率は、残っている円盤質量の割合を示している。注目するのは、0回りと π 周りの連動軌道の配置である。円盤が散逸する前(100%)にはこの2つの連動軌道の位置(離心率比)は互いに離れている。そして0周りの連動軌道が π 周りのものより上(離心率比が大きい)にある。これは、図4-aで見た現在の形状を逆さにした形である。0周りの連動軌道が π 周りのものより上にあるものは、「外側の惑星の方がたくさん摂動を受ける形状」である。考えてみれば、外

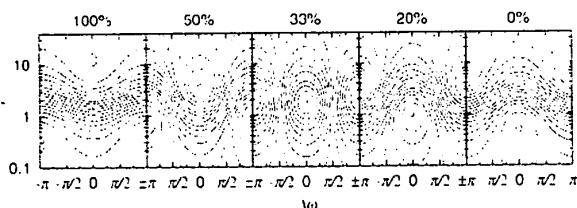


図5: 原始惑星系円盤の散逸に伴うアンドロメダ座ウブシロン星のハミルトニアン等高線の時間変化。百分率は残っている円盤の質量を表す。円盤散逸の前後で、等高線の配置は上下が逆転する。

側に円盤があるのだから、外側の惑星の方がより強い摂動を受けるのは当然である。円盤が散逸しだすと、相対的に外側の惑星への影響が減るので0周りの連動軌道は下へ、 π 周りのものは上へと動き、連動軌道は互いにだんだん近づいていく。円盤がある程度散逸すると(33%), 2つの連動軌道の高さは一致する。その後、二つの連動軌道はすれ違い、離れて行って、円盤散逸後(0%)では、外側の惑星が重いことによる「内側の惑星の方がたくさん摂動を受ける形状」となる。0周りの連動軌道で連動が保たれたまま離心率比が減少するのは図3-3でからも確かめられる。図5の33%のところは、内側の惑星の受ける摂動と外側の惑星の受ける摂動が釣りあった状態である。このようなとき、2つの惑星は強い共鳴状態となり、二つの惑星間に角運動量交換が起きて図3に見られるような離心率変化が生じることになる。

図5において等高線図の非連動軌道は、近いほうの連動軌道につられるように動いている。つまり、円盤散逸前に $\varepsilon < \gamma$ の領域の非連動軌道は、時間とともに離心率比が大きい位置へと移動し、 $\varepsilon < \gamma$ の領域にあった非連動軌道は、0周り軌道のように離心率比が小さい位置へと移動する。円盤散逸前の等高線図に現在の惑星の軌道($\varepsilon \sim 0.6$, $\Delta\omega \sim 0$)を置いてみると、その軌道は $-\pi$ から π まで変化する等高線上にある。この等高線は $\varepsilon < \gamma$ の領域にあって π 周り軌道につられて動くから、図3-2で見たとおりに、時間とともに離心率比は上昇する。

さて、これは $\gamma > 1$ の例であったが、次に $\gamma < 1$ の例として木星-土星系を見てみよう。時間進化の各段階でのハミルトニアン等高線図が図6である。容易に推測できることは、もともと外側の惑星の質量が小さい系では、円盤が加わっても、「外側の惑星の方がたくさん摂動を受ける形状」である事には変わりはない。というわけで、ハミルトニアン等高線図の形状にさしたる変化は生じない。ましてや、原始惑星系円盤が最小質量モデル程度であれば、等高線は図6の20%(中央)から0%へ動くだけで、木星-土星系の離

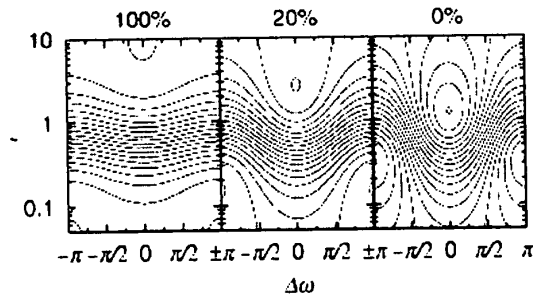


図6: 原始惑星系円盤の散逸に伴う木星土星のハミルトニアン等高線の時間変化。円盤散逸前(左), 最小質量円盤のとき(中央), 円盤散逸後(右)等高線図に大きな変化はない。

心率の変化は、永年変動で生じるものよりも小さい。

わかったのは、複数惑星系の惑星が現在ある離心率を持っているからといって、惑星誕生以来その離心率が保たれつづけていたのではないということである。特に、外側の惑星の質量が大きい系(正確には $\gamma > 1$ の系)では、天地がひっくり返るような変化が生じていた。そして、円盤が存在したときのハミルトニアン等高線図と現在のものを見比べれば、その惑星系がたどってきた道を簡単にさかのぼることができる。それでは、現在発見されている惑星系の元の軌道はどのようなものだったのだろうか？

3. 過去にさかのぼる

今までに発見されている複数惑星系の過去を調べてみよう。表1に、現在の軌道要素と並べて、原始惑星系円盤があったときの平均離心率を書いてみた。2.4で述べたように、 γ が1よりも小さい木星-土星系、おおぐま座47番星惑星系の場合は離心率にさしたる変化は見られない。次に離心率が変化する

主星名	軌道長半径 (AU)	質量	離心率 (現在)	離心率 (円盤散逸前)	近星点連動 (今/前)
おおぐま座47番	2.1/3.7	2.5/0.76	0.061/0.1	0.081/0.056	$\Delta\omega = 0$ / 無
太陽(木星/土星)	5.2/9.6	1.0/0.30	0.048/0.056	0.049/0.054	無 / 無
アンドロメダ座 ν	0.83/2.5	2.1/4.6	0.23/0.35	0.69/0.046	$\Delta\omega = 0$ / 0
HD37124	0.59/3.0	0.86/1.0	0.10/0.40	0.61/0.15	無 / 無
HD12661	0.80/2.7	2.2/1.6	0.35/0.11	0.11/0.31	$\Delta\omega = \pi$ / 無
HD168443	0.29/2.7	7.2/17	0.53/0.20	0.52/0.21	無 / 無
HD74156	0.28/3.5	1.6/7.5	0.65/0.40	1.6/0.15	無 / 無
HD38529	0.12/3.5	0.67/11	0.31/0.34	3.3/0.03	無 / 無

表1: 複数系外惑星系の現在の軌道要素, 過去の軌道要素。欄の左側が内側の惑星, 右側が外側の惑星。質量の単位は、木星質量で、観測からわかる最小値。参考文献[1]による。観測値は必ずしも確定したものではない。

$\gamma > 1$ の系について、図5を見ながら考えてみよう。

図5の0%の等高線のうち、0周りの等高線は、図の左側に移るにつれて上に移動し、高い離心率比の場所を占める連動の等高線となる。だから、アンドロメダ座 ν 星の惑星(0%で一番小さな0周りの等高線近くを運動)は、円盤散逸前は内側の惑星の離心率の方が大きい連動軌道にあったことがわかる。

$\varepsilon < \gamma$ (0周りに近い下のほう)の領域にあつて非連動軌道にあるものの昔をたどってみよう。このような等高線は、過去に戻るにつれ、0周りの連動軌道に従って上に移動し、いったん0周りの連動軌道になった後、再び開いて等高線図の上の方を占める非連動軌道になる。このような進化をする例がHD37124の惑星系である。現在の軌道は0%の等高線図で非連動軌道の下から2番目($\Delta\omega = \pi$ で $\varepsilon \sim 0.3$ くらいの線)の等高線に従って運動している。この等高線は円盤散逸前には、非連動軌道の上から3番目の等高線にあたるので、HD37124の惑星系軌道はもともと非連動軌道で、その離心率比は、円盤散逸前には今よりもずっと大きかったことがわかる。角運動量の保存則を用いるとそれぞれの惑星の離心率(比ではない)が求められるが、ハミルトニアン等高線図で等高線が $\varepsilon \sim 1$ を挟んで変化していることだけからも、円盤散逸時に2つの惑星間で離心率の逆転が起きたとわかる。

図5の0%の等高線のうち、 π 周りの連動軌道にある例がHD12661の惑星系である。HD12661の惑星の近星点連動はアンドロメダ座 ν 星の惑星

のほど強いものではなく、近星点経度差の変化の幅は $\pi/2$ ほどある。実際のHD12661では、0周りと π 周りの連動軌道が互いに近く、どちらかと言うとそのハミルトニアン等高線図20%のものに近い。そこで、20%の等高線図で、 π 周りで $\pi/2$ ほどの振幅を持つ等高線の過去をたどってみる。するとこれは、もともとは下の方にあった非連動軌道に行き着く。したがってHD12661の惑星は、昔は外側の惑星の方が大きい離心率をもち、連動はなかったと考えられる。

これまでのところから、現在ハミルトニアン等高線図の下(上)の方にある $\gamma > 1$ の惑星系は、過去には等高線図の上(下)の方にあったことがわかった。等高線図上で γ を挟んで離心率比が変化し、なかでも $\varepsilon = 1$ を挟んで離心率比が変化すると、2つの惑星で離心率の逆転が起きていた。では、 $\gamma > 1$ の系では必ず大きな離心率の変化があったと言ってよいのだろうか？

0%の等高線図で中央付近の非連動軌道を見てみよう。これはHD168443の惑星系のパターンである。昔にさかのぼっても、中央付近の等高線はやはり等高線図の中央あたりにいる。HD168443星の γ はおよそ2.68、離心率比は2.65であり、両者の値はほぼ近い。ハミルトニアン等高線は $\varepsilon = \gamma$ について対称に逆転するのであるから、 $\varepsilon \sim \gamma$ の場合には、その離心率比は変化してもたかが知れているのである。

さて問題なのは、HD74156とHD38529の系である。これらの系では、 γ が1より大きく、 γ と現在の ε とが大変離れている。 $\varepsilon \sim 1$ に対し、 γ は4から10であり、大きな離心率の変化が期待される系である。ハミルトニアン等高線図上で離心率比が大きくなる、あるいは小さくなるのは一向に差し支えないのだが、実際の系で一方の離心率が大きくなるといういろいろ困ったことが起きる可能性がある。前にも述べたように、複数惑星系は安定でなくてはならないからである。しかしこれらの系では、不安定どころか、過去にさかのぼると、内側の惑星の離心率が1を越えてしまう。離心率が1以上になると、惑星は中心星の周りを回ることができない。つまり、いままで

のように円盤とその散逸を考えただけでは、これらの惑星は現在の形では存在し得ないのである。この二つの系の惑星は、どちらも、軌道長半径、質量に大きな差があるから、二つの惑星間にリング状の円盤が残っていたのではないかなどの説明も考えられる。話が複雑になるので、ここではこれ以上の説明をしないが、このような惑星の存在を許すモデルを考えなければならないことこそ、軌道計算から、円盤が存在した時代の惑星形成条件に制約がつけられることを示している。この話の続きは、準備中の論文に期待されたい。

4. おもちゃから惑星科学へ

ここまでの話をまとめると、(a)複数惑星系の惑星は、現在ある値の離心率をもち、特徴的な近点の位置関係を持つからといって、昔からそうだったとは限らない。(b)ハミルトニアン等高線図を見ると昔のことがわかる。(c)外側の惑星の質量が大きい系(正確には $\gamma > 1$ の系)では、離心率が大きく変動した可能性がある。離心率比と γ が離れているほど、大きな変化があったことが考えられる。(d)たくさんの複数惑星系現在の軌道を説明することから、惑星形成条件に制約をつけられるかも知れない。となる。

数個、あるいはたった2個の天体が重力だけで引き合って運動している系。これほど単純な系はほかに類がなからう。このため、系外惑星の運動を計算していると、複雑な事象を扱っている方には、おもちゃで遊んでいると思われがちである。たしかに、軌道計算屋が系外惑星系という新しいおもちゃにいつせいに飛びついたため、天体力学が(再び)活性化した感がなきにしもあらずではある。しかしこのおもちゃこそ、太陽系=宇宙のスタンダードという神話を打ち砕くものであり、それゆえ、これまでの惑星科学では説明できなかった諸現象を解明する突破口となる可能性を秘めているのである。

謝辞 この研究の一部は第一著者がNASA Ames研究所でNational Research Council Associateshipを

太陽系外の惑星系の軌道変化／長沢・Lin・井田

受けている間に行われました。この仕事の一部は第二著者を通してNASA (grant NAG5-10727)とNSF (AST-9987417)によってサポートされています。計算の一部は東京大学地震研究所地震予知情報センターの並列計算機 (Silicon Graphics Origin 2000)を用いて行われました。

参考文献

- [1] <http://cfa-www.harvard.edu/planets/catalog.html>
- [2] Hayashi, C. et al., 1985 in *Protostars and Planets II*, Univ. of Arizona Press, 1100
- [3] Mizuno, H. 1980, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 64, 544
- [4] Goldreich, P., & Tremaine, S. 1980, *ApJ*, 241, 425
- [5] Laughlin, G. & Adams, F.C., 1999, *ApJ*, 526, 881
- [6] Rivera, E. J., & Lissauer, J. J. 2000, *ApJ*, 530, 454
- [7] Hayashi, C. 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 70, 35
- [8] Nagasawa et al. 2002, *ApJ*, submitted