

特集「木星に衝突する彗星：シューメイカー・レビー9」

彗星の軌道運動

吉川 真¹

1. 99%の確率

発見当初から棒状という変わった形状をしていたシューメイカー・レビー第9彗星は、実は約20個の彗星核が数珠つなぎになって運動している非常に特異な彗星であることがわかり、まず我々を驚かせた。また、その軌道が正確に決定されると、この彗星が1992年の7月に木星にかなり接近していたはずであることが計算によって示され、おそらくこのときにもとの彗星核が分裂したものと考えられるようになった。さらに未来へ運動を調べてみると、1994年の7月には再び木星に接近するが、このときには木星に衝突する可能性すらあることがわかってきた。新聞などの報道によると、「衝突は99%確実」に起こるということで、この彗星が一躍脚光を浴びることになったのである。

ところで、太陽系の歴史の45億年という時間で見れば、衝突現象というものは珍しい現象ではない。月をはじめとして惑星やその衛星の表面にあるクレーターは、多くが小惑星や彗星のような小天体の衝突によって形成されたと考えられているし、我々の住むこの地球上にもそのような衝突の跡がかなり発見されている。また、有名な6,500万年前の恐竜の絶滅は、直径10km程度の小天体の衝突が原因であるという説がかなり有力視されている。しかし、人間の一生といったタイムスケ

ールでは話は別である。流星や隕石といった本当に微小な天体による衝突を除けば、我々が天体の衝突というものに遭遇することはほとんどないと言ってよい。従って、1994年7月にほぼ確実(99%の確率!)に起こるシューメイカー・レビー彗星と木星との衝突は、太陽系における衝突現象を調べる上で貴重な機会を与えるものとなっている。

それでは、このシューメイカー・レビー彗星はどのような軌道をたどって木星に衝突することになったのであろうか。また、1994年7月に衝突するときの軌道はどのようになっているのであろうか。ここでは、この彗星について過去および未来にその軌道運動を解析した結果を報告する。

2. 彗星の軌道計算

シューメイカー・レビー彗星の軌道解析の結果を示す前に、ここで行った彗星の軌道計算について簡単に述べておくことにする。

彗星や小惑星などのいわゆる太陽系内小天体の軌道運動を調べる場合には、惑星による引力を考慮して天体の運動方程式を解くことを行う。この場合、古典力学(ニュートン力学)の範囲で解析を行い、相対論などの複雑なものは考慮しなくても十分な場合がほとんどである。それでも、一般には天体の運動方程式の厳密解を求めることはできないので、厳密解がわかっている場合からの

¹通信総合研究所 鹿島宇宙通信センター

ずれを摂動理論によって求めたり、運動方程式を直接に数値的に積分したりして運動を求めることを行っている。ここでは、シューメイカー・レビー彗星が惑星にかなり接近するので、摂動論は用いずに運動方程式を数値積分する方法で軌道計算をした。

数値積分法には様々なものがあるが、ここではその中でも精度が非常によいと言われている外挿法というやり方を用いることにした。この方法は、時刻 t_0 のときの値から h だけ後の時刻 t_1 のときの値を求めるときに、この h を2等分、3等分、4等分……してそれぞれ t_1 のときの値を求め、この分割数を無限大に外挿したときの値を t_1 のときの値とするようなものである。計算量が多くなる場合もあるが、その計算精度はかなり優れている。

また、扱う力学システムであるが、ここでは太陽と9個の惑星（地球は月を含む）と彗星がつくる系を考えることにする。これらの天体はすべて質点として扱い、天体の形による影響や彗星における非重力効果（ジェットなどによる力）は無視することにする。惑星の位置であるが、より精密に計算するためにここではDE200という惑星の暦を利用することにした。この暦は、西暦1800年から2050年までについて、惑星や月などの天体の精密な運動が計算されているものである。なお、彗星の質量は小さいとして、彗星は惑星の運動には

影響を与えないとする。また、木星の衛星による影響もここでは無視している。

彗星の軌道要素としては、Yeomansによって決定された値を初期値として用いることにした（表1）。これは、1993年7月に発表されたもので数珠つなぎになっている彗星の中央付近の軌道要素である。よって、必ずしも個々の彗星核に対応しているわけではないし、より多くの観測データが得られてくれば軌道要素の値も改良される可能性が高い。従って、以下で示すシューメイカー・レビー彗星の軌道計算の結果はこの彗星の軌道進化の1つの近似解として見てほしい。

3. 木星による捕獲

シューメイカー・レビー彗星の軌道計算は、上で述べた惑星の暦DE200の期間にほぼあわせて、西暦1800年ぐらいから2050年ぐらいまで行った。初期時刻は1993年であるから、未来に約50年、過去に約200年計算したことになる。実際には、1994年7月に木星との衝突の可能性が高いわけであり、衝突が起こればそれ以降の計算は無意味である。ただし、ここでの計算では天体をすべて点として扱っているため、計算の上では衝突は起こっていない。また、計算の精度であるが、計算が終了したときの値から逆に初期値に戻る計算を行い誤差の大きさを見積もってみた。その結果によると、この計算の全計算期間における彗星の位置の誤差は最大でも 2×10^{-4} 天文単位程度であり、計算精度は十分保たれていると言ってよい。[天文単位は太陽と地球の平均距離に対応し、約1億5千万キロメートルである。]

さて、軌道計算によって得られた結果は、天体の軌道要素の変化として示すのが普通である。しかし、軌道要素というものにある程度慣れている必要があるのでここでは軌道要素の結果は省略す

表1 彗星の軌道要素の初期値

Epoch	1993年8月1.0日
離心率	0.0500851659263537
近日点距離	5.0026719197841520AU
近日点通過時刻	1997年11月20.6029436161日
昇交点黄経	296.95313867841830度
近日点引数	32.32031005923340度(J2000)
軌道傾斜角	1.11001278613011度

ここに示す要素は、Yeomansが決定したSolution24である。

ることにし、より直感的に分かりやすい形で結果を表現してみることにする。

まず図1には、彗星と太陽、木星、土星との距離の時間変化を全計算期間にわたって示してみた。木星との距離の図を見ると明らかなように、この彗星は1960年ぐらいから木星との距離が急に小さくなって現在まで至っていることがわかる。これ

は、彗星が木星に捕まってあたかも木星の衛星のように運動していることを意味している。より過去に遡ってみると、この彗星は1900年以前は土星軌道に近いところで運動していたが、1917年に土星にかなり接近し、そのことがきっかけで軌道が変化して木星に捕まることになったことがわかる。この1917年の接近では、土星に約0.1天文単位ま

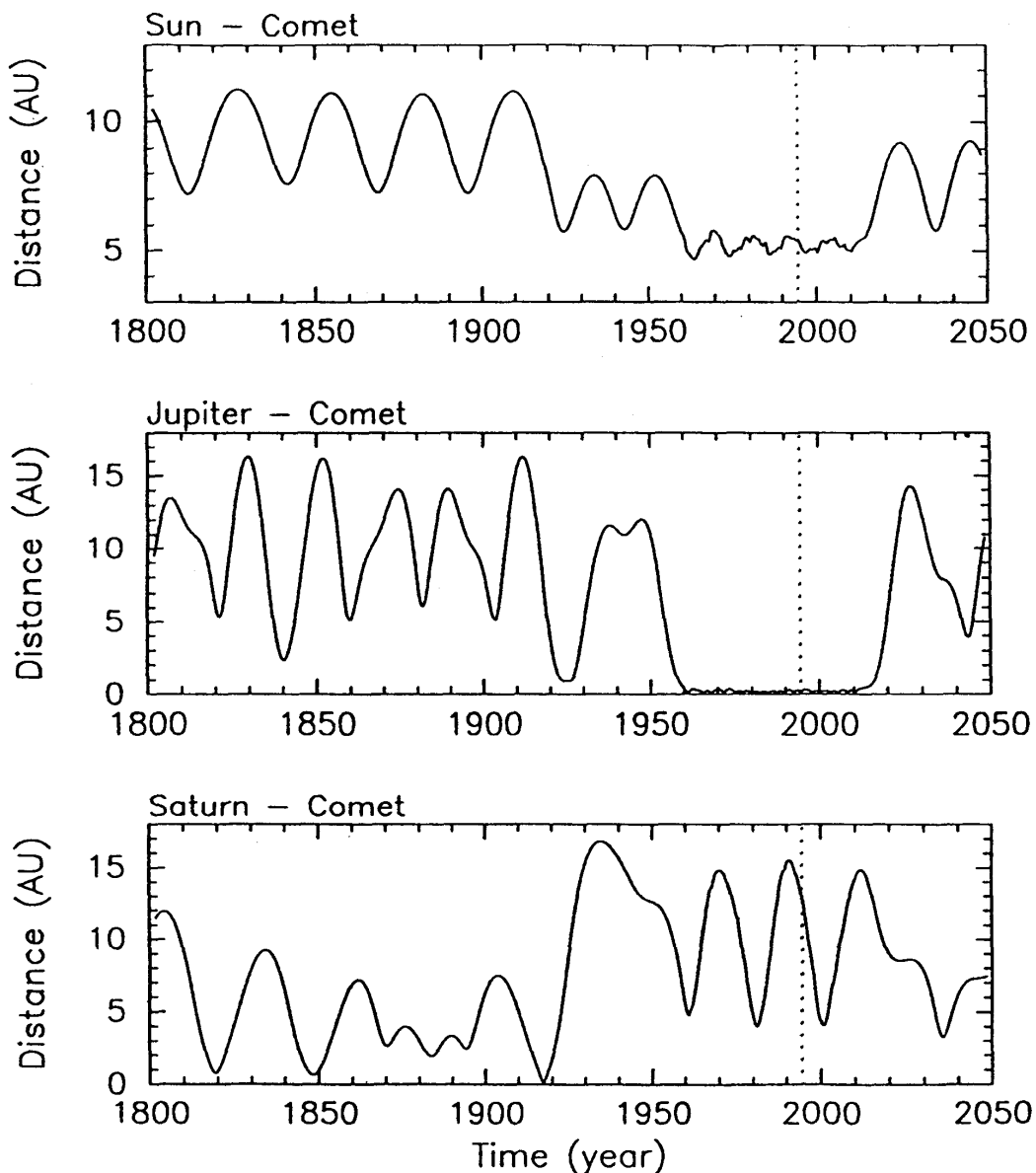


図1. シューメイカー・レビー彗星と天体との距離の時間変化。

ここでは、彗星と太陽(上)、木星(中)、土星(下)との距離を計算した全期間について示す。点線は、1994年7月の木星との衝突が予想されている時刻であり、実際に衝突が起これば、この点線より未来の結果は実現されないことになる。(AU:天文単位, 時刻:西暦)

で接近している。逆に、未来の軌道進化をみると、仮に1994年に衝突が起こらないとすれば、2010年ごろまでは木星の周りに留まっているが、その後は木星から離れていく。つまり、シューメイカー・レビー彗星は約50年の間、木星に捕らえられる軌道にあるのである。この結果は、国立天文台の木下・中井によって行われた計算結果[1]とほぼ

一致したものとなっている。1800年から1994年に衝突するまでについて太陽の周りを公転する運動の軌跡を描いてみると図2のようになる。だんだんと軌道が小さくなってきて木星軌道に巻き付くようになっていることがわかる。

次に、木星の衛星のようにになっている約50年間についてのみ木星と彗星の距離の時間変化を示し

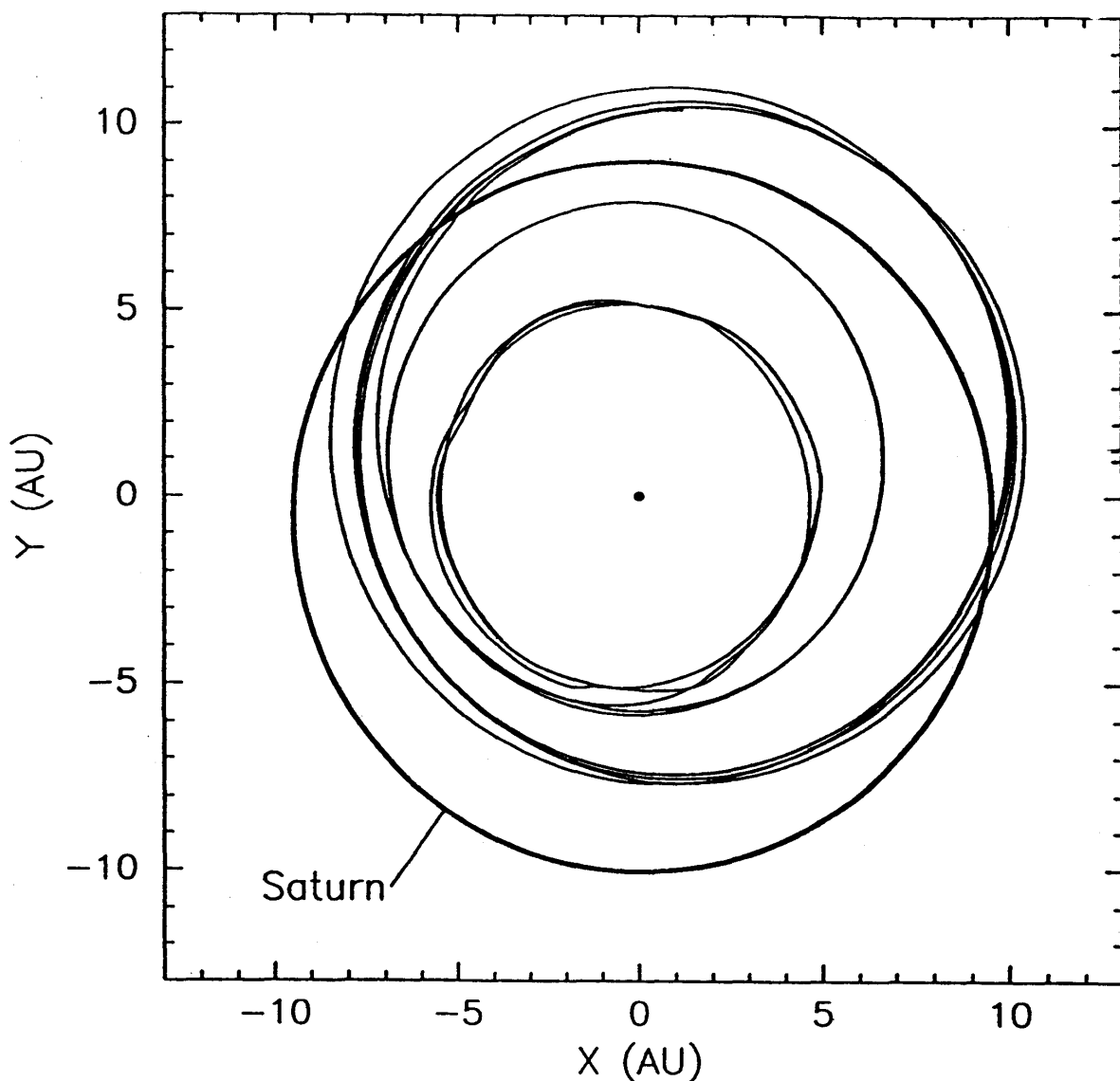


図2. シューメイカー・レビー彗星の運動の軌跡。

1800年から衝突する1993年7月までの彗星の軌跡を、黄道面（地球の公転面）に投影したものである。中心が太陽であり、X軸の方向が春分点の方向である。比較のために土星の軌道が描かれている。木星の軌道は図が煩雑にならないように省略されているが、最も内側の彗星軌道の付近に木星軌道がある。

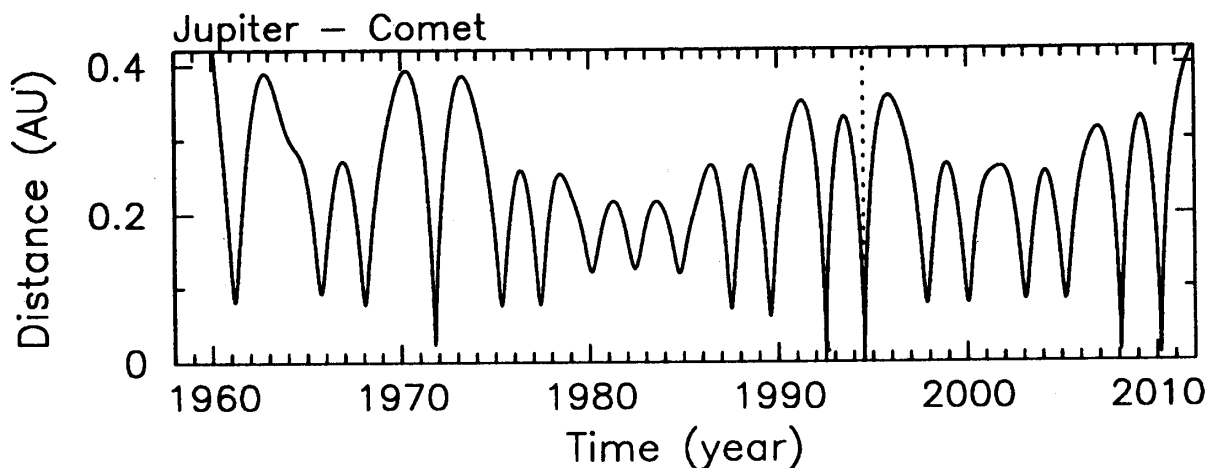


図3. シューメイカー・レビー彗星と木星との距離。

彗星が木星の衛星となっている間の距離の変化を示す。これは、図1で木星との距離が極端に小さくなっている部分の拡大図である。

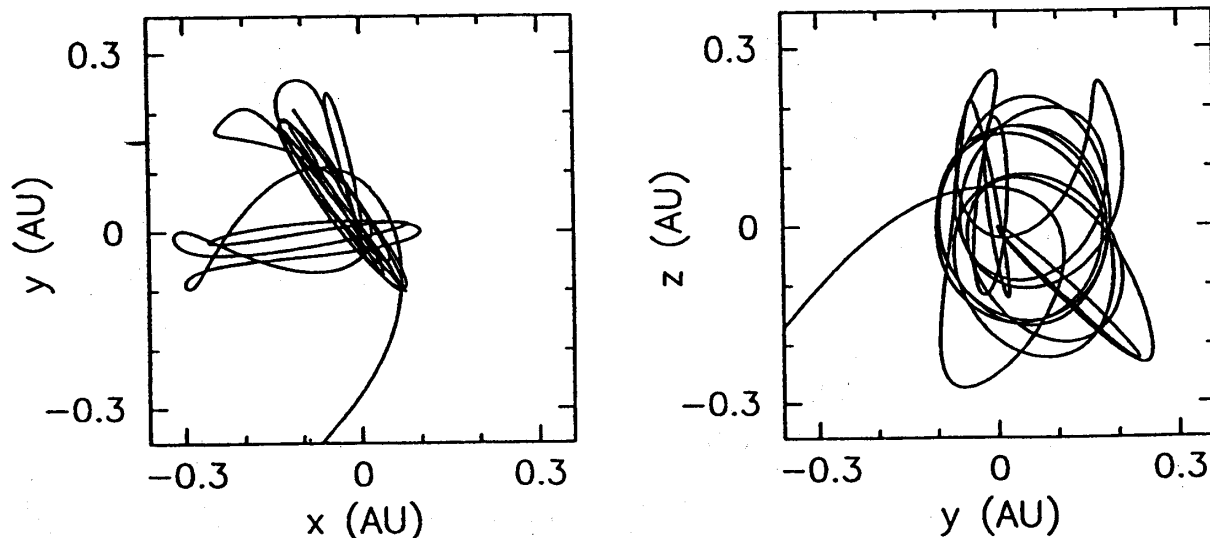


図4. 木星の周りのシューメイカー・レビー彗星の運動の軌跡。

1960年頃に木星にとらえられてから木星に衝突するまでの彗星の運動を木星を中心にして描いた図である。中心(原点)に木星があり、x-y平面(左)は黄道面に平行な平面、またy-z平面(右)は春分点の方向からみたときの黄道面に垂直な面である。春分点はx軸の方向にある。

てみる(図3)。この期間では、彗星は最大でも0.4天文単位ほどしか木星から離れない(ちなみに木星の軌道長半径は5.2天文単位程度である)。木星との接近は1993年以前では2回起こっているが、1回目は1971年の10月に0.024天文単位(370万km)ぐらまで接近した。2回目は1992年7月7.9日に起こり、このときは木星の中心から約10万5千kmまで接近している。木星の赤道半径は約7万

1千kmであるから、ほとんど木星表面をかすめ通ったと言ってもよいような接近である。この2回目の接近の時に潮汐力で彗星核が破壊され、現在見られるような数珠つなぎの彗星になったと考えられているのである。また、1993年以降では3回ほど接近が見られるが、このうち1994年のものが衝突と思われているもので、これについては次の節で少し詳しく述べる。また、もし衝突が起ら

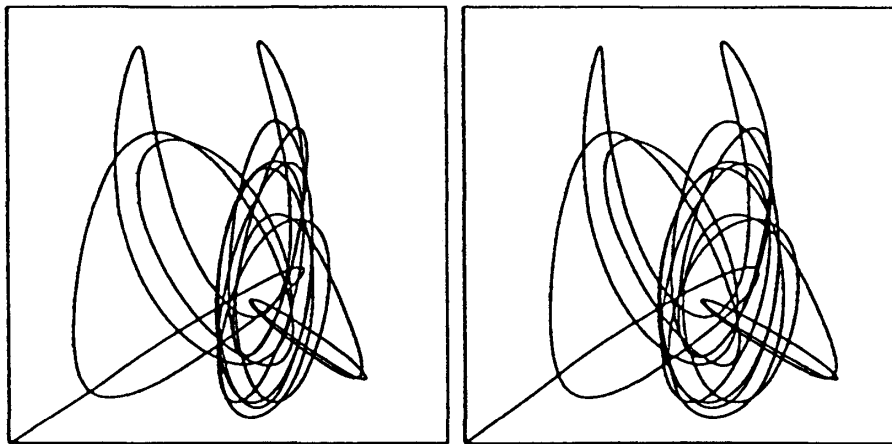


図5. 木星の周りのシューメイカー・レビー彗星の軌道の立体視。

図4のy-z平面の図について少し見る方向を変えて立体視用に作図したものである。右の目で右の図、左の目で左の図を見ることで、軌道が立体的に見える。もし立体視できない場合には中央に仕切を置いて試みてみるとよい。

なければ2008年と2010年にも木星に接近し、その後、木星の衛星状態から解放される結果となっている。

では、木星の衛星状態になっているときに、この彗星はどのような軌道をとって木星の周りを運動しているのでしょうか。木星を中心として見た場合の彗星の運動の軌跡を図4に示す。この図は、中心に木星があり彗星が木星に捕まってから1994年に衝突するまでの軌道を黄道面に平行な面と垂直な面に投影したものである。木星の周りをかなり複雑な軌道をとって運動していることがわかる。

これは、木星から受ける引力と太陽から受ける引力とが同じような大きさになっているために、軌道が一定にならずに複雑になっているのである。さらに、軌道の様子をよりよく理解するために、軌道を立体視するための図も描いてみた(図5)。木星の衛星の軌道と言っても、普通の安定した軌道とは全然違っていることが実感できると思う。

4. 木星との衝突

今回、最も注目されるのは、やはり1994年7月に起こるであろうと思われる木星との衝突で

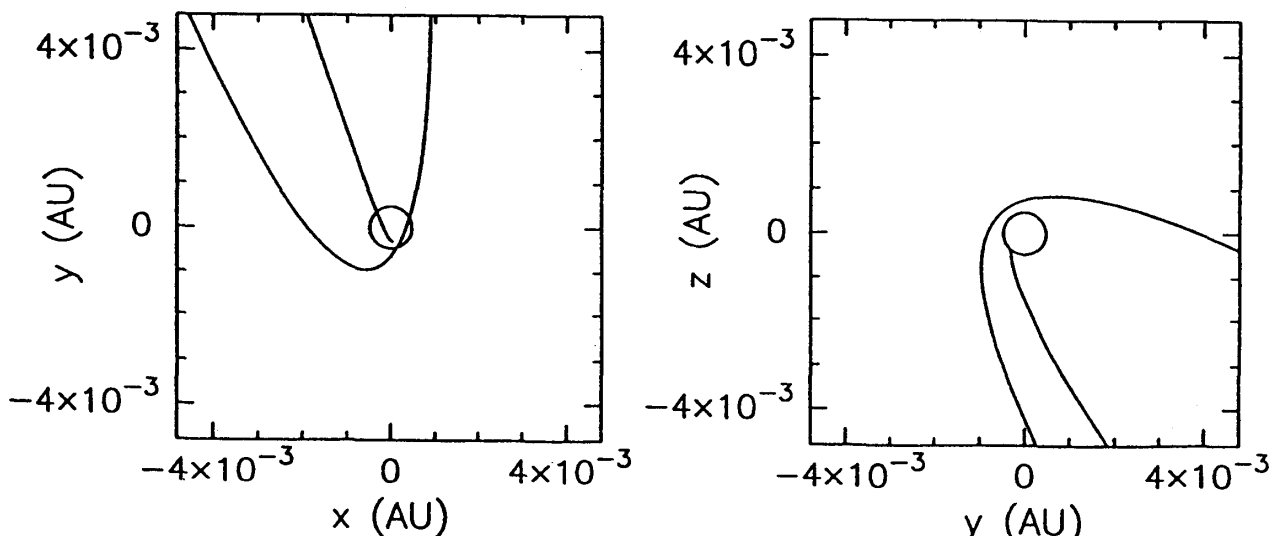


図6. 木星に衝突するシューメイカー・レビー彗星の軌道。

図4の中心部分を拡大したものである。ただし、本文にも述べたあるように、いくつかの軌道の線は省略してある。中心の円は木星本体の大きさを示す。

ある。ここでは、その衝突における運動の様子をまとめてみることにする。なお、以下で述べる計算結果は、すでにYeomansが発表しているものとはほとんど同じ結果となっている。

まず、図6(前ページ)であるが、これは図4の中心部分を拡大したものである。この図で、木星のすぐわきをかすめている軌道が1992年7月に接近した時のもので、ぶつかっている軌道が1994年7月の衝突である(分かりやすくするために、この他の重なっている軌道は省略してある)。この図を見る限り衝突は確実に起こるようである。

衝突が起こるときのいくつかのパラメータの値を表2に示す。ここでは、彗星が木星中心から木星の赤道半径である71,398kmのところ付近に来た時を衝突としている。ここでの計算によると、衝突は1994年の7月20.534日(世界時)に起こり、そのときの彗星の木星に対する速度は60km/sという高速である。ただし、初めにも述べたように、この彗星は20個ほどに分裂しているため、実際の衝突はこの時刻付近を中心にして前後数日にわたって起こると予想されている。それぞれの彗星核がいつ衝突するかは、かなり衝突に近づかないと正確には決められないと思われる。

次に、彗星が木星に衝突する位置であるが、図6からもおよその位置はわかるが、表2には衝突時の彗星とその他の天体との位置関係も示してある。ここで、角度 θ_1 と θ_2 は図7に示してある角である。衝突時には、 θ_1 は65度ほどであるから、衝突は木星の夜側で起こることがわかる。また、 θ_2 の方は109度であるから、地球からみても木星の裏側になってしまう。従って、衝突そのものは地球からは残念ながら見ることはできない。衝突する場所の経度は274度、緯度は-49度であるから、木星の南半球の中緯度付近に春分点の方向とほぼ直角の経度方向から衝突することになる。ただし、

表2 木星と衝突するときのパラメータ

時刻	1994年7月20.534日(世界時)
木星に対する相対速度	59.5 km/s
角度：太陽-彗星-木星 (θ_1)	64.6 度
角度：地球-木星-彗星 (θ_2)	109.3 度
木星中心から見た経度	274.0 度
木星中心から見た緯度	-48.5 度

経度は春分点の方向から計ったものであり、緯度は黄道面に平行な面を基準として計ったものである。 $(\theta_1 \cdot \theta_2)$ は図7を参照)

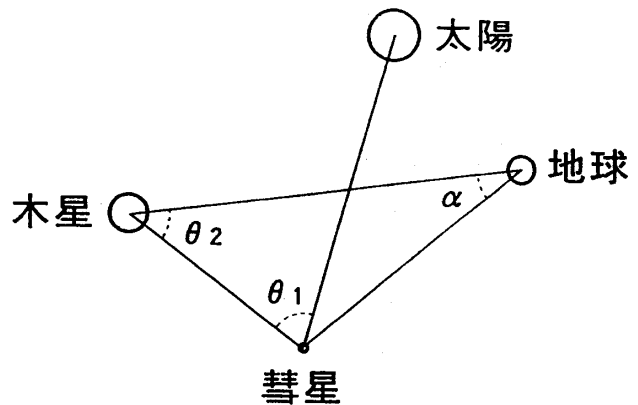


図7. 天体の位置と角度 θ_1 , θ_2 , α

ここでいう経度・緯度とは黄道面と春分点に準拠したものであるため、木星の実際の経度・緯度とは異なるものである。以上述べてきた各パラメータについて、衝突直前から直後にかけての合わせて10時間の時間変化を図8に示す。また、参考のため衝突が起こる時の惑星の配置を図9(172ページ)に示してある。彗星が衝突する現場は木星の陰になって見えないが、地球から木星自体は観測できることは幸いである。

5. 今後の課題

1994年7月に起こるとされるシューメイカー・レビー彗星の木星への衝突では、我々は天体

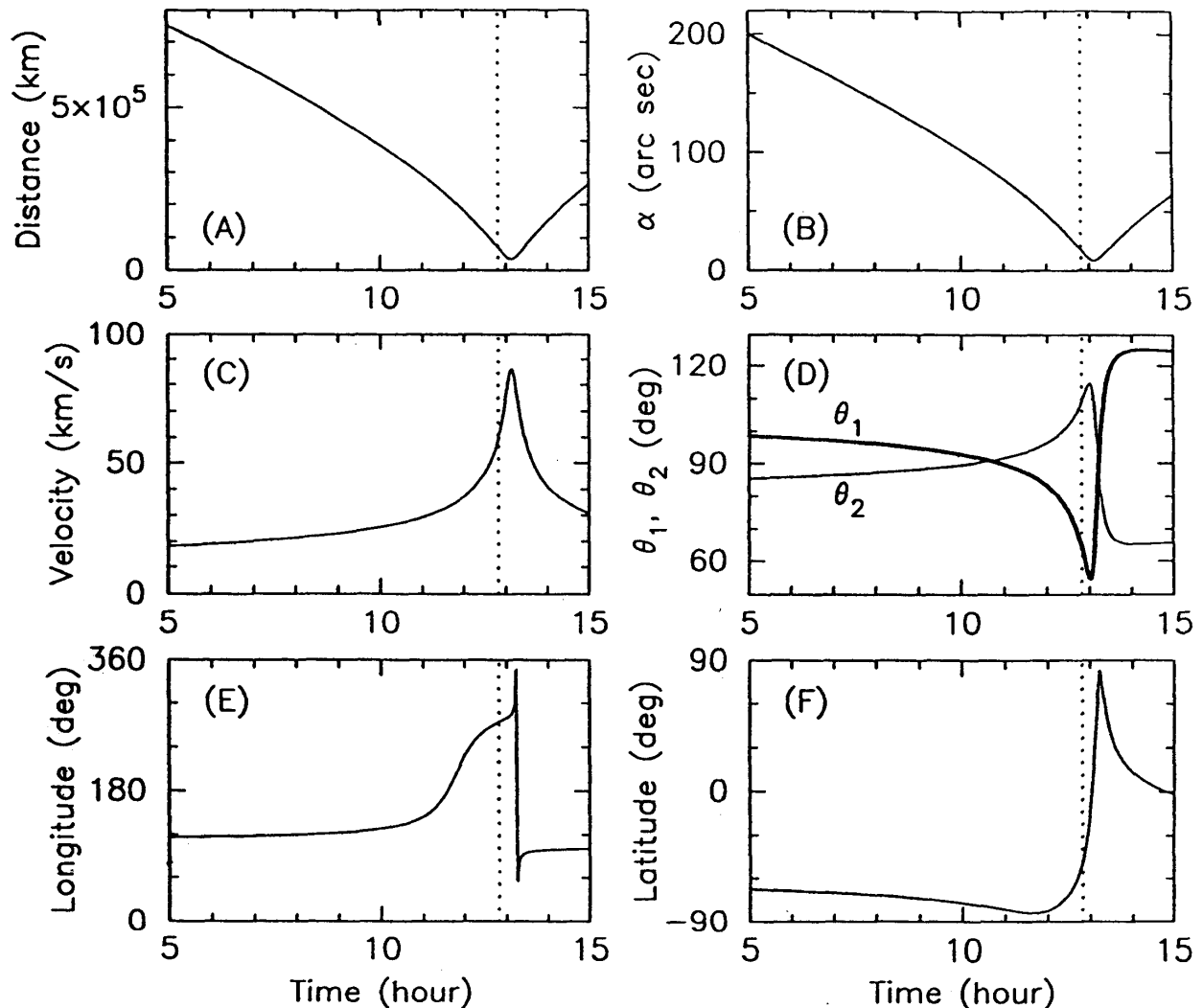


図8. シューメイカー・レビー彗星が木星に衝突する前後での各パラメータの時間変化。

時刻は、1994年7月20日の世界時を示し、点線は彗星が木星表面に衝突する時刻である。実際に衝突が起これば、点線より右側の結果は実現されない。ここで示しているパラメータは、彗星と木星の距離 (A)、地球から見たときの木星と彗星のなす角度 α (B)、彗星の木星に対する相対速度 (C)、角度 θ_1 ・ θ_2 (D)、木星中心からみた彗星の経度 (E) と緯度 (F) である。経度と緯度は黄道面および春分点に準拠して決めたものであるため、木星本体の経度・緯度とは異なる。(角度の α , θ_1 , θ_2 は図7を参照)

の衝突についての様々なデータを得ることができると期待されている。衝突現象で何がわかるかについては別の議論に譲ることにし、最後に彗星の運動に関する力学的な問題点を述べておくことにする。

天体力学では、万有引力の法則のもとにニュー

トンの運動方程式 (または相対論の方程式) を解くことで、原理的には天体の運動を精密に求めることができる。おかげで、惑星についてはかなり正確にその運動が求められており、たとえば日食などの現象を非常に高精度に予報できるようになっている。しかし、彗星の場合にはその運動を正

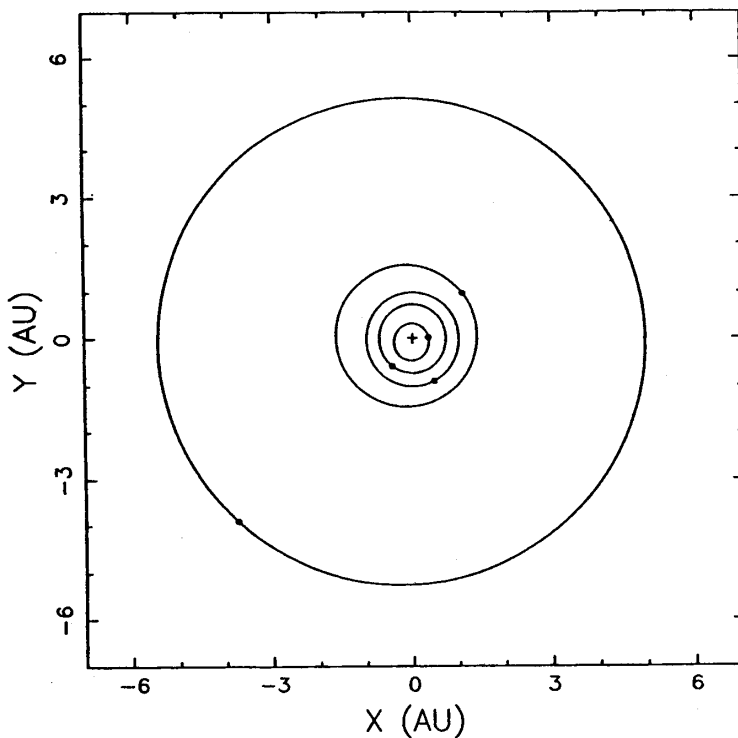


図9. シューメイカー・レビー彗星が木星に衝突するときの惑星の位置。

1994年7月20日の惑星（内側から水星・金星・地球・火星・木星）の位置を示す。

確に決めるのが非常に難しく、個々の彗星がどこから来たのかを知ることは不可能とさえいってよい。その理由は、ここで調べたシューメイカー・レビー彗星の場合のように、彗星は惑星に頻繁に接近することが多いため、軌道がカオス的になってしまうためである[2]。さらに、彗星の場合にはガスを放出したりすることで万有引力以外の力も働くが、その場合どのような力がいつ働くのかわからないという問題もある。従って、彗星については短期的には軌道運動を計算で求めることはできるが、少し長期になると計算精度を保つことができなくなってしまう。この問題に対しては、彗星の軌道要素の初期値においていろいろな誤差を含んだものを計算し統計的に考えることで対処しているのが現状であり、より適した軌道解析法を開発していく必要がある。

彗星という天体は、神秘的な姿で我々の太陽系の謎を解くための手がかりをもたらしてくれる天

体である。シューメイカー・レビー第9彗星がどのような新事実あるいはさらなる謎を我々にもたらしてくれるのか、これからは楽しみである。

参考文献

- [1] 木下宙, 中井宏, 1993: Comet Shoemaker Levy 9 の軌道進化. 日本天文学会1993年秋季年会講演予稿集 C012.
- [2] Nakamura, T., Yoshikawa, M., 1991: COSMO-DICE: Dynamical Investigation of Cometary Evolution. Publication of the National Astronomical Observatory of Japan Vol.2 Num.2, 293-383.