

太陽系外における惑星形成

太陽系で生命が存在する可能性があるのは、生命に必要なものをもつと思われる数個の惑星に限られる。最大の制約はおそらく液体の水の存在である。生命探査を宇宙へ展開するにあたり、太陽以外の恒星のまわりに惑星を見つける見込みについても理解する必要がある。特に興味深いのは、表面に液体の水が存在し、生命を保持できるような性質をもつ地球型惑星である。天文学者は系外に惑星を探し、発見しているが(15章)、まだ地球型惑星を発見するには至っていない。したがって、惑星形成を理解することで地球型惑星が存在しているかどうかを予測することになる。

この章の目的は、太陽系での惑星形成に関する過程に目を向け、これらと同じ過程が他の恒星のまわりではどのように起こるかを理解することである。まずは、性質がもっともよくわかっており、形成過程についてももっとも理解の進んでいる太陽系から始める。実際、惑星形成論によって性質が説明できるのは太陽系だけである。太陽系でどのような過程が起こるかを知れば、同じ過程が銀河系の広い範囲で起こるかどうかを知ることができ、その結果どのような型の太陽系ができるかを理解することができるだろう。次の章では他の恒星のまわりに惑星があるという観測的な証拠に着目し、16章ではその惑星が生存可能かどうかを議論する。

太陽系の主な特徴

太陽系には九つの惑星があり、大きさも組成も大きく異なる¹。内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星と冥王星がある。冥王星はそれだけで一つのカテゴリーに属するように見える。もちろん、惑星の衛星も内部的な過程によって表面で地質学的な過程を起こし、それぞれの世界をもっていると考えられる。このことを考慮すると、惑星の一覧表を月、ガリレオ衛星のイオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト、土星の衛星のタイタン、海王星の衛星のトリトンくらいは含めたものに拡張するべきであろう。この一覧表は20個くらいまでは簡単に拡張できるだろう。これらの天体がどのように形成されたか、同様の天体が系外に形成された可能性があるかを理解するため、惑星それぞれの性質と全体としての惑星の集合に着目する必要がある。太陽系には非常に多くの秩序や規則性がある。この規則性は形成過程を知る手がかりを与えてくれる。

はじめに、惑星と太陽系の主な特徴を挙げる。これらが系外にも当てはまる一般的な性質か、太陽系特有なものかを前もって知ることは困難だが、太陽系の初期の記録や形成を示唆する議論に展開することができるだろう。

1. 太陽系の惑星はすべて太陽のまわりを同じ方向に公転しており、その方向は太陽の自転方向と同じである。さらに、ほとんどの惑星では同じ方向に自転している；例外

¹2006年夏、冥王星の惑星降格により太陽系の惑星は八つになったが、ここでは本文通りに訳していく。

は逆方向に自転する金星と、自転軸が傾いている天王星と冥王星である。

2. 全惑星の軌道はほとんど同一平面上にあり、この面は太陽の赤道面に近い。冥王星の軌道が最も傾いており、傾斜角は他の惑星の軌道面に対して 20° である。さらに、九惑星の軌道はほぼ円である；またもや冥王星の軌道が一番円から遠く、軌道離心率が大きい。ただしそれでもそれほど大きくはない²。
3. 現在の知識によれば、惑星はすべて同時期、45 億年前から 46 億年前に形成された。直接年代を決めたのは地球、月、火星 (8 章で述べたように隕石を通して)、小惑星帯起源の隕石といった数個の天体にすぎない。しかし、これらはすべて同じ年代を示した。太陽の年代を直接はかることはできないが、同程度の質量をもつ恒星の観測にもとづいて予測した年代は 45 億年という数字と調和的である。
4. 惑星は太陽系にうまく配置されており、軌道が互いに交わることはない。海王星と冥王星がこの規則の唯一の例外である³。冥王星の軌道は円からはずれており、一番近いときには海王星よりも太陽に近づく。ただし海王星と冥王星は複雑な共鳴関係にあり、海王星が太陽に一番近づくときには海王星は太陽の反対側にある；両天体はそれほど近づかないのである。惑星軌道の配置はチチウス - ボーデの法則なるもので表現される。この法則は一連の数字、4, $4+3$, $4+(3\times 2)$, $4+(3\times 4)$, $4+(3\times 8)$, $4+(3\times 16)$ 等であり、これらを 10 で割ると太陽からの惑星の距離を天文単位 (A.U., 太陽から地球までの平均距離を 1 A.U. とした単位) で表したものとなる⁴。この法則は海王星を除けばうまくあてはまっているように見える。海王星は太陽系に侵入してきたように見えるかもしれない。また、チチウス - ボーデの法則によって惑星の存在が予測された火星軌道と木星軌道の間にある小惑星帯にも合致する。規則的な配置の惑星は形成過程からの自然な形態かもしれないが、この特殊な法則の詳細は偶然の産物以上のものではなさそうである。
5. 九惑星の組成は太陽からの距離によって異なる。太陽に近い四つの惑星、水星、金星、地球、火星は薄い大気を持つ (あるいは持たない) 岩石惑星である。次の四惑星、木星、土星、天王星、海王星は巨大ガス惑星であり、厚い大気を持ち、一般的な意味での固体表面を持たない (ただし、中心に岩石の核は存在するだろう)。太陽から最も遠い冥王星は小さな氷惑星で、他のどの惑星よりも外部の氷衛星にいろいろな意味で似ている。
6. 木星と土星の大気は主に太陽や宇宙の主要要素である水素とヘリウムで、太陽や宇宙の主要元素と同じである；この二惑星の全体の組成は太陽のものと非常に似ている。さらに、形成された 45 億年前から最も変化していないとされる隕石も太陽と同じ組成をもつ (ただし隕石中に残っていない水素とヘリウムは除く)。天王星と海

²冥王星の離心率は 0.2490 [1].

³厳密には交わっていない。

⁴チチウス - ボーデの法則

$$d = 0.4 + 0.3 \times 2^i.$$

ここで、 $i = -\infty, 0, 1, 2, 3, \dots$ であり、 d がチチウス - ボーデの法則によって与えられる軌道長半径である。海王星は $i = 7$ に相当し、38.8 AU と求められるが実際の軌道長半径は 30.06 AU である。ちなみに、 $i = 8$ (冥王星) を代入すると 77.2 となるが、冥王星の軌道長半径は 39.44 AU である [2].

王星は木星と土星ほど水素とヘリウムをもたず、大気は水や二酸化炭素、メタン、アンモニアといった氷が揮発性成分の分子であると思われる。

7. 惑星の衛星はたくさんあるが、どこにでもあるわけではない。巨大ガス惑星は衛星からなる小型「太陽系」をもっている。ほとんどの衛星は中心の惑星のまわりを惑星の自転方向と同じ向きに公転し、軌道はほぼ惑星の赤道面上にある。巨大ガス惑星はすべてリングをもつ。リングは、惑星のまわりをまわるミクロンサイズのダストからハウスサイズのブロックにもなる多数の粒子からなる。内側の惑星はリングも衛星群ももたない。地球には月があるが、金星には衛星はない；火星は小さな衛星を二つもつが、これらは小おそらく惑星帯からやってきたものだろう。
8. 太陽のまわりには、 $10^4 - 10^5$ A.U. くらいの位置に彗星の雲がある。この雲は見ることができないが、太陽系を横切る長周期彗星の軌道上の最も遠い点を求めることで存在が信じられている。この雲は 1950 年代にその存在を予測した天文学者、ヤン・オルトにちなんでオルトの雲と名付けられた。この雲の中の彗星は付近を通る星によって摂動を受けることがあり、なかには太陽系の内側を横切るものもある。太陽系の内側を通る彗星の軌道から、彗星は同一平面上にある惑星とは異なって球形の雲に一樣に分布しているようである
9. 彗星に似た天体からなる第二の雲も存在する。これは海王星や冥王星以遠の 30-50 A.U. の距離にある。ただし、これらの彗星は惑星のように同一平面上に円盤状あるいは帯状に分布しており、軌道は太陽のまわりを同じ方向に公転している。この彗星の帯は天文学者ジェラルド・カイパーにちなんでカイパーベルトと呼ばれ、短周期彗星のやってくる場所だと考えられている。カイパーベルト天体は 1990 年代に観測的に発見され、今日では 30 個超見つかっている；カイパーベルト天体のサイズは 100 から 400 km にわたり、おそらくもっと小さなものが非常に多くあるだろう (冥王星は単にこれらの天体の最大のものなのかもしれない)。
10. 惑星は全部合わせても太陽系の全質量のごく小さな割合を占めるにすぎず、太陽が全体の 99.8 % を占めている。木星が残りの質量のほとんどを占める。一方、惑星、特に木星は太陽系の角運動量のほとんどをもつ。角運動量は回転しようとする傾向のことである。各惑星は太陽のまわりを回転しており、全角運動量に寄与している。太陽は 27 日に一回転自転しているので全角運動量に寄与しているが、太陽から木星の距離が長いので、質量の小さな木星の方が寄与は大きい。
11. 45 億年前にできた隕石とその化学特性から、形成当時の温度は少なくとも太陽系の内側では 1500 K を超えていたことが示唆される。この高温下では固体物質が大量に昇華するだろう。これらは雲状から固体粒子への物質進化にかかる時間に制約を与える。固体粒子の中には現在までほとんど変化せず保持されたものもあり、進化にかかった時間は 1000 万年未満である。

太陽系の各部分は円盤上に存在し、ほとんどのものが同じ方向に自転と公転していることから、太陽系は惑星を形成する物質の円盤からできたと言われている。各要素の年代と様々

な物質の組成が共通することから、太陽と「原始惑星系円盤」はガスとダストからなる(完全にはいえないが)比較的均一な雲からできたという結論が得られる。初期の回転が小規模のものだったとしてもこのような巨大な雲の崩壊は中心星をまわる平たい円盤を無理なく形成するだろう。この系の質量のほとんどはやがて原始星となる中心星に行き着く。その他は崩壊からとり残され、原始太陽のまわりにガスと出すとの円盤を形成するだろう。このデブリはやがて集積して惑星を形成する。このような、惑星の「太陽系星雲」起源説は1755年にイマヌエルカントによってはじめて提唱された。これは、多くの観測にもとづいたものであり、さまざまな観測結果や理論結果と調和的であるため、科学業界に受け入れられた。

恒星系での「原始惑星系」円盤形成

太陽系は巨大分子雲の崩壊から形成されたと考えられている。このような雲はこの銀河の多くの場所で見られ、その中には若い星がよくある。宇宙は150億年前にできたと考えられており、我々の銀河系もおそらく同程度の年齢だろう。なぜ星が形成され続けるのだろうか？星のライフサイクルは一回ではなく、銀河の形成から同じ経過で繰り返される。星の寿命は質量に強く依存する。太陽質量の10倍以上をもつ重い星は核燃料を急速に燃やすため、寿命が短い。太陽質量の0.1倍程度の軽い星はより押し速度で燃料を燃やすため寿命が長い。各星の寿命は1000万年から100億年までの幅がある。したがって、今日我々が見ている星は銀河の形成と同時にできた一代目の星かもしれないが、初期に形成された星の大多数は寿命をまっとうしてなくなっている。しかし、崩壊するガス雲の中から新しい星が作られ続けており、幅広い年代の星をこの銀河の中に見ることができる。

最も重い恒星は核燃料を早く使いきり、崩壊を始める。崩壊は恒星の急激な膨張と質量の放出を起こす引き金となる。この過程が超新星爆発であり、爆発によって飛び散った破片はその近辺の星間空間に再分配される。さらに、爆発しない星も「恒星風」によって銀河に物質を放出しうる。宇宙誕生のビッグバンで生成されたのは水素、ヘリウム、リチウムの軽い三元素のみであるため、重い元素が生成されたのは恒星の中だろう。これらの元素が銀河に再配分されるのは超新星爆発と恒星風によってである。特に最も重い元素は超新星爆発によってのみ生成される。太陽と惑星がこういった重い元素を含んでいるということは、太陽系の物質はかつて恒星の中にあったということの意味する。

ガス雲の膨張による衝撃波と超新星起源のダストは近傍の巨大分子雲の崩壊を引き起こす。崩壊が起こるためには、雲の密度は重力がガスの膨張を超えるほど高くなる必要がある。雲が崩壊すると、多数の小さな雲に分裂し、各々が独立に分裂して恒星を形成する。この崩壊は非常に短い時間で起こる(10^5 年程度)。

崩壊が起こるとき、二つの重要な現象が起こる。まず、雲がはじめに持っていた回転は崩壊後も保存される。その結果、崩壊中の雲はフィギュアスケートの選手が腕を体に引きつけて回転をはやめるのと同様に回転を早める。回転すると、雲は雲の物質をもつ球状をた

もって崩壊することができなくなる；崩壊するには早く回りすぎるのである。そして、雲は中心の物質の集合（これがやがて中心星となる）と周辺的气体とダストの円盤となる。回転することで物質が回転軸に移動することが妨げられるが、軸に平行な方向の崩壊は防げない（軸からの距離は保たれる）；そして、ガスと出るとは中心星をまわる物質円盤を形成する。その結果、ディスクは原始星に似た組成を持ち、最大存在度の水素とヘリウムを持つ（図 14.1）。

[図 14.1]

巨大なガスとダストの分子雲の重力崩壊と原始惑星系円盤の形成を示す模式図。初期の雲は乱流状態にあるため、回転を生じる。角運動量が保存されると崩壊によって球ではなく中心に原始星のある回転円盤が形成される。

次に、円盤の内側の物質が崩壊するにつれて圧縮によって密度を増し、摩擦の増加によって加熱される。原始星からの距離によって太陽系の内側では高温になり、ダストが大量に昇華する。円盤が冷却すれば再凝縮が起こりうる。水素とヘリウムは他の気体とは違って凝縮しない。水はおそらく太陽系の内側では濃集しなかつただろう。濃集が進むにつれてガスとダストサイズのデブリの円盤ができる。このデブリからやがて惑星を形成される。

太陽星雲の気体成分は現在は存在しないため、これらを除くような過程が起こったはずである。このような除去過程が「T タウリ星」という型若い星のまわりで起こっていることが知られている（最初に見つかった例にちなんで名付けられた）。星の表面から流れてくるガスは、太陽風に質は似ているがもっと大量である。このガスの流れは惑星形成後に取り残されたガスとダストを引きずり、取り除くことができる。現在木星と土星に水素とヘリウムが太陽系元素存在度に近い量存在することは、これらがガスがまだ残っていて取り込めるような初期に形成されたことを意味する。天王星と海王星の大気に H と He が乏しいことは、これらのガスの多くが惑星形成の前に太陽系からなくなっていたことを示唆する。

このような原始惑星系円盤が実際に若い星のまわりに形成するという証拠は何かあるのだろうか？ こういった円盤が存在するという間接的な証拠は、1980 年代初めに地球をまわる赤外天文衛星 (IRAS) からの観測によって得られた。熱エネルギーに対応する波長で赤外放射の過剰な星が多数観測されている（図 14.2）。この放射が起こる波長から、放射している物体の温度は約 100 - 400 K 推定された。この放射は若い星の周りの粒子の大きな集合からのものだと考えられる。惑星そのものは観測されるほどの放射をおこなうには小さいが、同質量のものを大きな円盤にダスト粒子として分配すれば加納である。円盤の温度は 100 A.U. サイズまで上昇する；これらの円盤は大きさでは太陽系や太陽系ができた星雲に匹敵する。

[図 14.2]

ベータ・ピクトリス (β Pic) と GM Aurige (GM Aur) からのフラックスの観測結果。どちらも 10 マイクロメートル未満の波長は星からの放射に対応する

黒体放射の値によく合う。より長い波長では星のまわりのダスト円盤からの熱放射に対応する「赤外過剰」が見られる。この放射量から平均的な円盤の温度は 100 K 付近であろう。これは太陽系を形成する円盤サイズに匹敵する。

少数の星で、円盤の存在を示す直接の証拠が望遠鏡の像から得られている。星から射出された光が遮蔽され、カメラを隠さなければ、周囲の円盤で反射した光が見える。考えればわかるように、星そのものは円盤よりもかなり明るいいため、これは難しい観測である。少数の円盤と太陽に近い数個の星についてのみ写真がとられている。もっともよくとれた円盤はベータ・ピクトリスという星であり、円盤の構造の細部も一部見えている (図 1.8 を見よ)。円盤で反射された光は見えないが、背後の明るいガス雲に対して影を作っているのが見える (図 14.3)。

[図 14.3]

二つの原始惑星系円盤の HST 画像。どちらも円盤は暗く写っている。これは近辺のガス雲に反射された光を吸収するためである。円盤は縁側から見たため長く伸びて見える。各円盤は直径 100 A.U. ほどであり、太陽系の大きさと大体同じである。(a) HST 16. (b) HST SW; ガス雲が恒星風によって吹き飛ばされているのが見て取れることに注意。(J.Bally と D.Devine の好意による NASA の画像)

天文学的な証拠によれば、この銀河の若い星の四分の一から二分の一は周囲にダスト円盤を持っている。これは、ダストが集積して惑星を形成しうることを考えると、惑星はたくさんあるかもしれないということを意味する。

惑星集積

惑星は原始星のまわりのガス・ダストの円盤からどのように形成されるのだろうか。ここで述べる過程はこの太陽系で起きているものだが、他の若い星のまわりの原始惑星系円盤でも起こりうる典型的なものだと考えられている。この過程では、ダストが集積して 1 - 10 km サイズの微惑星という物体になり、やがてこれらの微惑星の重力集積によって最終的なサイズの惑星になる。外側の惑星はこの集積過程のはじめには岩石コアの状態だが、ガスの消失前に原始太陽系星雲からガスを集積することも可能である。

まず、地球型惑星が存在することになる太陽系の内側での過程について議論しよう。

冷却しつつある原始惑星系円盤ではダスト粒子は互いに重力で引き合って存在するにはは小さすぎる。そうではなく、ダスト粒子は静電気力が衝突時の「接触溶接」によってくっつくだろう。原始太陽のまわりのガスとダストの乱流運動は粒子同士が衝突して成長させる効果を強める。

地球型惑星を形成することになる物質が、初期には太陽系の現在内惑星がある領域を占めるダストの円盤に散らばっていたことを考えよう。現在の惑星の質量を用いると、円盤の密度は約 10 g/cm^2 である。これは空間密度であり、円盤の赤道面の 1 立方センチメートルごとに上下合わせて 10 グラムのダストが載っていることになる。このダストは全部が厳密に円盤面上にあるわけではないが、円盤上下の有限の体積を占めるはずである。このようにダストが大量になると、衝突が頻繁になり、 10^5 年で 1 - 10 km サイズの微惑星を集積しうる。この時期が終わる頃にはほとんどのダストが太陽を回る微惑星に取り込まれたはずである。

いったん 1 - 10 km サイズになると、微惑星は付近のものを重力で引きつけるようになる。すると、それぞれの微惑星が付近の微惑星を引きつけられるようになるため、衝突頻度が増す。以上に述べたキロメートルサイズの物体の衝突により、微惑星は成長し続ける。

微惑星が重力でお互いに引き合うようになってしまえば、より大きな天体への集積は速やかに起こる。成長の様子は太陽系の内側にガスが大量に残っているかどうか（ガスは固体粒子を減速させ、衝突速度を抑える効果があるため）や、巨大衝突が微惑星の破壊に至るかどうかによる。もっとも考えられる結果は、最も大きな天体が最も早く成長するというものである。これは、より多くの微惑星を重力的に引きつけるためである。その結果、「暴走」集積という現象が起こり、太陽系領域で、最大の天体がほとんどの質量をもつことになる（そして他の天体からかけはなれたサイズや質量を持つ）。最大の原始惑星によってもっと小型の多数の天体が集積されると、軌道の特性は平均化されて円に近い軌道を取り、付近の物体をすべて集める。

約 10^6 年にわたる暴走集積段階が終わるときには、太陽系の内側の質量は月から火星程度（地球質量の 1 ~ 10 %）の天体に集中する。これらの天体は約 0.02 A.U. の間隔をおい

て円軌道にある。太陽系の内側には何百もの「惑星の芽 (原始惑星)」があったと思われる。

原始惑星が月サイズ以上になるとこれらはお互いの軌道に重力摂動を及ぼすまでになる。すぐに軌道が楕円になり、近接する天体同士の軌道が交わるようになる。こうなると、天体同士の衝突が起こりうる。これらが衝突することで惑星の最後の成長が起こり、残ったデブリのほとんどが太陽系から除かれる (はき集められる)。また、天体同士が衝突せずに近接した場合、より離心率の大きな軌道へ変化する。軌道の離心率は高くなることもあり、太陽系内側で形成された物体間で相当量の混合が起こりうる。つまり、各惑星は太陽系の各領域の惑星の素だけからできるのではない。各惑星ごとに分離された「成長領域」のようなものがあるわけではない。そうではなく、水星軌道から火星軌道にわたる原始惑星と小惑星が各惑星に配分されるのであろう。完全に混ざりきるわけではなく、各集積領域の原始惑星にはわずかな特性が残るだろう。

惑星集積の最終段階は原始惑星がそれ以上掃き集められなくなって初めて完了する。この過程の数値計算シミュレーションでは所要時間は $10^7 - 10^8$ 年程度である。特に興味深いことは、多くのシミュレーションがそれぞれ三つか四つの惑星を太陽系の内側に形成するだろうという結果を示したことである。各シミュレーションではだいたい、地球程度の質量の惑星を一つ、もう少し小さい金星のようなものを一つ、そしてさらに小さな惑星を一つか二つ現れている。こういったシミュレーションから、「金星」は地球軌道の内側にも外側にも形成されうること、「水星」と「火星」は形成されるかもしれないしされないかもしれないということが示された。これらのシミュレーション結果は我々の太陽系と似ており、系外において典型的なものであることを示唆する (図 14.4)。

[図 14.4]

原始惑星系円盤における惑星形成シミュレーションの結果。上の二つは一つのシミュレーションを異なる初期条件をランダムに与えて行った結果にできた惑星を示す。下の図は太陽系の内側の惑星を示す。(Wetherill, 1996.)

最も重い惑星が現れそうな場所は、太陽から 1 A.U. (地球の位置) のあたりとわかった (図 14.5)。ここでも、我々の太陽系は予想したようなものの典型であるように見える。実際、他の恒星のまわりでの円盤から惑星形成シミュレーションの結果、そこでできるものは太陽系とよく似たものになる。地球のような惑星は自然な帰結か恒星形成の副産物であるように見え、銀河中に広く存在するはずである。

[図 14.5]

太陽に似た恒星系での原始惑星系円盤における惑星形成シミュレーションの結果。33 の異なるシミュレーション (初期値を変えた) 結果を同時にプロットし、惑星の形成されうる位置とその惑星の質量がどのような傾向を持つかを表した。各惑星の最終質量と中心星からの距離を示した; 参考のため地球, 金星, 火

星の質量を示してある。これらのシミュレーションでは木星による影響は考慮されていない。(Wetherill, 1991.)

太陽系の小惑星帯についてはどうだろうか？ 計算シミュレーションによれば、太陽系のこの領域にある微惑星と原始惑星の軌道に木星が摂動を及ぼす。これらの物体のなかには太陽系の内側へと飛ばされるものもあるだろうし、原始惑星に取り込まれるものもあるだろうし、太陽系から放出されてしまうものもあるだろう。木星による摂動は現在でも続いており、小惑星の軌道離心率を大きくし、より速い速度をもつ小惑星同士の衝突を引き起こすだろう。こういった衝突により、小惑星は破壊され、大きい天体へと集積するのを妨げられる。小惑星は単一の惑星には集積できず、多数の小天体として残るようだ。もし木星が存在しなければ、小惑星帯のデブリは集積してさらに岩石惑星を形成しただろう。

月サイズ、火星サイズの原始惑星から惑星への最終降着の結果で興味深いのは、この期間に巨大衝突が起こる必要があるということである。惑星サイズの天体の大規模衝突によって最終的な惑星ができる。面白いことに、巨大衝突説は降着理論が発展する前に出ていた。1980年代に月の起源を最もうまく説明するのは火星サイズの天体の成長中の地球への衝突だと認識された。月は衝突によって地球のまわりに放出されたデブリの集積によって形成されただろうというわけである。この筋書きは月の軌道や他の特性とともに組成を最もうまく説明することができる。さらに、巨大衝突は水星でも起こったという仮説がある。惑星の核がマントルから分離した後で巨大衝突が起こったとすれば、ケイ酸塩マントルが大量に宇宙へ放出されたと考えられる。そうすれば、水星が比較的高い平均密度を持つことを説明できるだろう。この場合、デブリは衛星とならずに宇宙に失われたはずである。

ここで問題になるのは、なぜ地球には衛星があるが金星にはないのかということである。どちらの惑星も似たような降着過程や巨大衝突を経ているのに一方の場合のみ放出物が衛星を作るのである。今のところその答えは出ていないが、すべての衝突やすべての惑星が同じようにふるまわなければいけないという制約はない。

このような、衝突による集積シナリオは月の地質学的な記録にみられるものとも調和的である。大きなサイズの原始惑星が掃き集められ、各惑星が固体表面に歴史を刻み始められるようになる頃には、太陽系の大きなデブリのほとんどは惑星のどれかに集積していただろう。小さいデブリのみが最後の過程で取り残される。もちろん、さしわたし数百キロメートルの天体を含むデブリは、例えば月に見られるような衝突盆地を作りうる。この衝突盆地は非常に大きく古いものである (図 14.6)。これらの物質も徐々に掃き集められる。今日でも地球に衝突するデブリがまだ存在する (2 章を参照)。これらの多くは小惑星帯起源であり、摂動によって最近地球軌道を横切るようになったものである。

[図 14.6]

ルナ・オービターによる東の海ベースンのモザイク。外側のリングは直径約 900 km である。横向きの縞はモザイクを作るときに入った人工的なものである。

太陽系外部の巨大ガス惑星の形成を理解するにはここまでの集積過程に修正が必要である。外惑星は岩石物質に加えて原始太陽系星雲からガスを集積したはずである。前に述べたように、木星と土星は大気中の元素の多くが太陽と同じ存在度を持つ。したがって、これらはガスを大量に集めなければならない。一方で海王星と天王星は太陽にくらべて水素とヘリウムがかなり少なく、原始太陽系星雲から取り込んだガスはもっと少なかっただろう。木星と土星で問題になるのは原始太陽系星雲ガスを重力的に引き寄せるには成長中の原始惑星は地球質量の 10 倍から 20 倍にならなくてはいけないことである。したがって、木星と土星の形成は内側の惑星と同じように岩石のコアの形成から始まる。この過程で、ガスの捕獲が始まる地球質量の 10 - 20 倍の原始惑星が形成される。

我々の銀河系にある「T タウリ型」の若い星からのガス流出の観測によれば、若い星を取り巻くガス雲は星形成から 1000 万年以内になくなる。ただし時期はよくわかっていない。木星や土星の岩石コアはこれよりも短い時間で形成されたはずであり、まだ原始太陽系星雲のガスが残っていて惑星に集積された。天王星と海王星はさらに太陽系の外部にあり、ガス集積に必要な質量の岩石コアを作るのにかかる時間が長かったと考えられる。その結果、太陽が残ったガスを失う T タウリ期までにあまりガスを捕獲できなかったのだろう。

外側の惑星の内部構造のモデルは、四惑星とも中心に地球質量の 10 - 20 倍の高密度コアを持つことを示している。これはガスを集積するのに岩石コアが必要とするサイズと同じである。この一致はおそらく偶然ではないだろう。木星の質量が地球質量の 318 倍であることは、木星は主に岩石コアに集積したガスからなることを意味する。土星の質量は地球質量の 95 倍であり、これも主に原始太陽系星雲のガスからなる。一方、天王星と海王星はそれぞれ地球の 14.5 倍、17.1 倍の質量を持っており、岩石コアの上に原始太陽系星雲のガスをわずかにまとったものだと考えられる (図 14.7)。

[図 14.7]

木星、土星、天王星、海王星の内部構造。惑星のサイズを地球と比較して示した。

各惑星とも岩石コアを持ち、水素とヘリウムに富む物質に覆われている。天王星と海王星の表層は太陽や H や He が現在でも大気主成分である木星、土星の大気に比べて水素とヘリウムに乏しい。

最後に、 10^4 A.U. 付近にある彗星のオールトの雲を考える。彗星は太陽から非常に遠い距離にあるため、原始太陽系星雲の密度が低く、公転速度が遅くダストやデブリが遭遇するのに時間がかかるため、形成が難しいはずである。彗星はもっと太陽に近い場所で形成されたものが太陽系外縁に放出されたのだろう。現在では、彗星は現在の天王星・海王星軌道付近で氷に富む微惑星として形成されたと考えられている。天王星や海王星が形成されると、近づいた微惑星の軌道に摂動を及ぼす。太陽系から完全に出て行ってしまうものもあれば太陽系内部へ飛ばされるものもあるが、おおくは 1000 A.U. を超える軌道に飛ばされる。そこでは銀河潮汐や近傍の分子雲が軌道に摂動を及ぼす。摂動による加速はその軌道での公転速度と同じくらいであり、軌道を効果的にかき混ぜる。その結果、現在では彗星の雲はランダムに見られるのみである。その後さらに摂動が加わった場合にはいくつかの天体は太陽系の内側へ戻り、彗星として観測される。

一方カイパーベルトは、天王星や海王星の軌道より外側で形成された天体からなる。したがって、ダストや氷は現在でも微惑星のような天体を形成しうる。ただし、速度が遅く、天体同士が遭遇するのにかかる時間も長いため、惑星サイズにはならない。付近に軌道を乱す惑星がないため、これらの天体は原始太陽系星雲の遺物として留まる。これまでに 30 個ほどのカイパーベルト天体が発見されており、これらは多くの氷微惑星のうちの最も大きい部類に属すると考えられている。100 km 以上のサイズの天体はおそらく 70000 個ほど存在すると見積もられている。冥王星はこういった天体のうち大きなサイズを持つものの一つに過ぎないのだろう。また、海王星の衛星のトリトンは海王星軌道で集積したのではなくカイパーベルト天体が捕獲されたものだろう。

太陽系には多くの規則性があること、これらの規則性の多くは惑星形成過程に基づくものであることがわかる。岩石惑星、巨大ガス惑星、彗星はどれも分子雲コアの崩壊と進化の一部であるようだ。

まとめ

地球のような惑星は銀河の中で一般的だろうか？ 次の章で議論するように、他の星のまわりにも惑星が見つかり始めた。しかし、新しく発見された惑星の多くは木星よりも質量の大きいものである。まだ地球サイズの惑星は発見できない。ではどうすれば太陽系での基礎に基づいて系外惑星の存在を理解できるだろうか？ これまで、太陽系が太陽を形成する分子雲コアの崩壊からどのように形成されたかという理論を展開してきた。この理論は複雑そうだが非常に単純で美しいものである。この理論は直観的にわかりやすい物理過程にそのままなっている。理論の細部には議論が残るが、大筋としては見解の一致が得られている。

この理論は太陽系に見られる様々な天体を説明することができる。観測でわかった太陽系の特徴とつじつまが合っているし、系外、特に観測できる若い星の相当数がまわりに円盤を持っていることとも調和的である。こういった円盤は原始惑星系円盤ややがて惑星となる原始惑星系星雲だと考えられている。観測された円盤のいくつかでは星の近くでデブリがなくなっており、観測はされていないが惑星がすでに形成されているということを示唆している。

観測可能な若い星の 4 分の 1 から 2 分の 1 は周囲に円盤を持っている。これらの円盤が本当に惑星系へと進化するとすれば、惑星は広く存在していることが期待される。さらに、計算シミュレーションでわかったような集積過程の物理によれば、太陽系の岩石惑星によく似た惑星があることは自然である。そして、円盤降着の自然な結果として、中心星から、岩石惑星の太陽からの距離と同じような距離に位置するだろう。言い換えれば、地球のような惑星は銀河中に広く存在しているはずである。次の二つの章では系外惑星の観測的証拠とその居住性 (液体の水と生命を維持する性質) に着目する。