

7. 太 陽 系 の 起 源

東大・教養・物理 小 野 周

太陽系の起源の問題は、太陽という恒星の進化に関係づけて考えると一つの不可逆現象である。これについては今日に至るまで明らかにされていない点が多い。これを物性物理学の問題とみると、気体と固体微粒子の系がどのように成長していくかという、特に固体とガスとの相互作用が一つの問題になる。

1. 太 陽 系

ここで、その起源に関連して考えている現在の太陽系を構成している要素を簡単に説明しよう。

A. 太 陽：恒星であり、全太陽系質量の 99.9% を占めている。

B. 惑星系：惑星およびそのまわりを回転している衛星で構成されている系（衛星を持たないものもある）。太陽系の角運動量の 98% はこれらの惑星系がもっている。惑星は次の 2 種に大別される（第 1 表参照）

第 1 表 惑 星 の 定 数 表

惑 星	平均軌道半径 [A U]	公 転 周 期 [年]	質 量 [地球質量]	平均密度 [g/cm^3]	衛星の数
水 星	0.387	0.241	0.055	5.5	0
金 星	0.723	0.615	0.815	5.10	0
地 球	1.000	1.000	1.000	5.52	1
火 星	1.524	1.881	0.108	4.0	2
木 星	5.20	11.86	317.904	1.33	12
土 星	9.53	29.40	95.09	0.68	9
天 王 星	19.27	84.62	14.559	1.7	5
海 王 星	30.11	165.25	17.239	2.3	2
冥 王 星	39.73	250.44	0.9	50.?	0

$$1 \text{ A U} = 1.50 \times 10^{13} \text{ cm}$$

- a. 地球型： 密度が4～5の程度で、水星、金星、地球、火星はこれに属している。
- b. 木星型： 密度が1～2の程度で、木星、土星、天王星、海王星がこれに属している。一般に地球型に比べて大きく、また、太陽からの距離が5 AU（天文単位： $1.50 \times 10^{13} \text{ cm}$ ）
- C. 小惑星： 惑星に比べて著しく小さく、大きいものでも月より小さく太陽から2.8 AUの付近にある。
- D. 彗星： 固体で構成された核と気体でできた天体で、気体のひろがりは大いが、天体としての質量は小さい。核の構造は明らかでない。
- E. 隕石： 大きさがメートルの程度ものがあり、鉄隕石と石質隕石に区別される。石質隕石にはコンドライトとエイコンドライトがあり、コンドライトの元素組成比は cosmic abundance（宇宙における元素存在比）に近い。
- F. 宇宙塵： ミクロン・サイズ以下のものに至るまで、の微粒子である。

現在の太陽系は上のような構成要素を持っているが、原始太陽系星雲からの進化の過程において、このような構成を持つ太陽がどのようにして生じたかということが、太陽系の起源の問題である。

2. 太陽系星雲の進化

太陽はいわゆる主系列の恒星で、その進化については、多くの研究の結果第2表にあるような進化の過程をとることが明らかにされている。角運動量がある場合については、このような詳しい理論

的研究はないが、こ

こでは一応角運動量のない場合の進化をもとに考える。

太陽系星雲の進化は星間ガスの収縮からはじまる。この収

第2表 太陽系星雲の進化

（Kは温度の単位ケルビン）

星 間 ガ ス	10^{-24} g/cm^3	100 K
原 始 星	$< 10^{-13} \text{ g/cm}^3$	$\sim 15 \text{ K}$
重 力 収 縮	$< 10^{-2} \text{ g/cm}^3$	10^5 K （中心） flare up
水 素 燃 焼	現在の太陽	
ヘリウム燃 焼	このあと鉄核を形成し光度が減る	

縮は、重力によるもので、ポテンシャル・エネルギーが熱に変るため、温度が上昇するが、

一方では、太陽系星雲の中の grain が、輻射をするためにエネルギーが失われる。このようにして、星間ガスから出発した太陽系星雲の密度は 10^{-24} g/cm^3 から 10^{-13} g/cm^3 になり、その温度は 15 K の程度である。これが原始星の状態であるが、これがさらに重力によって収縮をすると、中心の近くにおける圧力の増加は非常に大きくなるため、衝撃波が中心で発生し、それが表面に達し、表面で対流がはじまる。林忠四郎氏などの計算によると、原始星は収縮しはじめてから、次第に不透明になり、100 年間程度は光度は減少するか、急に flare up して 10 日間程度で現在の太陽光度の 2000 倍程度の光度になり、その後は次第に光度を減少し、10 年程度で、重力平衡の状態になり、 10^7 年程度さらに光度を減少させながら収縮し、中心温度が上昇して水素（原子核）燃焼がはじまる。水素燃焼がはじまると、エネルギーは重力でなく核反応によるために、半径も光度もあまり変化せず、この状態から現在の状態まであまり大きな変化はないと考えられている。また、flare up の時期には太陽の直径は現在の 100 倍程度である。

flare up については、FU Ori について観測があり、温度は低いが光度の大きい赤外線星の観測もあって、太陽の進化の初期にこのような時期があったことは太陽系の起源を考える上では非常に重要なことである。また赤外線星が観測されていることから、このような時期において、太陽大気には多くの grain が存在していたものと考えられる。

問題になるのは、このような grain から惑星、隕石等が生成した時期と太陽の flare up とそれにつづく高光度の時期との関係である。

3. 地球の年令と隕石

地球が生成してから何年経っているかということがもう一つの問題である。地球の最初の状態がどうであったかということがはっきりしたい以上、形成後何年ということも明らかでないが、現在の固体の層状構造（マントル、核といった）を持つ状態になってから 4.5×10^9 年であるというのが、種々の根拠からいえる。これは、鉛の同位元素の質量比から測定されたものである。これに関して特に重要なことは、隕石が形成された時期も同様な方法によると 4.5×10^9 年になることである。またアポロ宇宙船で運ばれた月の石についても最も古いものは同じ年代である。地球についての誤差の範囲は $\pm 0.2 \times 10^9$ 年、隕石についての誤差は 0.1×10^9 年である。ところで隕石ができる以前の歴史についていえば、隕石の中にある Xe^{129} から、隕石が形成されたときには I^{129} が存在してい

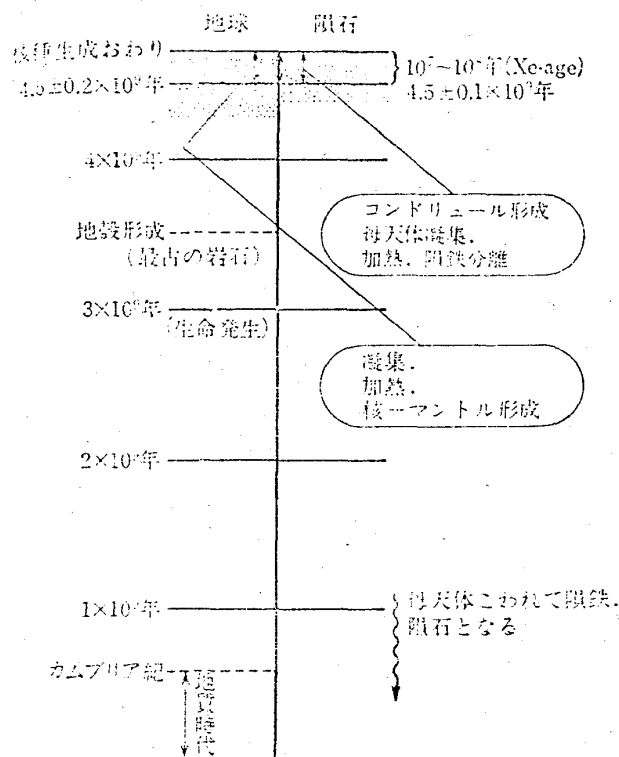
て、これが Xe^{129} になったということがわかる。 I^{129} は天然には存在していない同位元素で、その半減期 1.6×10^7 年で、これらの隕石が形成されたとき、 I^{129} が閉じこめられていたとすると、隕石の生成は太陽系星雲場所における元素（核種）の生成がおこなわれてから長くて 2×10^7 年程度の後形成されたものであることがわかる。地球のマントルが形成されたのは隕石と同じ時期という可能性もあるが誤差を考えても元素の生成から長くて 2×10^8 年程度の時間しか経過していないはずである。

地球上で発見された岩石の中で最も古いものは、 3.5×10^9 年であるから、地殻の形成も 3.5×10^9 年以前であることがわかる。しかし、地球が形成されたときから地殻の形成までの期間については明らかでない。これらの時期の関係を第 1 図に示す。

また隕石や隕鉄は、はじめから現在の大きさのものではなく、ある大きさの母天体がこわれて隕石や隕鉄になったということもかなりの確実性を持っている。隕石の表面の放射線損傷から、このような母天体が破壊して今のような隕石になってから 10^9 年程度の時間が経っているものとみられる。隕石の中に、隕鉄とい

う鉄に富むものがあるが、この組成は元素の cosmic abundance と異っているので、母体は現在の地球のような層構造を持っていて、その中心に鉄を多く持つ核が形成されていて、破壊したときに、中心の部分が隕鉄に周囲の部分がエイコンドライトになったという可能性もある。

一方ここで大きな問題になるのは、このような惑星や隕石の母天体あるいは惑星が最初に形成された時期と、太陽の進化における flare up の時期といずれが先で、いずれが後かということである。コンドライト特にカーボネシアス・コンドライトは、



第 1 図

不揮発性の物質が grain から成長したものとみられるが、コンドライトは、顕微鏡でみるとコンドリュールという球に 1mm 程度の微粒子で構成されている。このような形のものは一見液体になってできたかと思えば、このことが太陽の flare up (林フェイズ) と関係があるというみかたもできる。

4. 固体粒子の生成

太陽系星雲の進化の最初の段階から固体粒子 (grain) が存在していたと考えられる。しかし、このような固体の粒子が $10^{-24} \sim 10^{-13} \text{ g/cm}^3$ という密度の気体の中で、しかもその大部分が水素であるという気体から直接凝縮生成したとは考え難い。 $10^7 \sim 10^8$ 年では気体の中の原子が集って grain して成長することは到底不可能なことであろう。このような grain が宇宙空間に存在していることについては明らかな説明はできないが、もともと宇宙空間のガスの密度が一様でないこと、また生成の時期には高温・高密度であることを考えると特殊な条件の時期・空間でできたものがそのまま残っていると考えるべきであろう。

このような小さな grain がミリメートルサイズのもの、またはセンチメートル程度のものに成長することについてもそう簡単ではない。通常平均自由行路による衝突では、 10^8 年という期間で成長することは期待できない。太陽系における grain の成長については、原始太陽系では、固体粒子と気体が共存していることが最も本質的な点である。その第一の点は、このような粒子が、太陽のまわりの空間を無秩序にそれぞれケプラーの法則に従って運動していたのでは衝突の機会が少なく、粒子の衝突によって、これが直径数 m 程度の微小惑星 (プラネテシマル) に成長するのにはあまりにも時間がかかり過ぎる。したがって、このような粒子が、ケプラー運動だけでなく、ガスの乱流によって運ばれ、これによって成長したものと考えることが必要になる。この場合乱流速度はケプラー運動の速度と同程度以上でなければならない。もう一つの点は、たとえいくつかの粒子が近づいても、衝突して一つの物体に成長する機会はかならずしも多くないが、これらの粒子相互に万有引力を作用させながら、しかも真空中でなく気体の中を抵抗を受けながら運動しているときには、これがブレーキになって粒子が成長する可能性はさらに増すことである。もちろん、太陽系全体について平均した気体密度ではこのブレーキの作用はあまり大きくないが、粒子とガスとが、ある程度局部的に集ってクラスターをつくるとこういう作用は

実際に強くきいてくると考えられる。いいかえると、太陽系における惑星などの生成については、気体と粒子の共存が本質的な役割をするわけである。

5. 地球型惑星の形成

ミクロンサイズの固体粒子と気体の集団からどのようにして地球のような固体ができたかということは非常に難しい問題がある。簡単に気体の抵抗を受けて運動した結果、固体粒子が中心に集ったと考えたと次の二つの難点が出てくる。まず中心に集った固体のまわりに非常に多量の気体が残され、その気体は熱に対して不透明であるので、失われた重力のポテンシャル・エネルギーのための熱が保存され、今から45億年前にすでにマントルが形成されるといった地球の歴史と矛盾する。一方地球を構成している元素は cosmic abundance とはかなり外れており、軽い元素が少ない。もともとの固体微粒子も重い元素だけでなく、氷片のようなものもあったはずであるが、現在の地球内部の組成では、こういうものは、形成の過程でかなり失われているとみられる。

このように地球型惑星の形成については、地球の元素（核種）の組成、気体がどうなったか、現在の層状構造がどうしてできたかという問題があるが、最後の問題は、地球の形成後の進化に関係してくる。最初の二つは、地球形成の初期、すなわち太陽系の起源に直接つながる問題である。ここで、太陽の進化については、水素（原子核）の燃焼が始まって以来、その光度はほぼ一定で、地球が受ける単位面積あたりのエネルギーは現在とあまり変化していない。そうすると、太陽の flare up とそれに続く 10^7 年程度の光度の大きい時期（林フェイズ）に、初期の地球が形成されたという考えも出てくる。仮に太陽の光度が現在の300倍になったとすると、地球の表面温度は1500Kに近くなり、火星の場合でも1000Kになる。200倍以上の光度は、 10^6 年の程度より長く続いたと考えられるので、火星までの原始惑星では凝縮をおこしながらガスや軽元素は飛ばされたというのが一つの考え方である。なお木星の位置では、太陽の光度が現在の500倍であっても700K程度にしか温度は上らない。

なお地球の現在の大気のうち、酸素は、植物による同化作用の結果蓄積されたものであるが、その他のもの、特に不活性のものは、地球が生成されて以後内部から出たもので、原始大気とは別のものとされている。その原点がどこにあるかということも一つの問題である。

上にのべたように、原始地球のガスは、太陽の flare up とそれに続く高い光度の時期に飛ばされたと考えられるが、原始地球がある程度かたまって、そのまわりに大気があると考え、太陽の flare up 程度では、ガスを飛ばすのに必要なエネルギーはまったく不十分で、このことから当時の地球は、ガスと固体粒子が、木星の10倍の半径のところにあつて分布していたと推定される。

6. 木星型惑星の形成

上にのべたように、太陽の flare up によつても木星の大気は吹飛ばされない、木星より遠くにある惑星は、cosmic abundances に近い組成を持ち、大気の原始大気があるまま残っているのではないかと考えられる。このように考えると、木星では気体と固体粒子の系がそのまま収縮したものということになる。収縮の過程で、失われたポテンシャル・エネルギーは、固体粒子から熱放射として惑星外部に放出されると考えてよいであろう。このことは、中心の温度が十分低く15 K まで下れば、中心の圧力によつては、中心に固体粒子を含んだ液体水素ができることは考えられる。このようにして、木星および土星は、不揮発性の固体粒子を含んだ固体または液体水素でできているとみることは不可能ではない。このことは木星や土星の密度が小さいこととも一致する。また、質量が大きいことも、地球の場合のように多量の水素が吹飛ばされずに減ったと考えれば自然である。固体の水素やヘリウムの微粒子が最初に出来てそれが集つたということは考えられない。それは、このような固体粒子ができて幅射との平衡のため温度は15 K 以下に下らないから、通常の圧力で固体の水素粒子や水素の液滴が宇宙に存在することはまづ不可能である。中心から液体または固体が成長して行く場合の問題は、凝縮によつて生ずる熱が、厚い原始大気の中を通過して外部にどのくらいの速さで放出されるかということである。このように形成の過程で、木星の原始大気がどの程度輻射に対して透明であつたかということはこの問題にとってきめ手になることである。

7. その他の問題

以上土星までの惑星の形成について主として問題になる点を簡単にのべたが、天王星以遠の惑星についてはあまりはっきりしないが、水素よりもヘリウムに富んでいるのではないかという見方もある。密度は多少大きい。

小野 周

また、火星と木星の間にある小惑星についてはくわしいことはわからないし、またその形成についてもはっきりした理論はない。冥王星は遠い所にあるが非常に不思議な天体である。

最後に太陽系の生成について今後非常に重要になるとと思われる彗星のことにふれておきたい。彗星は太陽系の非常に遠いところからきて太陽に近づいたときにたまたま見ることができる。したがって、われわれが観測するのは、これら彗星全体のきわめて一部のものである。彗星は、最初の太陽系星雲が1光年近い半径をもってほぼ球状になっていたときに取残されてかたまりになったものと考えてよいであろう。したがって、太陽系の初期から存在し、原始物質を代表するものとみてよいであろう。

彗星は太陽に近づくと、コマ(頭)、核と尾に分れることが多いが、観測によると核には固体があることが明らかにされている。核の大きさは1~100 km と推定されている。核については、“砂袋”のようなもの、またはまばらな微粒子とガスの混合物という考えもあるが、氷塊の集りであるという説が一番有力なようである。これは最初に原始惑星ができた段階で、微粒子が成長して固体になったが、十分遠いところでは、温度が低く、氷のような揮発性のものでできた塊もそのまま残ったと考えてよいわけである。したがって、彗星の核の中には、太陽系の生成当時から存在している不揮発性物質の grain もそのまま保存されているともみられ、この点でも彗星は太陽系生成の過程を明らかにする上では特に重要である。

多少古いが、科学37(1967)No.10の特集号を参照していただければ幸である。また、F. L. Whipple : Nobel Symposium No. 21 “From Plasma to Planet” 1972 に最近の研究が出ている。