

私と宇宙物理学 ―研究の動機、方法、輪郭―

林 忠四郎

私はこれまで、主として、宇宙物理学の研究を続けてまいりました。この機会に、過去を振り返りまして、私がどのようにして宇宙物理学を選択したか、どのような方法を用いて研究を遂行したか、また、どのような結果を収めることができたか、などについてお話ししたいと思います。私の研究の題目を大別しますと、宇宙初期の元素の起源、星の構造と進化、太陽系の起源の三つになります。これらの問題は、私を含めた多くの研究者によって解決されてきたものですが、その現状についてもお話ししたいと思います。

私は、1937年、17歳のときに旧制第三高等学校に入学しました。当時は、日中戦争の始まる前で出版の規制はなく、私は哲学や文学の書物を自由に読むことができました。哲学書の多くはまったく難解でしたが、デカルトの本とカントの一部の本はかなりよく理解できました。

デカルトは、その著書『方法序説』(1637年)において、数々の有益なことを書いています。例えば、学問を進めるためには次の4つの方法を用いるだけでよいと述べています。その1は、内容は理性的に明瞭、明晰であること。その2は、必要なだけ小さい部分に分割すること。その3は、最も単純で認識しやすいものから始めて、複雑なものへ進むこと。その4は見逃しがないように、一つ一つ数え上げて全体を見わたすこととあります。この方法論は、その後の私に大きな影響を与えました。

また、カントは1797年に、数学と自然科学の違いについて、次のように述べています。「物理学では、多くの原理は、経験的な検証を経てはじめて、普遍的なものとなることができる」。ところで、現在の自然科学の哲学の主流は、論理実証主義の哲学であると言われてますが、デカルトとカントはその先駆者でありました。この哲学によりますと、正確な論理の展開と、実験や観測による厳密な検証の両方を兼ね備えることが科学の満たすべき条件とあります。このことは、私が後に宇宙物理学を研究する際の指針となりました。

私は高校から大学へ進学するにあたって、志望学科の選択に頭を悩ませましたが、結局、物理学科を選ぶことにしました。当時、私が読んだいろいろな解

説書によりますと、量子力学の発展には目覚ましいものがありました。それで、科学のうちで、論理的かつ実証的な学問として最も先端的であると思われた物理学を選んだわけです。東京大学理学部物理学科に入学して、量子力学、一般相対論や統計力学などをもっぱら勉強しましたが、これらの科目は後の宇宙物理学研究に欠かせないものでありました。3回生になって、落合麒一郎先生の原子核・素粒子理論のゼミに所属し、当時の第一線級の論文を勉強することができました。また、論文輪講という科目がありまして、学生一人一人に最新の論文の紹介が割り当てられましたが、私にはどうしたことか、ガモフの天体核反応の論文が与えられ、それに引用されていたエディントンの『星の内部構造』の本を読みました。これは、私が後に宇宙物理学の研究を始める機縁の一つになりました。

大学卒業の後は、嘱託として落合先生の研究室に残ることになりましたが、すでに太平洋戦争が始まっていて、兵役につかねばなりませんでした。私は海軍技術士官として、3年の間主として横須賀の海軍工廠に勤務し、終戦になって大学へ戻りました。

東京大学の落合研究室で素粒子論の研究を始めてまもなく、居住していたアパートの部屋の明け渡しを要求されました。私は落合先生に相談して、実家が京都にあるので、できれば京都大学の湯川秀樹先生の研究室に移りたいという希望を申し出ました。この希望がかなえられて、1946年4月に京都に戻りましたが、もとより素粒子論の研究を続けるつもりでした。それが宇宙物理学の研究を始めることになったのは、次のような次第でありました。

湯川先生は、当時たまたま宇宙物理学教室の教授を兼任されておりました。また、湯川研究室の部屋は非常に手狭でもありました。湯川先生は私に、宇宙物理教室の部屋で、「天体の原子核反応」を研究してはどうかと奨められました。前に申しましたように、私は学生時代に読んだガモフの論文を通じて、なすべき研究の内容を多少なりとも理解できました。それで、素粒子と天体核現象の理論をともに研究することにしました。原子核理論、統計力学や一般相対論の基礎知識はありましたので、宇宙論や星の内部構造に関する教科書や論文を読むことによって、比較的簡単に、星のエネルギー源や元素の起源の研究を始めることができました。

私が最初にとりかかったのは、赤色巨星の構造とエネルギー源の研究でした。ついで、膨張宇宙の初期における陽子と中性子の存在比を計算しました。これ

らの結果については、後で申し上げます。1949年に、大阪府立浪速大学工学部物理学教室の助教授に就任してからは、宇宙物理を離れて、素粒子論の研究に専念しました。この成果が認められたのでしょうか、私は1954年に湯川研究室へ助教授として戻ることになりました。私は、非局所・非線形の場の理論の研究を続けましたが、当時の素粒子論は学問的に非常に難しい状況にありました。このとき、1955年に湯川先生が所長をされていた京大基礎物理学研究所では、「天体核現象」の研究会が2週間の長きにわたって開催されました。東京や仙台などから天文や物理の先生方が多数集まって、星の進化や元素の起源などの研究の現状と将来について、非常に活発な質問や討論が行われました。

この研究会が契機になって、私は天体核現象の研究を再開することになりました。まず、赤色巨星の問題を再検討するとともに、故早川幸男教授らと共同して、ヘリウムの核融合によって炭素や酸素の原子核が作られる核反応の研究を始めました。これは、ヘリウム燃焼段階の星の構造と進化を調べるために必要なことでありました。1957年には教授に就任して、京大物理教室に新しく天体核物理の研究室を作りました。以後、若いスタッフと大学院生と共同して、星の内部の元素合成と星の進化の研究を進めました。その際、ミクロな核反応の計算とマクロな星の構造の計算が、研究を進めるうえでの車の両輪となりました。その結果は後でお話しいたします。

以上のような星の進化の研究を15年ほど続けまして、1970年からは太陽系の起源の研究を始めました。その理由の一つは、最終段階に至る星の進化の特徴をほぼ把握することができたと思ったことです。もう一つは、太陽系の形成に大きい影響を与えた原始太陽の進化の様子がわかってきたことです。私は、1984年に定年退職するまで15年の間、研究室の若い人々と共同で太陽系の形成過程を追求して、キョウト・モデルと呼ばれる理論をつくり上げました。太陽系起源については、世界的に多くの理論が提出されていますが、われわれの理論の特徴は、ダストから惑星が形成されるときに、その周辺には大量のガスがまだ残っていたとする点にあります。この場合には、水星から冥王星に至るすべての惑星の形成を統一的に説明することができます。

以上、宇宙物理学における私の研究の履歴をお話しいたしました。次に、研究の主なテーマでありました宇宙初期の元素合成、星の構造と進化、太陽系の起源の3つについて、少し立ち入った説明をしたいと思います。

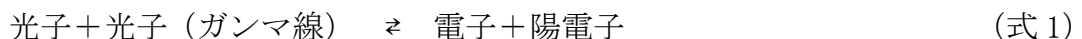
1929年に米国のハッブルは、遠方にある銀河がその距離に比例した速度を持

ってわれわれから遠ざかっているという法則を発見しました。この法則と熱力学の法則に従って、現在から過去にさかのぼって考えますと、さかのぼるほど宇宙の物質や輻射は圧縮されて、いくらでも高温の状態になります。10 億度の高温になると、原子核は陽子と中性子に分解し、さらに 50 億度になると、エネルギーを持った光子と光子の衝突によって、電子と陽電子の対が作られるようになります。

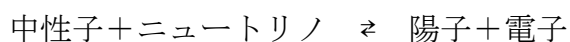
1948 年に米国のガモフは、宇宙はこのような非常な高温・高密度の状態から爆発的な膨張を始めたというビッグバン宇宙論を発表しました。彼はさらに、宇宙の始原物質は中性子だけであったという大胆な仮定を立てて、宇宙膨張による温度の降下とともに中性子がゆっくりと陽子に崩壊し、この陽子と中性子の核融合によって、現在の太陽や星を構成しているすべての元素が合成されたという理論を発表しました。

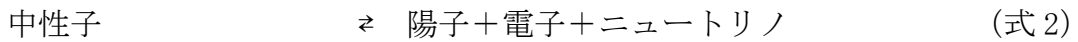
当時、私は元素の起源に興味を持っていろいろと調べていましたが、ガモフの論文を読んだとき、宇宙の初めに中性子だけが存在するというのはおかしいと思いました。なぜなら、非常な高温の状態では電子、陽電子、ニュートリノが大量に存在し、これを媒介として中性子と陽子の相互転換が活発に起こったはずであります。ところで、宇宙の温度が 10 億度近くまで下がりますと、それまでは自由であった陽子と中性子は結合するようになって、元素の合成が始まります。この元素合成の直前の陽子と中性子の数の比が、種々の元素の合成量を決めることになります。それで、私は素粒子論と統計力学の法則を使って、陽子と中性子の存在量の時間変化を計算しようと思い立ちました。

さて、ビッグバン宇宙論では、宇宙の膨張開始後の時刻と、輻射や物質の温度との関係は、マクロの法則である一般相対論によって与えられます。この温度は時刻の平方根に逆比例していて、例えば、時刻が 0.1 秒のときの温度は 100 億度程度です。このような高温の宇宙では、輻射としてはガンマ線が充満していて、次のような非常に速い反応、



によって、大量の電子対が作られています。他方、物質としては比較的少量の陽子・中性子と大量の電子・陽電子・ニュートリノが存在していて、ベータ崩壊の理論によると、次のような陽子と中性子の転換の反応が起こっています。





これらの反応は、高温では宇宙膨張より速く起こり、低温では膨張より遅くなります。

私は、宇宙の温度が急激に降下しているときに、この温度変化と競合して、式 2 の反応がどのように進行するかという、いわゆる非平衡の反応過程を計算して、次のような結果を得ました。300 億度の高温では、式 2 の各反応とその逆反応が宇宙膨張よりも速く起こるために、陽子と中性子はほぼ同数存在します。温度が下がると、式 2 の正反応が逆反応に勝ってきて、陽子の数は次第に中性子よりも多くなります。宇宙の膨張開始後 100 秒の時刻には、温度は 10 億度近くに下がって、陽子と中性子の結合によるヘリウム核の合成が始まります。このときの陽子と中性子の数の比は 4 : 1 程度になっています。これから作られるヘリウム核の数と残される陽子、つまり、水素核の数の比は 1 : 6 であることがわかります。この値は、太陽表面の観測値にほぼ一致しています。このように、私の計算は一応成功しました。

その 15 年後の 1965 年には、電波のマイクロ波の観測から現在の宇宙には絶対温度が 3 度の黒体放射が充満していることが発見されました。この放射は、宇宙初期の高温時にはガンマ線であったものが、宇宙膨張によって、その波長がマイクロ波まで大きく変化したものとして説明できます。この発見を契機に、先にお話ししたような元素合成の過程が多くの人によって詳しく計算されました。その結果、太陽表面などに観測されている、ヘリウムやごく少量の重水素、リチウム、ベリリウム、ホウ素などの軽い元素の存在量がこれでよく説明できることがわかりました。

以上のような、3 度の黒体放射の発見と軽い元素の合成は、ビッグバン宇宙論を実証する二つの重要な証拠となりました。ところで、次にお話しするように、星の内部の高温領域ではヘリウムや炭素以上の重い元素が合成されます。これらの元素は、やがて星から放出されて、周りの星間ガスと混合し、このガスから再び星が生まれます。太陽の化学組成は、重さにして水素が約 73%、ヘリウムが約 25%、炭素以上の重い元素が約 2%ですが、ホウ素以下の軽い元素は宇宙初期に、炭素以上の重い元素はすべて星の内部で作られたものです。

今世紀に入って、数多くの恒星の距離が測定されるようになり、その明るさ、すなわち、光度がわかってきました。また、星の表面から放出される放射のスペクトルの形から表面温度もわかってきました。1910 年頃、デンマークのヘル

ツスプルングと米国のラッセルは、多くの星の光度を縦軸に表面温度を横軸にプロットした、いわゆる HR 図を作りました。その結果、太陽をはじめとした大多数の星は主系列と呼ばれる一つの線上に並んでいて、比較的少数の星は半径が大きい黄色や赤色の巨星の分枝を作り、また、少数の星は半径が太陽の百分の一の程度の、いわゆる白色矮星の分枝を作っていることが発見されました。白色矮星は、その 1 立方センチあたりの重さが 1 トンもあるような非常に高密度の星です。以上のような HR 図は、これまで星の構造や進化の理論の検証に使われてきました。

星の構造の研究は、その中心から表面に至る温度や圧力の分布の様子を明らかにすることです。星の内部の各点で圧力と重力が釣り合っています。また、各点で温度の勾配に比例した熱の流れがあって、これが表面から外界に放出されたものが星の光度です。これらの温度と圧力の分布は、いわゆる非線形の微分方程式で記述されます。

さて、太陽の平均密度は地上の水と同じ程度です。1920 年以前は、太陽のような星がガスでできているか、液体でできているかは、はっきりしませんでした。1920 年頃になって、英国のエディントンは、当時の新しい量子論を使って、この問題を解決しました。すなわち、星の内部は非常に高温であるために、原子は原子核と電子に電離していて、物質は理想気体の状態に極めて近いこと、さらに熱の流れは輻射によって運ばれることを見出して、HR 図の主系列星の内部構造を明らかにしました。このエディントン理論によりますと、星の中心温度は星の質量に比例し、その半径に逆比例していて、太陽では 1 千万度程度です。この当時、星のエネルギー源の正体はまったく謎でしたが、これが星の中心にあるという仮定だけから、エディントンは星の構造を知ることができました。

このエネルギー源の謎は、1938 年頃になって、米国のベーテとドイツのワイツゼッカーによって解かれました。この二人は、ともに原子核理論の開拓者ですが、陽子と炭素や窒素の原子核との核反応の系列を調べて、結果的には 4 個の陽子が融合して 1 個のヘリウム核ができるという、いわゆる炭素・窒素の循環反応を見つけました。さらにベーテは、陽子と陽子の融合に始まって、同じく 4 個の陽子から 1 個のヘリウム核ができる、いわゆる陽子-陽子の連鎖反応を発見しました。温度が 2 千万度より高い場合は炭素・窒素の循環反応、低い場合は陽子-陽子の連鎖反応が速く起こります。ベーテは、これらの核融合反応に

よって放出されるエネルギーが星の光度に等しくなるような星の中心温度を求めました。主系列の星については、この温度はエディントン理論の値によく一致していて、ここにエネルギー源の謎は解決しました。

ところが、次のような謎が新しく発生しました。エディントン理論によると、太陽の百倍の半径を持つ赤色巨星の中心温度は太陽の百分の一ということになります。この赤色巨星は太陽の百倍以上のエネルギーを放出しているのです。私が最初、1946年に研究を始めたのは、この赤色巨星の謎を解くことでした。このためには、次にお話しするような星の進化の効果を考えねばなりません。

現在の太陽の中心では、非常にゆっくりと水素がヘリウムに変わっています。やがて中心の水素はすべてヘリウムに変わり、今から数十億年の後には、太陽の中心部にヘリウムからなるコア（芯）ができて、そのすぐ外側の薄い球殻状の領域で水素の核融合が進行するようになります。このような水素の燃焼にともなって、ヘリウム・コアの質量はゆっくりと増大します。コアの内部にはエネルギーの発生源がないので、その温度はあまり上がりませんが、重力的な収縮によって中心の密度は著しく増大し、例えば、1立方センチあたりの重さが10キログラム以上の密度になります。このような高密度のガスは、縮退した電子のガス、またはフェルミ・ガスと呼ばれています。

この縮退電子ガスについて少し説明いたします。今、低温度に保った状態で、ガスを圧縮していきますと、やがて原子どうしが接触するようになります。さらに圧縮を続けると、次のような量子力学的な効果がきいてきます。量子力学によりますと、電子の運動エネルギーは非連続的なとびとびの値を持ちます。さらに、電子はパウリの禁制原理に従って、二つ以上の電子が同一の状態を占めることはできません。このような効果によって、原子を作っている電子の運動エネルギーが増大し、電子は原子核の電気的な引力を振り切って、自由な状態になります。この自由電子のガスでは、圧縮すればするほど電子の運動エネルギーは増大し、従って、ガスの圧力は増大します。この圧力は、温度が0の状態でも値をもち、ガスの密度の $5/3$ 乗に比例します。このようなガスを縮退電子ガスといいます。白色矮星の強い重力はこの圧力によって支えられています。

さて、以上のような等温・高密度のヘリウム・コアと水素が豊富な外層からできていて、その境界の薄い殻状領域で水素が燃焼している星は、どのような

構造を持つかというのが、私の研究の主題でした。私は、先にお話ししたような微分方程式を数値的に積分して、圧力と温度の分布を求めました。初めは解がわかっていなかったので、星の中心温度や光度などについては種々の値を仮定して、星の外層領域では表面から内側に向かって積分し、コアでは中心から外側に向かって積分しました。そして、その境界では、圧力と温度が一致するとともに、光度に等しい核エネルギーが放出されているものを探するという方法で解を求めました。

核エネルギー源が中心にある太陽の場合と違って、殻状のエネルギー源を持つ星は、非常に凝縮したコアと希薄な外層からなる二重構造を持ちます。その境界であるエネルギー発生源の位置は、太陽半径のおよそ十分の一のところにあります。コアの密度は、中心の非常に大きい値から急な勾配をもって減少し、外層との境界の密度は、太陽の場合に比べてかなり小さくなります。つまり、外層は太陽よりもずっと希薄であって、これは星の半径が大きいことにほかなりません。

私は、1955年ごろから、上のようなヘリウム・コアの成長による星の進化の問題に取り組み、やがては研究室の若い人々と共同して、その後の進化を追跡しました。その結果を次に概観したいと思います。

まず、太陽の今後の進化についてお話しします。今から数十億年の後には、中心にできたヘリウム・コアの質量は全質量の20%にまで成長して、半径は現在の10倍程度まで増大します。さらに、コアの質量が40%近くになると、半径は100倍、光度は1,000倍程度の赤色超巨星になります。このとき、コアの温度は1億度近くまで上昇して、その中心では、ヘリウムの原子核が融合して炭素と酸素の原子核を作る反応が始まります。すなわち、星は中心と核状領域に二重のエネルギー源を持つようになって、半径は多少減少します。さらに、中心でのヘリウムの核融合が進むと、中心には炭素と酸素からなるコアが作られ、その外側にはヘリウムの中間層、さらに外側には水素の豊富な外層があるという三重構造が作られます。時間がたつとともに、炭素・酸素のコアの質量は成長しますが、太陽質量の星の場合、コアの中心温度の上昇には限界があって、炭素の原子核の核融合は起こりません。このような巨星は、その後ゆっくりと表面からガスを放出しながら、全体として冷却し、やがて核反応は停止します。最終的には、希薄な外層は剥ぎ取られて、高密度のコアが残りますが、これが白色矮星として観測されているものです。



以上は、太陽に近い質量をもった星の一生です。星の進化の様子は、それが生まれたときの質量によって大きく異なります。例えば、太陽の10倍程度の質量を持った星は次のような進化をします。炭素・酸素のコアができるまでは太陽の場合と同じですが、このコアの成長にともなって中心温度は上昇して、これが数億度になると炭素からマグネシウムを作る核反応が始まります。さらに少し高温では、酸素からケイ素を作る核反応が起こり、最後にはケイ素から鉄が作られて、多重構造ができ上がります。この鉄のコアの質量が太陽質量の程度まで成長しますと、その強い重力を縮退電子ガスの圧力では支えきれなくなって、コアは陥没して、超高密度の中性子星が作られます。他方、星の外層は爆発的に膨張し、その衝撃波は、1、2日のうちに星の表面に到達して、星は太陽の10億倍も明るくなります。これは、超新星として観測されている現象です。

ところで、私が1960年頃、赤色巨星の進化を研究していましたときに、星の表面温度の低いほうに限界があるのかどうかという疑問が生じました。これを解くために、星の表面条件、つまり表面近くの構造が星全体の構造にどのような影響を持つかという問題を詳しく調べてみました。その結果、次にお話しするように、HR図に限界線があることを見つけました。

さて、星の内部では中心から表面に向かって熱が流れていますが、この熱は輻射または対流によって運ばれています。輻射が運ぶとしたときの温度勾配がある限度以上に大きい場合は実際には対流が起こって、これが熱を運びます。地球大気の大気圏がその例です。赤色巨星では、その表面から内部のかなり深いところまで対流が起こっています。このような対流領域が星の中心まで広がって、星全体で対流が起こっているような構造は、星がとりうる限界の構造です。この限界の構造を持った星のHR図上の位置を求めましたところ、ほぼ鉛直に走る線が得られました。太陽質量の星の場合、この限界の表面温度は3,000～4,000度程度でありまして、これより低温の領域は、重力と圧力が釣り合った星が存在しない領域になっています。

以上の結果が得られたとき、私はこれを使って、水素の核融合が始まる以前の星、すなわち、主系列以前の星の進化が計算できることに気がつきました。このような原始的な星は、重力エネルギーを放出しながら、重力と圧力が釣り合った、非常にゆっくりした収縮をしているはずですが、さて、生まれたばかりの星は、比較的短時間のうちに、上の限界線上のどこかの点に落ち着きますが、このときの光度は太陽の10倍から100倍程度と思われれます。

この星は、上の限界線に沿ってゆっくりと収縮して、光度は次第に減少し、中心温度は上昇します。太陽質量の星の場合、約千万年の後には、星の光度は現在の太陽程度まで落ちますが、このとき中心近くでは、対流の代わりに、輻射で熱が運ばれるようになります。このとき、HR 図上の進化は鉛直方向から水平方向に向きを変えます。やがて、主系列に到達して、中心で水素の核融合が始まります。ところで、オリオン星雲やおうし（牡牛）座の星雲には、特異なスペクトルを持った、いわゆる、T タウリ星が数多く観測されていますが、これらの星は、以上のような進化の段階（ハヤシ・フェイズ）にあることが判明しました。

太陽系の起源は、多くの神話や宗教の経典に見られますように、古来人類の大きな関心事の一つでありました。1687 年にニュートンが力学と重力の法則を発見してから、その力学的な研究が始まり、哲学者のカントやラプラスは有名な星雲説を提唱しました。1755 年に、31 歳の若いカントは「自然の歴史と天体の理論」という題で、原始的な星雲から、その凝縮によって太陽と惑星が生まれる過程を論じました。これは当時の宇宙開闢論でありました。

以後、種々の説が数多く発表されてきましたが、1960 年代になって、太陽系起源の研究は、天文学だけでなく、広く物理学、化学、地球物理学、鉱物学などを含んだ総合科学の時代に入りました。そして、基礎的な知識が飛躍的に増大してきました。すなわち、T タウリ星のような原始星の観測とその進化の理論が進展するとともに、現在の太陽系を構成する惑星、衛星、彗星（ほうき星）、隕石などの構造や化学組成、さらには年代などが明らかになりました。例えば、太陽系を作る物質の化学組成は先にお話ししたように、重さにして、水素が約 73%、ヘリウムが 25%、残りの 2% が氷や岩石を作る元素であります。また、木星や土星の中心領域には、氷と岩石物質から成るコア（芯）があることがわかりました。

このような状況のもとに、ここ 20～30 年の間に、太陽系形成の理論的なモデルが数多く発表されてきました。私どもも 1970 年から約 15 年の間、研究を続けて、いわゆるキョウト・モデルを作り上げました。その概要を次にお話しします。

わが銀河の星間空間には、非常に希薄で低温の水素分子を主成分としたガス雲、いわゆる分子雲が数多く観測されています。これが星の誕生する場所です。典型的な分子雲は太陽の 1,000 倍程度の質量を持っています。その形

状は、球ではなくて、扁平なものが多く観測されています。分子雲は、自分自身の重力によって、ますます扁平になり、十分薄くなりますと、重力的に不安定になって、多数の薄い小円盤に分裂するものと考えられます。この小円盤の質量は太陽の程度、半径は現在の太陽系の1,000倍程度であります。

この小円盤の一つは、自分自身の重力で、その半径方向に大きく収縮し、約100万年の間に大部分のガスは原始太陽を形成します。残りの数パーセントのガスは、太陽の周りを回転しながら、ゆっくりと太陽に向かって収縮して、現在の太陽系程度の大きさのガス円盤を作ります。これを太陽系星雲と呼びます。

さて、キョウト・モデルはこの太陽系星雲のなかで惑星が生まれる過程を理論的に追求したものです。この過程はかなり複雑ですが、その基本的なものは次の4段階に大別されます。

まず第1の段階は、太陽系星雲中のガスとダスト（宇宙塵）が分離して、薄いダスト円盤が形成される過程であります。もとの分子雲は水素分子が主成分ですが、氷や岩石のもとになるミクロン大のダストを含んでいます。太陽系星雲の地球より太陽に近い領域では、温度が高いために氷は蒸発していますが、木星より遠い領域では、ダストには大量の氷が含まれています。ところで、これらのダストは、相互の衝突による付着、合体を繰り返して、最終的にはセンチメートル大に成長します。ガス中のこれらダストは、太陽の重力によって、太陽系星雲の中心面、すなわち、赤道面に向かって沈澱します。この結果、ガス円盤の中心面に、薄いダストの円盤が形成されることとなります。

続く第2の段階は、ダスト円盤の分裂による微小惑星の形成であります。ダストの沈澱が進行して、ダスト円盤の厚さが十分薄くなりますと、円盤は重力的に不安定になって、ほぼ1兆個という、極めて多数の小片に分裂します。この分裂片の半径はキロメートル、質量は彗星の程度でありまして、微小惑星、または微惑星と呼ばれています。これらの微惑星は、ガスを多く含んだ固体の状態にあります。

第3の段階は、微惑星の集積による固体惑星の形成です。多数の微惑星は、太陽の周りをケプラーの円運動をしながら、相互の衝突による付着、合体を繰り返して次第に成長します。水星、金星、地球、火星などのいわゆる地球型惑星や、木星と土星のコア（芯）はこのような微惑星の集積によって形成されました。地球の形成には約100万年、木星の固体のコアの形成には約1,000万年を要したものと推定されています。

次の第 4 の段階は、固体の惑星が周りのガスを取り込んで、木星や土星のような巨大惑星に成長する過程です。太陽系星雲中の木星や土星などが作られる領域には、もともと大量の氷が存在したために、固体惑星の質量は地球の 10 倍以上に成長することができます。このような大質量の固体惑星は、その強い重力で、周辺にある大量のガスを引き付けます。このガスが降り積もったものが木星と土星であります。ところが、地球型の小質量の惑星は、重力が弱いのでガスを引き付けることはできませんでした。

この後、太陽系星雲の残りのガスは一部が太陽に落下し、残りは遠方に逃げ去って、結局、太陽系から散逸してしまいます。最も遠方にある天王星と海王星は、ガスの散逸後に微惑星の集積によって作られたので、ガスを集めることができませんでした。

最後に、太陽系の将来についての予想を申し上げます。先にお話ししたように、星の進化の理論によると、今から約 50 億年後には、太陽の中心には炭素と酸素からなる高密度のコアができて、太陽は大きく膨張して赤色の超巨星になります。その表面は地球まで到達して、地球型惑星は太陽に呑み込まれますが、木星とその外側にある惑星は生き残ることになります。さらに、1,000 兆年の後には、ほかの星がたまたま太陽系に突入する可能性があります。この突入の確率は、1,000 兆年に 1 回の割合であると推定されます。この突入した星の重力に引かれて、残っていた惑星は太陽系から放出され、ここに太陽系の一生が終わるものと考えられます。

これをもって、話を終了させていただきます。ご静聴ありがとうございました。