

銀河初期の進化過程

佐場野 裕*

1. はじめに

最近の電波・赤外線・X線天文学の発展に伴い、光学的観測の時代にはうかがい知れなかった銀河の全体像を我々は眼前にしている。様々な、銀河の構造上の発見もさることながら、とりわけ、星間ガスから星が生まれるようすや、星とガスの相互作用の諸過程等の銀河の動的な姿が浮き彫りにされつつあることが大きな特徴であろう。このような新たな知見をふまえ、銀河の進化論も新たな展開が期待される時期にあるといえる。

ところで、銀河進化論で説明しようとするのは、大ざっぱに言えば、初期の膨張宇宙に生じた銀河の母体となるガス雲——原始銀河雲——が、その中で星を形成しながら全体として自己重力で収縮して、現在観測されるような個性豊かな銀河に至るまでの筋書きを解き明かすことである。10¹⁰年の時間の拡がり及びこの進化過程の中でも、初期の進化過程は変化も急激であり、又、銀河のおおよその性格を決定づけたと考えられるので特に重要である。ところが、銀河進化の中でも現在に近いところは、直接観測される銀河の現状から、ある程度推定され得るのだが、時代が昔にさかのぼればのぼる程、手がかりになる直接の資料が乏しくなる、丁度、地球の大古の環境の変化を、化石を手がかりに調べると同様に、銀河の昔の姿を、年令の古い星や球状星団を手がかりに調べることになる。本稿では、我々の銀河系について、それらの資料からうかがわれる銀河初期のようすを考えてみることにしよう。

2. 銀河初期の収縮期

よく知られているように、我々の太陽系が属している“現在”の銀河は、半径 15 kpc 厚さが約 1 kpc 程度の円盤層と、それをほぼ球状に包んでいるハローとよばれる部分からなっている。円盤層の部分には星他に星間ガスもかなり存在していて、そこから新しい星が生成されている。一方、ハロー部にはガスはほとんどなく、そこでの代表的な天体は年令の古い球状星団である。また、太陽近傍の星でも、太陽のような普通の星に対して、100~300 km/s という大きな相対速度をもつ高速度星は、銀河面から 10~30 kpc の高さまで跳び上がることができるので、これもハローの成員であると考えられて

いる。このような空間分布の特徴の他に、ハロー成分のもう一つの大事な特徴は、星の化学組成において、重元素量が円盤成分のものに比べてずっと少ないことである。ヘリウム以外の重元素は膨張宇宙の初期には合成されないことが知られているので、現在観測されている重元素は銀河形成後、星の進化の結果として合成され、銀河の中で時と共にその量を増してきたと考えられる。したがって、重元素量の少ない天体は銀河の初期に生まれた古い天体ということになる。そうすると銀河初期の進化のようすは大まかながら次のように描くことができる。——銀河の母体となったガス雲（以下では原始銀河雲とよぶことにする）は、少くとも現在のハロー程度の拡がりをもっていて、その中で星を形成しつつ内部の重元素量を増加させ、同時に銀河面に向かって収縮して現在の形状及び重元素量を分布させた。

膨張宇宙において原始銀河雲がどのようにして生じたかということは重要な問題だが、ここでは話題を限るために、銀河質量程度のガス雲が重力的に束縛された系として誕生したところから話を始めることにする（この話題については、たとえば、天文月報 70, No. 2 の田辺氏の好解説を参照されたい）。原始銀河雲が収縮するようすは、初めは自己重力の下でほぼ球対称的に縮むだろうが、収縮するにつれて遠心力の効果が大きくなって全体の形は扁平になり、最終的には重力と遠心力がつり合いを保っている現在の円盤状の姿に落ちついたと考えてよいだろう。ところで、ガス雲の収縮の場合には、その内部で気体粒子どおしが衝突をくりかえして一つの集団として上述のように形を変えるのだが、ガスから生じた星は、互に衝突することはないので星の集団の形は変わらない。つまり、収縮の途中に生まれた星々は、ガスのようにはもう収縮しないで、銀河中心をめぐる細長い軌道を運動するようになり、星にならずに残ったガスだけが銀河の回転軸に垂直な銀河面に向かって沈殿していくことになるのである。もちろん、その途中にも星を次々と生み落としながらだが。

こうした銀河初期の収縮のようすは、結局、収縮の過程で生まれた年令の古い星の空間運動にその痕跡が残されていることになる。図 1 (a), (b) は、視線速度及び固有運動の観測から三次元的な運動状態が決定された高速度星と RR Lyr 型変光星について、重元素量と速度の関係を表わしたものである。たて軸は重元素量の指標として用いられる $B-V=0.6$ 等での紫外色超過 $\delta(U-B)$

* 東北大学・理学部 Y. Sabano: Early Evolution of the Galaxy

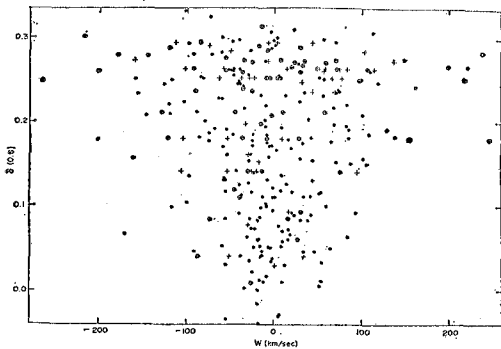
であり、 δ が大きい値ほど重元素量は少ない。横軸は、a 図では銀河面に垂直な方向の速度成分 W 、b 図では銀河回転方向の速度成分 V をとってある（この他に、もちろん動径方向の速度成分 U もあるが W の図とほぼ同様になるので省略する）。図 1 (a) を見ると、速度の平均値はほぼ 0 km/s であるが、分散は $\delta=0.3$ では約 100 km/s と大きい値で、 $\delta=0$ では約 20 km/s と小さくなり、全体に逆三角形の分布になっている。 $\delta=0.3$ は、太陽のように銀河円盤層を構成している天体の重元素量に比べると約 1/100、 $\delta=0$ は円盤層と同程度の重元素量に対応する。図 1 (a) は、銀河の初期に生まれた重元素の少ない星の速度分散は大きく、重元素量の増加と共に分散が小さくなっていくことをはっきり示している。このことは、先に述べたように、原始銀河雲が銀河面に向けて収縮する過程で、重元素量の少ない星々を生み落しながら現在の姿に落ちついたとする銀河の初期進化の描像とうまく一致する。ところで、このような速度分散と重元素量のきれいな相関が見られるためには、それぞれの重元素量に対応する各進化段階において、空間的に重元素量が一様になっていなければならないことに注

意しよう。つまり、原始銀河雲の収縮は、ガスの元素組成が内部で均一にならされる時間よりゆっくりとした時間尺度で進行したにちがいないのである。

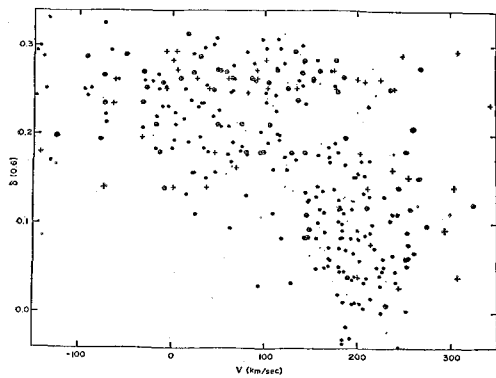
次に、銀河回転方向の速度成分と重元素量の関係を表わしている図 1 (b) に目を移そう。この図においても、速度分散と重元素量の相関は図 1 (a) と同様の傾向が見られるが、特徴的なことは V 速度の平均値が重元素量の増加と共に——ということとは収縮が進むにつれて、大きくなっていることである。このことは、銀河回転軸の動径方向にも収縮が角運動量を保存するように進行し、現在の太陽近傍での銀河回転の速度 250 km/s まで到達したということを示している。また、図からわかるように、 $\delta > 0.2$ の銀河初期に生まれた重元素量の少ない星の中には、銀河回転と逆向きに回転するものもあって、原始銀河雲の収縮期には、その内部のガスは乱流状態であったことがうかがい知れる。

このような高速度星の運動学的特徴から銀河初期の収縮のようすを解明する試みは、1962 年にエゲン・リンデンベル・サンデイジによりなされていて、彼らは、原始銀河雲の収縮は、約 10^8 年程度の重力による自由落下時間でおこる“急な”収縮であったとする結論を得ていた。ところが最近、吉井・斎尾 (1979) は、RR Lyr 型変光星を含む新しい資料を加え、さらに星の空間運動を三次元的に解析しなおしたところ、収縮の時間は少なくとも $3 \cdot 10^9$ 年はかかったという、エゲン達とは逆の“遅い”収縮の結論を得ている。

ところで、ハローの代表的存在である球状星団は、その H-R 図と星の進化理論を組み合わせることによって、直接、年令を決めることができる。最近、斎尾・有本によって詳しい研究がなされているが、結果の一例を図 2 で見ることにしよう。たて軸は太陽の重元素量 (\odot 印) に対する比を対数で表した量、横軸は 10^9 年を単位とした年令をとってあり、各球状星団について重元素量と年令との相関を見たものである (ただし、188 とある



(a)



(b)

図 1 高速度星 (● 印) と RR Lyr 型変光星 (+, ⊙ 印) の重元素量と速度成分 W , V の関係 (吉井・斎尾 1979, P.A.S.J. 31 (2) より)

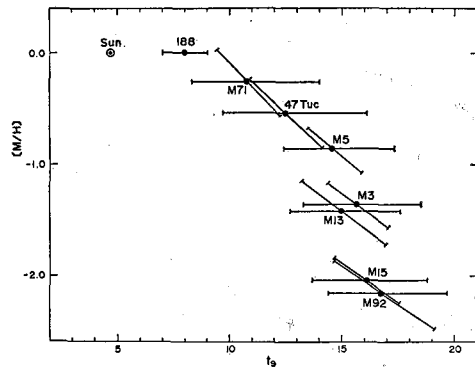


図 2 球状星団の重元素量と年令の関係 (斎尾 1977, Ap. Space Sci. 50, 93 より)

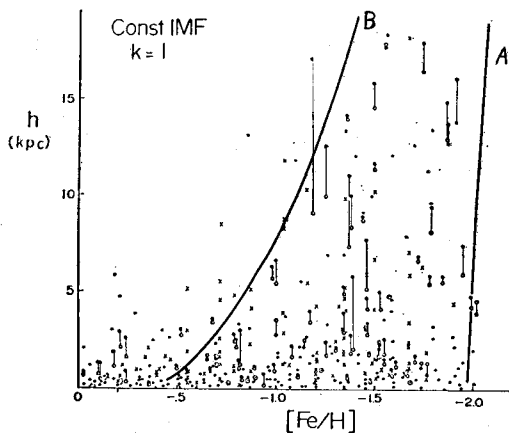


図3 各天体の銀河面からの高さ(kpc)と重元素量の関係。高速度星(●印)とRR Lyr型変光星(×印)は斉尾・吉井(P.A.S.P. 1977, 91(542))より。球状星団はデータの出典により h の値が異なるので○印で示してある。○印はクアルキン、●印はウォルチェーより

のは最も年令の古い散開星団 NGC 188 である)。明らかに重元素量の少ない星団ほど年令が古い傾向にあり、大体 $5 \cdot 10^9$ 年かかって銀河の中で次第に重元素量が増加してきたことを物語っている。

このことは、ハローの各天体の空間分布と重元素量との関係を見るとさらにはっきりしてくる。図3は、たて軸に銀河面からの高さ、横軸には重元素量(図2のたて軸と同じ表示法)をとったもので、各球状星団については直接観測される位置を示してあるが、高速度星(●印)及びRR Lyr型星(×印)については、図1(a)をもとに、銀河ポテンシャルの中で到達しうる高さを示す。重元素量の少ない星、たとえば太陽の1/100のものは、銀河面から15kpcより高い所まで存在しているのに対し、重元素量が1/10の星では5kpc以内の銀河面に近い領域に存在が限られているという顕著な傾向がみられる。前述した球状星団間の年令の差異を考え合わせれば、原始銀河雲が $10^9 \sim 10^{10}$ 年かかってゆっくり銀河面に向かって収縮しつつ、重元素量を増加させてきたという描像を確かめることができる。

3. 銀河初期の星生成

前節では、原始銀河雲の収縮の各段階で常にガスから星が生まれていることを暗黙の前提として話を進めてきたが、はたしてそのようにうまくいくのだろうか。一般に、ガス雲が重力収縮して星にまで到るか否かは、ガス雲の質量と、その内部の気体圧力とのかねあいで決められる。大きなガス雲であればそれだけ質量が大きく重力収縮は起こしやすい。問題は普通の星程度の質量を

もったガス塊がそうした重力不安定性を引き起こしてくれるかどうかである。

“現在”の銀河円盤層の中では、濃密な星間ガスから星が生成されるようすが、電波・赤外線観測で手にとるように解明されつつある。そこでは、星間ガスに含まれる C^+ イオンあるいはCO分子等が能率のよい冷却剤として機能していて、星間ガスが圧縮されて気体粒子の密度が大きくなるとより頻りに粒子どおしの衝突がおこり、エネルギーを失って、結果として温度が下がります。圧縮されやすくなるという熱不安定性が起こるので、密度のゆらぎは極端に増幅される傾向にある。このような状況では、普通の星程度の小質量のガス塊でも気体の内部圧力に抗して自己重力で収縮でき、最終的に星にまで到達するのである。

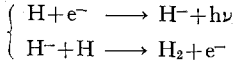
では炭素等の重元素の少ない銀河初期ではどうであろうか。さらに、重元素を含んでいない宇宙の原初のガスから太陽質量ぐらいの普通の星が、銀河の最初の世代の星として誕生することは可能なのだろうか。

原始銀河雲がどのような状態で生まれてくるかについてはあいまいな点が多いが、その生成時期は、宇宙膨張につれて温度が約4000度まで下がり初期の宇宙を満たしていた水素とヘリウムのプラズマが電子をとらえて中性化がおこった後であることは確かなようだ。そうすると、最初の原始銀河雲を構成しているのは中性の水素及びヘリウムのガスということになる。ヘリウムは粒子数にして水素の約1/10の量であるが、安定で不活性な元素なので冷却剤としては働かない。ヘリウム以外の重元素は、全く存在していないわけではないが極めて微量なので冷却剤としては無視できる量である。したがって最初のガス雲の熱的な性質を検討するには純粋水素のガス雲として扱うことができる。

ところで、宇宙の中性化が起った時点で、自己重力が内部圧力にうちかかって重力収縮が可能になる最小質量(ジーンズ質量)は $10^6 M_{\odot}$ なので、これ以上の量質をもったガス雲は——たとえば、我が原始銀河雲 ($2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$) は楽に重力収縮に転じたと考えてよい。また逆に、 $10^6 M_{\odot}$ より小さいガス雲は重力的に束縛された系として生じることは考えられない。ただし、大質量のガス雲が収縮するにつれて何らかの冷却機構が働いて、収縮に伴って解放された重力エネルギーをガス雲の外へ逃がすことができれば、ジーンズ質量は小さくなり、大質量のガス雲内部でさらに小さなガスのかたまりが生じることができるようになる。そこで次に、中性水素の原始銀河雲が重力収縮した場合、どのような熱進化をたどるのかを検討しよう。

銀河初期の水素ガス時代における有力な冷却剤の候補として水素分子 (H_2) がある。現在、円盤層をうめてい

る星間ガスでは、水素分子は星間塵の表面でつくられ、ある程度質量の大きな星間雲の中心部はほとんど分子の状態になっている。ところが、重元素のない銀河初期には塵粒子もないので、星間分子と同じメカニズムで分子形成がおこることは期待できない。しかし、宇宙の中性化がおこった後も、電離度にして 10^{-5} 程度の微量の自由電子が存在しているので、これを触媒にして次のようなガス相での反応がおこる。



ただし、原始銀河雲の収縮開始時に、この反応で生じる分子の量は、分子数の全気体粒子に対する相対比、 f にして 10^{-6} ぐらいで冷却剤としてはとても足りない。したがって重力収縮のはじめは断熱的に進み、ガスの温度は密度と共に上昇する。そうすると、反応はさらに進み、 f は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ まで増加する。このぐらいに H_2 分子が増えれば、この H_2 分子と H 原子の衝突で、気体粒子の運動エネルギーを赤外線放射にかえて雲の外へ放出するという機構が働いて、ガスをどんどん冷やすことができるようになる。このようすを 図 4 の温度-密度平面でたどってみよう。仮りに、ガスの温度 T が 100 K 、粒子密度 N が 1 cm^{-3} の状態から重力収縮が始まったとすると、まず断熱圧縮の線に沿って温度が 10^3 K まで上昇し、その後分子による冷却が働き出して、A で示されているようにほぼ等温的な圧縮に移行する。その後、密度が 10^5 cm^{-3} 以上になると、 H_2 分子と H 原子の衝突は逆励起の方向にも起こるようになるので冷却の能率は下がり、温度は再びゆるい上昇に向かう。温度が 10^4 K に近づくと、 H 原子との衝突で H_2 分子が解離される反応がおこり始めるのだが、この反応は温度に敏感な反応で、ちょっと温度の高い所は急速に分子がなくなり、ますます温度が上昇するという一種の熱不安定性が生じる。逆に温度の低い所は、周囲から圧縮されさらに冷却が進み、密度のゆらぎが増大する。したがって、ガス雲内部の密度の高い場所は 図 4 で示されているようにさらに高密度領域へ進化することになる。一方、その周囲のガスは、冷却剤としての分子が無くなるので、破線で示されるように断熱的な進化をたどる。同図の右方には、ジーンズ質量 (M_J) がちょうど太陽質量に等しくなる状態が一点鎖線で示されてあるが、 $1 M_\odot$ のゆらぎがこの線の右方の領域まで圧縮されれば、その後はゆらぎ自身が重力収縮を始めることができる。佐場野・吉井 (1977, 1979) の詳しい検討によれば、この条件は、 $0.1 \sim 10 M_\odot$ の範囲で満たされることが確かめられており、通常の質量範囲の星の誕生が期待される。図には、原始銀河雲が収縮を始める密度を $10, 100 \text{ cm}^{-3}$ とした進化経路も示してあるが、これから解るように、初期状態が

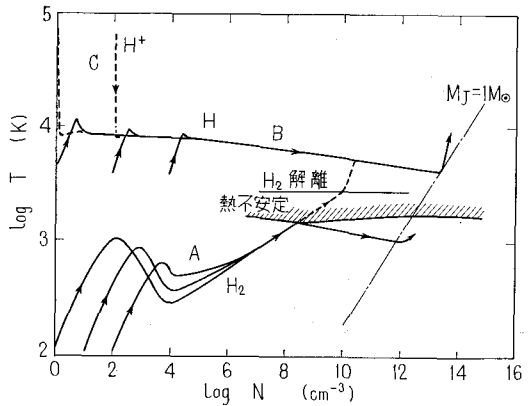


図 4 水素ガス雲の熱進化

異っていても、 H_2 分子の冷却が効き始めれば、結局 A の経路に収れんすることも確められる。つまり、進化のようすはガスの熱的性質で決められており、ガス雲の質量が十分に大きくて重力収縮さえ開始すれば、後の進化過程はほとんど変わらない。

ところで、上の議論では水素分子の存在が本質的なことであったが、原始銀河雲が収縮を開始する時期に水素分子が形成されるためには、先の反応式でみられるように触媒としての H^- イオンが必要であった。ところが、 H^- が放射でこわされないためには周囲の放射温度が 300 K 以下でなければならないので、もし放射温度がそれ以上のもっと“熱い”時代に原始銀河雲が収縮を始めるとすれば、水素分子の冷却は想定できない。また、水素分子は 2000 K 以上では水素原子との衝突で破壊されるので、高温のガスから原始銀河雲が生じた場合も同様に水素分子による冷却は期待できないことになる。

では、その場合、原始銀河雲はどのような熱進化をたどるのだろうか。宇宙の中性化がおこるときの、温度 4000 K 、電離度 10^{-5} のガス雲を重力収縮させてみよう。最初は、電子による水素原子の衝突励起等の冷却機構が働くには電離度が低すぎて、断熱的に温度が上昇する。そして、温度が 10^4 K にまで上がると、微量ながら含まれていた電子が水素原子に衝突することによって水素原子の電離がおこり、電離度は 10^{-8} まで増加する。このぐらいの電離度があると、電子と水素原子の非弾性衝突によって気体粒子の運動エネルギーが効果的に失われ、原始銀河雲は等温的に収縮できるようになる。ただし、収縮に伴い、ガス雲の密度が増加するにつれて、各衝突過程の他に、ガス雲内の放射場との相互作用も考慮しなければならず、熱進化のようすは複雑になる。長谷川・吉井・佐場野 (1979) は数値的にこの進化を追跡し、図 4 の B の経路で示される結果を得ている。収縮につれて、水素原子が励起され、同時にガス雲内の放射エネルギーも増大するのだが、重力収縮に伴って生じるガスの

熱エネルギーは、結局、連続光の輻射としてガス雲外へ放出されて、最終的に、ガス温度と輻射の温度が等しくなるような熱力学的平衡状態に達する 10^{18} cm^{-3} の高密度まで、ほぼ等温的に進化するのである。熱力学的平衡状態に達した後は、再び断熱的に収縮して温度が上昇するので、この進化経路上でのジーンズ質量の最小値は、温度上昇の直前の状態で見積もることができる。図4にみられるように、この値はほぼ $1 M_{\odot}$ であり、高温ガスの原始銀河雲の場合でも通常の質量の星生成が期待されよう。

これまでは、ほとんど中性の水素ガス雲の収縮だけを考えてきたが、原始銀河雲が重力収縮をはじめる宇宙の中性化がおこった直後は、宇宙乱流の散逸がはげしくて、そのためにガスが加熱され、完全電離した高温のガスから収縮を始める可能性もある。その場合は、収縮を始めるとすぐ電子と陽子は再結合し、急速に温度が下がり、図4のCの経路で示されるように、結局、前のBの経路に収束してしまい、後の進化は上述の場合と同じになる。

以上みたように、原始銀河雲の初期に、水素分子は存在するかどうか、あるいは電離ガスなのか中性ガスかといった不確かなことは多いのだが、いずれにせよ、重力収縮の途中で、太陽と同程度の質量をもった星が誕生するという結論にはかわりはないのである。

これまで、銀河初期の極端な場合として純粋水素ガス時代の熱的な性質を検討したが、次に微量な重元素を含むガス雲がどのような熱進化をたどるのかを考えてみよう。ここで、重元素量を表わすパラメーターとして、現在銀河円盤層に存在している天体の重元素量に対する比を用いることにしよう。当然のことながら、現在の星間ガスと純粋水素ガスとの中間の性質を示すことになるが、 z が 10^{-4} 以下では重元素の効果はガスの熱的なふるまいには影響を与えず、先の議論と変わりはない。重元素量が z にして 10^{-3} 以上になると、炭素・酸素等の重元素粒子の水素原子による衝突励起が冷却機構として重要になってくる。一例として、 $z=10^{-2}$ の場合、原始銀河雲が重力収縮に伴って進化するようすを図5に示しておく。図4のときと同じ状態から、水素分子を含む場合と含まない場合の二通りの熱進化のようすが示されている。重元素を含まない図4の場合とちがって、収縮してもまもなく、密度が $10 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ あたりから上述の冷却機構が働きだして急に温度が下がり、後は初期条件に関係なく約 100 K のほぼ定温変化をたどることになる。冷却の効率が良くなることその他に、さらに大事なことは、重元素の冷却に特有な熱不安定性が現れることで、図5ではこの不安定な領域が斜線のついた領域で示されている。図5の例では、 H_2 分子を含まないガス雲の場合、収縮の途中に、熱的に不安定な領域を通ることがわかる。

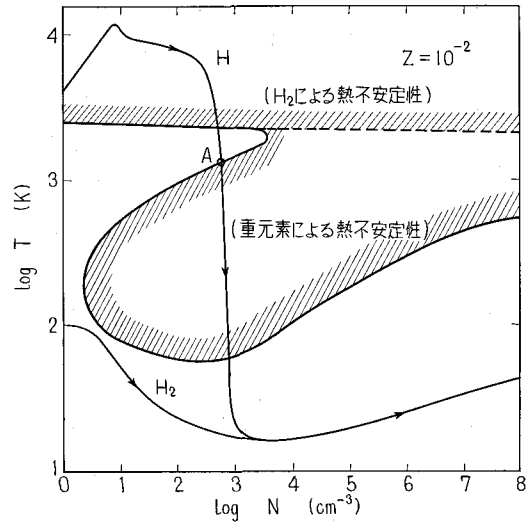


図5 重元素 ($z=10^{-2}$) を含むガス雲の熱進化

不安定な領域にさしかかるA点で(高温の不安定領域は水素分子に引きおこされるもので、今の例の場合は関係ない)、ガス雲内の微少な密度のゆらぎが急速に成長しはじめ、普通の星ぐらいの自己重力系にまで到達するようすが、気体力学の数値計算で確かめられている(吉井・佐場野 1979)。ともかく、重元素を z にして $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ぐらい含むようになると、ガスの熱的な性質は、水素ガスの時代とは質的に異ってきて、冷却能率の点からも、ゆらぎを増幅させる点でも、星の生成には好都合になってくることは確かなことである。このことは、現在観測されるハローの天体が、重元素量 z の $10^{-3} \sim 10^{-2}$ から急増していることと関連がありそうである。

銀河の初期から現在に到る各進化段階で、通常の星生成が可能であることが確かめられれば、銀河の中に存在するガスの量から、経験的に知られている星の生成率を仮定し、又生まれた星は星の進化的理論で定められた運命をたどることにして、銀河全体としての星・ガス・重元素量等の変化をコンピュータのモデル実験で追跡することができる。最近、大道(1979)はこの方法を銀河初期の収縮期に適用して、ハローの重元素量分布を説明することを試みている。銀河初期には、銀河が全体として収縮するので、星の生成率を決めるガス密度が大きく変化することが特徴的なことである。原始銀河雲が重力による自由落下の時間で、銀河面に“急速”に収縮した場合には、ハローの高さに滞在している時間が短いので、ここでは星の進化の結果として生じる重元素汚染は少ししかおこらず、結局、ハローで生まれた星は、ほんの少ししか重元素を含まないことになる。図3に、この場合のモデル計算から得られる軌跡をAで示しておいた。明ら

かに観測される球状星団や高速度星の重元素量を説明するには少なすぎる。収縮の時間を $5 \cdot 10^9$ 年と長くすると、観測値の分布をほぼ満足させる軌跡 B を得ることができる。やはりここでも、銀河の初期の収縮は 10^9 年以上かかるゆっくりしたものだったという前節の結論が確認される。

4. おわりに

以上みてきたように、銀河初期に関する観測・理論両面から検討を加えた結果、重元素を含まない初期の段階から原始銀河雲内では通常の質量をもった星の生成が進行し、 10^9 年以上かかるゆっくりした収縮の途中でハローの天体が形成され、星にならずに残ったガスが円盤状に沈殿していった最終的に現在の銀河の形状に到ったという描像は動かしがたいもののように思える。

それでは、銀河初期の重力による自由落下をさまたげて、“遅い”収縮にさせた原因は何だろうか。重力に拮抗し得るぐらいガスの圧力が高ければよいわけだが、ガスの圧力を上げるのに有効な機構として超新星の爆発によるエネルギーの開放が考えられる。現在の星間ガスにおいても、ガスの無秩序運動をひきおこしたり、ガスの加熱源となっているのは超新星の爆発によるエネルギー供給が一番重要なものとなっている。銀河初期では、ガスの密度が小さいことと、重元素が少なくて冷却能率が悪いことの両方が、超新星による加熱をさらに効率のよいものになっている。銀河初期のいろいろな環境におかれたガスの中で、超新星の爆発がどのような効果をもつかは、福長・佐場野 (1979) による気体力学の数値実験で

定量的な結果が得られている。この結果と、超新星の発生率を先の大道の進化モデルから見積って、当時のガスの状態を考えると、ほとんどが温度 10^6 K 程度の高温ガスで占められていることになり、到底、自由落下とはならないことが解る。ただし、これまでのところは、エネルギーのやりとりだけを考えているだけなので、動力学的な検討を加えて、星生成・化学進化のモデルを首尾一貫した進化モデルとして完成させることは、今後の一つの問題であろう。

又、銀河初期の“遅い”収縮からくる一つの帰結として、ハロー部の質量が円盤部の質量と同程度になるといふ、従来考えられている値よりやや大きい値を示唆するということがある。現在、大道・吉井により、銀河面から 10 kpc 程度の高さまでの暗い星 (矮星) を直接調べて、ハロー内での質量分布・重元素分布を解明しようという試みが始められている。今のところ予備的な結果ながら、本稿で展開された内容をほぼ確かめるような結論が得られている。

以上、主に東北大・天文教室・若手の最近の研究結果を軸にして述べてきた構成上、私見にかたよりすぎる部分も多いと思われる。又、球状星団と高速度星の関連、近傍銀河や銀河間ガスとの相互作用の問題など、あえて触れなかった重要な問題も残されている。今後の研究の進展の中で解決されることを期待したい。

最後ながら、原稿に目を通して親切な助言を下された高窪啓弥教授に、又、有益な討論の相手となってくれた大道・吉井・有本・福長・長谷川各氏に感謝の意を表したい。

