

銀河間ガスの動圧による円盤銀河からの星間ガスの除去

外山清高*・池内了*

I. S0 銀河の起源について

銀河は大別すると楕円銀河と渦状銀河ということになるが、それらの中間的なタイプとして S0 銀河がある。S0 銀河には星間ガスが少なく、赤く古い星で構成されているという点では楕円銀河に近く、星の分布では、中心部の球状部（バルジ成分）と円盤部（ディスク成分）の双方を持つという点では渦状銀河に似ている。このような S0 銀河の起源として、銀河形成の時点から上の2つのタイプとは異った銀河として出発したとする先天説と、渦状銀河として形成されたのだが、何らかの原因で星間ガスが除去されてしまったため、若い星が形成されなくなったとする後天説がある。先天説に立てば、銀河形成の問題に帰着され、現在の段階では答はわからない。しかし、後にみるように円盤銀河からのガスの除去は、極めてたやすいように思える。従って、後天説の方が有利に思える（むしろ、なぜ渦状銀河にガスが現在も存在しているのか、という問題設定にした方がよさそうにさえ思える。この点は、最終節で論ずる）。

後天説の主なものは、(i) 超新星爆発で加熱された星間ガスが銀河から流出してしまう——銀河風のモデル、(ii) 銀河間ガスを銀河が運動すれば、その動圧でガスがはぎとられてしまうモデル、(iii) 熱い銀河間ガスからの熱伝導で星間ガスが蒸発してしまうモデル、(iv) 銀河同士が相互作用して潮汐力でガスが放出されるモデル等である。(i) はその銀河の固有の性質に帰せられるから、ある意味で先天説に近い。楕円銀河のガスも銀河風で流出したとして、その構造の共通点に原因を求めることになる。このモデルは、銀河団に属さない S0 銀河の存在を合理的に説明できるが、渦状銀河と何が異っているのかが明らかでない。

(ii)~(iv) は、いわば環境説であり次のような観測事実とよく整合する。

(1) 全銀河に対する円盤銀河 (S0 及び渦状銀河) の割合は、どこでも一定であるが、円盤銀河中に S0 の占める割合は、銀河密度の高いところ程大きい。(Oemler による)。

(2) その形態がよく似ている銀河団でも、遠方の (=若

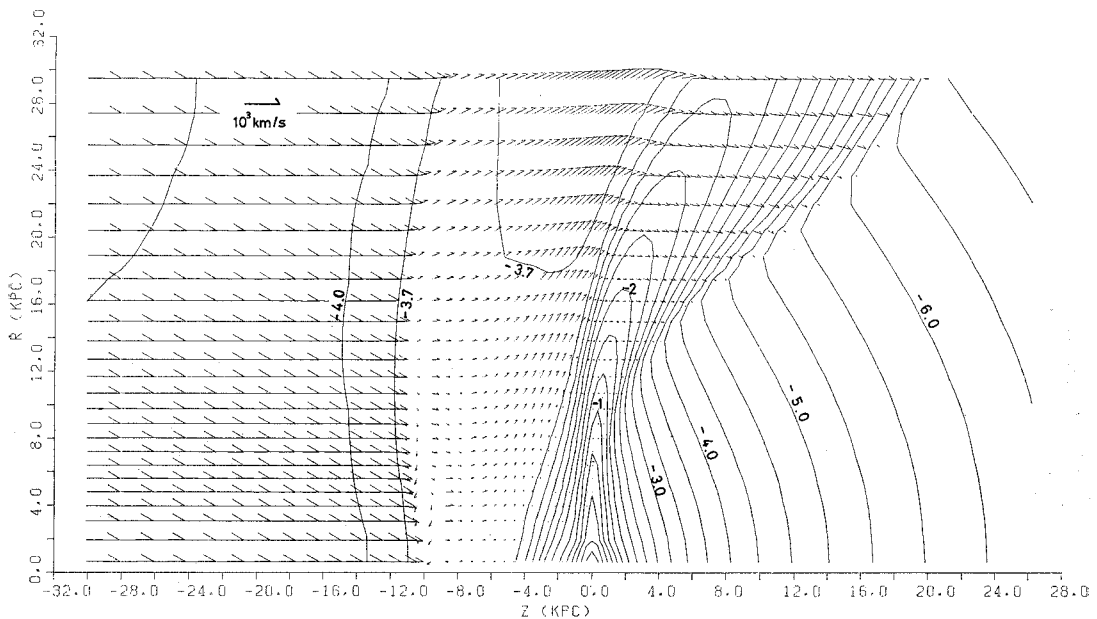


図 1 (a) 等密度線と流れの方向の時間変化。図中の数字は、 1 cm^3 中の原子数の常用対数。時間は、(a) 4.9×10^7 年, (b) 7.7×10^7 年, (c) 1.1×10^8 年。縦軸は、銀河回転軸からの半径。横軸は、銀河回転軸に沿った距離。座標原点は銀河中心である。

* 北大・理 Kiyotaka Toyama, Satoru Ikeuchi: Gas Ablation from a Disk Galaxy by Dynamical Pressure of Intergalactic Gas

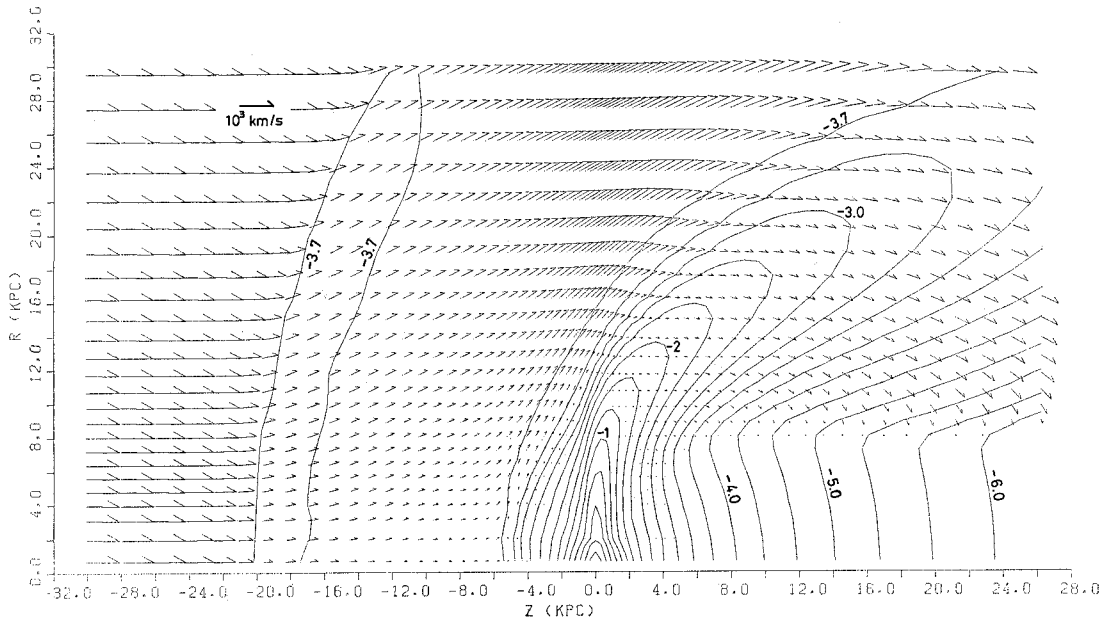


図 1 (b)

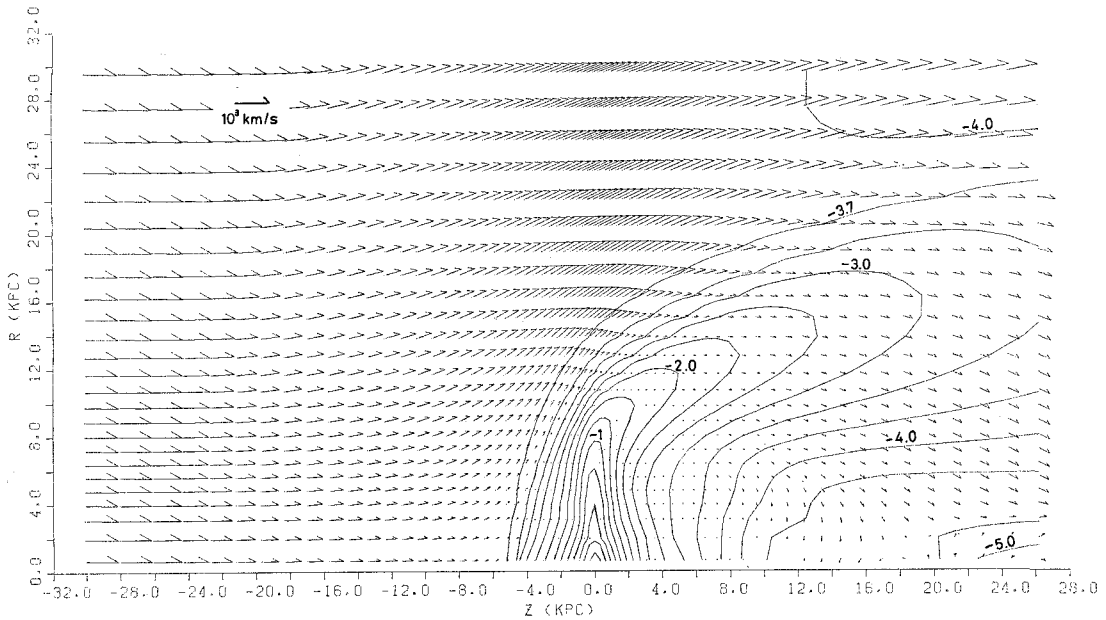


図 1 (c)

い) ものに青い銀河 (=渦状銀河) が多く、近傍の銀河団になるに従いその割合が減少している。(Butcher らによる) この事実は、渦状銀河は時間と共に S0 銀河へ移行していることを示唆している。

(3) 銀河間空間は、何も存在しない真空ではなく、種々のガスが存在している。銀河団からの X線放射、銀河をとりまく電波、銀河間をつなぐ“橋”の存在等、銀河間

ガスの存在は確実である。

以上を概括してみると、S0 銀河への移行は、その内的要因、環境要因のいずれも働いていると考えた方がよさそうである。問題は、どの機構が最も有効であるか、あるいは、より遠方の銀河の観測と矛盾しないかという点であり、各々のモデルについて、その効率や結果的なガス分布などを明らかにしておくことが肝要のように思

われる。

ここでは、円盤銀河が銀河間ガス中を運動している場合の動圧効果について、我々の行った数値計算例を紹介し、SO 銀河の起源について若干の考察を加える。

II. モデル

銀河間ガス中を円盤銀河が運動しているのだが、ガリレイ変換して、静止した星間ガスを含む円盤銀河へ銀河間ガスが吹きつけると考える。銀河のモデルは、軸対称とし宮本-永井ポテンシャルを採用する。銀河は、球対称のバルジ部と円盤部の2成分より成るとすると、パラメーターは5個必要になる。宮本らは、円盤銀河の星分布からパラメーターの間に2つの関係式を見出しており、残るパラメーターは3つになる。うち1つは、銀河の全質量で、我々は、ほとんどの場合 $10^{11} M_{\odot}$ とする。残り2つを適当に調節すれば、Sa から Sc にいたる渦状銀河の星分布をうまく再現することができ、これにより銀河重力場を決定することができる。

一方、星間ガスの空間分布は、星のそれと同じとし、密度だけ α 倍であると仮定する。この場合、星間ガスも星と同じ回転をしている。我々の銀河系では、星間ガスの質量は分子雲が荷っており、それは中心から 4~8 kpc の領域に集中したリング状分布を示している。従って、星分布とは明らかに異っている。この点については、後で述べる。

銀河間ガスの状態は、その温度 T_{∞} 、密度 n_{∞} 、流れの速度 V_{∞} で指定される。銀河団あるいは銀河グループで

の観測から、各々、 $10^8 K < T_{\infty} < 10^9 K$, $10^{-4} \text{ cm}^{-3} < n_{\infty} < 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $500 \text{ kms}^{-1} < |V_{\infty}| < 1000 \text{ kms}^{-1}$ の範囲にあると考えられる。問題は、ガスの流れの方向をどうとるかである。これは基本的に計算機能力で決まってしまう。我々は、軸対称銀河の対称軸に平行に銀河間ガスが流れ込む場合を調べる。従って、軸対称2次元コードで計算する。この場合、銀河間ガスとの相互作用の断面積は最大となり、最も効率的に星間ガスがはぎとられるケースと考えられる。数値計算には、重力及び回転を含むよう改良した FLIC 法を採用した。

III. 結果

銀河モデルは13種、銀河間ガスとして7種をとり、その組み合わせ27種について数値計算を行なった。代表的な例として、銀河モデルは我々の銀河に近い Sc 型に対応するモデルをとり、銀河中心核から 10 kpc の場所での星間ガス密度が $n_0 = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ とする。銀河間ガスについては、 $T_{\infty} = 10^7 \text{ K}$, $n_{\infty} = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$, $V_{\infty} = 10^3 \text{ kms}^{-1}$ と、銀河団の中心からやや離れた場所を通過する場合を設定する。

図1に、等密度線と流れの方向の時間変化を示している。図2は、各ステージの温度分布である。図1(a)は、銀河間ガスの流れが円盤部に到達し、密度の小さい外部からはぎとりが始まった段階である。銀河前方に衝撃波(ボウショック)が発生していることは、流速が急速に変化していること、図2(a)にあるように、そこでガス温度が高くなっていることから推定できる。ここでいった

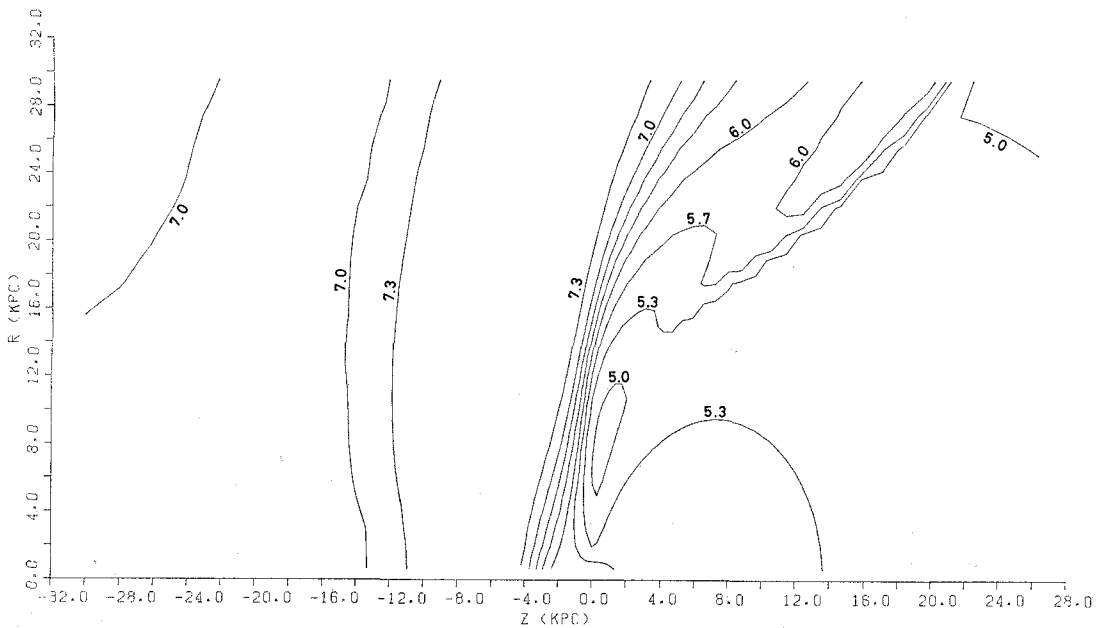


図 2 (a) 温度分布。図中の数字は、絶対温度の常用対数。時間は図 1 と同じ。

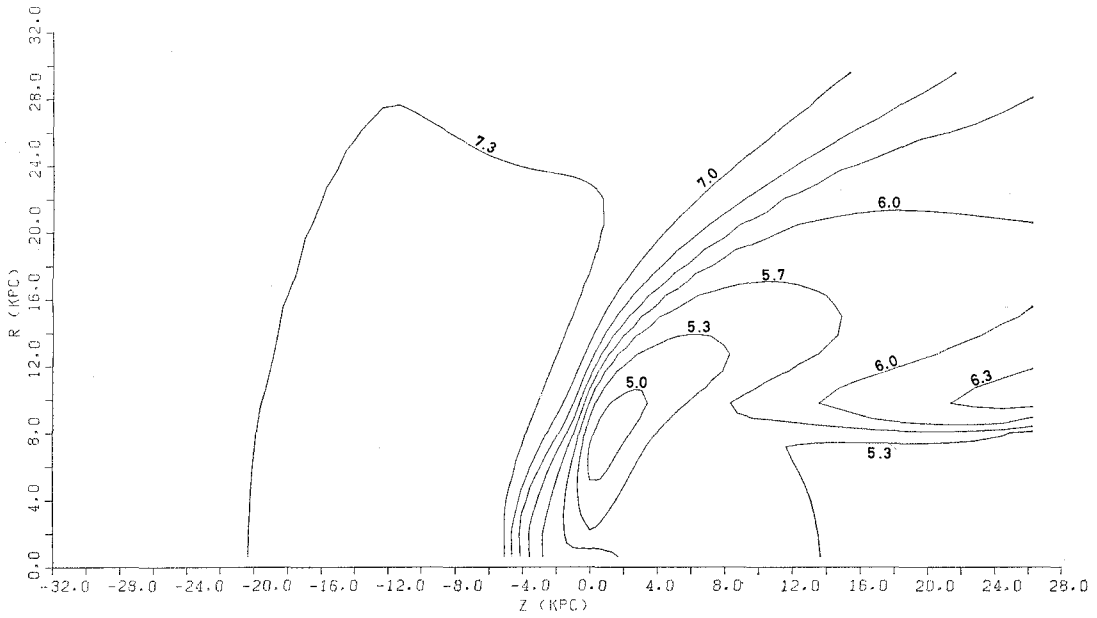


図 2 (b)

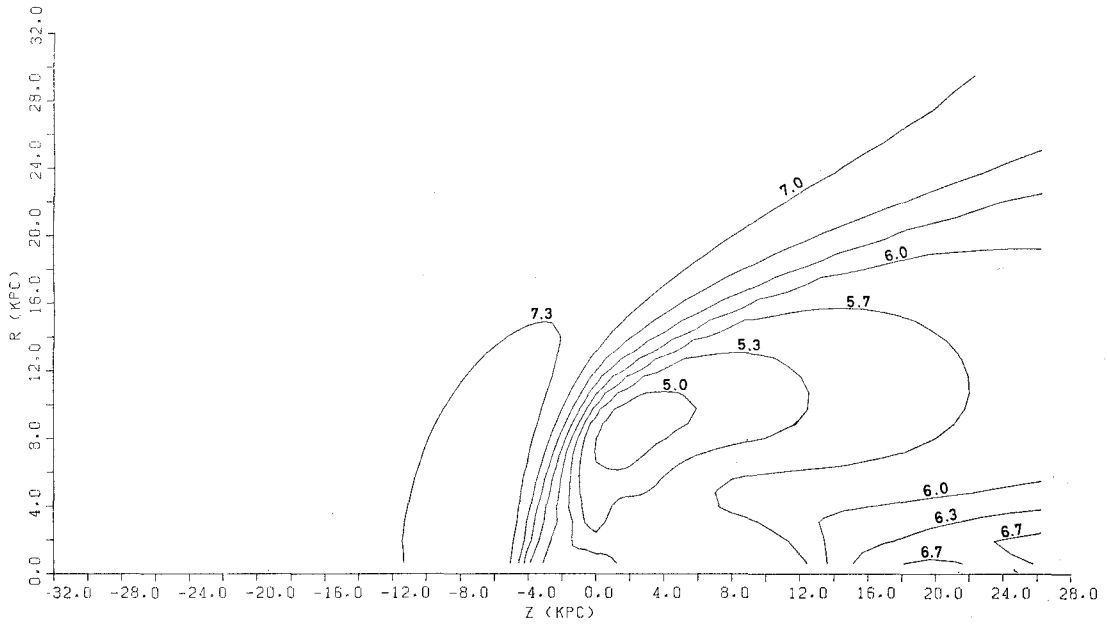


図 2 (c)

減速された銀河間ガスは、銀河の重力により再び加速されて円盤部のガスに沿うように流れる。

図 1 (b) では、外部円盤部のガスは大きく流されていることがよくわかる。注目したいのは、流れに対し銀河の陰になっている部分である。流れは、この領域に入り込むことなく、回転軸に平行に流れ去っている。従って、回転軸から数 kpc 内は、銀河間ガスの影響をほとんど

受けていない。円盤部のガスは角運動量を持っており、銀河間ガスと混ぜ合わされて銀河からはぎとられても、角運動量の保存のため回転軸に近づきにくいのである。この結果は、回転のない球対称銀河との相互作用の結果 (Lea and De Young による) と非常に異っている。球対称銀河の場合、ガスの流れは銀河後方にまわりこんでゆく。この流れが、後方から星間ガスを抜く作用として

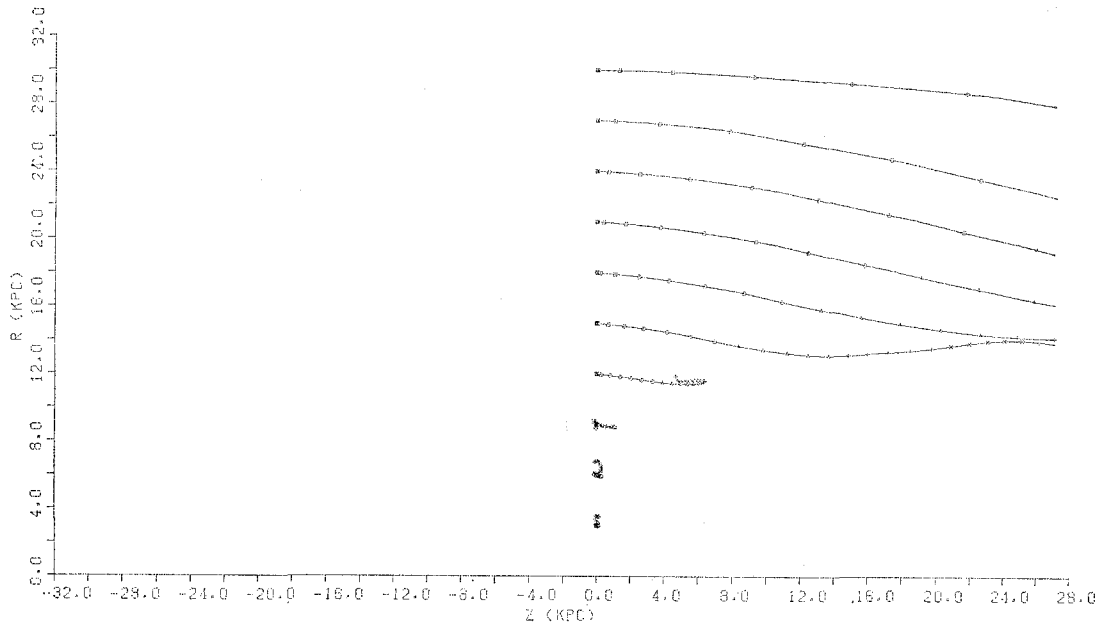


図 3 (a)

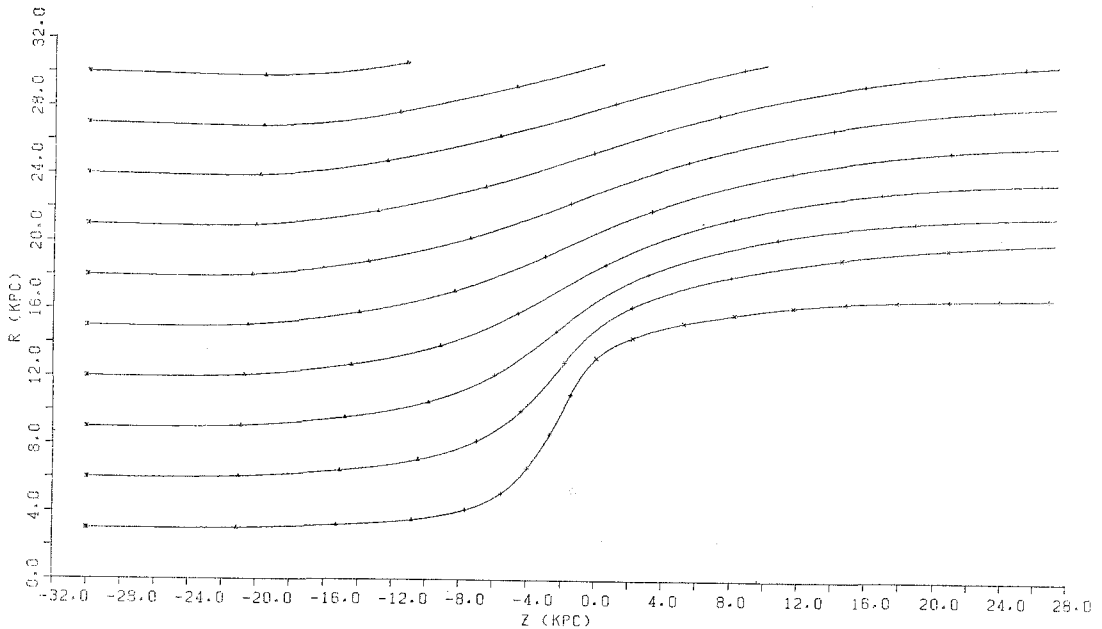


図 3 (b) 気体粒子の動き。(a) 最初に円盤部にあった星間ガスの動き, (b) 銀河間ガス粒子の動き, を示す。図中の印の間隔は, 10^7 年での動きを表す。

働いている。図 3 に, 気体粒子の動きを示している。(a) 図は, 最初に円盤部にあった星間ガス, (b) 図は, 銀河間ガス粒子の動きで, 線上のマークは, 10^7 年の時間間隔を示している。円盤部のガス粒子は, 外部のものはほぼ一直線 (実際は回転しているため, スパイラル運動になる) に流され, 回転軸に近い部分のガス粒子はほとん

ど不動である。球対称銀河の場合は, 銀河後方へのまわり込み, それによる渦運動, 抜かれる星間ガスとの相互作用等が重なりあって, 気体粒子の運動が非常に複雑であるのと好対照である。

図 1 (c) は, 流れ全体がほぼ定常状態に達した段階である。もちろん, 完全な定常状態にはなり得ないが, 今

注目している円盤部のガスは、ほぼ定常になっている。回転軸から数 kpc 内のガスは、後方へのガスのまわり込みがないこと、前方に発生した衝撃波が流れをくいとめる効果で保護され、安定なガス円盤となって残こされている。一方、円盤外層部のガスは、ほぼ完全に除去されてしまっている。

流れの方向と銀河対称軸が平行であるため、直観的には円盤部のガスはきれいさっぱりと除去されてしまうと考えるのに、実際には、十分に安定なガス円盤が中心附近に残されることは、S0 銀河に関連して注目される結果である。そこで、この安定なガス円盤と銀河モデル、銀河間ガスの状態との関係を定量化してみよう。

図4に、厚さ 2 kpc の円盤の各半径 R 内のガスの質量の時間変化を示している。図中の数値は、 R (kpc) の値である。すぐわかるように、 8×10^7 年後の $R \approx 10$ kpc のガス質量は一定であり、それより外にはほとんどガスが存在していない。つまり、半径 10 kpc 内の星間ガスはほぼ完全に保護されているに対し、それより外は、極めて短時間に除去されてしまう。この傾向は、数値計算を行った 27 例すべてに共通している。図4より、星間

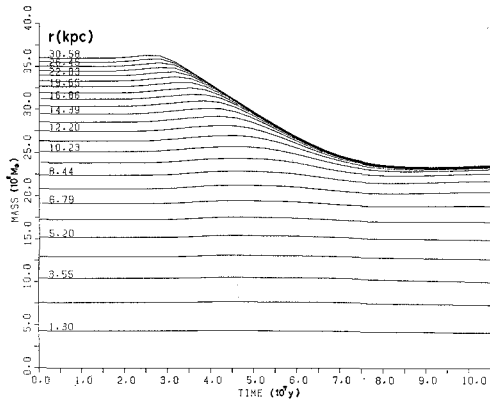


図4 厚さ 2 kpc の円盤の各半径 R 内のガスの質量の時間変化。単位は $10^8 M_\odot$ 。図中の数字は円盤の半径を示す。

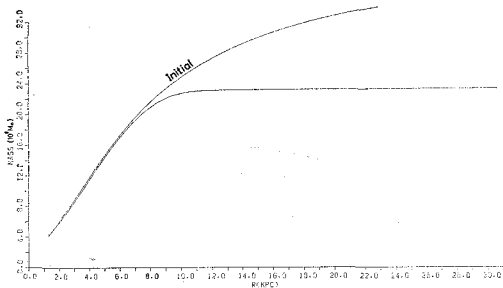


図5 ほぼ定常な流れとなった時刻での、厚さ 2 kpc の円盤の質量分布。Initial の線は、初期のガス分布を示す。

ガスの除去時間 Δt を見積ることができる。半径 20 kpc 内のガス質量は、 3.5×10^7 年頃に最大になる。この時刻は、銀河間ガスが銀河に到達した時刻であり、始めは銀河間ガスが少し付け加わっている。やがて、急速にガス質量は減少し始め、 8×10^7 年頃に最小になってそのままほとんど変化しなくなる。この2つの時刻差が除去に必要な時間、ガス質量の最大と最小の差 ΔM が除去される質量である。(実際には、グラフの読み取りの誤差が入らぬようもう少し正確に定義するが、本質的な差はない。) 数値計算した 27 例において、 Δt は、 $(3 \sim 5) \times 10^7$ であり、銀河が1回転する時間 $\sim 10^8$ 年と比較して十分に短いことは注目される。

図5に、安定なガス円盤が残されほぼ定常状態になった時刻での、厚さ 2 kpc の円盤の質量分布を示している。比較のため初期のガス分布も示している。半径 10 kpc より外にはほとんどガスが除去され、それより内では初期分布がそのまま残されていることが明確にわかる。このガス円盤の半径 R_a 、質量 M_a の銀河モデルや銀河間ガスのパラメーター依存性を、27 例を整理して調べてみた。 R_a は、流れが弱い場合は ~ 10 kpc、強い場合は 3 kpc 以下——すなわち、完全に除去されてしまう——になる。その結果は、次の経験式で表わされる。

$$R_a = \left(\frac{M_{\text{gal}}}{10^{10} M_\odot} \right)^{0.17} \left(\frac{n_0}{10^{-2} \text{ cm}^{-3}} \right)^{0.17} \left(\frac{a_2}{3 \text{ kpc}} \right)^{0.35} \times \left\{ 0.26 \left(\frac{c}{1.0} \right) - 1.15 \log \left(\frac{P_\infty}{(10^{-4} \text{ cm}^{-3})(100 \text{ km s}^{-1})^2} \right) + 3.10 M_\infty^{0.07} + 1.76 \right\} \text{ (kpc)} \quad (1)$$

ここで、 $P_\infty = n_\infty v_\infty^2$ で銀河間ガスの動圧、 M_∞ はそのマッハ数である。又、 a_2, c は、宮本-永井のポテンシャルに使われるパラメーターで、円盤銀河は、 $a_2 = 3 \sim 7$ kpc, $c = 0.1 \sim 0.5$ 範囲にあることが、宮本らによって指摘されている。この式は、 R_a が 3 kpc 以上では、10% 以内の誤差で数値計算結果を再現する。 M_a に関しては、このようなよく結果を再現する経験式を見出すことができなかった。

(1) 式からわかることは、(i) 銀河間ガスの流れのマッハ数は、 R_a の絶対値を決めるのに効いているが、変化させても R_a はほとんど変わらないこと、(ii) a_2, c などの銀河構造への依存性も、その変動幅の小さいことを考えるとそう大きくないこと、(iii) 動圧への依存性は対数的で小さいように見えるが、一桁以上変わりうることから、むしろ強い依存性を示すこと、(iv) 銀河質量 M_{gal} 、星分布のパラメーター a_2 、星間ガスの中心から 10 kpc での密度 n_0 への依存性が、 $R_a \propto (M_{\text{gal}} a_2^2 n_0)^{1/6}$ と考えられることである。おそらく、この (iv) について

は、簡単な物理的理由があるはずであるが、力及ばずそれを見出し得ないでいる。読者からの示唆を期待している。

IV. 議論と考察

(1) 式から、 R_d が 3 kpc より小さい——この場合、ガス円盤は残されず完全に除去されてしまうと考えてよい——条件は、 $M_{gal} < 10^{10} M_{\odot}$ 、 $n_0 < 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$ 、 $P_{\infty} > 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$ のいずれかが満たされる、ということになる。(むしろこの結論は、我々の調べたパラメーターの範囲について言えることである。) 従って、質量の小さい銀河、質量は大きくてもその星間ガスが少なかったり、銀河団の中心部へ突入してゆく場合には、円盤部のガスが完全に除去されてしまうことがわかる。又、いったん星間ガスが除去されてしまうと、銀河間ガスが銀河へ降り積もることがないことは、モデル計算が確認した。これは、 V_{∞} が銀河からの逃散速度より大きい場合なので一般化はできないが、少なくとも銀河団中では、銀河間ガスの降着による星間ガスの生成はなさそうである。

我々の計算では、星からのガス供給を考慮していないが、ガスの除去時間 dt が小さいこと、従って、その間に星から供給されるガスが、もともと存在していた星間ガスの量に比べて十分小さいことから、この近似はよく成立していると言える。

微妙なのは、ガスの輻射冷却の問題である。我々は、断熱として計算したが、冷却の時間スケールと流れが定常になるための時間がほぼ同じになっており、その効果は完全に無視することができない。もし、この効果を含めるとすれば、銀河前後での X 線輻射と共に、安定なガス円盤は冷却しつつ収縮してゆくと考えられる。この点を正しく取り扱わないと SO 銀河の観測との比較はできない。しかし、星間ガスの除去に関する我々の結論に影響を与えることはない。

以上の計算は、流れの方向と回転軸が一致している場合であったが、それ以外の場合はどうなるであろうか。星間ガスの除去時間は、銀河間ガスが持ち込んだ運動量の総量 $n_{\infty} v_{\infty} \cdot v_{\infty} dt = P_{\infty} dt$ が、星間ガスがもともと持っていた $n_0 (GM_{gal}/R)^{1/2} l$ (l は、円盤の厚み) を上廻る時点で見積ることができる。(この結果は、我々の計算結果とよく一致している。) そこで、同じ方法で、最もガスが除かれにくいと思われる場合——回転軸と流れの方向が垂直の場合——について除去時間を見積ってみよう。速度 V_{rot} で回転している星間ガスのもつ運動量は、 $n_0 V_{rot} R$ である。これと上の $P_{\infty} dt$ と比較すれば、各パラメーターの典型的な値 ($n_{\infty} = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ 、 $v_{\infty} = 500 \text{ km s}^{-1}$ 、 $n_0 = 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 、 $V_{rot} = 200 \text{ km s}^{-1}$ 、 $R = 10 \text{ kpc}$) をとると、 dt は、 1×10^8 年である。この時間で星間ガスの運動量

(今の場合、角運動量) が大きく変化する。ガスの流れと同じ方向に回転するガスは、角運動量が増大し膨らみ除去されやすくなり、反対方向に回転する部分ではガスは収縮する。果たして、非対称な渦状腕になるのか、それより早くガスが抜かれてしまうのかは、数値計算をやってみないとわからないが、この場合、3次元計算で薄いガス円盤を扱わねばならぬので、現段階では不可能のように思える。

V. エピローグ

さて、我々の計算例は、最も星間ガスの除去されやすい場合であるから、すぐには一般化できないが、銀河の年齢が 10^{10} 年もあるとすれば、どの円盤銀河でもガスは抜かれてしまうように思われる。さらに、星の生成率が時間と共に減少して現在の値となっているのなら、過去において星の生成率、従って超新星爆発の頻度が高く、銀河風としてもガスは逃げてしまうのではないかという点も考慮すると、むしろ、なぜ渦状銀河にガスが存在するのか、と逆の問いかけをした方がよいかもしい (ラーソンらの指摘)。今度は、ガスが除去されない理由又は新たなガス供給源を考えることになる。

この一つの解答は、星間ガスのほとんどは分子雲として大質量のかたまりとして存在し、超新星爆発や銀河間ガスの動圧がきかないとする考えである。特に、リング状に分子雲が分布しているなら、銀河間ガスはその間を通り抜けてしまうことも考えられる。

さらに、今流行の、大質量ハーローが存在すれば、ガスの除去がむつかしい上、いったんハーロー領域にガスが溜ってから円盤へ落下するもの(これが渦状銀河)、銀河間相互作用などで除去されてしまうもの(SO 銀河)というモデルも考えられる。

いずれにしてもこれらの理論は、銀河は環境により性格は変わりうるという“氏より育ち”式の発想に立脚しており、銀河研究の一つの方向を示唆しているものと思われる。さらに言えば、我々の銀河円盤部の体積の相当部分が高温 ($\geq 10^5 \text{ K}$) ガスで占められていることが指摘されている。この場合、高温ガスは円盤部からハーロー領域へ逃げ出してゆく。と同時に、銀河間ガスの圧力をうけて押し流される。その結果、2つのガス成分が衝突する前方領域では、ガスは冷却され熱的不安定でフィラメントや HI の橋ができ、後方領域は押し流されて尾を引く X 線輻射として観測される可能性もある。少なくとも、銀河円盤の上、下で異った姿をみせている銀河は多く見つけられており、内的要因と環境要因がからみあった現象も期待される。今後、より遠方の銀河を、より詳細に観測することによって、このような多様な現象が確認されることになるだろう。