



銀河形成問題の行方

～宇宙論から位置天文まで～

郷 田 直 輝

〈国立天文台 位置天文・天体力学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: naoteru.gouda@nao.ac.jp

銀河の形成問題は、昔から多くの研究者が挑んでいる、未だ解決していない天文学の重要な問題である。しかし、20世紀後半、特にごく最近の飛躍的な観測の発展やコンピューターの進歩により観測、理論ともに研究が進んできている。また、日本でもすばる望遠鏡による観測をはじめ、Astro-FやLMSA計画等では原始銀河の探査や、銀河進化の直接的観測が大きな目標の一つとなっている。これからの数年～十数年の間に観測がさらに飛躍することが期待されている。

そこで、世紀末を迎えるにあたり、今までを振り返り、銀河形成問題で何がどこまで分かってきているのか、また今後はどうなるのか、どうすべきなのかを考えてみるよい時期でもある。本稿では、銀河形成に関する現在の（個人的偏見は多少入るが）標準的なシナリオや解析方法を紹介する。さらに、銀河形成問題が如何に宇宙論から位置天文学に至るまで幅広く関わっているか、すなわち、銀河形成の解明のためには天文学の様々な分野の総動員が今後益々必要であることを力説するとともに、今後の戦略を考えてみることにする。

1. 序章

銀河がいつどのようにしてできたのかという銀河形成問題は、昔から多くの研究者を魅了し続けている課題である。銀河は、宇宙全体での基本構成要素であり、その形態やサイズ、色などは多様である。銀河の姿に美しさや神秘さを感じるとともに、その起源や進化に関する謎を解き明かしたいという誘惑をわき起こしてくれる。さて、本稿では銀河形成にまつわる昨今話題をいくつか簡単に提供するとともに、今後の展望についても語りたい。特に、銀河形成問題の解明のためには、天文学の多くの分野の動員が必要であり、様々な分野の研究者が関わる必要があることも力説したい。そういう意味も込めて、標題に宇宙論から位置天文までというサブタイトルを付けた。

さて、ご存じのように銀河形成に関わるここ最

近の観測、理論の発展は著しい。特に、観測に関しては、日本でもすばる望遠鏡の稼働をはじめ、今後もAstro-F (IRIS) やLMSA計画といった、いくつかの異なった波長での原始銀河探査や銀河進化の直接的観測が計画されている。まさに、銀河が“生まれる”ところが見られるかもしれない。しかし、銀河形成は後述するように、宇宙進化の中で様々な物理過程が非常に複雑に絡まっている。従って、観測データをただ単に眺めていても何も出てこない。つまり、観測データから何を読みとるか、自分なりのシナリオやモデルを用意しておく、その基準で読みとらねばならない。例えば後述するように、銀河の“年齢”といっても自分の思い描いているシナリオやモデルに応じて“年齢”の定義が異なる場合もある。今後、より大量かつ良質の観測データが増えてくることは確かではあるが、一般的に言って、観測データに対してそれら

を“謙虚”に眺めていてもそれらは何も物語ってくれない。そこで、我々はある良い意味での“偏見”というか、作業仮説をたて、それをどのように観測データを使って検証するのか考えていく必要がある。ただし、その“偏見”がどうもうまく検証されないとき、これを棄却するなり、修正するなりの謙虚な態度が必要であるのは言うまでもない。ただ、この“偏見”がたとえ、真実でないことが分かっても、この“偏見”が長続きすればするほど、その学問分野の進展に大きく貢献することになる。そこで、ここでは銀河形成に関しての私自身を含め、多くの人が現在抱いている“偏見”について説明することとする。

2. 宇宙における階層構造と重力不安定説

先ず、銀河形成にいく前にこの宇宙に存在する構造を見てみる。宇宙には、惑星や恒星、高密度星、そして太陽系などの惑星系といった比較的小さなスケールのものから、段々と大きなスケールへと目を移すと、星団、銀河、銀河群、銀河団、超銀河団といった広大なスケールに構造が存在し、いわゆる階層構造をなしている。密度でみると、例えば高密度の中性子星から低密度の超銀河団までなんと、45桁近くも開きがある。また、惑星系、星団や銀河内での星の分布と運動、銀河群や銀河団内での銀河の分布と運動は似通っている。もちろん詳細は、構成要素の数、形成過程と環境などが影響して異なるが、基本的にはお互いの重力によって全体として束縛されながら、運動しており、どれも似た構造である。つまり、入れ子構造をなしている。このような特徴をもった階層構造が存在する物理的原因は本質的には重力である。重力が、ベキ則に従う力をもっていて(スケールフリー)、デバイ遮蔽を伴う電磁気力とは違って、実際的に長距離力であることに起因し、広大なスケールに渡り入れ子的な階層構造が存在できる¹⁾。しかし、

実際には星や銀河といった特定の天体には典型的なサイズが存在する。このサイズの決定には、重力以外の力が介入するからである。例えば、ガスの輻射冷却といった電磁気力が関与するためである。では、宇宙が進化する中で実際に、これらの構造は如何にして形成されてきたのであろうか。銀河に関していえば、これがまさに銀河形成問題である。現在の多くの人が抱いている“偏見”は重力不安定説である。つまり、宇宙は十分昔、一様等方に物質が分布していたが、何らかの原因で密度の空間的なむらむら(ゆらぎ)が生じ、密度が高いところが自らの重力によって密度が大きく成長していく。そして、ついには構造が形成されたと考えるシナリオである。銀河の形成もこの枠組みの中で考えられている。さて、宇宙膨張の時間尺度を表す赤方偏移 z に関して、昔は観測で高赤方偏移といえば、高々 z が1を思い描いていることが多かったが、最近では、 $1 \lesssim z \lesssim 5$ あたりの銀河での星生成率史が示されたり、また z が6を超える銀河まで見つかったという報告もある。宇宙の再イオン化も z が5までには達成していそうである。さらに、最初に輝いた天体(まさに原始銀河)は z が10を超えると考えられている。このように、観測的にも銀河はずいぶんと昔からでき、そして進化していることが明らかにされつつある。従って、当然ながら銀河形成は、宇宙全体の進化の枠組みの中で考えなくてはいけない。そこで先ず、宇宙全体の進化を記述する宇宙モデルとそのモデルに含まれる宇宙論パラメータについて若干ふれておく。

3. 宇宙モデルと宇宙論パラメータ

宇宙全体の進化を記述する標準的なモデルは、フリードマン(・ルメートル)モデルである。このモデルでは宇宙が大局的には一様・等方であり、物質と輻射(あとあるとすれば、宇宙項を生じさせるエネルギー場)で構成されている。そして、このモデルでは、アインシュタインの重力場方程式は、宇宙膨張の進化の様子を表し、次のようになる²⁾。



$$H^2 \equiv (\dot{a}/a)^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (1)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3} \quad (2)$$

ここで、 a は宇宙の膨張を表すスケールファクター、 ρ は宇宙の（物質と輻射の）平均密度、 P は圧力、 K は空間の曲率である。また、 Λ は宇宙定数、 G は重力定数、 \dot{a} は a の時間微分を表す。さらに、ここで光速 c は 1 としてある。この方程式は特にフリードマン方程式とも呼ばれるが、この方程式には観測からその値を決めるべきパラメータが 5 つ含まれている。それらは、 $H_0 \equiv (\dot{a}/a)_0$ 、 $\Omega_M \equiv \rho_0/\rho_{crit}$ ($\rho_{crit} \equiv 3H_0^2/8\pi G$)、 $\Omega_K \equiv -K/(H_0 a_0)^2$ 、 $\Omega_\Lambda \equiv \Lambda/3H_0^2$ 、 $q_0 \equiv -(\ddot{a}/a)_0$ である。ここで 0 の添え字は現在時刻での値を示す。 H_0 は、ハッブル定数とよばれ、現在の宇宙の膨張率を表す。また、 ρ_{crit} は、宇宙定数がない場合、ちょうど宇宙が平坦な宇宙（空間曲率 K がゼロの場合）になる密度で、臨界密度と呼ばれる。従って、 Ω_M は宇宙の平均密度とその臨界密度との比を表すパラメータで密度パラメータと呼ばれる。 Ω_K は（規格化された）宇宙空間の曲率、 Ω_Λ は規格化された宇宙定数である。 q_0 は、現在宇宙の膨張が減速膨張 ($q_0 > 0$) か、加速膨張 ($q_0 < 0$) かを示すものである。これら、5 つのパラメータが宇宙論パラメータと呼ばれるもので、これらのパラメータ値を決めれば、フリードマン方程式を解くことにより、宇宙の進化が決定する。その値は観測から決めるべきものであり、様々な試みがなされてはいるが、後述するようにまだ完全に確定はしていない。ところで、(1) と (2) 式に現在時刻での値を代入し、 $\rho_0 \gg 3P_0$ の関係を使うと、次式が得られる。

$$\Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda = 1 \quad (3)$$

$$q_0 = \frac{\Omega_M}{2} - \Omega_\Lambda$$

このように、パラメータ間の関係が 2 個あるので、独立なパラメータは結局 3 個となり、普通、 Ω_M 、 Ω_Λ 、 H_0 がよくとられる。ところで、(3) 式の関係は、最近 “cosmic triangle” と呼ばれ³⁾、図 1 のように 3 つのパラメータの値の関係が正三角形上に描かれる。図 1 上には、パラメータの値に応じて宇宙がどのように進化するのか、いくつかの領域に分けられている。

さて、これらのパラメータの値は観測的にはどうなっているのだろうか。最近の “流行” は、 H_0 は 60 ~ 80 km/s/Mpc、 Ω_M は、0.2 ~ 0.4、 Ω_K は、ゼロあたり、つまり Ω_Λ は $1 - \Omega_M = 0.6 \sim 0.8$ あたりという値に収束しつつある。宇宙背景輻射の温度ゆらぎの観測情報から、 $\Omega_K \sim 0$ が示唆され、最近の Ia 型超新星の赤方偏移とみかけの等級との関係から加速膨張が示唆されている。また、銀河団の観測など、いくつかの観測結果と理論モデルを総合すると Ω_M 、 Ω_K 、 Ω_Λ は前述した値の範囲となる³⁾。すると、普通の物質（バリオン）の密度パラメータは、宇宙初期での軽元素合成の情報から、 $\Omega_B \sim 0.02h^{-2}$ (h は H_0 を 100 km/s/Mpc を単位として測ったもの) であるので、 h が 0.6 ~ 0.8 をとると、どうしても $\Omega_M > \Omega_B$ となり、両者には開きがある。この間を埋めるのがいわゆる “ダークマター” と呼ばれ、冷たいダークマターと呼ばれる種類のダークマターの存在が有力視されているが、まだ正体は不明である。またさらに、宇宙が平坦 ($\Omega_K \sim 0$) ということから、 Ω_M 以外にエネルギーを持つ “ダークエネルギー” の存在が要求される。宇宙定数ももちろんその一つであるが、必ずしも時間的にエネルギー密度が一定である必要はない。

さて、パラメータ値が収束しつつあるが、不定性はまだまだあると思う。つまり、系統的な誤差が各々のパラメータを決定する観測や理論モデルにつきまとっているためである。宇宙論パラメータ値の不定性は、当然、宇宙進化のなかで生まれる銀河の形成・進化の問題の不定性の原因の一つとなる。しかし、今後様々な多角的な観測により精度良く

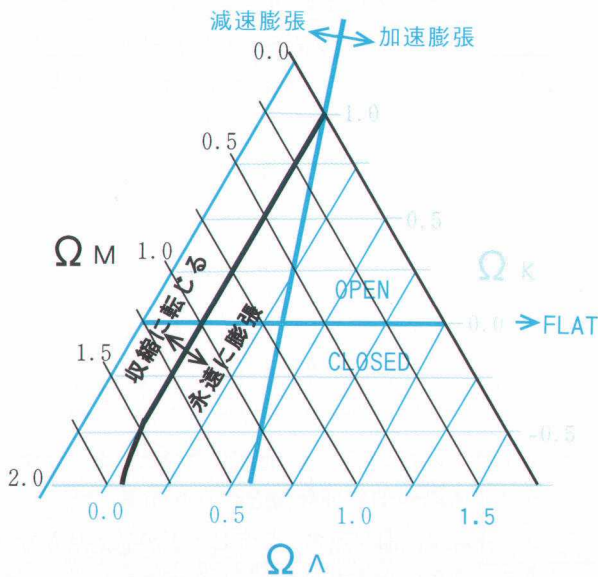


図1：3つの宇宙論パラメータ $\Omega_M, \Omega_K, \Omega_\Lambda$ の値を正三角形上にプロットしたもの (Cosmic Triangle). 宇宙の進化の様子が、パラメータの値に応じて、どのようになるか領域に区切られている³⁾.

パラメータ値が絞り込めていく期待もてる。

ところで、ハッブル定数の現状をみている。ハッブル宇宙望遠鏡での遠方銀河内のセファイド変光星の観測による距離測定に基づくハッブル定数は最近では、

$H_0 = 72 \pm 5$ (ランダム) ± 7 (系統的) km/s/Mpc という値が出された⁴⁾。この系統的誤差の中には、大マゼラン星雲までの距離が5%の誤差しかないという結果を用いている。ところで、初めての位置天文観測衛星であるヒッパルコス衛星によって年周視差が従来の地上での観測と比べて画期的に精度良く分かることになった⁵⁾。しかし、このヒッパルコス衛星の観測データを用いて、大マゼラン星雲までの距離を解析した結果は、解析手法により、距離にして約20%の開きがまだある。にもかかわらず、論文(4)で使った距離評価で、誤差が5%で収まっているのは、いくつかの独立な結果を平均操作したもので、誤差の評価には疑問が残る。従って、大マゼラン星雲までの距離を土台にして遠

方銀河の距離を推測し、ハッブル定数を求めている場合、ハッブル定数が10%以内で決定しているとは言い難い(10%以内の誤差に押さえたいのは、そうなれば、宇宙年齢の制限から、 Ω_Λ の存在に強く制限をつけることができるからである)。さて、解析手法により20%も開きがある理由は、ヒッパルコス衛星は確かに画期的ではあったが、まだまだ精度が不足しているからである。ヒッパルコス衛星の精度では、年周視差による距離測定の誤差が10%以内となるのは我々から100pc以内の領域にすぎない。ところが、セファイド変光星やRR型変光星といった良い距離指標である変光星は100pc以内にはほとんどない。従って、変光星で精度良く距離が直接得られているものは少ない。しかし、統計的に有意に解析するためにはサンプルが多数必要なため、ある程度精度が悪いデータも取り入れるが、その際の統計的処理や解析手法が人に依って違うため、

大マゼラン星雲の距離に関して食い違いが生じてしまうのである。従って、距離測定は、ヒッパルコス衛星より精度良い、将来の高精度位置天文観測に期待がかかっている。これについてはまた後述べる。

4. 宇宙進化における構造形成

さて、構造形成の話に入る。前述したように、銀河や宇宙の大構造は、フリードマン宇宙モデル(一様・等方宇宙)を無摂動状態として、そこに小さな密度ゆらぎ(摂動)が加わり、その密度ゆらぎが重力不安定性により成長して、構造が形成されたと考えられている。理論的には、初期の密度ゆらぎを仮定し、その成長を解析する²⁾。宇宙の晴れ上がり時(水素の再結合時直後)以前は、物質と放射は強く相互作用しあっているが、その時期は、ゆらぎは十分小さく、線形摂動解析で十分である。晴れ上がり時以後は、物質の方は放射からの圧力の影響を受けにくくなるので、ジーンズスケ



ールが下がり、それ以上のスケールをもったゆらぎは、自由に重力成長できて、非線形成長の段階に入っていく、銀河ができてくる。一方、超銀河団スケールでは、現在ようやく準非線形成長段階といえる。そして、輻射のゆらぎの方は、現在宇宙背景輻射 (CMB) の温度ゆらぎとして観測される。これらの密度ゆらぎの重力的な成長過程は、ゆらぎの初期条件はもちろんのこと、宇宙論パラメータ、ダークマターの性質と密度に密接に関わってくる²⁾。これらのパラメータ等を適当に仮定して、理論的に評価した構造形成や天体の分布、CMB の温度ゆらぎを観測量と比較することにより、宇宙論パラメータ、初期条件などを制限していく手法が用いられている。しかし、物質のゆらぎが非線形成長段階において、実際に銀河ができる過程は後述するように、非常に複雑であり、まだ完全に理解されていない。ところが一方、大構造の方は、ダークマターによる重力成長の過程が本質的であるので、銀河自体の形成に関しては仮定を用いざるを得ないが、比較的理論的評価がしやすい。ところで、1992年のCOBE (宇宙背景輻射探査衛星) による宇宙背景輻射の温度ゆらぎの発見は、先ず密度ゆらぎが実際に宇宙初期に存在したことを実証したことになる。従って、重力不安定説を強く裏付けるものとなった。また、いくつかのインフレーションモデルが予測するように、初期の密度ゆらぎは、ゆらぎのフリーエ成分の自乗平均がハリソン・ゼルドビッチスペクトルに従う、ランダムガウシアン分布になっている可能性が高いことも明らかになった。このCOBEによる結果および銀河の分布や固有速度等の観測情報から、理論モデルとの比較により、冷たいダークマターとよばれるダークマターが宇宙の重力を支配しており、宇宙論パラメータが $\Omega_M h \sim 0.3$ となっているモデルが強く示唆されている⁶⁾。しかし、もちろんまだ確定的ではない。他のいくつかのモデルも考えられている。ただ、銀河分布やCMBの温度ゆらぎなどの観測情報から得られる、宇宙の

晴れ上がり時の密度分布に従えば (冷たいダークマター入りの構造形成モデルが予測するように)、ダークマターは小さいスケールのゆらぎから重力的に収縮し、ビリアル平衡に達した天体 (ダークハローと呼ばれる) が形成され、時間が経つにつれ、より大きなスケールのダークハローが階層的にできていくことがもっともらしいと考えられている (階層的集団化説)。最近の観測による、銀河が非常に早くからできているらしいという結果から考えても、この説は妥当と言えよう。

余談であるが、かつて熱いダークマターによるパンケーキシナリオ説と、前述した冷たいダークマターによる階層的集団化説との対立があった。パンケーキ説は、旧ソ連のゼルドビッチが唱えたものであり、大きなサイズのゆらぎが先ず成長し、パンケーキ状になる。もし、熱いダークマターの質量が適度だと、ちょうど超銀河団スケールに対応する“パンケーキ”ができる。その後、パンケーキが分裂し、銀河が生まれると考える説である。現在、この説は観測結果から旗色は悪く、アメリカのピーブルスが初めて唱えた階層的集団化説に比べて廃れてきてしまった (個人的には、パンケーキ説の方にも物理的興味はあるのだが)。この2説の対立時期は、まさに旧ソ連とアメリカの冷戦時期と重なり、階層的集団化説の優越性が生まれてきたのがソ連崩壊による冷戦終結と時が近いのは歴史の偶然とよぶべきかもしれないが。

また、COBEによる温度ゆらぎの発見以前は、重力不安定説自体が何度も危ぶまれた。密度ゆらぎがあれば、温度のゆらぎもあっていいはずなのに、なかなか発見されず、しかも上限値が年々減少していたからである。ビッグバンモデル自体は揺るぎないはずなのだが、重力不安定説に対する問題点から、罪のないビッグバンに対して、“ビッグバンの危機”とまで言われた。また、重力不安定説以外の様々な (異端な?) 構造形成モデルも提案された。理論家は、こういう危機の時にこそ、大いに楽しむのかもしれない。しかし、COBEによる温

度ゆらぎの発見以後は、重力不安定説が、主流派を占め、他の説は亜流となって今日まで至っている。

5. 銀河形成のシナリオ

5-1. 階層的集団化説に基づくシナリオ

さて、いよいよ銀河形成に関する現在我々が抱いている“偏見”について話すこととする。重力相互作用のみを行うダークマター天体は、前章で述べたように階層的に重力成長していくが、バリオンガスからできる“銀河”はこのように単純ではない。ガスは電磁相互作用もするからである。ダークハローができるときに（ゆらぎのサイズがジーンズ波長より長ければ）バリオンガスも同様に重力収縮し、力学平衡に達する。しかし、このままではガスの温度は高く、また密度は低くて、銀河ほどコンパクトではないし、しかも星が生まれない。そこで、ガスの熱エネルギーを輻射過程（すなわち、電磁相互作用）によって抜く物理過程が重要な

る。輻射による冷却過程が効く場合は、ガスがより冷えて濃密になり（原始雲の誕生）、場合に応じて、星が誕生し（金属がなく、まさに一番星なのがPopIII）、めでたく銀河の誕生となる（原始銀河）。しかし、ガスが力学平衡にある状態（質量、力学平衡に達した時刻など）によっては冷却が効かず、従って星ができない場合もある。また、QSOからの紫外線輻射による熱化の影響がある場合もある。さらに、いったんできた星が超新星爆発を起こし、その効果により、まわりのガスが温められ、新しい星が出来にくくなるといったフィードバック効果もある。また、星が実際どのように形成されるかも難問である。さらに、ダークハローの成長（合体と降着）により、銀河雲や銀河同士の衝突・合体もある頻度で起こる。そしてさらに、銀河内の力学進化、星の進化に伴う星の種族の変化や化学進化（銀河の色に影響）など、現在の銀河になるまでには非常に複雑な過程を経なくては行けない。これが、現在描かれている銀河の形成・進化の“標準的”

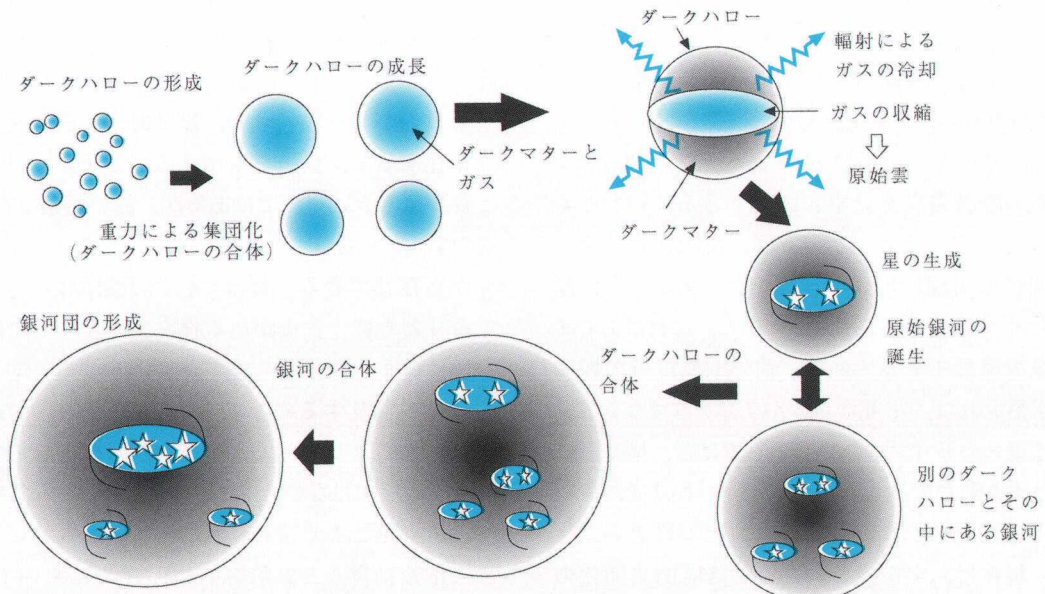


図2：階層的集団化説に基づく銀河形成のシナリオを模式的に描いたもの⁷⁾。



な描像である。以上の様子をイメージ化して書いた模式図が図2である⁷⁾。

5-2. 伝統的モデル

さてここで、最近、“伝統的モデル”と呼ばれるようになってきた銀河形成の以前からあるモデルとここで述べた階層的集団化によるモデルについて私見をコメントしておく。伝統的モデルとは、銀河はすべてある時期の短い期間に一斉に生まれたと仮定する。そして、楕円銀河は、急速に星を形成し、渦巻き銀河は徐々に星形成が起こったと考える。また、超新星爆発に伴う銀河風の効果によるガスの放出により、星形成が抑制されるというフィードバックの効果を取り入れる。このモデルで、楕円銀河の年齢が古く、しかも年齢のばらつきが小さいと考え、銀河風の効果を考慮して進化を追うと、大きく明るい楕円銀河と小さく暗い楕円銀河に金属量の違いが生じる。そのことによって、例えば銀河団中の楕円銀河の色-等級関係（明るい銀河ほど赤い）が、見事に説明される。一方、階層的集団化モデルは、銀河が同時期に形成されたとは考えない。しかも、衝突合体によって、小さい銀河からより大きい銀河へと通常進化したと考えている。従って、これらの2つのモデルは“対立”しているとよく言われる。しかし、筆者はこれは“対立”ではなく、アプローチの違いと考える。伝統的モデルは、ある観測事実を見事に説明できる、いわゆる現象論的モデルである。例えば、楕円銀河の色-等級関係の物理的原因の本質をとらえることに成功したと言って良いだろう。しかし、これはあくまでも現象論的モデルである。前述した最近の観測結果を信じれば、密度ゆらぎがランダムガウシアン分布に従い、サイズの小さいゆらぎほど、早く形成していくことがもっともらしい。違ったサイズの銀河がほぼ同時に形成される確率はゼロに近い。従って、現在は、宇宙進化における階層的集団化のシナリオに立って、描像を描いていかななくてはならない。ただ、伝統的モデルが発展した70年代、80

年代は前述したように、観測事実もまだ乏しく、様々な大構造形成モデルがとびかっていた時代である。このような時代では、宇宙論的なシナリオの枠組み内で考えるというよりも、伝統的モデルのような現象論的なアプローチをとるのが成功であったと思える。従って、今後考えるべきことは、観測事実を説明するためにこの伝統的モデルで入っていた効果が、“実際”の階層的集団化モデルで、どのような効果に相当するのか、そのあたりを調べていく必要があると思われる。実際、我々は楕円銀河の色-等級関係が階層的集団化モデルでも得られること、またどのような効果によって観測を再現することができるのかを解析した⁸⁾が、今後も銀河の形態決定の物理過程等に関してさらなる解析が必要であろう。

5-3. 階層的集団化説の“本当”

さて、ここで階層的集団化説に対してよくある誤解について述べておく。先ず、この説では、大きいサイズの銀河は最近“出来る”，従って、若い星が多く、青い銀河になると一見思われる。しかし、これは銀河同士の衝突合体を考えれば必ずしもそうではない。昔に出来た小さい銀河が合体を繰り返してバースト的星形成を起こし、銀河の質量も大きくなっていけば、昔に出来た古い星も多く存在するし、金属量も増える。すると、サイズと質量は大きい銀河ではあるが、赤い銀河となる。このように、質量はあとから大きくなるが、星は古くから存在できる。従って、ある銀河の“年齢”を言うときに、質量がある程度大きくなった時期を言うのか、今存在して輝いている星の平均年齢について言及するのかが、銀河の年齢は異なる。このようにシナリオによっては銀河の年齢の定義は、一意的ではない。さて、一方、小さい銀河は、昔に出来たとよく言われるが、これも間違いである。正確に言うと、階層的集団化説においては、小さいサイズの密度ゆらぎの“分散”が、(過去では大きいサイズのゆらぎの分散よりも)大きいこと

銀河形成の“レシピ”

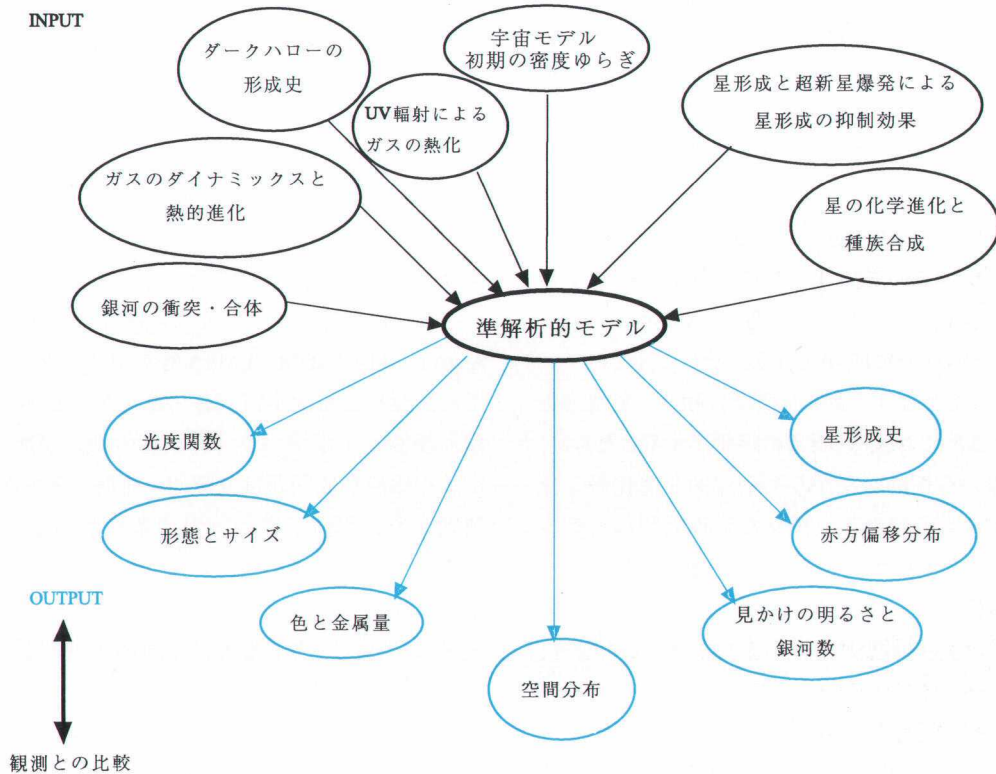


図3：準解析的モデル（SAM）の働きを表すレシピ

を意味し、確かに、小さいサイズのゆらぎが昔に大きい振幅を持つ場合も多いが、逆に小さい振幅を持つゆらぎも多く存在している。それらは、現在付近に銀河として形成される。むしろ、昔に形成されたものは、合体の効果でより大きい銀河へと進化している可能性が高い。また、重力収縮で昔に銀河雲になっていても、QSOからの紫外線放射の影響で、小さい銀河雲ではガスがよく温められて星が出来ずに、紫外線の影響がなくなった最近になって、星が出来て、銀河として認識される可能性もある。このように、小さな銀河は最近でも誕生できるのである。また、さらには、階層的集団化説では合体、合体と言われるが、確かにダークハロー

は、合体、もしくは降着により大きくなっていくが、銀河自体は必ずしも合体をするとは限らない。合体を全く経験しない、もしくはわずかな小規模な合体しかなく、その形成過程が単独の重力収縮のモデルでよく記述できる銀河も存在は可能である。このように階層的集団化説と一口に言っても、いざ銀河の形成・進化に関しては多様であることに注意すべきである。

5-4. 銀河形成の解析方法

では、このような複雑な銀河の形成問題を如何に解析したらよいのだろうか。当然ながら銀河形成に絡む前述した個々の物理過程に関する解析を進



める必要がある。日本でも、原始星の形成や輻射輸送など銀河形成に密接に関わるいくつかの分野で精力的に研究が行われている。さらに、これらの物理過程が如何に有機的につながり、銀河のどういう量にどのように影響するのか、また全体的なシナリオの是非をみていくことも重要となる。もちろん、それにも数値シミュレーションは重要なアプローチであるが、まだまだ分解能の問題など精度の問題がある。そこで、シミュレーションとは相補的なアプローチとして、最近、準解析的モデル (SAM) と呼ばれる手法も注目されている^{8),9)}。このアプローチでは、解明されていないいくつかの物理過程を、簡単にモデル化して取り入れる。そして、そのモデルに含まれるパラメータ等を様々に動かして結果をみてやることにより、観測量の評価をするとともに、物理過程の有機的つながりや全体的な進化の変化を解析するものである。様々な物理過程のモデルをインプットすると、アウトプットとして知りたい銀河の観測量を得ることができる (図3を参照)。また、この手法は観測と理論との橋渡しともなり、得られた観測結果が意味すること、またどういう観測を行えば、どういう物理過程やモデルに制限をどの様につけることができるか示唆を与えてくれるものである。一見、おもちゃのモデルのように見えるが、使い方次第では、銀河形成解明に対して重要な戦略となる手法である。もちろん、今後個々の物理過程のモデルの改良や観測との比較、数値シミュレーションによる定量的結果との比較を通じて、SAMを徐々に改良していかなければならない。このように観測、SAM、数値シミュレーション、個々の物理過程の解析を結ぶネットワークを通じてお互いよいフィードバックをかけあい、一步一步前進していく必要がこれからもあると思われる。

5-5. 銀河形成に関する展望

では、観測との比較であるが、これだけ多くの物理過程 (宇宙論から星形成まで) が複雑に絡むと、一つの観測結果を与えるモデル、パラメータの値の

範囲は数多く存在する可能性がある。つまり、多くの場合、一つの観測結果を説明可能なモデルが、たくさん縮退している。モデルの縮退した糸を解きほぐしていくために、SAMや数値シミュレーションによる解析を行うわけである。何をどう観測すれば、すばっと、糸がほどけて快刀乱麻を断つことができるのかを考えだすのが夢である。しかし、銀河形成はあまりにも多くの未知の糸が複雑に絡んでいるので、実際は地道に多角的に様々な観測により精度良い情報を得て、モデルを解析し、一本一本解きほぐしていく努力が必要となるかもしれない。

さて、観測的には、今後もHSTやすばる望遠鏡、Astro-F、MAGNUM、LMSA等を用いた様々な波長での観測による深宇宙天体の直接的な観測、原始銀河探査、宇宙論パラメータ値の測定が進み、宇宙論や銀河形成問題は飛躍的に発展するであろう。前述した、銀河形成の縮退の糸を解くためには、このような今後の高精度観測が必要なことは言うまでもない。さて、遠く昔の銀河を見て、良質の大量の観測データをもとに銀河の光度関数のような統計量の情報を得ることが今後も重要であることは間違いないが、我々の銀河系近傍の矮小銀河の情報も今後は重要でかつ興味深い。矮小銀河は個数的には、この宇宙に最も多く存在する。明るく大きな、いわば“エリート”の銀河は目立つので、今までは着目され続けてきたが、いわゆる“庶民”である矮小銀河の歴史を知らなければ、本当の意味での歴史を知ることにはならない。つまり銀河の形成・進化の完全な理解はできないであろう。今後の大望遠鏡によって可能となる詳細な矮小銀河の観測により、矮小銀河の星形成史や力学構造を解明していくことも銀河形成問題にとって重要でかつ興味深いであろう。

5-6. 高精度アストロメトリ観測

さらに、忘れてならないのが、宇宙論パラメータや星形成など銀河形成に関わるいくつかの重要なプロセスを解明するためには、前述の銀河の直接



的な観測だけでは不十分であるということである。ハッブル定数などの宇宙論パラメータ、また星形成に関しては、星生成率、初期質量関数等が重要な鍵となる情報量だが、これらを解明するには、ベースとなる高精度なアストロメトリ（位置天文）による星の距離決定が必要となる。これにより、変光星の周期—光度関係のより正確な関係式や、HR図が精度良く分かり、上述した鍵となる情報量の解明につながるからである。さらに、我々の銀河系も特別ではない限り、他の普通の銀河と同様の形成・進化過程を経ているはずであり、まさに銀河形成の“化石”を我々の銀河から得ることができるとも思われる。その一つが、ダークハローの力学構造（ダークハローや銀河が合体した痕跡が見つけれられる）であり、また、さらにハローやディスク、バルジ内のそれぞれの星の特徴でもある。それらを知るためにも、銀河系内の星の位置、距離、運動の精度良い情報が必要であり、高精度なアストロメトリの観測を必要とする。このように、宇宙論や銀河形成とは一見、無関係に思える星の位置、距離、運動の測定が宇宙モデルや銀河形成の解明のためにも重要となるのである（ハローの観測に関しては、ハローの力学構造や緩和過程とカオス等の非線形物理学との結びつきという点に対しても筆者としては大変興味をもっている）。このように観測に関しても、当然ではあるが、ある特定の観測だけで、銀河の形成・進化はすべて明らかになるわけではなく、あらゆる天文学の観測を動員して結びつけることが今後、益々重要であると考えられる。アストロメトリもヒッパルコス衛星よりさらに精度が良い観測が強く望まれる。ヒッパルコス衛星は確かに革命的ではあったが、まだ小さな革命にすぎない。大きな革命が今後必要である。銀河形成や宇宙論を含む天文学の様々な分野にブレークスルーをもたらすためには、年周視差および固有運動を10万分の1秒角程度以上の精度で測定する必要がある。それが実感として分かるのが図4（＝表紙）である。ヒッパルコス衛星は1000分の1秒角の精

度だったので、年周視差による距離測定が10%以内の誤差でできるのは、我々からわずか100 pc以内の領域に限られる。銀河系全体から見れば、ほんのわずかな領域である。一方、もし10万分の1秒角の精度が得られれば、我々から10 kpcにある星の距離を年周視差で10%の誤差で測定できる。固有運動だと、20 kpcの距離にある星の速度を1 km/sの誤差で測定できる。この距離まで行くと、銀河系のかなりの部分を覆い尽くせる。我々の天の川銀河の構造や様々な星の特徴が手に取るように分かる時代がくるかもしれない。このような高精度位置天文観測の計画は、電波では、国立天文台を中心にしてVERA計画が精力的に進行中である。VERAでは、メーザー源の位置、距離、運動を10万分の1秒角の精度で測定可能となる。一方、光のスペース干渉計の計画としては、NASAによるSIM計画（25万分の1秒角の精度で約1万個の星を観測）、ヨーロッパ宇宙機関（ESA）によるGAIA計画（10万分の1秒角の精度で約1億個の星を観測）が進行中である。さらに、ヒッパルコスとSIM、GAIAの間をつなぐものとして、アメリカの海軍天文台を中心としたFAME計画がある。2004年に打ち上げられることが、1999年10月に決定された。世界で初めてのスペース干渉計打ち上げとなる。ちなみにSIMは2006年あたり、GAIAは2009年あたりに打ち上げ予定ではあるが、まだ確定されていない（GAIAが打ち上げられるかどうかは、2000年9月頃決定の予定である）。FAMEでは、Vバンドで9等星までの星を約2万分の1秒角の精度で距離測定可能である。約2 kpcの距離にある星を10%の精度で距離測定が可能となる。銀河の全貌を明らかにすることはまだ出来ないが、天文学にとってかなり画期的な成果をもたらすであろう。例えば、前述したような興味ある変光星に関しては、精度良く距離決定できるサンプルがかなり増える。結果が楽しみである。さて、個人的見解ではあるが、今後は、可視光のスペース干渉計だけではできない、赤外線スペース干渉計による銀

ホールができて、QSOに発展したかもしれない。さらに、最初は星ができず、ライマン α の森であったものが、その後紫外線背景放射の強さが弱まることによって、ガスの冷却が可能となり、星ができて、最近に(矮小)銀河(faint blue galaxy?)になる場合も考えられる。従って、宇宙モデル、ダークマターの重力成長の過程とともに、様々な物理過程が銀河形成には絡んでくるが、銀河のみならず、QSO、ライマン α の森等の吸収線系も含めて、その形成と進化に関して統一的なシナリオを描くことが今後は必要であると考え。これらの関係を簡単に図式化したのが図5である。

以上、いろいろなことを綴ってきた。まとめると銀河形成は宇宙論から星形成まで様々な物理過程が絡む。その物理過程の解明が重要である。さらに、それらを結びつけるSAMや数値シミュレーションなどによる解析方法の発展も重要である。また、観測も様々な波長での遠方銀河やQSO吸収線系などの深宇宙天体の観測とともに近傍の矮小銀河の詳細な解析も重要と考える。さらには、高精度アストロメトリ観測も重要な地位を担う。本稿ではふれなかったが、もちろん、銀河団研究など他の様々な分野にも関係する。このように、天文学での様々な分野での研究を総動員して、一步一步、銀河の形成と進化の謎を追いつめていくことが重要だと感じる昨今である。

なお、本稿は去る1999年の秋、国立天文台および東京大学理学部天文学教室で行われた談話会での発表内容を基礎としてまとめたものであることを申し添えておく。

参考文献

- 1) 池内 了, 1995, 宇宙と自然界の成立ちを探る (サイエンス社)
- 2) 成相秀一・富田憲一, 1988, 一般相対論的宇宙論 (裳華房); 小玉英雄, 1991, 相対論的宇宙論 (丸善); 池内 了, 1997, 観測的宇宙論 (東京大学出版会)
- 3) Bahcall N.A., et al., 1999, preprint (astro-ph/9906463)
- 4) Freedman W.L., 1999, preprint (astro-ph/9905222)
- 5) 宮本昌典・辻本拓司, 1997, 天文月報8月号, 357頁
- 6) Turner M.S., 1998, preprint (astro-ph/9808149)
- 7) 郷田直輝, 1999, 数理科学4月号 (サイエンス社), 20頁
- 8) Nagashima M, Gouda N., 1999, MNRAS, submitted (astro-ph/9906184)
- 9) Kauffman G, White S.D.M, Guiderdoni, B., 1993, MNRAS 264, 201; Cole S, et al., 1994, MNRAS 271, 781

Future of Galaxy Formation Problems ~ from Cosmology to Astrometry ~

Naoteru GOUDA

National Astronomical Observatory, Tokyo 181-8588

Abstract: Problems of galaxy formations are one of the most important problems which many researchers have tried to resolve, but have never been resolved in astrophysics. However the progress of both observational and theoretical works on galaxy formations is remarkable. Furthermore it is expected that the future observations will help us to resolve the galaxy formation problems in a few years or a decade. Now it is a good period that we should think of the past, the present and the future status of galaxy formations. In this article, I introduce the standard scenario of galaxy formations and how to analyze the galaxy formations. Furthermore, I assert that many fields in astronomy, such as cosmology and astrometry, are related to the galaxy formation problems and we need progress in these fields in order to resolve the problems.