

銀河の進化と形成 (1)

太田 耕司

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 〒606-01 京都市左京区北白川追分町〉

銀河の形成と進化は、銀河天文学の根幹となる問題である。これまで、過去の銀河の姿を観測的に直接明かにすることは困難であった。しかし、100億年近く昔の銀河の姿を明かにする観測結果が、ここ数年で急速に蓄積され始め、銀河史を将に見てきたように語る事が可能になりつつある。ここでは、最近の成果を簡単にまとめて、銀河の歴史絵巻のスケッチを試みる。

1. みえてきた銀河の進化

人類が銀河を「系外銀河」として認識して以来約70年。その間、銀河天文学は数々の問題に挑んできたわけであるが、その最も基礎となる問題意識は、銀河の形成と進化であると言っても過言ではないだろう。私達の明かにしたいことは、現在多様な姿を見せている銀河が、どのように形成され、どのような進化をたどってきたのかということである。より具体的には、銀河はどのようなプロセスを経て誕生し、その形態はどのようにして決まり、あるいは変化してきたのか？銀河における星形成の歴史はどのようなもので、何が星形成率を決めてきたのか？星形成の結果として銀河の光度、色、化学組成等はどう変化してきたのか？銀河の数は変化してきたのか？等々の互いに関連し合った問題を明かにしたいわけである。また、これらの問題は、宇宙構造（ハッブル定数や減速パラメータ等）、宇宙の大規模構造、クエーサー（QSO）／活動銀河核（AGN）現象とも関連があるはずであり、その関係を探ることも極めて重要である。

上記の問に答えるためには、各時代毎の銀河の姿を明かにしてゆく必要があるわけだが、このような研究は10年位前には大変困難で、銀河の進化の直接的な証拠はほとんどつかめていないという

状態であった。ところが、ここ数年の間、銀河進化に関する観測的研究は飛躍的な進展をみせている。今や赤方変位(z)で2前後（減速パラメータ(q_0)を0.5、ハッブル定数(H_0)を $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とすると、今から約100億年前、宇宙誕生から約25億年の頃、以下この宇宙論パラメータを用いる）から現在に至る進化の様子が急激な勢いで明かにされつつある。銀河進化の分野はかつてない面白い時代に突入した感がある。

このような急激な展開の柱となっている観測は、1980年代後半以降から始まった、4mクラスの望遠鏡とCCDを用いた撮像による暗い銀河のナンバーカウント、そして多天体分光器による赤方偏移サーベイである。また、ここ2、3年では、ハッブル宇宙望遠鏡（HST）による高角分解能撮像観測の活躍がめざましい。更に、最近稼働した10m望遠鏡と多天体分光器の組合せで、今まで4mクラスでは手の届かなかったより暗く遠方の銀河の分光が可能となってきた。8-10m時代の幕開けである。

ここでは、最近の観測によって明かになりつつある銀河進化の様子と、さらに昔に遡った時代での銀河の様子—まだよくわかっていないが—をスケッチしてみたい。この分野の進展は将に日進月歩の観を呈しているので、1年後にはもう古い話になってしまう話題もあるかもしれない。しかし、

そんなことを言っていると、当分この分野の紹介はできないことになるので、原稿依頼を区切りに、思い切って簡単にまとめてみることにした次第である。

2. 銀河の数と光度関数

2.1 銀河の数かぞえ

地球上の単位立体角当りに存在する銀河のみかけの等級の頻度分布を調べることを「数かぞえ」(ナンバーカウント)という。一方、宇宙空間での単位体積中での銀河の絶対的な明るさの頻度分布を光度関数という。各時代での光度関数を明かにするためには、沢山のみかけの暗い銀河の分光観測を行ってその距離を知る必要があるが、このような観測は非常に困難である。(4 mクラスの望遠鏡なら $B=24$ 等位が限界である。)そこで、分光不可能な暗い銀河まで含めたナンバーカウントを行うことにより、銀河進化の謎に迫ろうという手法が登場する。(但し、宇宙論パラメータの問題ともカップルしている。)近傍の銀河の光度関数が決まり、銀河の光度進化をモデル化すれば(そして銀河が宇宙の中で一様に分布しているとする)、ナンバーカウントの結果を予測することができる。近傍の光度関数は従来からよく調べられているが、

まだ(ハッブル定数による不定性を除いても)多少の不定性が残っている。それ自身もむろん問題だが、光度進化も大問題である。光度進化を含めて銀河進化のモデルはいくつかあるが、これを用いて現実のナンバーカウントの結果を説明しようとすると、測光帯域(バンド)によって結果に矛盾が生じたり、分光可能な銀河のサンプルから得られている銀河の距離分布を同時に再現することができない等々の大きな問題があった。そこで、これらの問題を解決するために、銀河の数を時間的に変えたり、光度進化を銀河の光度に依存させたり、その1つのバリエーションとして現在は観測されない天体を過去に存在させたり、等々その他いろいろなアイデアのモデルが提案されており、観測的に実際の銀河進化を明かにしてゆくことが課題となっている。

最近 HST によって、銀河の形態別にナンバーカウントができるようになってきた。その結果、矮小不規則銀河も含めて形のはっきりしない銀河の数が、極めて多いことが明かになった¹⁾。銀河の進化がないとした場合のナンバーカウントのモデルと比べると、例えば $I=24$ 等ではモデルの10倍位の超過となる(図1)。また、これらの銀河の色は $V-I$ で非常に青く、星形成の活発な銀河である可

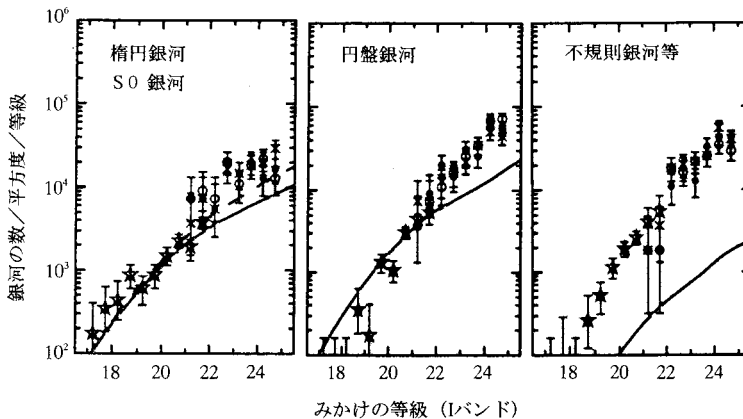


図1 ナンバーカウントの結果¹⁾。左から楕円銀河と S0 銀河、円盤銀河、不規則銀河や合体銀河等。実線は銀河進化なしの場合の各タイプ毎のモデル。(左の図の破線は宇宙論パラメータを変えた場合。)

能性が高い。残念ながら、赤方偏移はまだ不明なものがほとんどである。等級や色から、 $z=0.5$ 程度と予想されるものもあるが、もっと遠いものも混ざっているかも知れない。実際、 $z=1-0.8$ 程度の銀河団による重力レンズ効果によって、かなりの割合の暗くて青い銀河の形が歪んでいることが示されたので、これら歪んだ銀河は、銀河団より遠方に存在していることになる^{2,3)}。

さて、銀河の数が予想より多いということは、1つの可能性としては、近傍での銀河の検出が完全ではなく、近傍の光度関数が不完全である、ということが考えられる。実際、ごく近傍の表面輝度の低い暗く小さい銀河がいまだにみつかったりするので、この可能性はないとはいえ、その方面から原因を追求している人もいる。一方、もし本当に昔はこのような矮小不規則銀河のようなものが多かったとすると、なぜ現在その銀河が見られないのだろうか？ 銀河同士の合体で数が減ったのだろうか？ それならこれらの銀河はお互い合体しかかっているものが多くていいはずだが、この点はまだ矛盾する結果が報告されているだけで、決着はついていないようである^{4,5)}。或は、昔は星形成が活発だったのが、今はおとなしくなって、本当に暗い銀河となっているものが多いのかもしれない。しかし、先述したようにそのような銀河の検出は難しく、まだはっきりしたことはわからない。もし、ある時期に星形成が活発になったのなら、その原因は何か問題

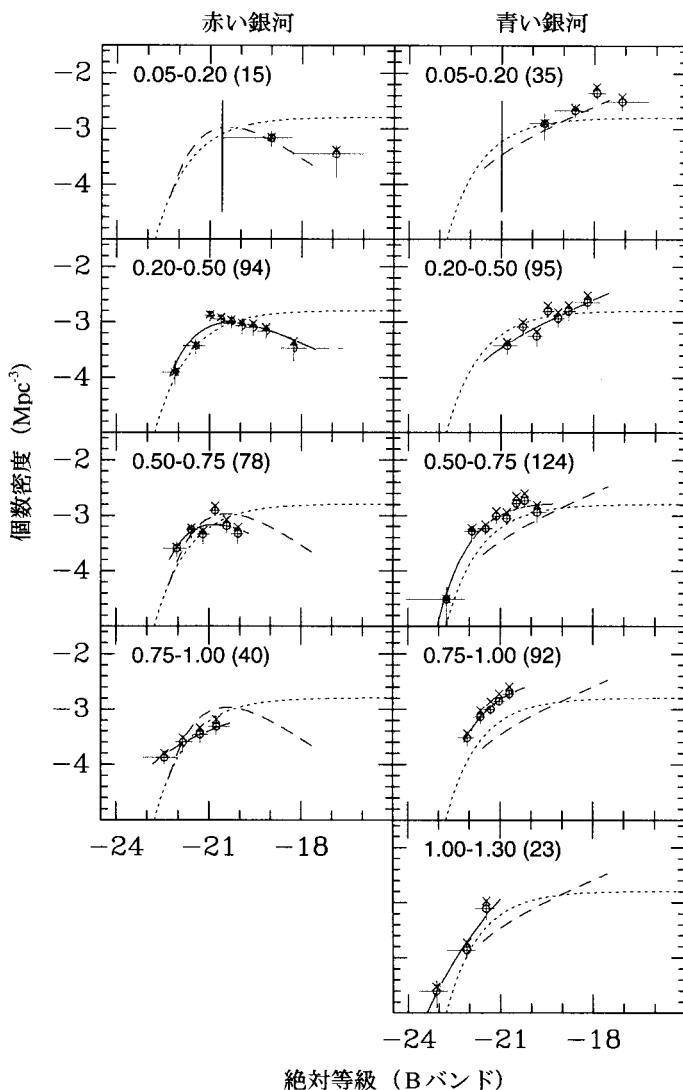


図2 銀河の色で分けた場合の光度関数⁶⁾。左が赤い (Sbcより赤い) 銀河、右が青い銀河。各図の左上に赤方変位の範囲と銀河のサンプル数が示してある。図中点線は近傍の光度関数であり、実線は、データ点がある関数形でフィットしたもの。破線は、 $z=0.20-0.50$ の時代でのフィットの結果。

である。ただ、このような不規則な形の暗い銀河の z が、どこかの z にそろっているとも限らず、全てを同じ原因で説明するのは適切ではないかもしれない。

2.2 銀河の光度関数の歴史

さて、しかし、現在では、上に述べたような暗い銀河までは手が届かないにしても、ある程度以上見かけの明るい銀河については、その距離を求めることができるので、各時代での光度関数が明らかになりつつある。その1つの結果として、赤い銀河(楕円銀河や早期型の円盤銀河と考えられる)では、 $z=1$ (今から約8 Gyr前)あたりまでさかのぼっても、光度関数に大きな変化は見られないが、青い銀河(晩期型円盤銀河や矮小不規則銀河等と考えられる)では、その頃までに既に光度関数の進化が見られることが明らかになった⁶⁾(図2)。彼らは光度関数の進化は色により、光度にはあまりよらないとしている。光度関数の進化は他のサーベイでも見られ⁷⁾、酸素の1階電離ガスからの輝線(3727 Å)の等価巾を星形成率の指標とすると、星形成の活発な銀河は、 $z=0.15$ から $z=0.4$ にかけて(この間約2.7 Gyr)既に進化が見られ(空間密度なら約2倍程度増加、光度なら約0.5等増光)、おとなしい銀河では有意な進化は見られない。

一方、HSTのデータと併せて、形態別に調べることも可能である。0.2< z <1.2までを3つの時代に区切って楕円銀河の光度関数を調べると、 $z=1$ までに光度が0.5等級明るくなっており、数の進化は見られないという報告もある⁸⁾。

この様に、光度関数は各時代毎に明らかになりつつあるが、図2からもわかるように、更にサンプル数を増やすことにより暗い銀河まで分光することが要求されていると考えられ、8-10 m望遠鏡の活躍が期待される。

3. 星形成の歴史

3.1 可視・近赤外域でみた星形成史

z をさかのぼると、銀河における星形成の規模(銀河全体での星形成率)はどうか変わるのだろうか? 但し、ここでいう星形成とは、可視や紫外領域での輝線や連続光の強度から推定されるもので、厳密には大質量星の形成だけを見ていることをあらかじめ断わっておかないといけない。低質量星の形成は近傍銀河でも未開拓の分野であり、遠方においてその形成率を測定することは今のところ極めて困難と考えられる。従って、本稿で観測量から算出される星形成率は、軽い方の星の存在量を太陽近傍での星の初期質量関数に従って導出したものであることは注意すべきである。(実際には $H\alpha$ の輝線光度から評価する場合は、ケニカットの式⁹⁾を使う事が多く、0.1太陽質量の星まで外挿している。)

3.1.1 銀河団中の銀河

$z=0.5$ 程度の時代(約6 Gyr前)まででは、ブッチャー・エムラー(Butcher-Oemler)効果という現象が、1980年代から知られている。これは、 $z=0.5$ 程度まで遡ると、リッチな銀河団では青い銀河の数の割合が増えていくという現象である。80年代では唯一と言ってもいいかもしれないが、銀河団中の銀河の進化の例となっていた。その後この傾向は確認され(例外もあるが)、現在では $z=1$ 付近まで見られることがわかってきている¹⁰⁾。

青い銀河の正体は、そのスペクトルから、スターバースト銀河やポストスターバースト銀河、及びAGNであると考えられている。このような爆発的星形成が起こる原因としては、銀河同士の相互作用と、銀河団中のガスと銀河の相互作用の主に二説ある。最近のHSTによる観測では、青い銀河の正体は、相互作用・合体銀河もあるが、晩期型の銀河も多いことが明らかとなった¹¹⁾。爆発的星形成の原因については、現在のところ銀河相互作用

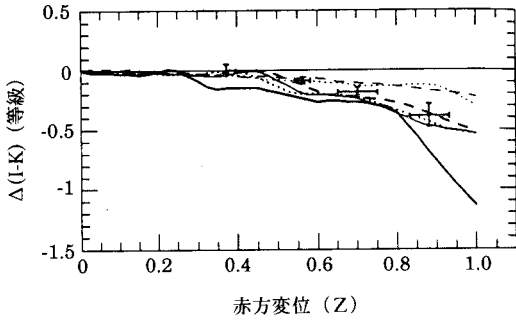


図3 楕円銀河の色進化¹³⁾. 縦軸は、銀河のその z におけるカラー (I-K) と進化が全くない場合のカラーの差を示している. 図中、十字がデータ点を表わしている. 実線は、銀河形成が $z=2$ で始まって、1 Gyr の間星形成を起こしてその後は星を形成しないという場合のモデルである. 2本あるのは $q_0=0.5$ と 0.0 のケースに対応している. 点線は、 $z=5$ で形成が始まる場合、破線は $z=10$ で始まる場合である.

用説が有力なようにみえるが、まだ完全に理解できたとは思えない. 実際、つい最近になっても、銀河同士の相互作用説の一つと捉えていいのだろうが、銀河同士の高速遭遇 (銀河ハラスメント) によるというような新アイデアも提出されてい

る¹²⁾.

銀河団中では、楕円銀河の数が多いが、これらが過去に遡っても同じ種類の楕円銀河であると想定すれば、これらを用いて楕円銀河の歴史を調べることができる. 遠方銀河団の中での楕円銀河の色-等級関係を調べると、 $z=0.8$ 付近まで遡っても、星形成の兆候はみられず、 $z=5-10$ で爆発的に星が形成されて、あとは、できた星の進化だけで光度や色が変わっていくという (受動的な進化) モデルで説明可能である^{10,13)} (図3). 最近では、 $z=1.2$ にある電波銀河 3C 324 のまわりに銀河団が発見され、この色-等級関係がまだみられている¹⁴⁾. $z=1$ 付近での銀河団はまだほとんど見つからないので、このような例を更に見つけることが重要である. 我々のグループでも現在 $z=1.1$ の QSO の周りを調べている.

3.1.2 フィールド銀河

以上は銀河団中の銀河の例であるが、フィールドでの銀河の星形成の歴史を系統的に調べることは、一般の銀河の進化を知るためには必須である. そこで一般のフィールドにおいて、近赤外の K バ

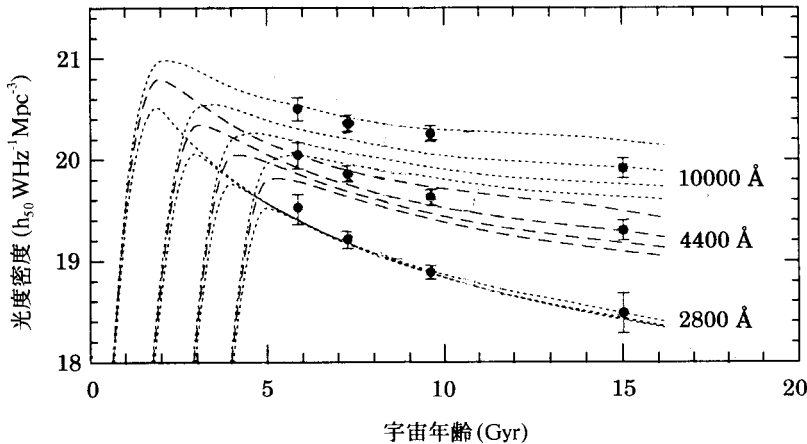


図4 宇宙の各時代における、10000 Å (オングストローム)、4400 Å、2800 Å での光度密度¹⁶⁾. 黒丸がデータ点. 点線と破線はモデル. モデルについては本文参照. 例えば、0.5 Gyr に形成が始まったモデルでは、上の点線は 10000 Å での、破線は 4400 Å での、下の点線は 2800 Å での光度密度の変化を表わしている.

ンドで銀河を選んでその距離や星形成の指標となる輝線等の性質を調べた結果を紹介する。Kバンドでは、晩期型の古い星の連続光からの寄与が大きいので、その絶対等級は銀河の質量の指標と考えてよい。Kでの絶対等級が暗い、つまり軽く小さい銀河は、すこし z を遡ると星形成の規模は徐々に大きくなり、重くて大きな銀河では $z=1$ 付近まで遡らないと星形成の活動性の増加はあまり見られない。すなわち、明るい銀河は、 z の大きいうちにかんりの星形成を起こしてあとは比較的はやく減衰していくのに対し、暗い方の銀河はかなり最近まで星形成の活動性を保っていると考えられる¹⁵⁾。

銀河の光度密度（ある程度広い宇宙空間内で平均した単位体積中の銀河の光度）の進化を紫外、可視、近赤外の3バンドで調べてみた例もある¹⁶⁾。銀河のカラー（その銀河の z でみたカラー）が、円盤銀河の Sbc より赤いか青いかでサンプルを分けると、 $z=1$ まででは、可視と近赤外では光度密度の変化に大きな違いは見られないが、紫外では全く異なり、青い銀河のサンプルでは過去に戻ると急激に光度密度が増すのに対し、赤いサンプルではほとんど変化は見られない。同じデータを用いて、銀河の大局的な星形成史を調べてみるのも面白い。各時代での銀河の光度密度を、紫外、可視、近赤外の3バンドで算出し、銀河進化の簡単なモデルと比較するのである。図4は横軸が宇宙年齢で、現在を15 Gyrとしてある。従ってこの図では、 $q_0=0.5$ としたとき H_0 は43から44程度であるので注意されたい。(宇宙項はないとしている。)例えば太陽近傍で得られている初期質量関数(具体的にはサルピータの関数)を用い、星形成率は時間の2.5乗で減ってゆくとし、星形成のピークが宇宙年齢2, 3, 4, 5 Gyr(それぞれ $z=2.8$, 1.9, 1.4, 1.1程度に対応)の各場合について、光度密度の変化が示してある。図より、前2つのケースが観測データと大体の一致をみせている。このような比較はまだ試験的な段階とみるべきかも

しれないが、示唆に富む結果である。以上は $z=1$ までの様子であるが、これより過去にさかのぼった様子については次回に紹介する。

参考文献

- 1) 例えば Abraham, R. G., et al., 1996, MNRAS, vol 279, L47
- 2) Smail, I., Dickinson, M., 1995, ApJ 455, 99
- 3) Luppino, G. A., Kaiser, N., 1995, ApJ, submitted
- 4) Burkey, J. M., et al., 1994, ApJ 429, L13
- 5) Woods, D., et al., 1995, ApJ 454, 32
- 6) Lilly, S. J., et al., 1995, ApJ 455, 108
- 7) Ellis, R. S., et al., 1996, MNRAS, in press
- 8) Im, M., et al., 1996, ApJ 461, L79
- 9) Kennicutt, R. C., 1983, ApJ 272, 54
- 10) Rakos, K., Schombert, J. M., 1995, ApJ 439, 47
- 11) 例えば Dressler, A., et al., 1994, ApJ 430, 107
- 12) Moore, B., et al., 1996, Nat 379, 613
- 13) Aragon-Salamanca, A., et al., 1993, MNRAS 262, 764
- 14) Dickinson, M., 1996, in Fresh Views of Elliptical Galaxies, ed. Buzzoni A. et al. (ASP Conf. Ser. 86) p. 283
- 15) Cowie, L. L., et al., 1996, AJ, submitted
- 16) Lilly, S. J., et al., 1996, ApJ 460, L1

Evolution and formation of galaxies

Understanding of the evolution and formation of galaxies is the most basic subject in galactic astronomy. Although until recently we hardly know the history of galaxies, observations of distant and faint galaxies have now been rapidly revealing the galaxy evolution up to about ten billion years ago. Here I intend to brief the recent results and try to make a sketch for the history of galaxies.