

銀河の進化と形成 (2)

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〉

e-mail: ohta@kusastro.kyoto-u.ac.jp

今回は、銀河の光度関数の進化と $z=1$ までの銀河における星形成を中心に紹介した。後半では、 $z=1$ を越える宇宙での星形成を中心に、最近の研究状況について紹介する。

3.1.2 フィールド銀河 (続)

$z=1$ を越えた宇宙での星形成の様子はどのようなものだろうか? K バンドで選んだ暗い銀河 (K=21 等位) の可視での分光観測によると、 $z=1$ 付近で年間 10 太陽質量位の星形成に対応する輝線を放つ天体がみえてきており、これより昔に起こったであろう大量の星形成時代のしっぽをつかまえたような感じをもっている¹⁷⁾。このように、一般のフィールドでの一般の銀河を、順に暗い方まで調べていくのが理想であるが、まだその観測は困難で 8-10 m 時代に入ってようやく $z=1$ に手が届き始めたといえる。今後サンプルが増加するものと期待される。

$z=1$ を越える遠方の (昔の) 銀河での星形成を調べる他のサンプルとして、銀河による QSO の吸収線系があげられる。これらは、たまたま QSO と視線が重なっているものなので、普通の銀河によるものである可能性が高い。従って、一般の銀河の進化を探るにはよいプローブである。このうち、中性水素原子の柱密度が 10^{20}cm^{-2} 程度を越える系を、減衰ライマン α 吸収線系 (DLAS) という。DLAS は、その大きな柱密度や宇宙における存在数密度等から、円盤銀河の先祖と考えられているが、その候補天体からの輝線を検出しようという試みもなされている。まずは、やはりライマン α 線で観測を行うため、そのターゲットの z は、大体 $z=2$ から 3 である (z の小さい方は、地上でライマン α 線を観測することから制限され

る。 z の大きい方は背景となる QSO の z で決まり、まだ $z>4$ の DLAS はそれほど多くは知られていない)。これらの DLAS からのライマン α 線は、非常に弱く、星形成率に換算すると年間 1 太陽質量程度以下である¹⁸⁾。但し、この値はライマン α 輝線の中性水素による吸収は考慮しているが (いわゆるケース B)、ダストによる吸収はないと仮定した場合である。ライマン α 線は基底状態とそのひとつ上の準位との間の遷移線なので、ダストがあると、ガスだけで予想される強度より小さくなってしまいうので、注意が必要である。この点では、バルマー線での観測の方が有利なため、H α 線で観測がされている例もある。まだ観測例は多いとは言えないが、H α 線で見ても星形成率は高くないようである^{19),20)}。

もうひとつの吸収線系として、ライマンリミット系 (LLS) がある。これはもとは QSO の吸収線系でライマンリミットが起こす系を指していたが、銀河が自身をライマンリミットで吸収しているような天体も仲間にいれてよいだろう。最近、星形成の活発そうな LLS の候補を QSO のまわりで探してそのスペクトルを調べるという方法で、 $z=3-3.5$ の銀河を見つけた例がある²¹⁾。そのスペクトルの特徴は、ライマン α 線はあまり強くなく (特に輝線は見られない)、QSO/AGN に見られる炭素の 3 階電離イオンからの輝線も弱く、そのかわりこの線を含めて早期型星に特有の各種吸収線が見られるというものである (図 5)。これは、

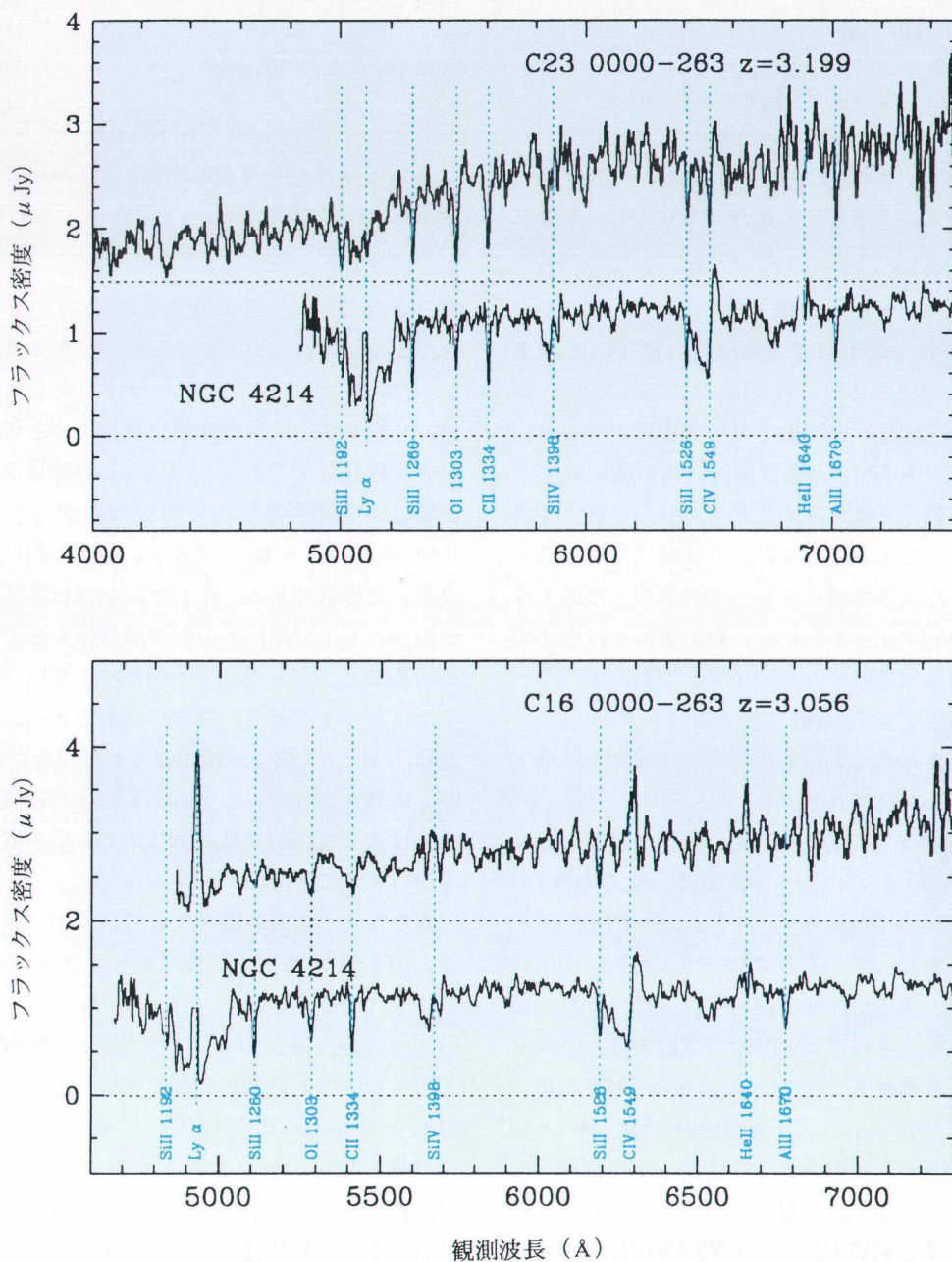


図5 $z=3$ 付近のライマンリミット系として見つかった銀河のスペクトルの例²¹⁾。上の図は輝線がほとんど見えないケース。下の図は輝線がよく見えるケース。各図の上側が観測された銀河のスペクトルで、その下には参考として、近傍のマゼラン型不規則銀河である、NGC 4214 のスペクトルが示されている。

近傍の星形成の盛んな不規則銀河によく似ている。偶然に見つかった $z=2.7$ の銀河も似たようなスペクトルを示しており、興味深い²²⁾。紫外光から推定される星形成率は、年間 10 太陽質量程度である。従って、もう少し z を遡ったところで銀河の形成がはじまったのかもしれない。

例えば、現在の星の質量が 10^{11} 太陽質量の銀河が、 $z=10$ から星の形成を始め、星形成率が 1 Gyr のタイムスケールをもつ指数関数で変化すると（楕円銀河の形成をイメージしたモデル）、 $z=3$ では星形成率は年間数 10 太陽質量となる。或は円盤銀河のバルジをイメージするなら、星の質量はこれより一桁以上で小さいので年間数太陽質量以下の星形成率が予想される。一方、円盤銀河の円盤部は、恐らく 10 Gyr 程度かけて 10^{10-11} 太陽質量の星をつくれればいいので、この場合でも $z=3-5$ 程度で形成が始まったとすると、星形成率は年間 10 太陽質量程度かそれ以下と予想される。従って $z>1$ で、年間数から数十太陽質量の星形成率をもつ銀河があれば、形成途中か終わり頃を見ているという感じなのかもしれない。

$z>4$ となると、見つかっているのは数十の QSO と強力な電波銀河がほとんどで、通常の銀河はまだ見つかっていないといってよい。（後述するように候補は存在している。）QSO に見られる輝線は重元素を含むので、少なくとも QSO の周りでは一定の星形成が起こっていたはずと考えられる。よく使われる楕円銀河の形成モデルを用いて、このような重元素の輝線の強度を QSO の輻射を考慮して説明することは可能であり²³⁾、QSO 現象が楕円銀河（敷衍するとスフェロイド成分）の形成と関連していることも示唆される。

むしろ、 $z>4$ の QSO のまわりに銀河を探す努力もされている。現在のところ $z=4.7$ の QSO のそばに 1 つのライマン α 輝線天体が見つまっている²⁴⁾、連続光でもこれと重なるように天体が存在している。連続光でみえている天体については $z\geq 4.4$ の形成中の銀河がみえているのではない

かという指摘があるが²⁵⁾、このライマン α 輝線天体の発見により（本当にライマン α かどうかも問題ではあるが）、 $z=4.7$ の銀河である可能性が高いと思われる。（その後の観測で輝線の z も更にはっきりしてきている²⁶⁾。）他にも、 $z=4$ を越える QSO の周りに 2 つのライマン α 天体（候補というべきか）が見つかっているが²⁷⁾、いずれも星形成率にすると年間 1—数太陽質量程度である。但し、これらの輝線は QSO からの輻射による電離が原因かもしれないので解釈には注意が必要である。

3.1.3 原始銀河探しとの関係

ところで、ライマン α 線の狭帯域撮像による原始銀河探しは長い歴史をもっている。その結果によると、 $z=10$ あたりまでは星形成率は年間 10 太陽質量以下で押さえられ、しかも、そのカバーする体積も十分に大きい。単純な星形成史のモデルと銀河の光度関数を考えるとすでに十分に検出されてもよいはずなのに、未だに、原始銀河は見つかっていない²⁸⁾。これは一体どうしてだろうか？

1 つの可能性は、ライマン α をプローブとするのがよくないのであって、実際には簡単なケース B のモデルで予想される光度より小さいのかもしれない。先述したように、ライマン α 線は散乱されている間にダストに吸収されてしまうのかもしれないし、

そもそも星形成領域がかなりのダストにおおわれているのかもしれない。実際、ここまで見てきた天体でも、意外とライマン α 輝線が弱いとか全く見られないものがあつた。他にもこのようなスペクトルをもつ、遠方銀河はいくつも知られている。そこで、バルマーの α 線がよい候補になるわけだが、まだそれほど多くの観測はされていない。特に、 $z=4$ を越えるともはや地上で観測する事は大変困難となってしまう。かわりに酸素の 1 階電離輝線である $3727\text{\AA}$ を使った探査が行われているが²⁹⁾、まだあまり広い領域をカバーしているとは言えない状態である。

3.2 分子ガス・ダストによる形成中の銀河探査

以上は可視や紫外での状況だが、星形成史を語る上で、分子ガスやダストに触れないわけにはいかない。形成中の銀河は恐らくガスやダストが多いものと予想される。むしろ、本当に最初の星形成では重元素もなく、水素分子以外の分子ガスやダストはないはずであるが、ひとたび爆発的星形成が始まれば、すぐに(例えば 10^8 年で)重元素により汚染されてしまうであろうことは、銀河の化学進化のシミュレーションからも予想される。このような予想に基づいて、形成中の銀河をダストあるいは分子ガスが豊富な天体という観点から調べる方向性もある。

現在までのところ、10-20程度の高赤方変位($z>2$)QSOと電波銀河で、ダストからと考えられるサブミリまたはミリ波の連続波が検出されている³⁰⁾。ダストの質量や温度を推定できるほどの観測例は少ないが、例えば $z=4.7$ のQSOでは、ダスト質量は 10^9 太陽質量程度、温度は50-100 Kと推定されている³¹⁾。遠赤外では検出されている高赤方変位銀河がもっとあってもよいと思われるかも知れないが、赤外線天文衛星(IRAS)では検出限界があまり深くなく、重力レンズで明るくなっているような天体を除き、高赤方変位天体には手が届いていない。サブミリ波や遠赤外で高赤方変位天体からの連続波をもっと検出するには、赤外線宇宙天文台(ISO)や、我国で計画中の大型ミリ波サブミリ波アレイ(LMSA)、赤外線衛星(IRIS)といった次世代の大型観測装置が必須と考えられる。

高赤方変位天体からの分子ガスの輝線探査(主にCO輝線)は、IRAS F 10214+4724での分子ガス発見以来、かなり行われてきた。現在のところ、確実に分子ガスが検出されていると認められている高赤方変位天体は、IRAS F 10214+4724とH 1413+117(クローバーリーフ)だけであり、既に多くの観測がされている。これらは、ともに $z=2$ 付近に存在し、いずれも重力レンズされた天体

であり、そのおかげで明るく見えている。このように天然の増光機構を用いて高赤方変位天体の性質を調べるのも重要な手段である。しかし、やはり一般の銀河の姿を系統的に調べることは、いずれ必須となるであろう。残念ながら、一般の銀河での観測は現在の観測装置では極めて困難であると思われる。LMSAの稼働が必要である。そこで、今までは星形成が盛んかもしれないと考えられるような天体、電波銀河・QSO・DLAS等が主なターゲットとなってきた。

電波銀河では $z=2-4$ のものがかなり観測されたが³²⁾、いずれもCO輝線は検出されるには至っていない。53 W 002という $z=2.4$ の電波銀河では検出された可能性があるが³³⁾、現在確認観測が行われているところである。QSOに関してもいくつか観測例はある。QSOは、AGN現象と星形成現象を一応別途に考えるという習慣のせい、意外と多くは観測されていないようである。我々も $z=1-3$ 程度の数個の明るいQSOの観測を行い、1つのQSOで検出できた可能性がある³⁴⁾。

以上はある意味で特別な銀河かもしれないが、より一般的な銀河のサンプルとしてDLASが候補となる。DLASに関してもいくつか観測されており、CO輝線を検出したという報告もあるが^{35),36)}、多くは検出できていない^{37),38)}。もし検出の報が正しければ、DLASでの星形成効率は近傍銀河でのそれと比べると、大変低いものである可能性がある³⁷⁾。

以上の観測で、CO輝線が検出されたというもの、上限だけのものも、全体の分子ガスの質量は、通常のCOとH₂の変換係数を用いると(ここは大きな問題である)、 10^{11-12} 太陽質量に相当し、重たい銀河の爆発的星形成期を探したこととなる。QSOや電波銀河のように楕円銀河形成と関連していると想像される天体では、ある時期に大量の分子ガスが存在するという時代があってもよさそうである。これらの天体での否定的な観測結果の解釈として1つ考えられるのは、もっと z の大

きい時が爆発的星形成の時代ではないかというものである。これは、既に見たように楕円銀河が $z=1$ 付近でもまだパッシブな進化をしているらしく、 $z>4$ で、爆発的な星の形成を行ったというモデルとも矛盾しないこと等からも想像される。そこで我々は、上記、ダストからの連続波が検出されたと考えられる天体の1つである、 $z=4.7$ （現時点では3番目に遠い天体、宇宙年齢が約1 Gyrの時代）のQSO³¹⁾での分子ガス探査を始めた。その結果、分子ガスの質量が 10^{11} 太陽質量程度に相当するCO輝線を検出することができた。輝線の速度巾も $200\text{--}300\text{ km s}^{-1}$ あるので重たい銀河の形成途中を捉えたのではないかと考えている。しかし、まだ、1本の輝線を1つの望遠鏡で捉えた段階であるので、確認・追求観測が必要で、現在それを行っているところである*。もし、このような天体が $z=4\text{--}5$ で他にも多く存在することが示されれば、いよいよ爆発的星形成の時代が見えてきたと言えるかもしれない。

*この輝線は、Omont et al. による観測でも独立に検出されたようである。

4. 銀河構造の変化

銀河の構造はどう変わってきたのだろうか？ $z=0.4$ 付近の銀河団や一般のフィールドの中等度の露出のHST撮像では、半分から60%程度の銀河は従来からよく知られているハッブル型の分類にはいり、残りは不規則なものに分類される^{11),39)}。通常のタイプに分類される銀河の構造を調べると、例えばバルジや円盤部の特徴的なサイズ等は現在の値とそれほど違いはなく、その光度比も変化が見られない⁴⁰⁾。

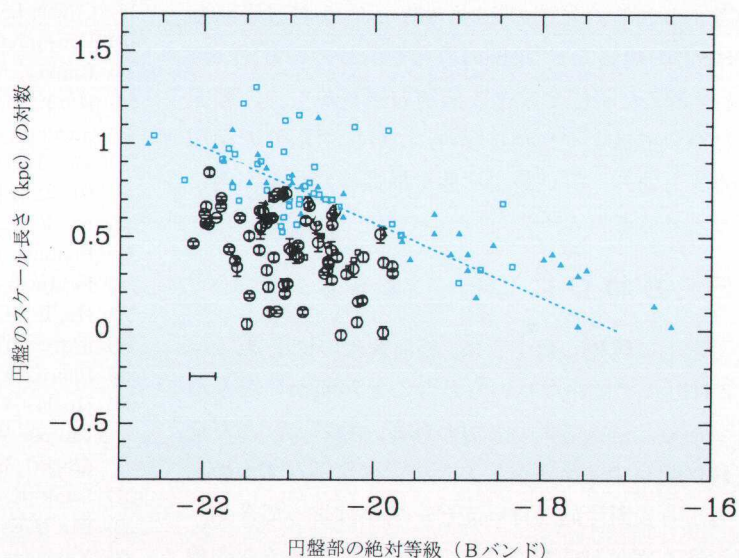


図6 円盤銀河の円盤部の構造の進化⁴¹⁾。縦軸は円盤の半径方向の光度分布を特徴づける長さの対数、横軸は円盤部だけの絶対等級。小さいデータ点は近傍の銀河、大きなデータ点は $z>0.5$ の銀河を表わす。点線は、円盤中心での表面輝度が一定の線を示しており、その値は近傍の円盤銀河での一般的な値である。円盤中心での表面輝度が高い(明るい)円盤は、この線の下側にならぶことになる。

ところが、 $z=1$ 付近になってくると、円盤銀河の円盤部の中心での光度が、近傍での一般的な値より約1.5等明るくなっているという報告があり、このあたりでは銀河構造の違いが見られるようになるようである⁴¹⁾ (図6)。また、この時代では彼らは青い核をもつ銀河が相当数あると報告している。同じくHSTの撮像により、みかけの等級の暗い銀河の中には、チェーン(鎖)状の銀河が多いという指摘もある⁴²⁾ (但し z は不明)。QSOの吸収線系のところで述べた、 $z=3$ 付近の星形成銀河は、HSTで調べるとコンパクトなものが多く、先ほどから何度も登場する不規則形状なものは少ないという⁴³⁾。更に個別の例では、 $z=3.4$ にQSOの吸収線系銀河を探していて見つかった、QSO 0000-2619のそばのG2という銀河は、現時点ではAGN的性質を持たない「通常の」銀河としては最遠の銀河と考えらるが、この表面輝度分布

は $r^{1/4}$ 乗則に従い⁴⁴⁾, 楕円銀河の先祖ではないかと考えられる。先述の 53 W 002 という電波銀河も HST の観測で $r^{1/4}$ 乗則の分布を示している⁴⁵⁾。 $z=1$ を越えた時代ではまだ個別の例しかなく, 形態についてはよくわからない。しかし, HST の深探査等もあり, 近い将来形態や構造の変化も明かになってくるだろう。

5. おわりに

以上に概観したように, 銀河進化の様子は, $z=2$ 付近まではかなりいろいろなことが明かになりつつあると言ってよいと思われる。むろん, まだ全貌は明かではないが, 大きなジグソーパズルのあちこちに断片的とはいえピースがはまってきて, おぼろげながら銀河進化の描像が描けそうな印象である。

その先はまだ手が届いていない感じであるが, 10 m 望遠鏡もまだ稼働しだして間もなく, フル稼働しているわけではないし, これから 8-10 m 時代に入ると, このような問題の解決も時間の問題かもしれない。更に, 既に触れたが, 21 世紀にはいると, 地上の可視赤外だけでなく, IRIS や LMSA 等の銀河誕生時代にメスをいれることができるかと期待される大型観測装置が我国でも計画されている。具体的な観測目標は, ここでは詳しく触れるつもりはないが, 多角的に銀河の歴史を明かにしていくことができるようになるだろう。

これから 10-20 年は銀河形成進化の観測的問題は山場となり, よりエキサイティングな時代になるのではないかと考えている。

謝 辞

この原稿執筆のベースは, 山田亨氏との共同研究及び日常的な議論や情報交換によるところが大きく, ここに改めて謝意を表わしたい。また, 共同研究者の方々, 草稿段階で色々なコメントをくれた大学院生の秋山正幸氏にも感謝する次第である。

参 考 文 献

- 17) Cowie, L. L., et al., 1995, Nat 377, 603
- 18) Lowenthal, J. D., et al., 1995, ApJ 451, 484
- 19) Bunker, A. J., et al., 1995, MNRAS 273, 513
- 20) Hu, E. M., et al., 1993, ApJ 419, L13
- 21) Steidel, C., et al., 1996, ApJ 462, L17
- 22) Yee, H.K.C., et al., 1996, AJ 111, 1783
- 23) 例えば Hamann, F., Ferland, G., 1993, ApJ 418, 11
- 24) Hu, E.M., et al., 1996, ApJ 459, L53
- 25) Fontana, A., et al., 1996, MNRAS 279, L27
- 26) Petitjean, P., et al., 1996, Nat 380, 411
- 27) Hu, E. M., McMahon, R. G., 1996, Nat, submitted
- 28) 例えば Pritchett, C. J., 1994, PASP 106, 1052
- 29) Pahre, M. A., Djorgovski, S. G., 1995, ApJ 449, L1
- 30) Hughes, D. H., 1996, in Cold Gas at High Redshift, ed. van der Werf P. and Rottgering H. (Kluwer, Dordrecht), in press
- 31) Isaak, K. G., et al., 1994, MNRAS 269, L28
- 32) 例えば Evans, A. S., et al., 1996, ApJ 459, 658
- 33) Yamada, T., et al., 1995, AJ 110, 1564
- 34) Yamada, T., et al., 1995, ApJ 438, L5
- 35) Brown, R., Vanden Bout, P.A., 1993, ApJ 412, L21
- 36) Frayer, D. T., et al., 1994, ApJ 433, L5
- 37) Ohta, K., et al., 1994, PASJ 46, L163
- 38) Wiklind, T., Combes, F., 1994, A&A 288, L41
- 39) Griffiths, R. E., et al., 1994, ApJ 435, L19
- 40) 例えば Phillips, A. C., et al., 1995, ApJ 444, 21
- 41) Schade, et al., 1996, ApJ, in press
- 42) Cowie, L. L., et al., 1995, AJ 110, 1526
- 43) Giavalisco, M., et al., 1996, ApJ submitted
- 44) Giavalisco, M., et al., 1995, ApJ 441, L13
- 45) Windhorst, R., et al., 1992, ApJ 400, L1

Evolution and formation of galaxies (cont.)

Kouji OHTA

Department of Astronomy, Kyoto University, Kyoto 606-01

In the last Skylight, the evolution of galaxy luminosity function and the star-formation history of galaxies by $z=1$ were described mainly. In this part, I will describe recent studies on the star formation in galaxies beyond $z=1$.