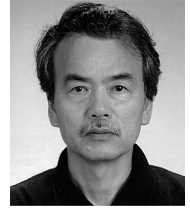


普通の銀河の育ち方

市川 隆

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: ichikawa@astr.tohoku.ac.jp



すばる望遠鏡とモアックスで観測された波長 $2.2\mu\text{m}$ の世界で最も深い撮像データを用いて、100億年前から現在に至る普通の銀河の成長についての研究結果を紹介します。過去の巨大な銀河の研究はこれまで多数行われていますが、銀河系やマゼラン銀河のような普通の銀河を過去100億年もさかのぼって研究することはたいへん困難でした。今回すばる望遠鏡と最新の観測装置を用いたことでそれが可能になりました。その観測の深さを活かし、銀河の表面輝度、大きさ、集団化の様子を研究することによって、普通の銀河がどのように成長してきたかがわかってきました。その結果、いつの時代も普通の銀河は同じように生まれ、同じように成長してきた描像が得られました。

1. はじめに

銀河の進化の研究といえば、銀河の明るさや分光データから個々の銀河について進化のモデルと比較する方法が一般的ですが^{1)~3)}、ここでは銀河の表面輝度や大きさなどのデータに着目して、普通の銀河は過去100億年どのように成長したのか、時代によって成長の仕方が異なるのか、などを統計的に調べた結果を紹介します。

銀河系は比較的大型の渦巻き銀河ですが、それより小さな普通の銀河、さらにはマゼラン銀河のような比較的小型の銀河（ここでは銀河内の星の総質量が太陽質量の10億倍から1,000億倍程度の銀河を普通の銀河、それ以上の銀河を巨大銀河と呼ぶことにします）が、どのような歴史を経てきたかを解明することは基本的な課題です。しかし個々の銀河の過去を直接見ることはできません。そこで銀河系やマゼラン銀河の先祖と思われる銀河を過去にさかのぼる方法で銀河の成長の様子を各時代で調べてみます。ただ、銀河には楕円銀河、渦巻き銀河、後者はさらに円盤部、バルジからなり複雑な構造を示しています。ここではあまり細かな分類や構造にはとらわれずに銀河全体

の成長に着目して大ざっぱな描像を描くことにします。

2. 遠方の銀河の観測

遠方の銀河、つまり過去の銀河の様子を調べるには先月号の特集記事にもあるように、赤外線での観測が不可欠です。特にここで述べる普通の銀河の観測はこれまでの望遠鏡ではたいへん困難でした。私たちのグループはすばる望遠鏡と最新の近赤外線観測装置のモアックスを使って何十時間もかけて遠くの暗い銀河を観測しました。そして波長 $2.2\mu\text{m}$ (K バンド) では世界で最も深い銀河のカタログ (MODS) を発表しました⁴⁾。この深さのおかげで、銀河系やマゼラン銀河と同定度の大きさの銀河を過去約100億年さかのぼって観測することができました。広い視野の観測装置ですので、これまでになく広範囲での観測から、このような銀河がどのように集団を作ってきたかわかってきました。

3. 銀河の成長

銀河は暗黒物質の中で生まれ、ときには近くにある銀河と合体をしながら成長してきたと言われ

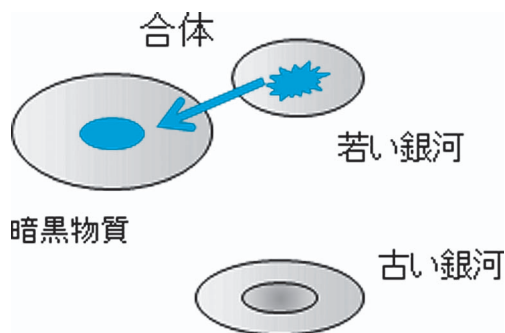


図1 暗黒物質の中にある銀河は単独で成長していくのか、それとも合体して成長していくのか。

ています(図1)。一方で、銀河が現在よりもたくさん生まれていた100億年前、銀河の合体の直接的証拠は少なく、特に、普通の銀河はそれほど頻繁には合体を繰り返していないとも言われています^{5),6)}。

合体の機会が多いと考えられる銀河団中心の銀河は別にして、同じ質量程度の銀河が合体するのはせいぜい過去80億年間1回あるいはそれ以下と言われています⁵⁾。大きな銀河に小さな銀河が飲み込まれる合体はもう少し頻繁に起きているかもしれませんが、遠方にある銀河で、小さな銀河の合体の様子を見る観測は非常に困難です。合体によって進化するのか、それとも銀河が単独でガスを星に変えながら進化しているのか、それを観測的に探ることができれば銀河の成長の描像を描くことができます。では、どのような観測をしたらその様子がわかるのでしょうか。私たちは銀河の表面輝度、大きさ、集団化に注目しました。

4. 銀河の表面輝度

銀河の中でガスが星に変わり、星が年を取っていくと銀河の明るさや色が変わります。そこで銀河の中の星の質量と銀河の明るさを調べました。銀河の大きさは全体の明るさの90%の光が入る大きさと定義します。銀河全体の平均的な様子を知るためです。銀河の星の総量の求め方は先月号

の鍛冶澤氏の記事⁷⁾をご覧ください。明るさは銀河の測光データを用います。しかし遠方の銀河からの光は宇宙膨張によるドップラー効果によって赤方偏移をしますので、同じ波長の観測データでは時代ごとに実際の波長とは異なります。例えば、 $2.2\mu\text{m}$ で観測される100億年前の銀河からの光はドップラー効果を補正すると、 $0.5\mu\text{m}$ の光を見ていることとなります。

銀河の星の総質量を求めるためには、銀河のモデルが必要です。一つひとつの銀河の測光データから最もよく再現される銀河のモデルと赤方偏移を決めます。そのモデル銀河から銀河が静止しているときの銀河の明るさ(静止系の明るさ)を推定します。こうしてモアックスで観測された、近傍から100億年前の銀河の静止系で波長 $0.5\mu\text{m}$ (Vバンド)での明るさを推定します。同様に $0.35\mu\text{m}$ (Uバンド)と $0.9\mu\text{m}$ (zバンド)での明るさも求めます。複数の波長で求めることにより、銀河の色(U-VやV-z)、ひいては銀河の中で星が生まれている情報を知ることができるからです。

図2は銀河の星の総質量とVバンド(静止系)での表面輝度(銀河の明るさを銀河の表面積で割ったもの)を宇宙の年齢ごとに示した関係です⁷⁾。(ここでは宇宙論的效果による急激な表面輝度の減少は補正してあります。)青い色(U-V<0)の銀河は年齢が若く、星が盛んに生まれている銀河です。各時代で青い銀河は星の総量が少なく、質量の大きい銀河ほど、古い時代に生まれたことがわかります。

この図から何か、普遍的な関係があることが示唆されます。銀河の星の総質量と表面輝度の相関の傾きはいつの時代も変わらないことを示しています。またどの質量の銀河もほぼ同じ割合で時代とともに表面輝度が暗くなっていきます。zバンドのデータも使って同様に調べて見ました。その結果、各時代で、同じ質量の銀河は同じ大きさをもつと仮定すると、この表面輝度と色の変化は銀河の中の星が進化していくことだけで説明できま

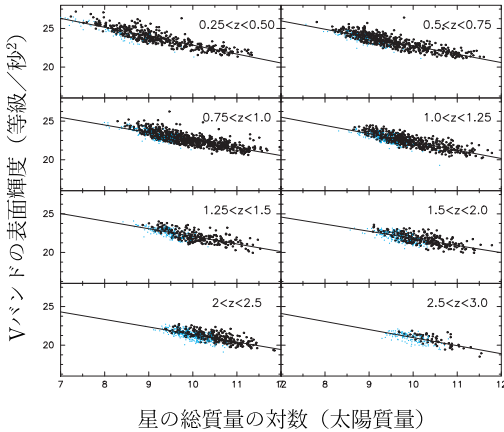


図2 各時代における銀河の星の総量とVバンド(0.5 μm)での表面輝度の相関。青い点は活発に星が生まれている銀河(U-V < 0)。z=0.25, 3.0はそれぞれ約30億年前と110億年前。

す。銀河の合体などによる表面輝度の変化の予想とは大分異なるようです。

5. 銀河の大きさ

先の表面輝度の議論では、同じ質量の銀河はいつの時代も同じ大きさをもつと仮定しました。では銀河の大きさは時代とともに変わるのでしょうか。しかし遠方にある普通の銀河の大きさを決めるのはたいへん困難です。銀河は広がっていますので、観測が浅いと銀河の端のほうを観測できません。

遠くまで観測できる明るい巨大銀河の大きさについては数多くの研究がなされてきました。その結果、100億年前の巨大銀河、特に巨大楕円銀河は現在よりも数分の1の大きさしかなく、非常にコンパクトであったという報告がされています⁸⁾。近傍の宇宙で同じ質量の巨大銀河を比べると100億年前は現在よりも1/2から1/5の大きさしかなかったこととなります。近傍の宇宙にはこのような巨大コンパクト銀河はほとんどないので、100億年の間に銀河が膨れてサイズが数倍も大きくなったこととなります。星の誕生がほぼ終

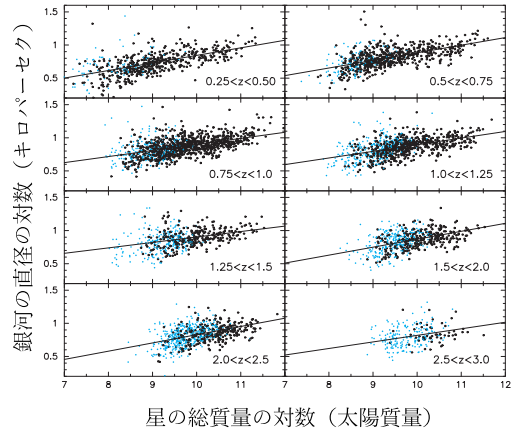


図3 各時代における銀河の総星質量と銀河の大きさの相関。

えたと思われる100億年前のこれらの巨大楕円銀河は、何らかの仕組みによって100億年間の間に数倍も大きくなることを意味しています。しかし理論的な説明はたいへん困難です。

ところで観測が十分に深くない場合、広く淡いすそ野をもつ楕円銀河の大きさを測定するのはたいへん困難です。特に宇宙論的效果で急激に表面輝度が弱くなる遠方の銀河の観測では、大きさを小さく見積もる恐れがあります。私たちはそのことをモデル銀河を使って示しました⁹⁾。私たちの観測はこれまでになく深いので、銀河の端までの大きさを求めることができます。

図3は銀河の大きさを各時代ごとに図示したものです⁹⁾。この図を見ると、**銀河の星の総質量と銀河の大きさの相関はいつの時代も全く同じで、変化がないことがわかります**。30億年前(z=0.25)から110億年前(z=3.0)のいつの時代も同じ質量の銀河は同じ大きさをもちます。つまり、いつの時代も普通の銀河は同じような成長の仕方をしていることを意味します。図は銀河の星質量が90%入る大きさで示されていますが、半分大きさでも同様の結果が得られました⁹⁾。z=0.25-0.5の結果はSDSSデータを用いた近傍の銀河での結果とほぼ同じです¹⁰⁾。

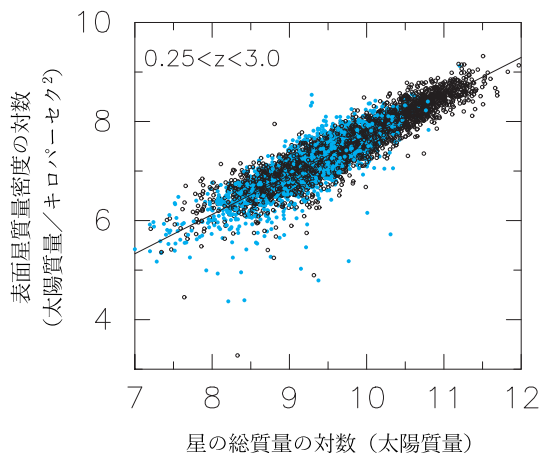


図4 銀河の総星質量と表面星質量密度の相関. 30億年 ($z=0.25$) から110億年前 ($z=3.0$) の全銀河を重ねた.

私たちの観測領域はあまり広くないので、巨大銀河はあまり多くありませんが、過去、巨大銀河の多くが非常に小さかったという兆候は見られません。

図3から同じ質量の銀河の大きさはいつの時代もほとんど違いがないことがわかりましたので、すべての時代を重ね合わせて、銀河の表面星質量密度（銀河の90%の星質量を銀河の表面積で割ったもの）に焼き直したものを図4に示します。表面質量密度は時代によらず銀河の総質量と強い相関があることがわかります。銀河の質量の小さな銀河には表面質量密度の小さなものが少しありますが、少数派です。大質量銀河には非常に高輝度のコンパクトな銀河はほとんどありません。

図5は銀河の50%の星質量と90%の星質量が入る銀河の大きさの比を時代ごとに図示したものです。この比は銀河の中心集中度を見ていることになります。これを見ると巨大銀河の中心集中度は100億年前から現在に至るまでだいに弱くなっていくことがわかります。一方、普通の銀河はほとんど集中度が変わっていません。銀河の合体モデルでは大きな銀河に小さな銀河が合体すると、銀河の外側でその影響が強く残り、銀河が大

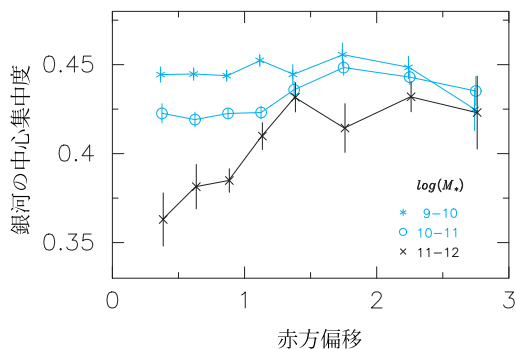


図5 銀河の中心集中度の進化.

きくなると言われています¹¹⁾。図5から巨大銀河は最近になるにつれて小規模な合体の影響が少しあるようですが、普通の銀河はいつの時代も同じ集中度をもっていることがわかります。一般的に普通の銀河には顕著な合体ほとんど起きていないようです。

6. 銀河の集団化

銀河の合体を検証するには銀河の集団化を調べる方法もあります。銀河は暗黒物質の中で生まれ、暗黒物質とともに集団を形成していきます。私たちは今回研究した銀河について、普通の銀河の集団化の歴史と合体の頻度についても調べました¹²⁾。銀河系やマゼラン銀河の先祖となるような銀河を選び、暗黒物質理論の助けを借りながら、どのような銀河が100億年後に近傍の宇宙にある銀河群、銀河団のような集団に進化するかを見つけました。その結果、普通の銀河の星の総質量は合体によって少し増える程度の進化を考えると暗黒物質モデルとよく合うことが示されました。しかし、先に説明した表面輝度や銀河のサイズと銀河の星質量との普遍的な相関と矛盾がないかどうかまだよくわかっていません。

7. おわりに

実際の銀河の進化では、時には他の銀河と合体し、それをきっかけに星が爆発的に生まれる場合

もあれば、新たな星生成はあまり顕著には起きず、静かに合体していく場合もあるでしょう。今回の研究では銀河系やマゼラン銀河のような普通の銀河は過去 100 億年間、合体はあまり重要でなく、静かに銀河内部で粛々と星が生まれ、年老いていった描像が得られました。それを確認するには直接、合体の様子を観測するのが一番です。しかし小規模な合体の歴史を 100 億年前までにさかのぼって観測することは地上からの観測は極めて困難です。

銀河内部での星の総質量の進化と小規模な合体が銀河の性質にどのような変化を与えるのか、また、どのような合体のシナリオならば今回示したような銀河の質量と表面輝度、あるいは銀河の大きさの相関、集団化を再現できるか、理論的な解明が待たれます。また観測からは銀河の内側と外側でどのように星の色（あるいは年齢）が異なるのかを過去にさかのぼって見れば、合体の影響を調べる手がかりになるかもしれません。

謝 辞

先月号と今月号の 2 号に渡ってモアックスによる研究成果を紹介しました。モアックスの開発と研究成果は多くの方々の理解と支援に支えられてきました。特に国立天文台ハワイ観測所の西村徹郎さん、小俣孝司さんには開発の中心となり、また技術的なご指導をして頂きました。ハワイ観測所のスタッフの皆さんにこの場を借りて改めてお礼を述べさせていただきます。

参考文献

- 1) 鍛冶澤賢, 2011, 天文月報 8 月号, 385
- 2) 小西真広, 2011, 天文月報 8 月号, 400
- 3) 吉川智裕, 2011, 天文月報 8 月号, 393
- 4) Kajisawa M., et al., 2011, PASJ 63, 379
- 5) López-Sanjuan C., et al., 2011, A&A 530, A20
- 6) Bundy K., et al., 2009, ApJ 697, 1369
- 7) Ichikawa T., et al., 2010, ApJ 709, 741
- 8) Trujillo I., et al., 2006, ApJ 650, 18
- 9) Ichikawa T., Kajisawa M., Akhlaghi M., 2011, MNRAS, submitted
- 10) Shen S., et al., 2003, MNRAS 343, 978
- 11) Naab T., Johansson P., Ostriker J.P., 2009, ApJ 699, L178
- 12) Ichikawa T., et al., 2007, PASJ 59, 1081

Evolution of Normal Galaxies at $0.3 < z < 3.0$

Takashi ICHIKAWA

*Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3
Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan*

Abstract: Using the deepest K-band catalog of galaxies, we have studied the evolution of the surface brightness and size of galaxies located at the local universe to the universe of 10 billion years ago. The universal scaling relations between stellar-mass and the size or surface brightness of galaxies at $0.3 < z < 3.0$ demonstrates that the stellar mass was built up in galaxies over their cosmic histories in a similar manner on average irrelevant to galaxy mass.