

MOIRCS がとらえた激進化終焉期の 銀河の姿



小西 真 広

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: konishi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙の星形成活動は今からさかのぼること 80–110 億年前にそのピークを迎えますが、その時代の銀河に何が起きていたのかはまだよくわかっていません。“銀河激進化期”と呼ばれるこの時代の銀河を詳細に調査することは、現在の宇宙の成り立ち（宇宙の星形成史）を知るうえで欠かすことができない課題です。本稿では、激進化終焉期（今からおよそ 80 億年前；赤方偏移 ~ 1 ）にある銀河の骨格構造の成長と宇宙の星形成史とのつながりについて、すばる望遠鏡と広視野近赤外線観測装置 MOIRCS を使った研究成果を紹介します。

1. 銀河進化と宇宙の星形成史

現在の宇宙には銀河系のように整然とした姿の銀河が数多く存在しますが、それらは一体どのようにして今の姿になったのでしょうか？

さまざまな距離にある銀河の星形成率（1 年間に太陽何個分の恒星が生まれているか）を調べていくと、宇宙全体での星形成活動は過去にさかのぼるほど活発になっていき、そのピークとみられる 80–110 億年前（赤方偏移で表すと $\sim 1-3^{*1}$ ）では現在のおよそ 10 倍にもなります¹⁾。また、現在の宇宙に存在する恒星の半数以上はこのピークのころに形成されたこともわかっています²⁾。近年このピークの時代は銀河進化の激動期、または“銀河の激進化期”とも言われ、銀河天文学のホットな研究テーマの一つとなっています。

本稿では、激進化期の銀河に何が起きていたの

かをすばる望遠鏡を用いて銀河の形態・構造の観点から解明しようという研究³⁾について紹介します。

2. 高光度赤外線銀河

ここ数年の間に *Spitzer*, *AKARI*, *Herschel* と続々と赤外線観測衛星が打ち上がりましたが、銀河の形成・進化という研究分野において、これらの赤外線衛星が与えた最も大きなインパクトの一つは、「過去にさかのぼるほど赤外線で見える銀河（赤外線銀河）の数が増えていく」という観測結果でした^{4)–6)}。赤外線で見えるというのは、星形成の直接的な指標となる大質量星からの紫外線を吸収し暖められたダストが熱放射として中間–遠赤外線の波長域で再放射しているためであり^{*2}、宇宙の星形成活動の歴史と合わせて考えると、過去の宇宙ほどダストに覆い隠された星形成活動が

*1 本稿では $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$, $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ という宇宙論パラメーターを使用しています。この場合、1 秒角は赤方偏移 1 においておよそ 8 kpc、またはおよそ 26,000 光年に相当します。

*2 ダストを暖める要因として大質量星以外に活動銀河核というものもありますが、こちらは星形成活動によるものではありません。本研究では、X 線で検出されている銀河は活動銀河核をもつ可能性があるかと判断して統計的な議論からは除外しています。

盛んであった、と解釈することができます。

銀河系の現在の星形成率は1年間に太陽1個分程度ですが、激進化終焉期(～60–80億年前)を代表する赤外線銀河であり全赤外線光度 L_{IR} (波長8–1,000 μm での赤外線光度)が太陽光度(L_{\odot})の 10^{11} – 10^{12} 倍にもなる高光度赤外線銀河(Luminous Infrared Galaxies; LIRGs)は(その赤外線光度が大質量星からの紫外線起源だとすると)年間10–100個という桁違いの活動性をもっています。過去に多く存在し、宇宙の星形成史を支配していたと見られる赤外線銀河は一体何者で、なぜこれほど爆発的な星形成を起こしていたのでしょうか？

現在の宇宙にも赤外線銀河は存在しますが、その数は多くありません。またそれらの星形成は、銀河同士の重力相互作用や銀河中心部の棒状構造の重力不安定性によってかき集められたガスが銀河中心へと注ぎ込まれることで中心集中的に起きています。一方激進化終焉期の赤外線銀河を可視光で見ると、衝突銀河でも棒渦巻き銀河でもなく、普通の渦巻き銀河が多いことがわかりました⁷⁾。最近では中間赤外線での詳細な観測から、ダストの温度や、星形成に敏感なPAH(多環芳香族炭化水素)分子の輝線強度が調べられていますが、いずれの結果も現在の赤外線銀河ではなくむしろ“ごく普通の”渦巻き銀河に近いことを示唆しています^{8),9)}。

過去の赤外線銀河が、現在見られるごく普通の銀河へとつながっているのだとすると、激進化期にはどのような進化段階にあったのでしょうか？そこで、私たちのグループはすばる望遠鏡の近赤外線観測装置MOIRCS¹⁰⁾を使って激進化期の銀河の構造を探ってみました。近赤外線観測には、可視光ではダストに覆い隠されて見えなかった構造や、それまでの星形成活動の積分であり銀河の骨格ともいえる年老いた星の分布を知ることができる、という特長があるからです。

3. MOIRCSで銀河の形態を探る

3.1 MOIRCSディープサーベイ

MOIRCSディープサーベイ(MODS)は北斗七星付近にある天の一角をMOIRCSを使って広く深く観測しようという近赤外線撮像観測プロジェクトです^{*3}。最もデータが深い28平方分角の領域には近傍から遠方まで3,000以上の銀河が検出されており、本稿ではこのデータを使用しています。

銀河の形態を調べるには当然細かい構造まで見たほうが良いのですが、補償光学(大気揺らぎをリアルタイムに補正しシャープな像にする光学系)を用いた観測では視野を犠牲にしなければならず、個々の銀河を個別に観測する必要があります。それに対しMODSデータは、広い視野とある程度の空間解像度を兼ねそろえ、統計的に有意な数の銀河の形態をまとめて判別できる、というユニークな特徴をもっています。今回形態の解析に使用するのは、シーイング(星像の揺らぎ)が0.5秒角よりも小さいものだけを集めた K_s バンド(波長2.2 μm 帯)の画像で、最終画像での星像は～0.4秒角を達成していて、補償光学を用いない観測ではマウナケアサイトにおいてほぼベストと言えるデータとなっています。0.4秒角という大きさは赤方偏移1での物理的距離にして約3kpcで、これは円盤銀河の典型的な円盤のサイズと同程度です。MODS K_s バンド画像を使えば、80億光年離れたところにある銀河が銀河系のような円盤構造をもっているかどうかを判別することができます。

3.2 形態の評価方法

銀河には、楕円銀河、円盤銀河(渦巻き銀河、棒渦巻き銀河)、そしてどちらにも属さない不規則銀河などの分類(ハッブル分類といいます)がありますが、本稿では大まかに、楕円銀河的(バ

*3 サーベイの詳細は鍛冶澤賢氏の記事をご覧ください。本稿で使用する形態カタログも含め、天体情報はMODS Project Websiteで公開しています(<http://astr.tohoku.ac.jp/MODS/wiki/>)。

ルジが卓越している円盤銀河も含む)か、円盤銀河的かという判断のみをしています。

楕円銀河的か、円盤銀河的かを天体画像から定量的に評価する方法はいくつも提案されていますが、大別すると、何らかの関数を仮定する (parametric) か、何も仮定しない (non-parametric) か、という二つの流儀があります。前者は銀河の1次元または2次元光度分布に対して関数形でフィットする手法で、(もちろん関数の仮定が妥当であればですが) 観測データの画質 (S/N 比) が多少悪くても評価がうまくいくことがあります。一方、後者は銀河の2次元光度分布からいくつかの形態の指標を計算する手法で、何も仮定を必要としないためどんな形に対しても適用することができますが、画像の深さやノイズ、銀河起源でないパターンなどの影響を強く受けてしまいます。

本稿では、parametric な方法でよく用いられている Sérsic プロファイル¹¹⁾という関数形^{*4}で銀河の形態評価を行っています¹²⁾。この関数は Sérsic 指数 n というパラメーターを変えることで多くの近傍銀河の光度分布を表すことができます。例えば、 n が1なら円盤銀河に多い指数関数的分布、 n が4なら円盤銀河のバルジや楕円銀河に多いド・ヴォークルール分布になります。しかし衝突銀河のように崩れた形をしている銀河はうまくフィットすることができません。そのために、non-parametric な形態指標の代表格である“中心集中度”と“非対称性”も計算して、形態評価のダブルチェックをするとともに崩れた(非対称性の大きな)銀河がないかどうかを確認しました。結果、最終サンプルの中にははっきり衝突とわかるような銀河はいませんでした。ただしこの点については補償光学、または宇宙望遠鏡を用いた詳

細な形態情報がなければ断定できないということに注意が必要です。

さて、銀河の形態を定量化する方法を紹介しましたが、実際の銀河に適用する前に、MODS 画像での形態解析がどのくらい信頼できるのかを確かめておく必要があります。それにはさまざまな明るさと大きさをもつモデル銀河を実際の画像に埋め込んで実際と同様の流れで天体検出・形態解析を行い、それらの形態情報が元どおりに再現されるかどうかというシミュレーションがよく行われます。MODS 画像に対してこの方法で検証した結果、 $K_s \leq 22.5$ 等 (AB 等級) の銀河であれば大きさに関係なく正しく形態情報が再現できていることが確認できました。それでは、いよいよ激進化終焉期の銀河の骨格、近赤外線形態を見ていきます。

4. 成長途上にある銀河の骨格

MODS 画像に写っている銀河から、激進化終焉期 (赤方偏移 0.8-1.2) にあり、恒星質量 (M_*) が太陽質量 (M_\odot) の 10^{10} 倍よりも重い ($K_s \leq 22.5$ 等に相当) ものをすべて選び (X 線源 16 天体を含む計 155 天体)、Sérsic プロファイルでフィットして円盤銀河的 ($n \leq 2.5$) か楕円銀河的 ($n > 2.5$) かに分けました。さらに赤外線銀河を同定するために *Spitzer* の $24 \mu\text{m}$ で検出されているかどうかを公開カタログを使って確認しました。 $24 \mu\text{m}$ データの限界フラックスは $80 \mu\text{Jy}$ で、ある赤外 SED (波長別の光の強度分布) モデルを仮定して赤方偏移 1 での全赤外線光度 L_{IR} を見積もると、 $\sim 1.1 \times 10^{11} L_\odot$ となり^{*5}、これは LIRG の定義の下限値とおよそ一致します。すなわち、 $24 \mu\text{m}$ で検出されているかどうかで LIRG かそうでない (以

^{*4} $I(r) = I(r_c) \exp\left\{-b_n \left[\left(\frac{r}{r_c}\right)^{1/n} - 1\right]\right\}$. r は銀河の中心からの距離、 $I(r_c)$ は半径 r_c での強度、 b_n は n を含む定数で、 $r = r_c$ が全フラックスの半分を含む半径 (半光度半径、half-light radius) になるように決められます。

^{*5} $12 \mu\text{m}$ の光度と全赤外線光度には強い相関があることが近傍銀河で確認されているため、その関係式を使って赤方偏移 1 の銀河から観測される $24 \mu\text{m}$ (つまり静止系 $12 \mu\text{m}$) のフラックスを全赤外線光度に変換しています。

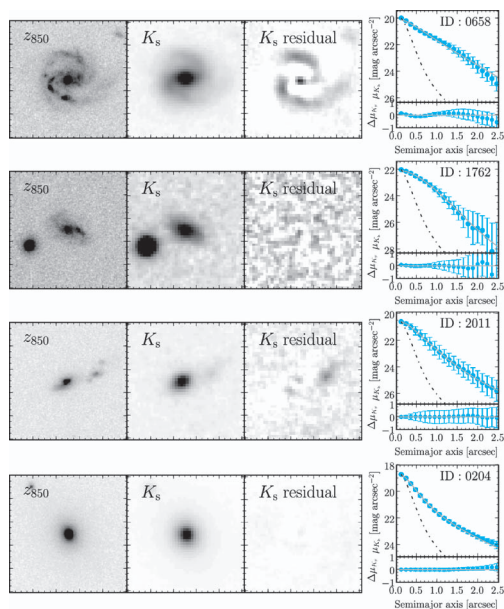


図1 激進化終焉期（約80億年前，赤方偏移 ~ 1 ）の銀河の姿。上から，円盤銀河的な光度分布をもつ LIRG ($n=1.3$) と非 LIRG ($n=0.7$)，楕円銀河的な光度分布をもつ LIRG ($n=4.0$) と非 LIRG ($n=4.5$)。それぞれ，左から三つの画像（ $\sim 40 \text{ kpc} \times 40 \text{ kpc}$ ）は，(a) 可視光 ($0.85 \mu\text{m}$)，(b) 近赤外線 ($2.2 \mu\text{m}$)，(c) 画像 (b) からベストフィットのモデル銀河のプロファイルを差引いた残りを表す。右のグラフは，画像 (b) とベストフィットモデルそれぞれから作成した1次元光度分布（上）と残差分布（下）。比較のために点源の光度分布を一点鎖線で示している。

下，非 LIRG）かに分けることができます。その結果，155 個の銀河から 43 個の LIRG が見つかりました。

こうして 155 個の銀河を形態（Sérsic 指数）と星形成活動（赤外線光度）でグループ分けをしました。図1にはそれぞれのグループに属する銀河を一つずつ例にとり，ハッブル宇宙望遠鏡（HST）の可視光 ($0.85 \mu\text{m}$) と MODS K_s バンドの画像，そしてベストフィットの Sérsic プロファイルを K_s バンドの画像から差引いた残差を載せています。円盤銀河的な光度分布を示す LIRG には K_s バンドでも顕著な渦巻き構造が見えているのがわ

かります。恒星質量の大きな円盤銀河的 LIRG の多くにはこのような構造が見られました。

図2は恒星質量で二つに分けて Sérsic 指数と銀河の大きさ（半光度半径）の分布を示しています。その結果，43 個の LIRG のうち実に9割以上が円盤銀河的だということがわかりました。さらに，恒星質量が大きく円盤銀河的な形態をもつ銀河だけを集めてくるとその中の6割は LIRG であることもわかりました。これらの観測結果は，激進化期の星形成活動が恒星質量の大きな大型円盤銀河の中で起きていることを意味しています。これらの傾向は可視光での研究からも報告されていましたが，近赤外線がとらえる構造（年老いた星の分布）においても変わっていないということになります。

それでは，この時代の円盤銀河は現在のそれと同じなのでしょうか？ それともまだ成長段階にあるのでしょうか？ それを確かめるために今度は銀河の大きさの波長による違いを調べてみました。近傍銀河には恒星種族（年齢・金属量）の分布の違いに起因して中心ほど赤く外側にいくに従って青くなる色勾配（radial color gradient）というものがあるため，銀河の大きさも測る波長によって変化します。これを激進化終焉期の銀河について調べて現在の銀河と比べた結果を図3に示します。ここでは K_s バンド（静止系 J バンド付近）での大きさを1として，HST の V バンド ($0.61 \mu\text{m}$, 静止系 U バンド) と z バンド ($0.85 \mu\text{m}$, 同 B バンド) 画像で測った大きさを示しています。近傍銀河のほうは Sloan Digital Sky Survey の銀河形態カタログから MODS の円盤銀河と同程度の恒星質量の円盤銀河だけを抽出して，波長 $0.35\text{--}0.91 \mu\text{m}$ 間の5バンドでの大きさを描いています。そうすると，激進化期の銀河のほうの色勾配が急であることがわかります。これまでに行われたいくつかの大規模な可視光銀河探索から，可視光で見た円盤銀河の大きさは過去80億年間ほとんど変化していないということがわかってお

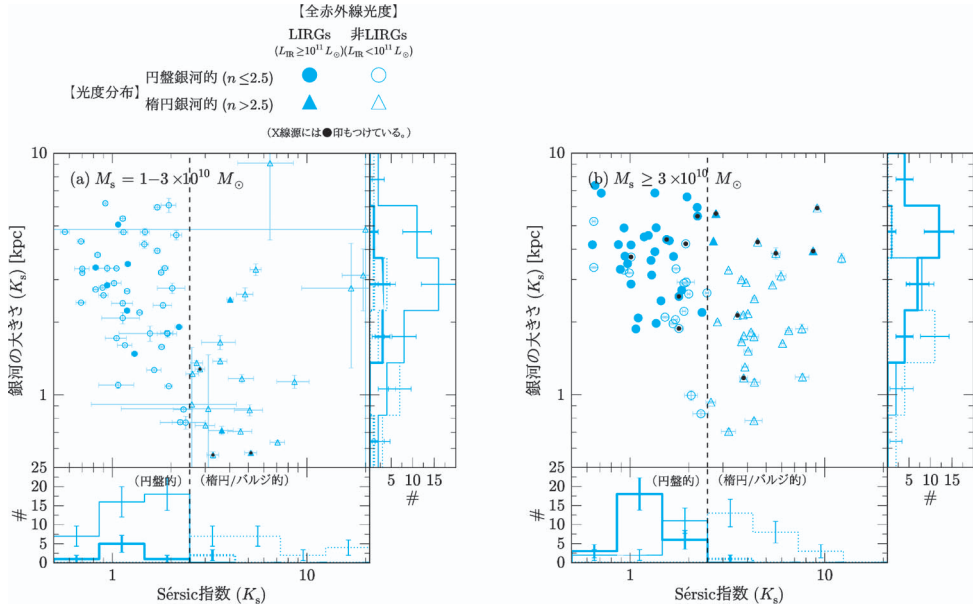


図2 近赤外線で調べた赤方偏移 ~ 1 にある銀河の Sérsic 指数 n と大きさ（半光度半径） R_e の分布。Sérsic 指数と全赤外線光度でサンプルを分けている（左上の説明）。恒星質量 $M_s = 3 \times 10^{10} M_\odot$ で分けてプロットしている。ほとんどの LIRG が $n \sim 1-2$ に分布している、つまり円盤銀河的であること、そして円盤銀河的な銀河の多くが LIRG であることがわかる。

り、この色勾配の違いは年老いた星で作られる骨格構造がまだ成長途上にあるためではないか、と私たちは解釈しています。

近年、激進化期の円盤銀河の近赤外線分光・面分光観測が行われるようになり、一部の円盤が力学的に安定した回転運動をすでに獲得していることや星形成領域が銀河外縁部に偏っている様子がわかってきています^{13), 14)}。これらの観測結果からは、当時の円盤銀河が現在の円盤銀河の原型をすでに構築している一方で、依然として円盤内部から徐々に骨格を固めていっている様子がうかがえます。これらの結果を踏まえて、“宇宙の星形成活動を代表していた高光度赤外線銀河が現在の銀河系のような大型円盤銀河へ成長していく”という銀河進化シナリオを考えると、宇宙の星形成史における銀河激進化期とは、円盤銀河的な高光度赤外線銀河が円盤部で大規模な星形成活動を起こしより大型化していく成長期であり、本研究で対象とした終焉期の銀河はその最終段階を迎えてい

た、と考えることができそうです。

5. まとめ

宇宙の星形成史のハイライトである銀河激進化期（今から 80–110 億年前）を担うのはダストに覆われながら大量に星を作っている銀河、赤外線銀河でした。本研究から、激進化終焉期に活躍する高光度赤外線銀河というクラスの銀河のほとんどは、銀河の骨格である年老いた星の分布でさえも円盤銀河の形をもっていることがわかりました。そして銀河の大きさの波長依存（色勾配）の考察から私たちは、それらの爆発的な星形成活動は（大規模な衝突などの重力相互作用ではなく）円盤の骨格成長に伴って起きているのではないかと考えています。

しかしながら、この円盤銀河形成シナリオが正しいかどうか決着をつける判断材料はまだまだ十分ではありません。時間軸を追って赤外線銀河の成長を調べていくことはもちろん重要です。ま

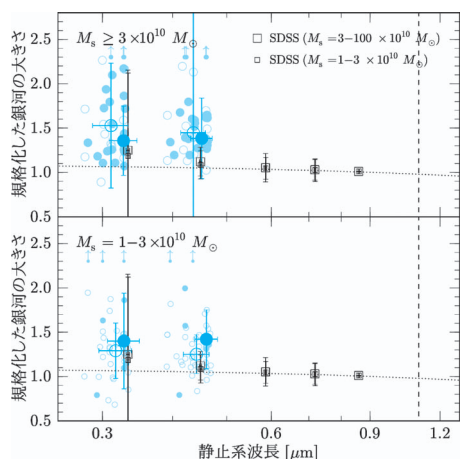


図3 赤方偏移 ~ 1 の円盤的銀河の波長ごとの大きさ(半光度半径). 静止系 J バンド付近($\sim 1.1\ \mu\text{m}$)での大きさで規格化してある. 丸記号は図2と同じく(LIRG: 塗りつぶし, 非LIRG: 中抜き)で, 大きなシンボルはそれぞれでの中間値を表す. 比較のために, 近傍円盤銀河の分布を四角記号と点線で示している. 近傍と比べて, 赤方偏移1では波長依存性が強いことがわかる.

た, 星形成を起こしている理由が円盤形成であったとして, 燃料となるガスはどこからどうやって供給されているのでしょうか. 今後は, すばる望遠鏡だけでなく, TMT (30 m 望遠鏡) や ALMA (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) によって星形成領域の詳細, 分子ガスの量や分布が得られるようになり, また JWST (ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡) によって詳細な近赤外線形態に効率よく迫ることができるようになるでしょう. それらにより, 銀河激進化期の理解, 銀河の形成と進化の理解が大きく進展すると期待されます.

謝辞

本稿は筆者の博士論文研究および論文3を基に作成したものです. 本研究の要である MOIRCS の開発と, それによるディープサーベイ遂行に当たり, あらゆる面でサポートしていただいたハワイ

観測所スタッフと関係者の皆様に深く感謝いたします. 最後に, 本稿執筆の機会をくださった浜名崇氏, そして執筆に当たりたいへんお世話になった天文月報編集委員会の皆様に感謝いたします.

参考文献

- 1) Hopkins A. M., Beacom J. F., 2006, ApJ 651, 142
- 2) Kajisawa M., et al., 2009, ApJ 702, 1393
- 3) Konishi M., et al., 2011, PASJ 63s2
- 4) Le Floch E., et al., 2005, ApJ 632, 169
- 5) Goto T., et al., 2010, A&A 514, 6
- 6) Gruppioni C., et al., 2010, A&A 518, L27
- 7) Bell E. F., et al., 2005, ApJ 625, 23
- 8) Seymour N., Symeonidis M., Page M. J., Huhnh M., Dwelly T., McHardy I. M., Riede G., 2010, MNRAS 402, 2666
- 9) Takagi T., et al., 2010, A&A 514, A5
- 10) Suzuki R., et al., 2008, PASJ 60, 1347
- 11) Sérsic J.-L., 1968, Atlas de Galaxias Australes (Cordoba: Obs. Astron.)
- 12) Peng C. Y., Ho L. C., Impey C. D., Rix H., 2002, AJ 124, 266
- 13) Lemoine-Busserolle M., Lamareille F., 2010, MNRAS 402, 2291
- 14) Neichel B., et al., 2008, A&A 484, 159

A Near-Infrared Morphological Study of Star-forming Galaxies at Redshift ~ 1 with Subaru/MOIRCS

Masahiro KONISHI

Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: Using the Subaru/MOIRCS Deep Survey K_s -band data, we investigate rest-frame near-infrared morphologies of galaxies at $0.8 \leq z \leq 1.2$ where the cosmic star formation activity has declined rapidly to the present. We find that luminous infrared galaxies (intensely starforming galaxies) at $z \sim 1$ have a factor of 3–5 times smaller disks than local disk galaxies in K_s -band while they show disk-like light profiles. The violent star formation beyond $z \sim 1$ may be strongly related to the formation of disk structure in disk galaxies.