

大規模データで探る銀河の形態進化

澁谷 隆俊

〈北見工業大学〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地〉

e-mail: tshibuya@mail.kitami-it.ac.jp



銀河は過去から現在にかけて形態を変化させ、そのサイズを大きくさせてきた。しかし、銀河形態の起源および進化の過程の解明には未だ至っていない。本稿では、これまで我々が取り組んできた、ハッブル宇宙望遠鏡の大規模データに基づく銀河形態研究について紹介する。

1. 銀河のかたち

銀河のかたち。その美しさ、不可思議さに惹かれ天文学者を志した方は少なくないのではないだろうか。第一線で活躍されている先生方の書籍^{1), 2)}、同年代の若手研究者の話を見聞きしているとそう感じる*1。私もその中の一人であり、特に銀河のかたちの起源には幼い頃から興味を抱いていた。

銀河形態進化の観測的研究は、ハッブル宇宙望遠鏡 (*HST*) の登場により、ここ 20 年程で急速に進展してきた。銀河形態指数³⁾、表面輝度プロファイル関数⁴⁾ などを用いた銀河形態の定量化により、現在では赤方偏移 $z \sim 7$ を超える遠方銀河の形態が調べられている^{5), 6)}。中でも、*HST* 深宇宙探査領域 3D-*HST*/CANDELS, HUDF および HFF のデータ (以降、*HST* レガシーデータと呼ぶ) は、銀河形態進化の理解に大きな力を発揮する (図 1)。合計探査面積は ~ 900 平方分角に達する。すばる望遠鏡の広視野カメラ *Suprime-Cam* の視野^{7), 8)} 全体に渡って、宇宙望遠鏡の空間分解能で画像が得られている、と想像していただければデータの凄さが伝わるだろうか。これらの領域には合計 ~ 19 万個の銀河が検出され、且つ、可視域から近赤外域の広い波長範囲で長時間観測さ

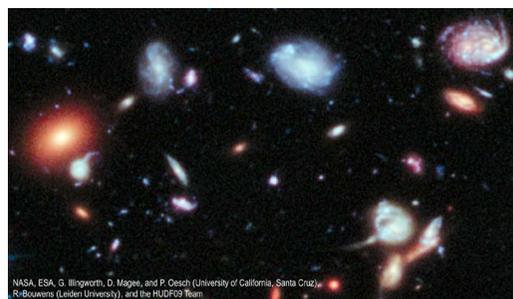


図1 HUDFの一部。

れているため、 $z \sim 0$ から $z \sim 10$ までの銀河の形態進化について統計的な研究を行うことができる。本稿では、これまで我々が取り組んできた、*HST* レガシーデータと大規模銀河サンプルに基づく (1) 銀河のサイズ進化^{9), 10)}、(2) 塊状銀河の進化¹¹⁾ の研究について概説する。

2. 銀河のサイズ進化

2.1 星形成銀河のサイズ進化

銀河は過去から現在にかけて衝突合体、星形成による成長などを繰り返し、そのサイズを大きくさせてきた。銀河のサイズ進化の研究は、銀河の成長過程や形成時の形態の情報が得られるため、重要視されている。

*1 こちらに関しては大規模データで探っていない。

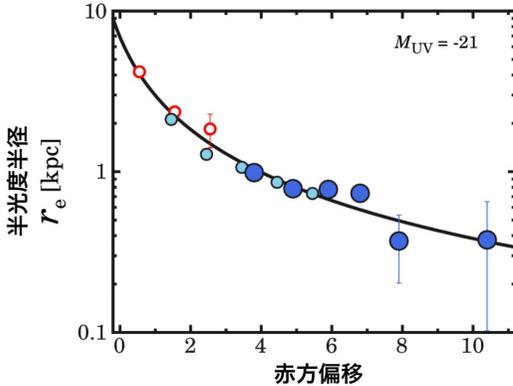


図2 星形成銀河の半光度半径 r_e の進化⁹⁾. 実線はベストフィット曲線 $r_e(z) \propto (1+z)^{-1.2}$. シンボルの違いは銀河サンプルの違い等を表す.

我々はHSTレガシーデータにある～19万個の銀河の画像を解析し、 $z \sim 0$ から $z \sim 10$ の星形成銀河の半光度半径 r_e を測定した. 銀河形態を広い赤方偏移範囲で調べるとき、様々な系統誤差が生じる可能性がある. 極力系統誤差の少ない研究を目指し、解析では、測定方法、測定波長帯、統計量等を全銀河に対して統一した. また、銀河サンプルの違いが最終結果に有意に影響しないことを確認した. 図2が得られた銀河サイズの進化である. これまで典型的サイズの決定が困難であった

$z \geq 6$ の宇宙から現在にかけて、銀河は平均的に、単調にサイズを大きくしていることが分かった.

各時代のサイズの頻度分布はどうなっているだろうか. 銀河円盤形成モデルによると、銀河の半光度半径 r_e とダークハローの半径 r_{vir} がスピンパラメータ λ を介して、

$$r_e \propto \lambda r_{\text{vir}} \quad (1)$$

と関係付けられる¹²⁾. この関係は、銀河(ガス)円盤がダークハローの内部で角運動量を獲得しながら形成する、として導出される. 式(1)によると、ある時代、ある r_{vir} (本研究では光度)の r_e は、 λ の頻度分布を反映する. 本研究で得られた r_e の頻度分布は対数正規分布型を示し、 λ の頻度分布と形、分布の幅、共に良く一致していることが分かった(図3). この傾向が $z \sim 0$ から $z \sim 6$ の遠方まで続いていた(図4). $z > 3$ の遠方宇宙において、 r_e の頻度分布が対数正規分布型をしていることを初めて十分に高い統計精度で示すことができた. さらに、広い赤方偏移範囲で、銀河の表面輝度プロファイルは円盤銀河に特徴的な傾き(セルシック指数 $n \sim 1$)を示していた(図5). 以上から、 $z \sim 0$ から少なくとも $z \sim 6$ の遠方まで、

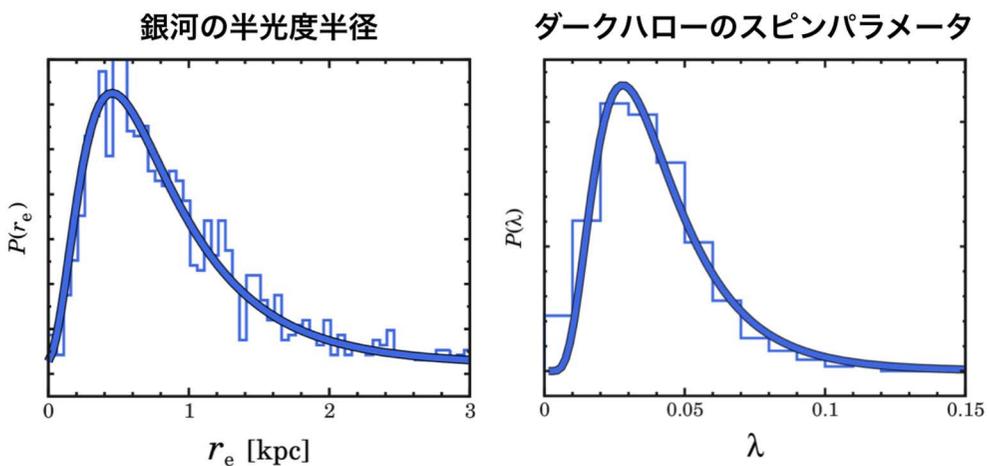


図3 (左図) 銀河の半光度半径 r_e の頻度分布⁹⁾. 赤方偏移 $z \sim 4$. (右図) N 体シミュレーションで得られたダークハローのスピンパラメータ λ の頻度分布(文献13の図1を再プロット). 曲線は対数正規分布関数によるベストフィット.

星形成銀河は平均的に「ダークハローの内部で角運動量を獲得しながら形成し、形成後は円盤銀河に近い表面輝度分布を持つ」という普遍性が見えてきた。最近では、角運動量の銀河質量依存性の研究¹⁴⁾、面分光データによる角運動量、 λ の推定¹⁵⁾など、さらに詳細な調査が進んでいる。

2.2 Ly α 輝線銀河のサイズ進化

ここまで星形成銀河全般について述べてきたが、その他の銀河種族のサイズ進化はどのようなになっているのだろうか。宇宙にはLy α を強く放射する銀河、Ly α 輝線銀河 (LAE)^{*2}、が存在する¹⁷⁾⁻²³⁾。LAEは典型的に低質量で若く、形成初期の銀河種族であると考えられている^{24), 25)}。では、形成初期の段階にあるLAEの（静止紫外域での）サイズは小さいのであろうか^{*3}。実際、これまでの研究²⁹⁾では、「Lyman break銀河 (LBG)^{*2}に比べて、LAEは典型的にコンパクトでサイズ進化しない」という報告がなされていて、その結果が長らく定説となっていた (図6左)。しかし、当該研究では別々の方法で測定されたサイズの文献値を集めただけであり、研究手法に再考の余地

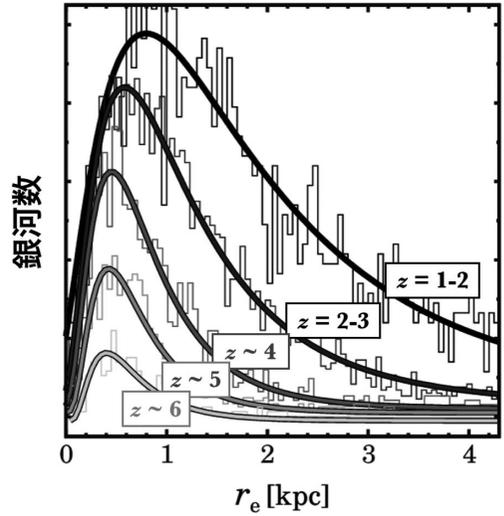


図4 赤方偏移 $z\sim 1-6$ 銀河の半光度半径 r_e の頻度分布⁹⁾。縦軸は銀河数(見やすいように定数倍している)。線の色が薄くなるほど高赤方偏移。曲線は対数正規分布関数によるベストフィット。

が残されていた。

我々は過去の観測で見つかったLAEを集め、サイズ進化の有無の再検討を行うことにした。サンプルの大きさは先述の先行研究の ~ 50 倍であ

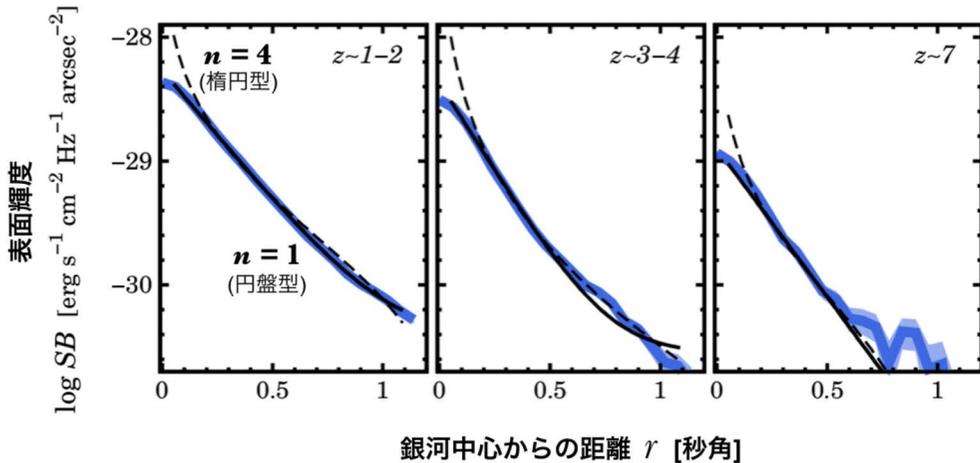


図5 星形成銀河の表面輝度プロファイル (青色)。実線は $n=1$ (円盤型)、破線は $n=4$ (楕円型) のセルシック関数によるベストフィット。各パネルの右上の数値は赤方偏移¹⁰⁾。

*2 LAE, LBGの定義については、過去の月報記事¹⁶⁾に詳しい記述がある。

*3 Ly α のサイズの研究もある^{26) -28)}。

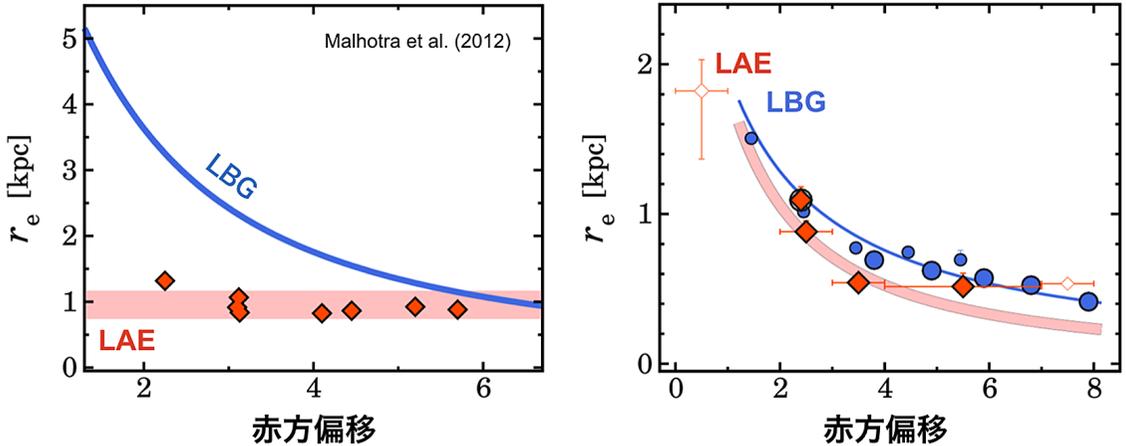


図6 LAEの半光度半径 r_e の進化. (左図) 先行研究 (文献29 の図1をもとに作成). 菱形はLAE, 実線はLBG. (右図) 本研究¹⁰. 菱形はLAE, 丸はLBG.

る. それら全てのLAEに対して, 同一の手法で r_e を測定した. サンプルの不均一性を注意深く取り除いたところ「LAEもLBGと同様のサイズ進化をしている」ことが分かった (図6右). 先行研究におけるLAEとLBGのサイズ差の原因は主に, 比較対象の銀河光度の不一致であると考えられる. さらにLAEは, LBGと同じく, 円盤銀河に近い表面輝度分布を持つことも明らかになった (図7). 以上の結果から, LAEの高いLy α 放射強度は, 銀河の星形成領域の形態に関係するというよりも寧ろ, 星間物質の構造—例えば「中性水素柱密度 N_{HI} が低くLy α 光子が抜け出し易い環境にある」など^{30)–33)}—に起因している可能性があることが分かった (図8).

3. 塊状銀河の進化

現在の宇宙では銀河の形態は主に, 楕円銀河, 渦巻銀河, 棒渦巻銀河, の3つに分類される. この秩序だった形態分類を「ハッブルの銀河形態分類 (音叉図)」と呼ぶが, 形態分類がいつ, どのように作られるかは現在でも解明されていない. $z \geq 1$ の遠方宇宙では近傍に比べて, 粒々な塊状構造 (giant clump) を持つ塊状銀河 (clumpy galaxy) が数多く存在することが知られている^{34)–36)}.

塊状構造は—銀河中央部のバルジの形成や成長に寄与する, など—形態分類の発現に深く関係すると考えられている.

塊状構造の性質と形成過程を統計的に探るべく, 我々はHSTレガシーデータの画像を解析し (図9, 10), 宇宙に存在する塊状銀河の割合 f_{clumpy} を測定した (図11). その結果, $z \sim 2-3$ までは遠方に行く程 f_{clumpy} が増大する, という従来の結果を確認することができた. しかし, $z \sim 2-3$ を超えると f_{clumpy} は下がり始める, という $z \geq 3$ の f_{clumpy} の進化傾向が初めて見えてきた. この f_{clumpy} の進化傾向から塊状構造の起源に迫ることができ. 塊状構造の形成過程には, 衝突合体などで銀河外から降着する外的要因と, 円盤不安定などによって形成される内的要因³⁹⁾がある. 今回得られた f_{clumpy} の進化は合体銀河の割合とは異なる傾向を示していた. また, 塊状構造の色を銀河中心からの距離に対してプロットしてみると, 銀河中心に行くにつれて赤い (すなわち古い) 星成分を持っていることが分かった (図12). 以上から, 塊状構造の多くは銀河円盤外縁部で内的要因で形成され, 銀河進化の過程で中心部に落ち込みバルジの形成や成長に寄与する, というシナリオと整合的であることが明らかになった.

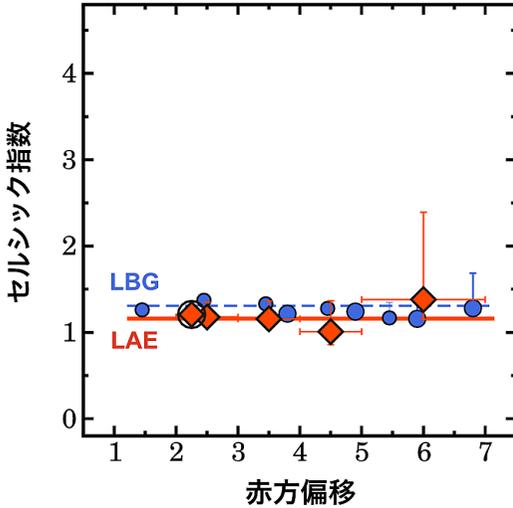


図7 LBGとLAEのセルシック指数¹⁰⁾。横軸は赤方偏移。菱形はLAE、丸はLBG。実線はLAEの、破線はLBGの平均値。

4. 研究の舞台裏

銀河形態研究の結果を淡々と紹介してきたが、常に順調に研究が進んだわけではない。研究を進める中で、他の研究グループとの競争にさらされた。研究開始のきっかけは、2014年3月の3D-HST/CANDELS銀河カタログの公開である⁴⁰⁾。このカタログにある～18万個の $z\sim 0-6$ の銀河をもとに、我々は銀河のサイズ研究に取り掛かった。遠方銀河の研究分野に限る話ではないが、世界有数のデータが絡む研究では、往々にして熾烈な論文出版競争が繰り広げられる。冒頭で述べたように3D-HST/CANDELSデータは遠方銀河の形態研究において貴重なデータであるがゆえ“データの争奪戦”が危惧された。しかし、とにかくできる限りやってみようという意気込みで研究を始めた。

大規模データに悪戦苦闘する毎日を送っていたが、カタログ公開から約1ヶ月後、気鋭の研究者A. van der Wel氏、斯界の権威M. Franx氏、P. G. van Dokkum氏率いる研究グループが～18万個の銀河全てに対して、そのサイズを測定し、 $z\sim 0$

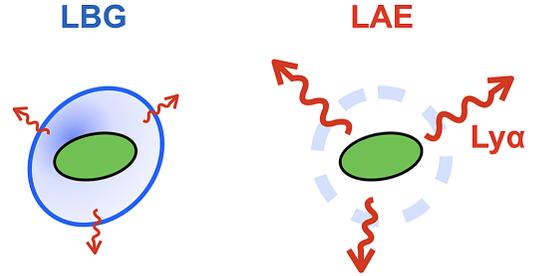


図8 LBG (左) と LAE (右) の構造。中心の楕円は星形成領域。青色は星間物質。波線はLy α 。

から $z\sim 3$ までのサイズ進化に関する研究を発表した⁴¹⁾。論文には $z\sim 7$ までのサイズ進化に関する言及もある。遠方銀河サイズ進化の研究において、3D-HST/CANDELSデータで調べられることはあまり残されていないかに見えた。しかし、折角始めた研究であるので、彼/彼女らの論文を読み込み、調べられていないことはないか模索することにした。

論文を読むと改善すべき点がいくつか見つかった。論文のサイズ測定は特定の観測バンドだけを使ったものであることが分かった。広い赤方偏移範囲で同じ波長帯の銀河形態を調べるには、複数バンドの画像を使わなくてはならない。しかし、論文では近赤外バンドの結果と、ある経験則を使って、別の波長帯のサイズを推定していた。また $z\geq 4$ の銀河サイズ進化については他の研究結果と比較しているだけであった。そのような折、播金優一氏(現 国立天文台)を中心として、HUDE, HFFも含めたHSTレガシーデータから合計～1万個の $z\geq 4$ 銀河が選択された⁴²⁾。我々は、これらの銀河サンプルを組み合わせて、 $z\sim 0-10$ の合計～19万個の銀河を使って研究を仕切り直すことにした。結果は先述の通りである。3D-HST/CANDELSデータだけでは見出せなかった遠方銀河の性質を明らかにできたと思う。

今後、“データの争奪戦”は苛烈を極めると考えられる。HSTの後継機、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)のデータ公開時のことを想

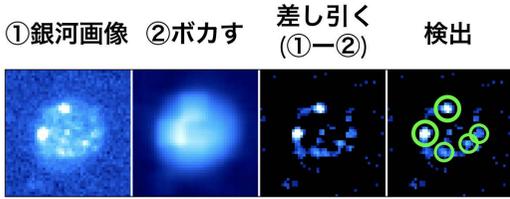


図9 塊状構造の検出方法.

像すると今から目眩さえ感じる。世界中の研究者がデータに殺到する中、先を越されることも多々あると思う。しかし、先を越されたときでも、一旦落ち着き「他の研究で調べられていないところ」を探ることで、自身の研究をより深いものにできる。過去の記事でも指摘されているが⁴³⁾、このことを今回の研究でも学ぶことができた。また「単一の観測領域／赤方偏移における研究」よりも、可能な限りデータを集めて、包括的に研究する方が本質的理解に繋がることも実感できた。大規模データを扱うことを恐れずに研究に臨みたい。

5. 今後の展望

最後に、僭越ながら今後の展望として、銀河形態研究における未解決問題—特に銀河サイズと塊状構造に関するもの—をいくつか列挙する。

銀河サイズの成長率は詳しく分かってきたものの、サイズ進化の原因については完全な理解には及んでいない。サイズ進化の原因の一つに銀河の衝突合体が挙げられるが、衝突合体が多い銀河高密度環境下でサイズ進化が促進されるかどうかは未だはっきりしない^{44), 45)}。また、銀河サイズ-光度関係が $z \sim 0$ から $z \sim 8$ の広い赤方偏移範囲で成り立っていることが分かったが⁹⁾、この関係はいつ発現したのか⁴⁶⁾。銀河形成時に既に成り立っているのだろうか。 $z > 10$ の統計的な銀河サイズ研究が望まれる。さらに、これまでの $z \geq 4$ の研究では主に静止紫外域でのサイズが調べられてきたが、静止可視光や輝線の観測から分かる星質量、電離ガスの分布とその進化にも注意を向けなくてはならない^{47), 48)}。最近では、球状星団の質

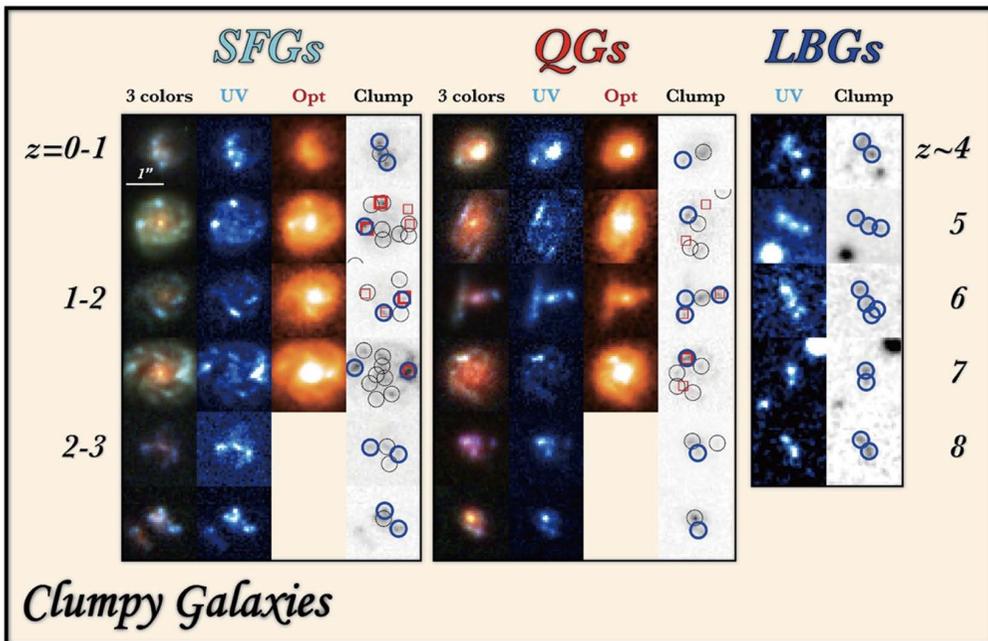


図10 塊状銀河の例¹¹⁾。"SFGs"は星形成銀河, "QGs"は非星形成銀河.

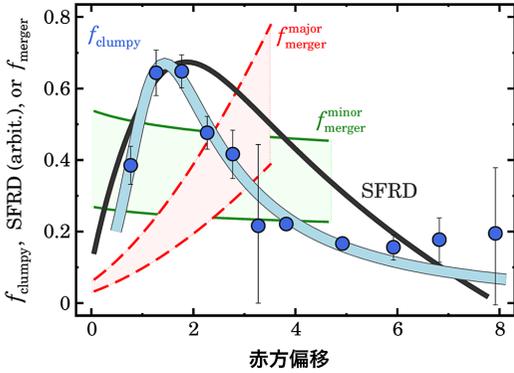


図11 塊状銀河の割合 f_{clumpy} (青丸, 青線), 星形成率密度 SFRD (黒線), 合体銀河の割合 f_{merger} (実線の帯: minor merger; 破線の帯: major merger)^{37), *4} の進化¹¹⁾.

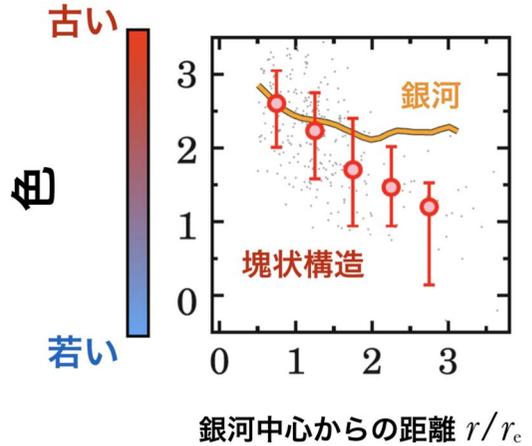


図12 塊状構造(丸)と銀河円盤(実線)の色¹¹⁾. 上に行くほど赤い. 横軸は銀河中心からの距離(銀河の半光度半径 r_e 単位).

量に迫る星質量 $\sim 10^6 M_{\odot}$ の“銀河”が $z \sim 6-9$ の遠方宇宙で見つかった⁴⁹⁾. それら宇宙初期の軽い系が, より重い星形成銀河と同様に円盤型をしているのか, それとも球状に近い形をしているのか, については興味深いところである.

塊状構造についても分からない点が多すぎる. 撮像データから発見されている塊状構造の多くは本当に内的要因で形成されたものであろうか. また, 形成後においても, 塊状構造が銀河中心に落ち込むか, 中心に落ち込む前に破壊されるか, は理論研究者の間でも意見が分かれるようである⁵⁰⁾⁻⁵²⁾. 塊状構造が中心に落ち込んだ後, どのような性質のバルジを形成するかについても観測的に調べる必要がある^{53), 54)}. 塊状構造は一時的に塊状に見えているだけで重力束縛系ではないとする理論予測までである⁵⁵⁾. これらの塊状構造の起源と運命については, 銀河副構造まで空間分解した分光観測による, 速度構造, 力学的安定性, フィードバックの強さなどの統計的研究が必須である⁵⁶⁾. f_{clumpy} の理論的再現も, ガス降着, 星形成活動, 銀河円盤安定性などを理解する上で課題となっている. ALMA などの電波望遠鏡による

ダスト, 分子ガス領域のサイズや塊状構造の研究も重要である^{57), 58)}.

分光観測に基づく研究では, JWST, 30 m 望遠鏡 (TMT) などの大型望遠鏡が威力を発揮するが, 銀河形態の環境依存性, 大質量銀河の形態の研究に対しては, すばる望遠鏡を始めとする地上望遠鏡の広領域探査データにも期待が寄せられる⁵⁹⁾. 研究手法の面では, 2015年頃から $z \geq 1$ の遠方銀河の形態研究に機械学習技術が応用されている⁶⁰⁾. 大量の画像と正解ラベルをネットワークに入力し, 画像内の形態的特徴を機械に学習させることで, 人間の目視によるチェックを模した形態判定が実現されている. JWST, TMT などによる高空間分解撮像および分光観測, 広領域探査データによる統計的研究, また, 機械学習技術の応用によって, 銀河形態進化の理解がさらに進むであろう.

銀河のかたち. 次世代の大型望遠鏡, 大規模データにより銀河のかたちの起源が解明されることを願って, 本稿の結びとする.

*4 最近では, $z \geq 3$ の f_{merger} の観測的研究もいくつかあり³⁸⁾, $z \geq 3$ の詳細な比較研究も求められる.

謝 辞

本稿は、2018年度日本天文学会研究奨励賞の授賞理由となった「大規模観測データを用いた高赤方偏移銀河の統計的研究」の一部をまとめたものである。より厳密な科学的議論は出版論文を参照していただきたい。これらの研究結果は多くの共同研究者のご協力をいただいで得られたものである。この場を借りて感謝の意を表したい。本稿で紹介しなかった研究でも他研究グループとの競争となり、大変な思いをすることもあった。そのような状況でも私を励まし、研究の議論に多くの時間を割いて下さった大内正己氏に心より感謝申し上げる。また、大学院生時代、指導教員として研究の基礎を教えて下さった家正則氏と柏川伸成氏に御礼申し上げる。紙面の都合上、全員のお名前は記載できないが、これまで私に関わって下さった全ての皆様に感謝申し上げたい。

小宮山裕氏、松田有一氏には原稿編集の際に大変お世話になった。井上茂樹氏からは理論研究者の観点から原稿について有益なコメントを頂いた。

参考文献

- 1) 谷口義明, 2013, 宇宙のはじまりの星はどこにあるのか (メディアファクトリー新書), 10
- 2) 吉田直紀, 2014, ムラムラする宇宙 (学研科学選書), 58
- 3) Conselice, C. J., 2014, ARA&A, 52, 291
- 4) Sérsic, J. L., 1963, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, 6, 41
- 5) Ono, Y., et al., 2013, ApJ, 777, 155
- 6) Kawamata, R., et al., 2015, ApJ, 804, 103
- 7) 例えば, Utsumi, Y., et al., 2010, ApJ, 721, 1680
- 8) 例えば, Tanaka, M., et al., 2010, ApJ, 708, 1168
- 9) Shibuya, T., et al., 2015, ApJS, 219, 15
- 10) Shibuya, T., et al., 2019, ApJ, 871, 164
- 11) Shibuya, T., et al., 2016, ApJ, 821, 72
- 12) Mo, H. J., et al., 1998, MNRAS, 295, 319
- 13) Bullock, J. S., et al., 2001, ApJ, 555, 240
- 14) Okamura, T., et al., 2018, ApJ, 854, 22
- 15) Swinbank, A. M., et al., 2017, MNRAS, 467, 3140
- 16) 柏川伸成, 2018, 天文月報, 111, 11
- 17) Iye, M., et al., 2006, Nature, 443, 186
- 18) Shimasaku, K., et al., 2006, PASJ, 58, 313
- 19) Kashikawa, N., et al., 2006, ApJ, 648, 7
- 20) Ouchi, M., et al., 2008, ApJS, 176, 301
- 21) Ota, K., et al., 2008, ApJ, 677, 12
- 22) Nagao, T., et al., 2008, ApJ, 680, 100
- 23) Mori, M., & Umemura, M., 2006, Nature, 440, 644
- 24) 小林正和, 2008, 天文月報, 101, 83
- 25) 矢島秀伸, 2015, 天文月報, 108, 834
- 26) Matsuda, Y., et al., 2012, MNRAS, 425, 878
- 27) Momose, R., et al., 2014, MNRAS, 442, 110
- 28) Zhang, H., et al., 2019, ApJ, submitted (arXiv:1905.09841)
- 29) Malhotra, S., et al., 2012, ApJ, 750, L36
- 30) Hashimoto, T., et al., 2015, ApJ, 812, 157
- 31) Nakajima, K., et al., 2016, ApJ, 831, L9
- 32) Shimakawa, R., et al., 2017, MNRAS, 468, 1123
- 33) Harikane, Y., et al., 2018, ApJ, 859, 84
- 34) Tadaki, K., et al., 2014, ApJ, 780, 77
- 35) Murata, K. L., 2014, ApJ, 786, 15
- 36) Guo, Y., et al., 2015, ApJ, 800, 39
- 37) Lotz, J. M., et al., 2011, ApJ, 742, 103
- 38) Ventou, E., et al., 2017, A&A, 608, A9
- 39) Noguchi, M., 1998, Nature, 392, 253
- 40) Skelton, R. E., et al., 2014, ApJS, 214, 24
- 41) van der Wel, A., et al., 2014, ApJ, 788, 28
- 42) Harikane, Y., et al., 2016, ApJ, 821, 123
- 43) 小野宜昭, 2017, 天文月報, 110, 59
- 44) Newman, A. B., et al., 2014, ApJ, 788, 51
- 45) Allen, R. J., 2016, ApJ, 826, 60
- 46) Liu, C., et al., 2017, MNRAS, 465, 3134
- 47) Kubo, M., et al., 2018, ApJ, 867, 1
- 48) Minowa, Y., et al. 2017, PASJ, submitted
- 49) Kikuchihara, S., et al., 2019, ApJ, submitted (arXiv:1905.06927)
- 50) Genel, S., et al., 2012, ApJ, 745, 11
- 51) Manderker, N., et al., 2017, MNRAS 464, 635
- 52) Oklopčić, A., et al., 2017, MNRAS, 465, 952
- 53) Inoue, S., & Saitoh, T. R., 2012, MNRAS, 422, 1902
- 54) Okamoto, T., 2013, MNRAS, 428, 718
- 55) Buck, T., et al., 2017, MNRAS, 468, 3628
- 56) Genzel, R., et al., 2011, ApJ, 733, 101
- 57) Fujimoto, S., et al., 2017, ApJ, 850, 83
- 58) Tadaki, K., et al., 2018, Nature, 560, 613
- 59) 小宮山裕, 2019, 天文月報, 112, 79
- 60) Huertas-Company, M., et al., 2015, ApJS, 221, 8

Morphological Evolution of Galaxies Revealed with Hubble Space Telescope Legacy Data

Takatoshi SHIBUYA

Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507, Japan

Abstract: I review our observational studies on galaxy morphological properties at $z \sim 0-10$ based on *Hubble Space Telescope* legacy data.