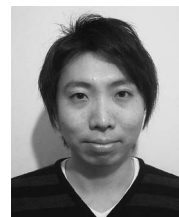


40億年前の宇宙にうつしだされた 「赤く燃ゆる銀河」のすみか



小山 佑世

〈国立天文台光赤外研究部 (独)日本学術振興会特別研究員 PD) 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: koyama.yusei@nao.ac.jp

すばる望遠鏡を用いたパノラマ観測によって、私たちはおよそ40億年前の宇宙にある巨大な銀河団の周辺に、赤く輝く星形成銀河を多数発見しました。この「赤く燃ゆる銀河」の正体は、若い銀河から年老いた銀河へ、いままさに進化を遂げようとする銀河の姿です。そんな人生の過渡期にある銀河が、銀河団から遠く離れた小さな銀河群領域に群れをなして存在していることがわかりました。まれな天体であると思われていた赤い星形成銀河の集中する領域がこれほどはっきりと示されたのは初めてのことで、銀河団や銀河群における銀河の進化を理解するうえで重要な手掛かりになりそうです。

1. はじめに

宇宙はひしめきあう銀河の世界です。はるか遠い昔に銀河は生まれ、その後、互いの重力で引き合っって銀河は群れを作ります。数百個の銀河で構成される大きな銀河集団を「銀河団」と呼び、それより小さな集団を「銀河群」と呼びます。銀河は、ただ群れ集まるのではありません。群れを作りながら銀河自身もその性質を変化させます。人間も、住む場所が変わり生活環境が変化すると、その人の性格まで変わってしまうことがよくあります。それと同じで、銀河も棲息する場所によって性質を変えることがあるのです。

例えば、銀河団のような「銀河の大都会」に住む銀河は、そのほとんどが赤い色をした楕円銀河やレンズ状銀河(S0銀河)です。これらの銀河では星形成活動がすでに終了し、新しい星は生まれていません。一方、大きな群れに属さない孤独な銀河たちは、その多くが青い色の渦巻銀河や不規則銀河です。これらの銀河では星形成活動が盛んに行われ、銀河内部に新しい星が次々に生まれ

ています¹⁾。この不思議な「銀河宇宙のすみ分け規則」は、宇宙のいつの時代に、どのように確立したのでしょうか？ その答えを得るために、多くの研究者が日々、遠方宇宙の銀河団を観測する試みを続けています。遠方の銀河団とはまさに、過去の宇宙で銀河が群れ集まる現場であり、その場所を調査することで、銀河団や銀河群の形成に伴う銀河進化の様子を直接調べることができるのです。

2. すばるパノラマ写真の威力

2.1 遠方宇宙の大規模構造が見えてきた

近年の大型望遠鏡の登場で、何十億光年も離れた宇宙にある銀河を観測することが可能になりました。わが国のすばる望遠鏡もその一つで、現在も数多くの世界的発見を続けています。すばる望遠鏡は広い視野を生かした観測を得意とします。特に、すばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam は30分角(およそ満月1個分の大きさ)という視野をもち、他の8メートル級望遠鏡を圧倒しています。

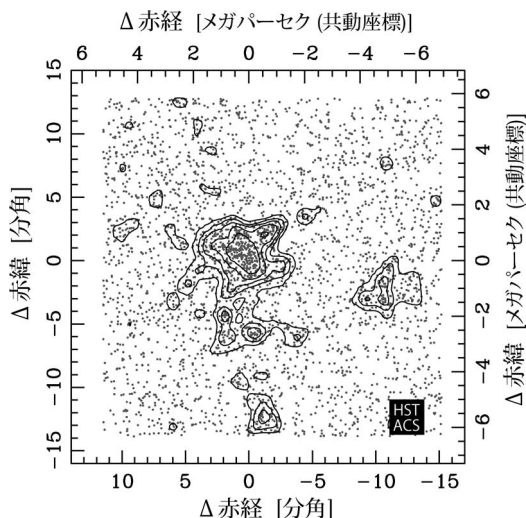


図1 すばる望遠鏡の観測で明らかになった、エイベル851銀河団とその周辺の銀河分布. プロットされているのは、Iバンドで24等より明るく、測光的赤方偏移 (photo-z) が0.30から0.45の間の銀河. 等高線は銀河の個数密度に基づいて描かれている. 比較のため、ハッブル宇宙望遠鏡のACSの視野を右下に示した.

私たちは、この広い視野をもつ Suprime-Cam を活用し、遠方銀河団の観測プロジェクトを進めてきました²⁾. その先駆けとなったのが、いまからおおよそ10年前に行われた、エイベル851という銀河団の研究です³⁾. このエイベル851銀河団*¹は、おおぐま座の方向にあり、私たちから約40億光年ほど離れたところに存在する有名な銀河団です (赤方偏移は0.41). この領域を Suprime-Cam で広く観測したところ、30分角の視野をはみださんばかりに広がるフィラメント状の大規模構造の存在が明らかになりました (図1).

この研究を皮切りに、すばる望遠鏡はさまざまな時代の宇宙大規模構造を発見してきました⁴⁾⁻⁶⁾. 最近では赤方偏移1を超える宇宙の構造も見えてきています⁷⁾. 何十億光年も彼方の宇宙に蜘蛛の巣のように広がる巨大な構造を見つけること自体、非常にエキサイティングな話題です.

しかし、私たちは構造を見つけて満足するのではなく、その構造のなかで起こる銀河進化のドラマを明らかにしたいと考えています. 実は、すばる望遠鏡の広視野観測で見えてきた遠方宇宙の大規模構造は、銀河の進化を考えるうえで極めて重要な場所である可能性が見えてきています.

2.2 銀河団の周辺部で変わりゆく銀河のすがた

ここで紹介したエイベル851銀河団の研究によって、銀河の進化についても重要な事実が明らかになりました. それは、図1で見たフィラメント構造の内部で、赤い銀河が急激に増えているということです.

銀河は通常、星形成を盛んに行っていると、青くて明るい星 (O型星やB型星のような寿命の短い星) の光が卓越するため、青色を示します. しかし何らかの原因で星形成がストップし、新しい星が作られなくなると、まもなく青い星が死に絶えるので、銀河は赤い色に変化していきます. つまり赤い銀河とは、青くて若い星がいなくなった後の「お年寄り銀河」だと考えることができます. そんなお年寄り銀河が、銀河団のような非常に密度の高い環境だけでなく、銀河団周辺のそれほど密度が高くない場所でも多数見つかったということは、銀河団から遠く離れた場所で銀河の性質が大きく変化していることを意味します. 遠方銀河団の周辺領域というのは、それまであまり調べられていなかったもので、この発見は驚くべきものでした. 私たちはこの銀河団の周辺環境を、より詳細に調べる必要があると考え、以下に述べる「狭帯域フィルター」を用いた星形成銀河の探索を実行することにしたのです.

3. 星形成活動を「撮る」という手法

3.1 H α 輝線

銀河の星形成活動を調べる方法にはさまざまなものがありますが、なかでも優良な指標としてよ

*¹ CL0939+4713という名前でも知られています.

く使われるのが「H α 輝線（静止波長6,563 Å）」です。H α 輝線とは、若い高温の星の周りでガスが電離された領域（H II領域）から放出される水素の再結合線で、このH α 輝線が強いほど銀河は盛んに星を作っている（＝星形成率が高い）と考えることができます。H α 輝線は静止系で可視光の領域にあるため、静止系紫外線の光を利用するその他の指標に比べるとダストの影響を受けにくい利点があります。一方でH α 輝線には、遠方宇宙の探査で使いにくいという弱点があります。赤方偏移が0.4を超える銀河では、H α 輝線は9,000 Åより長い波長域（近赤外線）で観測されることになります。この波長域には地球大気が発する明るい輝線（OH夜光）が多数存在するため、地上からの観測は大きく妨げられてしまいます。実際、赤方偏移0.4を超える宇宙の銀河団領域を狙った大規模なH α 輝線探査はほとんど例がありませんでした。

3.2 エイベル851, 再び

上で紹介したエイベル851銀河団は赤方偏移が0.4なので、H α 輝線は9,200 Å付近にやってきます。普通ならば当然、観測の難しい波長帯です。しかし幸運なことに、この9,200 Å付近には観測を妨げる強い夜光輝線の存在しない、恵まれた波長域があります。そのおかげで、エイベル851銀河団からやってくるH α 輝線は地上から観測することができるのです。

そこで私たちは、改めてエイベル851銀河団をSuprime-Camを用いて広く観測することにしました。ただし今回はNB921という名前の特種フィルターを使います。このNB921フィルターは、9,180 Åを透過中心とし、おおよそ9,110 Åから9,250 Åという限られた波長域の光だけを通すように設計されており、赤方偏移0.4のH α 輝線をちょうどとらえることができます。このようにある特定の波長の光だけを通すフィルターを「狭帯域フィルター（以下、ナローバンド）」といて、通常用いられるBバンドやRバンドなど

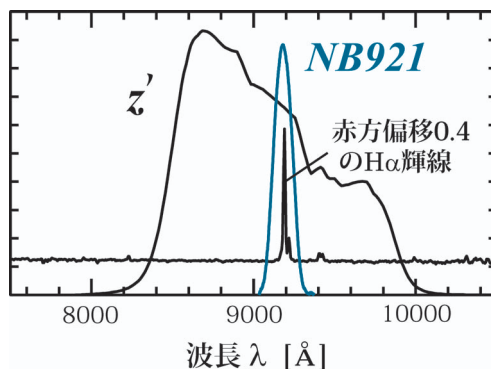


図2 本研究で使用したナローバンド (NB921) とブロードバンド (z' バンド) の透過曲線に、 $z=0.4$ に赤方偏移させた星形成銀河のスペクトル⁸⁾を重ねる。 $z=0.4$ のHAEであれば、NB921で明るく見えるはずである。

の「広帯域フィルター（以下、ブロードバンド）」と区別します。

ナローバンドを使った銀河探査の原理は簡単です。上述のとおり、新しい星が生まれている星形成銀河からは強いH α 輝線が放出されます。赤方偏移0.4にあるエイベル851銀河団に属する銀河の場合、このH α 輝線がちょうどNB921フィルターに入ってくるので（図2を参照）、NB921フィルターを装着した画像では明るく見えることになります。つまり、NB921フィルターを装着して撮影した画像と、ブロードバンド（ここではz'バンド）を使って撮影した画像を比較し、ナローバンド画像で特に明るい天体をピックアップすればよいのです（図3左）。ただし、ここには赤方偏移0.4のH α 輝線銀河（H α エミッター、以下HAEと表す）のほかにも、例えば赤方偏移0.8の[O III]輝線や赤方偏移0.9のH β 輝線、あるいは赤方偏移1.5の[O II]輝線など、私たちがここでは望んでいない時代の銀河の輝線が混入することがあるので、これらは銀河の色に基づいて除く必要があります（図3右）。この一連の作業を行った結果、私たちが研究対象とする赤方偏移0.4のHAEが400個以上も見つかりました*2。

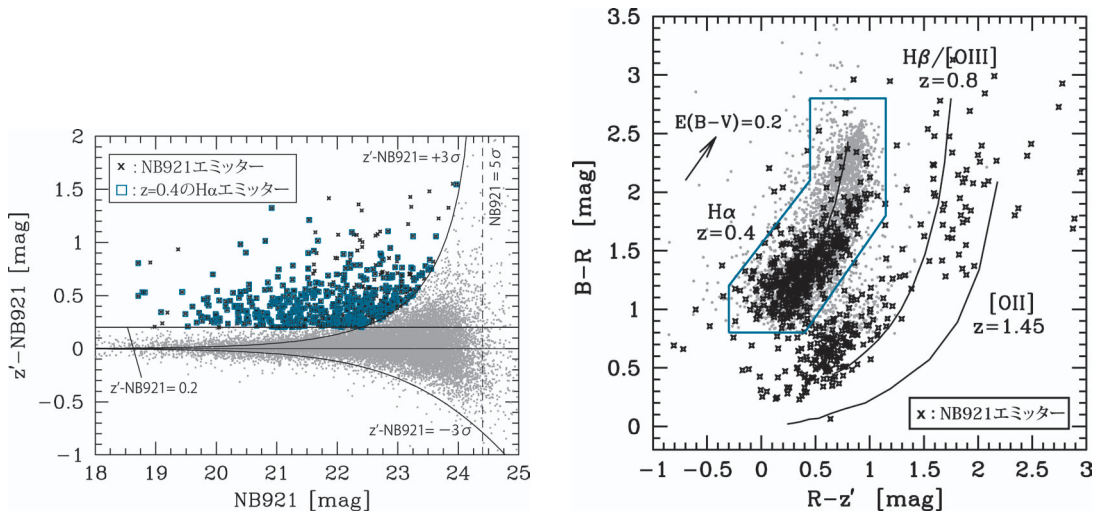


図3 (左) ブロードバンド (z' バンド) に比べてナローバンド (NB921) で明るく見える銀河を選びだすプロット。ナローバンドに輝線が入っているときの図で上方にプロットされる。ここでは、 $z' - \text{NB921} > 0.2$ かつ $z' - \text{NB} > 3\sigma$ の銀河をエミッターと定義した。さらに右図によって赤方偏移0.4のHAEであると認められたものを青い□で表す。(右) HAEを選び出すための2色図 ($B-R$ vs $R-z'$)。測光的赤方偏移が0.30-0.45の銀河を灰色の点で、左図でNB921エミッターと選ばれたものを黒い×印で表す。 $z=0.4, 0.8, 1.45$ のモデル銀河⁹⁾のカラートラックも示した。本研究ではNB921エミッターのうち、青い枠線で囲まれた領域に入るものを $z=0.4$ のH α エミッターとして選出した。

一般に、銀河の輝線を観測したい場合には銀河を分光観測する必要があります。最近ではさまざまな大型望遠鏡に多天体分光の機能をもつ装置が搭載されていますが、それでも視野内の限られた数の銀河しか調べることができません。ところが、ナローバンド画像を使うと、観測視野内のすべての銀河について、ある強さ以上の輝線をもつものを一網打尽にとらえることができます。これこそがナローバンド探査の真髄であり、広い視野をもつすばる望遠鏡との相性は抜群で、遠方銀河の研究のみならずさまざまな研究分野で応用されている手法です。

それでは、上で選択されたHAEの空間分布を見てみましょう(図4)。図1で見た大規模構造をなぞるように、多数のHAEが分布する様子が見取れます。改めてこのエイベル851銀河団周り

の巨大な構造を確認すると同時に、以下に示すとおり、私たちは予想外にも「赤い色」をもつHAEが多数存在することを発見したのです。

4. 赤く燃ゆる銀河

4.1 浮かび上がった赤い星形成銀河のすみか

ここからが本研究の最も重要な部分になります。まず、私たちが発見したHAEの多くは青い色を示します。2.2節でも述べたとおり、星形成を盛んに行っている銀河では、青い星の光が卓越して銀河は青く見えます。H α 輝線を強く出すHAEたちは星形成活動の真っ最中であると考えられるので、HAEが青い色をもつのはごく自然なことだと言えます。

しかし、私たちはそんなHAEたちのなかに、普通の星形成銀河では考えにくい「赤い色」をも

*2 本研究のHAEセレクションは、H α 輝線の静止系等価幅がおよそ20 Å以上、かつ星形成率がおよそ0.3 M_{\odot}/yr 以上の銀河が選ばれています。

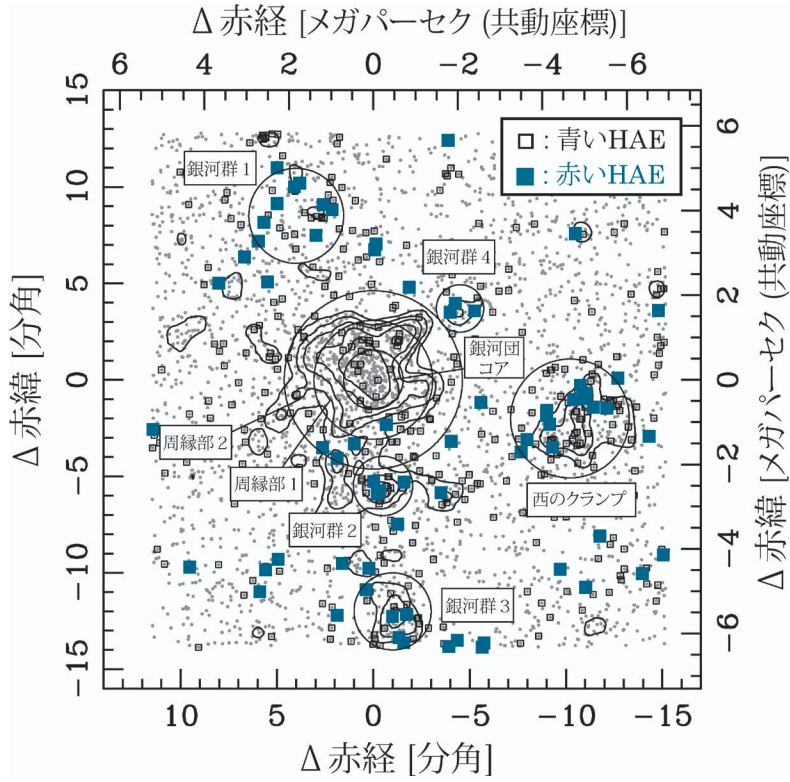


図4 エイベル851銀河団周辺のHAEの分布。背景にプロットされている灰色の点および等高線は図1と同じである。HAEは確かに図1で見た構造に沿って分布し、特に赤いHAEが銀河団の周辺構造に集中する様子が見て取れる。

つ銀河が多数存在していることを突き止めたのです。この赤い色をもつHAEのことを、私たちは「赤く燃ゆる銀河」と名づけ、その存在環境を詳しく調べることにしました。再び図4をご覧ください。すでにお気づきのとおり、「赤く燃ゆる銀河（図では青い■）」は、銀河団の中心付近にはほとんど存在せず、銀河団から遠く離れた銀河群領域に集中して存在しているようすがはっきりと見て取れます。この事実こそ、本稿で最もお伝えしたかったポイントです。

もう少し詳しく様子を探ってみましょう。図5をご覧ください。先ほどの図4の中で定義されて

いるさまざまな環境ごとに「色等級図」が示されています。色等級図を使うと銀河の色をより詳しく調べることができます*3。「赤く燃ゆる銀河」はここでも青い■印で示されていますが、やはり銀河団に近い領域にはほとんど見られないのに対し、銀河団から遠く離れた西のクランプや銀河群領域には多数存在することがわかります。この「目で見て明らかである」というのはたいへん説得力があるのですが、もう少し定量的に示してみましょう。定量化の方法はいろいろありますが、ここではシンプルに「HAEのなかで赤い銀河の割合」を計算することになります（図6）。銀河団

*3 ここまで「赤い銀河」・「青い銀河」という表現を漠然と使ってきましたが、図5を見てわかるとおり、本研究ではB-I=2という境界線を設け、それより赤いものを「赤い銀河」、それより青いものを「青い銀河」と呼んでいます。「赤く燃ゆる銀河」とはすなわち、HAEのなかでB-I>2の色をもつ銀河として定義されています。

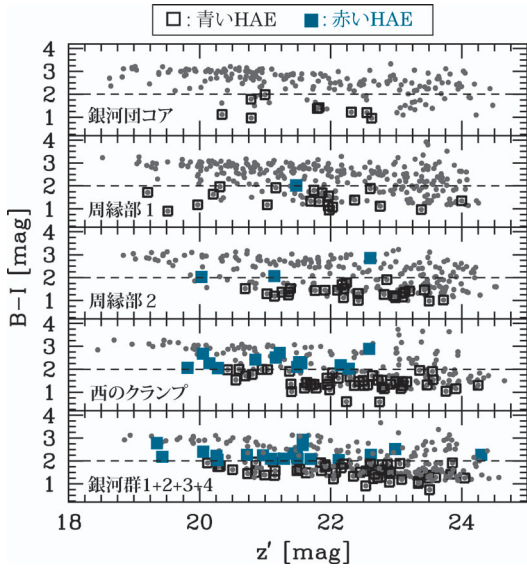


図5 さまざまな環境ごとに作成した銀河の色等級図 (B-I vs. z'). 環境の定義は図4を参照すること. 破線で示したB-I=2のラインが本研究における赤い銀河と青い銀河の境界である. 銀河団の中心付近には見られない赤いHAE (青い■印)が, 西のクランプと銀河群領域には多数存在しているのがわかる.

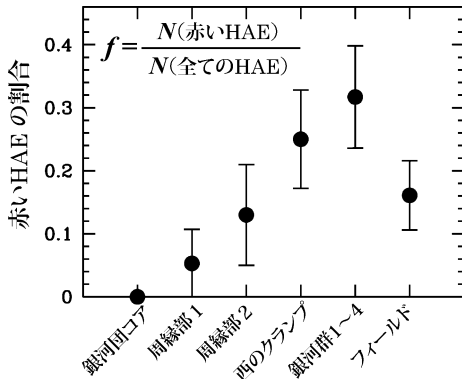


図6 赤いHAEの割合を環境別に計算したものの. 銀河団の中心付近には赤いHAEは存在しないので縦軸の値は0となるが, 銀河群領域ではこの割合が30%にもなる.

の中心近くには「青いHAE」は存在しても「赤いHAE (=赤く燃ゆる銀河)」は存在しないので, この割合は0になります. 一方で, 銀河群領域で

はこの割合がおよそ30%という高い値を示していることがわかります. 星形成銀河は青いだろうと考えていた私たちの常識からすれば, 驚くほど大きな数字です. またこれをさらに言い換えれば, 「赤い銀河」と一言でいってもその性質は環境によって大きく異なっている, と表現することもできます. 銀河群環境の赤い銀河には「赤く燃ゆる銀河」が実は相当数含まれていることが, 本研究で明らかになりました.

4.2 赤い星形成銀河は私たちに何を語るか?

それでは, この「赤く燃ゆる銀河」はいったい何者で, どうして銀河群という場所を好んで棲息しているのでしょうか? この質問への明確な答えは, 残念ながらまだ得られていません. 一般論を述べれば, 銀河は星形成活動を行っている限り青い色を示し, 星形成をやめるとまもなく青い星が死に絶えて銀河は赤くなります. 今回見つかった「赤く燃ゆる銀河」は, 赤い色をしているため, 一見すると星形成活動の「弱い」銀河ではないかと誤解されてしまいそうです. しかしその一方で強いH α 輝線が確かに観測されているため, その解釈は簡単ではないのです.

「赤く燃ゆる銀河」について言えることが二つあります. まず, 繰り返しになりますが, 強いH α 輝線が確かに存在するという事です. これはすなわち, 銀河の内部で活発な星形成が行われていることを意味します. 若くて青い星がたくさん生まれているはずなのに, 銀河全体が赤く見えるということは, 銀河の中の「ダスト」が影響している可能性が考えられます. 銀河のなかにあるダストは, 特に青い光をよく吸収する性質があるため, 本来の色より銀河が赤く見ることがあります (これを「赤化」といいます). 今回見つかった「赤く燃ゆる銀河」も, ダストによる赤化を強く受けた銀河であると私たちは考えていますが, 真相の解明には, 中間赤外線や遠赤外線によるダストの観測が必要になります. 実は, 私たちが過去に行った遠方銀河団の中間赤外線の観測に

よって、遠方銀河団周辺部に中間赤外線で明るい銀河が多数見つかった例があります¹⁰⁾。その経験を踏まえれば、「赤く燃ゆる銀河」がダスト赤化を強く受けた銀河である可能性は高いと言えます。

もう一つ言えることがあります。2.2節で述べたとおり、10年前にこのエイベル851銀河団が研究され、銀河団周辺の銀河群環境で、赤いお年寄り銀河が増えている様子が示されました。このお年寄り銀河の増える場所が、今回の研究で見つかった「赤く燃ゆる銀河」の集中領域と見事に一致していたのです。このことから、おそらく「赤く燃ゆる銀河」とは、銀河が若年期から老年期へと移りゆく、ちょうど「人生の過渡期」にある銀河だと解釈することができます。そんな人生の過渡期にある銀河が、銀河群環境にもっとも多く存在していたということは、少なくとも今回調査した40億年前の宇宙において、銀河群という環境が銀河の進化を促進する重要な場所であったことを物語っています。

4.3 赤い星形成銀河の行く末と今後の指針

「赤く燃ゆる銀河」は銀河団銀河の進化を考えると極めて重要な種族であると考えられます。しかし、私たちはまだこれらの存在を発見した段階であり、その正体は謎に包まれています。そこで最後に、この「赤く燃ゆる銀河」の正体解明に向けて筆者なりに今後の指針を整理しておきたいと思います。

まず、「赤く燃ゆる銀河」はそれぞれの銀河内部のどこで星形成を行っているのでしょうか。たとえば、普通の渦巻銀河のように銀河のディスク部分全体で星を作っているのでしょうか。それとも銀河の中心核付近に集中して星形成が起きているのでしょうか。これを知るためには「赤く燃ゆる銀河」たちを「面分光観測」する手法が効果的です。面分光観測ならば銀河内部のどこから強い輝線が出ているのか調べることができます。もしも「赤く燃ゆる銀河」の星形成活動が銀河の中心

核付近に集中しているとすれば、それは以下に述べるように、長年の謎であった銀河団S0銀河の起源と関係があるかもしれません。

というのも、現在の宇宙の銀河団にはS0銀河が多数存在しますが、この銀河団中のS0銀河は宇宙の歴史の後半（最近の50億年くらいの間）に急速に増えてきたと言われていています¹¹⁾。S0銀河の起源として、よく渦巻銀河が考えられますが、実は現在の宇宙に見られる銀河団のS0銀河を作るためには、渦巻銀河の星形成活動を止めるだけでは不十分で、「バルジを太らせる」必要があると言われていています^{12), 13)}。私たちが見つけた40億年前の宇宙の「赤く燃ゆる銀河」が中心核でスターバーストを起こしているのだとすれば、「赤く燃ゆる銀河」たちは今まさにバルジを成長させている最中であり、いずれS0銀河の仲間入りをするその準備段階にあるのではないかと考えることができます。最近では銀河形態の研究から、S0銀河が銀河群環境で特に効率よく形成されているという報告もあるので^{14), 15)}、同じく銀河群領域に見つかった本研究の「赤く燃ゆる銀河」がS0銀河の形成にかかわっている可能性は大いにあるでしょう。

もう一つ、明らかにしなくてはならないことがあります。それは「赤く燃ゆる銀河」における活動銀河核(AGN)の役割です。現状では観測されたH α 輝線が、星形成に由来するものなのか、AGNに由来するものなのか、あるいはその両方なのか、明確に分離することはできません。近傍の宇宙では銀河団中のAGNは少ないと言われていますが、遠方宇宙でそれを信じてよいのかどうかもわかりません。「赤く燃ゆる銀河」を輝かせるエネルギー源をきちんと知るためには、個々の銀河を丁寧に分光観測すること、そして同時にダストに隠された活動性を見落とさないよう、近赤外線・中間赤外線のデータを組み合わせた多波長でのアプローチが必要になるでしょう。

5. おわりに

最後にもう一度、本研究成果は非常に広い視野を誇るすばる望遠鏡だからこそなし得たものであることを強調しておきます。すばる望遠鏡のパノラマ観測のおかげで、銀河団から遠く離れた領域に「赤く燃ゆる銀河(=人生の過渡期にある銀河)」のすみかを発見することができました。中心にあって華やかなイメージの銀河団領域ではなく、これまであまり主役になることのなかった銀河団周辺の銀河群にこそ、実は大切な宝物が眠っていた、と言うことができます。

遠方銀河の研究という、100億光年を超えるような超遠方宇宙の研究に目がいきがちですが、もう少し近場の宇宙にもまだまだ解き明かすべき謎がたくさんあるという印象です。本研究で40億年前の宇宙に見つかった「赤く燃ゆる銀河」も、銀河の進化、とりわけ銀河団銀河の進化を理解するうえで極めて重要な種族であることは間違いありません。しかしその「赤く燃ゆる銀河」が現れる物理的要因はまだわかっていません。今後は「赤く燃ゆる銀河」一つひとつをさまざまな方面から解剖し、その正体に迫っていくことが、私たちの使命であると考えています。この「赤く燃ゆる銀河」の起源が解明されるとき、銀河の進化と環境の関係についてまた一歩、理解が進むと期待しています。

謝辞

本研究は、国立天文台の児玉忠恭氏、仲田史明氏、東京大学の岡村定矩氏、嶋作一大氏とともに筆者が博士論文の一部として行ったものです。上記の皆さまには多くのことを教えていただき、また長時間の議論に付き合ってくださいました。また、論文の審査にあたってくださった本原顕太郎氏、家正則氏、河野孝太郎氏、吉井譲氏、有本信雄氏にはご多忙のなか論文を丁寧に読んでいただき、有益なコメントを多数いただきました。

最後に、本稿執筆の機会を与えてくださった柏川伸成氏、および執筆にあたりお世話になった天文月報編集委員会の皆さまに深く感謝いたします。なお、執筆のお声掛けをいただくきっかけとなった、すばる望遠鏡のニュースリリースにあたり、国立天文台ハワイ観測所の藤原英明氏にはたいへんお世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば, Dressler A., 1980, ApJ 236, 351
- 2) Kodama T., et al., 2005, PASJ 57, 309
- 3) Kodama T., et al., 2001, ApJ 562, L9
- 4) Tanaka M., et al., 2005, MNRAS 362, 268
- 5) Nakata F., et al., 2005, MNRAS 357, 1357
- 6) Koyama Y., et al., 2007, MNRAS 382, 1719
- 7) 例えば, Tanaka M., et al., 2007, MNRAS 377, 1206
- 8) Kinney A., et al., 1996, ApJ 467, 38
- 9) Kodama T., Bell E.F., Bower R.G., 1999, MNRAS 302, 152
- 10) Koyama Y., et al. 2010, MNRAS 403, 1611
- 11) Dressler A., et al. 1997, ApJ 490, 577
- 12) Christlein D., Zabludoff A. I., 2004, ApJ 616, 192
- 13) Kodama T., Smail I., et al., 2001, MNRAS 326, 637
- 14) Wilman, D., et al., 2009, ApJ 692, 298
- 15) Just D., et al., 2010, ApJ 711, 192

A Panoramic Mapping of Red Star Forming Galaxies at $z=0.4$

Yusei KOYAMA

Optical & Infrared Astronomy Division, National Astronomical Observatory of Japan (JSPS research fellow), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We report a wide-field H α emitter survey around a distant galaxy cluster at $z=0.4$, using the narrow-band filter on Suprime-Cam/Subaru. The majority of the H α emitters are blue, while we find that an unexpectedly large number of H α emitters show red colors. Such red star-forming galaxies are likely to be in the transitional phase from young population to older, and interestingly, we revealed that they are most numerous in the cluster surrounding groups and filaments.