

論文内容の要旨

Properties of Galaxies in the Era of Strong Evolution:
The Dependence on Mass and Environment
(銀河進化の全盛期における銀河の性質の質量及び環境依存性)

林 将央

現在の宇宙には、渦巻銀河や楕円銀河など多種多様な姿をした銀河が無数に存在している。これらの銀河がどのような状況で生まれ、どのような過程をたどって今日の姿へと進化してきたのか。銀河の形成と進化については依然よく解っていないことが多く、その解明は現代の天文学における重要な研究テーマの1つである。

現在の銀河の姿は、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) に代表される広視野の大規模な撮像分光サーベイによって、くまなく探査されてきている。その結果、銀河の形態や銀河の星形成活動の活発さ、銀河内の星間ガスの金属量といった銀河の基本的な性質は、その恒星質量や銀河の存在する環境に強く依存していることが明らかになった。恒星質量の大きな銀河ほど、星形成活動が弱く、年齢の古い星で構成された楕円銀河である傾向が強い。銀河の恒星質量と星間ガスの金属量にも、正の相関関係がある。また、同じ恒星質量の銀河では、銀河団のような高密度領域に存在する銀河のほうが、金属量が大きいこともわかってきた。さらに、高密度領域に存在する銀河の多くは楕円銀河である。その一方、フィールドのような低密度領域に存在する銀河は円盤銀河であることが多い。

これらの近傍宇宙における観測結果は、銀河の形成と進化の理解には、銀河の性質を決定づけている質量と環境の効果の解明が不可欠であることを示している。そのためには、銀河の形成と進化が活発な時代において、その時代の銀河の性質の解明が必要である。近傍の宇宙の姿はかなり詳細に明らかにされてきているが、遠方の宇宙の姿の解明は、遠方銀河の観測の難しさから近傍の宇宙ほど進んでいない。最近になってようやく、遠方の宇

宙の広視野撮像サーベイや分光サーベイが行われ、大規模な遠方銀河サンプルが得られるようになってきた。そこで、本学位論文では、銀河進化の全盛期である赤方偏移(z)が 1.4~2.5 の時代 (約 90-110 億年前) に注目する。宇宙の星形成活動は $z\sim 2$ の時代に最も活発であったことが判ってきている。また、現在の宇宙に存在する恒星質量の半分以上は、 $z>1$ の時代に形成されている。不規則な形態をしていた高赤方偏移銀河が、楕円や渦巻のような美しい形態へと変化し始めたのも $z\sim 2$ の時代である。さらに、この時代は銀河との共進化が示唆されている活動銀河核 (AGN) の活動が最も活発な時代であったことも興味深い。つまり、宇宙において銀河が最も活発に形成され、環境や質量に強く依存した銀河の性質の基礎が形づくられようとしている時代に着目し、この時代における銀河の性質の質量依存性と環境依存性を明らかにする。

本学位論文では、すばるディープフィールド (SDF) と $z=1.46$ の XMMXCS J2215.9-1738 銀河団の深い広視野データを用いる。これらのデータから、 $z\sim 2$ の典型的な銀河について、その銀河の属するダークマターハロー (DH) の性質や銀河の星形成率や金属量の恒星質量依存性、また、星形成活動の環境依存性を明らかにすることができる。コールドダークマターに基づく銀河形成モデルでは、銀河は DH の中に形成され、銀河の進化は DH の質量に強く依存すると考えられている。そのため、DH 質量と銀河の性質の関係を明らかにすることは銀河の進化を考える上で非常に重要である。また、星形成率や銀河の星間ガスの金属量も、銀河の進化段階を知ることで重要な指標である。星形成率から、その時代の星形成活動を知ることができ、金属量は、その時代までの銀河の星形成史を反映している。さらに、遠方宇宙の高密度領域における星形成活動はこれまでほとんど明らかにならず、 $z=1.46$ の遠方銀河団の詳細な星形成活動の探査は我々の研究が初めてである。本学位論文において、我々は、(1) SDF の $z\sim 2$ の銀河の属する DH の性質と恒星質量の関係、(2) SDF の $z\sim 2$ の銀河の星形成率とガスの金属量の恒星質量依存性、(3) $z=1.46$ の銀河団の高密度領域における星形成活動について明らかにした。

$z\sim 2$ の銀河を選び出すために、可視光と近赤外線撮像データを用いて B-z と z-K のカラーを基に銀河選択を行う BzK 法を用いる。この方法は、 $1.4 < z < 2.5$ の時代に存在する銀河を効率よく選び出すことができる。近赤外線の明るさを基に銀河を選出するので、恒星質量リミットのサンプルに近く、恒星質量との関係を正しく評価することができる。銀河のカラーから、星形成銀河 (星形成 BzK 銀河) と星形成をせず受動的に進化している赤い銀河 (赤い BzK 銀河) を区別できることが利点の 1 つである。また、この方法はダストによる吸収の影響に左右されにくく、 $z\sim 2$ の銀河をほぼ無バイアスに選出でき、この時代の典型的な銀河サンプルの構築が可能である。この方法で得られるサンプルを用いて、我々が得た結果は次の通りである。

DH の質量とクラスタリング強度には正の相関関係があるため、DH のクラスタリングを反映する銀河のクラスタリング強度から、その銀河が属する DH の質量を推定できる。我々は SDF の可視 B、z バンドと近赤外 K バンドの深い広視野撮像データを用いて $z\sim 2$ の銀河を

選び出し、そのクラスタリング強度の測定から、 $z \sim 2$ の銀河の属する DH の性質を調べた。我々の結果と他のグループの研究結果を合わせて、BzK 銀河のクラスタリング強度の光度依存性を明らかにした。(i) 恒星質量の大きな銀河ほどクラスタリングが強く、恒星質量と共に、属する DH の質量は急激に増加する。(ii) しかし、 5×10^{10} 太陽質量より小さな恒星質量の銀河は、ほぼ一定の質量の DH に存在する。(iii) 小質量の星形成 BzK 銀河は天の川銀河クラスの近傍銀河に進化し、大質量の星形成 BzK 銀河は銀河団の中にある非常に重い近傍銀河に進化する。

SDF にある星形成 BzK 銀河の近赤外分光観測を行ない、0.9 から 2.3 ミクロンまでのスペクトルを取得した。28 個の銀河で $H\alpha$ や [OII] などの輝線を検出した。そして、2 個の AGN を除く 26 個の星形成銀河について、 $H\alpha$ や [OII] 輝線の光度から銀河の星形成率を、 $H\alpha$ と [NII] 輝線の光度比から銀河の星間ガスの金属量を求めた。また、SDF の可視光から赤外線までの多波長撮像データから、銀河スペクトルを推定し、正確な恒星質量を見積もった。そして、 $z \sim 2$ の星形成銀河の星形成率と金属量の恒星質量依存性を調べた。(i) 星形成率は恒星質量の大きな銀河ほど大きい。一方、単位恒星質量あたりの星形成率 (SSFR) は恒星質量の大きな銀河ほど逆に小さい。また、小質量の銀河は様々な SSFR を持つことが明らかになった。この相関関係は、恒星質量の小さな銀河ほど質量成長率が大きく、小質量の銀河は様々な星形成効率を持つことを示唆する。(ii) 恒星質量が大きくなるほど、銀河の星間ガスの金属量が大きくなるという関係が得られた。この相関関係の傾向は、静止系紫外線の明るさを基に検出された $z \sim 2$ の星形成銀河を用いた先行研究と一致する。しかし、同じ恒星質量の銀河を比較したとき、先行研究と比べて我々の調べた銀河のほうが、平均して 0.2dex ほど金属量が大きい。また、我々の銀河の方が赤いカラーを持つ。この $z \sim 2$ の銀河の金属量の違いは、年齢の古い銀河が大きな金属量を持つ可能性を示唆する。

XMMXCS J2215.9-1738 銀河団は X 線で検出されている $z > 1$ の数少ない遠方銀河団の 1 つである。NB912 狭帯域フィルターを用いて、この銀河団の撮像観測を行った。そして、中心領域 (約 7.5×7.5 平方 Mpc (共動座標)) において、 $2.6 M_{\text{sun}} / \text{yr}$ より大きな星形成率をもつ銀河団メンバーからの [OII] 輝線を全て捕らえた。狭帯域フィルターを用いた輝線探査の利点は、観測される銀河の選択バイアスのない、無バイアスな探査を行うことができる点にある。(i) 銀河団中心にも [OII] 輝線銀河は多く存在していることがわかった。銀河団メンバーに対する輝線銀河の割合は、銀河団中心でも高い割合を維持している。(ii) [OII] 輝線銀河の星形成率や輝線等価幅は銀河団中の位置に依らず、ほぼ一定である。一方、単位星質量あたりの星形成率は銀河団中心に近い銀河ほど小さい傾向が見られた。これは恒星質量の大きな銀河ほど銀河団中心付近に存在していることによる。これらの結果は、 $z = 1.46$ の銀河団中心部では、低赤方偏移の銀河団中心部とは異なり、星形成活動が活発であることを示唆する。また、質量の大きな銀河は、より高密度領域で形成されているようである。つまり、これは高密度領域の天体ほどより宇宙初期に形成されたという銀河形成バイアスが効いていることを示唆する。(iii) 近傍の銀河団と比べて、恒星質量の小さな赤い銀河が不足

していることが確認された。つまり、近傍へ進化するにつれて、星形成活動が活発な銀河は、より小質量な銀河へと遷移していくと考えられる。

本学位論文において、我々は、 $z \sim 2$ の恒星質量の大きな銀河は重い DH（つまり、原始銀河団領域）に存在すること明らかにした。そして、そのような銀河は、赤いカラーを持ち、星形成活動は弱く、金属量の大きな銀河であることも明らかになった。この結果から、高密度領域に存在する銀河は低密度領域に存在する銀河に比べて宇宙初期段階で形成され進化してきたと考えられる。また、高密度領域においては、過去ほど星形成活動が活発であることも明らかになった。つまり、近傍宇宙に見られる銀河の性質の恒星質量依存性や環境依存性には、銀河形成バイアスやダウンサイジングな銀河形成が重要な役割を担っていると結論づけられる。