

論文内容の要旨

論文題目 Star forming activities of massive galaxies at the
peak epoch of galaxy formation

(銀河形成の最盛期における大質量銀河の星生成活動)

氏名 但木 謙一

現在の宇宙には様々な形態の銀河が無数に存在している。銀河の形態はその物理的性質と密接に関係しており、円盤銀河では現在でも活発に星形成を行っているのに対して、楕円銀河ではすでに星形成を終えており、古い星種族から銀河が構成されていることが知られている。一方で赤方偏移2を超えるような遠方宇宙では、近傍宇宙に見られるような秩序だった形態の銀河はほとんど見られず、不規則でクランプ構造を持った銀河が多く存在している。これらの銀河がどのようにして現在の宇宙に見られるような銀河に進化してきたのかという謎は銀河天文学における最大の問題の1つである。この問題を解決するためには銀河の形成や進化が最も激しく進行している赤方偏移2-3の時代にある銀河を直接観測し、その形態や物理的性質との関係を調べるのが重要となってくる。本学位論文ではすばる望遠鏡に搭載された近赤外撮像装置 MOIRCS を用いて赤方偏移2.2と2.5にある星形成銀河の探査を行い、ハッブル宇宙望遠鏡によって取得された画像を用いて、それらの銀河の物理的性質や形態を徹底的に調査した。

まず第一に本研究の独創的な点は星形成銀河の選択手法にある。先行研究の多くは測光赤方偏移または分光赤方偏移に基づいて星形成銀河を選択しており、前者は推定される赤方偏移や測定した星形成率に不定性があり、後者は銀河の選択バイアスの影響を強く受けるといった問題があった。狭帯域フィルターを用いた $H\alpha$ 輝線銀河探査はこれらの問題を解決し、赤方偏移2を超える星形成銀河であってもほぼ無バイアスにサンプルすることが可能である。我々はハッブル宇宙望遠鏡によって取得された高解像度の可視・近赤外の撮像データが利用できる CANDELS-SXDF フィールドにおいて、MOIRCS に搭載した専用狭帯域フィルター NB209 と NB2315 を用いた撮像観測を行い、赤方偏移2を超える104個の $H\alpha$ 輝線銀河を同定した。

通常の星形成銀河は大質量星の寄与により青い色を示すのに対して、我々が同定した星形成銀河のいくつかは赤い色を示していた。これらの赤い $H\alpha$ 輝線銀河においては、 $H\alpha$ 輝線光度から見積

もった星形成率が静止系紫外域の連続光から見積もった星形成率に比べて2倍以上大きいことがわかった。H α 輝線は紫外域に比べてダストによる減光を受けにくいことから、これらの赤い H α 輝線銀河はダストに埋もれたスターバースト銀河であると考えられる。さらに赤い H α 輝線銀河の多くが MIPS 24 μ m の中間赤外線で検出されていることもこの結果を強く支持している。

同定した H α 輝線銀河のうち 13 天体については、MOIRCS を用いて近赤外分光観測を行った。そのうち 12 天体から実際に H α 輝線を検出し、8 天体から [N II] 輝線を検出した。[N II] と H α の輝線比から、3 個の H α 輝線銀河は AGN による影響を強く受けていることが明らかになった。これらは全て、星質量が $10^{11} M_{\odot}$ より大きく赤い銀河であるのに対して、それより小質量の H α 輝線銀河にはいずれも AGN による影響が見られなかったことから、大質量銀河の形成過程の晩年期に AGN の活動が高まり、最終的に銀河内のガスを吹き飛ばし星形成を止める、いわゆる「AGN フィードバック」が起きている可能性を示唆する。

AGN の影響が無視できるほど小さい場合、[N II]/H α 輝線比は銀河内星間ガスの金属量の指標となる。我々はこの指標を用いて、H α 輝線銀河の金属量の星質量依存関係を調べた。我々のサンプルの金属量は先行研究で示されているように同じ質量の近傍の星形成銀河に比べて小さいが、その分散は大きく、同じ星質量の銀河でもダストによる減光度が大きい銀河では金属量も大きくなっていることがわかった (図 1 参照)。過去に同じ星質量を作り出しているのにも関わらず、異なる化学進化を経ていることから、銀河内に残存する分子ガスの質量に違いがあると考えられる。この仮定を観測によって確かめるためには、ALMA による CO 分子輝線の観測が重要である。

無バイアスな星形成銀河探査は個々の銀河の性質を調べるだけでなく、この時代の星形成銀河の統計的な性質を調べることに有効的である。赤方偏移 2.2 の我々のサンプルから得られた H α 光度関数は暗い側で急な勾配を示しており、先行研究によって報告されている値と概ね一致した。一方で赤方偏移 2.5 のサンプルから得られた H α 光度関数は水平な勾配を示し、全く異なっていることがわかった。赤方偏移 2.2 と 2.5 では宇宙年齢の差が 4 億年しかないことから、時間進化というよりは環境の違いが見えている可能性が高い。実際に赤方偏移 2.5 の H α 輝線銀河は群れており、このような高密度環境では銀河同士の合体が頻繁に起こることが期待されるため、結果として光度関数の明るい側の寄与が大きくなっていると考えられる。今後原始銀河団のような超高密度環境との比較をすることで、光度関数の環境依存性をより詳しく調べることができるだろう。

星質量が $10^{10} M_{\odot}$ 以上の H α 輝線銀河サンプルのうち、およそ 38% はクランピーな構造を持った銀河であった。クランプの典型的なサイズと星質量はそれぞれ 1.1 kpc と $10^{9.3} M_{\odot}$ であり、回転円盤ガスにおける Toomre 半径、Toomre 質量と概ね一致しており、これらのクランプは銀河円盤中での重力不安定性によって形成されたものだと考えられる。

宇宙論的シミュレーションでは銀河円盤で形成されたクランプは動的摩擦によって角運動量を失い、やがて銀河中心へ落ちていくと予想されている。また一方で星形成による強いアウトフローを考慮したシミュレーションでは、中心に落ちる前にクランプは壊れてしまうという結果も得られている。このクランプ移動は銀河のバルジ形成に大きく寄与することから、クランプの形成後の進化は大きな関心を集めている。クランピーな構造をした $H\alpha$ 輝線銀河のうち、MIPS $24\mu\text{m}$ で赤外放射が検出された7天体について、クランプの色と銀河中心からの距離の関係を調べた結果、同じ銀河内であってもクランプの色は大きく異なっており、銀河の中心に近いクランプは外側のクランプに比べて赤いことがわかった (図2参照)。クランプの色の起源としては年齢とダストによる減光の2つが考えられるが、これらは縮退しており、例え多波長のデータがあったとしても解くことは難しい。しかし我々のサンプルの場合、銀河内のどこかからは赤外放射が確実に放射されており、最も可能性が高い放射源は銀河核の赤いクランプである。円盤で形成されたクランプが、力学的摩擦や相互作用によるエネルギー散逸によって、ガスを消費尽くす前に銀河中心に辿り着き、クランプ間の衝突によって銀河中心での激しい星形成が誘発されたと考えられる。

最後に我々の同定した $H\alpha$ 輝線銀河の今後の進化について考察した。 $H\alpha$ 輝線銀河のうち44%は近傍の晩期型銀河の星質量-サイズ関係と概ね一致していた。これらの銀河はこの関係に沿ってより大質量の星形成銀河へと進化していくことが期待される。注目すべきは近傍の星質量-サイズ関係に比べて極めて小さい $H\alpha$ 輝線銀河である。コンパクトな $H\alpha$ 輝線銀河は全体の25%を占めるが、その星質量表面密度が近傍の早期型銀河よりも高いことは大変興味深い。近年、赤方偏移2の時代に同じ星質量の近傍の楕円銀河に比べて極めて小さい受動的銀河が発見されているが、我々のコンパクトな $H\alpha$ 輝線銀河はその祖先に当たる銀河なのかもしれない。

以上のように、本学位論文では、銀河が最も盛んに形成されている時代を代表する星形成銀河の優良な独自サンプルを、すばる望遠鏡による $H\alpha$ 輝線銀河探査によって構築し、ハッブル宇宙望遠鏡による高解像度画像やスピッツァー望遠鏡のダスト放射画像を併用して、星形成銀河の統計的な性質と、個々の銀河の形態や内部構造を詳細に調査したものである。そして、大質量銀河の形成と初期の進化を支配している物理過程を直接観測によって実証的に探り、さらにこれら形成途上の活動的な銀河から、同時代から少し後の時代に観測されている、より進化が進んだ大質量でコンパクトで静かな銀河へと至る、進化の道筋を描き出すことに成功した。

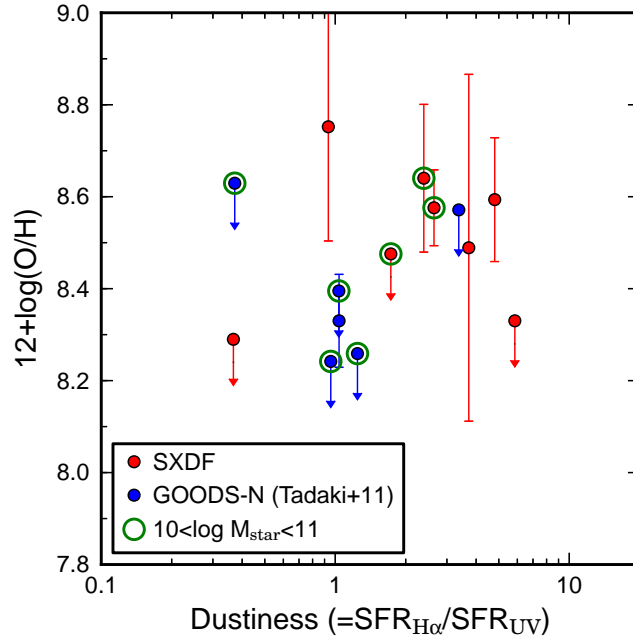


図 1: 星間ガスの金属量（縦軸）とダストによる減光度（横軸）の関係。赤丸と青丸は赤方偏移 2.2 にある H α 輝線銀河を示している。緑丸は星質量が $10^{10} < M_{\text{star}} < 10^{11}$ の範囲にあるものを示しており、同じ質量であってもダストによる減光度が大きい銀河で金属量が大きくなる傾向がある。

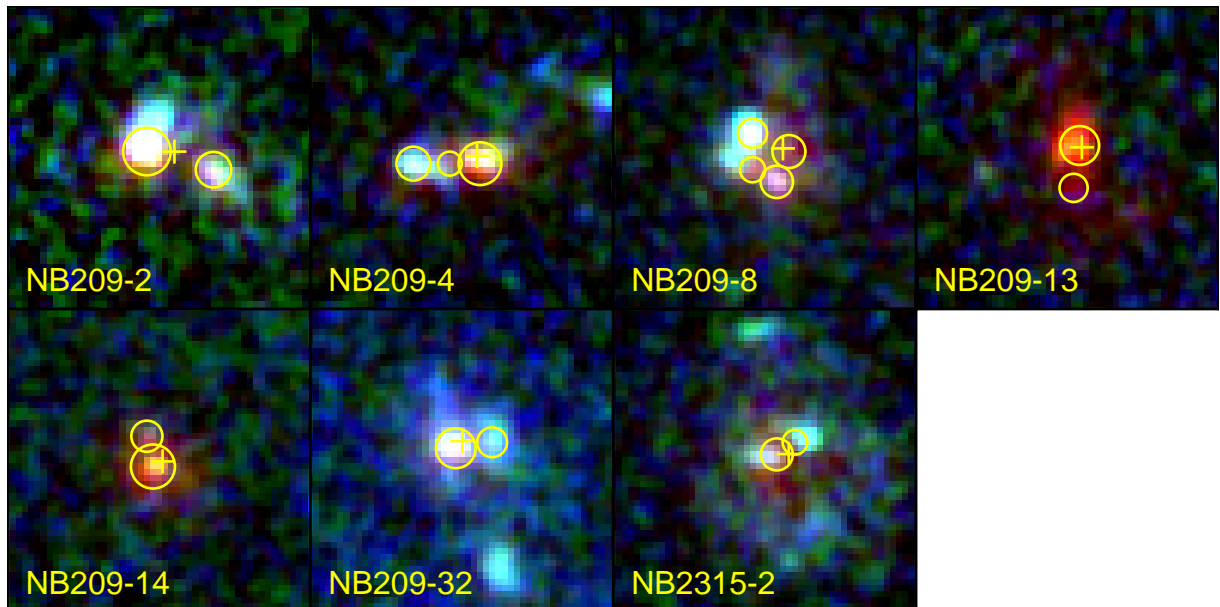


図 2: クランピーな構造を持ち、かつ MIPS 24 μm で検出された 7 個の H α 輝線銀河のハッブル宇宙望遠鏡による 3 色画像。黄丸と黄十字はそれぞれクランプの位置と銀河の質量重心を示している。銀河中心に近いクランプの方が赤くなっている。