

「宇宙の構造形成と銀河進化の関連性から探る

誕生期から成熟期にわたる銀河団形成史の理解」

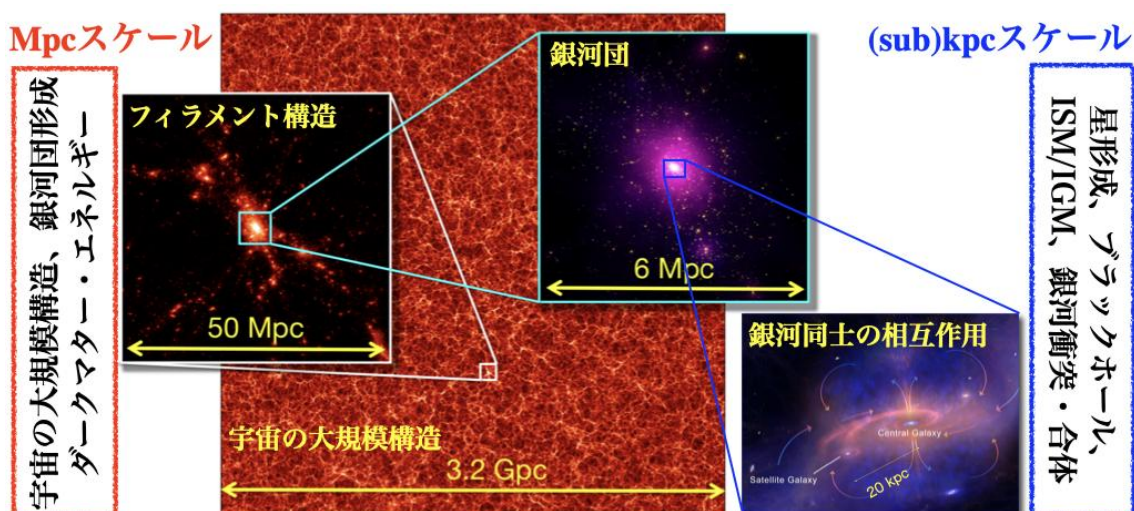
兵庫県立大学自然・環境科学研究所

利川 潤

1 研究の背景と目的

現在の宇宙には渦巻銀河や楕円銀河のように様々な銀河が存在している。しかし最新の宇宙論の研究結果から、宇宙は限りなく一様な状態から始まったと考えられている。その天体などがない状態の初期宇宙からどのように銀河の多様性に溢れた現在の宇宙へと変貌を遂げたかは、現代天文学においても大きな謎である。現在の宇宙の詳細な観測から、銀河団のような銀河の高密度環境には年老いた、星形成をしていない楕円銀河が多く存在している。一方、銀河が疎な低密度環境では若く、星形成を活発に行っている渦巻銀河がより多く分布していることが知られている。このように銀河の性質と環境の間にははっきりとした関係性がある事が近傍宇宙の観測から明らかにされている。ではどのような物理過程によってこの銀河と環境の関連性が生じたのだろうか？この問題に挑むためには銀河内部での星形成などのキロパーセク (kpc) スケールの現象だけではなく (1 パーセク=3.3 光年)、環境(銀河団)そのものも時間とともに変化・成長していくので宇宙の構造形成というメガパーセク (Mpc) スケールの現象についても研究が必要である。階層的構造形成モデルから、これらのスケールの大きく異なる2つの現象は銀河団を通して有機的に結びつける事ができ、銀河団研究は宇宙論と天体物理学の交差点に位置しており、重要な研究テーマの1つである。

銀河団の形成過程を理解するためには、近傍宇宙の成熟した銀河団だけではなく、遠方宇宙に存在する形成途中の銀河団「原始銀河団」を直接観測することも不可欠である。しかし銀河団のような高密度環境は稀であり、さらに観測が難しい遠方宇宙の原始銀河団の発見個数は少なかった。そのような稀な天体を発見するために、これまでの多くの研究ではクエーサーや電波銀河といった非常に明るい天体を目印に使い、その天体の周辺領域で原始銀河団が存在するかどうか探査を行っていた。クエーサーや電波銀河は非常に重い銀河であるため、宇宙の中でも高密度環境にバイアスされて形成されると予想されている。実際にこの方法で多くの原始銀河団が発見されている一方で、クエーサーや電波銀河が存在する領域にも関わらず原始銀河団が発見されないような例も報告されている。このような特異天体と環境の関係性にも未解明な部分が多いため、このような目印を使う探査方法はバイアスされた原始銀河団サンプルを構築する恐れがある。そこで研究代表者が主導する研究グループは大口径かつ広視野観測が可能なすばる望遠鏡の観測装置「Hyper SuprimeCam (HSC)」を用いることで、目印を用いることなく原始銀河団の探査を行い、より無バイアスかつ大規模な原始銀河団サンプルを初めて構築した。本研究は、このサンプルを基に原始銀河団の平均的な性質だけでなく、それぞれの原始銀河団の個性など多様性も定量化する。そしてその多様性の起源を探ることは、銀河団形成のそれぞれの形成段階の理解に繋がると期待できる。原始銀河団で起きている物理過程をより詳細に理解するために、近傍宇宙における原始銀河団に対応するような環境を同定し、観測の容易さという近傍宇宙の利点を活かし、中小口径望遠鏡なども駆使することで銀河進化の環境依存性を引き起こす物理過程を調べる。構造形成と銀河進化の2つの科学的観点、遠方宇宙の原始銀河団と近傍宇宙の銀河団という2つの観測対象、それぞれを組み合わせることで銀河団の誕生から成熟までの形成史の解明を目指す。



本研究の背景や目的を示す模式図：Gpc スケールの宇宙の大規模構造から、Mpc スケールのフィラメント構造や銀河団、そしてkpc スケールの銀河同士の相互作用へと、階層的に宇宙の物質・構造は関連し合っている。宇宙論から天体物理学まで様々な物理過程が銀河団を通じて相互に影響し合っていることが予想される。

2 研究方法・研究内容

HSC サーベイを基に構築された原始銀河団サンプルに対して、すばる望遠鏡などを用いて可視光波長域による分光追観測を行う。遠方銀河からの Ly α 輝線を検出することで、その銀河の赤方偏移を正確に決定する。撮像観測である HSC サーベイだけでは赤方偏移(視線)方向には大きな不定性があり、天球面に投影された銀河の数密度しか測定することができない。このことにより視線方向にいくつかの中程度のスケールの構造が重なった場合などに、表面数密度は原始銀河団と同程度に測定されてしまい、誤ったサンプルを原始銀河団候補と推測することになる。赤方偏移を正確に決定することで、視線方向も含めた3次元的な銀河の数密度を測定することが可能になり、原始銀河団を分光同定できる。原始銀河団を分光同定することにより、原始銀河団を構成するメンバー銀河と同時代の一般領域に存在するフィールド銀河を比較することで、銀河団形成と銀河進化の関連性を以下の観点から多角的に調べる。

a) 原始銀河団の空間分布と DMH 質量の推定

HSC サーベイによって構築された原始銀河団カタログのみから解析可能であり、追加の観測データは必要としない。原始銀河団の数密度に加えて、原始銀河団のクラスタリング解析から相関長を用いて空間分布を定量化する。理論モデルやシミュレーションから予想されるダークマターハロー(DMH)の相関関数と比較することにより、観測された原始銀河団はどの程度の DMH 質量に付随した構造であるのかを推定できる。DMH 質量は構造形成を議論する上で最も基本的な物理量の一つである。構造形成モデルから DMH 質量の時間進化を統計的に推測することで、異なる赤方偏移(宇宙年齢)間で祖先・子孫の関係付けることができる。銀河形成・進化は周囲の環境から影響を受けるとともに、その環境自身も時間発展する。原始銀河団の数密度や相関長の関係は宇宙論モデルの予測と直接的に比較可能であり、LSST 計画などにより大規模なサンプルが構築されれば宇宙論パラメーターの制限にも原始銀河団研究を活用することができる。

b) 原始銀河団の内部構造と力学状態

銀河団のような巨大な構造は銀河や物質が徐々に集積することで力学的平衡状態を保ちながら時間進化する場合もある一方で、銀河群や同程度の構造が衝突・合体する

ことで力学状態を大きく変える場合も起こり得る。実際に近傍宇宙においてもおよそ半数の銀河団は平衡状態ではなく、形成途中の原始銀河団ではその割合はさらに高いと予想される。また物質・銀河の降着・集積過程はフィラメント状の宇宙の大規模構造に沿ったような異方性を持ち、力学的な平衡状態にまだ達していない原始銀河団では内部構造にその過程の情報が残されていると考えられる。PFS は多数の天体を同時に分光観測でき、奥行方向も含めた原始銀河団の3次元構造を明らかにすることができる。さらに広視野であることから、原始銀河団の内部構造だけではなく、宇宙の大規模構造と接続するような原始銀河団の周囲の銀河分布も調べることができる。申請者は限られた数の原始銀河団ではあるものの、個々の原始銀河団に徹底的な分光追観測を行いその内部構造や力学状態について議論を既に行った。HSC と PFS というすばる望遠鏡の主力観測装置を組み合わせることで、原始銀河団の内部構造や銀河の集積過程の研究を飛躍的に発展させることができる。

c) 原始銀河団での銀河合体・質量降着

次に原始銀河団に属する個々の銀河がどのように質量を増大させていくかを調べる。物質がガスの状態で定常的な流入や、銀河同士の衝突・合体による急成長の大きく2通りの経路が考えられる。この2つの現象の切り分けには銀河の力学状態や形態が重要な物理量になり、ハッブル宇宙望遠鏡や補償光学などによる高分解能観測や面分光観測が必要となる。JWST の公開データなども利用することで銀河形態を調べ、銀河同士の相互作用や合体の兆候の有無を議論できる。また ALMA 望遠鏡によるサブミリ波観測では銀河の運動に加えてガス量なども見積もることができ、銀河へのガス流入に制限を加えることができる。また間接的ではあるが、多波長撮像データを用いた SED フィッティングにより、銀河の年齢や星質量、ダスト量、金属量などを推定し、銀河の成長過程に制限を加えることができる。

d) 近傍宇宙における銀河団・銀河群での環境と星形成活動

大口径望遠鏡を使っても遠方銀河の内部での星形成活動などの現象を詳細に明らかにすることは難しい。銀河進化に対する環境効果は様々な物理過程が複合することで発現していると予想されているため、近傍宇宙の高密度環境での銀河の性質を調べることで遠方宇宙と共通する物理現象の理解に迫る。また近傍宇宙(赤方偏移 $z \sim 0.1$)の光度距離は遠方宇宙($z \sim 4$)と比べると 1/100 程度であり、口径 2m のなゆた望遠鏡のような中口径望遠鏡でも十分に観測可能である。また星形成銀河に特有の輝線が可視光の波長域で観測可能であるため、その波長に合わせた狭帯域フィルター(NB)を作成することで効率的に星形成銀河の探査ができる。銀河団中の銀河は ram pressure stripping などが原因となりガスが剥ぎ取られ星形成活動が抑制されると考えられている。一方で精密なシミュレーションによると、ガスが剥ぎ取られる前にガスの圧縮から短期間だが星形成が活発になるという予測もある。また銀河衝突も衝突する銀河の性質などにより、星形成活動の抑制にも促進にもどちらにも働く場合がある。このように銀河の性質や銀河団の規模などにより環境効果は正反対の結果を導く可能性がある。様々な物理量が比較的容易に観測できる近傍銀河を利用することで、環境と星形成活動の関連性の起源となる物理過程やどのような条件のもとでどの物理過程の寄与が大きくなるかについて理解を目指す。

3 研究成果

研究代表者によって取得されたすばる望遠鏡の観測時間によって、赤方偏移 $z \sim 3$ の原始銀河団候補を3領域を分光追観測を行った。そのうち2つの領域からは3次元的な数密度超過を確認し原始銀河団を新たに発見した。さらに HSC サーベイの Deep 領域

で公開されている近赤外線が多波長撮像データも活用することで、原始銀河団を構成する銀河の性質をより詳細に調べた。その結果、完全に同一の手法で探査された2つの原始銀河団にも関わらず、1つは星形成を活発に行っている銀河を含んでいるのに対して、もう一方は星形成が終わりつつある銀河の存在が確認できた。これは原始銀河団の多様性を示しており、銀河団は複雑な形成段階を辿っていることを示唆している。これらの結果は日本天文学会 2025 年秋季年会などの学会・研究会において報告を行った。現在は学術論文として結果をまとめている最中である。

なゆた望遠鏡の可視光撮像装置 WFGS2 に近傍銀河 ($z \sim 0.1$) の $H\alpha$ 輝線の検出を目的とした NB を搭載し、近傍銀河団の観測を行った。この NB は研究代表者が獲得した外部資金を基に 2025 年 1 月に購入され、2025 年度に実験室や実際の天体観測による性能評価に加えて、NB を用いたモザイク観測に適した WFGS2 の観測プログラムの開発も行った。そしてこの NB を用いて、力学的に平衡状態に達している銀河団とそうではない銀河団をそれぞれ 1 領域ずつ観測を行った。

研究代表者が兵庫県立大学西はりま天文台を退職することにもない、本研究助成の受給資格を失うことになった。したがってここでは研究途中での成果報告書となった。本研究助成のために立案した研究計画やなゆた望遠鏡で取得された観測データは、研究代表者が次の所属先でも活用し研究計画の完遂を目指す。

4 生活や産業への貢献および波及効果

西はりま天文台では高校生などの実習を受け入れており、研究代表者は本研究で得られた最新成果も含めながら、天文学の啓蒙・普及活動を行ってきた。また NB の購入などなゆた望遠鏡の機能強化に貢献し、これは共同利用観測などを通して多くの研究者への波及効果が期待できる。