

氏 名 利川 潤

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1744 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Growth History of Galaxy Clusters
Traced by Protoclusters at $z \sim 3 - 6$

論文審査委員 主 査 教授 有本 信雄
准教授 高田 唯史
准教授 岩田 生
教授 長峯 健太郎 大阪大学大学院
准教授 大内 正己 東京大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

赤方偏移 3 から 6 にわたって原始銀河団探査を行なった。原始銀河団は遠方宇宙において銀河の高密度領域であり、近傍宇宙で見られるような銀河団の祖先にあたる天体と考えられている。近傍宇宙において銀河団に属する銀河は一般領域の銀河とは有意に異なる性質を持っており、銀河の性質とその環境には密接な関わりがあることが知られている。また銀河団は特に高密度な領域に存在し、クモの巣のような宇宙の大規模構造を構成する上で重要な位置を占めている。このように、銀河団は銀河進化、宇宙の構造形成の両方に対して重要な研究対象であり、銀河団形成の解明は銀河進化・構造形成の理解のためには不可欠である。そのために近傍のみならず、遠方宇宙における銀河団へと形成途中である原始銀河団の研究が求められている。しかし銀河団は非常に個数密度の低い天体であり、さらに遠方に存在する原始銀河団は非常に個数密度の低い天体である。これまでに発見された赤方偏移 3 以上の原始銀河団は 10 個を越える程度であり、まずは原始銀河団の発見数を増やす必要がある。これまでのほとんどの原始銀河団探査は高密度領域の目印と考えられる電波銀河やクエーサーという特別な天体を使い探査が行われてきた。しかし電波銀河・クエーサーの性質、特に遠方での性質にはまだ未解明な部分が多く、これらの天体が存在する領域にも関わらず高密度領域ではなかった例も報告されている。特定の天体の領域のみ観測することは、ある特定の性質を持つ原始銀河団を選択的に見つけ出すという恐れがある。そこで本研究の特色は広視野観測を用いることで先行研究とは相補的な手法での探査を行なったことである。無バイアスな原始銀河団探査から銀河団形成の真の理解を目指す。

Subaru Deep Field と CFHT Legacy Survey Deep Fields という 2 つの領域を用いた。これらの領域は暗い遠方銀河まで検出できる深さ、個数密度の低い天体を発見できる広さの両方を兼ね備える原始銀河団探査には最適な領域である。これらの領域において赤方偏移 3 から 6 の銀河を、ライマン・ブレイク法を用いることで選び出し、銀河の天球面上での分布を定量化した。さらに理論モデルを使うことで遠方銀河の表面数密度と現在の宇宙でのダークマターハロー質量の関係を調べることから、原始銀河団を含む確率が 85% 以上となる表面数密度超過を原始銀河団候補の条件とし、22 個の原始銀河団候補が選び出された。ライマン・ブレイク法から選び出される銀河の赤方偏移方向の不定性は原始銀河団の大きさよりはるかに大きいため、原始銀河団候補が 3 次元的に集中していることを確かめるため、分光観測から赤方偏移を正確に決める必要がある。22 個の原始銀河団候補のうち 9 個に対して分光追観測を行なった。9 個のうち 4 個は赤方偏移分布に有意なピークがあり、3 次元的にも狭い領域に銀河が多数集中していることが確認でき、原始銀河団を発見することができた。この 4 個には赤方偏移 6.01 の原始銀河団も含まれており、これは現在発見されている中では最遠方の原始銀河団であり、銀河団形成の始まりを知る上でも重要な発見である。残りの 5 個の領域のうち 1 つは赤方偏移分布に有意なピークが見られる原始銀河団ではなく、4 つは十分な数の銀河を分光同定できなかつたためにその赤方偏移分布を詳細に調べることはできなかつた。

分光追観測から発見された 4 つの赤方偏移 3 から 6 の原始銀河団から、原始銀河団の構造や原始銀河団銀河の性質についてより詳細な議論を行った。まず原始銀河団の内部構造については赤方偏移 6.0 では原始銀河団はいくつかの小さなサブグループに分けることが

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

でき、銀河ペアを作るような分布をしていた。ところが赤方偏移 3.7 の原始銀河団では中心のより狭い領域に半数の原始銀河団銀河が密集しており原始銀河団コアのような構造が作られていた。階層的構造形成モデルからも予想される通り、構造形成の始まりでは小さなグループがたくさん作られ、それらが合体・集積を繰り返すことで現在の宇宙で見られるような巨大な構造が作られていく過程を観測的に確かめることができたのではないかと考えられる。この原始銀河団構造の大きな変化とともにその原始銀河団に含まれる銀河の性質にはどのような変化が表れてくるのかを調べた。赤方偏移 6.0 では原始銀河団銀河と同時代の一般領域の銀河には性質の違いは見えず、やはり赤方偏移 6.0 は構造形成の非常に初期の段階であり環境による違いが現れる前だと考えられる。コア構造が作られ始めている赤方偏移 3.7 の原始銀河団では $\text{Ly}\alpha$ 輝線が原始銀河団では弱く、環境による違いが赤方偏移 3.7 という遠方宇宙においても見えてきた。その原因については高密度環境では銀河形成・進化がより早く進んだためにダスト量が多いことによる減光、またはコア構造に従い銀河だけでなくガスも原始銀河団への集積が進んでいることから中性水素ガスによる吸収という 2 つの可能性があげられる。原因についてはまだはっきりしない部分があるが、構造形成や環境と銀河の性質の間には相関があり、そのような観点からも銀河の性質を議論していくことは重要であることが分かった。赤方偏移 3.1 においては 2 つ原始銀河団を発見することができたが、その原始銀河団の性質を調べると同時代の原始銀河団であるが異なる性質を持っている傾向が見え、原始銀河団ごとの個性の存在を強く示唆している。正しい銀河団形成の理解のためにはより多くのサンプルを構築し、平均的な性質を調べていく必要がある。

このように本研究では新たに 4 個の原始銀河団を発見するだけでなく、広視野探査を用いることの必要性を示すことができた。また赤方偏移 3 から 6 にわたって系統的な探査を行なったことから原始銀河団の発見だけにとどまらず、異なる赤方偏移の原始銀河団の比較から銀河団形成への考察を行った。それと同時に原始銀河団の個性が存在する可能性も示した。現在、すばる望遠鏡の新装置 Hyper Suprime Camera により進められているさらに大規模な探査を進めている。この探査から構築される非常に大規模なサンプルにより統計的な議論を深め、本研究は大きく発展していく。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

原始銀河団は遠方宇宙における銀河の高密度領域であり、近傍宇宙で見られるような銀河団の祖先にあたる天体と考えられている。銀河団銀河は一般領域の銀河とは有意に異なる性質を持っており、また銀河団は宇宙の大規模構造を構成する上で重要な位置を占めている。銀河団は銀河進化、宇宙の構造形成の研究の両方に重要な天体であり、銀河団形成を理解するには、近傍のみならず、遠方宇宙の原始銀河団の研究が不可欠である。本研究は、これまでの原始銀河団探査が電波銀河や QSO 周辺の高密度領域を中心に行われてきたことに対し、それとは相補的に一般領域を広く探査し、赤方偏移 $z = 6.01$ という最遠方にある原始銀河団を発見し、更に、 $z \sim 4$ にある三つの原始銀河団を発見し、 $z \sim 6$ から ~ 4 までの原始銀河団の構造変化を辿り、遠方宇宙における異なる赤方偏移での銀河団銀河の性質を明らかにしたものである。

出願者は、まず、Subaru Deep Field (SDF) と CFHT Legacy Survey (CFHTLS) Deep Field の公開多色撮像データをもとに、銀河のスペクトルエネルギー分布の特徴によって赤方偏移を推定するドロップアウト法を用いて、赤方偏移がそれぞれ $z \sim 6, 5, 4, 3$ にあるライマンブレイク銀河の空間分布を求め、一般領域における銀河の高密度領域の探査を行った。探査領域が従来の電波銀河・QSO 周辺領域の探査に比べて著しく広いのが特長である。

出願者は、次に、公開されている宇宙の大規模構造シミュレーションの結果をもとに、近傍宇宙での $\sim 10^{14} M_{\odot}$ の銀河団に成長するために必要な高密度領域の物理的な広がりや赤方偏移の幅を、それぞれの赤方偏移で見積もり、上記の探査領域に適応して合計 22 個の原始銀河団候補を同定した。

出願者は、次に、そのうちの 9 個について、すばる、Keck、Gemini 望遠鏡を用いて分光観測を行い、4 個の原始銀河団を発見した。そのうち、 $z = 6.01$ にあるものは最遠方原始銀河団であり、その発見は本研究の特筆すべき成果である。また、他の 3 個の原始銀河団の赤方偏移は $z = 3.67, 3.24, 3.13$ であるが、これまでに知られている原始銀河団は電波銀河・QSO 周囲にある 15 個程度に過ぎず、本研究による $z > 3$ の一般領域にある原始銀河団の発見が銀河団進化の研究に果たす貢献は大きなものがあり、高く評価できる。

出願者は、次に、これらの原始銀河団の構造を調べ、 $z \sim 6$ では、いくつかの銀河ペアのようなサブグループに分解できるのに対して、 $z \sim 3.7$ では原始銀河団の中心に多数の銀河が集中したコア構造を持つことを明らかにした。この結果は、サンプル数は少ないものの、原始銀河団の構造が $z \sim 6$ から $z \sim 3.7$ にかけて急激に平衡状態にある構造へと進化することを示唆している。

出願者は、最後に、銀河団銀河の性質について調べ、 $z \sim 6$ では原始銀河団銀河と一般領域の銀河とでは、紫外光度、ライマン α 輝線強度および等価幅に違いは見られないこと、これに対して、 $z \sim 3.7$ では原始銀河団銀河のライマン α 輝線等価幅が一般領域銀河に比べて著しく小さいことを明らかにした。この原因としては、銀河内部のダストと銀河間中性水素ガスによる吸収が考えられるが、一意的には結論できない。しかしながら、銀河団銀河の進化が銀河団の構造の変化に伴う環境効果を受けていることを本研究は初めて示唆した。

本研究で用いられた分光観測データは出願者が中心となって取得したものであり、公開

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

された撮像データも含め、データ解析、結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められ、その内容は銀河団進化の理解に大きく貢献するものである。したがって、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。