

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740116

研究課題名（和文）

銀河団とその構成銀河の形成過程の解明

研究課題名（英文）

Probing the Formation of Galaxy Clusters and their Members

研究代表者

太田 一陽 (Ota Kazuaki)

独立行政法人理化学研究所・牧島宇宙放射線研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：20462666

研究成果の概要（和文）：

我々が発見した赤方偏移  $z=6$  (宇宙年齢約9億年)の原始銀河団候補と後の時代 ( $z<6$ )の原始銀河団を比較し、体積や質量が現代 ( $z=0$ , 137億年)までにどう変化してきたかを調べた。その結果、 $z=6$  原始銀河団候補の体積は大きめであるが、質量は  $z=0-5$  時代の原始銀河団と似ていた。この  $z=6$  天体は銀河団の祖先であり、より小さい体積に質量を集積していきながら、現在の宇宙に見られる銀河団へと進化すると考えられる。これは9億年という初期宇宙でも大規模構造の形成がかなり進んでおり、銀河団の形成も始まっていたことを示す。

研究成果の概要（英文）：

We compared volume and mass of the redshift  $z=6$  (900 million years after the Big Bang) galaxy proto-cluster candidates we found with those of galaxy clusters at  $z<6$  to examine how such physical properties have changed until today ( $z=0$ , 13.7 billion year after the Big Bang). We found that the  $z=6$  proto-cluster has a larger volume but the masses are comparable. This implies that this  $z=6$  object could be a progenitor and evolve to be a galaxy cluster seen in the present-day universe, assembling the mass toward the smaller volume. Also, our result suggests that the structure formation was already in a matured phase and formation of galaxy clusters were taking place even at the epoch as early as the 900 million year universe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学 ・天文学

キーワード：可視光天文学，観測的宇宙論，高赤方偏移銀河，銀河形成，銀河進化，観測天文学，銀河団，初期宇宙

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙では星が形成されて集まり銀河となり、銀河が集まり銀河団となり、銀河がフィラメント状の形に群がり質量が高密度な領域と銀河が殆ど無い低密度な空洞から成る泡状の大規模構造を形成している。銀河団は、この大規模構造のフィラメント同士が交差する超高密度領域に形成される。宇宙誕生初期には質量の密度ゆらぎが存在し、高密度な領域では質量集積と星形成が速く進み、銀河の群れが合体・成長を繰り返して現在の宇宙に見られる大規模構造に進化したと観測から分ってきている。

しかし、いつ頃どの様にして大規模構造や銀河団が形成されどの様に進化して今日の宇宙に至ったかは完全には解明されていない。これを解明するには、逆に、宇宙の時間を遡り(=より遠くを観測し)ながら、銀河の空間分布、質量集積、星形成活動がどう変化してきたかを調べていき、宇宙の大規模構造と付随する銀河団、その構成銀河がどの様に形成されてきたか、その過程を調べる必要がある。

大口径の望遠鏡が登場し、より遠くの宇宙が観測され、90年代には赤方偏移  $z=2-3$  (宇宙年齢  $t=21-32$  億年)にも大規模構造と原始銀河団が発見され(Pascarelle et al. 1996; Steidel et al. 1998 等)、2000年代には  $z=4-5$  ( $t=11-15$  億年)にも既に存在するのが確認された(Shimasaku et al. 2003; Venemans et al. 2007 等)。銀河団は、X線を放射するガスで満たされていたり、異常に明るいクエーサーや楕円銀河、強力な電波を出す銀河等の周りに低質量の銀河が群がってできている場合が多い。その為、X線源や電波銀河、クエーサーを目印にして発見されてきた。

しかし、X線検出器の感度で観測できる限界は  $z\sim 1$  までであり、現在発見されている最遠の電波銀河は  $z\sim 5$  である。それ以上遠くの原始銀河団を見つけるには、広視野カメラで宇宙を深く(=長時間露出で)撮像して

$z>5$  銀河を検出し、その空間分布を調べるしかない。また、 $z>5$  銀河の様な非常に遠く暗い天体は口径 8-10m級の望遠鏡でないと検出できない。その様な望遠鏡のカメラで唯一、原始銀河団の全体とその周辺の大規模構造を一度に撮像できる広視野なものは、日本がハワイ島で運用している「すばる望遠鏡の主焦点カメラ」だけである。2005年には主焦点カメラにより、 $z=5.7$  ( $t=9.7$  億年)にも既に大規模構造が存在し、形成途上の原始銀河団が含まれているのが観測された(Ouchi et al. 2005)。それ以上遠くの  $z>5.7$  宇宙では、原始銀河団の存在はまだ確認されていない。

本研究では、同主焦点カメラで深く撮像された空の領域 Subaru Deep Field 内で  $z\sim 6$  銀河候補天体をモデルから予測した撮像画像の色を基準に選び出したところ、大規模構造特有の非一様な空間分布を示し、その中に明らかに個数密度が過剰な領域を発見した。この領域の  $z=6$  に投影した 2次元平面上のサイズ ( $14\times 14\text{Mpc}^2$  :  $1\text{Mpc}$  は  $3.1\times 10^{22}$  m)は、これ迄に発見されている  $z=4.8, 5.7$  の原始銀河団のサイズとほぼ同じであった。この高密度領域には 32 個の  $z\sim 6$  銀河候補が群がっているが、他の観測の際にその内 4 個を分光する機会を得た。その結果、 $z=5.92, 6.01, 6.03, 6.03$  にある本物の銀河であると判明した。 $z=5.92-6.03$  に相当する視線方向の距離  $34\text{Mpc}$  も  $z=4.8, 5.7$  の原始銀河団のサイズとほぼ同じであり、本研究が発見したこの高密度領域は、観測史上最も遠い(最も昔の)  $z=6$  原始銀河団の可能性が非常に高い。

しかし、残りの 28 個の  $z\sim 6$  銀河候補はまだ分光で本物と同定されていない。更にその内 2 つは異常に明るく、 $z\sim 6$  のクエーサーである可能性が高い。クエーサー周辺に銀河が群がるタイプの原始銀河団は、他研究者による  $z=6$  原始銀河団「候補」の発見が一例だけ報告されているが(Stiavelli et al. 2005)、 $z>5$  では本物はまだ見つからない。そこで本研究では次の 4 つの目的達成を目指した。

## 2. 研究の目的

- (1) 先ず、未同定の 28 天体を分光し、これら

がクエーサーを含む本物の  $z=6$  銀河であるかを確認する。

(2) 分光同定した各銀河の赤方偏移  $z$  から正確な 3 次元空間分布を調べ、高密度領域のサイズを求め、宇宙の平均物質密度とかけて質量も求める。このサイズと質量を  $z \leq 0-5$  の(原始)銀河団のものと比較し、質量が同等であればこの高密度領域が  $z=6$  原始銀河団であると判断する。また、 $z=6$  (127 億年前の宇宙) から原始銀河団のサイズが時間と共にどのように変化して、 $z=0$  (現在) 宇宙の銀河団に進化したかを調べる。

(3) 原始銀河団を構成する個々の銀河のサイズ、質量、空間分布、星形成率、速度分布を求め、 $z=0-6$  でどう変化するかを調べる。サイズ、質量、空間分布の変化からは、銀河団内での質量集積と重力平衡化の過程が分かり、星形成率の変化からは、近傍宇宙の銀河団内に見られる大質量の楕円銀河がどのように形成されてきたかが分かる。また、速度分布を見て、2 つ以上の正規分布のピークがあれば、2 つ以上の銀河の群れが衝突・合体している証拠であり、その過程を時間を追って調べられる。

(4) (3) で調べた原始銀河団中 (= 銀河数が高密度な領域) の銀河の形成・進化過程を、低密度領域の銀河のそれと比較することで、銀河進化に環境依存性があるかどうかを調べる。

### 3. 研究の方法

我々が発見した最遠の赤方偏移  $z=6$  (宇宙年齢約 9 億年) の原始銀河団候補とその構成銀河の体積と質量を求め、後の時代 ( $z < 6$ ) の原始銀河団とその構成銀河と比較し、これらの物理的性質が現代 ( $z=0$ 、宇宙年齢約 137 億年) までにどう変化してきたかを調べる。また、原始銀河団の構成銀河と一般的な天域 (銀河数密度が特別高くも低くもない天域) の銀河の性質と比較することで、 $z=6$  時代の宇宙でも銀河の性質に環境依存性があるかどうかを調べる。

具体的な方法は以下の通り (時系列順) である。

- ① 我々の発見した  $z=6$  原始銀河団候補天体を構成する  $z \sim 6$  銀河候補 28 個を口径 8 m の Gemini 望遠鏡で分光する。
- ② 28 個の赤方偏移から原始銀河団のサイズ

と質量を求め、 $z=0-5$  (原始) 銀河団と比較する。

- ③ 28 個のサイズ、空間分布、星形成率、速度分布を  $z < 6$  の(原始)銀河団の構成銀河と比較する。
- ④ ③を銀河団以外の環境にある典型的な  $z=0-6$  銀河とも比較する。

(注)  $z=0-5$  銀河、銀河団外の銀河のデータは、先行研究の文献と我々の別研究からのデータから持ってくる。

上記方法により以下の 3 つの結果 (本研究の最終目的) を導き出す。

- ① 28 個中何個が本物の  $z=6$  銀河かを同定する。これらが本当に  $z=6$  原始銀河団を構成するかが分かる。
- ② 銀河団自体とその構成銀河自体が時間と共にどう形成され進化してきたか分かる。
- ③ 銀河の形成と進化が環境 (銀河団内か外か) にどう影響されるか分かる。

### 4. 研究成果

先ず、ハワイ島マウナケア山にある口径 8 m Gemini 望遠鏡の GMOS 分光器を使って、28 個の構成銀河候補天体の分光同定を試みたが、悪天候 (降雪) のため、分光データを得ることが出来なかった。つまり、28 個が本物の銀河かどうか同定できなかった。その為、本研究ではこれらを「 $z=6$  銀河候補天体」として扱い、撮像画像と測光データのみを用いて解析を行った。以下の結果は、その解析から得られたものである。

平成 20 年度は、我々が発見した赤方偏移が  $z=6$  (宇宙年齢約 9 億年) の原始銀河団候補とその構成銀河候補の物理的性質を求め、後の時代 ( $z < 6$ ) の原始銀河団とその構成銀河と比較し、これらの物理的性質が現代 ( $z=0$ 、宇宙年齢約 137 億年) までにどう変化してきたかを調べた。その結果、この原始銀河団候補のサイズ (体積) は大きめであるが、質量と個数密度は後の時代の原始銀河団と似ていることが分かった。更に、この原始銀河団候補の質量は現在の宇宙に存在する銀河団の質量に匹敵することも確認した。これは宇宙の年齢が約 9 億年という非常に若い時点で、既に大規模構造の形成がかなりの段階まで進んでおり、銀河団の形成も始まっていた可能性が高いことを示す。また、この天体は銀河団の祖先であり、より小さい体積に質量を集積していきながら、現在の宇宙に見られる銀河団へと進化すると考えられる。今後

の銀河団形成過程の解明につながる結果である。

また、平成 21 年度は、我々が発見した赤方偏移が  $z=6$  (宇宙年齢約 9 億年) の原始銀河団候補 (= 銀河数が高密度な天域) の構成銀河候補天体の物理的性質 (サイズと星形成率) を求め、一般的な天域 (銀河数密度が特別高くも低くもない天域) の銀河の性質と比較することで、 $z=6$  時代の宇宙でも銀河の性質に環境依存性があるかどうかを調べた。その結果、原始銀河団候補領域と一般的な天域でサイズと星形成率に有意な差は見られなかった。また、原始銀河が活発に星形成活動を行っている時にはライマン  $\alpha$  輝線が出る場合がある。 $z=6$  原始銀河団候補の構成銀河の何割がこの輝線を出しているかも調べ、約 20% が出していることが分かった。この割合は  $z=6$  時代の宇宙の一般的な天域の銀河の場合と殆ど同じであった。銀河団候補サンプル数は少ないものの、これは星形成活動の活発さは、 $z=6$  の時代で、銀河の個数密度が高い天域と一般的な天域で大きくは変わらず、環境依存性が弱い可能性を示唆する。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

太田 一陽 (Ota Kazuaki)  
独立行政法人理化学研究所・牧島宇宙放射線  
研究室・基礎科学特別研究員  
研究者番号：20462666