



楕円銀河の中に存在している<sup>1)</sup>。このことから、現在の楕円銀河がどのように恒星を作り進化してきたかを明らかにすることは銀河の形成と進化過程を理解するうえで非常に重要であると言える。これまでの研究から、現在の宇宙では、銀河の基本的な性質は銀河が存在している環境、および、銀河自身の質量に強く依存していることが明らかになっている<sup>2), 3)</sup>。つまり、楕円銀河が好んで存在する場所があり、楕円銀河に見られる性質にも傾向がある。

楕円銀河は星形成活動を終えて赤い色をしている。一方、円盤銀河は活発に星形成を行っていて青い色をしている。一般的に、大質量の銀河のほうが星形成活動が弱く、古い星で構成された楕円銀河である傾向が強い<sup>4)</sup>。また、現在の宇宙では、銀河団のような高密度領域に存在する大部分の銀河は楕円銀河であり、一般領域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<sup>2)</sup>。現在の宇宙で観測される銀河の性質の傾向から、銀河団という環境が楕円銀河の形成に大きく寄与していることが考えられる。しかし、銀河の性質が環境および質量に依存している原因については明らかになっていない。

銀河団という環境が銀河の性質に影響を及ぼすであろう二つの効果が考えられている。一つは高密度領域における銀河形成バイアスという先天的な効果であり、もう一つは銀河が銀河団に集まってくる過程で受ける後天的な効果である。宇宙初期に密度ゆらぎが大きかった高密度領域ほど、初期段階で銀河などの構造が形成されやすい。つまり、銀河団や大質量銀河は、より早くに形成された分だけ早く進化し、現在では星形成活動を終わらせてしまっていると考えられる。これが先天的な銀河形成バイアスの効果である<sup>5)</sup>。一方、銀河団のような高密度領域では、銀河間の距離が近いいため、銀河どうしの合体や星間ガスのはぎ取りなど、銀河どうしの相互作用が大きくなる。これが後天的な環境効果である<sup>6)</sup>。しかし、この両効果

のどちらがどの程度、銀河の形成と進化過程に影響を及ぼしているのか、定量的には全く未解明であるというのが現状である。

そこで、時系列に沿って、銀河の性質の環境依存性を観測的に明らかにすることが重要である。遠方（つまり過去）の銀河ほど、その形成期に近く、その性質は先天的効果を強く反映しているはずである。一方、銀河が集団化する過程でさまざまな環境下にいる銀河の直接観測から、後天的効果の寄与を調べることができる。これまでの観測から、約 77 億年前（赤方偏移 $\sim 1$ ）までさかのぼっても、銀河団の中心部ではすでに星形成活動を行っていないことが明らかになっている<sup>7)</sup>。つまり、銀河団の中心部に存在する楕円銀河の形成時期はもっと昔であることが示唆される。しかし、約 77 億年前より昔の銀河団における詳細な探査はまだ行われておらず、その状況は明らかになっていない。この未開拓の時代は宇宙の星形成活動が最も活発であった時期である<sup>8)</sup>。また、現在の宇宙に存在する恒星質量の半分以上が形成された時期であることも明らかになっている<sup>9)</sup>。このことから、現在の楕円銀河の形成現場をとらえるには、約 77 億年前（赤方偏移 $\sim 1$ ）より昔の銀河団を観測することが不可欠である。現在は星形成を終えた楕円銀河であってもその生まれた時期に近づくと星形成を行っていると考えられる。つまり、遠方銀河団において楕円銀河の先祖が成長を続けている現場をとらえようとしている。

### 3. XMMXCSJ 2215.9 – 1738 銀河団における輝線銀河探査

私たちは、すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Superprime-Cam) と近赤外線多天体撮像分光装置 (MOIRCS) を用いて、約 92 億年前（赤方偏移 1.46）にある XMMXCSJ 2215.9 – 1738 銀河団（以後 XCS2215 銀河団と表す）<sup>10)</sup> の星形成活動探査を行った（図 1）。この銀河団は現在見つかっている銀河団の中で最も遠方の銀河団の一つであり、

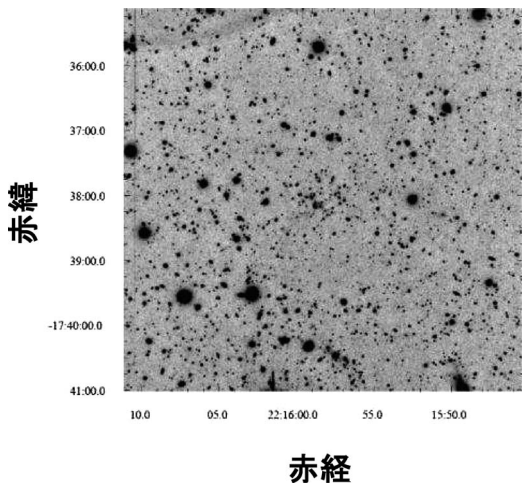


図1 すばる望遠鏡に搭載されている主焦点カメラ (Suprime-Cam) と NB912 狭帯域フィルターを用いて撮った XMMXCSJ2215.9-1738 銀河団。上方方向が北、左方向が東である。この画像の視野は、主焦点カメラの視野  $34 \times 27$  平方分のうち、他の可視光データ ( $B, z'$ ) と近赤外線データ ( $J, K_s$ ) のある約  $6 \times 6$  平方分の領域である。本研究の結果は、この約  $6 \times 6$  平方分の領域のデータを用いて得られた。

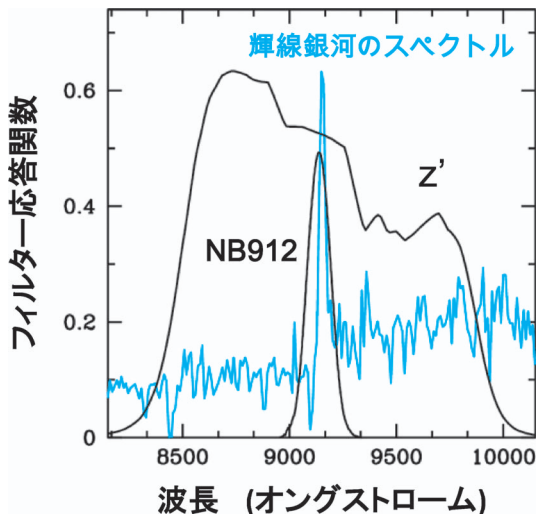


図2 NB912 狭帯域フィルターと  $z'$  広帯域フィルターの応答関数。この二つのフィルターを用いた観測を行い、その明るさの違いから輝線銀河を選び出すことができる。青で示したスペクトルは、約 92 億年前 (赤方偏移 1.46) の時代から [O II] 輝線を放射する銀河のモデルスペクトル。

約 92 億年もの昔の銀河団環境での星形成活動を詳細に調べたのは、この研究が初めてである。

本研究では、銀河の星形成活動の信号を正確に捕えるために、狭帯域フィルターを用いた観測を行った。天文学の研究では、特定の波長域の光を通すフィルターを使って、研究目的に合った波長の光のみを観測する。狭帯域フィルターとは、透過することのできる光の波長域が特に狭いフィルターである。今回の研究で用いたのは、NB912 狭帯域フィルターである。このフィルターを透過する光の波長域は、中心波長が  $9,139 \text{ \AA}$  であり半値幅 (FWHM) が  $134 \text{ \AA}$  である (図2)。

星を活発に作っている銀河の星形成領域の電離ガスからは決まった波長の光 (輝線) が出てくる。そして、遠方で放射された光は赤方偏移を受けて本来より長い波長域で観測される。遠方銀河から放射される輝線をとらえるためには、今回観測し

た銀河団の距離と狭帯域フィルターが通す光の波長の関係が重要である。幸いなことに、この銀河団に存在する銀河の星形成領域から放射された [O II] 輝線\*1は赤方偏移を受けて、今回用いた狭帯域フィルターの波長域にちょうど移動してくる。つまり、もし銀河団内の銀河が [O II] 輝線を放射しているなら、NB912 狭帯域フィルターを通して観測すると、その銀河は特に明るく観測される。一方、ほぼ同じ波長域で光を透過する広帯域フィルター ( $z'$ バンド) では輝線の有無の影響が弱く銀河のスペクトルの連続光成分を捕らえることができる。したがって、広帯域フィルターでの明るさに比べて、狭帯域フィルターでの明るさが有意に明るければ、輝線を捕らえたとみなせる (図3)。これが狭帯域フィルターを用いた輝線探査の原理である。

撮像観測による輝線探査には大きな利点がある。一般的に輝線を観測するには分光観測が必要

\*1 一階電離した酸素が放射する禁制線であり、この輝線の静止系波長は  $3,727 \text{ \AA}$  である。

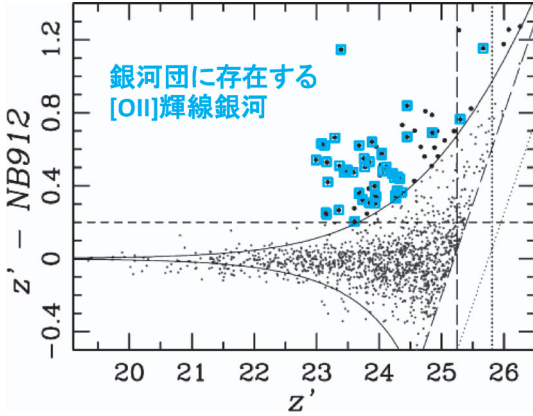


図3 XCS2215 銀河団に存在し、[O II] 輝線を放射する銀河の選出。横軸は  $z'$  データでの銀河の明るさ、縦軸は  $z' - \text{NB912}$  の色（つまり、NB912 データと  $z'$  データの明るさの違いで、値が大きいかほど NB912 データで銀河が明るく観測されたことを表す）。図2のように輝線が狭帯域フィルターに入ってくると、NB912 データは  $z'$  データに比べて明るくなる。縦軸の値（ $z' - \text{NB912}$  の色）が実線より大きいとき、NB912 データは  $z'$  データより有意に明るい（つまり、輝線を検出したことになる）。その輝線銀河の中で、 $B - z'$  と  $z' - K_s$  の二つの色が、約 92 億年前（赤方偏移 1.46）の時代の銀河の色と一致するものを XCS2215 銀河団に存在する [O II] 輝線（青の四角）とみなす。

である。最近の分光装置は一度に多くの天体を観測できるようになり、観測効率は高くなってきているが、それでも一度に観測できるのは多くて数百個ほどである。つまり視野内の全天体を分光観測することは時間的に不可能なので、観測する天体を取捨選択するときどうしても人為的な効果が入ってしまう。しかし、狭帯域フィルターを用いた撮像観測では、その視野に存在する銀河が星を作っていると、それらの銀河を一網打尽にすべて捕らえることができるのである。この方法は銀河団のような特定の距離にある領域の星形成活動の探査をするのには非常に向いている。

撮像観測をすると、その画像にはさまざまな距離に存在する銀河が写る。そこで、XCS2215 銀河

団に存在しているメンバー銀河を選び出す必要がある。本研究では、NB912 狭帯域フィルターで撮像したデータ以外に、 $B$ 、 $z'$ 、 $J$ 、 $K_s$  という広帯域フィルターで撮像した可視光・近赤外線データも用いる。本研究の観測で利用したフィルター数が多くないために、測光的赤方偏移を使わずに、 $B - z'$  と  $z' - K_s$  の銀河の二つの色（各フィルターでの明るさの違い）を用いて赤方偏移 1.4 から 2.5 付近に存在する銀河を選び出す色選択法を用いた。もちろん、この方法では銀河団メンバーだけを選び出すことはできない。そこで、すばるディープフィールドという一般領域のデータを用いて銀河団に属さない銀河の個数密度を推定する。この一般領域の個数密度より超過した分が銀河団に属する銀河の寄与である。この方法では、輝線銀河以外は一つひとつの銀河に対して銀河団メンバーか否かの判断はできないが、この銀河団領域の個数密度からすばるディープフィールドデータの個数密度を統計的に引き算することで、銀河団メンバーの寄与を正しく評価できる。

この狭帯域フィルターを用いた撮像観測の結果、XCS2215 銀河団の 6 分 × 6 分の領域において、2.6 太陽質量/年より大きな星形成率をもつ銀河団メンバーからの [O II] 輝線をすべて捕らえた。次の章では、明らかになった遠方銀河団の星形成活動を紹介する。

## 4. 見えてきた大質量銀河の形成現場

### 4.1 高密度領域における活発な星形成活動

私たちは、XCS2215 銀河団に存在する 44 個もの [O II] 輝線を放射する銀河団メンバー銀河を発見した。図4はその [O II] 輝線銀河の分布図である。この図を見てすぐわかることは、銀河団中心にも [O II] 輝線銀河は多く存在しているということである。前述のように [O II] 輝線の大部分は星形成活動により放射されていると考えられるので、約 92 億年前（赤方偏移 1.46）に存在するこの銀河団では、まだ星形成活動が活発であること

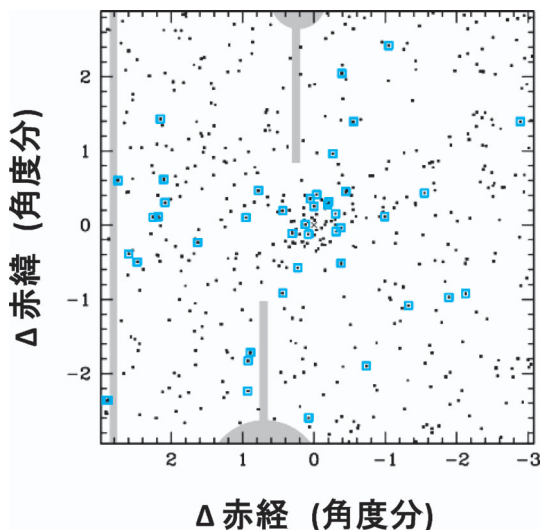


図4 図3で選び出した44個の[O II]輝線(青の四角)の分布図. 中央のバツ印が銀河団の中心. 上方方向が北, 左方向が東である. 視野は図1と同じ約6×6平方分の領域である. また, グレーの領域は, マスクをして使わなかった領域である.

を示唆する結果である. この状況は, もっと現在に近い(より低赤方偏移の)銀河団中心部とは全く異なっている. より近傍の銀河団の中心部に存在する銀河はすでに星形成を終えており, 活発な星形成活動は銀河団周辺の銀河群のような環境に移っている<sup>7), 11)</sup>. 図5は, 私たちが約69億年前(赤方偏移0.81)のRXJ1716銀河団に対して行っている同様の狭帯域フィルターによる星形成銀河探査の結果との比較である. RXJ1716銀河団では水素から放射されるH $\alpha$ 輝線を捕らえている. XCS2215銀河団では銀河団中心付近にたくさんの星形成銀河が存在する一方, 約23億年後のRXJ1716銀河団では中心部分を避けるように星形成銀河が分布している. その違いが図5では一目瞭然であり, 非常に興味深い結果である.

この銀河団中心部分での星形成活動の高まりを定量的に評価するために, 銀河団メンバーに対する[O II]輝線銀河の割合を調べた. その結果が図6である. 銀河団の場所(銀河団中心からの半径)

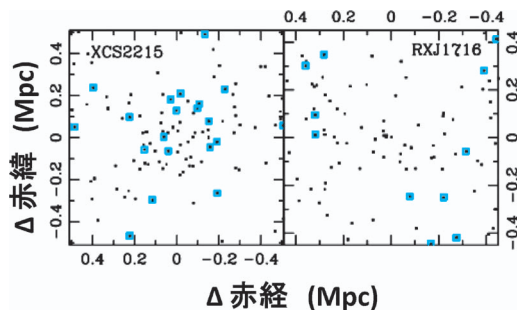


図5 XCS2215銀河団(約92億年前, 赤方偏移1.46)の[O II]輝線銀河とRXJ1716銀河団(約69億年前, 赤方偏移0.81)のH $\alpha$ 輝線銀河の分布の比較. 青の四角は両銀河団における輝線銀河を表す. また, 黒点は銀河団メンバーの分布を示す. 視野は共に銀河団中心周りの2×2平方分である. 両銀河団において, 実スケールではほぼ同じ広さの領域を見ている. 1 Mpcは $3.086 \times 10^{22}$  mに相当する.

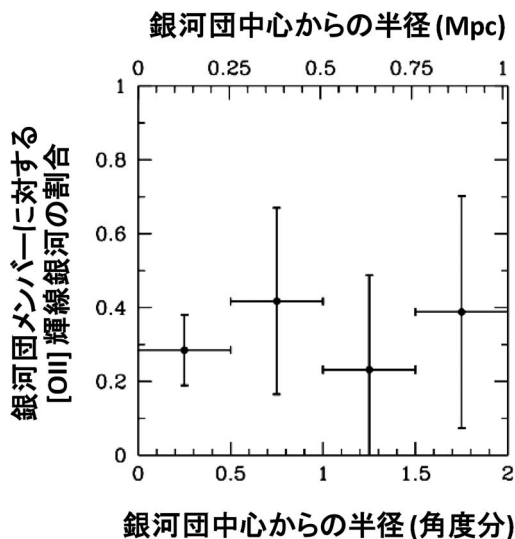


図6 XCS2215銀河団のメンバー銀河に対する[O II]輝線を出す銀河の割合. 横軸は銀河団中心からの距離.

によらず, 輝線銀河の割合はほぼ一定で, かつ, 約30%という高い割合の銀河団メンバーが活発に星形成活動を行っていることが明らかになった. より現在に近い銀河団で同様に輝線銀河の割合を調べると, 銀河団の外側から中心に向かって, 輝線銀河の割合は減少傾向を示し, 銀河団の

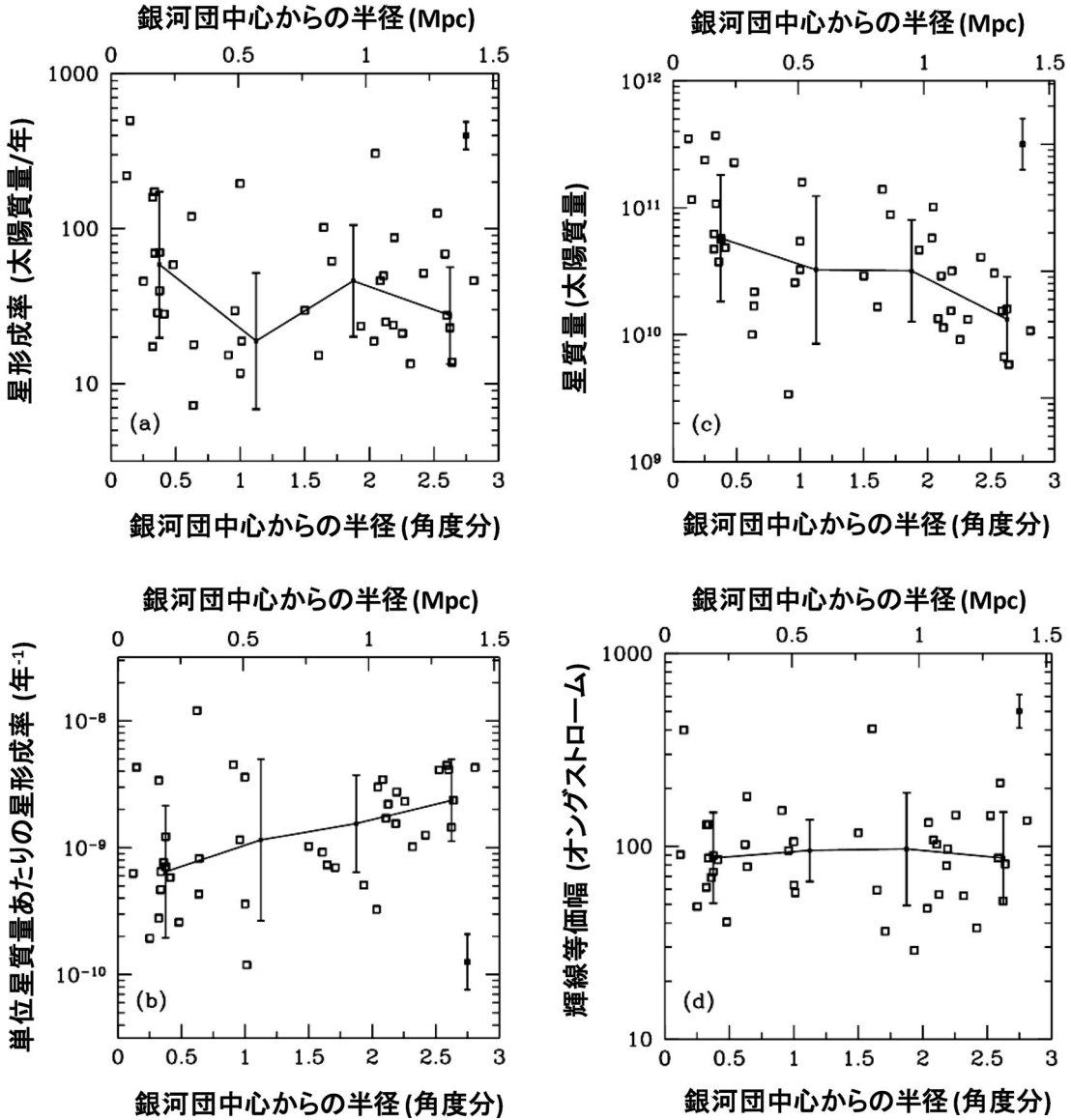


図7 44個の [O II] 輝線銀河の (a) 星形成率, (b) 単位星質量あたりの星形成率, (c) 星質量, (d) 輝線等価幅. 横軸は銀河団中心からの距離. 実線は, 銀河団からの半径で四つの領域に区切った各領域におけるメジアン値を示す. 各図の隅に, 各値の典型的なエラーを示す.

中心付近ではゼロに近づく<sup>7), 11)</sup>. これらの結果は, 約92億年前の銀河団の中心部分に存在する銀河は, 依然として星形成を活発に行っていて成長を続けていることを意味する.

輝線の光の量 (フラックス) から輝線銀河の星

\*2 とともに銀河の星形成活動の活発さを表す量.

形成率や輝線等価幅<sup>\*2</sup>, 静止系可視連続光のフラックス量から銀河の恒星質量を推定することができる. そして, 銀河の単位恒星質量あたりの星形成率を調べた. 44個の輝線銀河に対して, 銀河団内の位置とそれぞれの量の関係を調べた結果が

図7である。この図では、銀河団からの半径で四つの領域に区切り、各領域におけるメジアン値を実線で結んでいる。この結果から、輝線銀河の星形成率や輝線等価幅は銀河団の半径に依存せず、ほぼ一定であることがわかる。一方、わずかであるが、単位恒星質量当たりの星形成率は中心付近の輝線銀河ほど小さくなっている傾向が見られる。これは銀河団中心ほど恒星質量の重い銀河が存在していることに起因している。

これらの結果から、約92億年前(赤方偏移1.46)の宇宙にさかのぼることでようやく、銀河団のような高密度領域でさえ、依然として活発に星形成活動を行っている現場が観測され始めた。また、質量の重い銀河ほど銀河団の中心付近で作られていることが明らかになった。つまり、これは先天的効果の銀河形成バイアスが効いていることを示唆する非常に興味深い結果である。

#### 4.2 星質量の小さな赤い銀河の不足

第2章で、現在の銀河団に存在する銀河は楕円銀河で占められていること、そして、楕円銀河は赤い色をしていることを述べた。このような赤い銀河が多く存在することが銀河団の特徴の一つであるが、一体どの時代からこのような状況になっているのかという疑問が出てくる。そこで、XCS 2215 銀河団の銀河について銀河の色と等級の関係を調べ、どのくらいの明るさの銀河まで赤い銀河が形成されているかを調べた(図8)。図8(a)は、 $B-z'$ と $z'-K_s$ の二つの銀河の色から選ばれた銀河団メンバー候補天体を使って作った図である。銀河団に赤い銀河が存在していれば、それらは図8(a)の二つの点線間に分布することが予想される。実際、 $K_s$ バンド等級が明るい赤い銀河が多く存在していることがわかる。つまり、約92億年前の銀河団でもすでに色等級関係が存在することが確認された。しかし、この遠方の銀河団が近傍の銀河団と異なる点は、暗くて赤い銀河がほとんど存在しないことである。 $K_s$ バンドが21.5等(AB等級)より暗い赤い銀河の数が減少している

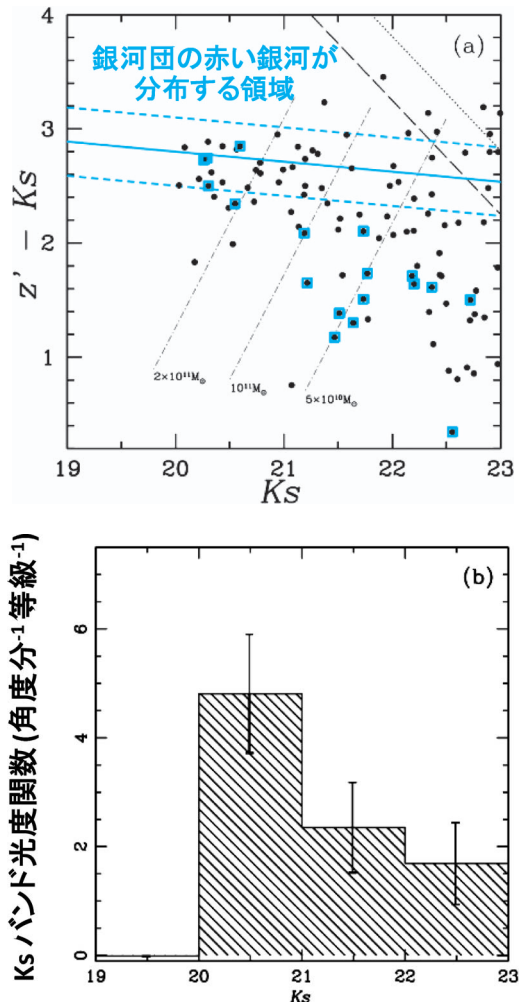


図8 (a)  $z'-K_s$ と $K_s$ の色等級図。黒点は $B-z'$ と $z'-K_s$ の二つの色で選ばれたXCS2215銀河団メンバー銀河の候補。青の実線は理論モデルから予想される約92億年前(赤方偏移1.46)の銀河団に存在する赤い銀河の色等級関係。XCS2215銀河団に存在する赤い色をした銀河は青の点線の間に分布する。青の四角は[O II]輝線銀河。(b) XCS2215銀河団の $2 \times 2$ 平方分の領域における $K_s$ バンド光度関数。図8(a)の点線の間に分布する銀河を使い、一般領域データを用いた統計的引き算を行うことで、銀河団メンバーの寄与を正確に評価している。

ように見える。点線の間にある銀河に対して一般領域のデータを使った統計的差引を行うことで、銀河団メンバー銀河だけを正しく評価したのが、図 8(b) の  $K_s$  バンド光度関数である。この図はそれぞれの  $K_s$  バンド等級をもつ赤い銀河団メンバー銀河がどのくらいの数存在しているかを表す。色等級関係の図を見て受ける印象どおり、 $K_s$  バンドが 21.5 等より暗い銀河の数が減少していることがわかった。つまり、この時代の典型的な明るさより 0.5 等ほど暗い銀河までは色等級関係が見られるが、それより暗い銀河団銀河はほとんどが青い色をした星形成銀河である。一方、もっと現在に近い銀河団ではその時代の典型的な明るさの銀河より 1 等以上暗い銀河まで色等級関係が形成されている<sup>12)</sup>。銀河の明るさと恒星質量に相関があることを考慮すると、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ことを示唆した結果である。

## 5. 今後の展開

本研究によって、銀河団中心部で大質量銀河の形成現場が見え始めてきた。しかし、銀河の形成と進化過程の解明への道のりはまだまだ遠いと言わざるをえない。本研究では、まだ一つの銀河団について調べただけである。この性質がこの時代の典型的なものなのか、この XCS2215 銀河団に特有のものなのかという疑問を解決するためには、同じ時代に存在する別の銀河団をもっと探査する必要がある。そして、もっと遠方(より過去)の銀河団を観測して、その状況を探査することも重要である。また、XCS2215 銀河団で発見された星形成銀河についても、その個々の性質をより詳細に調べていく必要がある。そのためには、分光観測によってスペクトルを取得することが不可欠である。さらに、星を作る原料となるガスの量を知ることも重要だと思われる。アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計の運用が始まれば、遠方銀河のガス量の議論が可能になるであろう。

## 謝 辞

本稿は、筆者が東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程に在籍中に行った研究の成果をまとめたものです。本研究は、国立天文台の児玉忠恭氏、東京大学の岡村定矩氏、嶋作一大氏、小山佑世氏、そして、ハワイ観測所の田中 壱氏との共同研究によるものです。皆様からいただいた多くの助言や議論の結果、たいへんに興味深い研究を進めることができました。深く感謝します。また、本研究は著者が日本学術振興会の特別研究員 (DC2) のときに行い、特別研究員奨励費の助成を受けたものです。最後に、本稿の執筆にあたり天文月報編集委員会の皆様にもお世話になりました。感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Bell E. F., et al., 2003, ApJS 149, 289
- 2) Dressler A., et al., 1997, ApJ 490, 577
- 3) Tanaka M., et al., 2005, MNRAS 362, 268
- 4) Kodama T., et al., 2004a, MNRAS 350, 1005
- 5) Cen R., Ostriker J. P., 1993, ApJ 417, 415
- 6) Cowie L. L., et al., 1996, AJ 112, 839
- 7) Koyama Y., et al., 2010, MNRAS 403, 1611
- 8) Hopkins A. M., Beacom J. F., 2006, ApJ 651, 142
- 9) Kajisawa M., et al., 2009, ApJ 702, 1393
- 10) Stanford S. A., et al., 2006, ApJ 646, L13
- 11) Kodama T., et al., 2004b, MNRAS 354, 1103
- 12) Lidman C., et al., 2008, A&A 489, 981

### High Star Formation Activity in the Central Region of a Distant Cluster at $z=1.46$

Masao HAYASHI

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We conduct a deep [O II] emission survey with a narrow-band filter NB912 on Subaru/Suprime-Cam in a cluster XMMXCS J2215.9-1738 at  $z=1.46$ , one of the most distant clusters to date with a detection of extended X-ray emission. We find that this cluster shows the high star formation activity even at its center, suggesting that we are beginning to enter the formation epoch of massive galaxies in the cluster core.