

# 「すばる」と「あかり」による遠方銀河団の 徹底調査—銀河団周縁部で高揚する 銀河の星形成活動—



小山 佑 世

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻（独）日本学術振興会特別研究員 DC1） 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1）  
e-mail: koyama@astron.s.u-tokyo.ac.jp

銀河の個性はその銀河の住む場所（環境）と強く関係しています。しかしそれがどうしてなのか、その起源は宇宙のいつの時代にさかのぼるのか、実は誰もその確固たる理由を知りません。これを解き明かすためには、遠方すなわち過去の宇宙を観測し、過去の宇宙のいろいろな場所で、銀河が環境とどのような関係をもちながら成長しているかを地道に調べ上げることが必要です。本稿では、いずれも広い視野を武器とする「すばる望遠鏡」と「あかり衛星」の合わせ技で挑んだ、遠方銀河団およびその周辺領域の観測成果を紹介します。

## 1. 銀河と環境・私たちの挑戦

宇宙には無数の銀河が存在します。私たちの住む天の川銀河も、宇宙にあまた存在する銀河の一つです。銀河は互いの重力で引き合い、銀河団や銀河群と呼ばれる銀河の集団を作っています。宇宙には、銀河の密集した領域もあれば、ほとんど銀河の存在しない領域もあります。ちょうど私たち人間が、町や村を作って生活している一方で、ほとんど誰も住んでいない地域があるのとよく似ています。人間の場合は、都会に住む人と地方に住む人では性格に差があったり、地方から都会に出てくると、生活環境の変化で突然人格が変わったりすることがあるように、銀河の性質も、実はその銀河の住んでいる場所（環境）と強く関係しています。たとえば、銀河団のような銀河の密集地帯には赤い色をした楕円銀河やレンズ状（S0）銀河が多いのに対し、銀河のあまり集まっていな

い領域には青い色の渦巻銀河が多いことが比較的古くから知られています<sup>1)</sup>。

このような銀河の性質と環境の関係は、宇宙の歴史のなかでいつごろ、どのように形成されてきたのでしょうか…。きっと、銀河も人間と同じように、群れ集まりながら何らかの影響を受けて、その性質を変えてきたのだと考えられますが、その詳細は謎に満ちています。筆者は、遠方つまり過去の宇宙を観測することで、過去から現在にかけて、銀河団や銀河群が形成され、そのなかで個々の銀河も進化し、宇宙が現在の姿を獲得した様子を直接調べたいと思って研究を進めています。

## 2. 遠方宇宙の大規模構造を探れ

第1章で述べたように、銀河団のような銀河の密集領域には「色の赤い」銀河が多いことがわかっています。赤い銀河とは一般に、星形成活動を行っていない銀河なので<sup>\*1</sup>、銀河団という環境

\*1 銀河は、星形成活動を行っているときは明るく青い星（O型星やB型星）の寄与が大きいために青い色をしていますが、これらの星々は寿命が短いため、銀河が星形成活動をやめるとまもなく姿を消してしまいます。そしてすぐに低温の赤い星からの寄与が大きくなり、銀河の色は赤くなるのです。

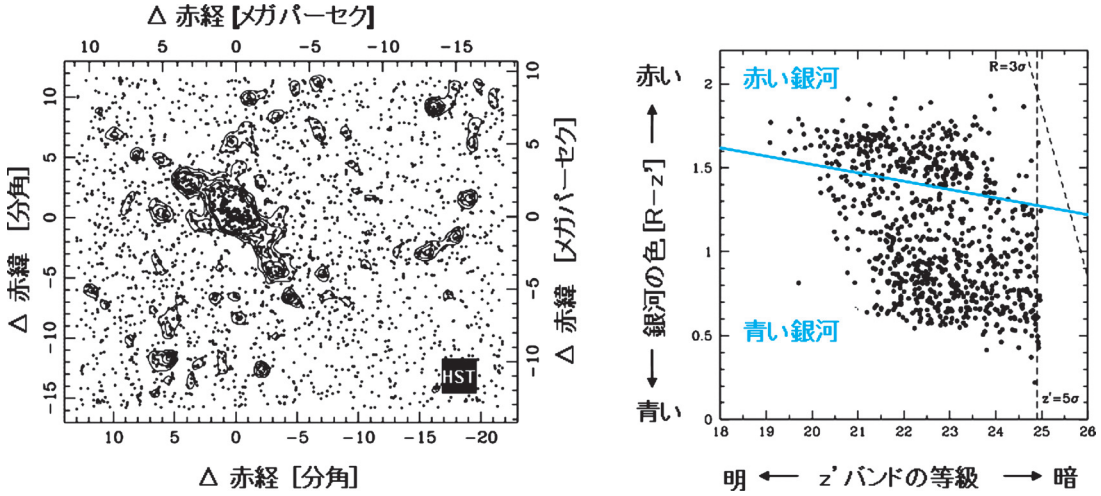


図1 (左) すばる望遠鏡で描き出したRXJ1716銀河団とその周辺構造。1点1点が銀河の位置を表す。比較としてハッブル宇宙望遠鏡(HST)の視野を示した。すばる望遠鏡の視野がいかに広いかを実感できる。また、座標軸に示したメガパーセク(Mpc)とは距離の単位パーセクの100万倍で、図の右上の軸の一目盛(1メガパーセク)はおよそ326万光年に相当する。(右)銀河団領域の銀河の色等級図。本稿ではこの図の青線に境に、赤い銀河と青い銀河を定義する。

は、銀河の星形成を止め、赤い銀河を作る場所だと信じられています<sup>2)</sup>。さらに、最近のさまざまな研究では、銀河団だけでなくもう少し密度の低い銀河群程度の環境も、銀河進化に重要な影響を与えるのではないかとされています<sup>3)</sup>。私たちは、銀河団のみならず銀河群やフィールドまでのさまざまな環境を調べなければ、到底、銀河の進化を理解したとは言えないのです。

そこで私たちのグループは、遠方宇宙つまり過去の宇宙のさまざまな時代、さまざまな環境を効率よく調べるために「遠方の銀河団を広く観測する」というアプローチを続けています<sup>4)</sup>。銀河団周辺にはほぼ例外なく、フィラメント状の大規模構造が広がっているため、遠方銀河団を広く観測すれば、遠方宇宙の高密度環境から低密度環境まで一網打尽に調査できるという狙いです。

図1(左)は本研究の舞台である赤方偏移0.81(およそ70億年前)の宇宙の銀河団RXJ1716.4+

6708(以下、RXJ1716銀河団)を、世界の8メートル級望遠鏡のなかでも抜群の視野(約30分角)を誇るすばる望遠鏡の主焦点カメラSuprime-Camで観測し、測光データから銀河団メンバーを選び出してその分布を描いたものです<sup>5)</sup>\*2。銀河の密集した銀河団コアと北東から南西(図の左上から右下)へ伸びるフィラメント状の大規模構造、さらに島のように浮かぶいくつもの銀河群が見えています。次章では、この大規模構造のなかのどの場所が、銀河進化に重要な影響を与えるのか調べてみたいと思います。

### 3. 銀河団周縁部への興味

本格的な説明に入る前に、本稿で使う銀河の「色」の定義をしておきます。実は星形成を行っていない「赤い銀河」と星形成をしている「青い銀河」は、「色等級図」を描くとはっきりと分けることができます(図1右)。そこで、この図の中で赤

\*2 本来は銀河団メンバーの同定には、銀河を一つ一つ分光してその赤方偏移を確認する必要がありますが、これだけ広範囲にわたって分布する銀河をすべて分光するのは現実的ではなく、ここでは測光データに基づくメンバー選出(photo-zセレクション)を行っています。

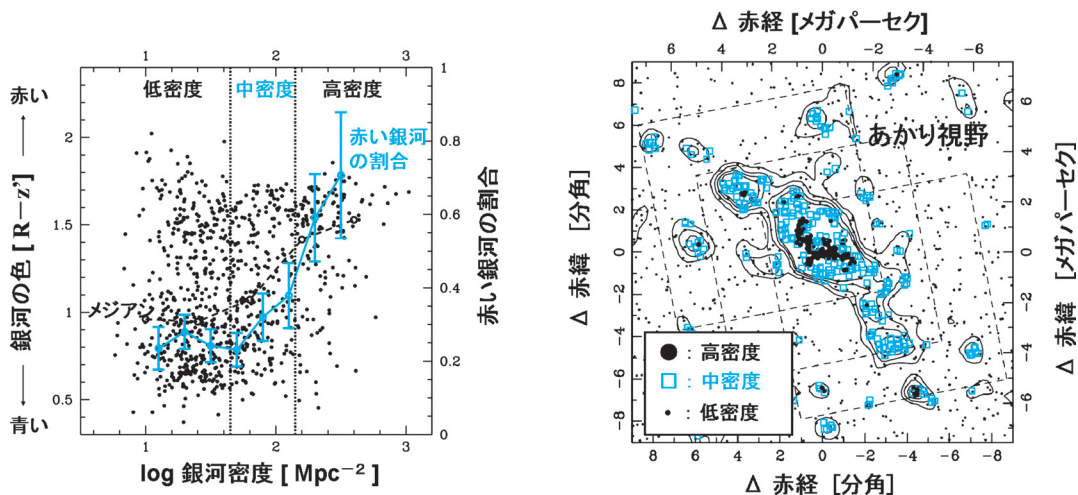


図2 (左) 銀河の色と環境（銀河密度）の関係。各環境での赤い銀河の割合および銀河の色のメジアン値も示した。(右) 低密度・中密度・高密度が地図上でどこに対応するのかを表した図。今回注目の中密度環境は銀河群やフィラメントに対応する。また破線で描いた三つの四角形は本研究の「あかり」による観測視野を表す。

い銀河と青い銀河の境界を定め、以後この定義を使います。本稿では「赤い銀河」・「青い銀河」という言葉が頻繁に登場しますが、それはすべて上の定義に基づいていることを覚えておいてください。

さて、ここから本題に入っていきます。私たちは前章で選び出した銀河団メンバー銀河の性質を環境の関数として描くことができます。ここでは銀河の色と環境の関係を見てみましょう<sup>\*3</sup>。図2(左)は銀河の色 vs. 環境のプロットで、赤い銀河が高密度領域に集中し、青い銀河が低密度領域に集中しているのがはっきりとわかります。そして、横軸の値がおよそ1.7のあたりから、赤い銀河が増え始めていることもわかります。ここで、図2(左)に示したように銀河の環境を低密度・中密度・高密度環境の三つに分割してみましょう。先ほど、赤い銀河が増え始めると言ったのは「中密度環境」に対応します。図2(右)を見ると、この「中密度環境」とは銀河団周囲の、銀河群や大

規模構造のフィラメントに対応していることがわかります。この結果は、銀河団ほどの高密度環境でなくとも、銀河群やフィラメント程度の環境で、銀河の性質が変化を始めるということを支えます。同じくすばる望遠鏡を使って、他の遠方銀河団を観測した研究でも、これと同様の示唆が得られています<sup>3), 6)</sup>。赤い銀河が増え始めるのは星形成活動を終えた銀河が増え始めることを意味するので、銀河群やフィラメント環境で銀河の星形成活動を止めるプロセスが盛んに起きているのだと考えられます。しかし私たちは「どのように」銀河の性質が変化しているのかわかりません。それに、色が赤いからといってそれらはすべて星形成をやめた銀河なのかどうかも本当はわかりません。ダストによる赤化を受けているだけで、星形成を活発に行っている場合もあると言われています<sup>7)</sup>。次章では、この疑問と不安に中間赤外線という全く異なる波長の観測データから取り組みます。

\*3 ここでいう「環境」とは局所銀河数密度というもので、各銀河から5番目に近い銀河までの距離を求め、その距離を半径とする円内での銀河数密度を測ったものです。5番目に近い銀河が近ければ近いほど密度は高く、遠ければ密度は低いという簡単なくみですが、銀河環境の定量的定義として、よく使われています。

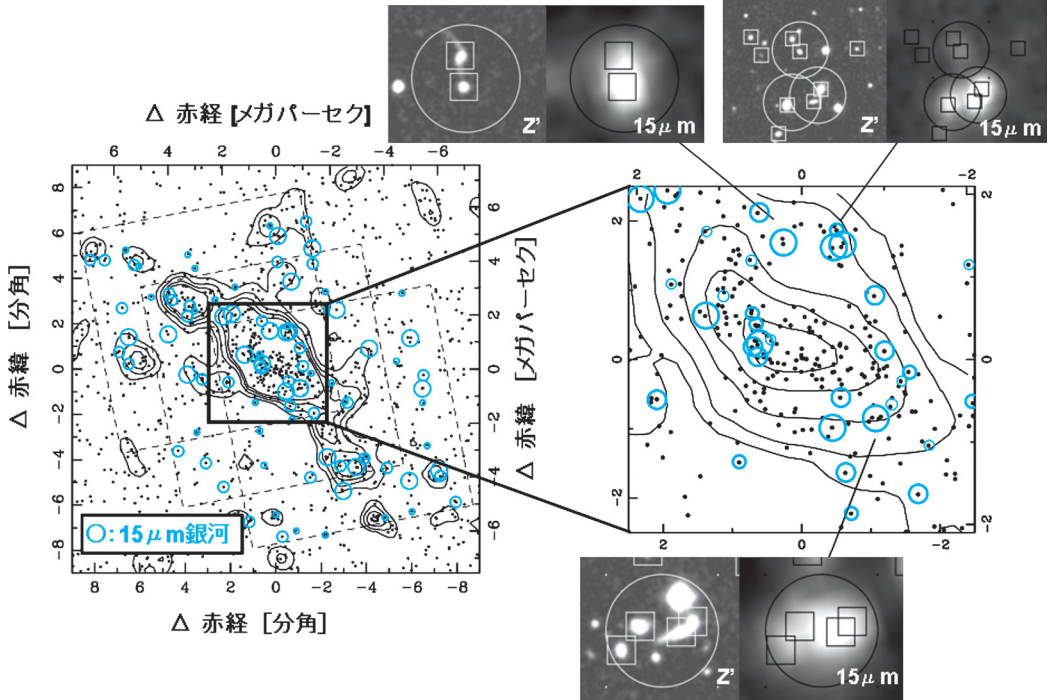


図3 15 μm 観測で検出された銀河の分布. 全体図 (左) と中心付近の拡大図 (右). 15 μm 銀河の○の大きさは 15 μm の明るさに対応し, 明るいソースほど大きくしてある. 三つの 15 μm 銀河については可視光 (z'バンド) および 15 μm でのスナップショットも示した. 各写真内の円の半径は 8 秒角で, 赤方偏移 0.81 では約 60 キロパーセクに相当する.

## 4. 広視野赤外線観測というアプローチ

### 4.1 赤外線で見えるか?

銀河団周辺環境についてもっと詳しく知るために, 私たちはこの銀河団をあかり衛星の IRC というカメラを用いて 15 μm 帯で撮像観測しました. IRC は約 10 分角の視野をもち, 赤外線カメラの視野としてはとても広く, すばる望遠鏡で観測を進めてきた私たちの研究ととても相性のいい観測装置です. 私たちは銀河団周囲の大規模構造をすっぽりカバーするように, 図 2 (右) に示した三つの視野を設けて観測を行いました<sup>8)</sup>.

15 μm 帯というのは, 赤方偏移 0.81 であるこの銀河団の静止系ではおよそ 8 μm に対応し, 星形成銀河からのダスト放射をとらえます. 星形成

銀河の中間赤外線の明るさは赤外線全光度とよく相関し, 星形成率のよい指標となっています<sup>9)</sup>. ちなみに今回の私たちの観測は, いま観測している銀河団の距離だと星形成率がおよそ 25 M<sub>☉</sub>/年以上の銀河を検出することができます.

### 4.2 中間赤外線ソースはどこを好む?

本研究の最もユニークな点は, 遠方銀河団のずっと外側までをカバーする中間赤外線での観測に成功し, 中間赤外線ソースがいったいどのように分布しているのかを描き出せることにあります. 銀河団メンバーであり, かつ 15 μm で検出された銀河 (以下, 15 μm 銀河と呼びます) の分布を図 3 に示します. たくさんの 15 μm 銀河が観測した領域全体にわたって検出されていますが, 銀河団のごく中心には 15 μm 銀河は存在しないこ



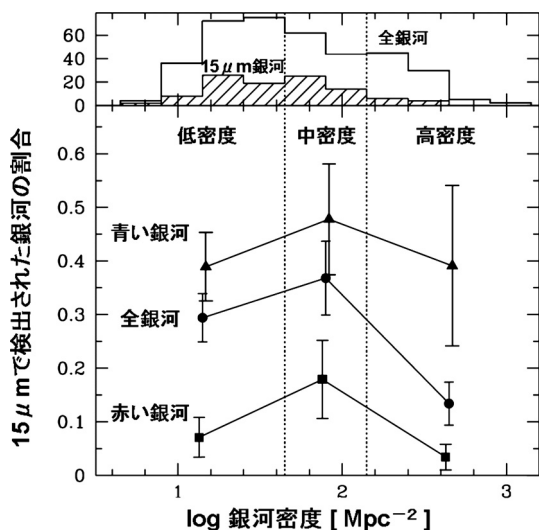


図4 各環境での、15 μm 銀河の割合 (z'バンドの明るさが 22.5 等 (AB 等級) より明るい銀河に限って計算). 図の上に付けたヒストグラムは各環境にいる銀河の数を表す.

とがわかります. そしてその中心領域を取り囲むように、15 μm 銀河がたくさん分布しています.

この分布をもう少し定量的に調べるため、前章で定義した低密度・中密度・高密度環境の定義を再度使い、これら三つの環境に 15 μm 銀河がどのくらい存在しているのかを調べてみます (図4).

図4を見ると、まず高密度環境では 15 μm 銀河の割合は明らかに低いことがわかります. これは納得の結果です. 銀河団中心部の銀河は星形成活動が低く、中間赤外線では検出されないのです. 一方で低・中密度環境ではいずれも高い割合を示しているのがわかります. これは少々驚きの結果です. 前章を思い出してください. 前章では、可視光の観測から、赤い色の銀河が中密度環境で増え始めることを示し、中密度環境で星形成活動が止まり始めているはずだと述べました. しかし赤外線データに基づく本章の結果からは、中密度環境は低密度環境と同程度か、あるいは低密度環境以上に 15 μm 銀河が多く存在する可能性を示唆します. 中密度環境は、星形成活動を止める環境であると同時に、星形成率にしておよそ 25 M<sub>☉</sub>/年

を超えるような激しい星形成活動を引き起こす場所でもあるようです. この結果についての解釈は第6章で行うことにして、次章ではせっかく見つかった 15 μm 銀河について、もう少し詳しく見てみたいと思います.

## 5. 銀河団周縁部で高まる星形成活動?

私たちは今回見つかった 15 μm 銀河のなかで、特に興味深い2種類の銀河に注目してみました. 一つ目は可視光で赤い色をしている 15 μm 銀河です. 15 μm で検出されているということは星形成活動を盛んに行っているはずなので、これらはダストによる赤化を強く受けた「ダストで赤い」星形成銀河だと考えられます. 先ほどの図4には 15 μm 銀河の割合を赤い銀河・青い銀河に分けて計算した結果も示しています. もちろん青い銀河のほうが 15 μm で検出されやすいのは、そのほとんどが星形成銀河であるからにはほかなりません. しかし赤い銀河についてもいくらかの銀河は 15 μm で検出されていて、しかもその割合は先ほどから注目している中密度環境で高いかもしれないことがわかりました.

二つ目は、可視光での明るさに対して 15 μm での明るさがきわだって明るい銀河です. これは z'-15 μm という色を調べることで見つけます. z' バンド (静止系でおよそ 5,000 Å) の明るさはおよそ各銀河の星質量に、15 μm の明るさは星形成率に対応します. つまり z'-15 μm という色は各銀河の星形成率を星質量で割った量 (すなわち単位星質量あたりの星形成率, specific star formation rate と呼ばれる) に対応します. この z'-15 μm で大きな値をもつ銀河は、何らかの要因によって急激に星形成活動が活発化されたところなのかもしれません. おもしろいことに、この種類の銀河もここまでずっと注目してきた中密度環境に集中していることがわかったのです (図5左).

これら二つのタイプの銀河の空間分布はいずれ

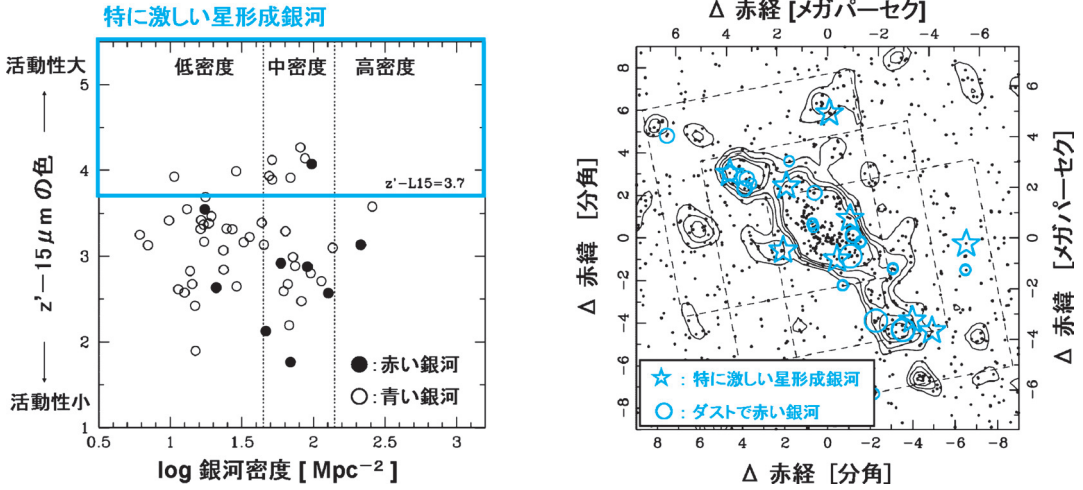


図5 (左) 銀河の活動性を表す  $z'-15\mu\text{m}$  の値と環境の関係.  $z'-15\mu\text{m} > 3.7$  のような大きな値の銀河はやはり中密度環境に集中している. (右) 「ダストで赤い」銀河の分布と, (左) で見つけた激しい星形成銀河の空間分布.

も似通っていて、銀河群、フィラメント、およびそのすぐ周囲を好んで存在していることがわかりました(図5右). 銀河群・フィラメントのような中密度環境は、ここで注目したようなやや特殊な星形成銀河をも誘発する環境であるようです.

## 6. 考えられるシナリオと次なる挑戦

私たちは、わが国の誇るすばる望遠鏡とあかり衛星の広視野撮像能力をフルに活用して、遠方銀河団の周囲を徹底的に調査しました. 今回の観測結果を総合して、この銀河団とその周辺で起きていることを考察してみたいと思います.

すばる望遠鏡による可視光の観測は、赤い銀河が銀河群・フィラメント程度の中密度環境で増え始めることから、中密度環境での星形成活動の「低下」を示唆しました. 一方で、あかり衛星による中間赤外線観測は同じく中密度環境でダストを伴う星形成銀河が多く存在する可能性を示し、こちらは星形成活動「上昇」の可能性を示唆します. 一見食い違う結果に思われるかもしれませんが、私たちは以下のように考えています.

低密度環境にいる青い星形成銀河は、銀河団や

銀河群の重力に引かれ、銀河群程度あるいは銀河団周辺の「中密度環境」に落ち込んだとき、銀河同士の重力相互作用や合体の可能性が高くなる. そしてひとたび銀河同士の相互作用や合体が起ると銀河の星形成率は一瞬膨れ上がりますが、しばらくすると星の材料となるガスを使い果たして星形成活動を終え、赤い銀河へと変わるのだと考えられます. 実際、強い赤外線放射を検出したいくつかの領域を見てみると、複数個の銀河が集まって小さなグループになっている箇所や、明らかに銀河同士が相互作用しているような場所も見受けられました(図3).

しかし、銀河の星形成活動を止めるのは、銀河同士の相互作用だけでは言い切れません. 激しい星形成を起こしている相互作用銀河が銀河団周辺に見つかったのは、これが少なくとも重要なプロセスの一つとして、銀河進化に関与していることを支持します. しかしたとえば、銀河団の中心付近での銀河団ガスによる銀河ガスのはぎ取りや<sup>10)</sup>、銀河群程度の環境ではたらく「銀河の窒息」のような効果もきっと起こっているはず<sup>11)</sup>.

現状では、銀河にとってどのプロセスがどの程

度重要なのか、きちんと知るにはまだ多くの情報が不足しています。たとえば、今回見つかったような銀河団付近の赤外線銀河が銀河内部のどこで星形成を起こしているのか（中心核集中か、広がっているか）、あるいはこれら激しい星形成銀河の候補と活動銀河核 (AGN) の関係、その他にも銀河団の個性の問題などが残されています。これら未解決問題の一部は、わが国の次世代の赤外線衛星プロジェクトである SPICA やその他の次世代観測装置につながるテーマでも考えています。また、今回私たちが調べたのはおよそ赤方偏移 1 の宇宙でしたが、これを赤方偏移 2, 3, ... とさかのぼっていくと銀河団はどのように見えるのか、という素朴な疑問もあります。私たちは冒頭で述べたような、「さまざまな時代のさまざまな環境を調べ尽くす」目標への第一歩を踏み出したところにすぎません。私たち銀河の環境学者は、さらにたくさんの時代の銀河団や銀河群をいろいろな側面から調べて、宇宙の歴史を完全に理解できる日を夢見て研究を続けているのです。

謝 辞

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、ESO の田中賢幸氏、JAXA の松原英雄氏、高木俊暢氏、和田武彦氏、大藪進喜氏、ソウル大学の Hyung Mok Lee 氏、Myugshin Im 氏とともに行ったものです。上記の皆さまには多くのことを教えていただき、また長時間の議論に付き合ってくださいました。深く感謝いたします。また、ハワイ大学の後藤友嗣氏からも多くのアドバイスをいただきました。筆者が援助をいただいている日本学術振興会にも感謝いたします。最後に、今回の執筆へお誘いくださ

った今西昌俊氏および執筆にあたりたいへんお世話になった天文月報編集委員会の皆さまに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) たとえば, Dressler A., 1980, ApJ 236, 351
- 2) たとえば, Boselli A., Gavazzi G., 2006, PASP 118, 517
- 3) たとえば, Kodama T., Smail I., Nakata F., Okamura S., Bower R.-G., 2001, ApJ 562, L9
- 4) Kodama T., et al., 2005, PASJ 57, 309
- 5) Koyama Y., et al., 2007, MNRAS 382, 1719
- 6) Tanaka M., et al., 2005, MNRAS 362, 268
- 7) たとえば, Wolf C., Gray M. E., Meisenheimer K., 2005, A&A 443, 435
- 8) Koyama Y., et al., 2008, MNRAS 391, 1758
- 9) たとえば, Takeuchi T. T. et al., 2005, A&A 432, 423
- 10) たとえば, Gunn J. E., Gott III J. R., 1972, ApJ 176, 1
- 11) たとえば, Kawata D., Mulchaey J. S., 2008, ApJ 672, L103

**Panoramic Observation of Distant Clusters of Galaxies with Subaru and AKARI**

Yusei KOYAMA

*Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo (JSPS fellowship DC1), 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: Properties of galaxies are strongly dependent on environment in which they live. However, it is still unclear why such a relation is present and how the relation was built up. To understand it, it is essential to directly investigate various environments in the past Universe. We report here a new result based on a wide-field and multi-wavelength observation of a distant galaxy cluster, as a synergy of Subaru and AKARI.