

# 見えない光で発見！ 96億年前の銀河団

田中賢幸

〈東京大学数物連携宇宙研究機構 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: masayuki.tanaka@ipmu.jp



すばる望遠鏡を使って、現在までに分光確認されている最も遠方の銀河団を、赤方偏移 1.62 に発見しました。これは X 線と近赤外線という、目に見えない光を用いた発見です。96 億年前という時代にもかかわらず赤い銀河が銀河団には多くいることがわかり、銀河の性質が銀河の住む場所による、という傾向はこの時代にすでにできあがっていたようです。この起源を理解するためには、さらなる遠方の銀河団を探する必要があります。さらに赤方偏移 2.15 の原始銀河団の研究を含めて簡単に紹介したいと思います。

## 1. 敵は天気のみならず

2009 年 12 月のことです。ハレポハクを出発し、山頂に向かう空は快晴でした。しかし、天気予報によると後半は多少雲が予想され、翌日もあまり期待できそうにありません。今日の前半夜が勝負だと思い、山頂に着いて準備を始めると、嫌な言葉が聞こえてきました。「副鏡が初期化できない。」前日まで FMOS のエンジニアリングがあって、その日に副鏡をつけたのですが、なぜか副鏡とコミュニケーションがとれないというのです。結局、通信ケーブルを地道に調べて接続を直し何とか修復してもらい、やっとのことで望遠鏡を空に向けましたが、2 時間足らずで湿度が上昇し、観測中断。結局、そこで一晩目は終わってしまいました。

二晩目。予報に反して、空は晴れていました。しかし、観測室に到着するとまた嫌なニュースが待っていました。「観測を実行する OS が動かない。」昼間に次世代 OS のテストをしていたとか。しばらく復旧作業が続きましたが、結局次世代 OS ベータ版で観測することに。そしてやっとの思いで、望遠鏡を空に向けて観測を始めたのでした。

私はとりわけ観測運が悪いらしく、悲しいことにこういったトラブルによく見舞われます。ただ実際問題、これでは観測屋としてはタイムリーな研究がしにくいわけで、あまりこの仕事は向いていないのではないかと思うことすらあります。研究に運は重要なのです。しかしそんな運の悪い私でも、この観測で最遠方の銀河団を発見しました。この発見自体が運だったか努力の結果だったかは…ともかくとして、そこに至る道のりを書き綴ってみたいと思います。

## 2. 銀河と大規模構造

宇宙の中で星は集団をなし、銀河を形作っています。銀河はさまざまな特徴をもちますが、銀河も時に集団をなし、銀河団を形作ります。この銀河団というのが本稿の話題なのですが、まずは銀河を詳しく見てみましょう。

大きく分けて、銀河には赤い色をした銀河と、青い色をした銀河があります。銀河はちりやガスから星を作る星の生産工場ですが、銀河の色はその星を作る活動に密接に関係しています。青い色は、その銀河の中に若い生まれたての星が多いことを示していて、銀河が現在活発に星を作っ

ていることを意味します。逆に赤い色は、銀河が長い間星を作ってなく若い星があまりないことを示しています。銀河の色と星形成活動の間にはこのような関係があります。

さて、2種類に大別できる銀河ですが、それぞれ宇宙の中で住み分けていることがわかっています。宇宙における銀河の分布はとても非一様で、蜘蛛の巣の糸のように銀河は分布しています。そして糸と糸の交差点に銀河の大集団である銀河団があります。このような分布のパターンは宇宙の大規模構造と呼ばれています。この巨大な構造をよく見てみると、銀河団のような宇宙の中で銀河が集まっている場所には、赤い銀河が多いことがわかります。一方、蜘蛛の巣の糸の中で一人ぼっちでいる銀河は、青い銀河が多いことが知られています。これは銀河の星形成活動が、銀河の住む場所によって大きく変わることを示しています。

しかしなぜ、住む場所が重要になるのでしょうか？ 答えはまだわかりません。この問いは銀河の形成・進化を理解するうえで一つの鍵になると言えます。そしてこれを解き明かす方法の一つとして、遠くの宇宙を調べることが考えられるでしょう。宇宙では遠くを見れば過去にさかのぼることができます。いつ、どのようにして銀河の色は住む場所に応じて変化するようになったのでしょうか？ 昔の銀河団には青い銀河が多かったのでしょうか？ それとも赤い銀河が始めからいたのでしょうか？

さて、ここから話を進める前に少し但し書きを。以下、赤方偏移を“ $z$ ”で表します。

### 3. $z=1$ の銀河団はすでに赤い

遠方銀河団の研究は今に始まったわけではなく、その歴史は古いといえます。しかし、私たちの理解が大きく進んだのは、1990年代にハッブル宇宙望遠鏡で行われた系統的な  $0.3 < z < 0.5$  にいる銀河団の研究によると言えるでしょう<sup>1)</sup>。さらに2000年代に入り、すばる望遠鏡をはじめとす

る近年の大望遠鏡の発達により、最近では  $z=1$  付近の遠方銀河団の様子が、詳細に調べられるようになってきました。これらの遠方銀河団のほとんどは X 線観測（次章で解説します）で見つかったもので、次章以降に述べる私たちの研究当時は、最遠方の銀河団は  $z=1.45$  にありました<sup>2)</sup>。

今日までの多くの観測で、これらの遠方銀河団の中にはすでに赤い銀河が多いことがわかってきました<sup>3)</sup>。  $z=1$  と言えば、およそ 80 億年前。そのような時期にすでに銀河団が赤い銀河で満たされていた、というのは驚くべきことです。銀河団にいる銀河は、非常に早い段階で星形成を止めて赤くなっていたことがうかがえます。しかし、一体いつ頃やめたのか、ということに関しては直接的なことはここからはわかりません。それには、より昔にさかのぼって銀河団を調べるしかないでしょう。これが、私たちの遠方銀河団探しの動機になりました。

## 4. 銀河団の探し方

さて、遠くの銀河団を見つけると意気込んでみたものの、実際どう探せばよいのでしょうか？ 見つけ方はいくつか考えられます。列挙してみましょう。

一つは X 線を使うことです。銀河団には高温のガスが大量に存在していて、それが X 線を放っています。X 線衛星を使って、大きく広がった X 線をとらえれば、それが銀河団起源である可能性が非常に高いです。ただ、遠くにいる銀河団からの X 線はとても弱いので、偽の天体が混ざらないように安全な解析をすると、遠方銀河団の検出は難しくなります。

もう一つは赤い銀河の集団を探すことです。銀河団には赤い銀河が多いと冒頭で説明しましたが、この事実を逆に使ってやるのが考えられます。つまり、赤い銀河の集団があればそれは銀河団である、と。しかし、この方法は可視光から近赤外光の深い画像データが必要になります。ま

た、赤い銀河を探すことで見つかる銀河団に、大きな偏りができることがあります。例えば、青い銀河しかない銀河団が仮にいたとすると、この方法では見つかりません。

ほかには銀河団の重力で光がわずかにゆがめられる、重力レンズ効果を使う方法があります。しかしながら、この方法は非常にシャープな画像でないと、遠方銀河団からの重力レンズ効果を検出することは難しく、遠方銀河団を探するうえではあまり現実的ではないと言わざるをえません。

最後に、Sunyaev-Zeldovich 効果を使うものもあります。宇宙背景放射が銀河団ガスによってエネルギー分布がゆがめられる効果を使うもので、詳細は省きますが遠方銀河団を探するうえで効率的な方法だと言えます。現在、この効果を使ったサーベイが行われていて、遠方銀河団が見つかりつつあります。

私たちは最初の二つの手法（X線と赤い銀河の検出）を組み合わせて用いることにしました。一つには、どちらの手法も現時点で確立された銀河団探しの手法であること。また、銀河団でもとりわけ遠方のものとなると、どちらか一方の手法ではゴミ（ノイズ）を拾ってしまうことが多く難しいのですが、二つを組み合わせることでそういったゴミを減らし検出限界まで挑める、というのも理由の一つです。

現在、世界中の大望遠鏡を用いて、いわゆる「ディープサーベイ」が多数行われていますが、私たちはそのデータを使って遠方銀河団を探すことにしました。それは、ディープサーベイではしばしばX線から、可視、さらには近赤外の深いデータがそろっていて、私たちの目的にぴったり合うからです。そのようなサーベイの一つである、すばる/XMM-Newton ディープフィールドで上の手法を用いることにより、 $z=1.6$  付近にいると思われるいくつかの銀河団候補を発見することができました。繰り返しになりますが、当時知られていた最遠方銀河団は $z=1.45$  がありました。

さて次は、私たちの見つけた候補が本物の銀河団であることを証明しなければいけません。それには分光観測をして銀河までの距離を測り、銀河が同じ距離に集まっていることを確認する必要があります。

## 5. $z=1.62$ 銀河団の発見

一般に人間の目を感じることのできる光は、光の波長でおおよそ 4,000 から 7,000 Å 程度であると言われていています。それより波長の短い光も長い光も人間には見えません。しかし宇宙は膨張していることから、より遠くの宇宙からの光は、地球に届くまでの間に波長が長くなります。赤方偏移という効果です。そのため、当時の宇宙での可視光に対応する光を調べるには、より長波長の光で地球から観測する必要があります。 $z=1.6$  の場合はそれが近赤外光になります。すばるの誇る近赤外分光器 MOIRCS は、まさにその近赤外線でも複数の天体までの距離を一度に測れる分光装置で、

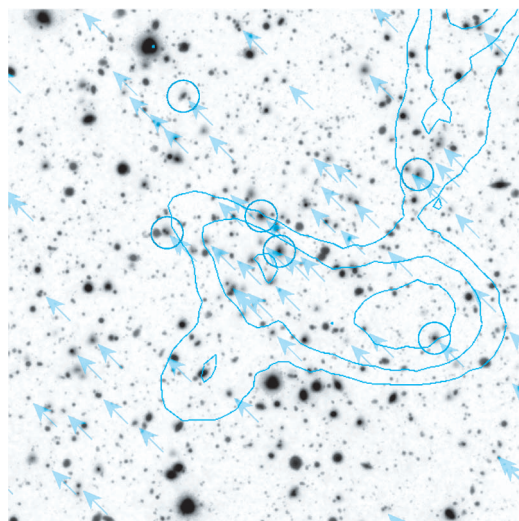


図1 銀河団周辺の画像。矢印で銀河の色から選んだ、銀河団周辺にいたおぼしき銀河を、そして丸で分光確認したメンバー銀河を示しています。等高線がX線強度を表します。この絵が印刷でどこまでできるか自信がないですが、元はカラーなので論文も参照ください。

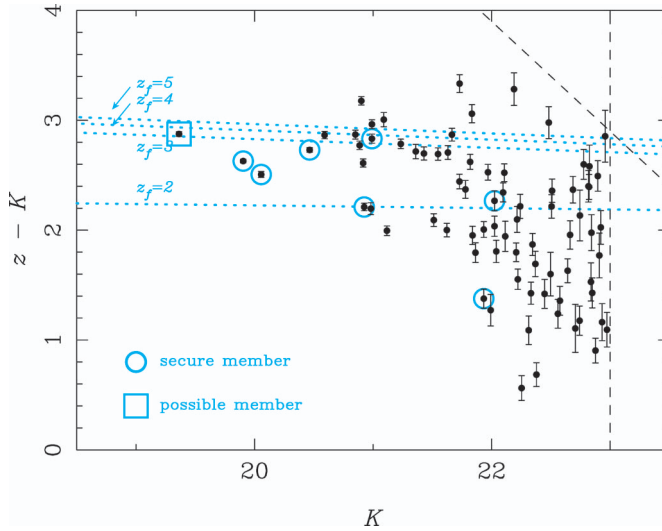


図2  $z=1.62$  銀河団の色等級図. 銀河のさまざまな波長の色を使って、 $z=1.62$  いるとおぼしき銀河を描いています. 大きな丸で分光確認された確実な銀河団メンバー、大きな四角で分光観測がなされ、確実ではないがメンバーの可能性のある天体を示しています. 点線が色等級関係（赤い銀河のなす色と明るさの相関. 同じ赤い銀河でも、より重く明るい銀河ほど少しだけより赤いという相関）のモデルで、上から銀河が  $z=5, 4, 3, 2$  にできたと仮定した場合の関係を表しています. 明るい銀河はほとんど、 $z=3-4$  付近の赤い色をしています.

私たちの見つけた銀河団候補を確認するには絶好の観測装置となります.

このような流れで冒頭で触れた観測が行われました. 決して順調とはいえなかった観測でしたが、それでも何とかデータを得ることができました. 持ち帰ったデータを解析してみると、一つの銀河団候補の周りに予想された赤方偏移とほぼ同じ  $z=1.62$  に複数個の銀河を確認しました. 図1にその分布を示します. とりわけ明るい銀河では、吸収線から赤方偏移を測ったり、年齢等の物理量を出すことができました. これは今までは可視光の分光器で、より近傍の銀河に対してのみできたことでした. 近赤外分光観測でこのような赤方偏移にいる銀河の静止系可視光をとらえ、銀河の性質を詳細に調べることができることを、MOIRCSは見事に示したのです. 近赤外分光による銀河団研究の幕開けです.

さて、こうして確認された銀河団を調べてみると、実はこれは分光確認の前にすでに予想がつい

ていたことなのですが、赤い銀河が銀河団には多いことがわかりました. 図2に銀河の色等級図を示します.  $K$  バンド（中心波長は  $2.2 \mu\text{m}$ ）がおおよそ銀河の星質量の指標だと思えば（つまり  $K_s$  バンドで明るいほど、より星を多くもった重い銀河ということ）、星質量の重い銀河はほとんど赤い銀河であることがわかります. 青い銀河も見られますが、その多くは小質量の銀河で、かつそれらの一部は銀河団メンバーではない可能性が高いと思っています. つまり、96億年前 ( $z=1.62$ ) という時代ですでに、銀河団には巨大な赤い銀河が多くいたようです.

赤い銀河がいつ銀河団にはびこるようになったのかを調べるために始めたこの遠方銀河団探査ですが、どうやら今回の結果から  $z=1.62$  よりもさらに遠方に行かなければいけないことがわかりました. 残念というか、まだ仕事が残ったのでほっとしたというか、複雑な気分です.

ところで、同じ銀河団を全く独立に可視分光観

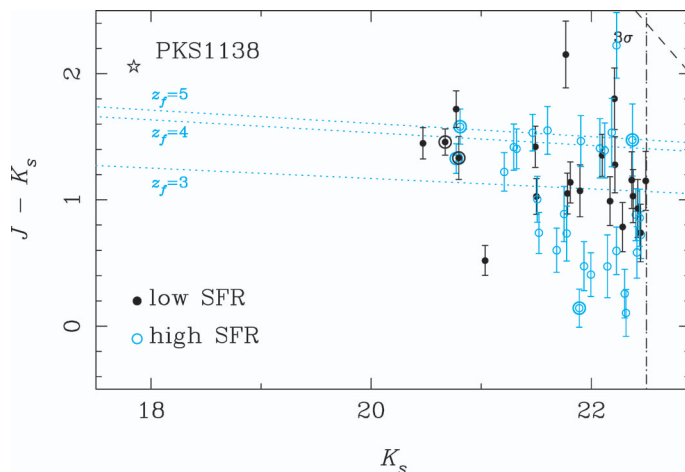


図3  $z=2.15$  の原始銀河団の色等級関係. ここでは  $z=2.15$  にいるとおぼしき銀河を選んでいて, 点線がモデルの色等級関係です. 銀河団中心には電波銀河がいることが知られているのですが, それは左上の星印です. 黒と青で星形成活動の弱い銀河, 強い銀河をそれぞれ表していて, 二重丸はすでに確認されている銀河団メンバーです.  $20 < K_s < 21$  に明るい赤い銀河が集まっていますが, この半分は割と活発に星を作っていて残りは作っていません.

測をした研究も報告されています<sup>5)</sup>. ここでは特に述べないでおこうと思います. 興味のある方はそちらの論文もご覧ください.

## 6. 卵が先か, 鶏が先か

この発見を IPMU 発でプレスリリースしたときのことです. とある記者の方が電話取材で, 赤い銀河が集団化して銀河団をなしたのか, それとも集団化してから銀河が赤くなったのか, という質問をされました. 思わずとてもいい質問だと感心してしまいましたが, 卵が先か, 鶏が先か, と一見似た問題かもしれません. さて, どちらでしょう?

実は, 今回発見した銀河団よりも遠くの  $z=2.15$  に, 「原始銀河団」と呼ばれているものがあります. 分光で確認されたメンバー銀河は 20 個を超えているのですが, 重力で束縛された本物の銀河団であるかどうかは, いまだはっきりしていません. 非常に定義があいまいなこの原始銀河団ですが, 世間でまことしやかにささやかれている多くの原始銀河団の中で, この  $z=2.15$  のものは最

も確からしいものと言えるでしょう. 私たちはこれを詳しく調べてみました<sup>6)</sup>.

図3にこの原始銀河団の色等級図を示します. ここでは紫外光から赤外光までの多くのデータを用いて, 銀河の星形成活動の活発さをおおまかに見積もっています. 図から, 明るく赤い銀河が  $z=2.15$  においてすでいくつか存在していたことがわかります. 詳しくは論文に示しましたが, このような銀河は銀河団の外の一般のフィールドにはほとんどいません. 面白いことに, この明るくて赤い銀河のおよそ半数は, 割と活発に星を作っていて, 残りの半分は星を作っていません. より近傍の銀河団では, 明るく赤い銀河はほとんど星を作っていないので, これは銀河団では初めて見られた傾向です. もしかしたら, 巨大銀河が赤くなりつつある現場を見ているのかもしれませんが.

この原始銀河団はできたばかりか, できかけである可能性があります. 今回の研究結果は, そのような若い銀河団で赤くなっていった銀河がいたことを示唆しているのかもしれませんが. 卵が先か, 鶏が先か. もしかしたら答えはその中間で,

集団化していく過程で赤くなっていった銀河が多くいたようにも思えます。しかし今のところは、原始銀河団一つを調べただけで、結論まではほど遠い状況です。確実な証拠を得るには、もっと多くの銀河団を調べる必要があるでしょう。

## 7. ま と め

宇宙における赤い銀河と青い銀河の住み分けの起源を調べるうえで、遠くの銀河団を調べるといのは有効な手法の一つです。今までに知られていた  $z=1.45$  の最遠方の銀河団でさえ、赤い銀河が多いことがわかっていました。そこで、私たちはそれを超えるもっと遠くの銀河団を探しました。苦しい観測の末、MOIRCS による分光観測から  $z=1.62$  に銀河団を発見しました。しかし、そこでもすでに赤い銀河が多かったのです。

そこでさらに遠方の  $z=2.15$  の原始銀河団を調べると、赤い銀河と青い銀河が共存している姿が浮かび上がりました。銀河が集団化して銀河団を形成する過程で、赤くなっていった銀河が多かったことを示唆しているのかもしれませんが、でも、もう少し多くの遠方銀河団を調べないと結論がでないことです。

去年だったか、鶏については、しばらく前に生物学者が「卵が先」と明快な説明をしてくれました。一般に受け入れられている結論かは知りませんが、説得力のある説明でした。銀河の場合はまだまだ結論が出そうにありません。先日上野で食

べたおいしい親子丼を思い出しつつ、このあたりで終わりにしたいと思います。

## 参 考 文 献

- 1) Dressler A., et al., 1997, ApJ 490, 577
- 2) Stanford S. A., et al., 2006, ApJL 646, L13
- 3) Mei S., et al., 2009, ApJ 690, 42
- 4) Tanaka M., Finoguenov A., Ueda Y., 2010, ApJL 716, L152
- 5) Papovich C., et al., 2010, ApJ 716, 1503
- 6) Tanaka M., De Breuck C., Venemans B., Kurk J., 2010, A&A 518, 18

### A Spectroscopically Confirmed Galaxy Cluster at $z=1.62$ and a Proto-cluster at $z=2.15$

Masayuki TANAKA

*Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8583, Japan*

**Abstract:** We discover the most distant cluster of galaxies at  $z=1.62$  using invisible light to our eyes—X-ray and near-infrared. The cluster hosts massive red galaxies, suggesting that the environmental dependence of galaxy properties was already, at least partly, in place at this high redshift. A close look at a (proto-)cluster at higher redshift,  $z=2.15$ , suggests that the massive cluster galaxies are becoming red in the (proto-)cluster. The environmental dependence might have been imprinted at the time of cluster formation.