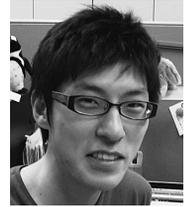


127億光年かなたの原始銀河団

利川 潤

〈総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻 〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: jun.toshikawa@nao.ac.jp



すばる望遠鏡Suprime-Camの広視野観測により、私たちは127億2,000万年前の宇宙にある原始銀河団をすばる深宇宙探査領域において発見しました。平均的な数密度に比べ5倍以上の高密度であり、分光追観測からもはっきりと銀河が密集していることを明らかにしました。銀河団銀河のいくつかの性質について、孤立銀河と比較してみても有意な違いを見つけることはできませんでした。また特徴的な3次元構造をもっており、銀河団形成の初期段階についていくつかの示唆を得ることができました。今回発見された原始銀河団は、これまで見つかったなかで最も遠いものであり、銀河団の誕生を理解するためにも重要な手がかりになると期待できます。

1. はじめに

銀河は宇宙のなかでどのように分布しているのでしょうか？ 宇宙全体に均質に分布しているのでしょうか、それとも疎密に富んだ複雑な分布をしているのでしょうか？ 近傍の宇宙の観測から、銀河は一様に分布しているのではなく、銀河の数密度が低いところや高いところなどさまざまな領域があることがわかっています¹⁾。そして宇宙のなかでも、格段に数密度の高い領域が銀河団と呼ばれ、100個から1,000個を超えるほどの明るい銀河が密集しています。さらに銀河団はお互いに結びつき合い、まるでクモの巣のような宇宙の大規模構造を形作っています。この宇宙の大規模構造のなかでフィラメントの結合点のような特別な場所に銀河団は存在しています。しかし、宇宙の誕生の時点では物質の分布はほぼ一様であったと考えられています。では一体どのようにして、現在の宇宙で見られるような起伏に富んだ宇宙の構造が形成されてきたのでしょうか。宇宙初期の物質の分布は、ほぼ一様からほんのわずかながら凸凹がありました、そしてその小さな密度分

布の偏りが137億年もの宇宙の歴史のなかで、重力によりしだいに大きくなったと考えられています。その結果、一様とはほど遠い宇宙の大規模構造が形成されてきたと考えられています²⁾。

さらに銀河団は、ただ単に非常に多くの銀河が狭い領域に集中しているだけではありません。銀河団に含まれる銀河は銀河団に含まれない孤立した銀河と比べると、銀河の性質に大きな違いをもっています。銀河団銀河は一般的に重く、赤く、年老いた銀河が多いことが知られています。このことから銀河団のような高密度な領域に存在するのか、それとも低密度な環境に存在するのか、つまり銀河がどのような環境に存在するのかにより銀河進化は大きく異なると考えられています³⁾。

このように現在の宇宙では、銀河団は宇宙の大規模構造と銀河進化に密接なかわりをもっています。銀河団がどのように形成されてきたのかを研究することは、宇宙の大規模構造の形成や銀河進化という大きな謎の解明につながっていくと期待できます。そしてそのためには近傍の宇宙で見られるような完成した銀河団を調べるだけでな

く、銀河団へと形成しつつある現場としての原始銀河団を直接調べることも重要になります。銀河団は重力で束縛された最も巨大な天体であり、その形成には宇宙年齢に匹敵するほど時間が必要となります。そのため原始銀河団を見つけるためには、遠方宇宙において銀河の数密度が高い領域を探さなければいけません。

2. 原始銀河団の探し方

2.1 これまでの研究とその問題点

銀河団形成の解明のためにも、まずは原始銀河団の発見が不可欠となります。しかし銀河団は非常に高密度な領域なので、その宇宙における数密度は小さく非常にまれな天体です。理論的な推測によると、現在の宇宙では宇宙全体の質量のうちおよそ3割が銀河団の中に存在しているにもかかわらず、宇宙における銀河団の占める体積の割合はたった0.4%であると考えられています⁴⁾。遠方宇宙での形成途中の原始銀河団となると、さらにまれな天体となります。例えば、127億年前の宇宙では、およそ数平方度以上の天域を探索して初めて一つの高密度領域が見つかると考えられています⁵⁾。これは現在の大型望遠鏡の視野をはるかに超えた広さであり、原始銀河団の発見は非常に困難なものになります。そこで多くの研究では、電波銀河やクエーサーといった非常に明るい天体を目印に使い原始銀河団の探索を行っています。電波銀河やクエーサーは非常に重い天体であり、したがってこのような大質量天体の周囲には原始銀河団があっても不思議ではありません。例えばハッブル宇宙望遠鏡は遠くの銀河まで見つけ出すことはできますが、視野が狭いために原始銀河団のようなまれな天体の発見は難しいと考えられています。目印を使うことで高密度領域をピンポイントで探索できます。このように電波銀河やクエーサーを目印として使い、その天体の周辺をより詳細に観測することで、多くの原始銀河団が発見されてきました^{6),7)}。

確かにこの方法を使えば効率良く原始銀河団を発見することが可能になります。赤方偏移3を超えると原始銀河団の実際の発見例のほとんどは、この方法によるものです。しかし、この方法によって発見された原始銀河団を調べるだけでは、原始銀河団の姿を正しくとらえることができない可能性があり、銀河団形成について誤った結論を下してしまう恐れがあります。なぜなら目印を使うことにより、原始銀河団のなかでもある特定の性質をもった原始銀河団のみを選び出してしまい、そこから得られた結果を一般的な原始銀河団の性質と勘違いしてしまう恐れがあるからです。理論的な研究によると電波銀河やクエーサーのような非常に重い天体は、確かに高密度領域において形成されると考えられています。しかし、それと同時にクエーサーなどからの非常に強い放射は周辺での銀河形成を抑制する効果もあります⁸⁾。これにより物質の密度が高い領域にもかかわらず、銀河の数密度は低く銀河団の形成を阻害する、または遅らせる効果が働いてしまう可能性があります。また電波銀河やクエーサーは常に明るく輝いているのではなく、銀河進化のなかのある特定の時期においてのみ輝いていると考えられています。どのようなきっかけで明るく輝き始め、そしてどのように輝き終わるのかということもまだ解明されていません。したがって、このような天体を目印に使うことで、銀河団形成の中のある一時期の原始銀河団を選び出してくる可能性があります。このような理由から、銀河団形成を正しく理解するためには、目印を使わず原始銀河団を見つけて出すという、相補的な研究も不可欠です。

2.2 すばる広視野観測による原始銀河団探索

すでに述べたとおり、原始銀河団の発見には遠くの暗い銀河を見つけて出さなければならないことに加えて、非常にまれな領域を探し出さなければならない、という二つの困難があります。この二つの問題点のうち、まれな天体であることが原始銀河団の発見では特に大きな問題となります。こ

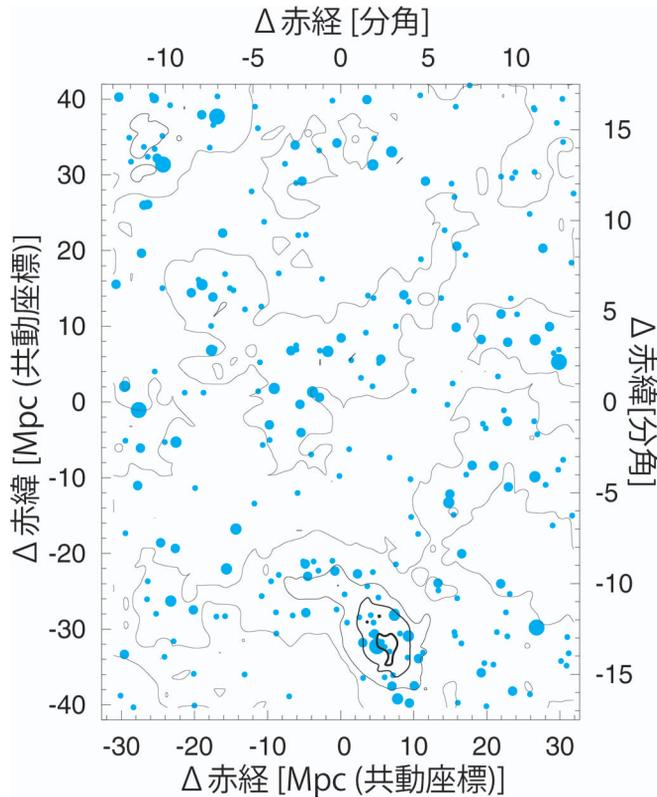


図1 SDFにおける赤方偏移6の銀河の分布。大きい丸ほど明るい銀河を表します。等高線は銀河の個数密度に基づいて描かれています。最も細い線が平均密度を表し、最も太い線が平均から5倍の密度超過を表しています。画像下側に銀河が集中している領域があることに気がつきます。

のようなまれな天体を目印を用いずに見つけ出すためには、ただひたすら広く宇宙を観測し探索しなければなりません。そこで、私たちはすばる望遠鏡の広視野観測を活用し、原始銀河団を探しました。すばる望遠鏡は口径8 mの主鏡に加え、Suprime-Camと呼ばれる主焦点カメラにより約30分角の広視野観測を行うことができます。例えば遠方銀河の発見で有名なハッブル宇宙望遠鏡の観測装置ACSと視野の大きさを比較すると、すばる望遠鏡はおよそ80倍も広い視野をもっています。そして現在、大型望遠鏡でありながらも、主焦点にカメラを搭載でき、広視野観測を行うことができるのはすばる望遠鏡のみです。大口径と広視野という二つの特長を兼ね備えているすばる望遠鏡だからこそ、目印を使わずに遠くまで

れな原始銀河団を見つけ出す可能性が非常に高くなります。そしてこのような原始銀河団の発見を積み重ねていき、目印を用いる方法によって発見された原始銀河団との比較を行うことで原始銀河団のより普遍的な性質を知ることができるようになると期待できます。

3. 最遠方原始銀河団の発見

私たちは長い銀河団形成の歴史のなかでも、特に銀河の集団ができ始める最初の段階、つまり原始銀河団の誕生に焦点を当てました。原始銀河団の誕生に迫るためには、宇宙の歴史において非常に初期の時代における原始銀河団の発見が必要です。初期宇宙での原始銀河団の発見はますます難しくなると予想されますが、すばる深宇宙探索領

域 (Subaru Deep Field; SDF) において、私たちは幸運にも目印を使わずに赤方偏移6.01, つまり127億2,000万年前の宇宙から原始銀河団の発見に成功しました。SDFにおいて発見されたこの原始銀河団は、現在、見つかったなかでは最も遠い原始銀河団になり原始銀河団の誕生に迫るための重要な手がかりになると考えられます。

それではどのようにこの原始銀河団が発見されたのか詳しく見ていきたいと思えます。まずSDFとはすばる望遠鏡が重点的に観測している天域の一つであり、Suprime-Camにより2001年から10年近くも繰り返し何度も観測が行われている天域です。その結果、広視野というだけではなく、地上望遠鏡からは限界に近いほどの暗い天体まで、つまり非常に遠方の銀河まで見つけ出すことができる天域です*1。私たちはSDFの多色の深い撮像データを用いて、ライマン・ブレイク法^{9), 10)}という手法によっておよそ赤方偏移が6の銀河を数多く見つけ出すことができました。赤方偏移6はおよそ127億年前の宇宙に対応し、宇宙年齢がまだ10億年にも達しないような非常に初期の宇

宙です。SDFにおいて見つけ出された258個のおよそ赤方偏移6の銀河の天球面上での分布を調べてみると、図1の下側に銀河が密集した領域があることがわかりました。

この銀河の分布を見るだけでも明らかですが、定量的に評価するために局所的な表面数密度を求めました。SDFでの平均の表面数密度と比較して、図1の下側の銀河の密集した領域は5倍以上の高密度領域でした。また数密度が平均の3倍以上高い領域はおよそ6分角×6分角 (14 Mpc×14 Mpc, 共動座標) 程度の広がりを持ち、30個もの赤方偏移6の銀河がその領域に含まれていました。このようにしてすばる望遠鏡Suprime-Camの広視野観測を用いることで、電波銀河やクエーサーといった目印を用いることなく、高密度領域を見つけ出すことができました。

しかし、この高密度領域は原始銀河団であると断定することはまだできません。なぜなら、ライマン・ブレイク法によって確かに遠方の銀河を選び出してくることはできるものの、その銀河までの視線方向の距離、つまり赤方偏移には大きな不定性が残っており、天球面上だけでなく赤方偏移も含め、3次的に銀河が集中していることを確かめなければなりません。視線方向の距離については、主にすばる望遠鏡の観測装置FOCASを用いて正確に測定しました。分光観測の結果、15天体の視線方向の距離を正確に決めることができ、そのうち半分以上の8天体の赤方偏移の値が非常に近く ($\Delta z < 0.05$), 距離に直すと18 Mpc (共動座標) 以内の距離に集中していることが確かめられました (図2)。図2のヒストグラムは観測から得られたこの領域における銀河の赤方偏移分布を表します。曲線は原始銀河団のような銀河の集団が存在せず、赤方偏移方向について銀河が一様に分布している場合に期待される赤方偏移分布を表します。図2から明らかなようにヒスト

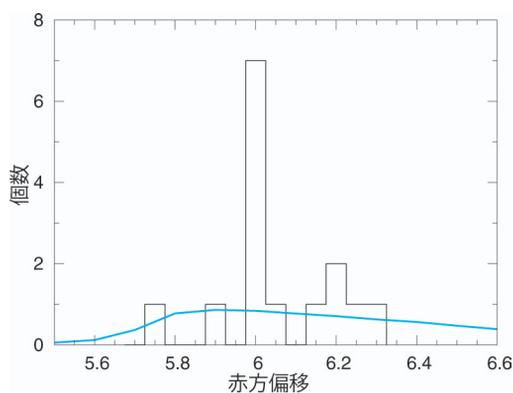


図2 分光観測により距離を決定できた15天体の赤方偏移分布。曲線は原始銀河団のような銀河の集団が存在せず、赤方偏移方向について銀河が一様に分布している場合に期待される赤方偏移分布を表します。

*1 積分時間は合計30時間にもなり、 z バンドの3 σ 限界等級は27.1等になります。

グラムと曲線は全く異なる分布をしています。15天体が赤方偏移方向について一様分布をしている場合、赤方偏移 6.0 ± 0.025 の銀河はおよそ1天体しか存在しないと予想されるのに対して、この領域では赤方偏移 6.0 ± 0.025 の銀河が7天体も見つかっています。この結果、銀河は3次的にも非常に強く密集しており、たまたまここに銀河が集まっているだけだと到底考えられません。このことから、発見された銀河の集まりが127億2,000万年前に存在した、現在発見されているなかで最も遠い原始銀河団であるということが明らかになりました。

4. 発見の次に

4.1 原始銀河団銀河の性質

今回発見された原始銀河団に含まれる銀河と同時代の孤立した銀河について、星形成の活発性の指標となりうる紫外線光度やライマンアルファ光度などについて比較を行いました。まだ十分な数のサンプルがないために、不定性が残っているものの、127億年前の宇宙では高密度領域の銀河と低密度領域の銀河ではそれら性質について大きな違いを見つけることができませんでした。このことから現在の宇宙で見られるような銀河団銀河と孤立銀河の性質の違いは、初期宇宙ですで見られるものではなく銀河団形成の過程で後天的に得られるのではないかと推測できます。しかし今回の観測からでは、銀河のもつさまざまな性質のうちほんの一部の性質しか調べることができませんでした。今後のさらなる観測により、その他の性質も比較することによって銀河団形成の初期段階においては高密度領域の銀河と低密度領域の銀河の間に性質の違いが、初期段階から見られないのかどうかをはっきりさせたいと考えています。また銀河団形成の初期段階において、ある性質については銀河団銀河と孤立銀河の間に違いがなく、別の性質については違いがすでにあるなど、より詳細な比較ができるようになれば、銀河団形成と

銀河進化の関連についても重要な示唆を得ることができると期待できます¹¹⁾。

4.2 原始銀河団の構造

次に私たちは原始銀河団銀河の赤方偏移を正確に多数決めることができたことから、原始銀河団の構造も調べました。8天体の原始銀河団銀河の赤方偏移を使い、速度分散を求めた結果 647 km s^{-1} となり、理論予測に比べておよそ3倍も大きな値となりました。またビリアル平衡を仮定して、速度分散から原始銀河団の質量を見積もるとおよそ 3×10^{14} 太陽質量となり、この値は現在の銀河団と同程度の質量です。127億年前の宇宙ですでにこのような大質量の天体が存在する場合、現在の宇宙ではおよそ 5×10^{15} 太陽質量にまで成長すると予想できます。しかし、このような巨大な天体が127億年前の宇宙で見つかるとは考えにくいです。原始銀河団はまだ形成途中の段階であるために、平衡状態であるという仮定がそもそも成り立っていないと考えられ、速度分散も理論予想より3倍も大きな値を示しています。では

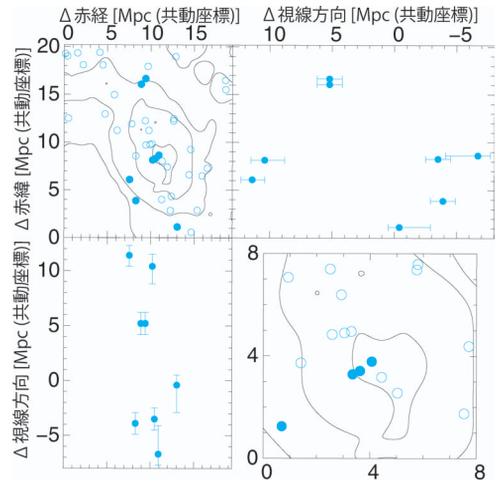


図3 原始銀河団領域の3次元分布。青丸は分光観測により原始銀河団銀河であると確かめられた銀河を表します。白丸は正確な赤方偏移がまだ決定されていない銀河を表します。等高線は図1と同様に個数密度に基づいて描かれています。

なぜこのような大きな値になったのでしょうか？
 原始銀河団銀河の赤方偏移の違いは視線速度の違いであると考えられますが、距離の違いであるとも考えることができます。

そこで赤方偏移の違いを距離の違いと考えた場合に、原始銀河団銀河の3次元的にどのように分布しているのかを調べました。図3を見ると8天体はまるで中心を外すように分布しているように見え、この原始銀河団は何らかの内部構造をもっている可能性があります。ここで注意しなければいけない点の一つがあります。それは分光観測を行うことで、すべての銀河の赤方偏移を正確に決めることができるとは限らないという点です。撮像データから選び出されてきたおよそ赤方偏移6の銀河は暗いため、基本的には分光観測により赤方偏移を決めることは非常に難しいです。しかしライマン・ブレイク法で選び出された銀河のうち、いくつかの銀河はライマンアルファの強い輝線をもっており¹²⁾、この輝線を分光観測によりとらえることで赤方偏移を決めることができます。したがって、ライマンアルファ輝線をもたない銀河は、たとえ原始銀河団銀河であったとしても、その赤方偏移を決めることができないため、原始銀河団銀河かどうかの判断ができません。図3の白丸は強いライマンアルファ輝線をもっておらず、まだ原始銀河団銀河かどうか確かめられていない銀河を表します。これらの銀河が実際には

どこにいるのかで、すでにわかっている原始銀河団銀河の分布に対する解釈は大きく異なってきます。以下に二つの極端な解釈を述べます。

一つ目は、距離を決めることができなかった銀河は実際には原始銀河団銀河であり、例えば図4のように分布しているという場合です。この場合では強いライマンアルファ輝線をもつ銀河は外側に、ライマンアルファ輝線をもたない、もしくは弱い銀河は内側にどのように分布しています。その結果、原始銀河団でも外側の銀河のみを選び出してきて、その速度分散を求めてしまったために、速度分散の値を大きく見積もってしまった可能性があります。またほかの研究からライマンアルファ輝線をもつ銀河はもたない銀河に比べると、概して若く軽い銀河であることが示唆されています。これらのことから原始銀河団の中心にはライマンアルファ輝線の弱い、比較的成長している銀河が分布し、外側にはライマンアルファ輝線の強い、若い銀河が分布しているとも考えることができます。つまり、127億年前の宇宙において、すでに原始銀河団内での銀河の位置と銀河の性質に関係が現れ始めていると推測することができます。宇宙年齢が10億年にも達しないことを考慮すると、銀河団形成の始まりの時点から環境効果が働いているのでは、という考えをもつことができます。

二つ目は、赤方偏移を決めることができなかった

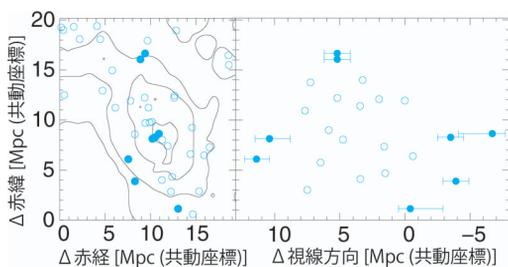


図4 一つ目の解釈に対する3次元分布。赤方偏移を決定できていない銀河（白丸）が、右の図のように分布していた場合、すでにある程度形成された原始銀河団のように見えます。

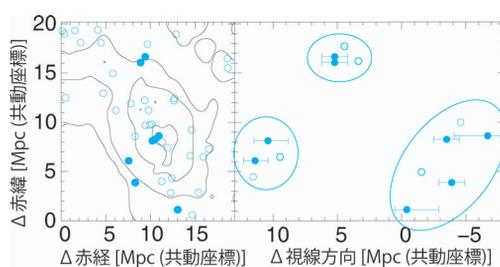


図5 二つ目の解釈に対する3次元分布。赤方偏移を決定できていない銀河（白丸）が、右の図のように分布していた場合、サブグループがあるように見えます。

た天体のほとんどは原始銀河団銀河ではなく、原始銀河団の手前もしくは奥に存在しているという場合です。この場合では、この原始銀河団は図5のように、さらにいくつかの小さなサブグループに分けることができます。サブグループが合体に向かっている仮定であるために、速度分散を大きく見積もってしまった可能性があります。そしてこれらのサブグループは合体を繰り返していくことで、大きな銀河団へと成長していくのではないかと考えることができます。ほかの原始銀河団でもサブグループから構成されている例は見つかっています¹³⁾。この解釈では、銀河団形成の最初の段階であり、銀河の集積がまさに始まろうとするところを見ているのではないかと考えることができます。

このように極端ではあるものの3次元分布から2通りの解釈をすることができます。一つはある程度形成の進んだ原始銀河団で、環境効果がすでに現れ始めている、という解釈です。もう一つはサブグループの合体・集積がこれからまさに行われる、銀河団形成の最初ではないか、という解釈です。これら二つの解釈はお互いに排他的なものではなく、二つの効果が働きながら銀河団形成は進んでいくと考えられますが、宇宙年齢がまだ10億年にも達していない時代に発見された原始銀河団ではどちらの効果がより大きいのかを、今後の研究で明らかにすることは銀河団形成を理解するうえでも非常に重要です。最後に、原始銀河団の内部構造の議論ではライマンアルファ輝線から決めた赤方偏移を用いて議論を行っており、銀河のアウトフローなどの効果によりライマンアルファ輝線の位置はずれるため¹⁴⁾、原始銀河団の内部構造についてまで議論するには無視できない不定性があることを注意しておきます。

4.3 さらに外側の構造

これまでの多くの研究とは違い、今回の原始銀河団は広視野観測により発見することができました。したがって、原始銀河団のさらに外側の構造

がどのようになっているのかについても調べることができます。現段階ではまだ分光観測による赤方偏移の決定ができていないために、推測の域を出ないものの、図1の銀河の分布に基づく、表面数密度の超過は2-3倍程度ではありますが、原始銀河団から左上に向かって伸びた構造があるように見えます。近傍の宇宙ではフィラメント状の宇宙の大規模構造においてフィラメントの結合点のような位置に銀河団が存在していることは明らかにされており、127億年前の宇宙においてもそのフィラメント構造を思わせるような銀河の分布が見つかりました。原始銀河団と大規模構造の関連を調べるためには、分光観測をさらに広範囲にわたって大規模に行う必要がありますが、広視野観測によりただ単にまれな天体が発見できるだけでなく、大規模構造との関連のような大きなスケールの銀河の分布まで調べることができるのです。

5. おわりに

私たちはすばる望遠鏡Suprime-Camによる広視野観測から127億年前の宇宙において高密度領域を見つけ出し、それに続く分光追観測によりその高密度領域には、原始銀河団が存在することを突き止めました。さらに原始銀河団に含まれる銀河の性質について、あるいは原始銀河団の構造などについても議論を進め、銀河団形成の初期段階がどのように進むのかについて、いくつかの示唆を得ることができました。この最遠方原始銀河団をより詳しく調べることで、銀河団形成の初期段階について理解を進めることができると期待しています。

そして私たちにはもう一つ重要な課題が残されています。それは銀河団形成の一般的な理解を行うためにも、今回発見された原始銀河団は127億年前の宇宙のなかでも平均的な原始銀河団なのか、それとも原始銀河団のなかでも特異なものであるのかを明らかにすることです。また電波銀河

やクエーサーを目印として使い、発見された原始銀河団との性質や構造の比較も行う必要があります。これらについてはさらに原始銀河団探査を進めていき、原始銀河団のサンプル数を増やしていく必要があります。すばる望遠鏡にはパワーアップした主焦点カメラ Hyper Suprime Camera が搭載されることで、さらに7倍の広さの広視野観測が可能になります。新しい装置を活用していくことで、まれな天体であるにもかかわらず多数のサンプルを得ることができ、原始銀河団の共通の性質または個性、つまり銀河団形成の理解につながっていくと期待できます。

謝 辞

本研究¹⁵⁾は柏川伸成氏、太田一陽氏、諸隈智貴氏、澁谷隆俊氏、林 将央氏、長尾 透氏、Linhua Jiang 氏、Matthew A. Malkan 氏、江上英一氏、嶋作一大氏、本原顕太郎氏、石崎剛史氏とともに行ったものです。上記の皆さまをはじめ、多くの方々からさまざまな助言をいただき、また長時間の議論に付き合ってくださいました。また、本稿を執筆するにあたりお世話になりました天文月報編集委員会の皆さまに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば Tegmark M., et al., 2004, ApJ 606, 702
- 2) Springel V., et al., 2005, Nature 435, 629

- 3) 例えば Dressler A., 1980, ApJ 236, 351
- 4) Aragón-Calvo M. A., et al., 2010, MNRAS 408, 2163
- 5) Overzier R. A., et al., 2009, MNRAS 394, 577
- 6) Miley G., De Breuck C., 2008, A&AR 15, 67
- 7) Venemans B. P., et al., 2007, A&A 461, 823
- 8) Barkana R., Loeb A., 1999, ApJ 523, 54
- 9) Madau P., 1995, ApJ 441, 18
- 10) Steidel C. C., et al., 2003, ApJ 592, 728
- 11) Hatch N. A., et al., 2011, MNRAS 415, 2993
- 12) Stark D. P., et al., 2011, ApJ 728, L2
- 13) Kuiper E., et al., 2011, MNRAS 415, 2245
- 14) Shapley A. E., et al., 2003, ApJ 588, 65
- 15) Toshikawa J., et al., 2012, ApJ 750, 137

A Protocluster at $z=6$

Jun TOSHIKAWA

Department of Astronomical Science, School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: We report the discovery of a protocluster at $z=6$ with a spectroscopic confirmation in the wide-field image of the Subaru Deep Field. The overdensity of the protocluster is five times higher than the average. We found no significant difference in the observed properties between the protocluster members and nonmembers. The protocluster has a distinguishing three-dimensional distribution of member galaxies, and we discuss two explanations for this distribution in the early phase of cluster formation.