

多数の原始銀河団を発見

柏川伸成

特集：すばる ハイパー・シュプリーム・カム

すばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam (HSC)は、約120億光年^{*1}かなたの宇宙に、銀河団の祖先「原始銀河団」を200個近く発見した。これは従来の10倍にもなる発見数だ。これらの原始銀河団の質量を測定した結果、この時代としては非常に大きな質量の天体であることがわかり、その後成長して現在の銀河団になるという仮説とうまく一致した。さらに、これまでの予想に反して、これらの原始銀河団領域中にはクェーサーがほとんど存在しないこともわかった。銀河どうしの合体がクェーサー活動を引き起こすという従来の仮説に大きな疑問を呈する結果だ。HSCによって得られた大規模なサンプルを用いることで、遠方宇宙においても原始銀河団の特徴を初めて統計的に明らかにすることができたのである。

銀河の集団—銀河団—

宇宙には、明るい銀河が100個から1000個を超えるほど集まった「銀河団」とよばれる銀河の集団がいくつも見つまっている。宇宙における銀河の分布は網の目のように広がっているが、糸と糸の交わるところが超銀河団にあたり、銀河団どうしはお互いに結びつきあって、「宇宙の大規模構造」とよばれる巨大なネットワークを形成していることがわかっている。このような巨大な構造はいつどのようにできたのだろう？宇宙の始まりの頃には物質密度はほぼ均質だったが、そこにはわずかながらむらがあった。そしてその非常に小さなむらが138億年もの時間をかけて重力によって大きくなり、現在の宇宙に

みられるような銀河団へと成長し、大規模構造をつくり出した、と考えられている。では、いったいつ銀河団は生まれ、どのように成長してきたのであろう？銀河団は、たんに銀河の数が多いという特徴だけではなく、銀河の進化にとって非常に重要な、つぎに述べる特徴ももっている。

環境効果

宇宙には渦巻銀河や楕円銀河などのさまざまな銀河が存在している。そして銀河の性質は、その銀河の周囲の環境と密接に関係していることが知られている。現在の宇宙では、銀河が密集する銀河団のような領域には、年老いて赤くて重い楕円銀河が多く存在し、逆に銀河があまり存在しない領域には、活発に星形成をしている若くて青い渦巻銀河が多くみられる。このように銀河の性質がその環境に大きく依存することを「環境効果」とよんでいる。なぜこの環境効果がみられるかについては、大きく分けて2つの説がある。もともと楕円銀河は銀河の密集した領域に生まれやすいとする説と、銀河の密集したところに生まれた銀河は楕円銀河になりやすいという説だ^{*2}。このことから銀河団は、それを構成する個々の銀河の性質に大きな影響を与えつつ、銀河団自身も大きくなった、と推測される。銀河団がどのように形成されたのかを知ることは、宇宙の大規模構造と銀河進化という大きななぞに迫るために非常に重要である。しかし、銀河団の形成についても、また環境効果がいつ、どのように生じたのかについても、まだはっきりとしたことがわかっておらず、現代天文学の大きななぞとなっている。

銀河団から原始銀河団へ

銀河団や大規模構造の誕生、あるいは環境が銀河進化に与える影響のメカニズムを解明するためには、現在の宇宙に存在するできあがった銀河団だけではなく、銀河団がまさに成長しつつある過去の若い姿(これを「原始銀河団」^{*3}とよぶ)の観測を通して直接調べることが重要である。しかし銀河団のように非常に密度の高い領域は宇宙全体でもごくまれであり、たとえば現在の宇宙においてさえ、銀河団が占める体積の割合はわずか約0.38%である。遠方宇宙に存在する原始銀河団の発見はさらに困難である。宇宙の観測では遠くをみることで過去にさかのぼることができるが、はるかかなたの銀河からやってくる光はとても微弱で検出が難しい。さらに、周辺に比べて格段に密度が高い特別な領域しか銀河団に成長できないので、原始銀河団は宇宙初期において非常にまれな天体なのである。たとえば、以下で述べる120億光年先の宇宙での原始銀河団の体積割合は0.000001である^{*4}。宇宙を端から端まで幅広く、なおかつじっくり奥のほうまで探査しないと原始銀河団は見つからない、という困難を抱えていた。

128億光年先の最遠方銀河団

HSCが登場する以前にも、広視野撮像観測を武器としていたすばる望遠鏡は、原始銀河団に関する成果を挙げていた。われわれの研究チームは、かみのけ座の方向にある「すばる深宇宙探査領域」とよばれる、すばる望遠鏡が重点的に観測している天域のなかに、遠方銀河の数密度が周辺よりも5倍も高い領域を発見した。さらに、すばる

*1 1光年は光が1年間に進む距離 $= 9.5 \times 10^{12}$ km。

*2 銀河の高密度領域で期待される銀河どうしの衝突、潮汐相互作用、銀河間ガス圧力、などが後天的な環境効果の原因として考えられる。環境効果はわれわれの社会にもかきまみることが出来る。人が密集する都会に住む人と田舎に住む人の考え方、文化は少し異なってい

るように思える。これは、そもそも都会が好きな人が都会に集まってきたのか、それとも、都会に住んでいると何となく周囲に染まってしまうのだろうか？ まさに銀河の環境効果も「氏か育ちか」がわかっていないのである。

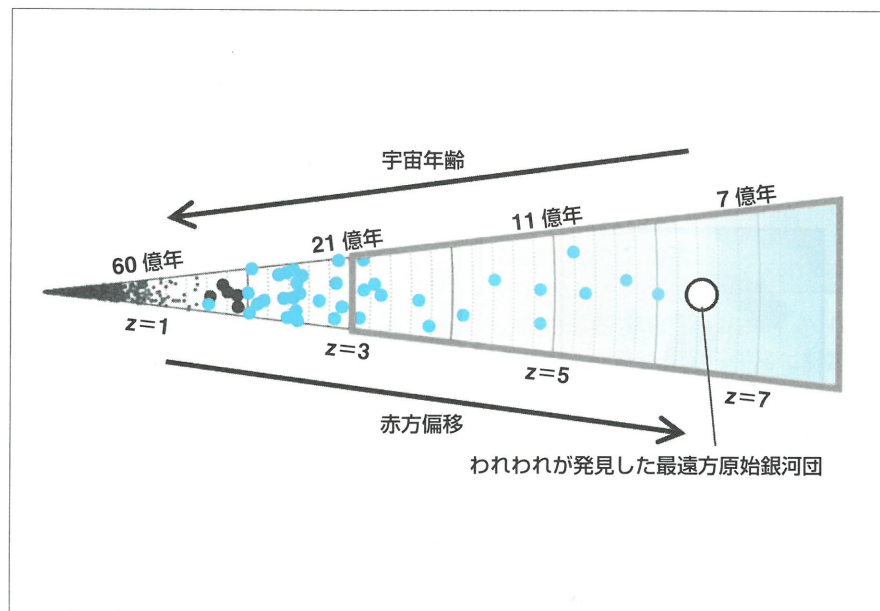
*3 銀河団のいわゆる先祖にあたる天体のことを原始銀河団とよぶが、その定義は(どこが先祖になるかがわかっていないので)確立してい

ない。ここでは、現在に至るまでに質量が太陽質量の 10^{14} 倍以上に成長する領域を原始銀河団とよぶことにする。

*4 ちなみに四葉のクローバーを見つける確率は0.0001、飛行機が墜落する確率は0.000005らしい。

望遠鏡の微光天体分光撮像装置 (Faint Object Camera and Spectrograph, FOCAS) を用いた追加観測から、この領域に存在する多くの銀河が900万光年以内に密集して存在しており、奥行き方向にも集中していることを確かめた。銀河は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はとうてい考えられない。このことから、発見された銀河の集まりが128億光年先にある原始銀河団であるということが明らかになった¹⁾。これは現在発見されているなかでもっとも遠い原始銀河団である。宇宙年齢が10億年にも達していない宇宙のごく初期における原始銀河団の存在が明らかとなったのである。127億光年を超える超遠方の宇宙に銀河団・大規模構造が存在するのか、またどの程度成長しているのか、という問いは、この時代に起きた「宇宙の再電離」という現象とも深く関連している。

しかしこの発見は、じつは偶然ともいえる。原始銀河団の個数密度と、当時のすばる望遠鏡の広視野能力を考えると、確率的には、本来ならあと4倍の広さを探査しないとこの原始銀河団は見つからなかったと考えられる。たまたま運よく超遠方の銀河団を発見できた、ともいえるが、さらによりいっそう、原始銀河団を理解するためには、ただやみくもに2匹目のどじょうを狙うわけにはいかない。実際、これまでに115億光年を超える遠方宇宙で見つかった原始銀河団は20個にとどまっていた<図1>^{*5}。この程度の数では、原始銀河団を理解することは難しい。だが、この状況はHSCの登場で一変する。



<図1> 既知の原始銀河団の赤方偏移分布

黒点や黒丸が銀河団、青丸が原始銀河団を示すが、両者の区別は明確ではない。HSCで原始銀河団探査をしている時代、空間は灰色で囲まれている。この領域で従来に比べて50倍の原始銀河団の検出が見込まれる。白丸はわれわれが2012年に発見した最遠方原始銀河団。文献2から改変して作成。

HSCによる観測

われわれはHSCを用いて、遠方宇宙における原始銀河団の探査を行った。宮崎氏の記事にあるように、すばる望遠鏡では現在、HSCを用いた大規模な宇宙探査観測が進められており、すでに従来とは比較にならないほどの広い天域において質の高いデータが取得されている。われわれはこのデータからまず、比較的探査がしやすい約120億光年先の銀河を選び出し、それらの空間分布を調べることで、原始銀河団の探査を行った。その結果、約120億年前の宇宙に銀河が密集した原始銀河団を179個発見^{*6}し、しかもそれらが不均一に分布することを明らかにした³⁾<図2>。これは従来の研究に比べ約10倍の発見数で、遠方宇宙において原始

銀河団の統計的な研究を初めて可能にする画期的な成果といえる。さらに、われわれは、原始銀河団の分布を詳細に解析し、原始銀河団を包み込む暗黒物質の塊「暗黒物質ハロー」の質量を推定することに初めて成功した。推定された暗黒物質ハローの質量は太陽質量の10兆倍以上であり、これらの領域がいずれ銀河団(太陽質量の 10^{14} 倍)に成長することを強く示唆するものである。

クェーサーと原始銀河団の関係

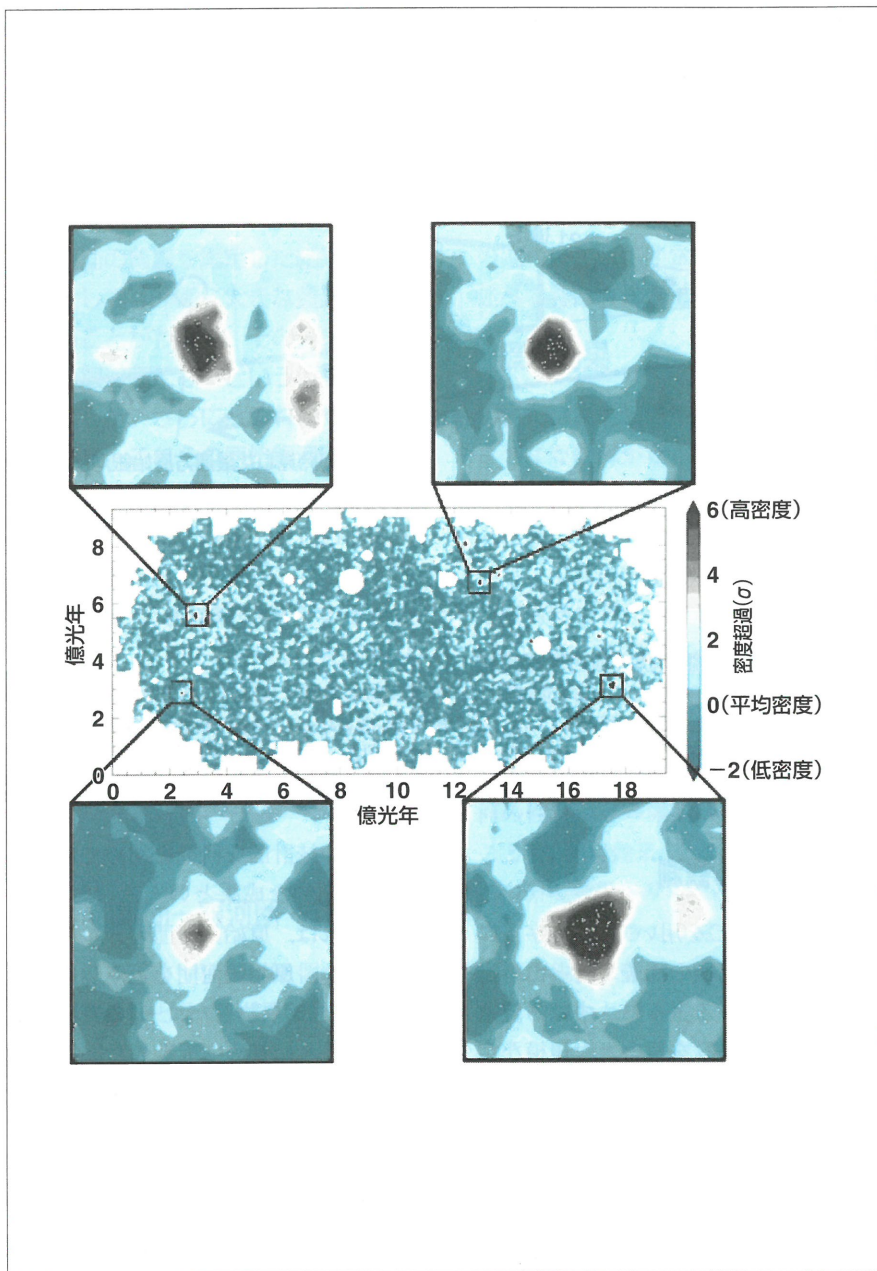
ほぼすべての重い銀河の中心には超巨大ブラックホールが存在すると考えられている。クェーサーとは、銀河中心の超巨大ブラックホールに多量のガス降着が起き、その重力エネルギーの解放によって莫大なエネルギーが解放され、非常に明るくなっている天体であ

*5 しかもその多くは電波銀河やキューサーといった特異天体を目印に使って見つかった原始銀河団である。しかし、そのような特異天体の形成メカニズム自体もまだ解明されておらず、どのような環境に存在するのか自体が現在も研究の対象になっている。また、特異天体を含まない原始銀河団も実際に発見されている。目印を使う方法は効率的であったとしても、特定の性質をもつ原始銀河団のみに

発見が偏ってしまい、環境と銀河進化の関連性の正しい理解を妨げる可能性がある。

*6 ここでは、原始銀河団の候補天体といったほうが正確である。分光観測をして、奥行き方向にもたしかに銀河が密集していることを示さなければ、確実に原始銀河団とはいえない。これまでの研究から、これらの領域は約76%という高い確率で本物の原始銀河団であ

ると考えられるが、断定するためには今後の分光観測が必要である。



〈図2〉HSCサーベイの観測により明らかにされた約120億年前の銀河の分布と原始銀河団領域の拡大図

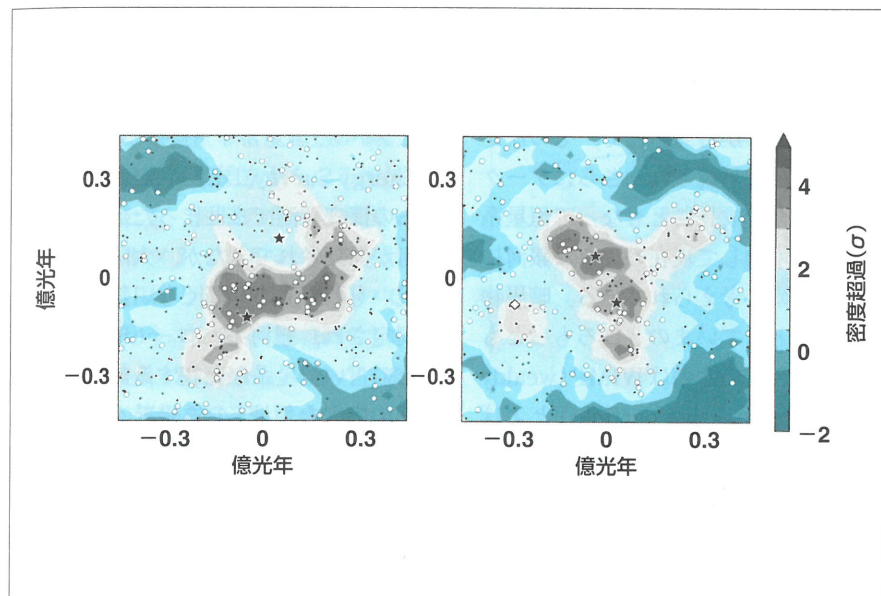
図の青色から黒色は、銀河の低密度から高密度領域を表し、拡大図上の点は実際の銀河の位置を表す。とくに黒色の領域は将来的に銀河団になると予想される原始銀河団領域である。この研究により遠方宇宙においても初めて数十億光年スケールの構造を描き出すことができた。すぐ近くに中程度の高密度領域をともなっている場合や、フィラメント状の分布が伸びているような原始銀河団もみられる一方で、孤立しているものなどさまざまな特徴をもった原始銀河団をみることができる。(国立天文台提供)(カラー画像は巻頭グラビアを参照)

る。銀河が衝突合体するときに、ブラックホールがその銀河のガスを大量に飲み込んでキューサーが出現する、というのが、キューサーの起源についての現在の通説となっている。もしこの仮説が本当であれば、銀河が密集し衝突頻度も高い原始銀河団ではキューサーが生まれやすい、つまり原始銀河団領域にキューサーが見つかりやすい、ということが予想される。このように、活動銀河核(Active Galactic Nuclei, AGN)の発現やブラックホールの成長も銀河団と深く関与している可能性が示唆されてきた。しかし、原始銀河団もキューサーも宇宙空間において非常にまれであるために、これまでこの仮説の検証を行うことは困難であった。

われわれはHSCによって得られた原始銀河団と同じ時代に見つかっている、120億年前の明るい遠方キューサー151個を利用し、両者の位置関係を調べた。すると驚くべきことに、原始銀河団に属する明るいキューサーはたった2個しかいないことがわかったのである⁴⁾。キューサーはごくごく標準的な宇宙の環境にいるらしい。さらに、もっとも明るいキューサーは原始銀河団を避けるように分布することも初めて明らかになった。この結果は、先に述べた従来の予想とは異なり、銀河の衝突を原因としない別のキューサー発現メカニズムが必要である可能性を示唆している。一方、キューサーからの明るい放射によって周囲の銀河成長が抑制されたために周囲に銀河が観測されなかった可能性も考えられ、今後のさらなる観測、議論が待たれている。

もう1つ興味深い発見は、原始銀河団に属していたまれなキューサーのうち2個は「ペア」として存在していたこ

*7 さらに検証のために、より近くにある約80億年前のキューサーペアについても周囲の銀河の密集度を測定した。その結果、キューサーペアのいる環境は、単体のキューサーの環境よりも銀河の密集度が大きいことが確かめられた。これは、原始銀河団中では単体ではなく複数の超巨大ブラックホールが同時に活動的になりやすい、という新たな可能性を支持する結果である。



〈図3〉2つのキューサーペアと周囲の銀河分布

星印はキューサー、丸と点はそれぞれ明るい銀河と暗い銀河を示す。色のついた等高線が平均に対する銀河の密度超過を示し、中心のペア周囲が高密度になっていることがわかる。(国立天文台提供)

とである⁵⁾〈図3〉。キューサーのペアはとくに遠方宇宙においては非常に珍しく、この2つのペアが原始銀河団中に発見されたことにより、原始銀河団中では単体ではなく複数の超巨大ブラックホールが同時に活動的になりやすい、という新たな可能性が示された^{*7}。

HSCの広く深い観測によって、われわれはかつてない数の原始銀河団を見つけ、さらに活動的なブラックホールが属する環境の多様性について、きわめてユニークかつ新しい発見をすることができた。HSCの観測によって初めて、原始銀河団の統計的な研究が可能になったのである。今後観測を継続することによって、原始銀河団サンプルの数はさらに増える。すばる望遠鏡のHSC宇宙探査観測が完了すると120億光年かなたの原始銀河団は約1000個

発見できることが期待できる。もはや原始銀河団はけっしてまれな天体ではなくなったのである。これらのサンプルを用いることで、110億光年から130億光年にわたる原始銀河団の成長過程を明らかにし、銀河団の形成、あるいは環境効果の発現について新たな発見をすることができるかもしれない。

参考文献

- 1) J. Toshikawa *et al.*: *Astrophys. J.* **750**, 137 (2012).
- 2) R. Overzier *et al.*: *Astron. Astrophys. Rev.* **24**, 14 (2016).
- 3) J. Toshikawa *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **70**, 12 (2018).
- 4) H. Uchiyama *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **70**, 32 (2018).
- 5) M. Onoue *et al.*: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **70**, 31 (2018).

ゆらぎと相転移

宮下精二 著

A5判・182頁

定価(本体2,400円+税)

ISBN978-4-621-30296-5

2016年4月号から2017年3月号までのパリティ連載講座「相転移ことはじめ」の単行本化。物理学やその周辺の科学において普



遍的で重要な概念「相転移」を「ゆらぎ」に注目しながら平易に解説。おもに磁性体を例にとり、ゆらぎと相転移の初等的なところから、コストリッツ-サウレス相転移や量子相転移などの話題まで、相転移のいろいろな側面を紹介。

相転移・臨界現象とくりこみ群

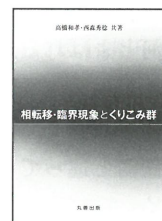
高橋和孝・西森秀稔 共著

A5判・398頁

定価(本体5,200円+税)

ISBN978-4-621-30156-2

東京工業大学で大学院生向けに開講されている「統計物理学」の講義内容の単行本化。相転移とは何か、から説き起こし、熱力学・統計力学による記述、平均場理論、Landau理論などの基礎的解説を行った後、相転移に伴う臨界現象の具体的な状態や普遍的性質、および、その理解に不可欠なくりこみ群について詳説。



丸善出版株式会社

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町2-17
TEL (03) 3512-3256 FAX (03) 3512-3270
<https://www.maruzen-publishing.co.jp>