

すばる/HSCで探る宇宙星形成史の起源

播 金 優 一

〈ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン Gower St., Bloomsbury, London WC1E 6BT,
United Kingdom〉

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: y.harikane@ucl.ac.uk



宇宙における星形成活動は、宇宙初期から赤方偏移 $z\sim 2-3$ （宇宙年齢約30億年）までに活発になり、ピークを迎え、その後現在に至るまでに10分の1に減少したことが観測的に知られている。この進化は宇宙星形成史と呼ばれるが、なぜ宇宙がこのような進化をしてきたのか、その物理的な起源はわかっていなかった。我々はすばる望遠鏡の最新撮像装置 Hyper Suprime-Cam (HSC) を使った探査により、60万個の遠方銀河からなる世界最大のサンプルの構築に成功し、遠方銀河の星形成と物質降着の間に宇宙のどの時代でも成立する基本関係があることを初めて指摘した。さらにこの関係は宇宙星形成史の特徴的進化を説明でき、宇宙星形成史の物理的起源が、構造形成による銀河数の増加と宇宙膨張による物質降着率の減少であることを明らかにした。

1. 宇宙星形成史

宇宙の中で銀河がどのように形成し、進化してきたのかを知ることは、現代の天文学の主要な課題の一つである。銀河の形成・進化を調べるために、人類は大型望遠鏡を使い、遠方宇宙にある形成途中の銀河を探査してきた。探査によってこれまでに多くの遠方銀河が見つかっており、例えばハッブル望遠鏡により見つかった赤方偏移 $z\sim 4$ 以上（宇宙年齢約20億年以前）の銀河の数は1万個を超えた¹⁾。最近ではアルマ望遠鏡の観測により $z=9.1$ において銀河が分光同定され²⁾、ハッブル望遠鏡により $z=11$ の銀河候補も分光されている³⁾。

このような大型望遠鏡による探査で見つかった銀河の星形成率^{*1}をもとに、宇宙の各時代の星形成率密度^{*2}を計算した結果が図1である。宇宙の星形成率密度は、宇宙初期から赤方偏移 $z\sim 2-3$

（宇宙年齢約30億年）まで上昇し、ピークを迎え、その後現在までに10分の1に減少したことが知られている。つまり、宇宙の星形成活動は $z\sim 2-3$ が最も活発であり、その時代では現在に比べ10倍ほどの勢いで星が作られていたことを示している。この宇宙の星形成史（図1）はMadau plotとも呼ばれ⁶⁾、どの銀河天文学の教科書にも登場するような、銀河形成・進化の研究において有名な観測結果である。宇宙星形成史は宇宙の長い歴史の中でどのようにガスから星や銀河が生まれたのかという情報を含んでおり、銀河形成・進化だけでなく、ニュートリノ⁷⁾やガンマ線バースト⁸⁾、背景放射⁹⁾の研究においても重要である。

しかし、宇宙の星形成率密度がなぜこのような進化をするのか、なぜ $z\sim 2-3$ にピークを迎えるのか、という進化の物理的な起源はよくわかっていなかった。この宇宙星形成史の特徴的進化は、

^{*1} 単位時間あたりに星になるガスの質量。単位は通常 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 。

^{*2} 単位時間・単位体積あたりの星形成率の平均値。単位は通常 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ 。

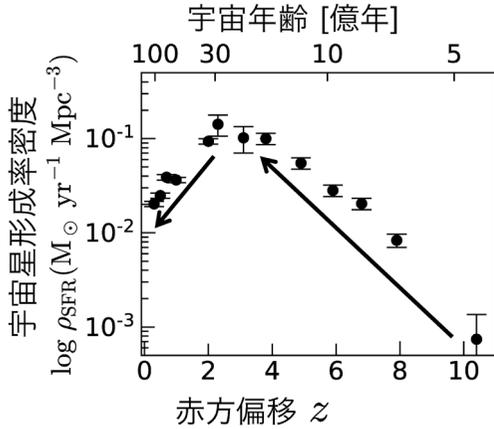


図1 宇宙星形成率密度の観測結果^{1), 4), 5)}. 宇宙星形成率密度は宇宙初期から赤方偏移 $z \sim 2-3$ まで上昇し、その後現在まで10分の1に減少したことが知られている。

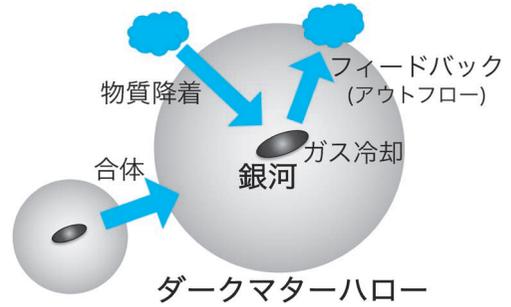


図2 銀河とダークマターハローの概念図. 物質降着, ガス冷却, フィードバック (アウトフロー等), 合体を経て銀河は形成・進化していく。

実は1990年代のハッブル宇宙望遠鏡によるハッブルディープフィールド探査の時代に既に報告されていた^{10), 11)}. しかし、進化の起源については、結果が報告されてから20年来議論されてきたにも関わらずよくわかっていなかった。そこで私たちは、銀河とダークマターハローの関係という新たな観点から、この進化を理解しようと試みた。

2. ダークマターハロー

銀河を取り囲むダークマターの自己重力系であるダークマターハロー (今後ハローと呼ぶ) は、銀河形成において重要な役割を担っている (図2). 星形成に必要なガス冷却の効率はハローのビリアル温度に依存し¹²⁾, 星形成を抑制するフィードバック機構の一つであるアウトフロー (銀河からのガスの放出) はハローの重力ポテンシャルに影響される¹³⁾. 物質降着率やハローの合体率もハロー質量に依存するので¹⁴⁾, 銀河のハロー質量を調べることは銀河形成のプロセスを理解する上で重要である。

遠方銀河のハロー質量を推定するにはクラスタリング解析と呼ばれる手法が用いられる。これは銀河のクラスタリング強度 (密集具合) を角度相

関関数を使って評価し、構造形成モデルと比較することでハロー質量を推定する手法である。角度相関関数 $\omega(\theta)$ は以下の式で定義される：

$$dP(\theta) = n^2(1 + \omega(\theta)) d\Omega_1 d\Omega_2, \quad (1)$$

ここで $dP(\theta)$ は角度 θ の距離で銀河ペアが見つかる確率、 n は銀河面密度、 $d\Omega_1, d\Omega_2$ は立体角である。つまり、角度相関関数は銀河ペアの見つかる確率を規格化した量であり、値が大きいほど銀河が密集していることを示す。このクラスタリング解析は銀河の位置と赤方偏移の情報のみを用いるので遠方銀河にも適用可能である。しかし、角度相関関数は二点統計であり、クラスタリング強度を精度良く測定するには多くの銀河が必要になる。

3. 世界最大の遠方銀河カタログ

そこで私たちは、すばる/Hyper Suprime-Cam (HSC) 探査データを使い遠方銀河のクラスタリング解析の研究を進めてきた。すばる/HSCは視野 1.8 deg^2 の広視野可視撮像カメラであり、これまですばるの主焦点に取り付けられていた Suprime-Cam の約7倍、ハッブル望遠鏡/Advanced Camera for Surveys (ACS) の約500倍の視野を持つ¹⁵⁾. このすばる/HSCを300夜投入するすばる戦略枠プログラムによるHSC探査¹⁶⁾ は2014年から観測が始まっており、現在までに700平方度を超え



図3 HSC探査により撮られた画像例。画像の領域は本研究で使用した全体の探査領域の約10分の1である。

る天域が観測されている(図3)。私がこの研究を本格的に開始した2015年の時点でも従来の遠方銀河研究の100倍の約100平方度もの観測データが解析され公開されていた。このデータからライマンブレイク法^{*3}で遠方銀河を選択すれば、従来の研究とは比較にならない精度で角度相関関数が計算でき、遠方銀河のハロー質量を精度良く測定できるはずだ、と考えた。

しかし、実際には様々な困難が待ち構えていた。特に我々を悩ましたのが、HSC画像に映っている天体の測光値の取り扱いの難しさである。詳細は大内正己氏の記事¹⁷⁾や小野宜昭氏の記事¹⁸⁾に書かれているのでそちらを参照していただきたいが、国立天文台やKavil IPMU、プリンストン大学のソフトウェアチームの方々になんども相談をさせていただき、広く使われている測光ソフトウェアであるSource Extractor¹⁹⁾の測光値や分光観測結果との比較、さらには選択された遠方銀河の画像のチェックなどを行い、修士課程から博士課程合わせて約2年もの歳月をかけて最終的な遠方銀河サンプルを構築することに成功した。

構築した遠方銀河サンプルには、 $z=4-7$ の銀河

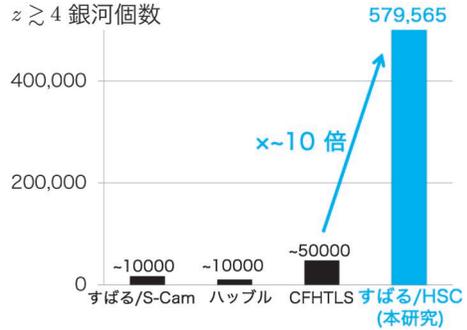


図4 各探査により検出された赤方偏移 $z \geq 4$ 銀河の個数。左から順に、すばる/Suprime-Cam (S-Cam) 探査²⁰⁾、ハッブル宇宙望遠鏡の探査¹⁾、CFHTレガシー探査²¹⁾、すばる/HSC探査(本研究)^{22), 23)}。

が579,565個(約60万個)も含まれている。図4では検出した遠方銀河の個数を探査ごとにまとめている。今回HSC探査により得られた約60万個という数は、これまでのすばる/Suprime-Camを使った研究²⁰⁾はもとより、最新のハッブル宇宙望遠鏡の探査¹⁾やCFHT(Canada-France-Hawaii Telescope)レガシー探査²¹⁾による研究の10倍以上の規模であり、現在世界最大の遠方銀河サンプルである。

4. 角度相関関数

この大規模遠方銀河サンプルを使って角度相関関数を計算してみたところ、図5のようにこれまでの研究よりも格段に精度の良い結果が得られた。角度相関関数はこの図のように、10秒角($z=4$ で0.3 Mpc^{*4})を境に小スケール側と大スケール側で傾きが変わることが知られている。角度相関関数は銀河ペアの見つかる確率を規格化した量であったが、この傾きの違いはその銀河ペアの出どころの違いによるものである(図6)。小スケール側の銀河ペアは主に1ハロータームと呼ばれる、同一ハロー内にある銀河ペアからの寄与であり、

^{*3} 銀河間物質中の中性水素による吸収の効果で、銀河スペクトルに現れる特徴的なブレイク(ライマンブレイク)を用いて銀河を選択する手法。

^{*4} 典型的な $z \sim 4$ 銀河のハローのビリアル半径に対応。

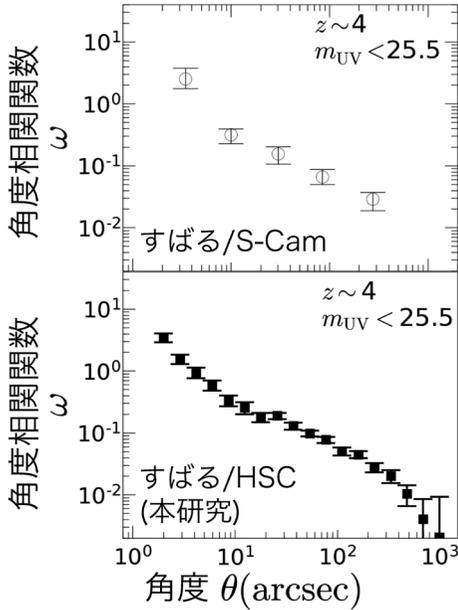


図5 赤方偏移 $z \sim 4$, UV等級 $m_{UV} < 25.5$ mag 銀河の角度相関関数. 上段はすばる/S-Cam探査による結果²⁰⁾で, 下段がすばる/HSC探査²³⁾による結果.

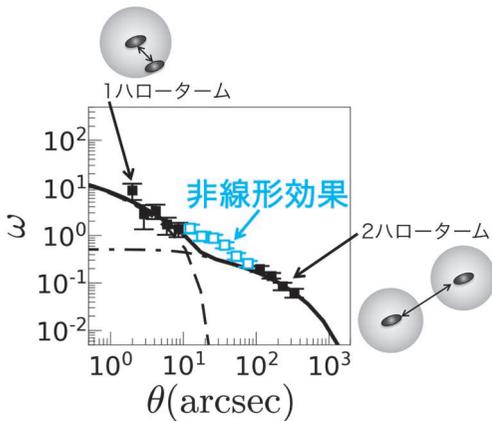


図6 HSC探査により得られた角度相関関数 ($z \sim 4$, $m_{UV} < 24.0$ mag) とHODモデルフィットの比較²³⁾. 破線と一点鎖線はそれぞれHODモデルにより計算した1ハローターム, 2ハロータームであり, それぞれ小スケール側 (< 10秒角), 大スケール側 (> 10秒角) で支配的である. 2ハローターム中の青四角 (10-90秒角) は非線形効果が卓越していて, 線形近似を使ったHODモデルフィットでは再現できない.

ペアの個数はダークマターハローの密度プロファイルに依存する. 一方, 大スケール側の銀河ペアは2ハロータームと呼ばれる, 別々のハローに属する銀河ペアからの寄与であり, ペアの個数はハロー質量とダークマターの大規模構造のパワースペクトルに依存する. この両方のペアからの寄与を扱えるのが, halo occupation distribution (HOD) と呼ばれるモデルである²⁴⁾. このモデルでは銀河団のようなハローの中に複数の銀河がある系を扱うことができ, SDSSを使った研究では近傍銀河の角度相関関数を小スケールから大スケールまで綺麗に説明できることが知られている²⁵⁾.

早速HSCデータを使って得られた遠方銀河の角度相関関数を, 自作のHODモデルコードでフィットしてみた. しかし, どのようにパラメータを調整しても, 図6のように10-90秒角あたりの角度相関関数が再現できず, 観測値よりも値が低くなってしまう. HODコードは自作だが, 3カ月かけて苦労して作った上に, 過去の研究の計算結果²⁶⁾と一致することを確認したので間違いがないと思われる. 共同研究者に相談しても, 明確な理由はわからなかった.

仕方がないのでとりあえず他の結果について結果をまとめていた頃, とある論文²⁷⁾に目がとまった. その論文は遠方銀河のクラスタリング解析に関するシミュレーションを使った理論研究の論文であり, 遠方宇宙では非線形効果によって, 通常の線形近似で計算した場合よりも角度相関関数が1 Mpc ($z=4$ で30秒角) 付近で高めに出ることが予測されていた. これはまさに我々が今悩んでいる, 観測とモデルの角度相関関数が一致しない原因ではないか! 早速その論文を参考に, この非線形効果に注意しながらHODモデルを使いハロー質量を求めた.

5. 星形成と物質降着の関係

HSCの大規模サンプルのおかげで, ハロー質量は不定性10%以下という非常に良い精度で計

算することができた。ハロー質量に関する結果がまとまり、論文を準備している段階で、今回の研究のセールスポイントはなんだろう、と考え始めた。HSCによる遠方銀河サンプルは最新のもので規模も大きいものの、過去にも遠方銀河のクラスターリング解析の論文自体はたくさんあり^{20), 28), 29)}、ハロー質量のみを報告してもインパクトは大きくなさそうに思えた。最近では銀河の星質量とハロー質量の比である stellar-to-halo mass ratio (SHMR) が注目されているが、自分の過去の論文³⁰⁾ や CFHT レガシー探査データを使った研究²¹⁾ で既に報告されている。しかも SHMR は分母・分子が星質量・ハロー質量、つまり両方とも星形成・ハローへの物質降着の積分量であり、現在だけでなく過去の星形成効率の情報を含んでおり議論が難しい。

何か別の新しいことができないかと論文を読み漁っていたところ、銀河-ハロー関係の標準的論文である Peter Behroozi らの論文³¹⁾ のとある図に目がとまった。その図には星形成率と物質降着率の比 (SFR/M_h) がプロットされていた。この比はハローに落ちてきた物質のうち星に変換される割合を示しており、SHMR と違い銀河のその時代の星形成効率を表している。しかし、彼らの論文ではアバundance マッチング法^{*5} と呼ばれるクラスターリング解析とは別の手法でハロー質量を求めており、特に遠方銀河では観測データの制限も弱く、不定性が大きかった。一方、今回の研究では HSC の大規模サンプルによりハロー質量が不定性 10% 以下と精度良く求められている。ライマンブレイクにより赤方偏移もわかっているので、構造形成の N 体シミュレーションを使えば物質降着率 (M_h) に良い制限がつけられる¹⁴⁾。 SFR/M_h の分子の星形成率は HSC のカバーしてい

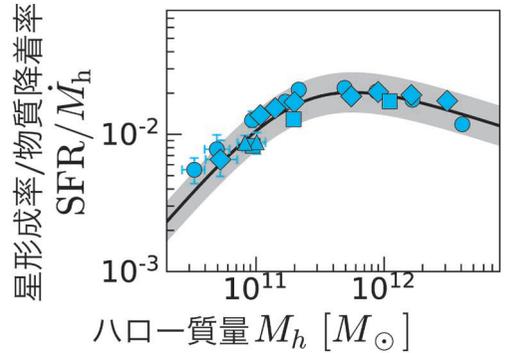


図7 星形成と物質降着の基本関係²³⁾。横軸はハロー質量、縦軸は星形成率と物質降着率の比である。青色の丸と菱形、四角、三角はそれぞれ本研究による $z=4, 5, 6, 7$ の結果。黒線と灰色領域は本研究により見つかった関係とその誤差範囲。

る静止系紫外光の光度から計算可能である^{*6}。そこで、今回の結果を使って SFR/M_h を求めるのは、新規性もあり面白いのではないかと考えた。

HSC の広視野データに相補的なハッブル望遠鏡の深いデータ³⁰⁾ も組み合わせると SFR/M_h を計算した結果が図7である。ご覧のように、今回の研究で調べた赤方偏移 $z \sim 4-7$ の範囲では、 SFR/M_h とハロー質量 M_h の間に 0.15 dex 以内のタイトな関係があることがわかる。さらに、この関係は Behroozi らの論文の $z=0$ の結果とも矛盾しない。つまり、 $z=0-7$ において、 SFR/M_h には大きな赤方偏移進化が見られないということを示している。先ほど述べたように SFR/M_h はハローに落ちてきた物質のうち星に変換される割合である。今回得られた結果は、ハローに落ちてきた物質の量に比例して星形成が起きるが、その効率(降着した物質のうち星に変換される割合)はハロー質量が同じなら宇宙のどの時代においても大きく変わらない、ということを示している。つまり、銀河

*5 銀河の個数密度 (アバundance) とハロー個数密度の間の経験的な関係を仮定し、銀河とハローを結びつけハロー質量を推定する方法。

*6 紫外光はダストにより吸収されるのでその補正が必要である。本研究では紫外連続光スロープとダスト吸収量の間の経験則³²⁾ を用いて補正したが遠方銀河はそもそもダスト量が少ないので、この補正による影響は小さい。

における星形成と物質降着の間には宇宙のどの時代でも成立する基本的な関係があることを示唆している。実はこの関係自体は過去のいくつかの理論研究³³⁾において仮定されてきたのだが、今回我々はその関係が実際に存在することを、観測データを用いて初めて指摘したのである。

6. 宇宙星形成史の起源

さらにこの関係を使って、一番最初の節で述べた宇宙星形成率密度を計算してみた。宇宙星形成率密度は図8下パネルの観測データ(黒点)のように、 $z \sim 10$ から $z \sim 2-3$ で上昇し、その後現在にかけて減少することが銀河の紫外光度関数の観測結果等からわかっている。一方、宇宙星形成率密度は次の式のように、ハロー個数密度(dn/dM_h)、物質降着率(\dot{M}_h)、星形成率/物質降着率比(SFR/ \dot{M}_h)の積で計算できる。

$$\rho_{\text{SFR}} = \int dM_h \frac{dn}{dM_h} \times \dot{M}_h \times \frac{\text{SFR}}{\dot{M}_h} \quad (2)$$

ハロー個数密度と物質降着率は、N体シミュレーションによって赤方偏移・ハロー質量ごとに計算できる^{14), 34)}。図8の上・中パネルにそれぞれ個数密度と物質降着率の計算結果を示した。星形成率/物質降着率比は我々の見つけた基本関係が使用できる。

これらを使って宇宙星形成率密度を計算した結果を図8の下パネルに示した(青実線)。ご覧のように、この星形成と物質降着の基本関係は、宇宙初期から $z \sim 2-3$ までの上昇、その後の減少という、宇宙星形成率密度の特徴的進化を見事に再現している。これはどのようなことを示しているのだろうか。我々の見つけた基本関係によるとSFR/ \dot{M}_h は赤方偏移進化しないので、宇宙星形成率密度の進化は、ハロー個数密度(dn/dM_h)と物質降着率(\dot{M}_h)の進化が原因である。ハロー個数密度は構造形成の効果によって宇宙初期から赤方偏移 $z=2-3$ までで急激に上昇するが、その

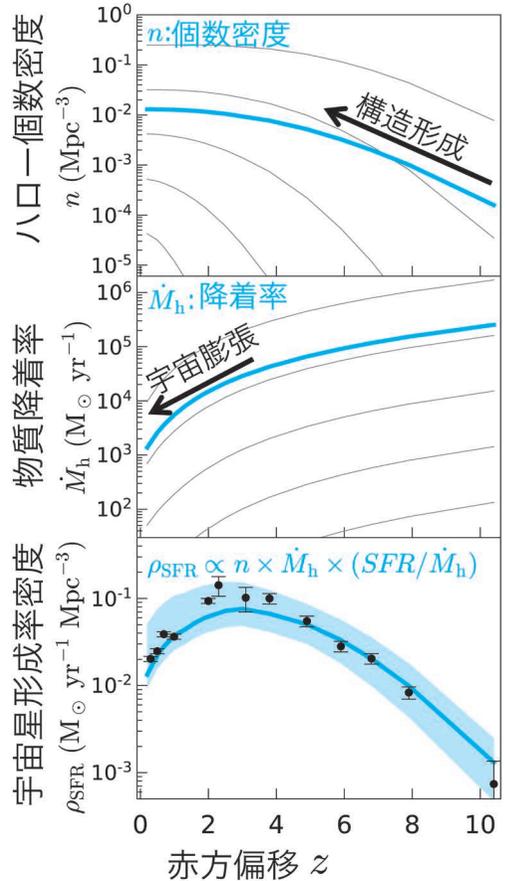


図8 上段と中段は、N体シミュレーションによる計算結果で、それぞれハローの個数密度とハローへの物質降着率を赤方偏移ごとに示している。上段(中段)の灰色曲線は、上から(下から)順に、 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} 太陽質量のハローの結果、青色曲線は図7の基本関係を使った重み付け平均。下段は黒印は過去の観測結果で、青線と青色領域はそれぞれ式(2)を使って計算した宇宙星形成率密度進化とその不定性²³⁾。

後の上昇は緩やかである(図8上パネル)。一方、物質降着率は、宇宙膨張の効果によって $z=3$ 以降現在にかけて急激に減少する(図8中パネル)。つまり、宇宙の星形成率密度進化のうち、宇宙初期から $z=2-3$ までの上昇は、構造形成によるハローの個数密度の増加、つまり、星形成銀河の個数密度の増加が原因であり、その後現在までの減

少は、宇宙膨張により物質降着率が下がることで、銀河1個あたりの星形成率が減少したことが原因である。我々のすばる/HSCを使って構築した世界最大の大規模サンプルによって、銀河形成・進化研究の基礎的事実である宇宙星形成史の物理的起源が、構造形成によるハロー個数密度の単調増加と、宇宙膨張による物質降着率の単調減少の二つの重ね合わせであることがわかった。

7. おわりに

遠方銀河カタログの構築に2年を費やし、角度相関関数に現れた非線形効果などに悩まされた本研究であったが、なんとか無事論文にまとめることができ、PASJ HSC特集号に掲載することができた²³⁾。クラスタリング解析の研究は解析も複雑で、普段はあまり注目されないことが多いのだが、今回は意外にも反響が大きく、arXiv投稿後には非線形効果を予測した論文²⁷⁾の著者であるCharles Joseを含む複数の研究者からメールをもらった上に、論文投票サイト^{*7}では過去30日間に投稿された論文のうちトップ10にランクインした。これはまさに、すばる/HSCの研究成果に世界中が着目していることを示している。

本研究により宇宙星形成史の物理的起源を探ることができたが、もちろんまだ終わりではない。SFR/ M_h については、 $z=1-3$ の銀河の値はまだきちんと求められてはいない。この理由は $z=1-3$ の銀河のライマンブレイクは観測波長で5,000 Å以下であり、可視光をカバーするHSCのフィルターセットではこのブレイクを捉えることができず、銀河が選択できないためである。これに関してはHSC探査領域をCFHTのuバンド(3,000–4,000 Å)で観測するCLAUDSプロジェクト(PIs: M. Sawicki, S. Arnouts, J. Huang)が進んでおり、このデータを使うことで $z=1-3$ 銀河を選択できるだろう。さらに、アルマ、すばる、ケック望遠鏡を使った分

光観測も精力的に進められており、個々の銀河の性質に迫る研究が可能になっている。HSC探査データの取得も進んでおり、筆者らは今現在最新のデータを使って改めて遠方銀河カタログを作成している最中である。 $z=4-7$ 銀河の数はこの研究の時から約4倍の200万個に達しており、このサンプルによってまた新たな現象が見えてくるかもしれない。

謝辞

本稿の内容は筆者らがこれまでに発表した論文^{23), 30)}および筆者の博士論文³⁵⁾に基づいています。これまで研究を進めるにあたり多くのコメント・議論をしていただいた、大学院での指導教員である大内正己氏、HSCデータを使った銀河選択の際に多くの時間を割いて議論をしてくださった小野宜昭氏、澁谷隆俊氏に深く感謝いたします。本研究の鍵となったのは何と云ってもすばる/HSCの探査データです。HSCとHSC探査の実現に多大な努力をされたすべての方に感謝します。また、本稿を執筆する機会を与えてくださり、本稿の内容に関して助言をくださった天文月報編集委員の小宮山裕氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Bouwens, R. J., et al., 2015, ApJ, 803, 34
- 2) Hashimoto, T., et al., 2018, Nature, 557, 392
- 3) Oesch, P. A., et al., 2016, ApJ, 819, 129
- 4) Reddy, N. A., & Steidel, C. C., 2009, ApJ, 692, 778
- 5) Schiminovich, D., et al., 2005, ApJ, 619, L47
- 6) Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415
- 7) Strigari, L. E., et al., 2005, JCAP, 04, 17
- 8) Kistler, M. D., et al., 2009, ApJ, 705, L104
- 9) Madau, P., & Pozzetti, L., 2000, MNRAS, 312, L9
- 10) Madau, P., et al., 1996, MNRAS, 283, 1388
- 11) Steidel, C. C., et al., 1999, ApJ, 519, 1
- 12) Sutherland, R. S., & Dopita, M. A., 1993, ApJS, 88, 253
- 13) Murray, N., et al., 2005, ApJ, 618, 569
- 14) Fakhouri, O., et al., 2010, MNRAS, 406, 2267
- 15) Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S1
- 16) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- 17) 大内正己, 2019, 天文月報, 112, 146

*7 <https://voxcharta.org/>

18) 小野宜昭, 2019, 国立天文台ニュース3月号
 19) Bertin, E., & Arnouts, S., 1996, A&AS, 117, 393
 20) Ouchi, M., et al., 2005, ApJ, 635, L117
 21) Ishikawa, S., et al., 2017, ApJ, 841, 8
 22) Ono, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S10
 23) Harikane, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S11
 24) Bullock, J. S., et al., 2002, MNRAS, 329, 246
 25) Zehavi, I., et al., 2011, ApJ, 736, 59
 26) Hamana, T., et al., 2004, MNRAS, 347, 813
 27) Jose, C., et al., 2017, MNRAS, 469, 4428
 28) Hildebrandt, H., et al., 2009, A&A, 498, 725
 29) Barone-Nugent, R. L., et al., 2014, ApJ, 793, 17
 30) Harikane, Y., et al., 2016, ApJ, 821, 123
 31) Behroozi, P. S., et al., 2013, ApJ, 770, 57
 32) Meurer, G. R., et al., 1999, ApJ, 521, 64
 33) Mason, C. A., et al., 2015, ApJ, 813, 21
 34) Tinker, J. L., et al., 2008, ApJ, 688, 709
 35) 播金優一, 2019, 博士論文 (東京大学)

Origin of the Cosmic Star Formation History Studied with the Subaru/HSC Survey
Yuichi HARIKANE

University College London, Gower St., Bloomsbury, London WC1E 6BT, United Kingdom

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

Abstract: Observations with large telescopes reveal that the cosmic star formation rate density increases from the early universe to the redshift of $z \sim 2-3$, 3 billion years after the Big Bang, and decreases to the present day universe. This redshift evolution is known as the cosmic star formation history, but the physical origin of this evolution is not well understood. Using the Subaru/Hyper Suprime-Cam survey data, we have constructed the largest sample of high redshift galaxies, and identified a fundamental relation between star formation in galaxies and mass accretion. This fundamental relation reproduces the evolution of the star formation rate density, implying that the origin of the cosmic star formation history is the combination of the increase of galaxy number density due to the structure formation, and the decrease of the accretion rate due to the cosmic expansion.