

HSCが拓いた遠方銀河の統計天文学

大内正己

〈東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: ouchims@icrr.u-tokyo.ac.jp



現在進行中のすばる HSC 探査は、遠方銀河の研究分野において、異色の存在である。すばるの高い感度により、赤方偏移 $z=7$ の初期銀河までを検出しながら、広領域撮像能力により、100 平方度の広さで調べることができるためだ。現在までに、1.4 Gpc³ という宇宙論的な探査体積の中において、58 万個の遠方 ($z=4-7$) の初期銀河の検出に成功した。これにより、今までできなかった宇宙論的スケールでの初期銀河の研究を実現して、新分野を開拓した。さらに、多くの銀河研究者が 12 年に及び準備を進めてきた狭帯域撮像による Ly α 輝線天体 (LAE) 研究では、宇宙再電離の新しい知見が得られた。これらの初期銀河と LAE による研究の多くはそれぞれ、GOLDRUSH と SILVERRUSH と名づけられた 10 編以上の論文にまとめられ、当該分野に大きなインパクトを与えた。研究はまだ端緒についたばかりで、多くの若手の研究者によって次なる論文が準備され、分光追観測が行われるなど、このインパクトは深く長く続くだろう。これらの結果は、世界で計画されている次世代広領域探査 (LSST や EUCLID) の先駆的研究としての役割も担い始め、さらなる期待が寄せられている。

1. はじめに

2006 年、当時アメリカで研究員をしていた私のもとに 1 通のメールが届いた。何でも、すばる可視光広視野カメラ Suprime-Cam の後継で、視野が約 7 倍となる HSC という装置プロジェクト (HSC 装置プロジェクト) を進めていて、これに協力してもらえないか、という依頼だった。稼働中の Suprime-Cam でも、ほかの 8 m 級望遠鏡のカメラよりも 10 倍ほど広い視野をもっていたため、そのユニークな性能で、最遠方銀河の発見や遠方銀河団、大規模構造の発見など、深宇宙研究に大きな進展をもたらしていた。私自身も、博士論文を Suprime-Cam のデータで書き、この恩恵に預かっていたのである。私の中でさまざまな疑問が脳裏をよぎった。HSC のような、Suprime-Cam 以上の広い視野のカメラが本当に必要なのだろう

か？ いや、むしろ分光器や近赤外線カメラにより、Suprime-Cam の探査で見つけられた面白い天体を分光したり、多波長で研究するほうが、科学的なインパクトが大きいのではないかと。そんなことを考えながら、受け取った依頼メールをよく見てみると、HSC 装置プロジェクトの現状に関する発表資料が添えられていた。資料を見る中で、小宮山裕さん (国立天文台) の発表資料にあった 1 枚のスライドに目が釘づけになった。このスライドには、Suprime-Cam の長時間マッピング観測で発見された、赤方偏移 $z=6$ における 100 Mpc スケールの大規模構造の天球面図が載っていた。そして、この図には、予想される HSC の視野の大きさが描かれていた。HSC の視野は、 $z=6$ の大規模構造を余裕で覆うほど広い。長い時間をかけて Suprime-Cam で観測した結果得られた $z=6$ の大規模構造が一度の観測で完了して

しまう。単純な比較ではあったが、自身がSuprime-Camで長時間マッピング観測をしたことを思い出した。Suprime-Camでようやく実現できる観測が一度に済んでしまうとすると、HSCではどんな宇宙が見られるのだろうか？ そんな想像を膨らませていると、だんだんと興奮が高まっていった。私は、すぐに依頼メールに対する返事を書いた。「喜んで協力します」と。それから、深夜に数え切れないほどのskype会議を行った。どれだけ議事録を流したかも覚えていない。日本と台湾の関係する研究者がまとまり、観測素案を作った。そして、プリンストンの研究者が加わり観測案を一つにまとめた。

今考えると、当時の私は、定量的検討も十分に行わないまま、ナイーブに直感だけで新規プロジェクトを評価していたと思う。しかし、HSC探査が始まり、実際の結果が出る中で、この直感には確信が変わっていった。

2. HSCがもたらした異次元サンプル

2014年、すばる戦略枠プログラムとして、HSCの観測が始まった。データを目の当たりにすると、その量に圧倒された。これまで見てきたSuprime-Camのデータでも大きくて苦勞が絶えなかったのだが、HSCはCCDの数が10倍、さらに戦略枠プログラムということでこれまでのすばる観測時間の10倍程度、実に従来の100倍近いデータを扱うことになったのである。

さらにわれわれを悩ませたのは、解析されたHSCデータである。HSC装置プロジェクトでは、プリンストン大学と国立天文台などが協力をして、データ解析を一括して行っている。ここでは、プリンストン大学がSDSS (Sloan Digital Sky Survey) 探査で培った解析アルゴリズムを引き継いで、非常に効率的な処理が行われ、素晴らしいアドバンテージがあった。その一方で、SDSSでは、夜光(20等級)よりも明るい天体を扱うことに最適化されているため、従来のすばる望遠鏡

で達成される夜光の1/100の1以下になる(25-27等級)天体の測光や色測定にさまざまな問題が出てきた。例えば、SDSSでは点源や近傍銀河を扱うので、Sérsicプロファイル(一般的な近傍銀河のプロファイル)の組み合わせで銀河の形態をモデル化して全等級を出している。しかし、HSCで検出される25-27等級の天体の大半は、遠方銀河か近傍の矮小銀河であるため、Sérsicプロファイルを仮定すると、測光に無視できない系統誤差が入ってくる。さらに、遠方銀河は検出限界ギリギリ(5σ)でようやく見えるものが大半だが、こういった天体の測光をSDSSの解析アルゴリズムで行うと、銀河形態のモデル化のパラメータが余分にあるため、カタストロフィクな間違い(測光値にして2-3等級の間違い)が出てしまう。国立天文台のソフトウェアグループの協力を仰ぎながら、若手研究者の小野宜昭さん、播金優一さん(東京大学)、利川潤さん、内山久和さん(総研大)らは、力を合わせて測光の問題に取り組んだ。当初は解決法が見つからず途方に暮れていたのだが、彼らは最後まで諦めずに一つひとつの問題に取り組み、粘り強く続けた。従来の解析で得られた、信頼のおける測光値との比較などから、系統誤差の振る舞いやカタストロフィクな間違いをコントロールする手法を確立したのである。問題を解決するまでに、約2年の歳月がかかった。そして得られた広帯域バンドの測光値をもとにして、赤方偏移した連続波のブレイクをたよりに天体を選び、最終的な遠方銀河カタログ(ドロップアウト銀河カタログ)¹⁾を構築した。

このようにして、2017年当時に得られていたHSC画像(以降、初期HSC画像と呼ぶ)に基づく遠方銀河カタログは、 $z=4-7$ の銀河が579,565個(約58万個)も含まれている。これは、すばるSuprime-Camの探査はもとより、最新のハッブル宇宙望遠鏡探査²⁾、CFHTレガシー探査³⁾の実に10-100倍にもなる(図1)。探査体積は 1.4 Gpc^3 と $z=0$ のSDSS探査と同レベルで、宇宙

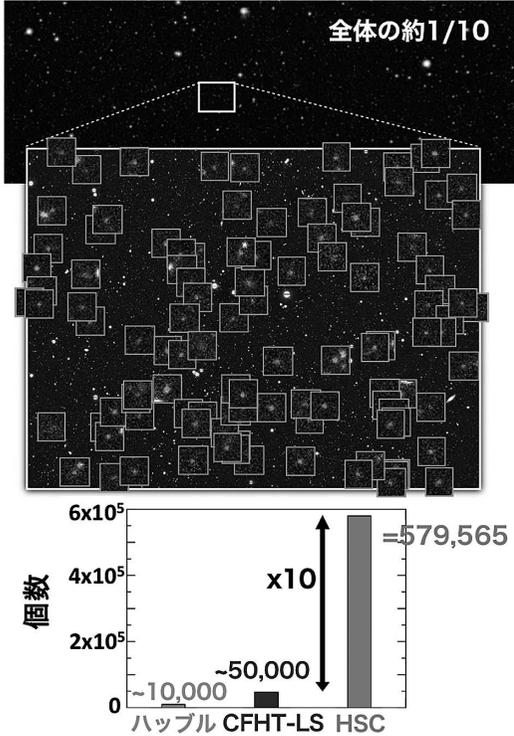


図1 上段) 初期HSC画像の約1/10の領域の画像. 中段) 上段の白色長方形の部分の画像(初期HSC探査の約1/1,000の領域の画像に対応)とそこで検出された赤方偏移 $z=4-7$ の遠方銀河の拡大図. 下段) 初期HSC探査によるサンプルの遠方銀河の個数を過去の探査と比較した棒グラフ. 左から順に、ハッブル宇宙望遠鏡の探査²⁾、CFHTレガシー探査³⁾、HSC探査¹⁾.

論的大きさである。遠方銀河探査の常識を超えた、まさに異次元のサンプルだ。そして、これは若手研究者の努力の結晶でもある。

3. 宇宙論的な遠方銀河研究への扉

巨大な探査体積(1.4 Gpc³)の中に見つかった圧倒的多数(約58万個)の遠方銀河からなるサンプル。このサンプルを用いれば、遠方銀河を使った宇宙論的な研究ができるようになる。SDSSなどが $z=0$ で行っていた宇宙論的な銀河研究を、遠方宇宙($z=4-7$)で行うことができるのだ。HSCによって、新しい研究分野への扉が開

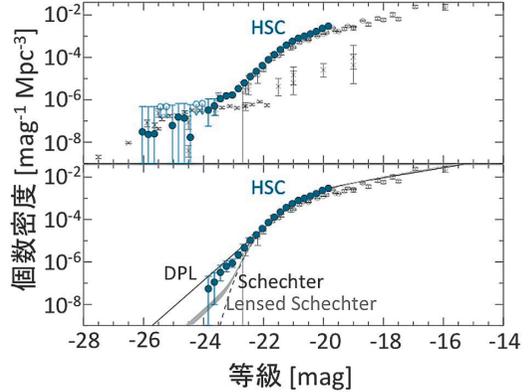


図2 上段) HSCサンプルにより得られた $z=4$ の銀河の光度関数(青丸¹⁾). 横軸の等級は静止系紫外線等級. 白抜き黒丸(クロス)は、銀河(AGN)の光度関数で、従来の研究の結果. 下段) 青丸印は上段と同じだが、AGNの寄与を差し引いた場合の光度関数. 白抜き黒印は従来の研究で得られた銀河の光度関数. 曲線は、観測結果に最もよく合うダブルパワーロー(DPL; 黒実線)、シェヒター関数(黒鎖線)と重力レンズ効果入りのシェヒター関数(灰色帯).

かれたのである。この扉から出てきた研究の一部をここで見ていきたい。

一つ目の結果は光度関数である。図2上段の青丸は、HSCのサンプルから求めた $z=4$ 銀河の光度関数である¹⁾。静止系紫外線の波長域で見たもので、宇宙の星形成史と関係する重要な観測量である。HSCの測定結果は、誤差がとても小さいうえ、非常に密にデータ点が存在し、過去の研究と比べ物にならない精度である。そして、図2において、過去の結果と比べると、活動銀河核(AGN)の光度関数(図2上段の左側部分)と、銀河の光度関数(図2上段の右側部分)の間の測定が不連続になっていたのだが、HSCの結果(青丸)によってこれらを橋渡しすることに成功した。そして、分光データに基づいてAGNの光度関数を差し引き、純粋な銀河の光度関数を求めたところ(図2下段)、これまで一般的に言われてきたシェヒター関数(重力レンズ効果を含む)では、説明できず、明るい側に超過が見つかった。

た。明るい側の超過は、星形成のフィードバック効果が大量暗黒物質ハローにおいて弱くなっている可能性があり、銀河形成に対する重要な知見が得られた。この光度関数を報告したOnoらの論文¹⁾が発表された直後、オランダのライデン大学のRychard Bouwens准教授から私たちのグループにメールが届いた。Bouwens准教授と言えば、ハッブル宇宙望遠鏡による遠方銀河の光度関数の研究で大成した研究者で、観測理論問わず、遠方宇宙の研究では知らない人はいない、超がつくほどの有名人である。メールの差出人の部分に彼の名前を見たときは、何かまずいことでもあったのか、と思った。Bouwens准教授のメールを恐る恐る開くと、そこにはOnoらの論文を読んだことが書かれ、次のような文章が続いていた“Your figures showing the transition between the galaxy and quasar luminosity function regimes will likely appear in many textbooks and reviews for many years to come.”つまり、「HSCにより求められた光度関数が、長い間、多くの教科書やレビューに掲載されるだろう」と分析めいた文言で、賛辞が送られてきたのである。これを見て、私たちは大いに勇気づけられたのだ。

二つ目の結果は、遠方銀河の2体角度相関関数(相関関数)である。現在の宇宙における銀河の分布は、空間的に偏りがあり、銀河群や銀河団、大規模構造といった構造を作っている。この構造は、一般的な構造形成モデルである、ラムダ・コールド・ダークマター(Λ CDM)モデルが予言する暗黒物質ハローの分布で説明できることが知られている⁴⁾。構造形成で基本量となるのが銀河の個数密度と空間分布の二つである。これらは、銀河の光度関数と相関関数といった二つの観測量に対応するため、これらを Λ CDMモデルと比較して、銀河が付随する暗黒物質ハロー(DMH)の質量 M_h とDMHへの質量降着率 \dot{M}_h を推定することができる。このような研究は、近傍の銀河に対してSDSS探査により盛んに行われ

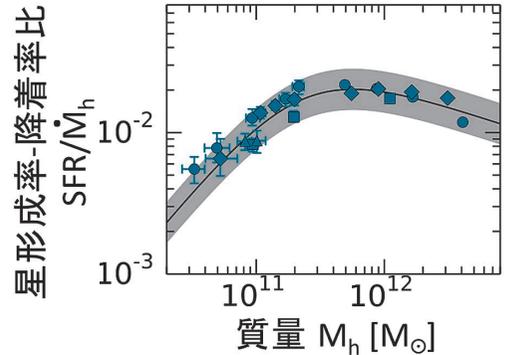


図3 SFR/ \dot{M}_h - M_h 関係。青色の丸と菱形、四角、三角は、HSC探査による、それぞれ $z=4, 5, 6, 7$ における結果^{6,7)}。黒線と灰色領域は、HSC探査で見つけられた星形成の普遍的関係とその誤差範囲。

てきたのだが⁵⁾、HSCの遠方銀河サンプルを用いれば、初期の銀河に対して、SDSS探査と同じような精度で測定できる。そして、HSCで得られた光度関数についてはすでに述べたとおりである。相関関数とは言う、銀河分布を測定して求めた結果、極めて高い精度で得られた^{6,7)}。これまで捉えることが難しかった非線形効果をもたらす相関関数の膨らみも有意に検出できた⁷⁾。さらに、これらの観測量と銀河光度から星形成率(SFR)を見積もると、図3のような星形成率-降着率比(SFR/\dot{M}_h - M_h)関係が得られた。この図の縦軸は、銀河へ降着した物質が星になる割合であり、横軸は銀河が存在するDMHの質量である。HSC探査から求めた SFR/\dot{M}_h - M_h 関係は、 10^{11} - $10^{12} M_\odot$ にピークがある曲線である。そして、驚くべきことに $z=4$ から7までの違いは0.2-0.3 dex以内である。従来の研究で求められた、近傍($z=0$)の宇宙の SFR/\dot{M}_h - M_h 関係と比べても、誤差の程度でしか違いがない。つまり、赤方偏移によらない星形成の普遍的な関係が SFR/\dot{M}_h - M_h にあることがわかった。(以後、これを SFR/\dot{M}_h - M_h 関係と呼ぶ。) SFR/\dot{M}_h - M_h 関係の意味するところは、銀河の質量 M_h が決まれば、降着するガスの量に比例して星が作られることになるの

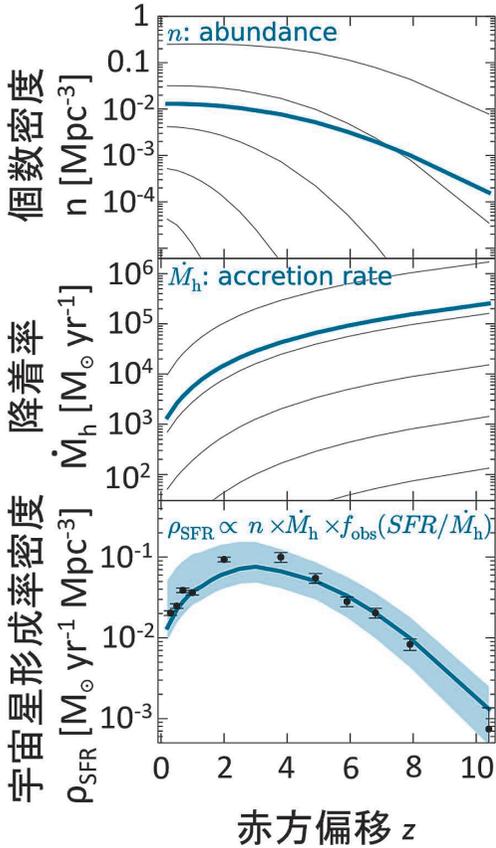


図4 上段と中段は、 Λ CDMモデルに基づく計算結果で、それぞれ暗黒物質ハローの個数密度進化と質量降着率。上段(中段)の灰色曲線は、上から(下から)順に、 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} 太陽質量の暗黒物質ハローの結果。青曲線は、重み付け平均。下段は、HSC探査で得られた SFR/\dot{M}_h-M_h 関係 $f_{\text{obs}}(SFR/\dot{M}_h)$ に個数密度進化(上段)と質量降着率(中段)を用いて求めた宇宙星形成率密度の進化(青線)とその不定性(青色領域)。黒印は、過去の観測研究で直接的に星形成率密度の進化を測った値⁷⁾。

だが、この比例計数が赤方偏移によらないことになる。言い換えると、質量 M_h をもつ銀河において、ガスから星への変換量は、降着するガスの量だけで決まり、宇宙の時代によらない。この結果は、宇宙の各時代を通して、ガス降着が星形成を決定づける根本的な物理メカニズムであることを意味する。さらに興味深いのは、 SFR/\dot{M}_h-M_h 関

係がMadauプロットとして知られる宇宙星形成率密度の進化⁸⁾を説明できる点だろう。 SFR/\dot{M}_h-M_h 関係が、宇宙初期から成り立つ場合、 Λ CDMの構造形成モデルが预言する①暗黒物質ハローの質量 M_h -個数密度の関係(図4上段)と②質量降着率 \dot{M}_h (図4中段)の組み合わせで、Madauプロットが求められる(図4下段;青線)。ここで、過去(高赤方偏移)から現在($z=0$)に向けて、①は増加関数となっており、暗黒物質ハローの個数密度が増えていること、②は減少関数になっており、宇宙の密度が減少するに伴って暗黒物質ハローへの質量降着率が減っていること、が見取れる。これらを過去の観測研究で直接測定された宇宙星形成率密度(黒印)と比較すると、赤方偏移2-3にピークがあるという特徴的な傾向を含めて、誤差の範囲で非常によく一致していることがわかった。この結果は、HSC探査により得られた SFR/\dot{M}_h-M_h 関係が、 Λ CDMの枠組みでMadauプロットを説明できることを意味する。そして、赤方偏移2-3にピークができる原因が、初期の宇宙から $z\sim 2-3$ にかけて①暗黒物質ハローが多くなり、 $z\sim 2-3$ から現在にかけて宇宙の密度が減少するのに伴って②質量降着率が少なくなる、という二つの物理メカニズムが主に働いていることが明らかになったのである。

紙面の都合で、詳しく紹介するのはここまでにせざるを得ないのだが、ほかにもHSC探査によって非常に重要な結果が得られている。まずは、原始銀河団についての研究⁹⁾である。遠方銀河の分布のうち、数Mpcの円内に、遠方銀河の密度が有意に高い部分(密度超過)を原始銀河団と呼ぶ。遠方銀河の密度超過が原始銀河団と呼ばれる理由は、 Λ CDMモデルの枠組みで考えると、現在の宇宙に見られる銀河団の祖先は、遠方銀河の密度超過が祖先である確率が高いためである¹⁰⁾。しかしこれまで、遠方銀河の密度超過が、本当に銀河団の祖先なのかは、明らかでなかった。そこでHSCの研究では、遠方銀河サンプル

のうち検出数が多い $z=4$ の銀河に基づいて、216カ所もの密度超過を見つけた。100を超える密度超過が得られたため、初めて密度超過同士の自己相関関数を求めることに成功した。得られた自己相関関数と個数密度の両者は、 Λ CDMモデルが予想する銀河団（大質量暗黒物質ハロー）の祖先と矛盾なく説明されることがわかった。自己相関関数の結果が加わることで、遠方銀河の密度超過の大半が、銀河団の祖先であることを強く裏づける結果となった⁹⁾。さらに、これらの密度超過とAGNの関係を調べたところ、100個に1個くらいの密度超過にしかAGNが見つからなかった。そのため、銀河団の祖先において、銀河核の活動が活発になりAGNになるわけではないという示唆が得られた¹¹⁾。一方で、AGNペアと密度超過の間関係はこれとは違ったものになっているという面白い結果も出されている¹²⁾。銀河の密度超過とAGNの結果については、分野境界領域の研究であり本特集の長尾透さん（愛媛大学）の記事（次号掲載予定）で紹介されているので、そちらをご覧ください。

4. 12年間に出した知恵と汗

このように、HSC探査によって新しい次元の遠方銀河研究が始まった。ここまでに述べた結果は、広帯域バンド画像から選ばれた（星の連続波を元に出された）遠方銀河である。HSCの前世代装置にあたるSuprime-Camは、狭帯域バンドを使って、赤方偏移したLy α 輝線を捉えて多くのLy（ライマン） α 輝線銀河（LAE）¹³⁾を検出していた。そして、Suprime-CamはLAEの研究で大きな成功を収めた¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。HSC探査のLAE研究においても狭帯域バンド観測が行われ、遠方銀河研究分野に大きな衝撃を与える結果が出ている。ここからは、HSC狭帯域バンド観測の研究とそれに至る道のりについて紹介したい。

時は2006年春まで遡る。ワシントンDCで開かれた会議での出来事だった。この会議では、マ

ゼラン望遠鏡の撮像装置に狭帯域フィルターを搭載し、遠方銀河の複数の輝線を狭帯域バンド撮像で検出する取り組みについて話し合われた。LAEの中にはAGN、さらには初期銀河に近い（低金属量）銀河が含まれており、これらの輝線を狭帯域バンドで捉えることで、数あるLAEの中からAGNや初期銀河候補天体を見つけようというものだった。ここで重要になるのは、ある赤方偏移の銀河が出す輝線を、複数の狭帯域フィルターで捉えて、候補天体を見つけるべきであるという議論だった。例えば、2枚の狭帯域フィルターを中心波長をうまく調節して、ある赤方偏移の遠方銀河のLy α （静止系1,216 Å）とC IV（静止系1,548 Å）輝線の両方を捉えて、AGN候補を見分けるといったものである。ただし、複数枚の狭帯域フィルターの波長は、大気夜光輝線を避けつつ、大気透過率のよい波長域に入らなくてはならない。

2枚の狭帯域フィルターで二つの輝線を捉えるというのは、20世紀末にも行われていた観測手法で、特段新しいアイデアではないのだが、これを3枚以上にして、Ly α とC IVだけでなく、He II（静止系1,640 Å）、さらには宇宙再電離の源となるライマン連続光を同時に捉える狭帯域フィルターのセットを用意すれば、新しい狭帯域撮像探査を行うことができる。

当時はまだHSCの話は具体化していなかったので、まずはSuprime-Camで、どこまで効率的な狭帯域フィルターのセットができるか考えるべきである。早速、Suprime-Camの狭帯域フィルター作成で大きな手腕を発揮された嶋作一大さん（東京大学）に連絡を取り、狭帯域フィルターの設計試案（NB試案）を検討した。

この検討に課せられていた境界条件は多岐にわたる。できるだけ少ない数の狭帯域フィルターで異なる赤方偏移の輝線やライマン連続光を捉えることはもとより、i) 狭帯域フィルターがカバーする波長域で大気透過率が高いこと、ii) 狭帯域

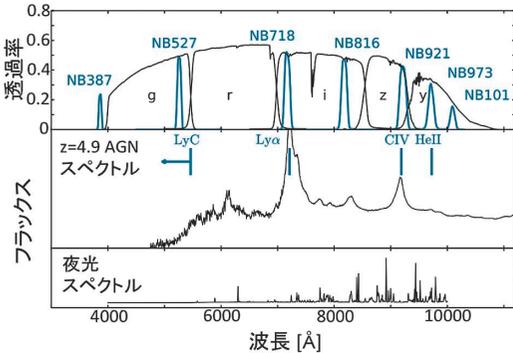


図5 上段) 狭帯域フィルターの透過率曲線(青線). NB試案に基づき作成された実際のHSC狭帯域フィルターの透過率曲線. 黒線はHSC広帯域フィルターの透過率曲線. 中段) $z=4.9$ AGN(銀河)のスペクトルの例. 左から順にライマン連続光(LyC), $Ly\alpha$, C IV, He IIのシグナルに対応する波長. 下段) 地球大気夜光スペクトル. 中段と下段のフラックスは任意の値.

フィルターの波長は、夜光が弱いこと、iii) 一番低赤方偏移側を狙う狭帯域フィルターのLAEは、赤方偏移した主要輝線($H\alpha$ や $[O II] 3727$)が観測条件に優れている(高い大気透過率と低い夜光)といった条件もあり、検討は困難だった。この困難を乗り越え、ようやく図5のような美しいNB試案を得た。狭帯域フィルターを7枚だけ用意すれば、1) $z=3.3$ と4.9のLAEとそのライマン連続光が観測でき、2) $z=2.2, 3.3, 4.9$ のLAEのHe IIが観測でき、3) $z=4.9$ についてはC IVも得られライマン連続光と $Ly\alpha$, C IV, He IIの四つのスペクトルの特徴がすべて同時に捉えられる。さらに、 $z=2.2-7.3$ という幅広い赤方偏移範囲のLAEをカバーできる。このNB試案は当初Suprime-Camの将来探査のためのものだった。しかし、HSC装置プロジェクトが始動したことを境にHSCの狭帯域フィルターの設計に生かせることになった。このNB試案をSuprime-Camより広大な視野をもつHSCで実現すれば、夢のような研究が実現できるかもしれない。

2008年頃になると、HSCの狭帯域フィルターの作成と運用に関する有志の話し合いが何度も行

われた。国内外に散らばるメンバーのため、TV会議による話し合いだった。この中で、HSC狭帯域フィルターの試作を始めていた林野友紀さん(東北大学)は、議論をリードした。このころ林野さんたちは、国立天文台とメーカーからの協力を取り付け、基礎技術の開発に力を注いでいた。そして2009年には、HSC用の大型(直径60 cm)のフィルター基板に対して干渉膜を蒸着し、約1%以下の波長精度を達成する技術を確認した。これで、技術面の懸念はすべて取り除かれたのだった。

林野さんたちの技術検討は、HSCの狭帯域フィルターの作成へ向けた大きな一歩だった。しかし、目の前には次なる壁があった。資金である。狭帯域フィルターの干渉膜蒸着はとても難しく、歩留まりが悪いため、予想される作成価格は狭帯域フィルター1枚につき1-2千万円だった。科学の興味に応じて、各人が狭帯域フィルターを作っている、いくらお金があっても足りない。有志の話し合いを通じて、HSCの狭帯域フィルターを作る場合はお互いに連絡を取り合い、同じフィルターを異なるグループで作るといった無駄をなくすことで合意した。また、この会議によって、私たちが細々と進めていたNB試案が広く共有された。LAE研究を進める谷口義明さん(当時愛媛大学、現放送大学)、ライマン連続光の研究を進める岩田生さん(国立天文台)と井上昭雄さん(大阪産業大学)をはじめとする方たちと力を合わせて、研究費を獲得し、HSCの狭帯域フィルターを作成することになった。NB試案は、いつしか試案ではなくなり、私たちの目標になっていった。

それから間もなくして、谷口義明さんからうれしい知らせが届いた。「愛媛大学の資金を獲得して、2枚のHSC狭帯域フィルターが作れるようになった。」行動力のある谷口さんらしく、資金獲得第1号を飾ったのだった。この資金はどの狭帯域フィルターにも使えるものだった。そこで私は

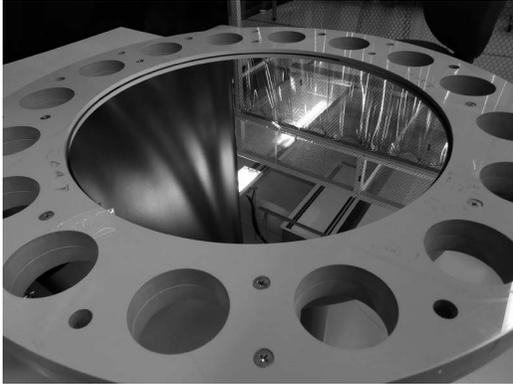


図6 完成した狭帯域フィルター NB921¹⁷⁾.

谷口さんをお願いをした。「今後、狭帯域フィルターの資金集めは科研費を通して行うこととなります。NB387などの短波長側はライマン連続光を目標とした研究、さらにNB101などの長波長側は宇宙再電離研究を目標とした研究として科研費を申請すれば予算の獲得は堅いでしょう。一方で、中間波長帯に位置するNB718とNB816フィルターの申請は、科学的インパクトを強調しにくく、科研費の申請が難しいです。申しわけないですが、谷口さんに科研費申請の難しいNB718とNB816フィルターの作成をお願いできませんか？」この言葉に対して、谷口さんは、即答した。「じゃあ、愛媛ではNB718とNB816を作ります。」その後は順に、大内がNB921¹⁷⁾とNB973、嶋作さんがNB101とNB387、岩田さんがNB527と研究費の獲得ラッシュに湧いた。谷口さんの大局を見た判断が、HSC狭帯域フィルター7枚の完成を大きく後押ししたのである。資金獲得後、すぐに作成を始め、各フィルターについて約1年の時間はかかったものの、狭帯域フィルターは次々と完成していった(図6)^{*1}。

このようにしてできた狭帯域フィルターは、名前をあげられないほど多くの学生や若手研究者た

ちの手で、性能評価がなされた。その中でも、HSCフィルターの透過率測定装置の整備をし、狭帯域フィルターの受け入れ作業をされた川野元聡さん(国立天文台)の活躍は特筆すべきもので、狭帯域フィルター観測を実現するうえで不可欠だった。さらには、狭帯域フィルターの性能のまとめを作成された当時愛媛大学の小林正和さんと塩谷泰広さんの貢献も観測研究を遂行するうえで重要だった。このように、多くの人が力を合わせて、狭帯域フィルターが完成した。

狭帯域フィルター作成と同時に進んだのが、理論モデルの構築である。HSCの狭帯域フィルターによる観測では、宇宙再電離期として知られる、赤方偏移 $z=6$ を超える時代を従来の10-100倍の体積で探査できる。HSCであれば、宇宙再電離期にあるとされる非常に大きい(最大100 Mpc程度)電離バブルを余すところなく捉える探査が行えるため、宇宙再電離に関する研究が大きく進むことは容易に予想ができた。このような研究で結果を最大限に引き出すには、理論モデルと比較することが必須だ。当然ながら、HSCの超広領域観測と比較する理論モデルも、大きな領域(体積)をもつシミュレーションが要求され、従来のモデルでは不十分だった。

2011年に獲得した科研費の研究分担者を核として、有志の観測家と理論家が、定期的集まり議論を始めた。理論家の梅村雅之さんと森正夫さん(筑波大学)、井上さん(前出)、長谷川賢二さん(名古屋大学)がこの活動を牽引してくださった。「HSC観測の結果と比較できる理論モデル」を合言葉に、私たち観測側からは、予想されるHSC観測データを理論家に提示し、それに対応するモデル構築について議論した。この理論とのタイアップが、後に出るHSC観測の結果を物理的に理解するためのエンジンとなった。このよう

*1 HSC狭帯域フィルターの正式名称は、NBと4桁の数字を使ったもの(例えばNB0921)である。しかし、設計時はNBと3桁の数字(例えばNB921)を使った名称を用いていた。図6およびこれ以降の文章においても、対応関係が明確になるように、設計時の名称を用いた。

にしてHSCの狭帯域フィルターによる研究の準備はすべて整った。あとは観測を行うのみであった。

5. 予想外のHSC狭帯域観測

2012年10月24日、私は渋谷駅の雑踏の中にいた。東大駒場キャンパスでの講義を終え、帰宅する途中だった。スマホを片手にメールをチェックするとNBという文字が目飛び込んできた。すばるHSCの狭帯域バンド(NB)の観測に関するメールで、HSC装置プロジェクトの理事会の決定内容を伝えるものだった。私はメールを一読して肩を落とした。

当初、すばるHSC探査のプロポーザルに含める予定だった狭帯域フィルター(図5)を減らし、最も短波長側にあるNB387と長波長側のNB816, NB921, NB101の四つの狭帯域フィルターだけにして、宇宙再電離研究をメインに据えたプロポーザルにせよ、という決定事項が伝えられた。このとき、観測提案書の提出締切が1週間後に迫っていたが、狭帯域フィルター作成をしていた嶋作さん、岩田さん、井上さんらと力を合わせて、観測計画の再検討に大急ぎで取り掛かった。HSC探査計画に協力し、数値やサイエンスの目標も大きく改訂した。幸い、翌年4月にHSC探査が認められ、狭帯域フィルター4枚の観測は保証され、安堵した。狭帯域フィルター7枚の観測ができなかったのは残念だったが、当時は4枚だけでも狭帯域フィルターの観測を実行できるよう努力するのが精一杯であった。残りの狭帯域フィルターの観測については、その後に狭帯域フィルター作成者が協力して、すばるインテンシブ・プログラムCosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru (CHORUS: 代表井上さん)で実現することになった。

観測提案から約2年後、ついにHSCによる狭帯域フィルター観測が行われ、最初の狭帯域バンド画像が得られた。整約された画像を見ている

と、その広大な探査領域に私たちは目を奪われた。そして、この瞬間から、HSC狭帯域バンドの巨大画像との戦いが始まった。初期の観測ではNB816とNB921と名づけられた $z=5.7$ と 6.6 の遠方銀河LAEを狙った狭帯域バンド画像が得られた。狭帯域と広帯域バンドの色から、強いLy α 輝線を示す天体であるLAEを選び出す。慎重な作業が要求される。ここで、すばるSuprime-Camでの観測経験が豊富な澁谷隆俊さん(現・北見工業大学)が、リーダーシップを発揮して、大車輪の活躍を見せた。澁谷さんは、多バンドの測光値(スペクトル・エネルギー分布)をもとにLAEを選んだ。すると20万個のソースが選ばれた。「こんなにたくさんLAEがあるはずはない。」案の定、これらを目で確認すると、ほとんどが偽天体だった。例えば、人工衛星や流星、明るい星が作るハローの境目で、測光がおかしくなっている天体などである。20万個のソースを一つひとつ目で確認して除いていく。過去にも、Suprime-Camの狭帯域バンド画像からLAEサンプルを作る際には同じように目で確認する作業があった。しかし、データが大きい分、HSC探査で要求される作業量は桁違いに多い。この作業は機械学習などで自動化することも検討すべきだが、手法を確立するのに時間がかかる恐れがあった。そこで澁谷さんは、この途方もない数の天体を一つひとつ目で確認して取り除いていったのだった。途中から大学院生の樋口諒さん(東京大学)らの学生も参加し、作業は加速したものの、この作業のほとんどは澁谷さんによって成されたものである。澁谷さんの粘り強い取り組みは、来る日も来る日も続けられ、最終的には約2カ月の時間を費やした。単純作業で苦痛を伴う作業を、澁谷さんが血のにじむような努力で乗り越えたことは想像に難くない。

このようにして、 $z=5.7$ と 6.6 という遠方にあるLAEを合計2,230天体も見つけたのである¹⁸⁾。これまでのLAEサンプルの10倍にもなる。しか

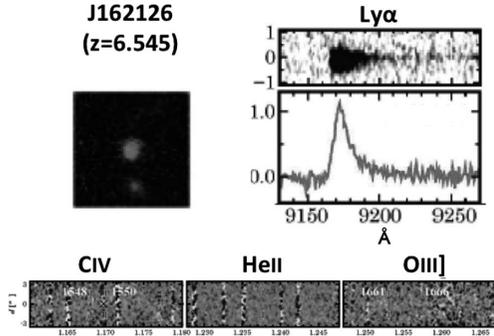


図7 追観測で得られたスペクトルの例 (J162126 LAEについて). 左上パネルはJ162126 LAEの画像, 右上パネルは可視光スペクトルで, $z=6.545$ に対応する波長で $\text{Ly}\alpha$ 輝線が検出されている. 下パネルは, C IVとHe II, O III]の波長域における近赤外線スペクトル¹⁹⁾.

も, 探査面積は赤方偏移 $z=6-7$ において 0.5 Gpc^2 という桁外れに大きいものだ. これを見て, 宇宙再電離をはじめとする遠方宇宙の研究が大きく前進する違いないと確信した.

さらに澁谷さんのリーダーシップのもと, LAEの分光追観測が進められた. HSC広領域探査で検出されたLAEはこれまで見つけれられたものよりも明るい. これを利用して, $\text{Ly}\alpha$ 輝線の可視光分光同定だけでなく, より観測が難しい高電離の金属輝線 (以下, 高電離輝線と呼ぶ) も近赤外線分光で検出を目指すという野心的なものだった. この近赤外線分光で得られたスペクトルを図7に示す. 過去の研究結果も合わせて, 分光同定できたLAEは約100天体になり, LAEサンプルの信憑性の試験がより高い精度で行えるようになった. さらに, 観測された明るいLAEの高電離輝線は非常に弱いこともわかった. 過去の暗いLAEに対する観測結果と合わせることで, 明るさに反相関する形で高電離輝線が弱まることを発見した¹⁹⁾. 高電離輝線は低金属量の銀河ほど強くなること, さらに銀河の明るさと質量が比例するので, この分光結果は, 赤方偏移 $z=6-7$ という早い時代の銀河でも, 質量-金属量関係が存在していることを示唆し, とても面白い.

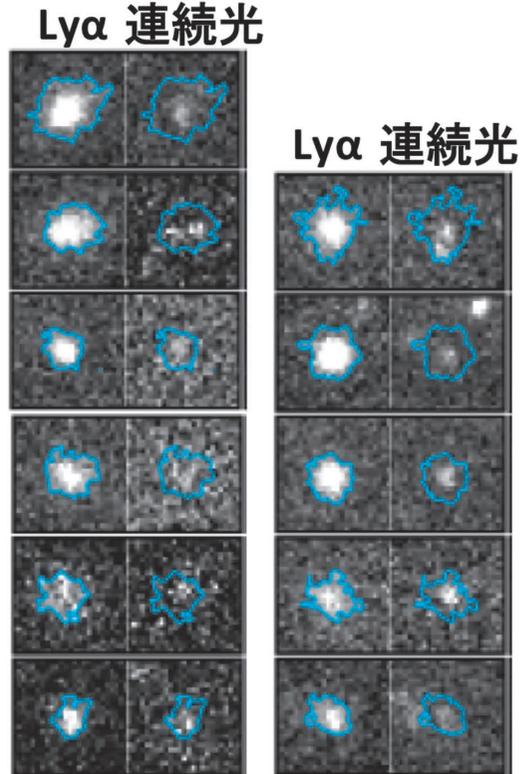


図8 11個の $\text{Ly}\alpha$ ブロープの $\text{Ly}\alpha$ および連続光を含むバンドの画像¹⁸⁾. 青色の曲線は, 各天体の $\text{Ly}\alpha$ の画像での等輝度線.

さらに, LAEの狭帯域バンド画像 (一部はスペクトル) をよく調べると, $\text{Ly}\alpha$ ブロープと呼ばれる, $\text{Ly}\alpha$ 輝線が 10 kpc 程度に広がるLAEが検出されていることに気づいた. しかも, 赤方偏移 5.7 と 6.6 で合わせて11天体も見つかった¹⁸⁾のである (図8). 赤方偏移 $z=6-7$ という初期の宇宙において, $\text{Ly}\alpha$ ブロープは, $z=6.6$ のHimiko²⁰⁾やCR7²¹⁾などが発見されており大きく広がる $\text{Ly}\alpha$ 輝線の物理的起源については多くの議論がなされてきている. しかし, その統計的性質はまだわかっていない. HSCで検出された11個の $\text{Ly}\alpha$ ブロープと探査体積を考えると, 個数密度にして, 10^6 から 10^7 Mpc^3 の探査にたった1個くらいしか $\text{Ly}\alpha$ ブロープが存在しないことがわかる. 従来の小さい探査領域では, なかなか見つからなかったこと

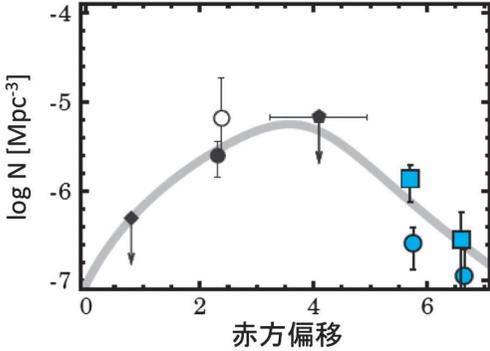


図9 Ly α プローブの個数密度の赤方偏移進化¹⁸⁾. 青印がHSC探査により得られた赤方偏移 $z\sim 6-7$ のLy α プローブの個数密度. 黒印は過去の観測に基づく低赤方偏移側の結果. 灰色の帯は、低赤方偏移側から高赤方偏移側の観測点を説明する進化曲線.

も領ける. この個数実度を低赤方偏移におけるLy α プローブのそれと比較してみたのが図9である. ここでは、各サンプルの表面輝度限界やサイズの定義の違いを考えずに、個数密度進化をざっくり描いている. 図9を見ると、あたかも、宇宙星形成史の図(Madauプロット⁸⁾)のように赤方偏移 $z=2-3$ あたりでピークがあるように見える. Ly α プローブのような広がったLy α 輝線が、銀河の星形成活動と物理的に関係していることを示唆している. HSCの大規模データの統計研究によって、新たなアプローチで天体の起源に迫ることができることを予感させる結果である.

以上のように、HSCのLAEサンプルに基づく研究で、銀河形成に関する知見が得られた. しかしLAE研究の一番の醍醐味は、宇宙再電離が調べられることだろう. 宇宙再電離期($z\sim 6-7$)の銀河間物質には中性水素ガスが残っている. この中性水素ガスが、量子論的效果を起源とするLy α より長波長側の吸収(ダンピングウイング吸収)をもたらす. LAEのLy α 輝線は暗く観測される. 銀河間物質中の中性水素の量によって、吸収の量が変化し、観測されるLy α 輝線の強度が変わる. そのため、Ly α 輝線をたよりに、宇宙再電離の歴

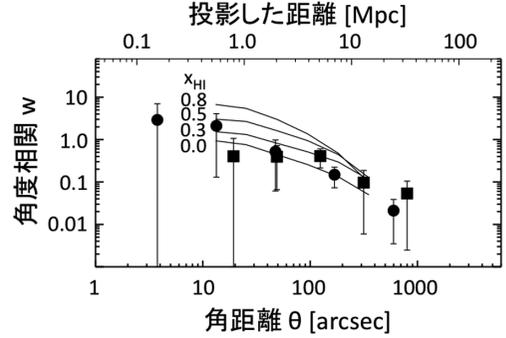


図10 LAEの2体角度相関関数¹⁷⁾. 黒塗印は測定値. 4つの黒線は、数値シミュレーションの予測で、下から順に $x_{\text{HI}}=0.0, 0.3, 0.5, 0.8$ に対応する. HSCの観測結果は低い値の x_{HI} を支持している.

史(宇宙再電離史)を知ることができる. これまでもLAEを使った宇宙再電離研究は多く行われてきたのだが、探査体積が小さく、宇宙再電離にあるとされる巨大な電離バブルを完全にサンプルできていない可能性が指摘されていた. HSC探査のように 0.5 Gpc^2 と広い範囲の観測を行えば、電離バブルを約30個以上サンプルできることになり、宇宙再電離史の平均像に迫ることができる. また、電離バブルの中にある銀河から出されるLy α 放射は中性水素の吸収を受けずに観測されやすくなる効果もある. この効果により、LAEとして観測される銀河の空間分布は、実際のLAEの空間分布よりも粗密が大きくなり、LAEの2体角度相関関数が強くなると予想される. 2体角度相関関数も合わせれば、宇宙再電離時代に理論的に予言されている電離バブルが本当に存在するかどうか調べることができる. HSCのデータに基づいてLAEの2体角度相関関数の測定を行うと、宇宙再電離後の時代($z=5.7$)と比べて $z=6.6$ で2体角度相関関数の有意な増加は見られず、電離バブルが存在しても、影響は小さいことがわかった(図10)¹⁷⁾. これは、 $z=6.6$ が宇宙再電離の末期であることを強く示すものである. さらに、HSC探査により、これまででない高い

精度で測定した光度関数の結果²²⁾を合わせると、 $z=6.6$ では、宇宙の中性水素割合 x_{HI} は $z=6.6$ で 20%程度ほどしかなく、 $z\sim 6.6$ から宇宙再電離が終了した $z\sim 6$ までの最末期における宇宙再電離進化は非常に穏やかなものだったとわかった。

そして、HSC観測へ向けて続けられてきた理論モデルの構築(4章参照)が、ここで力を発揮した。長谷川さんは、理研の京コンピュータで作られた宇宙論的規模の質量分布をベースにして、大規模な輻射流体計算を行い、銀河とその周りに広がる銀河間物質の電離状態を与えた。ここで井上さんがモデルで得られた銀河に対して、解析的なアプローチで Ly α 輝線の強度を与えた。このような、モデル銀河を疑似観測することで、HSC観測で得られた LAE の 2 体角度相関関数と Ly α 光度関数を同時に説明するモデルを探したのである。その結果、 $z=6.6$ における x_{HI} は 40%未満となり、前出の結果を裏づけた。そして、この手法を過去の Suprime-Cam で得られた $z=7.3$ のデータも合わせた結果、 $z=7.3$ の時代の x_{HI} は 50^{+10}_{-30} % で、宇宙再電離史の中間の時代であることが分かった²³⁾。完璧に作り込んだモデルによりモデルの不定性の取りうるパラメータ空間をしっかりと決めたことから、高い信頼性のある結果と言える。

また、HSCの LAE 研究では、スピッツァー宇宙望遠鏡の大規模観測プロジェクト Spitzer Large Area Survey with Hyper-Suprime-Cam (SPLASH プロジェクト²⁴⁾) との共同研究が大きな力を発揮した。SPLASH プロジェクトは、2012年に John Silverman さん(カブリ IPMU)が橋渡しをする形で、カリフォルニア工科大学の Peter Capak さんを中心とするグループに HSC 探査メンバーが協力する形で始められたプロジェクトである。SPLASH は、HSC の超深探査領域のほぼ全体を、3-5 μm における 2 バンドの近赤外線撮像でカバーした。大規模観測の強みを生かして、長時間積分のマッピングを行い、限界等級で 25-26 等級に達

する深い撮像データが得られた。SPLASH データの解析は、アメリカの共同研究者が中心となり進められた²⁵⁾。一方で、HSC 探査メンバーは、SPLASH との共同研究でどのような研究を主導したのだろうか? ここでは、図 4 の研究で結果を出した播金さんが再び登場する。播金さんたちは、HSC の LAE に対し、SPLASH データを合わせて 0.4-5.0 μm の観測波長範囲でスペクトルエネルギー分布を詳しく調べた。これは、遠方銀河の研究において、大きな意味がある。赤方偏移 $z=6-7$ の LAE の静止系可視光 (0.4-0.7 μm) は、観測波長で 3-5 μm 程度の赤外線になり、地上観測では十分な感度を達成できず、シグナルが得られない。そのため、遠方銀河の静止系可視光のスペクトルは、NASA の次世代宇宙望遠鏡 JWST の打ち上げ(2021 年を予定)を待たないと得られない、というのが業界の常識である。しかし、SPLASH の撮像データ(観測波長 3-5 μm) を HSC の LAE サンプルに対して用いれば、静止系可視光 (0.4-0.7 μm) の様子が調べられる。そして、LAE のような輝線の強い天体では、赤方偏移によるスペクトルの引き伸ばしの効果(輝線の等価幅が宇宙膨張により $[1+z]$ 倍になる効果)で、SPLASH の撮像データから得られた測光値の大半が、静止系可視光の強輝線である H α (6,563 \AA) や [O III] (5,007 \AA) の寄与になる。SPLASH データの測光値を利用すれば、静止系可視光の輝線フラックスの見積もりができる。

このようにして、播金さんらは、LAE の静止系可視光における強輝線のフラックス比や等価幅の値を得た。撮像データには、輝線に加えて、連続光による寄与がある。播金さんたちは、輝線と連続光を同一の物理パラメータで予言する BEAGLE モデル²⁶⁾の開発グループの協力を得ながら、連続光の不定性もしっかりとエラーに入れた。さらに、ALMA 望遠鏡のミリ波観測で得られた [C II] 158 μm 輝線の強度も比較に用いた。その結果、図 11 の a) から c) に示す三つの輝線比お

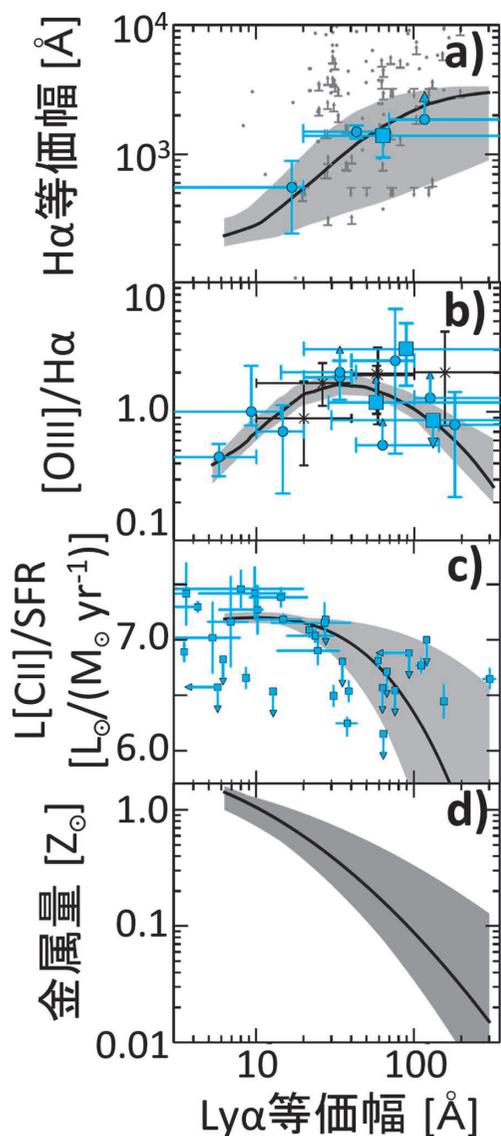


図11 $\text{Ly}\alpha$ 等価幅と各物理量との関係. 青印がHSCとSPLASHデータから得られた結果. a) $\text{H}\alpha$ 輝線等価幅. b) $[\text{O III}]/\text{H}\alpha$ 輝線比. c) ALMAにより得られた $[\text{C II}]$ 輝線光度を星形成率で割った割合. d) 金属量. モデルに対して与えられた金属量と $\text{Ly}\alpha$ 等価幅関係を黒線と灰色領域で示す. ここで, a)-c)の黒線と灰色領域は, d)のモデルを仮定した場合の結果. d)のモデルによりa)-c)の三つの関係がすべて矛盾なく説明できる. This figure is reproduced by permission of the AAS.²⁷⁾

よび等価幅の関係を導いた. 統計テストによると, 三つの関係には, いずれも有意な相関が見られた. これら三つの関係は, 何を意味しているのだろうか? 銀河が取りうる星種族(星年齢や金属量, 減光量など)と電離雲の状態(電離パラメータ, 金属量など)を, 星種族と光電離の合成モデルBEAGLEで再現して, 三つの関係が成り立つ物理パラメータを探した. その結果, 図11のd)のように, 銀河の金属量と $\text{Ly}\alpha$ 等価幅が反相関している場合, どのようなパラメータの組をとっても, この三つ関係が成り立つことを見出した²⁷⁾. 「金属量と $\text{Ly}\alpha$ 等価幅が反相関」という反相関関係は, 銀河研究者であれば, 驚きの結果ではない. しかし, この関係が赤方偏移 $z=5-7$ という初期の宇宙で成り立っていること, さらに一つの反相関関係で, 図11のa)-c)の三つの関係すべてを説明できるとわかったときは, 目から鱗が落ちる思いであった. このようにして, HSCのLAEサンプルとSPLASHのデータを組み合わせ合わせたおかげで, JWSTの打ち上げを待たずして, JWSTで出されるような研究結果を得たのである.

6. 論文の出版ラッシュ

HSC探査データを用いた遠方銀河研究は, 多くの論文にまとめられた. 特に, ここで述べた銀河カタログ¹⁾とLAEカタログ¹⁸⁾を用いた研究は, それぞれゴールドラッシュ(Great Optically Luminous Dropout Research Using Subaru HSC; GOLDRUSH)とシルバーラッシュ(Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC; SILVERRUSH)というプロジェクト名が与えられた. これらのプロジェクト名は論文の主著者である学生や研究員らがアイデアを持ち寄り, 30以上の名前の候補から1週間の議論を経て決められたものである. 若手研究者の知恵の結晶と言うよ^{*2)}.

このようにして、GOLDRUSHとSILVERRUSHを冠する論文は、すでに10編にまとめられ、この1年くらいの間にすべて出版された。これにとどまらず、現在査読中や準備中の論文が続々と続き(例えばHiguchiら²⁸⁾), まさに論文の出版ラッシュとも言えるだろう。

7. これから

HSC探査の遠方銀河研究は、さまざまな方面に広がりを見せつつある。多波長観測の国際協力研究として、SPLASHプロジェクトが行われたことは5章で述べたとおりだが、これと並行してCFHT Large-Area *U*-band Deep Survey (CLAUDS; Sawicki, Arnouts, Huangほか)プロジェクトが進められている。CLAUDSプロジェクトでは、CFHT望遠鏡のMegaCamカメラを用い、HSCの深撮像探査領域(27平方度)に対して、深い*u*バンド撮像を行った。その結果、HSC探査でカバーできていない*u*バンド撮像のデータが得られた。CLAUDSのデータをHSCデータと組み合わせることで、HSC探査データだけでは見つけられない、低赤方偏移($z \sim 2-3$)の星形成銀河を大量に検出することに成功した。この結果に関する論文は、C. Liuさん(SJTU)が中心に準備をしているところである。

SPLASHやCLAUDS以外にも、5章で述べたHSC狭帯域フィルターによるCHORUS探査も現在進行中である。初期観測結果として、 $z=7.0$ のLAEのLy α 光度関数を求めた研究結果がすでに出版されている²⁹⁾。

さらなるHSC探査の観測、データの解析および論文執筆は今なお続いている。そして、Keck望遠鏡、VLT望遠鏡、ALMAなど、多くの研究者が様々な望遠鏡や波長で追観測を進めており、当初のHSC探査案では予想していなかった面白い研究へと発展しつつある。一方で、これらの追

観測は、一部の面白い天体(全体の1%に満たない天体)に対して行われるもので、HSC観測で見つけられた大半の遠方銀河に対して、手つかずのままである。何よりも先に、より多くの銀河に対して分光追観測をしたいのだが、現状の分光器の探査能力はすでに限界に達している。しかし、HSCの遠方銀河研究には大きな望みが残されている。カブリIPMUや国立天文台をはじめとする国際協力で作られつつある、すばる主焦点分光器(PFS)である。PFSはHSCと同等の視野(約1.3平方度)をもちながら、2,400本のファイバーでこの領域をカバーする。PFSならば、たった1~2時間の積分で、現状の分光サンプルを遙かに凌駕する1,000個オーダーの遠方銀河に対して分光観測ができる。PFSの観測で、紫外線輝線診断による金属量推定、さらには銀河形成に欠かせないフィードバックと密接に関わる銀河風速度の測定など、期待される研究は多岐にわたる。HSC撮像の遠方銀河サンプルに対しPFS分光を行うことで、従来の100倍以上の巨大な遠方銀河分光サンプルが得られるだろう。このように、HSCの結果をPFS観測につなげることで、分光に基づく新たな統計研究への扉が開かれようとしている。

以上のように、HSC探査による遠方銀河研究は、異次元の巨大サンプルをもたらした、統計的な遠方銀河研究の先駆的な存在となった。2020年代にファーストライトが予定されている、地上大型探査望遠鏡The Large Synoptic Survey Telescope (LSST)、広視野宇宙望遠鏡Wide Field Infrared Survey Telescope (WFIRST)やEUCLIDなどの科学検討にHSCによる遠方銀河サンプルを使いたいという例も出てきている。このようなことから、HSC観測は、超広領域観測の世界的潮流の一步先を進んでいることが実感できる。さらに、HSC探査がもたらした遠方銀河の研究結

*2 経緯については、国立天文台ニュース2019年3月号に出版予定の小野宜昭さんの記事を参照。

果とサンプルは、30 m望遠鏡 (TMT) などの次世代超大型望遠鏡の観測研究へと有機的につながり、研究の大きな流れができるだろう。HSC探査の優位性を活かし、次世代を担う若手研究者がこの流れに乗り、世界で活躍することに思いを馳せつつ筆を置きたい。

謝 辞

本稿の草稿を読み、内容の確認やコメントを下さった小宮山裕さん、江草美美さん、小野宜昭さん、利川潤さん、内山久和さん、播金優一さん、尾上匡房さん、嶋作一大さん、林野友紀さん、谷口義明さん、岩田生さん、井上昭雄さん、川野元聡さん、梅村雅之さん、森正夫さん、長谷川賢二さん、澁谷隆俊さん、樋口諒さん、伊藤凌平さんに感謝いたします。また、紙面の都合で、お名前が出せなかった多くの方々もいらっしゃいます。この方々を合わせまして、お一人お一人のご努力のお陰でHSC探査の遠方銀河研究が成り立っております。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Ono, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S10
- 2) Bouwens, R. J., et al., 2015, ApJ, 803, 34
- 3) van der Burg, R. F. J., et al., 2010, A&A, 523, A74
- 4) Springel, V., et al., 2005, Nature, 435, 629
- 5) Leauthaud, A., et al., 2012, ApJ, 744, 159
- 6) Harikane, Y., et al., 2016, ApJ, 821, 123
- 7) Harikane, Y., et al., 2018a, PASJ, 70, S11
- 8) Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415
- 9) Toshikawa, J., et al., 2018, PASJ, 70, S12
- 10) Chiang, Y.-K., et al., 2013, ApJ, 779, 127
- 11) Uchiyama, H., et al., 2018, PASJ, 70, S32
- 12) Onoue, M., et al., 2018, PASJ, 70, S31
- 13) Ouchi, M., et al., 2003, ApJ, 582, 60
- 14) Taniguchi, Y., et al., 2005, PASJ, 57, 165
- 15) Iye, M., et al., 2006, Nature, 443, 186
- 16) Kashikawa, N., et al., 2006, ApJ, 648, 7
- 17) Ouchi, M., et al., 2018, PASJ, 70, S13
- 18) Shibuya, T., et al., 2018a, PASJ, 70, S14
- 19) Shibuya, T., et al., 2018b, PASJ, 70, S15
- 20) Ouchi, M., et al., 2009, ApJ, 696, 1164
- 21) Sobral, D., et al., 2015, ApJ, 808, 139
- 22) Konno, A., et al., 2018, PASJ, 70, S16
- 23) Inoue, A., et al., 2018, PASJ, 70, 55
- 24) Capak, P., et al., 2012, Spitzer Proposal ID 90042
- 25) Mehta, V., et al., 2018, ApJS, 235, 36
- 26) Chevallard, J., & Charlot, S., 2016, MNRAS, 462, 1415
- 27) Harikane, Y., et al., 2018b, ApJ, 859, 84
- 28) Higuchi, R., et al., 2018, ApJ, submitted (arXiv:1801.00531)
- 29) Itoh, R., et al., 2018, ApJ, 867, 46

Subaru Hyper Suprime-Cam: Pioneering the Statistical Astronomy of High-Redshift Galaxies

Masami OUCHI

Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

Abstract: The on-going Subaru Hyper-Suprime Cam (HSC) survey has pioneered the statistical astronomy of high-redshift galaxies. So far, the early results of the HSC survey have identified galaxies at a redshift up to 7. A half million galaxies at $z \sim 4-7$ are found in the observed volume of 1.4 comoving Gpc³. We obtain precision measurements of luminosity functions and spatial correlation functions for dropout galaxies and Lyman alpha emitters, revealing the key features of star-formation and feedback uncovered by the previous studies due to the statistical accuracy limits. These early results are published in papers with the project names of GOLDRUSH and SILVERRUSH. We expect more results of the HSC survey with the forthcoming full data set and new multi-wavelength data taken by various follow-up observations with world large telescopes.