

# 銀河団レンズを通して見る宇宙の遙か彼方

森 下 貴 弘

〈宇宙望遠鏡科学研究所 3700 San Martin Drive Baltimore, MD 21218〉

e-mail: tmorishita@stsci.edu



ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡は我々の宇宙に関する常識を変えうる革新的なデータを供給する。打ち上げ、コミッションングプログラムを経た後、専有観測・一般観測が始まる前に Early Release Science (ERS) と呼ばれる枠組みで一般公募から選ばれた13の観測が施行される。このプログラムはコミュニティの新しい望遠鏡と装置への理解・関心を高めることを目的とするものであり、取得されたデータは専有期間を持たずに即時に公開される。各チームは観測をデザインし、一般ユーザーのデータ利用・将来の観測計画を手助けする。本稿ではそのようなERSプログラムの経緯・特性に触れ、筆者が主力として貢献を果たす観測プログラム、GLASS ERSも紹介する。

## 「また延期」

プロポーザル締め切りを一週間後に控えた2018年3月の朝だった。メール受信ボックスにフォーマルなメールが届く。タイトルは、“JWST Status: New launch estimate” ディレクターからスタッフに宛てられたものだった。嫌な予感がしつつも内容を確認してみると打ち上げ予定日の延期が決定されたことが書かれていた。“We are close to launch, just not quite as close as we had previously expected, or had hoped.”

もちろん、これが最初の延期ではない（そして、最後の延期でもなかった）。しかしながらこの延期の決定には、打ち上げまでおよそあと50日と迫った時点だったからこそ、次こそはと誰もが信じていたからこそ、その分失望も大きかった。

それから約3年と8ヵ月、Cycle 1一般観測プロポーザル公募、望遠鏡の打ち上げ地フランス領ギアナへの輸送など数々のマイルストーンを経て、我々は現在このミッションで最も進んだ地点にいる（2021年10月末本稿執筆時）。

## 1. 人類史最大の宇宙望遠鏡

総重量約6.5 t、19枚の六角形の黄金の分割鏡からなる6.5 mの大口径。その「宇宙観測所」全体を太陽からの強い放射から守る銀紫のサンシールドは22 m × 12 mと、テニスコートほどの大きさである。総費用1兆円。ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）は人類が宇宙に打ち上げる最大の望遠鏡である。4つのサイエンス観測装置を搭載し、近赤外線から中間赤外線の波長域を網羅し、撮像・多天体分光・面分光・時間軸観測・コロナグラフ撮像といった幅広い観測モードを提供する。ミッションの遂行はボルティモアにある宇宙望遠鏡科学研究所（STScI）で行われ、現在は打ち上げミッションのリハーサル、ラグランジュ点2（L2）からのデータ輸送、アーカイブやリダクションパイプラインの整備など数多くの項目が日々忙しく進められている。

望遠鏡や各装置の詳細などは多くの記事でまとめられているのでここでは割愛する。強調すべき点は、この新しい望遠鏡から送られてくるデータは非常に多様性に富んでおり、新しい側面を備えている。それらは同時に、非常に複雑な性質を持

つため、ミッションオフィスからユーザーへの手厚いサポートが欠かせなくなっている。

### 1.1 ERS観測の役割

JWSTは革新的かつ複雑なデータを供給する。ミッションオフィスとしてはできるだけ多くの研究者にその恩恵を共有してほしい。そういった意図から、JWSTにはDirector's Discretionary Early Release Science (以下ERS)という早期観測プログラムが組まれている。これは、搭載される装置の新しいモードを活用・披露し、コミュニティに親しみを持ってもらうという目的がある。そのため取得されるデータは専有期間なしに即時公開され、誰でもアクセスすることができる。

ERS観測は2009年に新しい可視・近赤外線カメラWFC3がHSTに搭載された際にも実施され、当時のSTScIの所長権限でおよそ210軌道分の観測時間がサイエンス検討チームに与えられた。この背景には、WFC3には正式なサイエンスチームが存在しなかったことがあり、STScIはそのサイエンス検討を外務メンバーに委任していた。しかしながら、それは正式な装置チームとは異なることを理由に、彼らには専有観測枠Guaranteed Time Observations (GTO) を与えることができなかった。その代わりとして新しくERSの時間枠が設けられ、サイエンス検討チームに観測ターゲットを決める権限が与えられた (M. Stiavelli, STScI, private comm.)。

一方で、今回のERSプログラムは望遠鏡自体の打ち上げに伴い、また観測も2017年の一般公募によって決定されるという、2009年の時とは違った側面を持つ。また、JWSTの装置、その観測モードの数の多さから、採択された観測数も13と非常に規模の大きなものとなっている\*1。

採択されたサイエンスチームは観測ターゲットの選定や観測デザインだけでなく、取得されるデータをコミュニティに最大限に活用してもらうための準備をする。それらはリダクションツール

の整備への貢献やデータリリース、可視化ソフトウェアツールの開発などである。打ち上げ・観測が迫る現在、各チームは急ピッチでその準備を進めている。以下では筆者が中心となって進めている我々の観測プログラムを簡潔に紹介する。

## 2. チームGLASS

“GLASS”とは、“The Grism Lens-Amplified Survey from Space”の略称で、その始まりはHST Cycle 21に採択された大型観測プログラムである。10の大質量銀河団をWFC3を用いて分光撮像観測をしたものである [1, 2]。WFC3が持つスリットレス分光器 (以下グリズムと呼ぶ) を使った低分散分光観測は非常にユニークであり、その搭載以来多くの観測で使用されてきた。スリットがないため視野内のすべての光源が分散されるため、一度の観測で得られるサンプル数が圧倒的に多い。またスリットによる観測光源のロスもなく効率もよい。低分散であるために強い輝線の場合はその天体の形態情報がそのまま残る。いわば、‘全天体面分光装置’とも言える。

このグリズムを使ったスリットレス低分散分光観測はスペースでの観測に特化しているといえる。なぜかというと、地上では視野内で激しく時間変化する大気赤外線背景放射 (が分散されたもの) を取り除くのが難しいためである。一方で、その効率ゆえの欠点もある。まず、近接する天体からのコンタミである。スリット (=マスク) がないことから、分散方向に並ぶ天体からの光は一様に分散され重複する。そのため、目標とする天体のスペクトルを取り出すには、検出器に落ちたすべての分散光の復元が必要となる。そのため、グリズムの観測にはそれと同じ (理想的にはそれよりも大きな) 視野を網羅した撮像画像がペアで取得されるようになっている。また、分光分解能が低い (R=100–200)、隣接する輝線

\*1 <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-ers-programs>

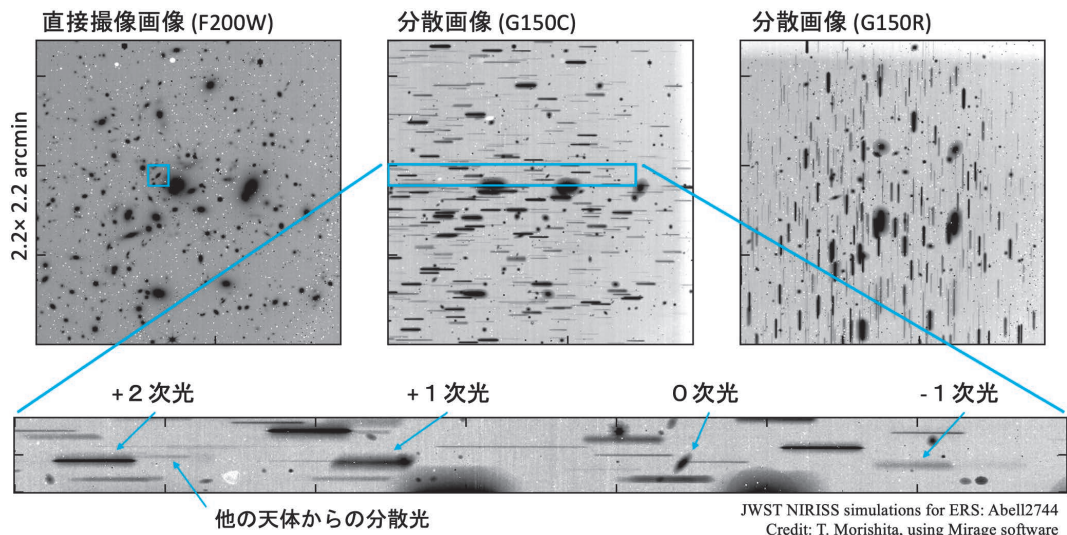


図1 NIRISSを使った銀河団の観測シミュレーションデータ。上段：直接撮像画像（左）と分散されたスペクトル（中，右）。G150CとG150Rでは分散方向が90度異なるため、2つのグリズムを使うことで近接天体によるコンタミを効率よく取り除くことができる。下段：例として一つの銀河（左上図枠線内）周辺のスペクトルデータを拡大したもの。

の重なりも起こり（例えば、 $H\alpha$ と $[NII]$ ）、逆畳み込み解析や理論モデルに基づいた反復的なフィッティング解析が必要となる。そのような性質から、技術的に敷居の高い観測モードでもある（図1）。

## 2.1 GLASS ERS

そして、GLASS ERSは過去のHST観測プログラムで培われた技術を活用したJWST観測プログラムである。観測デザイン・プロポーザルはUCLAのT.Treuを筆頭とするチームによって2016年から進められた。筆者も当初UCLAにVisiting Studentとして在籍していた。このチームの特徴は、その大半が当時の学生・ポスドクが占めており、非常に若い力が集まっていることである。始動から数年経った今では、多くのメンバーが世界中の研究機関で活躍している。チームは当初の12人のプロポーザルメンバーに加え、イタリア・オーストラリアの研究グループとも連携することで、合計32人のチームにまで成長した。

このプログラムでは、GLASS HSTとは対照的に、大質量銀河団Abell 2744のみをターゲットとしている（図2）。この銀河団は過去のHSTによ

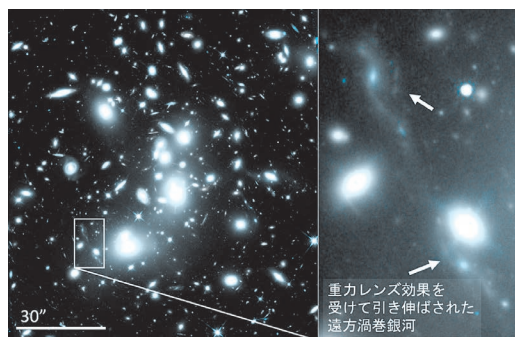


図2（左）GLASS ERSの観測ターゲットである銀河団Abell2744の中心部。（右）観測視野内にある、強力な重力レンズ効果を受けて引き伸ばされた遠方にある渦巻銀河。Credit: ESA/Hubble, NASA, HST Frontier Fields

る深撮像プログラムでも観測されており [3, 4], HSTの長露光・多波長撮像観測はもちろん、すばる望遠鏡やALMA望遠鏡を始めとする地上望遠鏡からも繰り返し観測されており、日本のコミュニティにも馴染みの深い天体であるかもしれない[5]。我々がこの銀河団をターゲットとする理由の一つには、その特徴的な重力レンズ効果が挙げられる。

総質量が $10^{15}$ 太陽質量もの巨大な構造を通過してくる光は、その強力な重力レンズ効果により拡大・増光される。その効果により、遠方宇宙に存在する非常に小さく暗い天体でさえも我々の目に認識可能なシグナルとして届くのである。

我々は主に二つの観測装置の使用を計画している。一つはNIRISSと呼ばれる低分散スリットレス分光器である。基本的にはWFC3グリズムと似た装置である。大きな違いは、まず波長領域が $0.8\text{--}2.2\ \mu\text{m}$ と広範囲に及ぶことである。また、'G150C'と'G150R'の分散方向が90度異なる2つの独立したグリズムを備えているため(図1)、分散方向を変えるための望遠鏡自体の回転が不要となり、観測時間を大幅に削減できることである\*2。NIRISSは他のJWSTの装置と比べて非常にシンプルな光学設計となっているため、効率がよく、暗い天体まで網羅できる。もう一つは、NIRSpecと呼ばれる中分散分光器である。こちらはマイクロシャッターアレイ(MSA)と呼ばれるスリットの役割を果たす構造があり、あらかじめ選択された天体をより詳細に調べることが目標としている。

我々の観測プログラムは主なサイエンスゴールとして以下の三つの矢を設定している。1. 遠方宇宙における初代銀河・星の形成過程、2. 宇宙の星形成最盛期である赤方偏移 $z\sim 1\text{--}3$ における銀河進化・バリオン循環、3. 銀河団における銀河進化の環境依存性である。

### 2.1.1 宇宙初期における銀河・星の形成

遠方宇宙に存在する天体を見つけだすのは、ハッブル宇宙望遠鏡の大きな目標であった。特に、再電離期と呼ばれる宇宙の変遷期における銀河・大質量ブラックホールに関しては、それ自体の形成・進化だけでなく、宇宙の水素原子を電離した光源を特定するうえでこの上なく重要な観測対象である。

我々の観測プログラムもこれを第一においてデザインされている。観測ターゲットであるAbell2744銀河団は、遠方銀河を見つけだすうえで「非常によいレンズ」であることが知られており、これまでもX線、可視・近赤外線からサブミリ波まであらゆる波長帯域で観測されてきた[6-8]。我々はそれらの観測から見出された高赤方偏移( $z>5$ )に存在するLy $\alpha$ 輝線の強い銀河をNIRSpec MSA観測サンプルに含んでいる。NIRSpecは3つの分光分解能を選択肢に持つが、我々の中でも最も高い $R=2700$ を選択した。これはLy $\alpha$ 輝線のラインプロファイルを程よくサンプリングし、その系を取り巻く水素ガスの速度情報を得るためである。またそれと同時に、NIRSpecが提供する $1\text{--}5\ \mu\text{m}$ に及ぶ幅広い波長範囲において、ヘリウム・炭素・酸素由来の輝線も観測することができる。これらの輝線強度は銀河内星間ガスの温度や金属元素量に対し敏感であるため、こうした観測量から初代銀河の内部でその燃料となる星形成ガスの状態を垣間見ることができる。

また、NIRSpecと同様の視野にNIRISSも使われる。この装置では対照的に視野内のすべての天体を無分別に観測できるため、これまで観測されていなかった銀河、あるいは見えなかったより暗い銀河の特定を可能とする。NIRSpecと同じ程度の露光時間が設定されているが、装置のシンプルな作りゆえの効率から、およそ2倍の深さの感度での探査が期待される。

### 2.1.2 星形成最盛期における銀河のバリオン循環

2つ目のサイエンス項目は赤方偏移 $z\sim 1\text{--}3$ 、いわゆるコズミックヌーンにおける銀河進化である。これはGLASS HST時代から我々の十八番のサイエンスケースであった[9-12]。この時代の宇宙では銀河が劇的な星・大質量ブラックホール形成を遂げ、その形態を大きく進化させ、我々が近

\*2 一般的に、グリズム観測では隣接天体からの分散光が大きな弊害となるため、同じ視野の観測でも2つ以上の分散角度でデータを取得することが推奨されている。

傍宇宙で見ている銀河形態の「ハッブル系列」を作り上げてきたと知られている。この時代における銀河内の星・ガス・塵といったバリオンの循環を観測的に制限することは、その星形成過程、形態形成の起源、そして星形成活動の停止に関わる物理過程の解明に重要である。

ただJWSTをもってしても、これほど遠方の宇宙では数百pc程度の空間分解能が限界であり、そこに漂う銀河の内部構造を完全に空間分解して識別することは難しい。その点、我々には前述した重力レンズの強みがある。重力レンズ効果との相乗効果によって我々の角分解能は典型的な星形成領域の大きさに迫り (<100 pc), 銀河内部のその空間分布を直接垣間見ることができる。NIRISSを使った観測では、空間分解された輝線マップを取得することができ、星間ガスと星の循環がどこで、どのような時間スケールで起きているかが分かる。

もちろん、これらの銀河のいくつかはNIRSpecのMSAにも割り当てられる。NIRISSよりも高いR~2700の中分散グレーティングを使えば、それぞれの銀河の速度情報やより詳細な元素組成を取得できる。これらは近傍で見られているような円盤銀河と同じような構造をこれらの銀河が既に作り上げているのか、といった問いに答えるうえで重要な情報である。

### 2.1.3 銀河団銀河

以上では重力レンズ効果によって恩恵を受ける遠方銀河に注目してきたが、レンズ自体すなわち銀河団並びにそれに属する銀河もJWSTの手に掛ければ興味深い観測ターゲットになる。特に、NIRISSによるスリットレス分光では、その圧倒的に明るい銀河団銀河が否応にも観測され、「コンタミ」として扱われてきた。しかしながらそれらの銀河はその明るさ・見た目の大きさゆえ、銀河の環境効果を調べる観点から、我々のサイエンス項目の一角を担ってきた。例えば、グリズム観測では各銀河内のH $\alpha$ を効率よくマッピングすることができ、銀河のどこで星形成が起きているの

か、また、その星形成活動は銀河団内の環境効果(=外的要因)によってどのように影響されるのかといった問いに答えることができる[13]。銀河団による環境効果は、束縛力の小さい系の方が顕著に現れやすいことから、JWSTの観測によって以前は見られていなかった質量範囲での発見が期待される。同時に取得される撮像画像を用いて、銀河の形態や構造の環境依存性を星・ガス両方の観点から調べあげることができる。

## 3. データ取得の日程とその後

ERS観測プログラムはその目的を達成するため、打ち上げから6ヵ月に及ぶコミショニング観測(L+6)が終了し次第、優先的に開始される(図3)。実際のスケジュールは打ち上げ後に決まるが、観測ターゲットと望遠鏡の方向制限(太陽のある方向は避けたいため)の関係から、我々の観測は2022年の初夏あるいは11月頃に実施される予定である。

ERSプログラムで取得されたデータには、原則として誰もがアクセスする権利を持つ。一方で、我々のチームとしての役割は、その生データを適切に処理し、より利用しやすい形式で公開することである。我々のチームは処理された画像データ、天体カタログ、各天体のスペクトラムの公開に加え、データの実用例をまとめたスクリプト、可視化ツールなどの公開も予定している。

また、ERSの活動とは独立にSTScIではパイプラインの整備やデータ可視化ツールの開発、研究者向けの実践セミナーも並行で行っている。



図3 打ち上げ後のスケジュール。ERS観測プログラムは打ち上げから6ヵ月に亘るコミショニングプログラムを経たあとに優先的に施行される。

‘Jwebbinar’と呼ばれるオンライン形式のイベントでは、プレゼンテーションの一方の方向のインプットだけでなく、参加者には事前に用意されたシミュレーションデータとジュピターノートブックを使って解析を経験してもらい、そのフィードバックをもとに更に発達させていくという試みも行われている\*<sup>3</sup>。このようなイベントが広いコミュニティに行き渡り、世界中のより多くの研究者が手軽に参加できるようになったことは、コロナ禍における数少ないよい側面かもしれない。

#### 4. 終わりに

以上、簡潔ではあったが、JWST ERS観測プログラムの概要とその一例として我々のプログラムの紹介をさせていただいた。本文では我々のプログラムを例としてそのサイエンス・現状をまとめたが、各チームで使用する装置も違えば、追求するサイエンスも大きく異なり、多様性に富んでいる。ぜひプログラム一覧をご覧ください、そして自身の研究活動に活用していただくことも検討していただければと思う。

最後に、ERS観測プログラム全体の目標は、コミュニティがJWSTを使った観測、そのデータの取り扱い、そして将来の観測計画の手助けをすることである。当然そのサポートの対象は日本の天文コミュニティも含んでいる。欧米を主導とするJWSTミッションのコミッショニング活動・ERS観測プログラムに携わることができた数少ない日本人の一人として、今後もその役割を積極的に果たし日本のコミュニティに還元していきたいと思う次第である。私自身、現在に至るのは大学院生のときに参加した国際学会でのふとしたきっかけからである。この記事の読者の中でもしこれらの観測を通してミッションに貢献したいという方、特に若い学生がいるようであれば、積極的にチームにコンタクトし、飛び込んでほしい。

#### 謝辞

この原稿を作るにあたっては、天文月報編集委員の市川さんに大変お世話になりました。ここでお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- [1] Schmidt, K. B., et al., 2014, ApJ, 782, L36
- [2] Treu, T., et al., 2015, ApJ, 812, 114
- [3] Postman, M., et al., 2012, ApJS, 199, 25
- [4] Lotz, J. M., et al., 2017, ApJ, 837, 97
- [5] Medezinski, E., et al., 2013, ApJ, 777, 43
- [6] Schmidt, K. B., et al., 2017, ApJ, 839, 17
- [7] Laporte, N., et al., 2017, ApJ, 837, L21
- [8] González-López, J., et al., 2017, A&A, 608, A138
- [9] Wang, X., et al., 2017, ApJ, 837, 89
- [10] Abramson, L. E., & Morishita, T., 2018, ApJ, 858, 40
- [11] Morishita, T., et al., 2018, ApJ, 856, L4
- [12] Wang, X., et al., 2020, ApJ, 900, 183
- [13] Vulcani, B., et al., 2016, ApJ, 816, 86

#### Through the Looking GLASS

**Takahiro MORISHITA**

*Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive Baltimore, MD USA 21210*

Abstract: James Webb Space Telescope will provide innovative data that could change our understanding of the universe. After the launch and commissioning program, 13 observing programs will be executed in a framework called Early Science Release (ERS) before proprietary and public observations begin. These programs aim to help the community familiarize with the new telescope and instruments, and all data obtained in the programs will be released immediately without a proprietary period. The awarded teams design their observations, create the data platform, and help the public use the data and plan for future observations. In this article, I will briefly introduce the background and characteristics of the ERS program, as well as our observation program, GLASS ERS.

\*<sup>3</sup> <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/jwebbinars>