

JWSTで探る $z=6-13$ の遠方宇宙： 最遠方銀河と化学進化



播 金 優 一

〈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: hari@icrr.u-tokyo.ac.jp

幸運なことにJWSTの第一期観測として、私がPIとして提案したプログラムが2本採択されました。しかしその裏には不採択に終わった過去の観測提案など様々な苦労がありました。ここでは採択された2本の観測プログラムの内容を、科学的背景や提案することになった経緯とともに紹介したいと思います。この記事が今後JWSTプロポーザルを出そうと考えている方々のお役に立てば幸いです。

1. はじめに

James Webb Space Telescope (JWST) はNASA/ESA/CSAが開発した口径6.5 mの赤外宇宙望遠鏡です。6.5 mという大口径と宇宙空間という場所を活かして、JWSTはこれまでの地上・宇宙望遠鏡よりも一桁以上高い感度の観測を赤外域で実現します。実際に発表されている資料を見てみると^{*1}、例えば5 μm での感度は分光性能ではSOFIAやVLTの1,000倍以上、撮像性能でもSpitzer望遠鏡の約30倍と予測されています。

JWSTはこの圧倒的な感度をもって、遠方銀河の研究にブレイクスルーを起こすことが期待されています。期待されるサイエンスとしてまず真っ先に思いつくのが、最遠方銀河の発見・初代銀河の観測です。最遠方銀河の分光同定は、単に赤方偏移記録の更新だけではなく、宇宙の始まりからの短い時代の中でその銀河がどのように誕生・進化したのかという、銀河形成の物理過程に直接的な制限を加えることができます。これまでに報告されている銀河の中で最遠方のものは、ハッブル

望遠鏡で発見され、ケック望遠鏡等で分光された、赤方偏移 $z=10.96$ のGN-z11という天体です [1, 2]。この天体は銀河としては非常に明るく(UVの絶対等級で -22 ABmag)、興味深いことに炭素の量が多いことや活動銀河核が存在する可能性が示唆されています [2]。他の独立な研究によって、 $z=9-11$ の宇宙で従来考えられていた以上にGN-z11のような明るい銀河の個数密度が多いことや [3, 4]、 $z=6-9$ の銀河の中で $z\sim 15$ で始まった星形成を示す古い星の兆候が報告されており [5-7]、JWSTはこれらの祖先である $z>11$ の銀河を発見することが期待されています。

もう一つJWSTで可能となる重要な遠方銀河サイエンスとして、輝線を使った物理的性質の調査があります。銀河の金属量といった物理的な性質を調べるためには、分光観測を行って星雲ガスからの輝線を調べる必要があります。特に水素のH α や酸素の[OIII] $\lambda 5007$ といった静止系可視の輝線は性質がわかりやすく近傍銀河の研究でもよく使われており [8]、銀河の研究者としてはまさに喉から手が出るほど欲しい輝線です。近傍銀河で

*1 <https://www.stsci.edu/jwst/about-jwst/history/historical-sensitivity-estimates>

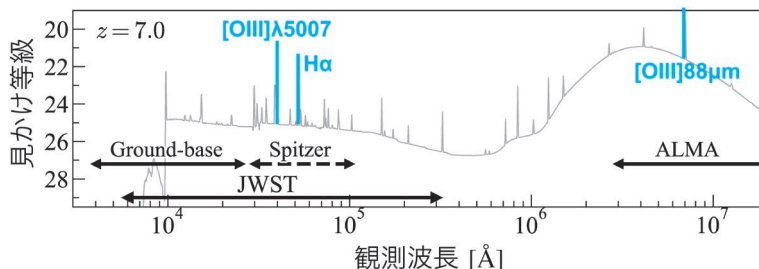


図1 赤方偏移 $z=7$ の遠方銀河の典型的なスペクトル ([10]を改変). 横軸は観測波長, 縦軸は明るさで, 静止系可視輝線である [OIII] λ 5007とH α , 遠赤外輝線である [OIII]88 μ mが青色の線で示されています. 矢印はそれぞれ地上望遠鏡 (Ground-base), Spitzer望遠鏡, ALMA望遠鏡, JWSTの観測できる波長範囲を示しており, JWSTによって遠方銀河の [OIII] λ 5007やH α といった静止系可視輝線の分光観測が可能になることがわかります. Spitzer望遠鏡は分光ではなく撮像で遠方銀河を観測するので, 破線で示しています.

はこれらの輝線を使って金属量が求められていますが, 長い宇宙の歴史における化学進化を議論するためには, 遠方銀河でも金属量を測定し, 赤方偏移進化を議論する必要があります. しかし遠方銀河は図1に示すように高い赤方偏移によってこれらの輝線が赤外域にシフトしてしまい, これまでの望遠鏡では分光観測を行うことができないという問題がありました. この問題を解決するために研究者たちはSpitzer望遠鏡の撮像データから静止系可視の輝線強度を推定したり [9, 10], ALMAでアクセスできる [OIII]88 μ mといった遠赤外輝線を用いたりして [11, 12], などとか間接的に遠方銀河の性質を調べようとしてきました. しかしJWSTの登場によって, これらの静止系可視輝線を分光することが可能になり, 遠方銀河の物理的な性質を直接調べることが可能になります.

このような科学的背景があり, 遠方銀河の研究者たちはJWSTによる観測をこれまで待ち望んできました. 実際に第一期観測 (サイクル1, General Observer; GO) として採択されたプログラムの中でも, “Galaxies” カテゴリーのプログラムに一番観測時間が割り当てられており*2, 注目度

の高さが伺えます. 私も今回観測提案を行い, 幸運なことに2本の観測提案が採択されました (GO-1657, GO-1740, ともにPIは播金). それぞれGO-1657は赤方偏移 $z=6-7$ の銀河の金属量を正確に測定するプログラム (以下, $z=6-7$ 金属量プログラム), GO-1740は $z=13$ にある銀河候補の分光同定を目指すプログラム (以下, $z=13$ 分光プログラム) です. ここでは天文月報の貴重な紙面を拝借して, これら2つのプログラムの内容や提案に至った経緯を紹介させていただきます.

2. 準備1: $z=13$ 分光プログラム

$z=13$ 分光プログラムが始まるきっかけとなったのは, 実はALMAサイクル7で提案した大型観測提案 (large program) が惜しくも不採択に終わったことでした*3. その時にlarge programとして採択されたのは, オランダ・ライデン大学のRychard Bouwensさんが率いるREBELSという $z=6.5-10$ 銀河を狙ったプログラムです. 採択結果が出たあと2019年8月に北見工業大学で開かれた研究会で, 早稲田大学の井上昭雄さん, 橋本拓也さん (現筑波大学) と今後について話をし

*2 全体の約30%. 次点は“Exoplanets and Disks”で全体の約20%を占めています. さらに極端な例だと分光装置NIRSpecの装置開発グループ時間 (Guaranteed Time Observations; GTO) は85%ほどが遠方銀河・AGN観測に使われます.

*3 2回提案し2回ともsecond quartileで不採択でした (first quartileがトップ).

ている中で、彼ら (Bouwens さんら) のさらに先に行く研究をしよう、ということで始まったのが、 $z=13$ 銀河を探すこのプログラムでした。

遠方銀河はスペクトルの静止系 1216 \AA 付近に、ライマンブレイクと呼ばれる銀河間物質中の中性水素による吸収が見られます。 $z=13$ ではこのブレイクは $1.7 \mu\text{m}$ 付近に赤方偏移するので、 $z=13$ の銀河を探すためには原理的には H バンド (約 $1.6 \mu\text{m}$) で暗く、 K バンド (約 $2.2 \mu\text{m}$) で明るい天体を探せばよいわけです。しかし静止系 4000 \AA のバルマーブレイクも $z=3-4$ で $1.6-2.0 \mu\text{m}$ にシフトしてくるので、 H , K バンドの情報のみで銀河を選択しようとする、バルマーブレイクの強い年老いた銀河 (パッシブ銀河) も同時に見つかってしまいコンタミとなります。そこでより長波長 ($3-5 \mu\text{m}$) をカバーする Spitzer 望遠鏡の撮像データを使うことで、 $3-5 \mu\text{m}$ で明るく見えるパッシブ銀河のコンタミを除去しようと試みました。

H , K バンドまでの深い撮像データや Spitzer 望遠鏡のデータが揃っている COSMOS 領域と SXDS 領域の画像を使って $z \sim 13$ 銀河を探してみましたが、初めのうちはよい候補天体は見つからず、選ばれた数百天体を一個一個目でチェックしてみても、すべて測光がおかしい天体か、低赤方偏移のコンタミ天体ばかりでした。数カ月かけて選択条件や測光手法を改善していき、最終的に 2019 年 12 月頃ようやく候補天体が見つかりました。これらの天体は図 2 に示すように、どれも $1.7 \mu\text{m}$ 付近でブレイクが見られ、 $3-5 \mu\text{m}$ ではそこまで赤くないなど、 $z \sim 13$ の銀河の条件を満たしています。またこれらの天体は非常に明るいのですが (-23 ABmag)、実は個数密度は、最初に紹介した $z=9-11$ の明るい銀河の観測から予想されるものと無矛盾でした。ちなみにもし $z \sim 4$ の銀河だったとしても、これまで見つかっている

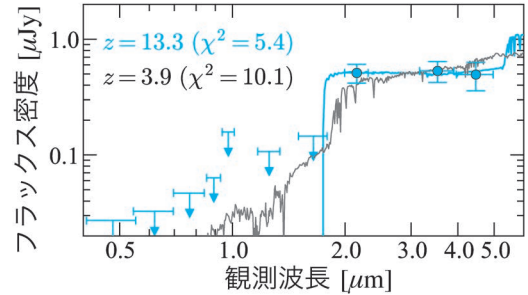


図2 選ばれた $z=13$ 銀河候補のスペクトルエネルギー分布例 ([13] を改変)。横軸は観測波長、縦軸はフラックス密度で、青色のデータ点は観測フラックスです。青色と灰色の線はそれぞれ $z=13.3$ と $z=3.9$ の銀河のスペクトルで、 $z=13.3$ 銀河の方が観測データ点をより良く説明できることがわかります。

パッシブ銀河に比べて星質量が一桁小さく、それはそれで新しく面白い天体です。

これらの結果をもって、まずは $[\text{OIII}]\lambda 88 \mu\text{m}$ 輝線を狙って ALMA 望遠鏡の所長裁量観測時間を獲得しにいきました。無事観測提案は採択されたのですが (2019.A.00015.S, PI: 井上)、アレイのコンフィギュレーションが理想的なものよりも extended な状態で観測されたこともあり、これらの天体が本当に $z \sim 13$ 銀河なのかどうかについてははっきりとした結論は得られませんでした [13]。さらに ALMA は一度の観測周波数幅が狭いので、広い周波数範囲を調べて輝線を探すためには何度も観測を行う必要があります。その点 JWST の分光装置 NIRSpec なら一度の観測でライマンブレイクや輝線を検出でき正確な赤方偏移を決められるため、自然と JWST 観測提案を準備する流れとなりました*4。

3. 準備2: $z=6-7$ 金属量プログラム

一方 $z=6-7$ 金属量プログラムは、2019 年秋から 2020 年春にポスドクとして滞在していたイギリス、University College London での Richard Ellis

*4 ALMA によるさらなるフォローアップ提案も無事採択されています (2021.1.00207.S, PI: 播名)。

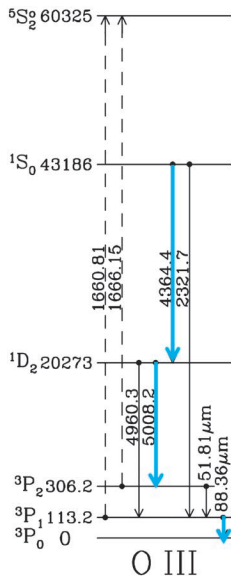


図3 酸素の二階電離OIIIのエネルギー準位図 ([15] を改変). 青色の矢印で示した遷移が、上から [OIII]λ4363, [OIII]λ5007, [OIII]88 μm 輝線に対応しています。

ID	RA	Dec	ObjName	Filter	ProposedID
1	8.196	14:02:59	22:24:45.80	MOSFIRE_Lyn	1199 1202 1302
2	8.683	14:02:50	52:52:26.40	MOSFIRE_Lyn_NV	1213 1262 1345
3	8.362	00:14:24.9	-30:22:26.1	ALMA_OIII	1324
4	8.312	00:16:09.60	-24:03:26.5	ALMA_OIII	1208
5	7.73	14:02:34.89	53:00:15.4	MOSFIRE_Lyn_CIII	1213 1345
6	7.884	05:32:32.03	-27:45:37.1	MOSFIRE_Lyn	1190 1207 1210 1263 1266
7	7.64	14:23:46.18	24:04:30.76	MOSFIRE_Lyn	1208
8	7.599	12:37:19.84	62:15:26.65	MOSFIRE_Lyn	1211
9	7.599	12:36:37.90	62:16:08.5	MOSFIRE_Lyn_CIII	1191 1311
10	7.477	14:02:12.09	53:00:26.87	MOSFIRE_Lyn	1213 1345
11	7.482	03:30:00.14	-27:51:55.47	MOSFIRE_Lyn	1213 1345
12	7.482	03:30:00.14	-27:51:55.47	MOSFIRE_Lyn	1213 1345

図4 実際に作成したスプレッドシート。GTOやERSのプログラムで観測される遠方銀河の情報と観測モードをまとめています。

に示すように [OIII]λ5007輝線とは準位が異なるので、[OIII]λ5007/[OIII]88 μm輝線比を調べると直接温度法に必要な電子温度を測定することができます*5。そのため、私の論文で報告したような [OIII]88 μm輝線が検出されている遠方銀河は、JWST第一期GO観測のターゲットとして非常に有力な候補となります。

第一期のGOの観測提案は装置開発グループの観測であるGTOや初期科学成果のための観測(Early Release Science; ERS)のプログラム決定後に募集が行われるので、それらのプログラムとはターゲット、もしくは観測モードが異なっている必要があります。つまりいくらよい観測提案を思いついても、GTOやERSで既にその観測が行われる場合は提案することはできないのです。これは分光同定されている天体が少なく、有名天体に観測提案が集中する遠方銀河の研究では深刻です。そこで採択されたGTO、ERS観測のプログラムをくまなく調べて、どの遠方銀河がどのようなモードで観測されるのかを一覧にしてみました(図4)。遠方銀河に関連するプログラムは合計30個ほどありましたがすべて調査してみたところ、ALMAによる [OIII]88 μm輝線検出が報告された有名な遠方銀河はほとんど観測される予定になっていました。しかし幸運なことに論文発表がGTOの観測提案締め切り後だったために、私の

さんとの議論から始まりました。その際に私は、自身の論文 [12] でALMAを使って [OIII]88 μm輝線を検出した3つのz~6銀河をJWSTで観測したい、と話していたことを覚えています。

最初に銀河研究における [OIII]λ5007といった静止系可視輝線の観測の重要性を紹介しましたが、ALMAで検出される [OIII]88 μm輝線を組み合わせることで、実は銀河の星間ガスの金属量を正確に測定することができます [14]。これは直接温度法と呼ばれる手法で、通常は可視輝線である [OIII]λ4363などが使われるのですが、[OIII]λ4363は輝線強度が [OIII]λ5007の約100分の1程度と非常に弱く、z>6の銀河での検出は難しいかもしれないと考えられています。一方ALMAで観測できる [OIII]88 μm輝線は実際に遠方銀河で検出されているように比較的強度が強く、図3

*5 実際には [OIII]λ5007/[OIII]88 μm輝線比は電子密度にも強く依存するので注意が必要です。本観測プログラムでは電子密度に敏感な [OIII]λλ3726,3729輝線を観測することでこれを解決しています。

論文の天体を含む数個はGTO/ERSの観測リストに入っていませんでした。そこで私の論文の天体を含む、[OIII]88 μm 輝線が検出されている $z=6-7$ 銀河3天体をターゲットとした観測提案の準備に取りかかりました。JWST/NIRSpecを使って[OIII] $\lambda 5007$ 等の静止系可視輝線を検出し、 $z\sim 6$ 銀河の金属量を直接温度法を使って初めて測定することが目標になります。

4. 提案提出までの道のり

$z=13$ 分光プログラムは、それまでにALMA等の他の望遠鏡に観測提案を提出していたため議論のポイントが絞られており、提案書提出締め切り(日本時間11月25日)の約一週間前には大方の形ができて共同研究者の方々に回覧するなど、かなり順調に提案書の作成が進みました。一方 $z=6-7$ 金属量プログラムの方は全く新しい観測提案でしたので、日本に帰国した2020年春から国立天文台・東京大学の内正己さん、小野宜昭さん、中島王彦さんとも議論を重ねながら準備を始めました。当初は時間的余裕もあり比較的ゆっくりと準備を進めていたのですが、10月後半に先ほどのRichard Ellisさんから、カルフォルニア大学Davis校のTucker JonesさんとRyan Sandersさんが似たような観測提案を準備しているとの連絡がきて動きが加速しました。お互いのターゲットや提案する観測モードが被っていたわけですが、話し合いの結果これら2つの観測提案は合流して、私がPI、Ryan Sandersさんはco-PIとして一緒に提案書を提出することになりました。その頃(11月初め)からは私、イギリスのRichard Ellisさん、アメリカのRyan Sandersさん、Tucker Jonesさんの4人の間で詳細な観測戦略や提案書の文章について、ほぼ連日メールが飛び交うようになりました。特に締め切り間際は私が日本時間で夕方まで提案書の作成をしていると、イギリスのEllisさんから提案書についてのメールが届き、それに対応していると深夜になってアメリカの

Sandersさん、Jonesさんからメールが届き、またそれに対応していると朝になってしまう…、という状態が数日続き、なかなか満足した睡眠時間は取れませんでした。11月後半はほかにも研究会での基調講演などがあり、これまでの研究者人生の中で一番忙しかった時期かもしれません。それでもなんとか締め切り3日前の日曜日の朝に第1稿を共同研究者の方々に回覧することができました。提案書自体は普段から大型望遠鏡の提案書を書き慣れている彼らのコメントやインプットのおかげで、とても完成度の高いものになりました。

5. 採択と今後

提案書を提出してから約4カ月後の3月31日に審査結果が届き、無事 $z=13$ 分光プログラムと $z=6-7$ 金属量プログラムの2本の観測提案は採択されました。実は倍率は時間ベースで約4倍と想像していたほど高くはなく、今後倍率が上がることを考えると頑張っただけで第一期観測に提案しておいてよかったと少しホッとしました。ちなみにほかにもPIで3本観測提案を出していたので、採択成績は2/5とほぼ期待値通りです。

第一期観測で採択されたほかの提案を見ると、皆どれもタイトルを読んでいるだけでワクワクするようなプログラムばかりで、今から観測開始が非常に待ち遠しい限りです。また採択されたプログラムを科学目標ごとにまとめてみると、銀河候補の分光同定・正確な金属量の測定という2つの観点では、今回提案した2つのプログラムがどちらも $z=13$ と $z=6-7$ で最遠方の観測であることがわかりました。これは共同研究者の方々のおかげで非常によい観測プログラムを提案することができたからだと思っています。

もちろん、観測提案書が採択されることがゴールではなく、JWSTのデータを使って研究を行い、論文を書かなければなりません。今回の提案採択は多少自分の自信になりましたが、JWSTの

観測が始まった際にはまた心を入れ替えて研究に励み、天文月報に報告できるような成果を出せるように頑張っていきたいと思います。

謝 辞

この2つの観測プログラムの提案を実現できたのは、ひとえに支えてくださった共同研究者のおかげです。本文中に登場した方々に加え、共同研究者である田村陽一さん、Tommaso Treuさん、札本佳伸さん、松尾宏さん、馬渡健さん、山中郷史さん、Nicolas Laporteさん、Guido Roberts-Bor-saniさん（以上五十音順）に感謝いたします。またこの記事執筆する機会をくださり、内容に関して助言をくださった天文月報編集委員の西澤淳さん、市川幸平さん、川中宣太さんに感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Oesch, P. A., et al., 2016, ApJ, 819, 129
 [2] Jiang, L., et al., 2021, Nature Astronomy, 5, 256
 [3] Morishita, T., et al., 2018, ApJ, 867, 150
 [4] Bowler, R. A. A., et al., 2020, MNRAS, 493, 2059
 [5] Hashimoto, T., et al., 2018, Nature, 557, 392
 [6] Mawatari, K., et al., 2020, ApJ, 889, 137
 [7] Laporte, N., et al., 2021, MNRAS, 505, 3336
 [8] Kobulnicky, H. A., & Kewley, Lisa J., 2004, ApJ, 617, 240
 [9] Faisst, A. L., et al., 2016, ApJ, 821, 122
 [10] Harikane, Y., et al., 2018, ApJ, 859, 84
 [11] Inoue, A. K., et al., 2016, Science, 352, 1559
 [12] Harikane, Y., et al., 2020, ApJ, 896, 93
 [13] Harikane, Y., et al., 2021, ApJ, submitted (arXiv: 2112.09141)
 [14] Jones, T., et al., 2020, ApJ, 903, 150
 [15] Draine, B. T., 2011, Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium (Princeton University Press, Princeton)

Exploring the Distant Universe at $z=6-13$ with JWST: The Most Distant Galaxy and Chemical Evolution

Yuichi HARIKANE

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

Abstract: Two programs that I proposed as a PI were fortunately approved for the JWST cycle 1 GO observations. However, there were many hardships in the background including some previous proposals that were not accepted. In this article I would like to describe the contents of these two approved programs, along with their scientific backgrounds and how we came to propose them. I hope this article will be useful for those who are thinking of submitting a JWST proposal in the future.