

JWST×ALMA×重力レンズで迫る 初代銀河形成～100 pcの現場



藤 本 征 史

〈Cosmic DAWN Center, Jagtvej 155A, 2200 Copenhagen Ø, Denmark〉

〈Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Lyngbyvej 2, DK2100 Copenhagen Ø, Denmark〉

e-mail: fujimoto@nbi.ku.dk

宇宙黎明期の小質量銀河は、宇宙で最初にできた初代銀河に最も近い存在である。その性質を明らかにすることは、宇宙再電離過程や初代銀河形成理解に繋がるため、非常に重要である。銀河の性質の根幹的要素に1) 金属量, 2) 質量集積, 3) 運動学が挙げられる。宇宙誕生約9億年後の小質量銀河において、銀河内外、多層的に広がるそれら三大要素を、重力レンズ効果を用いながら約100 pcに至る空間分解能で一網打尽に解き明かそうという野心的なプロジェクトが、この度NASA James Webb Space Telescope (JWST) の初年度運用観測の一つに採択された。本稿ではその下地となったアルマ望遠鏡を用いた大型サーベイから、JWST観測で目指す描像、そしてその他大型望遠鏡とも併せた今後の展望について紹介したい。

1. 宇宙の夜明け研究所

「だいたい40件くらいかしら」JWST観測提案に至ったきっかけは、5年ほど前に、とある国際学会発表を目指したシチリア行きの船内にあった。ポストドク公募数について雑談していた時の欧米研究者の発言である。ポストドクでは海外に行きたいと考えていたものの、5件ほど応募できれば御の字と思っていた私を焦らせるには十分なインパクトを持った言葉であった。元来私は謙虚な性格である。学生の頃、もうすぐ打ち上がる革新的な衛星望遠鏡として、JWSTの名を聞いてもピンとはこず、そんなにすごい望遠鏡であれば、私のような若輩者が提案書を出して、プロジェクトを牽引するような日が来るのはまだまだ先のことだと思っていた。しかし、上述のきっかけによって視野を広げて海外を重点的に20件ほどポストドク公募にトライし、運良くいくつかのオファーをいただきながら無事に博士号を取得し、そして2年

ほど前にコペンハーゲンにある Cosmic DAWN Center (以下DAWN) にやってきたのだ。当初は想定していなかった選択肢ではあったが、先日ディレクターと話をしていると、アメリカで行ったセミナートークを聞いた研究者が君を推したのがオファーの決め手だよと教えてくれた。思いもよらない偶然の交差上に今があることを思うと、日常が優しく包んでくれているような、ほっこりとした気持ちになってくる。ヒュッゲである。

“宇宙の夜明け”の名の通り、DAWNは世界中の最新大型望遠鏡を駆使しながら初代星・銀河、超巨大ブラックホールの謎に迫ることをミッションとしている。必然、JWSTは研究所のミッションを主軸的に担う装置でもあり、Guaranteed Time Observations (GTO) や Early Release Science (ERS) プログラムに関わるメンバーも数多い。締め切り数日前から慌て出す天文学者の常とは裏腹に、数ヶ月前からグループ内でJWSTに向けた定例ミーティングが行われ、GTOメンバー主催の

ワークショップが開催されるほか、個別の献身的なサポートも受けられた。まだ打ち上がっていない衛星望遠鏡を用いた観測提案準備では、慣れないことも多々あったが、なんとか出したいと思っていた観測提案書を2本提出できた。周りを見ても学生も積極的に提出しており、これだけ周囲が当たり前のように精力的にJWSTにトライする環境がなければなかなか厳しかったと思う。私が住む研究者用アパートにはDAWNの同僚が多く住んでおり、締め切りを過ぎた25時頃には同僚が集いだし、皆で祝杯をあげた。

2. 3度目の正直、悲願の発見へ

2018年、7月、よい知らせが届いた。現在、国際的に最も競争率の高い観測提案公募の一つでもある、大型電波干渉計Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) の大型枠の提案で東大天文センターの河野孝太郎氏をPIとする我々の提案、ALMA Lensing Cluster Survey (ALCS) が採択されたのである。この提案は2016、2017年度で2度不採択を経験していたので、これが3度目の正直であった。またこの提案の主眼が2016年に出版していた私の初の主著論文と関わりが深かったこともあり、1度目の提案から感度と期待される検出の見積もりなどを担当し、サーベイデザインについても河野氏と密に議論・検討を重ねていたので、感慨はひとしおであった。

サーベイの要は大質量銀河団33個をALMAで観測することで、銀河団が引き起こす重力レンズ効果を利用し、通常では検出されない、暗い遠方の天体を大量に発見することである。ALMAの高感度に加え、重力レンズ効果により効率的なサーベイが可能となり、従来行われていた他のALMAの大規模サーベイと比べても、最も広さと感度を兼ね備えたサーベイを実現した(図1)。これは即ち、従来の観測では発見されることのない暗い天体や希少な天体の検出を可能とするものだ。60名を超える大型国際共同研究体制で

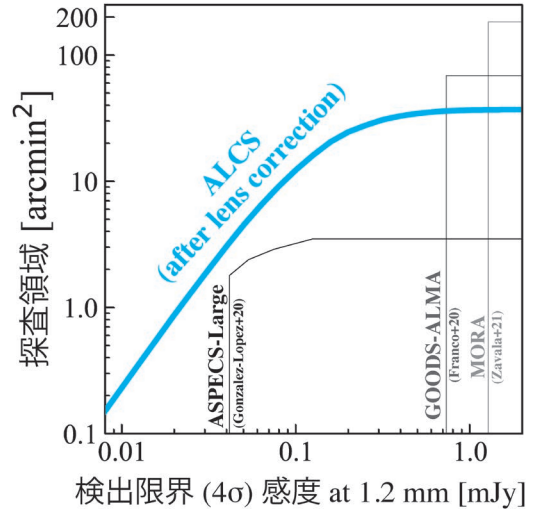


図1 ALCSの探査領域と天体検出感度(青線)。これまで行われたALMAの大規模サーベイ [1-3] と比べても随一の、深さと広さを兼ね備えたサーベイを実現している。

のプロジェクトにおいて、私はデータ解析・天体検出の責任者であったため、データを取得次第、逐次解析し、結果をチームに共有した。100時間の膨大なALMAデータの解析には苦勞もあったが、東大の甘日出文洋氏、吉村勇紀氏の協力を得ながら無事進めることができた。

その中で、あるとき吉村氏からメールをいただいた。吉村氏、J. González-López氏、私がそれぞれ独立の解析で検出していた輝線天体の一つが、手前の銀河の影響でわかりにくいものの、実は赤方偏移 $z=6$ の[CII] 158 μm 輝線ではないかというものであった。即座にチーム内で協議を進めた。G. Brammer氏による詳細な多波長解析、大栗真宗氏をはじめとした重力レンズモデル解析からの見識、そしてGemini望遠鏡を用いたA. Zitrin氏、N. Laporte氏による迅速な追分光観測の結果により、最終的に $z=6.072$ の[CII]輝線天体であることが確認された。驚いたことに詳細な重力レンズモデル解析から、本来、天の川銀河の1/100ほどの重さ($\sim 10^9 M_{\odot}$)の小質量銀河からの微弱な[CII]や塵の熱放射が、約20~160倍

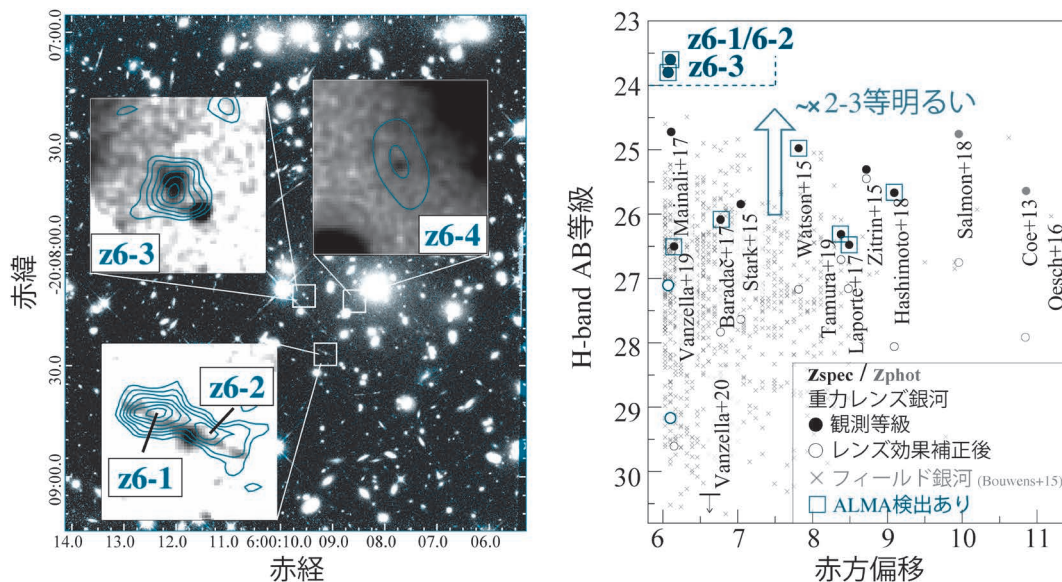


図2 (左図) ALMAで見えてきた強力な重力レンズ効果を受けた $z=6.072$ 小質量銀河の多重像。拡大図は各6秒角四方。コンタは [CII] 輝線強度、背景はハッブルの画像。JWSTでは多重像の中でも最も明るいz6-1/z6-2, z6-3がターゲット。(右図) これまで報告されている $z \geq 6$ 天体と比較した、ターゲットの静止系紫外線連続波での明るさを示す。

もの増光率を受けつつ多重像として検出されていることがわかった。これらの像はいずれも、現在までに知られている $z \geq 6$ 銀河の中で最も明るい部類である(図2)。さらに多重像の一部は増光率が極大となる臨界線をまたいでいるため、銀河外縁部の構造を詳細に写しだしていることもわかった。このALCSは大型国際プロジェクトであったため、発見をまとめた論文原稿回覧ではこれまで経験のなかった数のコメントをいただき改訂作業は大変ではあったが、その分チーム内の多くの専門家の助けもあり、発見から半年後には無事論文を米国天文学誌に投稿、予定されていたJWSTのTelescope Allocation Committee会議日前にはarXivで結果を世界に公表することができた[4, 5]。

実はこうした重力レンズ効果を受けた遠方銀河からの[CII]検出は、東大天文学科で同期であった山口裕貴氏の学部卒業研究のテーマで[6]、更にはALMA運用当初から天文台の松田有一氏な

ども精力的に進められていた分野でもある[7]。残念ながら当時のデータ量での探索領域では見つけることができなかったが、これまで日本のグループがリードして蓄積した経験値があったからこそ、今回発見から論文化までを迅速に繋げることができたように思う。

3. 宇宙初期、新生銀河内部に迫る

では今回の観測提案の科学的意義、背景について述べていく。宇宙黎明期($z \geq 6$)の銀河の性質を調べることは、宇宙大規模構造の形成や宇宙再電離過程、そして初代銀河の形成と進化など、宇宙の基本的な問題を理解する鍵となる。その中でも、特に小質量な新生銀河($\leq 10^9 M_{\odot}$, 近傍の矮小銀河と同程度)は、当時豊富に存在する代表的な存在であったため、主要な宇宙再電離源として、また初代銀河に最も近い存在として、特に重要である。

銀河の性質を紐解くうえで根幹を成すのが1)

金属量, 2) 質量集積 (星, ガス, 塵, 暗黒物質), そして3) 運動学である. 1-2) は銀河の成長具合を定量評価するだけでなく, 暗黒物質の集積や星形成, フィードバックの影響など, 成長の“歴史”が密に刻印されている一方で, 3) からは衝突合体, ガスの流出入など, “現在進行形”で起きている物理過程が相補的に明らかになるからである. ただ, 関連する物理過程はいずれも主に銀河内部の星間物質の空間スケールで起きているが, 宇宙初期の, 特に小質量銀河ともなると, 特段暗くて小さいために, これまで, こうした銀河内部の構造に切り込みながら詳細な性質を明らかにしていくことは困難を極めていた. こうした課題を一挙に解決する天体こそが, 強力な増光・拡大効果を受けた重力レンズ天体である. 2節で紹介した, 今回我々 ALCS チームが見つけた重力レンズ天体は, 初めて人類を, 遠く古代の銀河内部にまで導く, 非常に貴重な存在なのである.

4. 本観測

ターゲットはALMAによって塵やガスの冷たい星間物質の側面が捉えられた, 非常に強力な重

力レンズ効果を受ける, $z=6.072$ 小質量銀河の明るい2つの多重像である (2節および図3). 多重像のうち一方は銀河全体を約20倍の増光率で, 他方は銀河外縁部を局所的に約160倍の増光率で拡大しており, これら2つの多重像を徹底的に調べることで, 本来では到底捉えられなかった, 銀河内部から外縁部までの統一的な描像に迫る. JWST NIRCам 撮像, NIRSpec 面分光を駆使した計12.3時間の観測を行い, ALMAでは捉えられなかった高温星間物質や星の側面を, 実スケールで約100 pcに至る空間分解能で包括的に解き明かす. JWST 観測で明らかになる主要な観測量を図3にまとめた. 具体的には大きく分けて以下の3つのゴールを目指す.

i) **金属量**—ターゲットの驚異的な明るさに加え, NIRSpec 面分光の抜群の感度により, 空間分解した $H\alpha$ と $[NII]_{6583}$ 分布を得る. 近傍の HII 領域でよく較正されている $N2$ index ($[NII]_{6583}/H\alpha$) [9] を用いて, 金属量分布を得る. また ii) で調べる星質量・星形成率分布と併せ, 空間分解した星質量-星形成率-金属量関係を $z=6$ 小質量銀河に対して描き出す. この相対的な金属量分布から, 初期

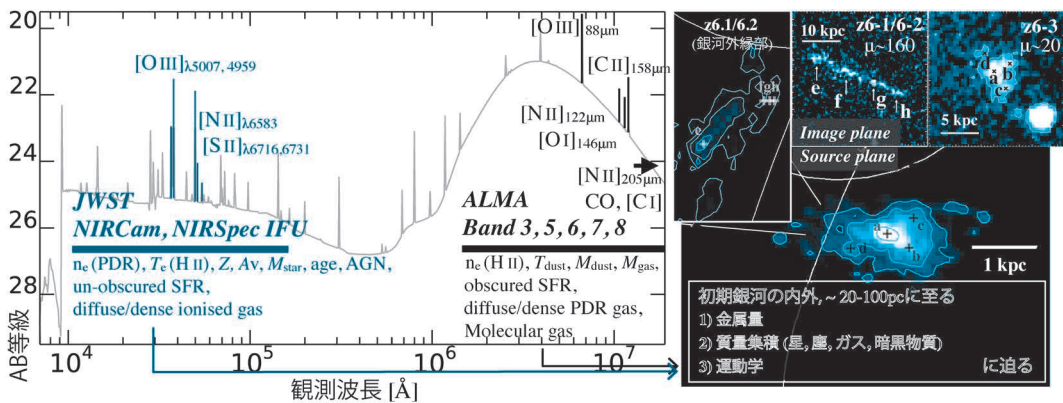


図3 (左図) 予定されているJWST, ALMA観測から導出される物理量 (電子密度 n_e , 電子温度 T_e , 金属量 Z , ダスト滅光 A_V , 星形成率 SFR, 星質量 M_{star} , ダスト温度 T_{dust} , ダスト質量 M_{dust} , ガス質量 M_{gas} など). 背景のスペクトルエネルギー分布は典型的な $z=6.6$ 銀河に対するモデル [8]. (右図) ハッブル画像に基づいた重力レンズ効果前 (source plane) 後 (image plane) でのターゲットの見え方. 銀河外縁部が臨界線 (白線) 付近で強い増光・拡大効果を受け, 引き伸ばされた2像が繋がったアーク状に見える (z6-1/6-2). ハッブルが示唆する各クラumpを a-h で示している.

の銀河で星形成とフィードバックがどのように進行したかを調べる。

ii) **星集積史**—NIRCamを用いて、静止系紫外—可視連続光で見える銀河の内外部の構造を描き出す。NIRCamの高い空間分解能（ハッブル宇宙望遠鏡の3倍以上）と強力なレンズ効果により、レンズ補正を経て約20–80 pcの空間分解能、F150Wでの限界等級（ 5σ ）約32–35等級を実現する。これにより星質量や年齢の分布、更にはハッブルの画像から示唆される個々のクランプの位置（図3）・サイズを精密に測定する。また $z\sim 3$ におけるクランプ輝度関数[10]に則ると、少なくとも ~ 30 個の更なる暗いクランプの同定が期待される。またこれらの導出過程で、ダスト減光はNIRSpecで観測される $H\alpha/H\beta$ のバルマー減衰や、独立に得られるALMAの観測データももとに補正される。星質量、年齢の分布は、過去の星形成史に直結しており、銀河のいつ・どこで最初の星形成が起こったのかを理解する。

iii) **運動学**—NIRSpec面分光データで観測される静止系可視の明るい輝線（ $H\alpha$, $[OIII]_{5007}$ など）を用いて、銀河内外の詳細な力学構造を調べる。既にALMAの $[CII]$ 輝線観測からターゲットは回転運動を示す円盤構造であることがわかっている[1]。高分解能・高感度で得られるNIRSpec面分光データをもとに、より詳細な回転曲線を得ながら、ii)で明らかになるクランプ位置と星質量分布を正確に把握することで、各クランプの速度中心が母銀河の円盤回転からオフセットしているか検証する。これにより、各クランプが銀河円盤に付随したものなのか、流出入中のガスによるものなのか明確になる。ガスの流出については、空間分解した場所ごとのスペクトルを個別に調べ、特定の場所でガスの流出によって引き起こされるような広輝線成分が現れているかについても調べる[11]。また、近年 $z=1-2$ の大質量銀河周辺で報告されているのと同様に[12, 13]、銀河外縁部で回転曲線が減少しているのかどうかを検証

し、 $z=6$ の低質量銀河における暗黒物質の集積について調べる。

5. 今後の展望

ALMAによって発見された今回のターゲットではあるが、発見に至った観測の積分時間は実は5分ほどで、まだまだALMAでも高分解能、長時間積分、他輝線観測など、やるべきことが多くある。“明るい正義”である。実際にALMA Cycle 8では私やDAWNの同僚がPIとなって提出した3本の追観測がすべて採択（A, B-grade）され、合計約60時間のALMAの観測時間が更に投入される予定である。これは一つのALMAの大型枠提案に匹敵する観測規模である。ALMAの追観測で得られる観測量も図3にまとめた。普段の遠方銀河に対するALMA観測ではなかなか得られない暗い遠赤外輝線（ $[NII]$, $[OI]$, $[CI]$, COなど）に加え、複数のBandで得られる連続波から、ダスト温度やその分布まで、これまでにない精度で調べられることが期待される。またALMAで得られる $[OIII]_{88\mu m}$ とJWSTで得られる $[OIII]_{5007}$ や他の輝線から得られる情報を組み合わせることで、直接温度法による、より正確な金属量の測定も可能になる[14]（詳しくはp 84の播金優一氏の記事を参照）。物理に基づく直接温度法による金属量測定は、4節i)で述べたような、経験則で得られている強輝線法を較正する試金石でもある。それを普遍的な小質量銀河で達成することは、今後JWSTで $z>6$ 銀河に対して強輝線法による金属量測定が大規模に、そして統計的に行われる際には、レガシー価値が発揮されることが期待される。

またALMA以外にも、世界中の大型望遠鏡に対して観測提案を続けている。一つには、すばる/FOCASやVLT/MUSEによる $Ly\alpha$ の面分光観測である。 $Ly\alpha$ 放射は宇宙再電離期における銀河間の中性水素ガス密度を調べる統計的な指標としても広く研究されており[15–17]、銀河から $Ly\alpha$ 光

子がどのように脱出してくるのかを理解することは重要である。宇宙再電離期の代表的な小質量銀河において、Ly α 輝線の空間分布を描き出し、図3で示される諸物理量の分布と組み合わせることで、Ly α 光子の銀河からの脱出過程について調べる予定である。またJWST, ALMA, そしてすばる/FOCASやVLT/MUSEという、異なる面分光装置が描き出す、異なるガス気相における3次元構造の違いも、フィードバックや、ガス密度、金属量分布などを反映しており、大変興味深い。

こういう観測提案を書いていると、審査員からよくいただくコメントがある。“一天体で何がわかるのか”，というものである。私も審査側にしていることがあるので、その気持ちは十二分に理解できる。ただやはり広く浅く、同時に深く狭くもあるからこそ、相補的に理解は進む。今回見つけた天体はまさにその後者を担う価値があると確信している。また、たとえばサンプルが一つであっても、想像だにできなかった現象が見えてきたときには、我々はそれを物理で説明する責務がある。そんなときにこそ、知識の裾野が飛躍的に広がる。深く狭く潜ったその先に、JWSTとALMAはどんな深宇宙を魅せてくれるのか。私はもちろん、忙しいなか、膨大な量の提案書を読み込んで下さる審査員の方々、そして世界中のあらゆる人々にとって、明日へのワクワク感が少しでも向上するような、そんな研究を引き続き世界の最前線で楽しんでいきたい。

6. ま と め

本稿では、私がPIとしてリードしているJWSTの初年度運用で採択されたプロジェクトについて、それに至った個人的・物理的・科学的背景から、採択されたJWST観測で目指す描像、そして今後の展望について紹介した。いろいろな偶然、周りの素晴らしい方々の支え、そしてチームとしての相乗効果があったからこそ、ダイナミックにプロジェクトが成長し、史上かつてない規模で、

世界中の望遠鏡が、今、一つの天体に向けられようとしている。予定されているJWST, そしてALMAの更なる観測では、暗黒物質の集積に始まり、ガス、塵、そして星といった銀河の形成、進化を制御する全構成要素が、約100 pcに至る空間スケールで徹底的に調べられる。それにより、銀河を根本的に特徴づける1) 金属量, 2) 質量集積(星, ガス, 塵, 暗黒物質), そして3) 運動学が、宇宙黎明期における代表的な小質量銀河において、包括的に解き明かされ、宇宙再電離過程や初代銀河形成に革新的理解をもたらすことが期待される。

謝 辞

ALCSサーベイPIとしてプロジェクトの立ち上げから現在に至るまでご尽力してくださっており、学部時の指導教員として天文学の面白さを教えてくださった河野孝太郎氏。ALCS co-PIかつ、大学院生時の指導教員として研究者としての礎を築いてくださった大内正己氏。海外異動前に自立したポスドクとして一歩踏み出していく私の背中を押してくださった井上昭雄氏。そしていつも突りの多いコメントをくださり、議論をたたかわせてくださるALCSチームはじめ、共同研究者の皆様にご心より感謝申し上げます。最後になりますが、この原稿を作成するにあたっては、西澤淳氏、市川幸平氏をはじめとする天文月報編集委員の方々や友人の今井順子氏に大変お世話になりました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Franco, M., et al., 2020, A&A, 643, A30
- [2] González-López, J., et al., 2020, ApJ, 897, 91
- [3] Zavala, J. A., et al., 2021, ApJ, 909, 165
- [4] Fujimoto, S., et al., 2021, ApJ, 911, 99
- [5] Laporte, N., et al., 2021, MNRAS, 505, 4838
- [6] Yamaguchi, Y., et al., 2017, ApJ, 845, 108
- [7] Matsuda, Y., et al., 2015, MNRAS, 451, 1141
- [8] Harikane, Y., et al., 2018, ApJ, 859, 84
- [9] Pettini, M., & Pagel, B. E. J., 2004, MNRAS, 348, L59

- [10] Livermore, R. C., et al., 2015, MNRAS, 450, 1812
- [11] Herrera-Camus, R., et al., 2021, A&A, 649, A31
- [12] Genzel, R., & Förster Schreiber, N. M., 2017, Nature, 543, 397
- [13] Tiley, A. L., et al., 2019, MNRAS, 485, 934
- [14] Osterbrock, D. E., 1989, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei
- [15] Stark, D. P., et al., 2010, MNRAS, 408, 1628
- [16] Pentericci, L., et al., 2014, ApJ, 793, 113
- [17] Ouchi, M., et al., 2020, ARA&A, 58, 617

Linking Dark and Visible Sides of Early Galaxies with JWST and ALMA

Seiji FUJIMORO

Cosmic Dawn Center, Jagtvej 155A, 2200 Copenhagen Ø, Denmark

Abstract: We perform detailed characterizations of a low-mass galaxy at $z=6.072$, using a unique ensemble of deep, high-resolution integral-field-unit data sets from JWST and ALMA with the aid of strong gravitational lensing. A total of ~ 70 hrs of our JWST and ALMA programs scheduled in 2022 will comprehensively characterize three fundamental properties of 1) chemical enrichment, 2) mass assembly, and 3) kinematics down to physical scales of ~ 20 – 100 pc in the galaxy. This will lead to a dramatic transformation in our understanding of the main formation and evolution mechanisms of galaxies in the first billion years after the Big Bang.