

# ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡で スパイダー・ウェッブを解剖せよ

小山 佑世<sup>1</sup>・嶋川 里澄<sup>2</sup>・  
児玉 忠恭<sup>3</sup>・José Manuel Pérez-Martínez<sup>4</sup>

〈<sup>1</sup> 国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, U.S.A.〉

〈<sup>2</sup> 国立天文台ハワイ観測所 (三鷹) 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

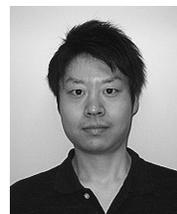
〈<sup>3,4</sup> 東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: <sup>1</sup>koyama@naoj.org, <sup>2</sup>rhythm.shimakawa@nao.ac.jp,

<sup>3</sup>kodama@astr.tohoku.ac.jp, <sup>4</sup>jm.perez@astr.tohoku.ac.jp



小山



嶋川



児玉



Pérez-Martínez

本稿では、私たちがJWST/NIRCamで狙う、赤方偏移2.16（約110億年前の宇宙）の原始銀河団の観測計画について紹介します。ターゲットとなるMRC1138-262という領域は「スパイダー・ウェッブ」の異名をもつ、非常に明るい電波銀河の領域です。今世紀初頭に、この領域に原始銀河団が報告されてから約20年間、私たちが進めてきたすばる望遠鏡での観測なども含め、世界中の研究者がこの領域を開拓してきました。今回、幸運にも記念すべきJWSTの最初のサイクルで、この領域を観測する機会をいただきました。もちろんJWSTのデータを手にするのはこれからですが、提案に至った経緯を中心に、その提案内容、そして銀河団銀河の進化史解明というゴールに、この観測からどこまで迫ることができるのか、考えてみたいと思います。

## 原始銀河団・開拓史

「原始銀河団」というワードを、最近よく耳にするようになりました。「銀河団」とは何が違うのでしょうか？ 実は、明確な線引きがあるわけではありません。現在の宇宙にみられるような立派な銀河団に成長する前段階と考えられる、遠方宇宙の小さな銀河集団を「原始銀河団」と呼ぶのが慣例です。原始銀河団とはすなわち、過去の宇宙で銀河が群れ集まる現場。原始銀河団を観測することで、銀河団の過去のすがたを直接捉え、現在の宇宙の銀河団とそのメンバー銀河の形成史を明かしたい。それが本研究の動機です。

遠い宇宙に原始銀河団を探してみようと思ったときに、まず問題となるのが、銀河団は「非常に

レアな天体である」ということです。1平方度クラスの探査を行っても、現在の宇宙の銀河団に成長するような原始銀河団はせいぜい数個程度しか見つかりません。今でこそ、すばる望遠鏡のHyper Suprime-Camなどの活躍で遠方宇宙の広域探査も難しくないように感じてしまっていますが、今世紀初頭にはまだそのような術はありませんでした。

そこでよく使われたのが、明るい遠方宇宙の電波銀河を狙って、その周辺領域に原始銀河団を見つけようというアプローチです。電波銀河は、現在の宇宙では銀河団の中心に鎮座するような大質量楕円銀河の祖先と考えられることから、逆に遠方宇宙の電波銀河の周りには形成途上の銀河団があるはずだと考えられたのです。広域な無バイア

ス探査がまだ難しかった時代に、この手法は成功を収め、遠方宇宙の多くの電波銀河領域に原始銀河団が報告されました [1].

なかでも非常に早い段階で、赤方偏移2を超える時代(100億年以上過去の宇宙)の原始銀河団として注目されたのが、本稿の主役であるMRC1138-262と呼ばれる電波銀河の周辺領域です。この天体はもともと1994年に出版された遠方宇宙の電波銀河カタログ [2] に収録されていた赤方偏移2.16の電波銀河で、電波観測から回転量度(rotation measure)が特に大きいことが知られており、この領域には巨大銀河団の祖先にあたる原始銀河団が存在するのではないかと有望視されていました。

## 「スパイダー・ウェブ」の異名をもつ原始銀河団

MRC1138-262は見かけも大変印象的です。図1はハッブル宇宙望遠鏡で撮影されたMRC1138-262の可視光画像です。明るい母銀河とその周りの複雑な構造が、大きな蜘蛛とその巣に捕らえられた小さな蠅たちのように見えることから「スパイダー・ウェブ銀河」の名前で親しまれるようになりました [3]。現在ではこのスパイダー・ウェブ銀河周辺の原始銀河団のことを、「スパイダー・ウェブ原始銀河団」と呼ぶことも多くなっています。

さて2000年当時、初めてスパイダー・ウェブ銀河の領域に、ライマン $\alpha$ 輝線天体の密度超過として原始銀河団が報告されました [4,5]。当時知られていた「最遠方の銀河団」が赤方偏移1程度だった時代です。このスパイダー・ウェブ銀河周辺での原始銀河団の発見により、「電波銀河を目印に言えば原始銀河団が見つられる！」という気運が高まり、その後電波銀河の領域を狙った系統的な原始銀河団探査も行われました ([6]など)。

スパイダー・ウェブ原始銀河団についても、多波長でのフォローアップ観測が続々と行われ、ライマン $\alpha$ 輝線天体だけでなく、H $\alpha$ 輝線銀河、

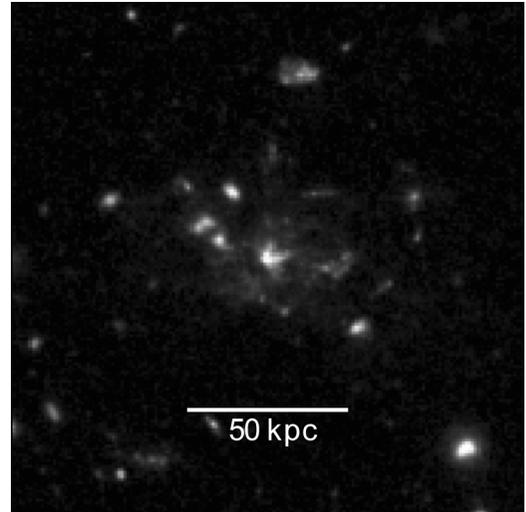


図1 本研究の主役である赤方偏移2.16の電波銀河MRC1138-262の可視光画像(ハッブル宇宙望遠鏡)。非常に複雑な構造をしており、巨大な蜘蛛の巣に見立てて「スパイダー・ウェブ銀河」と呼ばれている。

「Extremely Red Object (ERO)」や「Distant Red Galaxies (DRG)」と呼ばれる赤い銀河、そして最近ではサブミリ銀河やCO輝線銀河などのさまざまな銀河種族についても密度超過が認められています ([7-12]など; 図2を参照)。私たちが把握できているだけでも、すばる望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、VLT, ALMA, ATCAなど、第一線の大規模望遠鏡の観測時間がのべ1,000時間以上投入されています。今では「原始銀河団といえばスパイダー・ウェブだ!」と言う研究者もいるくらい、原始銀河団の代表格として有名な存在です。

## マハロ・すばる

私たちが主にすばる望遠鏡を用いて、このスパイダー・ウェブ銀河の領域を重点的に観測してきました。2010年頃、本稿の著者の一人である児玉(当時国立天文台)を中心に、「MAHALO-Subaru (Mapping H-Alpha and Lines of Oxygen with Subaru)」と銘打ったプロジェクトをスタートしました。このプロジェクトは、すばる望遠鏡の広視野

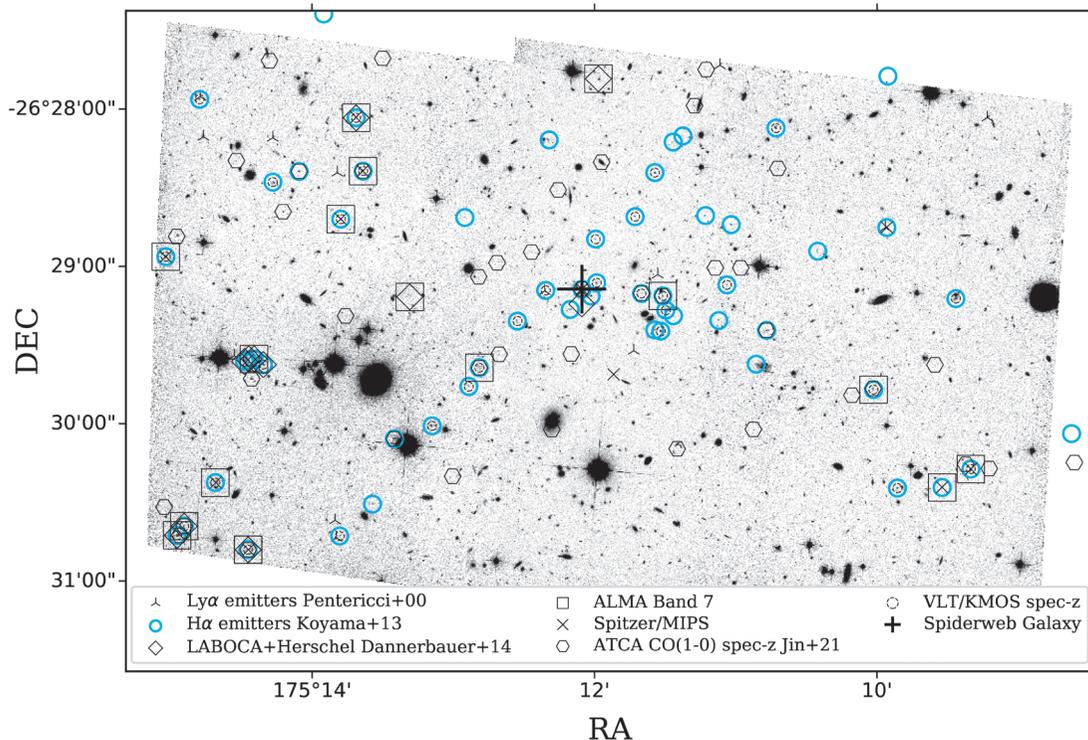


図2 私たちがJWSTで狙う「スパイダー・ウェブ原始銀河団領域」における銀河分布. これまでに行われた多波長観測によってライマン $\alpha$ 輝線銀河からサブミリ銀河までさまざまな銀河種族の密度超過が報告されている. 背景の画像はハッブル宇宙望遠鏡のIバンド画像. 今回のJWSTサイクル1提案では, この図に示した約6分角 $\times$ 3分角の領域全体をNIRCamの4フィルターで観測する.

観測能力を活かして, 主焦点カメラSuprime-Cam (当時) や近赤外線観測装置MOIRCSの狭帯域フィルター群を使い, 宇宙のさまざまな時代・環境を網羅した星形成銀河探査を行おうというものです. 「MAHALO (マハロ)」とは, ハワイ語で「ありがとう」を意味する言葉で, ハワイ島マウナケアで活躍を続けるすばる望遠鏡の観測機能を存分に生かすことで実現できた観測プロジェクトとして, 地元ハワイへの愛も込めた最高のネーミングとなっています.

MAHALO-Subaruプロジェクトでは, 特にH $\alpha$ 輝線を狙う原始銀河団の探査に力を入れてきました ([13-15] など). スパイダー・ウェブ銀河は赤方偏移が2.16なので, 静止波長6563 ÅのH $\alpha$ 輝線が2.07 $\mu$ mへと赤方偏移します. 私たちはこのス

パイダー・ウェブ原始銀河団からのH $\alpha$ 輝線を受けるための狭帯域フィルター (NB2071) をすばる望遠鏡のMOIRCSに搭載し, 原始銀河団の周辺領域を広くカバーするH $\alpha$ 輝線銀河探査を行いました [16, 17]. 検出されたH $\alpha$ 輝線銀河の性質を調べてみると, 原始銀河団の中心部に近い銀河ほど星質量が大きく, なかには10<sup>11</sup>太陽質量を超える星形成銀河も多数存在していることがわかりました. 宇宙誕生後, まだ30億年程度しか経っていない時代に, 銀河団の銀河はすでに大部分の星を作り終え, 現在の宇宙の大質量楕円銀河にも匹敵する星質量を獲得していたことが示されたのです [16].

H $\alpha$ 輝線で同定された銀河を中心に, 私たちは分光フォローアップも進めました. スパイダー・

ウェブ原始銀河団に付随するメンバー銀河の赤方偏移分布からは、力学質量が $1.7 \times 10^{14}$ 太陽質量と見積られ、標準的な銀河団の進化モデルを考えると、スパイダー・ウェブ原始銀河団は現在の宇宙で「かみのけ座銀河団」のような巨大な銀河団の祖先ではないかと考えられています [18].

## いざ、JWST時代へ：スパイダー・ウェブの幸運

こうして世界中の研究者の努力によって多波長データが蓄積され、原始銀河団の代表的存在となったスパイダーウェブ、次なる目標はやはりJWSTでした。これだけ良質なデータが揃うユニークな領域です。JWSTの初期観測で是非とも狙うべきターゲットであるという確信はあったものの、これだけ有名なフィールドだと他のグループも当然狙っているに違いない……そんな不安も抱えながら、JWSTのサイクル1に向けた観測プロポーザルの準備を始めました。JWSTのどの装置を使っても、私たちの想像を超えたサイエンスが展開できそうで、関係者でさまざまな意見を出し合いましたが、やはり今回はサイクル1です。できるだけシンプルな提案にしようと考えました。

最終的に、使用する装置は「NIRCam」に絞り込みました。NIRCamは波長 $5 \mu\text{m}$ までをカバーするJWSTの近赤外線カメラです。その視野は9.7平方分角。すばる望遠鏡での観測などに慣れていると決して広いものではありませんが、なんといっても口径6.5 mの宇宙望遠鏡です。近赤外線での圧倒的な感度と解像度は他の追随を許しません。

NIRCamには29枚の多彩なフィルターが搭載されています。そのなかで私たちは「F405N」という中心波長 $4.05 \mu\text{m}$ 、バンド幅 $0.045 \mu\text{m}$ の狭帯域フィルターに注目しました。実はこのフィルター、スパイダー・ウェブ原始銀河団の赤方偏移2.16でパッションβ輝線（静止波長 $1.282 \mu\text{m}$ 、以下Paβ輝線）をちょうど捉えることができるフィ

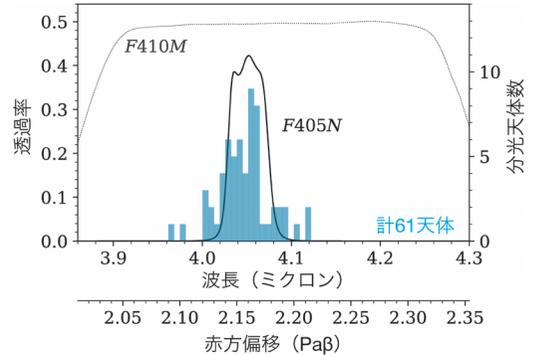


図3 私たちのJWSTサイクル1課題の鍵を握るF405Nフィルターの透過曲線と、スパイダー・ウェブ原始銀河団のメンバー銀河の赤方偏移分布およびそのPaβ輝線に対応する波長のヒストグラム。9割以上のメンバー銀河について、F405NフィルターでPaβ輝線強度を測ることができる。一方で、F410Mフィルターは連続光成分をとらえるために用いる。

ルターなのです。もちろん、個々の銀河は原始銀河団内をさまざまな方向に運動しているので、メンバー銀河の赤方偏移は完全には揃っておらず、幅があります。そのメンバー銀河の赤方偏移分布と、F405Nフィルターの透過率曲線を比べてみると、これが非常によく合っていました(図3)。このF405Nフィルターで観測すれば、原始銀河団に付随する銀河からのPaβ輝線をすべて捉えられるのです。これは大変な幸運でした。スパイダー・ウェブ銀河の赤方偏移がほんのわずかでも違っていたら、以下で述べるような観測は成立しなかったのです。

Paβ輝線は、ダストによる減光も受けにくい星形成活動の優良な指標です。しかしHα輝線などに比べると弱い輝線で、しかも赤方偏移1を超えてしまうと地上観測では届かない波長にシフトしてしまうため、これまで高赤方偏移でのPaβ輝線の検出というのはそもそも例がありませんでした。JWSTといえども、赤方偏移2を超える宇宙からやってくるPaβ輝線を検出できるのだろうかとか半信半疑ではありました。しかし、実際に必要

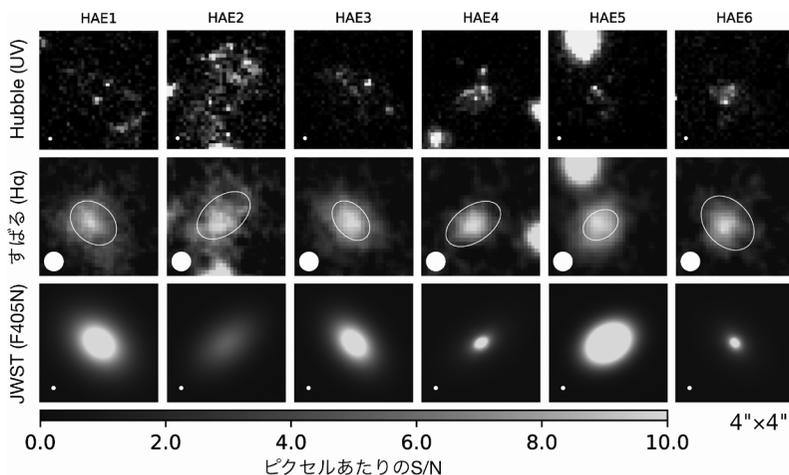


図4 スパイダー・ウェブ原始銀河団のH $\alpha$ 輝線銀河についてJWST/NIRCamのF405Nフィルターでの観測シミュレーション. ある程度の空間的な広がりを考慮しても, Pa $\beta$ 輝線を十分に検出できると期待される.

な観測時間を見積ってみると, JWSTの感度は想像以上に凄まじく, 私たちがすばる望遠鏡で検出したH $\alpha$ 輝線銀河程度の星形成率をもつ銀河であれば,十分にPa $\beta$ 輝線を検出し,その内部を分解できることがわかりました(図4).

これはJWSTに限ったことではありませんが, 狭帯域フィルターを使う観測は,狙った波長(今回の場合は4.05  $\mu\text{m}$ )に輝線が入る天体を漏れなく検出できるという特徴があります. JWSTを使えば4ミクロン帯でも約0.15秒角(赤方偏移2の物理スケールで約1.5 kpc)の解像度が実現されます.これはすでに手元にあるハッブル宇宙望遠鏡のデータ(こちらは静止系紫外連続光に対応)ともマッチした解像度です. Pa $\beta$ 輝線と静止系紫外連続光は,いずれも若い星の光に敏感で,どちらも星形成が活発な領域で明るく輝くはずですが.しかし紫外線はダストによる減光を強く受けるため, Pa $\beta$ 輝線と紫外線の輝度分布を比較することで,銀河内部のどこで星形成が行われているのか,どの領域でダストの減光を強く受けているかという情報を,原始銀河団のすべての銀河について得ることができます.

そこで私たちの提案では,このPa $\beta$ 輝線に対応するF405Nフィルターでの観測と,その連続光

成分を拾うためのF410Mフィルター(中心波長4.08  $\mu\text{m}$ )での観測をメインに据えました.ここで,思わぬボーナスがあります. JWST/NIRCamは短波長域(0.6-2.3  $\mu\text{m}$ )をカバーする青側チャンネルと,長波長域(2.4-5.0  $\mu\text{m}$ )をカバーする赤側チャンネルで構成されていて,ターゲット領域を赤・青チャンネルで同時に観測できる仕様になっています.狙っている赤方偏移2.16のPa $\beta$ 輝線は4  $\mu\text{m}$ 帯に入るので赤チャンネルですが,同時に青チャンネルも活用できます. 私たちは赤チャンネルでF405N, F410Mの観測を行っている間,青チャンネルにはそれぞれF182M(中心波長1.85  $\mu\text{m}$ ), F115W(中心波長1.15  $\mu\text{m}$ )というフィルターを搭載して観測することにしました. F115W, F182M, F410Mという3フィルターの組合せは,スパイダー・ウェブ原始銀河団(赤方偏移2.16)の静止系でおおよそUバンド, Vバンド, Jバンドに対応させています.

遠方銀河の研究者であれば,このU-V-Jという組み合わせにピンとくる方も多いはずですが.縦軸に静止系U-Vの色を,横軸に静止系V-Jの色を取った二色図を使うことで,星形成が活発で若い星の光が支配的な銀河と,星形成活動が弱く古い星が支配的な銀河を切り分けることができるた

め、理想のフィルターセットとされています。

私たちの提案は、スパイダー・ウェブ原始銀河団の全面(約6分角×3分角)を静止系Uバンド、Vバンド、Jバンド、およびPa $\beta$ 輝線でマッピングしようというものです。視野内のすべての原始銀河団メンバー銀河を0.1秒角の解像度で「解剖」し、まずは(1)Pa $\beta$ 輝線の輝度分布をもとに個々の銀河内部における正確な星形成領域の分布を理解する、そして(2)静止系UVJのカラー分布を同じく0.1秒角の解像度で分解して銀河内部の星種族の分布を明らかにする。わずか4時間程度のコンパクトな観測でありながら、100億年前の宇宙で成長する銀河団銀河のすかたを克明に描き出すことができると期待され、その効率のよさも、貴重なJWSTの観測時間を有効利用できるという観点で、ポイントになったかもしれません。

## まとめに代えて

2021年3月末、私たちのもとにプロポーザル採択の通知が届きました。JWSTの記念すべき最初のサイクルに観測時間を獲得できたことを、チーム一同、大変光栄なことだと思っています。本稿は日本の研究機関に所属する、小山・嶋川・児玉・Perez-Martinezの4名で執筆しましたが、プロポーザルの準備にあたっては、本提案の共同代表であるスペイン Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) の Helmut Dannerbauer 氏、同じく co-I の Shuowen Jin 氏 (IAC) とも密に協力して進めました。チームのメンバーが日本・ハワイ・スペインに分布しているため、時差の関係で打合せの設定には大変苦労しました(スペインの朝8時、日本の夕方5時、ハワイの夜10時というのがほぼ唯一可能な時間帯でした)。しかし一旦作業を始めてみると、「常に誰かは昼間」という状態で、驚くべき効率でプロポーザルを仕上げることができました。すべて順調にいけば、2022年中には観測が実行され、JWSTのデータを手にすることができるはずです。そこからまた、原始銀

河団の開拓史に新たな1ページが刻まれます。

## 参考文献

- [1] Venemans, B. P., et al., 2007, A&A, 461, 823
- [2] Roettgering, H. J. A., et al., 1994, A&AS, 108, 79
- [3] Miley, G. K., et al., 2006, ApJ, 650, 29
- [4] Kurk, J. D., et al., 2000, A&A, 358, 1
- [5] Pentericci, L., et al., 2000, A&A, 361, 25
- [6] De Breuck, C., et al., 2010, ApJ, 725, 36
- [7] Kurk, J. D., et al., 2004, A&A, 428, 793
- [8] Kodama, T., et al., 2007, MNRAS, 377, 1717
- [9] Tanaka, M., et al., 2010, A&A, 518, 18
- [10] Dannerbauer, H., et al., 2014, A&A, 570, 55
- [11] Tadaki, K., et al., 2019, PASJ, 71, 40
- [12] Jin, S., et al., 2021, A&A, 652, 11
- [13] Tanaka, I., et al., 2011, PASJ, 63, 415
- [14] Hayashi, M., et al., 2012, ApJ, 757, 15
- [15] Koyama, Y., et al., 2014, ApJ, 789, 18
- [16] Koyama, Y., et al., 2013, MNRAS, 428, 1551
- [17] Shimakawa R., et al., 2018, MNRAS, 481, 5630
- [18] Shimakawa, R., et al., 2014, MNRAS, 441, 1

### Scrutinizing the Distant Spiderweb Protocluster with JWST

Yusei KOYAMA<sup>1</sup>, Rhythm SHIMAKAWA<sup>2</sup>,  
Tadayuki KODAMA<sup>3</sup> and José Manuel PÉREZ-  
MARTÍNEZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Subaru Telescope, National Astronomical  
Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place,  
Hilo, HI 96720, USA

<sup>2</sup>National Astronomical Observatory of Japan,  
2-21-1 Ohsawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>3,4</sup>Graduate School of Science, Tohoku University,  
6-3 Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-  
8578, Japan

Abstract: We introduce our JWST/NIRCam Cycle-1 program to observe the “Spiderweb” protocluster at  $z=2.16$ . This protocluster was discovered back in 2000, and over the last ~20 years, astronomers investigated this protocluster region with multi-wavelength observations. Our JWST observations will map, resolve, and penetrate the protocluster galaxies with unprecedented depths and spatial resolution, which we believe will shed new light on the cluster galaxy formation in the early universe.