

¿ESTÁ EL PARADIGMA Λ CDM EN PELIGRO

No es la única forma, pero muy probablemente es uno de los métodos más potentes para estudiar las primeras fases de la evolución de nuestro Universo, incluso más allá de la época de la recombinación. Lo afirmamos desde nuestro punto de vista subjetivo como entidades basadas en la existencia de bariones, estrellas, y planetas, y contando además con que somos astrofísicos extragalácticos. Nos referimos a cómo se formaron las primeras estrellas y galaxias, un tema que ahora está renaciendo gracias a los primeros datos proporcionados por el telescopio espacial más potente jamás construido, el JWST.



Pablo G. Pérez-González
Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA
pgperez@cab.inta-csic.es

Mauro Stefanon
Universitat de València
mauro.stefanon@uv.es

El 12 de julio de 2022, JWST (usaremos en este artículo solo las siglas del telescopio, siguiendo la política de AAS y RAS) distribuyó los primeros datos públicos a todos los astrofísicos del mundo, después de completar exitosamente un período de 6 meses de puesta a punto. Este fue el pistoletazo de salida de una carrera por descubrir nuevas galaxias a alto desplazamiento al rojo, más en concreto explorando los primeros 500 millones de años después del Big Bang ($z \geq 10$), o incluso los primeros 250 Myr ($z \geq 15$). Este objetivo se está abordando a través de estudios fotométricos y espectroscópicos profundos realizados por todos los instrumentos JWST, desde las longitudes de onda más azules analizadas por NIRCcam, las más rojas analizadas por MIRI, así como aprovechando las prestaciones espectroscópicas y espectrofotométricas de NIRSpec y NIRISS. Describimos los resultados en estos primeros once meses en este artículo.

Las llamadas “primeras observaciones públicas” (ERO por sus siglas en inglés, *Early Release Observations*) mostraron el potencial único de JWST desde esa primera publicación de datos en julio de 2022. Además de las imágenes ultraprofundas tomadas para el cúmulo MACS0723, que mejoraron las observaciones de Hubble en profundidad, y especialmente de Spitzer en resolución espacial en el infrarrojo medio, los espectros de galaxias de alto desplazamiento al rojo fueron el conjunto de datos más significativo y único proporcionado por JWST. Solo cuatro días después de la publicación de los datos ERO, el 18 de julio, Carnall et al. (2023) presentaron desplazamientos al rojo espectroscópicos obtenidos con líneas de emisión para 10 fuentes, incluidas cinco a $5 < z < 9$, todas con líneas de emisión [OIII] muy fuertes y muy bien detectadas, e incluso detecciones de emisión H δ .

Antes de que JWST empezara a proporcionar datos, la mayor parte de la información sobre las propiedades físicas de las fuentes de alto desplazamiento al rojo provenía del análisis de fotometría de banda ancha (equivalente a una resolución espectral de $R \sim 5$). Solo existían unos pocos espectros, en su mayoría ruidosos, para fuentes a $z > 6$, obtenidos con espectrógrafos de infrarrojo cercano montados en telescopios terrestres de 8-10 metros. Estos estudios se centraron en la emisión Lyman- α y líneas metálicas en el UV (p. e., Stark et al. 2017). De hecho, a estos desplazamientos hacia el rojo, el rango óptico en reposo se desplaza

POR LOS PRIMEROS RESULTADOS DE JWST?

a $\lambda \geq 3 \mu\text{m}$, fuera del alcance de HST y de los espectrógrafos terrestres. El acceso a este régimen de longitud de onda solo estaba disponible con profundidades suficientes para explorar el Universo lejano a través de imágenes de banda ancha a $3.6 \mu\text{m}$ y $4.5 \mu\text{m}$ proporcionadas por Spitzer/IRAC. Antes del lanzamiento de JWST, sabíamos de la presencia de líneas de emisión prominentes que parecían afectar la emisión en las citadas bandas. Sin embargo, la sensibilidad limitada (hasta magnitud 27 como mucho) y la relativamente baja resolución espacial (PSF FWHM $\sim 1.8''$) de IRAC nos impedían conocer en detalle las propiedades de estas galaxias a alto desplazamiento al rojo. Fue normal entonces que todos nos quedáramos impresionados por el salto en la calidad y el rango espectral cubierto por NIRSpec en esos datos ERO!

A las ERO pronto se unieron las primeras observaciones proporcionadas por exploraciones públicas como CEERS y GLASS, dos proyectos denominados Early Release Science (ERS), planeados para proporcionar datos públicos y mostrar las prestaciones de JWST a toda la comunidad en los primeros seis meses de la misión científica. Con todas estas observaciones, un gran número de artículos aparecieron en las siguientes semanas. Llegado este momento queremos hacer un inciso para mencionar que muchos de nosotros, antes del lanzamiento de JWST, considerábamos la disponibilidad pública de los datos de JWST desde día 1 como una política muy positiva. No obstante, debemos decir que la gran competencia entre equipos fue sorprendente, poco saludable en cierta medida, e incluso preocupante. De hecho, las reducciones de datos disponibles en el archivo de JWST/MAST estaban lejos de ser óptimas. En esas primeras semanas de la misión científica, algunos de los equipos con amplia experiencia previa en el uso de datos simulados aún luchaban por mejorar la calidad de las calibraciones (incluidos los errores sistemáticos en la calibración fotométrica absoluta de hasta varias décimas de magnitud, Boyer et al. 2022). Sin embargo, al mismo tiempo otros equipos se apresuraban a publicar, y ya no hablamos de publicar en la revista con árbitro, sino a publicar en artículos rápidamente colgados en astro-ph o incluso en Twitter. No hace falta decir que esta actitud frenética implicaba la presencia de fallos potencialmente significativos en el análisis e interpretación de los nuevos datos que empezaban a llegar.

Centrándonos ahora en los resultados científicos, algo comenzó a surgir como un resultado sorprendente y robusto. Con observaciones como las proporcionadas por el programa CEERS, que se planeó para alcanzar magnitud 29 (AB) en 7 filtros que abarcan desde $1.15 \mu\text{m}$ hasta $4.4 \mu\text{m}$ en 10 apuntados NIRCам, esperábamos (bastante) menos de una decena de galaxias a $z > 9$, considerando que CEERS muestrea la población brillante ($L > L^*$). Sin embargo, artículos como Naidu et al. (2022), Harikane et al. (2022), Castellano et al. (2022), Donnan et al. (2022), Bouwens et al. (2022a), Yang et al. (2022) y Finkelstein et al. (2022) proporcionaron candidatas muy prometedoras de galaxias a $z \sim 10$ y $z \sim 12$, incluso llegando a $z \sim 16$ o $z \sim 20$. Estos equipos independientes analizaron los mismos conjuntos de datos (eran públicos) y encontraron muestras de 1 a 25 candidatas a $z > 8$ (remarcamos la palabra candidata, véase más abajo), con un típico (y preocupante) nivel del 20% de objetos en común entre muestras. Incluso con las grandes incertidumbres de estos primeros artículos, todos los trabajos coincidieron en que JWST estaba descubriendo muchas más candidatas a galaxias a alto desplazamiento al rojo de lo esperado en base a datos y simulaciones pre-JWST. La diferencia no era pequeña, se descubrían al menos el doble y típicamente 5 veces más candidatas robustas de las esperadas (véase, por ejemplo, la Figura 5 en Finkelstein et al. 2022). Esto sugería que las galaxias en el Universo primitivo ensamblaron su contenido estelar de manera muy eficiente.

Dos o tres meses más tarde siguieron artículos más completos, que confirmaron el resultado mencionado anteriormente, mejoraron las coincidencias entre las muestras y discutieron de manera crítica y constructiva los desafíos a los que nos enfrentábamos con los primeros datos JWST. Artículos como Bouwens et al. (2023), Finkelstein et al. (2023b) y Harikane et al. (2023) presentaron muestras combinadas extraídas de varios conjuntos de datos.

Más allá de la selección fotométrica, la confirmación espectroscópica de candidatas a galaxias a $z > 8$ es una de las prestaciones más asombrosas de JWST. A diferencia de HST, con JWST podemos seleccionar candidatas a galaxias a muy alto desplazamiento al rojo y luego abordar la confirmación espectroscópica, especialmente con el instrumento NIRSpec de la ESA, que ha contado con una importante contribución de la comunidad española.

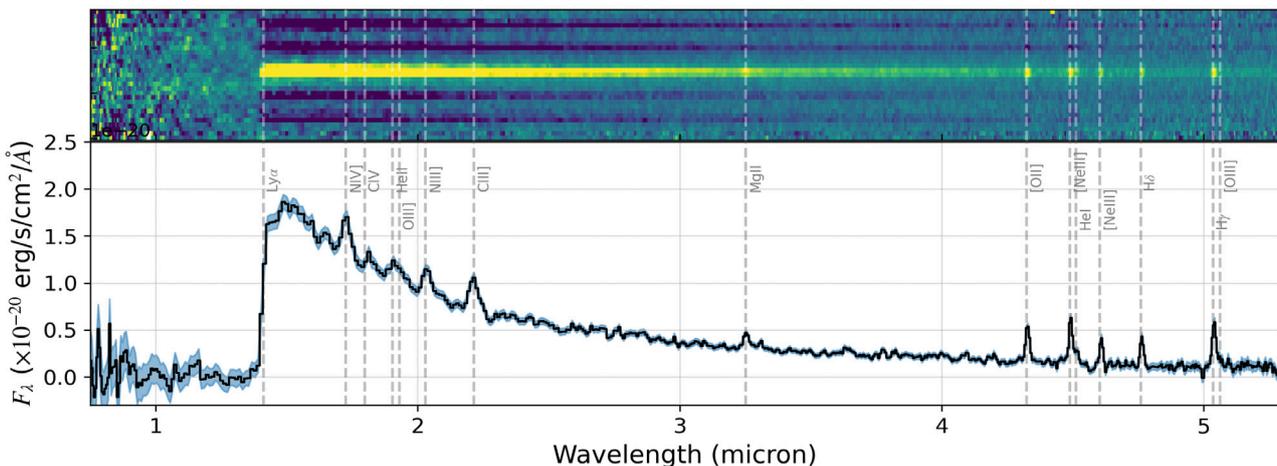
El punto de partida de esta tarea de confirmación espectroscópica consistió en el seguimiento de fuentes previamente identificadas con HST. Aunque no fue la primera, un ejemplo notable es GNz11 (Oesch et al. 2016), la galaxia más luminosa con formación estelar (al menos esta era la naturaleza asignada antes de JWST, véase Maiolino et al. 2023) con el desplazamiento al rojo más alto en la era pre-JWST. El espectro grisma de HST/WFC3 de 12 órbitas (~ 11 horas de tiempo de exposición acumulado, Oesch et al. 2016) no mostraba grandes características espectrales aparte de un salto identificado con el de Lyman. Pero los datos de JWST ahora mostraban una gran cantidad de líneas de emisión sobresaliendo por encima de un sólido continuo y su *break* (Bunker et al. 2023; Figura 1). Entre estas líneas encontramos incluso emisión Ly- α en una época que se considera cercana a la era de la preionización.

Rápidamente empezaron a aparecer más trabajos mostrando la verificación espectroscópica de fuentes descubiertas tanto por HST como ya por JWST (Curtis-Lake et al. 2023, Arrabal-Haro et al. 2023a,b, Harikane et al. 2023, Roberts-Borsani et al. 2022). La espectroscopía ha confirmado no sólo que muchas de las candidatas a $z > 8$ eran reales,

sino también ha revelado interesantes poblaciones de galaxias que podrían contaminar esas muestras, complicando la construcción de muestras robustas de galaxias primigenias. Ejemplos de tales poblaciones son “*dusty starburst*” a $z=4-6$, y fuentes con líneas de emisión súper-intensas con desplazamientos al rojo tan altos como $z \sim 7$, que cuentan con anchuras equivalentes en reposo por encima de los 1000 Angstrom (Zavala et al. 2022, Naidu et al. 2023, Pérez-González et al. 2023a, Arrabal-Haro et al. 2023a).

Si bien la espectroscopía en el infrarrojo cercano y medio de JWST podría decirse que proporciona el mayor potencial de nueva ciencia sobre el universo primitivo, la mejora en las capacidades de imagen a $3-5 \mu\text{m}$ (NIRCam) y hasta $\sim 18 \mu\text{m}$ (MIRI) en términos de sensibilidad y resolución espacial (que minimiza la contaminación fotométrica por fuentes vecinas) constituye también un recurso muy poderoso. Específicamente, esto ha permitido a la comunidad seleccionar muestras de galaxias con alto desplazamiento al rojo a partir de longitudes de onda ópticas e infrarrojas en reposo, lo que reduce significativamente los efectos de selección introducidos por la atenuación del polvo y las poblaciones estelares evolucionadas.

Figura 1. Espectro de NIRSpec de GNz11, $z=10.6$, publicado en Bunker et al. (2023). El espectro está tomado con el prisma (resolución espectral alrededor de 100) y muestra un claro break de Lyman además de múltiples líneas de hidrógeno, helio y varios metales.

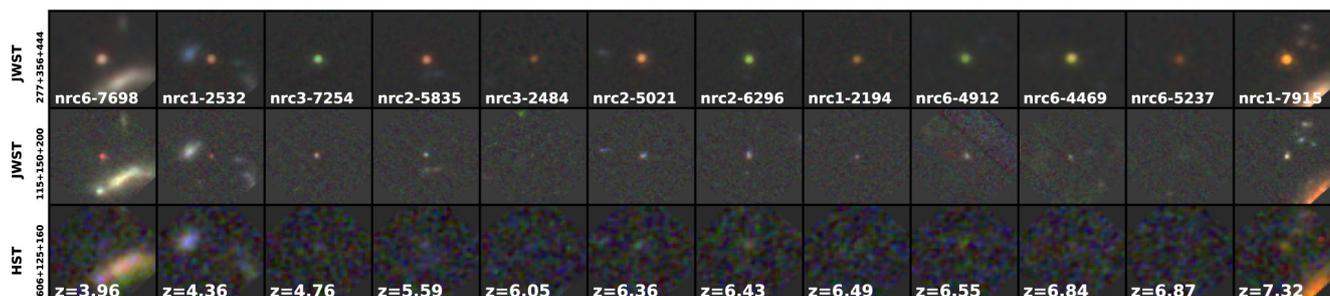


Estos tipos de objetos pueden contaminar potencialmente las muestras de galaxias con elevados desplazamientos al rojo seleccionadas a partir de grandes saltos de color. Son también, por otra parte, galaxias extremadamente interesantes en sí. Por ejemplo, se han descubierto galaxias rojas a $5 < z < 9$ que podrían ser extremadamente masivas, tal como fue presentado en artículos como Labbé et al. (2023), Barrufet et al. (2022), Rodighiero et al. (2023), Pérez González et al. (2023b; Figura 2) y Atkins et al. (2023). Estos estudios se basaron en esfuerzos previos con Spitzer (p. e., Stefanon et al. 2015; Alcalde Pampliega et al. 2019; Wang et al. 2019) que, sin embargo, carecían tanto de la sensibilidad como de la resolución espacial para determinar de manera sólida sus propiedades físicas. Actualmente todavía existe un debate intenso sobre la naturaleza de esta población de galaxias que podría presentar masas estelares extremadamente altas, incluso desafiando los modelos Λ CDM ya que no podría explicar la formación de grandes cantidades de estrellas en el Universo muy joven (véase, por ejemplo, Boylan-Kolchin 2023, Lovell et al. 2023, Haslbauer et al. 2022, pero también Mason et al. 2023, Keller et al. 2023, McCaffrey et al. 2023, Prada et al. 2023). Sin embargo, estudios recientes han cuestionado esta primera interpretación,

al menos para algunas de las fuentes, señalando la presencia potencial de poblaciones estelares extremadamente jóvenes que podrían aumentar el flujo las bandas del infrarrojo medio y sesgar las estimaciones de masa (Endsley et al. 2022, Pérez-González et al. 2023a), así como la posible presencia de AGN en muchos de ellos (Barro et al. 2023). De hecho, muchas de estas galaxias que JWST está descubriendo a $z > 5$ parecen albergar AGN oscurecidos, como revelan las componentes anchas de las intensas líneas de emisión observadas con NIRSpec, sus peculiares distribuciones espectrales de energía (rojas en longitudes de onda mayores de $2 \mu\text{m}$, azules en bandas de longitudes de onda más corta) y su morfología compacta (Kocevski et al. 2023, Larson et al. 2023, Barro et al. 2023).

En los próximos meses continuaremos con la saga sobre las galaxias a muy alto desplazamiento al rojo, así como sobre las nuevas fuentes rojas descubiertas por JWST. Estamos comenzando a obtener datos significativamente más profundos que extienden las funciones de luminosidad al extremo débil y a desplazamientos al rojo más altos con programas como MIDIS, NGDEEP o JADES (Pérez-González et al. 2023b, Austin et al. 2023, Harikane et al. 2023, Adams et al. 2023). Proyectos

Figura 2. Ejemplos de las galaxias descubiertas por JWST que presentan colores muy rojos a longitudes de onda mayores que $2 \mu\text{m}$ (fila superior) y azules por debajo (fila central), siendo extremadamente débiles para observaciones HST (file inferior). Las estimaciones de masas estelares han sido consideradas como demasiado grandes para los modelos basados en Λ CDM. Esta figura está adaptada de Pérez-González et al. (2023a) y entraron en el artículo de Labbé et al. (2023), con masas mayores en el último artículo comparado con lo obtenido en el primero y en otros trabajos como Endsley et al. (2022).



como PRIMER y COSMOS-web nos darán mejores estadísticas para diferentes tipos de poblaciones de galaxias con densidades numéricas pequeñas pero que podrían representar etapas evolutivas importantes. La naturaleza de esas galaxias a $z=7-9$ supuestamente demasiado masivas también se investigará con campañas espectroscópicas de seguimiento, así como con datos fotométricos con MIRI. En resumen, los primeros 9 meses de JWST han sido increíbles, pero los resultados más emocionantes aún están por llegar.

REFERENCIAS

- Adams, N. J., et al. "Discovery and properties of ultra-high redshift galaxies ($9 < z < 12$) in the JWST ERO SMACS 0723 Field", MNRAS 518, 4755 (2023)
- Alcalde Pampliega, B., et al. "Optically Faint Massive Balmer Break Galaxies at $z > 3$ in the CANDLES/GOODS Fields", ApJ 876, 135 (2019)
- Arrabal Haro, P., et al. "Spectroscopic verification of very luminous galaxy candidates in the early universe", arXiv:2303.15431 (2023)
- Arrabal Haro, P., et al. "Spectroscopic confirmation of CEERS NIRCам-selected galaxies at $z \sim 8-10$ ", arXiv:2304.05378 (2023)
- Atkins et al., 2022
- Austin, D., et al. "A Large Population of Faint $8 < z < 16$ Galaxies Found in the First JWST NIRCам Observations of the NGDEEP Survey", arXiv:2302.04270 (2023)
- Barro, G., et al. "Extremely red galaxies at $z=5-9$ with MIRI and NIRSpect: dusty galaxies or obscured AGNs?", arXiv:2305.14418 (2023)
- Barrufet, L., et al. "Unveiling the nature of infrared bright, optically dark galaxies with early JWST data", MNRAS 522, 449 (2023)
- Bouwens, R. J., et al. "Evolution of the UV LF from z 15 to z 8 Using New JWST NIRCам Medium-Band Observations over the HUDF/XDF", MNRAS.tmp (2023)
- Boyer, M. L., et al. "The JWST Resolved Stellar Populations Early Release Science Program. I. NIRCам Flux Calibration <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022RNAAS...6..191B>", RNAAS 6, 191 (2022)
- Boylan-Kolchin, M. "Stress testing Λ CDM with high-redshift galaxy candidates", NatAs.tmp (2023)
- Bunker, A. J., et al. "JADES NIRSpect Spectroscopy of GN-z11: Lyman-alpha emission and possible enhanced nitrogen abundance in a $z=10.60$ luminous galaxy", arXiv:2302.07256 (2023)
- Carnall, A. C., et al. "A first look at the SMACS0723 JWST ERO: spectroscopic redshifts, stellar masses, and star-formation histories", MNRAS 518, L45 (2023)
- Castellano, M., et al. "Early Results from GLASS-JWST. XIX. A High Density of Bright Galaxies at $z \approx 10$ in the A2744 Region <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023ApJ...948L..14C>", ApJL 948, L14 (2023)
- Curtis-Lake, E., et al. "Spectroscopic confirmation of four metal-poor galaxies at $z = 10.3-13.2$ <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023NatAs...7..622C>", NatAs 7, 622 (2023)
- Donnan, C. T., et al. "The abundance of $z \geq 10$ galaxy candidates in the HUDF using deep JWST NIRCам medium-band imaging", MNRAS 520, 4554 (2023)
- Endsley, R., et al. "A JWST/NIRCам Study of Key Contributors to Reionization: The Star-forming and Ionizing Properties of UV-faint $z \sim 7-8$ Galaxies", arXiv:2208.14999 (2022)
- Finkelstein, S. L., et al. "A Long Time Ago in a Galaxy Far, Far Away: A Candidate $z \sim 12$ Galaxy in Early JWST CEERS Imaging", ApJL 940, L55 (2022)
- Finkelstein, S. L., et al. "CEERS Key Paper. I. An Early Look into the First 500 Myr of Galaxy Formation with JWST", ApJL 946, L13 (2023)
- Harikane, Y., et al. "Pure Spectroscopic Constraints on UV Luminosity Functions and Cosmic Star Formation History From 25 Galaxies at $z_{\text{spec}}=8.61-13.20$ Confirmed with JWST/NIRSpect", arXiv:2304.06658 (2023)
- Haslbauer, M. et al., "Has JWST Already Falsified Dark-matter-driven Galaxy Formation?", ApJ 939, 31 (2022)
- Keller, B. W., et al., "Can Cosmological Simulations Reproduce the Spectroscopically Confirmed Galaxies Seen at $z \geq 10$?", ApJ 943, 28 (2023)
- Kocevski, D. D., et al. "CEERS Key Paper. II. A First Look at the Resolved Host Properties of AGN at $3 < z < 5$ with JWST", ApJL 946, L14 (2023)
- Labbé, I., et al. "A population of red candidate massive galaxies 600 Myr after the Big Bang", Natur 616, 266 (2023)
- Larson, R. L., et al. "A CEERS Discovery of an Accreting Supermassive Black Hole 570 Myr after the Big Bang: Identifying a Progenitor of Massive $z > 6$ Quasars", arXiv:2303.08918 (2023)
- Lovell, C. C., et al. "Extreme value statistics of the halo and stellar mass distributions at high redshift:

- are JWST results in tension with Λ CDM?", MNRAS 518, 2511 (2023)
- Maiolino, R., et al. "JWST-JADES. Possible Population III signatures at $z=10.6$ in the halo of GN-z11", arXiv:2306.00953 (2023)
 - Mason, C. A., et al. "The brightest galaxies at cosmic dawn", MNRAS 521, 497 (2023)
 - McCaffrey, J., et al., "No Tension: JWST Galaxies at $z > 10$ Consistent with Cosmological Simulations", arXiv:2304.13755 (2023)
 - Naidu, R. P., et al. "Two Remarkably Luminous Galaxy Candidates at $z \approx 10-12$ Revealed by JWST", ApJL 940, L14 (2022)
 - Oesch, P. A., et al. "A Remarkably Luminous Galaxy at $z=11.1$ Measured with Hubble Space Telescope Grism Spectroscopy", ApJ 819, 129 (2016)
 - Pérez-González, P. G., et al. "Life beyond 30: probing the $-20 < M_{UV} < -17$ luminosity function at $8 < z < 13$ with the NIRCам parallel field of the MIRI Deep Survey", arXiv:2302.02429 (2023)
 - Pérez-González, P. G., et al. "CEERS Key Paper. IV. A Triality in the Nature of HST-dark Galaxies", ApJL 946, L16 (2023)
 - Prada, F., et al., "Confirmation of the standard cosmological model from red massive galaxies ~ 600 Myr after the Big Bang", arXiv:2304.11911, (2023)
 - Roberts-Borsani, G., et al. "Early Results from GLASS-JWST. I: Confirmation of Lensed $z \geq 7$ Lyman-break Galaxies behind the Abell 2744 Cluster with NIRISS", ApJL 938, L13 (2022)
 - Rodighiero, G., et al. "JWST unveils heavily obscured (active and passive) sources up to $z \sim 13$ ", MNRAS 518, L19 (2023)
 - Stark, D. P., et al. "Ly α and C III] emission in $z = 7-9$ Galaxies: accelerated reionization around luminous star-forming systems?", MNRAS 464, 469 (2017)
 - Stefanon, M., et al. "Stellar Mass Functions of Galaxies At $4 < z < 7$ from an IRAC-selected Sample in Cosmos/Ultravista: Limits on the Abundance of Very Massive Galaxies", ApJ 803, 11 (2015)
 - Wang, T., et al. "A dominant population of optically invisible massive galaxies in the early Universe", Nature 572, 211 (2019)
 - Yang, L., et al. "Early Results from GLASS-JWST. V: The First Rest-frame Optical Size-Luminosity Relation of Galaxies at $z > 7$ ", ApJL 938, L17 (2022)
 - Zavala, J. A., et al. "Dusty Starbursts Masquerading as Ultra-high Redshift Galaxies in JWST CEERS Observations", ApJL 943, L9 (2023)