

Viola Gelli<sup>1,2</sup>, Stefania Salvadori<sup>1,2</sup>

# A caccia di galassie nane all'alba dell'Universo

*Hunting for dwarf galaxies at cosmic dawn*

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze

<sup>2</sup> INAF, Osservatorio Astrofisico di Arcetri

**Riassunto.** Il telescopio spaziale più grande mai costruito, il James Webb Space Telescope (JWST), sarà lanciato a ottobre 2021 e ci permetterà di osservare in profondità l'Universo lontano. Grazie a sofisticate simulazioni cosmologiche ad alta risoluzione, abbiamo dimostrato che JWST potrà osservare, per la prima volta, centinaia di sorgenti poco luminose ma fondamentali per la storia cosmica: le galassie nane satelliti.

**Parole chiave.** Galassie nane, prime galassie, JWST.

Come suggerisce il nome, le galassie nane sono oggetti astronomici piccoli, la cui massa è almeno cento volte inferiore rispetto a quella della nostra galassia, la Via Lattea. Nonostante ciò, i modelli cosmologici ci dicono che il ruolo che queste piccole ma numerose galassie nane hanno rivestito nella storia dell'Universo, dal Big Bang fino ai giorni nostri, è stato fondamentale. Sappiamo infatti che furono proprio queste ad ospitare le prime stelle formate nel cosmo, che iniziarono a brillare appena poche centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang. Nel primo miliardo di anni di vita dell'Universo, inoltre, le galassie nane costituiva-

**Abstract.** The greatest space telescope ever built, the James Webb Space Telescope (JWST), will be launched in October 2021, allowing us to observe the distant Universe in depth. Thanks to sophisticated high-resolution cosmological simulations, we demonstrate that for the very first time JWST will observe hundreds of small sources which though very faint are fundamental in cosmic history: dwarf satellite galaxies.

**Keywords.** Dwarf galaxies, first galaxies, JWST.

As their name suggests, dwarf galaxies are small astrophysical objects with masses more than a hundred times less with respect to our Milky Way. Nevertheless, thanks to cosmological models we know that they have played a fundamental role in cosmic history, from the Big Bang to the present day. Dwarf galaxies were indeed the first galaxies to form in the Universe, hosting the first generations of stars that took shape just a few hundred million years after the



no la quasi totalità delle galassie e fu proprio in tali epoche remote che iniziarono ad assemblarsi tramite i cosiddetti eventi di *merger*, formando galassie via via più massicce. Le galassie nane rappresentano dunque i mattoni base a partire dai quali hanno avuto origine le grandi galassie odierne, come la nostra Via Lattea.

Data la loro piccola massa in stelle, inferiore a 1000 milioni di masse solari, le galassie nane sono quelle più deboli e dunque più difficili da osservare nell'Universo lontano, dove possiamo rivelare soltanto gli oggetti più brillanti. Pertanto, sebbene gli attuali telescopi siano riusciti a studiare in modo estremamente dettagliato le galassie nane vicine, che orbitano come satelliti attorno alla Via Lattea, al giorno d'oggi catturare la luce delle galassie nane più lontane rappresenta ancora una chimera. Tuttavia l'avvento del più grande telescopio spaziale mai esistito, il James Webb Space Telescope (JWST), il cui lancio è previsto per ottobre 2021, rivoluzionerà *completamente* questo scenario. JWST, che è frutto di una collaborazione internazionale tra NASA, Agenzia Spaziale Europea e Agenzia Spaziale Canadese ha uno specchio di 6,5 metri di diametro suddiviso in 18 esagoni ed è ottimizzato per osservare nell'infrarosso. Grazie all'espansione dell'Universo, infatti, la luce proveniente dalle galassie più distanti viene "stirata" a queste frequenze (*redshift*) mentre percorre lo spazio cosmico per giungere fino a noi. JWST ci fornirà quindi l'opportunità di studiare le galassie più remote, situate ad oltre 13 miliardi di anni luce da noi, immortalandone l'immagine all'alba dell'Universo. Quali caratteristiche ci attendiamo per le deboli galassie nane che popolavano il giovane Universo? JWST sarà davvero in grado di catturare la loro luce *per la prima volta*? E cosa ci riveleranno queste osservazioni?

Big Bang. During the first billion years of the Universe's existence, they represented the great majority of galaxies. Then they started coalescing, through so-called *merger events*, giving birth to progressively bigger galaxies. Hence dwarf galaxies constitute the basic building blocks for the formation of massive galaxies, such as our own Milky Way.

Due to their low stellar mass, lower than 1000 million solar masses, dwarf galaxies are also extremely faint. As a consequence, they are very difficult to detect, especially in the distant Universe where we are only able to capture the light of the most luminous objects. Indeed, our current telescopes are capable of studying in detail nearby dwarf galaxies that exist as satellites orbiting around the Milky Way, although detecting the light of the most distant ones still represents a great challenge. However, this scenario is going to be revolutionized very soon, with the advent of the greatest space telescope ever built: the James Webb Space Telescope (JWST). It is the fruit of collaboration between NASA, the European Space Agency and the Canadian Space Agency; its launch is scheduled for October 2021. Its mirror has a diameter of 6.5 meters and is composed of 18 hexagons. It is optimized for infrared observations: due to the continuous expansion of the Universe, the light of distant galaxies is indeed shifted to these wavelengths while traveling cosmic distances to reach us (*redshift*). JWST will therefore give us the opportunity to detect faint galaxies located more than 13 billion light-years away from us, capturing the light they produce at the dawn of the Universe.

What properties do we expect from the faint dwarf galaxies living in a very young Universe? Will JWST be effectively capable of catching their light *for the very first time*? What

Abbiamo risposto a queste domande grazie ad una sofisticata simulazione numerica cosmologica, capace di riprodurre su un super-computer l'evoluzione dell'Universo e di ciò che lo compone durante il suo primo miliardo di anni di vita. In particolare, la simulazione analizzata segue l'evoluzione di una tipica galassia remota massiccia, una così detta Lyman Break Galaxy (LBG), e dell'ambiente che la circonda. Abbiamo scelto di analizzare questa simulazione perché le galassie LBG, grazie alla loro estrema luminosità pari a più di dieci miliardi di volte quella del sole, sono tra le pochissime galassie remote ad essere già state identificate con i telescopi attuali.

La simulazione ci ha rivelato che, proprio come la nostra Via Lattea è circondata da galassie nane satelliti, anche intorno ad una tipica LBG primordiale vivono piccole galassie nane, al momento invisibili agli occhi dei nostri telescopi. Analizzando in dettaglio queste galassie satelliti ne abbiamo scoperto le proprietà: esse sono centinaia di volte meno massicce rispetto alla grande LBG a cui orbitano intorno e, al contrario di quest'ultima, sono povere di gas. La loro formazione ed evoluzione viene influenzata dalla presenza della vicina LBG e dall'ambiente particolarmente denso in cui vivono. Innanzitutto, molte galassie nane hanno subito eventi di merger. Inoltre, la composizione chimica delle loro stelle risente fortemente dei continui processi di formazione stellare all'interno della LBG: al termine della loro vita, infatti, le stelle più massicce esplodono come supernovae, liberando energia ed arricchendo con nuovi elementi chimici sintetizzati al loro interno l'ambiente intergalattico circostante, all'interno del quale nascono e vivono le galassie nane satelliti.

will we learn from such observations?

We answered these questions using a state-of-art cosmological simulation which through a supercomputer reproduces the evolution of the Universe during its first billion years. Specifically, the simulation targets a typical massive galaxy, a so-called Lyman Break Galaxy (LBG), and the environment surrounding it. We chose this kind of simulation because LBGs, thanks to their extremely high luminosities, are among the few distant galaxies that our current telescopes have already observed and identified.

The results of the simulation revealed that many small dwarf galaxies dwell and orbit around a typical primordial LBG, in the same way that our Milky Way is surrounded by its own satellite galaxies. Yet they are still invisible to the eyes of our current telescopes. We analyzed these sources in detail in the simulation and discovered their expected properties: they are more than a hundred times less massive than the nearby LBG, and they contain no gas, unlike this massive galaxy. Their formation and evolution have been strongly influenced by the LBG and by the dense environment in which they live in several ways. Firstly, many dwarf galaxies experienced merger events that characterize these dense regions. Secondly, the continuous processes of stellar formation happening in the LBG strongly affect the chemical composition of stars in the dwarf galaxies: when massive stars die, they explode as supernovae and pollute the surrounding environment in which dwarf galaxies form and live with new, heavier chemical elements.

Once we analysed the star formation and chemical histories of these primordial dwarf sat-

Una volta analizzate le storie evolutive e chimiche di queste prime galassie nane satelliti, siamo stati in grado di ricostruire il flusso di fotoni che ci aspettiamo che esse producano. Per farlo abbiamo tenuto di conto della loro emissione stellare e dell'effetto di attenuazione dovuto al gas e alla polvere presenti nel mezzo interstellare. Infine, abbiamo considerato gli effetti strumentali della camera infrarossa NIRCam che sarà a bordo di JWST. Nel riquadro di sinistra in Figura 2 è riportato il sistema di galassie predetto dalla simulazione cosmologica: il disco centrale corrisponde alla grande LBG mentre i punti luminosi circostanti sono proprio le galassie nane satellite. Nel riquadro di destra vediamo come la corrispondente immagine apparirà ai nuovi occhi di JWST in tipiche osservazioni profonde ottenute in 20 ore. I nostri risultati mostrano *per la prima volta* che JWST sarà davvero in grado di catturare la luce di galassie nane *satelliti* distanti 13 miliardi di anni luce, ovvero risalenti ad appena un miliardo di anni dopo il Big Bang. Inoltre, il nostro studio dimostra che queste deboli galassie satelliti possono essere facilmente identificate attorno alle luminose LBG e le loro proprietà fisiche svelate sfruttando le osservazioni dalla camera NIRCam a diverse lunghezze d'onda, i *colori*, che ci forniranno informazioni cruciali su età e metallicità stellari. Durante le campagne osservative ad alta priorità pianificate per i primi mesi di attività di JWST saranno osservate decine di galassie LBG remote. Qua risiede l'importanza del nostro lavoro. Stiamo infatti predicendo che mentre osserveremo le LBG, saremo anche in grado di identificare centinaia di galassie nane satelliti: un pasto gratis per JWST.

ellite galaxies, we were able to reconstruct the photon flux they are expected to produce. We considered their stellar emission along with the attenuation effects due to the presence of gas and dust. Finally, we reproduced the expected instrumental effects when images are taken through the near-infrared camera (NIRCam) on board JWST. In the left-hand panel of Figure 2, we can see the system of galaxies as predicted by high-resolution cosmological simulation: the central disk is the massive LBG, and the surrounding luminous dots are indeed the small dwarf satellite galaxies. On the right-hand side, we show the corresponding image as seen through the eyes of JWST in a typical deep observation with an exposure time of 20 hours. Our results show *for the first time* that the new space telescope will be able to successfully capture the light of satellite dwarf galaxies located as far away as 13 billion light-years, dating back to when the Universe was just one billion years old. We also demonstrate that these faint galaxies will be easily identified around luminous LBGs and that we will be able to derive their physical properties. This will be possible thanks to the numerous wavelengths used by NIRCam, which will allow us to observe different *colours* and thus acquire crucial information about stellar ages and metallicities. We expect to detect dozens of distant primordial LBGs already in the first high-priority observational campaigns planned for JWST: hence the importance of our study. Indeed, our results imply that hundreds of primordial dwarf satellite galaxies will be observed for the first time: a free lunch for JWST.

*Viola Gelli* è dottoranda presso l'Università degli Studi di Firenze dove nel 2019 ha conseguito la Laurea Magistrale in Scienze Fisiche e Astrofisiche con la sua Tesi "*Popolazioni stellari di galassie nane ad alto redshift*", i cui risultati sono stati pubblicati sulla rivista scientifica MNRAS. Il suo secondo studio "*Dwarf satellites of high-z Lyman Break Galaxies: a free lunch for JWST*" è stato appena pubblicato nella prestigiosa rivista ApJ Letters. È stata selezionata da ESO per presentare i suoi risultati all'importante evento degli "*ESO Hypatia Colloquia*".

*Stefania Salvadori* è Professore Associato di Fisica e Astrofisica presso l'Università degli Studi di Firenze dove è rientrata nel 2017 con una borsa Rita Levi Montalcini. Nel 2018 ha conseguito un finanziamento ERC-starting grant per il suo progetto *NEFERTITI* (NEar-FiEld cosmology Re-Tracing Invisible Times) che le ha permesso di formare il suo gruppo di ricerca. Nel 2019 le è stato conferito il Fiorino d'oro dalla città di Firenze.

*Viola Gelli* is a PhD student at the University of Florence, where in 2019 she took her Master's Degree in Physical and Astrophysical Sciences with the thesis "The stellar populations of high-redshift dwarf galaxies". The results of this study have been published in the peer-reviewed scientific journal MNRAS. Her second study, "Dwarf satellites of high-z Lyman Break Galaxies: a free lunch for JWST", has just been published in the prestigious journal ApJ Letters. She has been selected by ESO to present her results during the prestigious "ESO Hypatia Colloquia".

*Stefania Salvadori* is an Associate Professor in Physics and Astrophysics at the University of Florence, to which she returned in 2017 with a Rita Levi Montalcini fellowship. In 2018 she won an ERC-starting grant with the project "NEFERTITI" ("NEar-FiEld cosmology Re-Tracing Invisible Times"), which allowed her to form her research group. In 2019 she was awarded the Fiorino d'Oro by the city of Florence.

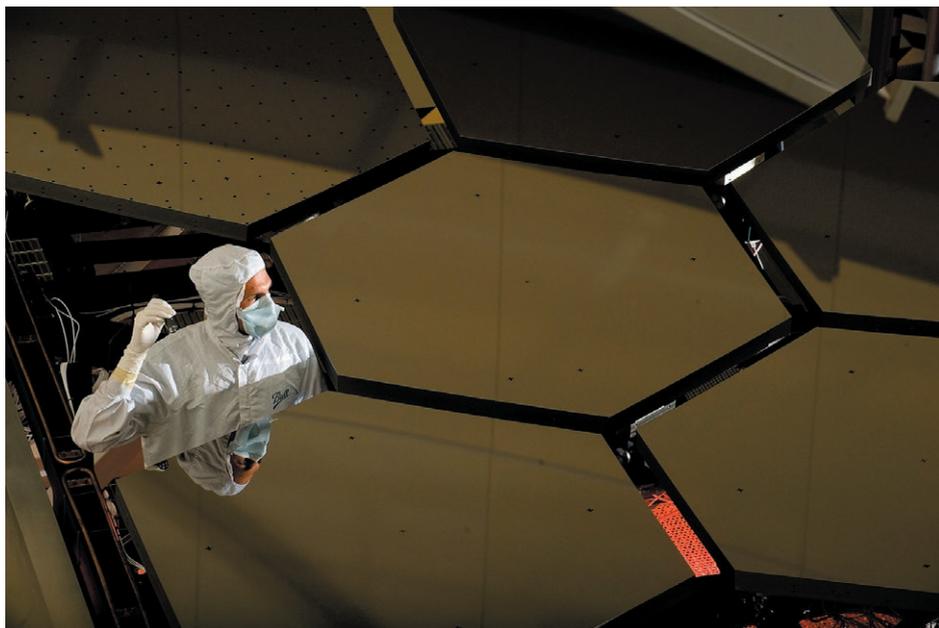


Figura 1. Sei dei 18 specchi esagonali del James Webb Space Telescope in fase di preparazione. Credit: NASA/MSFC/David Higginbotham/Emmett Given.

Figure 1. Six of the 18 hexagonal mirrors of the James Webb Space Telescope being readied for shipment. Credit: NASA/MSFC/David Higginbotham/Emmett Given

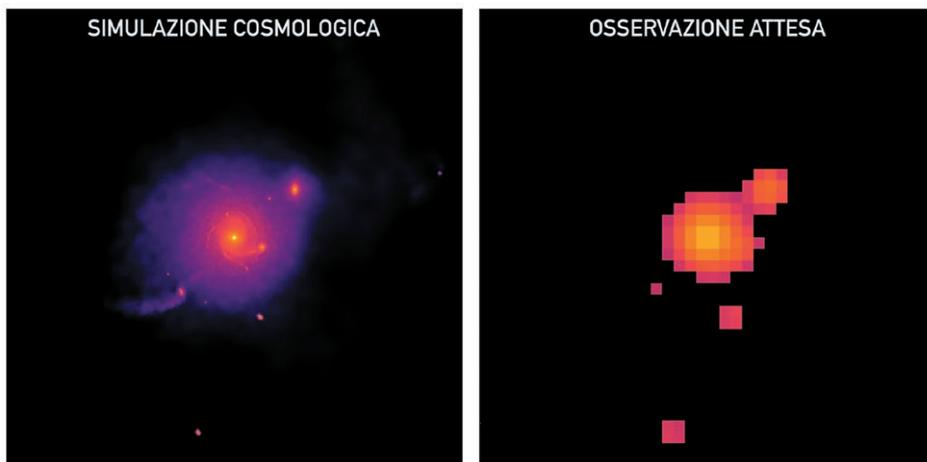


Figura 2. A sinistra vediamo la galassia LBG centrale e le sue 5 galassie nane satelliti come riprodotte dalla simulazione cosmologica ad alta risoluzione. A destra una riproduzione di come il sistema sarà osservato da JWST in 20 ore di osservazione nel filtro F356W.

Figure 2. Left: the central LBG and its five satellite dwarf galaxies as reproduced by the high-resolution cosmological simulation. Right: a mock image of how the system will appear in a JWST observation of 20 hours with the F356W filter.