

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

Tesi di Laurea Triennale

**Il ruolo delle interazioni tra galassie nell'era del
James Webb Space Telescope (JWST)**

Relatore

Prof.ssa Giulia Rodighiero

Laureanda

Giulia Logori

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Sommario	5
Introduzione	7
1 Lo scheletro dell'Universo: vuoti, gas e galassie	11
1.1 Super-ammassi, ammassi e gruppi di galassie.	11
1.2 La struttura di una galassia.	13
1.3 Classificazione morfologica delle galassie.	15
1.4 Le Galassie Peculiari.	18
2 Le interazioni di galassie	21
3 Le simulazioni idrodinamiche	25
3.1 Evoluzioni di interazioni tra galassie.	25
3.2 Progetto IllustrisTNG.	28
4 Il ruolo delle interazioni a vari redshifts	33
4.1 Interazioni che modificano la morfologia delle galassie.	33
4.2 Mergers ad alto redshift.	38
4.3 Il processo di crescita in massa delle galassie nell'Universo primordiale.	42
4.4 Il legame tra mergers di galassie ed evoluzione di quasars.	43
4.5 Mergers nell'epoca della reionizzazione.	49
4.6 Mergers di diverse tipologie di galassie.	53
4.6.1 Il ruolo delle interazioni nell'evoluzione delle galassie nane.	54
4.6.2 Jekyll and Hyde.	55
5 Discussioni e conclusioni	57
6 Bibliografia	63

Sommario

Questa tesi compilativa ha come obiettivo quello di raccontare il ruolo delle interazioni tra galassie nell'era del JWST (James Webb Space Telescope). La parte iniziale tratterà in generale dell'elemento, che costituisce principalmente l'Universo visibile formandone lo scheletro su grande scala, ovvero le galassie; queste ultime a loro volta organizzate secondo precise gerarchie dalle più piccole associazioni di alcune ad ammassi e super-ammassi galattici. Questa narrazione servirà a dare un'idea di dove avvengono le interazioni, cosa coinvolgono e sarà completata con la descrizione della morfologia delle galassie. Le loro caratteristiche a volte peculiari sono il risultato di fenomeni di interazione gravitazionale o merger che le coinvolgono oppure lo hanno fatto nel passato. Si proseguirà dunque con l'introduzione del concetto di interazione tra galassie spiegando come questi processi mareali ne vadano a modificare radicalmente l'aspetto lasciando dei resti visibili come ponti di stelle e gas e code di detriti. Per rappresentare in modo visivo quanto appena descritto nella tesi verranno utilizzate delle simulazioni idrodinamiche, che fanno parte del progetto IllustrisTNG. L'elaborato si concluderà presentando alcuni risultati descritti su articoli pubblicati nei vari decenni fino ad oggi riguardo questa tematica. Queste fonti raccontano e spiegano ciò che si è scoperto accade a vari redshifts raccogliendo prove di ciò che è stato dal passato fino ad oggi al presente nell'evoluzione delle galassie nel loro aspetto, nella loro struttura e nella loro composizione.

Introduzione:

Questa introduzione servirà da breve rassegna dei vari componenti dell'Universo attuale per iniziare ad orientarci nel cosmo. Partendo dal nostro sistema di riferimento terrestre sappiamo che il nostro Sole e tutto il Sistema Solare sono contenuti entro la Via Lattea, una galassia contenente circa 100 miliardi di stelle. Essa stessa è contenuta all'interno di un piccolo agglomerato di galassie chiamato Gruppo Locale, che attorno risulta circondato da spazio vuoto. Ad una distanza approssimabile a circa 10 Mpc sono presenti altri 5 gruppi simili; tutti in prossimità di un sistema di galassie chiamato Ammasso della Vergine a 18 Mpc. Questo schema si ripete nell'Universo, che risulta così essere formato da conformazioni di massa e dimensioni via via più grandi in base alla scala, le più grandi definite super-ammassi che al loro interno sono però costituite da strutture più piccole. Ne deriva un quadro complessivo caratterizzato da una forma filamentare, dove le galassie sono il tassello fondamentale della cosiddetta Struttura su Grande Scala. L'Universo, oltre a queste componenti visibili nell'ottico, ne presenta anche di visibili ad altre lunghezze d'onda. Una di queste sono i plasmi non condensati e diffusi, studiati con telescopi in raggi X in grado di rilevare il picco di emissione della loro radiazione. Vi sono poi i raggi cosmici, flussi di particelle ad elevata energia, che si suddividono in:

- primari, se sono di natura extraterrestre;
- secondari, se sono frutto dell'interazione dei primari con l'atmosfera terrestre.

Per riuscire ad indagare su epoche passate abbiamo a nostra disposizione lo studio dei fotoni, che si sono rivelati fondamentali per studiare l'evoluzione dinamica dell'Universo. Essi sono diffusi in modo omogeneo su varie lunghezze d'onda e presentano varie energie, ma la componente più importante è il cosiddetto Fondo Cosmico, nelle microonde (si veda figura I.1).

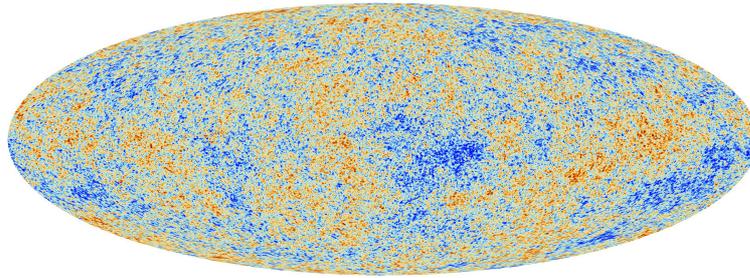


Figura I.1: Mappa del CMB-Cosmic Microwave Background con le sue anisotropie osservate dal satellite Planck. (Fonte:

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB , Credit: ESA and the Planck Collaboration).

Rimangono da descrivere i neutrini, l'antimateria, la materia oscura, l'energia oscura ed infine la radiazione gravitazionale. I neutrini sono particelle elementari difficili da rilevare con massa molto piccola che si muovono quasi alla velocità della luce e la loro presenza riesce ad influenzare la formazione delle strutture cosmiche. L'Antimateria invece risulta presente in quantità non significative e si presuppone che ciò sia dovuto ad un' asimmetria verificatasi, tra particelle e le loro rispettive antiparticelle, nelle primissime fasi di espansione dell'Universo portandolo ad essere dominato da materia barionica. La materia oscura è anch'essa costituita da materia non barionica ed è contenuta per esempio nelle galassie; interagisce gravitazionalmente con l'altra parte di materia e con il campo elettromagnetico ed è solo tramite questi processi che la si può osservare. L'energia oscura potrebbe essere la forza repulsiva responsabile dell'accelerazione del processo di espansione dell'Universo.

Infine introduciamo la radiazione gravitazionale, le relative onde alla velocità della luce perturbano la metrica spazio-temporale e si generano in seguito a fenomeni quali: collassi ed esplosioni di stelle ma anche interazioni e merging di galassie. Si conclude così questa rappresentazione sintetica dei vari componenti dell'Universo per addentrarci ora in una presentazione più specifica riguardo la morfologia delle galassie (Franceschini A. [1]).

Capitolo 1

Lo scheletro dell'Universo: vuoti, gas e galassie

1.1 Super-ammassi, ammassi e gruppi di galassie

L'Universo appare costituito da spazi vuoti che si alternano a filamenti formati da gas e galassie, ovvero zone ad elevata densità, dove i super-ammassi formano dei nodi di unione (si veda figura 1.1).

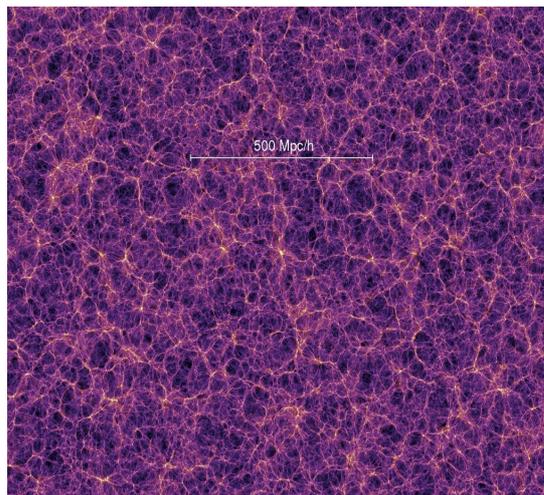


Figura 1.1: Sezione del campo di densità a $z=0$ ($t=13,6$ Gyr) (Fonte:

https://wwwmpa.mpagarching.mpg.de/galform/virgo/millennium/seqB_063a_half.jp).

Questi ultimi rappresentano la struttura più imponente che può raggruppare al suo interno ammassi e gruppi di galassie. Le galassie, nello specifico, non sono distribuite seguendo un ordine casuale nello spazio, ma la loro proiezione nella sfera celeste mostra piuttosto una struttura distinta.

La loro distribuzione tridimensionale può essere correttamente determinata misurando la distanza che separa ognuna dalle vicine. Un ammasso, a sua volta, è in grado di ospitare da centinaia a migliaia di galassie tenendole unite grazie alla gravità. Ogni ammasso ha una sua forma caratteristica, alcuni sembrano essere circolari, altri sembrano avere una distribuzione di galassie ellittica o irregolare e non pochi presentano più di un centro. La massa complessiva di un ammasso è stimabile conoscendo la luminosità totale di tutte le galassie contenute al suo interno. La stima della massa fu determinata da Zwicky F. che moltiplicò il rapporto tra massa solare e luminosità solare per la luminosità totale delle galassie membro. Questa formula si può utilizzare se le stelle nell'ammasso hanno un rapporto (M/L) medio simile a quello del nostro Sole, ma le stelle nelle ETG ne hanno uno più alto perché meno massicce; perciò la massa stimata deve essere aumentata di un fattore pari a circa 10. Nel loro ciclo di vita gli ammassi continuano a contenere informazioni riguardo il loro stato iniziale, ma la maggior parte non riesce ad evolvere in uno stato di equilibrio (Schneider P., 2006 [2]). Nel 1958 Abell G. editò un catalogo di ammassi di galassie e tutti gli insiemi che non soddisfavano tali criteri furono classificati come gruppi di galassie con massa e velocità di dispersione più basse ed una minore estensione. Una classe speciale è costituita dai gruppi compatti, dove galassie poco luminose sono spesso confinate all'interno di un piccolo volume; in simili condizioni tra questi sistemi avvengono delle interazioni ed esse finiscono col fondersi (Schneider P., 2006, [3]).

1.2 La struttura di una galassia

Le galassie sono fatte di stelle, gas, polveri e materia oscura e le loro dimensioni caratteristiche variano tra i 10 e i 30 Kpc; mentre la distanza tra di esse può essere in media di qualche Mpc. Si tratta di strutture ben organizzate costituite da componenti quali: bulge, disco spesso, disco sottile e alone galattico; dove la preponderanza di uno rispetto agli altri dipende dal tipo di galassia considerata e dalla sua morfologia (si veda figura 1.2).

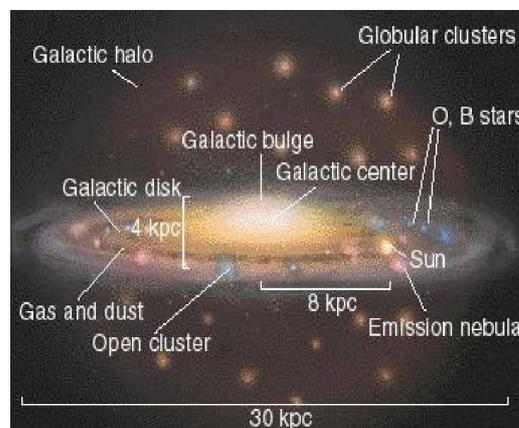


Figura 1.2: Schema rappresentativo delle componenti principali della nostra galassia, la Via Lattea (Fonte: dispense del corso di “Cosmologia” del Prof.

Franceschini A. [4]).

L'alone galattico è una componente pressoché sferica in grado di avvolgere l'intera galassia ed è formata dalle stelle più antiche, che sono a loro volta raggruppate in ammassi globulari. Esso rappresenta anche il primo ambiente galattico ad essersi formato e le stelle lì dentro sono prive di elementi pesanti e seguono moti orbitali radiali caratterizzati da poco momento angolare.

Il loro moto potrebbero dunque averlo ereditato dal gas primordiale oppure potrebbe essere stato reso disordinato in seguito a dei merging tra galassie. La parte centrale, detta componente sferoidale o bulge, assume una forma sferica o ellittica e presenta una distribuzione di stelle, solitamente le più vecchie della galassia che la rendono anche molto luminosa. Il gas che non è stato trasformato in stelle durante la formazione dell'alone è collassato in una struttura schiacciata discoidale in rotazione, che circonda tutto il bulge e che la rende la parte più diffusa, come dimensioni, contenente gas e polveri che permettono l'esistenza di stelle di età intermedia ricche di metalli e appartenenti alla popolazione II. Questa parte discoidale ne ha anche una più sottile, detta appunto disco sottile, più giovane generata dopo il collasso del gas residuo in un piano di simmetria mantenuto in rotazione. Il gas e le polveri qui sono più freddi con un alto tasso di formazione stellare di stelle giovani e blu. Questa tipologia di stelle appartiene alla popolazione I che è caratterizzata da una metallicità simile a quella del nostro Sole. La morfologia delle galassie risulta comunque legata alle caratteristiche che possiede come: le popolazioni stellari, il momento angolare, il tasso di formazione stellare, il gas e le polveri (Franceschini A. [4]).

1.3 Classificazione morfologica delle galassie

La classificazione delle galassie può essere fatta sfruttando la loro morfologia e ancora oggi quella più conosciuta è la Sequenza di Hubble. Di seguito verranno elencate le categorie di appartenenza seguendo lo schema di Hubble (Corsini E. M. [5]) (si veda figura 1.3), che prevede 4 famiglie:

1. galassie ellittiche (E)
2. galassie lenticolari (S0) normali o barrate (SB0)
3. galassie a spirale (S) normali o barrate (SB)
4. galassie irregolari (Irr)

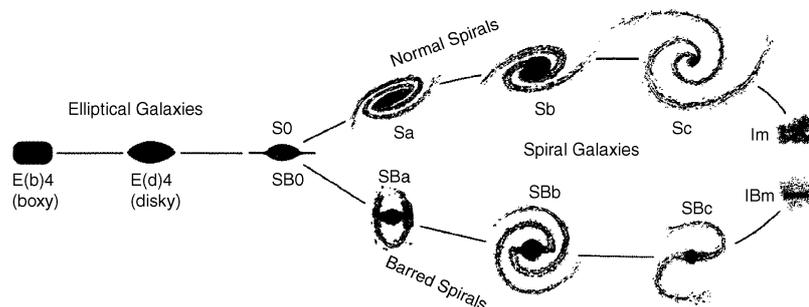


Figura 1.3: Rappresentazione grafica del modello a diapason della classificazione di Hubble E. (Fonte : Schneider P., 2006, [6]. Copyright: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. Credit: Kormendy & Bender 1996, ApJ 464, 119).

La componente sferoidale di bulge tende progressivamente a diminuire in dimensione passando dagli oggetti ellittici a quelli a spirale e irregolari, dove invece domina quella a disco.

Il modo in cui avviene questa variazione si può esprimere attraverso il rapporto tra disco e bulge, che coinvolge la quantità di luce prodotta da entrambe le componenti; infatti la popolazione stellare che abita una galassia varia in base alla famiglia di appartenenza della galassia (si veda figura 1.4). Le stelle di popolazione II, quelle più antiche, si trovano nella parte centrale; mentre quelle appartenenti alla popolazione I, le stelle più giovani, sono concentrate nei dischi (Franceschini A. [4]). La rappresentazione grafica dello schema di Hubble è costituita da un diapason; nella sua parte iniziale troviamo quelle di forma ellittica piuttosto regolare simili ad ellissoidi, che possono essere: prolati, oblati o triassiali. L'appartenenza alla categoria delle ellittiche si indica tramite la lettera E seguita da un numero compreso tra 0 e 7, che ne indica la sotto categoria e rappresenta l'ellitticità ($\epsilon = 1 - (b/a)$, con a,b semiassi maggiore e minore rispettivamente) moltiplicata per dieci. Le galassie di tipo E0 sono pressoché sferiche, invece più ci si avvicina al tipo E7 più lo schiacciamento apparente aumenta. Quelle lenticolari, S0, sono collocate nel punto in cui si separano i due rami del diapason e rappresentano la transizione tra ellittiche e a spirale; esse hanno due componenti il bulge centrale a forma di sferoide e il disco e possono essere suddivise in tre sottoclassi, che differiscono per la prominenza di quest'ultimo. Questa famiglia di galassie e quelle a spirale, all'interno della struttura centrale, possono avere una struttura allungata denominata barra. Nei rami del diapason troviamo infine la terza famiglia di galassie; le barrate sono posizionate nel ramo più basso mentre quelle a spirale normali in quello più in alto. Una loro particolarità è rappresentata dall'aver nel disco piatto e sottile, ampio 0,1 Kpc e spesso 1 Kpc, dei bracci costituiti da nubi di gas e polveri dove vi è un alto tasso di formazione stellare, che porta alla formazione di stelle giovani, massicce, calde e blu.

In entrambi i rami i tipi di galassie sono nuovamente suddivise in 3 sottocategorie: Sa, Sb, Sc oppure SBa, Sbb e Sbc. Alla lettera a corrispondono un bulge esteso e dei bracci di spirale avvolti stretti e poco risolti; invece alla lettera c la morfologia cambia, il bulge diviene poco esteso e i bracci ben risolti si distendono non apparendo più addossati al nucleo. Al di fuori dello schema in una posizione separata si trova l'ultima famiglia, le irregolari; tali galassie sono frutto di possibili processi di fusione ed interazione e sono ricche di gas e polveri, dunque anche di stelle blu e giovani. La loro categoria può essere suddivisa in due sottogruppi: le tipo I ben risolte in stelle e debolmente irregolari nella forma e le tipo II caotiche con macchie e filamenti dovuti alla presenza di polveri (Corsini E. M. [5]).

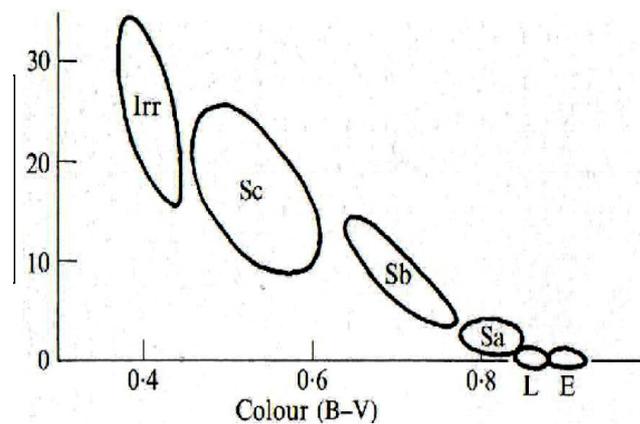


Figura 1.4: Andamenti della frazione di gas idrogeno (percentuale rispetto massa totale della galassia) in funzione del colore integrato delle varie tipologie galattiche. Nelle galassie blu la luce viene emessa da stelle giovani e massicce e vi è una grande quantità di gas. La morfologia di queste galassie è irregolare o a spirale. Nelle galassie rosse sono le stelle più vecchie e poco massicce ad emettere luce e la quantità di gas è poca. La loro morfologia è lenticolare o ellittica. (Fonte: dispense del corso di “Cosmologia” del Prof. Franceschini A. [4])

Il modello a diapason appena descritto risulta quindi essere una classificazione di tipo evolutivo, dove a sinistra troviamo delle galassie passive e quiescenti, come le ellittiche e le lenticolari, dette Early-Type Galaxies (ETG); mentre proseguendo a destra appaiono le Late-type Galaxies (LTG), ovvero quelle a spirale o irregolari con un elevato tasso di formazione stellare. La classificazione è legata dall'interpretazione dell'aspetto morfologico di una galassia. Le ellittiche e la loro ellitticità dipendono dalla proiezione e dall'orientazione rispetto la linea di vista. La presenza o meno della barra nella struttura galattica è complicata da visualizzare in un sistema a spirale se osservato edge-on (Schneider P., 2006 [6]).

1.4 Le Galassie Peculiari

Le galassie peculiari possono essere il risultato di diversi fenomeni di interazione. Le galassie interagenti vengono classificate in 5 tipi, che rispecchiano il loro grado di interazione e la relativa distorsione morfologica. Quelle di tipo 1 sono isolate e non interagenti; le galassie di tipo 2 presentano poche deformazioni ed interagiscono debolmente. Le cose iniziano a cambiare se passiamo al tipo 3 dove la morfologia inizia a cambiare ed appaiono delle code mareali. Infine i sistemi di tipo 4 sono fortemente interagenti e questo è evidenziato da visibili segni di deformazione e conseguente evoluzione (si veda figura 1.5); essi poi possono degenerare nell'ultimo tipo, ovvero il quinto, quello dei sistemi collassati post fusione (Lanz L. et al., 2013 [7]).

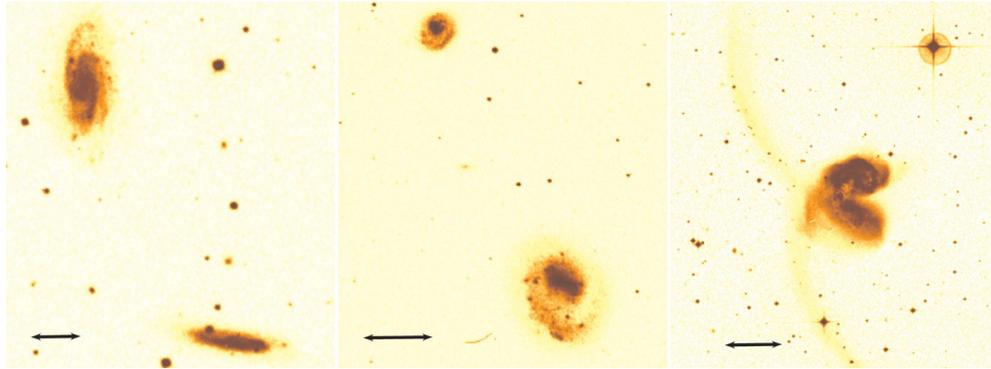


Figura 1.5: Tre immagini che rappresentano rispettivamente da sinistra a destra galassie interagenti di tipo 2, 3 e 4 mostrando distorsioni morfologiche in aumento. La prima immagine mostra in alto la galassia NGC 3430 e in basso NGC 3424. La seconda vede in alto NGC 4625 e in basso NGC 4618 e l'ultima immagine raffigura l'interazione tra NGC 4038/4039. NGC 4038/4039 vengono considerate come un sistema unico detto “Le Antenne”. (Fonte: Lanz L. et al., 2013 [7]).

Le galassie peculiari per interazione non sono le uniche; esistono altre classi aggiuntive come: le galassie nane, le galassie attive e le starburst dove il tasso di formazione stellare è molto alto se comparato a quello dei normali sistemi. La morfologia, ma soprattutto le proprietà fisiche portano alla loro identificazione. Il colore, ad esempio, indica la presenza di una determinata popolazione stellare; mentre il reddening interno quantifica la polvere. Il tasso di formazione stellare e la quantità di gas interstellare sono altre proprietà considerate (Schneider P., 2006 [8]). Possiamo ora nel prossimo capitolo, dopo aver introdotto l'argomento, definire un merger galattico.

Capitolo 2:

Le Interazioni di galassie

L'astronomo statunitense Arp nel 1966 compilò un catalogo astronomico di 338 galassie peculiari in totale. Egli riteneva infatti, che la classificazione di Hubble delle “nebulose” fosse troppo idealizzata poiché ogni galassia se osservata da vicino mostra invece peculiarità nella forma (Corsini E. M. [5]). Nel 1972 fu grazie ad un articolo di Toomre & Toomre, se vennero forniti i primi modelli generali per galassie interagenti. Strutture come ponti e code (si veda figura 2.1) vanno interpretate come i resti lasciati in seguito ad incontri ravvicinati in galassie multiple sotto l'azione delle forze mareali (Toomre A. & Toomre J. [11]).



Figura 2.1: Disegno schematico per rappresentare la possibile formazione di un ponte intergalattico tra due galassie; realizzato da Zwicky nel 1956. (Fonte: Toomre A., 1974 [9]. Copyright: Reidel 1974 (by the IAU))

Secondo quanto affermava già Chamberlin (1901), in assenza di una forza intrinseca ogni rotazione deve dare origine ad una forma a spirale con due bracci curvati nella stessa direzione secondo la rotazione della massa (Toomre A., 1974 [9]). Quando una galassia assiste al passaggio ravvicinato di una compagna più piccola in dimensioni, successivamente subisce una deformazione, che va a coinvolgere le porzioni esterne del disco primario dove appare un braccio di spirale o un ponte sul lato vicino verso il “satellite” ed un controbraccio sul lato opposto. Nel caso in cui ad avvicinarsi sia una galassia di uguale dimensione o leggermente superiore nasce una coda di detriti nel lato opposto a quello di attrazione mareale; mentre nella parte più vicina le particelle vengono richiamate e catturate dal “satellite”. Tutto ciò che è stato appena descritto è il prodotto di maree reciproche, infatti le notevoli dimensioni dei corpi coinvolti portano al momento di un avvicinamento anche una distorsione della loro forma. Se il disco di una piccola galassia viene strappato improvvisamente dalla gravità non uniforme di una massa più pesante durante un Fly-By parabolico, si nota in seguito la comparsa di filamenti nel disco della prima (Toomre A. & Toomre J., 1972 [11]). In una coppia di galassie interagenti i due lati vicini di ognuna di esse risente di una maggiore attrazione gravitazionale invece il lato più lontano ne risente, ma più debolmente e resta indietro. Le collisioni galattiche sono eventi rari ma drammatici; le maree scatenate sono più forti ed inducono ponti di stelle e gas, dove questi ultimi in nubi si scontrano provocando nei dischi esplosioni di stelle e conseguenti processi di formazione stellare. I mergers, ovvero le fusioni, avvengono quando delle galassie in collisione dissipano energia orbitale e il fenomeno termina con la formazione di una unica. La dissipazione di energia avviene perché le stelle più antiche vengono espulse e questo fatto ha un ruolo fondamentale per la formazione di nuove e lo scontro di nubi di gas.

A volte può verificarsi anche un fenomeno di cannibalismo, che coinvolge una galassia più grande ed una più piccola, che viene così distrutta dalle maree provocate dalla compagna maggiore. Il risultato finale è una galassia a spirale con il nucleo costituito dall'unione dei due precedenti e il disco di gas e stelle appartenenti alla progenitrice più grande organizzati anche in bracci (Pogge R., 2006 [12]).

Capitolo 3:

Le simulazioni idrodinamiche

3.1 Evoluzioni di interazioni tra galassie

Per rappresentare i fenomeni appena descritti, nel capitolo precedente, e che coinvolgono un sistema di due o più galassie; vengono utilizzate delle simulazioni idrodinamiche. In questi modelli si considerano vari processi fisici che includono le dinamiche gravitazionali, gli effetti della formazione stellare e l'evoluzione delle popolazioni stellari. Si tratta di processi non lineari e legati tra loro. Le simulazioni, al computer, sono rese possibili attraverso l'uso di metodi matematici dove vengono sviluppati algoritmi a n-corpi (Simulazioni numeriche- INAF [13]). L'unica condizione necessaria è quella di considerare le galassie come un insieme di particelle che, al limite idrodinamicamente, possono essere trattate come un fluido e il risultato di conseguenti possibili forze viscosive sono quindi forme contorte e distorte. Di seguito verranno analizzate due figure, dove vengono presentate consecutivamente, su vari fermo immagine, le evoluzioni di due diverse interazioni tra due galassie sfruttando le simulazioni idrodinamiche. Lo studio si concentra sullo sviluppo degli afflussi gassosi e il conseguente inizio di un'attività di starburst nei mergers tra galassie a disco di massa comparabile. Gli afflussi di gas appaiono più forti negli stadi finali dei mergers, nelle galassie dotate di bulges centrali densi; mentre sono più deboli e avvengono nelle fasi iniziali in quelle prive di bulge. La prima raffigura due galassie Early-Type a spirale (si veda figura 3.1); dove la componente stellare più antica nel bulge prevale in dimensioni su quella gassosa presente invece nei bracci del disco.

Dopo un primo incontro, dovuto all'attrazione mareale, le loro forme si distorcono e si generano code di connessione e barre nei bulges. La versione finale è una galassia ellittica anche se osservandola da lontano qualche struttura della fusione rimane ancora visibile (Mihos J. C. & Hernquist L. , 1996, [14]).

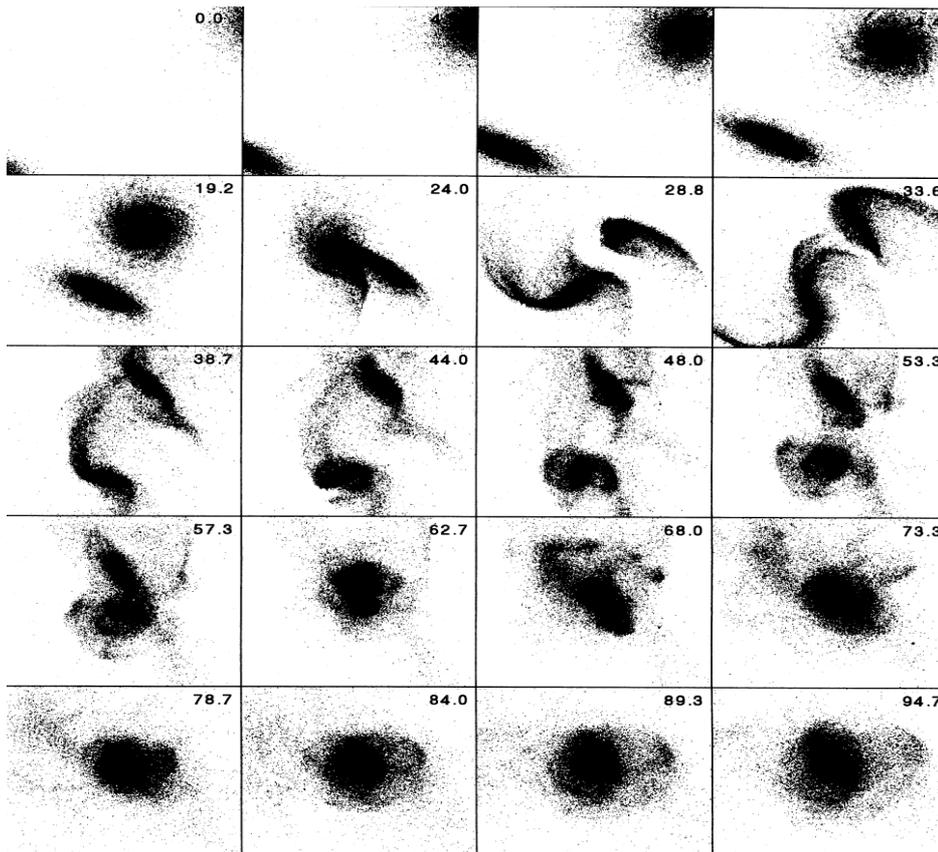


Figura 3.1: Evoluzione del processo di interazione tra due galassie Early-Type dove la componente stellare più vecchia nel bulge finisce per prevalere su quella più giovane e gassosa presente nei bracci di spirale (Fonte: Mihos J. C. & Hernquist L. , 1996,. [14]).

Il secondo caso vede coinvolte due galassie a spirale Late-Type (si veda figura 3.2) dove a prevalere è la componente gassosa e stellare giovane presente nei bracci di spirale.

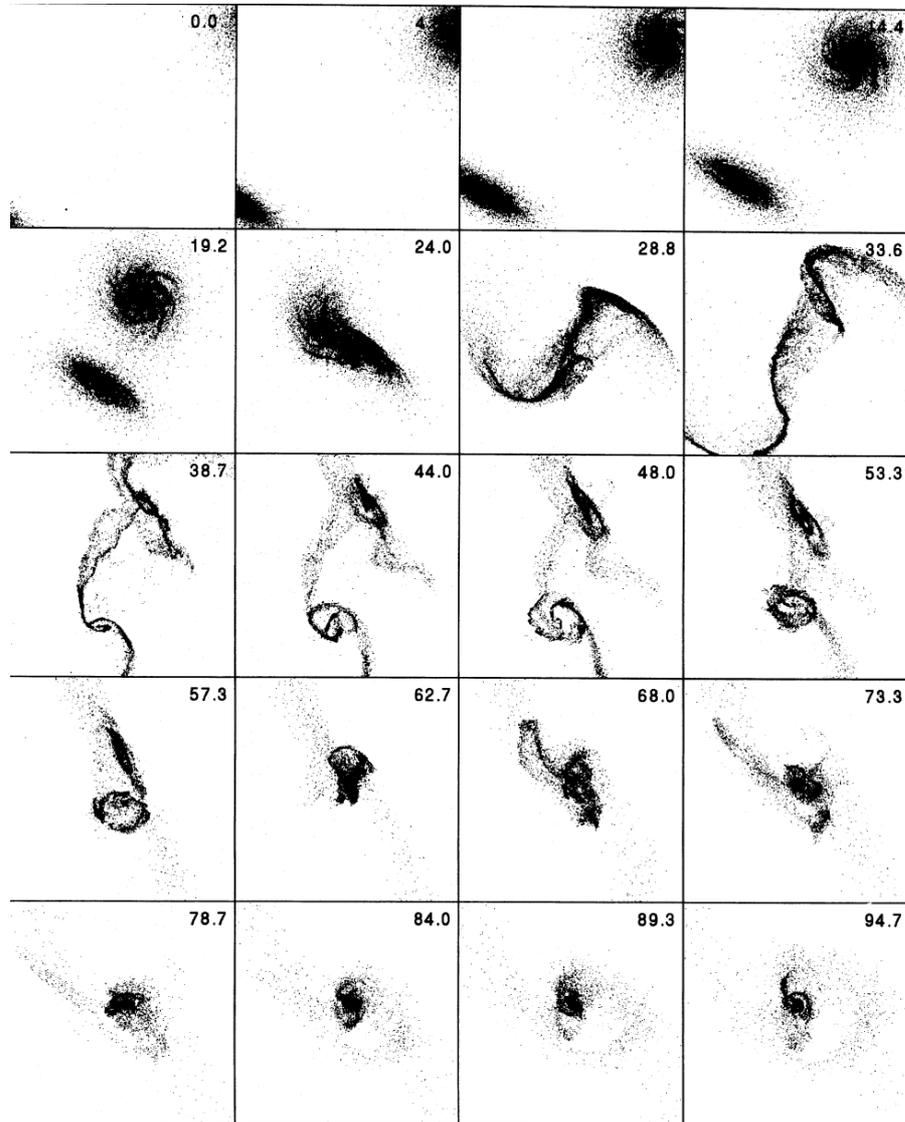


Figura 3.2: Evoluzione del processo di interazione tra due galassie Late-Type dove la componente stellare più giovane e gassosa presente nei bracci di spirale finisce per prevalere su quella vecchia nel bulge (Fonte: Mihos J. C. & Hernquist L. , 1996. [14]).

Qui le stelle evolvono per collisione e il gas dissipa energia e momento angolare; si forma un ponte di unione tra le due e la maggior parte del gas si trova infine in un nucleo compatto con starburst. Non manca ad ogni modo un disco diffuso e continuano a coesistere anche delle piccolissime code mareali (Mihos J. C. & Hernquist L. , 1996. [14]).

3.2 Progetto IllustrisTNG

Un altro esempio di tali simulazioni è dato dal progetto IllustrisTNG e che propone grandi simulazioni magnetoidrodinamiche cosmologiche della formazione delle galassie per creare programmi di osservazione e comprendere quando e come si evolvono nelle loro strutture (TNG - IllustrisTNG project [15]). Per prime verranno, qui di seguito, mostrate delle istantanee prese dal video¹ (si vedano figure 3.3, 3.4 e 3.5) relativo alla formazione di una galassia di tipo tardivo a disco e massiva con in atto al suo interno processi di formazione stellare.

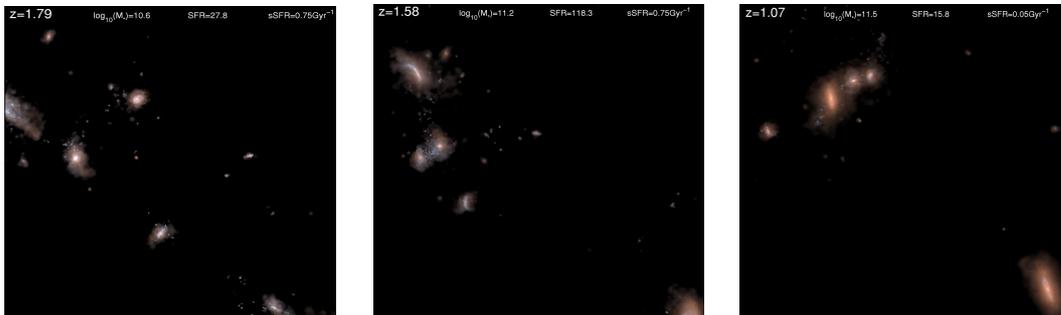


Figura 3.3: Prima sequenza di tre istantanee, prese dal video, a tre diversi redshifts rispettivamente: $z=1.79$, $z=1.58$, $z=1.07$. La luce stellare della LTG, considerata, viene mostrata in una regione di 500 Kpc. (Fonte: <https://www.tng-project.org/media/>).

¹ Il video completo relativo alle figure 3.3, 3.4 e 3.5 è disponibile al link: https://www.tng-project.org/movies/tng/tng100_sb0_latetype_formation.mp4

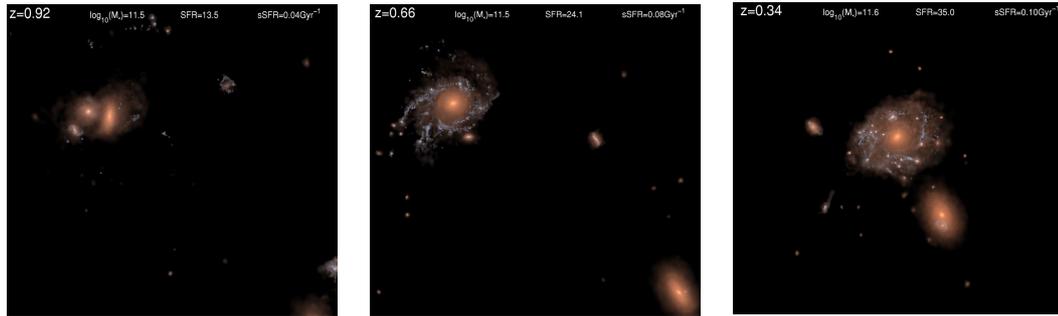


Figura 3.4: Seconda sequenza di tre istantanee, prese dal video, a tre diversi redshifts rispettivamente: $z=0.92$, $z=0.66$, $z=0.34$. La luce stellare della LTG, considerata, viene mostrata in una regione di 500 Kpc. (Fonte: <https://www.tng-project.org/media/>).

Si tratta di un sistema individuale tracciato nel tempo in un regione di 500 Kpc e si nota come la formazione stellare sia rapida in un disco esteso e grumoso, ma il colpo di scena avviene tramite una fusione tardiva ad un redshift di circa $z=0.3$ con una galassia compagna di massa pressoché uguale, (TNG - IllustrisTNG project, [15]).

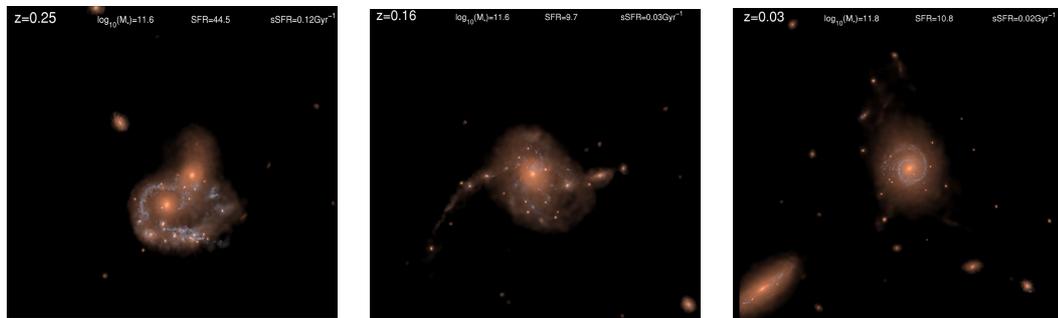


Figura 3.5: Terza sequenza di tre istantanee, prese dal video, a tre diversi redshifts, rispettivamente: $z=0.25$, $z=0.16$, $z=0.03$. La luce stellare della LTG, considerata, viene mostrata in una regione di 500 Kpc. (Fonte: <https://www.tng-project.org/media/>).

Dal secondo video² sono state prese queste istantanee (si vedano figure 3.6, 3.7 e 3.8), che riguardano invece una galassia di tipo precoce, ovvero un'ellittica quiescente, che a causa dell'interazione con un'altra smette di fornire gas necessario alla produzione di stelle.

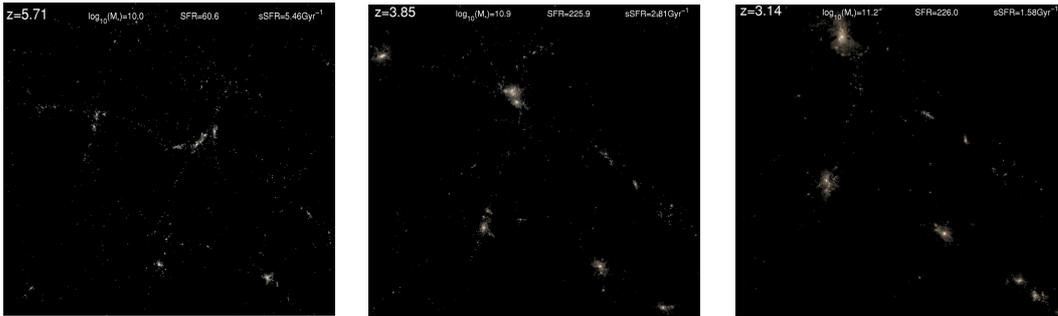


Figura 3.6: Prima sequenza di tre istantanee, prese dal video, a tre diversi redshifts rispettivamente: $z=5.71$, $z=3.85$, $z=3.14$. La luce stellare della ETG viene mostrata in una regione di 1 Mpc. (Fonte: <https://www.tng-project.org/media/>).

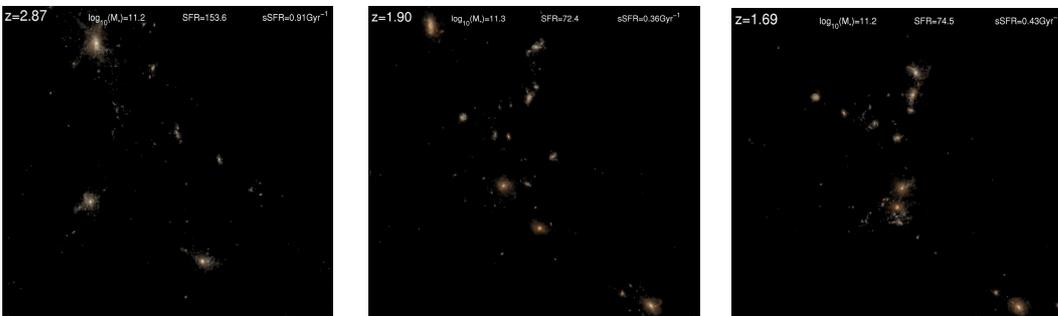


Figura 3.7: Seconda sequenza di tre istantanee, prese dal video, a tre diversi redshifts rispettivamente: $z=2.87$, $z=1.90$, $z=1.69$. La luce stellare della ETG viene mostrata in una regione di 1 Mpc. (Fonte: <https://www.tng-project.org/media/>).

² Il video completo relativo alle figure 3.6, 3.7 e 3.8 è disponibile al link: https://www.tng-project.org/movies/tng/tng100_sb0_earlytype_formation.mp4

Questa volta la regione di spazio considerata è di 1 Mpc e il filmato ha inizio ad un alto redshift e percorre un intervallo di tempo fino ad oggi quando la galassia protagonista appare rossa e morta e subisce molteplici fusioni con altre compagne, che l'arricchiscono di stelle e materiale portandola a raggiungere la morfologia sferoidale finale (TNG - IllustrisTNG project, [15]).

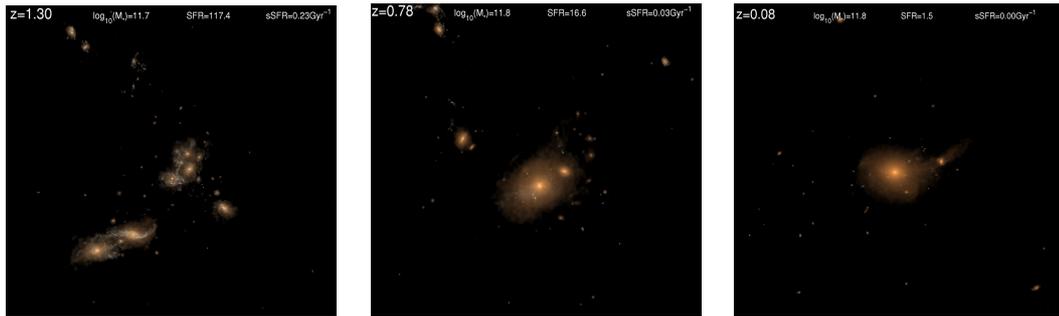


Figura 3.8: Terza sequenza di tre istantanee, prese dal video, a tre diversi redshifts, rispettivamente: $z=1.30$, $z=0.78$, $z=0.08$. La luce stellare della ETG viene mostrata in una regione di 1 Mpc. (Fonte: <https://www.tng-project.org/media/>).

Capitolo 4

Il ruolo delle interazioni a vari redshifts

In questo capitolo verranno discussi i risultati pubblicati in numerosi articoli e ottenuti in questi decenni di ricerca riguardo il ruolo delle interazioni tra galassie a vari redshifts. Le cosiddette redshift surveys vengono effettuate per indagare e studiare la distribuzione delle galassie tridimensionalmente e il redshift di ogni sistema viene misurato spettroscopicamente. Questo tipo di ricerche negli anni sono state guidate e condotte seguendo lo sviluppo tecnologico dei telescopi e della relativa strumentazione.

4.1 Interazioni che modificano la morfologia delle galassie

Kartaltepe ed altri colleghi furono tra i primi a studiare coppie di galassie ad alti redshifts. All'epoca gli scienziati concordavano sul fatto che i mergers di galassie fossero importanti per la formazione di nuove galassie e per la loro evoluzione; la massa delle galassie coinvolte può crescere, si può innescare un processo di formazione stellare ed inoltre, caso non troppo raro, il fenomeno può far accumulare materiale necessario per la crescita di buchi neri nel centro della galassia. Il tasso di fusione sembrava dipendere dall'intervallo di redshift osservato, dunque anche dalla lunghezza d'onda e dalla magnitudine limite della ricerca. Gli studi a z maggiori o uguali a 0.1 hanno coinvolto piccoli campioni di galassie contenenti da poche decine a poche centinaia di candidate a diversi livelli di interazione, portando così i ricercatori a presupporre, eventualmente, una fusione, che sembrava avvenire di rado. Il merger si ipotizzava potesse accadere solo tra le coppie più vicine e in un lasso temporale che dipendeva dalla loro distanza e dall'eccentricità orbitale presunta.

I ricercatori si ritrovavano ad analizzare sempre i dati provenienti da oggetti che si erano appena fusi o che risultavano in procinto di farlo, e questo accadeva poiché ci si affidava a criteri puramente morfologici per comprendere se fossero sistemi in merging, anche avanzati. Tutto questo ha comportato anche delle lacune come ad esempio la mancanza di informazioni sulle galassie progenitrici e lo scambiare una regione irregolare di formazione stellare, con spostamenti verso il blu/UV, con un sistema interagente. Lo studio delle interazioni e della morfologia ha portato alla stesura di leggi per il tasso di merging: $(1+z)^m$, con m che può assumere valori compresi tra 0 e 5, se $m=0$ non vi è evoluzione; mentre se $m \sim 5$ l'evoluzione è forte. La COSMOS (Cosmic Evolution Survey)³ offriva una nuova opportunità per studiare il tasso di merger tra le galassie, in rapporto al loro redshift. Il telescopio spaziale Hubble ha fornito per la COSMOS immagini e cataloghi di galassie. Questi dati sono stati utilizzati, per studiare l'evoluzione della pair fraction delle galassie, sfruttando l'alta sensibilità e il z accurato dei cataloghi della COSMOS. I sistemi legati gravitazionalmente apparivano infatti vicini, separati da meno di una decina di Kpc e vennero selezionati in base alla loro luminosità osservandoli in più bande per assicurarsi la loro rilevazione. La scoperta ha portato a comprendere come la maggior parte dei merging coinvolgessero dischi di galassie con formazione stellare, dunque anche le più vicine con z locale erano in evoluzione e avevano la loro compagna a 5-20 Kpc e $z < 0.4$. Le coppie totali scoperte furono all'incirca 1749.

³ COSMOS è un'indagine astronomica progettata e condotta per sondare la formazione e l'evoluzione delle galassie in funzione del redshift e dell'ambiente galattico locale. Ad oggi sono state rilevate più di 2 mln di galassie, che coprono circa il 75% dell'età complessiva dell'Universo, sfruttando la spettroscopia dai raggi X alle frequenze radio dei maggiori telescopi spaziali e terrestri. La Survey è guidata da Casey C., Kartaltepe J, e Smolcic V. ed include 200 scienziati. (Fonte: <https://cosmos.astro.caltech.edu>)

I risultati dell'identificazione di tali coppie sono stati riassunti nella tabella in figura (si veda figura 4.1).

TABLE 1
NUMBER OF COSMOS GALAXIES ($\geq L_T^*$) WITH A COMPANION $\geq L_T^*$ AT PROJECTED SEPARATION 5–20 kpc

z^a	NUMBER OF GALAXIES				GALAXY SAMPLE	PAIR FRACTION	COMOVING VOLUME SAMPLED (10^6 Mpc^3)
	ACS Only	Ground Based	Total	Total – Random			
0.15.....	0	10	10	8	386	0.021	0.09
0.25.....	0	27	27	19	1043	0.018	0.23
0.35.....	0	148	148	117	2956	0.040	0.41
0.45.....	0	117	117	93	3097	0.030	0.61
0.55.....	0	163	163	124	3680	0.034	0.81
0.65.....	5	381	386	244	7320	0.033	1.01
0.75.....	9	597	606	424	9575	0.044	1.21
0.85.....	14	398	412	299	6719	0.045	1.38
0.95.....	44	757	801	584	8888	0.066	1.54
1.05.....	85	772	857	612	9276	0.066	1.69
1.15.....	59	837	896	642	6281	0.102	1.82

^a Centroid of redshift bin of width 0.1.

Figura 4.1: Tabella con risultati pair fraction delle galassie considerate. (Fonte: Kartaltepe J. S. et al., 2007. [18]).

La pair fraction nella tabella riguarda le galassie con una vicina posta a 5-20 Kpc. Questo dato è stato calcolato usando il numero totale di galassie, che sono collocate in coppia; nel caso di un gruppo compatto, ogni galassia è stata contata una volta sola. La pair fraction rappresenta perciò una conferma, con il suo valore, della probabilità che una galassia abbia una compagna vicina. Per distanze ancora minori invece ci si dovette affidare al SDSS ⁴ catalog dove si scoprirono 45 coppie di galassie delle 705 catalogate a $z < 0.1$. Nella figura che segue (si veda figura 4.2), la pair fraction delle galassie viene mostrata, in funzione del redshift per le coppie nella COSMOS, assieme al valore locale determinato dalla SDSS.

⁴ La SDSS (Sloan Digital Sky Survey) è una survey frutto di una collaborazione internazionale di scienziati, che raccolgono dati da 2 telescopi nel Nord e Sud America per creare immagini 3D dell'Universo. Negli anni si sono realizzate immagini multicolore di circa un terzo del cielo e raccolto spettri di 3 mln di oggetti astronomici. (Fonte : <https://skyserver.sdss.org/dr18/>)

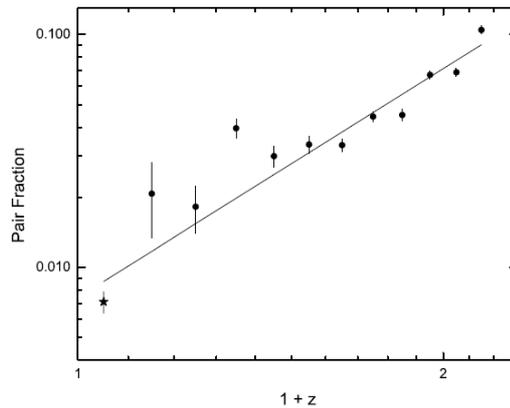


Figura 4.2: Grafico che riporta i dati della pair fraction delle galassie (5-20 Kpc) in funzione del redshift ($1+z$) nel campo COSMOS. (Fonte: Kartaltepe J. S. et al., 2007. [18]).

Questi risultati erano affetti da errori statistici, che riguardavano la COSMOS survey sulla varianza cosmica, ovvero l'incertezza statistica riguardo osservazioni dell'Universo a grandi z , e il Poisson noise (pari a 1σ di errore nella figura 4.2); ma nonostante questo si arrivò alla conclusione che la maggior parte risiedeva in un range di redshift compreso tra $0.7 < z < 0.8$ anche se un eccesso rimaneva visibile a $z=1.05$ e più ci si abbassava più il numero di questi diminuiva. Si concluse affermando che l'evoluzione della pair fraction per coppie ravvicinate può essere riassunto in: $(1+z)^m$, con $m=3.1\pm 0.1$, ovvero una media interazione. Il valore di m potrebbe essere dovuto alla varianza cosmica oppure alle statistiche di Poisson, in quanto lo studio è stato condotto considerando un range di z limitato e in un'area limitata. Fermandosi a considerare $z < 0.5$ sarebbe stato $m \sim 5$; mentre per $z=0.3-0.8$ il valore sarebbe $m \sim 0$.

Si veda ora la figura 4.3:

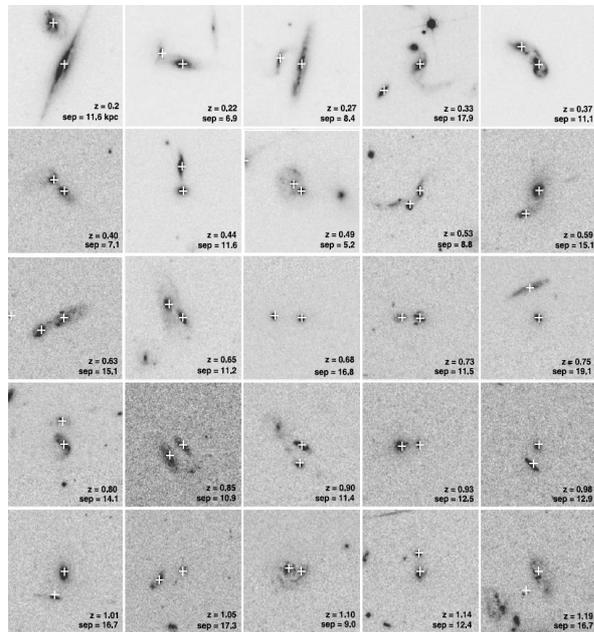


Figura 4.3: Gruppo di 25 coppie di galassie luminose con una separazione proiettata <20 Kpc. (Fonte: Kartaltepe J. S. et al., 2007. [18]).

Le coppie mostrate in figura sono ordinate per z e appaiono in interazione; oltre ad essere simili nei cambiamenti morfologici mostrano anche una trasformazione nella loro luminosità. Lo scopo, per il quale si sono utilizzati i dati sia della COSMOS che della SDSS, è stato quello di voler determinare la pair fraction delle galassie luminose in funzione di $0 < z < 1.2$. (Kartaltepe J. S. et al., 2007. [18]).

4.2 Mergers ad alto redshift

Dalla formazione delle progenitrici ad oggi, le galassie hanno affrontato trasformazioni drammatiche. Esse hanno prodotto generazioni di stelle da nubi di gas molecolare, costituito le loro popolazioni stellari e nel mentre arricchito il mezzo interstellare con elementi pesanti ed infine hanno modificato la loro riserva interna di gas. La conversione, di una frazione, della loro scorta di gas freddo in stelle viene compensata da un rifornimento di gas nuovo, tramite il mezzo intergalattico. Nel 2023 la stessa Kartaltepe riprese e rivoluzionò lo studio della struttura delle galassie e della loro morfologia a redshifts maggiori pari a $z=3-9$ sfruttando i dati forniti dal telescopio JWST, usando la NIRCcam per la survey CEERS. L'aumento della popolazione stellare ha modificato la morfologia delle galassie, trasformandole da LTG a ETG. Il celebre strumento viene sfruttato per indagare l'astronomia a raggi infrarossi e riuscire così a studiare la struttura dell'Universo su grande scala ed individuare gli oggetti più antichi e distanti. Le surveys extragalattiche prima, fino al lancio del JWST, nell'Universo profondo venivano condotte con il HST⁵. Esse hanno permesso di rivoluzionare il sapere riguardo l'evoluzione delle galassie da 10 miliardi di anni fa ad oggi, ma rimangono ancora aperte delle domande riguardo le prime fasi evolutive, nei primi 3 miliardi di anni. Le galassie, circa 10 miliardi di anni fa, possedevano infatti delle caratteristiche simili a quelle odierne. Il campione studiato comprende 850 galassie a $z>3$ ed è stato classificato sfruttando le differenze morfologiche osservate. La classificazione del HST di queste ultime era limitata, poiché solo 59 erano abbastanza brillanti per essere osservate. Circa il 40% a $z=3-4.5$ avevano dischi, circa il 20% a $z=3-5$ invece erano sferoidi puri.

⁵ HST è stato lanciato in orbita nel '90 ed è tuttora orbitante sopra l'atmosfera terrestre. Si tratta di un telescopio riflettore Cassegrain che osserva nel visibile e NIR e raccoglie la luce UV visibile solo dallo spazio. (Fonte: <https://hubblesite.org>)

La percentuale delle irregolari scendeva partendo dal 5% per $z>6$; il 30% a $z=5-7$ non era più risolvibile. A tali distanze, ovvero per $z>6$ gli oggetti apparivano non risolti oppure non classificabili. La classificazione con JWST comportò una grande differenza dovuta ad una maggiore copertura in profondità e lunghezza d'onda. Qui di seguito, verrà mostrata un'immagine relativa a cinque galassie del campione osservate sia con il HST che con il JWST (si veda figura 4.4).

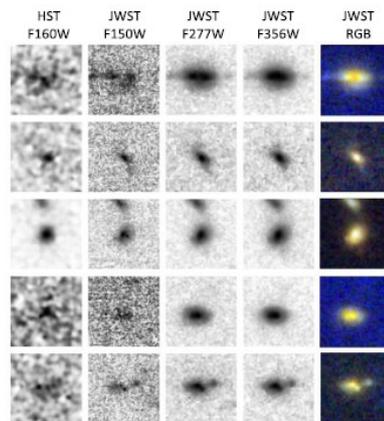


Figura 4.4: Sequenza di immagini di 5 galassie, del campione studiato, osservate prima con HST e poi con JWST. Esse mostrano diverse caratteristiche morfologiche se osservate con il primo strumento piuttosto che con il secondo. (Fonte: Kartaltepe J. S. et al., 2023. [21]).

Complessivamente, con i dati forniti dal JWST, il 56% delle galassie del campione ha una componente a disco ben identificabile, ma questo valore percentuale varia in base al z considerato. Si parla del 60% a $z=3-4$, che scende a ~45% a $z \sim 5$ e arriva al 30% per $z>6$. Le ellittiche rappresentano invece il 20%; mentre le irregolari sono costanti e uguali al 40%-50% a tutte le distanze. Nella figura che segue verranno mostrate delle immagini, di una selezione di galassie, scelte per ognuno dei gruppi morfologici presenti nel campione di partenza considerato (si veda figura 4.5):

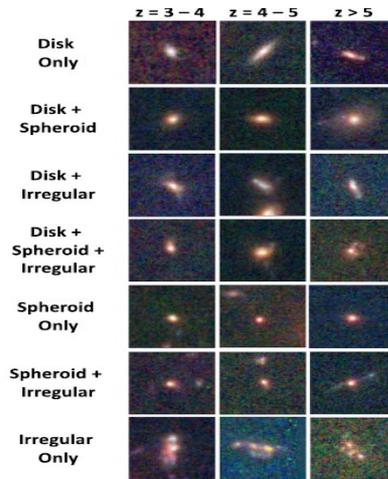


Figura 4.5: Immagini, a tre diversi intervalli di z , dei gruppi morfologici a cui appartengono le galassie del campione studiato ottenute grazie alla NIRCcam del JWST. (Fonte: Kartaltepe J. S. et al., 2023. [21])

Le galassie dalla loro formazione ad oggi hanno usato le loro riserve di gas e questo ha comportato grandi trasformazioni; il gas freddo contenuto in nubi molecolari è stato appunto convertito in nuove stelle, arricchendo il mezzo interstellare di elementi pesanti e il processo è continuato grazie ad un costante afflusso di altro gas dal mezzo intergalattico. Questo processo è continuato fino a $z = 2-3$, aumentando la densità dell'Universo e successivamente è diminuito fino ai livelli molto bassi odierni. Ci sono evidenze che mostrano anche come nel bulge siano apparsi e cresciuti anche buchi neri super massicci diventati infine quasars. Oltre ad una scomparsa progressiva del disco, nelle galassie di tipo ellittico si è notato come il rapporto tra i semiassi, se contenuto tra 0.6-0.4 circa, dipenda dalla massa e dalla luminosità della popolazione galattica. La conversione di materia oscura in materia barionica comporta il passaggio da ellissoide prolato (si veda figura 4.6), con semiasse lungo maggiore rispetto sia a quello corto che a quello intermedio, ad oblato (si veda figura 4.7) con i due semiassi lungo e intermedio uguali e maggiori rispetto a quello corto.

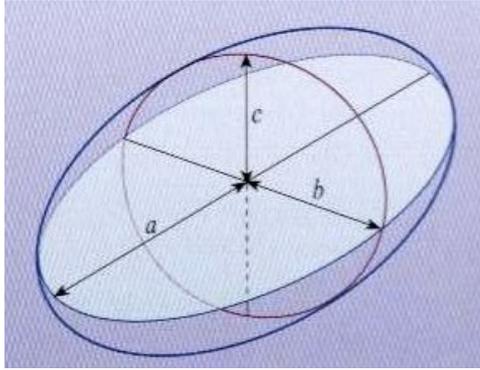


Figura 4.6: Immagine di un ellissoide prolato con semiasse corto, c , e semiasse intermedio, b , uguali e minori rispetto a quello lungo, a . (Fonte: Corsini E. M., [5]).

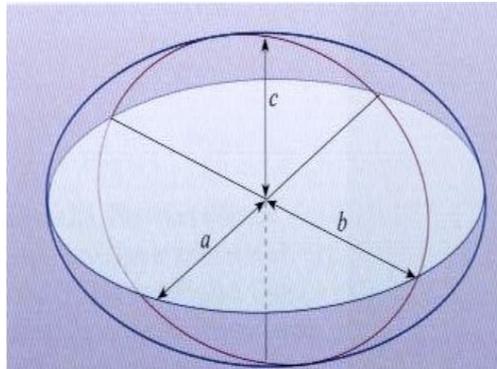


Figura 4.7: Immagine di un ellissoide oblato con semiasse lungo, a e semiasse intermedio, b uguali e maggiori rispetto a quello corto, c . (Fonte: Corsini E. M., [5]).

Questo cambiamento è difficile da individuare se le galassie sono osservate di fronte, apparendo face-on disk, piuttosto che di profilo, ovvero edge-on. Gli studi condotti basandosi sulle osservazioni svolte dal Hubble Space Telescope (HST) hanno portato a risultati differenti rispetto a quelli ottenuti grazie al lavoro svolto dal James Webb Telescope (JWST). Nello specifico 488 galassie che sembravano avere una morfologia sono apparse completamente diverse; molte catalogate come sferoidi per la loro compattezza centrale e una ridotta brillantezza superficiale nel disco erano in realtà a disco ed altre a ritenute a disco si sono rivelate essere irregolari.

In generale comunque ci si è accorti con entrambi i telescopi di come a $z > 3$ la popolazione galattica abbia morfologie varie. L'identificazione dei mergers nell'Universo lontano è resa più complicata dalla presenza di polveri interstellari, che impediscono alla luce prodotta dalle stelle giovani di raggiungere i telescopi ottici, che non riescono così ad individuare il moto delle galassie stesse. (Kartalpepe J. S. et al., 2023. [21])

4.3 Il processo di crescita in massa delle galassie nell'Universo primordiale

Nel 2021 il team Alpine e nello specifico Romano hanno riportato in un articolo la scoperta di dozzine di questi fenomeni avvenuti nell'Universo primordiale sfruttando il potente interferometro Alma, in Cile. Questo radiotelescopio permette di svelare galassie altrimenti invisibili, risalenti a quando l'Universo aveva appena un miliardo di anni, catturando la luce emessa da un particolare ione del carbonio, detto C⁺. Tale radiazione, a differenza di quella ultravioletta della stella, è in grado di superare la nube di polvere che la circonda ed è emessa ad una precisa frequenza poiché gli atomi di carbonio vengono immediatamente ionizzati dalla luce prodotta dalla stella. La presenza di C⁺ porta con sé importanti informazioni riguardo il tasso di formazione stellare dentro le galassie e la loro morfologia (Ufficio stampa Inaf, [24]). Sfruttando questa proprietà del C⁺, la frazione di mergers ai z esplorati dalla survey ALPINE è stata modificata. La riga di emissione C⁺ (15,8 μ m) è stata osservata come proveniente da un gruppo di 75 galassie, che stavano formando una stella della sequenza principale a redshift compreso tra 4.4 e 5.9 (Romano M. et al., 2021. [23]).

I ricercatori stessi hanno scoperto come 12 miliardi di anni fa i mergers fossero circa 40 volte più frequenti rispetto ad oggi e anche fondamentali per lo sviluppo delle galassie; una simile alla Via Lattea continua infatti a scontrarsi con le vicine fino a subire una decina di fusioni in appena 13 miliardi di anni (Ufficio stampa Inaf, [24]). I mergers che sono stati identificati sono 23 e riguardavano tutti circa il 31% delle galassie considerate nell'ALPINE survey. Si è potuto studiare anche l'evoluzione della frazione di merger cosmica al variare del redshift; se $z=0-2$ vi è un incremento che raggiunge il picco per $z=2-3$ e si termina con un declino per z maggiori. Questa scoperta risale comunque a prima del lancio del JWST, ma ha permesso di confrontare il processo di crescita in massa delle galassie dovuto alla conversione del gas in stelle con quello dovuto al processo di merging. Il secondo infatti acquista importanza più ci si avvicina agli arbori dell'Universo. I mergers, sia in corso che appena avvenuti, lasciano nelle galassie impronte cinematiche e/o morfologiche. Gli spettri delle stesse galassie presentano poi variazioni nelle righe di assorbimento. In conclusione, pur affermando la necessità di dover compiere ulteriori studi, i ricercatori sono concordi nel confermare il ruolo significativo nella costituzione della massa delle galassie studiate nel corso del tempo cosmico. (Romano M. et al., 2021. [23])

4.4 Il legame tra mergers di galassie ed evoluzione dei quasars.

Ad alti redshifts già nel 1990 si era ipotizzato, sfruttando le dinamiche delle galassie in merging, che vi potesse essere un'evoluzione dei quasars attraverso le fusioni tra galassie o meglio il tasso di nascita dei primi sembrava legato a quello dei mergers (Carlberg R. G., 1990. [27]).

I quasars sono oggetti celesti, galassie lontanissime, che emettono energia dalla loro regione nucleare in quantità altissime e il loro spettro di emissione è caratterizzato da righe verso il rosso a causa del redshift molto alto (Covino S., 2001. [26]). Non sono la sola classe di AGN anche se possiedono la maggior parte delle loro proprietà. Le AGN sono galassie con un'ampia distribuzione di energia tanto da coprire con le loro emissioni uno spettro che va dalle onde radio ai raggi X, ma arriva anche al range GAMMA. Le emissioni hanno origine in una regione centrale molto piccola il nucleo galattico attivo da cui deriva il loro nome. Le varie classi si differenziano per: le diverse caratteristiche nello spettro, la luminosità e il rapporto tra luminosità nucleare e quella derivante dalla luce emessa dalla popolazione stellare, che le abita. I quasars in particolare emettono dal radio ai raggi X con un flusso, che varia a tutte le frequenze (Schneider P., 2006. [25]). Queste galassie vengono alimentate da un buco nero posto al centro e circondato da un disco di accrescimento costituito da gas e stelle in rapida rotazione attorno al suo asse. Dal disco la materia cade nel buco nero producendo una radiazione abnorme (Covino S., 2001. [26]). Un gruppo di ricerca guidato da Carlberg, primo autore in un articolo, affermava come la luminosità dei quasars potesse essere legata alla massa dell'alone della galassia ospite; mentre la loro vita inversamente proporzionale. La presenza di questi oggetti sembrava essere collegata all'esistenza di un numero maggiore di code nelle galassie ospite, che solitamente erano in merging con le vicine (Carlberg R. G., 1990. [27]). Nel 2010 un articolo firmato Schawinski ha esposto come i mergers possano essere collegati nelle galassie Early-Type sia alla loro evoluzione che alla crescita dei buchi neri. I modelli di formazione di tali sistemi coinvolgono processi di fusione tra galassie progenitrici maggiori ricche di gas, che a loro volta causano le fasi più significative nella crescita di un buco nero e la conseguente diminuzione nella formazione stellare fino ad arrivare alla creazione di una galassia rossa sferoidale.

All'epoca il legame tra mergers e gli AGN non era ancora del tutto chiaro. Le analisi condotte riguardavano un campione di galassie sferoidali poco massicce, note per virare da una nube blu alla sequenza rossa. I disturbi alla loro morfologia si presentavano maggiormente durante la prima fase di starburst andando poi a decrescere in modo sostanziale durante l'ultima fase AGN, legata ad un merger recente più profondo. Le galassie starbursts nell'Universo Locale presentano un alto tasso di formazione stellare a causa di interazioni con altre galassie o come risultato di processi di merger. In esse vengono prodotte sia stelle ma anche ammassi di stelle. Il tempo trascorso è necessario ed occorre al materiale per perdere momento angolare e raggiungere il buco nero. I nuclei galattici attivi di Seyfert Early-Type possono essere considerati i discendenti post-starbursts (Schawinski K., 2010. [28]). Essi sono gli AGN scoperti per primi e la loro luminosità è più bassa rispetto a quella delle altre classi. Le loro immagini nell'ottico le raffigurano e permettono di identificarle come galassie a spirale con un nucleo estremamente brillante. Il loro spettro mostra linee di emissione forti e ampie. Solitamente vengono divise in quelle di tipo 1 e tipo 2; le prime hanno uno spettro caratterizzato da linee ampie e ravvicinate invece le seconde hanno uno spettro con soltanto linee ravvicinate (Schneider P., 2006. [29]). Recentissima è invece la scoperta fatta su questo tema, sfruttando la tecnologia installata nel JWST, da un gruppo internazionale guidato dall'Inaf. Il team, usando lo spettrografo, nel NIR, NIRSpec del telescopio, ha individuato una fusione drammatica tra quasar e galassie. L'interazione ha coinvolto un lontanissimo quasar, contenuto nella galassia ospite PJ308-21, e due galassie satellite massicce, che rappresentano un sistema estremamente evoluto sia in massa che in composizione chimica. A $z=6.2$ il sistema ospite ha rivelato un'alta metallicità, ovvero la presenza di elementi più pesanti di H ed He e di un nucleo galattico attivo (AGN).

La prima galassia satellite ha mostrato una bassa metallicità e fotoionizzazione solo per formazione stellare; mentre la seconda ha una metallicità più alta e la fotoionizzazione proviene solo dal quasar. Il buco nero ha una massa pari a 2 miliardi di masse solari (Ufficio stampa Inaf., [31]). Le galassie, che ospitano quasars, sono tra le più massive conosciute per popolare l'Universo ai suoi arbori. Quanto si conosce, a tal riguardo, proviene da osservazioni a lunghezze d'onda nel (sub)millimetrico; le quali hanno rivelato il z preciso, le dinamiche interne al gas, il contenuto molecolare del gas atomico e ionizzato e infine la polvere. Non vengono però tracciate a tali lunghezze d'onda le quantità di idrogeno e perciò bisogna far affidamento su fattori di conversione e assunzioni per comprendere l'abbondanza di metalli (Decarli R. et al., 2024. [32]). La tecnica utilizzata si chiama spettroscopia a campo integrale e per ogni pixel di immagine si ricava l'intero spettro della banda ottica osservato poi nell' IR (Ufficio stampa Inaf., [31]). Qui di seguito vediamo due figure che rappresentano il sistema di galassie osservato con ALMA e HST prima e dopo con il JWST (si vedano figure 4.8 e 4.9):

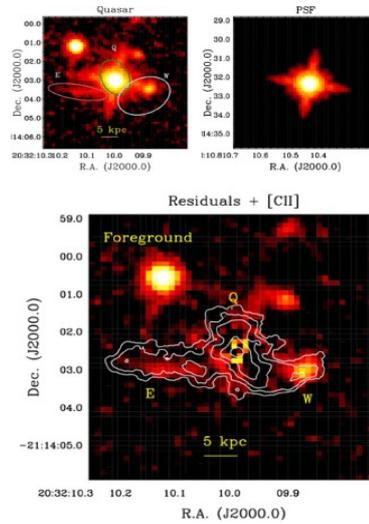


Figura 4.8: In alto a sx viene mostrata l'emissione del quasar e della sua galassia ospite; mentre in alto a dx appare il modello PSF. Al centro, in basso, vi è il residuo rimasto dopo la sottrazione PSF. La comparazione mostra come la mappa [CII] coincide con l'emissione stellare di luce a est e ovest del quasar. (Fonte: Decarli R. et al., 2019. [33]).

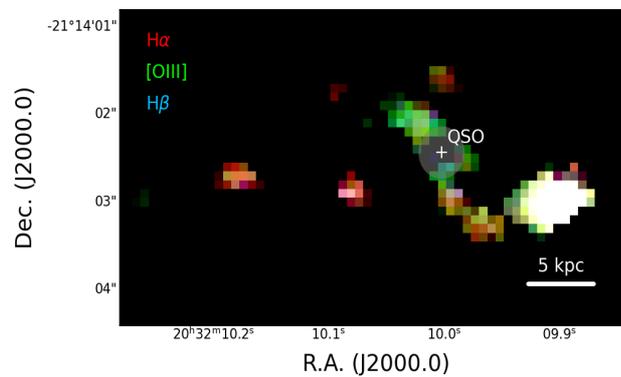


Figura 4.9: Mappa delle emissioni di riga dell'idrogeno ($H\alpha$ e $H\beta$) e dell'ossigeno ($[OIII]$), nel sistema PJ308-21, dopo aver mascherato la luce del quasar centrale (QSO) (Crediti: (Decarli R. et al., 2024. [32])).

Le emissioni sono servite per studiare le proprietà del mezzo interstellare ionizzato come: il campo di radiazione fotoionizzante, la metallicità, l'oscuramento della polvere, la densità elettronica, la temperatura e il tasso di formazione stellare. Questo studio ha segnato un traguardo importante per la comprensione dei quasars e delle galassie compagne (Ufficio stampa Inaf., [31]). Si è scoperto come il sistema sia, in realtà, costituito da cinque componenti: la galassia ospitante il quasar, le galassie compagne poste a est e ovest della prima, il ponte che collega il quasar alla vicina ad ovest e l'afflusso ionizzato. La morfologia, del sistema, osservata nella riga di emissione $H\alpha$ e nelle altre righe ricorda la mappa [CII] osservata con ALMA. Vi sono però delle differenze:

1. Le righe di emissione nell'ottico, nel sistema di riposo, sono difficili da qualificare soprattutto nella zona centrale a causa del contrasto con il nucleo brillante. Ciò non accade con le osservazioni [CII]; poiché non hanno tale limitazione.
2. La compagna a ovest mostra molte più righe di emissione a lunghezze d'onda nell'ottico, più di quante osservate nella banda nel FIR.
3. Le righe osservate dal JWST , nell'ottico, sembrano mancare di una componente più diffusa a causa di limitazioni nella brillantezza superficiale.
4. L'afflusso è stato individuato nelle righe ottiche $H\alpha$ e [OIII], ma non in quelle [CII]; dunque esso è costituito da componente ionizzata.
5. Le galassie compagne non sono AGN, come si era erroneamente ipotizzato a seguito di osservazioni a raggi X.

6. Le galassie compagne sono separate avendo valori diversi in densità e metallicità; esse sono abbastanza massive avendo una massa di circa 10 masse solari, ma la loro metallicità, pur essendo alta a quel z , è più bassa di quella solare.

Concludendo si può affermare come il JWST abbia avuto un grande impatto nella comprensione delle prime galassie massive e nella crescita dei primi BH massicci. Il numero di questi sistemi, a $z > 6$, sta aumentando (Decarli R. et al., 2024. [32]).

4.5 Mergers nell'epoca della reionizzazione

Un altro traguardo importante è stato raggiunto con l'esplorazione, sempre recente, dell'ambiente dell'era di reionizzazione. Secondo il modello del Big Bang (si veda figura 4.10), l'Universo nelle prime fasi evolutive si presentava come caldo e denso, dove le particelle subatomiche e i fotoni interagivano in equilibrio termodinamico e questi ultimi venivano continuamente assorbiti e riemessi. A $z \sim 1100$, dopo la ricombinazione, il gas intergalattico divenne neutrale con soltanto una residua ionizzazione. A queste fasi dell'Universo risulta impossibile accedere e sono serviti 380 mila anni perché si espandesse e raffreddasse formando atomi neutri. In questa nuova fase i fotoni, dopo la ricombinazione, riuscirono a disaccoppiarsi dalla materia e poterono viaggiare liberi nello spazio, per arrivare a noi sotto forma di radiazione cosmica di fondo CMB, la prima fotografia dell'Universo. In seguito, ebbe inizio l'età oscura, dove il gas neutro formato da atomi di H si addensò per effetto della gravità ed assorbì ogni fotone; da queste regioni addensate poi si formarono stelle, quasar, galassie e l'energia emessa dalle prime stelle aveva la forza per slegare gli elettroni dall'atomo di H. Questa fase viene definita reionizzazione.

Il processo di reionizzazione deve essere accaduto per fotoionizzazione esercitata da parte delle prime generazioni di stelle calde.

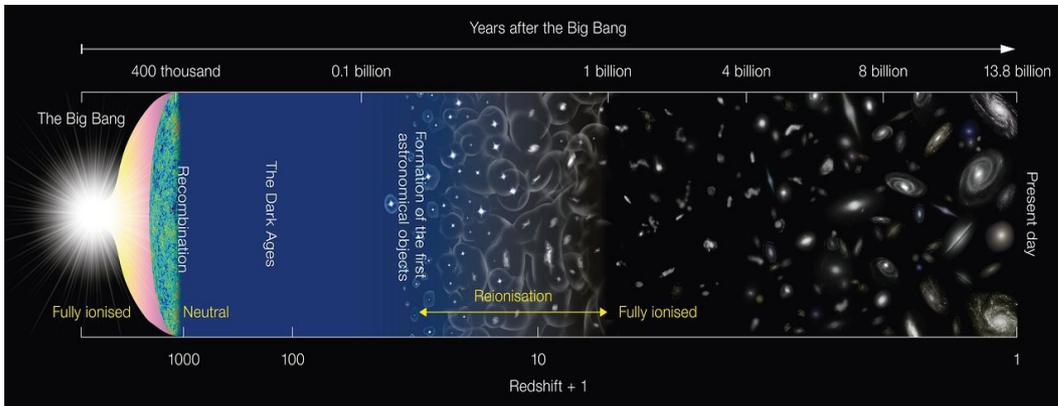


Figura 4.10: Rappresentazione schematica delle tappe principali dello sviluppo dell'Universo in seguito al Big Bang. (Fonte: Bonafede Annalisa, [34], Crediti: Osservatorio astronomico nazionale del Giappone (Naoj)).

Il tutto avvenne un miliardo di anni dopo il Big Bang (Bonafede Annalisa, [34]). Duan Q. et al., 2024. [35] affrontano il tema dei mergers nell'epoca della reionizzazione sfruttando i dati raccolti dal JWST (si vedano figure 4.11 e 4.12). I dati riguardano la frazione di coppia, il tasso di merger e di accrescimento della massa stellare a redshift $z=4.5-11.5$ di galassie con massa pari a $8.0 < \log_{10}(M^*/M_{\odot}) < 10.0$. Il ruolo dei mergers nella formazione galattica è stato studiato nell'epoca più antica mai esplorata e si è notato come fino a $z=8$ ci sia un aumento delle frazioni di coppia di galassie, che poi evolvono in modo piatto fino a $z=11.5$.

Table 3. Pair Fractions, Merger Rates, and Mass accretion rates and Specific Mass Accretion rates derived in this work across six different redshift bins.

Redshift	[4.5, 5.5]	[5.5, 6.5]	[6.5, 7.5]	[7.5, 8.5]	[8.5, 9.5]	[9.5, 11.5]
Pair Fractions (f_p)	0.125 ± 0.020	0.252 ± 0.035	0.162 ± 0.025	0.211 ± 0.065	0.140 ± 0.070	0.117 ± 0.084
Merger Rates (\mathcal{R}_M) [Gyr^{-1}]	1.87 ± 0.30	5.15 ± 0.71	4.32 ± 0.66	7.12 ± 2.21	5.85 ± 2.90	6.45 ± 4.62
Mass Accretion Rates (ρ) [$M_\odot \text{Gyr}^{-1}$] / 10^9	0.86 ± 0.14	2.40 ± 0.33	2.04 ± 0.31	3.66 ± 1.16	2.88 ± 1.76	3.19 ± 2.31
Specific Mass Accretion Rates (\dot{M}/M_*) [Gyr^{-1}]	0.93 ± 0.15	2.55 ± 0.35	2.14 ± 0.33	3.52 ± 1.07	2.92 ± 1.42	3.23 ± 2.32

Figura 4.11: Tabella con dati relativi alle frazioni di coppia, tassi di merger, aumento della massa delle galassie raccolti durante la ricerca condotta da Duan e i suoi colleghi a diversi intervalli di redshift. (Fonte: Duan Q. et al., 2024. [36]).

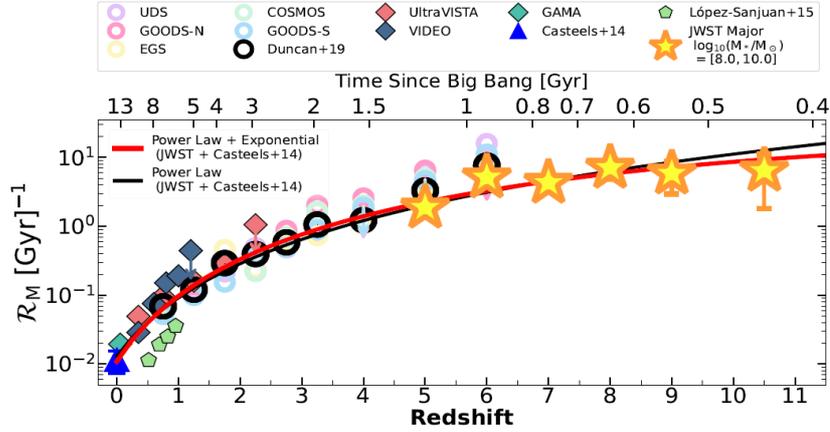


Figura 4.12: Grafico di evoluzione del tasso di merger delle galassie rispetto al redshift. I tassi di merger maggiori a z molto alti, ottenuti dai risultati del JWST, sono rappresentati dalle stelle gialle. (Fonte: Duan Q. et al., 2024. [36]).

Nell'Universo locale i mergers appaiono aumentare in numero a $z=6$ e si stabilizzano anch'essi a $z=11.5$. Una galassia “media” per un redshift da 10.5 a 5 aumenta la sua massa stellare in seguito ad interazione di un fattore pari a 2.77 ± 0.99 . Si è analizzato l'accrescimento della massa stellare dentro le galassie, dovuto ai mergers e lo si è comparato con il processo di SF intrinseco all'interno delle galassie stesse.

Si è scoperto come la massa stellare sia aumentata, in seguito ai mergers maggiori, di una percentuale pari a $71\pm 25\%$ della massa stellare creata dalla SF del gas. Basandosi su ciò, approssimativamente, il $42\pm 24\%$ della massa stellare totale di una delle galassie considerate aumenta dai mergers maggiori; mentre il rimanente ha origine da SF. La conclusione porta ad affermare come un merger riesca a guidare la costituzione di circa metà galassia. La formazione ed evoluzione di questi sistemi è strettamente legato alla storia dei mergers, che hanno coinvolto le galassie progenitrici minori (Duan Q. et al., 2024. [36]). In questa era sono stati poi condotti ulteriori studi e si sono osservate galassie Lyman-alpha emitters a z compreso tra 5.8 e 8 ed identificate nel NIR dal JWST come parte dell' Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES).⁶ (Witstok J. et al., 2024. [40]). L'osservazione di queste galassie è resa complessa poiché tale riga di emissione è difficile da osservare; essa presenta infatti proprietà particolari ed è disturbata dal mezzo intergalattico neutro (IGM) molto presente nell'Universo primordiale (Sandri M., 2023. [37]). Witstock J. et al., 2024. ([40]), hanno affermato come numerose galassie con processi di SF guidino la reionizzazione cosmica e i dati raccolti sfruttando NIRSpec e NIRCам, dimostrano il potenziale delle galassie Lyman-alpha emitters come prove della reionizzazione. Nello spettro le linee di assorbimento hanno origine dalla transizione $Ly\alpha$ dell'idrogeno neutro localizzato lungo la linea di vista della sorgente, anche se quest'ultimo non può essere localizzato in modo omogeneo; poiché un mezzo intergalattico omogeneo contenente idrogeno neutro sarebbe visibile come un assorbimento continuo (Schneider P., 2006. [38]).

⁶ L' Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES) è un programma ambizioso di produzione di immagini in IR e spettroscopia pensata per studiare l'evoluzione delle galassie da alti z al periodo di Cosmic Noon. (Fonte : Eisenstein D. J. et al., 2023. [39]).

Le galassie di questo tipo sono studiate da anni ma i loro dati crollano per $z > 7$, circa meno di 770 milioni di anni dopo il Big Bang, a quei redshifts i fotoni Lyman vengono immediatamente assorbiti nel IGM e il loro spettro di emissione indica come abbiano un basso contenuto di metalli e polvere (Sandri M., 2023. [37]). Solitamente se si parla di galassie Lyman-alpha emitters, si intendono galassie massive in un periodo chiave per la costituzione della loro massa e che molto probabilmente stanno effettuando un merger. Ouchi et al. hanno riportato un esempio di galassia massiva in un periodo chiave per la costituzione della sua massa vicino alla fine dell'era di reionizzazione. Sono state utilizzate osservazioni ALMA, combinate con le immagini fornite dal HST, di una galassia luminosa denominata “Himiko” posta a $z=6.595$. La galassia presenta anche un elevato tasso di SF, pari a $100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Le osservazioni suggerivano, che si trattasse di un oggetto unico con un basso contenuto di polvere e gas interstellare primordiale. Le immagini date dal HST proponevano un punto di vista unico riguardo la sua morfologia; il core appariva estremamente blu e in attività e “Himiko” sembrava essere associata a due gruppi meno estremi. La galassia inoltre stava effettuando un triplo merger maggiore e per questo motivo emetteva una nube di gas ionizzato nella riga Lyman-alpha. (Ouchi M. et al., 2013. [41]).

4.6 Mergers di diverse tipologie di galassie

Fensch et al., 2017, hanno usato le simulazione idrodinamiche per comparare la formazione stellare in una sequenza di galassie in merging rispettivamente ad alto e basso redshift, variando la frazione di massa del gas tra i due modelli. Il risultato ottenuto mostra come alla stessa orbita i mergers ricchi di gas ad alti z fossero meno efficienti nel generare starbursts rispetto a quelli a basso z .

I meccanismi alla base della formazione stellare a bassi redshifts sembrano essere piuttosto l'aumento di turbolenza, la frammentazione del gas e l'afflusso di gas centrale (Fensch J. et al., 2017. [42]).

4.6.1 Il ruolo delle interazioni nell'evoluzione delle galassie nane

Martin G. et al., 2021, [43] si sono interessati a come i mergers abbiano portato all'evoluzione delle galassie nane nel tempo. Come galassie nane, hanno studiato sistemi di massa stellare comparabile a $M_* < 10^9 M_\odot$, che contribuiscono alla formazione dell'alone e dalla massa complessiva di quelle più massive. Le conoscenze riguardanti il loro processo di vita erano limitate. Si sono utilizzati i dati provenienti da New Horizons e la sua simulazione idrodinamica cosmologica per comprendere come i mergers e i Fly-bys a $z=0.5$ abbiano comportato la costruzione di queste galassie. A $1 < z < 3$ tra il 5% e il 20% ,rispettivamente, di esse mostravano un aspetto morfologico disturbato non causato completamente da un'interazione, ma piuttosto da altre denominate Fly-bys cioè passaggi ravvicinati, che non terminano in mergers. Le galassie nane solitamente ne affrontano due: uno maggiore a $z=5$ e uno minore a $z=0.5$, quest'ultimo coinvolge il 10% della loro massa stellare totale comportando un aumento della formazione stellare di 3-4 volte. Nonostante ciò, anche gli altri processi, pur comportando meno formazione stellare ma essendo più frequenti ne influenzano la vita maggiormente. I risultati raggiunti dimostrarono come tutte le galassie, di qualsiasi dimensione, passino gran parte della loro esistenza (pari al 10-30 %) in uno stato morfologicamente disturbato, che comporta la perenne variazione della lunghezza degli assi. Questo dato tende a diminuire a z più bassi. Si parla del 5% a $z=1$ contro un 20% a $z=3$ (Martin G. et al., 2021. [43]).

4.6.2 Jekyll and Hyde

Schreiber C. et al., [44] nel 2018 hanno studiato un sistema di galassie. Lo studio riguardava due galassie massive, che vennero denominate “ Jekyll and Hyde “ poiché mostravano un'inattività ed un'oscurazione estrema circa 1,5 miliardi di anni dopo il Big Bang. I dati spettroscopici furono ottenuti sfruttando ALMA ed analizzando l'origine di un'emissione inaspettata nel sub-millimetrico attraverso una galassia dormiente, chiamata “ ZF-COSMOS-20115” a circa $z=4$ (si vedano figure 4.13 e 4.14). Questo segnale captato però veniva prodotto da un'altra galassia oscura, massiva e compatta di massa pari a 10^{11} masse solari e vicina alla prima a soli 3.1 Kpc. La dormiente mostrava un scarso processo di formazione stellare e la totale mancanza di emissioni polverose. Jekyll potrebbe essersi arrestata nella produzione di stelle meno di 200 Myr fa prima di essere osservata, ma continuava ad ospitare una riserva densa di gas comparabile a quella contenuta nelle starbursts. Viste le caratteristiche simili, le due potrebbero essere state in due fasi del medesimo processo di inattività.

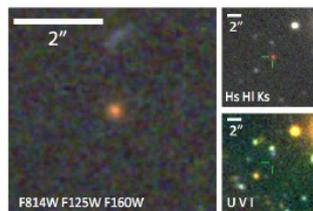


Figura 4.13: Immagini nel visibile e NIR di ZF-COSMOS-20115. L'immagine a sinistra proviene dal HST, con una risoluzione di 0,2 arcsec; mentre a destra appaiono due immagini meno risolte ottenute da telescopi terrestri. (Fonte: Glazebrook K. et al., 2017. [45], <https://arxiv.org/pdf/1702.01751>).

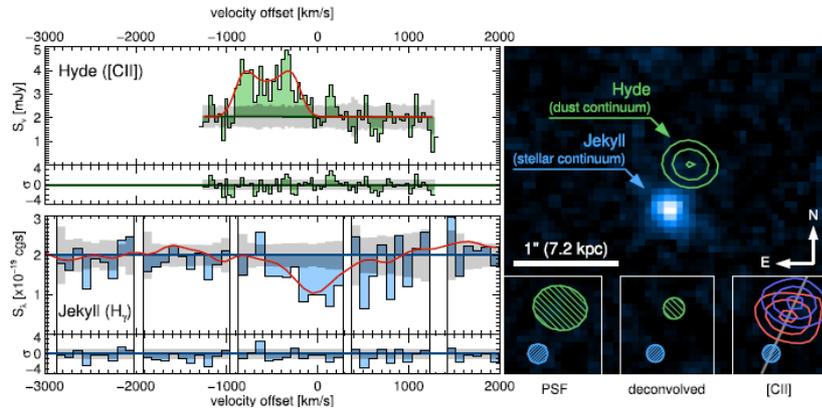


Figura 4.14: La figura rappresenta immagini e spettri di Jekyll e Hyde. In alto a sinistra vi è lo spettro di Hyde fornito da ALMA; mentre in basso a sinistra vi è quello MOSFIRE di Jekyll. In alto a destra appare l'immagine del sistema data dal HST nel NIR; la sorgente brillante al centro è Jekyll. (Fonte: Schreiber C. et al., 2018. [44]).

Discussioni e conclusioni

Lo scopo di questa tesi è quello di raccontare come, negli ultimi anni dalla data del suo lancio nel Dicembre 2021, il JWST abbia rivoluzionato lo studio e la comprensione delle interazioni tra galassie a vari redshifts; ovvero nel corso delle epoche cosmologiche, che si sono succedute dal Big Bang fino ad oggi. La presentazione di alcuni risultati tratti da articoli scientifici pubblicati, nelle ultime decadi, da numerosi gruppi di ricerca su questa tematica, mira a rendere evidente come lo sviluppo di una strumentazione sempre più: moderna, aggiornata e potente abbia permesso grandi scoperte e l'elaborazione di tecniche di ricerca più innovative e performanti. Il JWST è il successore in carica del telescopio spaziale Hubble per quanto riguarda l'Astronomia a raggi infrarossi dalla banda R del visibile alle lunghezze d'onda dell'infrarosso. Lo strumento è molto più sensibile rispetto al precursore, che si limitava ad analizzare dall' ultravioletto al vicino infrarosso. Lo scopo del suo lancio è quello di esaminare le epoche più remote scoprendo la formazione delle prime galassie, a circa 13 mld di anni luce, e di osservare all'interno delle nubi di polvere dove nascono le stelle e i sistemi planetari. La sua strumentazione (si veda figura 5.1) ideata e sviluppata con questo fine consiste in:

- OTE, elemento ottico del telescopio, costituito da un piano posteriore, che sorregge lo specchio primario diagonale di 6,5 m fatto da segmenti in berillio resistente e leggero raggruppati in una struttura ripiegabile.
- ISIM, modulo integrato della strumentazione scientifica, composto da MIRI strumento a infrarossi medi, NIRSpec spettrografo e NIRCам fotocamera.

L'elemento che più caratterizza il telescopio è il parasole, che consente di mantenere ad una corretta temperatura la strumentazione permettendo al telescopio di raffreddarsi a meno di 50 K (JWST- James Webb Space Telescope, [45]).

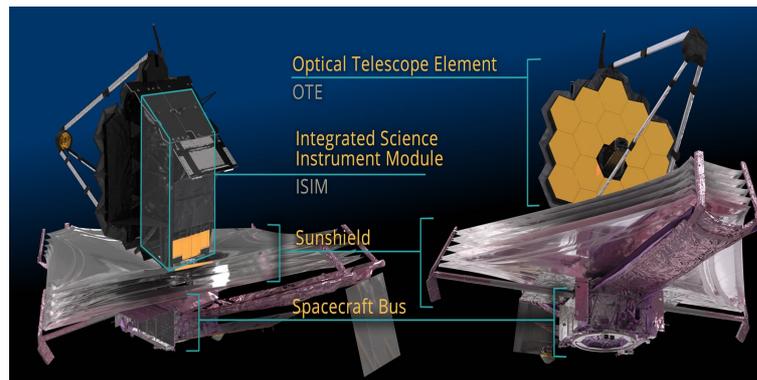


Figura 5.1: Immagine descrittiva delle componenti del JWST (Fonte: <https://www.jwst.nasa.gov>.)

L'efficienza di questa tecnologia è evidenziata dall'ultimo studio condotto da Kartaltepe, che paragonato a quello precedente, ha fatto emergere come galassie etichettate con precise caratteristiche morfologiche in realtà ne possedessero altre. I mergers modificano l'aspetto delle galassie, ma ricerche recenti hanno enfatizzato anche come contribuiscano alla crescita della loro massa, soprattutto in quelle più lontane nell'Universo primordiale. Queste ultime, nel corso di processi di interazione e fusione con le vicine, possono sviluppare al loro centro dei buchi neri e da tali dinamiche possono originarsi anche i quasars. Le galassie presentano fasi di starburst oppure un alto tasso di formazione stellare legati in entrambi i casi ai processi di merger soprattutto nell'Universo Locale. Spingendosi fino alle primissime fasi evolutive dell'Universo, JWST ha permesso di studiare i mergers, durante l'epoca di reionizzazione, quando riescono a guidare gran parte della vita della galassia interessata. Si può concludere affermando che le galassie passino molto della loro esistenza in un stato disturbato.

Con il suo lancio, previsto per Maggio 2027, anche il futuro telescopio spaziale Nancy Grace Roman (si veda figura 5.2) collaborerà con il JWST, per comprendere come dal gas primordiale abbiano avuto origine le galassie e come i buchi neri abbiano influenzato la loro formazione e quella delle stelle. La sua visuale sarà più ampia circa cento volte in più rispetto a quella del telescopio spaziale Hubble e permetterà di indagare e trovare risposte nei settori dell'energia oscura, degli esopianeti e dell'Astrofisica a IR. Si spingerà ad osservare e raccogliere dati sull'Universo agli arbori; quando si mostrava opaco nascondendo le primissime galassie e stelle al loro interno fino ad arrivare al periodo di transizione, denominata Alba Cosmica, una fase più brillante. L'Alba Cosmica fu appunto l'epoca in cui questa nebbia si iniziò a diradare e portò gli atomi neutri a disgregarsi in centinaia di mln di anni. Roman avrà il compito di aiutare a far comprendere meglio chi tra i buchi neri e le galassie primordiali abbia contribuito maggiormente a condurre l'Universo in un nuovo periodo di sviluppo (Nancy Grace Roman Space Telescope, [46]).

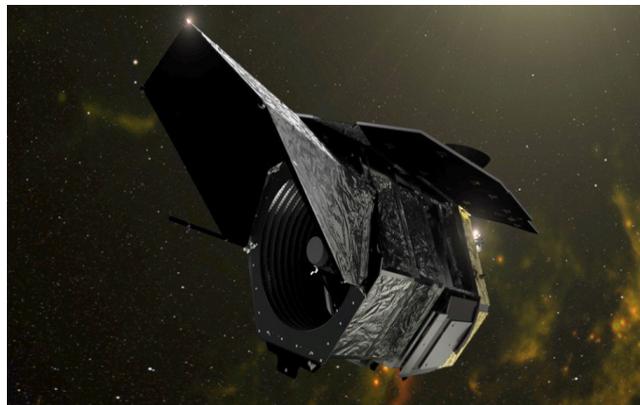


Figura 5.2: Immagine del Telescopio Spaziale Nancy Grace Roman (Fonte: <https://roman.gsfc.nasa.gov/index.html>)

Nel 2020, con l'indagine decennale in Astronomia e Astrofisica, sempre la NASA ha istituito un nuovo programma di maturazione dei grandi osservatori (si veda figura 5.3), che richiederà nuove tecnologie e saranno necessari circa 10 anni per vederle realizzate. Il primo è l'Osservatorio dei mondi abitabili che permetterà di immaginare i sistemi planetari attorno a stelle simili al nostro Sole, dove potrebbero esserci esopianeti con caratteristiche terrestri. Studiandone lo spettro; si potrà comprenderne il contenuto atmosferico determinando l'abitabilità, la presenza di acqua e gas, l'attività biologica e i livelli di ossigeno e ozono. Questo osservatorio permetterà di studiare anche le primissime epoche della storia dell'Universo e il ciclo di vita delle stelle. Il secondo sarà il Grande osservatorio dei raggi X, che studierà l'alta energia dell'Universo luminoso dove il gas caldo guida l'evoluzione delle galassie.



Figura 5.3: Immagine dei tre futuri grandi telescopi spaziali (Fonte: <https://www.greatobservatories.org>)

L'ultimo Grande osservatorio si concentrerà nell'infrarosso e svelerà il lato nascosto della nostra galassia e del buco nero al suo interno; la comprensione della formazione dei sistemi planetari sarà rivoluzionata studiando cosa accade fino ai confini del nostro Sistema Solare (The New Great Observatories. [47]).

Con la convinzione che, questi e altri futuri strumenti, possano aiutare gli scienziati ad avere un quadro sempre più preciso dell'Universo nella sua struttura e nella sua storia.

Bibliografia

[1] Franceschini A., *Introduzione. Universo locale e le sue principali componenti*, dispense del corso di “Cosmologia”, cap.1, UniPd – Università degli Studi di Padova, A.A. 2019/2020.

[2] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.1 *Introduction and Overview*, ¶ 1.2.5 *Voids, Clusters of Galaxies, and Dark Matter*, Springer, 2006, 453.

[3] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.6 *Clusters and groups of galaxies*, ¶ 6.2.8 *Galaxy Groups*, Springer, 2006, 453.

[4] Franceschini A., *Una componente cosmologica fondamentale: le galassie*, dispense del corso di “Cosmologia”, cap.2, UniPd – Università degli Studi di Padova, A.A. 2019/2020.

[5] Corsini E. M., *Morfologia e classificazione delle galassie*, slides del corso di “Astrofisica 1”, UniPd – Università degli Studi di Padova, A.A. 2018/2020.

[6] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap. 3 *The World of Galaxies*, ¶ 3.1.1 *Morphological Classification: The Hubble Sequence*, Springer, 2006, 453.

[7] Lanz L. et al., *Global Star Formation Rates and Dust Emission over The Galaxy Interaction Sequence*, ApJ, 2013, 768, 90.

- [8] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.1 *Introduction and Overview*, ¶ 1.2.2 *The World of Galaxies*, Springer, 2006, 453.
- [9] Toomre A., *Gravitational Interactions Between Galaxies*, Symposium-International Astronomical Union, Vol.58: The Formation and Dynamics of Galaxies, D. Reidel Publishing Company, 1974, pp.347-365,(disponibile all'indirizzo <https://doi.org/10.1017/S0074180900024554>)
- [10] Arp H., *Atlas of Peculiar Galaxies, Preface*, California Institute of Technology, 1996, 190.
- [11] Toomre A. & Toomre J., *Galactic Bridges and Tails*, ApJ, 1972, 178, pp. 623-666.
- [12] Pogge R., *Introduction to Stars, Galaxies and the Universe, Lecture 29: When Galaxies Collide: Interacting Galaxies*, 2006, disponibile all'indirizzo:<https://www.astronomy.ohiostate.edu/pogge.1/Ast162/Unit4/interact.html> (ult. cons. il 29/07/2024).
- [13] Simulazioni numeriche-INAF, <http://www.inaf.it/it/campi-di-attivita/galassie-e-cosmologia/4-origine-ed-evoluzione-delle-galassie-e-delle-strutture/simulazioni-numeriche> (ult. cons. 01/08/2024).
- [14] Mihos J. C. & Hernquist L., *Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers*, ApJ, 1996, 464, 641.
- [15] TNG - IllustrisTNG project, <https://www.tng-project.org> (ult. cons. 01/08/2024).

- [16] TNG - IllustrisTNG project, <https://www.tng-project.org/media/>, (ult. cons. 01/08/2024).
- [17] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.8 *Cosmology III: The Cosmological Parameters*, ¶ 8.1 *Redshift Surveys of Galaxies*, Springer, 2006, 453.
- [18] Kartaltepe J. S. et al., *Evolution of the frequency of luminous close galaxy pairs at $z < 1.2$ in the cosmos field*, ApJS, 2007, 172, 320.
- [19] COSMOS-Cosmic Evolution Survey, <https://cosmos.astro.caltech.edu> (ult. cons. 01/08/2024).
- [20] SDSS- Sloan Digital Sky Survey, <https://skyserver.sdss.org> (ult. cons. 01/08/2024).
- [21] Kartaltepe J. S. et al., *CEERS Key Paper. III. The Diversity of Galaxy Structure and Morphology at $z=3-9$ with JWST*, ApJL, 2023, 946, L15.
- [22] HST – Hubble Space Telescope, <https://hubblesite.org> (ult.cons. 01/08/2024).
- [23] Romano M. et al., *The ALPINE-ALMA [CII] survey, The contribution of major mergers to the galaxy mass assembly at $z \sim 5$* , A&A, 2021, 653, A111, 31.
- [24] Ufficio stampa Inaf, 2021, *Fusioni galattiche à gogo nell'universo primordiale*, <https://www.media.inaf.it/2021/09/21/fusioni-galattiche-universo-primordiale/>, (ult.cons. 01/08/2024).

- [25] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.5 *Active Galactic Nuclei*, ¶ 5.1 *Introduction*, Springer, 2006, 453.
- [26] Covino S., 2001, INAF-Brera, *I Quasars*,
<https://www.brera.inaf.it/~covino/DVG/NEW/A5021QSO.HTM>
(ult.cons. 01/08/2024).
- [27] Carlberg R. G., *Quasar evolution via galaxy mergers*, *ApJ*, 1990, 350, pp. 505-511.
- [28] Schawinski K., *Role of mergers in Early-Type galaxy evolution and black hole growth*, *ApJL*, 2010, 714, L108.
- [29] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.5 *Active Galactic Nuclei*, ¶ 5.2 *AGN Zoology*, Springer, 2006, 453.
- [30] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.9 *The Universe at High Redshift*, ¶ 9.2 *New Types of Galaxies*, Springer, 2006, 453.
- [31] Ufficio stampa Inaf, 2024, *Jwst cattura la drammatica fusione quasar-galassie*, <https://www.media.inaf.it/2024/07/05/jwst-quasar-rapida-crescita/>, (ult.cons. 01/08/2024).
- [32] Decarli R. et al., 2024, *A quasar-galaxy merger at $z\sim 6.2$: Rapid host growth via the accretion of two massive satellite galaxies*, *A&A*, 689, A219, pp. 1-15.
- [33] Decarli R. et al., 2019, *ALMA and HST Kiloparsec-scale Imaging of a Quasar-galaxy Merger at $z\sim 6.2$* , *ApJ*, 880, 157, pp.8.

- [34] Bonafede Annalisa, 2017, *Reionizzazione, la luce alla fine dell'età oscura*, <https://www.media.inaf.it/2017/06/20/reionizzazione/>, (ult.cons. 01/08/2024).
- [35] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.9 *The Universe at High Redshift*, ¶ 9.4 *Reionization of the Universe*, Springer, 2006, 453.
- [36] Duan Q. et al., *Galaxy Mergers in the Epoch of Reionization I: A JWST Study of Pair Fractions, Merger Rates and Stellar Mass Accretion Rates at $z=4.5-11.5$* , MNRAS, 2024, pp. 1-30.
- [37] Sandri M., 2023, *JWST rileva emissioni H-alfa all'alba cosmica*, <https://www.media.inaf.it/2023/06/30/jwst-rileva-emissione-h-alfa-allalba-cosmica/>, (ult.cons. 01/08/2024).
- [38] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, cap.8 *Cosmology III: The Cosmological Parameters*, ¶ 8.5 *Origin of the Lyman- α Forest*, Springer, 2006, 453.
- [39] Eisenstein D. J. et al., *Overview of the JWST Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES)*, 2023, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.0246>, pp.33,(ult.cons. 01/08/2024).
- [40] Witstok J. et al., *Inside the bubble: exploring the environments of reionisation-era Lyman- α emitting galaxies with JADES and FRESCO*, A&A, 2024, vol. 682, A40, pp.15.
- [41] Ouchi M. et al., *An Intensely star-forming galaxy at $z\sim 7$ with low dust and metal content revealed by deep ALMA and HST observations*, 2013, ApJ, 778, 102.

- [42] Fensch J. et al., *High-redshift major mergers weakly enhance star formation*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, vol. 465, pp. 1934-1049.
- [43] Martin G. et al., *The role of mergers and interactions in driving the evolution of dwarf galaxies over cosmic time*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, vol.500, pp. 4937-4957.
- [44] Schreiber C. et al., *Jekyll and Hyde: quiescence and extreme obscuration in a pair of massive galaxies 1.5 Gyr after the Big Bang*, 2018, A&A, vol.611, A22, pp. 22.
- [45] Glazebrook K. et al., 2017, <https://arxiv.org/pdf/1702.01751> (ult. cons. 08/08/2024).
- [46] JWST- James Webb Space Telescope, <https://www.jwst.nasa.gov>. (ult. cons. 08/08/2024).
- [47] Nancy Grace Roman Space Telescope, <https://roman.gsfc.nasa.gov/index.html> (ult. cons. 08/08/2024).
- [48] The New Great Observatories, <https://www.greatobservatories.org> (ult. cons. 08/08/2024).