

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Laurea in Astronomia

Tesi di laurea

Studio delle galassie barrate nell’ammasso

MACS J0647.8+7015 a $z = 0.59$

Relatore

Prof. Enrico Maria Corsini

Studentessa

Margherita Lera

Correlatori

Dott. Edoardo Borsato

Dott. Luca Costantin

Anno Accademico 2023/2024

Riassunto

Questa tesi si propone di determinare la frazione di galassie barrate f_{bar} presenti nell'ammasso MACS J0647.8+7015 a *redshift* $z = 0.59$. A partire da un catalogo di circa 4000 sorgenti luminose individuate dal programma *Cluster Lensing and Supernova Survey* (CLASH) nella regione di cielo di circa 4.1 arcmin^2 centrata sull'ammasso e mappata dal telescopio spaziale Hubble (HST), sono stati identificati gli oggetti estesi, di bassa ellitticità e con *redshift* fotometrico inferiore a 1. Successivamente i 229 possibili membri dell'ammasso sono stati selezionati sulla base della relazione colore-magnitudine nelle bande F606W e F814W della *Advanced Camera for Surveys* (ACS). Sono stati considerati come riferimento i colori di una popolazione stellare vecchia (14 Gyr) e molto metallica (+0.4 dex) e di una popolazione stellare giovane (1 Gyr) e poco metallica (-0.25 dex) e le magnitudini assolute della galassia più brillante dell'ammasso e delle galassie nane. Per 147 galassie sono state estratte dall'archivio *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST) le immagini ad alta risoluzione angolare recentemente ottenute dal programma GO 1443 (PI: D. Coe) con il filtro F200W della camera *Near-Infrared Camera* (NIRCam) montata sul telescopio spaziale James Webb (JWST). Le galassie sono state morfologicamente classificate in non barrate ($bar = 0$), fortemente barrate ($bar = 2$) e incerte ($bar = 1$). La frazione di galassie barrate risulta $f_{\text{bar}} = 11.6\%$ analoga a quella recentemente trovata per l'ammasso SMACS J0723.37323 (SMACS0723) a $z = 0.39$. Sarà ora possibile verificare se anche per l'ammasso MACS J0647.8+7015 vale la correlazione tra f_{bar} e massa delle galassie ospiti già trovata a basso *redshift* e approfondire come l'ambiente influisca sulla formazione delle barre.

Indice

Riassunto	I
1 Introduzione	1
1.1 Galassie barrate	1
1.1.1 Proprietà	1
1.1.2 Formazione ed evoluzione	4
1.2 Galassie barrate e ambiente	5
1.3 Galassie barrate e massa	6
1.4 Galassie barrate e <i>redshift</i>	7
1.5 Scopo e schema della tesi	8
2 Selezione del campione	9
2.1 Ammasso di galassie MACS J0647.8+7015	9
2.2 Selezione delle galassie	10
3 Classificazione morfologica	17
3.1 Preparazione	17
3.2 Classificazione	19

Capitolo 1

Introduzione

Nella Sezione 1.1 si elencano le principali caratteristiche delle galassie barrate, a partire dalle loro caratteristiche morfologiche e, successivamente, si descrivono le proprietà e la formazione ed evoluzione delle barre che si trovano al loro interno. Nella Sezione 1.2 si discute il rapporto tra la frazione di galassie barrate f_{bar} e l'ambiente in cui esse si trovano, descrivendo le influenze che questo potrebbe avere nella formazione o distruzione di una barra. Nella Sezione 1.3 si riporta una ipotesi di diversificazione del rapporto tra barre e ambiente in funzione della massa della galassia ospite. Nella Sezione 1.4 si descrivono vari risultati ottenuti nello studio del rapporto tra f_{bar} e *redshift*, ponendo particolare attenzione sui risultati ottenuti dagli studi in infrarosso con il *James Webb Space Telescope* (JWST). Nella Sezione 1.5 si schematizza la struttura della tesi e se ne illustra lo scopo.

1.1 Galassie barrate

Le galassie barrate sono galassie lenticolari o a spirale dotate di una struttura allungata nelle regioni centrali, detta appunto barra, che non supera mai l'estensione del disco. Le barre sono tra le caratteristiche morfologiche più comuni delle galassie a disco.

Le barre sono il prodotto di una instabilità dinamica del disco stellare in rotazione. Queste strutture sono considerate transienti, in grado di rigenerarsi e dissolversi anche più di una volta nel tempo di scala di Hubble (Bournaud & Combes 2002). La sopravvivenza di una barra in una galassia isolata dipende da quanto efficacemente essa trasferisce momento angolare alle altre componenti della galassia.

La prima identificazione visuale di una barra è attribuita a Parsons (1861), seguita dal primo riconoscimento fotografico e dalla prima definizione di queste strutture come una classe di oggetti (chiamate galassie di tipo ϕ) da parte di Curtis (1918).

Il nome di galassie barrate fu coniato da Hubble (1926), che introdusse il simbolo SB per descriverle. Jeans (1928) realizzò il primo sistema di classificazione morfologica strutturata con due sequenze differenti per spirali barrate e non barrate. Successivamente a quella di Hubble, varie classificazioni morfologiche (nelle quali erano incorporati i primi sistemi di classificazione di Wolf (1908) e Reynolds (1920)) inclusero la presenza di una barra come elemento di distinzione nella catalogazione delle galassie a disco. In particolare de Vaucouleurs et al. (1964) introdussero le galassie debolmente barrate (SAB), ulteriormente suddivise a seconda della presenza di un anello; Morgan (1958) identificò nelle spirali barrate una delle famiglie in cui erano divise le galassie nella sua classificazione; infine van den Bergh (1976) creò sottoclassi a seconda della prominenza della barra dividendo le galassie a disco in non barrate (S), debolmente barrate (S(B)) e barrate (SB).

1.1.1 Proprietà

Le galassie barrate possono essere distinte in diverse categorie a seconda dell'apparenza della barra e possono ospitare al loro interno varie componenti, anche molto complesse. La loro morfologia è riassumibile come segue (Figura 1.1).

Nelle galassie poco inclinate o viste di faccia ($i = 0^\circ$) le barre sono distinte in:

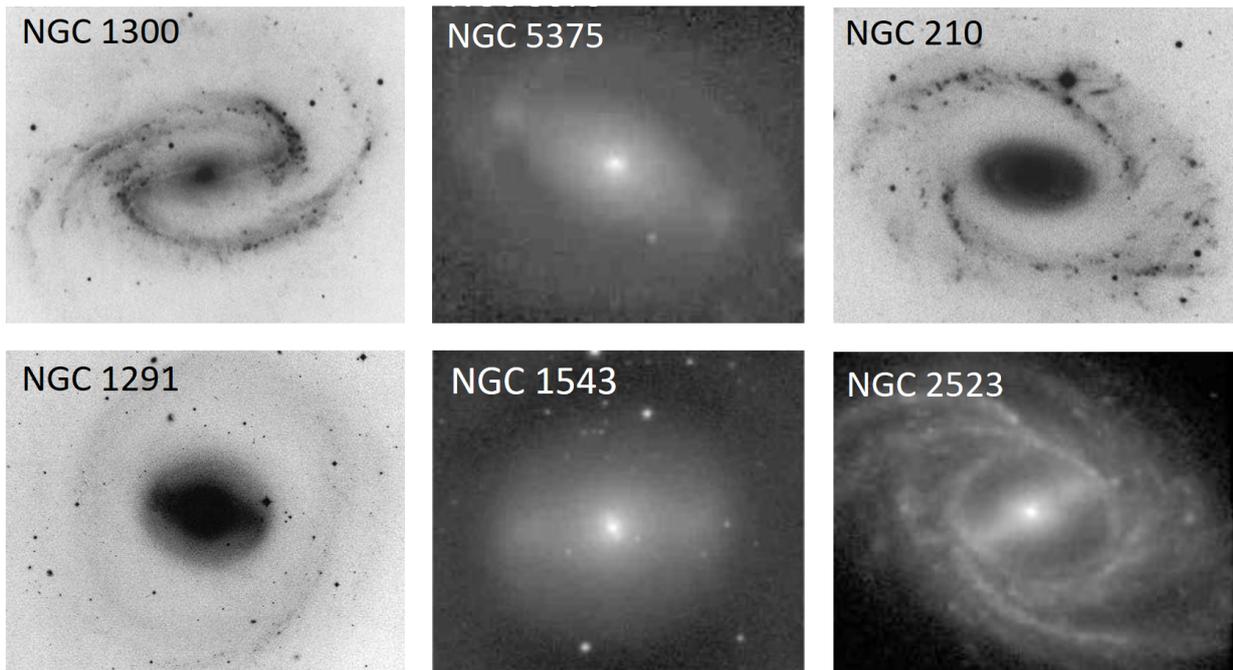


FIGURA 1.1: Esempi di morfologie di galassie barrate e strutture correlate: NGC 1300 (barra forte), NGC 5375 (barra ad ansa), NGC 210 (ovale), NGC 1291 (barra nucleare), NGC 1543 (lente), NGC 2523 (anello interno). Tratto da Corsini (2021).

- Barre forti: in questi casi i bracci di spirale spuntano dalle estremità della barra oppure da un anello (completo o parziale) che la circonda. Le barre forti si dividono in barre dei "primi tipi", composte da popolazioni stellari vecchie, e di "tipo avanzato", composte da popolazioni stellari giovani. Le prime presentano una zona interna più larga e estremità squadrate, mentre le seconde sono prive dell'allargamento centrale e spesso sono decentrate rispetto al disco.
- Barre ad ansa: sono caratterizzate da concentrazioni di luce agli estremi che possono ricordare delle maniglie. Sono composte nella maggior parte dei casi da popolazioni stellari vecchie e spesso sono ben riconoscibili nelle immagini. Le anse hanno diverse forme: possono essere piccole e tonde, oppure quasi rettilinee al termine della barra creando una forma simile a un parallelogramma, oppure ancora archi curvi che danno alla barra una parvenza di anello parziale. La causa dell'esistenza delle anse non è certa; esse sono presenti all'incirca nel 40% di galassie barrate dei primi tipi (S0-Sb), mentre sono molto rare per tipi più avanzati.
- Barre deboli e ovali: le barre deboli costituiscono una famiglia intermedia tra galassie SA e SB e sono definite stimando visualmente la forza della barra. Gli ovali sono la perturbazione più comune nei dischi, spesso delimitati da un anello esterno. Sembra giocare nelle galassie un ruolo simile a quello delle barre: galassie dotate di ovali potrebbero evolvere secolarmente allo stesso modo delle galassie barrate, oppure gli ovali stessi potrebbero essere un prodotto dell'evoluzione secolare. Sono strutture allungate che producono nella parte interna del disco una deviazione globale rispetto alla forma assisimmetrica.
- Barre nucleari (o secondarie): sono barre di dimensioni di circa un decimo rispetto alla lunghezza della barra primaria. Sono comuni nelle galassie barrate, mentre sono molto rare in galassie non barrate; a volte si trovano all'interno di un anello nucleare. L'angolo tra le barre primaria e secondaria permette di dividere queste in barre che precedono o che seguono. Poiché non esiste un angolo privilegiato osservato tra le barre primarie o secondarie si deduce che hanno velocità angolari diverse.

Nelle galassie barrate molto inclinate o viste di taglio ($i = 90^\circ$), si osserva una struttura a forma di "scatola" o "nocciolina" (Erwin & Debattista 2013).

Nelle regioni centrali delle galassie barrate si possono osservare ulteriori strutture correlate alla barra:

- Lenti: sono strutture che inglobano la barra dalla forma tonda o leggermente ellittica dotate di bordi netti. Sono molto comuni nelle galassie lenticolari e sono composte di popolazioni stellari vecchie.
- Barre-lenti: sono strutture simili alle lenti di lunghezza minore della barra.
- Anelli e pseudoanelli: sono strutture circolari correlate alle risonanze orbitali delle barre. Sono divisi in "nucleari" quando sono ubicati nel centro della galassia, "interni" quando circondano la barra (associati alle risonanze interne di Lindblad) ed "esterni" quando hanno un raggio pari al doppio di quello della barra (associati alla risonanza esterna di Lindblad). Gli anelli sono divisi anche in due tipologie in base alla loro disposizione, perpendicolare oppure allineata rispetto alla barra. Gli pseudoanelli sono parzialmente chiusi e sono formati da bracci di spirale esterni.

Le proprietà più importanti delle barre sono:

- 1 - Il profilo di luce;
- 2 - La forma;
- 3 - La lunghezza;
- 4 - La forza;
- 5 - La velocità angolare.

Il profilo di luce descrive l'andamento radiale della brillantezza superficiale della barra. Esso può essere descritto tramite varie leggi parametriche e risulta più luminoso lungo l'asse maggiore rispetto a quello minore (Sellwood & Wilkinson 1993).

Riguardo alla forma della barra, essa è definita dalla forma delle sue isofote; può essere dunque studiata separando ogni componente galattica e derivandone i contributi tramite una decomposizione fotometrica. Le isofote delle barre sono ben descrivibili da ellissi generalizzate, con forme che variano dalla ellisse perfetta a forme più "a disco" o "a scatola". La loro forma intrinseca è tridimensionale. Questo è particolarmente evidente su alcune galassie viste di taglio, che mostrano una struttura verticalmente estesa talvolta a forma di "X". In generale, la forma intrinseca delle barre è quella di un ellissoide triassiale, generalmente prolato. Inoltre le galassie più massicce e dei primi tipi con uno sferoide più prominente e concentrato ospitano barre più spesse e arrotondate rispetto alle galassie di tipo avanzato (Méndez-Abreu et al. 2018).

L'estensione della barra è parametrizzata tramite il raggio R_{bar} , che corrisponde al semiasse maggiore della barra e consiste nella massima estensione radiale delle orbite stellari che ne supportano la struttura (Contopoulos 1981). Questo valore può essere misurato con varie tecniche combinabili assieme per ottenere una stima più precisa e quelle più comunemente usate sono l'ispezione visiva, l'analisi delle isofote, l'analisi di Fourier, la decomposizione fotometrica, e la misura del rapporto tra forza tangenziale e radiale. Il valore di R_{bar} tende ad essere maggiore nelle galassie più estese e nelle galassie più massicce (Erwin 2017).

La forza della barra è definita dal parametro S_{bar} , il quale può essere utilizzato come elemento di distinzione tra barre forti e deboli. Esso consiste nel contributo della barra al potenziale gravitazionale totale della galassia (Buta & Block 2001) e può essere interpretato come la frazione di stelle nella regione della barra, che vanno riordinate per rendere la struttura assisimmetrica. Anche in questo caso si adottano vari metodi di misura, tra cui lo studio del rapporto assiale della barra, il rapporto tra forza tangenziale e radiale e l'analisi di Fourier. Si osservano valori minori di S_{bar} nelle galassie dei primi tipi rispetto a quelle di tipi più avanzati (Aguerri et al. 2009).

L'ultimo parametro è la velocità angolare Ω_{bar} , che consiste nella frequenza angolare con cui la barra ruota attorno al centro galattico. Il suo valore dipende dal contenuto di materia oscura, e la sua variazione influenza la posizione delle risonanze e la dinamica stellare. Spesso viene parametrizzata tramite il tasso di rotazione \mathcal{R} , definito come il rapporto tra raggio di corotazione R_{cr} e il raggio della barra:

$$\mathcal{R} = R_{\text{cr}}/R_{\text{bar}} \quad (1.1)$$

$$R_{\text{cr}} = v_{\text{circ}}/\Omega_{\text{bar}} \quad (1.2)$$

dove v_{circ} è la velocità circolare della barra. R_{cr} è la distanza alla quale la forza di gravità e le forze centrifughe si equivalgono nel sistema di riferimento solidale alla barra.

Il tasso di rotazione è un parametro adimensionale e indipendente dalla distanza, che permette di dividere le barre in "lente" ($\mathcal{R} < 1.4$), "veloci" ($1 \leq \mathcal{R} \leq 1.4$) e "ultraveloci" ($\mathcal{R} < 1$).

Siccome Ω_{bar} è un parametro dinamico, per ricavarne il valore in una galassia si richiede la conoscenza della cinematica stellare. Si possono adottare varie tecniche di misura, che includono:

- L'identificazione degli anelli tramite le risonanze di Lindblad (Jeong et al. 2007);
- L'analisi della forma delle bande di polvere (Athanassoula 1992);
- L'analisi della posizione delle regioni di formazione stellare rispetto ai bracci di spirale (Puerari & Dottori 1997);
- Il confronto della distribuzione e della velocità del gas con modelli dinamici (Weiner et al. 2001);
- Lo sfasamento tra onda di densità e potenziale (Zhang & Buta 2007);
- La misura della posizione e velocità lungo la linea di vista delle stelle lungo direzioni parallele all'asse maggiore del disco (Tremaine & Weinberg 1984).

Vari studi che misurano \mathcal{R} indicano che la maggior parte delle barre che si osservano sono veloci (Aguerri et al. 2015) e che non c'è una forte correlazione con il tipo morfologico. Il tasso di rotazione misurato da diversi metodi porta a risultati generalmente consistenti.

Le barre lente sono oggetti che vengono osservati raramente. I metodi finora adottati per misurare queste barre dipendono molto dai modelli e soffrono di alcune limitazioni, perciò i risultati hanno incertezze molto grandi. Buttitta et al. (2022) hanno misurato in modo diretto e con grande precisione una barra lenta nella galassia NGC 4277, confermando che la sua lentezza sia dovuta a una quantità significativa di materia oscura nella regione centrale della galassia.

Per quanto riguarda le barre ultraveloci, sebbene se ne osservino svariate esse non sono considerate oggetti fisici, poiché in un regime di questo tipo le orbite stellari si allineano perpendicolarmente all'asse maggiore della barra e non riescono più a supportarne la struttura (Athanassoula 2003). Cuomo et al. (2021) hanno mostrato, a partire da un campione di galassie che ospitano barre ultraveloci, che la misura delle stesse deriva da una stima sbagliata del parametro R_{bar} a causa della presenza di anelli o forti bracci di spirale.

1.1.2 Formazione ed evoluzione

Le barre non sono strutture statiche, ma si possono formare e distruggere e sono strettamente legate all'evoluzione delle proprietà morfologiche, fotometriche e dinamiche della galassia ospite. L'evoluzione delle barre e delle loro proprietà si può dedurre solamente tramite studi teorici o simulazioni numeriche. Il ciclo di vita di una barra è caratterizzato da diverse fasi: formazione, fase instabile, fase di evoluzione secolare e eventualmente dissoluzione.

Le barre si possono formare spontaneamente in dischi stellari instabili e isolati (Ostriker & Peebles 1973), oppure a causa di una interazione mareale con un compagno vicino (Noguchi 1987). Le barre formatesi spontaneamente sono solitamente più veloci, ovvero hanno un valore minore di \mathcal{R} rispetto a quelle formate da interazioni mareali, che risultano più lente. Durante questa fase il raggio R_{bar} cresce rapidamente fino a formare la struttura della barra (Martinez-Valpuesta et al. 2006).

La prima fase successiva alla formazione è una fase di instabilità, durante la quale la barra può avere forma a "nocciolina" o a "X" (Athanassoula et al. 2013). In questa fase il disco da sottile (rapporto assiale di ~ 0.1) si ispessisce (rapporto assiale di ~ 0.3), mentre le orbite delle stelle del disco si diffondono di più lungo la direzione verticale e quelle nella zona della barra, che altrimenti sarebbero quasi circolari, si fanno via via più eccentriche. Le prime fasi di nascita ed assestamento durano circa 1 Gyr, tuttavia questo valore può variare in presenza di un alone massiccio di materia oscura o di uno sferoide, dove la formazione e la successiva evoluzione sono rallentate (Athanassoula & Misiriotis 2002).

Nel ciclo di vita della barra segue una fase, più lunga, di evoluzione secolare durante la quale la barra scambia momento angolare, massa ed energia con le altre componenti della galassia ospite (Sellwood 2014). I dettagli di questa fase sono influenzati da vari fattori. In generale, un rapporto alto in massa tra sferoide e disco rallenta la formazione e genera barre più forti.

Un fattore che gioca un ruolo importante è la presenza di materia oscura. Lavori teorici e simulazioni cosmologiche mostrano che le barre, a causa della frizione dinamica, rallentano e subiscono grandi perdite di momento angolare dopo l'interazione con un alone di materia oscura (Weinberg 1985; Debattista & Sellwood 1998; Martinez-Valpuesta et al. 2017). La frizione dinamica dipende sia dalla massa totale dell'alone sia dalla sua distribuzione all'interno della galassia ospite, ma anche dalla sua forma. La capacità dell'alone di assorbire momento angolare influisce molto sull'evoluzione della forma della barra: un alone massiccio provoca la formazione di barre sottili e lunghe mentre uno meno massiccio genera barre più arrotondate e corte. Inoltre, un alone che non ruota causa una debole distorsione ovale nel disco (Athanassoula & Misiriotis 2002).

L'efficienza nello scambio di momento angolare tra le diverse componenti galattiche dipende anche dalla frizione del gas (Kumar et al. 2022). La quantità di gas presente nella barra influenza la forza della stessa: barre che si formano in ambienti privi di gas e con un alone sferico sono più forti, mentre in dischi ricchi di gas le simulazioni indicano una formazione di barre deboli.

Durante l'evoluzione secolare il momento angolare della barra viene trasferito, perciò Ω_{bar} diminuisce e conseguentemente \mathcal{R} aumenta. Oltre all'alone di materia oscura, anche la frazione di gas influenza la velocità di evoluzione di questo parametro, che varia da un aumento veloce in sistemi poveri di gas a un valore quasi costante in sistemi ricchi di gas (Villa-Vargas et al. 2010). Siccome le barre veloci sono tipiche di galassie con aloni di materia oscura meno densi, le osservazioni di una grande quantità di barre veloci implica che la maggior parte delle galassie barrate contengono poca materia oscura nelle regioni centrali (Corsini & Debattista 2011).

La dissoluzione di una barra è un fenomeno di cui non si conosce ancora bene la durata temporale e viene causato da un accumulo di massa centrale. In aggiunta, il gas presente al suo interno è in grado di indebolirla tramite il suo momento torcente gravitazionale, che produce un disallineamento nelle orbite stellari (Bournaud & Combes 2002; Bournaud et al. 2005). Le barre, infine, possono anche essere distrutte da incontri estremamente violenti (Friedli 1999; Ghosh et al. 2021). Le condizioni per dissolvere una barra, tuttavia, sono serrate perché è necessario avere al centro una concentrazione alta di massa, pari almeno al 10% della massa totale del disco (Shen & Sellwood 2004).

Una quantità considerevole di gas potrebbe essere responsabile per la riformazione di una barra (Bournaud & Combes 2002).

1.2 Galassie barrate e ambiente

L'Universo locale è caratterizzato dall'ubiquità di galassie barrate ed è su queste che si basa la maggior parte della nostra conoscenza sulla formazione e evoluzione delle barre. Considerando vari studi si può affermare che più della metà delle galassie a disco che abitano l'Universo locale, osservate in banda ottica, sono barrate (Aguerri et al. 2009). Questo limite può oscillare anche di quantità non trascurabili quando si osservano diversi campioni, poiché la sua misura dipende fortemente dal metodo e dall'intervallo di lunghezze d'onda nel quale viene osservata la barra, e potrebbero contribuire altre dipendenze dalla massa, dalla frazione di gas oppure ancora dalla risoluzione spaziale che impedisce

di vedere le barre più piccole. Ad esempio, nel vicino infrarosso, f_{bar} aumenta fino a circa il 70% (Eskridge et al. 2002). Inoltre, f_{bar} in ottico è più alta in galassie di tipo più avanzato, con dipendenze dal rapporto sferoide/disco, dalla concentrazione, ma anche da luminosità, colore e massa stellare e di HI.

Lo studio della frazione f_{bar} di galassie barrate in diversi ambienti permette di esplorare i meccanismi che innescano la formazione delle barre e il ruolo dell'ambiente nel modificarne le proprietà. Siccome l'ambiente influenza fortemente la componente stellare e/o gassosa del disco, si pensa che possa di conseguenza influenzare anche la formazione delle barre. I processi ambientali possono regolare il ciclo di vita delle barre contribuendo sia al loro sviluppo, forzando instabilità nel disco, sia alla loro distruzione tramite riscaldamento del disco. Un ambiente molto studiato è quello degli ammassi di galassie, all'interno dei quali hanno luogo vari meccanismi fisici che possono essere responsabili della trasformazione della morfologia dei dischi o addirittura della loro distruzione (Boselli & Gavazzi 2006).

Le possibili correlazioni tra ambiente e f_{bar} sono state esaminate in vari studi, ma i risultati che si sono ottenuti sono in contrasto tra di loro. Una prima relazione ipotizzata è che f_{bar} in diversi ammassi aumenti verso il centro dell'ammasso stesso (Thompson 1981). Si è registrato anche un aumento di f_{bar} in coppie di galassie, e che le galassie lenticolari più deboli negli ammassi mostrano una frazione di barre più alta rispetto alle loro controparti di campo. Questi risultati considerati insieme sembrerebbero indicare che le barre popolino ambienti ad alta densità. In opposizione, Tawfeek et al. (2022) hanno ottenuto un valore di f_{bar} massimo nelle regioni esterne degli ammassi, ipotizzando che le forze mareali agenti all'interno degli ammassi potrebbero essere responsabili dell'indebolimento o della dissoluzione delle barre. Infine, alcuni autori sostengono che f_{bar} dipende più dalle proprietà della galassia ospite che dall'ambiente in cui si trova. Lee et al. (2012) hanno riportato che le relazioni con l'ambiente svaniscono una volta corretti il colore e la dispersione di velocità centrale, mentre Giordano et al. (2011) e Marinova et al. (2012) hanno osservato galassie in diversi ambienti senza riportare grosse differenze tra questi. Questi risultati sono stati confermati anche da Sarkar et al. (2021), che hanno studiato f_{bar} in un ampio campione di galassie a spirale e non hanno trovato nessuna correlazione tra la frazione e il tipo di ambiente in cui si trovano.

1.3 Galassie barrate e massa

Un'interpretazione complementare dei risultati è stata proposta da Méndez-Abreu et al. (2010), i quali sostengono che la massa della galassia è il parametro principale che influenza la formazione di barre e osserva che le barre sono ospitate da galassie solo in un intervallo di masse limitato. Negli studi precedenti potrebbero essere presenti effetti di selezione causati dalle diverse caratteristiche dei campioni presi in analisi e, in particolare, è necessario suddividerli in classi di massa e/o luminosità.

Méndez-Abreu et al. (2012) hanno derivato f_{bar} in funzione della luminosità (e massa) in diversi ambienti, più precisamente considerando due campioni di galassie di campo e due campioni di galassie appartenenti agli ammassi della Vergine e della Chioma. I risultati supportano uno scenario di influenza dell'ambiente in funzione della massa: la distribuzione di f_{bar} rispetto alla massa è diversa per le galassie di campo piuttosto che negli ammassi. Essi hanno trovato che f_{bar} negli ammassi raggiunge un massimo di 50% circa a $M_r = -20.5$ mag, mentre negli ambienti a bassa densità il picco è raggiunto a magnitudini maggiori. A luminosità minori f_{bar} diminuisce perché aumenta lo spessore del disco delle galassie ospiti. In questo intervallo di massa la frazione risulta maggiore nel campo rispetto agli ammassi: i dischi di massa inferiore negli ammassi vengono riscaldati o distrutti più facilmente per via delle interazioni con altre galassie e non riescono a sviluppare una barra. Al contrario, galassie di massa intermedia all'interno degli ammassi hanno una frazione f_{bar} più alta e ciò indica che dischi più luminosi sono abbastanza forti da sopravvivere alle interazioni e riescono a formare una barra.

Un ulteriore studio ha confrontato la frazione f_{bar} nell'ammasso SMACS J0723.37323 (SMACS0723) a *redshift* $z = 0.39$ rispetto a quelli più vicini e ai campioni di galassie di campo precedentemente analizzati (Méndez-Abreu et al. 2023). In confronto alle galassie di campo, i dati riportano per tutti gli ambienti densi una mancanza di barre nel regime di massa inferiore. Questo significa che già a *redshift*

alti c'è una forte influenza da parte dell'ambiente, perciò il meccanismo che inibisce la formazione di barre negli ammassi deve agire nelle prime fasi di costituzione degli ammassi. Si registra anche una debole evoluzione della frazione delle barre di galassie a massa elevata negli ultimi 4 Gyr di evoluzione, il cui leggero aumento con il tempo potrebbe derivare da interazioni lente che innescano la formazione di barre.

Riassumendo, sembrerebbe esistere una bimodalità nel ruolo dell'ambiente sulle barre. I dischi più luminosi e massicci sono abbastanza forti da mantenere la loro struttura fredda nonostante le interazioni e sono dunque più resistenti e in grado di formare una barra. In queste galassie, un ruolo poco decisivo è giocato dai processi ambientali, che sopprimono la creazione di barre, e al contrario quest'ultima è intensificata dagli incontri lenti con galassie compagne. Per galassie meno luminose ($M_r \geq -19$ mag), le stesse interazioni giocano un ruolo distruttivo. I dischi meno massicci sono caldi e fragili, quindi gli ambienti più densi inibiscono la formazione di barre al loro interno per queste classi di luminosità.

1.4 Galassie barrate e *redshift*

Ci si aspetta che a *redshift* più alti f_{bar} potrebbe subire delle variazioni. A $z > 1$ l'Universo era molto più turbolento e denso rispetto a come lo si osserva ora, e questo ha delle ripercussioni sul numero di barre osservate a tali *redshift*, poiché necessitano di dischi dinamicamente freddi per formarsi.

Lo studio di f_{bar} a *redshift* alti soffre di ulteriori limitazioni: è necessario osservare in bande infrarosse per identificare una struttura come quella delle barre e la brillantezza superficiale è minore così come la risoluzione spaziale. Marinova & Jogee (2007) hanno misurato f_{bar} nelle bande ottica e infrarossa in un campione di galassie sia prima che dopo aver operato una deproiezione su di esse, senza trovare variazioni significative. Questo significa che ad alti *redshift* f_{bar} può essere misurata senza deproiettare le galassie.

Vari studi sono stati condotti utilizzando la strumentazione del telescopio spaziale Hubble (HST) volti a caratterizzare meglio le relazioni tra barre e *redshift*. Si stima che da $z = 0$ a $z = 0.8$ la frazione declina da 70% a 20% per le spirali di tipo SB e SAB, mentre nelle spirali SB la frazione scende da 30% a meno del 10%. Jogee et al. (2004) hanno analizzato un campione di galassie situate a *redshift* $0.2 \leq z \leq 1$, trovando una frazione circa costante $\sim 30\%$ fino a $z = 0.7$. Al contrario Sheth et al. (2008) hanno misurato una diminuzione per f_{bar} all'aumentare del *redshift*, a partire dall'Universo Locale dove la frazione misurata è del 65% al 20% a $z=0.84$. Hanno trovato anche che le galassie più rosse e massicce hanno una frazione maggiore di barre. In riassunto, per spirali più rosse, più massicce e luminose la frazione resta all'incirca costante, mentre nelle spirali più blu e deboli e meno massicce si osserva un declino forte di f_{bar} a partire da $z > 0.3$. L'evoluzione dei parametri delle barre in funzione del *redshift* (come ad esempio la loro dimensione e forza) è stata indagata da Kim et al. (2021), i quali hanno analizzato un campione di galassie tra $0.2 \leq z \leq 0.84$. Essi hanno trovato che il valore mediano di R_{bar} rimane costante con z e dunque la barra evolve proporzionalmente alla crescita del disco, mentre la forza della barra non evolve con il *redshift*.

Lo studio di galassie barrate al di fuori dell'Universo locale è stato potenziato notevolmente dalle nuove immagini infrarosse ad alta risoluzione della camera *Near-Infrared Camera* (NIRCam) del telescopio JWST per via della migliore risoluzione angolare. Ad esempio, a lunghezza d'onda $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ la larghezza a mezza altezza (FWHM, dall'inglese *Full Width Half Maximum*) della funzione di allargamento del punto (PSF, dall'inglese *Point Spread Function*) della *Wide Field Camera 3* (WFC3) è 0.151 arcsec^1 , mentre quella di NIRCam è 0.050 arcsec , tre volte minore².

Méndez-Abreu et al. (2023) hanno misurato f_{bar} nell'ammasso SMACS0723 a $z = 0.39$, trovando una frazione f_{bar} più alta rispetto agli studi condotti con HST per via della migliore risoluzione spaziale

¹<https://hst-docs.stsci.edu/wfc3ihb/>

²<https://jwst-docs.stsci.edu/>

e profondità delle immagini. Il loro risultato è in accordo con alcune simulazioni che predicono valori di f_{bar} simili a quelli trovati e che prevedono una diminuzione di f_{bar} per galassie massicce. Gli studi con HST hanno portato a una serie di risultati non sempre concordi tra di loro, ma dividendo in massa i campioni i dati indicherebbero trend diversi a seconda delle varie classi: in dischi più massicci ($\log M/M_{\odot} > 10$) c'è poca variazione, mentre per quelli meno massicci la diminuzione di f_{bar} con il *redshift* è maggiore. Questo è consistente con uno scenario in cui i dischi più massicci nei primi Gyr di storia dell'Universo si sono stabilizzati velocemente e hanno avuto tempo di formare una barra e di conseguenza c'è poca evoluzione da $z = 1$ fino ad oggi. In aggiunta, a masse elevate l'ambiente non influenza la formazione di barre: si è osservato infatti che f_{bar} è maggiore nell'ammasso SMACS0723 piuttosto che nelle galassie di campo locali.

A questi risultati si aggiungono quelli di Guo et al. (2023), che hanno identificato sei esempi di galassie barrate a *redshift* $1.1 \leq z \leq 2.3$ e grazie alle immagini infrarosse di JWST ne hanno misurato i parametri.

L'osservazione di barre ad alti *redshift* ha importanti implicazioni. Se queste, infatti, già esistono in epoche remote e sono in grado di sopravvivere fino a epoche presenti, significa che i processi secolari influenzati dalle barre potrebbero operare in tempi lunghi e avere un impatto sulle galassie che si osservano a $z = 0$.

Una seconda conseguenza è che le instabilità che portano alla formazione delle barre si devono innescare molto presto. A *redshift* alti, tuttavia, le turbolenze dovrebbero impedire o ritardare lo sviluppo di barre, che avviene solo in dischi dinamicamente freddi. Costantin et al. (2023) hanno riportato la scoperta di una galassia a spirale barrata a *redshift* fotometrico $z = 3$, con massa e morfologia assimilabili a quella di un progenitore della Via Lattea. Questo implica che i dischi si potrebbero essere raffreddati molto presto e che le barre a *redshift* alti potrebbero formarsi in tempi minori del previsto (~ 400 Myr). In aggiunta, siccome i dischi freddi sono dominati dalla materia oscura, questa scoperta pone dei vincoli sulla distribuzione di materia oscura in galassie a z elevati.

1.5 Scopo e schema della tesi

Lo scopo della tesi è quello di derivare f_{bar} in un campione di galassie appartenenti all'ammasso MACS J0647.8+7015 (MACS0647) a $z = 0.59$, sfruttando le immagini infrarosse ottenute da NIRCcam installata su JWST.

La tesi è articolata nel seguente modo:

- Nel Capitolo 1 si introduce l'argomento delle galassie barrate. Nella Sezione 1.1 si elencano le principali caratteristiche delle galassie barrate, a partire dalle loro caratteristiche morfologiche e, successivamente, si descrivono le proprietà e la formazione ed evoluzione delle barre che si trovano al loro interno. Nella Sezione 1.2 si discute il rapporto tra la frazione di galassie barrate f_{bar} e l'ambiente in cui esse si trovano, descrivendo le influenze che questo potrebbe avere nella formazione o distruzione di una barra. Nella Sezione 1.3 si riporta una ipotesi di diversificazione del rapporto tra barre e ambiente in funzione della massa della galassia ospite. Nella Sezione 1.4 si descrivono vari risultati ottenuti nello studio del rapporto tra f_{bar} e *redshift*, ponendo particolare attenzione sui risultati ottenuti dagli studi in infrarosso con il *James Webb Space Telescope* (JWST). Nella Sezione 1.5 si schematizza la struttura della tesi e se ne illustra lo scopo.
- Nel Capitolo 2 si riassume il processo di selezione del campione sul quale si è effettuata la classificazione. Nella Sezione 2.1 si descrivono le proprietà dell'ammasso MACS0647 e si mostrano le caratteristiche dei dati a disposizione su cui si è operata la selezione. Nella Sezione 2.2 si elencano i parametri e i rispettivi estremi utilizzati come criteri per selezionare gli oggetti di interesse.
- Nel Capitolo 3 si descrivono i dettagli della classificazione morfologica delle galassie del campione. Nella Sezione 3.1 si riporta il processo tramite il quale si è arrivati alla raccolta finale di immagini dei singoli oggetti, mentre nella Sezione 3.2 si riporta il metodo adottato per eseguire la classificazione morfologica e si discutono i risultati ottenuti.

Capitolo 2

Selezione del campione

In questo capitolo si riassume il processo di selezione del campione sul quale si è effettuata la classificazione. Nella Sezione 2.1 si descrivono le proprietà dell'ammasso MACS0647 e si mostrano le caratteristiche dei dati a disposizione su cui si è operata la selezione. Nella Sezione 2.2 si elencano i parametri e i rispettivi intervalli utilizzati per selezionare gli oggetti di interesse.

2.1 Ammasso di galassie MACS J0647.8+7015

L'ammasso di galassie MACS J0647.8+7015 (MACS0647) appartiene al campione della *Massive Cluster Survey* (MACS, Ebeling et al. 2001), un progetto iniziato nel 1998 volto alla compilazione e caratterizzazione di ammassi luminosi a raggi X e distanti $z > 0.3$ in modo da aumentare la possibilità di studiare i parametri fisici e cosmologici che influenzano l'evoluzione degli ammassi a *redshift* alti. Da una lista di oltre 5000 candidati estratta dal catalogo ROSAT *All-Sky Survey Bright Source Catalogue* (RASS-BSC), MACS ha osservato e confermato spettroscopicamente 124 ammassi di galassie a $0.3 < z < 0.7$, dei quali più di due terzi sono nuove scoperte.

MACS0647 è uno dei 12 ammassi di galassie del catalogo MACS a $z > 0.5$. Ebeling et al. (2007) hanno calcolato un *redshift* di $z = 0.5907$ e una dispersione di velocità $\sigma = 1150_{+260}^{-340}$ km s⁻¹. Chen et al. (2023) hanno calcolato una massa totale di $(7.39 \pm 0.12) \cdot 10^{14}$ M_⊙ entro R_{500} , corrispondente al raggio entro il quale la densità è 500 volte maggiore rispetto alla densità critica al *redshift* dell'ammasso.

L'ammasso di galassie MACS0647 (Figura 2.1) è stato osservato all'interno del programma *Cluster Lensing and Supernova Survey* (CLASH, Postman et al. 2012) insieme ad altri 24 ammassi di galassie massicci e dinamicamente rilassati selezionati in base a dati nei raggi X, oppure in base alla loro forza di lenti gravitazionali (raggio di Einstein $\theta_{\text{Ein}} > 35$ arcsec per $z > 2$).

Le immagini sono state raccolte utilizzando 16 filtri diversi, che spaziano dal vicino ultravioletto ($\lambda \sim 2000$ Å) al vicino infrarosso ($\lambda \sim 17000$ Å). Ogni ammasso è stato osservato con due angoli di orientazione diversi (con un divario di $\sim 30^\circ$), fino a coprire un'area di 4.08 arcmin².

Tramite il codice SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) Postman et al. (2012) hanno identificato gli oggetti dell'ammasso a partire da una media pesata delle immagini processate ottenute da *Advanced Camera for Surveys* ACS/WFC e WFC3 e ne hanno misurato la fotometria corretta per estinzione galattica ($E(B - V) = 0.023$). Hanno inoltre eseguito una stima del *redshift* fotometrico dei singoli oggetti.

La lista di questi oggetti è pubblicamente disponibile sul sito *web* del catalogo CLASH¹. Gli elementi, di cui si fa uso in questo lavoro, contenuti nel catalogo sono:

- Codice ID assegnato da SExtractor;
- Coordinate equatoriali RA e Dec (J2000.0);
- Parametro adimensionale di "stellarità" calcolato automaticamente da SExtractor, che varia da $stel = 0$ (galassia certa) a $stel = 1$ (stella certa) ed è riferito alla estensione della sorgente;

¹<https://archive.stsci.edu/prepds/clash/>

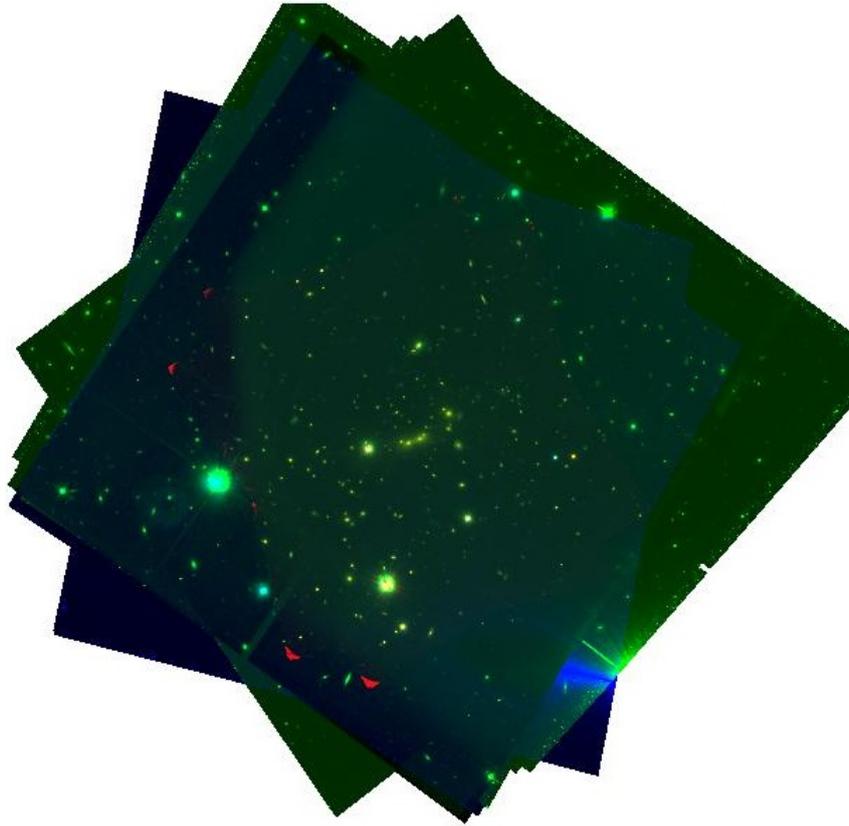


FIGURA 2.1: Immagine a falsi colori dell'ammasso MACS0647 ottenuta con HST.

Fonte: https://archive.stsci.edu/prepds/clash/macs0647_display.html

- Parametro di ellitticità calcolato come $ell = 1 - b/a$, dove b/a è il rapporto assiale della isofota meno luminosa rilevata da SExtractor;
- Magnitudine isofotale calcolata per ciascun filtro nel sistema fotometrico AB all'isofota meno luminosa rilevata da SExtractor;
- *Redshift* fotometrico z_b ottenuto con il codice *Bayesian Photometric Redshift* (Benítez 2000).

Il campione iniziale comprende 3933 oggetti.

2.2 Selezione delle galassie

I dati dall'archivio di CLASH sono stati utilizzati per eseguire una selezione degli oggetti appartenenti all'ammasso e idonei alla procedura di classificazione morfologica. La selezione è stata realizzata tramite una serie di criteri sfruttando i parametri elencati nella Sezione 2.1. Il campione finale di galassie verrà esaminato visualmente utilizzando immagini recentemente ottenute con la camera infrarossa NIRCam a bordo di JWST, che permetterà uno studio dettagliato della morfologia di queste galassie, fornendo una risoluzione 3 volte maggiore rispetto alle immagini precedentemente ottenute con HST (Sezione 3.1).

I due filtri utilizzati per misurare le magnitudini degli oggetti sono:

- WFC/F606W, con lunghezza d'onda osservata di $\lambda_{\text{ref}} = 5291.88 \text{ \AA}$;
- WFC/F814W, con lunghezza d'onda osservata di $\lambda_{\text{ref}} = 8045.53 \text{ \AA}$.

Dall'elenco iniziale del catalogo sono stati esclusi tutti gli elementi che almeno in uno dei due filtri presentano un valore di magnitudine pari a 99 (che indica in questo caso mancanza di identificazione

TABELLA 2.1: Magnitudini per le SED delle popolazioni stellari vecchia e giovane, calcolata con le IMF bimodale (bi), di Chabrier (ch) e di Kroupa rivista (kb).

Popolazione	IMF	m_{F606W} (mag)	m_{F814W} (mag)	$m_{F606W} - m_{F814W}$ (mag)
Vecchia	bi	8.92	7.08	1.84
	ch	8.88	7.04	1.84
	kb	9.13	7.28	1.85
Giovane	bi	5.07	4.05	1.02
	ch	5.00	3.98	1.02
	kb	5.32	4.29	1.03

dell'oggetto nella specifica banda) oppure a -99 (che indica che la fonte si trova fuori dal campo di vista del rivelatore o si trova all'interno della separazione dei rivelatori). Si sono ottenuti 3078 oggetti.

Per eliminare la maggior parte delle sorgenti non risolte, sono stati esclusi tutti gli elementi con il parametro di stellarità $stel \geq 0.9$. Successivamente si sono selezionati gli oggetti con ellitticità $ell \leq 0.5$, in modo da avere solamente galassie con una inclinazione ($i > 45^\circ$) adatta a identificare una eventuale barra. Infine si sono selezionati gli elementi con *redshift* fotometrico $zb < 1$, per togliere gli oggetti che probabilmente non appartengono all'ammasso. A seguito di queste selezioni si è ottenuto un campione residuo di 1071 oggetti.

Per selezionare i membri dell'ammasso si è utilizzata la relazione tra colore e magnitudine. Gli ammassi di galassie posti in un diagramma colore-magnitudine presentano una sequenza rossa ben definita che permette di selezionare i membri dell'ammasso fotometricamente. Per definirne i limiti è necessario eseguire dei tagli sia in colore sia in magnitudine apparente. Il diagramma è stato costruito utilizzando la magnitudine m_{F814W} nel filtro F814W e il colore $m_{F606W} - m_{F814W}$ definito come differenza di magnitudini nei filtri F606W e F814W.

Per la selezione in colore, si è utilizzata la libreria E-MILES di modelli di popolazioni stellari² per ricavare la distribuzione spettrale di energia (SED, dall'inglese *Spectral Energy Distribution*) di due popolazioni differenti a *redshift* pari a quello dell'ammasso, corrette con le curve di risposta dei due filtri utilizzati (Vazdekis et al. 2016). Il limite superiore imposto nel diagramma (Figura 2.2) corrisponde al colore di una popolazione di stelle vecchia (età 14 Gyr) e molto metallica ($[M/H] = 0.4$ dex). Il limite inferiore è stato invece ricavato da un modello di SED di una popolazione giovane (1 Gyr) e poco metallica (-0.25 dex). I valori ottenuti sono rispettivamente $m_{F606W} - m_{F814W} = 1.84$ mag e $m_{F606W} - m_{F814W} = 1.03$ mag. Per entrambi i modelli si è utilizzata una funzione di massa iniziale (IMF, dall'inglese *Initial Mass Function*) bimodale (Vazdekis et al. 1996), che ha come singolo parametro la pendenza (impostata in questo caso a 1.3). È simile a una distribuzione unimodale per stelle con masse sopra a $0.6 M_\odot$ ma predice un numero inferiore di stelle con masse minori.

I colori sono stati ricavati anche assumendo due ulteriori IMF e si è verificato che i risultati siano in accordo tra di loro. La prima è la IMF di Chabrier (Chabrier 2003), mentre la seconda è la IMF di Kroupa rivista (Kroupa 2001). Sono due leggi di potenza e nella seconda viene tenuto conto degli effetti sistematici dovuti a binarie irrisolte. I valori di colore ottenuti per le diverse IMF sono riportati in Tabella 2.1.

Per il taglio superiore in magnitudine, si è calcolata³ la magnitudine apparente che avrebbe una galassia nana di magnitudine assoluta $M = -16$ mag posta a $z = 0.59$, ottenendo come valore $m_{F814W} = 26.69$ mag. Per il taglio inferiore in magnitudine, sono state usate le coordinate equatoriali della galassia più brillante dell'ammasso (BCG, da *Brightest Cluster Galaxy*) MACS J0647.8+7015-BCG (Durret et al. 2019), che nel catalogo CLASH corrisponde all'oggetto di $ID = 4842$, per trovare l'elemento corrispon-

²<http://research.iac.es/proyecto/miles/pages/webtools/tune-ssp-models.php>

³La magnitudine si è calcolata tramite il modulo di distanza, utilizzando la distanza di luminosità a $z = 0.59$ ricavata da <https://astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html> assumendo un Universo piatto con $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\lambda = 0.7$ e $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

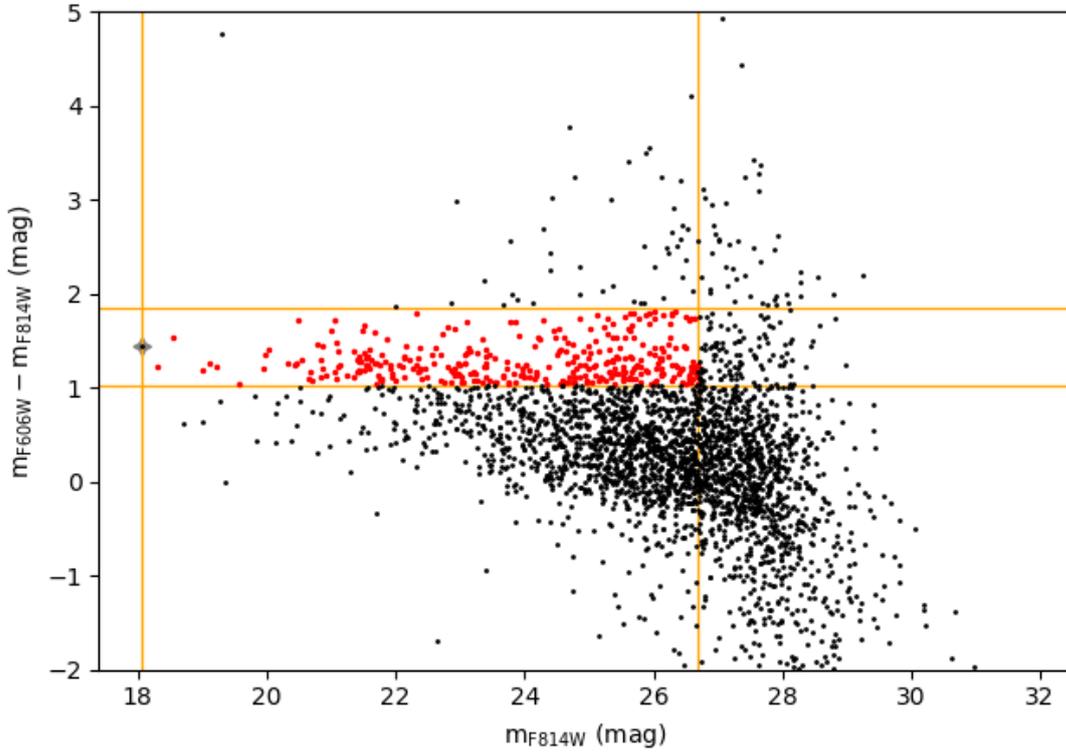


FIGURA 2.2: Diagramma colore-magnitudine delle sorgenti del catalogo CLASH per MACS0647. In rosso sono rappresentati i membri dell'ammasso selezionati dai limiti in colore ($1.84 < m_{F606W} - m_{F814W} < 1.03$ mag) e in magnitudine ($18.07 < m_{F814W} < 26.69$ mag). La stella grigia corrisponde MACS J0647.8+7015-BCG.

dente nel catalogo dell'ammasso e ricavarne la magnitudine nel filtro F814W, pari a $m_{F814W} = 18.07$ mag.

Riassumendo, i parametri e i rispettivi intervalli utilizzati per effettuare la selezione dall'elenco iniziale di sorgenti sono:

- Estensione: $stel < 0.9$;
- Ellitticità: $ell < 0.5$;
- Redshift: $zb < 1$;
- Magnitudine: $18.07 < m_{F814W} < 26.69$ mag;
- Colore: $1.03 < m_{F606W} - m_{F814W} < 1.84$ mag.

Il campione che si è ottenuto comprende 229 elementi. In Tabella 2.2 è riportato l'elenco delle galassie selezionate con le loro proprietà. Alcuni elementi del campione, dopo una successiva analisi con i dati a disposizione da JWST, non sono risultati idonei per il processo di classificazione e perciò sono stati esclusi dall'elenco (Sezione 3.1). La selezione finale comprende un totale di 147 elementi.

TABELLA 2.2: Selezione e classificazione di galassie appartenenti all'ammasso MACSJ0647.

ID	RA (deg)	dec (deg)	<i>stel</i>	<i>ell</i>	m_{F606W} (mag)	m_{F814W} (mag)	<i>zb</i>	<i>bar</i>
2110	101.9207856	70.2698462	0	0.491	22.80	21.55	0.739	1
2167	101.9822273	70.2693925	0.03	0.147	21.85	20.54	0.677	0
2222	101.9274473	70.2689927	0	0.244	22.16	21.08	0.688	2
2638	101.9637864	70.2666082	0	0.164	27.50	25.76	0.848	0
2746	101.9515336	70.2661288	0	0.477	27.82	26.64	0.555	0
2910	101.9196955	70.2651847	0	0.089	25.66	24.58	0.903	0
2977	101.9263590	70.2648739	0	0.169	26.89	25.36	0.843	0
3017	101.9163654	70.2643831	0.03	0.202	24.12	22.99	0.531	0
3055	101.9344532	70.2641751	0.02	0.094	25.38	24.33	0.396	0
3063	101.9567181	70.2641388	0	0.066	26.03	24.65	0.298	0
3119	101.9328566	70.2637724	0	0.170	25.92	24.53	0.332	0
3168	101.9549307	70.2635666	0.03	0.006	26.58	25.09	0.974	0
3180	102.0102334	70.2630827	0.03	0.263	22.86	21.73	0.560	2
3219	101.9164213	70.2628869	0.03	0.321	21.74	20.64	0.674	2
3227	101.8997938	70.2631751	0	0.202	27.65	26.56	0.770	0
3237	102.0244903	70.2630862	0	0.420	26.03	24.96	0.906	0
3238	102.0248281	70.2627736	0	0.223	23.78	22.70	0.911	0
3447	102.0224473	70.2615885	0	0.121	26.31	25.21	0.770	0
3469	101.9395438	70.2613267	0.03	0.027	24.55	23.16	0.526	0
3476	101.9739385	70.2609592	0.03	0.412	23.56	22.38	0.500	1
3615	101.9052910	70.2603564	0.03	0.404	23.51	22.22	0.573	0
3670	101.9650474	70.2602498	0	0.272	27.95	26.27	0.850	0
3703	101.9241487	70.2600396	0	0.205	26.90	25.70	0.445	0
3713	101.9086395	70.2597651	0.03	0.283	22.72	21.43	0.575	0
3754	101.9207704	70.2597414	0	0.454	27.06	25.88	0.607	0
3763	101.9409272	70.2595100	0.03	0.403	24.13	22.92	0.547	1
3913	101.9225470	70.2586673	0	0.016	26.75	25.44	0.311	0
3926	101.9520617	70.2584681	0.03	0.329	24.57	23.14	0.544	0
3965	101.9842702	70.2587025	0.02	0.044	25.92	24.66	0.475	0
3974	101.9299935	70.2583334	0	0.169	26.31	24.91	0.902	0
3989	101.9545591	70.2580667	0	0.442	23.59	22.15	0.793	0
4056	102.0064159	70.2576870	0	0.153	26.33	25.26	0.891	0
4059	101.9857884	70.2575165	0	0.199	26.44	25.33	0.661	0
4067	101.9909976	70.2573765	0.03	0.147	22.70	21.41	0.609	1
4096	101.9223089	70.2573885	0.03	0.133	24.79	23.67	0.441	0
4125	101.9139091	70.2567302	0.03	0.179	22.14	20.83	0.667	2
4181	102.0027488	70.2574671	0	0.111	24.24	22.97	0.538	2
4196	101.9526796	70.2566161	0	0.243	26.12	24.78	0.350	0
4224	101.9109076	70.2565000	0	0.243	27.62	26.56	0.866	0
4248	101.9628253	70.2562873	0.02	0.212	25.80	24.74	0.832	0
4283	101.9404372	70.2563647	0	0.360	26.63	25.54	0.994	0
4350	101.9487926	70.2498878	0.03	0.380	21.15	19.93	0.761	0
4358	102.0611731	70.2530928	0.01	0.421	25.97	24.86	0.680	0
4406	102.0429265	70.2526957	0	0.209	26.31	24.99	0.630	0
4410	102.0450773	70.2527581	0.01	0.041	25.60	24.15	0.543	0
4449	101.9655767	70.2524614	0	0.217	27.65	26.44	0.813	0
4458	101.9703819	70.2520292	0.03	0.159	22.82	21.57	0.579	0
4461	101.9935754	70.2518022	0.03	0.124	22.61	21.44	0.541	0
4493	101.9596730	70.2521515	0.03	0.092	25.25	24.15	0.448	0
4527	101.9657725	70.2513467	0.03	0.228	25.56	23.85	0.413	0

4533	101.9268733	70.2515662	0.03	0.389	23.12	21.83	0.544	1
4553	101.9562709	70.2542379	0	0.204	24.44	23.09	0.334	2
4594	102.0164431	70.2511529	0.03	0.066	24.06	22.63	0.567	1
4643	101.9432573	70.2540661	0.03	0.127	24.51	23.40	0.502	0
4647	101.9347187	70.2510389	0.02	0.070	25.85	24.50	0.444	0
4658	101.9406535	70.2548828	0	0.313	27.47	25.68	0.909	0
4679	101.9060171	70.2541500	0	0.074	25.83	24.76	0.465	0
4732	101.9646274	70.2514933	0.03	0.347	22.78	21.05	0.760	0
4745	101.9906712	70.2502270	0.03	0.362	22.98	21.71	0.563	2
4868	102.0061252	70.2496634	0.03	0.185	24.07	22.89	0.431	0
4870	102.0041831	70.2489710	0.03	0.207	23.19	21.52	0.761	1
4888	101.8784130	70.2541005	0.01	0.132	26.74	25.53	0.478	0
4904	101.9289290	70.2495301	0.03	0.240	22.21	21.05	0.536	2
4922	101.9158224	70.2494814	0.03	0.128	24.39	23.22	0.533	2
4991	101.9016153	70.2485927	0	0.301	23.92	22.85	0.457	1
5008	101.9138081	70.2489334	0	0.146	24.73	23.39	0.530	1
5013	102.0681345	70.2490683	0	0.294	25.07	23.94	0.755	0
5053	102.0604218	70.2486669	0.03	0.200	23.16	21.91	0.520	0
5084	101.9221568	70.2483229	0.03	0.219	23.33	22.11	0.533	0
5128	101.9587220	70.2539715	0	0.109	27.28	25.83	0.912	0
5143	101.9342072	70.2480882	0.02	0.103	25.70	24.65	0.656	0
5202	101.9130810	70.2459320	0.03	0.156	22.71	21.43	0.590	0
5228	102.0692522	70.2472510	0.13	0.179	27.43	25.63	0.628	0
5244	101.9968624	70.2465598	0.03	0.121	21.58	20.33	0.528	0
5269	101.9217459	70.2461520	0.03	0.190	23.09	21.95	0.544	1
5284	102.0144900	70.2541618	0.13	0.286	27.42	26.31	0.530	0
5285	101.9454496	70.2466836	0.03	0.196	25.19	24.07	0.464	0
5289	101.9122748	70.2552775	0.03	0.180	22.74	21.46	0.578	0
5329	101.9266847	70.2463950	0.03	0.087	25.11	24.00	0.446	0
5337	101.9328550	70.2460364	0.03	0.351	22.92	21.67	0.585	2
5355	101.9529756	70.2460905	0	0.077	26.06	24.94	0.364	0
5375	102.0521312	70.2458366	0	0.238	26.00	24.47	0.964	0
5381	101.9908989	70.2457715	0.03	0.204	26.01	24.81	0.491	0
5382	101.9914535	70.2455719	0.03	0.156	22.62	21.44	0.573	2
5384	102.0652452	70.2460382	0.66	0.204	27.91	26.67	0.902	0
5401	102.0732783	70.2457859	0.03	0.200	24.09	23.03	0.905	0
5424	101.9886946	70.2474231	0.03	0.421	21.84	20.68	0.556	0
5458	101.9298214	70.2454269	0.03	0.079	25.58	24.55	0.523	0
5473	101.9351493	70.2451254	0.03	0.113	24.04	22.81	0.525	0
5481	101.9579949	70.2452626	0	0.128	27.54	26.12	0.909	0
5518	101.9996644	70.2446957	0.03	0.255	22.77	21.43	0.565	1
5539	101.9691480	70.2445361	0.04	0.098	23.05	21.94	0.530	0
5562	101.9792106	70.2444477	0.03	0.167	24.06	22.90	0.437	2
5564	101.9809727	70.2440661	0.03	0.402	23.01	21.60	0.935	2
5577	101.9610062	70.2483299	0.03	0.473	20.07	18.54	0.698	0
5578	102.0062406	70.2537108	0	0.258	27.70	26.23	0.314	0
5579	101.9422237	70.2446404	0	0.090	27.53	26.38	0.750	0
5582	101.9059063	70.2443942	0.03	0.129	24.91	23.86	0.450	0
5585	101.9533249	70.2449951	0.03	0.419	22.75	21.36	0.602	0
5589	102.0079861	70.2535287	0.03	0.125	24.53	23.45	0.495	1
5592	101.9234366	70.2444052	0.03	0.179	24.07	22.87	0.569	0
5593	101.9266571	70.2444239	0.02	0.269	26.16	24.67	0.813	0
5603	102.0730329	70.2444621	0	0.455	27.00	25.75	0.636	0

5624	101.9667116	70.2442165	0	0.187	26.54	25.15	0.431	0
5633	102.0621530	70.2440832	0	0.348	24.80	23.76	0.402	0
5655	102.0526069	70.2434220	0.03	0.065	22.26	20.80	0.552	2
5656	102.0544850	70.2425625	0.03	0.491	21.43	20.03	0.537	1
5665	102.0723543	70.2438649	0	0.292	26.87	25.80	0.802	0
5674	101.9353527	70.2443297	0	0.262	26.95	25.80	0.282	0
5678	101.9782605	70.2432806	0.03	0.195	22.06	20.86	0.681	1
5679	101.9764534	70.2428455	0	0.152	25.37	24.19	0.443	0
5727	101.9249729	70.2439637	0.03	0.133	25.41	24.31	0.361	0
5784	101.9110104	70.2425212	0.03	0.361	23.67	22.45	0.561	0
5805	101.9236021	70.2427005	0	0.404	26.23	25.16	0.754	0
5840	101.9754647	70.2424536	0	0.156	27.60	26.37	0.328	0
5856	101.9173847	70.2423507	0	0.245	27.43	26.01	0.772	0
5902	101.9742305	70.2553045	0.03	0.161	23.58	22.38	0.560	0
5922	101.9551869	70.2390724	0.03	0.384	23.83	22.58	0.581	0
5928	101.9096189	70.2389604	0.03	0.300	23.11	21.91	0.560	0
5969	101.9503520	70.2387962	0	0.403	25.14	23.98	0.765	0
6000	102.0066910	70.2385894	0	0.187	26.22	24.75	0.774	0
6013	101.9856776	70.2410732	0	0.253	27.26	26.13	0.869	0
6017	101.9855717	70.2406974	0.03	0.327	23.48	22.14	0.548	0
6060	101.8986698	70.2381268	0	0.314	26.77	25.67	0.436	0
6074	101.9189943	70.2533912	0	0.413	27.54	26.30	0.869	0
6083	101.9748496	70.2378318	0	0.483	25.77	24.24	0.783	0
6125	101.9789574	70.2375816	0.03	0.262	24.13	23.01	0.744	0
6138	101.9765385	70.2532163	0.03	0.045	24.28	23.21	0.501	0
6145	101.9474438	70.2392872	0.03	0.248	22.07	20.93	0.766	0
6201	101.9775294	70.2528747	0	0.035	27.07	25.55	0.768	0
6211	101.9332956	70.2349029	0.01	0.362	22.98	21.75	0.718	2
6212	101.9315565	70.2344599	0.03	0.393	23.23	22.12	0.856	1
6214	101.9774820	70.2525850	0.03	0.018	23.59	22.49	0.536	0
6380	101.9514922	70.2337420	0	0.086	26.56	25.41	0.683	0
6583	101.9440952	70.2370982	0.03	0.209	24.65	23.40	0.573	1
6797	101.9263323	70.2365510	0	0.444	24.04	22.69	0.889	2
6841	101.9902917	70.2402592	0.01	0.117	26.58	24.85	0.549	0
6905	102.0602983	70.2400720	0.01	0.406	23.66	22.34	0.535	0
6911	101.9634755	70.2407486	0.03	0.412	22.37	21.25	0.518	2
6938	102.0632979	70.2400467	0	0.389	28.37	26.63	0.917	0
6990	101.9650200	70.2409194	0.03	0.249	22.88	21.50	0.592	0
7008	101.9556820	70.2355038	0.03	0.365	25.26	24.01	0.439	0
7108	102.0522388	70.2418610	0	0.259	26.87	25.55	0.720	0
7187	101.9285574	70.2399635	0.03	0.182	24.59	23.53	0.454	0
7335	101.9941716	70.2364067	0.02	0.115	26.15	24.81	0.498	0
8576	102.0496427	70.2411521	0.03	0.344	24.64	23.26	0.639	1
8700	101.9665096	70.2174636	0.02	0.283	24.99	23.71	0.716	0
8704	101.9539983	70.2173184	0	0.372	25.16	23.96	0.632	1

Capitolo 3

Classificazione morfologica del campione

In questo capitolo si descrivono i dettagli della classificazione morfologica delle galassie del campione. Nella Sezione 3.1 si riporta il processo tramite il quale si è arrivati alla raccolta finale di immagini dei singoli oggetti, mentre nella Sezione 3.2 si riporta il metodo adottato per eseguire la classificazione morfologica e si discutono i risultati ottenuti.

3.1 Preparazione delle immagini

Il JWST², lanciato il 25 dicembre 2021, è l'osservatorio spaziale più complesso finora costruito. Il suo specchio primario è composto di 18 specchi esagonali, per un diametro totale di 6.5 m, corrispondente ad un'area 6 volte maggiore rispetto a HST. JWST è dotato di 4 strumenti a bordo, che permettono di ottenere immagini e spettri nel rango infrarosso con una risoluzione senza precedenti. Essi sono NIRCam, *Mid-Infrared Instrument* (MIRI), *Near-Infrared Spectrograph* (NIRSpec) e *Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph* (NIRISS).

Lo strumento NIRCam dal quale sono state ricavate le immagini dell'ammasso MACS0647 è in grado di osservare in un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ (riferita al filtro F090W) e $\lambda = 5 \mu\text{m}$ (riferita al filtro F444W). Esso è composto da due moduli che osservano campi adiacenti ed è dotato di 29 filtri. Il suo campo di vista osserva due aree di dimensione $2.2 \times 2.2 \text{ arcmin}^2$ separate da uno spazio di 44 arcsec, per un'area totale di 9.7 arcmin^2 .

L'ammasso MACS0647 è stato osservato all'interno del programma *General Observers* (GO) Id.1443¹ (PI: D. Coe). Le immagini sono state ottenute a novembre 2022 e gennaio 2023 con un'esposizione di 2104.408 s e sono pubblicamente disponibili nell'archivio *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST)². L'immagine dell'ammasso utilizzata per l'ispezione visuale consiste in un mosaico di immagini nel filtro F200W che ha lunghezza d'onda di riferimento $\lambda_{\text{ref}} = 1.990 \mu\text{m}$. Il mosaico è stato ottenuto utilizzando una versione modificata della *pipeline* di calibrazione ufficiale (versione 1.12.3, con calibrazioni referenti a pmap 1145), che utilizza procedure *ad hoc* per il trattamento del cielo e la rimozione di artefatti prima di combinare le singole immagini (Costantin, comunicazione privata; si veda ad esempio Pérez-González et al. (2024)). L'immagine ha una risoluzione di $30 \text{ mas pixel}^{-1}$ ed è calibrata in MJy sr^{-1} .

A partire dalla lista di oggetti selezionati descritta nel Capitolo 2, utilizzando la classe `cutout2D` dalla libreria di PYTHON `ASTROPY`³ si sono ricavate delle porzioni di immagine nel formato `.fits` centrate sui singoli oggetti e di dimensione $4 \times 4 \text{ arcsec}^2$, corrispondenti a $133 \times 133 \text{ pixel}$. Queste porzioni sono successivamente state convertite in immagini in formato `.png`. A queste è stata applicata una scala di colore logaritmica che permette di evidenziare meglio le regioni interne delle galassie osservate.

L'immagine dell'ammasso utilizzata per estrarre le immagini delle galassie comprende un'area totale

¹<https://www.stsci.edu/jwst/phase2-public/1433.pdf>

²<https://mast.stsci.edu/search/ui/#/>

³<https://docs.astropy.org/en/stable/>

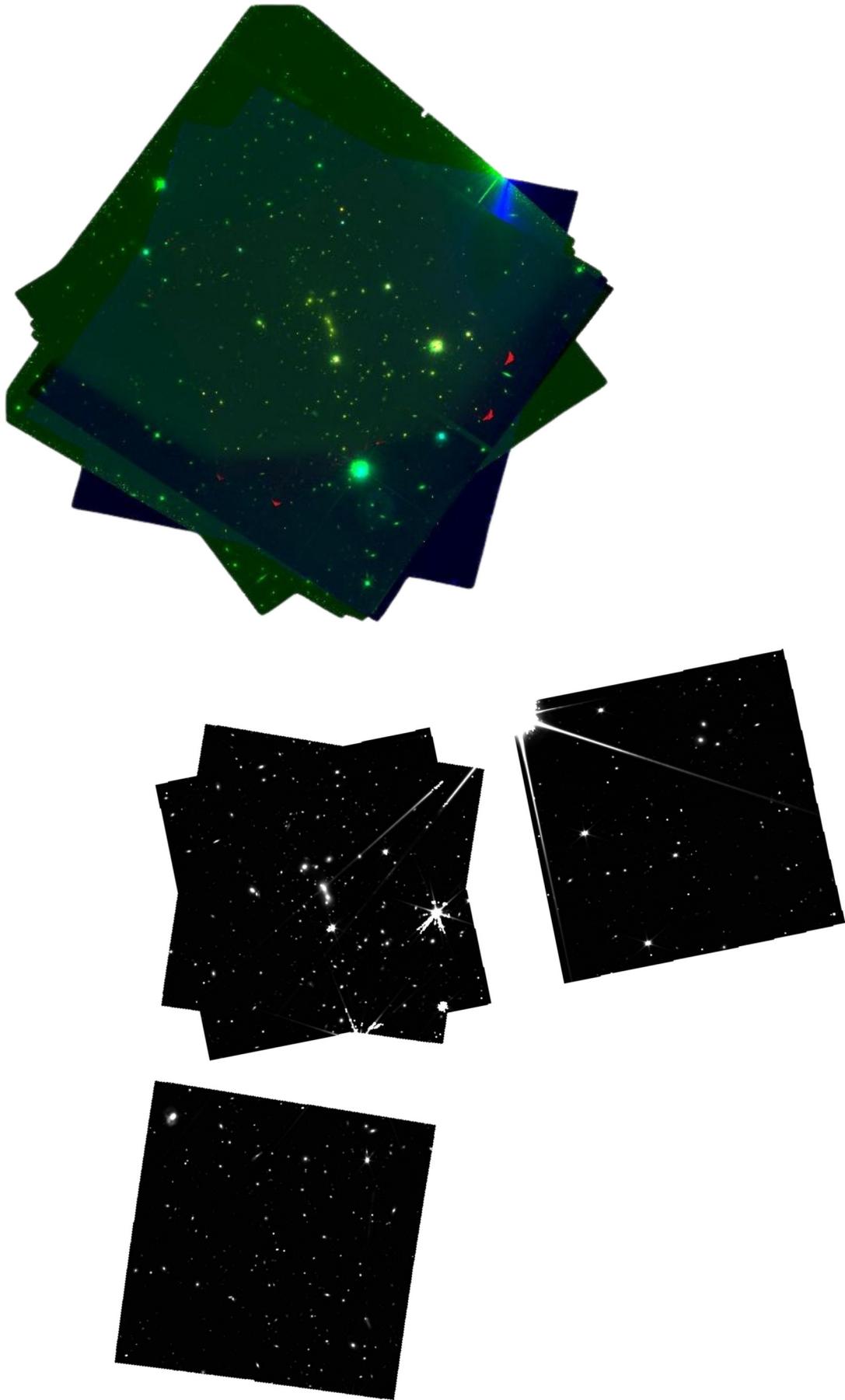


FIGURA 3.1: Immagine a falsi colori di MACSJ0647 con HST (in alto) che copre un campo di vista di area totale 4.08 arcmin^2 (Postman et al. 2012) a confronto con l'immagine dello stesso ammasso nel filtro F200W di JWST (in basso). Le due immagini hanno la stessa scala e orientazione.

minore rispetto a quella riferita al catalogo CLASH ed è composta da un mosaico di immagini singole e distanziate. Dunque per alcuni elementi della selezione di galassie dal catalogo CLASH le regioni del campo in cui queste si trovano sono parzialmente o completamente escluse dall'immagine e non permettono di vedere l'oggetto selezionato (Figura 3.1). Inoltre, alcuni elementi della lista consistevano in sorgenti non risolte non identificate precedentemente. Come anticipato nella Sezione 2.2, questi oggetti spuri non idonei per il processo di classificazione sono stati identificati visualmente o tramite elaborazione con Python e sono stati esclusi dalla lista finale di galassie da classificare. Il campione complessivo di 229 elementi è stato ristretto in questo modo a 147 elementi.

3.2 Classificazione morfologica e discussione dei risultati

Dal campione di partenza estratto dal catalogo CLASH si è ottenuto un campione finale di 147 galassie. Si è potuto dunque procedere alla classificazione delle immagini. Questa è stata eseguita ispezionando visivamente le immagini dei singoli oggetti e assegnando a ciascuna un parametro *bar*, che in base alla loro morfologia può assumere i valori:

- 2: barra presente e ben riconoscibile;
- 1: barra incerta;
- 0: barra assente.

Nella Figura 3.2 si riportano le galassie classificate come barrate ($bar = 2$). La classificazione completa è consultabile nella Tabella 2.2.

Su un totale di 147 galassie, sono state osservate 17 galassie barrate, corrispondenti a un valore di $f_{bar} = 11.6\%$. Sono state osservate, inoltre, 18 galassie con barra incerta. La frazione totale di galassie con barre certe e incerte è $f_{bar} = 23.8\%$.

In confronto, nell'ammasso SMACS0723 a $z = 0.39$ (Méndez-Abreu et al. 2023) è stata trovata una frazione $f_{bar} = 10.6\%$ corrispondente a 20 galassie barrate su un campione di 188 galassie. I valori di f_{bar} nei due ammassi sono consistenti e non si registra una diminuzione di f_{bar} all'aumentare di z .

Questo rappresenta il primo lavoro di classificazione morfologica delle galassie barrate eseguito per l'ammasso MACS0647 a $z = 0.59$. Nell'ammasso SMACS0723 a *redshift* $z = 0.39$ e negli ammassi locali della Chioma e della Vergine è stata trovata una forte correlazione tra la massa e luminosità della galassia ospite e f_{bar} (Méndez-Abreu et al. 2023, 2012). Anche per MACS0647 sarà necessario studiare queste relazioni per aumentare il campione di dati su cui si studia l'andamento di f_{bar} in funzione della massa e per poter verificare la validità della relazione a *redshift* maggiori. In questo modo sarà possibile validare con maggiore sicurezza l'ipotesi secondo la quale l'ambiente influenza la formazione e la vita delle barre in modo dipendente dalla massa della galassia ospite.

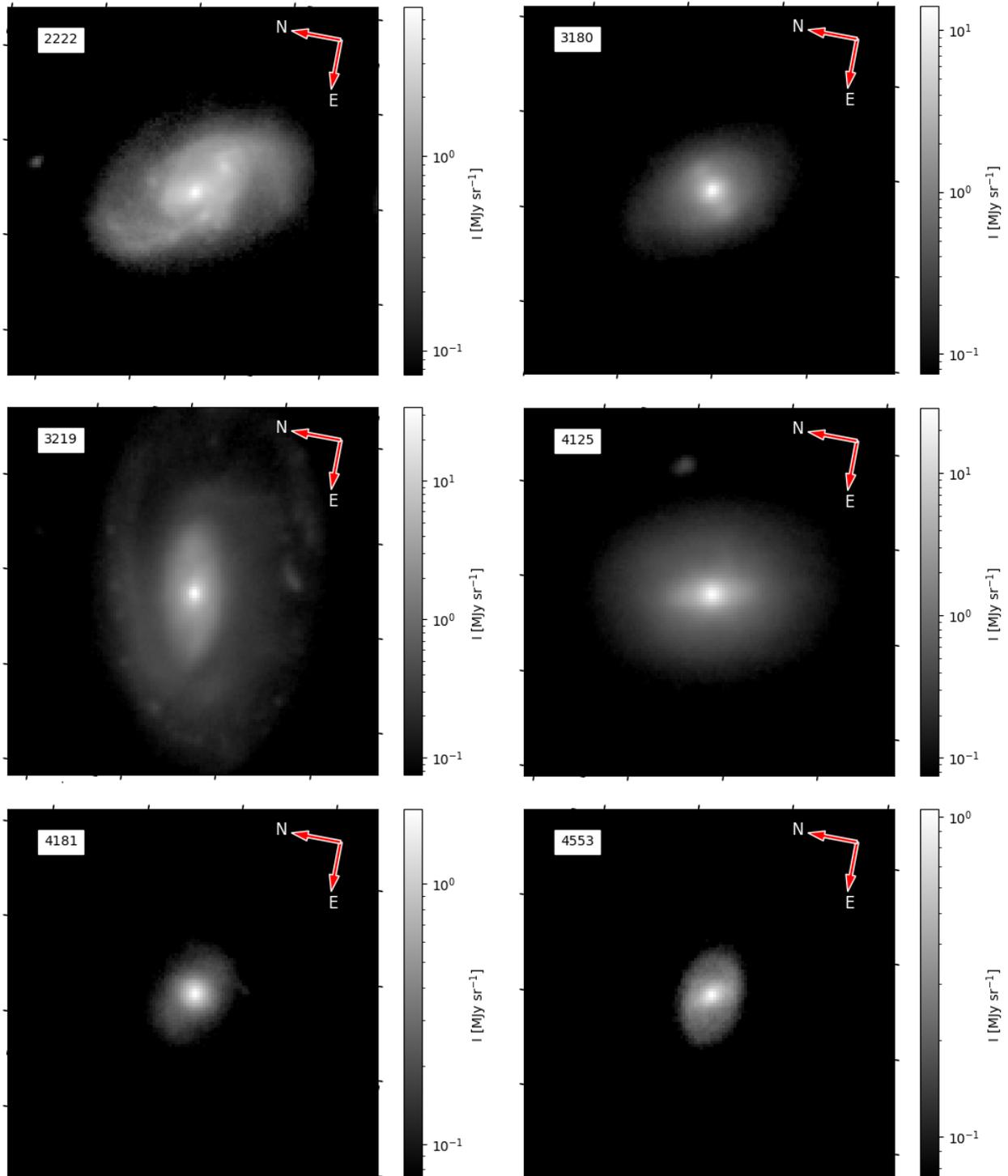


FIGURA 3.2: Galassie classificate barrate ($bar = 2$) appartenenti all'ammasso MACSJ0647. Le immagini ottenute con NIRC*am*/F200W hanno un campo di vista di 4×4 arcsec² e per ciascuna di esse è specificata l'orientazione.

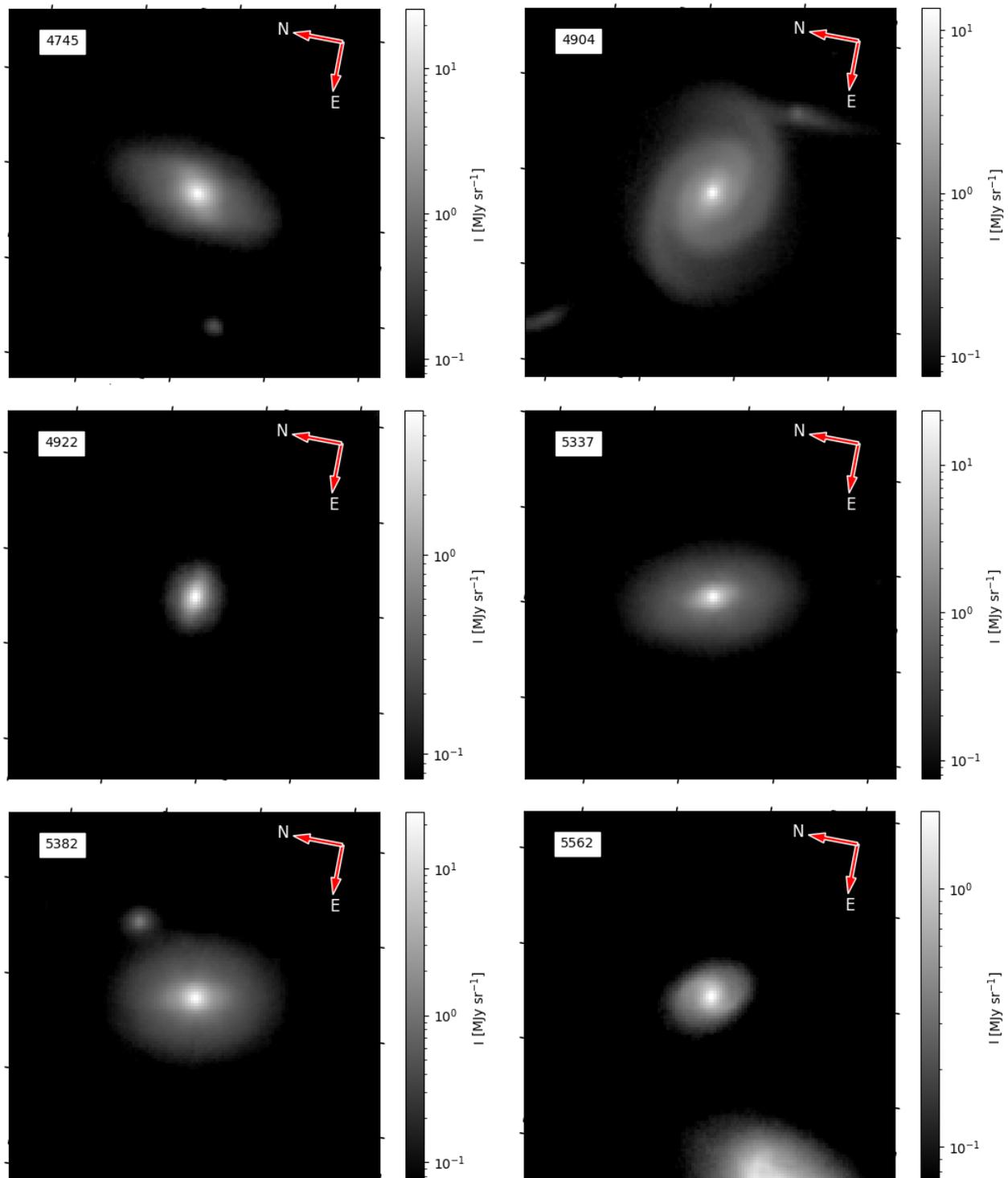


FIGURA 3.2: Continua.

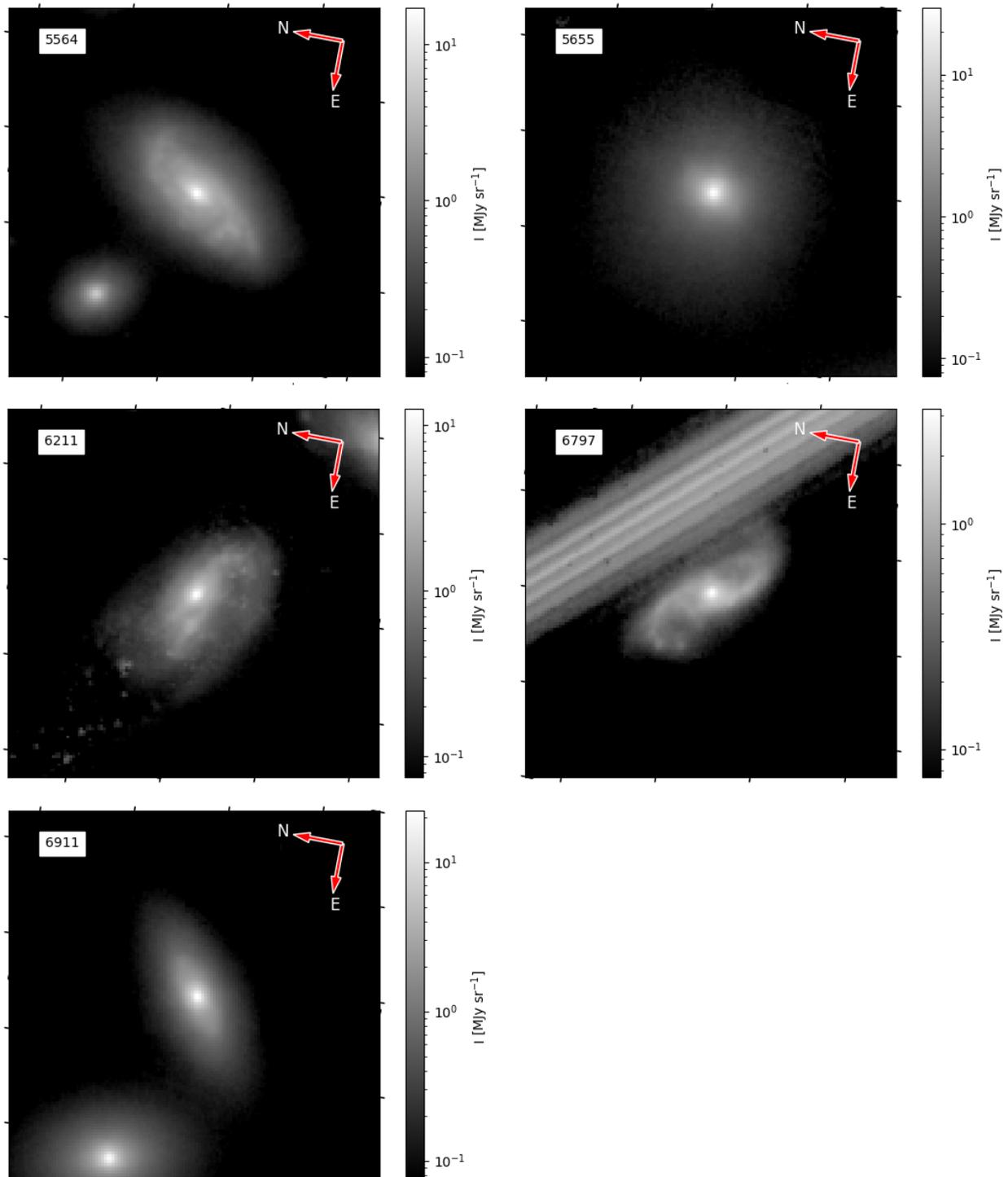


FIGURA 3.2: Continua.

Bibliografia

- Aguerri, J., Méndez-Abreu, J., & Corsini, E. 2009, *A&A*, 495, 491
- Aguerri, J., Méndez-Abreu, J., Falcón-Barroso, J., et al. 2015, *A&A*, 576, A102
- Athanassoula, E. 1992, *MNRAS*, 259, 345
- Athanassoula, E. 2003, *MNRAS*, 341, 1179
- Athanassoula, E., Machado, R. E., & Rodionov, S. 2013, *MNRAS*, 429, 1949
- Athanassoula, E. & Misiriotis, A. 2002, *MNRAS*, 330, 35
- Benítez, N. 2000, *ApJ*, 536, 571
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Boselli, A. & Gavazzi, G. 2006, *PASP*, 118, 517
- Bournaud, F. & Combes, F. 2002, *A&A*, 392, 83
- Bournaud, F., Combes, F., & Semelin, B. 2005, *MNRAS*, 364, L18
- Buta, R. & Block, D. 2001, *ApJ*, 550, 243
- Buttitta, C., Corsini, E., Cuomo, V., et al. 2022, *A&A*, 664, L10
- Chabrier, G. 2003, *PASP*, 115, 763
- Chen, C., Arnaud, M., Pointecouteau, E., Pratt, G., & Iqbal, A. 2023, arXiv preprint, arXiv:2311.10397
- Contopoulos, G. 1981, *A&A*, 102, 265
- Corsini, E. 2021, *Barred Galaxies, Lezioni per il dottorato di ricerca in Astronomia (Università di Padova, Padova)*
- Corsini, E. & Debattista, V. 2011, *Mem. Soc. Astron. Ital. Sup.*, 18, 3
- Costantin, L., Pérez-González, P. G., Guo, Y., et al. 2023, *Nature*, 623, 499
- Cuomo, V., Lee, Y. H., Buttitta, C., et al. 2021, *A&A*, 649, A30
- Curtis, H. D. 1918, *Pub. Lick Obs.*, 13, 9
- de Vaucouleurs, G. H., de Vaucouleurs, A., & Shapley, H. 1964, *Reference Catalogue of Bright Galaxies (University of Texas Press, Austin)*
- Debattista, V. P. & Sellwood, J. 1998, *ApJ*, 493, L5
- Durret, F., Tarricq, Y., Márquez, I., Ashkar, H., & Adami, C. 2019, *A&A*, 622, A78
- Ebeling, H., Barrett, E., Donovan, D., et al. 2007, *ApJ*, 661, L33
- Ebeling, H., Edge, A. C., & Henry, J. P. 2001, *ApJ*, 553, 668

- Erwin, P. 2017, MNRAS, 474, 5372
- Erwin, P. & Debattista, V. P. 2013, MNRAS, 431, 3060
- Eskridge, P. B., Frogel, J. A., Pogge, R. W., et al. 2002, ApJS, 143, 73
- Friedli, D. 1999, ASP Conf. Series, 187, 88
- Ghosh, S., Saha, K., Di Matteo, P., & Combes, F. 2021, MNRAS, 502, 3085
- Giordano, L., Tran, K.-V. H., Moore, B., & Saintonge, A. 2011, arXiv e-prints, arXiv:1111.1532
- Guo, Y., Jogee, S., Finkelstein, S. L., et al. 2023, ApJ, 945, L10
- Hubble, E. P. 1926, ApJ, 64, 321
- Jeans, J. H. 1928, Astronomy and Cosmogony (Cambridge University Press, Cambridge, UK)
- Jeong, H., Bureau, M., Yi, S. K., Krajnović, D., & Davies, R. L. 2007, MNRAS, 376, 1021
- Jogee, S., Barazza, F. D., Rix, H.-W., et al. 2004, ApJ, 615, L105
- Kim, T., Athanassoula, E., Sheth, K., et al. 2021, ApJ, 922, 196
- Kroupa, P. 2001, MNRAS, 322, 231
- Kumar, A., Das, M., & Kataria, S. K. 2022, MNRAS, 509, 1262
- Lee, G.-H., Park, C., Lee, M. G., & Choi, Y.-Y. 2012, ApJ, 745, 125
- Marinova, I. & Jogee, S. 2007, ApJ, 659, 1176
- Marinova, I., Jogee, S., Weinzirl, T., et al. 2012, ApJ, 746, 136
- Martinez-Valpuesta, I., Aguerri, J. A. L., González-García, A. C., Dalla Vecchia, C., & Stringer, M. 2017, MNRAS, 464, 1502
- Martinez-Valpuesta, I., Shlosman, I., & Heller, C. 2006, ApJ, 637, 214
- Méndez-Abreu, J., Costantin, L., Aguerri, J., de Lorenzo-Cáceres, A., & Corsini, E. 2018, MNRAS, 479, 4172
- Méndez-Abreu, J., Costantin, L., & Kruk, S. 2023, A&A, 678, A54
- Méndez-Abreu, J., Sánchez-Janssen, R., & Aguerri, J. 2010, ApJ, 711, L61
- Méndez-Abreu, J., Sánchez-Janssen, R., Aguerri, J., Corsini, E., & Zarattini, S. 2012, ApJ, 761, L6
- Morgan, W. 1958, PASP, 70, 364
- Noguchi, M. 1987, MNRAS, 228, 635
- Ostriker, J. P. & Peebles, P. J. 1973, ApJ, 186, 467
- Parsons, W. 1861, Phil. Trans. R. Soc. London, CLI, 681
- Pérez-González, P. G., Barro, G., Rieke, G. H., et al. 2024, arXiv e-prints, arXiv:2401.08782
- Postman, M., Coe, D., Benitez, N., et al. 2012, ApJS, 199, 25
- Puerari, I. & Dottori, H. 1997, ApJ, 476, L73
- Reynolds, J. 1920, Observatory, 43, 377
- Sarkar, S., Pandey, B., & Bhattacharjee, S. 2021, MNRAS, 501, 994

- Sellwood, J. 2014, *Rev. Mod. Ph.*, 86, 1
- Sellwood, J. A. & Wilkinson, A. 1993, *Rep. Prog. Ph.*, 56, 173
- Shen, J. & Sellwood, J. 2004, *ApJ*, 604, 614
- Sheth, K., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., et al. 2008, *ApJ*, 675, 1141
- Tawfeek, A. A., Sodi, B. C., Fritz, J., et al. 2022, *ApJ*, 940, 1
- Thompson, L. A. 1981, *ApJ*, 244, L43
- Tremaine, S. & Weinberg, M. D. 1984, *ApJ*, 282, L5
- van den Bergh, S. 1976, *ApJ*, 206, 883
- Vazdekis, A., Casuso, E., Peletier, R. F., & Beckman, J. E. 1996, *ApJS*, 106, 307
- Vazdekis, A., Koleva, M., Ricciardelli, E., Röck, B., & Falcón-Barroso, J. 2016, *MNRAS*, 463, 3409
- Villa-Vargas, J., Shlosman, I., & Heller, C. 2010, *ApJ*, 719, 1470
- Weinberg, M. D. 1985, *MNRAS*, 213, 451
- Weiner, B. J., Sellwood, J., & Williams, T. 2001, *ApJ*, 546, 931
- Wolf, M. 1908, *Pub. Ap. Inst. König. Heidelberg*, 3
- Zhang, X. & Buta, R. J. 2007, *AJ*, 133, 2584