

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea in Astronomia

TESI DI LAUREA

**Recenti progressi sulla formazione delle galassie all'alba
cosmica rivelati tramite indagini spettroscopiche dal James
Webb Space Telescope**

Candidato:

Michele Catone

Matricola 1217928

Relatore:

Prof.ssa Giulia Rodighiero

Correlatore:

Dott.ssa Laura Bisigello

Alla mia famiglia.

Sommario

A poco più di un anno dall'inizio della missione scientifica del James Webb Space Telescope, l'enorme quantità di dati prodotti ha fornito nuovi vincoli sulle galassie ad alto redshift e sulla loro evoluzione. In questo lavoro è stata effettuata un'analisi spettroscopica di una galassia all'Alba Cosmica al fine di ricavarne i parametri fisici e poter quindi contribuire alla caratterizzazione delle galassie appartenenti a tale epoca cosmica. In particolare, l'obiettivo è quello di determinare la natura di una galassia appartenente alla classe dei Little Red Dots, sorgenti contraddistinte da colori molto rossi e compatte, il cui ruolo nell'Universo primordiale non è ancora chiaro. Dallo studio dei dati che saranno forniti nei prossimi anni della missione scientifica del James Webb Space Telescope, sarà possibile comprendere il contributo di questi oggetti nell'era dell'Alba Cosmica e di come abbiano influenzato la formazione delle galassie attuali.

Dai risultati è emerso che la galassia in esame, identificata come MSAID28876, appartiene alla classe dei Nuclei Galattici Attivi. È stato inoltre riscontrato che tale sorgente è situata al medesimo redshift di altre Galassie Attive confermati da studi spettroscopici [7], tale particolarità potrebbe essere spiegata da una sovra-densità di questa categoria di galassie a $z \sim 7$. Saranno pertanto necessarie successive indagini a tali redshift per la verifica di tale ipotesi e per chiarire gli aspetti legati ai Little Red Dots.

Questo elaborato è suddiviso come segue: in Cap. 1 è riportata la descrizione del James Webb Space Telescope e degli strumenti a bordo, sono inoltre discusse le recenti scoperte in campo cosmologico, che hanno gettato nuove luci sull'evoluzione e formazione galattica e sulla stessa cosmologia. Nel secondo capitolo sono presentati la metodologia di osservazione e selezione dell'oggetto e dell'analisi dello spettro eseguita con l'ausilio di un codice Python. Mentre nel Capitolo 3 sono mostrati i risultati che sono discussi a seguire in Cap. 4.

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Il James Webb Space Telescope	7
1.1.1	Strumenti a bordo	8
1.2	Risultati cosmologici recenti	9
2	Metodologia e analisi dei dati	13
2.1	Individuazione e osservazione delle galassie	13
2.1.1	I "Little Red Dots"	13
2.1.2	Selezione in colore	14
2.2	Analisi dei dati	16
2.2.1	Sottrazione emissione continua	16
2.2.2	Interpolazione gaussiana	16
2.2.3	Calcolo dei parametri	18
3	Risultati	23
4	Conclusioni	25
A	Fisica e struttura dei Nuclei Galattici Attivi	27

Elenco delle figure

1.1	Immagine schematica del James Webb Space Telescope. <i>Crediti: NASA.</i>	7
1.2	Curva dell'estinzione galattica, espressa in funzione della profondità ottica $\tau(\lambda)$. Vi è inoltre riportato anche l'andamento medio della profondità ottica in funzione della lunghezza d'onda fotonica. <i>Crediti: Professor Alberto Franceschini [6].</i>	8
1.3	Schemi ottici di NIRSpec (in alto) e di NIRCам (in basso). <i>Crediti: Space Telescope Science Institute.</i>	9
1.4	Campo profondo dell'ammasso di galassie SMACS0723 osservato dal Telescopio Spaziale James Webb. <i>Crediti: NASA.</i>	10
2.1	Immagine a colori compositi (RGB) dell'ammasso Abell 2744, ottenuta dalla combinazione dei filtri F090W+F115W+F150W in blu, F200W+F277W in verde e F356W+F410M+F444W in rosso. I contorni colorati mostrano la posizione di tre set di dati differenti del JWST usati in questo campo; GLASS (<i>verde</i>), UNCOVER (<i>blu</i>) e DD-2756 (<i>rosso</i>). L'intera immagine comprende una porzione di cielo pari a 12.7x5.9 arcmin. <i>Crediti: Space Telescope Science Institute.</i>	14
2.2	Immagine ottenuta con l'ausilio del software SAOImageDS9 con dettaglio della posizione delle tre sorgenti nel campo di Abell 2744.	15
2.3	Immagini dei tre spettri con le rispettive polinomiali per la rimozione del continuo. . .	17
2.4	Immagine con gli spettri ridotti delle tre sorgenti, sono inoltre indicate, tramite rette verticali tratteggiate, le linee di emissione rivelate. In particolare, sono state associate delle rette viola alle righe della serie di Balmer dell'idrogeno.	18
2.5	Linee di emissione di MSAID28876 analizzate e interpolate con una funzione gaussiana riportata in viola, rosso e blu.	19
2.6	Linee di emissione di A2744-QSO1A analizzate e interpolate con una funzione gaussiana riportata in viola.	20
2.7	Linee di emissione di A2744-QSO1C analizzate e interpolate tramite una funzione gaussiana riportata in viola.	21
3.1	Grafico per la verifica della corretta analisi delle linee di emissione. In ascissa sono riportati i flussi misurati, mentre in ordinata quelli ottenuti da Lukas J. Furtak [7]. . .	24
A.1	Immagine schematica che mostra la sezione di un AGN come descritto secondo il modello unificato. <i>Crediti: Nature.</i>	28

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Il James Webb Space Telescope

Il Telescopio Spaziale James Webb (*James Webb Space Telescope*, JWST) è indubbiamente il protagonista della nuova frontiera della cosmologia osservativa, perché, grazie alla sua alta risoluzione e alla capacità di osservare nelle regioni infrarosse (IR) dello spettro elettromagnetico, permette di studiare le galassie ad alto redshift e scandagliare le regioni più remote dell'universo. Lanciato il 25 dicembre 2021, l'osservatorio è situato nel punto Lagrangiano L2, ciò permette agli strumenti di bordo di operare a temperature molto basse (al di sotto di 50 K [18]) grazie allo scudo termico protettivo. Questo è necessario dal momento che il JWST osserva principalmente nelle lunghezze d'onda infrarosse, pertanto, se la temperatura della strumentazione fosse superiore, l'emissione termica potrebbe costituire un rumore di fondo o coprire il segnale in arrivo.

L'osservatorio è composto da tre elementi:

- l' *Integrated Science Instrument Module* (ISIM): include gli strumenti scientifici a bordo;
- l' *Optical Telescope Element* (OTE): include gli specchi che raccolgono la luce e la forniscono agli strumenti dell'ISIM. Lo specchio primario ha un diametro di circa 6.5 m ed è costituito da 18 specchi esagonali delle dimensioni di 1.4 m;
- lo *Space Element*: comprende il bus navicella che si occupa di fornire le funzioni di supporto per l'osservatorio [18].

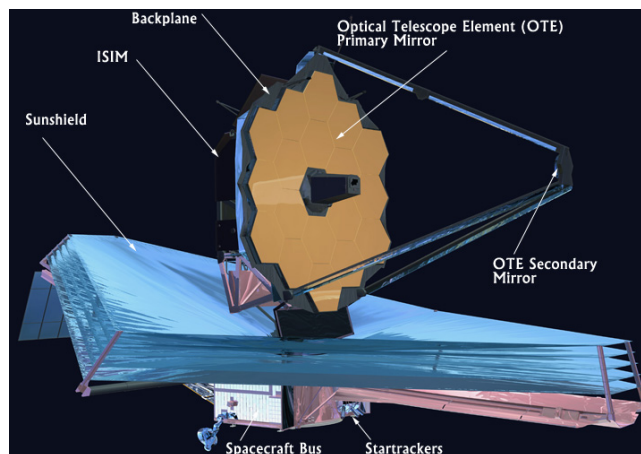


Figura 1.1: Immagine schematica del James Webb Space Telescope. *Crediti: NASA.*

Il grande vantaggio di un telescopio spaziale che osserva nel vicino e nel medio infrarosso (*Near Infrared*, NIR e *Mid Infrared*, MIR) è la possibilità di poter osservare le linee di emissione della serie di Balmer, in particolare la riga $H\alpha$, ad alti redshift, poiché questa fuoriesce dalla banda K intorno a $z = 2.5$ [20], dunque impossibile da rivelare con i telescopi terrestri (*ground-based*). Inoltre, sfruttando lo spostamento verso lunghezze d'onda maggiori causato dal redshift, è possibile rivelare la componente ultravioletta (UV) e ottica delle galassie a grandi distanze proprio nell'infrarosso. Questo aspetto è molto importante perché, in particolare la luce UV, rappresenta la presenza di

stelle giovani e dunque di formazione stellare in atto. In generale, i fotoni a queste lunghezze d'onda vengono assorbiti dalle polveri diffuse nel mezzo interstellare (*Interstellar Medium*, ISM) della galassia che, riscaldandosi riemettono nel lontano infrarosso [2] (*Far Infrared*, FIR). Questo assorbimento è descritto da una legge nota come "Legge di estinzione", riportata in Fig. 1.2, che mostra come questo sia più efficace alle lunghezze d'onda minori, di conseguenza la luce infrarossa sarà meno assorbita dalle polveri, potendole attraversare, ciò permette di osservare le stelle nascoste oltre le coltri di nubi che compongono le galassie.

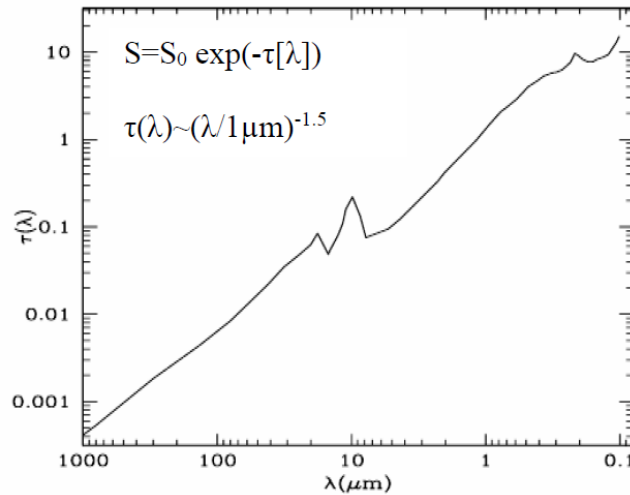


Figura 1.2: Curva dell'estinzione galattica, espressa in funzione della profondità ottica $\tau(\lambda)$. Vi è inoltre riportato anche l'andamento medio della profondità ottica in funzione della lunghezza d'onda fotonica. *Crediti: Professor Alberto Franceschini [6].*

Questa serie di vantaggi rende il James Webb il telescopio ideale per lo studio e la caratterizzazione delle galassie ad alto redshift. Infatti, la metallicità nelle galassie, ad esempio, è misurata tramite gli stimatori dei rapporti tra le linee di emissione [4]. Un altro parametro importante è il tasso di formazione stellare (*Star Formation Rate*, SFR), il quale indica il tasso con cui sono formate nuove stelle nel tempo ed è espresso in $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, tale parametro è stimato a partire dall'intensità della riga $H\alpha$ o dalle luminosità UV o ottica. Tuttavia, come spiegato precedentemente, a queste lunghezze d'onda, l'assorbimento da parte delle polveri è molto elevato, pertanto la luminosità bolometrica nell'IR è considerata un miglior stimatore del tasso di formazione stellare [6].

1.1.1 Strumenti a bordo

L'ISIM comprende i seguenti strumenti:

- Near Infrared Spectrograph (NIRSpec);
- Near-Infrared Camera (NIRCam);
- Mid-Infrared Instrument (MIRI);
- Fine Guidance Sensor/Near InfraRed Imager and Slitless Spectrograph (FGS/NIRISS) [18].

Si riporta di seguito una descrizione più dettagliata di NIRSpec e NIRCam, strumenti usati durante le osservazioni dell'indagine da cui sono stati ricavati i dati. Degli schemi ottici di entrambi gli strumenti sono riportati in Fig. 1.3.

NIRSpec È il primo spettrografo nello spazio capace di eseguire spettroscopia multi-oggetto, cioè di poter estrapolare lo spettro di più oggetti contemporaneamente. Ciò è dovuto al fatto che le galassie che il JWST ha come obiettivo sono molto deboli, dunque è necessaria una lunga esposizione per raccogliere abbastanza luce per formare uno spettro. Affinché NIRSpec possa ottenere lo spettro di cento oggetti contemporaneamente è stato dotato di un sistema di micro-otturatori (*micro-shutter array*, MSA) che possono essere controllati individualmente permettendo di essere aperti o chiusi per visualizzare o bloccare una parte del cielo [17]. Come suggerisce il nome, NIRSpec opera nel vicino

infrarosso, più precisamente da un intervallo che va dai $0.6\ \mu\text{m}$ ai $5\ \mu\text{m}$, con tre risoluzioni spettrali: un prisma a bassa dispersione ($R \approx 30 - 300$) che comprende l'intero intervallo di lunghezza d'onda con un'unica esposizione, e due reticoli di diffrazione (*grating*) a media e alta risoluzione ($R \approx 1000$ e $R \approx 2700$) [3]. Un vantaggio di NIRSpec è la possibilità di studiare galassie ad alto redshift con risoluzione inferiore all'ordine del kpc offrendo un miglioramento rispetto ai precedenti studi eseguiti con telescopi ground-based [2].

NIRCam È la fotocamera principale per operazioni di *imaging* a bordo del James Webb Space Telescope, che copre un intervallo in lunghezza d'onda che va dai $0.6\ \mu\text{m}$ ai $5\ \mu\text{m}$. NIRCam è in grado di rivelare la luce proveniente dalle prime stelle e dalle galassie primordiali nel loro processo di formazione, da stelle in galassie vicine, da stelle giovani che appartengono alla Via Lattea e da oggetti della Kuiper Belt. A bordo dello strumento è anche presente un coronografo, in grado di bloccare la luce di stelle vicine in modo da poter osservare eventuali pianeti in orbita attorno a esse [16]. Lo strumento è composto da due moduli con ottiche e rivelatori pressoché identici, ognuno dei quali osserva un'area di $2.2' \times 2.2'$ e separati da una lacuna di $\sim 44''$. In totale i due moduli coprono un'area di $9.7\ \text{arcmin}^2$, l'intero campo di vista può essere osservato sia a brevi ($0.6 - 2.3\ \mu\text{m}$) che a lunghe ($2.4 - 5.0\ \mu\text{m}$) lunghezze d'onda tramite l'utilizzo di dicroici [11]. Entrambi i moduli sono dotati di una serie di 29 filtri che possono essere utilizzati in combinazione con dei grismi o con il coronografo [12].

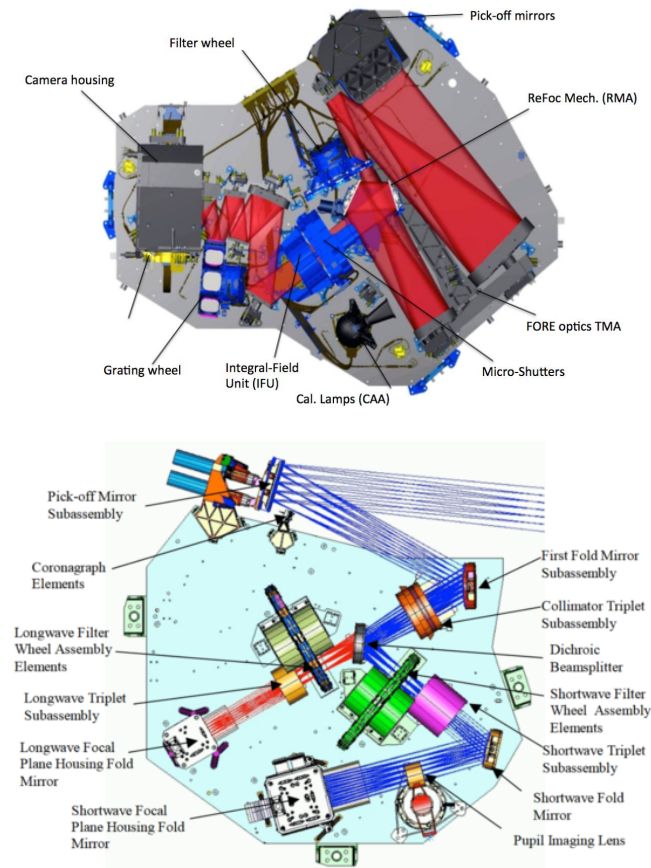


Figura 1.3: Schemi ottici di NIRSpec (in alto) e di NIRCam (in basso). *Crediti: Space Telescope Science Institute.*

1.2 Risultati cosmologici recenti

Come già discusso in precedenza, il Telescopio Spaziale James Webb permette di osservare galassie a redshift molto alto. Prima dell'avvento di questo telescopio, osservare galassie a oltre $z \sim 6$ era molto arduo [4], adesso invece sono state individuate galassie oltre questo limite, con la possibilità



Figura 1.4: Campo profondo dell'ammasso di galassie SMACS0723 osservato dal Telescopio Spaziale James Webb. *Crediti: NASA.*

di rintracciare le righe di emissione $H\alpha$ e $H\beta$ da $6.5 < z < 9.3$ grazie alla spettroscopia nella banda IR [19][1]. Inoltre, sono state osservate linee di emissione *optical rest-frame* emesse da galassie ad alto redshift che permettono di ricavare parametri fisici come il tasso di formazione stellare e la metallicità del mezzo interstellare.

Degli strumenti molto importanti per lo studio delle galassie ad alto redshift e la loro evoluzione sono le relazioni di scala, *Scaling relations* in inglese. Le più importanti sono la Relazione Massa-Metallicità (*Mass-Metallicity Relation*, MZR) e la Relazione Fondamentale di Metallicità (*Fundamental Metallicity Relation*, FMR). La prima correla la massa stellare e la metallicità, sia della frazione gassosa sia stellare. In particolare, per quanto riguarda le galassie ad alto redshift, dalle osservazioni eseguite da vari gruppi è stato riscontrato che la MZR della fase gassosa della galassia evolve in modo monotono con il redshift, con la metallicità che decresce a massa fissata [14]. Questo andamento è in accordo con la teoria evolutiva delle stelle, infatti a tempi cosmici più vicini al Big Bang ci si aspetta una minore metallicità poiché una minore quantità di stelle ha arricchito l'ISM tramite perdite di massa o eventi di supernovae. La seconda relazione, invece, esprime come sono legate tra loro la massa stellare, la metallicità del gas e la SFR, la quale può essere descritta come una superficie in un grafico 3D ($\mathcal{M}_* - Z - SFR$) [4]. È stata osservata un'anticorrelazione tra la metallicità e la massa del gas atomico, ma questa correlazione si è rivelata più stretta rispetto a quella con la $sSFR$ ¹ (*Specific Star Formation Rate*) [14].

Dalle analisi delle survey effettuate con il James Webb Space Telescope è stato riscontrato un tasso di formazione stellare molto alto e una metallicità molto più bassa di quanto atteso data la massa stellare \mathcal{M}_* e la SFR della galassia [5], con misure che si attestano attorno a valori subsolari [19]. Sono state inoltre rilevate delle deviazioni dalla FMR come descritta per galassie locali, pertanto non più invariante per redshift. In particolare le galassie a $z > 6$ sono molto carenti di metalli se comparate a galassie locali con stessa \mathcal{M}_* e SFR, ciò suggerisce che i metalli potrebbero essere rimossi più efficacemente da meccanismi quali deflussi guidati da supernove oppure che il gas originario sia molto più diluito, oltre a ciò, i dati indicano un'anticorrelazione tra SFR e metallicità [5]. Altre indagini, tra cui la *Cosmic Evolution Early Release Survey* (CEERS), mostrano correlazioni con il redshift tra il rapporto $[OIII]/H\beta$ e tra la SFR misurata tramite la riga $H\alpha$, rivelando un'evoluzione delle linee di emissione con z . Anche in questo caso, i dati tendono a indicare che le galassie a $z > 5$ sono caratterizzate da maggiori SFR e minori masse stellari e di conseguenza maggiori $sSFR$, che possono essere spiegate da un'alta ionizzazione e da una bassa metallicità [1].

¹Il tasso di formazione stellare specifico è definito come $sSFR \equiv \frac{SFR}{\mathcal{M}_*}$, cioè la misura della SFR per unità di massa. L'inverso della $sSFR$ ha le dimensioni di un tempo e pertanto è indicato con τ_{ist} , il quale stabilisce il tempo scala della formazione delle stelle in quell'istante, può anche essere definito come il tempo richiesto da una galassia per raddoppiare \mathcal{M}_* mantenendo la stessa SFR [4][6].

Capitolo 2

Metodologia e analisi dei dati

2.1 Individuazione e osservazione delle galassie

2.1.1 I "Little Red Dots"

L'avvento del James Webb Space Telescope, dotato di grande risoluzione e sensibilità nel dominio infrarosso, ha visto emergere due nuove tipologie di popolazioni galattiche, che si aggiungono alle galassie oscure del Telescopio Spaziale Hubble (*HST-dark galaxies* in inglese) nello studio di come queste sorgenti evolvono nel tempo. La prima di queste nuove categorie di oggetti è una popolazione di galassie molto massive e quiescenti ad alti redshift, confermate spettroscopicamente fino a $z = 4.658$. La seconda popolazione consiste in sorgenti massicce ($>10^{10} M_{\odot}$) a $z > 7$, a meno di 700 Myr dopo il Big Bang. Con l'attuale teoria della formazione a struttura gerarchica prevista dal modello Λ CDM è complesso dimostrare come tali galassie possano essersi formate. Queste sorgenti sono state denominate "Little Red Dots" (LRDs) e sono caratterizzate da una componente ultravioletta debole ma con quella ottica rest-frame ben visibile con la parte rossa del continuo molto ripida [10][13]. Un passo importante verso la comprensione dell'emergere di questa tipologia di galassie è tramite indagini più approfondite di galassie massive e polverose nell'Universo primordiale e stimarne la massa e le abbondanze [9].

La natura dei LRDs non è ancora ben chiara, sono state avanzate tre interpretazioni che spiegano le proprietà riscontrate in queste sorgenti, tra cui la presenza di linee di emissione molto allargate. Innanzitutto, il colore rosso potrebbe essere dovuto da un'intensa discontinuità di Balmer a 4000 \AA ¹, ciò significa che questi oggetti non sono altro che i nuclei delle attuali galassie massive, tuttavia i Little Red Dots sono troppo rossi per soddisfare una discontinuità a 4000 \AA . Una seconda soluzione prevede che la componente rossa sia il risultato di processi di formazione stellare con una notevole quantità di polvere. Questi modelli tendono a sovrastimare i limiti superiori osservati con l'*Atacama Large Millimeter Array* (ALMA), un modo per avere consistenza con questi dati sarebbe assumere una componente polverosa piuttosto calda ($\gtrsim 100 \text{ K}$). Dal momento che questi oggetti risultano molto compatti, sembra plausibile che la polvere raggiunga questa temperatura a causa della formazione stellare. Infine, la terza possibilità suggerisce, sulla base della morfologia compatta e sulla proprietà della *Spectral Energy Distribution* (SED), che queste sorgenti siano dominate da Nuclei Galattici Attivi (*Active Galactic Nuclei*, AGN) arrossati a redshift compresi tra 3 e 7 e con la presenza di linee allargate. Poiché queste sorgenti sono molto arrossate, la luminosità UV non rappresenterebbe la luminosità del disco di accrescimento del buco nero centrale, come avviene per i Nuclei Galattici Attivi non arrossati. Pertanto la componente UV del continuo potrebbe derivare da formazione stellare o dalla diffusione della componente continua non assorbita dell'AGN. Le recenti osservazioni spettroscopiche del James Webb Space Telescope hanno rivelato un numero sostanziale di AGN con righe allargate in oggetti compatti e altamente oscurati a $z > 5$ [15]. Le indagini sembrano quindi confermare l'ipotesi dei Little Red Dots come Nuclei Galattici Attivi, questa elevata densità numerica è inaspettata se comparata alle sorgenti selezionate in ultravioletto [10].

¹Il *Balmer break* è una discontinuità molto marcata dovuta da assorbimenti da parte di elettroni della banda $n = 2$. Si osserva alle lunghezze d'onda del limite della serie di Balmer (3645 \AA) ed è usata come diagnostico per la storia del tasso di formazione stellare di una galassia.

2.1.2 Selezione in colore

Le popolazioni galattiche appena descritte in Sottosez. 2.1.1 sono state scoperte tramite selezioni in colore e sfruttando le capacità del telescopio James Webb nel vicino infrarosso, in modo da selezionare oggetti molto rossi, che possono corrispondere ad alti redshift, processi di formazione stellare in atto o una significativa presenza di polveri. Anche in questo lavoro è stato eseguito un processo analogo sui dati fotometrici dell'*imaging* di NIRC*am*, in particolare ristretto al campo dell'ammasso di galassie Abell 2744 (A2744), noto anche come Ammasso di Pandora, di cui è riportata un'immagine a colori compositi in Fig. 2.1. In particolare, è stato scelto un campione di oggetti con una differenza di colore nei due filtri di NIRC*am* F277W e F444W maggiore di 1.5 ($F277W-F444W > 1.5$).

Alcuni risultati spettroscopici provenienti dal programma *Ultra-deep NIRSpec and NIRC*am* Observation before the Epoch of Reionization* (UNCOVER), hanno individuato sorgenti compatte e rosse proprio nel campo di Abell 2744, compreso A2744-QSO1: una sorgente visibile in tre zone diverse dell'ammasso [8]. Infatti l'Ammasso di Pandora è noto per il significativo potere di lente gravitazionale, in grado di poter rendere visibili galassie a redshift molto alti, motivo per cui è stato scelto come oggetto di osservazioni del James Webb Space Telescope.

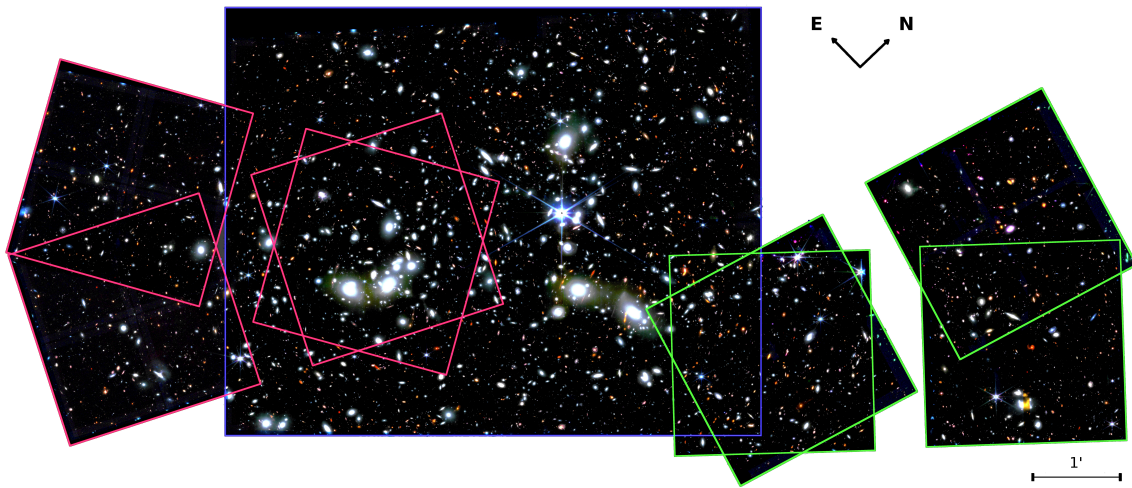


Figura 2.1: Immagine a colori compositi (RGB) dell'ammasso Abell 2744, ottenuta dalla combinazione dei filtri F090W+F115W+F150W in blu, F200W+F277W in verde e F356W+F410M+F444W in rosso. I contorni colorati mostrano la posizione di tre set di dati differenti del JWST usati in questo campo; GLASS (*verde*), UNCOVER (*blu*) e DD-2756 (*rosso*). L'intera immagine comprende una porzione di cielo pari a 12.7×5.9 arcmin. *Crediti: Space Telescope Science Institute.*

La selezione in colore è stata applicata sugli oggetti osservati durante il programma, di questi sono emersi otto oggetti che soddisfano la condizione imposta. In seguito è stato verificato se nell'archivio dei dati di UNCOVER tali oggetti fossero stati osservati con NIRSpec, in modo da poterne analizzare gli spettri. Tra questi è stata scelta una galassia, denominata MSAID28876 (AR: 0 h 14 min 16.7 s, Dec: $-30^{\circ}22'23.6''$ [10]) di cui è presente solo in parte un'analisi spettroscopica all'interno del campione del criterio fotometrico proposto da Jenny E. Greene [10], tuttavia non è stata discussa la natura di questo oggetto. Sono state selezionate anche due delle tre immagini di A2744-QSO1, già analizzato da Lukas J. Furtak e identificato come AGN, indicate con A2744-QSO1A (AR: 0 h 14 min 19.161 s, Dec: $-30^{\circ}24'5.664''$) e A2744-QSO1C (AR: 0 h 14 min 23.331 s, Dec: $-30^{\circ}23'39.639''$) [8][7]. L'obiettivo infatti è quello di comparare i parametri fisici delle righe di emissione di MSAID28876 con quelli di A2744-QSO1 per poter verificare se corrisponde ad un AGN. In Fig. 2.2 è raffigurato l'Ammasso di Pandora con un dettaglio sulla posizione delle tre galassie; l'immagine è stata ottenuta con lo strumento NIRC*am* in combinazione con il filtro F444W ed è stata visualizzata con il software *SAOImageDS9* con dati scaricati dal *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST) per individuare la posizione delle tre sorgenti nel campo di Abell 2744.

Gli spettri delle tre galassie sono stati ottenuti con il prisma a bassa risoluzione, così da poter coprire l'intero intervallo di lunghezza d'onda di NIRSpec, compreso tra i $0.6 \mu\text{m}$ e i $5 \mu\text{m}$, con un'unica

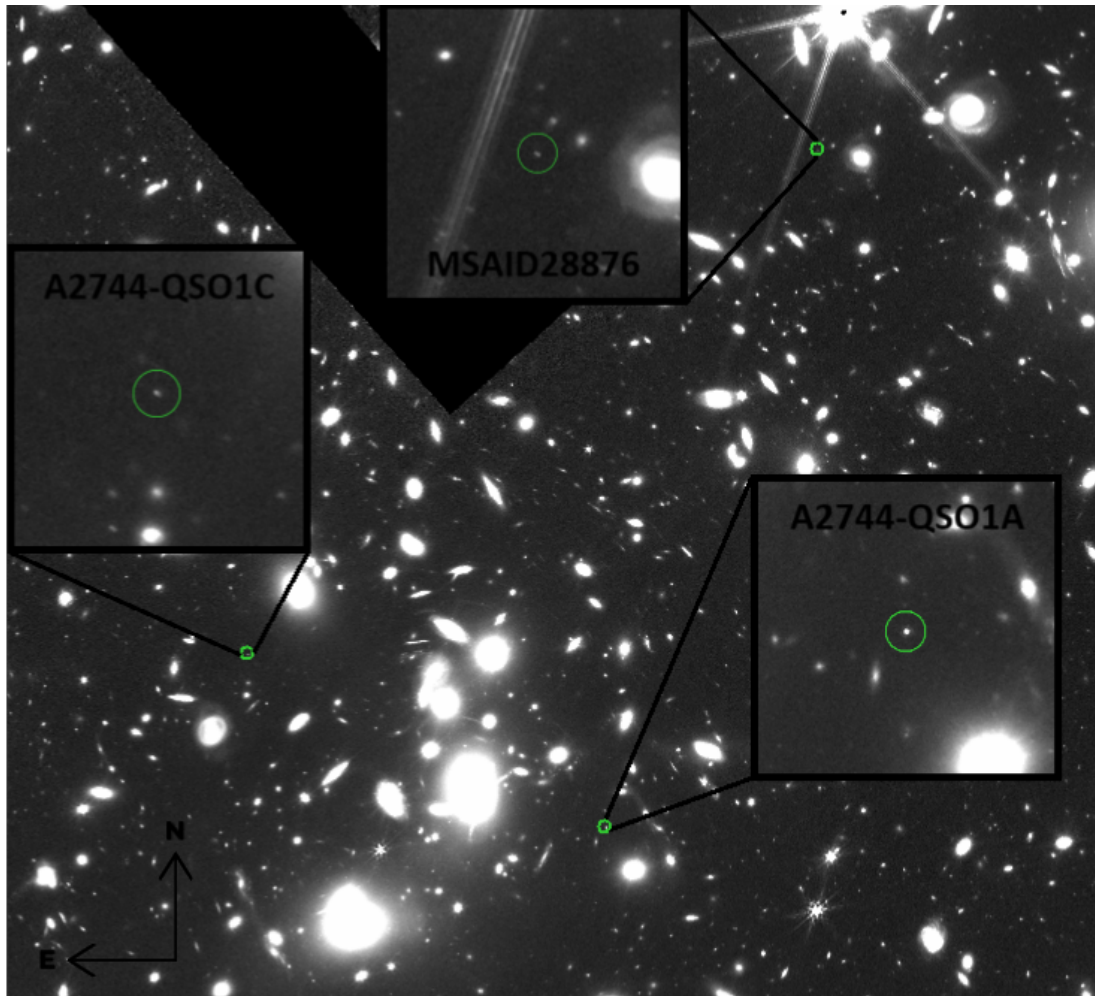


Figura 2.2: Immagine ottenuta con l'ausilio del software SAOImageDS9 con dettaglio della posizione delle tre sorgenti nel campo di Abell 2744.

esposizione, che è stata di 6.4 ore per MSAID28876, di 17.4 ore per A2744-QSO1A e di 14.7 ore per A2744-QSO1C.

2.2 Analisi dei dati

Gli spettri unidimensionali sono stati ottenuti tramite estrazione da spettri bidimensionali con dati di archivio del JWST. I risultati di tale estrazione in valori di lunghezza d'onda, densità di flusso ed errore associato ad essa sono stati analizzati tramite un codice scritto in Python 3.9 al fine di ricavare i parametri fisici principali delle righe di emissione dello spettro. Inoltre, è stato deciso di analizzare anche gli spettri delle due immagini dell'AGN A2744-QSO1 per confrontare i risultati con i valori di riferimento riportati da Lukas J. Furtak [7], in modo da poter verificare la corretta esecuzione dell'analisi da parte del codice.

2.2.1 Sottrazione emissione continua

Prima di sottrarre l'emissione continua di corpo nero della galassia, la densità di flusso e l'errore associato sono stati convertiti da nJy a $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ tramite la relazione:

$$f_{\lambda} [\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}] = \frac{c [\text{\AA s}^{-1}]}{\lambda^2 [\text{\AA}^2]} f_{\nu} [\text{nJy}] = 2.9979245 \times 10^{18} \text{\AA Hz} \frac{10^{-32} f_{\nu} [\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}]}{\lambda^2 [\text{\AA}^2]}$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto.

In seguito, è stata rimossa l'emissione continua dai tre spettri. Per fare ciò sono stati selezionati, tramite un ciclo `for`, vari array che comprendono dieci valori della densità di flusso e lunghezza d'onda ciascuno, di questi è stato poi scelto il valore medio per creare una polinomiale di quinto grado che interpoli al meglio gli spettri usando il comando `polyfit` e `polyval` del pacchetto `numpy`. Successivamente la polinomiale è stata sottratta alla densità di flusso, ottenendo così degli spettri con rumore attorno allo zero, riportati in Fig. 2.4.

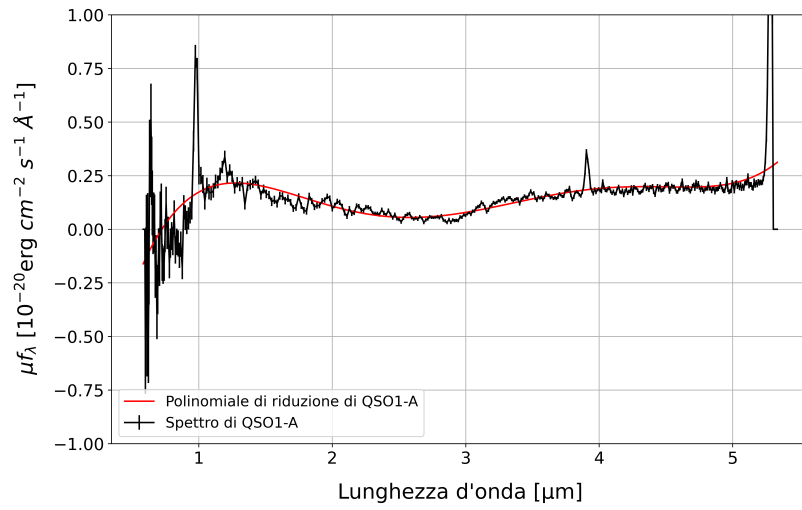
2.2.2 Interpolazione gaussiana

Al fine di ottenere i vari parametri, le linee di emissione rivelate sono state interpolate da delle distribuzioni gaussiane. Sono state dapprima individuate le posizioni delle righe in modo da poter selezionare i corrispondenti intervalli di indici degli array relativi alla lunghezza d'onda, alla densità di flusso e all'errore ad essa associato. In seguito, tramite il comando `curve_fit` del pacchetto Python `scipy.optimize`, sono stati ricavati il valore medio μ_{λ} , l'ampiezza A e la σ dell'interpolazione fornendo delle stime iniziali di questi definite come segue

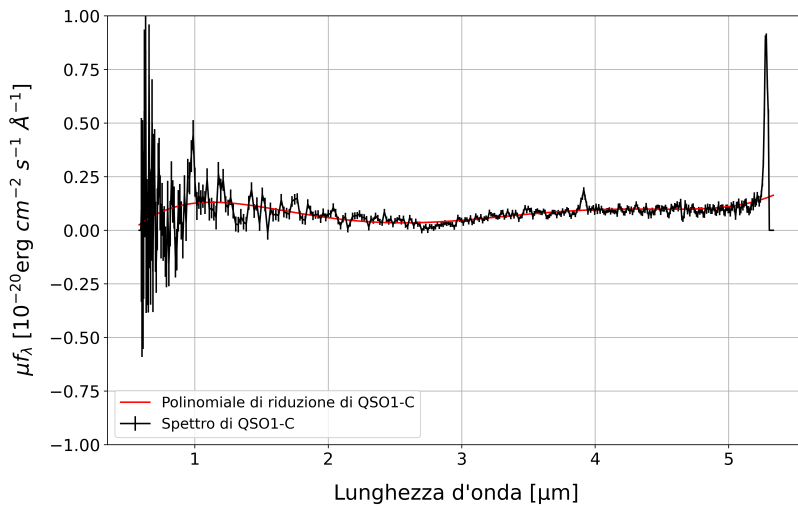
$$A = f_{max}$$

$$\sigma = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{2}$$

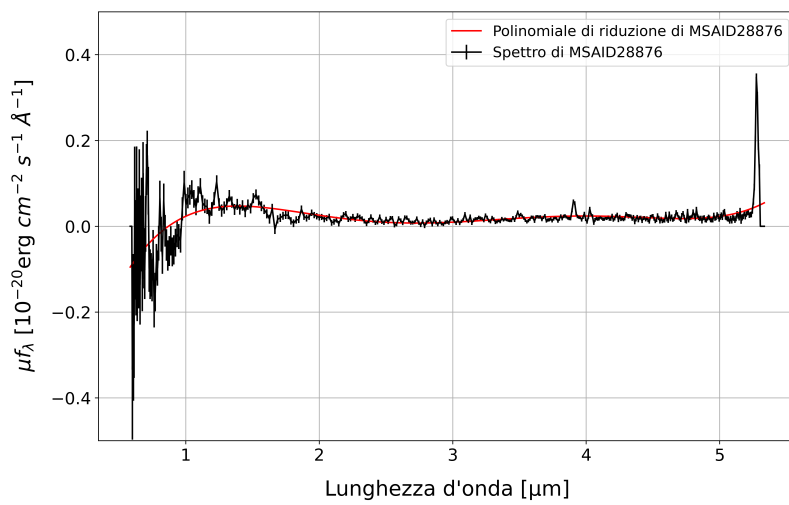
dove f_{max} è il valore massimo di densità di flusso assunto nell'intervallo di lunghezza d'onda considerato e λ_{max} , λ_{min} corrispondono rispettivamente all'estremo destro e sinistro dell'intervallo di lunghezza d'onda in cui è stata eseguita l'interpolazione. Per quanto riguarda la stima iniziale del valore medio, sono state inserite le lunghezze d'onda osservate da Lukas J. Furtak [7], dal momento che è stato riscontrato un egual valore del redshift per le galassie e quindi le lunghezze d'onda delle linee di emissione dei tre spettri coincidono, come si può osservare in Fig. 2.4. I valori degli errori associati a tali parametri sono stati ottenuti considerando la radice quadrata degli elementi diagonali della matrice restituita da `curve_fit` tramite l'utilizzo di un ciclo `for`. Infine, per ottenere una funzione gaussiana più accurata e smussata, sono stati generati cento valori della lunghezza d'onda equamente distanziati nell'intervallo in cui è stata selezionata la riga usando il comando `linspace` di `numpy`. Tali valori, sono poi stati impiegati, insieme a quelli dei parametri della distribuzione gaussiana calcolati da `curve_fit`, per calcolare l'ordinata dell'interpolazione gaussiana centrata nel valore atteso, tramite



(a) A2744-QSO1A.



(b) A2744-QSO1C.



(c) MSAID28876.

Figura 2.3: Immagini dei tre spettri con le rispettive polinomiali per la rimozione del continuo.

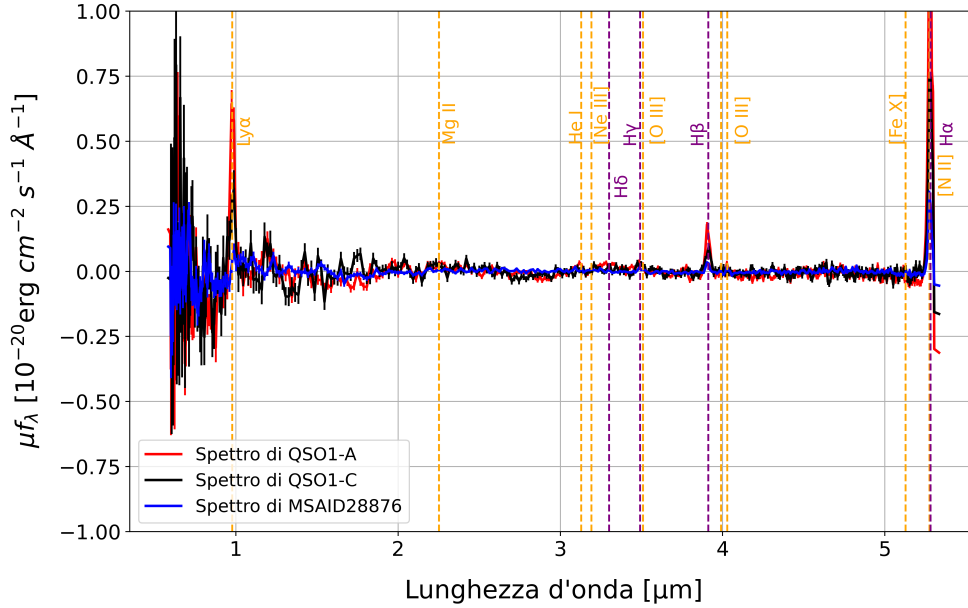


Figura 2.4: Immagine con gli spettri ridotti delle tre sorgenti, sono inoltre indicate, tramite rette verticali tratteggiate, le linee di emissione rivelate. In particolare, sono state associate delle rette viola alle righe della serie di Balmer dell'idrogeno.

la formula

$$f(\lambda) = Ae^{-\frac{(\lambda - \mu_\lambda)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.1)$$

Sono riportati in Figg. 2.5, 2.6 e 2.7 i grafici con l'interpolazione gaussiana delle linee di emissione analizzate. Poiché la riga H α è situata al limite dell'intervallo di osservazione di NIRSPEC, le interpolazioni gaussiane risultano troncate a 5.29 μm , come si può osservare in Figg. 2.5a, 2.6a e 2.7a. A causa della bassa risoluzione del prisma con cui sono state osservate le tre galassie, non è stato possibile eseguire un'interpolazione a doppia componente.

2.2.3 Calcolo dei parametri

Una volta ricavati i parametri delle funzioni gaussiane con cui sono state interpolate le linee di emissione dei tre spettri, è stato possibile derivare i valori del flusso, della larghezza equivalente (*Equivalent Width*, EW) e della larghezza a metà altezza (*Full Width at Half Maximum*, FWHM), quest'ultima, in particolare, è molto utile per determinare la tipologia di AGN di MSAID28876. Infatti gli AGN Tipo 1 sono caratterizzati da valori della FWHM molto elevati, mentre gli AGN Tipo 2 presentano FWHM ridotte, in accordo con il Modello Unificato dei Nuclei Galattici Attivi².

Il flusso della linea di emissione corrisponde all'integrale dell'interpolazione gaussiana mentre l'errore associato ad esso è stato ricavato tramite la teoria della propagazione degli errori, pertanto

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda = A\sigma\sqrt{2\pi} \quad (2.2)$$

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial A} \delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \delta \sigma\right)^2} = \sqrt{\sigma^2 2\pi \delta A^2 + A^2 2\pi \delta \sigma^2} \quad (2.3)$$

dove δA e $\delta \sigma$ sono gli errori associati ad A e σ , mentre λ e σ sono stati convertiti da μm a \AA in modo che l'unità di misura del flusso fosse in $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

²Per un approfondimento sulla struttura dei Nuclei Galattici Attivi e sui processi che avvengono all'interno di essi si rimanda alla lettura dell'Appendice A a pagina 27.

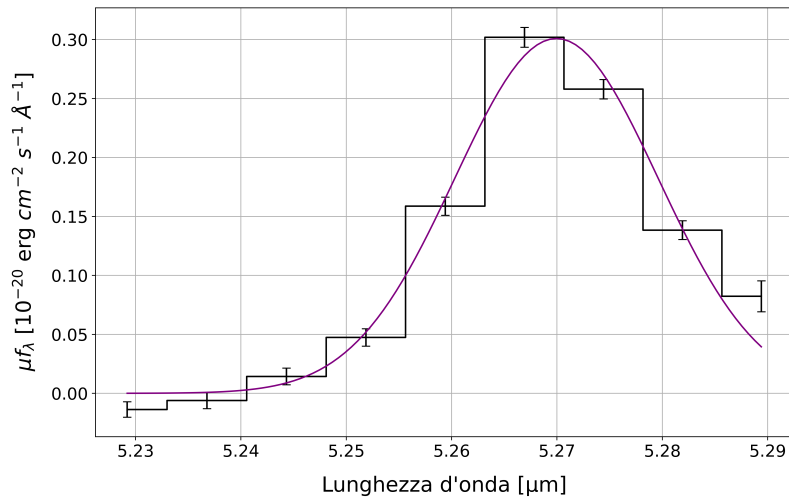
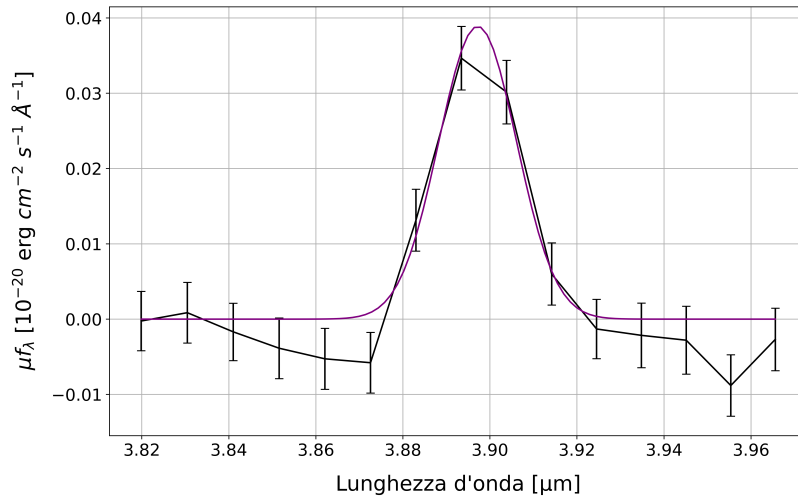
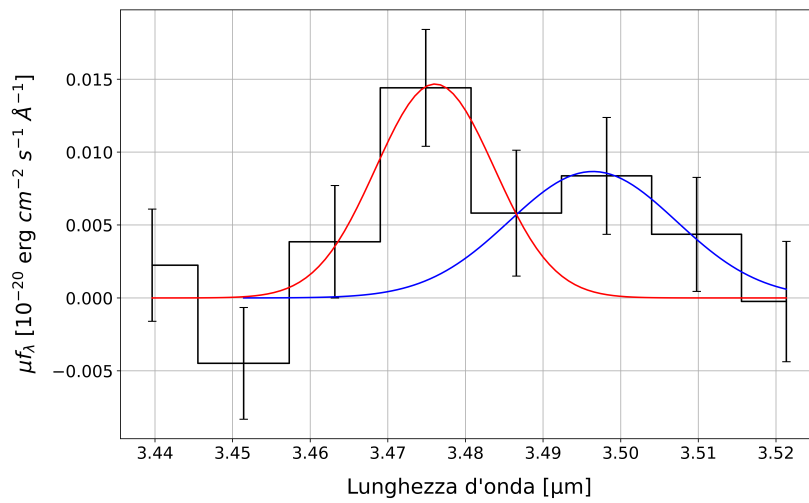
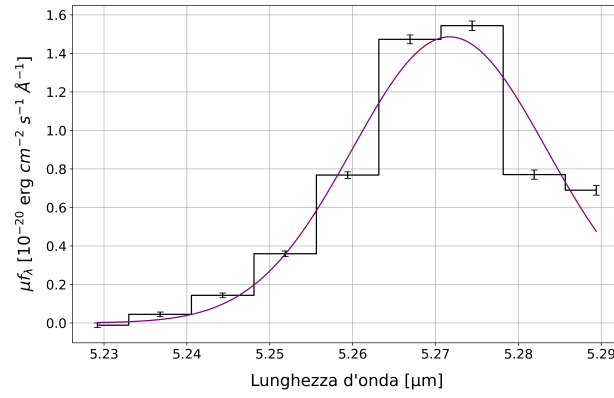
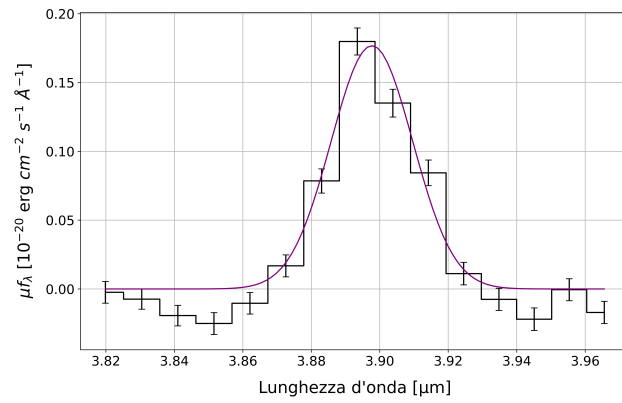
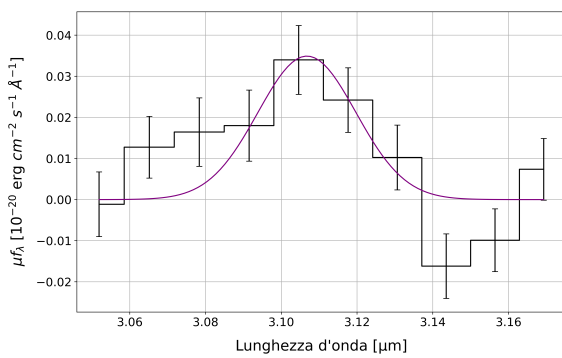
(a) Linea $H\alpha$.(b) Linea $H\beta$.(c) Linee $H\gamma$ e $[O III]\lambda 4363$.

Figura 2.5: Linee di emissione di MSAID28876 analizzate e interpolate con una funzione gaussiana riportata in viola, rosso e blu.

(a) Linea H α .(b) Linea H β .

(c) Linea He I.

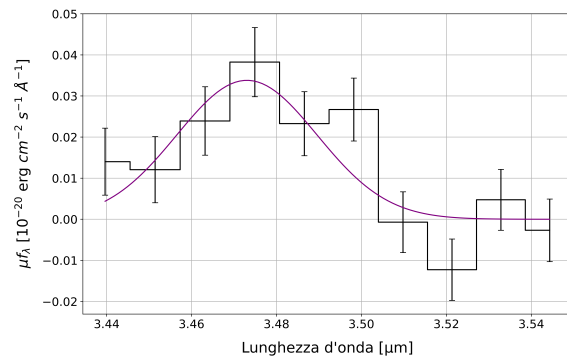
(d) Linea H γ .

Figura 2.6: Linee di emissione di A2744-QSO1A analizzate e interpolate con una funzione gaussiana riportata in viola.

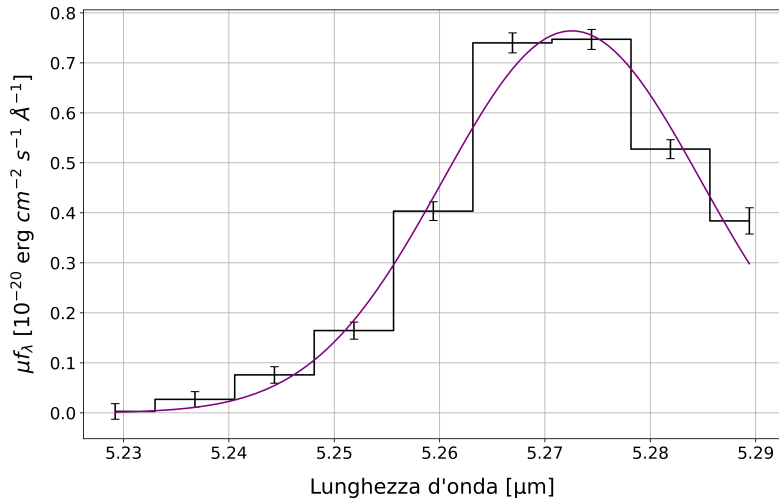
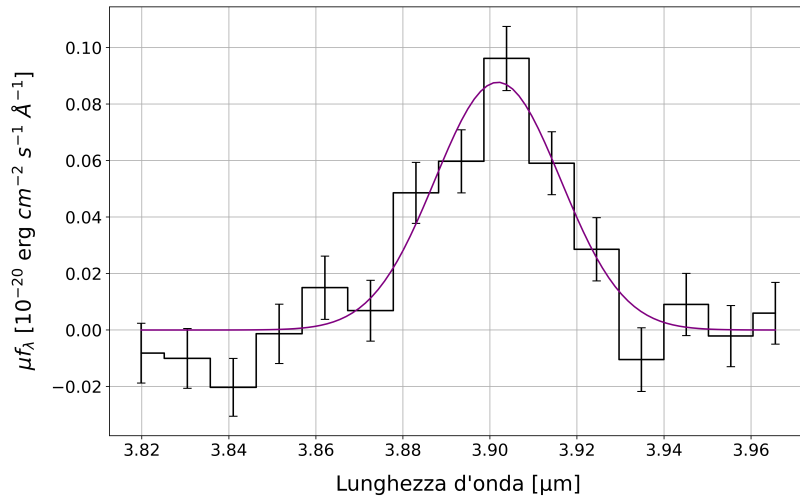
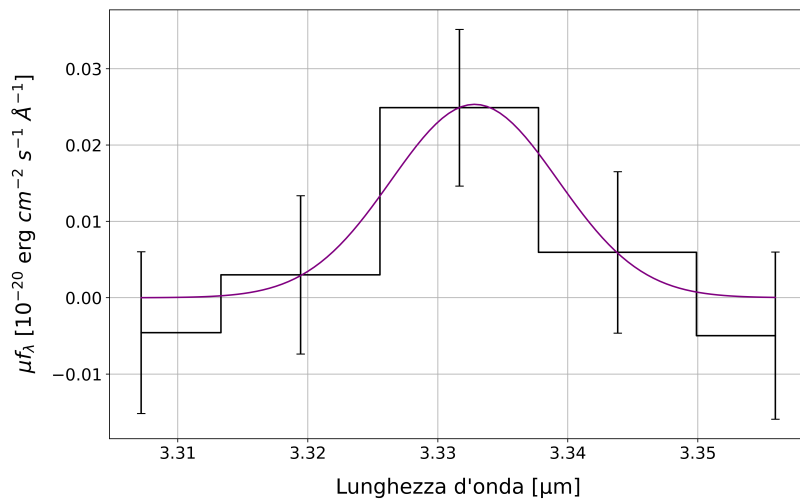
(a) Linea H α .(b) Linea H β .(c) Linea H δ .

Figura 2.7: Linee di emissione di A2744-QSO1C analizzate e interpolate tramite una funzione gaussiana riportata in viola.

La larghezza a mezza altezza e l'errore associato sono stati ricavati tramite le relazioni $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma \approx 2.355\sigma$ e $\delta\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln(2)}\delta\sigma \approx 2.355\delta\sigma$, mentre sono state convertite mediante la formula

$$\text{FWHM}[\text{km s}^{-1}] = c [\text{km s}^{-1}] \frac{\text{FWHM}[\mu\text{m}]}{\mu_\lambda[\mu\text{m}]} = 2.99792 \cdot 10^5 \frac{\text{FWHM}[\mu\text{m}]}{\mu_\lambda[\mu\text{m}]} \quad (2.4)$$

Invece la larghezza equivalente è definita come

$$EW = \int_{\text{linea}} \frac{f_s - f_c}{f_c} d\lambda = \frac{F}{f_c} \quad (2.5)$$

dove f_s è la densità di flusso dello spettro, incluso il livello dell'emissione continua, mentre f_c è il valore che assume il continuo, per il quale è stato usato il valore assunto dalla polinomiale di riduzione usata durante la fase di sottrazione dell'emissione continua. Se quest'ultimo si assume costante può essere portato fuori dal segno di integrale, pertanto l'integrale coincide con quello riportato in Eq. (2.2) e di conseguenza si ha che la larghezza equivalente è il rapporto tra il flusso della linea di emissione e il livello del continuo. L'errore sulla EW è stato calcolato tramite la formula della propagazione degli errori, riportata di seguito

$$\delta EW = \sqrt{\left(\frac{\partial EW}{\partial F} \delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial EW}{\partial f_c} \delta f_c\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta F}{f_c}\right)^2 + \left(-\frac{F}{f_c^2} \delta f_c\right)^2} \quad (2.6)$$

Infine, i flussi sono stati corretti per magnificazione causato dall'effetto di lente gravitazionale dividendo per i fattori di incremento, corrispondenti a $\mu_A = 6.2$ per QSO1A e $\mu_C = 3.5$ per QSO1C [7], mentre la larghezza equivalente è stata corretta per redshift cosmologico dividendo per $(1+z)$. Per verificare la corretta analisi delle linee di emissione, è stato calcolando il rapporto tra i flussi di A2744-QSO1A e A2744-QSO1C misurati con quelli riportati da Lukas J. Furtak [7], anche quest'ultimi corretti per magnificazione, ottenuti dividendo per la somma dei due fattori dal momento che i valori presentati sono il risultato dell'analisi della sovrapposizione degli spettri. In Fig. 3.1 a pagina 24 è riportato un grafico in cui in ascissa sono riportati i valori misurati mentre in ordinata quelli di riferimento.

Capitolo 3

Risultati

Dallo studio spettroscopico dei tre oggetti si desume una particolarità, ovvero che possiedono tutti lo stesso redshift, con un valore di $z = 7.04$ [10]. Inizialmente, infatti, era stato ipotizzato che MSAID28876 fosse una quarta immagine di A2744-QSO1 prodotta dall'effetto di lente gravitazionale dell'ammasso, tuttavia questa galassia è localizzata in una regione dell'ammasso in cui, secondo il modello sviluppato (Comunicazione Riservata, P. Bergamini), non sarebbe possibile la presenza di una quarta immagine dell'AGN, pertanto è stata identificata come una galassia a sé stante.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i parametri delle righe rivelate nei tre spettri analizzati tramite il codice `Python` descritto in Sez. 2.2. Per ottenere risultati scientificamente attendibili, è stato deciso di considerare soltanto le linee di emissione con flusso superiore a tre volte δF .

Linea di emissione	λ_0 [Å]	λ_{oss} [µm]	FWHM [km s ⁻¹]	μF [10 ⁻²⁰ erg/ cm ² s]	EW ₀ [Å]
H γ	4341	3.476 ± 0.002	1553.2±365.5	2.8 ± 0.9	
H β	4861	3.897 ± 0.001	1619.1±202.8	8.7 ± 1.4	28.1 ± 7.6
H α	6563	5.2699 ± 0.0005	1292.1±67.3	72.7 ± 5.0	190.5±17.7

Tabella 3.1: Valori dei parametri fisici delle linee di emissione analizzate dello spettro della galassia MSAID28876. Non è stato possibile rivelare tutte le righe individuate a causa di un basso rapporto S/N o per *blend* di righe, pertanto le righe He I, H δ e [O III] $\lambda\lambda$ 4363, 4959, 5007 non sono state riportate in questa tabella. Si tiene inoltre a precisare che le incertezze sul flusso delle righe è sovrastimato poiché ottenuto propagando le incertezze di grandezze correlate oppure, come nel caso della linea di emissione H γ , a causa della doppia interpolazione con la riga [O III] λ 4363 Å.

Linea di emissione	λ_0 [Å]	λ_{oss} [µm]	FWHM [km s ⁻¹]	μF [10 ⁻²⁰ erg/ cm ² s]	EW ₀ [Å]
H γ	4341	3.473 ± 0.003	3358.9±663.7	14.0 ± 3.4	
H β	4861	3.898 ± 0.001	2160.5±201.9	52.8 ± 6.8	28.2 ± 4.7
H α	6563	5.272 ± 0.001	1571.8±125.0	437.3±48.0	177.3±21.8

Tabella 3.2: Valori dei parametri fisici delle linee di emissione analizzate dello spettro della galassia A2744-QSO1A. Non è stato possibile rivelare tutte le righe individuate a causa di un basso rapporto S/N o per *blend* di linee, pertanto le righe He I, H δ e [OIII] $\lambda\lambda$ 4363, 4959, 5007 non sono state riportate in questa tabella. Si tiene inoltre a precisare che le incertezze sul flusso delle righe è sovrastimato poiché ottenuto propagando le incertezze di grandezze correlate.

Dal rapporto dei flussi delle righe H α e H β riportati in Tab. 3.1, 3.2 e 3.3 è stato possibile ricavare il fattore di arrossamento, anche noto come *Balmer decrement*, estinzione dovuta dalle polveri per lo stesso fenomeno discusso in Sez. 1.1 e il cui andamento è riportato in Fig. 1.2. Il Balmer decrement è definito come il rapporto tra H α e H β , poiché la seconda delle due linee di emissione si trova a una lunghezza d'onda più blu rispetto alla prima sarà più sensibile all'assorbimento. Il valore teorico, in

Linea di emissione	λ_0 [Å]	λ_{oss} [μm]	FWHM [km s ⁻¹]	μF [10 ⁻²⁰ erg/ cm ² s]	EW ₀ [Å]
Hδ	4102	3.333 ± 0.003	1360.7±343.7	4.1 ± 1.3	
Hβ	4861	3.902 ± 0.002	2613.8±315.6	31.8 ± 5.1	38.2 ± 6.9
Hα	6563	5.2725 ± 0.0006	1644.7±89.8	235.2±16.2	179.0±14.7

Tabella 3.3: Valori dei parametri fisici delle linee di emissione analizzate dello spettro della galassia A2744-QSO1C. Non è stato possibile rivelare tutte le righe individuate a causa di un basso rapporto S/N o per *blend* di righe, pertanto le righe He I, Hγ, [O III]λλ4363, 4959, 5007 non sono state riportate in questa tabella. Si tiene inoltre a precisare che le incertezze sul flusso delle righe è sovrastimato poiché ottenuto propagando le incertezze di grandezze correlate.

assenza di polveri, del rapporto tra le due righe equivale a 2.87, quindi un valore superiore a quello teorico indica una maggiore presenza di polveri che causa una diminuzione dell'intensità delle linee più blu mentre si verifica un aumento in intensità delle righe più rosse. Di seguito sono riportati i valori del rapporto Hα/Hβ misurati per le tre galassie:

- MSAID28876: 8.3 ± 1.5 ;
- A2744-QSO1A: 8.3 ± 1.4 ;
- A2744-QSO1C: 7.4 ± 1.3 .

Per A2744-QSO1 è stato ottenuto un Balmer decrement medio di 7.8 ± 0.4 .

Infine, dal rapporto dei flussi, è emersa una corrispondenza tra quelli misurati e quelli di riferimento, come si riscontra osservando il grafico in Fig. 3.1, pertanto si può ritenere che l'analisi delle linee di emissione sia stata eseguita correttamente. Il valore mediano del rapporto tra i flussi per A2744-QSO1A è 1.1, mentre per A2744-QSO1C è 1.2.

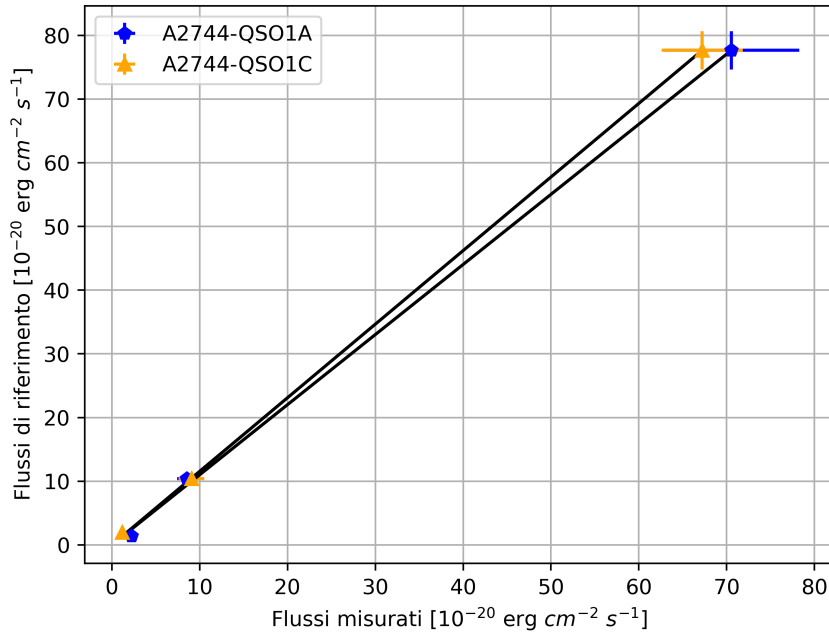


Figura 3.1: Grafico per la verifica della corretta analisi delle linee di emissione. In ascissa sono riportati i flussi misurati, mentre in ordinata quelli ottenuti da Lukas J. Furtak [7].

Capitolo 4

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata analizzato lo spettro di una galassia a redshift $z = 7.04$ al fine di comprenderne la natura. In particolare sono state esaminate le linee di emissione $H\alpha$, $H\beta$ e $H\gamma$ tramite interpolazioni gaussiane per ottenere parametri fisici come flusso, larghezza a metà altezza ed larghezza equivalente.

Dai risultati presentati in Cap. 3, le ipotesi più probabili che sono state dedotte sono le seguenti:

1. Dal confronto dei valori dei parametri delle linee di emissione di MSAID28876 con quelle di A2744-QSO1A e A2744-QSO1C riportati in Tab. 3.1, 3.2 e 3.3, si riscontra che questi sono molto simili, poiché A2744-QSO1 è già stato confermato essere un Nucleo Galattico Attivo, è possibile che anche MSAID28876 appartenga a questa categoria di sorgenti;
2. Nello specifico, MSAID28876 potrebbe essere un AGN di Tipo 1, questo può essere spiegato dall'elevato valore della FWHM delle tre linee di emissione, pertanto la sorgente potrebbe essere orientata in modo tale che si osservi la regione circostante al buco nero super-massiccio centrale, nota come *Broad-Line Region* (BLR) ¹;
3. A sostegno dell'ipotesi della natura di AGN Tipo 1 di MSAID28876 vi è la grande differenza in intensità tra le righe $H\beta$ e [OIII], come si può osservare in Fig. 2.4 a pagina 18. Infatti, questa caratteristica è peculiare di questa famiglia di sorgenti, in particolare per i quasar di Tipo 1 non oscurati, poiché la linea di emissione $H\beta$, a differenza di quella [OIII], possiede una componente di BLR;
4. Il rapporto tra i flussi delle righe $H\alpha/H\beta$ suggerisce una grande presenza di polveri nella galassia che ospita il Nucleo Attivo. Questo fatto potrebbe aiutare a comprendere la formazione delle galassie primordiali e il motivo per cui sia presente una grande quantità di polveri durante l'Alba Cosmica. Potrebbe essere inoltre un indice della presenza del toro di polveri che circonda il buco nero super-massiccio e pertanto validare l'ipotesi della natura di AGN di MSAID28876;
5. Il fatto che la Galassia Attiva individuata da Lukas J. Furtak e MSAID28876 si trovino al medesimo redshift, suggerisce una possibile sovra-densità di questa categoria di oggetti a $z \sim 7$ che potrebbe essere d'aiuto per la comprensione sul ruolo degli AGN durante l'Alba Cosmica.

Dal momento che i dati spettroscopici sono stati ottenuti usando NIRSpc in combinazione con il prisma a bassa risoluzione come elemento dispersore, per verificare tali aspetti saranno necessarie osservazioni supplementari dell'oggetto con una configurazione a maggiore risoluzione dello spettrografo.

¹Vedasi Appendice A.

Appendice A

Fisica e struttura dei Nuclei Galattici Attivi

I Nuclei Galattici Attivi (AGN) rappresentano una frazione di galassie, dette Galassie Attive, che presentano fenomeni nelle regioni nucleari che non possono essere spiegati tramite attività stellari. Sono sorgenti caratterizzate da luminosità bolometriche molto elevate, fino a $L \sim 10^{48}$ erg s⁻¹, presentano inoltre forti emissioni nelle bande dei raggi X e gamma e un continuo ottico e UV di natura non stellare. Gli spettri degli AGN sono solcati da righe in emissione molto allargate con FWHM fino a $>10\,000$ km s⁻¹ e da linee più strette, sia permesse che proibite¹, con FWHM ≈ 1000 km s⁻¹. Infine sono state osservate emissioni di plasma relativistico che fuoriescono dal nucleo a velocità prossime a quelle della luce.

Esistono tre principali categorie di Galassie Attive:

- *Nuclei attivi radio-brillanti (radio-loud)*. Un AGN è detto radio-brillante quando il rapporto tra il flusso radio e ottico è maggiore di un determinato valore. Di questa categoria fanno parte:
 1. Radiogalassie: queste sorgenti emettono principalmente radiazione di sincrotrone. A differenza di altri Nuclei Galattici Attivi, nelle radiogalassie è possibile osservare la galassia che ospita le attività nucleari. Secondo la classificazione Fanaroff-Riley (FR), si distinguono due classi, FR I e FR II, in base alla luminosità radio a 178 MHz. Gli spettri ottici possono mostrare linee di emissione allargate o strette (*broad-line radio galaxies*) o solo quelle strette (*narrow-line radio galaxies*);
 2. Blazar: questa classe comprende due categorie di oggetti molto luminosi nella banda radio. Il primo include i *flat-spectrum radio-loud quasars* (FSRQs), caratterizzati da spettri radio con emissione di sincrotrone. La seconda classe include gli oggetti BL Lacertae (BL Lac), i cui spettri ottici sono contraddistinti da emissione continua priva di caratteristiche e raramente linee di emissione e assorbimento molto deboli. I getti relativistici di questi AGN sono orientati a piccoli angoli rispetto alla linea di vista dell'osservatore, causando una elevata e casuale variazione del flusso e una forte polarizzazione lineare;
- *Nuclei attivi radio-quieti (radio-quiet)*. Costituiti da:
 1. Quasars o QSO: questi oggetti furono inizialmente scoperti come controparte ottica di sorgenti radio a distanze cosmologiche che furono denominati *quasi-stellar radio sources* (quasars), per la morfologia compatta e simil stellare in banda ottica. Successivamente, furono osservati un grande numero di oggetti con le stesse proprietà ma con emissioni radio più deboli o assenti, questi oggetti furono chiamati *quasi-stellar objects* (QSOs). Tuttavia le forti emissioni radio sono presenti solo in una piccola frazione di questi sistemi, pari a circa il 10%;
 2. Galassie di Seyfert: sono galassie a disco che ospitano una brillantezza superficiale elevata nelle regioni nucleari emettendo forti linee di emissione; la loro luminosità bolometrica è minore rispetto a quella dei QSO. Similmente alle radiogalassie, sono suddivise in due categorie in base agli spettri ottici: Seyfert 1, dove linee di emissione strette e allargate sono presenti e

¹Le linee proibite sono prodotte da transizioni altamente improbabili non permesse dalle regole di selezione della meccanica quantistica. Tali transizioni avvengono in condizioni di bassa densità del gas.

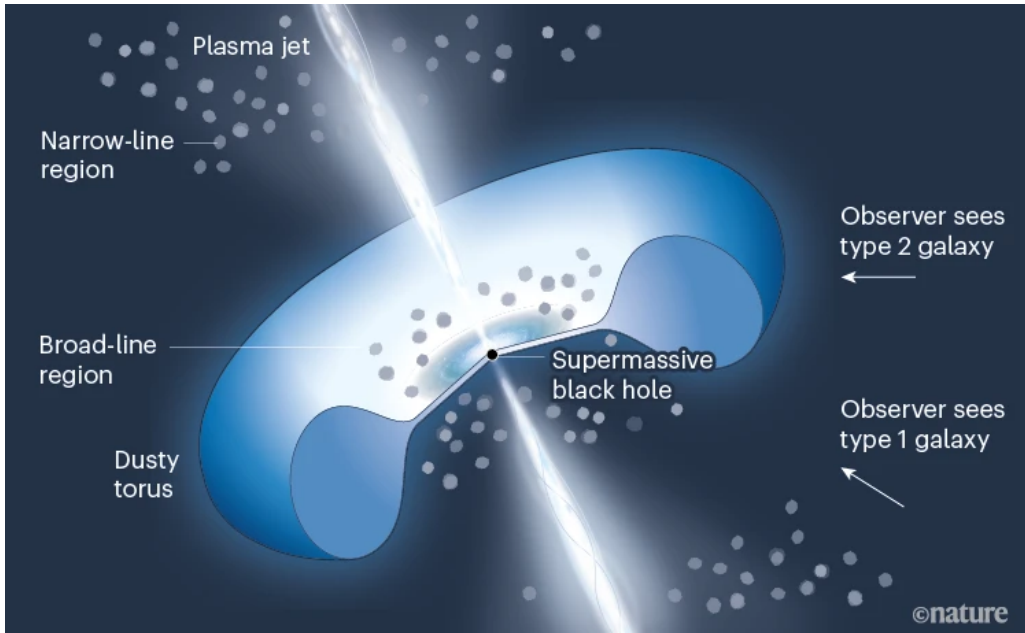


Figura A.1: Immagine schematica che mostra la sezione di un AGN come descritto secondo il modello unificato. *Crediti: Nature.*

Seyfert 2, in cui sono visibili solo le linee più strette;

- Galassie con eccesso d'emissione infrarossa: galassie luminose (LIRG), ultra-luminose (ULIRG) e iper-luminose (HYLIRG), le quali possiedono, rispettivamente, luminosità bolometriche $>10^{11} L_{\odot}$, $>10^{12} L_{\odot}$, $>10^{13} L_{\odot}$ [4][6].

In generale, le sorgenti con linee di emissione allargate sono detti AGN Tipo 1, mentre se solo le linee di emissione più strette sono visibili sono detti AGN Tipo 2.

Il modello ampiamente accettato sulla struttura dei Nuclei Galattici Attivi è quello del Modello Unificato, di cui è riportato uno schema in Fig. A.1. Secondo questo scenario il buco nero supermassiccio (*Super Massive Black Hole*, SMBH) al centro dell'AGN presenta un disco di accrescimento di piccole dimensioni (circa 1 AU) e il cui raggio dipende dalla massa del SMBH con una dipendenza $R_{acc} \propto M_{\bullet}^{2/3}$. Tutto ciò è confinato nella cosiddetta *Broad-Line Region* (BLR), in cui le nubi di gas denso ($n \sim 10^8 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) e fotoionizzato ($T \sim 10^4 \text{ K}$) si muovono ad alte velocità (FWHM fino a $>10\,000 \text{ km s}^{-1}$) e sono responsabili dell'emissione di linee allargate. La sorgente centrale e la BLR sono circondate a loro volta da un toro di polveri e gas più freddo, il quale induce la radiazione emessa nella regione centrale a fuoriuscire in modo anisotropo con forma biconica. Le linee di emissione più strette (FWHM $\approx 500 - 1000 \text{ km s}^{-1}$) si generano nella *Narrow-Line Region* (NLR), situata all'esterno del toro di polveri e costituita da nubi di gas con densità più bassa ($n \sim 10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$) come dimostrato dalla grande quantità di linee di emissione proibite. Le dimensioni tipiche di questa regione sono dell'ordine dei 100 pc o più e spesso mostra una morfologia biconica consistente con la presenza della radiazione proveniente dalla regione centrale.

Sulla base di questo modello, molte delle differenze osservate nelle varie tipologie di AGN sono attribuibili a effetti geometrici che dipendono dall'orientazione del sistema rispetto alla linea di vista dell'osservatore. Pertanto Nuclei Galattici Attivi con linee di emissione allargate rappresentano il caso in cui la regione interna al toro è visibile, mentre la presenza di righe più strette può essere spiegata dall'oscuramento della BLR da parte del toro di polveri con solo la NLR visibile, come riportato in Fig. A.1. Di conseguenza, nota la FWHM, è possibile determinare la tipologia dell'AGN e se quindi ciò che si osserva è la regione centrale o quella più esterna. Infine, per quanto riguarda i blazar, questi corrispondono al caso estremo in cui la linea di vista è allineata con i getti relativistici emessi dal nucleo.

Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento alla relatrice Giulia Rodighiero e alla correlatrice Laura Bisigello per avermi seguito durante la realizzazione di questo lavoro di tesi e per avermi dato l'opportunità di studiare oggetti tanto affascinanti come i Nuclei Galattici Attivi e analizzare dati così recenti; grazie ai loro consigli ho acquisito nuove competenze e conoscenze.

Voglio inoltre ringraziare la mia famiglia, in particolare i miei genitori per avermi supportato durante la mia carriera universitaria e che hanno sempre incoraggiato le mie passioni da quel giorno in cui mi regalarono il primo telescopio. Un ringraziamento speciale a mia nonna Giovanna che ha sempre creduto in me.

Infine ringrazio anche Carmen, che è sempre stata al mio fianco e mi ha supportato durante questi mesi con grande pazienza, ringrazio i miei amici e i miei colleghi di università, con cui ho condiviso tanti bei momenti in questi anni del mio percorso accademico.

Bibliografia

- [1] Bren E. Backhaus et al. «CEERS Key Paper VIII: Emission Line Ratios from NIRSpec and NIRCам Wide-Field Slitless Spectroscopy at $z > 2$ ». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2307.09503 (lug. 2023), arXiv:2307.09503. DOI: 10.48550/arXiv.2307.09503. arXiv: 2307.09503 [astro-ph.GA].
- [2] Jack E. Birkin et al. «JWST’s TEMPLATES for Star Formation: The First Resolved Gas-Phase Metallicity Maps of Dust-Obscured Star-Forming Galaxies at $z \sim 4$ ». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2307.10412 (lug. 2023), arXiv:2307.10412. DOI: 10.48550/arXiv.2307.10412. arXiv: 2307.10412 [astro-ph.GA].
- [3] Andrew J. Bunker et al. «JADES NIRSpec Initial Data Release for the Hubble Ultra Deep Field: Redshifts and Line Fluxes of Distant Galaxies from the Deepest JWST Cycle 1 NIRSpec Multi-Object Spectroscopy». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2306.02467 (giu. 2023), arXiv:2306.02467. DOI: 10.48550/arXiv.2306.02467. arXiv: 2306.02467 [astro-ph.GA].
- [4] Andrea Cimatti et al. *Introduction to galaxy formation and evolution : from primordial gas to present-day galaxies / Andrea Cimatti, Filippo Fraternali and Carlo Nipoti*. eng. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. ISBN: 9781107134768.
- [5] Mirko Curti et al. «JADES: Insights on the low-mass end of the mass–metallicity–star-formation rate relation at $3 < z < 10$ from deep JWST/NIRSpec spectroscopy». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2304.08516 (apr. 2023), arXiv:2304.08516. DOI: 10.48550/arXiv.2304.08516. arXiv: 2304.08516 [astro-ph.GA].
- [6] Professor Alberto Franceschini. *Dispense del corso di Cosmologia*.
- [7] Lukas J. Furtak et al. «A supermassive black hole in the early universe growing in the shadows». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2308.05735 (ago. 2023), arXiv:2308.05735. DOI: 10.48550/arXiv.2308.05735. arXiv: 2308.05735 [astro-ph.GA].
- [8] Lukas J. Furtak et al. «JWST UNCOVER: Extremely Red and Compact Object at $z_{phot} \simeq 7.6$ Triply Imaged by A2744». In: *Astrophysical Journal* 952.2, 142 (ago. 2023), p. 142. DOI: 10.3847/1538-4357/acdc9d. arXiv: 2212.10531 [astro-ph.GA].
- [9] R. Gottumukkala et al. «Unveiling the hidden universe with JWST: The contribution of dust-obscured galaxies to the stellar mass function at $z \sim 3 - 8$ ». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2310.03787 (ott. 2023), arXiv:2310.03787. DOI: 10.48550/arXiv.2310.03787. arXiv: 2310.03787 [astro-ph.GA].
- [10] Jenny E. Greene et al. «UNCOVER spectroscopy confirms a surprising ubiquity of AGN in red galaxies at $z > 5$ ». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2309.05714 (set. 2023), arXiv:2309.05714. DOI: 10.48550/arXiv.2309.05714. arXiv: 2309.05714 [astro-ph.GA].
- [11] Space Telescope Science Institute. *NIRCам Field of View - JWST User Documentation*. URL: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-camera/nircam-instrumentation/nircam-field-of-view>.
- [12] Space Telescope Science Institute. *NIRCам Filters - JWST User Documentation*. URL: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-camera/nircam-instrumentation/nircam-filters>.
- [13] Ivo Labbe et al. «UNCOVER: Candidate Red Active Galactic Nuclei at $3 < z < 7$ with JWST and ALMA». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2306.07320 (giu. 2023), arXiv:2306.07320. DOI: 10.48550/arXiv.2306.07320. arXiv: 2306.07320 [astro-ph.GA].
- [14] R. Maiolino e F. Mannucci. «De re metallica: the cosmic chemical evolution of galaxies». In: *Astronomy and Astrophysics Reviews* 27.1, 3 (feb. 2019), p. 3. DOI: 10.1007/s00159-018-0112-2. arXiv: 1811.09642 [astro-ph.GA].

- [15] Jorryt Matthee et al. «Little Red Dots: an abundant population of faint AGN at $z \sim 5$ revealed by the EIGER and FRESCO JWST surveys». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2306.05448 (giu. 2023), arXiv:2306.05448. DOI: 10.48550/arXiv.2306.05448. arXiv: 2306.05448 [astro-ph.GA].
- [16] NASA. *Near Infrared Camera (NIRCam) Instrument Webb/NASA*. URL: <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/instruments/nircam.html>.
- [17] NASA. *Near Infrared Spectrograph (NIRSpec) Instrument Webb/NASA*. URL: <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/instruments/nirspec.html>.
- [18] NASA. *The James Webb Space Telescope Observatory — NASA*. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/webb/observatory/index.html.
- [19] Alice E. Shapley et al. «JWST/NIRSpec Balmer-line Measurements of Star Formation and Dust Attenuation at $z \sim 3 - 6$ ». In: *arXiv e-prints*, arXiv:2301.03241 (gen. 2023), arXiv:2301.03241. DOI: 10.48550/arXiv.2301.03241. arXiv: 2301.03241 [astro-ph.GA].
- [20] Fengwu Sun et al. «First Peek with JWST/NIRCam Wide-field Slitless Spectroscopy: Serendipitous Discovery of a Strong [O III]/H α Emitter at $z = 6.11$ ». In: *Astrophysical Journal, Letters* 936.1, L8 (set. 2022), p. L8. DOI: 10.3847/2041-8213/ac8938. arXiv: 2207.11259 [astro-ph.GA].