

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Rilevazione dell'idrogeno atomico

in galassie passive a $z > 0.1$

Relatrice

Prof.ssa Giulia Rodighiero

Correlatore

Francesco Sinigaglia

Laureando

Marco Boscato

Matricola 1224394

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

In questo lavoro viene presentata in primo luogo un'analisi di letteratura dello stato dell'arte sulla metodologia, le campagne osservative e i risultati relativi al contenuto di idrogeno neutro (HI) in galassie a $z < 0.1$ e alle relazioni di scala che lo legano ad altre proprietà fondamentali delle galassie. Successivamente, viene presentato e applicato lo "stacking" spettrale come tecnica statistica per misurare la massa media di HI delle galassie passive a $z > 0.1$ e indagare il suo ruolo nell'evoluzione delle galassie, utilizzando dati acquisiti dalla survey MIGHTEE con il radiotelescopio MeerKAT.

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Scaling relations	4
1.1.1	Relazioni di scala nell'universo locale ($z \sim 0$)	4
1.1.2	Relazioni di scala a $z > 0.2$	4
2	Dati MIGHTEE	9
3	Selezione del campione e analisi dati	9
3.1	Catalogo hCOSMOS	10
3.2	Stacking	10
3.3	Analisi dati	13
3.3.1	Dn4000	14
3.3.2	Stellar mass	16
3.3.3	Dn4000 e stellar mass	19
4	Risultati e discussione	23
5	Appendice	25

1 Introduzione

L'idrogeno neutro interstellare HI è la componente gassosa principale nelle galassie e fornisce la base per i processi di formazione stellare.

Prima ancora delle prime stelle, l'HI era l'elemento che più permeava l'Universo primordiale, per poi collassare su se stesso andando a formare giganti nubi che diventeranno galassie. Proprio per questo, l'HI è un tracciante alternativo rispetto alla storia di formazione stellare per ottenere informazioni fisiche.

A differenza dell'idrogeno molecolare H_2 , che tende a concentrarsi in un numero limitato di nubi giganti nelle regioni interne, la distribuzione di HI riempie una frazione molto più grande dello spazio interstellare e forma un disco che può estendersi fino a 5-10 volte oltre al disco galattico, contribuendo alla maggior parte della massa di gas freddo.

L'HI (non ionizzato) consiste in un sistema formato da un singolo protone e un singolo elettrone che, interagendo tra loro a causa dei propri momenti di dipolo magnetici intrinseci, producono un'alterazione di energia del sistema emettendo fotoni a una frequenza pari a 1420 MHz, corrispondente a una lunghezza d'onda $\lambda = 21.2$ cm.

Il rilevamento della riga 21 cm è la tecnica principale usata in radioastronomia per ricavare l'HI, in quanto, oltre a fornire informazioni sul redshift e sulla velocità rotazionale del disco galattico, consente di risalire alla massa del gas, permettendo così di rivelare sperimentalmente relazioni di scala tra massa di HI, massa stellare e *Star Formation Rate* (SFR).

Individuare la presenza di HI in oggetti extragalattici non è affatto semplice, dal momento che l'intensità della riga 21 cm è molto debole. Le indagini dirette di HI, come Arcibo Legacy Fast ALFA Survey (ALFALFA, Haynes et al. 2018) in Fig. 1, sono limitate all'Universo locale ($z < 0.06$), mentre per studiare oggetti a redshift maggiori è necessario utilizzare tecniche alternative alla rilevazione diretta, tra cui la tecnica statistica dello stacking spettrale. Essa consiste nel sommare spettri centrati sulla frequenza di riposo della linea spettrale che si vuole individuare per ottenere un segnale al di sopra del livello di rumore.

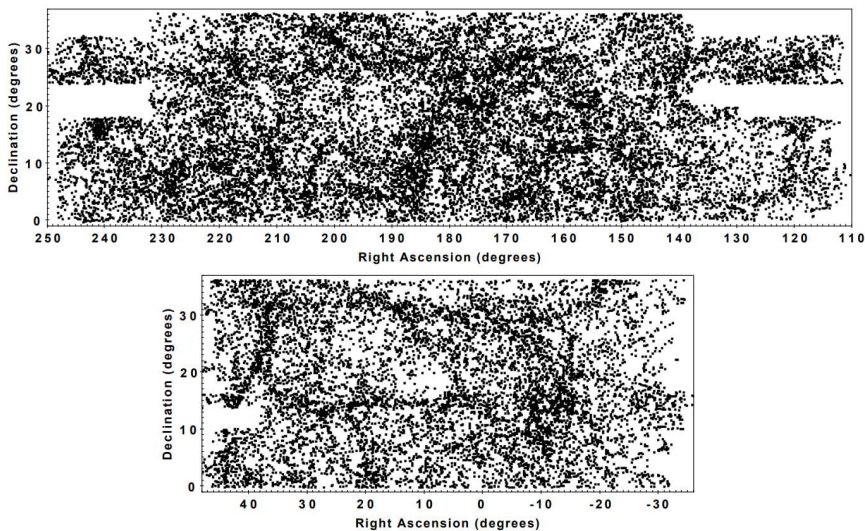


Figura 1: Distribuzione nel cielo delle sorgenti ALFALFA nell'Universo locale ($z \sim 0$) ricavata da Haynes et al. 2018. Mappa dell'emisfero galattico settentrionale (sopra) e meridionale (sotto).

1.1 Scaling relations

Le relazioni di scala dell'HI tra la quantità di massa (M_{HI}) presente e le proprietà fisiche delle galassie, come massa stellare, densità della superficie stellare (stimata dal rapporto bulge-totale), SFR e colore NUV-r (espresso in magnitudini), sono finora state studiate solo per l'Universo locale.

Questi parametri sono molto importanti per aiutarci a tracciare il contenuto di gas HI all'interno delle galassie qualora non fosse possibile ottenere una stima diretta.

1.1.1 Relazioni di scala nell'universo locale ($z \sim 0$)

Per oggetti presenti nell'Universo locale ($0.02 < z < 0.05$), è stato confermato come la frazione di HI ($f_{\text{HI}} = M_{\text{HI}}/M_*$) tenda a decrescere in funzione della massa stellare della galassia e come la densità della superficie stellare, invece, cresca all'aumentare di quest'ultima. Attraverso uno studio più approfondito (T. Brown et al. 2015), si è notato come le informazioni sulla frazione di HI presente varia a seconda dei parametri considerati.

Riassumendo brevemente, si è osservato come galassie di colore simile, nell'Universo locale, contengano in media rapporti analoghi tra gas freddo e massa stellare, mostrando solo una piccola dipendenza dalla massa o dalla morfologia. In altre parole, si afferma che la SFR è la proprietà delle galassie più strettamente correlata al contenuto di HI e inoltre si evidenzia come le principali relazioni di scala tra i parametri sopracitati possano essere comprese come una combinazione del tasso di formazione stellare specifica ($\text{sSFR} = \text{SFR}/M_*$).

Le galassie di massa bassa o intermedia tendono a essere più blu e ad avere formazione stellare attiva, mentre le galassie più massicce o dominate dal bulge sono in media più quiescenti (Fig. 2a). Questo significa che, tra due differenti campioni, le relazioni tra f_{HI} -massa stellare e f_{HI} -densità di superficie stellare sono dipendenti dalla variazione di sSFR. A un valore fissato di colore NUV-r, le galassie ad alta massa hanno una frazione di HI inferiore rispetto a quelle con bassa massa (Fig. 2b). Se si considera NUV-r equivalente alla sSFR, galassie massive e dominate dal bulge hanno percentuale inferiore di f_{HI} rispetto a galassie a bassa massa e dominate dal disco. Segue che le galassie a grande massa sono più efficienti nel consumare gas per la formazione di nuovi sistemi stellari rispetto alla loro controparte di massa inferiore.

Un recente studio (Rhee et al. 2022), tramite la tecnica di stacking spettrale su oggetti a $0.04 < z < 0.09$, afferma la presenza di tali correlazioni tra colore ottico delle galassie e le proprietà del gas HI. Dai risultati si evince un netto comportamento bimodale delle sorgenti: per le galassie blu, ad alta SFR, si rileva un forte segnale di HI, mentre per le galassie rosse passive questo non si verifica nonostante un'ampia statistica di oggetti analizzati (Fig. 3).

Tuttavia esistono esempi di galassie early type nell'Universo locale in cui è stata rilevata presenza di HI, riportate ad esempio nel lavoro di Serra et al. 2012 in Fig. 4.

1.1.2 Relazioni di scala a $z > 0.2$

Da studi condotti su galassie a $z > 0.2$ (Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022), in particolare per galassie blu ad alta formazione stellare (dette anche star-forming) a $z \sim 0.37$, si è trovata un'evoluzione moderata, ma non significativa, delle relazioni di scala per $\log_{10}(M_{\text{HI}}) - \log_{10}(M_*)$ e $\log_{10}(f_{\text{HI}}) - \log_{10}(M_*)$ per galassie ad alta massa stellare, il che implica la necessità di un efficace meccanismo di rifornimento di HI. In particolare le relazioni $\log_{10}(M_{\text{HI}}) - \log_{10}(\text{SFR})$ e $\log_{10}(f_{\text{HI}}) - \log_{10}(\text{sSFR})$ dimostrano

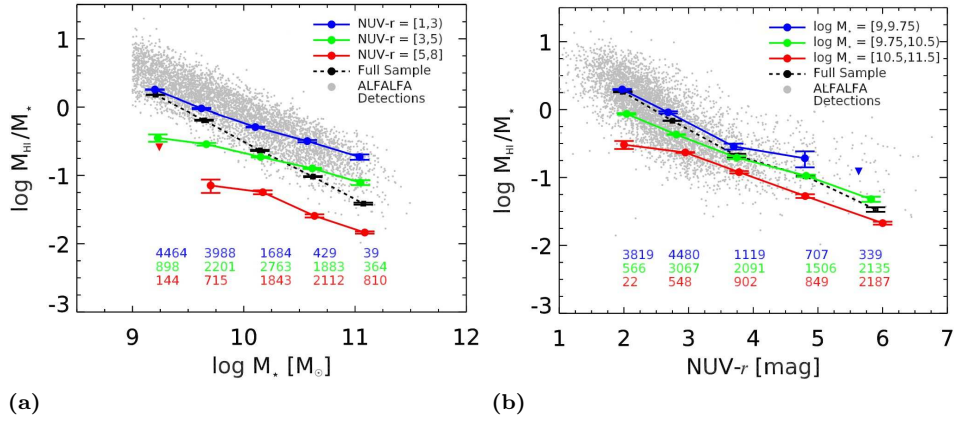


Figura 2: A sinistra (2a): relazione tra f_{HI} e massa stellare M_* , separati in bin di colore NUV-r bassi (blu), intermedi (verde) e alti (rosso), come indicato nella legenda in alto. A destra (2b): relazione tra f_{HI} e colore NUV-r, separati in bin di massa bassi (blu), intermedi (verde) e alti (rosso), simile alla figura (2a). In entrambe le figure, i punti grigi rappresentano le singole rilevazioni del catalogo ALFALFA (Haynes et al. 2018) e i numeri al di sotto indicano il numero di galassie sommate in ogni bin. Infine le linee nere tratteggiate mostrano le relazioni di scala per l'intero campione. (T. Brown et al. 2015)

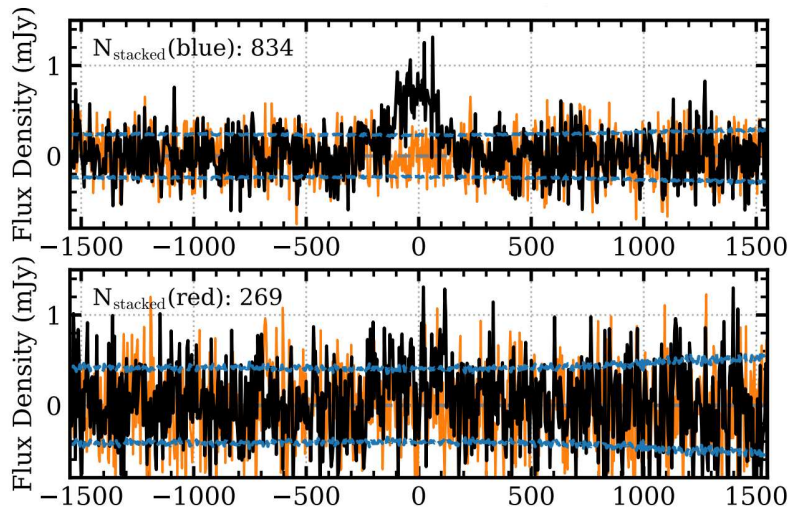


Figura 3: Sopra: spettro sommato per galassie blu. Sotto: spettro sommato per le galassie rosse.

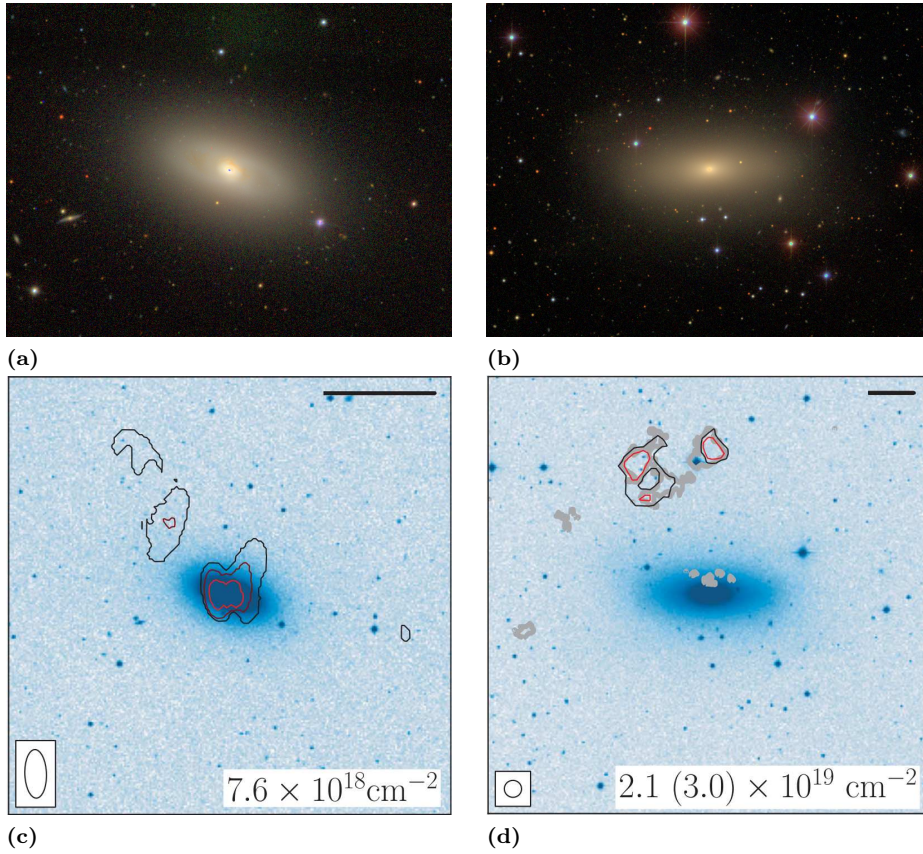


Figura 4: Immagini di due galassie ellittiche ricche di HI presenti nell'Universo locale. In alto a sinistra NGC 3489 (4a) e in alto a destra NGC 2768 (4b). Entrambe sono state osservate dal telescopio SDSS in banda ottica (NASA/IPAC Extragalactic Database). Sotto la loro rispettiva configurazione di HI. (Serra et al. 2012)

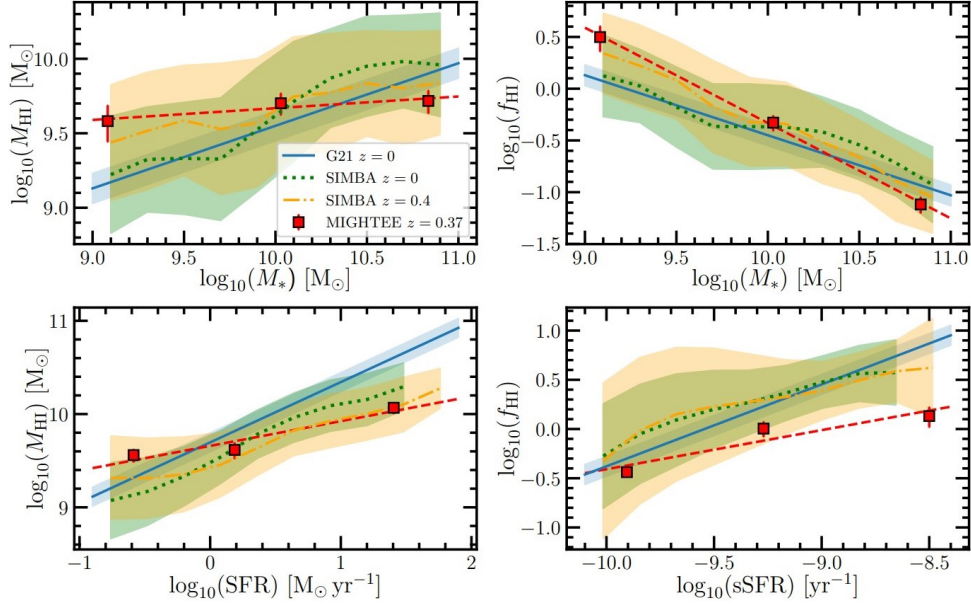


Figura 5: HI *scaling relations* per galassie star-forming (Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022): I quadrati rossi corrispondono ai risultati ottenuti tramite la procedura di stacking spettrale su galassie a redshift medio $z \sim 0.37$ mentre la linea rossa tratteggiata corrisponde al fit dei dati. La linea blu corrisponde ai risultati per $z \sim 0$ mentre le linee tratteggiate verdi e gialle corrispondono alle simulazioni SIMBA per $z = 0$ e $z = 0.4$.

come le galassie ad alta formazione stellare, a valore di M_{HI} fissato, evolvano in modo significativo in funzione del SFR (e sSFR), mentre per le galassie meno star-forming l'evoluzione è più mite.

Dalla Fig. 5 si può notare come per entrambi i valori di redshift $z \sim 0$ e $z \sim 0.37$ nella relazione $\log_{10}(M_{\text{HI}}) - \log_{10}(M_*)$ si osserva una normalizzazione simile tra le due interpolazioni attorno al valore $\log_{10}(M_*/M_{\odot}) \sim 10.3$ ma diverse pendenze; la relazione a $z = 0$ è più pendente rispetto a quella a $z \sim 0.37$. In altre parole si afferma che galassie a basso contenuto di massa stellare ($\log_{10}(M_*/M_{\odot}) \sim 9$) sono più ricche di HI per un ordine di 0.5 dex^1 a $z \sim 0.37$ rispetto a $z \sim 0$, mentre le galassie massicce ($\log_{10}(M_*/M_{\odot}) \sim 11$) convergono a una quantità simile di HI con un ordine di differenza pari a 0.25 dex . Lo stesso risultato lo si può osservare nella relazione $\log_{10}(f_{\text{HI}}) - \log_{10}(M_*)$. In termini di formazione stellare, la SFR dimostra una relazione con M_{HI} più accentuata per sorgenti a $z \sim 0$ rispetto a redshift maggiori. Infatti, mentre per $z = 0$ la relazione è direttamente proporzionale, galassie aventi $\log_{10}(\text{SFR}/(M_{\odot}\text{yr}^{-1})) < 0.5$ non presentano nessuna evoluzione in M_{HI} mentre galassie con $\log_{10}(\text{SFR}/(M_{\odot}\text{yr}^{-1})) > 0.5$ mostrano un eccesso di M_{HI} fino a $\sim 0.5 \text{ dex}$ in $\log_{10}(M_{\text{HI}})$ a valore fissato di $\log_{10}(\text{SFR}/(M_{\odot}\text{yr}^{-1})) \sim 1.4$. Infine, le relazioni $f_{\text{HI}} - \text{sSFR}$ a $z \sim 0$ e $z \sim 0.37$ convergono a $\log_{10}(\text{sSFR}/\text{yr}^{-1}) \sim -10.0$, mentre le galassie a $z \sim 0.37$ hanno f_{HI} sistematicamente più piccolo rispetto a $z \sim 0$ fino a $\sim 0.8 \text{ dex}$.

In questo lavoro viene adottato l'approccio dello stacking spettrale su dati interferometrici relativi a galassie passive a redshift $0.23 < z < 0.49$ per determinare relazioni di scala tra la massa stellare (M_*), massa di HI (M_{HI}), *Star Formation Rate* (SFR) e la loro rispettiva evoluzione. In particolare andremo a confrontare i nostri risultati

¹ordine di grandezza: una differenza di $x \text{ dex}$ è una variazione di un fattore di 10^x

con quelli ottenuti dal lavoro di Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022 in Sec. 1.1, svolto su galassie star-forming nel medesimo range di redshift. Si è scoperto infatti come queste ultime presentino una leggera evoluzione delle loro relazioni di scala; in particolare si è notato come galassie a bassa M_* , intorno a $z \sim 0.37$, abbiano esaurito la loro riserva di HI negli ultimi 4 Gyr e che il tempo di esaurimento dell'HI ($\tau_{\text{dep,HI}} = M_{\text{HI}}/\text{SFR}$), dovuto alla formazione stellare, sia sull'ordine dei ~ 15 Gyr, ciò suggerisce che siano in atto altri processi oltre alla formazione stellare, che determinano il contenuto di gas osservato.

D'altra parte, per le galassie massicce, si è evidenziato un efficiente rifornimento del contenuto di HI all'interno dei loro dischi, contrastando il consumo di HI dovuto alla produzione di nuove stelle. Assumendo che la produzione di H_2 e la SFR siano in equilibrio e che il tempo di bruciamento dell'idrogeno molecolare ($\tau_{\text{dep,H}_2} = M_{\text{H}_2}/\text{SFR}$) sia inferiore a 1 Gyr, deve esistere un meccanismo, non ancora ben noto, che alimenta la produzione di HI nelle galassie massicce, fenomeno derivato da $\tau_{\text{dep,HI}} \sim 1 - 1.2$ Gyr in tali oggetti.

Le simulazioni indicherebbero che la maggior parte dell'HI presente nell'universo a $z < 0.5$ sia contenuto all'interno dei dischi galattici e che tale aumento non sia dovuto ad accrescimenti cosmologici, come osservato per alti valori di z , ma tramite processi di fusione tra galassie (*merging*), suggerendo l'aggregazione come principale meccanismo di trasferimento dell'HI. Questa ipotesi potrebbe spiegare così l'elevata presenza di HI all'interno di sistemi ad alta massa.

Tuttavia, il rifornimento di HI nelle galassie massicce non è in grado di procurare abbastanza gas per sostenere completamente la formazione stellare e quindi si osserva una corrispondente diminuzione della SFR. Si ipotizza che la ragione principale sia dovuta al fatto che l'HI si accresca nella parte esterna del disco e impieghi un tempo significativo, a causa del momento angolare, per migrare verso la regione interna dove avvengono principalmente i processi di formazione stellare.

2 Dati MIGHTEE

In questo lavoro sono stati utilizzati i dati radio provenienti dal catalogo MIGHTEE, in particolare i dati di Early Science HI (MIGHTEE-HI, Maddox et al. 2021), che coprono il campo di COSMOS, e i dati spettroscopici provenienti dal catalogo hCOSMOS (Damjanov et al. 2018), sui quali è stato applicato lo stacking spettrale.

MeerKAT International GigaHertz Tiered Extragalactic Exploration Large Survey Program (MIGHTEE) è una survey condotta tramite il radiotelescopio MeerKAT che ricopre quattro campi extragalattici profondi (COSMOS, XMM-LSS, ECDFS, ELAIS) e caratterizzata da una grande quantità di dati a più lunghezze d’onda.

MeerKAT è un radiotelescopio che consiste in 64 antenne collocate nel deserto del Karoo in Sud Africa ed è uno dei quattro precursori del progetto finale SKA (*Square Kilometre Array*). Ogni antenna ha forma di parabola gregoriana sfalsata con disco riflettore principale da 13.5 m di diametro e da un disco sotto-riflettore dal diametro di 3.8 m, sono dotate di ricevitori in banda UHF ($580 < \nu < 1015$ MHz), banda L ($900 < \nu < 1670$ MHz), e banda S ($1750 < \nu < 3500$ MHz).

MIGHTEE, oltre a studiare le proprietà dei campi magnetici cosmici e il loro sviluppo in ammassi e galassie, è stato concepito per migliorare la comprensione sull’evoluzione e attività dei nuclei galattici attivi (AGN) nel tempo cosmico. Inoltre, viene utilizzato per apprendere l’evoluzione dell’HI nell’Universo e come questo si trasformi in stelle dopo aver attraversato la fase molecolare.

In questo lavoro sono stati utilizzati i dati di MIGHTEE-HI (Maddox et al. 2021), sotto campione di MIGHTEE incentrato nel rilevamento dell’HI. I dati sono stati ottenuti ponendo come intervallo di frequenza 900–1420 MHz e con risoluzione angolare di 12 arcsec, all’interno di un volume cosmologico di 32 deg^2 e redshift $0 < z < 0.58$ pari a 0.033 Gpc^3 . Per svolgere l’indagine, unicamente sul campo di interesse di COSMOS, sono stati considerati i dati all’interno di 12 deg^2 e con coordinate in ascensione retta (RA) e in declinazione (DEC) rispettivamente intorno a ~ 150 e ~ 2 gradi. I dati raccolti sono stati osservati con risoluzione spaziale di $\sim 210 \text{ KHz}$, corrispondente a $\sim 45 \text{ km s}^{-1}$ per $z = 0$ e $\sim 55 \text{ km s}^{-1}$ per $z \sim 0.5$.

3 Selezione del campione e analisi dati

Come riportato in Sec. 1.1.1, si è visto come per l’Universo locale ($z < 0.1$) l’HI sia principalmente contenuto all’interno di galassie blu star-forming, mentre in galassie rosse passive non vi sia alcuna traccia di segnale (Rhee et al. 2022). Stesso risultato è osservato anche all’interno dei dati di MIGHTEE per redshift maggiori di $z > 0.2$ (private communication, F. Sinigaglia). All’interno di queste ultime però vi sono oggetti con forte presenza di polveri, ciò è interessante in quanto le galassie rosse e passive hanno la caratteristica di aver consumato tutto il loro gas durante la fase di formazione stellare.

In questo lavoro, dunque, analizzeremo un campione di questi oggetti rossi peculiari fornito privatamente da Darko Donevski, selezionati in modo da ottenere una detection nel lontano infrarosso in quanto ricchi di polvere.

Il fine della nostra analisi consiste quindi nell’explorare la relazione tra M_{HI} e M_* in questa classe di galassie, in modo da confrontarle con i risultati ottenuti da Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022 in Fig. 5 dallo stacking su galassie blue star-forming situate al medesimo redshift.

3.1 Catalogo hCOSMOS

Il campione da noi utilizzato è una porzione di oggetti presenti all'interno del catalogo hCOSMOS (Damjanov et al. 2018), che consiste in una survey condotta tramite lo spettrografo a multifibre (300 fibre ottiche e campo di vista di $\sim 1 \text{ deg}^2$) MMT Hectospec sul campo profondo COSMOS. Un sottoinsieme dell'indagine, hCOS20.6, comprende 1968 galassie, pari al 90% degli oggetti totali presenti nella zona centrale a 0.89 deg^2 e con redshift tra $0.01 < z < 0.6$ per un valore medio $\bar{z} = 0.27$.

Nel lavoro di Damjanov et al. 2018 è stato calcolato il parametro D_n4000 , indice spettrale definito come il rapporto tra il flusso misurato tra $3850\text{-}3950 \text{ \AA}$ e $4000\text{-}4100 \text{ \AA}$, utilizzato come stimatore per l'età delle galassie. Questo indice spettrale misura la forza del salto a 4000 \AA prodotta da un gran numero di linee di assorbimento, dove i metalli sono la principale causa di questa opacità. Si è visto infatti che nelle stelle più giovani e calde gli elementi metallici sono ionizzati più volte e vanno diminuendo l'opacità delle linee. Pertanto la forza del salto a 4000 \AA è minore per i sistemi dominati da popolazioni stellari giovani e aumenta con l'età della popolazione stellare. Le indagini spettroscopiche dimostrano che la distribuzione dell'indice D_n4000 è fortemente bimodale, con una netta divisione attorno al valore ~ 1.50 che suddivide i campioni in galassie star-forming ($D_n4000 < 1.50$) e galassie passive ($D_n4000 > 1.50$).

In questo lavoro è stato utilizzato il catalogo hCOSMOS per le informazioni spettroscopiche e i datacubo di MIGHTEE per i dati radio. Dal campione fornito privatamente da Darko Donevski, sono state selezionate un totale di 992 galassie (Fig. 6) con valore di $D_n4000 > 1.50$.

Riassumiamo brevemente come il catalogo è strutturato:

- ID NUMBER: codice identificativo della galassia campionata;
- RA: ascensione retta espressa in gradi;
- DEC: declinazione espressa in gradi;
- z: redshift spettroscopico;
- D_n4000 : indice di età spettrale basato sulle misure MMT di Hectospec;
- $\log M_*$: logaritmo in base 10 del valore della massa stellare;
- Type: classificazione morfologica (Tasca et al. 2009). Il valore 1 indica galassie *early-type*, 2 galassie a spirale mentre 3 indica galassie irregolari;
- IR detected: parametro che indica galassie senza rilevamento di polvere dal deblending delle sorgenti (se il valore è 1, la galassia viene considerata polverosa in base a rilevamenti con $S/N > 3$ in almeno 3 bande dell'infrarosso);
- Sersic Index: basato sul catalogo morfologico di Zurigo (Tasca et al. 2009);
- MNUV_MR: indicatore di colore corretto per l'estinzione della polvere;

3.2 Stacking

Il rilevamento diretto di HI è limitato a redshift molto bassi ($z < 0.15$) a causa della debolezza intrinseca della riga a 21 cm e dalla limitata sensibilità dei radiotelescopi. Per ovviare al problema una tecnica comunemente utilizzata è lo stacking spettrale.

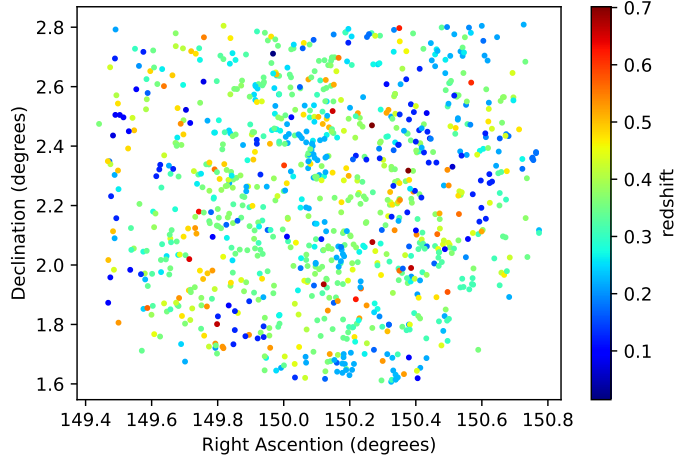


Figura 6: Distribuzione spaziale delle galassie del campione analizzato all'interno della footprint. In ascissa e ordinata sono presenti rispettivamente le coordinate delle sorgenti in ascensione retta (RA) e declinazione (DEC) espresse in gradi. Il colore indica il valore del redshift di ogni oggetto

Questa tecnica consiste nel sommare uno sopra l'altro vari spettri centrati nella rispettiva frequenza di riposo, nei quali non inizialmente non vi è traccia di segnale, per ottenere alla fine un segnale al di sopra del livello di rumore.

L'analisi di stacking è stata eseguita utilizzando una procedura standard di stacking spettrale. Ogni spettro di HI non rilevato singolarmente è ottenuto con una integrazione spaziale sulle coordinate angolari di un dato di dimensione $n \times n \times s$ voxels (controparte tridimensionale del pixel bidimensionale) in corrispondenza del redshift e delle coordinate ottiche della galassia campione.

Nel nostro caso abbiamo preso come valori di n e s rispettivamente $3\sigma_{beam}^2$ e $[-1500, 1500]$ km s^{-1} , in modo da riuscire a inglobare il flusso totale emesso e limitandoci così solo al problema di sottrarre un possibile eccesso o difetto di flusso da parte di sorgenti vicine.

Successivamente ogni spettro osservato alla frequenza ν_{obs} viene ricollocato alla propria frequenza a riposo ν_0 attraverso l'equazione del redshift cosmologico

$$\nu_0 = \nu_{obs}(1 + z)$$

e convertito in unità di velocità non relativistica tramite $v/c = z$.

In seguito ogni spettro viene ricampionato seguendo un modello di riferimento in modo tale che essi vengano suddivisi equamente lungo la direzione spettrale.

Convertiamo lo spettro ottenuto da unità di flusso a unità di massa secondo la relazione

$$M_{\text{HI}}(v) = (2.356 \cdot 10^5) D_L^2 S(v) (1 + z)^{-1} M_{\odot} \text{ km s}^{-1} \quad (1)$$

dove D_L è la distanza di luminosità espressa in Mpc, $S(v)$ è la densità spettrale di flusso della riga 21 cm espressa in Jansky (Jz) e $(1 + z)^{-1}$ è un fattore di correzione per la riduzione di flusso dovuto all'espansione dell'universo.

Infine è possibile sommare gli spettri e ottenere un valore della massa media di HI in funzione della frequenza

$$\langle M_{\text{HI}}(v) \rangle = \frac{\sum_{i=0}^{n_{gal}} M_{\text{HI},i}(v) \times w_i \times f_i}{\sum_{i=0}^{n_{gal}} w_i \times f_i^2} \quad (2)$$

² σ_{beam} : in interferometria corrisponde alla *point spread function* (PSF)

dove n_{gal} è il numero di spettri sommati mentre f_i e w_i sono la trasmissione media del *primary beam* e il peso assegnato a ciascuna sorgente. Nel nostro caso, utilizzando la procedura standard per lo stacking, poniamo $w_i = 1$ e $\sum_i w_i = n_{gal}$.

Per esaminare la validità del segnale, generiamo un ulteriore spettro di riferimento ottenuto dalla somma degli spettri del rumore di ogni galassia. Partendo da un sottocubo con centro definito, aggiungiamo un valore fissato (100") di traslazione angolare al centro del datacubo della galassia lungo una direzione casuale e definito sullo stesso intervallo spettrale della galassia in questione. Il valore dello sfasamento angolare è opportunamente scelto per garantire che lo spettro di riferimento sia estratto vicino allo spettro della galassia e che non abbia sovrapposizioni con altre galassie conosciute; in tal caso viene scartato e tracciato uno nuovo. In questo modo si costruisce uno spettro di riferimento che rappresenta l'ipotesi nulla per dimostrare che qualsiasi rilevamento ottenuto con lo stacking non sia dovuto a segnali di rumore.

L'incertezza del livello di rumore 1σ viene valutata calcolando la radice quadrata media (rms) dei canali rumorosi dello spettro sovrapposto (σ_{rms}), ossia i canali al di fuori dell'intervallo spettrale integrato per calcolare M_{HI} . Questo ci permette di stimare il valore del segnale-rumore dello spettro finale come

$$SNR = \sum_i^{N_{ch}} \frac{\langle S_i \rangle}{\sigma_{rms} \sqrt{N_{ch}}} \quad (3)$$

dove $\langle S_i \rangle$ è lo spettro sovrapposto e N_{ch} è il numero dei canali integrati.

Per stimare l'incertezza sul valore della massa di HI ottenuta viene applicato il metodo *jackknife resampling* al campione di galassie, noto per produrre una stima quasi imparziale degli errori quadratici medi, e successivamente viene eliminata una galassia per volta eseguendo lo stacking sopra ogni sub-campione. Partendo dalla media aritmetica per un insieme di valori x_j

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j$$

ottenuta eliminando l'elemento i -esimo e da

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i$$

l'errore è calcolato come la varianza della distribuzione di \bar{x}_i

$$\sigma^2 = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{x})^2$$

dove n indica la dimensione dell'insieme dei sottocampioni.

Per eliminare il problema della contaminazione di flusso da parte di sorgenti vicine viene utilizzata una simulazione di dati basati su SKA Simulated Skies semi-analytic simulations (S³-SAX), eguagliando l'angolo e la grandezza spettrale alle nostre osservazioni. In seguito viene decomposto lo spettro estratto per ogni galassia selezionata in contributi dallo spettro stesso e in contributi da parte di galassie vicine contaminanti. In questo modo è stato possibile calcolare con precisione il livello di contaminazione, pari al 10% in tutti i casi studiati, e di conseguenza sottrarre un contributo fisso del 10% dall'output $\langle M_{HI} \rangle$ dallo stacking.

Per determinare il valore del SNR sono usati due metodi differenti:

- massima densità di flusso (picco) rispetto al rumore

$$SNR_{\text{peak}} = S_{\text{max}}/\sigma_{\text{rms}} \quad (4)$$

dove S_{max} e σ_{rms} corrispondono rispettivamente alla densità del picco di flusso massimo dello spettro sommato, che nel nostro caso corrisponde al valore massimo di massa misurata, e rms dei canali rumorosi.

- SNR integrato

$$SNR_{\text{int}} = \frac{\sum_i^{N_{ch}} S_i \Delta v}{\sigma_{\text{rms}} \Delta v \sqrt{N_{ch}}} \quad (5)$$

dove N_{ch} , S_i e Δv sono rispettivamente i numeri delle velocità dei canali sommati, la densità massima di flusso espressa in massa corrispondente al canali i , e la larghezza dei canali di velocità (ipotizzata come costante).

Useremo SNR_{peak} per quantificare il significato statistico del profilo di linea ottenuto come deviazione dalla linea base del rumore. Funge da buona stima per il valore del SNR solamente nel caso in cui lo spettro sommato si estenda su un intervallo di velocità ristretto e con profilo gaussiano. Negli altri casi, dove la linea è allargata dal redshift e la forma risultante è più complessa, ci affidiamo a SNR_{int} per ottenere una stima dell'SNR che sia sensibile a tutti i canali in cui viene rilevata l'emissione HI e non solo al picco dello spettro.

3.3 Analisi dati

In questa sezione andremo ad approfondire lo studio basato sul campione estratto dal catalogo hCOSMOS (Damjanov et al. 2018) per galassie con $D_n4000 > 1.50$ e selezionando gli oggetti compresi tra $0.23 < z < 0.49$, ottenendo un totale di 659 galassie. Per prima cosa è stato generato uno stack globale sul campione di galassie (Fig. 7), rilevando un forte segnale di M_{HI} in analogo ai risultati di Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022 per galassie star-forming al medesimo range di redshift. È possibile confrontare i risultati in Fig. 7 e nella Tab. 1.

Da questa conferma, andremo a svolgere un'analisi più dettagliata in modo da indi-

Galassie sommate	659
Massa media di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	1.60
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	0.18
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_{\odot})	10.20
SNR al picco	2.99
SNR integrato	6.13

Tabella 1: Dati ricavati dallo stacking delle 659 sorgenti collocate $0.23 < z < 0.49$.

viduare la popolazione di galassie (valore di D_n4000 , $\log M_*$ e tipologia morfologica) che presenta tale abbondanza di HI e la confronteremo con le scaling relations per le galassie blu star-forming.

L'analisi è stata condotta applicando la procedura di stacking, suddividendo i dati prima in bin di D_n4000 e successivamente in bin di $\log_{10} M_*$. Per entrambi i parametri sono stati svolti diversi test scegliendo arbitrariamente l'ampiezza dei bin in modo da identificare l'intervallo al cui interno è possibile osservare uno spettro di emissione.

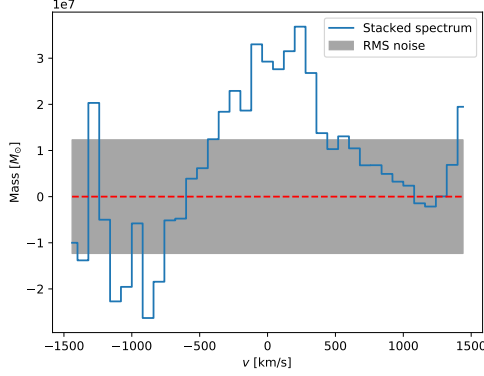


Figura 7: Spettro dell'HI ottenuto dal procedimento di stacking applicato al campione di 659 galassie a $0.23 < z < 0.49$. La linea solida blu mostra lo spettro sommato, mentre l'area grigia corrisponde al valore di σ_{rms} .

3.3.1 Dn4000

In Fig. 8 vengono riportate le distribuzioni degli oggetti selezionati tra $0.23 < z < 0.49$ in valori di D_n4000 . Si può notare un forte andamento decrescente del numero di oggetti al crescere del valore dell'indice di età spettrale. I grafici in Fig. 8 sono stati usati per valutare una prima stima della suddivisione dei campioni in bin di D_n4000 .

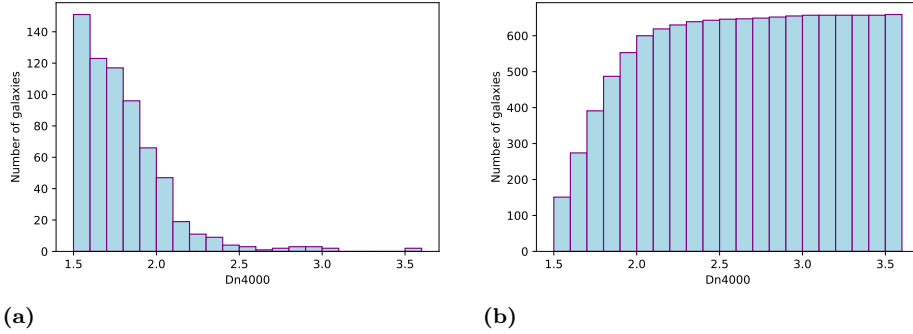


Figura 8: In Fig. 8a è riportato l'istogramma in bin di D_n4000 di tutti gli oggetti a redshift $0.23 < z < 0.49$. In Fig. 8b è rappresentato il rispettivo istogramma cumulativo.

Dn4000 - Test 1

In questa prima analisi i 659 oggetti sono stati suddivisi in bin di $\Delta D_n4000 = 0.30$ a partire da $D_n4000 = 1.50$ fino a $D_n4000 = 2.39$. Gli oggetti rimanenti tra $D_n4000 = 2.40$ e $D_n4000 = 3.60$ invece sono stati compresi in un unico bin in modo da lavorare con un numero di campioni sufficiente alto per applicare l'analisi di stacking. Si è ottenuto un totale di 4 spettri distinti con relativa stima della massa di HI.

Dalla Fig. 9 si può notare la presenza di un forte segnale nello spettro in Fig. 9a, mentre le informazioni diminuiscono a valori sempre più grandi di D_n4000 . In particolare nello spettro in Fig. 9c, viene calcolata una massa negativa a causa di fluttuazioni del rumore e di conseguenza è impossibile calcolarne il logaritmo; in questo caso sappiamo direttamente che non viene rilevata presenza di HI.

I risultati ottenuti si possono consultare nella Tab. 2.

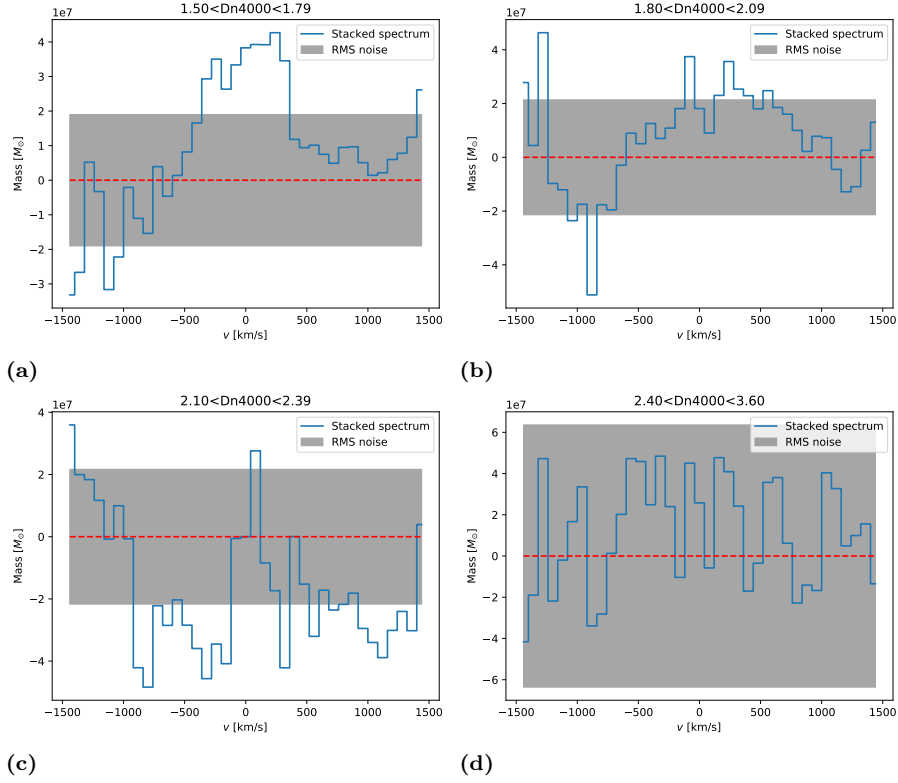


Figura 9: Grafici ottenuti nel Test 1 dalla somma di spettri in diversi intervalli di D_n4000 . I colori sono analoghi alla Fig. 7.

ΔD_n4000	1.50 - 1.79	1.80 - 2.09	2.10 - 2.39	2.40 - 3.60
Galassie sommate	391	209	39	20
Massa media di HI ($10^{10}M_\odot$)	2.03	1.22	-5.93	1.34
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_\odot$)	0.26	0.23	0.61	0.56
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_\odot)	10.31	10.09	null	10.13
SNR al picco	2.25	2.17	1.66	0.76
SNR integrato	5.05	2.69	-1.29	0.99

Tabella 2: Dati ricavati dal Test 1 in bin di D_n4000 relativi alla Fig. 9.

Dn4000 - Test 2

Viene ripetuta la procedura svolta nel primo test ma utilizzando bin di $\Delta D_n4000 = 0.10$. In questa seconda analisi suddividiamo ulteriormente il campione in bin piú specifici in quanto è stato rilevato un forte segnale tra $1.50 < D_n4000 < 2.10$ nel test precedente. Uniamo in un unico bin invece i valori tra $2.10 < D_n4000 < 3.60$ per aumentare la statistica del segnale.

Si può notare un picco nello spettro in Fig. 10c, il quale rientra all'interno del segnale in Fig. 9a, e di conseguenza possiamo considerare l'intervallo $1.70 < D_n4000 < 1.79$ come una popolazione di galassie in cui è presente una forte quantità di M_{HI} .

ΔD_n4000	1.50 - 1.59	1.60 - 1.69	1.70 - 1.79	1.80 - 1.89
Galassie sommate	151	123	117	96
Massa media di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	0.64	2.58	3.26	0.65
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	0.22	0.32	0.59	0.31
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_{\odot})	9.80	10.41	10.51	9.81
SNR al picco	2.13	2.10	4.01	1.35
SNR integrato	1.73	4.46	7.55	1.27
ΔD_n4000	1.90 - 1.99	2.00 - 2.09	2.10 - 3.60	
Galassie sommate	66	47	59	
Massa media di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	2.08	1.17	0.06	
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	0.54	0.42	0.43	
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_{\odot})	9.80	10.07	8.79	
SNR al picco	2.58	1.37	1.02	
SNR integrato	2.72	1.20	0.11	

Tabella 3: Dati ricavati dal Test 2 in bin di D_n4000 relativi alla Fig. 10.

3.3.2 Stellar mass

Nello studio condotto sul parametro D_n4000 è stato rilevato un picco di segnale in corrispondenza $1.70 < D_n4000 < 1.79$. Procediamo ora analizzando il catalogo dividendolo in bin di massa. In Fig. 11 vengono riportate le distribuzioni degli oggetti selezionati tra $0.23 < z < 0.49$ in valori di $\log_{10}M_*$. Dai grafici si può notare una concentrazione di galassie attorno al valore $\log_{10}M_* \sim 11.0$. Procederemo analizzando gli oggetti nello stesso metodo usato nella Sec. 3.3.1 verificando la presenza di un segnale di HI attorno a tale valore.

Stellar mass - Test 1

Le 659 galassie sono state suddivise in tre intervalli partendo da $\log_{10}M_* = 10.00$ fino a $\log_{10}M_* = 11.50$ per avere un numero sufficientemente alto di oggetti per applicare lo stacking. Procediamo come in Sec. 3.3.1 ottenendo un totale 3 spettri distinti con relativa stima della massa di HI.

Dai grafici si può notare la presenza di un forte segnale in Fig. 12b corrispondente all'intervallo con maggior numero di galassie.

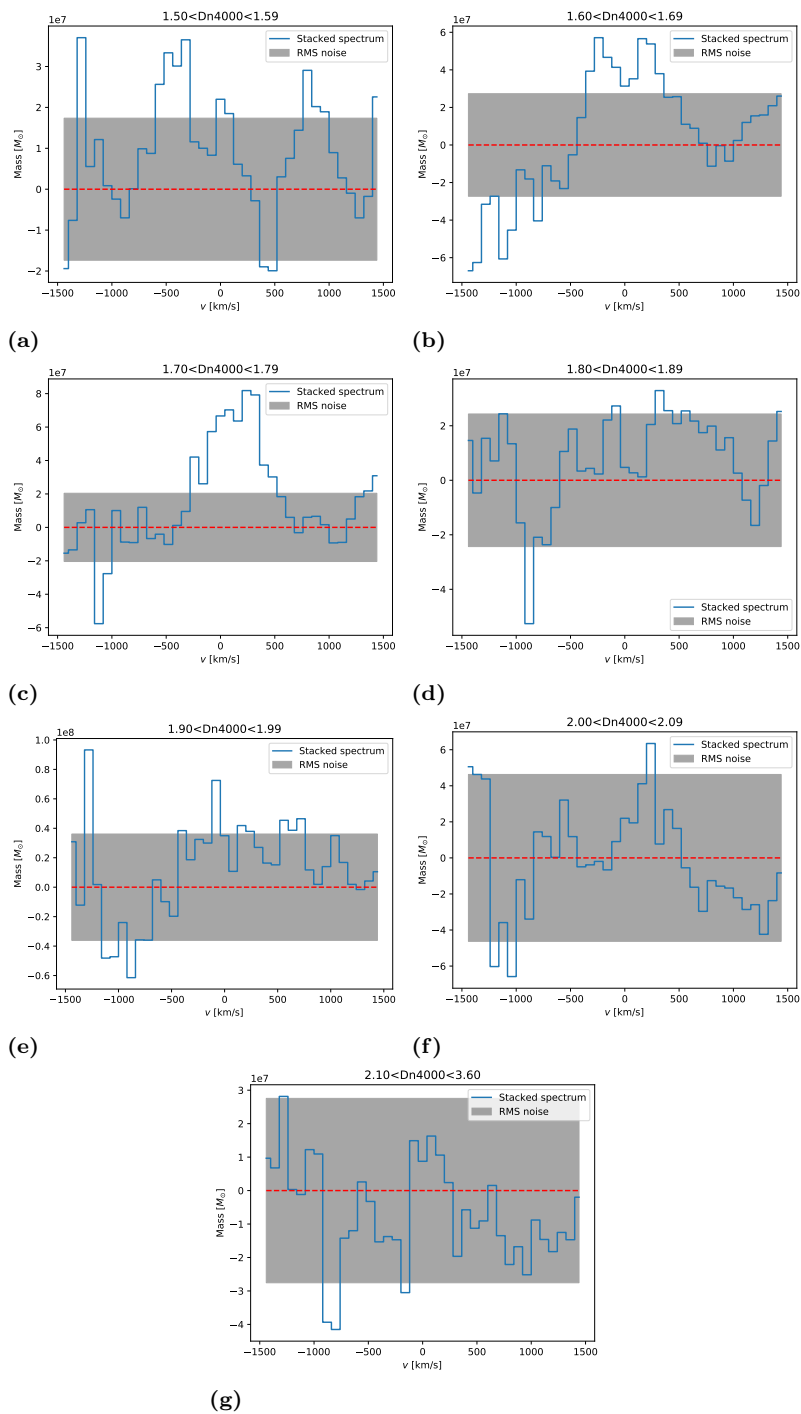
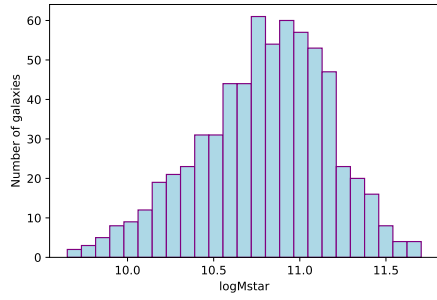
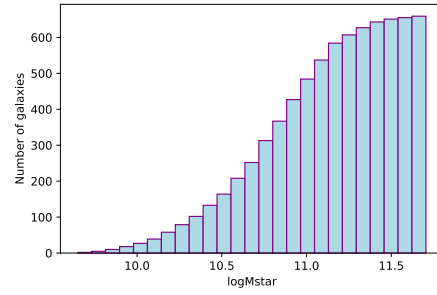


Figura 10: Grafici ottenuti nel Test 2 dalla somma di spettri in diversi intervalli di D_n4000 . I colori sono analoghi alla Fig. 7.

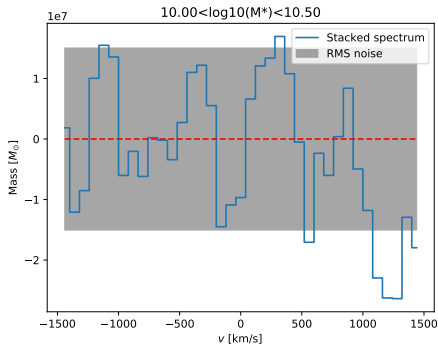


(a)

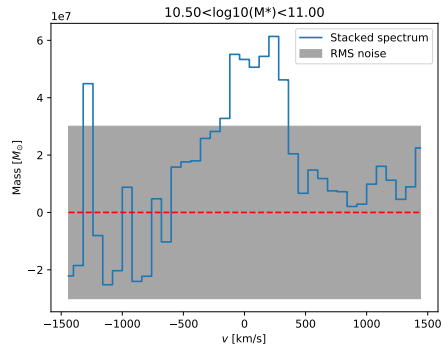


(b)

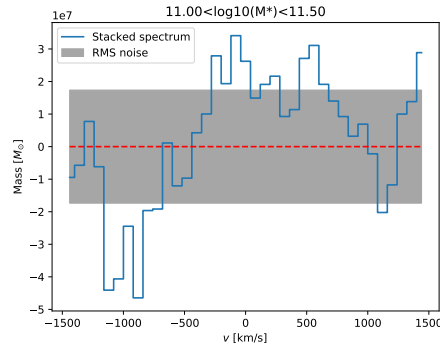
Figura 11: In Fig. 11a è riportato l'istogramma in bin di $\log_{10}M_*$ di tutti gli oggetti a redshift $0.23 < z < 0.49$. In Fig. 11b è rappresentato il rispettivo istogramma cumulativo.



(a)



(b)



(c)

Figura 12: Grafici ottenuti nel Test 1 dalla somma di spettri in diversi intervalli di $\log_{10}M_*$. I colori sono analoghi alla Fig. 7.

$\Delta\log M_*$	10.00 - 10.50	10.50 - 11.00	11.00 - 11.50
Galassie sommate	122	304	200
Massa media di HI ($10^{10}M_\odot$)	0.02	2.69	1.30
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_\odot$)	0.20	0.25	0.28
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_\odot)	8.31	10.43	10.16
SNR al picco	1.13	2.04	1.96
SNR integrato	0.06	4.22	3.55

Tabella 4: Dati ricavati dal Test 1 in bin di $\log_{10}M_*$ relativi alla Fig. 12.

Stellar mass - Test 2

Procediamo nuovamente suddividendo questa volta in intervalli di $\Delta\log_{10}M_* = 0.25$ per ottenere una stima più precisa. Vengono generati così 6 diversi spettri. Si nota un forte segnale nello spettro per $10.75 < \log_{10}M_* < 11.00$ (Fig. 13d), coerente con il risultato ottenuto nel test precedente.

$\Delta\log_{10}M_*$	10.00 - 10.25	10.25 - 10.50	10.50 - 10.75
Galassie sommate	44	78	126
Massa media di HI ($10^{10}M_\odot$)	-0.70	0.42	1.81
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_\odot$)	0.41	0.21	0.32
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_\odot)	null	9.63	10.26
SNR al picco	0.87	1.86	1.60
SNR integrato	-1.04	1.09	3.27
$\Delta\log_{10}M_*$	10.75 - 11.00	11.00 - 11.25	11.25 - 11.50
Galassie sommate	178	151	49
Massa media di HI ($10^{10}M_\odot$)	3.31	1.33	1.22
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_\odot$)	0.30	0.32	0.62
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_\odot)	10.52	10.13	10.09
SNR al picco	2.27	1.39	0.88
SNR integrato	4.92	2.83	0.74

Tabella 5: Dati ricavati dal Test 2 in bin di $\log_{10}M_*$ relativi alla Fig. 13.

3.3.3 Dn4000 e stellar mass

Si è registrata dunque la presenza di un segnale di HI in Fig. 10c e in Fig. 13d. Dunque procediamo andando a selezionare gli oggetti compresi tra i valori $1.70 < D_n4000 < 1.79$ e $10.75 < \log_{10}M_* < 11.00$ e applichiamo nuovamente l'analisi di stacking spettrale usata in Sec. 3.3.1 e Sec. 3.3.2. Vengono rilevate in totale 32 galassie e il rilevamento di un segnale con $\text{SNR} > 5$, il che può far pensare che tra gli oggetti esaminati ci potrebbero essere contributi di sorgenti radio (HI). Da una verifica delle coordinate delle 32 sorgenti nei datacubi di MIGHTEE risulta che non c'è presenza di segnale diretto in emissione.

Procediamo analizzando il sottocampione di 32 oggetti isolando galassie early type (ellittiche e lenticolari), con valore morfologico pari a 1, e galassie a spirale con valore

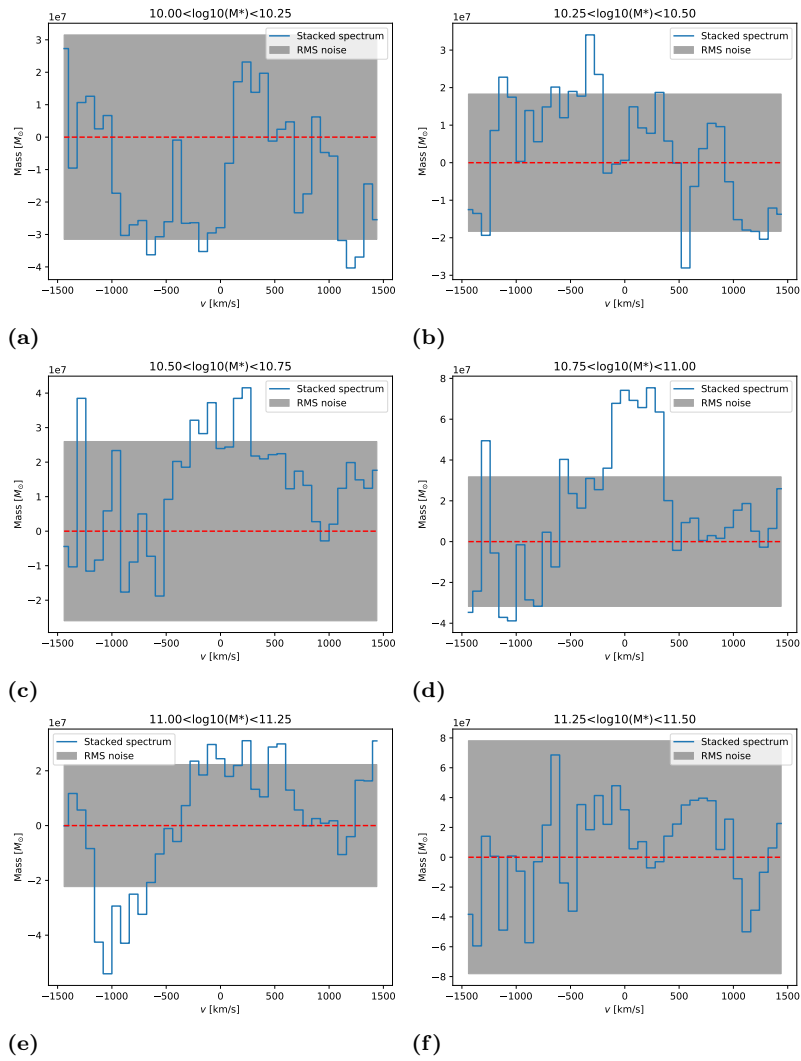


Figura 13: Grafici ottenuti nel Test 2 dalla somma di spettri in diversi intervalli di $\log_{10}M_*$. I colori sono analoghi alla Fig. 7.

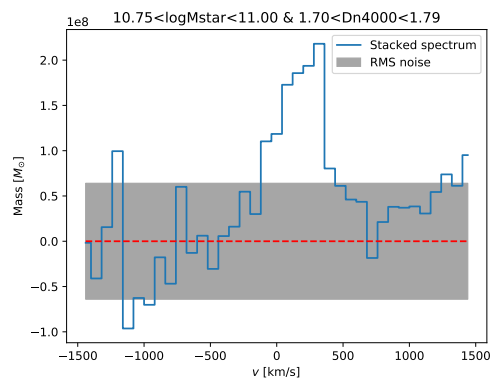


Figura 14: Spettro sommato delle 32 sorgenti selezionate tra valori $1.70 < D_n4000 < 1.79$ e $10.75 < \log_{10}M_* < 11.00$. I colori sono analoghi alla Fig. 7.

Galassie sommate	32
Massa media di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	6.93
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	1.32
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_{\odot})	10.84
SNR al picco	3.41
SNR integrato	5.12

Tabella 6: Dati delle 32 sorgenti collocate tra $1.70 < D_n4000 < 1.79$ e $1075 < \log_{10}M_* < 11.00$ relativi alla Fig. 14.

morfologico 2 (Sec. 3.1); si ottiene un totale di 25 oggetti type = 1 e 7 oggetti type = 2. Applicando lo stacking su entrambe le classi si verifica come le galassie early type contribuiscano maggiormente all'intensità del segnale HI rilevato in Fig. 14 rispetto alle spirali, contributo dato però da un numero maggiore di oggetti e quindi non sufficiente per determinare se la massa di HI sia contenuta solo all'interno delle galassie early type. Per una valutazione più accurata eseguiamo un'analisi prendendo in modo casuale 7 galassie ellittiche type = 1 e confrontiamo lo spettro generato con quello delle galassie type = 2 (15b).

In Fig. 16 e in Tab. 8 si nota come non sia stato rilevato nessun segnale di HI e questo dimostra come il peso della statistica è determinante. Dunque non siamo in grado di confermare, o smentire, che l'HI sia concentrato in galassie early type.

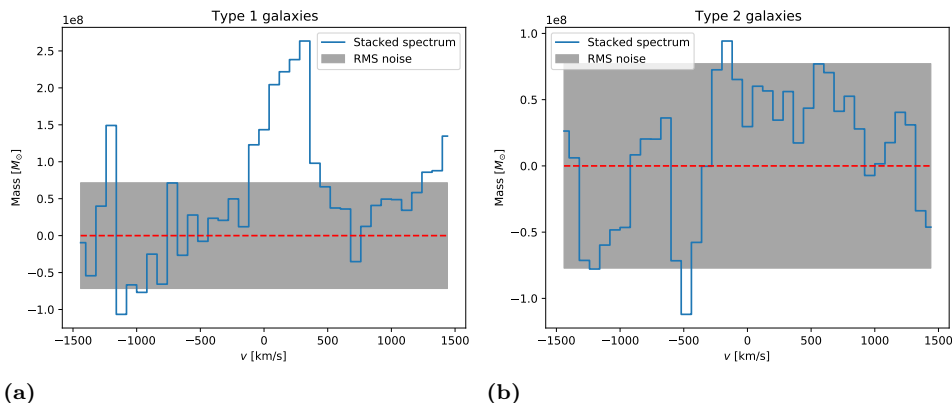


Figura 15: Spettro sommato delle 32 sorgenti divise per morfologia. A sinistra (15a) lo spettro sommato delle galassie early type (type = 1), a destra (15b) lo spettro delle galassie a spirale (type = 2).

classe morfologica	type = 1	type = 2
Galassie sommate	25	7
Massa media di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	7.94	3.30
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	1.53	1.20
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_{\odot})	10.90	10.52
SNR apicco	3.68	1.22
SNR integrato	5.24	2.02

Tabella 7: Dati delle 32 sorgenti suddivise per classe morfologica relativi alla Fig. 15.

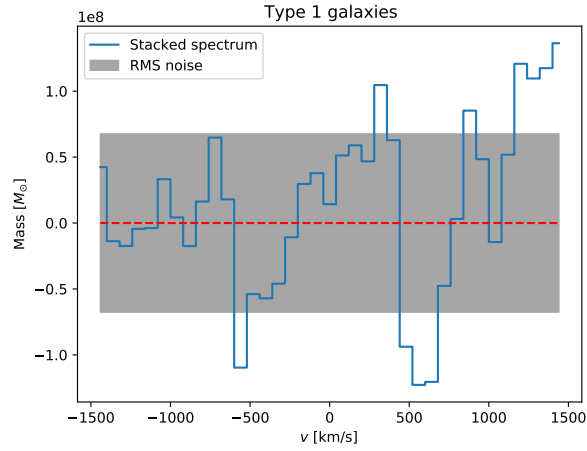


Figura 16: Spettro sommato delle 7 sorgenti early type selezionate in modo casuale. Si può notare come non ci sia segnale e questo dimostra il peso della statistica sul numero di oggetti analizzati.

Massa media di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	1.82
Errore sulla massa di HI ($10^{10}M_{\odot}$)	1.35
$\log M_{\text{HI}}$ medio (M_{\odot})	10.26
SNR apicco	2.02
SNR integrato	1.27

Tabella 8: Dati relativi alla Fig. 16 delle 7 sorgenti early type (type = 1) selezionate in modo casuale dalle 32 galassie ottenute in Sec. 3.3.3 visibili in Tab. 9

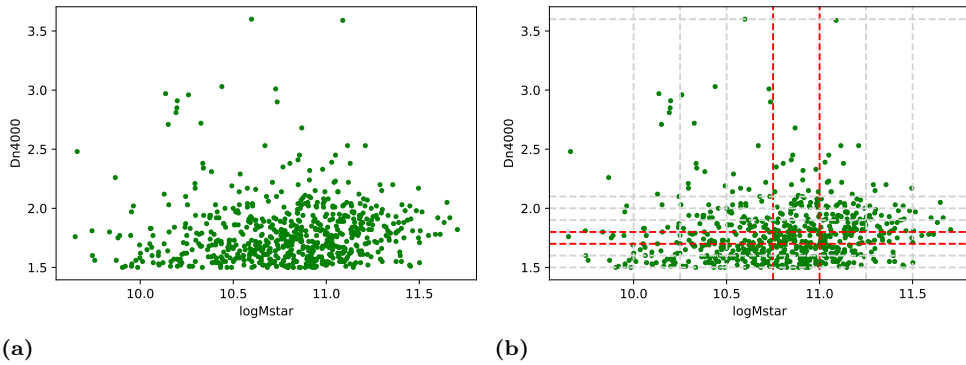


Figura 17: Grafici di dispersione per massa e D_n4000 delle 659 galassie analizzate. Fig. 17a: in ascissa sono presenti i valori per $\log_{10}M_*$ mentre in ordinata i valori per D_n4000 . Fig. 17b: le linee grigie corrispondono ai rispettivi bin usati durante l'analisi e, in particolare, l'area delimitata dall'intersezione tra le 4 linee rosse corrisponde alle 32 galassie analizzate in Sec. 3.3.3.

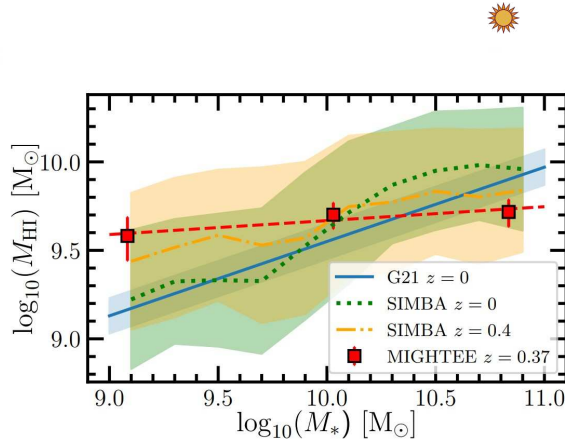


Figura 18: Confronto tra $\log(M_{\text{HI}}/M_*) - \log M_*$ ottenuto in Sec. 3.3.3 con i risultati presentati nel lavoro di Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022 (Fig. 5). Il simbolo "☀" corrisponde al risultato dello stacking effettuato sul campione di 32 in Sec. 3.3.3

4 Risultati e discussione

Dall'analisi condotta in precedenza abbiamo ottenuto un sottocampione di 32 galassie in cui è evidente l'elevata quantità di HI rilevata statisticamente tramite la tecnica dello stacking spettrale. Una visione in banda *I* con HST/ACS delle singole sorgenti è presentata in Fig. 19. Da una prima analisi si nota un numero maggiore di galassie early type rispetto a galassie a spirale, come introdotto in Sec. 3.3.3, e la presenza di sistemi formati da più galassie con evidenti fenomeni di merging, i quali potrebbero confermare le ipotesi anticipate nell'introduzione sulla presenza di HI (Sec. 1). Ovviamente bisogna tenere conto che la statistica per le type = 2 è di circa 1/3 di quella delle type = 1, un campione troppo piccolo per ottenere una stima precisa sulla quantità di HI presente in quella classe morfologica.

In Fig. 18 è interessante notare che, al contrario di quanto ci aspettavamo, galassie early type con valore di $1.70 < D_n4000 < 1.79$ e con $10.75 < \log M_* < 11.75$, mostrano una forte presenza di M_{HI} pari a un fattore 10 volte superiore rispetto ai risultati ottenuti da Sinigaglia, Rodighiero et al. 2022 per galassie star-forming, a parità di massa stellare e al medesimo range di redshift (Sec. 1.1).

Per il futuro di questo studio si vuole comprendere, in modo più dettagliato, se le galassie con maggior quantità di HI siano effettivamente quelle al centro di ammassi o gruppi e se il fenomeno di merging sia il principale responsabile di accrescimento di HI all'interno di galassie massicce. È di interesse anche rivelare le rispettive relazioni di scala dell'HI, in particolare come quest'ultimo sia collegato alla formazione stellare, per ricavare un disegno evolutivo delle galassie in questione. Il prossimo step consisterebbe nel confrontare i risultati ottenuti con le simulazioni fisiche SIMBA a $z = 0.4$ (Fig. 5).

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo breve spazio per ringraziare chi, con dedizione e pazienza, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato.

Un ringraziamento particolare va alla professoressa Giulia Rodighiero, mia relatrice, che mi dato l'opportunità unica di partecipare attivamente in questo progetto e che mi ha seguito con infinita disponibilità durante questi mesi.

Grazie anche al mio correlatore Francesco Sinigaglia per i suoi preziosi consigli e accorgimenti che sono stati fondamentali per la realizzazione di questa tesi.

Vi ringrazio caldamente per avermi accolto nel vostro team e per avermi reso, anche se in piccola parte, partecipe in questa bellissima esperienza di ricerca.

Ringrazio infinitamente la mia famiglia, in particolare mia madre e mio padre, per avermi seguito e sostenuto in tutti questi anni e per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso di studi.

Infine, un ringraziamento speciale va ai miei amici e ai miei compagni di università con cui ho condiviso risate, fallimenti e gioie.

Grazie per essermi sempre stati vicino e grazie per aver reso possibile il raggiungimento di questo importante traguardo.

5 Appendice

ID number	RA	DEC	z	type
633	150.130136	2.437687	0.26492	1
1461	149.676598	2.406356	0.37302	1
295	149.680341	2.033968	0.26481	2
1739	149.782600	1.886361	0.32736	2
1351	149.803455	2.159203	0.35320	1
1066	149.847109	2.287365	0.35821	1
1557	149.936383	2.037188	0.34082	1
1367	149.937732	2.195212	0.31475	2
2111	149.962654	2.679490	0.34634	1
1431	149.973155	2.508880	0.26366	1
1497	150.050713	2.192965	0.26225	1
392	150.092687	2.498610	0.42906	1
448	150.092795	2.481876	0.24904	1
629	150.116328	1.994072	0.36048	1
1951	150.145435	2.053823	0.37097	1
1181	150.173440	2.555236	0.42667	1
2433	150.316163	2.164270	0.43992	1
2457	150.349983	2.158916	0.32341	1
1970	150.531802	2.248008	0.43042	1
583	150.569990	1.936022	0.31022	1
1626	149.829245	2.266995	0.37211	1
2223	149.986290	2.408331	0.34173	1
1987	150.134660	2.672347	0.35199	1
873	150.184392	2.067280	0.34642	1
840	149.485855	1.984044	0.43554	1
1876	150.712760	2.456246	0.47319	2
2588	149.499686	2.255135	0.26123	1
527	149.727879	2.315849	0.42504	2
110	150.548639	2.766178	0.36159	1
1234	150.094793	1.970201	0.37183	2
2598	150.345246	1.699377	0.30897	1
1435	149.986362	2.574893	0.30907	2

Tabella 9: Dati delle 32 sorgenti ricavate da Sec. 3.3.3

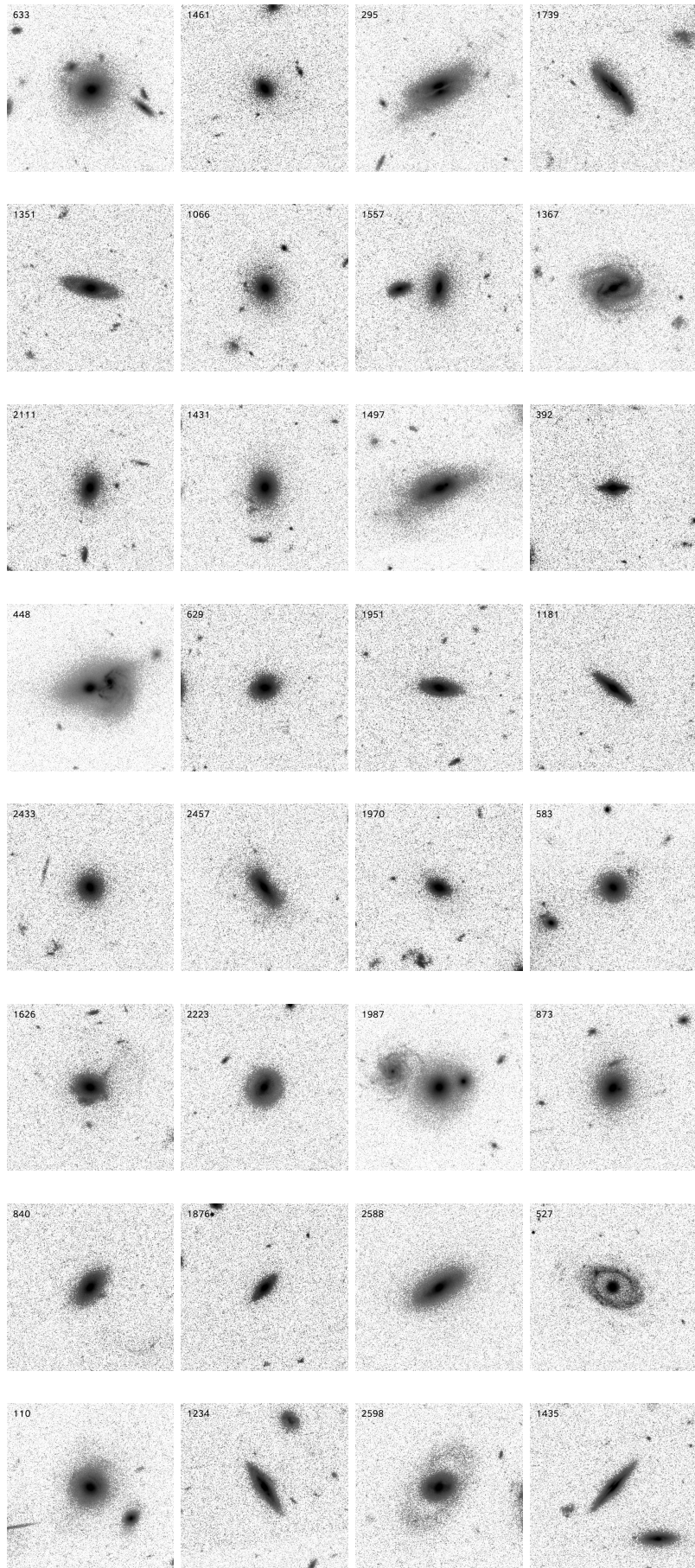


Figura 19: Immagini delle 32 galassie ricavate dalla selezione di Sec.3.3.3. Le immagini sono riportate seguendo l'ordine della Tab.9 (NASA/IPAC Infrared Science Archive, COSMOS cutouts)

Riferimenti bibliografici

- Brown, Toby et al. (2015). «The effect of structure and star formation on the gas content of nearby galaxies». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452.3, pp. 2479–2489.
- Damjanov, Ivana et al. (2018). «hCOSMOS: A Dense Spectroscopic Survey of $r \leq 21.3$ Galaxies in the COSMOS field». In: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 234.2, p. 21.
- Haynes, Martha P et al. (2018). «The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic HI Source Catalog». In: *The Astrophysical Journal* 861.1, p. 49.
- Huang, Shan et al. (2012). «The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: the galaxy population detected by ALFALFA». In: *The Astrophysical Journal* 756.2, p. 113.
- Maddox, Natasha et al. (2021). «MIGHTEE-HI: The HI emission project of the MeerKAT MIGHTEE survey». In: *Astronomy & Astrophysics* 646, A35.
- Rhee, Jonghwan et al. (2022). «Deep Investigation of Neutral Gas Origins (DINGO): HI stacking experiments with early science data». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.
- Serra, Paolo et al. (2012). «The ATLAS3D project—XIII. Mass and morphology of HI in early-type galaxies as a function of environment». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 422.3, pp. 1835–1862.
- Sinigaglia, Francesco, Ed Elson et al. (2022). «Optimizing spectral stacking for 21-cm observations of galaxies: accuracy assessment and symmetrized stacking». In: *arXiv preprint arXiv:2206.03300*.
- Sinigaglia, Francesco, Giulia Rodighiero et al. (2022). «MIGHTEE-HI: Evolution of HI Scaling Relations of Star-forming Galaxies at $z < 0.5$ ». In: *The Astrophysical Journal Letters* 935.1, p. L13.
- Tasca, L et al. (2009). «A robust morphological classification of high-redshift galaxies using support vector machines on seeing limited images-II. Quantifying morphological k-correction in the COSMOS field at $1 < z < 2$: Ks band vs. I band». In: *Astronomy & Astrophysics* 497.3, pp. 743–753.