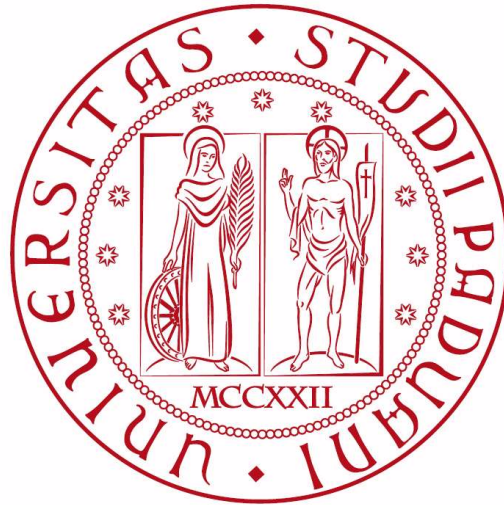


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI
FISICA E ASTRONOMIA 'GALILEO GALILEI'

CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

STUDIO DELLA RELAZIONE
MORFOLOGIA-DENSITÀ
DI GALASSIE IN AMMASSI VICINI

Relatore:
Prof.ssa Giulia Rodighiero

Laureanda:
Beatrice Faccioli

Correlatore:
Dott.ssa Benedetta Vulcani

Anno Accademico
2021/2022

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Morfologia	3
1.2	Ambiente di una galassia	6
1.3	Relazione morfologia-densità	7
1.4	Scopo della tesi	9
2	Data set	13
2.1	Il campione WINGS e OmegaWINGS	13
2.2	Calcolo della distanza dal centro dell'ammasso	15
2.3	Il campione considerato	18
3	Analisi e risultati	19
3.1	Morfologia in funzione di <i>local density</i> e distanza dal centro dell'ammasso	21
3.2	Relazione morfologia-densità T - Σ	23
3.3	Relazione morfologia-raggio T - R	25
3.4	Relazione T - Σ in funzione della distanza	27
3.5	Relazione T - R in funzione della <i>local density</i>	30
4	Conclusioni e prospettive future	33

Abstract

Gli studi attuali sulla relazione morfologia-densità di galassie negli ammassi locali sono concentrati entro il raggio viriale R_{200} , definito come il raggio che racchiude una densità media pari a 200 volte la densità critica dell'Universo. Fasano et al. (2015) [1], ad esempio, studiano la morfologia delle galassie sia in funzione della *local density* che della distanza dal centro dell'ammasso entro R_{200} . Recentemente, però, si è osservato come anche le zone esterne degli ammassi influenzino le proprietà delle galassie, quindi le analisi dovranno essere estese a raggi viriali maggiori.

Questo è il lavoro esposto nella presente tesi.

Utilizzando il grande e coerente database fornito dal progetto OmegaWINGS, in questo lavoro di tesi vengono rivisitate le relazioni morfologia-densità ($T-\Sigma$) e morfologia-raggio ($T-R$) in ammassi di galassie nell'Universo locale. In particolare, grazie al vasto campione di galassie preso in esame, viene testato il comportamento di queste relazioni in diversi range di distanza dal centro dell'ammasso (per $T-\Sigma$) e di densità locale (per $T-R$).

1 Introduzione

Nella Sez. [1.1](#) viene presentato un *excursus* sulle classificazioni morfologiche delle galassie da parte di Hubble e di de Vaucouleurs. Nella Sez. [1.2](#) sono descritti i diversi tipi di ambiente in cui può trovarsi una galassia e la loro influenza su formazione ed evoluzione della galassia stessa. Nella Sez. [1.3](#) è riportata una breve storia degli studi sulla relazione morfologia-densità delle galassie. Nella Sez. [1.4](#), infine, sono esposti gli scopi del presente lavoro di tesi.

1.1 Morfologia

La prima (e più famosa) classificazione morfologica delle galassie fu proposta nel 1926 da Edwin Powell Hubble [\[2\]](#). La versione finale della sua classificazione si trova in *The Hubble Atlas of Galaxies*, redatto da Sandage nel 1961 [\[3\]](#).

Hubble, basandosi su parametri osservabili semplicemente con un telescopio, suddivide le galassie visibili nell'Universo in quattro grandi categorie: ellittiche (E), lenticolari (S0), spirali (S) e irregolari (Irr).

- Le **galassie ellittiche** presentano l'aspetto di un disco che può essere più o meno schiacciato e appaiono senza una struttura interna differenziata. In base al grado di ellitticità esse vengono suddivise in otto classi, che vanno da E0 (galassia perfettamente sferica) a E7 (galassia molto allungata). Gran parte delle galassie ellittiche sono nane, con dimensioni dell'ordine di 200 pc; più rare, invece, sono le ellittiche giganti, che possono raggiungere grandezze confrontabili con quella della Via Lattea (oltre 30 kpc).
- Le **galassie lenticolari** sono caratterizzate da un *bulge* centrale molto luminoso e di apparente forma sferica, circondato da un disco meno luminoso e più sottile. La famiglia delle S0 è divisa in tre classi in base all'entità di polveri presenti nel disco galattico: così le S0₁ non mostrano alcun segno di assorbimento da polveri,

mentre le S_0 presentano una banda oscura di materia assorbente lungo il disco.

- Le **galassie a spirale** presentano bracci di polvere, gas e stelle in un disco in rotazione attorno ad un luminoso *bulge* centrale. La suddivisione in tre classi (a, b, c) dipende dalla combinazione di:
 - preminenza del *bulge* rispetto al disco galattico;
 - avvolgimento dei bracci di spirale;
 - risoluzione del disco in stelle.
- Le **galassie irregolari** non presentano nucleo apparente e particolari strutture di simmetria. Le irregolari di tipo I (Irr I) sono fortemente risolte e vi si osservano stelle, nubi e ammassi, mentre le irregolari di tipo II (Irr II) mostrano una struttura amorfa.

Fatta eccezione per le galassie ellittiche, tutti i tipi morfologici sono suddivisi in due gruppi in base all'esistenza o meno di una barra, cioè di una struttura allungata presente nel *bulge* centrale da cui dipartono i bracci di spirale e in cui la densità stellare è maggiore rispetto a quella media del disco.

La classificazione di Hubble può essere sintetizzata dal diagramma a diapason in figura [1.1](#). A sinistra del diagramma si trovano le galassie ellittiche, dopo le quali vi è una biforcazione: in alto sono poste le galassie 'normali', senza barra, e in basso quelle barrate.

Tuttavia il lavoro di Hubble si basa su un campione ristretto di sole galassie luminose giganti e supergiganti che sono isolate o si trovano in piccoli ammassi, e quindi non può rappresentare completamente tutte le differenti varietà morfologiche osservabili.

Un'altra fondamentale classificazione morfologica è quella ad opera di de Vaucouleurs (1964) [4](#), che allarga il numero del campione di galassie e aggiunge a quelle indicate da Hubble ulteriori sottoclassi. Ad esempio posiziona tra ellittiche e lenticolari le E^+ , che comprendono

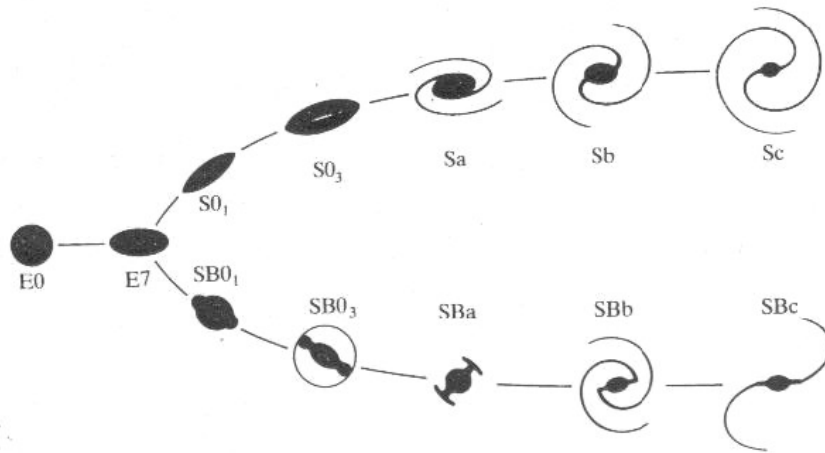


Figura 1.1: Diagramma a diapason di Hubble. Immagine tratta da Mihalas & Binney (1981) [5].

le galassie ellittiche immerse in un alone luminoso, e le $S0^-$, le galassie lenticolari con un disco debole; tra galassie lenticolari e a spirale le $S0^+$, lenticolari con proprietà più simili alle spirali; tra galassie a spirale e irregolari le Sd, galassie più avanzate delle Sc, e le Sm, che possono considerarsi in uno stadio tra spirali avanzate e irregolari di tipo magellanic. Queste ultime non mancano del tutto di simmetria e mostrano un accenno di struttura con bracci di spirale.

Nel lavoro di de Vaucouleurs sono indicate con SA le galassie non barrate, con SAB quelle con una barra debole e con SB le barrate. Vi è un'ulteriore suddivisione delle galassie a spirale in base alla presenza dei soli bracci, indicata con (s), o di un anello da cui si diramano i bracci, indicata con (r). Esiste anche il caso intermedio (rs).

A de Vaucouleurs si deve l'assegnazione di un valore numerico ad ogni tipo morfologico di galassie, come mostrato nella tabella in figura 1.2. I valori di questo *numerical Hubble stage* T vanno da -5 a +10, con i numeri negativi che corrispondono alle galassie *early-type* (ellittiche e lenticolari) e i numeri positivi alle *late-type* (spirali e irregolari).

Hubble	E		E-S0	S0		S0/a	Sa	Sa-b	Sb	Sb-c	Sc			Sc-Irr		Irr
de Vauc.	E	E*	S0*	S0 ⁰	S0*	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im
T	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figura 1.2: Confronto tra la classificazione di Hubble e quella di de Vaucouleurs mediante il numerical Hubble stage T .

1.2 Ambiente di una galassia

Le galassie non sono distribuite uniformemente nell'Universo, ma tendono invece a congregarsi in gruppi e in ammassi.

L'ambiente (*environment*) di una galassia è definito come il modo in cui altre galassie sono distribuite nelle sue immediate vicinanze.

Vi sono tre tipologie principali di ambienti:

- Le **galassie isolate** (anche dette 'galassie di campo' o '*field*'), le quali non hanno avuto interazioni significative con altre galassie di massa simile in tempi recenti e sono molto rare. In queste galassie il gas non è stato portato via da interazioni con altre galassie vicine.
- I **gruppi** di galassie, che sono gli ambienti più comuni in cui si possono trovare galassie. Anche se un gruppo può contenere fino a 100 galassie, solo alcune di queste avranno una massa paragonabile a quella della Via Lattea. Il Gruppo Locale, che contiene la Via Lattea e Andromeda, è un gruppo relativamente piccolo con un diametro di circa 1 Mpc.
- Gli **ammassi**, che possono contenere dalle poche centinaia fino alle parecchie migliaia di galassie, con potenzialmente centinaia di esse massive quanto la Via Lattea. I principali ammassi vicini a noi sono quelli della Vergine (17 Mpc dalla Terra) e della Chioma (99 Mpc).

L'ambiente a cui una galassia appartiene gioca un ruolo importante nella formazione e nell'evoluzione galattica. In particolare, è responsabile della relazione morfologia-densità, che verrà discussa in questo lavoro di tesi a partire dal paragrafo [1.3](#).

Due proprietà diverse atte a osservare l'effetto dell'ambiente sulle galassie sono *local density* e distanza dal centro dell'ammasso. La distanza è un tracciante del potenziale dell'ammasso, dei suoi processi idrodinamici e della disponibilità di gas nelle galassie. La *local density* è un tracciante del potenziale di interazione tra galassie: più esse sono vicine più è alta la probabilità di interazione gravitazionale e *merger*.

1.3 Relazione morfologia-densità

Il primo rilevamento di differenze significative tra ammassi e *field* riguardo alle popolazioni galattiche si può ricondurre a Hubble e Humason (1931) [\[6\]](#), i quali notano che la predominanza di galassie *early-type* è una delle caratteristiche principali degli ammassi. Vent'anni dopo Spitzer e Baade [\[7\]](#) interpretano la prevalenza di galassie con popolazione stellare di tipo II (*early-type*, soprattutto S0) negli ammassi come conseguenza di collisioni tra galassie nell'ambiente denso tipico dell'ammasso. Ulteriori tentativi di classificare gli ammassi in funzione della composizione morfologica delle galassie sono stati compiuti da Morgan (1961) [\[8\]](#) e Oemler (1974) [\[9\]](#).

Tuttavia, la prima conferma quantitativa della relazione tra morfologia e ambiente viene fornita da Dressler solo nel 1980 [\[10\]](#). Nel suo lavoro, infatti, compare il primo studio della relazione tra la densità locale delle galassie e la loro frazione di diverso tipo morfologico, cioè la **relazione morfologia-densità** (chiamata anche **T - Σ**). Dressler scopre che la T - Σ regge in ammassi locali sia con struttura regolare (dinamicamente *rilassati*) che irregolare (con presenza di sovrastrutture, *non rilassati*). L'estensione della relazione agli altri ambienti, ossia gruppi e *field* (Bhavsar 1981 [\[11\]](#); de Souza et al. 1982 [\[12\]](#); Postman e Geller 1984 [\[13\]](#)), ha portato la comunità astronomica a considerare la T - Σ una sorta di legge universale nell'astronomia extra-galattica.

La relazione morfologia-densità indica che galassie *early-type* (ellittiche e lenticolari) dominano principalmente in ambienti ad alta densità, mentre galassie *late-type* (a spirale e irregolari) sono più comuni in ambienti a bassa densità.

La figura [1.3](#) illustra la forte relazione tra *local density* e popolazioni di diversi tipi morfologici come risultato dell'analisi di galassie in 55 ammassi locali compiuta da Dressler: la frazione di galassie a spirali e irregolari (S+Irr) decresce monotonicamente all'aumentare della densità, mentre le frazioni di S0 e ellittiche crescono con essa.

Nel 1997 Dressler [\[14\]](#) rivisita i dati presentati nel suo lavoro del 1980 applicando una *field correction* dipendente dal tipo morfologico, che corregge i valori della *local density*, e una divisione più fitta dei bin dei dati. I risultati sono mostrati in figura [1.4](#). L'andamento della relazione $T-\Sigma$ rimane lo stesso già descritto per la figura [1.3](#).

Nel lavoro del 1980 Dressler afferma, inoltre, che la relazione $T-\Sigma$ è molto più forte della relazione tra morfologia e distanza dal centro dell'ammasso (**relazione morfologia-raggio, $T-R$**). Tuttavia nel 1991, Whitmore e Gilmore [\[15\]](#), riesaminando i dati di Dressler, dimostreranno che la forza delle due relazioni è comparabile. Due anni dopo [\[16\]](#) concluderanno che la $T-R$ è la relazione fondamentale che guida le frazioni di ogni tipo morfologico, dalle spirali (che diminuiscono in numero verso il centro dell'ammasso e sono quasi assenti nel centro stesso) alle S0 (che aumentano moderatamente verso il centro e poi decrescono bruscamente) e alle ellittiche (che da una frequenza del 10% nelle regioni più esterne aumentano rapidamente fino al 60%-70% vicino al centro).

Il punto di vista di Whitmore e Gilmore riguardo alla predominanza della $T-R$ rispetto alla $T-\Sigma$ nella determinazione delle frazioni morfologiche negli ammassi verrà però quasi abbandonato dopo che nel 1997 Dressler [\[14\]](#) proverà che la relazione $T-\Sigma$ regge perfino per ammassi a redshift $z \sim 0.5$.

Attualmente gli studi sulla relazione morfologia-densità di galassie negli ammassi locali sono limitati entro il raggio viriale R_{200} , definito

come il raggio che racchiude una densità media pari a 200 volte la densità critica dell'Universo. Anche Fasano et al. (2015) [1], la cui procedura di analisi è stata presa ad esempio nel presente lavoro di tesi, studiano la morfologia delle galassie sia in funzione della *local density* che della distanza dal centro dell'ammasso entro R_{200} .

1.4 Scopo della tesi

Recentemente (Lewis et al. 2002 [17], Gómez et al. 2003 [18], Park & Hwang 2009 [19]) si è osservato come anche le zone esterne degli ammassi influenzino le proprietà delle galassie.

Nel presente lavoro di tesi le analisi saranno estese a raggi viriali maggiori per verificare la forza e la validità delle relazioni morfologia-densità e morfologia-raggio a distanze dal centro dell'ammasso superiori a quelle analizzate fino ad oggi.

Utilizzando il grande e coerente database fornito dal progetto OmegaWINGS (nella Sez. 2.1), saranno rivisitate le relazioni morfologia-densità (T - Σ ; in 3.2) e morfologia-raggio (T - R ; in 3.3) in ammassi di galassie nell'Universo locale. In particolare, grazie al vasto campione di galassie preso in esame, sarà testato il comportamento di queste relazioni in diversi range di distanza dal centro dell'ammasso (per T - Σ ; in 3.4) e di densità locale (per T - R ; in 3.5).

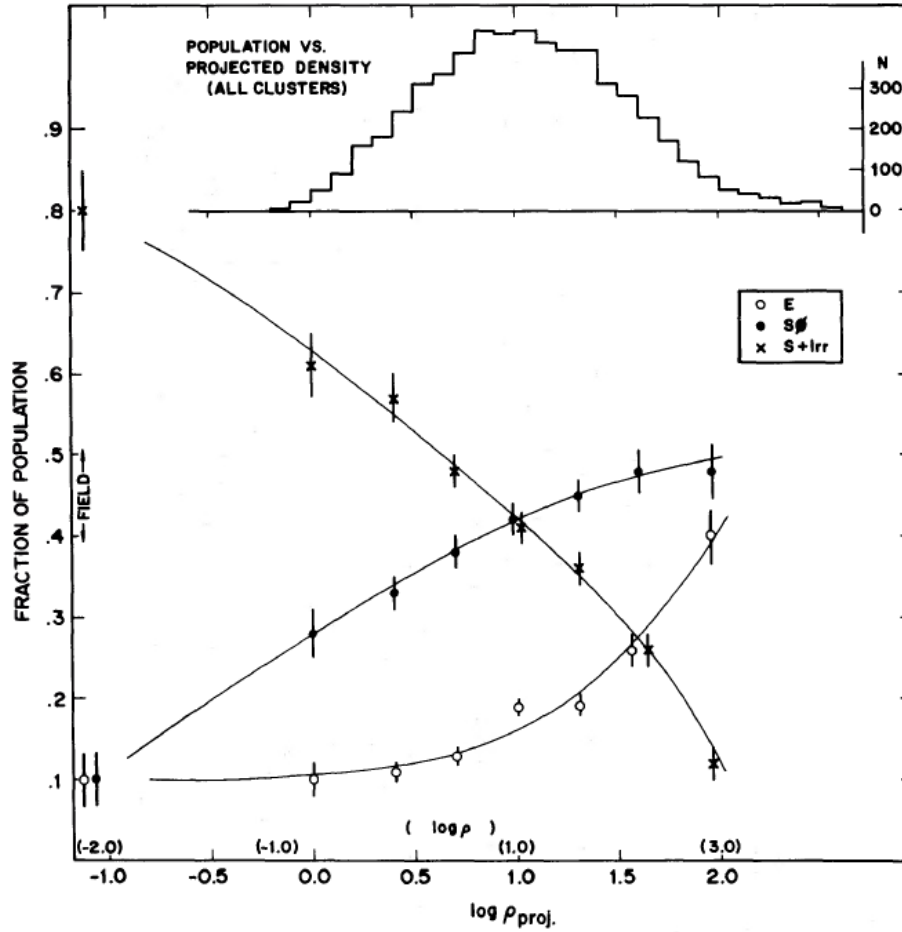


Figura 1.3: Relazione T - Σ : frazioni di galassie E, S0 e S+Irr in funzione del logaritmo della densità locale. L'istogramma in alto mostra la distribuzione numerica delle galassie in bin della densità locale. Grafico tratto da Dressler (1980) [10].

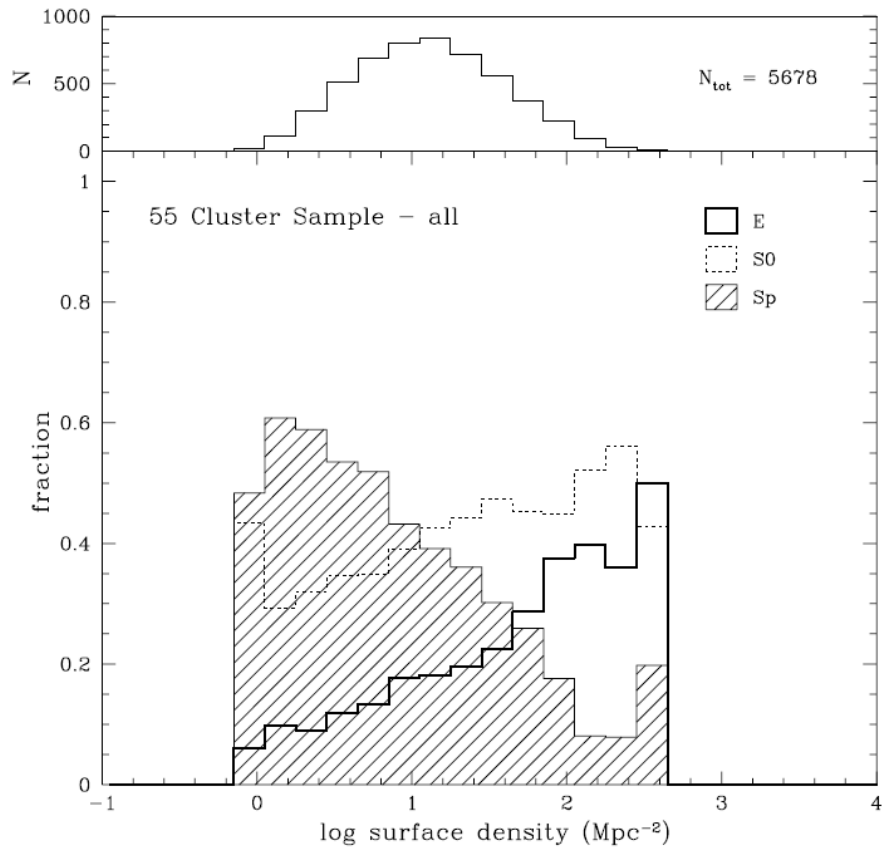


Figura 1.4: Relazione T - Σ ri-analizzata per i 55 ammassi di galassie studiati in Dressler (1980) [10]. L'istogramma in alto mostra il numero di galassie in ogni bin di densità superficiale, su un totale di 5678 galassie. Grafico tratto da Dressler (1997) [14].

2 Data set

Nella Sez. [2.1](#) viene riportata la modalità di estrazione di un primo campione di galassie e ammassi dai cataloghi WINGS e OmegaWINGS. Nella Sez. [2.2](#) è descritto il calcolo della distanza di ogni galassia dal centro dell'ammasso di appartenenza. Nella Sez. [2.3](#), infine, viene descritto il campione utilizzato per le analisi di questo lavoro di tesi.

2.1 Il campione WINGS e OmegaWINGS

Il campione di galassie considerato e analizzato in questo lavoro di tesi è estratto dal *Wide-field Nearby Galaxy-cluster Survey* (WINGS; Fasano et al. 2006 [\[20\]](#), Moretti et al. 2014 [\[21\]](#)), che include 76 ammassi di galassie selezionati in raggi X con $0.04 < z < 0.07$. Il campione di ammassi copre un ampio range di dispersione di velocità ($\sigma_{cl} \sim 500 - 1300 \text{ km s}^{-1}$) e luminosità in raggi X ($L_X \sim 0.2 - 5 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$).

La *survey* WINGS si occupa solo di catalogare dati nella parte centrale degli ammassi; ciò che manca è uno studio dettagliato anche nelle regioni più esterne della popolazione locale di ammassi in un campione statisticamente significativo. Questo è ora possibile grazie alla *survey* OmegaWINGS, che quadruplica l'area coperta mediante *optical imaging* per 46 ammassi (Gullieuszik et al. 2015 [\[22\]](#), Moretti et al. 2015 [\[23\]](#)).

I target spettroscopici sono stati selezionati in base alla fotometria in banda B e V. I cataloghi spettroscopici sono stati corretti per incompletezza sia geometrica che in magnitudine, utilizzando il rapporto dei numeri degli spettri che forniscono un redshift con il numero totale delle galassie nel catalogo fotometrico principale, calcolato come funzione della magnitudine in banda V e della distanza radiale proiettata dalla galassia di ammasso più luminosa (*brightest cluster galaxy*, BCG).

Una galassia è considerata membro di un ammasso se il suo redshift si trova entro $\pm 3\sigma_{cl}$ dal redshift medio dell'ammasso (Cava et al. 2009 [\[24\]](#)). Il raggio viriale R_{200} è calcolato a partire da σ_{cl} (Poggianti et al. 2006 [\[25\]](#)) e usato per scalare le distanze dal centro dell'ammasso delle galassie membro (Paccagnella et al. 2016 [\[26\]](#)).

Le magnitudini assolute di tutte le galassie nel campione sono calcolate usando i redshift medi degli ammassi presenti in Cava et al. (2009) [24]. Esse sono K-corrette utilizzando le tabelle in Poggianti (1997) [27] e secondo i tipi morfologici forniti da MORPHOT, strumento che verrà approfondito poco più avanti.

I tipi morfologici delle galassie sono presi dal database di galassie WINGS descritto in Moretti et al. (2014) [21]. Questo database è stato ottenuto eseguendo MORPHOT (Fasano et al. 2012 [28]) in banda V su galassie con area isofotale più grande di 200 pixel alla soglia di $2.5\sigma_{bkg}$ (dove σ_{bkg} è la deviazione standard del background). MORPHOT è uno strumento automatico di *machine learning* appositamente ideato per ottenere stime del tipo morfologico di galassie nel catalogo WINGS. Esso combina un grande set di diagnostiche di morfologia, facilmente calcolabile dai digitali *cut-out* delle galassie. MORPHOT produce due stime indipendenti del tipo morfologico basate su:

- una semianalitica tecnica di massima verosimiglianza;
- una *neural network machine*.

Lo stimatore finale si è dimostrato efficace quasi quanto la classificazione visiva. In particolare, ha dimostrato di essere in grado di distinguere tra galassie ellittiche e lenticolari S0 con una precisione senza precedenti.

MORPHOT è consistente con la classificazione di Hubble revisionata e definita da de Vaucouleurs et al. (1991) [29] (vedi Sez. 1.1).

La densità locale relativa ad una data galassia è comunemente definita come il numero di vicini (N_n) della galassia per Mpc^2 . Le densità locali vengono calcolate (Fasano et al. 2015 [1], Vulcani et al. in preparazione) utilizzando le 10 galassie più vicine con $M_V \leq -19.5$ e delimitandone l'area che le include con un cerchio. Il risultato è dato da

$$\Sigma_{10} = 10/A_{10} \quad , \quad (2.1)$$

dove $A_{10} = \pi R_{10}^2$ (Mpc) e R_{10} è il raggio (in Mpc) del più piccolo cerchio centrato nella galassia e che include i 10 vicini.

2.2 Calcolo della distanza dal centro dell'ammasso

Le grandezze descritte finora, ossia morfologia e densità locale delle galassie, sono state prese dalla letteratura attraverso i cataloghi WINGS e OmegaWINGS. La distanza di ogni galassia dal centro del suo ammasso è, invece, stata calcolata da me adottando la procedura di seguito esposta.

Si assume che il centro dell'ammasso coincide con la massima intensità dell'emissione in raggi X. Le coordinate (ascensione retta e declinazione, entrambe in gradi) di ogni galassia e quelle del centro dell'ammasso di appartenenza provengono dal catalogo WINGS, ristretto ad un campione considerato (si veda la Sez. 2.3).

Per calcolare innanzitutto la distanza angolare θ tra queste due coordinate, bisogna derivare l'equazione che descrive la separazione di due punti che giacciono sulla superficie di una sfera vista dal centro della sfera (figura 2.1) [30].

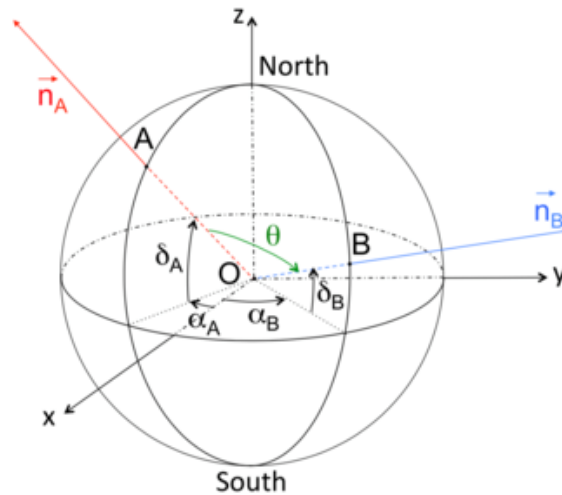


Figura 2.1: Distanza angolare θ tra due punti A e B visti da un osservatore in O .

Siano, ad esempio, A e B due oggetti celesti osservati dalla Terra. A e B sono definiti dalle loro coordinate celesti: ascensione retta (RA),

$(\alpha_A, \alpha_B) \in [0, 2\pi]$, e declinazione (dec), $(\delta_A, \delta_B) \in [-\pi/2, \pi/2]$. Sia O l'osservatore sulla Terra posizionato al centro della sfera celeste. Il prodotto scalare dei vettori \mathbf{OA} e \mathbf{OB} è uguale a:

$$\mathbf{OA} \cdot \mathbf{OB} = R^2 \cos\theta \quad ,$$

che è equivalente a:

$$\mathbf{n}_A \cdot \mathbf{n}_B = \cos\theta \quad .$$

Nel sistema di riferimento (x, y, z) i due vettori unitari sono scomposti in:

$$\mathbf{n}_A = \begin{pmatrix} \cos\delta_A \cos\alpha_A \\ \cos\delta_A \sin\alpha_A \\ \sin\delta_A \end{pmatrix}, \quad \mathbf{n}_B = \begin{pmatrix} \cos\delta_B \cos\alpha_B \\ \cos\delta_B \sin\alpha_B \\ \sin\delta_B \end{pmatrix} \quad .$$

Quindi,

$$\mathbf{n}_A \mathbf{n}_B = \cos\delta_A \cos\alpha_A \cos\delta_B \cos\alpha_B + \cos\delta_A \sin\alpha_A \cos\delta_B \sin\alpha_B + \sin\delta_A \sin\delta_B \equiv \cos\theta \quad .$$

Si ottiene così:

$$\theta = \cos^{-1}[\sin\delta_A \sin\delta_B + \cos\delta_A \cos\delta_B \cos(\alpha_A - \alpha_B)] \quad , \quad (2.2)$$

che è la distanza angolare cercata tra la galassia e il centro del suo ammasso di appartenenza.

L'angolo θ ha la dimensione dei gradi, quindi il passo successivo è trasformarlo in secondi d'arco.

Ora bisogna convertire questo dato in Mpc [\[31\]](#). La relazione tra la dimensione effettiva di un oggetto, la sua distanza angolare vista da un osservatore e la distanza tra i due può essere ottenuta con la relazione trigonometrica:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{l}{2D} \quad ,$$

dove θ è la distanza angolare in secondi d'arco, l la dimensione lineare in Mpc e D la distanza tra i due oggetti in Mpc.

Tuttavia questa soluzione trigonometrica non è corretta a grandi distanze perchè si deve tener conto della teoria della relatività generale

presente nella descrizione del modello cosmologico dell'Universo e del modo in cui la luce viaggia fino ad un osservatore. Perciò si metteranno in relazione la distanza angolare θ e la dimensione lineare l con la distanza del diametro angolare $D_A(a)$:

$$l = D_A(a) \times \theta \quad . \quad (2.3)$$

Tale distanza $D_A(a)$ di un oggetto lontano dipende dalla cosmologia dell'Universo considerata, e può essere scritta come:

$$D_A(a) = \begin{cases} \frac{ac}{H_0\sqrt{-\Omega_K}} \sin\left[\frac{H_0\sqrt{-\Omega_K}}{c} D_C(a)\right] & \Omega_K < 0 \\ aD_C(a) & \Omega_K = 0 \\ \frac{ac}{H_0\sqrt{\Omega_K}} \sinh\left[\frac{H_0\sqrt{\Omega_K}}{c} D_C(a)\right] & \Omega_K > 0 \end{cases}$$

con:

$$D_C(a) = c \int_a^1 \frac{1}{a\dot{a}} da \quad ,$$

dove a è il fattore di scala e \dot{a} è:

$$\dot{a} = H_0 \sqrt{\frac{\Omega_R}{a^2} + \frac{\Omega_M}{a} + \Omega_K + \Omega_\Lambda a^2} \quad ,$$

con H_0 la costante di Hubble e $\Omega_R, \Omega_M, \Omega_K, \Omega_\Lambda$ i diversi contributi di densità di energia dell'Universo.

Per svolgere il conto si è utilizzato nel linguaggio di programmazione *Python* il sub-package *astropy.cosmology* e la funzione *FlatLambdaCDM* (in questa tesi sono stati utilizzati i valori $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$ e $\Omega_\Lambda = 0.7$): inserendo nel codice il redshift z attribuito ad ogni ammasso, è stato possibile calcolare il valore $D_A(a)$ dello stesso. Utilizzando la relazione [2.3](#) si è infine ricavata la distanza l in Mpc tra galassia e centro dell'ammasso di appartenenza.

Gli ammassi però non hanno tutti la stessa dimensione, quindi a parità di distanza le galassie potrebbero risentire in maniera diversa dell'effetto dell'ammasso. Si dovranno quindi "scalare" queste distanze, in modo che siano direttamente confrontabili. Per farlo si utilizzerà la dimensione dell'ammasso, presente nel catalogo WINGS come R_{200} (Mpc). Il risultato finale sarà dunque il rapporto tra l e R_{200} . Da qui in avanti questa quantità verrà chiamata r/r_{200} .

2.3 Il campione considerato

Dal campione iniziale di galassie del catalogo WINGS, descritto in [2.1](#), sono state selezionate solo:

- le galassie membro, cioè quelle appartenenti ad un ammasso;
- le galassie che hanno una magnitudine limite in banda V di $M_V^{lim} = -19.5$.

Per gli scopi di questa tesi si è scelto di dividere il campione di galassie in tre tipi morfologici: ellittiche (E), lenticolari (S0) e spirali (S). La suddivisione è stata eseguita mediante il *numerical Hubble stage* T , già discusso in figura [1.2](#), seppur con alcune modifiche: a $-5.5 < T < -4.25$ corrispondono le ellittiche, a $-4.25 \leq T \leq 0$ le lenticolari, infine a $0 < T < 12$ le spirali. Le galassie con $T \leq -5.5$ e $T \geq 12$ sono state escluse dal campione.

Questa selezione porta ad un numero totale di galassie pari a 5478 elementi. Considerando il valore in completezza di ogni galassia, il numero pesato di galassie totali sale a 9192.3. Nella tabella [2.1](#) è indicato nel dettaglio il numero di elementi che verranno analizzati, suddivisi per tipo morfologico.

	Numero totale	Numero pesato (*)
All	5478	9192.3
E	1532	2616.1
S0	2367	4048.5
S	1579	2527.7

Tabella 2.1: Numero di galassie nel campione considerato. (*) Numero pesato per completezza.

Dai 76 ammassi catalogati in WINGS sono estratti tutti quelli che contengono almeno una delle galassie selezionate. Il numero totale di ammassi significativi è 59; all'interno dei rimanenti 17 ammassi non sono presenti nel catalogo WINGS galassie rispondenti ai criteri di selezione descritti.

3 Analisi e risultati

Lo scopo di questa tesi è studiare come cambia la distribuzione morfologica delle galassie al variare della *local density* Σ_{10} e della distanza r/r_{200} dal centro dell'ammasso a cui appartengono.

Come si osserva in figura 3.1, la correlazione tra le due quantità è evidente (infatti galassie più vicine al centro hanno una densità maggiore e galassie più lontane dal centro hanno una densità minore), sebbene con grande dispersione statistica dei dati.

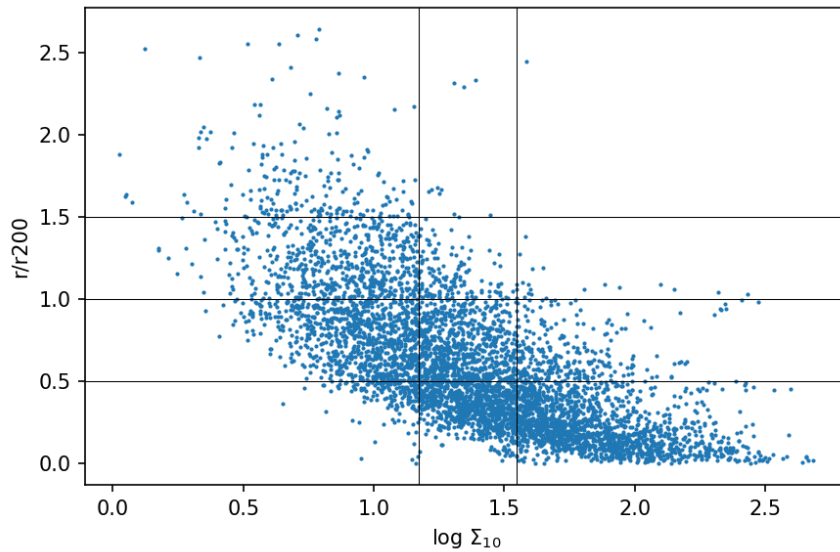


Figura 3.1: Distribuzione delle galassie in funzione di *local density* e distanza dal centro dell'ammasso. In ascissa vi è il logaritmo in base 10 della densità locale Σ_{10} in Mpc^{-2} (eq. 2.1); in ordinata la distanza r/r_{200} della galassia dal centro dell'ammasso, come calcolato nella Sez. 2.2. Le righe verticali e orizzontali nel grafico suddividono il campione statistico in diverse regioni, il cui significato è spiegato nel testo e riassunto nelle tabelle 3.1 e 3.2.

Si osserva, infatti, che nel centro dell'ammasso ($r/r_{200} \leq 0.5$) il logaritmo della *local density* varia tra i valori 1 e 2.5 Mpc^{-2} , mentre

all'esterno ($r/r_{200} \geq 1.5$) spazia tra 0 e 1 Mpc^{-2} .

In figura [3.1](#) le righe verticali dividono il campione in tre bin di *local density*, scelti in modo da contenere ciascuno circa lo stesso numero di galassie (tabella [3.1](#)).

Numero del bin	Limite inferiore $\log\Sigma_{10}$	Limite superiore $\log\Sigma_{10}$
1	0	1.172
2	1.172	1.548
3	1.548	2.682

Tabella 3.1: Definizione dei bin in cui è stato suddiviso il campione in base alla densità locale $\log\Sigma_{10}$ (in unità di Mpc^{-2}).

Analogamente, le righe orizzontali dividono il campione dei dati in quattro bin di distanza, elencati in tabella [3.2](#).

Numero del bin	Limite inferiore r/r_{200}	Limite superiore r/r_{200}
1	0	0.5
2	0.5	1
3	1	1.5
4	1.5	2.64

Tabella 3.2: Definizione dei bin in cui è stato suddiviso il campione in base alla distanza r/r_{200} .

Nell'elaborare i dati, si sono seguite due diverse strategie: in un primo momento si è analizzata la distribuzione del tipo morfologico in funzione della *local density* e della distanza dal centro dell'ammasso, considerando l'intero campione (in Sez. [3.1](#)). Successivamente i dati riguardanti ciascuna morfologia (E, S0, S) sono stati scorporati e analizzati separatamente, per distinguere il diverso andamento della frequenza di galassie di ciascuna morfologia al variare della densità locale (in Sez. [3.2](#)) e della distanza (in Sez. [3.3](#)). Infine, è stato testato il comportamento delle relazioni $T-\Sigma$ e $T-R$ in diversi range di distanza dal centro dell'ammasso (in Sez. [3.4](#)) e di *local density* (in Sez. [3.5](#)).

3.1 Morfologia in funzione di *local density* e distanza dal centro dell'ammasso

Per realizzare i grafici in figura 3.2 e 3.3, che riportano in ordinata il numero di galassie osservate per un determinato tipo morfologico, il conteggio del numero di galassie è stato pesato per completezza.

In figura 3.2, ciascun istogramma rappresenta la frequenza dei diversi tipi morfologici all'interno di uno dei bin di densità locale definiti in tabella 3.1.

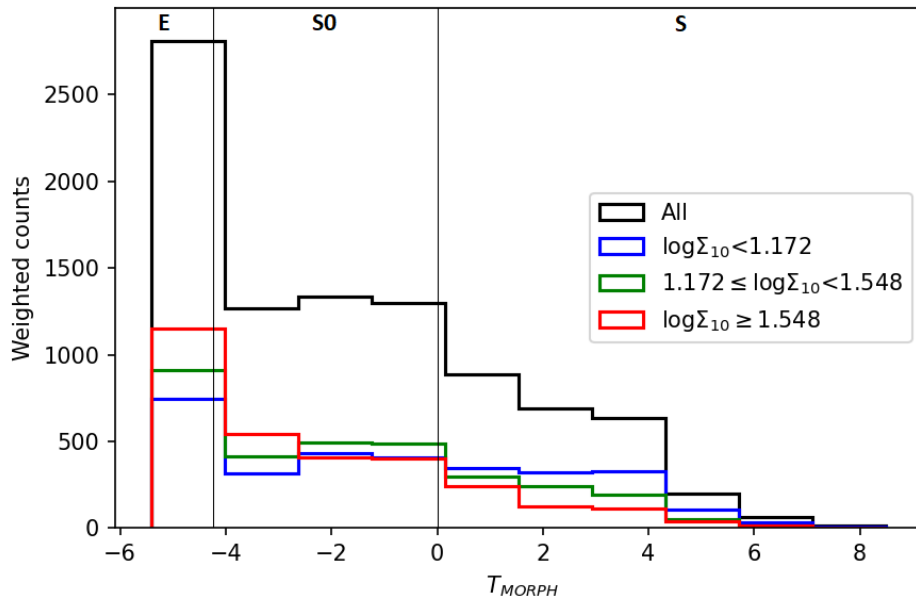


Figura 3.2: Distribuzione del tipo morfologico delle galassie in funzione della *local density* Σ_{10} (in Mpc^{-2}).

In figura 3.3, invece, ciascun istogramma rappresenta la frequenza dei diversi tipi morfologici all'interno di uno dei bin di distanza definiti in tabella 3.2.

Ciò che risulta dai grafici di figura 3.2 e 3.3 è una conferma dell'esistenza della correlazione osservata nella figura 3.1: la distribuzione

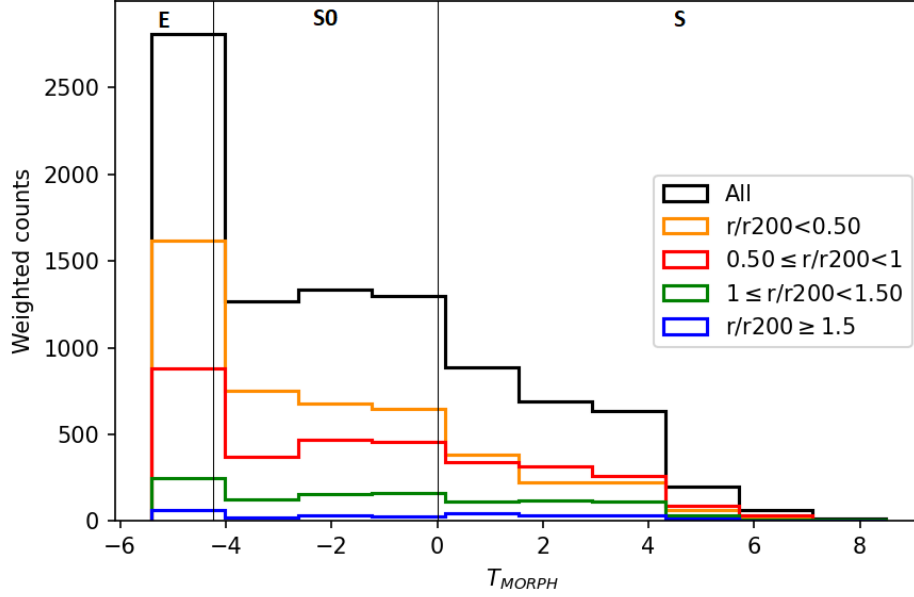


Figura 3.3: Distribuzione del tipo morfologico delle galassie in funzione della distanza dal centro dell'ammasso r/r_{200} .

della morfologia cambia sia in funzione della *local density* che della distanza dal centro dell'ammasso. Infatti a *local density* maggiori e a distanze dal centro minori dominano proporzionalmente galassie *early-type* (ellittiche e lenticolari), mentre a *local density* minori e a distanze maggiori vi è la prevalenza di galassie *late-type* (spirali).

Per meglio evidenziare la relazione per le diverse classi morfologiche, si procede ora a suddividere il campione di galassie nei tre tipi morfologici E, S0 e S (si veda la Sez. 2.3). Si fa riferimento alla **frazione** di ciascun tipo morfologico, intesa come il rapporto tra il numero di galassie di una certa morfologia e il numero totale di galassie osservate in un determinato sottoinsieme del campione. Si intende in questo modo visualizzare la frequenza con cui ciascuna determinata morfologia viene osservata in funzione di densità locale e distanza dal centro dell'ammasso.

3.2 Relazione morfologia-densità T - Σ

La figura 3.4 illustra la relazione morfologia-densità T - Σ per tutto il campione di galassie considerate. Il campione è stato suddiviso in 10 classi di uguale ampiezza di *local density*. Il valore massimo di $\log\Sigma_{10}$ nel campione è di 2.682 Mpc^{-2} ; l'ampiezza di ciascuna classe risulta dunque di 0.26 in $\log\Sigma_{10}$. Tutti i valori di $\log\Sigma_{10}$ sono espressi in unità di Mpc^{-2} .

Il plot mostra in modo evidente l'andamento della classica relazione T - Σ : all'aumentare della *local density* la frazione di galassie ellittiche cresce. Al contrario, la frazione di galassie a spirale diminuisce.

In figura 3.4 si verifica che le galassie a spirale hanno un andamento decrescente all'aumentare della *local density*: alle densità più basse ($0.26 - 0.78 \log\Sigma_{10}$) esse costituiscono circa il 50% del totale. Tra le galassie osservate aventi *local density* più alta (oltre $1.56 \log\Sigma_{10}$), quelle a spirale rappresentano meno del 20%.

Fino ad un valore di $\log\Sigma_{10}$ compreso tra 0.78 e 1.04, la classe delle galassie a spirale è dominante sulle altre popolazioni. A densità maggiori invece sono le altre popolazioni a prevalere in numero. In particolare, a densità intermedie ($1.04 - 2.08 \log\Sigma_{10}$) dominano le S0, mentre alle più alte densità (oltre $2.08 \log\Sigma_{10}$) prevalgono le E.

La frazione delle galassie S0 sembra non dipendere dalla *local density*: essa si mantiene prossima al valore del 40% in tutto l'intervallo di *local density* osservato.

Le galassie ellittiche, che a basse densità (inferiori a $1.04 \log\Sigma_{10}$) costituiscono meno del 20%, crescono in numero con la densità fino a superare il 50% a densità maggiori di $2.08 \log\Sigma_{10}$.

I risultati ottenuti sono in accordo con quanto trovato da Fasano et al. (2015) [1] per quanto riguarda le regioni centrali degli ammassi. Il campione di osservazioni impiegato da Fasano si ferma tuttavia ad una distanza r/r_{200} massima di 1. Le osservazioni elaborate e discusse in questa tesi sono più estese, comprendendo membri fino ad una distanza di $2.64 r/r_{200}$.

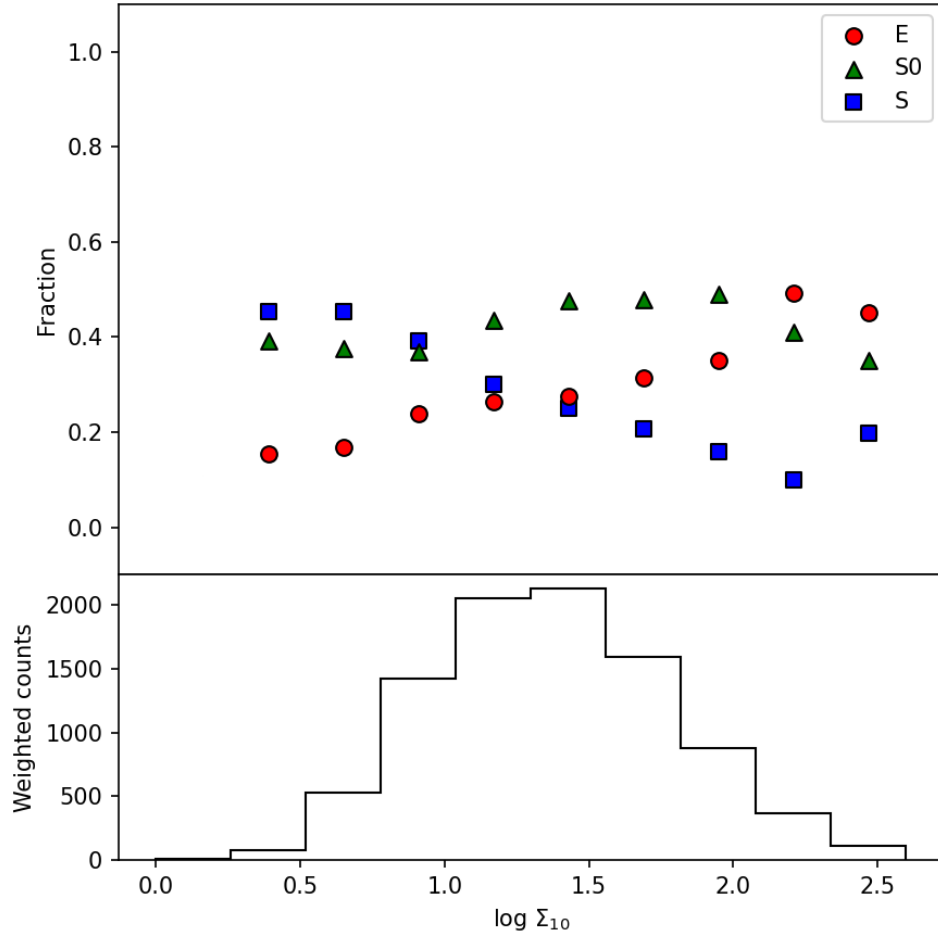


Figura 3.4: Relazione T - Σ (pannello superiore) e istogramma della *local density* (pannello inferiore) per l'intero campione di 5478 galassie considerate. I valori di $\log \Sigma_{10}$ sono espressi in unità di Mpc^{-2} . Cerchi, triangoli e quadrati (rossi, verdi e blu) corrispondono rispettivamente a galassie ellittiche E, lenticolari S0 e spirali S. Il grafico di dispersione (nel pannello superiore) non riporta i dati relativi alla classe in $\log \Sigma_{10}$ da 0 a 0.26, perchè questa contiene un numero di osservazioni estremamente ridotto e non rappresentativo del campione.

3.3 Relazione morfologia-raggio $T-R$

Analogamente alla figura 3.4, la 3.5 illustra la relazione morfologia-raggio $T-R$ per tutto il campione di galassie considerate. Il campione è stato suddiviso in 10 classi di uguale ampiezza di r/r_{200} . Il valore massimo di r/r_{200} nel campione è di 2.64; l'ampiezza di ciascuna classe risulta dunque di 0.26 in r/r_{200} .

Si assume che il centro dell'ammasso coincide con la massima intensità dell'emissione in raggi X.

Nella figura 3.5 si osserva che nel centro degli ammassi ($r/r_{200} < 0.26$) la percentuale di galassie a spirale è inferiore al 20%. All'aumentare della distanza, tuttavia, la frazione di galassie S cresce fino a raggiungere il 60% in $1.82 - 2.08 r/r_{200}$. A partire da un valore di r/r_{200} compreso tra 1.30 e 1.56, le spirali dominano sulle altre popolazioni.

La frazione delle ellittiche costituisce circa il 40% del totale delle galassie al centro dell'ammasso ma, spostandosi verso le regioni più esterne dell'ammasso, questa frazione diminuisce. Oltre $0.78 - 1.04 r/r_{200}$ la frequenza delle ellittiche si mantiene prossima al 20%.

Le galassie lenticolari S0 dominano in numero vicino al centro dell'ammasso, costituendo il 50% di tutte le galassie per $r/r_{200} < 0.52$. Superato questo valore, la loro frazione diminuisce all'aumentare della distanza.

Tra 0.82 e $1.30 r/r_{200}$ le galassie lenticolari e quelle a spirale costituiscono insieme l'80% del campione, dominando sulla popolazione delle ellittiche.

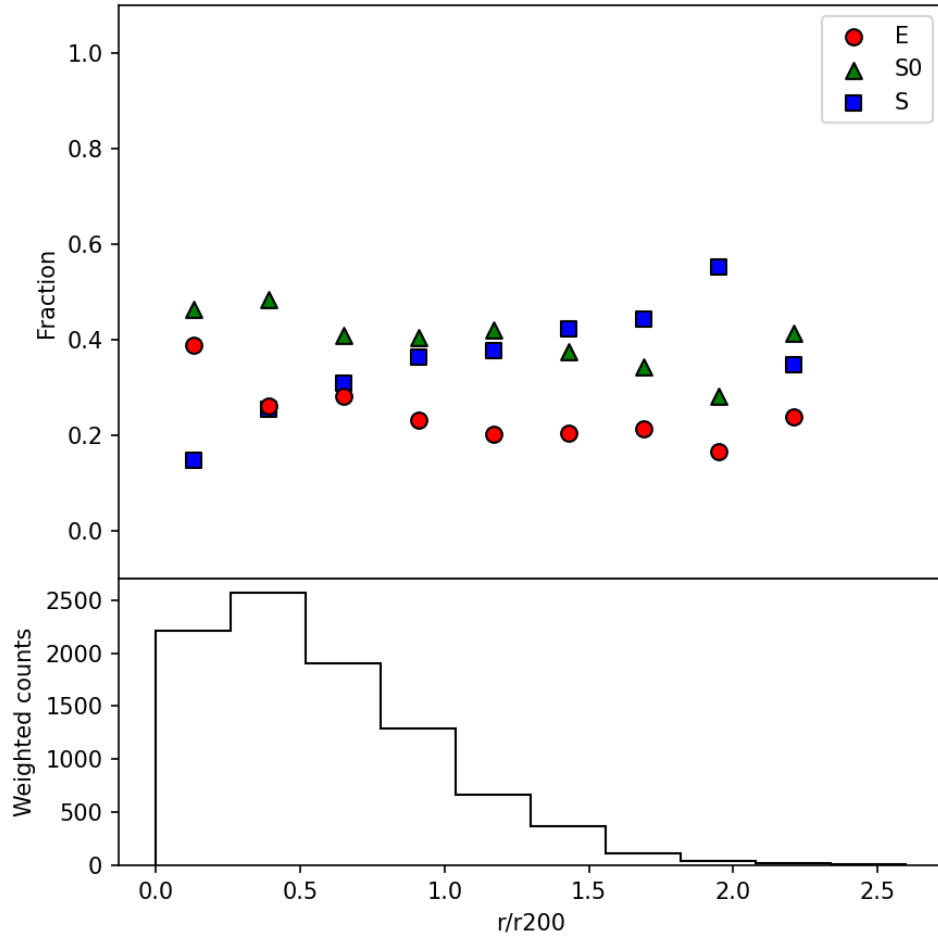


Figura 3.5: Relazione $T-R$ (pannello superiore) e istogramma della distanza dal centro dell'ammasso r/r_{200} (pannello inferiore) per l'intero campione di 5478 galassie considerate. Il significato dei simboli è lo stesso della figura 3.4. Il grafico di dispersione (nel pannello superiore) non riporta i dati relativi alla classe in r/r_{200} da 2.34 a 2.64, perchè questa contiene un numero di osservazioni estremamente ridotto e non rappresentativo del campione.

3.4 Relazione T - Σ in funzione della distanza

La Sez. 3.2 è stata dedicata ad illustrare la relazione morfologia-densità per tutto il campione di galassie. Dunque il grafico copre l'intero range di distanza dal centro dell'ammasso.

È interessante ora studiare se e in che modo la relazione T - Σ dipenda dalla posizione della galassia all'interno dell'ammasso, in particolare dalla distanza r/r_{200} dal centro dello stesso.

Nella tabella 3.3 sono riportati i numeri delle galassie considerate in ogni bin di distanza, suddivise per tipo morfologico.

I plot nei pannelli inferiori della figura 3.6 rappresentano gli istogrammi della *local density* in bin di r/r_{200} crescente. In essi si osserva che, allo spostarsi dal centro dell'ammasso (grafici (a) e (b)) fino alle regioni più esterne (grafici (c) e (d)), il range di *local density* coperto cambia: infatti vicino al centro si hanno Σ_{10} sistematicamente più alte, mentre all'aumentare della distanza i punti traslano verso *local density* minori.

Prendendo ora in esame i plot nei pannelli superiori con le frazioni di tipo morfologico, si osserva che entro il valore 0.5 di r/r_{200} (grafico (a)) la relazione T - Σ globale regge: all'aumentare della *local density* la frazione delle galassie a spirale diminuisce e quella delle ellittiche aumenta fino a dominare sugli altri tipi morfologici. L'andamento delle S0 rimane costante ad un valore prossimo al 40%.

Con l'aumentare della distanza dal centro dell'ammasso, la frazione delle galassie ellittiche diminuisce sistematicamente ad ogni Σ_{10} .

Per valori di r/r_{200} compresi tra 0.5 e 1 (grafico (b)) tutte le frazioni di tipo morfologico hanno un andamento pressoché costante (eccetto che nella classe 0.26–0.52 in $\log\Sigma_{10}$; tutti i valori di $\log\Sigma_{10}$ sono espressi in unità di Mpc^{-2}).

Al contrario, per $1 \leq r/r_{200} < 1.5$ (grafico (c)) sembra esserci una forte dipendenza per le galassie lenticolari e a spirale: la frazione di S0 aumenta fino a costituire il 70% delle galassie totali in 1.56–1.82 $\log\Sigma_{10}$, mentre la frazione delle S diminuisce fino ad un valore prossimo al 20% in 1.30–1.56 $\log\Sigma_{10}$. Tuttavia il numero ridotto di galassie osservate a

	$r/r_{200} < 0.5$		$0.5 \leq r/r_{200} < 1$	
	Numero	N. pesato	Numero	N. pesato
All	2654	4618.5	1895	3217.5
E	849	1503.3	481	828.6
S0	1253	2177.8	775	1329.5
S	552	937.4	639	1059.4

(a)

	$1 \leq r/r_{200} < 1.5$		$r/r_{200} \geq 1.5$	
	Numero	N. pesato	Numero	N. pesato
All	730	1090.5	199	265.8
E	161	229.2	41	55
S0	276	455.4	63	85.8
S	293	405.9	95	125

(b)

Tabella 3.3: Numero di galassie a diversi bin di r/r_{200} .

queste distanze potrebbe non portare ad una rappresentazione grafica accurata.

Avvicinandosi alla zona più esterna dell'ammasso ($r/r_{200} > 1.5$, grafico (d)), la T - Σ non è più chiara. La frazione delle galassie a spirale, infatti, domina sulle altre popolazioni, arrivando a costituire fino al 60% delle galassie totali. Le galassie ellittiche sono proporzionalmente in numero minore rispetto agli altri tipi morfologici e la loro frazione non aumenta con la *local density*. L'andamento delle lenticolari non si mantiene costante.

Si può dunque concludere che, mentre nella zona centrale degli ammassi la relazione morfologia-densità è forte, nelle regioni più esterne essa è molto debole.

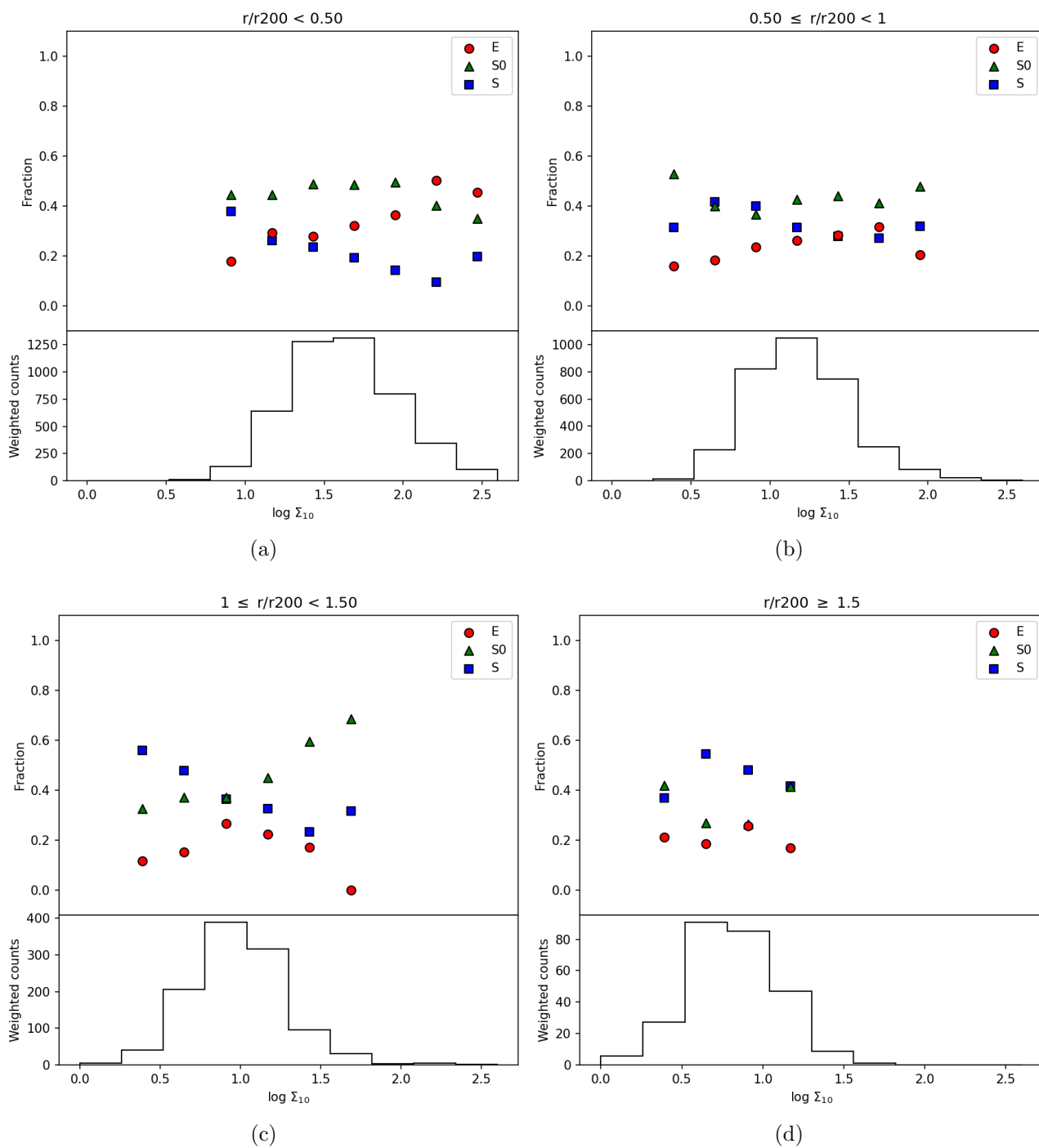


Figura 3.6: Relazione T - Σ per galassie in diversi bin di distanza: $r/r_{200} < 0.5$ nel plot (a), $0.5 \leq r/r_{200} < 1$ nel plot (b), $1 \leq r/r_{200} < 1.5$ nel plot (c) e $r/r_{200} \geq 1.5$ nel plot (d). Il significato dei simboli è lo stesso della figura 3.4. I valori di $\log \Sigma_{10}$ sono espressi in unità di Mpc^{-2} . Il grafico di dispersione (nel pannello superiore) del plot (a) non riporta i dati relativi alle classi in $\log \Sigma_{10}$ da 0 a 0.78, perchè queste contengono un numero di osservazioni estremamente ridotto e non rappresentativo del campione. Lo stesso vale per le classi 0 – 0.26 e 2.08 – 2.68 in (b), le classi 0 – 0.26 e 1.82 – 2.68 in (c) e le classi 0 – 0.26 e 1.30 – 2.68 in (d).

3.5 Relazione T - R in funzione della *local density*

La figura 3.5 illustra la relazione morfologia-raggio per tutto il campione di galassie, come descritto nella Sez. 3.3. Il grafico, dunque, copre l'intero range di *local density*.

Per studiare più nel dettaglio il comportamento della relazione T - R in funzione della densità locale, sono stati considerati i tre bin di *local density* elencati in tabella 3.1. I grafici in figura 3.7 riportano questa dipendenza. Tutti i valori di densità locale $\log\Sigma_{10}$ sono espressi in unità di misura di Mpc^{-2} .

Nella tabella 3.4 sono riportati i numeri delle galassie considerate in ogni bin di *local density*, suddivise per tipo morfologico.

Confrontando i plot in figura 3.7 si osserva che solamente per basse *local density* (grafico (a)) è possibile raggiungere grandi distanze dal centro dell'ammasso. Non si ha, invece, evidenza di galassie nelle regioni più esterne dell'ammasso che abbiano alti valori di densità Σ_{10} (grafici (b) e (c)).

A basse e ad alte *local density* si ritrova la stessa relazione T - R che persiste a livello globale per il campione intero di galassie: la frazione delle galassie a spirale aumenta con la densità, mentre la frazione delle ellittiche diminuisce. Lo stesso non si riscontra a *local density* intermedie (grafico (b)), ove la relazione non è chiara.

L'andamento della frazione di galassie S0 si mantiene costante attorno ad un valore del 40-50% per ogni bin di *local density* considerato. Dunque la frequenza di queste galassie sembra non dipendere dalla distanza.

	$\log\Sigma_{10} < 1.172$		$1.172 \leq \log\Sigma_{10} < 1.548$		$\log\Sigma_{10} \geq 1.548$	
	Numero	N. pesato	Numero	N. pesato	Numero	N. pesato
All	1811	3045.3	1808	3099.5	1859	3047.5
E	400	696.2	487	852.7	645	1067.2
S0	686	1186.1	821	1432.6	860	1429.9
S	725	1163	500	814.2	354	550.4

Tabella 3.4: Numero di galassie a diversi bin di *local density* [Mpc^{-2}].

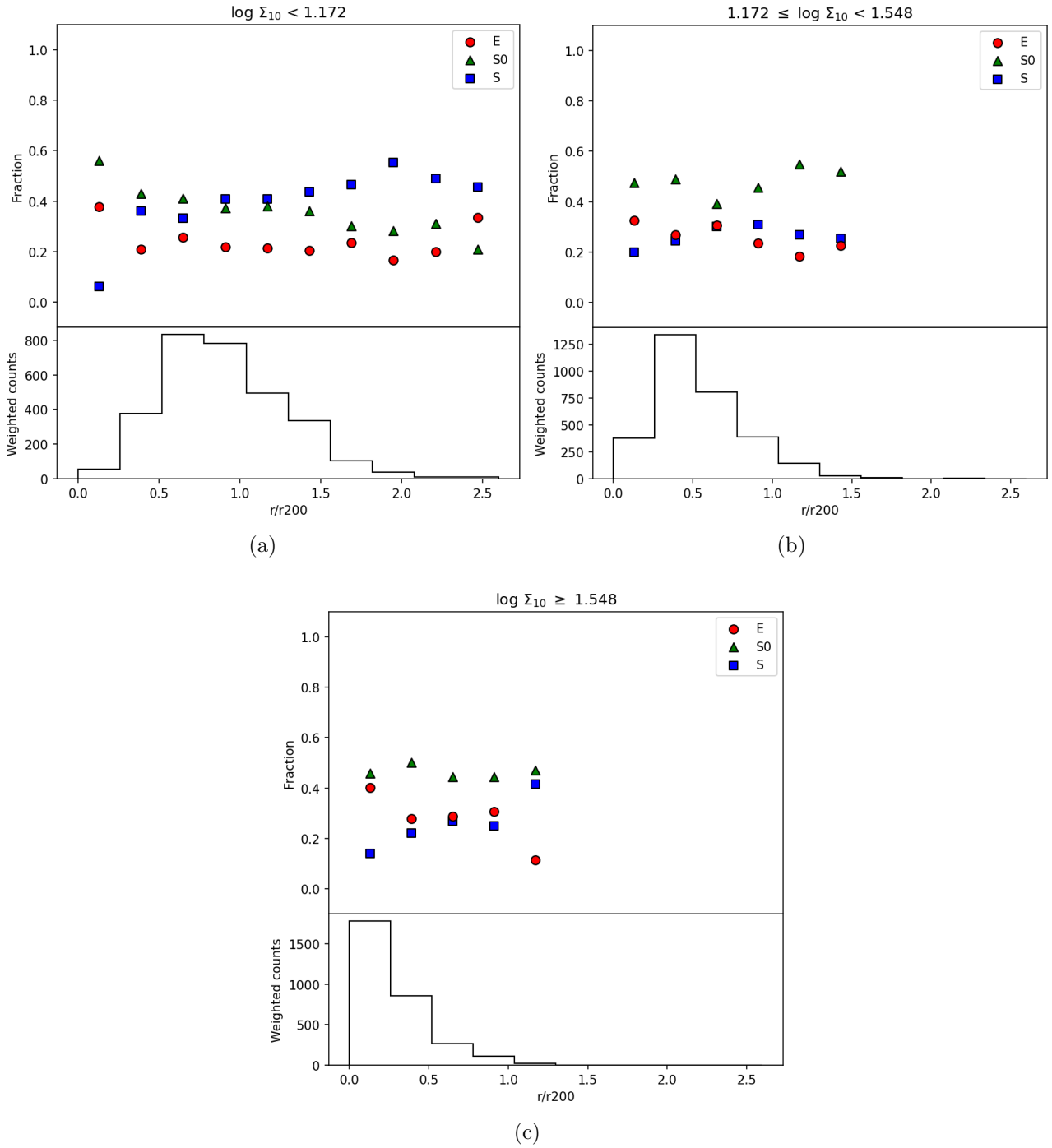


Figura 3.7: Relazione T - R per galassie in diversi bin di *local density* (i valori di $\log \Sigma_{10}$ sono espressi in unità di Mpc^{-2}): $\log \Sigma_{10} < 1.172$ nel plot (a), $1.172 \leq \log \Sigma_{10} < 1.548$ nel plot (b) e $\log \Sigma_{10} \geq 1.548$ nel plot (c). Il significato dei simboli è lo stesso della figura 3.4. Il grafico di dispersione (nel pannello superiore) del plot (b) non riporta i dati relativi alle classi in r/r_{200} da 1.56 a 2.64, perchè queste contengono un numero di osservazioni estremamente ridotto e non rappresentativo del campione. Lo stesso vale per le classi 1.30 – 2.64 in (c).

4 Conclusioni e prospettive future

Si è ricercata, all'interno del catalogo WINGS, evidenza della relazione morfologia-densità di galassie all'interno di ammassi locali. Sono state selezionate e prese in esame 5478 galassie che presentassero le caratteristiche di appartenere ad un ammasso, di avere una magnitudine limite in banda V di $M_V^{lim} = -19.5$ e un valore di *numerical Hubble stage* compreso tra -5.5 e 12.

Nel campione analizzato si è trovato riscontro delle previsioni teoriche e delle precedenti osservazioni: la relazione morfologia-densità è osservabile con evidenza entro il raggio viriale R_{200} . Dalle analisi condotte non risulta esserci un parametro predominante tra *local density* Σ_{10} e distanza r/r_{200} . Infatti per un dato bin di *local density* non si rileva una forte dipendenza dalla distanza, e viceversa.

La novità di questo lavoro di tesi consiste nell'aver esteso l'osservazione a grandi distanze dal centro dell'ammasso per analizzare ancora più dettagliatamente la relazione morfologia-densità $T-\Sigma$ e la relazione morfologia-raggio $T-R$. Vicino al centro si sono ritrovati gli stessi risultati presentati da Fasano et al. (2015) [\[1\]](#); allontanandosi fino alle regioni più esterne, la relazione $T-\Sigma$ non è più evidente come nel centro.

Soprattutto nelle zone più esterne dell'ammasso, infatti, potrebbero essere presenti delle sovrastrutture, ossia gruppi densi e sparsi di galassie appena 'caduti' nell'ammasso che alterano la correlazione densità-raggio. Una relazione $T-\Sigma$ chiara, dunque, esiste solo negli ammassi che sono liberi da queste sovrastrutture e che hanno una simmetria radiale ben definita. È possibile perciò che i risultati cambino in base alle caratteristiche degli ammassi che vengono considerati, a seconda che siano *rilassati* (regolari) o *non rilassati* (con presenza di sovrastrutture).

In futuro si potrebbero ricercare eventuali dipendenze delle relazioni $T-\Sigma$ e $T-R$ dalle proprietà dell'ammasso, in particolare dalla massa e dalla presenza di sovrastrutture.

Una limitazione nelle analisi di questo lavoro è data dall'irregolare *cluster area* coperta dalle osservazioni WINGS. In alcuni casi, infatti, potrebbe essere campionata solo una frazione del raggio totale

dell'ammasso, provocando disparità che influenzano le relazioni $T-\Sigma$ e $T-R$.

Fonti bibliografiche propongono di considerare il contributo di ulteriori grandezze fisiche oltre alla *local density* e alla distanza dal centro. Ad esempio, in Vulcani et al. 2011 [32] si suggerisce di valutare la diversa distribuzione di massa stellare di ciascuna classe di tipo morfologico. Galassie di tipo E, S0 e S hanno infatti distribuzione di massa stellare molto differente. In linea di principio è plausibile che la diversa distribuzione di ciascuna classe nel campione possa influire sulla dipendenza delle relazioni discusse.

Si sottolinea che in questo lavoro di tesi non si è tenuto conto dell'incertezza di misura da cui sono affetti i dati che sono stati elaborati. Per procedere in analisi più dettagliate sarà necessario considerare gli aspetti statistici e metrologici delle osservazioni sperimentali.

Riferimenti bibliografici

- [1] Fasano, G., Poggianti, B. M., et al. (2015) *Morphological fractions of galaxies in WINGS clusters: revisiting the morphology–density paradigm*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 449, Issue 4, 01 June 2015, Pages 3927–3944.
- [2] Hubble, E. (1926) *Extragalactic nebulae*. The Astrophysical Journal, 64, 321.
- [3] Sandage, A. (1961) *The Hubble Atlas of Galaxies*. Washington DC: Carnegie Institution of Washington.
- [4] de Vaucouleurs, G., et al. (1964) *Reference Catalogue of Bright Galaxies*. Austin: University of Texas Press.
- [5] Mihalas, D., Binney, J. (1981) *Galactic astronomy. Structure and kinematics*. San Francisco: Freeman, 2nd ed.
- [6] Hubble, E., Humason, M. L. (1931) *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*. The Astrophysical Journal 74, 43.
- [7] Spitzer, L., Baade, W. (1951) *Stellar Populations and Collisions of Galaxies*. The Astrophysical Journal 113, 413.
- [8] Morgan, W. (1961) *The classification of clusters of galaxies*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 47, 905-906.
- [9] Oemler, A. (1974) *The Systematic Properties of Clusters of Galaxies. Photometry of 15 Clusters*. The Astrophysical Journal 194, 1–20.
- [10] Dressler, A. (1980) *Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies*. The Astrophysical Journal 236, 351–365.
- [11] Bhavsar, S. P. (1981) *On galaxy morphology in small groups*. The Astrophysical Journal 246, L5-L9.

- [12] de Souza, R. E., et al. (1982) *The galactic content of groups of galaxies*. The Astrophysical Journal 263, 557–563.
- [13] Postman M., Geller M. J., (1984) *The morphology-density relation. The group connection*. The Astrophysical Journal 281, 95.
- [14] Dressler, A. (1997) *Evolution since $z = 0.5$ of the Morphology-Density Relation for Clusters of Galaxies*. The Astrophysical Journal, vol. 490, no. 2, pp. 577–591.
- [15] Whitmore, B. C., Gilmore, D. M. (1991) *On the Interpretation of the Morphology-Density Relation for Galaxies in Clusters*. The Astrophysical Journal 367, 64.
- [16] Whitmore, B. C., Gilmore, D. M. & Jones, C. (1993) *What Determines the Morphological Fractions in Clusters of Galaxies?* The Astrophysical Journal 407, 489.
- [17] Lewis, I., et al. (2002) *The 2dF Galaxy Redshift Survey: the environmental dependence of galaxy star formation rates near clusters*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 334, Issue 3, August 2002, Pages 673–683.
- [18] Gómez, P. L., et al. (2003) *Galaxy Star Formation as a Function of Environment in the Early Data Release of the Sloan Digital Sky Survey*. The Astrophysical Journal 584, 210–227.
- [19] Park, C., Hwang, H. S. (2009) *Interactions of Galaxies in the Galaxy Cluster Environment*. The Astrophysical Journal 699, 1595–1609.
- [20] Fasano, G., et al. (2006) *WINGS: a Wide-field Nearby Galaxy-cluster Survey - I. Optical imaging*. A&A, 445 3, 805-817.
- [21] Moretti, A., et al. (2014) *WINGS Data Release: a database of galaxies in nearby clusters*. A&A, 564 A138.

- [22] Gullieuszik, M., et al. (2015) *OmegaWINGS: OmegaCAM-VST observations of WINGS galaxy clusters*. *A&A*, 581 A41.
- [23] Moretti, A., et al. (2015) *Galaxy luminosity functions in WINGS clusters*. *A&A*, 581 A11.
- [24] Cava, A. et al. (2009) *WINGS-SPE Spectroscopy in the WIde-field Nearby Galaxy-cluster Survey*. *A&A*, 495 3, 707-719.
- [25] Poggianti, B. M., von der Linden, A., et al. (2006) *The evolution of the star formation activity in galaxies and its dependence on environment*. *ApJ*, 642, 188-215.
- [26] Paccagnella, A., Vulcani, B., et al. (2016) *Slow Quenching of Star Formation in OMEGAWINGS Clusters: Galaxies in Transition in the Local Universe*. *The Astrophysical Journal* 816.
- [27] Poggianti, B. M. (1997) *K and evolutionary corrections from UV to IR*. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 122 3, 399-407.
- [28] Fasano, G. et al. (2012) *Morphology of galaxies in the WINGS clusters*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 420, Issue 2, Pages 926–948.
- [29] de Vaucouleurs, G., et al. (1991) *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*. Springer-Verlag, New York.
- [30] CASTOR, author(s) unknown. *The Spherical Trigonometry vs. Vector Analysis*. URL: http://www.castor2.ca/07_News/headline_062515.html. Ultima modifica: 30 giugno 2015.
- [31] Oñorbe, J., Bernis, A., Bernis, M., *About Arcsec to Parsec*. URL: <http://arcsec2parsec.joseonorbe.com/about.html>. Ultimo accesso: 24 febbraio 2022.
- [32] Vulcani, B., et al. (2011) *The evolution of early-type galaxies in clusters from $z \sim 0.8$ to $z \sim 0$: the ellipticity distribution and the morphological mix*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 413, Issue 2, May 2011, Pages 921–941.