

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA “G. GALILEI”
CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA
TESI DI LAUREA TRIENNALE

Galassie a spirale supermassicce e loro ricerca nel database WINGS

LAUREANDA: MARIA SANTORELLI

RELATORE: PROF. GIUSEPPE GALLETTA

CORRELATRICE: DOTT.SSA DANIELA BETTONI

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

Indice

Introduzione	1
1 Cenni alla morfologia delle galassie e loro proprietà fisiche	3
1.1 Caratteristiche principali delle galassie ellittiche e spirali	3
1.2 <i>Star formation rate</i>	7
1.3 Funzione di Luminosità	9
1.4 Contenuto di HI nelle galassie	10
1.5 Ambienti caratteristici delle galassie	12
2 Descrizione delle proprietà delle galassie a spirale supermassicce	13
2.1 Caratteristiche delle <i>superspirali</i>	14
2.2 Ipotesi sulla formazione delle galassie <i>superspirali</i>	18
3 Ricerca di <i>superspirali</i> nel database WINGS	19
3.1 WINGS	19
3.2 <i>Superspirali</i> nel database WINGS	20
Conclusioni	25
Bibliografia	27

Introduzione

Uno dei problemi fondamentali dell'astrofisica è quello di comprendere la motivazione per cui la materia barionica va a condensarsi, con efficienza piuttosto notevole (circa del 20 – 25%), in strutture molto ben caratterizzate dal punto di vista morfologico e della massa. Come si è quindi originata questa condensazione di gas per formare stelle e galassie con una ben precisa forma e ben precisa caratteristica di massa?

Le galassie sono diversamente identificabili in base sia alla morfologia che alla luminosità; ad esempio, quelle ellittiche hanno un profilo di densità molto piccato al centro (cioè, in questa regione, presentano una fortissima concentrazione di stelle) che le rende facili da identificare grazie alla loro forma sferoidale e sono anche le galassie più massicce; le galassie a spirale invece hanno profili più piatti, e presentano dei dischi di gas popolati da stelle giovani.

L'evoluzione strutturale di questi oggetti è un indicatore fondamentale per la comprensione dei fenomeni di aggregazione della materia. La presenza di galassie a spirale supermassicce, che hanno luminosità in banda ottica pari alle galassie ellittiche giganti e conseguentemente una massa in stelle comparabile con esse, può suggerire un ulteriore tassello all'analisi di questo processo. Lo studio degli oggetti in questione può fornire delle indicazioni rilevanti per quanto riguarda l'evoluzione delle galassie: è noto che quelle con maggiore contenuto di massa sono le ellittiche. Esse possono infatti contenere fino a $10^{12} M_{\odot}$. A tal proposito è interessante il paragone con le *cD*, particolari galassie sferoidali giganti, le quali hanno la possibilità di raggiungere, di norma, anche $10^{13} M_{\odot}$.

La maggior parte della popolazione delle galassie nell'universo è costituita da quelle a spirale, che mediamente hanno una massa intorno a $10^{11} M_{\odot}$.

Otticamente luminose come le galassie ellittiche di ammasso più brillanti, sono le spirali supermassicce che presentano una luminosità in banda *r* pari a $L_r = 8 - 14 L_*$ (con $L_* = 4.3 - 7.5 \cdot 10^{44} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$); e massive, con un diametro isofotale di De Vaucouleurs ($\mu_B = 25 \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$) di 57 – 134 kpc e massa in stelle $M_* = 0.3 - 3,4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$.

Con la presente tesi, appunto, ci si propone di elencarne le principali caratteristiche, mostrando come e in quali database si possono cercare nell'universo vicino. Come ulteriore obiettivo, si vogliono applicare i criteri di selezione di galassie spirali supermassicce agli oggetti presenti nel database di galassie in ammassi vicini (WINGS).

Capitolo 1

Cenni alla morfologia delle galassie e loro proprietà fisiche

1.1 Caratteristiche principali delle galassie ellittiche e spirali

Le analisi morfologiche non possono sostituire le leggi e tutte le possibili implicazioni a livello fisico che si presentano nello studio dei fenomeni naturali, ma costituiscono le basi per le teorie generali. Inoltre possono rivelarsi degli strumenti molto efficaci per la valutazione delle varie ipotesi che è possibile formulare. Sono state proposte numerose classificazioni per le galassie, elaborate con le più disparate modalità, ma, per ora, esse forniscono degli indizi non ancora del tutto chiarificatori e determinanti per quanto riguarda l'evoluzione di queste strutture in relazione al trascorrere del tempo. Con certezza, per ora, possiamo affermare che, alle radici di tutte le classificazioni, ci sono delle caratteristiche strutturali che si ripetono nella composizione galattica: i dischi piatti, con la presenza o meno di bracci di spirale, e gli sferoidi centrali. Nell'universo sono state individuate anche galassie con entrambe le componenti, come le spirali, altre, come le ellittiche, che presentano una componente sferoidale di stelle vecchie simile al bulge.

E' dal 1926, con la prima classificazione di Hubble, che le galassie vennero suddivise in due grandi famiglie secondo la loro forma apparente in cielo: le ellittiche e le spirali.

Le prime sono appunto caratterizzate dalla loro forma ellissoidale che appare all'osservazione. Hanno una elevata concentrazione di luce centrale e hanno una scarsa presenza di gas e polveri. A livello strutturale costituiscono una classe di corpi celesti caratterizzata da una grande eterogeneità. La forma tridimensionale è generalmente triassiale e in alcuni casi può essere più tendente a quella oblata o a quella prolata.

Le galassie ellittiche sono divise in base alla loro ellitticità apparente, (derivante dalla forma con la quale le identifichiamo), e , definendo con a e b i semiassi maggiore

e minore dell'ellisse, è rappresentabile con l'espressione:

$$e = 1 - \frac{b}{a} \quad (1.1)$$

Essa indica appunto l'ellitticità che, moltiplicata per 10, accompagna la lettera E nella sigla per la classificazione di Hubble. Per indicare, ad esempio, una galassia ellittica dalle isofote circolari, si userà la notazione E0. La massima ellitticità per le ellittiche è $e=0.7$ poiché un oggetto con una ellitticità maggiore è considerato una galassia a disco, quindi E7 si riferisce al limite massimo per questo tipo morfologico.

Le galassie spirali sono strutturate principalmente in due componenti luminose: lo sferoide centrale e un disco caratterizzato da bracci di spirale. In esse ci può essere la presenza di una barra centrale dalla quale si dipartono i bracci: in questo caso vengono dette spirali barrate (SB).

Le galassie a spirale vengono suddivise in Sa, Sb o Sc a seconda dei criteri che comprendono la prominente del bulge, l'avvolgimento dei bracci e la risoluzione in stelle e regioni HII. In particolare le Sa sono caratterizzate da bracci molto avvolti e poco risolti in stelle; un piccolo bulge e dei bracci aperti e molto risolti, contraddistinguono, invece le galassie Sc.

Esistono ulteriori classi, aggiunte da Hubble posteriormente alla prima classificazione, quelle delle galassie lenticolari (o S0) e quelle delle galassie irregolari (Irr): le prime presentano un bulge molto luminoso come le ellittiche ma si distinguono da esse per la presenza di un disco, con assenza però di bracci a spirale; le seconde non rientrano in nessuna delle prime categorie in quanto sfuggono ad ogni tentativo di classificazione, presentando aspetti e caratteristiche molto diversi tra loro ed impossibili da inquadrare in precise tipologie che si replicano in altri oggetti.

Per meglio caratterizzare la morfologia, de Vaucouleurs et al. (1976) hanno definito il tipo morfologico come parametro T, con T da -5 a -1 per le galassie ellittiche, 0 per le galassie S0 e infine T da 1 a 10 per le galassie spirali e irregolari.

Una delle motivazioni più significative del classificare morfologicamente queste strutture, è che questi modelli con valore puramente osservativo hanno delle implicazioni a livello fisico.

Pensiamo infatti alla classificazione di Van Den Bergh (1976), nota anche come classificazione DDO (dal *David Dunlap Observatory* presso il quale effettuò le sue ricerche), nella quale l'astronomo, adottò le classi di luminosità per le galassie, utilizzando quella già nota per le stelle. Facendo ciò, notò come, ad esempio, irregolari e spirali di tipo morfologico più avanzato non potessero avere luminosità intrinseca tale da competere con le ellittiche o spirali dei primi tipi (Figura 1.1). Lo scopo principale del suo lavoro fu proprio quello di correlare la morfologia delle galassie con delle proprietà fisiche intrinseche a questi oggetti, in modo che non risultasse un mero lavoro di catalogazione che si riconducesse solo all'osservazione della forma.

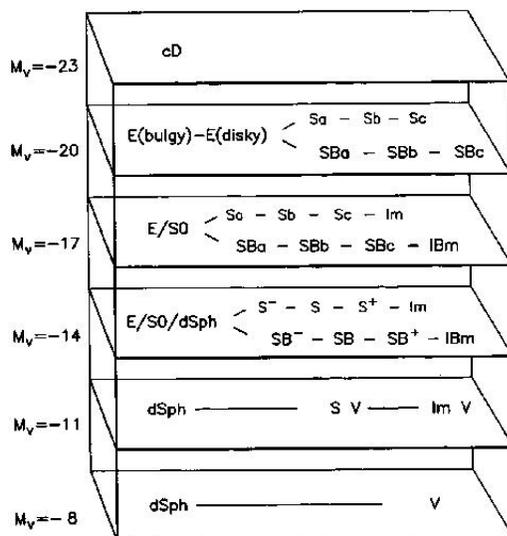


Figura 1.1: Van Den Bergh. La popolazione morfologica di galassie a seconda della luminosità intrinseca in banda V. Si nota come le galassie più luminose in assoluto siano le sferoidali cD e che, arrivati ad una soglia limite, non si possa più distinguere fra i vari sottotipi morfologici.

A quest'analisi aggiungiamo che le galassie più massicce in assoluto si trovano al centro di ammassi e sono ellittiche (si pensi a M87 nel celebre ammasso della Vergine), presentano spesso un eccesso di luce alla periferia causato da fenomeni di “cannibalismo” nei confronti di altri oggetti meno massivi, che vengono inglobati dalla forte buca di potenziale creata dalla loro massa prominente.

Merito di van den Bergh è anche la suddivisione precisa fra i vari tipi di spirali (Sa, Sb o Sc): queste varietà possono essere distinte grazie alla misurazione del rapporto tra la luce proveniente dal bulge e quella proveniente invece dal disco:

- tipo a: $1 < \frac{B}{D} < 3$;
- tipo b: $3 < \frac{B}{D} < 10$;
- tipo c: $\frac{B}{D} > 10$.

Ciò ha permesso di determinare quantitativamente la suddivisione in sottotipi per le galassie a spirale, senza affidarsi alla soggettività, che deriva dalla classificazione puramente osservativa di una galassia.

Un'altra differenza, sostanziale in quest'analisi, separa ellittiche e spirali: le stelle che le compongono. Le caratteristiche di una galassia sono dovute alle caratteristiche integrate delle popolazioni stellari che quella struttura ospita. Infatti stelle vecchie, di tipo F e G , dominano la luce delle galassie ellittiche (che sono più rosse), mentre le

spirali invece hanno una formazione stellare ancora ben attiva e ospitano anche stelle più giovani. Si può notare in effetti che, nei bracci di spirale, dove proliferano il gas e le regioni HII, è presente un'intensa attività di formazione stellare (con colori più blu).

Sulla base di queste considerazioni riguardo alla popolazione stellare dominante, le galassie si suddividono approssimativamente in due ulteriori classi, basate sul colore e sulla morfologia (Strateva et al. 2001). Queste hanno infatti due modalità di disposizione nel diagramma colore-magnitudine: E e S0 tendono a spostarsi nella sequenza rossa e sono dette *early-type galaxies*, spirali e irregolari nella sequenza blu, o altrimenti *late-type galaxies*. La divisione non è però così netta: quello che risulta dai dati è che si presenta un numero di galassie che si pone nella sequenza intermedia come si osserva in Figura 1.2.

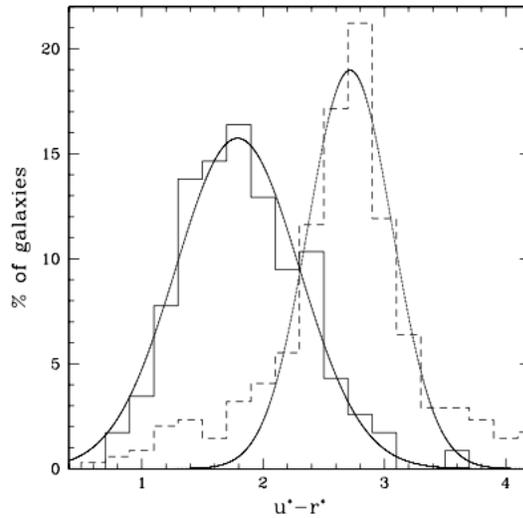


Figura 1.2: In ascissa il colore, in ordinata la percentuale di galassie. Si notano due picchi distinti, in linea continua le galassie *late-type*, a trattini le *early-type*. I due fits sembrano ben riprodotti con due gaussiane, anche se al centro la distinzione non è poi così chiara e precisa (basti notare la coda a sinistra nella curva continua delle *early-type* verso il blu) (Strateva et al. 2001).

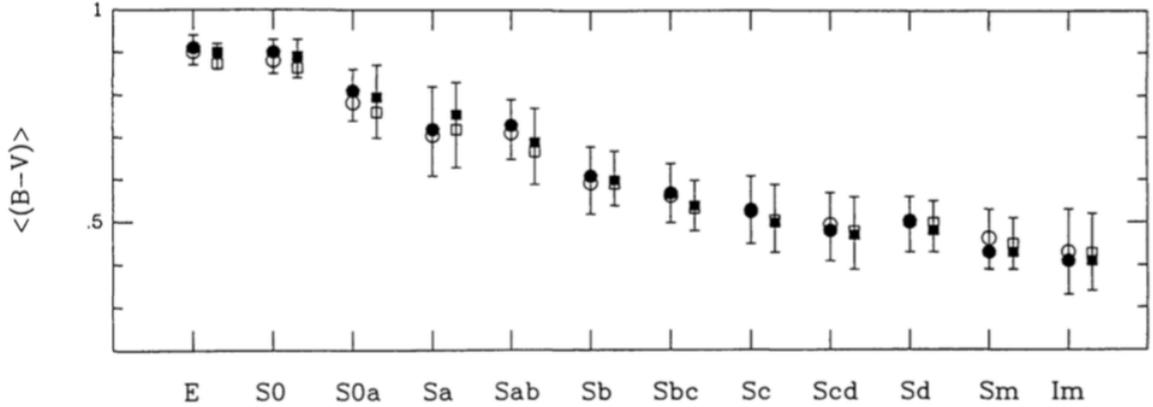


Figura 1.3: Dipendenza della tipologia morfologica galattica dal colore B-V. E' evidente come galassie dei primi tipi siano più rosse, fino ad arrivare alle spirali avanzate e alle irregolari che giacciono nella sequenza blu. (Roberts & Haynes, 1994)

1.2 *Star formation rate*

Un parametro fondamentale da aggiungere alla nostra trattazione riguarda il tasso di formazione stellare o *star formation rate*, dato dalla seguente definizione:

$$SFR \equiv \frac{\partial M_{stars}}{\partial t} \quad (1.2)$$

che è la tendenza, mediata su tutto il volume dell'intera galassia, a trasformare il proprio contenuto di gas e polveri in stelle. Chiaramente questa quantità è legata al tipo di galassia e al mezzo interstellare in essa incluso, che è la materia prima per attivare il processo di formazione stellare.

Questo parametro fisico si può ottenere con diversi metodi, uno dei più comuni utilizza l'intensità delle righe di Balmer. Stelle giovani e massicce, come le O e le B, sono immerse in nubi di gas, dette regioni HII, e producono un cospicuo ammontare di fotoni ad alta energia, che ionizzano il gas circostante. La ricombinazione successiva dell'idrogeno provoca nello spettro delle righe di emissione come quelle della serie di Balmer, per esempio l' H_α a $\lambda_{H_\alpha} = 6563\text{\AA}$ e l' H_β a $\lambda_{H_\beta} = 4861\text{\AA}$. L'intensità della riga presa in esame è proporzionale al tasso di ionizzazione del campo fotonico all'interno della galassia.

L'intensità di queste righe, notevole e facilmente identificabile e il fatto che esse si trovino nell'intervallo ottico meno influenzato dalla presenza dell'assorbimento delle polveri (ma che comunque ne risente) le rendono l'indicatore classico per eccellenza nel calcolo di SFR per le galassie a spirale. Questa modalità di indagine si appoggia sulla presenza di stelle giovani e regioni HII di conseguenza, quindi non è utilizzabile per galassie ellittiche, che presentano la quasi assenza di polveri, bassa attività di

formazione stellare e scarsa presenza di gas.

Un altro indicatore importante è costituito dalla luminosità bolometrica nell'infrarosso: tutti i fotoni blu e UV prodotti dalle stelle giovani vengono presto estinti dalle polveri che permeano la galassia, mentre quelli nell'infrarosso, a λ più alta, riescono ad oltrepassarle senza subirne l'assorbimento, uscendone quindi quasi indisturbati. Considerando l'emissione totale della galassia fra 3 e 1000 μm , la relazione che lega *star formation rate* e luminosità bolometrica integrata fra queste lunghezze d'onda è espressa dalla relazione:

$$SFR = 10^{-10} \frac{L_{IR}}{L_{\odot}} \quad (1.3)$$

dove il tasso di formazione stellare è espresso in $M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$

Un passaggio chiave nell'analisi e nella comprensione dell'evoluzione delle strutture stellari è la relazione tra il tasso di formazione delle stelle e le condizioni iniziali del mezzo interstellare. Come abbiamo già accennato, esiste, inoltre, un'interdipendenza fra tipo morfologico e SFR, reso esplicito, nel 1959 da Schmidt. Egli espresse tramite una legge totalmente empirica e parametrica, quest'idea di fondo: indicando con ρ_{gas} la densità del gas presente in una galassia giunse alla:

$$\frac{\partial \rho_{gas}}{\partial t} = -k \rho_{gas}^n \quad (1.4)$$

dove n è un parametro che dipende dall'indicatore usato, ma che di norma varia nell'intervallo $n \simeq 1 - 2$. Considerando il caso lineare, ovvero di $n = 1$, in cui il tasso di formazione stellare è linearmente proporzionale alla densità del gas presente nella galassia, l'equazione differenziale è risolvibile facilmente e ha soluzione:

$$\rho_{gas}(t) = \rho_{gas,0} e^{-kt} \quad (1.5)$$

che esprime l'evoluzione della densità del gas in funzione del tempo. In questa compaiono due parametri, $\rho_{gas,0}$, cioè la densità iniziale del mezzo interstellare e k , dimensionalmente l'inverso di un tempo, detto tempo scala, cioè la frequenza con la quale la galassia forma delle stelle. Sostituendo nell'equazione appena trovata la definizione di SFR:

$$SFR(t) = \frac{\partial M_{stars}}{\partial t} = -\frac{\partial \rho_{gas}}{\partial t} = -k \rho_{gas,0} e^{kt} = -K e^{-kt} \quad (1.6)$$

a sua volta K corrisponde al tasso di formazione stellare al tempo iniziale:

$$K = \left. \frac{\partial M_{stars}}{\partial t} \right|_{t=0} \quad (1.7)$$

L'inverso di K , τ , stabilisce il tempo-scala della formazione delle stelle durante la vita della galassia. Per i diversi tipi morfologici, la situazione è la seguente:

- per le ellittiche e le S0, K è dell'ordine di $10^{1-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, $\tau \simeq 1 - 2 \text{ Gyr}$,

- per le spirali dei primi tipi (Sa e Sb), $K \simeq 10 - 50 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, $\tau \simeq 5 - 7 \text{ Gyr}$,
- per le spirali avanzate e irregolari, $K \simeq 1 - 10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, $\tau \simeq 10 - 15 \text{ Gyr}$,

Ovvero le galassie di tipo *early* si sono formate in un tempo abbastanza ristretto nel passato con un tasso di formazione stellare molto alto; viceversa le spirali degli ultimi tipi avrebbero un'attività stellare, oggi, simile a quella che possedevano in passato.

Si evince quindi come il tasso di formazione stellare sia un parametro fondamentale, come la massa e la luminosità, per la definizione della struttura di una galassia e della sua evoluzione nel tempo.

1.3 Funzione di Luminosità

Per comprendere meglio le caratteristiche delle spirali supermassicce, si accenna in questa sezione ad uno strumento basilare nel campo della cosmologia e nello studio delle popolazioni di sorgenti cosmiche: la funzione di luminosità.

In cosmologia, date le caratteristiche peculiari di questa branca dell'astronomia, si impone una trattazione statistica attenta e accurata. Ciò permetterà di fornire, in modo autoconsistente, l'intervallo di incertezza associata alle misure, dati i numerosi limiti, come la distanza delle sorgenti, o il fatto di avere a disposizione un solo universo, del quale vogliamo inferire le proprietà globali, come campione del quale possiamo osservare eventi solo sul cono-luce. Si tratta quindi di definire le proprietà generali e intrinseche di una popolazione, nel nostro caso di galassie, e lo si mette in pratica servendosi della funzione di luminosità. Questa analisi viene affrontata con lo studio della luce prodotta dalle galassie in diverse bande fotometriche e fornisce degli indizi riguardo l'evoluzione dei suddetti oggetti se viene messa a confronto l'evoluzione di essa con il redshift z ; infatti restituisce la densità nella quale si trova il campione di galassie considerato. In tal modo permette di ricavare l'effetto della concentrazione dell'ambiente sulle galassie stesse.

Si pongono sulle ascisse la luminosità (o magnitudine) e sulle ordinate il numero di oggetti; la funzione che meglio riproduce, in generale, i dati osservativi è quella di Schechter (1976), definita dall'equazione:

$$\phi(L) dL = \phi^* \left(\frac{L}{L_*} \right)^{\alpha} e^{-\left(\frac{L}{L_*}\right)} d\left(\frac{L}{L_*} \right) \quad (1.8)$$

essendo $\phi(L) dL$ il numero di galassie per unità di volume nell'intervallo di luminosità $L + dL$ con i seguenti parametri:

- α è la pendenza della curva, per basse luminosità, nel grafico con assi logaritmici;
- L_* è la luminosità caratteristica, che definisce il cambio di pendenza della curva, che corrisponde ad una magnitudine caratteristica M_* ;

- ϕ_* è la normalizzazione della funzione di luminosità $\phi(L)$, che fornisce un'idea della densità del campione preso in analisi.

L'analisi di questa funzione suggerisce che il numero di galassie aumenta al diminuire della luminosità: le galassie più grandi e massive sono rare, viceversa quelle piccole e meno brillanti dominano la popolazione. Possiamo anche dedurre, dalla Figura 1.4 che il numero di galassie, inizialmente, cresce rapidamente con la magnitudine, per poi rendersi stabile, su un tasso di crescita meno elevato, quando le magnitudini cominciano a diventare maggiori di circa $M_B \simeq -19$ mag.

Si nota come gruppi galassie negli ambienti più disparati (sia a bassa che ad alta densità), presentino lo stesso andamento funzionale. L'idea di base è che esista quindi un motore unico che realizza queste condensazioni di gas in stelle e galassie.

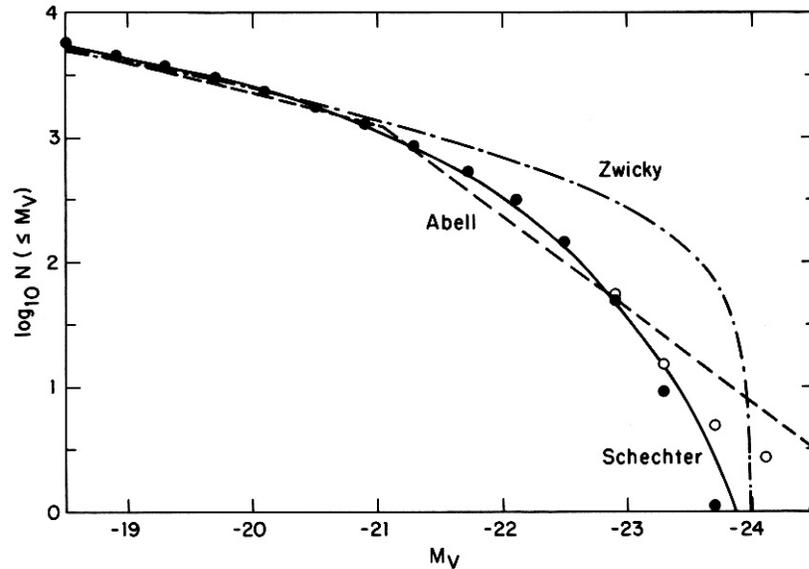


Figura 1.4: Funzione di luminosità per alcuni ammassi di galassie. Vengono riprodotti i fits di Abell, Schechter e Zwicky, che propongono tre leggi empiriche differenti per esprimere il numero di galassie in funzione della magnitudine. Si vede come la curva che interpola meglio i dati è quella proposta da Schechter. I dati rappresentati con pallini neri sono galassie normali, i pallini vuoti galassie cD al centro di ammassi (Sarazin, 1986)

1.4 Contenuto di HI nelle galassie

Un altro costituente importante da considerare nello studio delle galassie è il contenuto di idrogeno (HI) neutro, in quanto necessario per la loro formazione ed evoluzione.

L'idrogeno neutro nelle condizioni di bassa densità in cui si trova nel mezzo intergalattico emette una riga alla lunghezza d'onda di 21 cm (dovuta all'inversione dello

spin dell'elettrone): questo vuol dire che sono necessari dei radiotelescopi per osservare questa transizione. La misura che si ottiene è un buon indicatore della massa dell'idrogeno neutro contenuto nella galassia. Poiché questo elemento, che si suppone essere quello costituente del disco proto-galattico, è continuamente utilizzato nei processi di formazione stellare, la sua percentuale rispetto alla massa totale è destinata a diminuire.

E' stato scoperto che esiste una relazione stretta fra tipo morfologico e contenuto di idrogeno neutro rispetto alla massa totale della galassia, come mostrato in Figura 1.5.

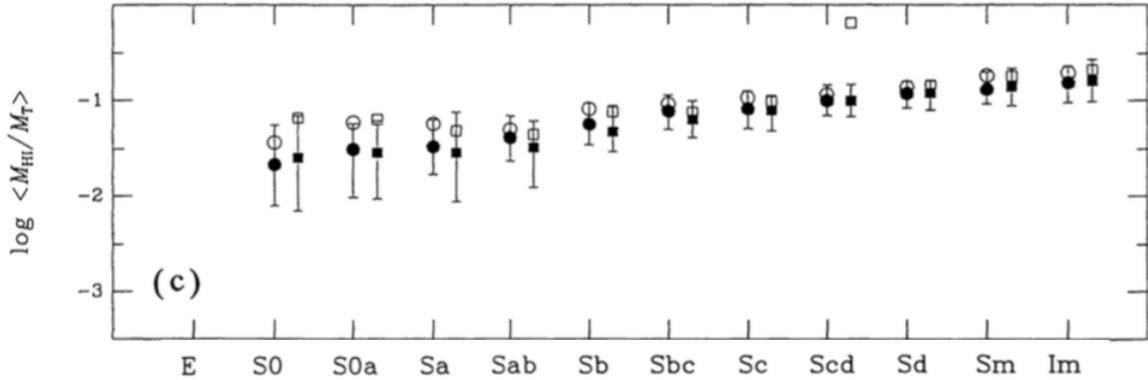


Figura 1.5: Rapporto tra massa di HI e massa totale della galassia in ascissa, tipo morfologico in ordinata. Si nota come la concentrazione di idrogeno neutro aumenta nelle galassie di tipo *late*. Le ellittiche, come ci si aspetta, hanno basse percentuali di gas neutro

Si può quindi affermare, riassumendo quanto appena descritto nelle precedenti sezioni, come galassie ellittiche e lenticolari, con le loro popolazioni di stelle vecchie, abbiano un colore tendente al rosso e posseggano poco gas: da ciò derivano i loro bassi tassi di formazione stellare, in quanto hanno consumato tutto il materiale a disposizione per produrre stelle. Viceversa le spirali e le irregolari, con una concentrazione di gas freddo maggiore e un colore blu, dovuto alle popolazioni giovani di stelle, riescono ancora a formare stelle, possedendo nei dischi la materia prima necessaria.

1.5 Ambienti caratteristici delle galassie

Aggiungiamo un cenno al rapporto tra tipo morfologico e densità dell'ambiente: c'è da chiedersi se le varie tipologie di galassie si possano trovare indifferentemente negli ambienti più disparati, dagli *ammassi* caratterizzati dall'elevata densità di galassie per unità di area, a regioni in cui le galassie hanno solo pochi compagni, per esempio il Gruppo Locale di cui fa parte la Via Lattea, o sono isolate il cosiddetto *campo*, e se questo, in qualche modo, sia indizio per comprendere la loro complessa dinamica evolutiva.

Già nel 1931 Hubble e Humason scoprirono che nell'universo locale, nei vicini ammassi di Virgo e Coma ad esempio, ellittiche e lenticolari mostravano la tendenza a dominare queste regioni dense, mentre le spirali erano più rare e si trovavano principalmente nel campo. Evidentemente la densità dell'ambiente caratterizza pesantemente le proprietà morfologiche, ma soprattutto fisiche, di queste strutture.

Grazie alle potenzialità di risoluzione di HST, alla fine degli anni '90 sono state compiute diverse analisi, che hanno portato a capire meglio il legame tra le differenti morfologie. Dressler et al., nel 1997, trovarono che le spirali, nell'intervallo di *redshift* che va da 0.3 a 0.4, sono $\sim 2 - 3$ volte più numerose nel campo rispetto alle altre tipologie e che, le lenticolari sono più frequenti rispetto a *redshift* maggiori. Le ellittiche dominano di gran lunga la popolazione di galassie degli ammassi (sono $\sim 40\%$). Tutto ciò implicherebbe che a $z \simeq 1$ si sia attivato un processo evolutivo che abbia portato all'aumento di popolazione di S0, altrimenti non si riuscirebbe a spiegare la discordanza così forte tra le percentuali di presenza delle varie tipologie morfologiche.

Come vedremo in seguito, le spirali supermassicce seguono l'andamento indicato per la loro tipologia morfologica.

Capitolo 2

Descrizione delle proprietà delle galassie a spirale supermassicce

In questo capitolo, ci si prefigge di discutere la problematica delle galassie *super-spirali* e delle motivazioni per cui sono da ritenersi oggetti peculiari e indicativi di fenomeni evolutivi su larga scala. Ricalcando il lavoro sulle galassie a spirali superluminose di Ogle et al. (2016), cerchiamo ora di andare alla radice della questione che ci proponiamo di esaminare. Da questo articolo estrapoliamo dei dati e delle caratteristiche delle galassie a spirale supermassicce, per poi applicare gli stessi ragionamenti ai nostri dati.

Le galassie più massicce dell'universo si sono probabilmente formate da picchi di densità nell'alone di gas primordiale, collassato in nubi, che ha poi dato vita alle prime strutture stellari conosciute. Tuttavia si può anche dedurre che, in ambienti molto densi come gli ammassi, possano avvenire collisioni tra oggetti più piccoli che si uniscono per dare vita ad uno nuovo più consistente e massiccio. Da questo quadro generale, ne dovrebbe derivare la distribuzione di massa (e quindi di luminosità) empiricamente descritta dalla funzione di Schechter.

La dicotomia presente fra galassie *early-* e *late-type*, è molto utile per comprendere la relazione fra SFR e altre proprietà intrinseche dell'oggetto. Per galassie di tipo *late*, il tasso di formazione stellare presenta una correlazione stretta con la massa in stelle, mentre la maggior parte delle *early-type* presentano degli SFR minori perché hanno quasi completamente esaurito il gas freddo necessario a formarne di nuove. Ci sono delle evidenze che suggeriscono un limite alla massa delle galassie a disco con presenza di formazione stellare pari a $3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Inoltre, a completare la panoramica d'insieme, mentre lo SFR delle galassie a disco diminuisce mano a mano che viene consumata la materia prima, ovvero il mezzo interstellare, necessaria alla produzione di nuove stelle, le galassie lentamente scivolano via dalla sequenza blu mentre esauriscono il loro gas.

Questo declino è un processo lento e graduale, che avviene in tempi dell'ordine del miliardo di anni dopo che il gas nel disco galattico viene completamente consumato.

Diverse teorie cercano di spiegare i meccanismi con i quali viene lentamente interrotto il rifornimento di gas e polveri per le galassie a disco più massive. Ne citiamo una che ipotizza che il *merging*, cioè l'unione di due o più galassie, sia una delle cause più frequenti di distruzione dei dischi con la conseguente accelerazione del consumo di materia necessaria alla formazione stellare (Baldry et al. 2004).

Lo studio delle galassie a spirale più massive ci può fornire delle indicazioni riguardanti i processi di evoluzione galattica, utile ad individuare fra di essi il responsabile per la distruzione dei dischi di gas. Il suddetto processo che porta ad accendere delle reazioni che facilitano la produzione stellare, consumando tutto il gas rimasto e facendo sì che queste galassie si spostino nella sequenza rossa delle ellittiche e lenticolari. L'esistenza di spirali giganti con $M_{stars} > 10^{11} M_{\odot}$ suggerisce la sopravvivenza dei dischi dopo determinati meccanismi evolutivi, come il *merging*, che pospongono la loro completa estinzione.

2.1 Caratteristiche delle *superspirali*

Come evidenziato da Ogle et al. (2016), conducendo l'indagine e la ricerca di spirali massicce usando i dati della Sloan Digital Sky Survey (SDSS) e del satellite IR WISE entro un redshift $z < 0.3$; il colore di queste galassie si colloca nella sequenza blu, similmente a quelle dello stesso tipo, ma che posseggono luminosità decisamente inferiore. Questo è ben evidente in Figura 2.1.

La loro massa, come già accennato in precedenza, si attesta tra i valori di $M_{stars} = 0.3 - 3.4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$.

Stimando la loro SFR vediamo come questa sia di circa $5 - 65 M_{\odot} \cdot yr^{-1}$, che è un valore molto più alto delle galassie spirali normali. Per un paragone più esplicito, si pensi, ad esempio che, per la Via Lattea, galassia del tipo SBbc, con massa in stelle di circa $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, questo parametro è vicino a $2 M_{\odot} \cdot yr^{-1}$.

I loro diametri isofotali, alla brillantezza superficiale di $\mu_B = 25.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$, sono di 57-134 kpc, con una media di 72 kpc.

Queste galassie spaziano attraverso parecchie tipologie di spirali, da quelle con bracci discontinui e frammentati, ad esemplari di *grand-design spiral galaxy*: una gran parte di queste esibisce una barra. In alcuni casi ci sono anche delle galassie con caratteristiche morfologiche peculiari, come anelli, bracci multipli o con uno prominente.

La decomposizione fotometrica bidimensionale di questi oggetti è stata trattata con un modello basato sulla legge di de Vaucouleurs, per lo sferoide:

$$I(r) = I_e e^{-7.67[(r/r_e)^{\frac{1}{4}} - 1]} \quad (2.1)$$

con I_e ed r_e raggio efficace e brillantezza superficiale efficace e una legge esponenziale per il disco:

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{r}{h}} \quad (2.2)$$

dove I_0 è la brillantezza superficiale al centro, e h il raggio di scala. Questa analisi ha portato ad una media del rapporto $B/T = 0.17$ (luminosità totale del bulge rispetto a quella totale della galassia), con valori che non scendono mai al di sotto di 0.1. La mancanza di questo range di valori potrebbe essere consistente con una preponderante attività passata di *merging*.

Tra le galassie identificate, alcune hanno evidenze di doppi sferoidi o nuclei, segno di essere risultato di interazioni di più oggetti, andati a formare una struttura di massa molto consistente.

Per quanto riguarda invece l'ambiente in cui si trovano queste galassie, si nota come la maggior parte di esse siano galassie di campo. Questo sembra essere ragionevolmente accettabile, visto che, negli ammassi di galassie, al centro troviamo delle cD o ellittiche giganti, che tendono ad attrarre a sé oggetti più piccoli, con fenomeni di cannibalismo. In questo tipo di configurazione sarebbe difficile la coesistenza di questi nuclei massicci con le superspirali, che, a causa delle interazioni mareali, perderebbero presto il gas contenuto nel disco.

Una questione interessante viene sollevata quando si considerano i *redshift* (e quindi la distanza) delle galassie *superspirali*: nel campione analizzato da Ogle et al. (2016), queste galassie si trovano nel bin di redshift più alto del campione cioè $0.2 < z < 0.3$. Ci si chiede, pertanto, se esistano esempi di galassie dalle caratteristiche analoghe a quelle prese in esame anche a distanze molto minori. Un prototipo ben noto di galassia a spirale gigante nell'universo locale è Malin 1, a $z = 0.083$, che, tuttavia, nonostante l'enorme disco di 70 kpc, ha una brillantezza superficiale molto bassa, una massa in stelle di $1.2 \cdot 10^{10} M_\odot$ e un SFR di $1.2 M_\odot \cdot yr^{-1}$, decisamente molto inferiore alle galassie considerate in questa analisi.

Rimane comunque la constatazione sulle grandi dimensioni di questi oggetti, come è mostrato in Figura 2.2.

Altre galassie di questo tipo sono state trovate nell'universo locale, ad esempio da Romanishin (1983), ma nessuna di queste è comparabile con le superspirali di cui stiamo parlando. Potrebbero essere utili nello studio accurato della formazione di dischi con una grandezza al di sopra della norma, ma non competono con esse. Hanno, infatti, una massa dell'ordine di $10^{10} M_\odot$. Possiamo affermare quindi che esemplari di galassie spirali supermassive possono essere trovate solo a grandi redshift.

Per rendere l'analisi più coerente, nel lavoro di Ogle et al. (2016), viene poi resa evidente, tramite un grafico, la dipendenza fra *star formation rate* e massa stellare delle galassie. Si nota una relazione fra queste due grandezze e inoltre, che le *su-*

perspirali sono in un intervallo ben precisato del piano, cioè dove SFR e massa sono entrambi parecchio consistenti.

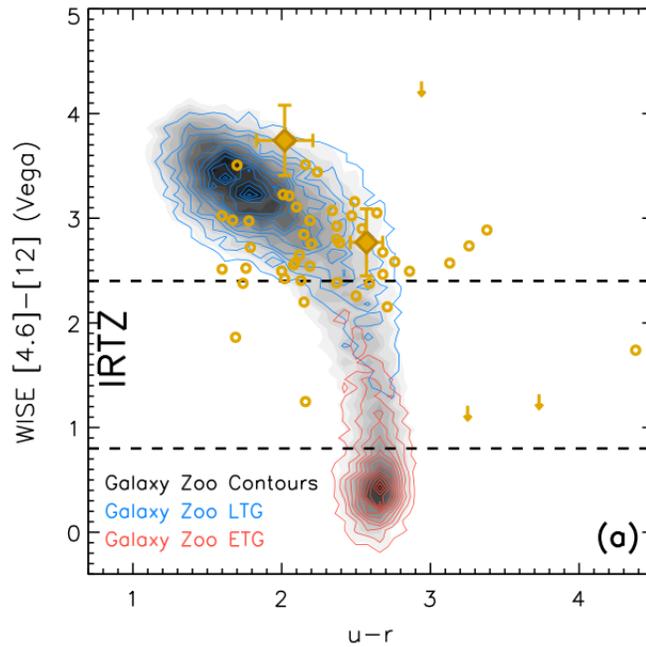


Figura 2.1: In questo grafico sono messi a paragone i dati di Ogle sulle *superspirali* con quelli di Lintott et al (2008) ricavati dal progetto *Galaxy Zoo*, un massivo tentativo di classificare quante più galassie possibile con l'aiuto dell'alto numero di partecipanti grazie all'utilizzo di piattaforme online condivise. Possiamo notare come le spirali massive (cerchi gialli) si collocano nella sequenza blu (sopra) del grafico colore-magnitudine, a dimostrare che questi oggetti, nonostante la loro massa, hanno un'attività stellare molto consistente (Ogle et al., 2016)

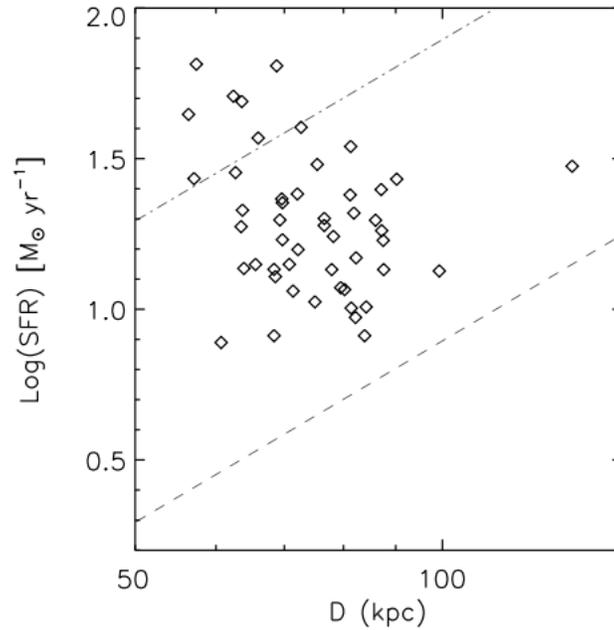


Figura 2.2: Viste le enormi dimensioni delle *superspirali*, qui a confronto lo *star formation rate* contro il diametro della galassia. L'intervallo dei diametri si attesta fra 57 e 134 kpc. Ogle et al. (2016). Nel capitolo tre, vedremo come i nostri dati rispondono alla medesima analisi.

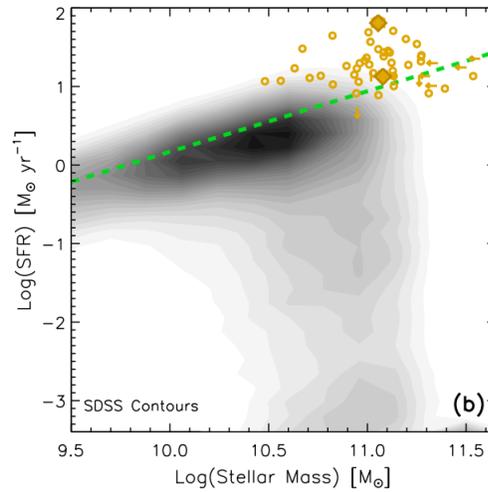


Figura 2.3: Dipendenza della *star formation rate* alla massa della galassia, dei dati del campione di Ogle paragonati con quelli forniti da Chang et al. (2015) da SDSS e WISE. La linea tratteggiata indica la sequenza principale della formazione stellare a $z \sim 0$. Le galassie sopra la linea hanno tempi di formazione generalmente più bassi dell'età dell'universo (Ogle et al.). Nel capitolo 3 verificheremo se i dati a nostra disposizione riproducono lo stesso andamento.

2.2 Ipotesi sulla formazione delle galassie *super-spirali*

Stimando la densità volumetrica di questi oggetti, si trova che é $\sim 60 \text{ Galassiepc}^{-3}$ a $z < 0.3$, un numero enormemente piccolo, che indica la rarità di questi oggetti.

Probabilmente queste enormi strutture si formano dal *merging* di galassie spirali con dischi ricchi di gas con altre simili, nelle quali i dischi stellari interni vengono distrutti, ma rimangono quelli esterni, composti perlopiù da idrogeno neutro, che si combinano per riformare il disco di gas e stelle. In questo caso essi sono molto più estesi di prima, visto che sono aumentate le masse in gioco. Ovviamente questo processo è favorito sia da un angolo di impatto particolare fra i due oggetti che da una rotazione del disco che non smorzi troppo il momento angolare.

Un'altra teoria di formazione riconduce all'addensamento del gas freddo, fenomeno che avverrebbe più gradualmente rispetto all'ipotesi formulata precedentemente. Sarà, quindi, importante studiare la distribuzione spaziale del gas neutro e dell'ambiente in cui avviene la formazione stellare, per comprendere meglio come si siano formati i dischi estesi.

Quello che sorprende, in prima battuta, è proprio come questo tipo di oggetti non sia già sulla sequenza delle galassie rosse, con bassi o quasi nulli tassi di formazione stellare. Infatti queste galassie, nonostante la loro massa enorme, continuano a produrre stelle, diventando un'eccezione nell'universo. Ci sono varie ragioni possibili. Innanzitutto, esse potrebbero sopravvivere con la loro struttura quasi intatta al *merging*, grazie ai loro dischi estesi e massivi. Alcuni esemplari sembrano, infatti, aver mantenuto il loro disco gassoso intatto, anche dopo interazioni con altre galassie. Come seconda opzione, i buchi neri al centro di queste strutture potrebbero non essere sufficientemente massivi per rimuovere il gas dal disco di gas presente intorno alla galassia. Come ultima possibilità, va considerato che l'alone che circonda la galassia potrebbe non possedere abbastanza massa da sospendere l'addensamento del gas freddo nel disco, necessario a produrre stelle.

Ogle afferma come questo tipo di oggetti potrebbero essere i progenitori di galassie lenticolari giganti sulla sequenza rossa, che hanno ormai esaurito la loro capacità di produzione stellare.

Capitolo 3

Ricerca di *superspirali* nel database WINGS

3.1 WINGS

WINGS, *Wide-field Nearby Galaxy Survey*, è un progetto a lungo termine nato dalla collaborazione internazionale di astronomi italiani, spagnoli, danesi, statunitensi e australiani che si prefigge l'analisi e lo studio di galassie e ammassi di galassie nell'universo locale, per il loro utilizzo nella formulazione delle teorie evolutive e dinamiche di queste strutture. Si era resa necessaria, infatti, la localizzazione di un "punto zero", che fornisse una base per l'esplorazione a *redshift* più alti e ciò richiedeva un'analisi precisa e accurata di ammassi di galassie nell'Universo locale.

Utilizzando immagini a grande campo ($30' \times 30'$), in più bande (U, B, V, J, K), e spettroscopia ottica, questa *survey* comprende un campione completo di 77 ammassi di galassie selezionati dal database di ROSAT (abbreviazione per Röntgensatellit, un satellite con a bordo un telescopio sensibile alle lunghezze d'onda X), a *redshift* compresi fra 0.04 e 0.07 e posizionati fuori dal piano galattico, con $|b| > 20^\circ$. L'*imaging* in banda ottica dei *clusters* selezionati, in banda B e V, costituisce il pilastro del progetto, detto anche WINGS-OPT.

L'analisi delle immagini ha permesso di ricavare i cataloghi fotometrici delle galassie nel campo di vista. Per ottenere la morfologia in maniera automatica su questa grande base di dati, è stato sviluppato un programma di riconoscimento per i vari tipi morfologici (MORPHOT, Fasano et al. 2012), che restituisce per ogni galassia (che abbia un'area apparente di almeno 200 pixels) il suo corrispettivo *Hubble Type number*, T.

Il campo di vista delle immagini, come accennato prima, copre circa mezzo grado quadrato di cielo e quindi comprende un'area in cui per gli ammassi più vicini, $z \sim 0.4$, si vede solo la parte centrale mentre per quelli più lontani, $z \sim 0.6$, si rag-

giungono anche zone più esterne. il campione preso in esame risulta essere quindi mediamente al centro dell'ammasso, ossia in una zona in cui c'è un'alta densità di galassie. Ci attendiamo, quindi, che il numero di galassie presenti sia per la maggior parte costituito dalle ellittiche, che, come abbiamo visto nel capitolo 1, tendono a dominare la popolazione dei *clusters*.

Una parte importante del progetto WINGS è stata anche la parte spettroscopica, cioè WINGS-SPE, che ha permesso di ottenere gli spettri, dal lontano ultravioletto fino al vicino infrarosso, delle galassie selezionate dalle immagini. Grazie a questi spettri si sono potuti misurare i *redshift*, e quindi determinare se la galassia appartiene o no all'ammasso, e calcolare anche le masse stellari e le SFR per vari bin di età (Fritz et al. 2007). Specificamente, le masse stellari sono state ottenute con i modelli di Fritz et al. eseguendo un fit sugli spettri.

3.2 *Superspirali* nel database WINGS

Il database utilizzato si compone di 5265 galassie, esse sono tutte le galassie di WINGS che hanno sia fotometria che spettroscopia che morfologia (quindi possono essere galassie sia appartenenti agli ammassi che di sfondo). Da questo primo campione sono state selezionate prima di tutto le spirali, cioè quelle galassie con tipo morfologico $T \geq 1$, esse sono 1487, cioè il 28% del totale.

In seguito, a questo sottocampione sono stati applicati dei criteri che ricalcano quelli di Ogle per identificare spirali supermassicce. Per prima cosa sono state individuate tutte le spirali con una massa $M_{tot} > 10^{11} M_{\odot}$, successivamente da questo ulteriore sottocampione, si sono individuate tutte le galassie che possedessero un tasso di formazione stellare $SFR > 5 M_{\odot} yr^{-1}$.

Sono state trovate 147 galassie con massa $M_{tot} > 10^{11} M_{\odot}$, pari quindi al 12% di tutte le galassie a spirale: di queste solo 8, cioè lo 0.04%, hanno una $SFR > 5 M_{\odot}/yr^{-1}$.

Nella tabella seguente sono elencate le principali caratteristiche delle 8 galassie trovate e in Figura 3.1 viene mostrato il grafico SFR vs. massa.

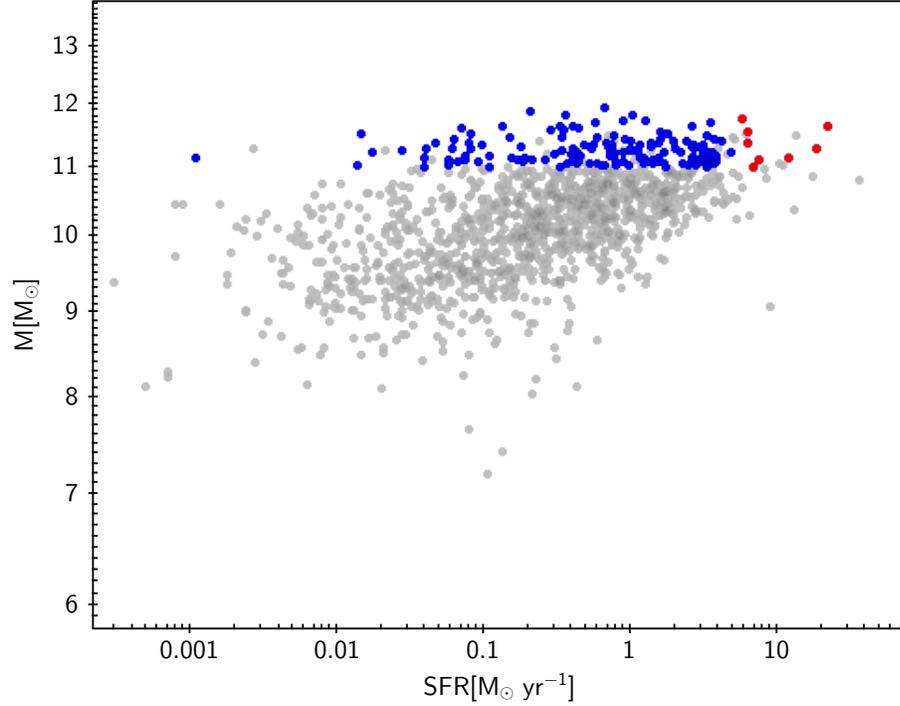


Figura 3.1: Le galassie identificate come *superspirali*, sono indicate con i puntini rossi, mentre tutte le spirali del campione WINGS sono identificate con pallini grigi. Sono state anche evidenziate di blu anche tutte le galassie a spirale con massa $M_{tot} > 10^{11}$. Negli assi logaritmici troviamo in ascissa il tasso di formazione stellare in masse solari per anno, in ordinata la massa totale della galassia in masse solari.

Escluso un caso, cioè WINGSJ043838.78-220325.0 in Abell 500, tutte le galassie trovate non appartengono agli ammassi di WINGS, ma sono galassie di sfondo e quindi con redshift più alto. Sono quindi tutte *superspirali* di campo.

Con i dati a nostra disposizione abbiamo ricavato alcune proprietà di queste galassie. Con la nota equazione:

$$v = H_0 d \quad (3.1)$$

dove v è la velocità di recessione delle galassie, d la distanza in Mpc e assumendo come costante di Hubble $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, possiamo ricavare dal dato cz la distanza delle galassie prese in esame approssimando la relazione

$$v \sim cz \quad (3.2)$$

per $z \ll 1$, da cui:

$$d = \frac{cz}{H_0} \quad (3.3)$$

calcolando così la magnitudine assoluta di ciascun oggetto, data la magnitudine apparente con il modulo di distanza:

$$(m - M)_V = -5 + 5 \log d \quad (3.4)$$

e quindi:

$$M_V = m_V + 5 - 5 \log d \quad (3.5)$$

si ottengono i risultati riportati nella tabella seguente.

Galassia	Cluster	z	M_{tot} M_\odot	SFR $M_\odot yr^{-1}$	T	r arcsec	R kpc	m_V	M_V
WINGSJ125818.69-172542.9	A1644	.213	11.10	7.60	5.4	4.65	23.51	19.11	-20.98
WINGSJ215221.72-154919.1	A2382	.438	11.77	5.77	2.0	4.53	52.83	19.95	-21.96
WINGSJ215655.60-074241.1	A2399	.315	11.38	6.29	3.9	5.07	40.02	19.21	-21.85
WINGSJ043101.79-612826.2	A3266	.205	11.16	11.86	4.1	10.22	49.51	18.85	-21.15
WINGSJ062652.68-541401.9	A3395	.235	11.55	6.25	5.2	8.35	47.22	17.42	-22.91
WINGSJ114444.89-341222.2	A3490	.406	11.63	22.13	2.9	4.28	45.67	19.48	-22.23
WINGSJ114511.38-341747.9	A3490	.192	11.00	6.82	1.3	6.2	27.94	18.51	-21.33
WINGSJ043838.78-220325.0	A500	.067	11.28	18.81	1.0	14.27	20.67	15.38	-22.00

Tabella 3.1: Proprietà delle 8 galassie trovate nell'intero campione, secondo i criteri precedentemente esposti riguardo alla massa, SFR e tipo morfologico

Troviamo come le magnitudini assolute siano nel range $-23 < M_V < -21$ e come i diametri delle galassie trovate sono compresi fra 47 e 105 kpc. In particolare il limite superiore di questo intervallo, la galassia WINGSJ215655.60-074241.1 in A2382, è molto estesa ($D > 100$ kpc), con una $SFR \sim 6 M_\odot yr^{-1}$, che la pone quindi ad essere un ottimo candidato per una spirale supermassiccia.

L'unica galassia a basso redshift, cioè che appartiene ad uno degli ammassi di WINGS, è riprodotta nella figura 3.2 in tricromia: si vede come sia una galassia spirale di tipo *early* (infatti ha il tipo morfologico $T=1$), con un bulge molto luminoso rispetto al disco.

Ciò non toglie che gli altri oggetti trovati, appartenenti al campo aperto, siano anche spirali di altri tipi. Per sostenere quest'affermazione, qui di seguito forniamo un istogramma riassuntivo sul tipo delle *superspirali* trovate.

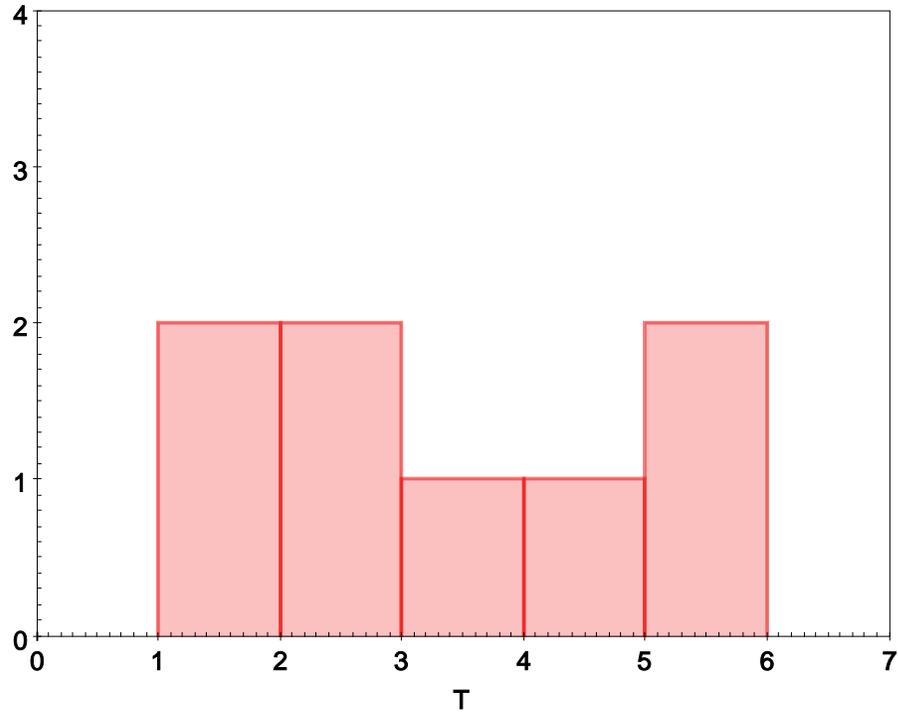


Figura 3.2: I tipi morfologici delle 8 galassie rispondenti alle caratteristiche cercate. Si nota come comprendano quasi tutti i tipi di spirali, dalle Sa fino alle Sc.

Anche nella nostra ricerca troviamo, come nel lavoro di Ogle et al. (2016), le *superspirali* nel campione a redshift più alto: ovvero questi oggetti sembrano essere decisamente molto rari nelle regioni centrali degli ammassi.

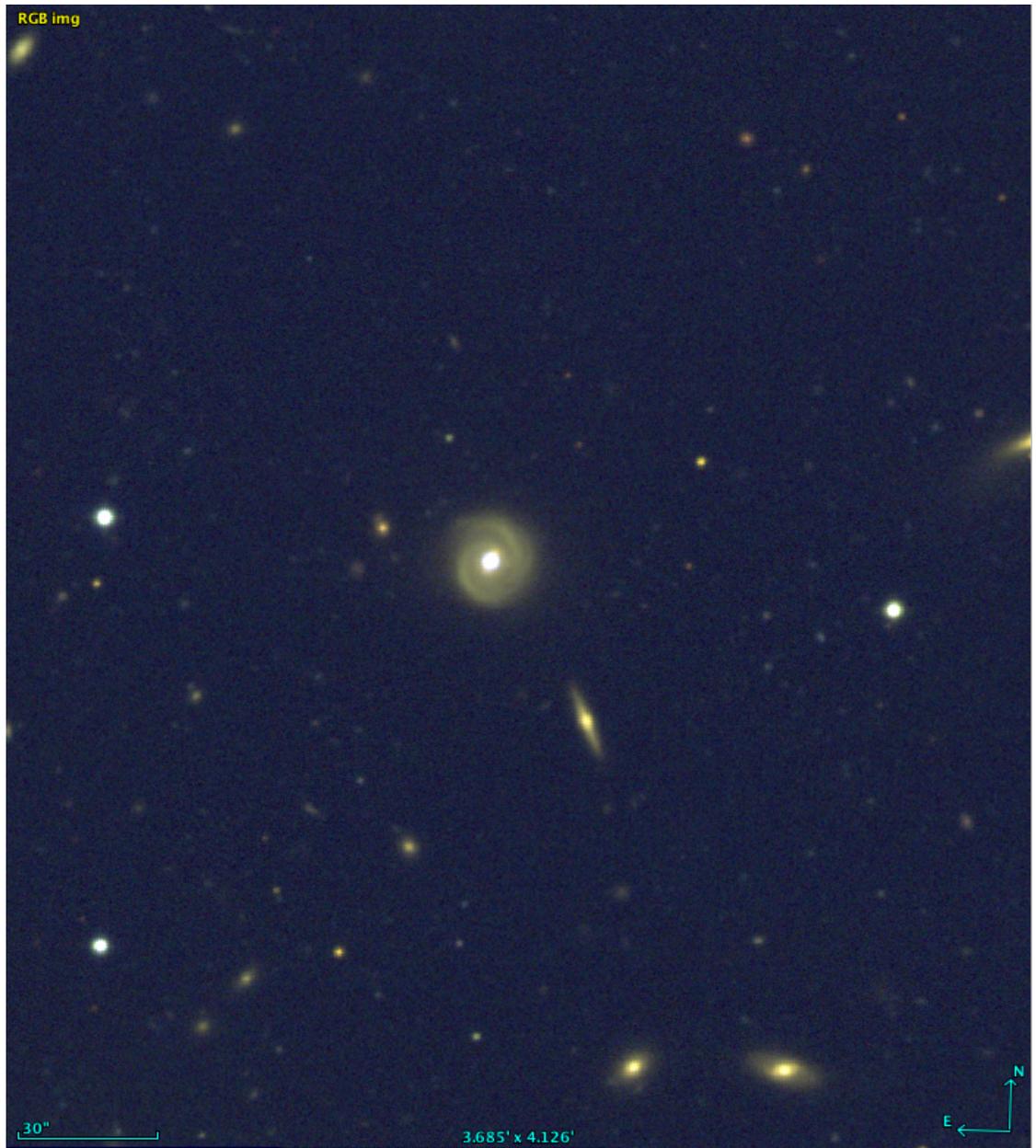


Figura 3.3: Immagine della *superspirale* WINGSJ043838.78-220325.0, unico esempio con le caratteristiche di massa, tipo e SFR che appartenesse all'ammasso preso in considerazione. L'oggetto è quello centrale, ed è visto quasi di faccia.

Conclusioni

Nella nostra ricerca di spirali supermassicce nel database WINGS, possiamo affermare che abbiamo selezionato dei candidati che sono in prevalenza ad alto *redshift*, in zone meno dense dell'ammasso considerato, visto che le galassie si trovano tutte fuori dall'intervallo $0.04 < z < 0.07$ a cui il progetto si era limitato. Una sola galassia, fra quelle trovate, è membro di un ammasso.

Probabilmente l'estensione della survey WINGS, denominata OMEGAWINGS, che ha già ottenuto le immagini per un campo di cielo di un grado quadrato, permetterà di studiare anche le regioni più esterne degli ammassi e ci potrà dare maggiori indicazioni sull'eventuale presenza di queste galassie anche in questi ambienti densi.

Notiamo come siano confermati i dati di Ogle et al. (2016): analizzato il campione a nostra disposizione, le *superspirali* sono oggetti molto rari, solo $\sim 0.0015\%$ del totale; alcuni esemplari risultano molto estesi, massicci e con SFR superiori alle normali galassie giganti e supergiganti.

Bibliografia

- [1] DE VAUCOULEURS, G., DE VAUCOULEURS, A., & CORWIN, J. R. 1976, *Second reference catalogue of bright galaxies*, Vol. 1976, p. Austin: University of Texas Press.
- [2] DRESSLER, A., OEMLER, A. J., COUCH, W., et al. *Evolution since $z = 0.5$ of the morphology-density relation for clusters of galaxies*, 1997, ApJ, 490, 577
- [3] FASANO G. et al., *WINGS: a Wide-field Nearby Galaxy cluster Survey*, 2006, A&A, 445, 805
- [4] FASANO, G., VANZELLA, E., DRESSLER, A., et al. *Morphology of galaxies in the WINGS clusters*, 2012, MNRAS, 420, 926
- [5] FRANCESCHINI, A., *Dispense di cosmologia*
- [6] FRITZ, J., POGGIANTI, B. M., BETTONI, D., et al., *A spectrophotometric model applied to cluster galaxies: the WINGS dataset*, 2007, A&A, 470, 137
- [7] HUBBLE, E., HUMASON, M. L., *The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae*, 1931, ApJ, 74, 43.
- [8] KENNICUTT, R. C., *Star formation law in galactic disks*, 1989, ApJ, 344, 685
- [9] LINTOTT, C. J., SCHAWINSKI, K., SLOSAR, A., et al., *Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the SDSS*, 2008, MNRAS, 389, 1179
- [10] OGLE, P., M., LANZ, L., NADER, C., HELOU, *Superluminous spiral galaxies*, 2016, AJ, 817, 109
- [11] ROBERTS, M. S., HAYNES, M., *Physical parameters along the Hubble sequence*, 1994, A&A, 32, 115
- [12] SARAZIN, C. L., 1986, Rev. Modern Phys., 58, 1
- [13] SCHECTER, P., *An analytic expression for the luminosity function for galaxies*, 1976, ApJ, 203, 297
- [14] STRATEVA, I., IVEZIC, Z., KNAPP, G. R., et al., *Color separation of galaxy types in the Sloan Digital Sky Survey imaging data*, 2001, AJ, 122, 1861
- [15] VAN DEN BERGH, S., *A new classification system for galaxies*, 1976, ApJ, 206, 883.