



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Analisi fotometrica dell’ammasso di galassie
RXCJ1514.9-1523

Relatore

Prof.ssa Giulia Rodighiero

Correlatore

Dr. Nicolas Estrada

Laureanda

Martina Auditore

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Ammassi di galassie	1
1.1	Struttura su larga scala	1
1.2	Proprietà degli ammassi	2
1.2.1	Classificazione	3
1.3	Funzione di luminosità	3
1.4	Relazione morfologia-densità	4
1.5	Massa	4
2	Dati osservativi	6
2.1	Ammasso RXCJ1514.9-1523	6
2.2	VST-GAME	6
3	Procedura	7
3.1	SExtractor e PSFEx	7
3.2	Magnitudine di completezza	10
3.3	Star/galaxy separation	11
4	Conteggi integrali per RXCJ1514.9-1523	14
5	Conclusioni e prospettive future	16

1 Ammassi di galassie

1.1 Struttura su larga scala

L'apparente vuoto di alcune regioni dello spazio, che al nostro sguardo pare non abbiano da offrire altro che buio, con l'ausilio di un telescopio si trasforma e si schiude: il telescopio può rivelare spettacolari pattern di decine di migliaia di galassie, uno scorcio sui loro intrecci inaspettati e una vivida immagine di quella che viene a costituirsi come struttura su larga scala dell'Universo.

Quest'espressione si riferisce alla distribuzione di materia dell'Universo osservabile su scale molto grandi, tipicamente dell'ordine di miliardi di anni luce. L'anno luce è un'unità di misura della lunghezza e corrisponde alla distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno. 1 anno luce corrisponde a 9461 miliardi di chilometri e 3.26 anni luce formano un parsec (pc), definito come la distanza dalla Terra di una stella che ha una parallasse annua - fenomeno per cui un oggetto sembra spostarsi rispetto allo sfondo se si cambia il punto di osservazione - di 1 secondo d'arco.

Anche se l'Universo su larghissima scala è quasi omogeneo (oltre 200-300 Mpc), la misura delle posizioni di migliaia di galassie ha mostrato che esse non sono distribuite uniformemente. Infatti, galassie ed ammassi (1-2 Mpc), si riuniscono in enormi addensamenti allungati, detti filamenti, che possono raggiungere fino a 50-100 Mpc di lunghezza. I filamenti sono separati tra loro da immense regioni vuote, i cosiddetti *voids*, che si estendono invece su scale maggiori di 10-50 Mpc.

Questa complessa rete è chiamata *Cosmic Web*. Tale struttura è dovuta all'amplificazione di piccolissime disomogeneità nella distribuzione iniziale di materia, le stesse rivelate dall'anisotropia della radiazione cosmica di fondo, inizialmente dell'ordine di 10^{-5} . Dopo il *Big Bang*, su scale temporali di miliardi di anni, le forze gravitazionali avrebbero fatto collassare la materia sempre più. Il modo in cui si sono formate le strutture su larga scala dell'Universo dipende quindi dal campo gravitazionale esistente, cioè dalla quantità totale di materia presente. Sembra che una componente particolare della materia abbia guidato, più delle altre, questo processo di addensamento: la cosiddetta materia oscura, che domina l'Universo.

In figura 1.1 sono riportati i risultati della Sloan Digital Sky Survey (SDSS) che mostra la struttura appena descritta. È evidente un'organizzazione cellulare e in parte filamentare, in cui le galassie si dispongono preferenzialmente sulle pareti di volumi sferici, che appaiono all'interno sotto-densi. Mentre su scale che superano alcune centinaia di Mpc ($z > 0.05 - 0.1$) la distribuzione delle strutture sembra divenire più uniforme. Si noti che z è il *redshift*, vale a dire lo spostamento relativo in frequenza di un'onda elettromagnetica dovuto all'espansione dell'Universo.

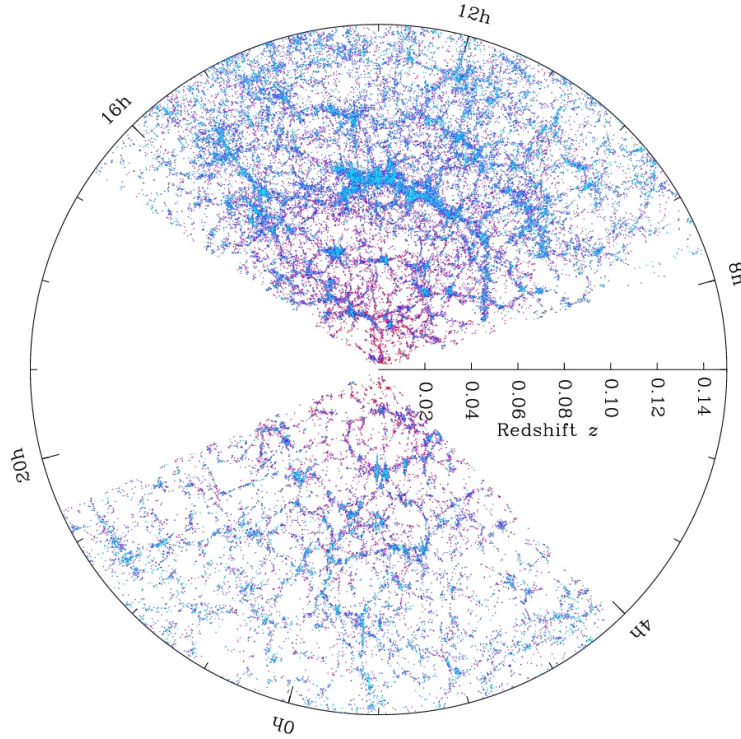


Figura 1.1: SDSS survey (M. Blanton and SDSS)

1.2 Proprietà degli ammassi

Gli ammassi di galassie costituiscono i più estesi sistemi gravitazionalmente legati dell'Universo. Il numero di galassie al loro interno è dell'ordine di qualche centinaio, con una velocità di dispersione dell'ordine delle migliaia di $\frac{km}{s}$.

Nonostante fino agli anni '70 gli ammassi fossero identificati con sovradensità di galassie, adesso è evidente che la massa stellare non è in alcun modo la componente dominante.

È noto, infatti, che le componenti principali siano:

1. Materia barionica:

- Stelle: 1 – 5% della massa totale; sono sempre presenti all'interno delle galassie e sono l'unica componente rilevabile in banda ottica.
- *Intracuster Medium* (ICM): 10 – 16% della massa totale; è il gas che costituisce la maggior parte della massa barionica di un tipico ammasso di galassie ed emette principalmente in banda X per *bremssstrahlung*. Da misurazioni in X e da considerazioni sulla sua distribuzione, si può dire che abbia temperatura $T \approx 10^{7-8}$ K.

- *Interstellar Medium* (ISM): gas all'interno delle galassie, nel quale, sotto opportune condizioni, si formano le stelle.
- Polvere: $< 1\%$ della massa totale.

2. Materia oscura: $84 - 90\%$ della massa totale; tale risultato è stato trovato tramite le osservazioni in banda X, le considerazioni dinamiche su gas e galassie che compongono l'ammasso e gli effetti di lensing gravitazionale.

Il *core* degli ammassi di galassie, che tipicamente si identifica con il raggio viriale (si veda sotto), ha un'estensione spaziale media di circa 1-2 Mpc. In banda ottica la luminosità degli ammassi è dell'ordine di $L_{tot} = 10^{13} L_{\odot}$. Le masse totali sono dell'ordine dei $10^{48} g$, cioè circa $10^{15} M_{\odot}$.

1.2.1 Classificazione

Gli ammassi si possono classificare sulla base della distribuzione spaziale delle galassie che li compongono come regolari, quelli più evoluti e quindi virializzati, o irregolari, ancora in fase di formazione. Gli ammassi regolari hanno simmetria quasi circolare e non presentano particolari sottostrutture che invece caratterizzano gli ammassi irregolari.

Per quanto riguarda le tipologie di galassie che costituiscono gli ammassi, ellittiche e lenticolari sono più comuni delle spirali nelle regioni centrali e dense degli ammassi, mentre nelle zone lontane dal centro e poco dense è in generale vero il contrario.

Infine, un'ulteriore classificazione si basa sulla galassia più brillante dell'ammasso considerato, la cui luminosità è messa in relazione con quella delle altre galassie presenti. La galassia più luminosa in un ammasso, chiamata *brightest cluster galaxy* (BCG), è sempre una gigante ellittica. Galassie di questo tipo si trovano tipicamente al centro e sono le più luminose dell'Universo. In alcune BCG il nucleo è avvolto in un alone esteso di bassa brillantezza superficiale: in questo caso si parla di galassie cD (*central dominant*). Sulla base di ciò, Bautz e Morgan (1970) hanno realizzato una suddivisione in tre tipi principali:

- Tipo B-M I: Ammassi che contengono al centro una galassia cD che domina in luminosità;
- Tipo B-M II: Ammassi che contengono una galassia dominante dalle caratteristiche intermedie tra cD ed ellittiche di grandi dimensioni;
- Tipo B-M III: Ammassi senza galassie dominanti, in cui figurano diverse tipologie intermedie.

1.3 Funzione di luminosità

La funzione di luminosità specifica il modo in cui le galassie in un ammasso si distribuiscono rispetto alla loro luminosità. La funzione differenziale $n(L)dL$ specifica il numero di galassie con luminosità compresa tra L e $L+dL$.

Il suo integrale

$$N(L) = \int_L^\infty n(L) dL$$

è il numero di galassie con luminosità maggiore di L .

La funzione di luminosità di Schechter descrive la distribuzione luminosa delle galassie in un ammasso se si escludono BCG e cD:

$$n(L)dL = N^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^{-\alpha} e^{-(L/L^*)} d\left(\frac{L}{L^*} \right)$$

dove L^* è la luminosità caratteristica, che rappresenta la luminosità delle galassie che dominano dal punto di vista fotometrico la funzione, N^* è il numero di galassie con $L > L^*$ e α è la pendenza della curva.

È una legge di potenza alle L medio-basse ed è tagliata esponenzialmente in prossimità di $L = L^*$. Il parametro α risulta assumere valori piccoli ($\alpha \sim 1.07$): la pendenza della funzione di luminosità locale è piuttosto piatta alle medio-piccole luminosità e quindi la densità totale media di luminosità è dominata da oggetti con $L \sim L^*$.

1.4 Relazione morfologia-densità

La relazione di morfologia-densità mostra una forte dipendenza tra la frazione delle diverse morfologie di galassie e la densità dell'ambiente. Le osservazioni sperimentali hanno mostrato che la percentuale di *early type galaxies* (ETG, cioè galassie ellittiche e lenticolari) aumenta da $\approx 10 - 20\%$ nelle regioni poco dense dell'Universo fino a $\approx 80 - 90\%$ nella parte centrale degli ammassi più densi. Questo implica che le ETG siano preferibilmente situate in ambienti ad alta densità, mentre le SFG (*star forming galaxies*) sono più comuni nel campo, cioè al di fuori di gruppi o ammassi.

La relazione di morfologia-densità si traduce anche in un effetto sulla distribuzione della funzione di luminosità e della massa stellare. Ambienti più densi contengono sistemi più luminosi, mentre galassie con $L < L^*$ si trovano di solito in zone a densità minore. In maniera simile, la funzione di massa stellare mostra che le galassie massive si trovano nelle regioni ad alta densità.

1.5 Massa

La massa di un ammasso può essere stimata in diversi modi:

1. Dalla dispersione della velocità delle singole galassie nell'ammasso si può usare il teorema del viriale per ottenere una prima stima della massa totale nel caso in cui la struttura sia virializzata, cioè sia dinamicamente stabile. Ciò significa che le galassie interagiscono tra di loro nell'ammasso, che costituisce un sistema autogravitante. Con queste premesse vale il teorema del viriale, che all'ordine zero afferma che $2T + W = 0$, dove

$$T = \frac{1}{2} M_{tot} \sigma_V^2$$

è l'energia cinetica e

$$W = -\frac{GM_{tot}^2}{r_g}$$

l'energia potenziale gravitazionale. Inoltre, r_g è il raggio gravitazionale e σ_V è la dispersione di velocità viriale, che in caso di simmetria sferica e di distribuzione isotropica di velocità è semplicemente $\sigma_V^2 = 3\sigma_r^2$, con σ_r dispersione di velocità radiale.

2. Tramite l'equilibrio idrostatico, basato sulle osservazioni nei raggi X e dell'effetto Sunyaev-Zeldovich. L'effetto Sunyaev-Zeldovich è uno dei meccanismi che genera le anisotropie secondarie della radiazione cosmica di fondo (CMB), la traccia fossile del *Big Bang*. Tale effetto, ipotizzato per la prima volta nel 1969 da Sunyaev e Zeldovich, è una distorsione spettrale della CMB causata dalla diffusione Compton inversa dei fotoni durante il loro passaggio attraverso un gas ionizzato, di solito all'interno di un ammasso di galassie. Studiando la radiazione che ne deriva (raggi X) e misurandone la temperatura, si riesce a risalire alla massa.

Questo è possibile per mezzo di una relazione empirica che vale per gli ammassi di galassie, in particolare considerando l'emissione X: la relazione massa-temperatura. La temperatura specifica l'energia termica del gas che sarà proporzionale, per un ammasso virializzato, all'energia di legame. Vale che:

$$T \propto \frac{M}{r_{vir}}$$

dove r_{vir} è il raggio viriale di una sfera la cui densità Δ_c è almeno 200 volte maggiore della densità critica dell'universo ρ_{rc} , che è la densità che determina il passaggio da un Universo chiuso a un Universo aperto. La massa all'interno di tale sfera è:

$$M_{vir} = \frac{4\pi}{3} \Delta_c \rho_{rc} r_{vir}^3$$

E quindi combinando le due relazioni si ottiene:

$$T \propto \frac{M_{vir}}{r_{vir}} \propto r_{vir}^2 \propto M_{vir}^{2/3}$$

La misura della temperatura è possibile, come già detto, tramite l'effetto Sunyaev-Zeldovich, da cui si giunge alla stima della massa viriale di un ammasso.

3. Attraverso il lensing gravitazionale. La capacità per un oggetto astronomico di effettuare lensing è proporzionale a quanto esso sia massiccio, motivo per cui gli ammassi sono frequentemente studiati tramite questo

fenomeno. All'osservatore appaiono filamenti di materia simili ad archi che sembrano appartenere all'ammasso, ma calcolando la distanza di questi filamenti è chiaro che essi siano in realtà proiezioni di galassie più distanti, distorte dall'enorme gravità dell'ammasso. Attraverso la forma e posizione degli archi viene calcolata la massa totale dell'oggetto che effettua lensing. L'accuratezza delle stime è proporzionale al numero di filamenti osservati. Un'elevata accuratezza è quindi raggiunta tramite numerose osservazioni.

2 Dati osservativi

2.1 Ammasso RXCJ1514.9-1523

Gli ammassi sono ambienti ideali per studiare l'interazione tra galassie e la loro evoluzione.

Questa tesi si occuperà dell'ammasso RXCJ1514.9-1523 ($z=0.223$). La sua scoperta si fa risalire a *ROSAT-ESO Flux Limited X-ray Galaxy cluster survey* (H. Böhringer et al. 2004) [5], si trova nella posizione (228.74, -15.36), rispettivamente *Right Ascension* e *Declination*, e ha una massa $M \geq 8 \cdot 10^{14} M_{\odot}$.

Dalle osservazioni ai raggi X (REFLEX survey) è stato classificato come un ammasso a bassa luminosità X, tuttavia GMRT (*Giant Metrewave Radio Telescope*), che copre $\approx 2 \text{ deg}^2$, ha trovato un enorme alone (Giacintucci et al. 2011) [6], che suggerisce che l'ammasso sia andato incontro a *merging*. Il *merging* è il fenomeno più violento di interazione galattica, che si verifica quando due galassie o due ammassi collidono. La possibilità di avere a disposizione anche dati in banda ottica permette di verificare la presenza di una recente fusione tra ammassi poveri di gas per giustificare la bassa luminosità in banda X. Inoltre è noto che l'ammasso soffra di estinzione galattica (Schlafly et al. 2011) [7].

2.2 VST-GAME

La survey VST-GAME (*Galaxy Assembly as a function of Mass and Environment*) è un'indagine di VST attorno a 6 ammassi di galassie, in quattro bande: u' , g' , r' , i' . Il suo scopo è avere un set di dati omogeneo che copra tutte le popolazioni galattiche, dal *core* degli ammassi fino alle loro periferie. Nel caso di RXCJ1514.9-1523 fornisce un set di dati autoconsistente in banda ottica, cruciale per arrivare ad una comprensione migliore delle proprietà di questo ammasso e per compiere un'analisi spaziale dettagliata delle sue componenti galattiche.

VST (*VLT Survey Telescope*), con un diametro di 2.6 m, è stato progettato per survey ad ampio campo in banda ottica. È installato presso l'Osservatorio ESO di Cerro Paranal nel deserto di Atacama nel nord del Cile, ove opera insieme ai telescopi VLT (*Very Large Telescope*) e VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*). È dotato di un unico strumento di piano focale: OmegaCAM, una camera ottica, che è sensibile nelle bande u' , g' , r' , i' , su un campo di vista di $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

L'ampio campo di vista di VST ha permesso l'esplorazione di una regione di $20 \times 20 \text{ Mpc}^2$, che copre l'intero range di popolazione galattica, dal *core* fino a ben oltre il raggio viriale dell'ammasso ($\sim 5r_{vir}$).

Il tempo di esposizione dipende in primis dalla necessità di studiare galassie con una massa stellare fino a $\sim 10^9 M_\odot$ e con magnitudini molto alte.

Tramite OmegaCAM ETC (*Exposure Time Calculators*) si è stimato il tempo di integrazione per RXCJ1514.9-1523: 6143 s per u' , 3674 s per g' , 2189 s per r' e 4170 s per i' . Per ogni puntamento del telescopio, è stato proposto l'utilizzo di 5 diverse esposizioni per u' , g' e i' e 9 per la banda r' .

La fase lunare gioca un ruolo fondamentale: le osservazioni nelle bande u' e g' devono essere eseguite al buio, cioè in assenza di luna (*dark time*), mentre per le bande r' e i' sono indicati i periodi in cui la FLI (*fraction of lunar illumination*) è ≥ 0.4 (*grey* e *bright time*, rispettivamente). La FLI è definita come la frazione di disco lunare illuminato alla mezzanotte locale (Cile), dove 1 sta per totalmente illuminato e 0 corrisponde al momento in cui la luna è sotto l'orizzonte. In particolare, si considera la fase lunare di 3 giorni a partire dalla luna nuova come *dark time* (u' e g'), 7 giorni dalla luna nuova come *grey time* (r') e 10 giorni dalla luna nuova come *bright time* (i').

Si suppone, inoltre, di avere una massa d'aria di 1.2, dove la massa d'aria è la misura della quantità di aria lungo la linea di vista quando si osserva un oggetto celeste da sotto l'atmosfera terrestre.

I dati sono raccolti in condizioni di cielo sereno (meno del 10% del cielo deve essere coperto da nuvole, le possibili variazioni di trasparenza devono stare al di sotto del 10%), in cui l'estinzione atmosferica è uniforme in ogni direzione.

In questa tesi, per lo studio dell'ammasso RXCJ1514.9-152 si fa riferimento unicamente ai dati in banda r .

3 Procedura

3.1 SExtractor e PSFEx

L'immagine è processata usando i software *SExtractor* (*Source Extractor*), in combinazione con PSFEx (PSFExtractor), che esegue la fotometria tramite una PSF, che sta per *Point Spread Function* (Bertin et al. 1996) [8].

SExtractor ha come obiettivo quello di costruire un catalogo a partire da un'immagine astronomica. Per prima cosa misura e di conseguenza sottrae il *background*, la cui stima è regolata dal parametro BACK_SIZE. SE (*SExtractor*) seleziona attorno ad ogni pixel dell'immagine il livello di *background*, in un'area data da BACK_SIZE, e quindi determina se i suddetti pixel appartengano ad un oggetto o al *background* stesso. L'area che non fa parte di quest'ultimo viene quindi divisa tra le diverse sorgenti presenti nell'immagine, delle quali vengono determinate le proprietà. Il livello a partire da cui SE inizia a trattare i pixel come se fossero parte di un oggetto è indicato dai parametri di soglia.

Un oggetto per essere classificato come tale deve rispettare i seguenti requisiti:

- Tutti i pixel sono al di sopra di DETECT_THRESH.
- Tutti i pixel sono adiacenti, ossia hanno lati o vertici in comune.
- Il numero di pixel supera il minimo specificato in DETECT_MINAREA.

In seguito si rende necessaria la separazione dei pixel vicini che sono stati estratti come una singola sorgente: si tratta del processo di *deblending*. SE costruisce un 'albero' con gli oggetti, che si ramifica ogni volta che dei pixel sono oltre la soglia, ben separati da quelli al di sotto: ogni ramo rappresenta un oggetto diverso.

Dopo il *deblending* vengono quindi misurate forme e posizioni per poi procedere con la fotometria vera e propria. Se ci sono due picchi abbastanza distinti nella distribuzione luminosa (punto di sella nella distribuzione di intensità), l'oggetto è separato in diverse sorgenti nel catalogo e la fotometria è eseguita dividendo l'intensità del pixel condiviso. Alla fine si arriva ad avere una lista di oggetti con una serie di parametri misurati, che saranno quindi classificati in stelle o galassie da una rete neurale.

SE trae varie informazioni dall'*header* del file FITS che va in input (l'immagine astronomica), ma molti dei parametri vanno specificati nel cosiddetto *configuration file*. Tra i più importanti vale la pena ricordare:

1. MAG_ZEROPOINT: fattore di conversione per ottenere tutte le misure in unità di flussi o magnitudini.
2. PIXEL_SCALE, che rappresenta la dimensione di un pixel in arcosecondi.
3. SEEING_FWHM, importante per la separazione tra stelle e galassie, è la FWHM (*Full Width at Half Maximum*) delle immagini stellari in arcosecondi.

Il catalogo finale include varie misure di posizione e quantità fotometriche. Tra queste si ricordano: MAG_APER, magnitudini in apertura circolare, i cui diametri sono dati da PHOTOM_APERTURES; la magnitudine di Kron (MAG_AUTO), con apertura pari all'omonimo raggio.

MAG_AUTO è un parametro che permette di eseguire un certo tipo di fotometria, sviluppata da Kron (Kron, 1980) [9], nella quale si cerca di recuperare il flusso totale di una sorgente. Secondo Kron, infatti, per catturare la maggior parte del flusso di una galassia (> 90%) basta usare un'apertura pari al doppio del raggio di Kron, definito come

$$r_K = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}} r_i p_i}{\sum_{i \in \mathcal{E}} p_i}$$

dove r_i prende il nome di pseudo-raggio ridotto al pixel i -esimo e p_i rappresenta il valore del pixel all'interno dell'immagine.

Parametri	Valori
PHOTOM_APERTURES (pixel)	7.5 10.0 15.0 20.0 40.0 80.0 150.0 225.0 10.05 26.80
MAG_ZEROPOINT (mag)	30
SEEING_FWHM (arcsec)	0.534
PIXEL_SCALE (arcsec)	0.2
BACK_SIZE (pixel)	64

Tabella 1: Valori dei principali parametri di SE utilizzati in questa tesi.

Dall'estrazione delle sorgenti dall'immagine fornita da VST si è ottenuto un catalogo di 81358 oggetti. Nelle figura 3.1 e 3.2 si riportano rispettivamente l'immagine di VST e l'immagine in cui è stata effettuata la sovrapposizione del catalogo di cui sopra, entrambe in banda r.

I valori dei parametri menzionati, per le immagini rilevate da VST in banda r, sono riportati in tabella 1.

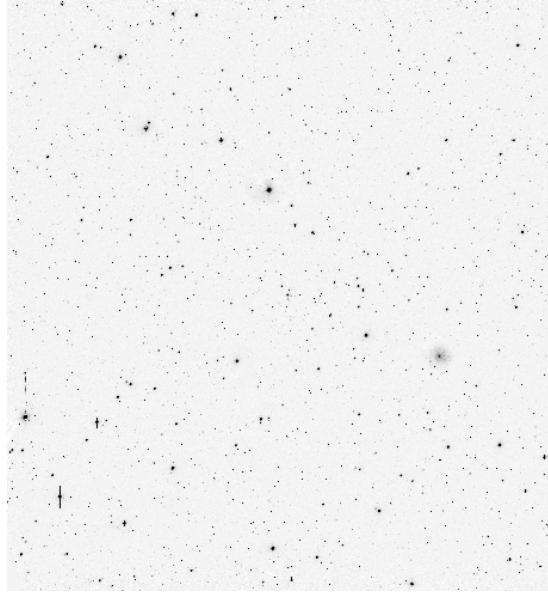


Figura 3.1: Immagine di VST.

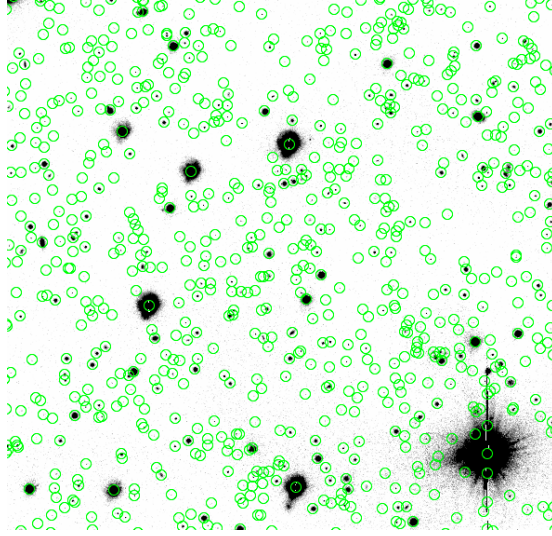


Figura 3.2: Zoom dell'immagine di VST con catalogo.

3.2 Magnitudine di completezza

A partire dal catalogo ottenuto, si è stimata la magnitudine di completezza seguendo il metodo descritto da Mercurio et al. (2015) [10]. Tale limite è definito come la magnitudine a cui si iniziano a perdere galassie in quanto più deboli della soglia di luminosità misurata con un'apertura di 1.5 arcsec di diametro (*detection cell*), per la banda *r*. È stata adottata questa apertura in particolare perchè adatta a tutte le immagini.

In figura 3.3 si può apprezzare la distribuzione della magnitudine di SE entro 8 arcosecondi di diametro in funzione della magnitudine misurata nella *detection cell*.

La linea verticale tratteggiata blu rappresenta il *detection limit*, cioè il limite a cui si iniziano a perdere oggetti in maniera sistematica. Tale valore, stimato manualmente, corrisponde ad una magnitudine di 24.6.

La retta rossa continua rappresenta invece la relazione lineare che intercorre tra la magnitudine entro un'apertura di 8 arcosecondi di diametro e la magnitudine entro l'apertura di rilevamento (1.5 arcsec). La relazione tra queste due magnitudini mostra una dispersione che dipende essenzialmente dai profili delle galassie, come è mostrato dalle due rette rosse tratteggiate. Prendendo in considerazione tale incertezza, è stata fissata la magnitudine di completezza come l'intersezione tra il *detection limit* e la retta con intercetta diminuita di 1σ .

Si stima che la magnitudine di completezza sia pari a 23.1 mag, dunque lo studio della classificazione degli oggetti si può limitare a tale valore.

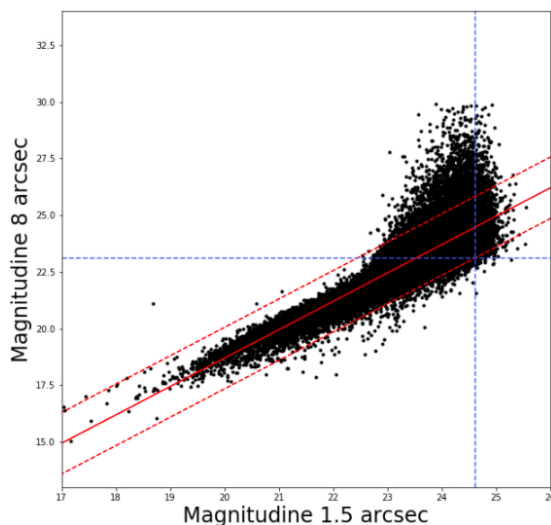


Figura 3.3: Distribuzione della magnitudine entro 8 arcsec di diametro in funzione della magnitudine entro un'apertura di 1.5 arcsec.

3.3 Star/galaxy separation

Per separare le sorgenti estese (galassie) da quelle puntiformi (stelle) si è seguito un approccio progressivo, utilizzando i seguenti parametri forniti da SExtractor:

- *stellarity index* (CLASS_STAR): deriva da una rete neurale e serve a fornire una prima classificazione stella/galassia. Rappresenta una probabilità, di conseguenza può assumere valori che si distribuiscono tra 0 e 1: più precisamente, gli oggetti sono considerati da SExtractor galassie nel caso in cui la CLASS_STAR sia pari a 0 e stelle se è invece uguale a 1.
- *half light radius* (FLUX_RADIUS), misura della concentrazione della sorgente.
- *spread model* (SPREAD_MODEL), un classificatore di SExtractor, che indica quanto il profilo di brillantezza superficiale di un oggetto si discosti da un profilo di PSF.
- MU_MAX: il picco della luminosità stellare sopra il *background*.

Si mostra adesso l'applicazione di SExtractor e dei quattro parametri appena citati ai dati dell'ammasso descritto in precedenza. A questo scopo è stato utilizzato un codice in Python, calibrato sulla base della procedura in questione.

In figura 3.4 si può vedere l'andamento di SI (*stellarity index*) in funzione della magnitudine di Kron. In arancione è stata rappresentata la sequenza di stelle sature, caratterizzate da una magnitudine di Kron $r < 16.2$ mag (si veda

sotto). Per quanto riguarda la sequenze di stelle non sature, in rosso in figura, si può trovare una netta distinzione dalle galassie a $r = 20.6$ mag, scegliendo una $\text{CLASS_STAR} > 0.8$. Poiché questo parametro non è affidabile entro il nostro limite di completezza è necessario proseguire con una classificazione più precisa.

Si procede ad un'ulteriore separazione delle sorgenti, spostandosi verso magnitudini più deboli, studiando l'*half light radius* in funzione della magnitudine di Kron. Dalla figura 3.5 si vedono in rosso gli oggetti che sono stati classificati come stelle nello step precedente e in verde quelli classificati in questa fase. Si può affermare che per $r < 22.4$ mag, gli oggetti con *half light radius* < 2.03 pixel siano stelle. Si è deciso di mantenere un approccio conservativo al momento della separazione delle sorgenti per non rischiare di tenere delle stelle nel catalogo, che vorremmo essere costituito unicamente da galassie al termine di questo processo.

Infine, si procede ad una separazione ancora più profonda, utilizzando come parametro lo *spread model*, di nuovo in funzione della magnitudine di Kron (figura 3.6). Per costruzione, *spread model* è pari a zero per sorgenti puntiformi, positivo per sorgenti estese e negativo per rilevamenti più piccoli della PSF, come i raggi cosmici. Stelle e galassie si dispongono in due diverse zone del grafico, distinguibili fino a $r = 23.1$ mag. Risultano essere stelle, quindi, tutte le sorgenti con *spread model* < 0.0025 e $r < 23.1$ mag, questa volta rappresentate in azzurro.

In conclusione, è stato plottato MU_MAX in funzione della magnitudine in Kron (figura 3.7). Oltre a riassumere i tre diversi step, questo grafico permette di individuare la magnitudine di saturazione $r = 16.2$ mag (retta verticale), già citata precedentemente.

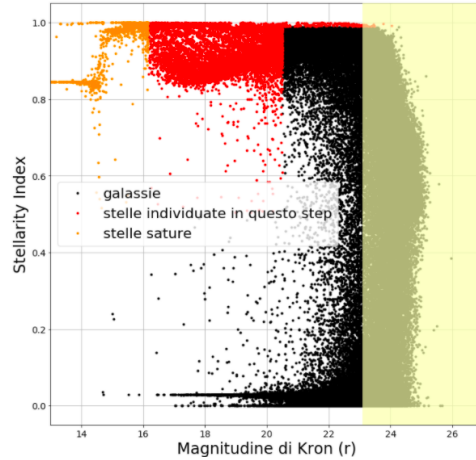


Figura 3.4: *Stellarity index* vs. magnitudine di Kron. In arancione le stelle sature, in rosso le stelle classificate in questo step con *stellarity index*, in nero le galassie.

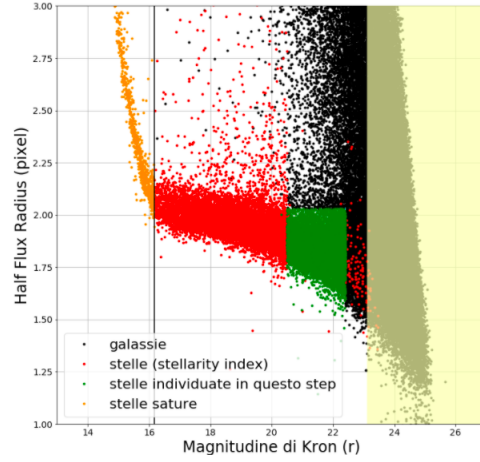


Figura 3.5: *Half flux radius* vs. magnitudine di Kron. In arancione le stelle saturate, in rosso le stelle classificate con SI, in verde le stelle classificate con *half flux radius*, in nero le galassie.

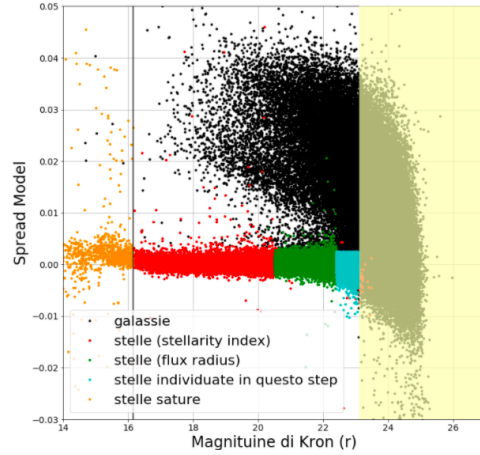


Figura 3.6: *Spread model* vs. magnitudine di Kron. In arancione le stelle saturate, in rosso le stelle classificate con SI, in verde le stelle classificate con *half flux radius*, in azzurro le stelle classificate con *spread model*, in nero le galassie.

Dal processo di separazione stella/galassia, degli 81358 oggetti estratti, 57586 risultano essere galassie.

In giallo sono mostrate le sorgenti escluse, in quanto si trovano a magnitudini superiori del limite di completezza.

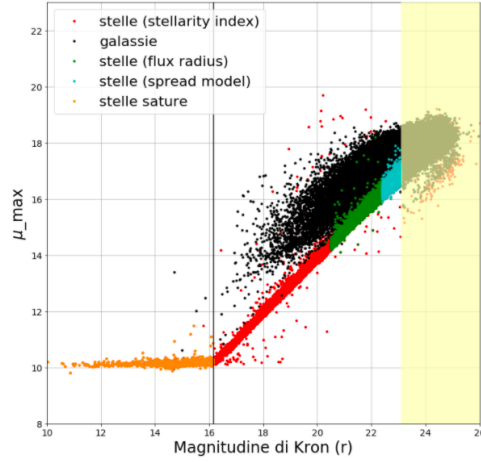


Figura 3.7: μ_{max} vs. magnitudine di Kron. In arancione le stelle sature, in rosso le stelle classificate con SI, in verde le stelle classificate con *half flux radius*, in azzurro le stelle classificate con *spread model*, in nero le galassie. La linea verticale è la magnitudine di saturazione.

4 Conteggi integrali per RXCJ1514.9-1523

I conteggi di sorgenti costituiscono un'osservabile cosmologico fondamentale e forniscono un metodo semplice di analisi della distribuzione spaziale degli oggetti. Stabiliscono il numero di sorgenti $N(S_\nu)$ con flusso maggiore di un certo valore, per unità di area di cielo. Dal punto di vista del calcolo operativo dei conteggi integrali, si tratta di stabilire la distribuzione cumulativa del numero di sorgenti in una certa area di cielo in funzione del loro flusso (in questo caso sotto forma di magnitudine).

In figura 4.1 si vede la distribuzione delle galassie nel campo in questione: in rosso le galassie considerate di campo, in nero l'area corrispondente al centro dell'ammasso.

In figura 4.2 sono visibili i conteggi integrali per entrambi i campioni di galassie: la linea continua per la zona che comprende l'ammasso, la linea tratteggiata per le zone esterne. La retta verticale rappresenta invece il *detection limit* (si veda sezione 3.2).

Si nota un eccesso di sorgenti nella zona dominata dall'ammasso, che confermerebbe la presenza di un'*overdensity*.

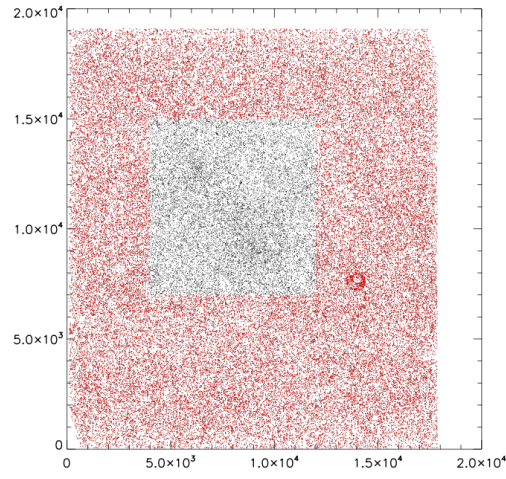


Figura 4.1: Rappresentazione della distribuzione spaziale delle galassie; le coordinate sono in unità di pixel. In nero le galassie di ammasso, in rosso le galassie di campo.

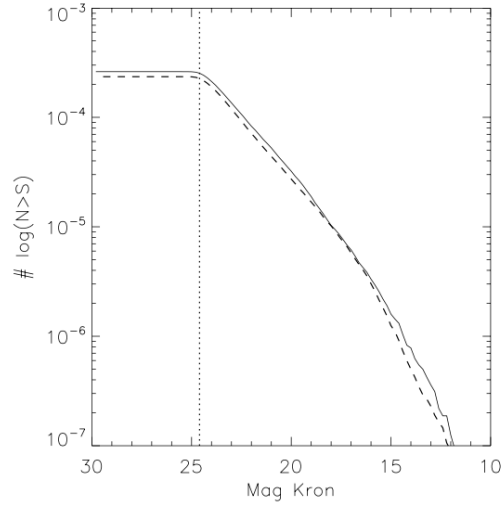


Figura 4.2: Conteggi integrali. Magnitudine di Kron vs. numero di sorgenti con flusso maggiore di un certo valore. La linea continua per la zona che comprende l'ammasso, la linea tratteggiata per le zone esterne, corrispondenti alla parte rossa in fig. 4.1.

5 Conclusioni e prospettive future

In questa tesi è stata realizzata l'analisi fotometrica dell'ammasso di galassie RXCJ1514-9-1523. Si è seguito il seguente procedimento:

1. Estrazione delle sorgenti: a partire dall'immagine astronomica fornita dalla survey VST-GAME è stato realizzato un catalogo di oggetti tramite *SExtractor* e *PSFex*.
2. Magnitudine di completezza: dal calcolo eseguito secondo il metodo di Mercurio et al. (2015) [10] si è stimato il limite di completezza pari a 23.1 mag. Tale limite ha permesso di escludere tutte le sorgenti con magnitudine maggiore del suddetto valore.
3. Separazione stella/galassia: a partire dal catalogo costruito nella prima fase si sono distinte le sorgenti estese (galassie) da quelle puntiformi (stelle). In particolare, da un totale di 81358 oggetti estratti, le galassie risultano essere 57586.
4. Conteggi integrali: attraverso questo studio è stato possibile evidenziare un'*overdensity* di sorgenti nella zona dominata dall'ammasso. Il fatto che il campione sia completo in flusso permette analisi statistiche auto-consistenti, in grado di fornire informazioni di validità generale sulle popolazioni di sorgenti dell'Universo, slegate dall'osservatore.

Il lavoro svolto fa emergere che l'immagine fornita da VST sia dotata di una buona qualità fotometrica, cosa che rende RXCJ1514.9-1523 un target per nuove proposte osservative e i dati in questione un'ottima base per futuri *follow-up* spettroscopici. Per avanzare nell'analisi, è possibile eseguire lo stesso procedimento di questa tesi nelle altre bande di VST-GAME (u' , g' e i'), dotate della stessa qualità fotometrica. La combinazione di varie bande permetterà di calcolare il redshift fotometrico, di riconoscere gli oggetti a $z=0.223$ e quindi legati all'ammasso, di conseguenza di riidentificare l'ammasso, ricostruendo la densità sia delle zone interne che di quelle esterne ed inesplorate.

Inoltre, considerato che al *redshift* in questione $1 \text{ arcsec}=3.74 \text{ kpc}$, il campo di vista di VST ($1^\circ \times 1^\circ$) corrisponde ad un'area fisica di $\sim 13.5 Mpc^2$. Questa dimensione permette potenzialmente di identificare sottostrutture (gruppi, *overdensities*, filamenti) attorno all'ammasso centrale, ricostruendo la *Cosmic Web* circostante in cui esso è evoluto.

Per concludere, si potrà confrontare la *large scale structure* attorno all'ammasso al dato redshift con le previsioni cosmologiche attuali, assicurandosi che simulazioni cosmologiche come TNG *Illustris* (Pillepich et al. 2018) [12] riproducano le sottostrutture attese attorno agli ammassi più evoluti.

Un particolare ringraziamento alla dr.ssa A. Mercurio dell'Osservatorio Astronomico di Capodimonte che ci ha fornito i dati per lo svolgimento della tesi.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. Cimatti, F. Fraternali, C. Nipoti, *"Introduction to galaxy formation and Evolution"*, 2019, Cambridge University Press.
- [2] B.W. Holwerda, *"The Source Extractor Guide to Galaxies"*, Space Telescope Science Institute, Baltimora.
- [3] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology. An Introduction*, 2006, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [4] A. Franceschini, Dispense del corso di Cosmologia, Università degli studi di Padova - A.A. 2018/2019.
- [5] H. Böhringer *et al.*, *"ROSAT-ESO Flux Limited X-ray Galaxy cluster survey"*, A&A 425, 2004.
- [6] S. Giancittucci, *"Diffuse radio sources in colliding galaxy clusters. Low frequency follow up of the GMRT Radio Halo Survey"*, Mem. S.A.It. Vol. 75, 282, 2008.
- [7] E. F. Schlafly *et al.*, *"Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey stellar spectra and recalibrating SFD"*, The Astrophysical Journal 737, 103, 2011.
- [8] A. Bertin, *"SExtractor: Software for source extraction"*, The Astronomy and Astrophysics Supplement Series 117, 393, 1996.
- [9] R. G. Kron, *"Photometry of a complete sample of faint galaxies"*, The Astronomy and Astrophysics Supplement Series 43, 305, 1980.
- [10] A. Mercurio *et al.*, *"Shapley Supercluster Survey: construction of the photometric catalogues and i-band data release"*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 453, 3685, 2015.
- [11] A. Mercurio, *Application for observing time*, VST Eso, 2017.
- [12] A. Pillepich *et al.*, *"Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model"*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 473, 4077, 2018.