

Più stelle per tutti: come prevedere il futuro di una stella

Caterina Milicia¹ e Matteo Zandi¹

¹Liceo Scientifico A. B. Sabin, Bologna

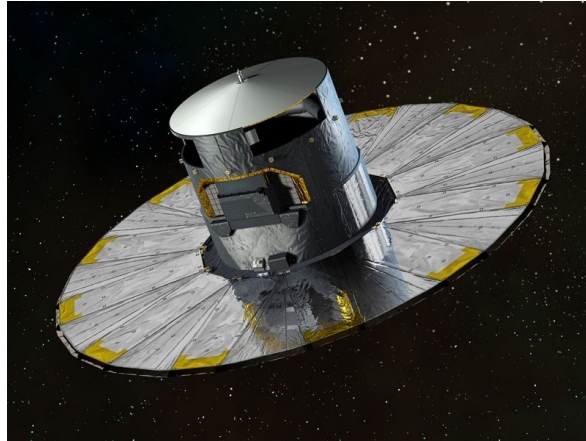


Figura 1: Il satellite Gaia

Sommario

1.	Introduzione	2
2.	Analisi Dati	2
2.1.	Filtri SDSS	3
2.2.	Gaia - Graphical Astronomy and Image Analysis Tool	5
2.3.	Coordinate celesti	7
2.4.	Flusso e Magnitudine	7
2.5.	Zeropoint	8
2.5.1.	Stella per Stella	8
2.5.2.	Con TopCat	9
2.6.	TopCat	10
2.7.	Gaussiana	10
3.	Criteri di selezione	10
3.1.	ELONGATION	11
3.2.	FWHM	11
4.	Diagramma HR	16
4.1.	Turnoff	19
5.	Confronto tra diagrammi HR	19
6.	Discussione	21
7.	Conclusioni	22
	Sommario tabelle	23
	Sommario figure	24

1. Introduzione

Durante le due settimane che vanno dal 10 al 21 giugno 2019, presso l'Area della Ricerca del CNR (Consiglio Nazionale di Ricerca) di Bologna con sede in via Piero Gobetti 101, si è tenuto il progetto SperimEstate, che consiste nell'offrire a decine di ragazzi la possibilità di sentirsi dei veri ricercatori.

Nello specifico, il nostro gruppo ha utilizzato i dati ottenuti dal telescopio Pan-STARRS, confrontati anche con quelli acquisiti dal satellite europeo ESA GAIA (Fig. 1), per studiare alcuni ammassi stellari¹ nella nostra galassia, osservati in diversi colori.

A venirci in aiuto ci sono stati lo strumento web di accesso ai cataloghi astronomici denominato "TOCats" e l'archivio di immagini di Pan-STARRS². Tra gli ammassi globulari abbiamo analizzato il Messier 12 (M12) mentre tra gli ammassi aperti NGC 2420. L'M12 è uno dei 110 oggetti (ammassi stellari e nebulose) contenuti nel catalogo dell'astronomo francese Charles Messier (1730-1817). NGC 2420 è uno dei circa 8.000 oggetti di uno dei cataloghi astronomici più completi e famosi, il *New General Catalogue* (NGC).

Le immagini degli archivi sono ottenute attraverso i telescopi con sensori CCD³.

L'obiettivo con i dati ottenuti è quello di costruire il diagramma Hertzsprung-Russell (HR) in cui si confrontano le due proprietà principali delle stelle: temperatura (colore) e la luminosità (magnitudine).

Nei paragrafi successivi verranno descritte in dettaglio le varie fasi del progetto, con le varie spiegazioni teoriche.

2. Analisi Dati

Dopo un iniziale ambientamento con il sistema operativo Ubuntu e i suoi comandi (cd, ls, mv, mkdir per elencarne alcuni), abbiamo avuto l'accesso all'archivio di immagini di Pan-STARRS. Per scaricare l'immagine dell'ammasso che ci interessa, bisogna inserire in input le coordinate celesti del suo centro, cioè ascensione retta⁴ e declinazione⁵

¹ Un ammasso stellare è un insieme di stelle molto dense che generalmente hanno stessa età e composizione chimica. Esistono due tipi di ammassi stellari: gli ammassi globulari e gli ammassi aperti. Gli ammassi globulari sono di forma sferica, con una densità di stelle maggiore al centro a causa dell'elevata attrazione gravitazionale, più antichi e più grandi rispetto a quelli aperti, meno densi e con forme più disparate, nonostante l'attrazione gravitazionale sia presente.

² Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*) è un sistema per immagini astronomiche a largo campo sviluppato e gestito dall'Istituto di Astronomia dell'Università delle Hawaii.

³ I CCD (*Charge-Coupled Device*) sono sensori montati sui telescopi capaci di convertire la radiazione elettromagnetica che li colpisce in carica elettrica. In questo modo vengono digitalizzate le immagini, in cui ad ogni pixel corrisponde la corrispondente carica elettrica. Queste immagini devono poi fare i conti con il rumore di fondo prodotto dal cielo e dall'apparecchiatura elettronica. Sulla Terra sono presenti ulteriori problemi, come le immagini più degradate rispetto ai satelliti in orbita a causa della turbolenza dell'atmosfera terrestre (il cosiddetto seeing) oppure che alcune radiazioni non raggiungono la superficie terrestre come i raggi X o Gamma.

⁴ L'ascensione retta (RA, *right ascension*) è la corrispondente ascissa (X) e viene misurata sull'equatore celeste in ore, minuti e secondi (o equivalentemente in gradi), in senso antiorario (verso Est), a partire dal punto di Ariete fino all'intersezione dello stesso equatore con il cerchio massimo passante per il punto osservato. E' compresa tra 0 e 24 ore (o fra 0 e 360°).

⁵ La declinazione (o DEC, *declination*) è la corrispondente ordinata (Y) e viene espressa in gradi, primi e secondi sul cerchio passante per i poli celesti ed il punto del cielo in osservazione, si conta da 0 a 90° a partire dall'equatore celeste, positivamente verso il polo Nord celeste e negativamente verso il polo Sud celeste, quindi è compresa tra -90° e +90°.

(Tab. 1, 2), e la dimensione dell'immagine voluta in pixel (abbiamo scelto 2400 px perché gli ammassi che ci interessano sono grandi circa 10 minuti d'arco e 1px nelle immagini Pan-STARRs corrisponde a 0.25 secondi d'arco). Abbiamo quindi scaricato dall'archivio Pan-STARRS le immagini degli ammassi in formato FITS⁶ acquisite nei filtri SDSS g, r, i, z (Fig. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

Tabella 1: Dati dell'ammasso globulare M12

Ascensione retta	16h 47m 14.52s
Declinazione	01° 56' 52.1"
Distanza	16000 anni luce (4900 pc)

Tabella 2: Dati dell'ammasso aperto NGC 2420

Ascensione retta	07h 38m 24s
Declinazione	+21° 34' 27"
Distanza	10060 anni luce (3085 pc)

2.1. Filtri SDSS

Ogni filtro (Fig. 2) considerato è progettato per far entrare la luce attorno a una specifica lunghezza d'onda. I filtri funzionano bloccando la luce a tutte le lunghezze d'onda eccetto quelle intorno alla lunghezza d'onda prescelta (Tab. 3).

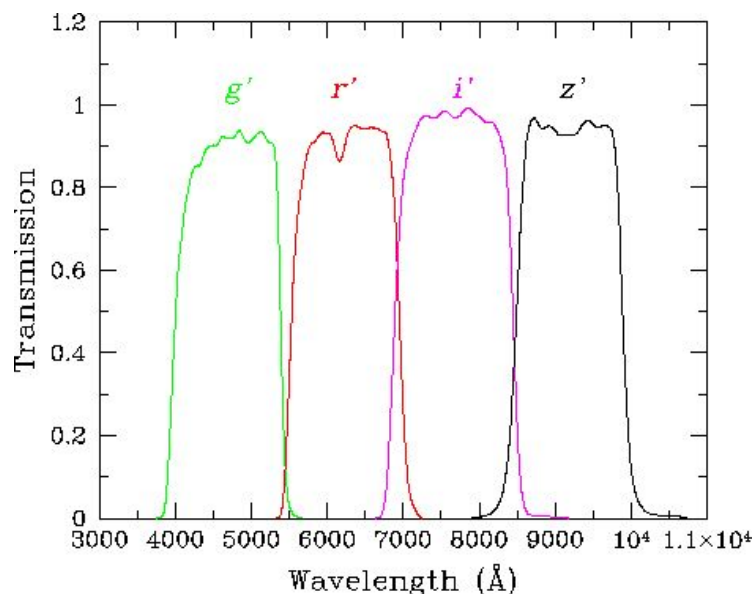


Figura 2: Il grafico dei filtri SDSS

Tabella 3: I filtri SDSS con le loro lunghezze d'onda centrali

Filter	Green (g)	Red (r)	Near Infrared (i)	Infrared (z)
Wavelength (Å)	4770	6231	7625	9134

⁶ Il FITS (Flexible Image Transport System) è un formato di file aperto molto comune in astronomia poiché permette di visualizzare immagini scientifiche e includere nel file informazioni sui dati contenuti. Fu inventato nel 1981.

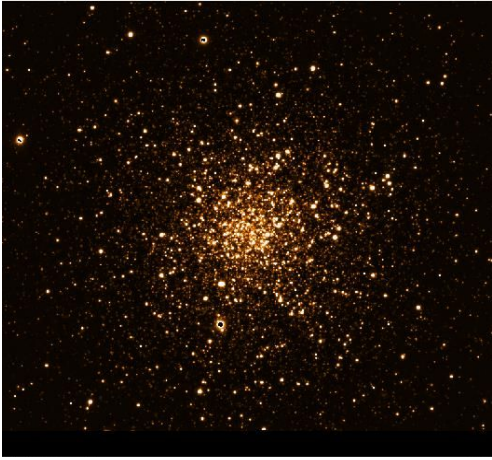


Figura 3: L'ammasso M12 con il filtro g

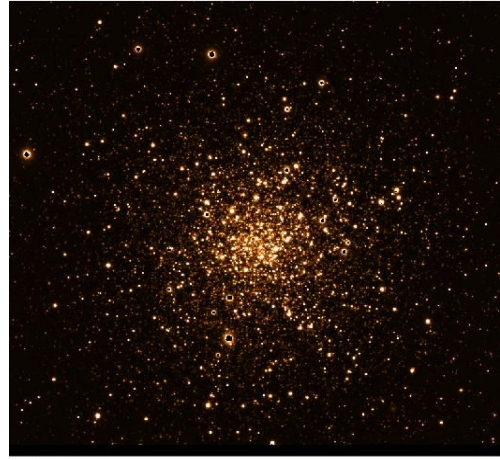


Figura 4: L'ammasso M12 con il filtro r

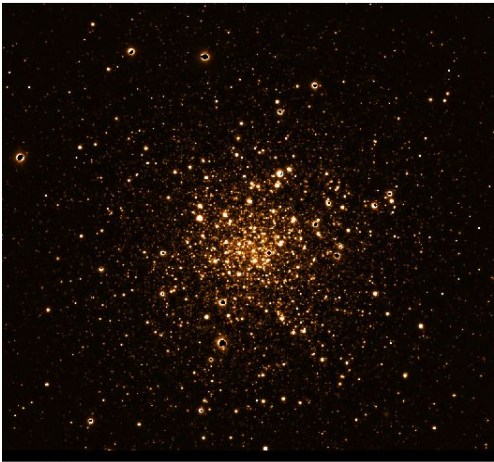


Figura 5: L'ammasso M12 con il filtro i

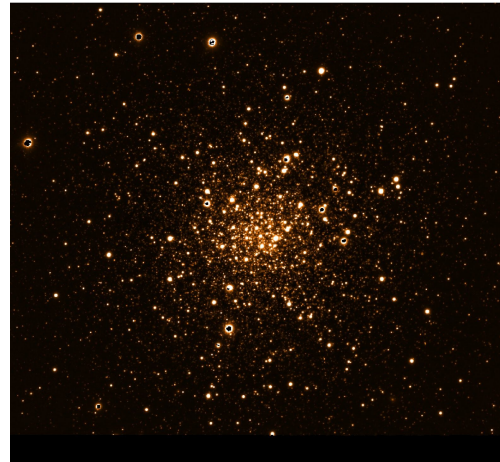


Figura 6: L'ammasso M12 con il filtro z

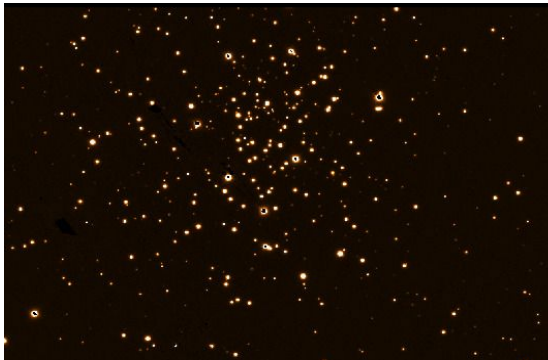


Figura 7: L'ammasso NGC 2420 con il filtro g

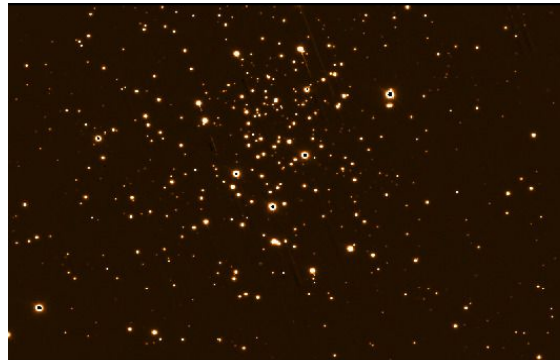


Figura 8: L'ammasso NGC 2420 con il filtro r

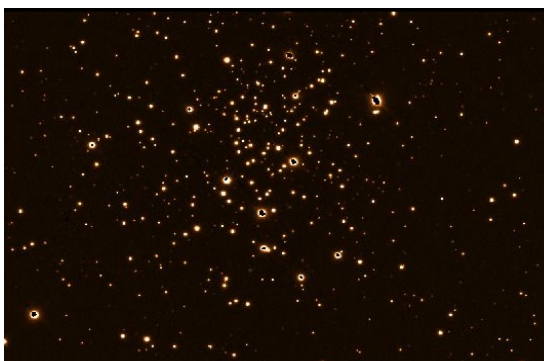


Figura 9: L'ammasso NGC 2420 con il filtro i

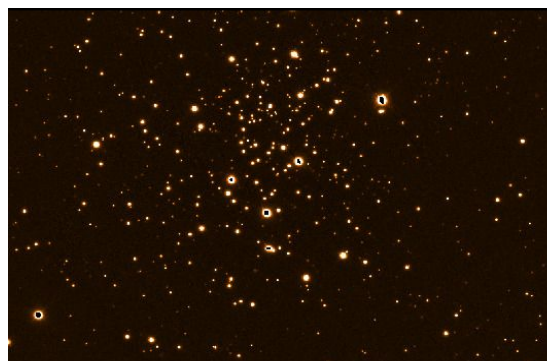


Figura 10: L'ammasso NGC 2420 con il filtro z

2.2. Gaia - *Graphical Astronomy and Image Analysis Tool*

In ogni immagine di ogni filtro abbiamo eseguito la *object detection*⁷ (ricerca degli oggetti presenti) tramite il programma GAIA (*Graphical Astronomy and Image Analysis Tool*). Nelle immagini seguenti in verde sono rappresentati gli oggetti luminosi (Fig. 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18).

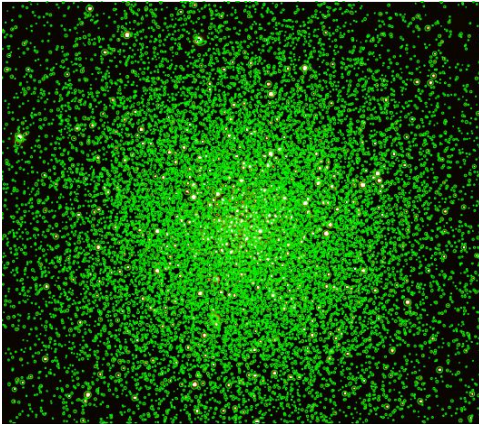


Figura 11: L'*object detection* dell'ammasso M12 nel filtro g

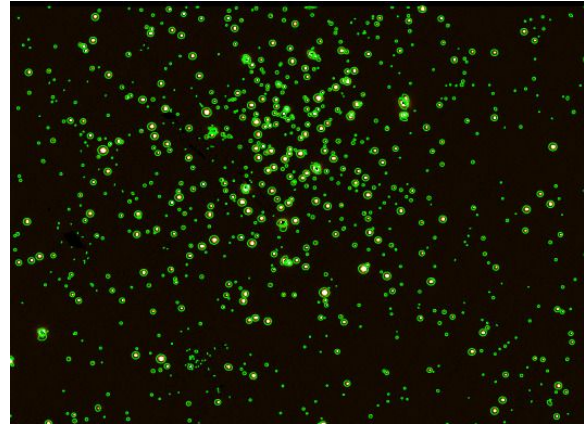


Figura 12: L'*object detection* dell'ammasso NGC 2420 nel filtro g

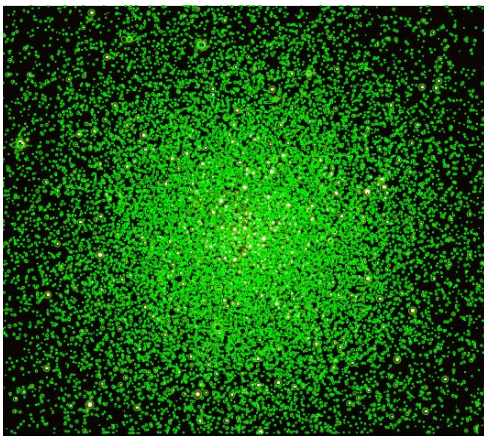


Figura 13: L'*object detection* dell'ammasso M12 nel filtro r

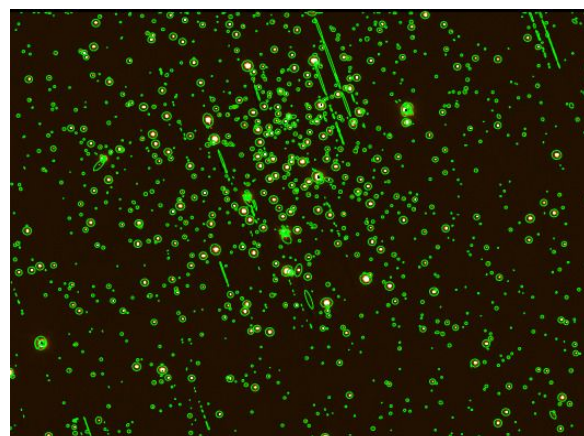


Figura 14: L'*object detection* dell'ammasso NGC 2420 nel filtro r⁸

⁷ La *object detection* è il rilevamento di oggetti presenti in immagini digitali. Nel nostro caso è la ricerca di ogni oggetto luminoso secondo dei criteri prestabiliti quali ad esempio, stima della dimensione dell'oggetto (*Object size*), significatività del segnale (*Detection threshold*), distinzione di due o più oggetti (*Contrast parameter*), dimensione in pixel su cui determinare il contributo fondo cielo alla luminosità dell'oggetto (*Mesh size*).

⁸ Come si può ben notare, nell'immagine del filtro r di NGC 2420 con il catalogo caricato, sono presenti delle strisce verdi. In quel caso abbiamo dovuto operare una selezione più meticolosa, escludendo anche quegli oggetti che sono una deformazione dell'immagine.

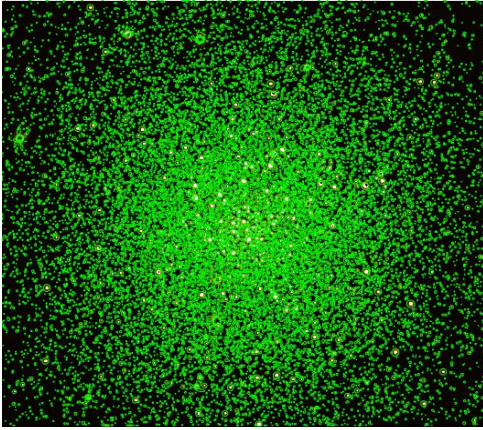


Figura 15: L'*object detection* dell'ammasso M12 nel filtro i

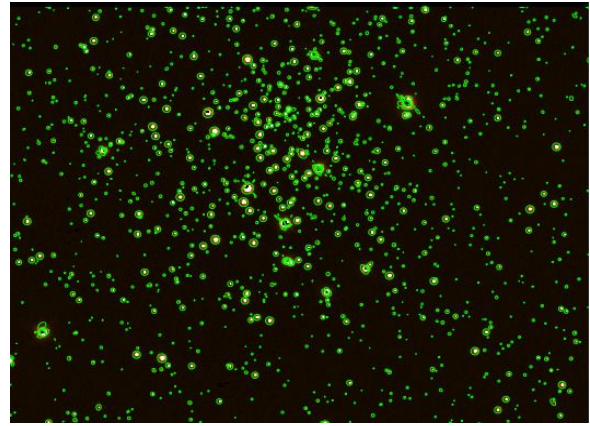


Figura 16: L'*object detection* dell'ammasso NGC 2420 nel filtro i

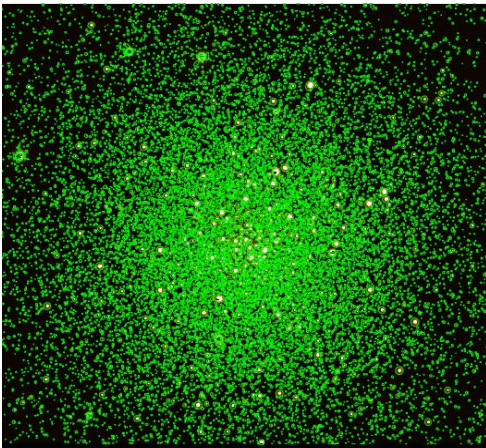


Figura 17: L'*object detection* dell'ammasso M12 nel filtro z

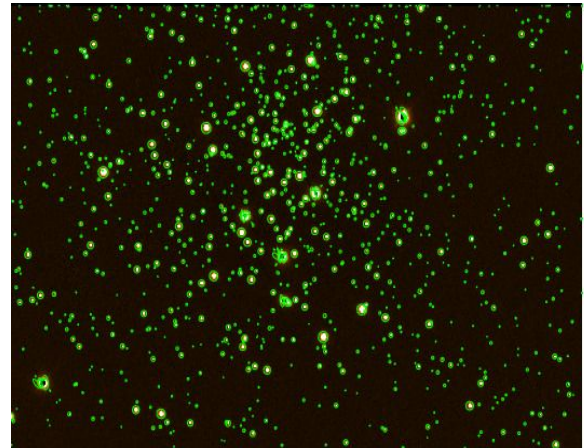


Figura 18: L'*object detection* dell'ammasso NGC 2420 nel filtro z

Si può notare che nell'ammasso globulare sono presenti un numero di oggetti molto più alto rispetto all'ammasso aperto. Infatti generalmente i primi sono formati da 10^4 - 10^6 stelle mentre i secondi sono formati da 10^2 - 10^3 stelle.

I parametri che abbiamo utilizzato nel programma di *object detection* in GAIA sono stati:

Object size: 5
Detection threshold: 3
Detection filter: none
*Contrast parameter*⁹: 0.0002-0.005
Mesh size: 8

Catalogue:

- XWIN_WORLD
- YWIN_WORLD
- FLUX_BEST
- FLUXERR_BEST
- MAG_BEST
- MAGERR_BEST
- FLAGS

⁹ Il contrasto di un'immagine è il rapporto o la differenza tra la luminosità più alta e quella più bassa. È il parametro da cambiare per una migliore distinzione di oggetti vicini fra loro, più è piccolo più è possibile trovare oggetti molto vicini.

- FWHM_IMAGE
- FWHM_WORLD
- ELONGATION

Adesso esamineremo quali sono le colonne (i vari parametri del *Catalogue*) delle tabelle che l'*object detection* ci fornisce.

2.3. Coordinate celesti

I primi due parametri sono le coordinate celesti: XWIN_WORLD corrisponde all'ascensione retta mentre YWIN_WORLD alla declinazione.

2.4. Flusso e Magnitudine

I parametri FLUX_BEST, FLUXERR_BEST, MAG_BEST e MAGERR_BEST stanno a indicare rispettivamente il flusso, l'errore sul flusso, la magnitudine e l'errore sulla magnitudine.

Si parla in genere di magnitudine (o grandezza) per definire la luminosità di una stella. I primi studiosi (II secolo a.C.) divisero le stelle osservate in cielo in sei classi di luminosità (magnitudini), basandosi sulle capacità dell'occhio umano. Man mano che il numero di stelle osservate aumentava, grazie a nuovi strumenti a disposizione, divenne fondamentale riuscire a trovare un modo uniforme, cioè indipendente dallo strumento usato, per poterne valutare la luminosità.

In particolare per valutare l'intensità di un oggetto e metterla in relazione con la sua classe di luminosità (magnitudine o anche grandezza) fu fondamentale il contributo che venne dalla fisiologia. Si può dimostrare che l'occhio umano reagisce alla stimolo della luce in modo logaritmico. La risposta dell'occhio umano (la sensazione di luce) ad uno stimolo luminoso può essere quindi descritta da una funzione logaritmica, la quale ci dà una misura della magnitudine apparente:

$$m = k \times \text{Log}(I) + \text{cost.}$$

Pogson definì una stella di prima magnitudine come una stella che fosse 100 volte più luminosa di una stella di sesta magnitudine da cui l'Equazione di Pogson: $m_1 - m_2 = -2.5 \times \text{Log}(I_1/I_2)$ dove $m_1 - m_2$ è la differenza tra le due magnitudini mentre I_1/I_2 è il rapporto tra le intensità.

L'equazione di Pogson spiega il perché la magnitudine decresce quando l'intensità luminosa cresce. Infatti si parla di oggetti brillanti quando la loro magnitudine apparente è molto piccola e viceversa. Per esempio la magnitudine apparente del Sole, che è l'oggetto più luminoso, risulta molto piccola ed equivalente a $m = -26.85$.

Quando parliamo di intensità luminosa di una stella in realtà ci si riferisce al flusso di energia. Questo è definito come la quantità di energia proveniente dalla stella che attraversa una superficie unitaria nell'unità di tempo. È questa energia che viene misurata con gli strumenti a terra o nello spazio (ad esempio: l'occhio, i telescopi, ecc.).

La formula del flusso è $f = L / (4\pi d^2)$ dove f è il flusso di energia che arriva a terra per una superficie di 1 cm^2 e nel tempo di 1 s, d è la distanza della stella dall'osservatore e L è l'energia emessa dalla stella nell'unità di tempo.

Quindi, sapendo che la magnitudine è definita come $m = -2.5 \times \text{Log}(I) + \text{cost}$, che l'intensità, I , corrisponde al flusso, f , si può riscrivere la differenza di magnitudini fra due oggetti in funzione della loro distanza:

$$m_1 - m_2 = -5 \times \text{Log}(d_2/d_1).$$

Poiché la magnitudine apparente dipende dalla distanza della stella, per poter confrontare la luminosità di due stelle è stata introdotta la magnitudine assoluta (M) legata alla luminosità intrinseca degli oggetti considerati. Formalmente la magnitudine assoluta è la magnitudine apparente (m) che un oggetto avrebbe se si trovasse ad una distanza dall'osservatore di 10 parsec ($1\text{pc} = 3.058 \times 10^{18}$ cm). Dalla relazione precedente otteniamo quindi:

$$M - m = -5 \times \text{Log}(d/10\text{pc}) = 5 - 5 \times \text{Log}(d) \text{ detto anche Modulo di Distanza.}$$

2.5. Zeropoint

Il programma GAIA calcola le magnitudini strumentali, cioè l'intensità della stella è misurata dal numero di conteggi ad essa associati ad essa bisogna sommare un numero (chiamato Zeropoint) per trovare la vera magnitudine apparente. Per trovare quel numero abbiamo usato due metodi differenti. Il primo, descritto nella sezione 2.5.1, lo abbiamo applicato ai dati dell'ammasso M12; il secondo, descritto nella sezione 2.5.2, lo abbiamo applicato ai dati di NGC2420.

2.5.1. Stella per Stella

Il primo metodo consiste nel selezionare un certo numero di stelle, 4 nel nostro caso, dal nostro catalogo, registrare le coordinate e le magnitudini, andare sul catalogo Pan-STARRS presente online, mettere in input le coordinate, trovare le quattro stelle e registrare le magnitudini apparenti fornite dal catalogo. Per ogni stella poi abbiamo fatto la differenza tra la magnitudine apparente fornita e quella strumentale misurata, trovando lo Zeropoint di ogni stella. I seguenti valori sono relativi a due stelle dell'ammasso M12 (Tabb. 4, 5, 6, 7).

Tabella 4: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro g

RA	DEC	Magnitudine GAIA	Magnitudine Pan-STARRS	Zeropoint
251.835	-1.908	-14.525	17.673	32.197
251.770	-1.959	-15.685	16.479	32.165

La media degli zeropoint del filtro g è 32.286.

Tabella 5: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro r

RA	DEC	Magnitudine GAIA	Magnitudine Pan-STARRS	Zeropoint
251.835	-1.908	-15.541	17.046	32.587
251.770	-1.959	-16.671	15.847	32.519

La media degli zeropoint del filtro r è 32.581.

Tabella 6: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro i

RA	DEC	Magnitudine GAIA	Magnitudine Pan-STARRS	Zeropoint
251.835	-1.908	-15.517	16.812	32.328
251.770	-1.959	-16.687	15.578	32.265

La media degli zeropoint del filtro i è 32.066.

Tabella 7: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro z

RA	DEC	Magnitudine GAIA	Magnitudine Pan-STARRS	Zeropoint
251.835	-1.908	-15.432	16.453	31.885
251.770	-1.959	-16.594	15.372	31.967

La media degli zeropoint del filtro z è 32.016.

2.5.2. Con TopCat

TopCat è un software utilizzato per la creazione di grafici e per la manipolazione di tabelle anche di grandi dimensioni. Per trovare lo Zeropoint abbiamo scaricato prima la tabella dal catalogo Pan-STARRS e l'abbiamo unita con quella che abbiamo trovato noi con GAIA, considerando solo gli oggetti aventi le stesse coordinate celesti entro un errore di 0.2 secondi d'arco. Una volta trovati tutti gli oggetti presenti in entrambi le tabelle, per ciascuno abbiamo fatto la differenza tra la magnitudine apparente del catalogo PanStarrs e quella strumentale del nostro catalogo. Lo Zeropoint in questo caso è il valore medio tra tutte le differenze risultanti. Abbiamo ripetuto l'operazione per tutti i filtri per l'ammasso NGC 2420 (Tab. 8).

Tabella 8: Medie degli Zeropoint nei vari filtri

Filtro SSDS	Media degli Zeropoint
g	32.0812
r	32.4346
i	32.1312
z	32.0131

Una volta trovati gli Zeropoint di ogni filtro, li abbiamo sommati alle nostre magnitudini, trovando le magnitudini apparenti corrispondenti.

2.6. TopCat

Come detto in precedenza, per leggere ed elaborare le tabelle che ci forniva GAIA, abbiamo usato il software TopCat. In questo modo siamo stati capaci di selezionare un certo intervallo di valori di un determinato parametro e prendere solo gli oggetti aventi quel parametro in quell'intervallo oppure confrontare due tabelle separate prendendo soltanto gli oggetti che avevano le stesse coordinate, ovvero gli stessi oggetti. In questo modo, una volta eliminati gli oggetti ambigui (difetti strumentali o galassie o...), siamo stati in grado di creare i diagrammi HR (vedi sezione 4). Per "pulire" le tabelle da possibili oggetti non appartenenti agli ammassi abbiamo usato i due parametri FWHM ed Elongation.

2.7. Gaussiana

Per capire quali intervalli di valore prendere della FWHM risultante dall'*object detection* di GAIA, è necessario introdurre il concetto di distribuzione normale (o gaussiana). La curva consiste nella distribuzione di probabilità, continua, simmetrica e completamente determinata da due parametri che sono la media μ e la deviazione standard σ . La μ è il valore con la frequenza più alta. Più specificatamente, esistono tre tipi di intervalli di valori da considerare per poi prendere quelli corretti nel nostro caso: $\mu \pm 1\sigma$ (dove cade il 68% dei valori), $\mu \pm 2\sigma$ (il 95% dei valori) e $\mu \pm 3\sigma$ (il 99%) (Fig. 19). È presente il \pm perché, come detto, la distribuzione è simmetrica attorno al valore medio. Quindi 1σ rappresenta l'intervallo dove cade il 68% dei valori della gaussiana. Per ognuna delle distribuzioni di FWHM delle nostre tabelle abbiamo apportato questo criterio di selezione.

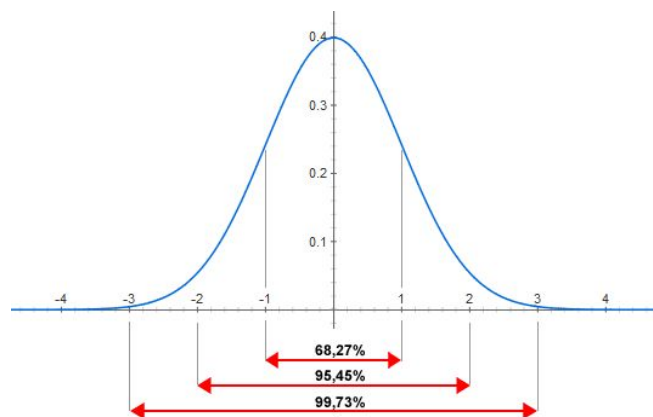


Figura 19: Grafico che mostra la curva gaussiana con le percentuali di valori presenti a $\pm 1, 2, 3\sigma$ e il picco μ

3. Criteri di selezione

Gli ultimi parametri elencati nel *Catalogue* (sezione 2.2), FWHM_IMAGE, FWHM_WORLD e ELONGATION sono stati utilizzati come principali criteri di selezione che descriveremo nei prossimi paragrafi.

3.1. ELONGATION

L'*elongation* è il rapporto tra il semiasse maggiore e il semiasse minore dell'ellissi che si è andata a formare una volta eseguito l'*object detection*. Se il suo valore è troppo alto, vuol dire che l'oggetto è molto ellittico, cosa che avviene solo per oggetti o che non appartengono al nostro ammasso, come ad esempio galassie, o che in realtà sono due (o più troppo vicini e il programma li vede come uno solo, oppure sono stelle "saturate" (Fig. 20, 21). Questo ultimo fenomeno si ha perché la capacità di accumulo delle cariche di un pixel dei rivelatori CCD non è illimitata. Quando un oggetto è troppo luminoso (ovvero raggiunge un livello di fotoni che è troppo alto per essere "contato" dai pixel dei CCD dello strumento del telescopio), appare quindi come un oggetto nero. Impostando come criterio di *elongation* minore di 1.5/2 possiamo eliminare in parte questi oggetti, permettendo un'analisi dati più precisa.

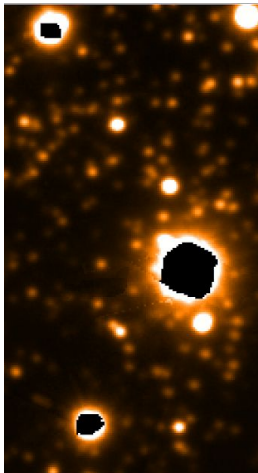


Figura 20: alcuni oggetti saturati

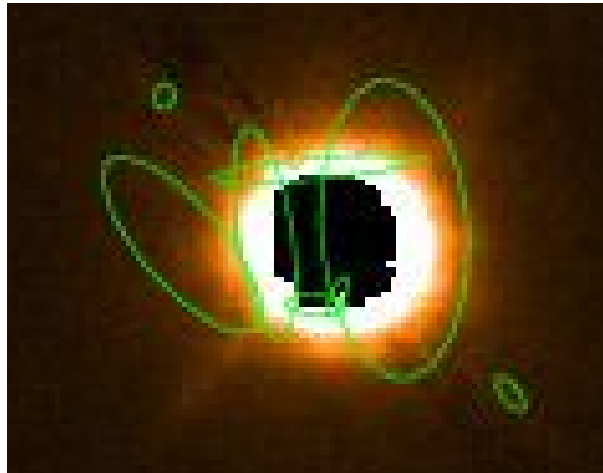


Figura 21: il comportamento dell'*object detection* nel caso di oggetti saturati con elevata *elongation*

3.2. FWHM e FPS

La *Full Width at Half Maximum* (FWHM) è la larghezza a metà altezza della curva gaussiana: Il legame tra σ e FWHM è $FWHM = 2.354\sigma$.

Per ogni filtro abbiamo costruito la distribuzione delle FWHM degli oggetti trovati con l'*object detection* e abbiamo considerato solo gli oggetti che avevano un valore di FWHM che cadeva entro circa il 68% (1σ) della distribuzione. (Fig. 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29).

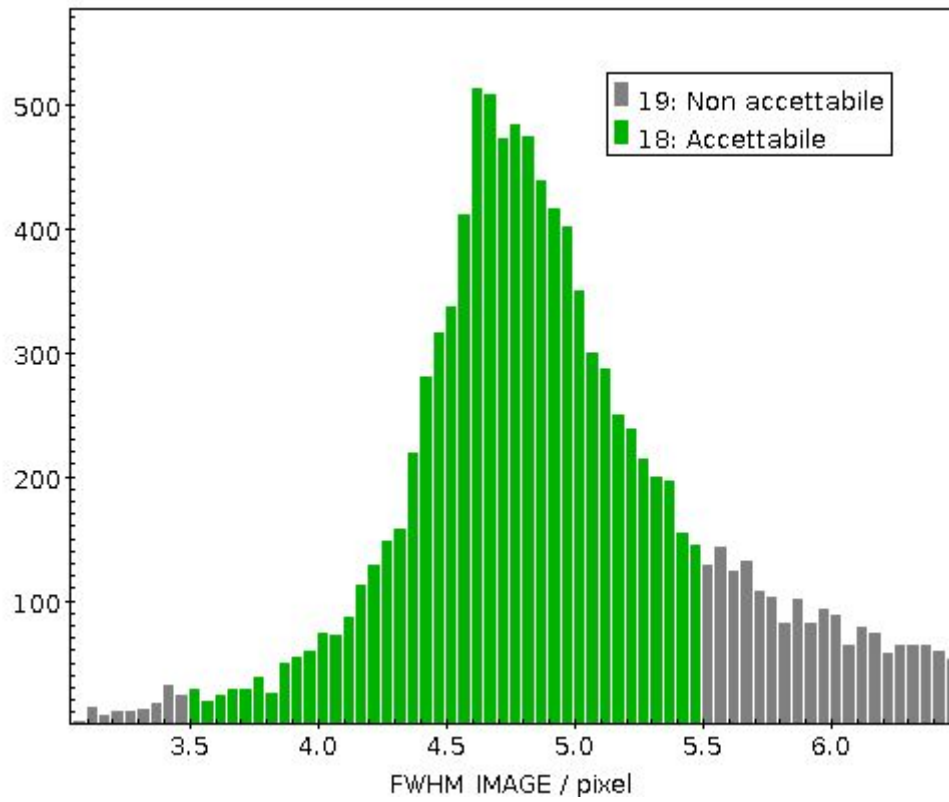


Figura 22: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro g dell'ammasso M12

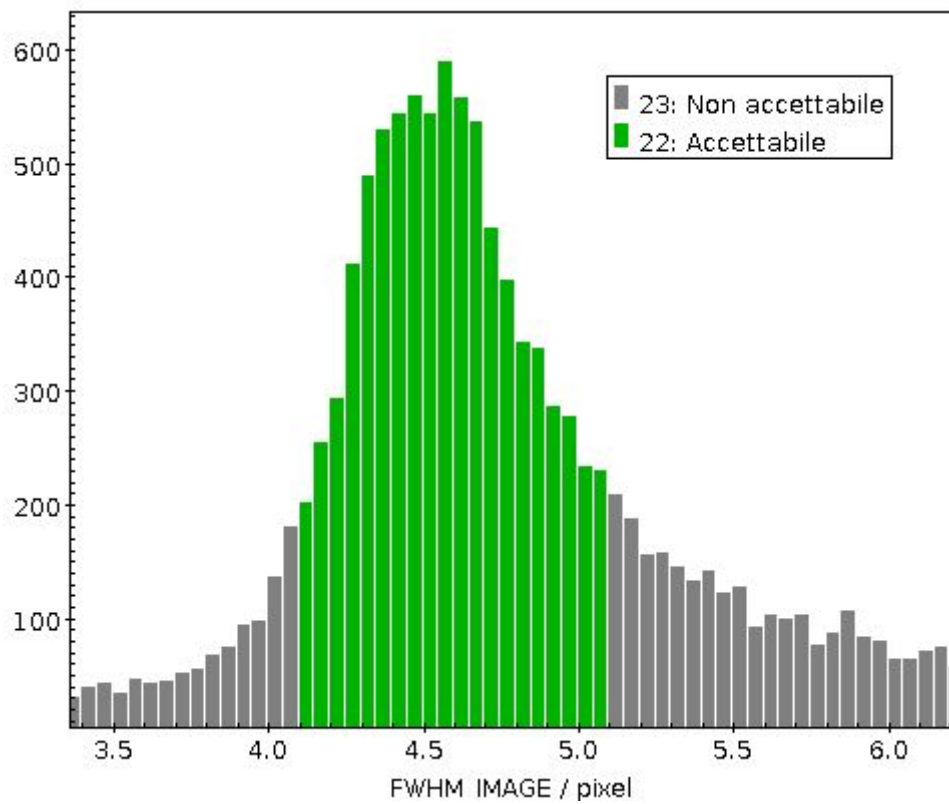


Figura 23: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro r dell'ammasso M12

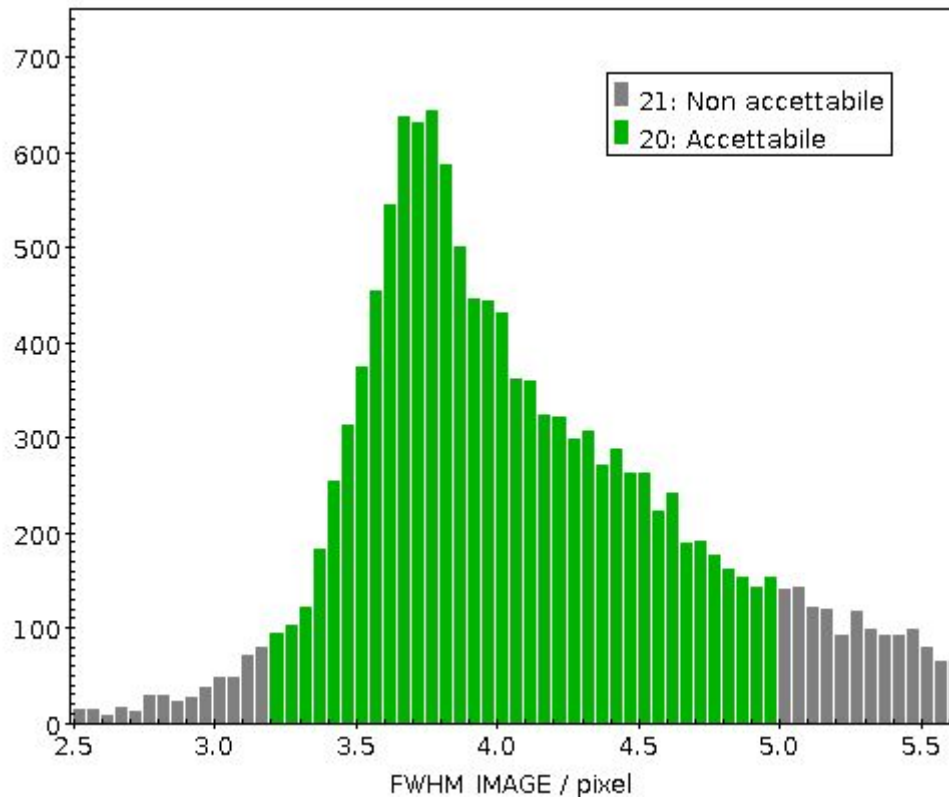


Figura 24: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro i dell'ammasso M12

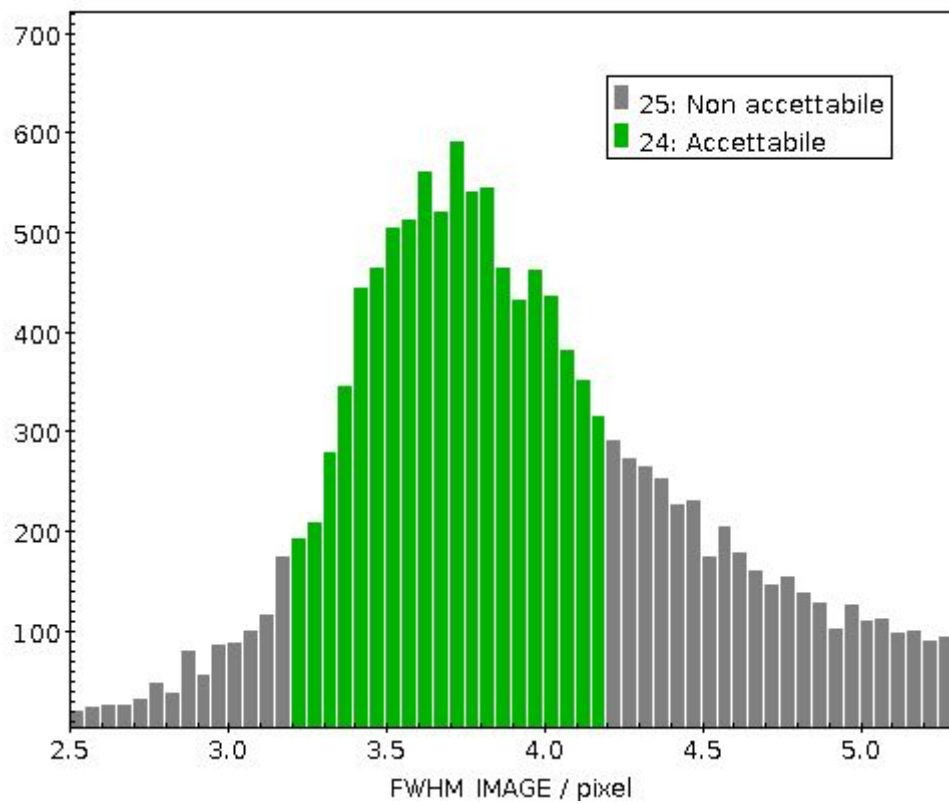


Figura 25: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro z dell'ammasso M12

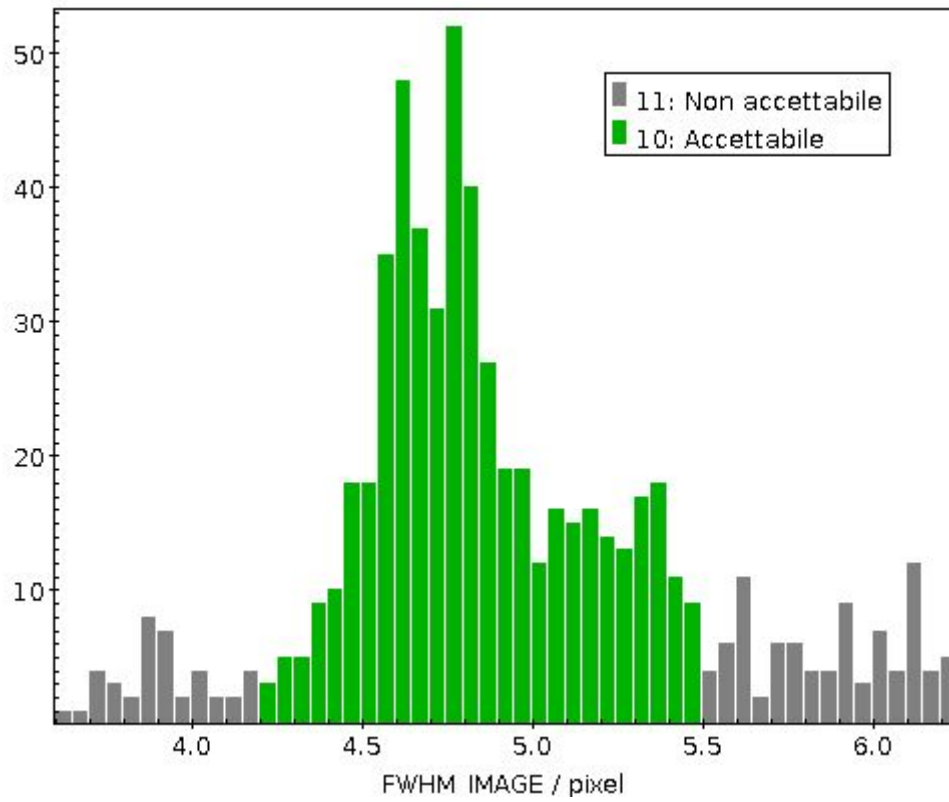


Figura 26: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro g dell'ammasso NGC 2420

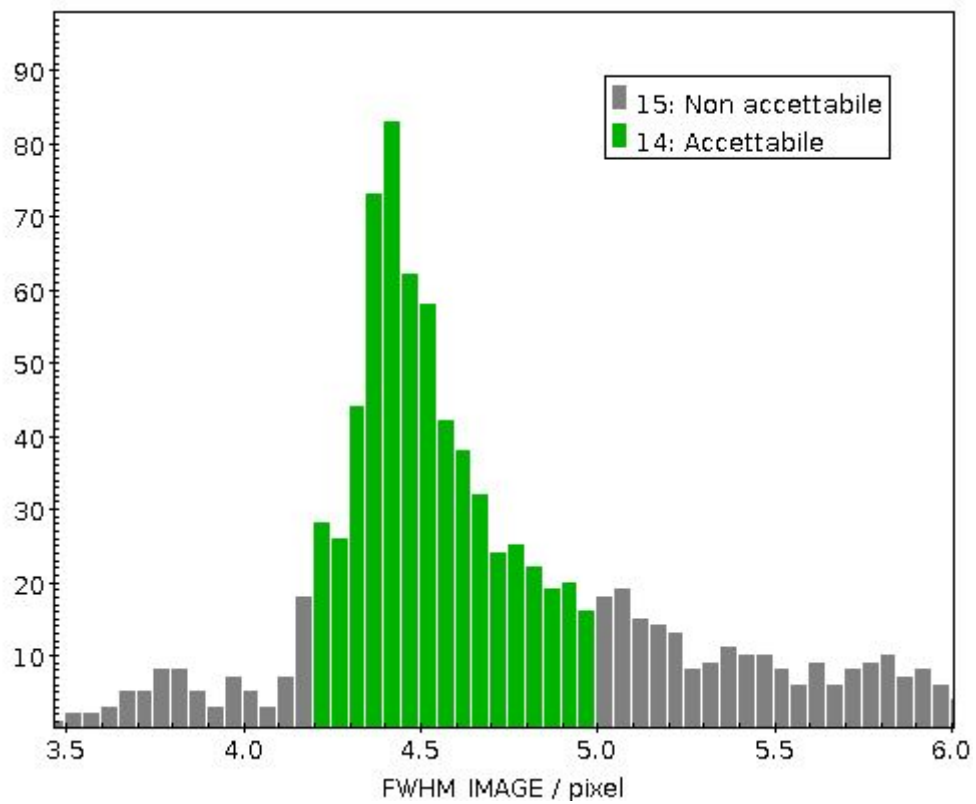


Figura 27: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro r dell'ammasso NGC 2420

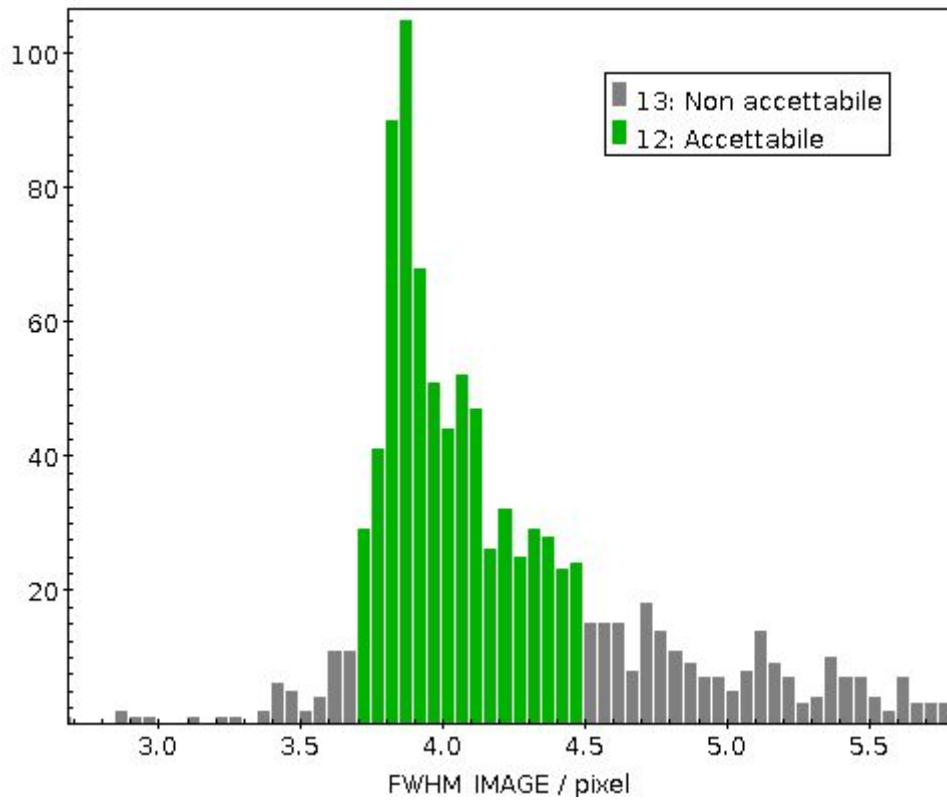


Figura 28: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro i dell'ammasso NGC 2420

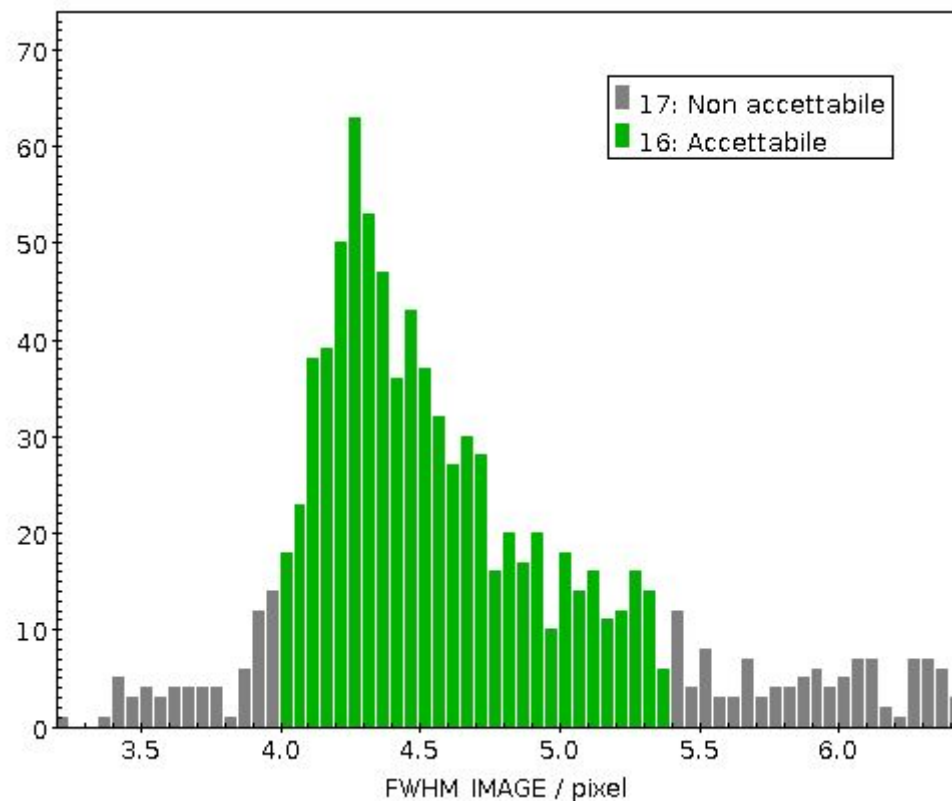


Figura 29: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro z dell'ammasso NGC 2420

La **PSF** (*Point Spread Function*) è una funzione bidimensionale che descrive come si distribuiscono i fotoni che provengono da una sorgente puntiforme, ad es. una stella. Attraverso i sensori CCD si possono osservare un gruppo di stelle come un campo bidimensionali di funzioni molto simili a gaussiane con la loro altezza proporzionale alla loro magnitudine (Fig. 30).

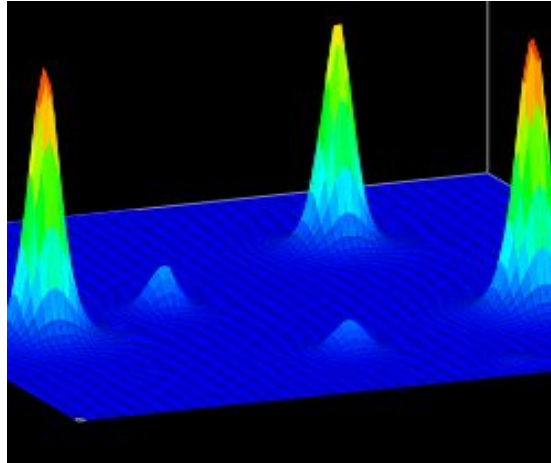


Figura 30: PSF di un insieme di stelle, in cui le funzioni con picchi più alti sono le stelle con magnitudine maggiore

4. Diagramma HR

Successivamente dopo una pulizia degli oggetti ambigui, è arrivato il momento di mettere insieme tutti i dati e costruire il diagramma HR¹⁰, utile per capire alcune caratteristiche delle stelle considerate. Le stelle infatti durante la loro evoluzione occupano solo determinate regioni del diagramma. Per poter confrontare stelle fra di loro in un diagramma HR è necessario utilizzare la loro magnitudine assoluta e quindi conoscerne la distanza. Le stelle appartenenti ad un ammasso sono caratterizzate dall'essere tutte più o meno alla stessa distanza, quindi possiamo costruirne il diagramma HR senza dover calcolare la magnitudine assoluta. Per farlo sono necessari un colore¹¹ e una magnitudine per un certo numero di stelle, che ci permetteranno di costruire un diagramma Colore-Magnitudine. Tale diagramma può essere letto anche come un diagramma che lega la luminosità e la temperatura effettiva della stella.

Per creare il diagramma abbiamo utilizzato un comando chiamato *match* in TopCat che, confrontando due tabelle ottenute per due immagini in filtri diversi, permette di selezionare tutti gli oggetti comuni (tramite le loro coordinate) e metterli in una singola tabella. Così facendo si ottiene una tabella in cui per lo ogni oggetto selezionato sono presenti le sue magnitudini in due filtri diversi. Questo processo di *match* lo abbiamo ripetuto per diverse coppie di filtri. Fatto ciò abbiamo costruito il diagramma HR mettendo nelle ascisse il colore e nelle ordinate la magnitudine (Fig. 31, 32, 33, 34).

¹⁰ L'invenzione del diagramma HR fu una delle scoperte più importanti in campo astronomico. Risale al 1913, quando il danese Hertzsprung e l'americano Russell, indipendentemente l'uno dall'altro, confrontarono in un diagramma la luminosità intrinseca e la temperatura delle stelle.

¹¹ Se prendiamo lo spettro di una stella e misuriamo il flusso usando due diversi filtri (es. g e r) possiamo confrontare fra loro le corrispondenti magnitudini. Si definisce Indice di Colore o Colore la differenza tra le magnitudini apparenti o assolute calcolate nelle due bande:

$$C(g,r) = M(g) - M(r) = -2.5 \times \text{Log}(F_r/F_g).$$

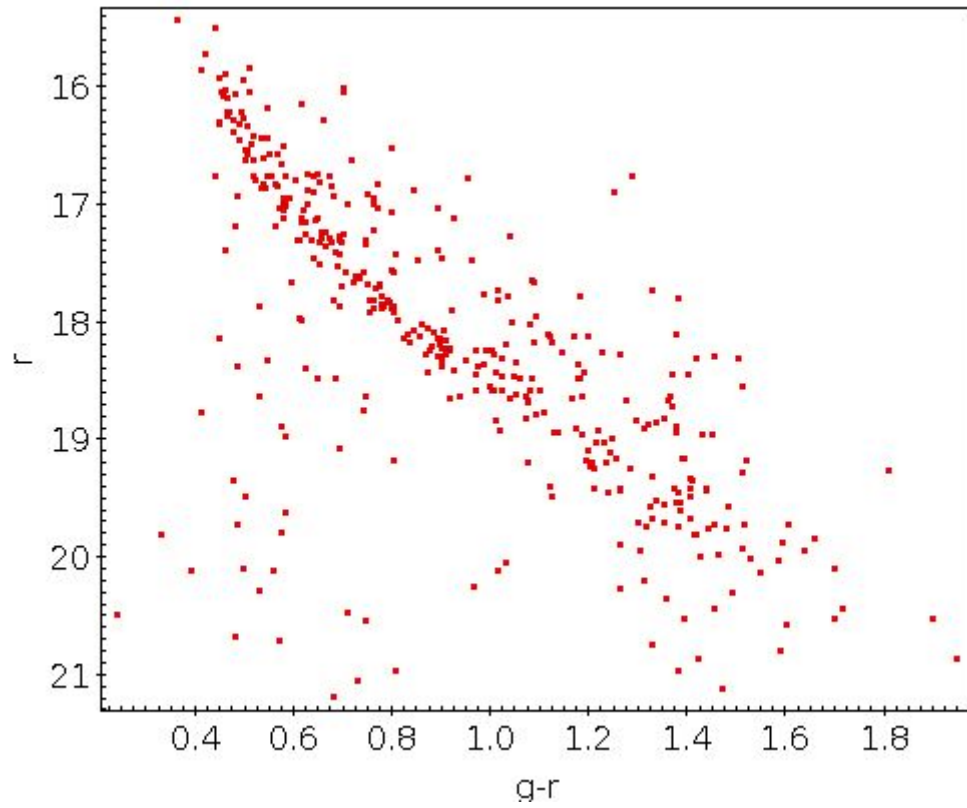


Figura 31: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-r su r dell'ammasso NGC 2420

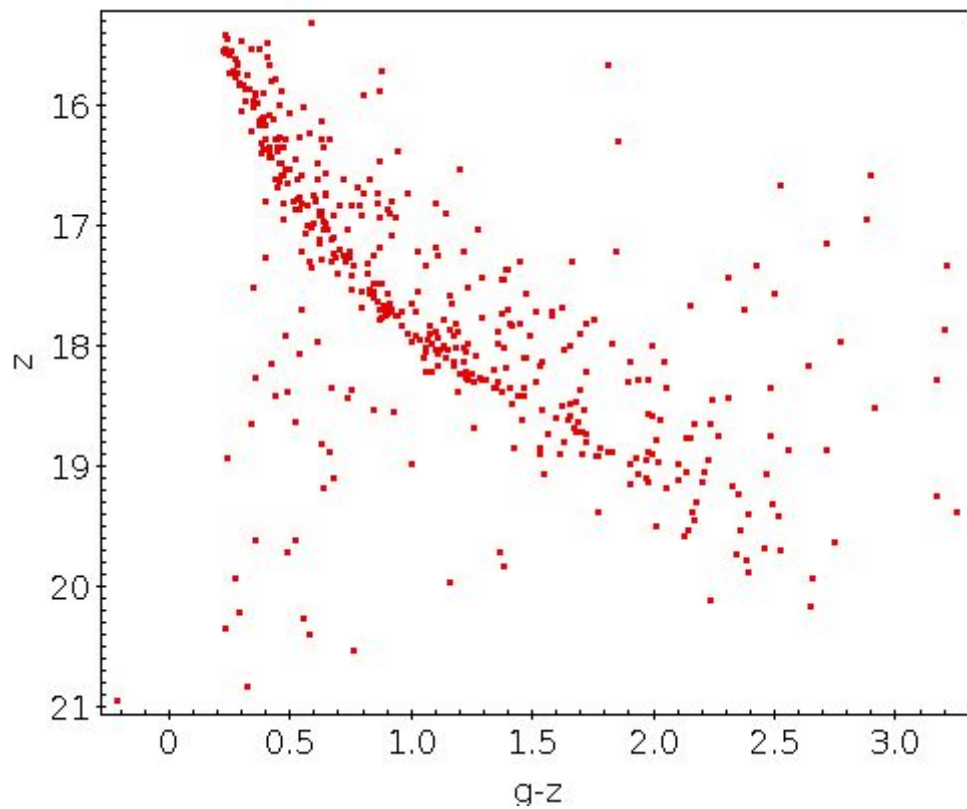


Figura 32: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-z su z dell'ammasso NGC 2420

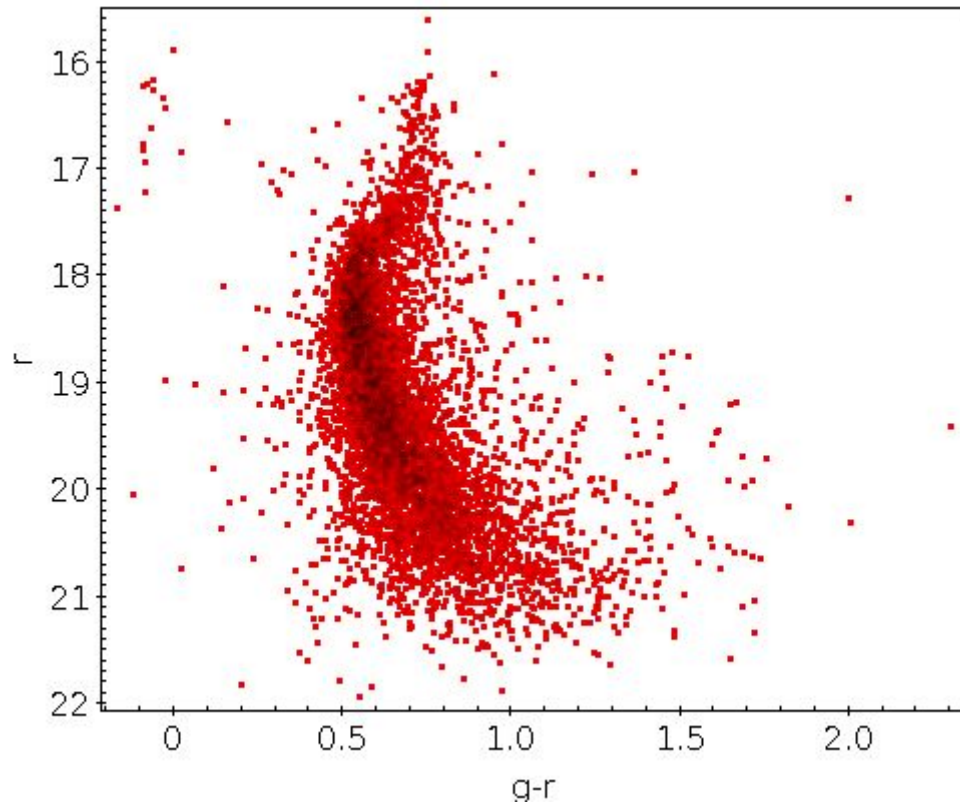


Figura 33: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-r su r dell'ammasso M12

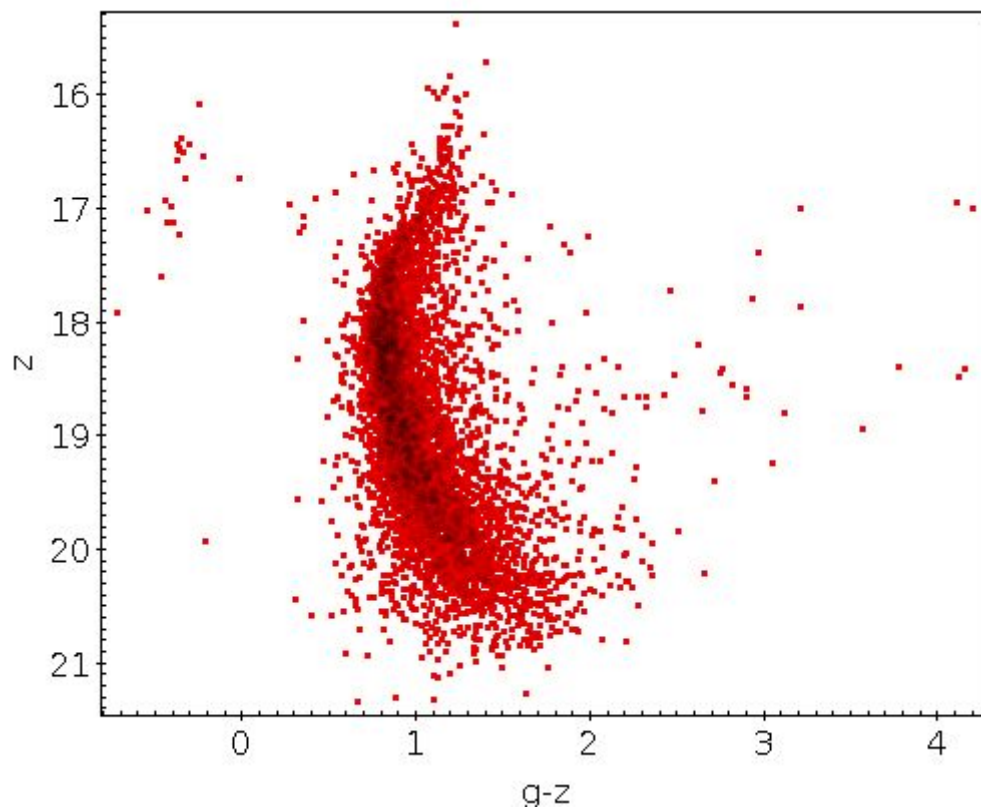


Figura 34: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-z su z dell'ammasso M12

4.1. Turnoff

Una volta creati i diagrammi, si passa all'analisi di essi. La prima cosa che si guarda è il *Turnoff*¹². La luminosità e la temperatura del *Turnoff* variano da ammasso ad ammasso fornendo informazioni sull'età dell'ammasso, per cui però abbiamo bisogno della luminosità intrinseca (Magnitudine Assoluta) delle stelle e quindi della distanza.

La magnitudine apparente del "ramo orizzontale dell'ammasso" (appena accennato in Fig. 33 dalle stelle che hanno un colore g-z attorno a zero e magnitudine z circa 16.5) può permettere di dare una stima della distanza. È necessario però fare alcune trasformazioni che non abbiamo avuto tempo di fare quindi abbiamo cercato le distanze dei nostri ammassi in letteratura.

5. Confronto tra diagrammi HR

Per confrontare il diagramma HR dell'ammasso M12 con quello dell'ammasso NGC 2420, bisogna convertire le magnitudini apparenti delle stelle dei due ammassi misurate nei vari filtri in magnitudini assolute, questo perché i due ammassi sono situati a distanze diverse e quindi le magnitudini apparenti non sono confrontabili tra di loro.

Utilizzando le distanze trovate in letteratura (Tab. 1) e le magnitudini apparenti abbiamo applicato la formula del Modulo di Distanza: $M = 5 - 5 \times \log(d) + m$. Successivamente abbiamo ricostruito i diagrammi colore/magnitudine assoluta per ogni filtro. Infine abbiamo costruito un ulteriore diagrammi, sovrapponendo per gli stessi filtri il diagramma HR dell'ammasso M12 con quello dell'ammasso NGC 2420 (Fig. 35, 36).

¹² Il *Turnoff* è un punto del diagramma HR molto importante. Indica il momento in cui la stella esaurisce l'H nel centro e lascia la curva di "Sequenza principale", ovvero il momento in cui la linea delle stelle nel diagramma inizia a curvare verso destra. Questo avviene sempre più tardi al diminuire della massa della stella, poiché più massiccia è la stella e più velocemente esaurisce il suo combustibile. Quindi il Turn-Off è un indicatore dell'età dell'ammasso.

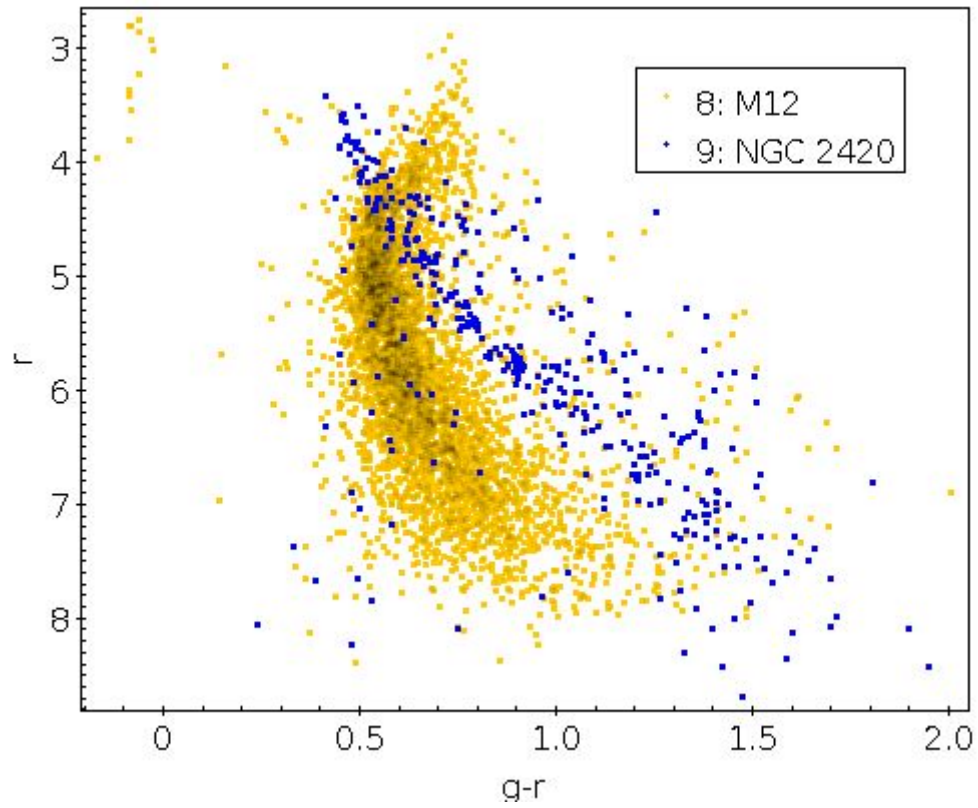


Figura 35: Sovrapposizione dei diagrammi HR degli ammassi M12 (giallo) e NGC 2420 (blu) nei filtri g e r su r

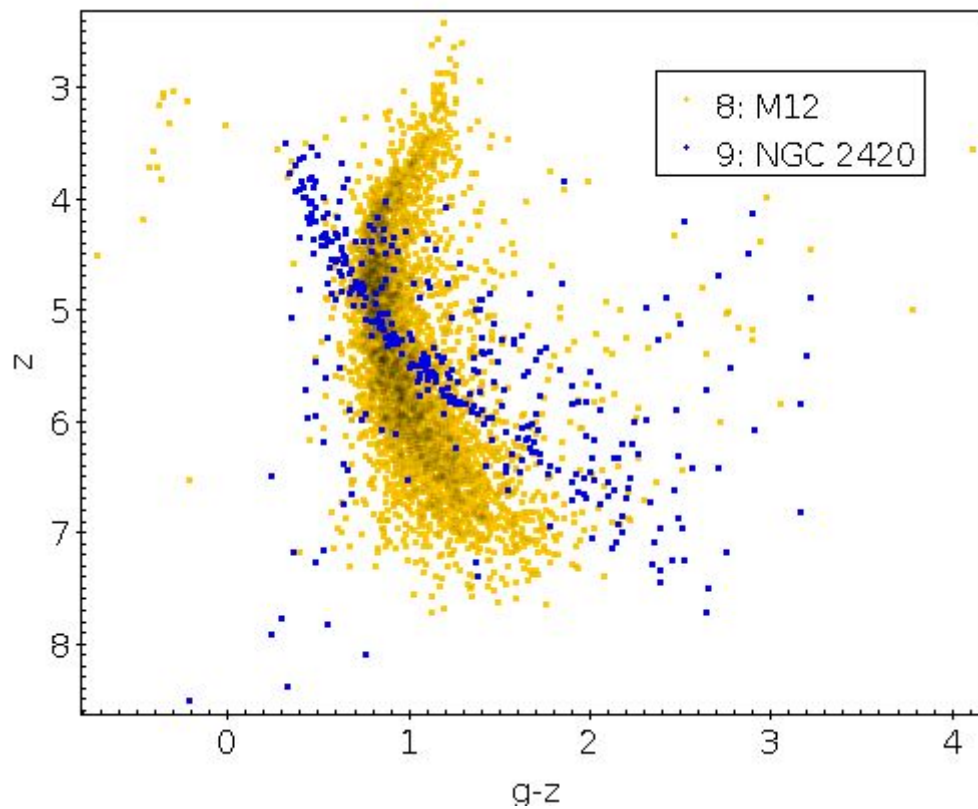


Figura 36: Sovrapposizione dei diagrammi HR degli ammassi M12 (giallo) e NGC 2420 (blu) nei filtri g e z su z

6. Discussione

Infine abbiamo osservato i due diagrammi finali cercando di capirne il senso e cercando di capire eventuali errori, confrontandoli con diagrammi HR di altri ammassi disponibili in letteratura. Sono venute fuori le seguenti osservazioni:

- Le stelle colorate in giallo nei grafici (quelle di M12) presentano un Turnoff molto più accentuato e visibile rispetto alla curva delle stelle blu (quelle di NGC2420), suggerendo quindi M12 sia molto più vecchio di NGC2420, con un numero maggiore di stelle che hanno finito di bruciare H al centro. Al contrario essendo un ammasso giovane, NGC 2420 non presenta stelle che hanno finito l'H. Inoltre la curva di M12 è più a destra e più bassa di quella NGC 2420, visibile meglio in Fig. 35, indicando la presenza in quest'ultimo di stelle più blu (cioè con g-z bassi), quindi più massicce e giovani. Si stima che M12 abbia un'età di 12.7 miliardi di anni mentre NGC 2420 soltanto 1.1 miliardi di anni.
- Un'ulteriore differenza è il numero di oggetti presenti nelle due curve. Questo è spiegato dal fatto che, come detto in precedenza, gli ammassi globulari come M12 hanno fino ad un milione di stelle, mentre gli ammassi aperti come NGC2420 solo qualche decina di migliaia.
- Notiamo anche che nel diagramma di M12 è marginalmente visibile il così detto "braccio orizzontale", caratteristico degli ammassi vecchi. Questo può essere dovuto al fatto che le stelle che compongono il braccio orizzontale sono più calde e più luminose e quando abbiamo fatto la selezione degli oggetti abbiamo eliminato le stelle troppo luminose perché saturate. Quindi è possibile che il braccio orizzontale sia fatto perlopiù da stelle che nelle nostre immagini erano saturate.
- Per raffinare la nostra selezione di stelle dell'ammasso utili per costruire il diagramma HR, abbiamo anche considerato l'eventualità della presenza di stelle/oggetti non appartenenti all'ammasso ma che si trovano invece lungo la linea di vista fra noi e l'ammasso. Un modo per scoprire questi oggetti è cercarne un eventuale spostamento tra la posizione del nostro catalogo e quella riportata in altri cataloghi ottenuti dalle osservazioni con altri telescopi dello stesso ammasso fatte a tempi diversi. Noi abbiamo usato come catalogo con cui confrontare il nostro quello prodotto dal satellite GAIA. Non siamo riusciti a trovare dei *moving objects* (oggetti in movimento) sia a causa dell'elevato errore sulla posizione nel nostro catalogo (in media 0.2 secondi d'arco), sia, probabilmente, a causa dell'intervallo di tempo troppo breve tra l'acquisizione delle immagini da noi analizzate e le misure fatte dal satellite GAIA. Infatti, la differenza media nella posizione degli stessi oggetti nei due cataloghi è risultata essere 0.05 arcsec significativamente inferiore all'errore medio sulla posizione del nostro catalogo di 0.2 arcsec. Quest'ultimo dato è stato calcolato sommando tutti gli errori. Per quanto riguarda la data di acquisizione delle nostre immagini, solitamente le immagini in formato FITS presentano un header in cui è riportata tale data. Il problema è che le immagini che abbiamo scaricato sono la combinazione di più immagini, il software ha creato una nuova immagine inserendo però la data della creazione di tale immagine e non quella di acquisizione.

7. Conclusioni

Tutto sommato, siamo riusciti a fare una buona analisi degli ammassi M12 e NGC 2420, con relativi diagrammi HR che mostrano perfettamente parte dell'andamento e della vita delle loro stelle. Siamo riusciti a individuare il *Turnoff*, necessario per l'analisi, e abbiamo trovato tutti i dati in linea con le aspettative (numero di stelle, età). Purtroppo nelle immagini analizzate erano presenti numerose stelle saturate (troppo luminose per telescopio usato) che non ci hanno permesso di apprezzare il grafico completo (cioè mancano tutte quelle più brillanti).

Per avere un'idea migliore del lavoro che abbiamo appena concluso, abbiamo deciso anche di considerare una regione di cielo senza la presenza di ammassi. Abbiamo quindi preso le coordinate di M12 e abbiamo aggiunto 15 arcominuti alla declinazione, cosa che ci ha permesso di vedere l'immagine della parte di cielo subito prossima all'ammasso. Il risultato è stato anche qui conforme alle aspettative. Per gli ammassi stellari il diagramma prendeva una forma ben precisa, con il *Turnoff* e con un andamento delle stelle sempre a formare la diagonale del grafico, mentre per la porzione di cielo senza ammassi, il diagramma non presenta nessuno di questi andamenti. Abbiamo ripetuto le stesse operazioni di pulizia (*Elongation* e FWHM) e abbiamo costruito i diagrammi HR (Figg. 37, 38)

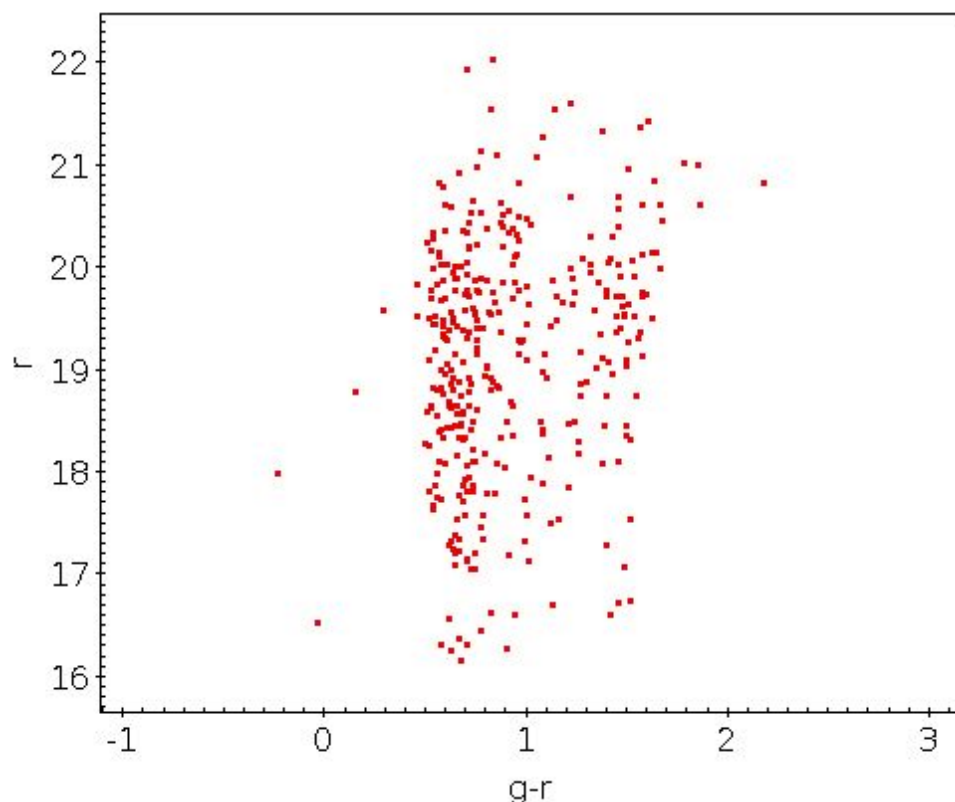


Figura 37: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-r su r della porzione di cielo considerata

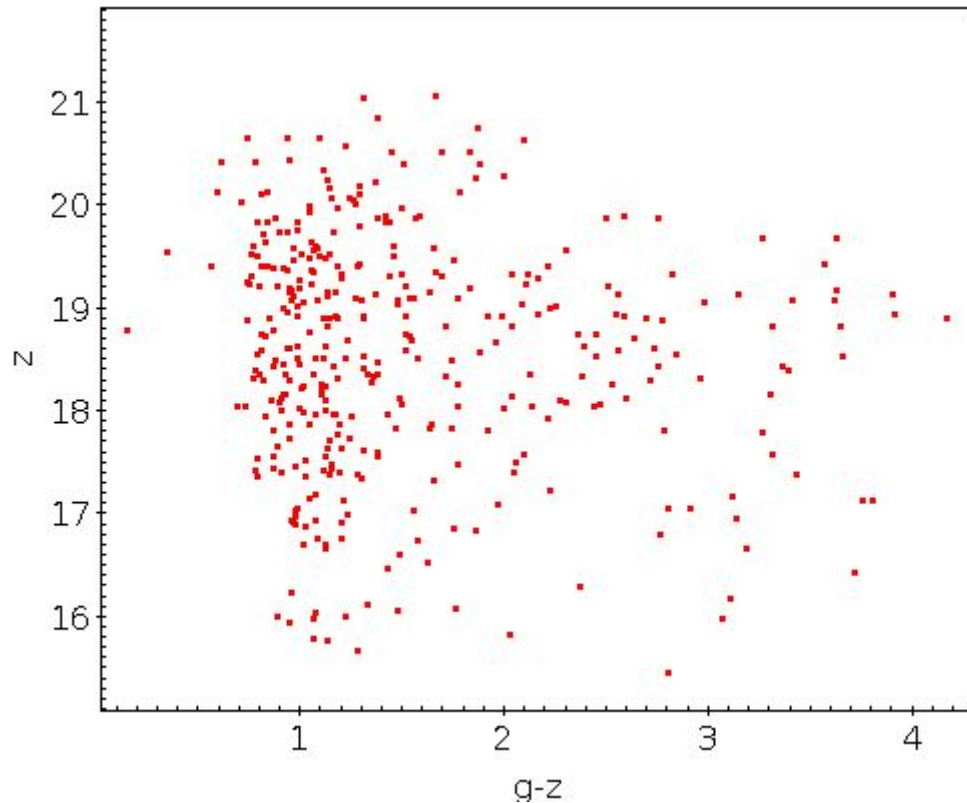


Figura 38: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-z su z della porzione di cielo considerata

Come si può ben notare, le stelle della porzione di cielo sono sparse senza uno schema fisso, come invece accade negli ammassi. Questo potrebbe essere dato dal fatto che, contrariamente a quelle degli ammassi, le stelle considerate sono tutte a distanze diverse da noi.

Per concludere l'esperienza dello stage è stata positiva. Abbiamo affrontato argomenti che non sono presenti nel programma scolastico, ma che sono interessanti. È un'esperienza consigliabile a chiunque abbia conoscenze in informatica e astronomia, ma affrontabile anche senza queste competenze.

Sommario tabelle

Tabella 1: Dati dell'ammasso globulare M12	3
Tabella 2: Dati dell'ammasso aperto NGC 2420	3
Tabella 3: I filtri SDSS con le loro lunghezze d'onda	3
Tabella 4: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro g	8
Tabella 5: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro r	8
Tabella 6: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro i	9
Tabella 7: Alcuni valori di due stelle dell'ammasso M12 nel filtro z	9
Tabella 8: Medie degli Zeropoint nei vari filtri	9

Sommario figure

Figura 1: Il satellite Gaia	1
Figura 2: Il grafico dei filtri SDSS	3
Figura 3: L'ammasso M12 con il filtro g	4
Figura 4: L'ammasso M12 con il filtro r	4
Figura 5: L'ammasso M12 con il filtro i	4
Figura 6: L'ammasso M12 con il filtro z	4
Figura 7: L'ammasso NGC 2420 con il filtro g	4
Figura 8: L'ammasso NGC 2420 con il filtro r	4
Figura 9: L'ammasso NGC 2420 con il filtro i	4
Figura 10: L'ammasso NGC 2420 con il filtro z	4
Figura 11: L' <i>object detection</i> dell'ammasso M12 nel filtro g	5
Figura 12: L' <i>object detection</i> dell'ammasso NGC 2420 nel filtro g	5
Figura 13: L' <i>object detection</i> dell'ammasso M12 nel filtro r	5
Figura 14: L' <i>object detection</i> dell'ammasso NGC 2420 nel filtro r	5
Figura 15: L' <i>object detection</i> dell'ammasso M12 nel filtro i	6
Figura 16: L' <i>object detection</i> dell'ammasso NGC 2420 nel filtro i	6
Figura 17: L' <i>object detection</i> dell'ammasso M12 nel filtro z	6
Figura 18: L' <i>object detection</i> dell'ammasso NGC 2420 nel filtro z	6
Figura 19: Grafico che mostra la curva gaussiana con i valori percentuali di σ e il picco μ	10
Figura 20: alcuni oggetti saturati	11
Figura 21: il comportamento dell' <i>object detection</i> nel caso di oggetti saturati con elevata <i>elongation</i>	11
Figura 22: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro g dell'ammasso M12	12
Figura 23: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro r dell'ammasso M12	12
Figura 24: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro i dell'ammasso M12	13
Figura 25: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro z dell'ammasso M12	13

Figura 26: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro g dell'ammasso NGC 2420	14
Figura 27: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro r dell'ammasso NGC 2420	14
Figura 28: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro i dell'ammasso NGC 2420	15
Figura 29: Istogramma che mostra i valori sottoposti al criterio della FWHM nel filtro z dell'ammasso NGC 2420	15
Figura 30: PSF di un insieme di stelle, in cui le funzioni con picchi più alti sono le stelle con magnitudine maggiore	16
Figura 31: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-r su r dell'ammasso NGC 2420	17
Figura 32: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-z su z dell'ammasso NGC 2420	17
Figura 33: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-r su r dell'ammasso M12	18
Figura 34: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-z su z dell'ammasso M12	18
Figura 35: Sovrapposizione dei diagrammi HR degli ammassi M12 (giallo) e NGC 2420 (blu) nei filtri g e r su r	20
Figura 36: Sovrapposizione dei diagrammi HR degli ammassi M12 (giallo) e NGC 2420 (blu) nei filtri g e z su z	20
Figura 37: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-r su r della porzione di cielo considerata	22
Figura 38: Grafico colore/magnitudine dei filtri g-z su z della porzione di cielo considerata	23

Bologna, 21 Giugno 2019