

# Fotometria *ugriz* dell'ammasso globulare M15

Claudia Bighin<sup>(1)</sup>, Caterina Colombo<sup>(1)</sup>, Piero Ferrarese<sup>(2)</sup>,  
Giulia Bellemo<sup>(3)</sup>, Ilaria Dal Borgo<sup>(1)</sup>, Lisa Perini<sup>(2)</sup>,

<sup>(1)</sup> Liceo "G. Veronese" sez. classica, Chioggia

<sup>(2)</sup> Liceo "G. Veronese" sez. Scientifico Brocca, Chioggia

<sup>(3)</sup> Liceo "G. Veronese" sez. Scientifico PNI, Chioggia

## ABSTRACT

*We studied the photometry of the globular cluster M15 by using g and r bands from ground, and F555W and F439W filters from space. This study allowed us to determine the magnitude of the stars and to build colour-magnitude diagrams of the globular cluster M15.*

## I. INTRODUZIONE

Lo scopo della nostra esperienza è quello di produrre i diagrammi colore-magnitudine per l'ammasso globulare M15 dallo studio fotometrico da terra e dallo spazio. M15 è situato nella costellazione di Pegaso, non molto lontano dal centro galattico e non molto oscurato da materia interstellare. Essendo uno fra gli ammassi più densi della Via Lattea, si ipotizza che al suo interno ci sia un buco nero. Alcuni studi hanno avanzato l'ipotesi dell'esistenza di una nebulosa nel campo stellare di M15.

Le immagini di M15 sono state ricavate dall'archivio della SDSS (Sloan Digital Sky Survey), per quanto riguarda la fotometria da terra (Fig. 1), e dall'archivio della WFPC (Wide Field Planetary Camera) montata su HST (Hubble Space Telescope) per quanto riguarda i dati dallo spazio (Fig. 2).

Dal diagramma colore-magnitudine è poi possibile ottenere l'equivalente di un classico diagramma H-R.

Un ammasso globulare (o ammasso chiuso o ammasso di alone) è un gruppo sferoidale di stelle che orbita attorno ad una galassia. Tali ammassi occupano un volume approssimativamente sferico. Le stelle sono strettamente impacchettate dal loro stesso campo gravitazionale, che conferisce al gruppo la sua forma sferica, e lo rende estremamente denso (fino a centinaia di migliaia di volte la densità di stelle che si trova nei pressi del Sistema Solare) nelle regioni centrali. Gli ammassi globulari sono in genere composti da centinaia di migliaia di stelle vecchie, come il bulge di una galassia spirale, ma confinate in pochi parsec cubici.

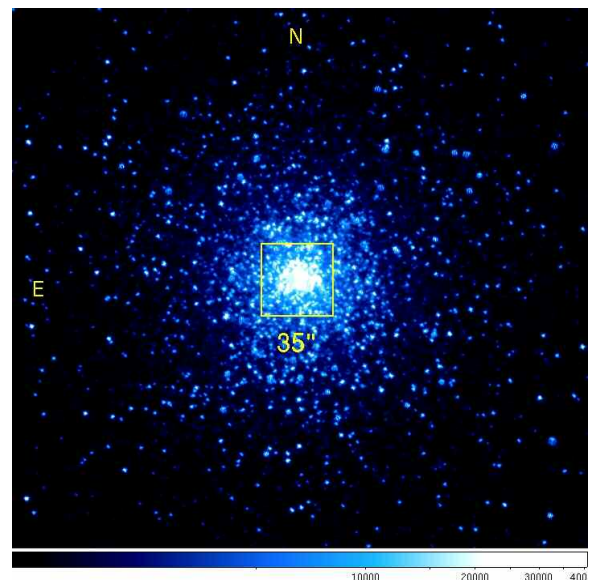
## II. DATI OSSERVATIVI

### DA TERRA

La fotometria permette di misurare la luce emessa dagli astri, che viene raccolta dal telescopio e inviata a un CCD, formato da una matrice di pixel, che permette di registrare il segnale. Il valore dei conteggi associati ad ogni pixel permette di ricavare l'intensità della luce.

La qualità dell'immagine varia in funzione del numero di secondi d'arco che il pixel analizza.

La SDSS è un progetto che fornisce, tra le altre cose, dettagliate immagini ottiche; il campo coperto da questa survey ha un'area pari a un quarto del cielo. E' stato utilizzato un telescopio da 2,5 metri di diametro situato ad Apache Point nel New Mexico avente un CCD di 120 Mpx.



**Fig. 1 :** M15 da terra: il riquadro al centro corrisponde all'area inquadrata dall'immagine spaziale

Per l'indagine fotometrica dell'ammasso abbiamo utilizzato 2 filtri (g, r), ciascuno dei quali permette di selezionare una porzione di spettro elettromagnetico.

Le lunghezze d'onda medie per ogni filtro della SDSS sono elencate nella seguente tabella:

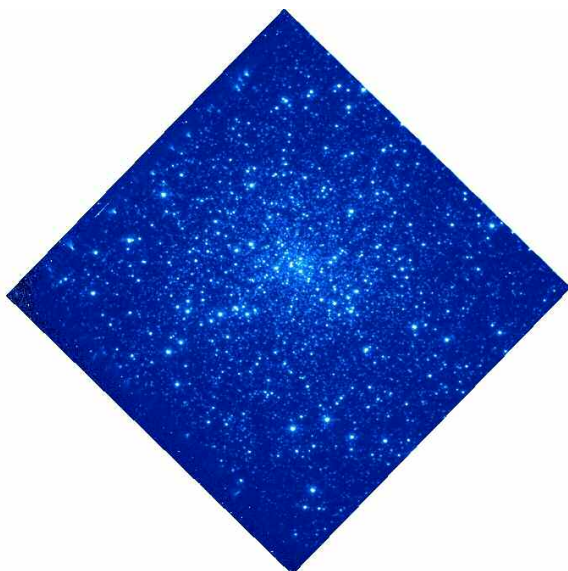
| <i>u</i> | <i>g</i> | <i>r</i> | <i>i</i> | <i>z</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 3551 Å   | 4686 Å   | 6165 Å   | 7481 Å   | 8931 Å   |

### DALLO SPAZIO

Le immagini ottenute dallo spazio sulle quali abbiamo lavorato sono state osservate dal telescopio spaziale Hubble (HST) che è posto negli strati esterni dell'atmosfera terrestre, a circa 600 chilometri di altezza, in orbita attorno alla Terra. È stato lanciato nel 1990 con lo Space Shuttle Discovery come progetto comune della NASA e dell' Agenzia Spaziale Europea (ESA).

Il telescopio può arrivare ad una elevata risoluzione ed è molto importante poiché l'osservazione fuori dall'atmosfera comporta numerosi vantaggi, infatti l'atmosfera distorce le immagini e assorbe la radiazione elettromagnetica a certe lunghezze d'onda.

La WFPC2 utilizza quattro CCD (acronimo di Charge Coupled Device) da 800x800 px, tre dei quali hanno una scala di 0.1 "/px (WF) mentre l'altro di 0.046 "/px (PC).



**Fig. 2 :** Immagine di 35"x 35" di M15 ottenuta dallo spazio con HST

Nella seguente tabella sono elencate la lunghezza d'onda centrale e la larghezza di banda dei due filtri di HST che sono stati utilizzati da noi:

| Filtro | $\Delta\lambda$ | $\lambda$ |
|--------|-----------------|-----------|
| F555W  | 1228 Å          | 5439 Å    |
| F439W  | 473 Å           | 4311 Å    |

### III. DESCRIZIONE DEL LAVORO

#### DA TERRA

Il programma utilizzato per l'analisi dei dati è IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*). I dati a nostra disposizione erano due immagini complementari dell'ammasso globulare M15 osservato da terra, con i filtri *g* ed *r*. Il nostro primo passo è stato quello di unire le due immagini in modo da ottenere un'immagine completa dell'ammasso. Dal momento che si dovevano unire le immagini, le abbiamo allineate in modo da avere la corretta sovrapposizione delle due parti.

Abbiamo poi proceduto con il conteggio delle stelle che risultano essere circa 30000. In seguito abbiamo fatto eseguire al programma una fotometria d'apertura nel filtro *g*. La fotometria di apertura consiste nel calcolare il flusso totale (sorgente+cielo) diviso per il tempo di esposizione, entro una determinata apertura centrata su ogni stella. Per eliminare il contributo del cielo, cioè l'intensità luminosa emessa dal cielo notturno abbiamo individuato una corona circolare di raggio maggiore di quello dell'apertura, che ci ha permesso di determinare il numero di fotoni per unità di superficie nel tempo di esposizione dovuti al fondo cielo e quindi di ottenere per sottrazione il numero netto di fotoni proveniente dalla stella nel tempo di esposizione.

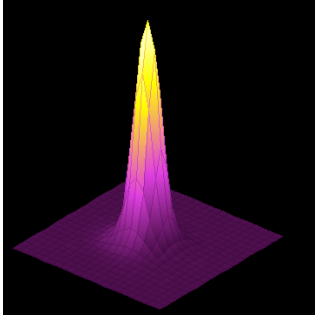
I valori così ottenuti divisi per il tempo di esposizione ci permettono di ricavare la magnitudine strumentale riferita cioè ai conteggi dei fotoni da parte dello strumento di misura:

$$m_s = -2,5 \log \left( \frac{I_* - n_{px} \cdot I_{cielo}}{t_{exp}} \right)$$

Successivamente, data la difficoltà per il programma di determinare una fotometria precisa visto che il campo era molto denso ed era quindi complicato separare con esattezza le singole sorgenti, abbiamo applicato un'altra tecnica basata sul fit della PSF (*Point Spread Function*) che rappresenta il profilo tridimensionale della distribuzione di luce delle sorgenti (Fig. 3). Bidimensionalmente, una PSF è una gaussiana che misura l'intensità della luce emessa e possiede una larghezza tipica denominata FWHM (Full Width at Half Maximum).

Sono state selezionate le stelle più isolate e con un profilo regolare per generare una PSF modello che poi è stata fittata su tutte le sorgenti del campo, eliminando quelle che si discostavano molto da questo profilo; è stata inoltre determinata la magnitudine di questi oggetti.

Questa operazione è stata fatta anche per l'immagine nel filtro *r*. Abbiamo ottenuto così i valori delle magnitudini di tutte le sorgenti identificate come appartenenti all'ammasso.



**Fig. 3 :** Questa immagine rappresenta la PSF media nel filtro *r* dell'ammasso M15 da noi esaminato.

Per arrivare alla magnitudine reale, si utilizza una formula per il calcolo della magnitudine calibrata a partire dalla magnitudine strumentale ottenuta dal fit con la PSF media.

La formula utilizzata è la seguente:

$$m = m_0 + m_s - kx - 25$$

$m$  = magnitudine calibrata

$m_0$  = costante dipendente dal filtro considerato

$m_s$  = magnitudine strumentale

$k$  = coefficiente di estinzione atmosferica

$x$  = massa d'aria

25 = costante additiva applicata arbitrariamente dal programma per il calcolo di  $m_s$  al fine di rendere i valori della magnitudine strumentale positivi.

|          | $x$   | $m_0$  | $k$   |
|----------|-------|--------|-------|
| <i>u</i> | 1.133 | 23.529 | 0.596 |
| <i>g</i> | 1.137 | 24.384 | 0.220 |
| <i>r</i> | 1.129 | 24.015 | 0.140 |
| <i>i</i> | 1.131 | 23.636 | 0.089 |
| <i>z</i> | 1.135 | 21.853 | 0.082 |

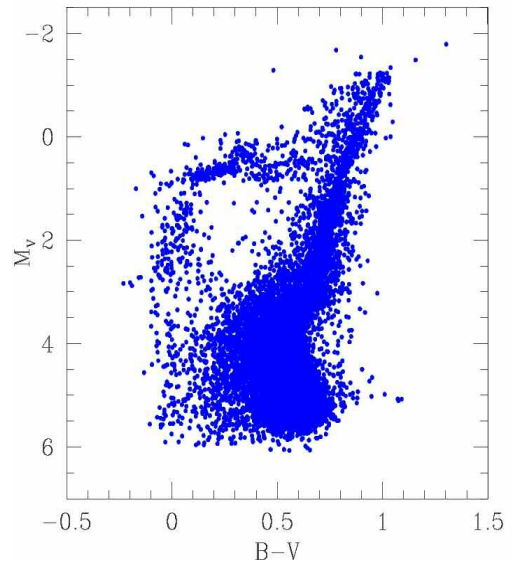
Nella tabella precedente sono elencati i valori dei parametri  $x$ ,  $m_0$  e  $k$  per i 5 filtri della SDSS.

Sostituendo i valori numerici nelle formule per  $g$  e  $r$ , si ottengono le seguenti relazioni:

$$m_g = m_s - 0.86614$$

$$m_r = m_s - 1.14306$$

Ci è sembrato poi opportuno convertire i valori dei filtri *ugriz*, in filtri del sistema fotometrico *UBVRI*.



**Fig. 4 :** Diagramma colore-magnitudine

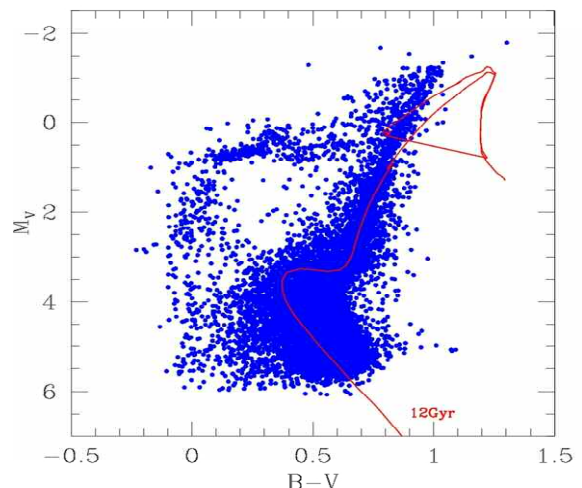
Quindi abbiamo utilizzato le seguenti formule di conversione:

$$B = g + 0.327 \cdot (g - r) + 0.216$$

$$V = g - 0.587 \cdot (g - r) - 0.011$$

e abbiamo creato un grafico colore-magnitudine (Fig. 4). In particolare in ascissa possiamo osservare il colore  $B-V$ , e in ordinata la magnitudine assoluta  $M_V$ . La magnitudine assoluta è stata ottenuta stimando ad occhio la magnitudine apparente media del ramo orizzontale e tenendo conto che le stelle variabili RR Lyrae che si trovano appunto in questa zona del diagramma, hanno magnitudine assoluta tipica pari a  $M_V = 0.7$ .

Attraverso la sovrapposizione di curve isocrone per gli ammassi globulari, abbiamo potuto stabilire un'età approssimativa dell'ammasso, che risultava essere 12 Gyr (Fig. 5).



**Fig. 5 :** Diagramma H-R con isocrona 12 Gyr

## DALLO SPAZIO

Dopo aver selezionato l'ammasso globulare NGC 7078 dall'archivio di HST, abbiamo raccolto per ogni immagine le informazioni relative a tempo di esposizione, tipo di filtro, larghezza di banda e lunghezze d'onda centrale.

Avevamo a nostra disposizione due gruppi di immagini: uno con filtro F555W equivalente al colore verde e l'altro F439W equivalente al blu.

Abbiamo diviso le immagini e lavorato separatamente su ogni immagine dei due gruppi fino a quando non è avvenuta la sovrapposizione.

Abbiamo selezionato una stella che è divenuta per noi stella campione, ne abbiamo ricercato le coordinate e inserito i comandi al fine di ritrovarla nelle altre immagini dello stesso gruppo. Abbiamo riportato tutte le coordinate della stella nelle diverse immagini, ne abbiamo calcolato le differenze di ascissa e ordinata riferite alla prima immagine per poter calcolare lo spostamento necessario per poterle sovrapporre perfettamente.

Fatto questo siamo passati alla combinazione delle immagini che devono essere perfettamente allineabili. Questa operazione viene eseguita per eliminare i raggi cosmici, che sono fenomeni casuali che riscaldano il sensore come se fossero fonti luminose; il loro numero tende ad aumentare al prolungarsi del tempo di esposizione.

Abbiamo calcolato la magnitudine strumentale dell'ammasso mediante fotometria di apertura prima e con il fit della PSF campione poi, come avvenuto per le immagini da terra.

La formula che esprime la relazione, tra intensità e la magnitudine è:

$$m_s = -2,5 \log \left( \frac{I_*}{t_{\text{exp}}} \right)$$

dove:

$m_s$  = magnitudine strumentale

$I_*$  = intensità della luce proveniente dalla stella in quella particolare banda fotometrica

$t_{\text{exp}}$  = tempo di esposizione

Fatto ciò abbiamo calcolato la magnitudine calibrata, equivalente alla somma della strumentale con  $m_0$  (detta magnitudine al punto-zero, calcolata utilizzando stelle standard per ogni banda).

Dopo aver eseguito le stesse operazioni anche sull'altro filtro, abbiamo allineato le immagini nei due filtri, in modo da avere le stesse sorgenti nella stessa posizione in entrambi i filtri.

Infine abbiamo convertito le magnitudini F439W in B e F555W in V.

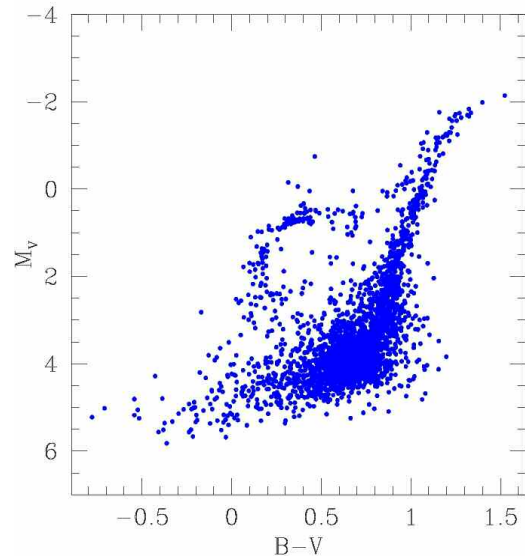


Fig. 6 : Diagramma H-R ottenuti con i dati della WFPC

Abbiamo quindi ricavato il diagramma H-R (Fig. 6) ponendo in ascissa B-V (indici di colore, cioè la differenza di magnitudine tra bande B e V) e in ordinata la  $M_V$  (magnitudine assoluta).

Dopo aver valutato la forma generale della disposizione dell'ammasso sul diagramma, abbiamo cancellato i dati non corretti.

Mediante il fit con le isocrone adeguate al particolare ammasso, abbiamo quindi ipotizzato una stima dell'età dell'ammasso che è risultata essere compresa tra 6 e 10 miliardi di anni (Fig. 7). Per confronto sono riportate le isocrone di età 30 e 300 milioni di anni.

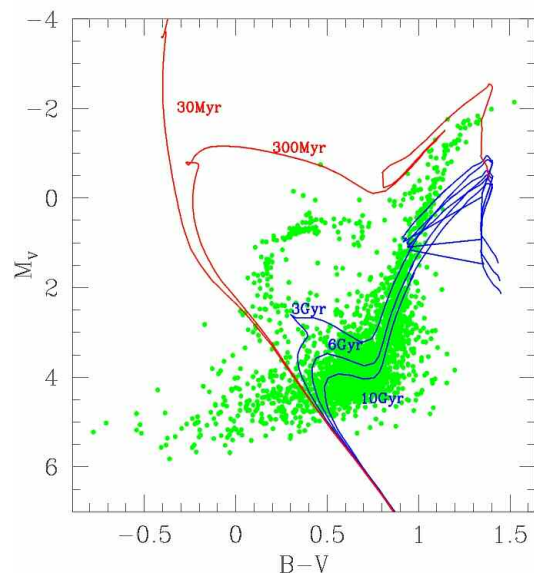


Fig. 7 : Diagramma H-R con isocrone di varia età

## IV. RISULTATI

I diagrammi presentati nelle figg. 4, 5, 6 e 7 ci indicano stelle tutte appartenenti all'ammasso. Come si può notare il turn-off dell'ammasso risulta essere accentuato. E' presente il ramo delle giganti e il ramo orizzontale: sapendo che le stelle variabili denominate RR Lyrae sono stelle che nel diagramma H-R si trovano sul ramo orizzontale e sono caratterizzate da magnitudine assoluta media costante e nota, utilizzando il valore trovato da noi per la magnitudine apparente, abbiamo potuto calcolare la distanza dell'ammasso attraverso la formula di Pogson:

$$M = m + 5 - 5 \log d$$

M = magnitudine assoluta delle RR Lyrae  
 m = magnitudine apparente delle RR Lyrae  
 d = distanza ammasso

Quindi nel nostro caso, poiché il ramo orizzontale si trova a magnitudine apparente  $V = 15.7$ , si ottiene :

$$d = 10^{\frac{5+m-M}{5}} \approx 10^4 \text{ pc} = 32600 \text{ a.l.}$$

valore presente anche nella letteratura scientifica. Come si può notare, attraverso la sovrapposizione delle isocrone ai due diversi diagrammi H-R, vi sono delle divergenze. Da terra, infatti, il diagramma H-R risulta più completo poiché si può visualizzare anche parte della sequenza principale. Dallo spazio invece, il campo stellare visivo è ristretto, come si osserva nelle figure 1-2, ed inoltre il tempo di esposizione applicato non consente di vedere le stelle più deboli dell'ammasso che vanno a formare il pezzo di sequenza principale che invece si osserva da terra. Poiché è il turn-off che indica l'età dell'ammasso, se la sequenza principale è solo accennata, diventa difficile stimare l'età. Infatti da terra risulta che l'ammasso ha una età di circa 12 miliardi di anni, mentre dallo spazio l'età più probabile risulta essere compresa tra 6 e 10 miliardi di anni.

## BIBLIOGRAFIA

SDSS (Sloan Digital Sky Survey, <http://www.sdss.org>)  
<http://www.wikipedia.org>  
<http://www.pd.astro.it>  
<http://www.tiscalinet.it>  
<http://www.mporzio.astro.it>