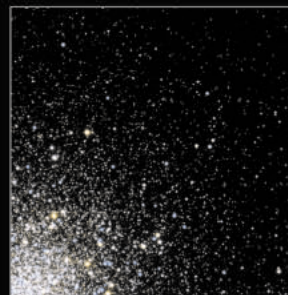


# GLI ESERCIZI DI ASTRONOMIA

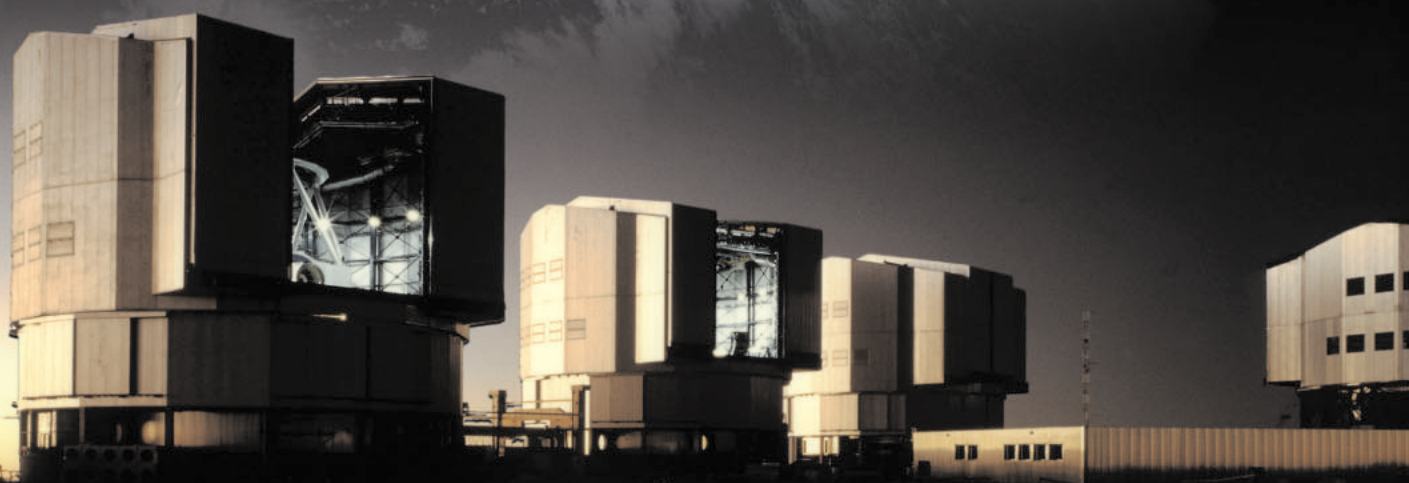
Esercizi di astronomia per studenti delle  
scuole superiori basati su osservazioni effettuate  
con il telescopio spaziale Hubble NASA/ESA  
ed i telescopi dell'ESO

a cura di

**ESA/ESO**



Esercizio 4



## Misurare la Distanza della Supernova 1987A

Basato su Osservazioni realizzate con il telescopio VLT dell'ESO





## Gli esercizi di astronomia a cura di ESA/ESO 4

### Prefazione

- Prefazione ..... pagina 2

### Introduzione

- Le Stelle ..... pagina 3
- Il bruciamento dell'idrogeno ..... pagina 3
- Ammassi stellari ..... pagina 3
- Gli ammassi globulari ..... pagina 4
- L'ammasso Globulare M12 ..... pagina 6
- Il diagramma di Hertzsprung-Russell ..... pagina 6
- L'evoluzione stellare nel diagramma H-R ..... pagina 7
- L'indice dei colori B-V ..... pagina 8
- Il diagramma H-R è la chiave di un ammasso ... pagina 8

### Quesiti

- Osservazioni, riduzione dati e analisi ..... pagina 9
- Accenni sull'analisi delle immagini ..... pagina 9
- Quesito 1 allenamento con la B-Band ..... pagina 9
- Quesito 2 la calibrazione della B-Band ..... pagina 9
- Quesito 3 le magnitudini della B-Band ..... pagina 9
- Quesito 4 allenamento con la V-Band ..... pagina 10
- Quesito 5 la calibrazione della V-Band ..... pagina 10
- Quesito 6 le magnitudini della V-Band ..... pagina 10
- Quesito 7 Indice di colore ..... pagina 10
- Quesito 8 Temperatura superficiale ..... pagina 10
- Quesito 9 Il diagramma H-R ..... pagina 10
- Quesito 10 La Sequenza Principale appropriata ..... pagina 10
- Quesito 11 La distanza da M12 ..... pagina 10
- Quesito 12 La correzione dell'estinzione ..... pagina 10
- Quesito 13 ..... pagina 16
- L'evoluzione di un ammasso globulare ..... pagina 16
- Quesito 14 ..... pagina 16
- Quesito 15 ..... pagina 16
- Quesito 16 ..... pagina 18

### Quesiti aggiuntivi

- Quesito 17 ..... pagina 18
- Quesito 18 ..... pagina 18

### Altre letture

- Articoli Scientifici ..... pagina 19

### Guida per l'insegnante

- Guida per l'Insegnante ..... pagina 21



## Prefazione

Gli esercizi di astronomia a cura di ESA/ESO 4

### Misurare la Distanza e l'Età di un Ammasso Globulare di Stelle

L'astronomia è considerata generalmente una scienza visuale ed accessibile, ideale quindi per scopi didattici. Nel corso degli ultimi anni, il telescopio spaziale Hubble della NASA e dell'ESA ed i telescopi dell'ESO a La Silla e Paranal in Cile hanno mostrato panorami dell'Universo sempre più profondi e spettacolari. Hubble ed i telescopi dell'ESO non hanno fornito soltanto immagini sorprendentemente nuove, ma costituiscono soprattutto strumenti preziosi per gli astronomi. I telescopi hanno un'eccellente risoluzione sia spaziale che angolare (nitidezza d'immagine) e permettono di scrutare l'Universo più a fondo di quanto sia mai stato possibile e, dunque, trovare le risposte a questioni da lungo tempo insolute.

Le analisi di tali osservazioni, spesso sofisticate nel dettaglio, sono in alcuni casi sufficientemente semplici, in linea di principio, da offrire agli studenti della scuola secondaria l'opportunità di ripeterle da soli.

Questa serie di esercizi è stata prodotta dall'ESA (European Space Agency), partner europeo del progetto Hubble che ha accesso al 15% del tempo di osservazione, in collaborazione con l'ESO (European Southern Observatory).

Prefazione



**Figura 1: Il Very Large Telescope dell'ESO**

Il Very Large Telescope (VLT) dell'ESO all'osservatorio di Paranal (nel deserto di Atacama, Cile) è il più grande ed avanzato telescopio ottico al mondo. Con la sua altissima risoluzione ottica e la sua enorme superficie, il VLT produce immagini nitide e può catturare la luce degli oggetti più deboli e lontani dell'Universo.





## Introduzione

### Le Stelle

Una stella è una sfera gigantesca di gas luminoso con caratteristiche fisiche come massa, temperatura e raggio. Per gli astronomi è importante, inoltre, stabilirne la distanza dalla Terra. La stella più vicina e più studiata è il Sole.

### Il Bruciamento dell'idrogeno

La luce emessa dalla maggior parte delle stelle è il prodotto del processo di fusione termonucleare nella loro regione centrale (nucleo). Una stella simile al Sole è composta normalmente da circa il 74% di idrogeno, 25% di Elio e da un rimanente 1% di un miscuglio di elementi più pesanti. Il processo di fusione più comune nelle stelle simili al Sole è il bruciamento dell'idrogeno attraverso il quale quattro nuclei di idrogeno si fondono in un nucleo di elio. Il processo richiede diverse fasi illustrate in figura 2. Nella prima fase del processo due protoni si fondono formando così un nucleo di deuterio, una forma più pesante di idrogeno. Questo evento è molto raro, anche nel nucleo denso delle stelle dove la temperatura raggiunge alcuni milioni di gradi. Ecco perché tutte le stelle simili al Sole non esplodono in un'incontrollata

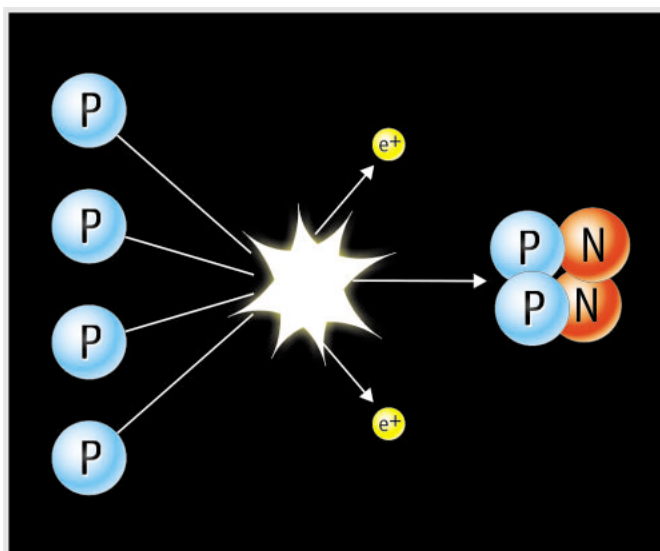
reazione a catena quando inizia il processo di fusione, ma rimangono in questa fase di stabilità della loro vita per molti miliardi di anni. Finché nella stella la temperatura superficiale è stabile, il raggio e la luminosità sono quasi costanti. La reazione nucleare nel nucleo genera sufficiente energia da mantenere bilanciata la pressione termica, che tende a far espandere la stella, con le forze gravitazionali interne che invece tendono a farla contrarre.

La massa dell'atomo di elio è solo il 99.3% della massa dei quattro nuclei originari. Il processo di fusione converte il restante 0.7% della massa in energia — generalmente in energia luminosa (fotoni). Il quantitativo di energia può essere calcolato con la famosa equazione di Einstein:  $E = Mc^2$ . Essendo  $c^2$  un numero enorme, questo significa che anche un piccolo quantitativo di materia può essere convertito in un'energia altrettanto grande. Il residuo 0.7% della massa dei quattro nuclei di idrogeno confluisce in un'unica reazione che può sembrare minuscola, ma considerando il numero totale delle reazioni coinvolte nel processo di fusione, si noterà una considerevole massa (ed energia) coinvolta.

### Ammassi stellari

Il termine "Ammassi Stellari" è utilizzato per indicare due tipi differenti di gruppi di stelle: ammassi di stelle aperti e ammassi di stelle globulari.

Gli ammassi di stelle aperti sono gruppi di stelle distribuite in modo abbastanza casuale e relativamente giovani che vanno dalle centinaia alle migliaia di elementi. Queste hanno età tipicamente attorno ad alcuni milioni di anni, una frazione dei pochi miliardi di anni che servono ad una stella per evolvere. Questi ammassi si trovano in un disco della nostra Galassia, la Via Lattea, e spesso contengono nubi di gas e polveri nelle quali nuove stelle si formano. Il diametro tipico di un ammasso stellare aperto è di circa 30 anni luce (10 parsecs).



**Figura 2: Bruciamento dell'idrogeno**

La forma più semplice di "produzione" di energia nelle stelle avviene per la fusione di quattro nuclei di idrogeno in uno di elio. Il processo ha diverse fasi, qui è illustrato il risultato finale.





## Introduzione



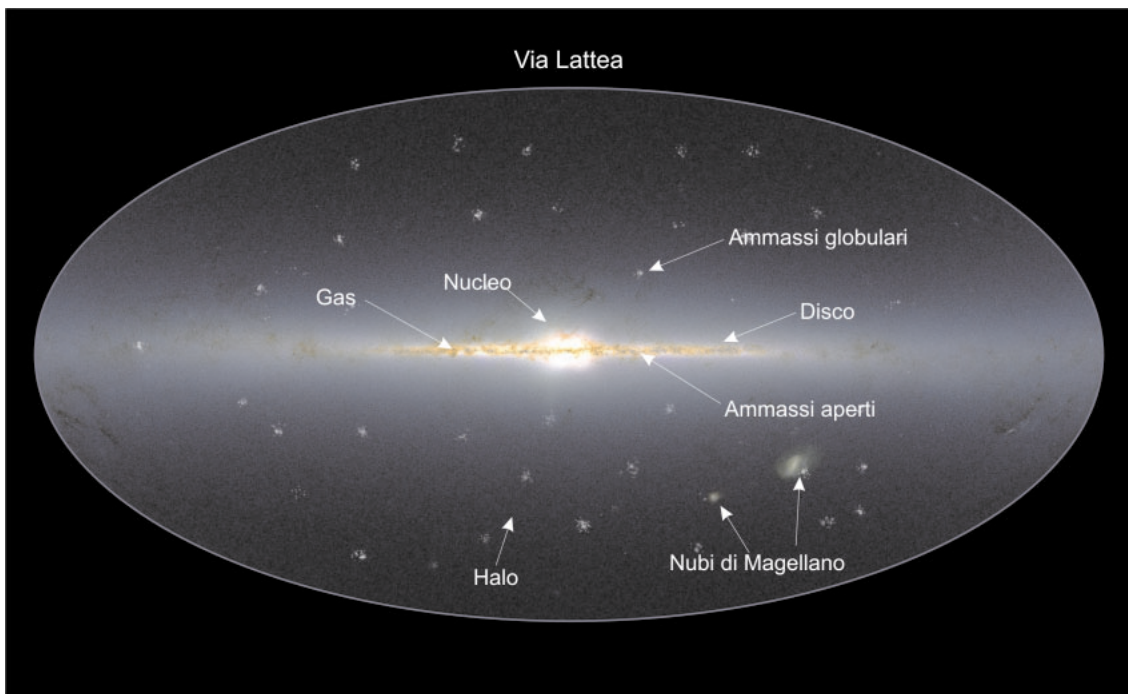
**Figura 3: Le Pleiadi (Messier 45) nella costellazione del Toro**

Questo è uno degli ammassi stellari più famosi nel cielo. Le Pleiadi possono essere viste ad occhio nudo anche da città con molto inquinamento luminoso. È uno degli ammassi aperti più luminosi e vicini. L'ammasso delle Pleiadi contiene più di 3000 stelle, è distante circa 400 anni luce ed il suo diametro è di soli 13 anni luce (cortesia di Bruno Stampfer e Rainer Eisendle).

### Gli ammassi globulari: le strutture più vecchie della Via Lattea

Alcune centinaia di ammassi compatti e sferici detti ammassi globulari si trovano nel disco e nell'alone della Via Lattea e sono legati gravitazionalmente alla nostra galassia.

Ogni ammasso globulare consiste in un gruppo sferico di fino ad un milione di stelle ed ha tipicamente un diametro di 100 anni luce. La maggior parte degli ammassi globulari è molto



**Figura 4: La Via Lattea**

Questa illustrazione dà una visione di insieme della Via Lattea con le differenti componenti di questo complicato sistema di stelle, gas e polveri. Il piano del disco giace sulla linea centrale orizzontale. Gli ammassi globulari sono distribuiti in un alone sferico attorno al centro galattico. Si pensa che questa distribuzione sia dovuta al fatto che questi ammassi di stelle si sono formati presto nella storia della Galassia.



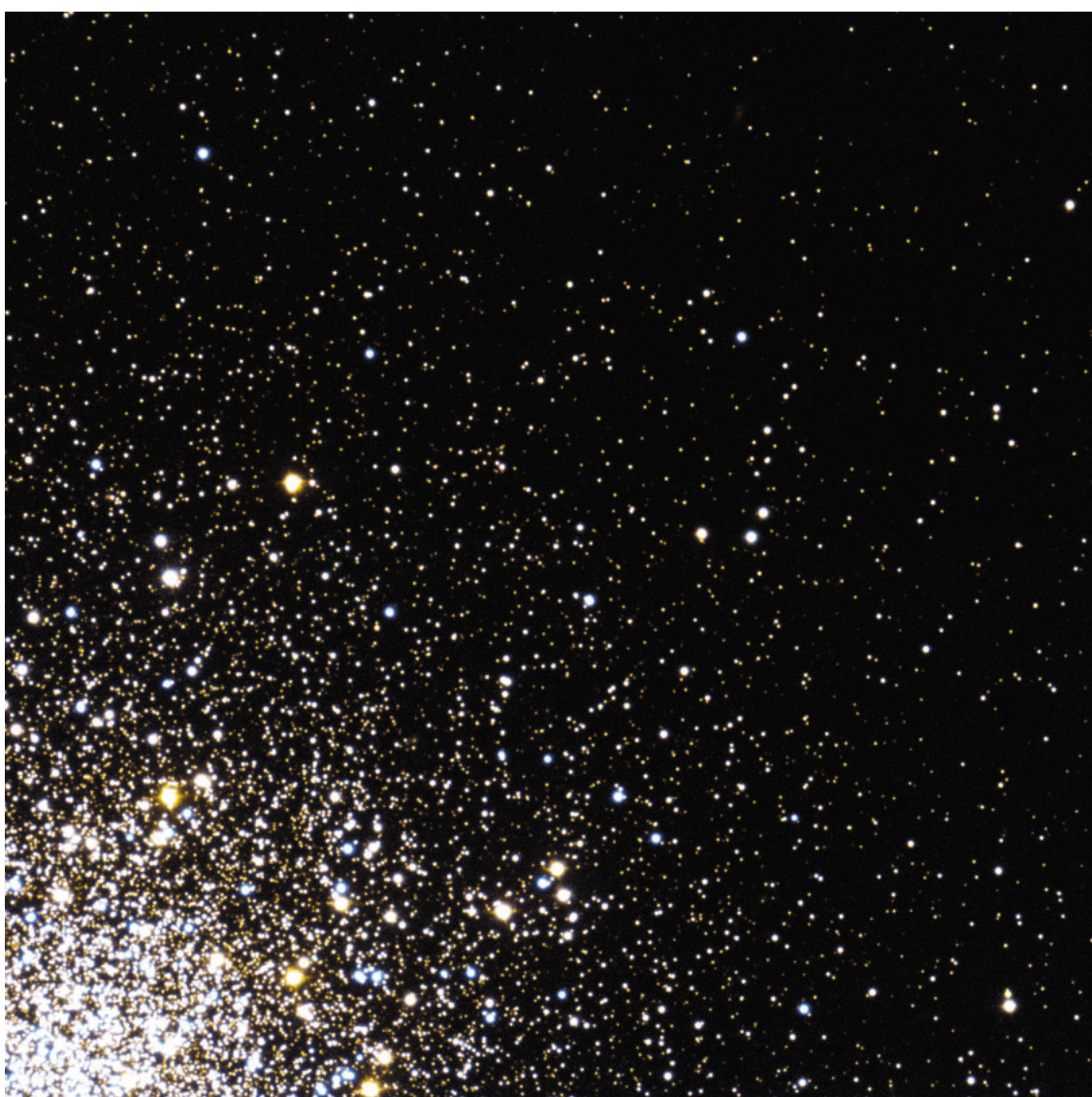
## Introduzione

vecchia e probabilmente precede la formazione della galassia, che ha avuto luogo 12 miliardi di anni fa, quando la maggior parte del materiale protogalattico si è depositato nel disco.

Molti ammassi globulari sono stati distrutti probabilmente negli ultimi miliardi di anni a causa di collisioni ed interazioni fra loro o con la Via Lattea. Gli ammassi globulari sopravvissuti sono più vecchi di qualunque altro tipo di struttura nella Via Lattea.

Gli studi compiuti sugli ammassi globulari rappresentano una parte importante della ricerca astrofisica della comunità scientifica internazionale.

Questi ammassi di stelle sono significativi non solo come "banchi di prova" per le teorie sulla struttura ed evoluzione stellare, ma anche perché sono tra i pochi oggetti nella Galassia per i quali possa essere determinata l'età con relativa precisione. A causa della loro grande longevità forniscono un importante limite inferiore per



**Figura 5: La regione più esterna dell'ammasso globulare M12**

Quest'immagine a due colori è stata creata dalle osservazioni fatte con filtri blu (B) e verdi (V) del Very Large Telescope (VLT) dell'ESO. In quest'immagine composta l'immagine B appare in blu e quella V in rosso. Alcune di queste stelle sono chiaramente più luminose nell'immagine B (si vedono come stelle bluastre) mentre le altre appaiono più luminose nell'immagine V (si vedono come stelle giallastre).

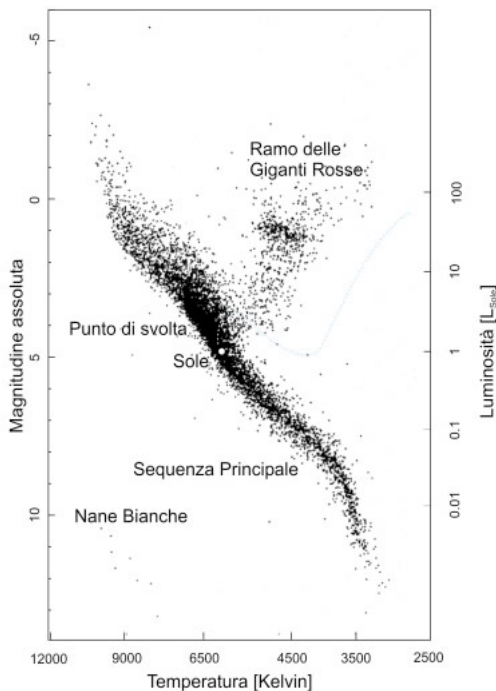




## Introduzione

l'età dell'Universo. La distribuzione delle loro età e la correlazione tra l'età di un ammasso e la sua abbondanza chimica rende questi sistemi uno strumento diagnostico inestimabile per i processi di formazione galattica.

Tutte le stelle appartenenti ad un ammasso globulare hanno la stessa storia e differiscono tra loro solo per la massa. Quindi gli ammassi globulari sono gli ambienti ideali per studiare l'evoluzione stellare. Negli esercizi seguenti potrete determinare alcune caratteristiche di un particolare ammasso globulare: Messier 12.



**Figura 6: Il diagramma Hertzsprung-Russell**

Il diagramma H-R mostra la correlazione esistente tra la temperatura superficiale e la luminosità della stella. Si noti la Sequenza Principale prominente e le regioni differenti dove dominano le giganti rosse e le nane bianche. La posizione del Sole è marcata come il "percorso" che farebbe una stella di una massa solare durante le diverse fasi della sua vita.

La posizione del Sole nel diagramma è determinata dalla sua temperatura superficiale di 5800 K e dalla sua magnitudine assoluta di +4,8.

## L'Ammasso Globulare Messier 12

L'ammasso globulare Messier 12 (o M12), chiamato anche NGC 6218, venne scoperto nel 1764 da Charles Messier e così divenne il dodicesimo oggetto nella lista di Messier. Come molti altri ammassi globulari, Messier lo descrisse come una "nebulosa senza stelle", una conseguenza dello scarso potere risolutivo dei suoi telescopi. William Herschel fu il primo a risolvere l'ammasso in singole stelle nel 1783.

M12 è situato nella costellazione di Ofiuko e può essere visto con un binocolo da zone con poco inquinamento luminoso. La magnitudine visuale dell'intero ammasso è di 6,7 (vedi la dispensa Strumenti per la definizione di magnitudine) e la stella più luminosa nell'ammasso ha una magnitudine visuale di 12.

Il catalogo NGC (New General Catalogue) è stato pubblicato nel 1888. Contiene ammassi globulari ed aperti, nebulose diffuse e planetarie, resti di supernova, galassie di tutti i tipi e persino qualche identificazione errata che non corrisponde ad alcun oggetto.

## Il diagramma di Hertzsprung-Russell

Un grafico che mostra la luminosità  $L$  (o la magnitudine assoluta  $M$ ) in relazione alla temperatura superficiale  $T$  delle stelle è chiamato un diagramma di Hertzsprung-Russell (diagramma H-R). La figura 6 mostra un esempio generale che è stato costruito dalle osservazioni di stelle nelle vicinanze di ammassi di cui si conoscevano le distanze (grazie alle misurazioni di HIPPARCOS). La temperatura superficiale,  $T$ , di una stella può essere dedotta dai valori misurati dei suoi colori ( $m_B - m_V$ ) (vedi la dispensa Strumenti).

Appare chiaro, guardando il diagramma H-R, come le misurazioni ( $L, T$ ) compiute su stelle differenti formino uno schema caratteristico quando sono rappresentate in un diagramma cartesiano. Le stelle sono concentrate in aree specifiche (segnate nella figura). Il diagramma H-R contiene la chiave di lettura per capire come evolvono le stelle nel tempo. Stelle differenti si muoveranno — in relazione alla loro massa — sul diagramma lungo specifici "percorsi".





## Introduzione

### Evoluzione stellare nel diagramma H-R

Le stelle spendono la maggior parte della loro vita sulla Sequenza Principale, bruciando idrogeno lentamente in uno stato di equilibrio stabile. Per questo motivo la maggior parte delle stelle che vengono osservate si situano sulla Sequenza Principale, approssimativamente una linea retta che va dal settore in alto a sinistra al settore in basso a destra nel diagramma. Quando l'idrogeno che alimenta il nucleo diminuisce, il suo bruciamento non è più possibile. Così termina la fase di vita della sequenza principale di una stella e l'equilibrio tra pressione del gas e contrazione gravitazionale nel nucleo non dura ancora a lungo. La fusione dell'idrogeno è ora confinata non in un guscio esterno al nucleo mentre questo inizia a collassare. Poiché il nucleo si contrae la pressione e la temperatura centrale aumentano, così i nuclei di elio presenti nel nucleo iniziano a fondere e a formare elementi più pesanti. Questo ciclo può essere ripetuto usando progressivamente elementi più pesanti quando elementi più leggeri si esauriscono nel nucleo. Durante questa fase la stella appare come una gigante rossa. Questo tipo di stella appare sul diagramma H-R fuori dalla sequenza principale in alto a

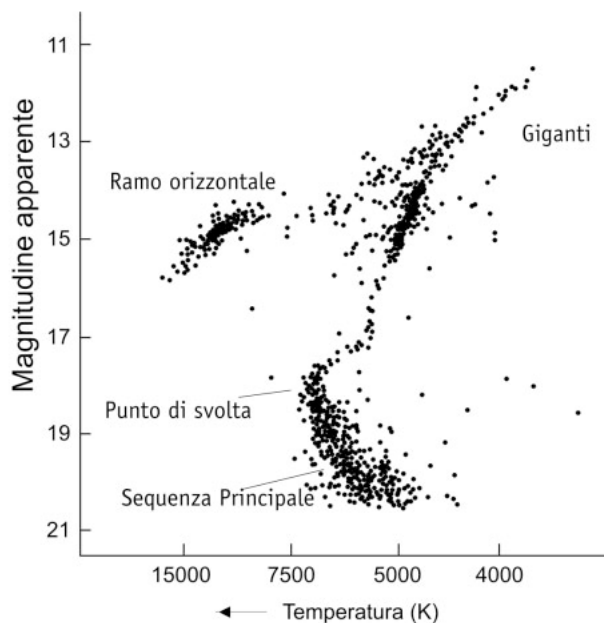
destra. La temperatura più alta nel nucleo provoca l'espansione del guscio esterno della stella e quindi l'abbassamento della temperatura superficiale. L'intera stella diviene molto grande e, a causa della temperatura superficiale più bassa, emette principalmente radiazioni di lunghezza d'onda maggiore apparendo quindi di colore rosso.

Nonostante la loro minor temperatura superficiale  $T$ , tutte le giganti rosse hanno una grande luminosità,  $L$ , per il loro raggio enorme,  $R$ . Il risultato della legge sulla radiazione di Stefan-Boltzmann per la radiazione emessa da un corpo nero è:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann. I valori tipici per una gigante rossa sono  $R \sim 10^2 R_{\text{Sole}}$ ,  $T \sim (3..4)10^3 \text{ K}$ , così  $L$  è circa  $10^3 L_{\text{Sole}}$ .

Quando il processo avanzato di fusione non può più essere sostenuto nel nucleo stellare, il nucleo collassa ancora. ancora una volta la temperatura del nucleo aumenta e adesso il guscio esterno della stella viene espulso. Una così detta nebulosa planetaria si è formata dai residui del guscio esterno della stella (vedi la dispensa



**Figura 7: Tipico diagramma di Hertzsprung-Russell di un ammasso globulare**

Dopo miliardi di anni di evoluzione il diagramma H-R di un ammasso globulare mostra una Sequenza Principale (Main Sequence, MS) corta nel settore in basso a destra. Un'area chiamata il Ramo delle Giganti Rosse inizia dalla MS e giunge fino al settore in alto a destra. Il punto dove MS incrocia e si collega con il Ramo delle Giganti Rosse è chiamato punto di svolta (turn-off point).



## Introduzione

dell'esercizio n° 3). Il nucleo ulteriormente collassato è molto caldo (appare bianco) e la stella è molto piccola. La stella per questo è chiamata nana bianca e rappresenta lo stadio finale di una stella simile al Sole.

Per Trovare una relazione approssimata tra luminosità  $L$  e temperatura superficiale  $T$  per tutte le stelle della sequenza principale, diamo un'occhiata al diagramma H-R (fig.6). La linea approssimata della Sequenza Principale si estende per circa un fattore dieci in temperatura: ( $3 \times 10^3 \dots 3 \times 10^4$ ) K. L'intervallo di luminosità si estende per circa sei decadi: ( $10^{-2} \dots 10^4$ )  $L_{\text{Sole}}$ . Possiamo quindi stimare una relazione approssimata:  $L \propto T^6$  per le stelle della sequenza principale.

Diamo alcuni esempi:

- Una stella con una massa elevata sulla sequenza principale con una temperatura superficiale di circa  $T_{\text{stella}} = 1,0 \times 10^4$  K ha una luminosità di circa  $L_{\text{stella}} = (10/5,8)^6 \cdot L_{\text{Sole}}$ , ovvero circa 26 volte la luminosità del Sole. (La luminosità del Sole ha un valore standard di 1 nella scala delle luminosità).
- Una stella di piccola massa con  $T_{\text{star}} = 3,5 \times 10^3$  K ha una luminosità di circa il 5% della luminosità del Sole.

### L'indice di colore B-V: un indicatore della temperatura superficiale

Tutte le informazioni che possiamo estrarre dalle stelle sono contenute nella radiazione che ci arriva da loro. Come spiegato nella dispensa Strumenti Astronomici, filtri differenti e indici di colore differenti possono essere utilizzati per misurare la luminosità di una stella. In questo esercizio useremo un'immagine B ed un'immagine V. Nelle vostre analisi di queste immagini troverete le magnitudini apparenti  $m_B$  ed  $m_V$  di un campione di stelle dell'ammasso. Potrete quindi calcolare i valori di  $m_B$  ed  $m_V$  (l'indice di colore B-V). Infine potrete determinare la temperatura delle stelle (vedi la dispensa Strumenti).

### Il diagramma H-R è la chiave di un ammasso

Un ammasso è un gruppo di stelle. La vita di un ammasso è determinata dalle vite dei differenti tipi di stelle al suo interno.

Negli ammassi globulari le osservazioni hanno dimostrato che in essi rimane molto poco gas e polvere, cosicché nuove stelle nascono raramente in questo tipo di ammassi.

La maggior parte delle stelle di piccola massa sono disposte sulla Sequenza Principale. Questo perché le stelle di piccola massa consumano la loro energia molto lentamente. Bruciano le loro riserve di idrogeno tranquillamente e continuano a farlo per miliardi di anni. Possono quindi rimanere sulla Sequenza Principale per molto tempo.

Al contrario, le stelle più massicce nell'ammasso hanno già convertito l'idrogeno nei loro nuclei e sono divenute giganti rosse. Tutto questo è accaduto molto tempo fa, così oggi nessuna stella calda con una grande massa rimane sulla Sequenza Principale (vedi fig. 7). Queste stelle sono localizzate nell'area diagonale che inizia dalla Sequenza Principale, giunge in direzione del settore in alto a destra del diagramma conosciuto come il Ramo delle Giganti Rosse.

Il punto dove la Sequenza Principale ed il Ramo delle Giganti Rosse si incontrano è detto punto di svolta ed è una tappa importante nella vita di un ammasso. Nell'esercizio seguente misurerete le coordinate di questo punto nel vostro diagramma e determinerete l'età di M12.



## Quesiti

### Osservazioni, riduzione dati ed analisi.

L'ammasso globulare M12 è stato osservato il 18 giugno del 1999 usando lo strumento FORS1 su ANTU (UT1) del VLT all'osservatorio di Paranal (Cile) dell'ESO. Per questo esercizio abbiamo scelto alcune immagini della parte più esterna dell'ammasso dove ci sono relativamente meno stelle. Le esposizioni sono state prese con un filtro blu (B-band) e con un filtro verde (V-band, V sta per Visual).

Osservare e ridurre poi i dati (il processo che rimuove gli artefatti strumentali e di altro genere dai dati) è un lavoro che richiede grandi telescopi e programmi per computer molto sofisticati. La parte veramente interessante per gli astronomi — l'analisi dei dati — inizia successivamente.

Per questo esercizio i dati sono stati già raccolti e ridotti. Abbiamo semplificato un po' l'analisi selezionando un gruppo di stelle che può essere considerato rappresentativo della popolazione dell'intero ammasso.

### Accenni sull'analisi delle immagini

Per analizzare le immagini, le magnitudini B e V di ogni stella devono essere misurate accuratamente. Gli errori compiuti nella prima parte di quest'esercizio influenzeranno in modo rilevante il risultato finale.

Le 45 stelle sono suddivise in sei sezioni:

- 1 Cinque stelle nos. da 1 a 5 — Stelle di "esercitazione"
- 2 Quattro stelle nos. da 6 a 9 — Stelle di "calibrazione"
- 3-6 Le rimanenti stelle sono suddivise in quattro sezioni (A, B, C e D) da assegnare a gruppi di studenti diversi in modo da ridurre il lavoro e darvi tempo sufficiente per compiere misurazioni precise.

Per rendere le vostre misurazioni il più accurate possibile, vi suggeriamo il procedimento seguente:

- Ponete il regolo (vedi Figs. 8–9 in basso) sulla stella e spostatelo avanti e indietro. Trovate dove i valori del diametro sono appena troppo alti e troppo bassi. Poi ponete il regolo a metà tra questi valori e leggete la vostra misurazione. Ripetete questo procedimento più volte e prendete la media dei valori ottenuti.
- Persone differenti in ogni gruppo misurino il valore di ogni stella almeno due volte e prendete la media dei valori ottenuti.
- Tra una misurazione e un'altra, ripetete le misurazioni delle cinque stelle di "esercitazione" per essere sicuri di continuare a compiere misurazioni coerenti tra stella e stella.

### Quesito 1 allenamento sulla B-Band

Per le stelle di "esercitazione" (n. da 1 a 5), le magnitudini sono riportate nella tabella (Fig. 10).

- ? Usatele per imparare ad utilizzare il regolo per compiere misurazioni sull'immagine B (Fig. 8) e comparatele con quelle nella tabella. Continuate ad esercitarvi finché siete sicuri di ottenere gli stessi risultati.

### Quesito 2 calibrazione della B-Band

Ogni gruppo misuri le stelle di "calibrazione" (n. da 6 a 9) indipendentemente. Le misurazioni possono essere poi calibrate con i risultati degli altri gruppi.

- ? Misurate le stelle di "calibrazione" dell'immagine B (Fig. 8), aggiungete questi numeri nella tabella e paragonate i vostri risultati con quelli degli altri gruppi. Se ci sono differenze, ricontrollate i valori di queste stelle e quelli delle stelle di "esercitazione".

### Quesito 3 la magnitudine sulla B-band

- ? Misurate la magnitudine blu ( $m_B$ ) di ogni stella numerata nell'area alla quale siete sta-







## Quesiti

ti assegnati (A, B, C or D) in Fig. 8 e aggiungete le misurazioni alla tabella.

### Quesito 4 allenamento sulla V-Band

- ? Allenatevi facendo misurazioni sull'immagine V (Fig. 9) e comparandole con quelle date dalla tabella. Siate sicuri di ottenere gli stessi risultati.

### Quesito 5 calibrazione della V-band

- ? Misurate le stelle di calibrazione nell'immagine V (Fig. 9), completate la tabella e comparate i vostri risultati con quelli degli altri gruppi. Se ci sono differenze, ricontrollate i valori di queste stelle e quelli delle stelle di "esercitazione".

### Quesito 6 la magnitudine sulla V-Band

- ? Usate la Fig. 9 per determinare la magnitudine visuale ( $m_V$ ) di ogni stella numerata nell'area alla quale siete stati assegnati (A, B, C or D). Aggiungete questi valori nella tabella.

### Quesito 7 Indice di Colore

- ? Calcolate i valori di  $m_B - m_V$  per ogni stella ed aggiungete i risultati nella tabella.

### Quesito 8 Temperatura Superficiale

- ? Usate il diagramma, Fig. 3 negli Strumenti astronomici, per convertire i valori di  $m_B - m_V$  nei valori della temperatura superficiale, T, per le stelle e aggiungete i valori nella tabella.

### Quesito 9 Il Diagramma H-R

La sequenza principale dell'ammasso delle Hyadi è stata "plottata" nel diagramma come riferimento. Notate come la magnitudine assoluta,  $M_V$ , sia stata misurata per le Hyadi

- ? Traccia sullo stesso diagramma le magnitudini apparenti ( $m_V$ ) in funzione della temperatura superficiale (T) per le stelle di M12.

### Quesito 10 la Sequenza Principale appropriata: il modulo di distanza

Per le stelle di M12 ora conosciamo ( $m_V$ , T), e dalle misurazioni di riferimento delle Hyadi conosciamo ( $M_V$ , T) per una Sequenza Principale standard. Il modulo di distanza (vedi gli Strumenti) di M12 è lo spostamento sull'asse verticale tra le due sequenze principali che avete tracciato.

- ? Calcolate il modulo di distanza  $m_V - M_V$  per M12.

### Quesito 11 Distanza di M12

- ? Usate il modulo di distanza e l'equazione della distanza (vedi, se necessario, gli Strumenti Astronomici) per determinare la distanza D di M12.

### Quesito 12 Correzione dell'estinzione

La distanza che avete appena trovato non è molto corretta visto che la nostra Galassia contiene una gran quantità di gas e polveri che assorbono la luce delle stelle che si trovano dietro (o immerse in essa). Le polveri ed i gas, inoltre, provocano un arrossamento del colore delle luce stellare dovuto ad un processo conosciuto come diffusione di Rayleigh (che è più efficace per lunghezze d'onda corte, cioè per la luce blu). L'effetto congiunto di questi due processi prende il nome di "estinzione interstellare"

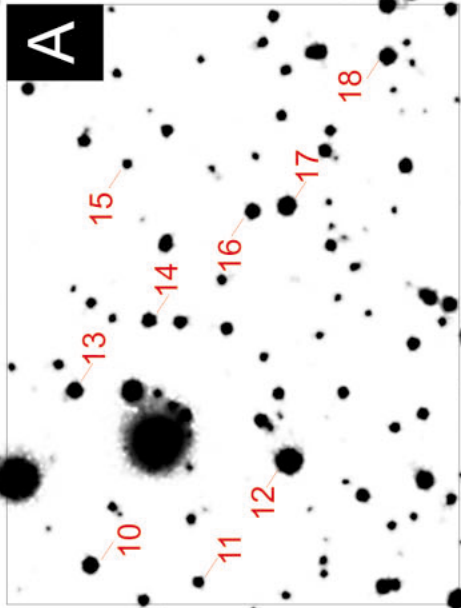
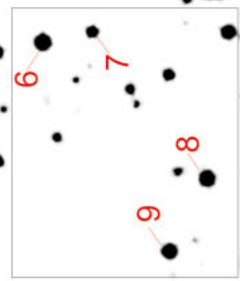
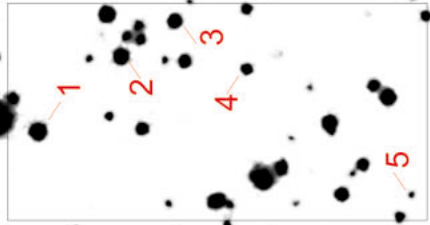
Vogliamo che voi correggiate le misure per l'effetto dell'estinzione che assorbe la luce (facendo diventare la magnitudine delle stelle osservate troppo alta e di conseguenza anche le distanze calcolate)<sup>1</sup>. Il modulo di distanza corretto è:

$$m - M - A,$$

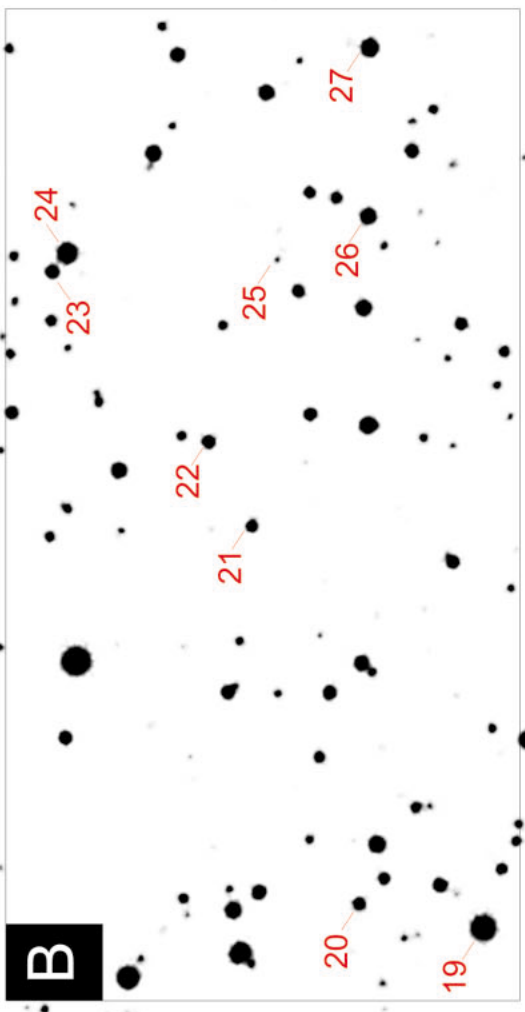
dove A è il fattore di correzione dell'estinzione. L'equazione della distanza cambia leggermente grazie a a questo effetto:

<sup>1</sup>Come detto questo rappresenta una semplificazione in quanto esiste una piccola influenza dell'estinzione sul termine B-V (ovvero sulla temperatura).

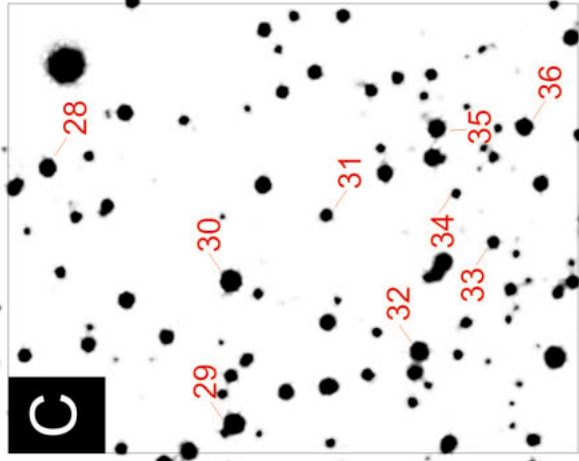
**B**



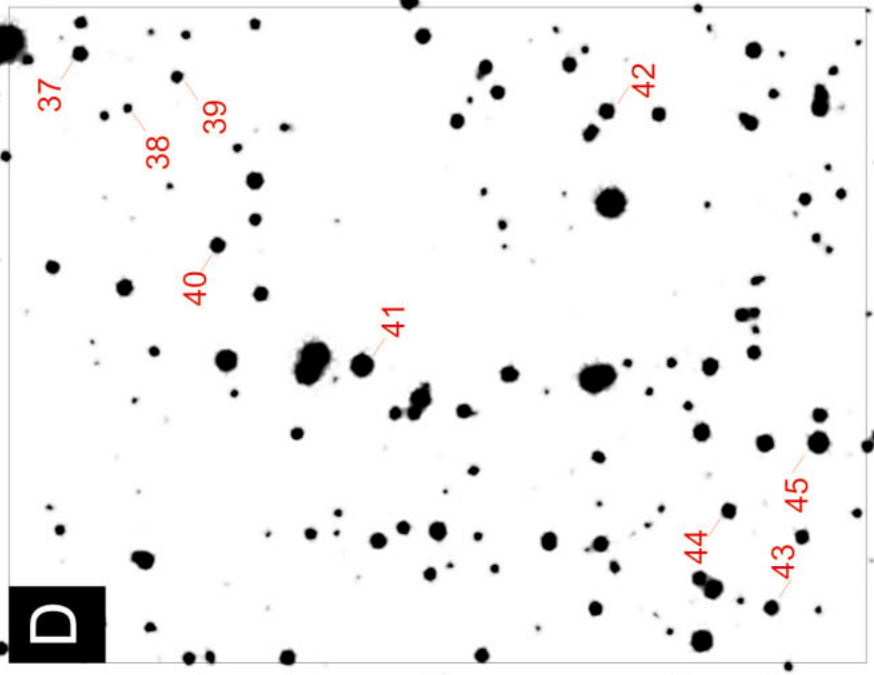
**B**



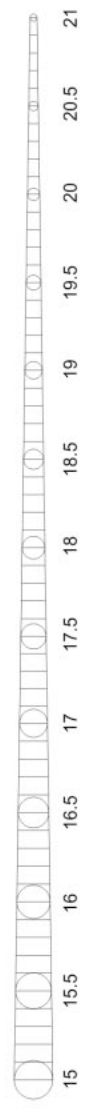
**C**



**D**

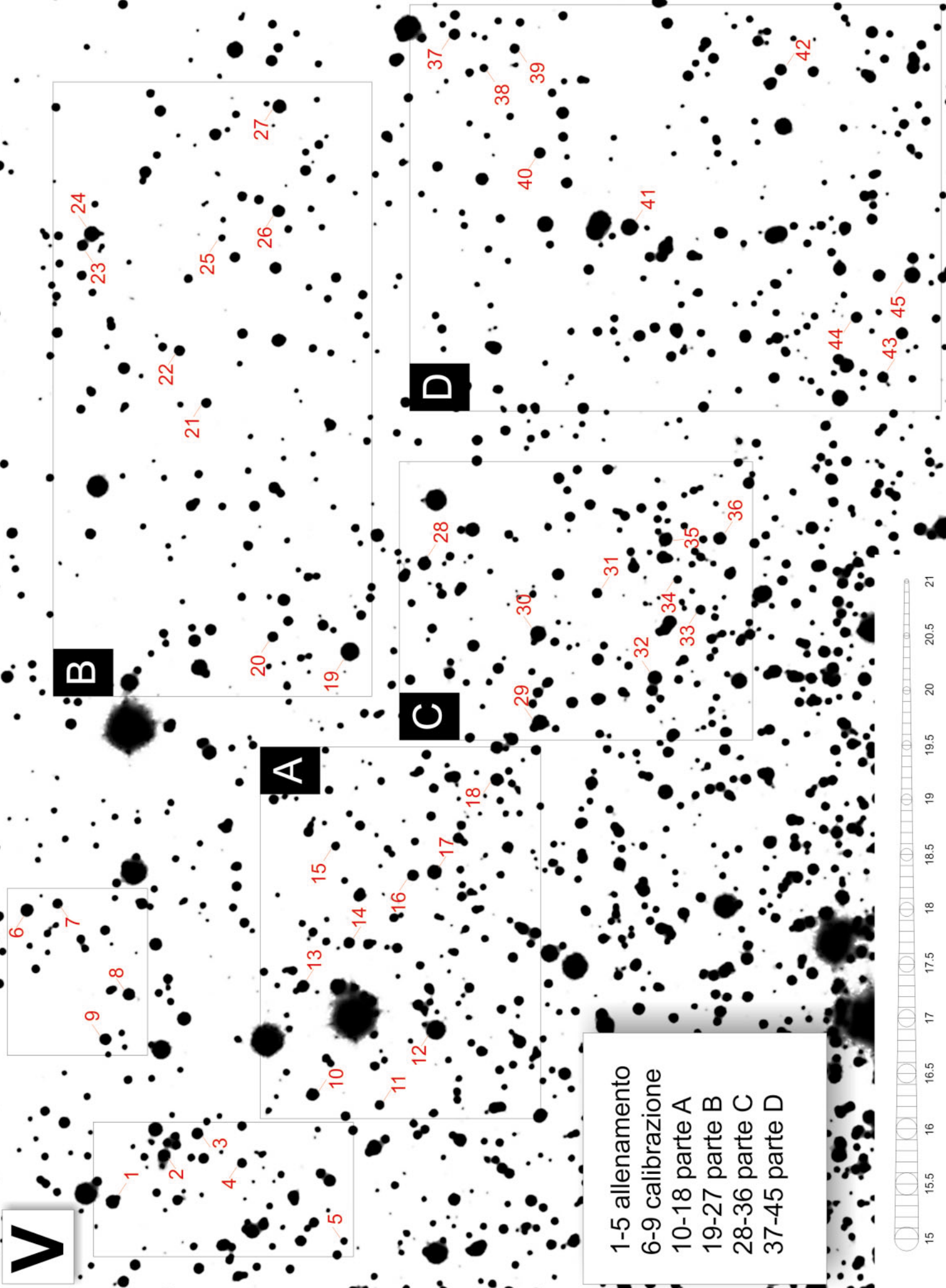


1-5 allenamento  
6-9 calibrazione  
10-18 parte A  
19-27 parte B  
28-36 parte C  
37-45 parte D



# V

Figura 9: immagine V-Ban



- 1-5 allenamento
- 6-9 calibrazione
- 10-18 parte A
- 19-27 parte B
- 28-36 parte C
- 37-45 parte D





## Quesiti

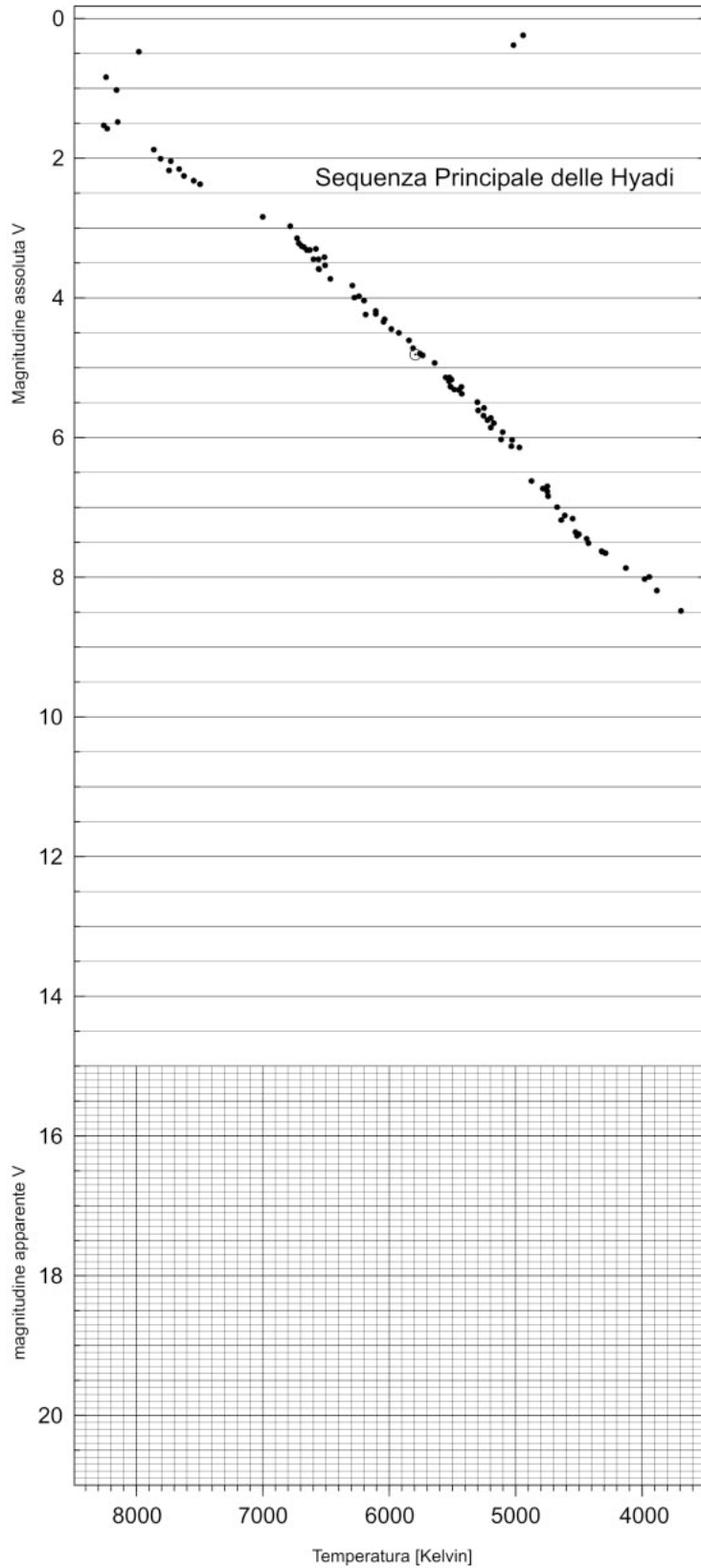
Figura 10: Tabella dei valori

Star	Valori degli scienziati				Misure/calcoli di ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18,82	17,98	0,84	5250	18,70	17,90	0,8	5403
2	19,02	18,31	0,71	5744	19,00	18,20	0,8	5403
3	19,32	18,65	0,67	5864	19,30	18,70	0,6	6122
4	19,96	19,25	0,71	5699	19,90	19,10	0,8	5403
5	21,05	20,21	0,84	5265	21,00	20,10	0,9	5076
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								



## Quesiti

Quesiti



**Figura 11: Diagramma H-R**  
I risultati delle misurazioni nei quesiti 1-9 sono stati tracciati qui.

La Sequenza Principale di calibrazione per le Hyadi è stata ottenuta con il satellite HIPPARCOS dell'ESA (da de Bruijne et al., 2001).



## Quesiti

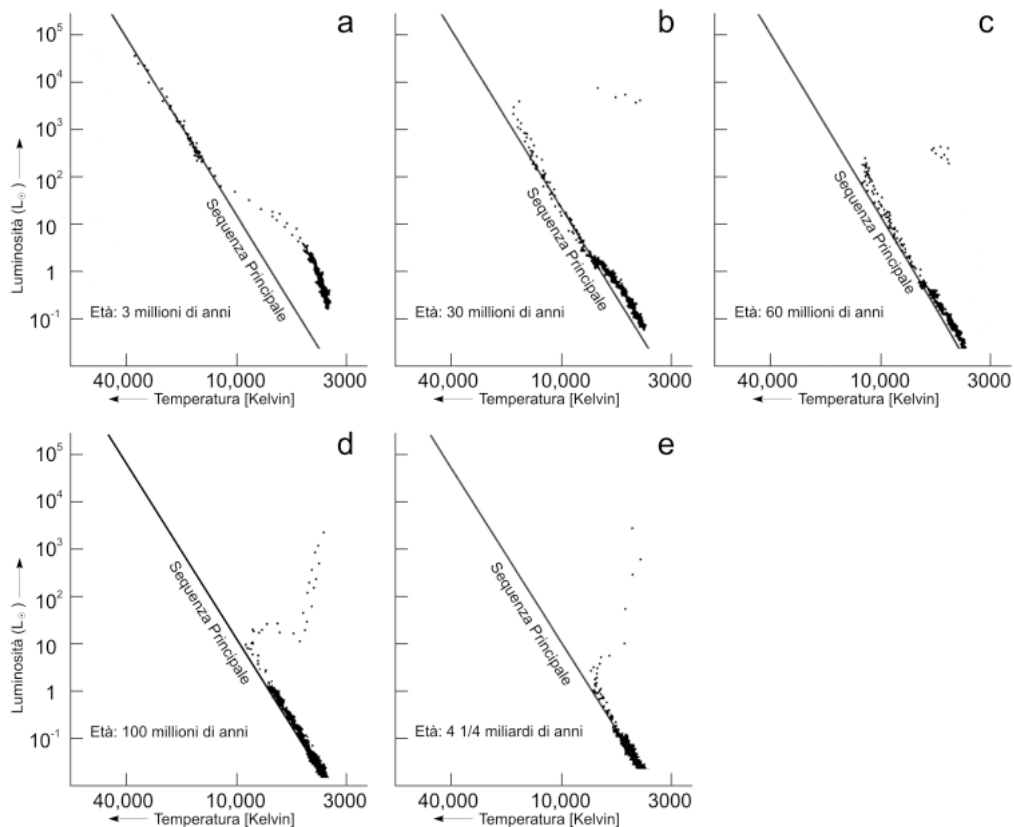
$$D=10^{(m-M-A+5)/5}$$

Per M12, il valore di A è dato da Harris ed al. ed è di 0.57 magnitudini (nella V-Band, che si usa per misurare  $m-M$ ).

- ? Calcolate la nuova distanza che è stata corretta per l'estinzione interstellare.

- ? La distanza corretta è molto differente rispetto a quella errata trovata nel quesito 11?

- ? questa correzione (una delle molte che gli astronomi usano nel loro lavoro quotidiano) sulle nostre idee generali sulla dimensione dell'Universo



**Figura 12: L'evoluzione teorica di un Ammasso Globulare**

Questa serie di diagrammi H-R è stata creata a partire dalle equazioni che descrivono l'evoluzione delle stelle nel tempo. Nel pannello 12a le stelle più massicce e luminose ( $T > 10\,000\text{K}$ ) sono già sulla sequenza principale e quelle più piccole sono ancora all'inizio del processo di bruciamento dell'idrogeno (bassa temperatura, bassa luminosità)

In 12b le stelle più massicce hanno consumato la maggior parte dell'idrogeno del loro nucleo e stanno bruciando la riserva nel guscio esterno. La loro luminosità è diminuita e sono divenute più rosse, si sono spostate dalla Sequenza Principale, il ramo delle Giganti Rosse ha fatto la sua apparizione e il punto di svolta è già visibile. Non ci sono più stelle nella parte alta della Sequenza Principale.

In 12c-e la parte superiore della Sequenza Principale è praticamente deserta, mentre il ramo delle Giganti Rosse è più densamente popolato. La loro luminosità è diminuita e sono divenute più rosse, si sono spostate dalla Sequenza Principale, il ramo delle Giganti Rosse ha fatto la sua apparizione e il punto di svolta è già visibile. Non ci sono più stelle nella parte alta della Sequenza Principale. La parte inferiore della Sequenza Principale mostra una popolazione numerosa di stelle di massa simile al Sole, con temperature superficiali comprese tra 4000 e 8000 K. Queste stelle rimarranno stabilmente in questa fase per miliardi di anni (adattato da R. Kippenhahn).





## Quesiti

### Quesito 13

Gli scienziati hanno calcolato precedentemente una distanza dell'ammasso di  $D = 4900$  parsecs dalla versione originale di un campione più completo di dati. Se le vostre risposte differiscono meno del 20% da questo valore, avete compiuto delle misurazioni molto accurate, dei calcoli meticolosi e potete essere molto soddisfatti del vostro lavoro!

Se i vostri risultati danno un errore più grande, possono esserci ragioni differenti. Alcune possibilità sono:

- Le vostre misurazioni della magnitudini sono sufficientemente precise?
- Potete pensare a metodi differenti e più raffinati per ridurre i dati e riprodurre la Sequenza Principale?
- Pensate ad altre soluzioni per migliorare i vostri risultati.

### L'evoluzione degli ammassi globulari

La forma della Sequenza Principale è praticamente la stessa per tutti gli ammassi globulari, qualunque sia la loro età. Il metodo di ricostruzione della Sequenza Principale utilizzato nell'esercizio su M12 può essere usato per altri ammassi di età diversa e calcolarne la distanza nello stesso modo.

I diagrammi H-R di ammassi diversi mostrano però che la parte superiore della Sequenza Principale cambia forma a seconda della loro età (vedi Fig. 12). Negli ammassi più vecchi le stelle più luminose dell'ammasso si sono evolute e si sono spostate nel ramo delle Giganti Rosse (Red Giant Branch). Conseguentemente, in funzione dell'età, la parte superiore della Sequenza Principale si accorcia e il punto di connessione tra la Sequenza Principale e il ramo delle Giganti

Rosse (punto di svolta) si sposta verso il basso, come una candela che si accorci bruciando. Ne consegue che la posizione del punto di svolta ci fornisce un'indicazione importante per la stima dell'età dell'ammasso.

### Quesito 14 Il punto di svolta: dalle magnitudini alla luminosità

- ?
- Determinate la magnitudine apparente di una stella al punto di svolta per M12. Calcolate la luminosità della stella in luminosità solari utilizzando la formula contenuta negli Strumenti Astronomici.

#### Il punto di svolta: dalla luminosità alla massa

Una volta nota la luminosità, possiamo stimare la massa della stella utilizzando la relazione "massa-luminosità". Per le stelle della Sequenza Principale si è osservata la seguente correlazione tra la massa e la luminosità (con masse e luminosità espresse in unità solari):

$$(L_{\text{Sole}} = 4 \times 10^{26} \text{ W}, M_{\text{Sole}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}):$$

$$L = M^{3,8}$$

### Quesito 15

- ?
- Convertite la luminosità derivata nel Quesito 14 in una massa relativa alla massa del Sole.



## Quesiti aggiuntivi



**Figura 13: Immagine d'insieme dell'ammasso globulare**  
Questa immagine mostra M12. Il lato della figura corrisponde a 0,25 gradi (dalla Digitized Sky Survey).

### Il punto di svolta: dalla massa all'età

Il tempo  $t$  trascorso dalla stella sulla Sequenza Principale dipende dalla sua luminosità e dalla sua massa.

- Una stella con alta luminosità brucia più idrogeno per secondo che una stella di bassa luminosità. Quindi la massa di una stella con alta luminosità diminuisce più rapidamente di quella di una stella con minore luminosità e, più bassa è la luminosità, più a lungo la stella può bruciare idrogeno.

- Per due stelle con masse differenti, la stella più massiccia ha più combustibile da bruciare. Quindi la vita di una stella è direttamente proporzionale alla sua massa e inversamente proporzionale alla sua luminosità.

Usando la relazione massa-luminosità, troviamo il tempo di vita in funzione della massa:

$$t \propto M^{-2,8}$$



## Quesiti aggiuntivi

### Quesito 16

- ?
- Utilizzando il valore della massa ricavato nel Quesito 15, stimate l'età dell'ammasso globale relativamente all'età del Sol, quando lascerà la Sequenza Principale,  $8,2 \times 10^9$  anni.

In conclusione, l'intero Universo deve essere più vecchio dell'età trovata.

### Stima del diametro

Per stimare il diametro lineare di M12, ne dobbiamo misurare il diametro angolare. In Fig. 13 si vede come la densità di stelle diminuisca dal centro verso la periferia dell'ammasso. Discutete un criterio per stabilire quali stelle appartengono alla regione esterna dell'ammasso e quali no.

### Quesito 17

- ?
- Misurate il diametro angolare,  $a$ , di M12 in centimetri e convertite la misura in radianti (vedi la dispensa Strumenti Matematici).
  - Calcolate poi il diametro,  $d$  (vedi l'approssimazione per piccoli angoli negli Strumenti Matematici).

Come distanza usate il valore che avete stimato voi stessi oppure quello di  $D = 4900$  parsecs trovato dagli astronomi.

### Stima del numero totale di stelle

Per stimare il numero totale di stelle,  $N$ , nell'ammasso dobbiamo fare alcune ipotesi:

1. L'ammasso è costituito da una miscela di stelle di tutti i tipi, ma noi assumeremo che la stella media sia una stella simile al Sole, ovvero la magnitudine di una singola stella sia circa uguale a quella del Sole.
2. Assumiamo anche che ogni stella contribuisca con la sua intera luminosità alla luminosità totale dell'ammasso. In realtà, polvere e altre stelle possono oscurare parzialmente o totalmente qualche stella.

### Quesito 18

La magnitudine assoluta di M12 è:

$$M_{cl} = -7,32$$

La luminosità totale dell'ammasso in luminosità solari è calcolata come:

$$L_{cl}/L_{Sole} = 2,512^{(M_{Sole}-M_{cl})}$$

Ricorda:  $M_{sun} = 4,8$ .

Dato che  $L_{cl} \approx N \cdot L_{Sole}$  e usando l'ipotesi 1, il valore di  $L_{cl}/L_{Sole}$  è uguale a  $N$ . Tenendo conto dell'ipotesi 2, ci dobbiamo aspettare che il valore reale di  $N$  sia un po' più alto di  $L_{cl}/L_{Sole}$ .



## Altre letture

### Pubblicazioni Scientifiche

- de Bruijne, J.H.J., Hoogerneerf, R., and de Zeeuw, P.T., 2001, *A&A*, 367, 111–147: *A Hipparcos study of the Hyades open cluster.*
- Cragin, M., Lucyk, J., Rappaport, B.: *The Deep Sky Field Guide to Uranometria 2000.0*, 1993-96, Willmann-Bell, Inc.
- Harris, W.E.: *Catalog of parameters for Milky Way Globular Clusters*, Revised: June 1999 (<http://physun.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>)
- Rosenberg, A., Saviane, I., Piotto, G., Aparicio, A., 1999, *AJ*, 118, 2306–2320: *Galactic Globular Cluster Relative Ages*
- Chaboyer, B., Demarque, P., Sarajedini, A., 1996, *ApJ*, 459–558: *Globular Cluster Ages and the Formation of the Galactic Halo*

Potete trovare ulteriori informazioni sull'estinzione interstellare nei siti:  
<http://www.astro.virginia.edu/class/hawley/astr124/ism.html>  
<http://tesla.phys.unm.edu/a111labs/cepheids/mags.html#Red>

Provate anche:  
<http://www.astroex.org/>







## Colophon



**EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY**  
**Education and Public Relations Service**

**Gli esercizi di astronomia a cura di ESA/ESO**  
**Esercizio 4: Misura della distanza e dell'età di un**  
**Ammasso Globulare 2ª edizione (23.05.2002)**

Realizzato da:

Hubble European Space Agency Information Centre  
European Southern Observatory:  
<http://www.astroex.org>  
(Versioni in formato pdf di questo materiale e links  
relativi sono disponibili all'indirizzo sopra citato)

Indirizzo Postale:

European Southern Observatory  
Karl-Schwarzschild-Str. 2  
D-85748 Garching bei München  
Germania

Telefono: +49 89 3200 6306 (or 3200 60)

Fax: +49 89 3200 64 80 (or 320 32 62)

E-mail: [info@astroex.org](mailto:info@astroex.org)

Testi di:

Arntraud Bacher, Jean-Marc Brauer, Rainer Gaitzsch,  
e Lars Lindberg Christensen

Grafica e layout:

Martin Kornmesser

Traduzione italiana:

Eugenio Benvenuti

Revisione:

Piero Benvenuti

Coordinazione:

Lars Lindberg Christensen e Richard West

Un caloroso ringraziamento a Jesper Sollerman per ridurre i dati, a Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, per commenti, e a Jos de Bruijne per averci messo a disposizione i suoi magnifici dati di Hipparcos. Vorremmo anche ringraziare le molte persone che hanno contribuito a migliorare la seconda versione dell'esercizio: Anne Vørnholt Olesen, Ole Hjort Rasmussen, Helle e Henrik Stub, Danimarca; Johann Penzl, Germania; Thibaut Plisson, USA; Marina Rejkuba and Manuela Zoccali, ESO.

Per l'edizione Italiana si ringraziano la Società Astronomica Italiana (SAIt), la sezione Calabria della SAIt e la Professoressa Angela Misiano (Liceo Scientifico "Leonardo da Vinci", Reggio Calabria) per il supporto.



## Guida per l'insegnante

### Sommario

In questo esercizio misuriamo le magnitudini blu ( $m_B$ ) e verdi (visuali,  $m_V$ ) di stelle selezionate nelle regioni esterne di un ammasso globulare fotografato dal VLT, convertiamo il colore ( $m_B, m_V$ ) in temperatura superficiale della stella ( $T$ ) e mettiamo in un grafico i valori di  $m_V$  in funzione di  $T$  (diagramma di Hertzsprung-Russell). La Sequenza Principale dell'ammasso, che si ricava dal diagramma, è paragonata con quella standard, calibrata per la distanza, del vicino ammasso delle Hyadi. La distanza dell'ammasso può essere calcolata paragonando le due sequenze e ricavandone il modulo di distanza. L'età dell'ammasso, che tra l'altro pone un limite inferiore all'età dell'Universo, può essere stimata dalla posizione del punto di svolta (turn-off) della sequenza Principale.

Questa guida per l'Insegnante contiene le soluzioni ai quesiti, con commenti e discussioni sulle approssimazioni e semplificazioni adottate, e considerazioni aggiuntive sull'evoluzione stellare. Lo scopo è quello di rendere l'esercizio più utile e di assistere l'Insegnante nella preparazione di un piano didattico personalizzato.

### Sulla vita delle stelle

Il "tempo di vita" di una stella è rappresentato dal periodo che essa spende sulla Sequenza Principale. Generalmente si utilizza il tempo di vita del Sole come unità di misura per il tempo di vita delle altre stelle.

Una proto-stella si forma dal mezzo interstellare. Tipicamente questo contiene il 74% di idrogeno, il 25% di elio e circa 1% di elementi più pesanti.

Quando la temperatura interna della protostella raggiunge alcuni milioni di gradi Kelvin, questa può iniziare a bruciare idrogeno e diventa una stella di Sequenza Principale.

Quattro atomi di idrogeno fondono per formare un atomo di elio. Dato che la massa di un atomo di elio è solo il 99,3% della somma delle masse dei quattro atomi di idrogeno, la massa residua (0,7%) viene convertita in energia. Per ogni Kg di materia stellare, 0,007 Kg vengono convertiti in energia. Dalla legge di Einstein ( $E=Mc^2$ ), possiamo calcolare l'energia trasformata come  $6,3 \times 10^{14}$  J/kg. ( $c$  è la velocità

della luce,  $3 \times 10^8$  m/s).

La luminosità del Sole è  $L_{\text{Sole}}=3,85 \times 10^{26}$  W ( $W = \text{J/s}$ ). Da questa possiamo calcolare la massa di idrogeno fusa per secondo:

$$\Delta M = 3,85 \times 10^{26} / (6,3 \times 10^{14}) = 6,11 \times 10^{11} \text{ kg/s}$$

La stella lascerà la Sequenza Principale quando circa l'11% della massa di idrogeno è stata convertita in elio, poiché in queste condizioni il nucleo centrale diviene instabile.

Dalla massa totale del Sole,  $M_{\text{sun}} = 2,0 \times 10^{30}$  kg, possiamo stimare la massa di idrogeno che può essere bruciata durante il tempo di vita della stella come:

$$0,11 \times 0,74 \times 2 \times 10^{30} = 1,6 \times 10^{29} \text{ kg.}$$

Dividendo questa massa per la perdita di massa per secondo, possiamo stimare vita totale del Sole sulla Sequenza Principale:

$$2,6 \times 10^{17} \text{ s} = 8,2 \times 10^9 \text{ y}, \quad 1 \text{ y} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 3,15 \times 10^7 \text{ s} \text{ (ovvero più di 8 miliardi di anni).}$$

Osservazioni del Sole indicano che la sua età attuale è di 4 miliardi di anni, quindi ci si aspetta che esso rimanga sulla Sequenza Principale per un periodo altrettanto lungo.

Conoscendo il tempo di vita del Sole, possiamo calcolare quello di ogni altra stella in funzione di questo.

Il tempo di vita di una stella dipende dalla sua massa. Possiamo semplificare un ragionamento abbastanza complesso con una formula approssimata, ma adeguata:

L'idrogeno disponibile alla stella come combustibile è proporzionale alla sua massa e  $t$  è inversamente proporzionale alla sua luminosità, quindi:  $t \propto M/L$

La velocità con la quale una stella spende la sua energia cresce rapidamente con la sua massa. I risultati sperimentali per le stelle di Sequenza Principale danno approssimativamente:  $L = M^{3,8}$ , la cosiddetta relazione massa-luminosità.

L'esponente 3,8 rappresenta un compromesso applicabile a stelle di massa intermedia (0,5 ...





## Guida per l'insegnante

10)  $M_{\text{Sole}}$ .

Quindi abbiamo (approssimativamente):  $t \propto M/L = M/M^{3,8} = M^{-2,8}$ ; vediamo che le stelle di grande massa evolvono molto più rapidamente che il Sole e quelle di massa minore, molto più lentamente.

Qualche esempio:

Una stella con una massa di circa 10 masse solari avrà un tempo di vita di solo  $t = 0,0016 t_{\text{Sole}}$ , ovvero circa 13 milioni di anni.

Una stella con una massa di 0,6 masse solari avrà un tempo di vita di circa  $t = 4,2 t_{\text{Sole}}$ , ovvero 34 miliardi di anni. Questo tempo è molto maggiore dell'età dell'intero Universo. Quindi nessuna stella di piccola massa nell'Universo ha ancora completato il suo tempo di Sequenza Principale.

### La selezione del campione di stelle

L'ammasso globulare M12 contiene circa 150.000 stelle (vedi la risposta al quesito 18). L'immagine utilizzata per questo esercizio è stata ottenuta con lo strumento FORS1 montato al telescopio "ANTU" (lo "Unit Telescope" N.1 o UT1 del VLT). L'immagine copre solo una piccola regione esterna dell'ammasso, scelta appositamente per evitare la parte centrale più "affollata" dove le stelle sembrano sovrapporsi. Abbiamo selezionato 45 stelle tali da essere rappresentative della popolazione dell'intero ammasso. Con un campione di queste dimensioni il carico di lavoro è contenuto e allo stesso tempo, per l'opportuna scelta del campione, i risultati sono paragonabili a quelli ottenuti scientificamente da un campione molto più numeroso di stelle. Un'immagine dell'intero ammasso M12, estratta dalla Digitized Sky Survey (DSS), è stata usata per i quesiti aggiuntivi.

### L'analisi delle immagini

Suggeriamo che ciascun gruppo di studenti utilizzi un regolo copiato su supporto trasparente. Abbiamo incluso il regolo in ogni immagine in modo da poter verificare che il processo di copiatura non abbia alterato la scala della figura. Gli studenti dovranno per prima cosa assicurarsi che il loro regolo trasparente coincida con quello riprodotto alla base di ogni immagine.

Suggeriamo inoltre che il lavoro sia suddiviso tra vari gruppi e per questo abbiamo diviso l'immagine in sei parti (esercizio, calibrazione, A, B, C e D). Le magnitudini sono date per le cinque stelle da "esercitazione". Queste cinque stelle possono essere utilizzate per far pratica con il regolo e ottenere risultati accurati e ripetibili. Le quattro stelle di calibrazione dovrebbero poi essere misurate da ciascun gruppo indipendentemente e successivamente confrontate in modo da ottenere misure consistenti tra i vari gruppi.

Per ridurre gli errori suggeriamo che ciascuna stella sia misurata almeno due volte da ciascun gruppo e venga utilizzata la media dei risultati.

È molto importante fare sufficiente pratica con il regolo prima di cominciare le misure.

"Misurare" non significa semplicemente sovrapporre il regolo sull'immagine! Per esempio, una stella di magnitudine 18,5 dovrebbe essere totalmente del cerchio appropriato, ma il "fondo" del cielo che la circonda dovrebbe appena "toccare" il cerchio. Gli studenti dovrebbero esercitarsi a misurare tutte le stelle in questo modo. Se le misure risultassero sistematicamente troppo basse o troppo alte, è possibile correggerle aggiungendo o sottraendo una costante appropriata.

La Fig. 3 della dispensa Strumenti Astronomici è usata per convertire l'indice di colore B-V in Temperatura. È stata inserita una serie di tabelle che possono essere copiate, ma suggeriamo l'utilizzo di un Foglio Elettronico (per esempio Excel) per semplificare il lavoro e per visualizzare l'indice di colore.

### Quesiti 1-8

Abbiamo raccolto in una tabella sia i valori ottenuti dagli astronomi con metodi professionali sia quelli ottenuti da noi con il metodo suggerito nell'esercizio (vedi Fig. 1).



## Guida per l'insegnante

Star	Valori degli scienziati				Misure/calcoli di ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18.82	17.98	0.84	5250	18.70	17.90	0.8	5403
2	19.02	18.31	0.71	5744	19.00	18.20	0.8	5403
3	19.32	18.65	0.67	5864	19.30	18.70	0.6	6122
4	19.96	19.25	0.71	5699	19.90	19.10	0.8	5403
5	21.05	20.21	0.84	5265	21.00	20.10	0.9	5076
6	18.94	18.12	0.82	5348	19.00	18.20	0.8	5403
7	19.80	19.10	0.70	5757	19.80	19.20	0.6	6122
8	19.06	18.34	0.72	5702	19.00	18.40	0.6	6122
9	19.20	18.53	0.67	5844	19.10	18.50	0.6	5122
10	18.99	18.25	0.74	5614	19.00	18.20	0.8	5403
11	20.07	19.34	0.73	5620	20.10	19.40	0.7	5751
12	17.32	16.37	0.95	4918	17.20	16.40	0.8	5403
13	19.18	18.52	0.66	5884	19.10	18.50	0.6	6122
14	19.53	18.83	0.70	5722	19.60	18.80	0.8	5403
15	20.33	19.60	0.73	5639	20.30	19.50	0.8	5403
16	19.31	18.62	0.69	5792	19.30	18.60	0.7	5751
17	18.57	17.69	0.88	5140	18.70	17.80	0.9	5076
18	18.95	18.15	0.80	5405	18.90	18.10	0.8	5403
19	17.48	16.56	0.92	5012	17.50	16.60	0.9	5076
20	19.66	18.96	0.70	5738	19.60	18.80	0.8	5403
21	19.77	19.08	0.69	5792	19.80	19.00	0.8	5403
22	19.52	18.84	0.68	5818	19.50	18.80	0.7	5751
23	19.50	18.79	0.71	5734	19.50	18.90	0.6	6122
24	18.23	17.34	0.89	5122	18.30	17.40	0.9	5076
25	21.08	20.26	0.82	5345	21.10	20.20	0.9	5076
26	19.04	18.28	0.76	5552	18.90	18.20	0.7	5751
27	18.76	17.89	0.87	5160	18.80	18.10	0.7	5751
28	18.88	18.05	0.83	5309	18.90	18.10	0.8	5403
29	18.27	17.40	0.87	5183	18.30	17.40	0.9	5076
30	18.14	17.28	0.86	5189	18.20	17.30	0.9	5076
31	19.84	19.14	0.70	5783	19.80	19.10	0.7	5751
32	18.62	17.76	0.86	5197	18.60	17.80	0.8	5403
33	19.92	19.22	0.70	5725	19.90	19.20	0.7	5751
34	20.53	19.75	0.78	5487	20.40	19.70	0.7	5751
35	18.82	17.99	0.83	5300	18.80	18.00	0.8	5403
36	18.95	18.19	0.76	5511	18.80	18.20	0.6	6122
37	19.33	18.65	0.68	5812	19.30	18.70	0.6	6122
38	20.53	19.76	0.77	5502	20.50	19.60	0.9	5076
39	19.92	19.21	0.71	5734	19.90	19.20	0.7	5751
40	19.29	18.62	0.67	5861	19.30	18.70	0.6	6122
41	17.91	17.00	0.91	5026	18.00	16.90	1.1	4479
42	19.19	18.50	0.69	5789	19.20	18.50	0.7	5751
43	19.42	18.74	0.68	5831	19.30	18.70	0.6	6122
44	19.36	18.69	0.67	5841	19.30	18.70	0.6	6122
45	18.12	17.24	0.88	5145	18.20	17.20	1.0	4768

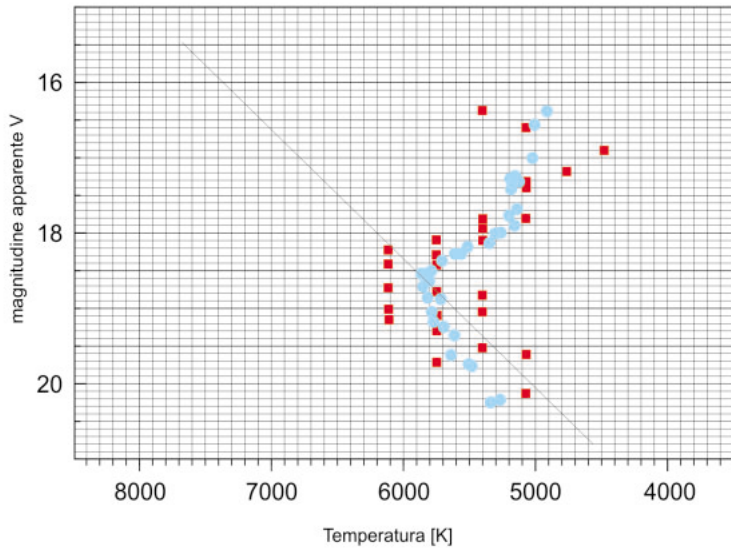
**Figura 1: Soluzioni per i Quesiti da 1 a 8**

La tabella riporta per ciascuna stella numerata i valori di B, V, B-V e T ottenuti dagli scienziati. Sono riportati anche le misure ottenute da noi seguendo le indicazioni dell'esercizio.





## Guida per l'insegnante



**Figura 2: Il diagramma di Hertzsprung-Russell per M12**  
 Il diagramma mostra le nostre misure (in rosso) assieme a quelle ottenute dagli scienziati (in blu).

### Quesiti 9-13

La parte bassa del diagramma (Fig. 3) è piuttosto corta e i risultati sono molto sensibili alla pendenza della curva tracciata per rappresentare l'andamento dei punti sperimentali. Per semplificare il procedimento ed evitare risultati troppo errati, abbiamo ipotizzato che la forma della Sequenza Principale sia approssimativamente la stessa per tutti gli ammassi, qualunque sia la loro età e quindi tutte le Sequenze Principali risultino parallele tra loro. In questo modo possiamo usare la pendenza della Sequenza Principale di riferimento delle Hyadi come guida.

Il valore di  $D$  dipende dalla posizione della Sequenza Principale nel diagramma dell'ammasso.

Harris ottiene  $m_V - M_V = 14,02$  per M12. Le nostre misure danno **13,9**.

Harris ottiene il valore di  $D_{cl} = 4,9$  kpc. Questo valore è stato ottenuto tenendo conto dell'estinzione interstellare tra noi e l'ammasso (0,57 magnitudini) nell'equazione della distanza per M12, ovvero  $m - M = 5 \log D - 5 + 0,57$ .

Noi abbiamo calcolato  $D = 10^{(m-M+5)/5} = 10^{3,78} = \mathbf{6,026 \text{ kpc}}$  senza la correzione per l'estinzione interstellare e  $D = 10^{(m-M-0,57+5)/5} = 10^{3,666} = \mathbf{4,634 \text{ kpc}}$  con la correzione.

Nei calcoli successivi abbiamo utilizzato il valore corretto per l'estinzione, 4,634 kpc.

### Quesiti 14-16

Nelle nostre misure una stella al punto di svolta ha una magnitudine apparente di **18,7**. Gli scienziati hanno misurato il punto di svolta a 18,3 magnitudini (Rosenberg et.al.).

Ora calcoliamo

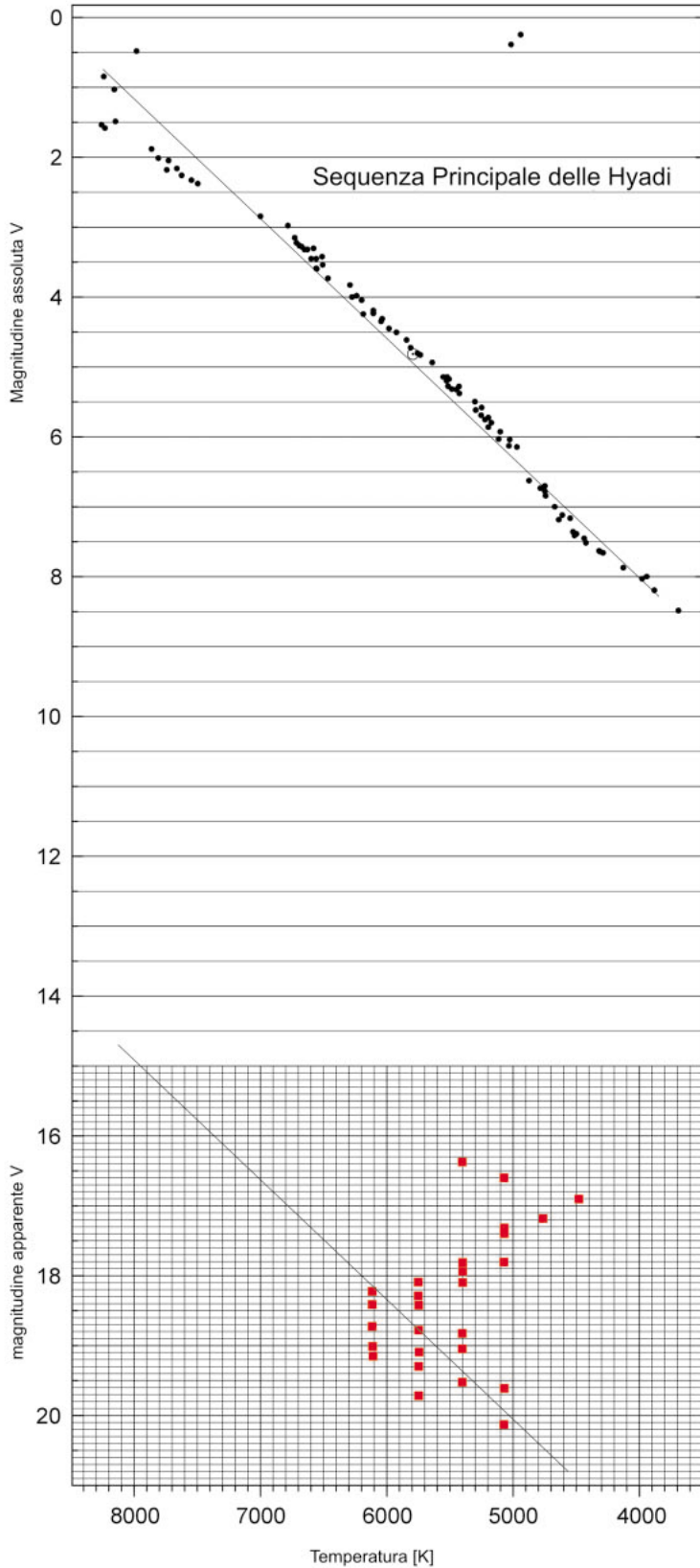
$$(L_{cl}/L_{Sole}) = (D_{cl}/D_{Sole})^2 \cdot (I_{cl}/I_{Sole})$$

Calcolo del rapporto ( $I_{cl}/I_{Sole}$ ):

Siccome  $I_{Sole}$  è molto più grande di  $I_{cl}$ , il rapporto sarà un numero molto piccolo, perciò suggeriamo di calcolare  $I_{Sole}/I_{cl}$  e di utilizzarne poi il reciproco nei calcoli successivi.



## Guida per l'insegnante



**Figura 3: Il diagramma Hertzsprung-Russell di M12 e dell'ammasso delle Hyadi**  
Questo grafico include il diagramma H-R delle Hyadi (parte superiore) assieme a quello di M12, ottenuto utilizzando le misure degli autori. Le linee rappresentano l'interpolazione delle stelle sulla Sequenza Principale.





## Guida per l'insegnante

$$(I_{\text{Sole}}/I_{\text{cl}}) = 10^{(m_{\text{cl}} - m_{\text{Sole}})/2,5} = 10^{(18,7 - (-26,5))/2,5} = 10^{18,08} = 1,202 \times 10^{18}$$

da cui  $(I_{\text{cl}}/I_{\text{Sole}}) = 8,318 \times 10^{-19}$

I calcoli successivi:

$$(D_{\text{cl}}/D_{\text{Sole}}) = (4634 \times 3,086 \times 10^{13}) / 1,498 \times 10^8 = 9,559 \times 10^8$$

$$(L_{\text{cl}}/L_{\text{Sole}}) = (D_{\text{cl}}/D_{\text{Sole}})^2 \times (I_{\text{cl}}/I_{\text{Sole}}) = (9,559 \times 10^8)^2 \times 8,318 \times 10^{-19} = \mathbf{0,76}$$

$$(M_{\text{cl}}/M_{\text{Sole}}) = (L_{\text{cl}}/L_{\text{Sole}})^{1/3,8} = \mathbf{0,93}$$

$$(t_{\text{cl}}/t_{\text{Sole}}) = (M_{\text{cl}}/M_{\text{Sole}})^{-2,8} = 1,224$$

$$t_{\text{cl}} = 1,224 \times t_{\text{Sole}} = 1,224 \times 8,2 \times 10^9 = \mathbf{10 \times 10^9 \text{ anni}}$$

Esiste un metodo alternativo e relativamente più semplice per stimare l'età degli ammassi. La sua origine è empirica (si basa su una serie di misure sperimentali) e perciò la sua comprensione è meno intuitiva. Consiste nell'applicare la seguente relazione empirica:

$$M_V(T0) = 2,70 \log_{10} (t) + 1,41,$$

dove  $M_V(T0)$  è la magnitudine assoluta corrispondente al punto di svolta e  $t$  è l'età dell'ammasso in milioni di anni. Dato che

$$M_V(T0) = m_V(T0) - (m_V(T0) - M_V(T0)) = m_V(T0) - (m_V - M_V)$$

(il modulo di distanza è lo stesso per l'intero ammasso), abbiamo :

$$m_V(T0) - (m_V - M_V) = 2,7 \log_{10} (t) + 1,41,$$

che si riduce a:

$$t = 10^{[(m_V(T0) - (m_V - M_V)) - 1,41] / 2,7}$$

Magnitudine misurata del punto di svolta	Distanza calcolata [pc]	Età, methodo 1 [miliardi di anni]	Età, methodo 2 [miliardi di anni]
18,7	4634	10,0	18,0
18,85	4634	11,1	20,5
18,5	4634	8,8	15,2
<b>18,3</b>	<b>4900</b>	7,0	11,6
18,3	4634	7,7	12,8
18,3	4500	8,0	13,5
18,7	6026 (no extinc.)	6,8	18,0

Le età risultanti dal calcolo di differenti magnitudini al punto di svolta e distanze, ottenute con il metodo proposto nell'esercizio e con il metodo alternativo sopra descritto:

I numeri in grassetto sono le migliori stime trovate in letteratura.



## Guida per l'insegnante

I vari metodi per calcolare l'età degli ammassi globulari sono descritti da Chaboyer et al., i quali trovano età comprese tra  $11,5 \times 10^9$  anni and  $15,9 \times 10^9$  anni per M12.

### Quesiti aggiuntivi

	cm	gradi	radianti
Immagine intera	14,8	0,25	
Diametro Angolare, a	13,0	0,22	$3,833 \times 10^{-3}$

### Quesito 17

$$d = D_{cl} \cdot a = 4634 \times 3,833 \times 10^{-3} = \mathbf{17,76 \text{ pc}}$$

L'ammasso finisce quando la densità delle stelle uguaglia quella delle stelle del fondo

Il valore del diametro angolare, a, corrisponde a  $0,22 \times 60 = \mathbf{13,2 \text{ minuti d'arco}}$ . Nell'Atlante Uranometria 2000.0 il diametro angolare riportato è di 14,5 minuti d'arco.

### Quesito 18

$$L_{cl}/L_{Sole} = 2,512^{(M_{Sole}-M_{cl})} = 2,512^{4,8-(-7,32)} \sim \mathbf{70.500}$$

Il numero totale di stelle in M12 è circa 150.000 +/- 35,000 secondo Carl Grillmair (SIRTF Science Center, comunicazione privata, 2002).



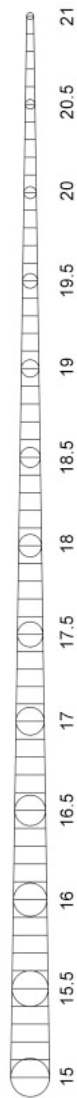




## Guida per l'insegnante

### **Figura 4: Regolo per le misure**

Questo regolo deve essere copiato su un supporto trasparente e usato per le misure richieste dai quesiti dall' 1 al 6.





[www.astroex.org](http://www.astroex.org)

