

## **Il diagramma HR**

**di Daniele Gasparri**

**Il diagramma HR è uno strumento importantissimo e potentissimo nel raggruppare e studiare le caratteristiche dell'intera popolazione stellare dell'Universo, attraverso il semplice studio della magnitudine assoluta in funzione del colore, o meglio gli indici di colore, che identificano la temperatura di colore o la classificazione spettrale. Tali grafici sono detti anche diagrammi Colore-Magnitudine.**

### **Gli indici di colore**

La misura della magnitudine apparente di una stella, o anche del suo flusso (ricorda che magnitudine e flusso sono legati dalla formula di Pogson, e che in realtà la magnitudine si ricava del flusso misurato e non viceversa!) in diverse bande spettrali, ci dà altre informazioni sulla natura e caratteristiche del corpo che stiamo osservando. Queste informazioni si ricavano meglio attraverso l'analisi dei cosiddetti indici di colore, che altro non sono che la differenza tra magnitudini appartenenti a bande spettrali diverse.

Gli indici di colore ci dicono, come lo stesso nome suggerisce, di che colore ci appare una stella. Dalla conoscenza di alcune nozioni di base possiamo ricavare informazioni sulla temperatura della stella, sul suo raggio, sulla sua dinamica, e probabile evoluzione, o caratterizzare il mezzo interstellare (ad esempio la presenza di polveri lungo la nostra linea di vista), il tutto prescindendo dalla distanza. Gli indici di colore sono, come la magnitudine assoluta, un metodo analitico per raggruppare una serie di proprietà della stella che però possono essere estrapolate senza conoscere la distanza.

A seconda delle bande utilizzate possiamo definire qualsiasi indice di colore; i più utilizzati sono i seguenti:

- U-B, indica la differenza tra la magnitudine nella banda U e nella banda B (nel sistema fotometrico di Johnson)
- B-V: differenza tra la magnitudine B e V
- Altri indici di colore possono essere V-I e altri ancora nelle bande infrarosse

Nel sistema fotometrico di Johnson, per definizione, alla stella Vega è stata assegnata  $m_U = m_B = m_V$  e quindi un indice di colore  $IC = 0$ . Vega non è la sola stella a fare da calibratore; esistono altre 6 stelle sparse nel cielo, simili a Vega, che rappresentano i cosiddetti calibratori di colore.

Gli indici di colore di gran lunga più usati sono senza dubbio U-B e B-V, che servono per calcolare la cosiddetta temperatura di colore della stella e la

successiva classificazione spettrale. Prima di vedere come ricavare queste proprietà dobbiamo fare luce sul valore che otteniamo dagli indici di colore in quanto la scala delle magnitudini è inversa rispetto a tutte le altre conosciute (ricorda che un valore alto corrisponde ad una bassa luminosità e viceversa).

Analizziamo gli indici di colore di stelle ben visibili ad occhio nudo durante la notte e cerchiamo di fare maggiore chiarezza:

- Aldebaran, la stella più luminosa della costellazione del Toro appare di colore nettamente arancio, e quindi è lecito pensare che la sua luminosità nel visibile sia maggiore di quella nel blu; il suo indice di colore infatti restituisce un valore  $B - V = +1,53$ . Cosa significa questo? Significa che il valore della magnitudine nella banda B è maggiore di quello della banda V, cioè che la stella è più luminosa in V rispetto alla banda B.
- Bellatrix è una delle stelle della costellazione di Orione e mostra un colore bianco-azzurro; è lecito quindi pensare che la magnitudine B sia minore di quella in V e cioè che essa sia più luminosa in B rispetto a V. In effetti l'indice di colore ci dice che  $B - V = -0,22$ , cioè proprio quello che ci saremmo aspettati.

A causa della scala delle magnitudini è importante non confondersi nell'interpretare i valori ottenuti dagli indici di colore; bisogna sempre ricordare che le stelle più luminose hanno magnitudine minore delle stelle meno luminose e quindi l'interpretazione degli indici di colore deve essere in qualche modo contraria a quella cui siamo abituati nelle comuni esperienze.

In generale possiamo affermare che quando l'indice di colore B-V è  $I > 0$  siamo in presenza di stelle dalla colorazione tendente al blu, mentre  $I < 0$  identifica stelle di colore tendente al rosso.

Siccome il colore delle stelle dipende dalla loro temperatura superficiale (stelle rosse sono più fredde di stelle blu), possiamo affermare che si ha  $I > 0$  per stelle fredde e  $I < 0$  per stelle calde, in riferimento a stelle bianche come Vega, per la quale  $I = 0$ .

Secondo questa classificazione di colore (e di spettro) sono state sviluppate diverse classi spettrali alle quali appartiene la stragrande maggioranza delle stelle del cielo: OBAFGKM, dove le stelle di tipo O e B sono azzurre, con  $I < 0$ , le A hanno  $I = 0$  e tutte le altre  $I > 0$  crescente da sinistra a destra (le stelle G sono giallo-verdi, le M estremamente rosse).

## **Il diagramma HR**

Attraverso gli indici di colore si possono costruire dei diagrammi molto utili per lo studio della popolazione stellare di una galassia o di un ammasso. Uno di questi è il diagramma colore-magnitudine, chiamato anche diagramma HR (Hertzsprung-Russel), un ottimo strumento per riassumere, individuare e capire le più importanti proprietà delle stelle. Il diagramma HR è un grafico nel quale in ascissa si riporta la temperatura di colore o l'indice di colore B-V, o il tipo spettrale, ed in ordinata la magnitudine assoluta. E' necessario riportare la magnitudine assoluta per evitare che le differenze di luminosità siano dovute alla distanza delle stelle e non alle loro proprietà intrinseche. Tale diagramma può comunque riportare la magnitudine apparente se si assume di osservare un gruppo di stelle situate all'incirca alla stessa distanza: in questo caso è evidente che le differenze di luminosità saranno dovute unicamente alle loro proprietà. Questa approssimazione può essere valida nello studio di stelle appartenenti ad ammassi stellari (globulari e aperti), la cui distanza dalla Terra sia molto maggiore delle dimensioni dell'ammasso.

E' chiaro che ciò non può essere vero per le stelle che osserviamo ad occhio nudo, le quali si trovano a distanze estremamente variabili.

Esistono 2 tipi di diagramma HR: uno teorico, l'altro osservativo. Il primo esamina un campione di stelle delle quali conosciamo molto bene parametri quali la distanza, la massa, la metallicità, l'età e la temperatura e serve per sviluppare dei modelli stellari e fare da calibratore ai diagrammi HR osservativi per gli ammassi aperti e globulari, la cui costruzione è importante per determinare parametri quali l'età e la popolazione stellare. Consideriamo un ammasso stellare o in alternativa un gruppo di stelle di cui conosciamo la distanza e quindi anche la loro magnitudine assoluta, calcoliamone l'indice di colore (che non dipende dalla distanza) B-V e inseriamo i dati ottenuti in un grafico. Otteniamo un andamento come quello della figura nella pagina seguente.

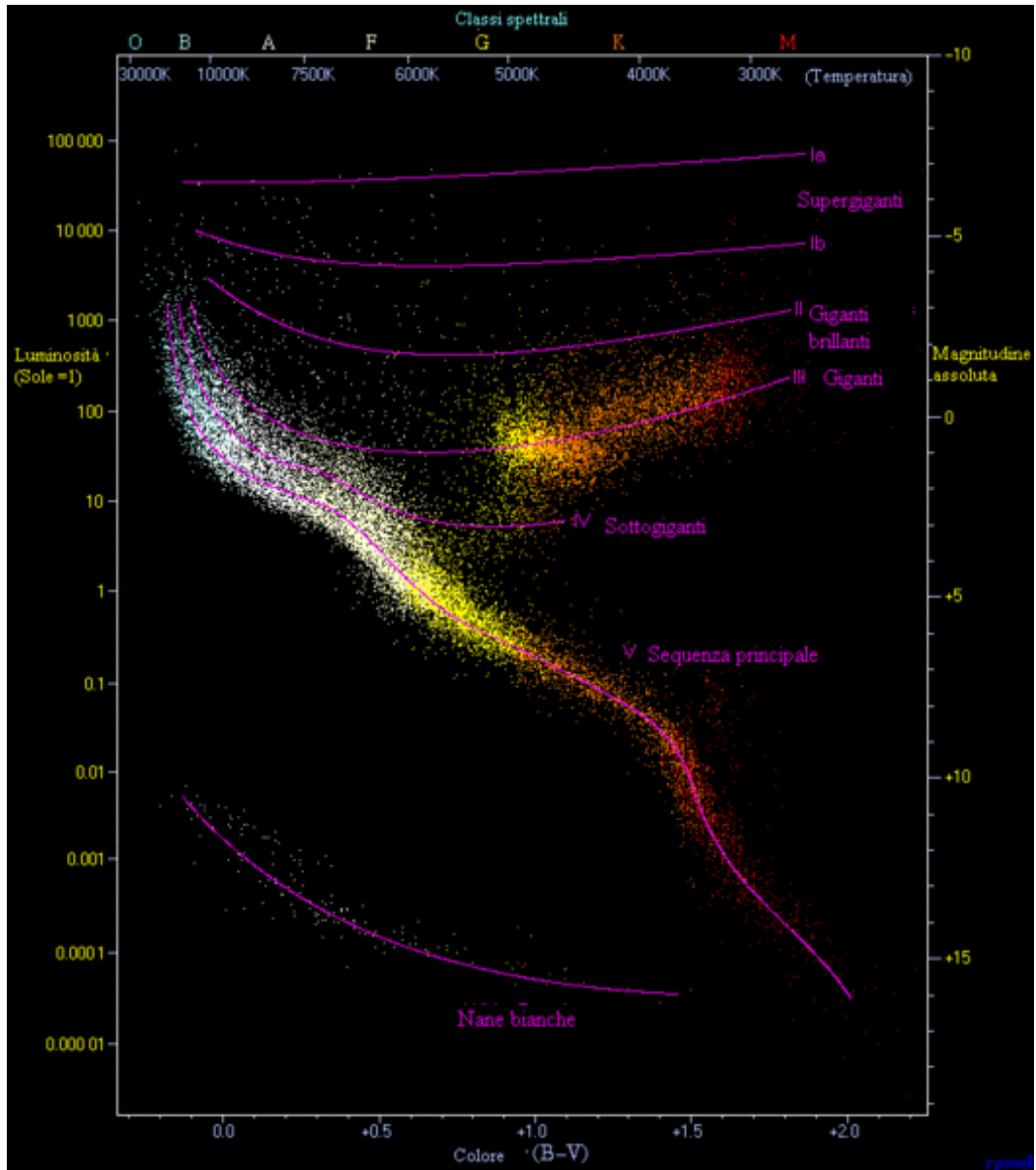


Diagramma HR teorico. Tutte le stelle dell'Universo sono raggruppate in 5 classi di luminosità. Oltre il 90% appartiene alla classe V, o sequenza principale. Questa disposizione ordinata suggerisce che tutte le stelle sono frutto di un modello fisico ben definito.

Vediamo quali informazioni possiamo ricavare da questo grafico.

- 1) gran parte delle stelle si posiziona lungo una sottile striscia che attraversa in diagonale tutto il diagramma. In questa zona vi si trovano le stelle

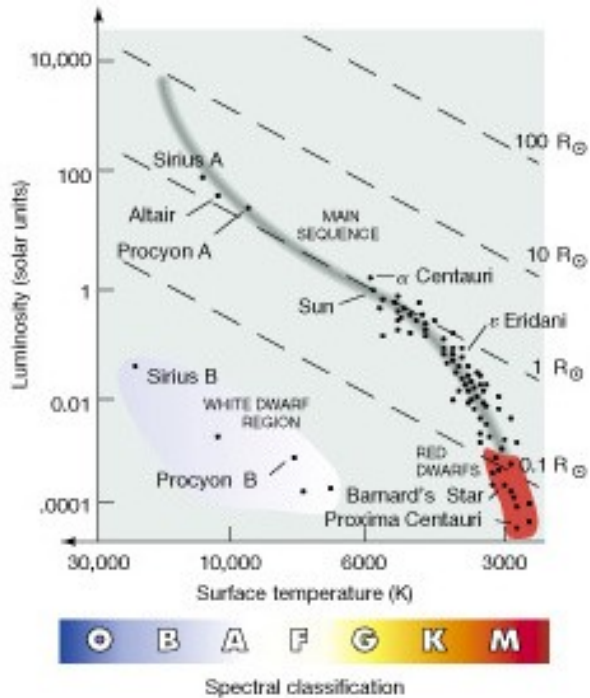
appartenenti alla cosiddetta sequenza principale, un periodo che rappresenta oltre il 95% della vita di una stella caratterizzato da stabilità e luminosità all'incirca costante.

2) L'intera popolazione stellare è confinata in zone definite. Questo ha un significato molto profondo: le stelle non sono fatte in modo casuale ma seguono delle regole. Non troverete mai ad esempio una stella più calda di 30000 K oppure più fredda di 2000 K oppure ancora una stella con temperatura di 30000 K e magnitudine assoluta +5. La ragione di questi limiti naturali porta ad importanti considerazioni sulla stabilità dinamica e sulla massa minima e massima di stelle estremamente calde e fredde, fino alla costruzione di modelli stellari.

3) Ci sono stelle che pur avendo la stessa temperatura hanno luminosità diverse.

Questo fatto si spiega facilmente se si assume che questa differenza è dovuta in gran parte a differenze di raggio, visto che l'emissione per unità di superficie deve essere uguale perché regolata dalle leggi del corpo nero (di cui la temperatura è l'unica variabile).

Dal diagramma infatti si possono ricavare i raggi stellari, semplicemente considerando una delle leggi del corpo nero (Stefan-Boltzmann), che descrive il flusso emesso da una stella (luminosità per unità di tempo e superficie) come proporzionale alla quarta potenza della



Andamento dei raggi stellari nel diagramma HR

temperatura:  $F = \sigma T^4$ . Stelle alla stessa temperatura emettono la stessa quantità di energia ogni secondo per ogni centimetro quadrato di superficie; è chiaro che se la superficie varia, varia anche l'energia totale irradiata dalla stella, la quale è data da:  $L = 4\pi r^2 F = 4\pi r^2 \sigma T^4$ , dove r = raggio della stella.

Questo per esempio significa che se due stelle hanno la stessa temperatura superficiale, ma l'una è 100 volte più luminosa dell'altra, allora il raggio della stella più luminosa è  $\sqrt{100} = 10$  volte maggiore. Nel grafico (generalmente logaritmico) HR possiamo individuare facilmente delle rette che rappresentano l'andamento dei raggi stellari.

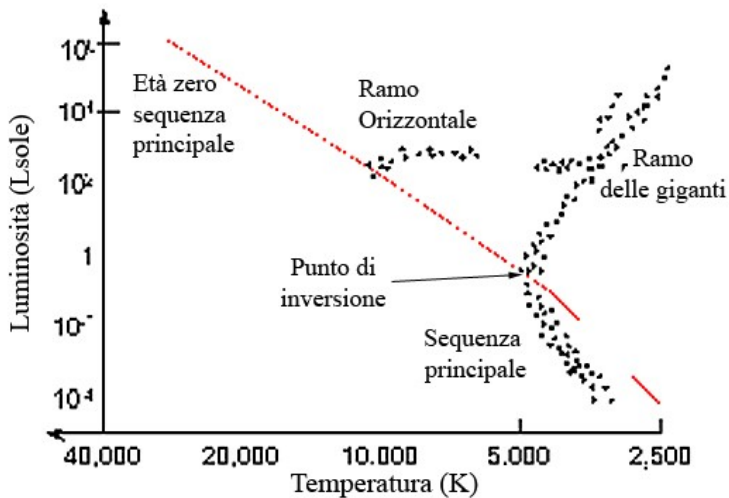
4) Oltre alla sequenza principale vi sono altri gruppi più o meno definiti. Gli astronomi hanno suddiviso le stelle in 7 classi di luminosità, alle quali appartiene l'intera popolazione dell'Universo (almeno per la parte che abbiamo la possibilità di esplorare). In ordine di luminosità decrescente abbiamo la Ia-O costituita dalle stelle supergiganti più brillanti che si conoscono; Ib, supergiganti luminose, II giganti brillanti, III giganti normali, IV subgiganti, V stelle della sequenza principale (nane), VI sub-nane e D le nane bianche. Questa classificazione prende in esame la luminosità e il raggio delle stelle, determinato dalla legge di Stefan-Boltzmann per il corpo nero (da non confondere con la classificazione spettrale OBAFGKM che prende in esame la temperatura e le righe negli spettri stellari!)

5) Avendo a disposizione un diagramma HR calibrato su delle stelle conosciute siamo in grado di utilizzarlo per stimare la distanza di qualsiasi altra stella appartenente alla sequenza principale con il cosiddetto metodo delle parallassi spettroscopiche. Basta misurare l'indice di colore e quindi la temperatura di colore della stella ed inserirla in un diagramma HR ben calibrato per avere come risultato la luminosità assoluta di tale stella, e di conseguenza la sua distanza. Questo metodo viene largamente usato per la stima della distanza delle stelle della nostra galassia per le quali non possiamo misurare direttamente la parallasse e si avvale proprio del fatto che in sequenza principale tutte funzionano allo stesso modo, con le stesse proprietà previste da modelli matematici

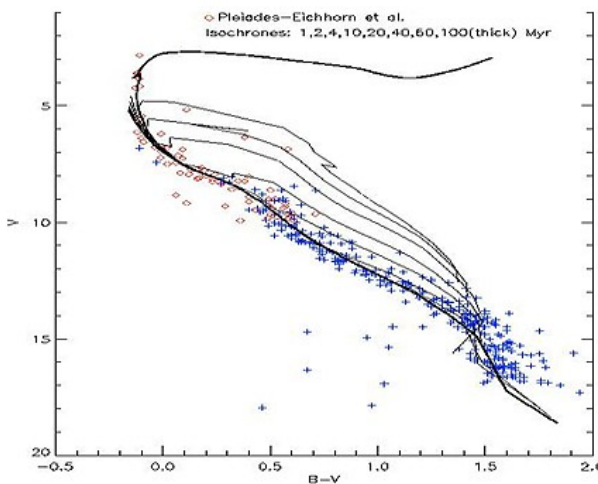
A causa di lievi differenze di luminosità dovute alle differenti età, la fascia della sequenza principale non si presenta sottile ma ha un certo spessore che porta ad errori nella valutazione della distanza. Questo metodo può essere applicato anche alle altre classi di luminosità, a patto di conoscere con esattezza la classe spettrale di appartenenza della stella.

6) Per quanto riguarda le stelle della sequenza principale, possiamo notare come ci sia una forte correlazione tra luminosità e temperatura; maggiore è la temperatura, maggiore è la luminosità, e così per il raggio; per questo motivo è logico pensare che stelle più luminose siano anche più massicce. La stima della massa è molto importante perché l'intera evoluzione stellare è determinata unicamente dalla massa della stella (teorema di Russel-Vogt).

7) Per indagare una popolazione stellare appartenente ad un ammasso, globulare o aperto, lo strumento principale è proprio il diagramma HR. Per questi oggetti possiamo considerare, almeno in prima approssimazione, le stelle poste tutte alla stessa distanza da noi, e quindi inserire in ascissa direttamente il valore della magnitudine apparente, ottenendo un diagramma HR osservativo. Il risultato che otteniamo è molto importante:



Tipico diagramma HR di un ammasso globulare. Le stelle giovani hanno ormai abbandonato da tempo la sequenza principale e vi sono rimaste stelle rosse, fredde e molto vecchie.



Tipico andamento di un ammasso aperto come le Pleiadi, giovane e ricco anche di stelle giovani, azzurre e calde. Le linee continue rappresentano tracce evolutive isocrone, cioè i percorsi evolutivi seguiti dalle stelle in funzione del tempo.

Osservando i due diagrammi notiamo una differenza fondamentale. Quello di un ammasso globulare ha una sequenza principale troncata in prossimità della temperatura di 5000 K, che corrisponde all'incirca ad un  $B - V \approx 1,0$ ; in particolare notiamo la completa assenza di stelle di sequenza principale con

temperatura, raggio e massa maggiore. Oltre alla sequenza principale, popolata da stelle di classe V, risulta molto popolata anche la classe delle giganti.

Il diagramma HR di un ammasso aperto come le Pleiadi è molto diverso: la sequenza principale non è troncata, anzi è ricca di stelle ad alta temperatura e luminosità, mentre sono assenti le grandi componenti di colore rosso che popolano le classi delle giganti e supergiganti.

Cosa significano questi due diagrammi? A cosa è dovuta la differenza di popolazione stellare?

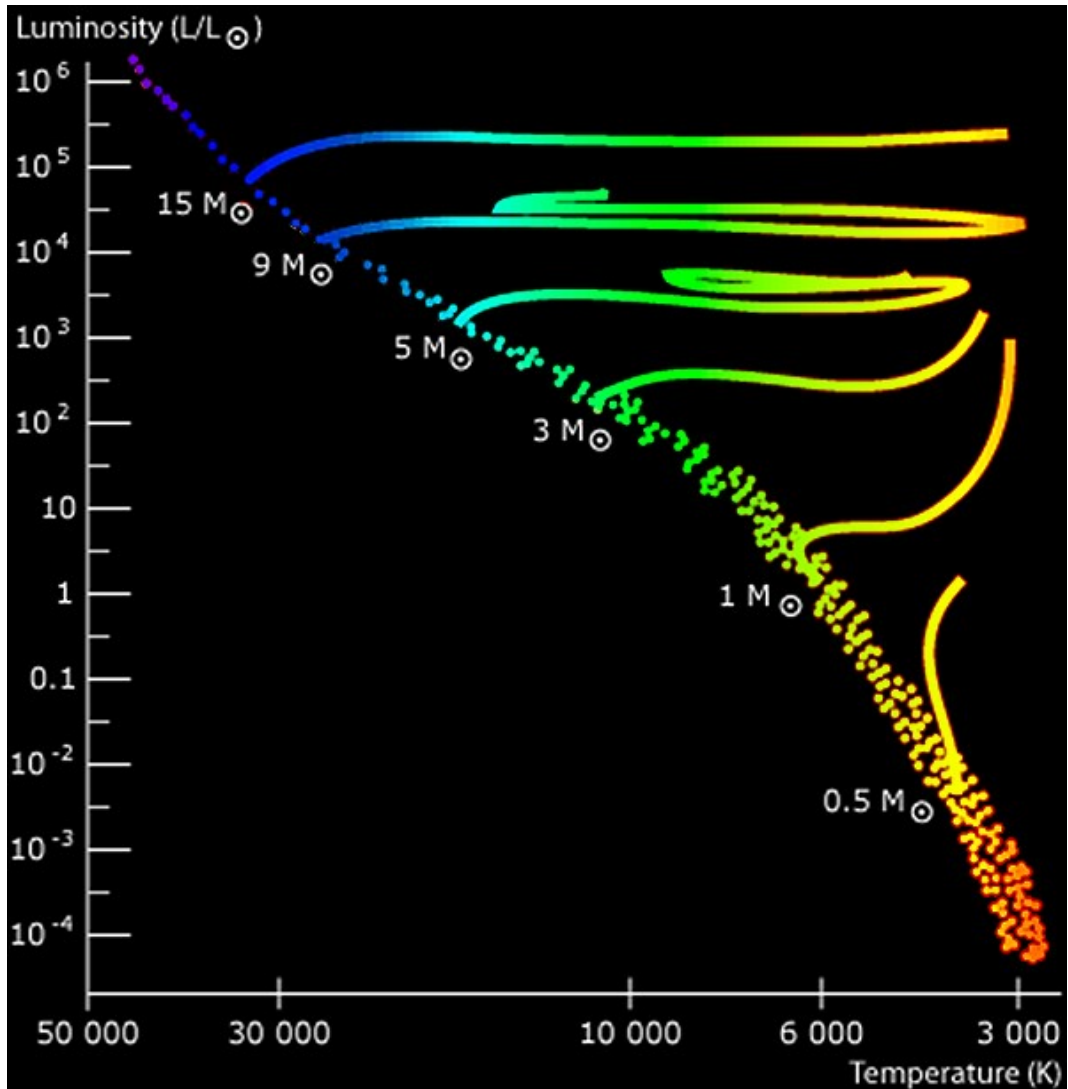
Gli astronomi sono riusciti a scoprire che la vita di una stella dipende dalla massa e che stelle più massicce vivono sensibilmente meno di quelle meno massicce. Una stella calda di tipo O vive per qualche decina di milioni di anni, mentre il Sole si pensa possa farlo per 10 miliardi; le stelle più fredde di tipo M alcune decine di miliardi di anni.

Se supponiamo che le stelle negli ammassi si siano formate tutte allo stesso tempo (e ciò è praticamente esatto), allora la differenza tra i diagrammi dei due tipi di ammassi è l'età. Quello degli ammassi globulari si presenta povero di stelle blu e bianche perché sono oggetti vecchi formati miliardi di anni fa, in cui le stelle più massicce hanno terminato la loro vita. Gli ammassi aperti, composti da molte stelle blu, sono la prova della loro giovane età, a volte solo qualche milione di anni (e su scala cosmica è un tempo davvero piccolo!).

8) Ultimo ma non per importanza, il diagramma HR di un ammasso può darci un'istantanea che mostra tutte le fasi dell'evoluzione stellare.

Attraverso l'analisi di decine di diagrammi HR gli astronomi sono riusciti a capire che le classi di luminosità non rappresentano diverse specie di stelle, ma solamente diversi stadi evolutivi di componenti tutte originariamente appartenenti alla sequenza principale.

Dopo aver passato gran parte della sua vita in sequenza principale bruciando idrogeno nel nucleo, qualsiasi stella finisce il combustibile principale e va incontro a delle modificazioni radicali della sua struttura, del suo raggio e della sua luminosità, passando dal ramo della sequenza principale al ramo delle sub-giganti, giganti o supergiganti (dipende dalla massa iniziale della stella)



Cammino evolutivo delle stelle in funzione della loro massa. L'evoluzione di una stella dipende (quasi) unicamente dalla sua massa. Le grandi e giovani stelle blu di classe spettrale O-B evolvono in qualche milione di anni e poi esplodono come supernovae. Le stelle fredde e piccole di classe M vivono oltre 50 miliardi di anni. Data l'età dell'Universo (circa 14 miliardi di anni) nessuna stella di questo tipo ha ancora cessato la sua vita ed in effetti i modelli teorici mancano di prove osservative.

<b>Tipo stellare</b>	<b>Temp (K)</b>	<b>Massa</b>	<b>Età*</b>
<b>O5</b>	40 000	40	1 My
<b>B0</b>	28 000	18	11 My
<b>A0</b>	9 900	3.5	440 My
<b>F0</b>	7 400	1.7	3 Gy
<b>G0</b>	6 600	1.1	8 Gy
<b>K0</b>	4 900	0.8	17 Gy
<b>M0</b>	3 500	0.5	56 Gy

Tempo di vita medio delle stelle in funzione della loro massa. La vita delle stelle dipende criticamente anche dalla metallicità. Un alto contenuto di metalli (come nelle giovani stelle di popolazione I) rallenta leggermente il tasso delle reazioni nucleari e consente alla stella di sopravvivere più a lungo.

\* L'età è espressa in milioni di anni (My = Mega years) o miliardi (GY = Giga years)