

Le Stelle vanno a scuola

Il Diagramma di Hertzsprung-Russell

Valentina Alberti

Maggio 2004

Indice

1	Premessa	3
2	Diagramma H-R	4
3	Regioni del diagramma	5
4	Relazione Luminosità-Temperatura-Raggio	10

1 Premessa

Fin da quando i primi spettrografi vennero utilizzati in campo astronomico, ci si accorse che gli spettri stellari presentavano una parte continua, simile a quella dovuta all'emissione di corpo nero, e delle righe di assorbimento che presentavano una certa regolarità quando le stelle osservate erano simili. Questa regolarità permise di classificare gli astri in diversi tipi (o classi) spettrali dipendenti, come si scoprì successivamente, dalla temperatura. Messa in ordine di temperatura decrescente i tipi spettrali sono O B A F G K M R N S e possono essere a loro volta suddivisi in 10 sottoclassi, da 0 a 9. In figura 1 sono riportati gli spettri di stelle appartenenti a classi spettrali differenti (B2, B5,...): ognuno di essi presenta delle righe di assorbimento ad una determinata lunghezza d'onda. In corrispondenza con tali righe sono riportati gli elementi che le hanno generate.

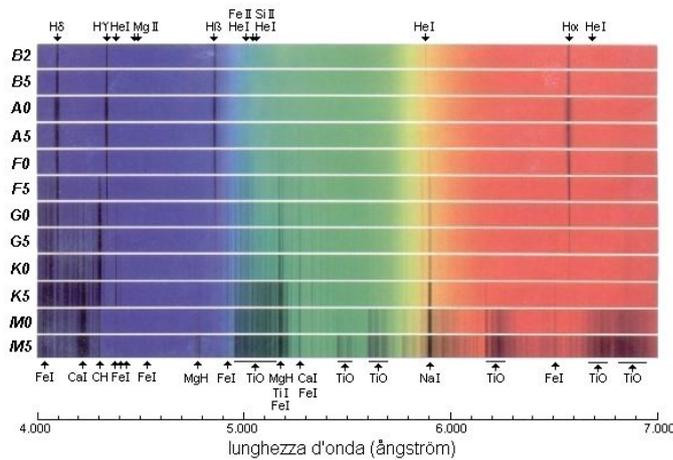


Figura 1: Classificazione spettrale delle stelle

Come già accennato, lo spettro stellare (la parte continua) è molto simile, anche se non identico, a quello generato da un corpo nero. Definendo la temperatura efficace T_e di una stella come quella che avrebbe un corpo nero con pari raggio R e luminosità bolometrica L e ricordando la legge di Stefan-Boltzmann, si ottiene, per le stelle, la seguente relazione:

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4 \quad (1)$$

La luminosità degli astri dipende, dunque, dal quadrato del loro raggio e dalla quarta potenza della temperatura efficace. Come conseguenza di questo fatto si ha che, a parità di raggio, una stella più luminosa è anche più calda e che, a parità di temperatura, stelle con dimensioni maggiori sono anche più luminose.

La temperatura delle stelle può, inoltre, essere relazionata al loro colore. Si ha, infatti, che le stelle rosse sono più fredde di quelle gialle che, a loro volta, sono fredde rispetto alle stelle blu. Per fare un esempio Betelgeuse (rossa) è più fredda del Sole (gialla) che a sua volta è molto meno calda di Sirio (blu).

2 Diagramma H-R

Nei primi anni del 1900 due astronomi, il danese Ejnar Hertzsprung e lo statunitense Henry Norris Russell, introdussero indipendentemente un diagramma bidimensionale in cui ogni stella era rappresentata da un punto corrispondente alla sua temperatura efficace e alla luminosità. Considerando le stelle la cui distanza era minore di 10 parsec dalla Terra, essi notarono che la distribuzione dei punti nel diagramma non era uniforme: la maggior parte delle stelle si trovava infatti lungo una linea sinuosa che tagliava circa a metà il diagramma, detta Sequenza Principale (*Main Sequence*), mentre altre occupavano la regione in alto a destra e quella in basso a sinistra. In figura 1 è riportato un esempio di diagramma H-R.

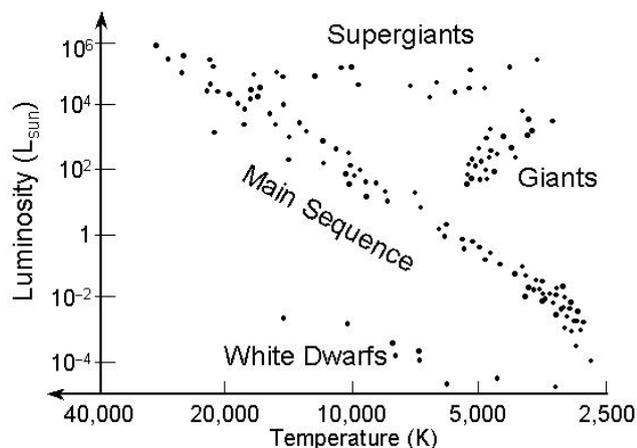


Figura 2: Diagramma H-R. Scala lineare-logaritmica.

Tale diagramma riporta in ascissa (scala lineare) la temperatura efficace espressa in gradi Kelvin¹ e in ordinata (scala logaritmica) la luminosità bolometrica in unità solari. Ad esso corrisponde un diagramma analogo, detto diagramma colore-magnitudine, la cui ascissa ed ordinata sono rispettivamente il colore e la magnitudine assoluta entrambe in scala lineare.

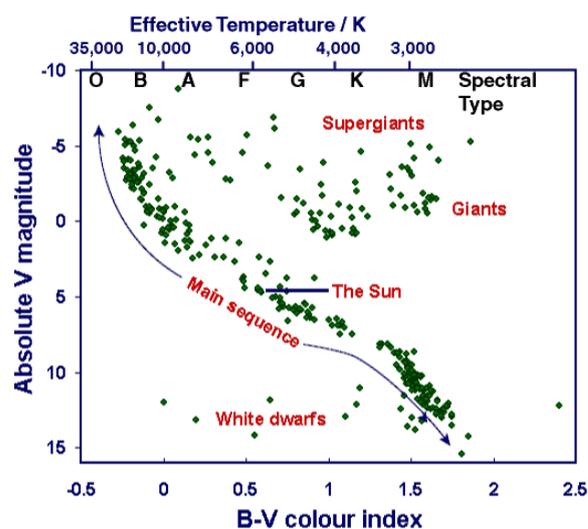


Figura 3: Diagramma colore-magnitudine. Scala lineare-lineare.

In figura 3 si è scelto di rappresentare il colore attraverso l'indice B-V e la magnitudine assoluta in banda V. L'asse delle ascisse secondario (in alto), riporta, invece, i tipi spettrali.

Il diagramma H-R è molto usato poichè permette di rappresentare e studiare l'evoluzione delle stelle.

3 Regioni del diagramma

A seconda sia delle caratteristiche (come la massa e la composizione chimica) che della fase evolutiva, le stelle tendono ad occupare zone ben precise del diagramma H-R. Le principali di esse, presenti anche nelle figure precedenti, sono la sequenza principale, il braccio delle giganti rosse, la zona delle supergiganti, e la zona del diagramma in cui si trovano le nane bianche.

¹0° Kelvin = -273° Centigradi

Sequenza Principale

È la regione del diagramma in cui risiede la maggior parte delle stelle. La loro posizione lungo la sequenza dipende dalla massa: per le stelle massicce vale la seguente relazione massa-luminosità.

$$L \propto M_s^{3.5} \quad (2)$$

Le stelle di composizione chimica diversa da quella del Sole si dispongono lungo Sequenze Principali parallele a quella che caratterizza stelle di composizione chimica solare.

La teoria della struttura stellare spiega che il motivo per cui le stelle tendono a stare sulla sequenza principale è che essa indica la fase evolutiva in cui esse sono più stabili e nella quale passano la maggior parte della loro vita. La permanenza in questa fase dipende dalla massa delle stelle: quelle molto grandi finiscono prima di bruciare l'idrogeno e quindi si allontanano dalla sequenza prima di quelle più piccole.

Le stelle di sequenza sono caratterizzate da un grande varietà di temperature e luminosità: i valori di tali quantità sono alti per stelle molto grandi, diminuiscono per le stelle tipo il Sole² e sono molto bassi per le stelle piccole. Ricordiamo, inoltre, che più alta è la temperatura della stella, più essa sarà brillante ed il suo colore tenderà al blu, mentre, più essa è fredda, minore sarà la sua luminosità e il colore tenderà al rosso.

Zona delle Giganti

La regione in alto a destra del diagramma H-R è occupata da stelle che vengono dette giganti o supergiganti rosse a seconda delle loro dimensioni. Esse sono stelle caratterizzate da una temperatura molto bassa ma che, nonostante ciò, sono molto luminose. Il motivo per cui si verifica questa condizione è spiegabile ricordando la relazione (2) che lega la luminosità delle stelle non solo alla temperatura ma anche al raggio: le giganti e le supergiganti rosse sono stelle fredde ma con raggi molto elevati e quindi molto brillanti.

Anche questa regione del diagramma corrisponde ad una ben precisa fase evolutiva della vita delle stelle: nel loro nucleo non c'è più idrogeno ma elio isotermo e inerte mentre l'idrogeno continua a bruciare in uno strato attorno al nucleo. Le stelle in questa fase sono dette sottogiganti. Da questo momento in poi le stelle evolvono in seguito ad una serie di contrazioni ed espansioni del nucleo e

²Il Sole si trova circa a metà della sequenza principale

dell'involuppo diventando giganti rosse. In seguito, se la loro massa è sufficientemente elevata, iniziano a bruciare l'elio nel loro nucleo spostandosi dalla regione delle giganti rosse al braccio orizzontale. Quando l'elio si esaurisce, si forma un nucleo di carbonio ed ossigeno all'esterno del quale vi sono due strati concentrici, uno di elio e uno, più esterno, di idrogeno. Successivamente le stelle evolvono prima a luminosità circa costante per poi diventare molto luminose mantenendo una temperatura molto bassa (vicina al limite di Hayashi). In questo stadio le stelle prendono il nome di giganti asintotiche.

A questo punto tutte le stelle con massa minore di 8 masse solari si avvicinano agli stadi finali della loro vita: esse infatti, anche se sono riuscite ad accendere l'elio, non sono abbastanza massive per innescare reazioni che coinvolgano il carbonio e sono soggette a dei puls termici, generati dagli strati di idrogeno ed elio: essi causano l'espulsione dell'involuppo sotto forma di nebulosa planetaria. Di queste stelle rimane dunque solo un nucleo molto caldo e degenere di carbonio e ossigeno, cioè una nana bianca.

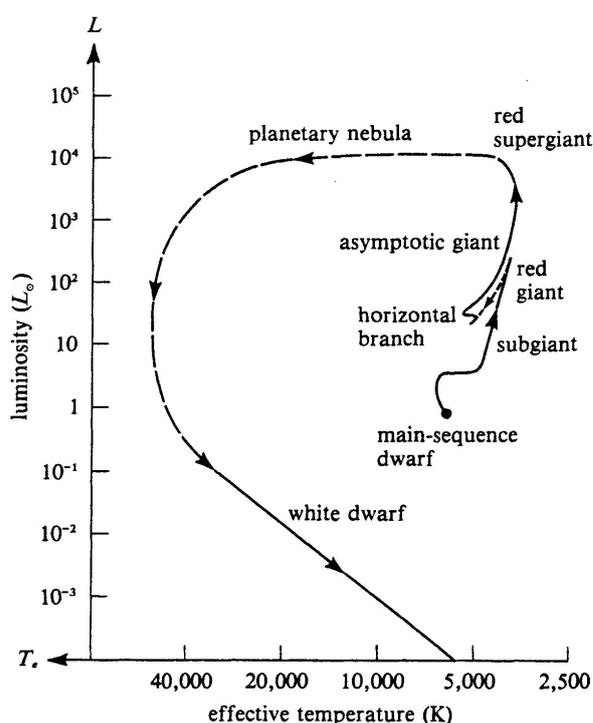


Figura 4: Evoluzione di una stella simile al Sole.

Consideriamo ora una stella con massa maggiore di 8 masse solari. Essa riesce ad accendere il carbonio e a formare elementi più pesanti (neon, ossigeno e silicio). L'inizio di un nuovo bruciamento causa, ogni volta, l'espansione del nucleo e la contrazione dell'involuppo, mentre, ogni volta che un bruciamento termina, il nucleo si contrae e l'involuppo si espande. In questo modo la stella si muove avanti e indietro nel diagramma H-R a L circa costanti, mentre il suo nucleo viene circondato dagli strati di combustione degli altri elementi, formando una struttura a cipolla.

Infine, l'evoluzione di stelle con massa maggiore di 20 masse solari è estremamente veloce e, nel diagramma H-R teorico, viene rappresentato da una linea che si muove da T molto alte a T molto basse ad L quasi costante.

Una volta bruciato il silicio si forma un nucleo di ferro che non può essere trasformato in elementi più pesanti. Esso si accumula nel nucleo fino a raggiungere la massa di Chandrasekhar: a questo punto il collasso ricomincia e causa l'esplosione della stella come supernova di tipo II.

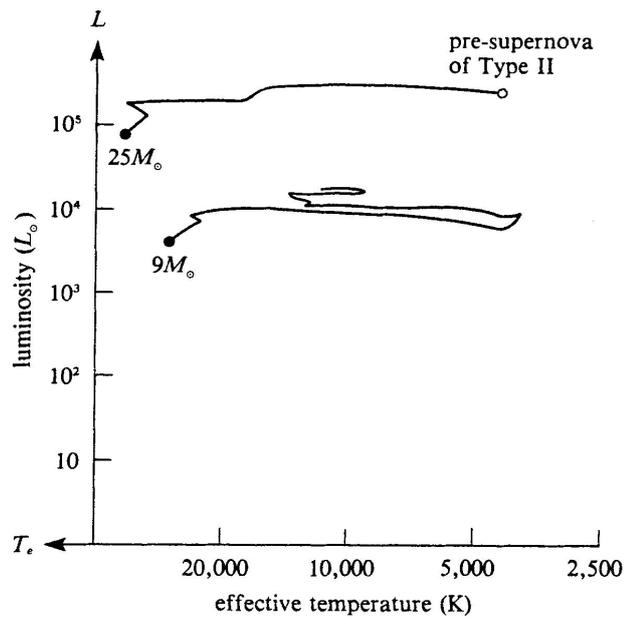


Figura 5: Evoluzione di stelle massicce.

Di seguito è riportata una tabella con i range caratteristici di raggio, luminosità e temperatura per stelle di sequenza principale (MS), giganti (G) e supergiganti (SG).

Tipo di stella	Range L	Range T	Range R
MS	$10^{-2} \div 10^6 L_{sun}$	$3000 \div 50000 \text{ K}$	$0.1 \div 10 R_{sun}$
G	$10^3 \div 10^5 L_{sun}$	$\leq 5000 \text{ K}$	$10 \div 100 R_{sun}$
SG	$10^5 \div 10^6$	$3000 \div 50000 \text{ K}$	$\geq 10^3 R_{sun}$

Zona delle Nane Bianche

Al di sotto della sequenza principale vi è una zona in cui si trovano stelle, dette nane bianche, caratterizzate da temperature elevate ma scarsa luminosità. Come si può immaginare dal nome, le nane bianche sono stelle il cui raggio è molto ridotto: dall' espressione (1) si ottiene infatti che se T è grande e L piccola allora R dovrà essere piccolo a sua volta. Queste stelle rappresentano la fase evolutiva finale di una stella come il Sole: in esse non possono avvenire reazioni nucleari e la pressione necessaria a bilanciare la gravità è fornita dagli elettroni degeneri. A causa dell'elevata temperatura queste stelle sono di colore bianco ma si vedono difficilmente a causa delle scarse dimensioni.

Zona Stelle di Wolf-Rayet

Appena sotto la sequenza principale, a temperature e luminosità più elevate rispetto quelle delle nane bianche, si trova una regione popolata da stelle peculiari, dette di Wolf-Rayet. Esse sono stelle molto massicce che appaiono molto calde a causa della perdita dell'involuppo (strato esterno) e sono molto rare sia perchè se ne formano poche, sia perchè muoiono presto come supernove.

Zona delle Variabili

Sopra la sequenza principale, a circa 7000 K di temperatura, vi è la più importante fascia di instabilità nel diagramma H-R. Essa corrisponde alla regione in cui si trovano stelle la cui luminosità varia a causa delle pulsazioni dell'involuppo e che vengono dette RR-Lyrae e Cefeidi. La loro variabilità costituisce, in astronomia, un metodo per determinare le distanze.

Queste ultime tre zone non sono segnate nelle figure.

:

4 Relazione Luminosità-Temperatura-Raggio

Per capire meglio le relazioni tra le quantità in gioco, guardiamo le seguenti figure e riconsideriamo la relazione (2) riportata di seguito per comodità.

$$L \propto R^2 T^4$$

FIG 3: essa riporta lungo l'asse delle ascisse i valori della temperatura in gradi Kelvin e le classi spettrali, sull'asse primario delle ordinate vi è la magnitudine assoluta mentre sull'asse secondario il valore della luminosità rispetto alla luminosità solare.

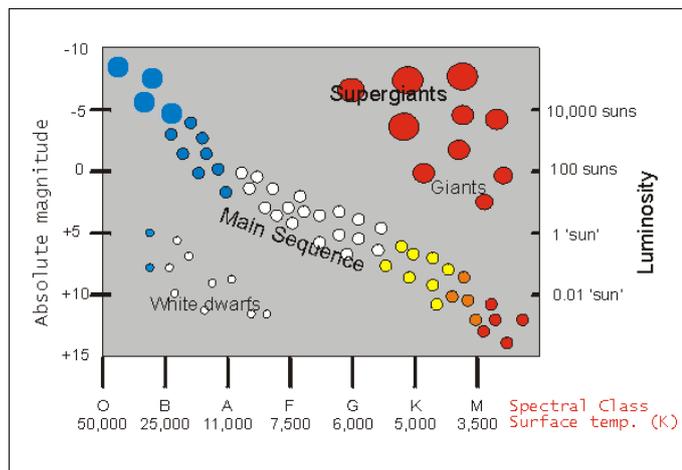


Figura 6: Diagramma H-R: relazione luminosità-raggio

Questa figura è utile per visualizzare le diverse dimensioni delle stelle nel diagramma H-R.

Consideriamo ad esempio le stelle appartenenti alla classe spettrale M che nel grafico sono colorate di rosso: la loro posizione nel diagramma indica che esse hanno una temperatura molto bassa, corrispondente a circa 3500 K. Guardando gli assi delle ordinate si vede facilmente che tra queste stelle molto fredde ve

ne sono alcune molto brillanti ed altre che lo sono molto poco: la differenza è dovuta alle loro diverse dimensioni rappresentate dalla grandezza dei pallini. Alogamente confrontando due stelle con temperatura compresa tra i 25000 ed i 50000 Kelvin si vede che, a parità di temperatura, le nane bianche sono molto meno luminose delle stelle appartenenti alla sequenza principale: ciò è dovuto ancora una volta alla differenza nei raggi delle due stelle come è sottolineato dal fatto che i pallini che rappresentano le white dwarfs sono molto più piccoli.

Di seguito è riportata un immagine che permette di interpretare meglio il legame tra la temperatura delle stelle e il loro colore.

FIG 4: questa figura riassume assieme sia il diagramma di H-R teorico che quello osservativo riportando contemporaneamente, sugli assi delle ascisse, la classe spettrale la temperatura e, su quelli delle ordinate, la luminosità, rispetto quella solare, la magnitudine assoluta.

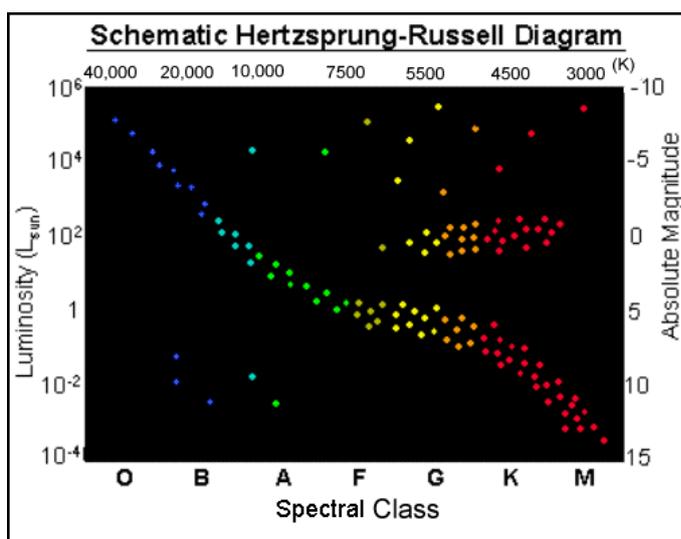


Figura 7: Diagramma H-R: relazione temperatura-colore

A differenza della precedente questa figura non distingue tra le diverse dimensioni delle stelle ma riporta più chiaramente la relazione tra la temperatura, o la classe spettrale, e il colore degli astri. Si vede facilmente, infatti che man mano che la temperatura aumenta i colori delle stelle passano dal rosso, che diventa sinonimo di freddo, al blu, che invece è associato al caldo.