

Centro Osservazione e Divulgazione
Astronomica Siracusa

Il diagramma HR

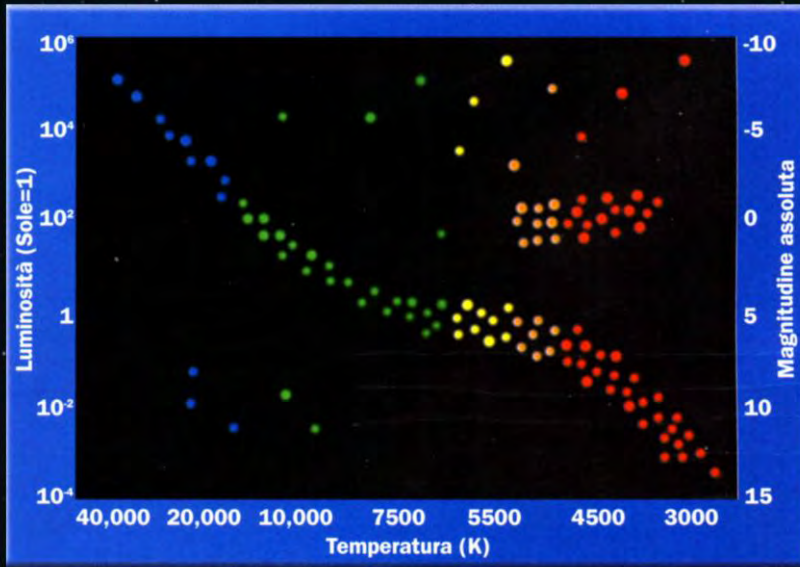
Siracusa, 5 luglio 2013

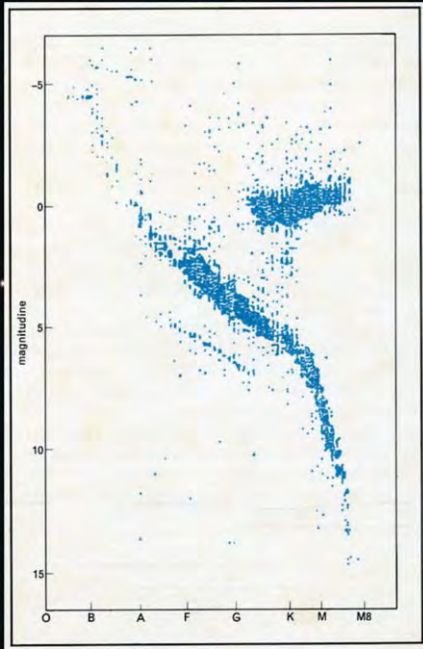


- Il diagramma HR è la rappresentazione grafica della relazione statistica che intercorre tra la luminosità e la temperatura superficiale di una stella.
- Fu enunciato fra il 1911 ed il 1913, indipendentemente l'uno dall'altro, dall'olandese Einar Hertzsprung e dall'americano Henry N. Russell, partendo dalle poche centinaia di stelle per le quali era allora nota la distanza e per cui era perciò possibile risalire alla magnitudine assoluta.



All'epoca, l'unico strumento per risalire alla distanza delle stelle era quello della parallasse trigonometrica, applicabile solo alle stelle nelle immediate vicinanze del sistema solare (poche decine di a.l.)

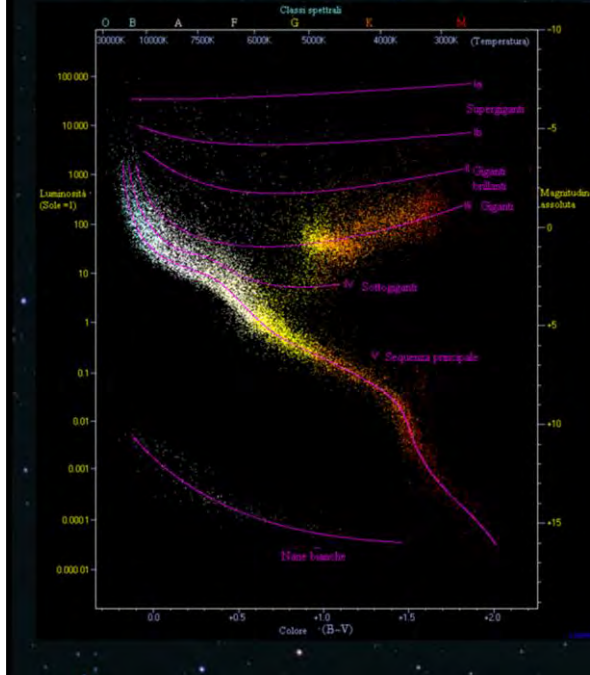




- Nella sua forma originaria, la luminosità della stella era rapportata alla classe spettrale, identificata da una lettera dell'alfabeto.
- La maggior parte delle stelle non si dispone casualmente nel diagramma ma si colloca lungo una fascia che lo taglia obliquamente, detta **sequenza principale**.
- Un secondo raggruppamento di stelle, di minor entità, si colloca nell'angolo in alto a destra.



Una rappresentazione più "completa"



- Sull'asse orizzontale, oltre alla classe spettrale e la temperatura superficiale delle stelle, anche il loro colore, espresso tramite l'indice B-V.



Definizioni

- **Magnitudine assoluta**

- E' la magnitudine apparente (luminosità) che la stella avrebbe se fosse osservata alla distanza convenzionale di 10 parsec (32,6 a.l.)
- Il Sole, se fosse posto a quella distanza, ci apparirebbe come una debole stellina di 4,8_m, appena osservabile ad occhio nudo.
- La relazione che lega magnitudine apparente, assoluta e distanza è la seguente:

$$M = m - 5 \log (d/10)$$

- **Classe spettrale**

- E' la tipologia dello spettro della stella nel visibile, inteso come distribuzione delle righe di assorbimento degli elementi posti sulla sua superficie. E' espressa con una lettera seguita da un numero.

- **Indice di colore B-V**

- E' la differenza tra la magnitudine di una stella misurata in luce blu (B) e quella visuale (V). Il suo valore ci permette di risalire al colore ed alla temperatura superficiale della stella.

HR



Le stelle come “corpi neri”

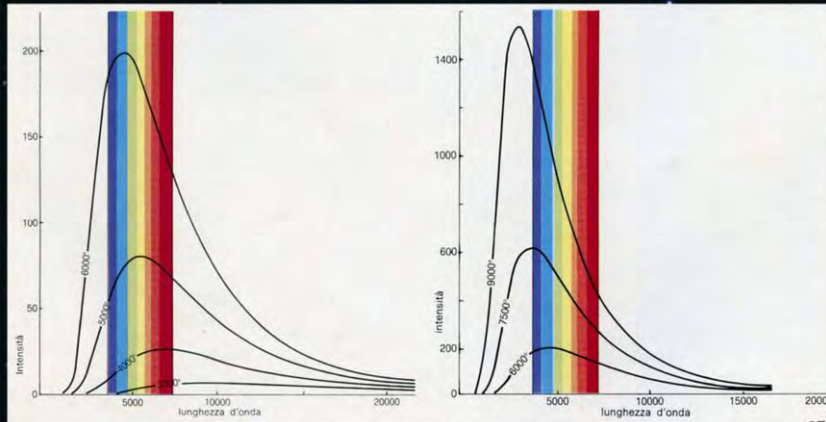
- Il *corpo nero* è un'astrazione usata in fisica per indicare un corpo ideale che assorbe interamente tutta la radiazione incidente, senza rifletterla ed indipendentemente dalla sua lunghezza d'onda.
- Per mantenere il suo equilibrio termico con l'esterno, però, il corpo nero ideale deve anche poter emettere tutta l'energia che riceve, con la stessa efficienza con cui l'assorbe, a qualunque lunghezza d'onda.
- Il corpo nero, pertanto, è simultaneamente un assorbitore ed un emettitore perfetto d'energia.



Una notevole approssimazione del corpo nero ideale può essere realizzata, in laboratorio, con una cavità dotata di una apertura sufficientemente stretta, tale che la radiazione che penetra attraverso di essa venga interamente assorbita per rimbalzi successivi sulle pareti interne del recipiente, essendo del tutto trascurabile la frazione che viene rimbalzata all'esterno attraverso la fessura.

Come emette il corpo nero?

- Il corpo nero emette energia su tutte le frequenze dello spettro, con una distribuzione caratteristica che dipende solo dalla sua temperatura e non dalla sua natura (*curva di Plank*):



La relazione che lega l'intensità di emissione di un corpo nero al variare della temperatura e della lunghezza d'onda fu definita da Max Plank nel 1900 ed è stata il primo grande successo della meccanica quantistica.

- La curva d'emissione del Sole e delle stelle approssima molto da vicino quella del corpo nero; è perciò possibile risalire alla loro temperatura superficiale misurando la distribuzione dell'energia emessa.



Leggi fondamentali del corpo nero

- Legge di Wien:

$$\lambda_{\max} = A/T$$

- Legge di Stefan-Boltzmann

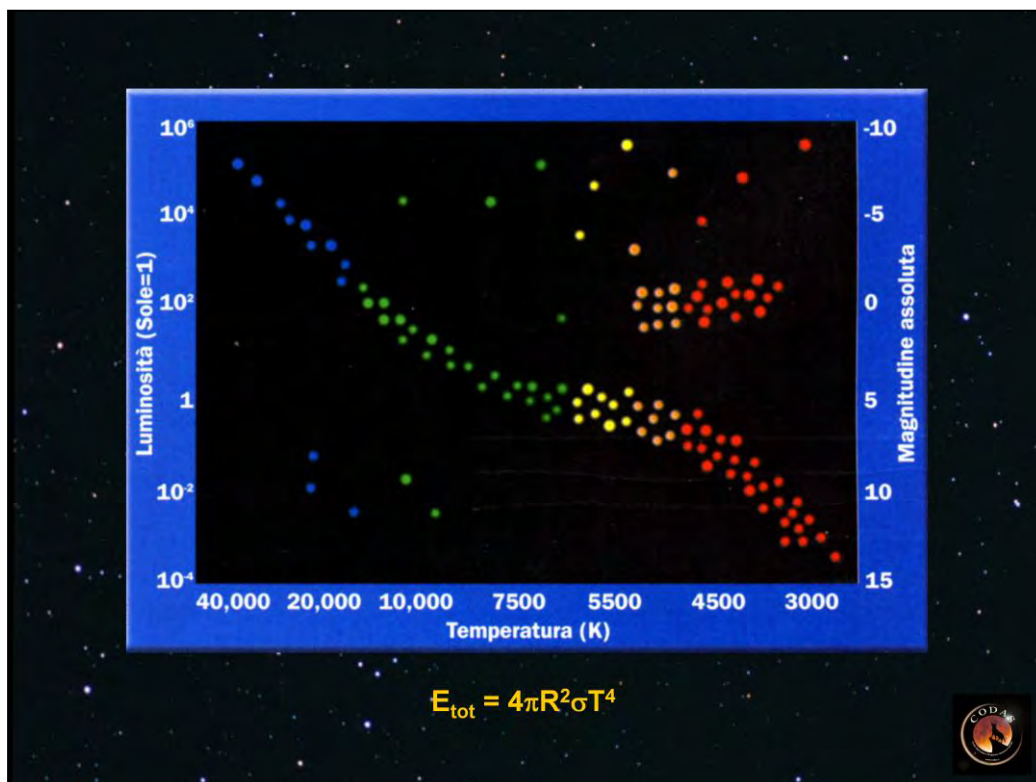
$$E = \sigma T^4$$

8



Nella legge di Wien $A = 0,29 \text{ cm}^\circ \text{ K}$ (o $2900 \text{ micron}^\circ \text{ K}$).

Sigma è la costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5,670 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ }^\circ \text{ K}^{-4}$.



Se si riportano in un diagramma le temperature superficiali delle stelle (o il loro equivalente osservativo, i colori) e le luminosità assolute delle stelle, i punti rappresentativi non si distribuiscono a caso nel diagramma ma tendono a concentrarsi solo in alcune zone. In particolare, la stragrande maggioranza delle stelle del disco galattico (oltre il 90% nei dintorni del Sole) si distribuisce lungo una striscia, detta **Sequenza Principale**, che taglia diagonalmente il diagramma andando, dall'alto verso il basso, dalla zona delle stelle luminose e calde a quella delle stelle deboli e fredde, assumendo la convenzione tradizionale di riportare sulle ascisse le temperature in ordine decrescente (o, il che è lo stesso, i colori che vanno dall'estremità azzurra a quella rossa dello spettro del visibile).

Il Sole (5.800 ° K) si colloca lungo questa sequenza in posizione intermedia, fra le stelle gialle; il suo picco d'emissione ricade nella regione del giallo-verde.

L'emissione luminosa totale, oltre che dalla temperatura superficiale, dipende anche dalla superficie emittente totale; pertanto, applicando la legge di Stefan-Boltzmann alla superficie totale, avremo la luminosità totale; viceversa, nota la luminosità totale e la temperatura della stella, si può risalire alla superficie emittente e quindi alle dimensioni della stella.

In tal modo è possibile risalire sia alle dimensioni relative delle stelle della sequenza principale sia spiegare la presenza di stelle che giacciono sul ramo secondario, in alto a destra, del diagramma.

Queste ultime, pur avendo una bassa temperatura superficiale, hanno un'elevata luminosità assoluta a causa delle loro immense dimensioni (la luminosità è funzione sia della quarta potenza della temperatura superficiale che del quadrato del raggio della stella). Si tratta di stelle **giganti e supergiganti**, che hanno abbandonato la sequenza principale in quanto si avviano alla fase terminale della loro vita. Esse avendo esaurito gran parte del combustibile idrogeno, hanno innescato le reazioni di fusione dell'elio in atomi più pesanti (C, O, etc.); in conseguenza di ciò, gli strati esterni non interessati alla reazione di fusione si espandono nello spazio sotto la spinta della maggiore radiazione emessa dal nucleo, a causa della maggiore temperatura di reazione.

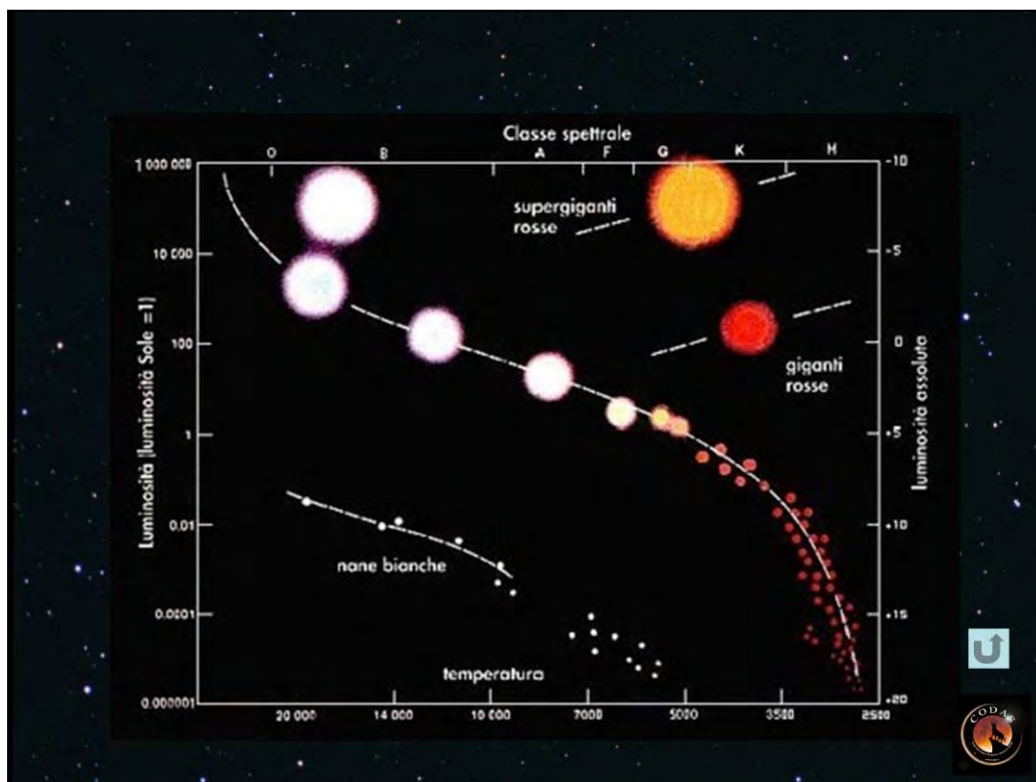
In maniera analoga, possiamo spiegare la presenza di un numero ridotto di stelle caldissime ma poco luminose, collocate nella porzione in basso a sinistra del diagramma. Il loro comportamento è speculare rispetto alle giganti rosse, cioè, pur avendo una temperatura molto alta, hanno una luminosità decine o centinaia di volte inferiore rispetto alle corrispondenti stelle sulla sequenza principale.

Il fatto che, pur essendo caldissime, hanno una bassa luminosità è dovuto solo al loro piccolo raggio. Sono il risultato finale dell'evoluzione stellare, ex giganti rosse che hanno disperso, più o meno esplosivamente, il proprio guscio esterno e di cui sopravvive solo il nucleo, densissimo ma ormai non più attivo. Questo è il c.d. ramo delle **nane bianche**.

In conclusione, la sequenza principale ospita tutte le stelle nella fase normale della loro vita, quella in cui è in atto la trasformazione di idrogeno in elio nel loro nucleo.

La zona intermedia tra la sequenza principale ed il ramo delle giganti è detta *lacuna di Hertzsprung*, ed ospita le stelle che abbandonano la sequenza principale per trasformarsi in giganti; poiché questa è una fase instabile nella

vita di una stella, essa ha una breve durata e perciò abbiamo poche probabilità di osservare stelle durante tale fase; ciò spiega perché tale regione è quasi vuota.

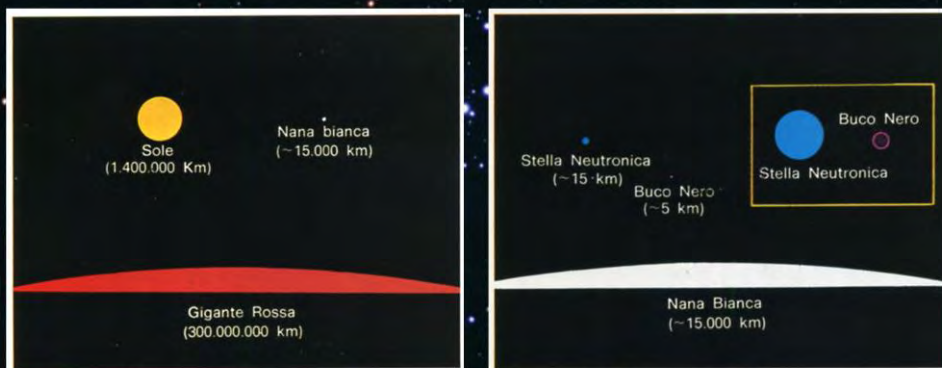


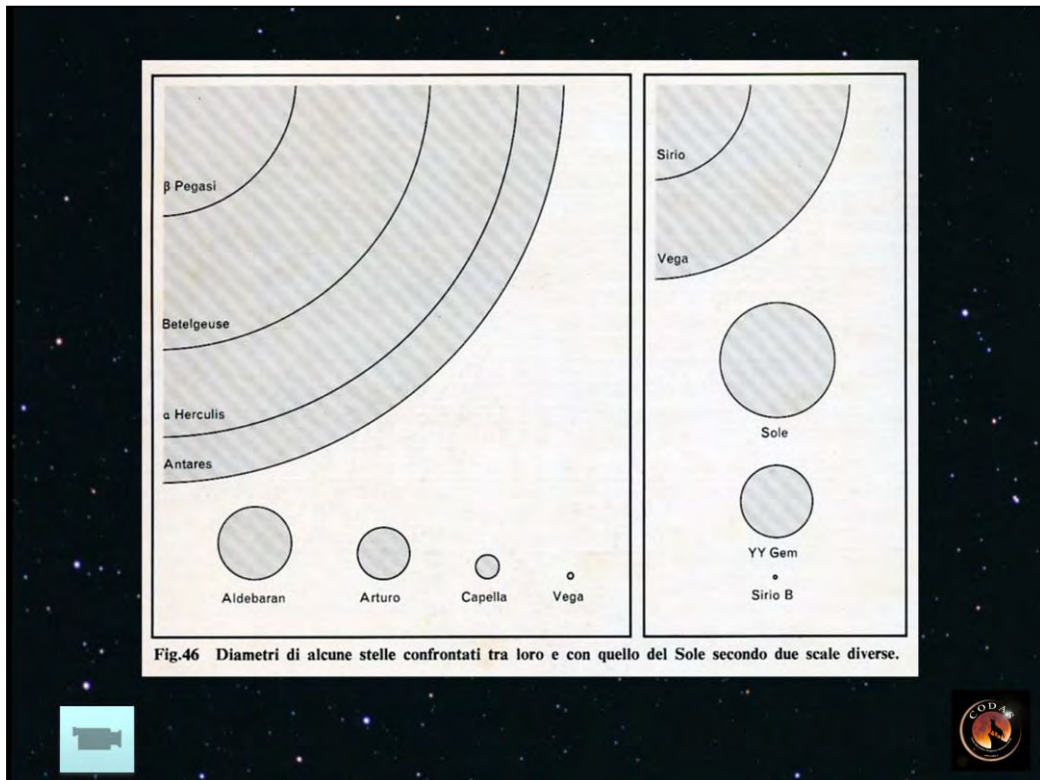
Lungo la sequenza principale, il diametro delle stelle aumenta con la temperatura e luminosità; le stelle di classe M hanno dimensioni, mediamente, della metà del Sole, quelle di classe A circa il doppio, le B circa otto volte, le O dodici volte.

Nel ramo delle giganti, le stelle, com'è prevedibile, hanno diametri notevolmente maggiori e densità molto rarefatte, come conseguenza del diverso meccanismo delle reazioni nucleari all'interno del nucleo. Le giganti F sono quattro volte più grandi del Sole, le G una decina di volte, le M fino a quaranta volte.

Un ulteriore ramo, parallelo a quello delle giganti, riguarda le c.d. *stelle supergiganti*, i cui diametri possono raggiungere valori di centinaia di volte quello del Sole. Alcune, come ϵ Aurigae e VV Cephei hanno diametri che superano di mille volte quello del Sole.

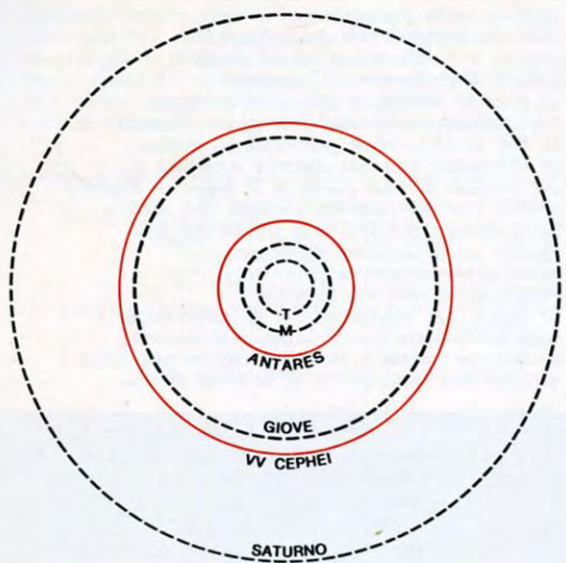
Dimensioni per categoria stellare





Nel ramo delle giganti, le stelle, com'è prevedibile, hanno diametri notevolmente maggiori e densità molto rarefatte, come conseguenza del diverso meccanismo delle reazioni nucleari all'interno del nucleo. Le giganti F sono quattro volte più grandi del Sole, le G una decina di volte, le M fino a quaranta volte.

Un ulteriore ramo, parallelo a quello delle giganti, riguarda le c.d. *stelle supergiganti*, i cui diametri possono raggiungere valori di centinaia di volte quello del Sole. Alcune, come ϵ Aurigae e VV Cephei hanno diametri che superano di mille volte quello del Sole.



Le dimensioni delle supergiganti Antares e VV Cephei confrontate con quelle delle orbite planetarie (T: orbita della Terra; M: orbita di Marte).



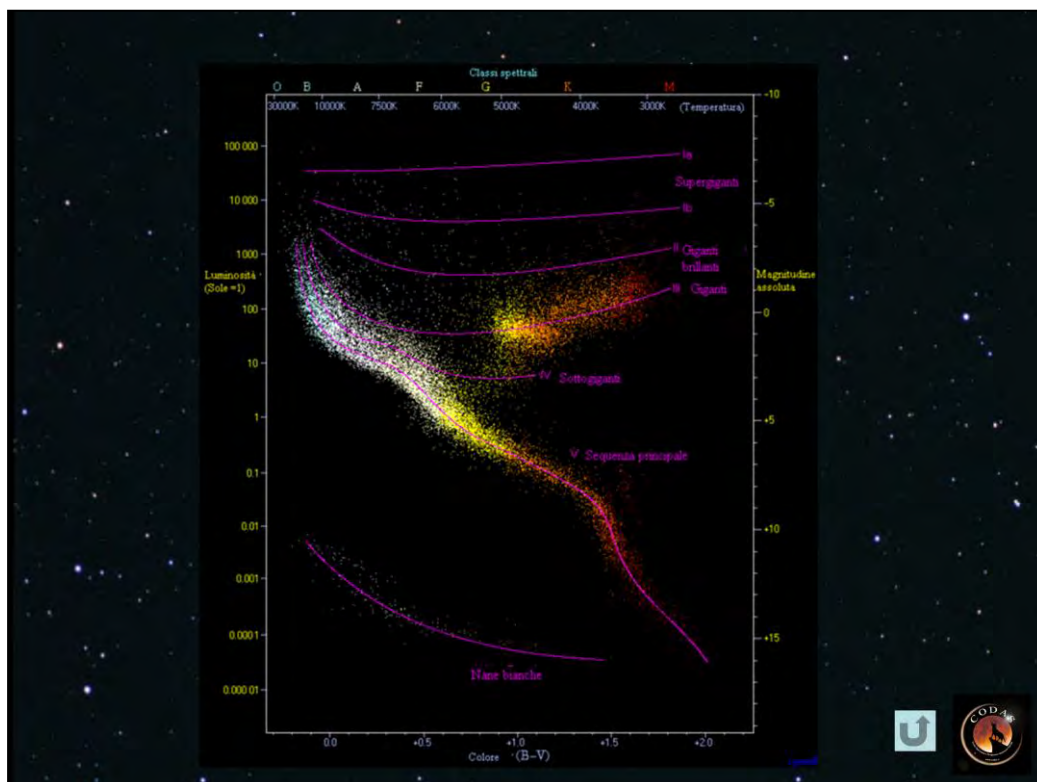
Ricapitolando...

- La Sequenza Principale ospita le stelle nella fase normale della loro vita (fusione dell'idrogeno in elio).
- Il ramo delle Giganti e Supergiganti ospita le stelle che hanno esaurito l'idrogeno nel nucleo e che bruciano l'elio o il carbonio.
- Il ramo delle Nane Bianche ospita ciò che resta delle giganti o supergiganti al termine della loro esistenza, ossia il nucleo caldissimo e densissimo nel quale non sono più possibili ulteriori reazioni nucleari.
- Tutte le stelle di massa $> 0,2$ masse solari diventeranno prima o poi delle stelle giganti.
- In conclusione, il diagramma HR può essere definito come la rappresentazione dell'**evoluzione stellare**.

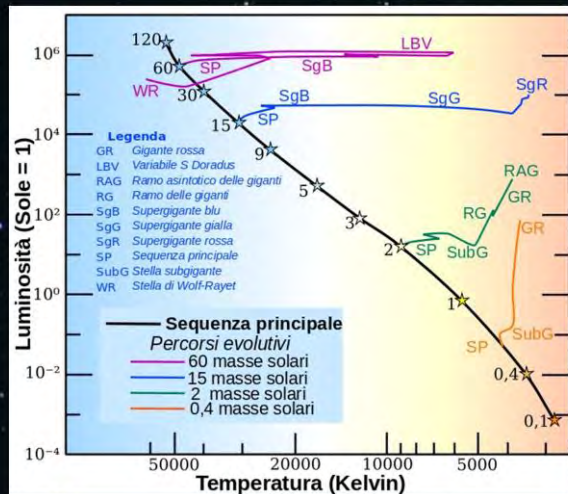


Le giganti con massa $< 0,5$ masse solari non raggiungono nel nucleo la temperatura sufficiente ad innescare la fusione dell'elio ($100 \text{ M}^\circ \text{ K}$).

Le giganti con massa $> 4-5$ masse solari dopo la combustione dell'elio riescono a raggiungere per contrazione la temperatura di un miliardo di gradi, in corrispondenza della quale si ha la fusione del carbonio, che garantisce una ulteriore breve vita residua alla stella.



Evoluzione delle stelle



Tanto più una stella è massiccia e luminosa, tanto più breve sarà la sua vita e tanto prima abbandonerà la sequenza principale.

Tutte le stelle di massa $> 0,2$ masse solari diventeranno prima o poi delle stelle giganti.

Terminata ogni possibile reazione nel nucleo, la maggior parte delle giganti si trasformano in nane bianche.



Il bruciamento dell'idrogeno è tanto più rapido quanto più la stella è luminosa e di massa elevata; quando la gran parte dell'idrogeno nel nucleo è stata bruciata, la stella abbandona la sequenza principale. A quel punto, la stella si espande e si raffredda leggermente, diventando più luminosa, passando in una fase in cui non è in equilibrio (*lacuna di Hertzsprung*), per poi approdare al ramo delle stelle giganti.

Nel **ramo delle giganti**, il nucleo della stella si contrae sotto il peso della gravità, riscaldandosi, e la reazione di fusione si sposta ad un guscio di idrogeno non ancora bruciato che è rimasto intorno al nucleo di elio;

Durante la fase di contrazione, quando il nucleo avrà raggiunto la temperatura di 100 milioni di gradi (massa $> 0,5$ MS) si innescherà la fusione dell'elio, e la stella diventerà più calda e luminosa.

Le stelle molto massicce (massa $> 4-5$ MS), terminata la fusione dell'elio, il nucleo si contrae ancora, sotto il peso delle masse sovrastanti, fino a raggiungere la temperatura di un miliardo di gradi, in corrispondenza della quale si ha l'accensione del carbonio.

Queste dinamiche spiegano l'andamento a zig-zag della posizione della stella nel diagramma HR, una volta abbandonata la sequenza principale: ad ogni innesco di una successiva reazione di fusione, la stella diventa più calda e luminosa, finché il nuovo combustibile non si esaurisce ed esse tornano a raffreddarsi.

L'evoluzione finale delle stelle con massa fino a 8 MS conduce alla formazione di una *nana bianca*, che altro non è che il nucleo della stella, caldissimo, che si è sbarazzato degli strati sovrastanti e nel quale sono cessate le reazioni nucleari. Le nane bianche sono rappresentata sul corrispondente ramo del diagramma HR.

Oltre le 8 MS, l'evento finale è catastrofico (supernova) e ciò che resta dell'astro, alla fine, è una stella a neutroni o un buco nero.

Relazione tra massa e vita delle stelle nella sequenza principale

- 0,3 Ms: 800 miliardi di anni.
- 1 Ms: 10 miliardi di anni.
- 3 Ms: 300 milioni di anni.
- 10 Ms: 100 milioni di anni.
- 30 Ms: 60 milioni di anni.



L'Indice di Colore

- Nel corpo nero c'è una relazione univoca tra la temperatura ed il rapporto tra le intensità di emissione a due diverse lunghezze d'onda.
- Pertanto, per risalire alla temperatura con buona approssimazione è sufficiente misurare l'intensità della radiazione emessa a due distinte lunghezze d'onda.
- Convenzionalmente, si confronta la magnitudine **B** misurata nella regione del blu (filtro azzurro), e quella visuale **V** (filtro giallo).
- La differenza tra i due valori, l'indice di colore B-V, è caratteristica per ogni temperatura del corpo nero.
- Disponiamo pertanto di un modo semplice e rapido per ricavare la temperatura delle stelle.

8

HR



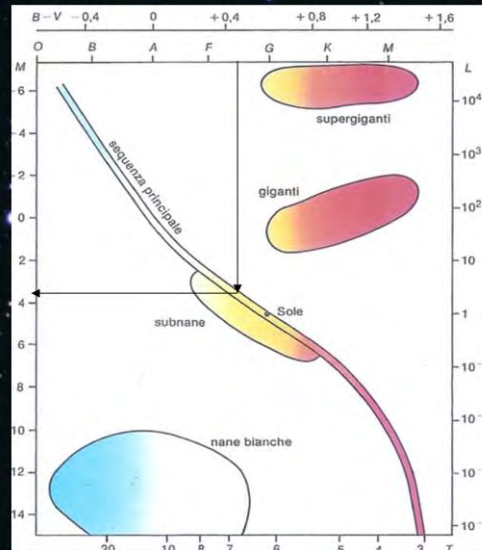
E' sufficiente fare due misure della luminosità della stella, con filtro azzurro e giallo, per risalire alla temperatura della stella e, da qui alla sua magnitudine assoluta.

Come ricavare la distanza delle stelle

- Basta una misura dell'indice di colore e la relazione

$$M = m - 5 \log (d/10)$$

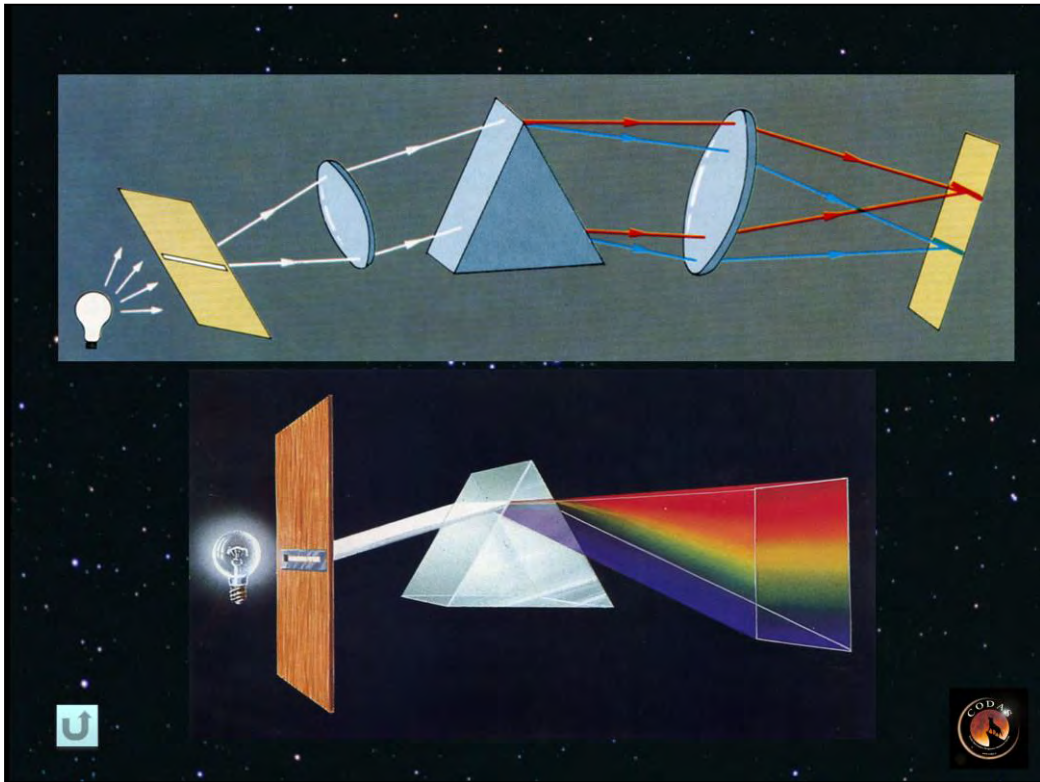
- Per sapere se la stella appartiene alla sequenza principale o al ramo delle giganti, occorre l'analisi del suo spettro.



Spettri e classi spettrali

- La radiazione emessa da una fonte luminosa è normalmente composta da diverse componenti. L'occhio umano non riesce a separare le singole lunghezze d'onda ma dispositivi come il prisma consentono tale operazione, grazie al differente indice di rifrazione delle varie radiazioni elettromagnetiche.

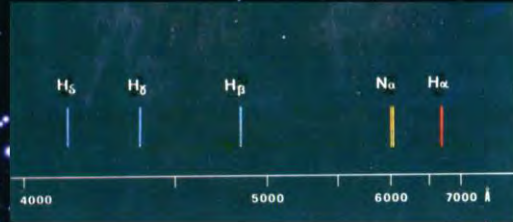




L'immagine della fenditura viene proiettata sullo schermo tante volte quante sono le componenti luminose.

Lo spettro dei gas

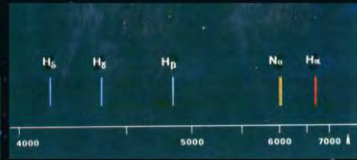
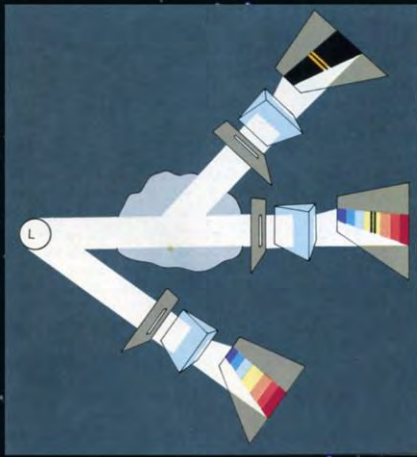
- I solidi, i liquidi ed i vapori ad alta pressione o densità caldi emettono uno spettro continuo.
- L'emissione di un gas caldo a bassa pressione, osservata attraverso uno spettroscopio rivela una successione di righe luminose isolate di diverso colore.
- Se, viceversa, la luce proveniente da una fonte continua attraversa lo stesso gas freddo, lo spettro continuo appare solcato da righe oscure che occupano le stesse posizioni delle precedenti righe luminose.



Ognuna delle righe emesse dal gas non è altro che l'immagine della fenditura a quella particolare lunghezza d'onda.

Aumentando la pressione del gas o del vapore le righe dello spettro si allargano e quando le pressioni diventano altissime lo spettro a righe si trasforma in continuo, caratteristico dei gas compressi.

Lo spettro dei gas



Ad ogni elemento chimico, in determinati range di temperatura, è associabile uno spettro a righe che lo caratterizza in modo univoco.



Le righe oscure non sono altro che la luce mancante in quelle particolari lunghezze d'onda e sottratta alla radiazione incidente. Gli elettroni degli atomi del gas assorbono energia in corrispondenza di determinate lunghezze d'onda e la riemettono in tutte le direzioni, restituendone solo una piccola parte nella direzione del fascio luminoso, che ci apparirà perciò solcato da righe più oscure.

Dato un miscuglio di vapori (idrogeno e sodio, nel caso specifico) è perciò risalire agli elementi che lo costituiscono osservando i due spettri che si sovrappongono.

Esaminiamo lo spettro delle stelle...







Gli strati più esterni della stella possono essere considerati alla stregua di un gas a bassa densità. L'esame delle righe ci permette di identificare quali specie chimiche sono eccitate a quella data temperatura, ma non la composizione della stella. Lo spettro, cioè, non rivela né le specie che richiedono maggiori energie (e quindi temperature più alte) per eccitarsi né quelle che, viceversa, a quella temperatura non esistono più come molecole neutre in quanto completamente ionizzate.

In altre parole, conoscendo quali elementi generano lo spettro di una stella, possiamo risalire, con buona approssimazione, alla sua temperatura.

La classificazione di Harvard

Tipo	Colore	Temperatura	Caratteristiche	Esempio
O	Blu	> 25000° K	Righe dell'elio ionizzato	10 Lac.
B	Blu	11000-25000	Righe dell'elio neutro	Rigel
A	Blu	7500-11000	Righe dell'idrogeno alla massima intensità	Vega
F	Da Blu a Bianco	6000-7500	Le righe dei metalli iniziano ad apparire	Canopus
G	Da Bianco a Giallo	3000-6000	Spettro di tipo solare	Sole
K	Da Arancio a Rosso	3500-5000	Dominano le righe metalliche	Aldebaran
M	Rosso	< 3500	Sono evidenti le bande molecolari	Antares

Tab (1) Classificazione di Harvard

HR

Ogni classe spettrale è a sua volta divisa in 10 sottoclassi.
Il Sole appartiene alla classe spettrale G2.



Poiché c'è una relazione diretta, come abbiamo visto, tra la temperatura della stella e le specie chimiche in grado di generare uno spettro, è possibile catalogare gli spettri per tipologia ed assegnare ad ognuno un range di temperatura; a questo punto, è possibile sovrapporre le varie classi sull'asse delle temperature del diagramma HR.

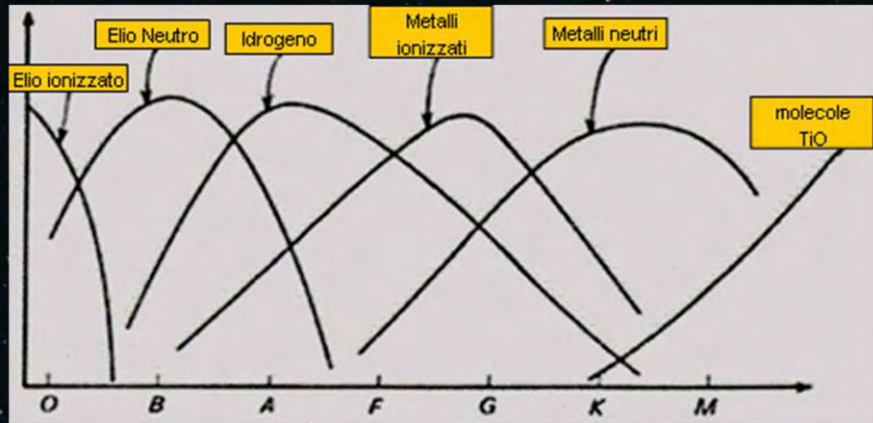
La classificazione più nota è quella di Harvard, che identifica ogni categoria con una lettera. Le lettere sembrano assegnate in maniera casuale a causa delle continue revisioni che la classificazione ha subito durante la sua genesi, con soppressione di alcune lettere, inversione del loro ordine, etc.

L'ordine di può ricordare facilmente con le iniziali delle frasi inglesi:

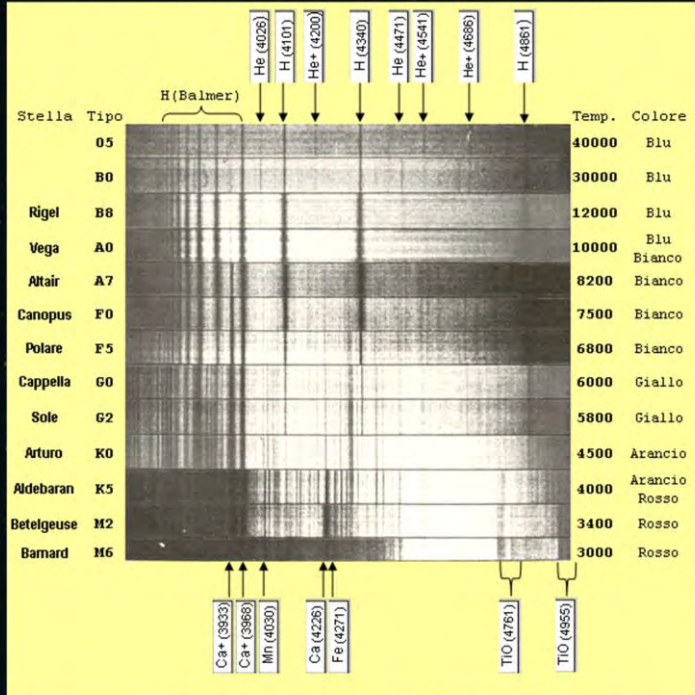
Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me.

Le stelle del ramo delle giganti e supergiganti si distinguono da quelle della sequenza principale, a parità di tipologia spettrale, perché le righe sono più sottili, in quanto, essendo più rarefatte, la loro superficie emette come un gas a bassa pressione.

La classificazione di Harvard



Ci sono atomi e molecole che si eccitano (per urto con altri atomi o per assorbimento di fotoni) a temperature di poche migliaia di gradi, mentre altri restano inerti. Quando la temperatura aumenta, anche gli altri atomi si eccitano, mentre i precedenti si ionizzano progressivamente finché la specie neutra scompare definitivamente e resta solo quella ionizzata, il cui spettro cambia radicalmente.

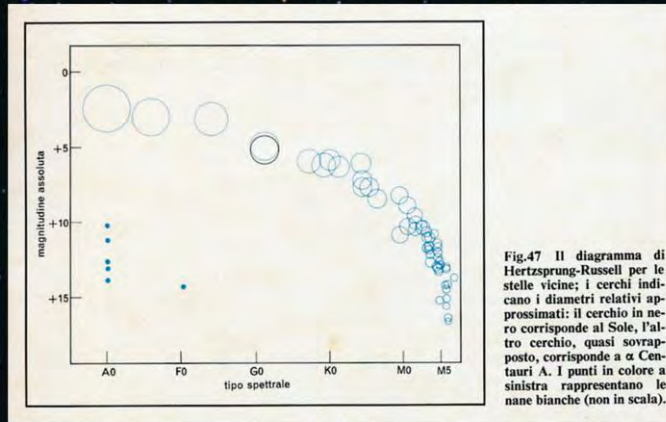


Individuazione della sequenza

- Le stelle del ramo delle giganti e supergiganti si distinguono da quelle della sequenza principale, a parità di tipologia spettrale, perché le righe sono più sottili, in quanto, essendo più rarefatte, la loro superficie emette come un gas a bassa pressione.
- L'analisi dello spettro, pertanto, ci permette di stabilire su quale ramo è collocata una stella.



I dintorni del Sole



- Entro una sfera di 17 a.l. troviamo complessivamente 45 stelle, incluso il Sole.
- Solo tre sono più grandi del Sole (Sirio, Altair e Procione), alcune, come Alfa Centauri, sono equivalenti, la maggior parte sono stelle più piccole, nane rosse e qualche nana bianca.
- Nessuna stella gigante.

HR



La più vicina stella gigante è Antares, a ben 400 a.l.

Lo studio degli ammassi stellari

- Il diagramma HR si è dimostrato uno strumento molto potente per lo studio degli ammassi stellari.
- Il grafico viene costruito su stelle poste alla stessa distanza dal Sole ed omogenee quanto ad origine.
- Dall'analisi della distribuzione delle stelle componenti l'ammasso è infatti possibile ricavare preziose informazioni sull'età dell'ammasso, sulla sua evoluzione presente e futura, sulle caratteristiche della nube di gas da cui lo stesso ammasso ha avuto origine.

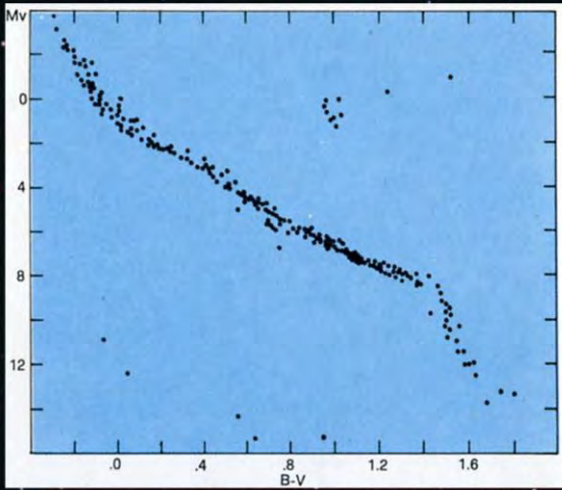
HR



Il diagramma HR applicato senza distinzioni su tutte le stelle conosciute, in una determinata regione dello spazio, è viziato da un effetto di selezione che privilegia le stelle più splendidi, visibili a maggiore distanza, rispetto alle più deboli. In particolare, le stelle del ramo delle giganti sono assai meno numerose delle corrispondenti stelle della sequenza principale (circa l'1%), rispetto a quanto non si ricavi visivamente dal diagramma, che pertanto dà una visione falsata del rapporto tra stelle nane e stelle giganti. Le nane rosse, dal canto loro, pur costituendo la grande maggioranza della popolazione stellare, hanno una luminosità da 100 a 10.000 volte inferiore a quella del Sole, perciò cessano di essere visibili ad occhio nudo già alla distanza di appena 5 a.l.

Conviene, pertanto, fare riferimento a gruppi di stelle che siano tutta alla medesima distanza da noi e, possibilmente, abbiano un'origine comune. L'omogeneità delle componenti del diagramma permette di dedurre utili informazioni sulla storia dell'ammasso.

Caso 1 – Ammassi aperti giovani



- Ammasso del Presepe, M44.
- Quasi tutte le stelle si collocano sulla sequenza principale.
- Solo poche si sono trasformate in giganti o nane bianche.
- Et  non superiore a qualche centinaio di milioni di anni.

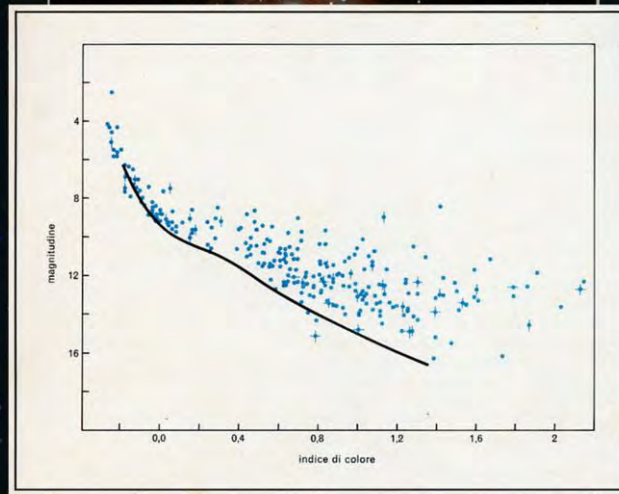


Gli **ammassi aperti** si trovano quasi esclusivamente in corrispondenza del nucleo e del piano galattico della Via Lattea.

Sono caratterizzati da stelle di *popolazione I*, con forte prevalenza di astri molto giovani e massicci, spesso in associazione con i residui della nebulosa da cui hanno avuto origine.

La loro forma   generalmente irregolare, a causa dell'effetto disgregante prodotto dall'attrazione gravitazionale della Galassia.

Caso 2: ammassi aperti in formazione



M42

- Solo le stelle più luminose giacciono lungo la sequenza principale.
- Le altre si trovano nella fase di protostella (pre-sequenza), in contrazione ed in cui non si sono ancora innescate le reazioni di fusione nel nucleo.
- Naturalmente, non ci sono stelle giganti.
- Età dell'ordine di qualche milione o decina di milioni di anni.

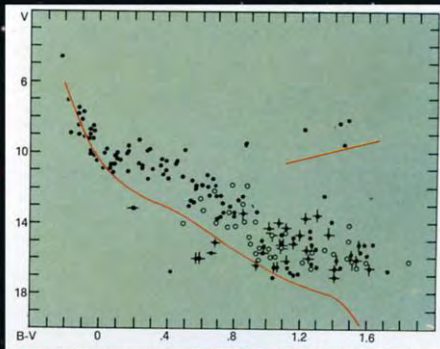


Una stella in contrazione è più grande del normale per cui, a parità di temperatura, ci appare più luminosa di una che ha terminato questa fase e giace sulla sequenza principale. Contraendosi, il suo raggio diminuisce e la temperatura aumenta; conseguentemente, il punto che la rappresenta nel diagramma HR si sposta da destra a sinistra, fino a raggiungere la sequenza e permanervi per tutta la durata della sua vita normale, quella cioè in cui avviene la fusione dell'idrogeno nel nucleo.

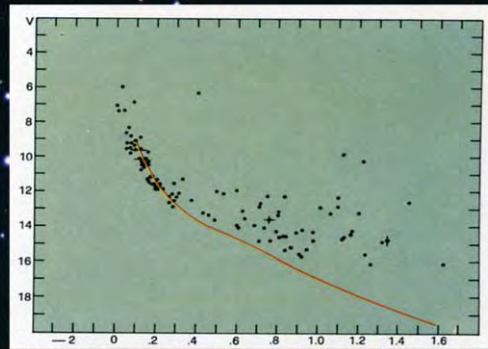
La linea continua rappresenta il punto di arrivo della protostella, quello in cui iniziano le reazioni nucleari; tale curva viene detta **linea d'età zero**.

Maggiore è la massa della stella, più rapida sarà la sua evoluzione verso la sequenza principale; come si vede dal grafico, ci arrivano prima le stelle più massicce e molto più tardi le stelle di piccola massa.

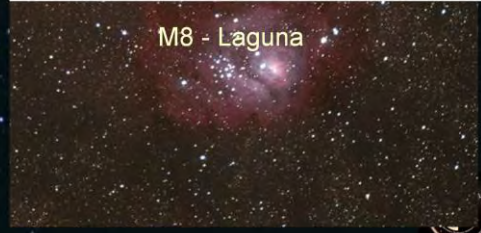
Caso 2: ammassi aperti in formazione



NGC 2264



M8 - Laguna

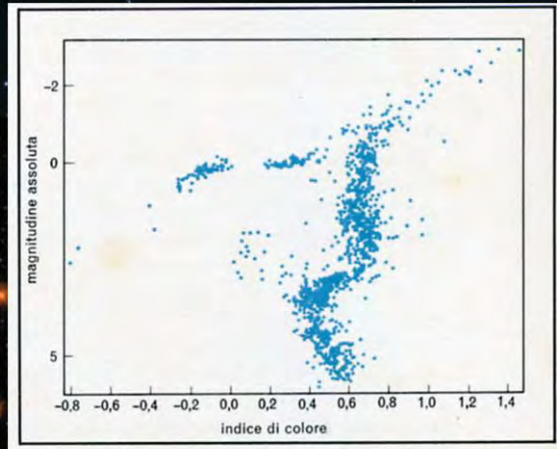


Una stella in contrazione è più grande del normale per cui, a parità di temperatura, ci appare più luminosa di una che ha terminato questa fase e giace sulla sequenza principale. Contraendosi, il suo raggio diminuisce e la temperatura aumenta; conseguentemente, il punto che la rappresenta nel diagramma HR si sposta da destra a sinistra, fino a raggiungere la sequenza e permanervi per tutta la durata della sua vita normale, quella cioè in cui avviene la fusione dell'idrogeno nel nucleo.

Maggiore è la massa della stella, più rapida sarà la sua evoluzione verso la sequenza principale; come si vede dal grafico, ci arrivano prima le stelle più massicce e molto più tardi le stelle di piccola massa.

Caso 3: ammassi globulari

- Sono strutture generalmente più massicce degli ammassi aperti, distribuite quasi esclusivamente nell'alone galattico.
- Tre differenze fondamentali rispetto agli ammassi aperti:
 - manca il ramo delle stelle più luminose della sequenza principale;
 - è molto sviluppato il ramo delle giganti;
 - assenza di metalli nei loro spettri.



M3

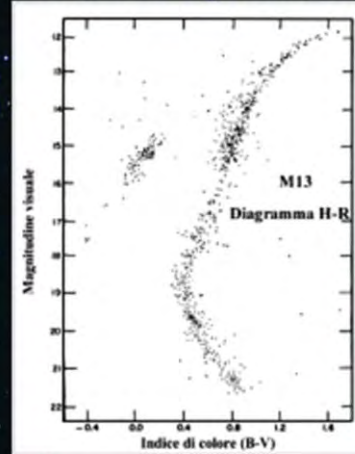
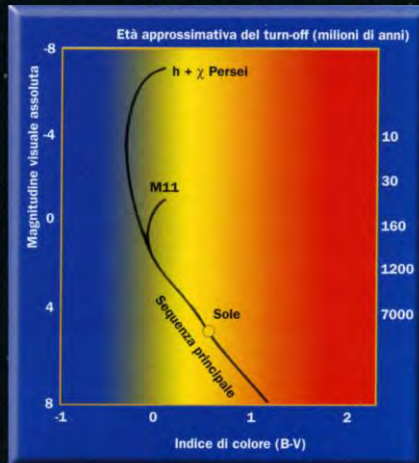
Il fatto che manchi la parte più luminosa della sequenza principale e che, viceversa, sia abnormemente popolato il ramo delle giganti indica che le stelle più grandi e luminose, a vita più breve perché bruciano con grande velocità il loro combustibile interno, hanno terminato l'idrogeno nel loro nucleo, abbandonando perciò la sequenza principale.

L'analisi spettrale evidenzia che si tratta di astri di *popolazione II*, cioè molto vecchi e poveri di metalli, di età non inferiore a 12 miliardi di anni. La loro formazione, quindi, risale alle prime fasi di vita della Via Lattea, interrompendosi poco dopo.

Il diagramma HR degli ammassi globulari rappresenta l'evoluzione futura di quello degli ammassi aperti o delle stelle di una regione qualsiasi della regione del disco galattico, fatta salva la presenza di metalli.

Come si calcola l'età degli ammassi?

- L'età degli ammassi viene determinata sulla base del loro **punto di spegnimento (turn-off)**, nel tratto ascendente della sequenza principale del diagramma H-R.
- Tanto più breve è la sequenza principale, tanto più popolato sarà il ramo delle giganti rosse e conseguentemente vecchio l'ammasso.



HR



Col trascorrere del tempo, man mano che le stelle più calde e massicce esauriscono il combustibile a loro disposizione ed abbandonano la sequenza principale per entrare in quella delle giganti rosse, la posizione del punto di spegnimento si sposta sempre più in basso

La sequenza principale, quindi, si accorcia e presenta, nel tratto terminale, una curvatura verso destra nella quale si collocano le stelle giunte al termine del loro ciclo normale. Tanto più in basso cade il punto di turn-off, tanto più vecchio è l'ammasso.

La posizione del punto di spegnimento è quindi stata usata per datare l'età degli ammassi stellari.

Nel grafico riportato, le stelle dell'ammasso aperto h e chi Persei giacciono quasi tutte sulla sequenza principale, il che denota un'età di poche centinaia di milioni di anni. M11, invece ha un'età stimata in qualche miliardo di anni.

M13 invece, ha un turn-off che inizia a partire dalle stelle di classe spettrale analoga al Sole; conseguentemente, l'età si colloca oltre i 10 miliardi di anni.

