



X CORSO D'INTRODUZIONE ALL'ASTRONOMIA

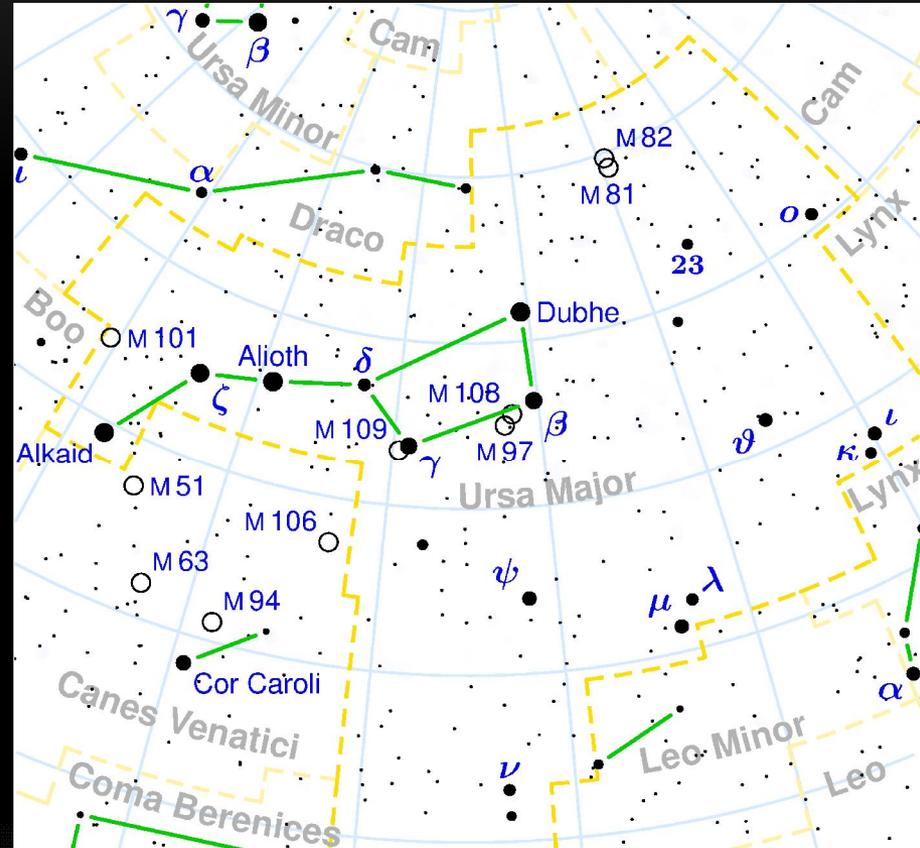
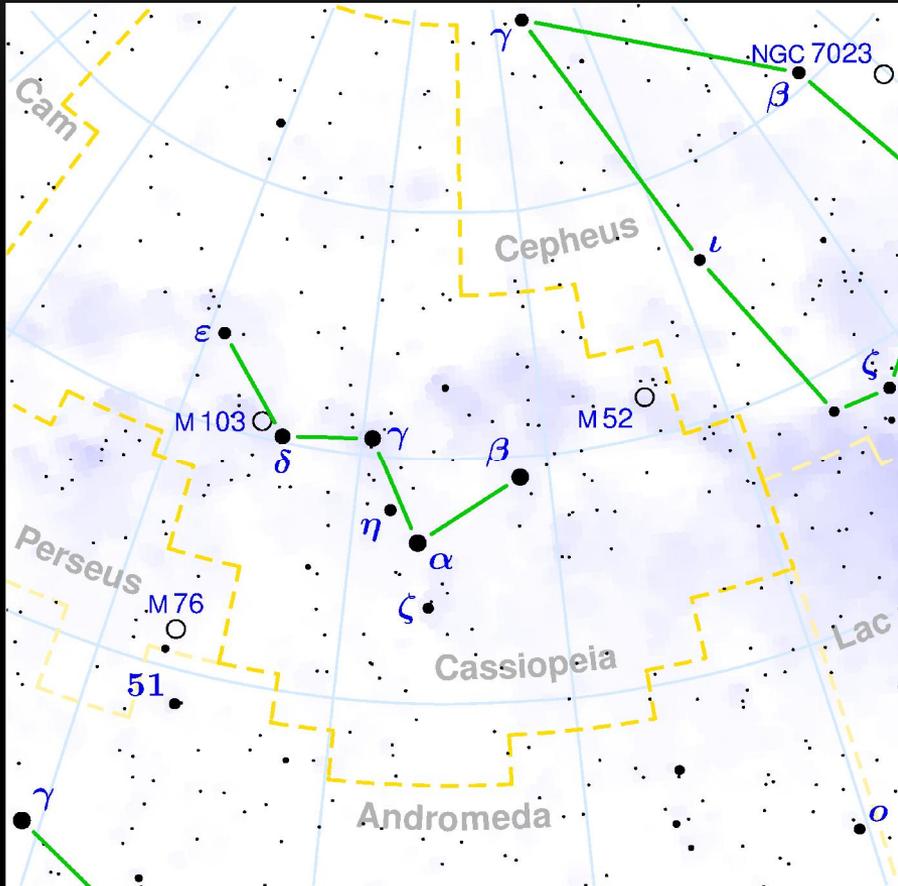
# LE STELLE

# Geografia delle stelle: le Costellazioni

- Le costellazioni sono il sistema più tradizionale e più pratico per orientarsi nella volta celeste, sia ad occhio nudo che con strumenti amatoriali.
- Si tratta di allineamenti fittizi tra le stelle più appariscenti, nei quali la tradizione popolare identificava personaggi o animali della mitologia.
- Sono complessivamente 88 le costellazioni della volta celeste: 48 sono quelle tradizionali tramandate dall'antichità greca e mesopotamica e codificate da Tolomeo intorno al 150 a.C. Le restanti furono progressivamente introdotte a partire dal XVII secolo, man mano che l'esplorazione del nostro mondo portava alla parallela scoperta di nuovi cieli ignorati fino a quel momento.







# La nomenclatura di Flamsteed

- Con l'uso dei telescopi, il numero di stelle identificate cresce progressivamente. L'utilizzo dell'alfabeto non è più sufficiente a classificare le stelle.
- Fu così che, nel XVIII sec., John Flamsteed, per il suo catalogo di oltre 3000 stelle, utilizzò i numeri invece delle lettere dell'alfabeto, ma sempre seguiti dal genitivo latino della costellazione.
- Essi non vengono più assegnati in ordine decrescente di luminosità, ma in funzione della loro posizione, partendo dalla stella più occidentale della costellazione.
- Nell'uso comune, anche professionale, i due sistemi convivono anche ai nostri giorni. Generalmente, si usa la classificazione di Bayer e, dove non è possibile, si passa a quella di Flamsteed (ad es., la stella 51 Peg o la 61 Cyg).



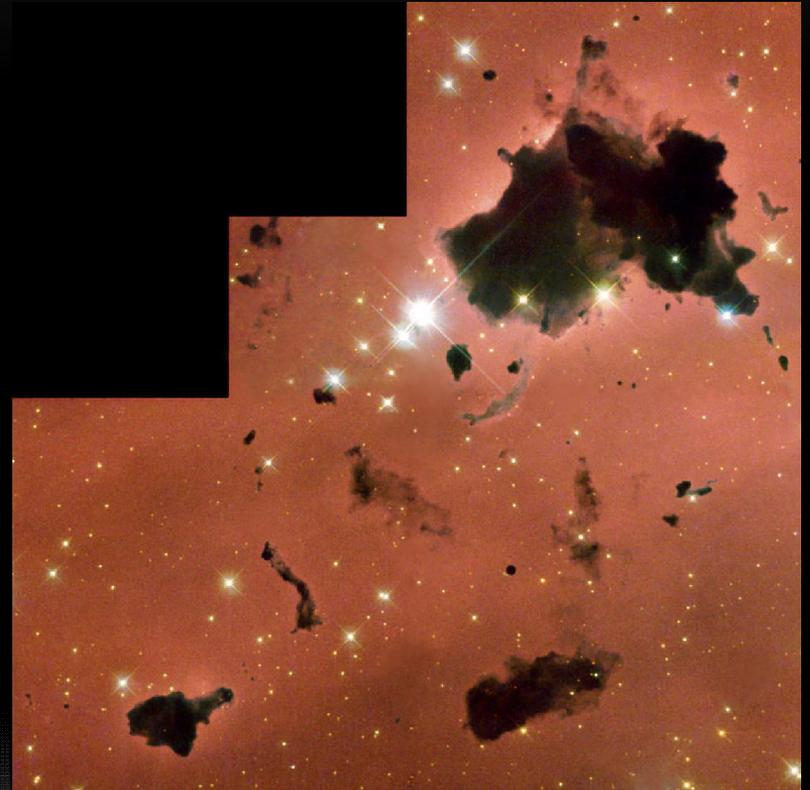
# Come nascono le stelle

- Le stelle si formano a partire dalla materia interstellare, costituita prevalentemente da idrogeno e, in misura minore, da elio, con tracce in quantità variabili di elementi più pesanti.
- Laddove tale materia è presente in abbondanza, ad es. nelle nubi di gas, molto abbondanti in alcune regioni della galassia come i bracci a spirale, vi è una maggiore genesi di nuove stelle.
- Il processo s'innesca a partire da una instabilità gravitazionale (ad es., l'esplosione di una supernova) che provoca un aumento temporaneo della densità in alcune zone della nube. Se si supera un valore critico (definito come *instabilità di Jeans*), la forza di gravità prende il sopravvento sulle forze di dispersione del gas, e la materia inizia a collassare.



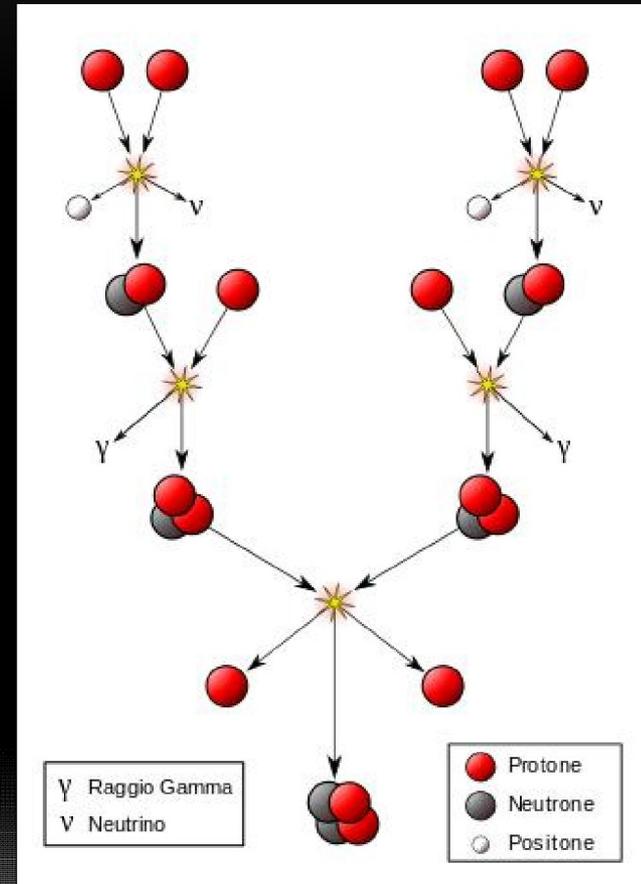
# I «globuli di Bok»

- Il processo di progressiva contrazione del gas interstellare può durare anche diversi milioni di anni e porta alla formazione di densi agglomerati di gas e polveri oscure, noti come *globuli di Bok*.
- Essi ci appaiono come delle aree scure sul fondo luminoso della nebulosa, perché la loro temperatura è ancora troppo bassa.
- Presentano una massa compresa tra 10 e 50 masse solari ed un'estensione di circa un anno luce.

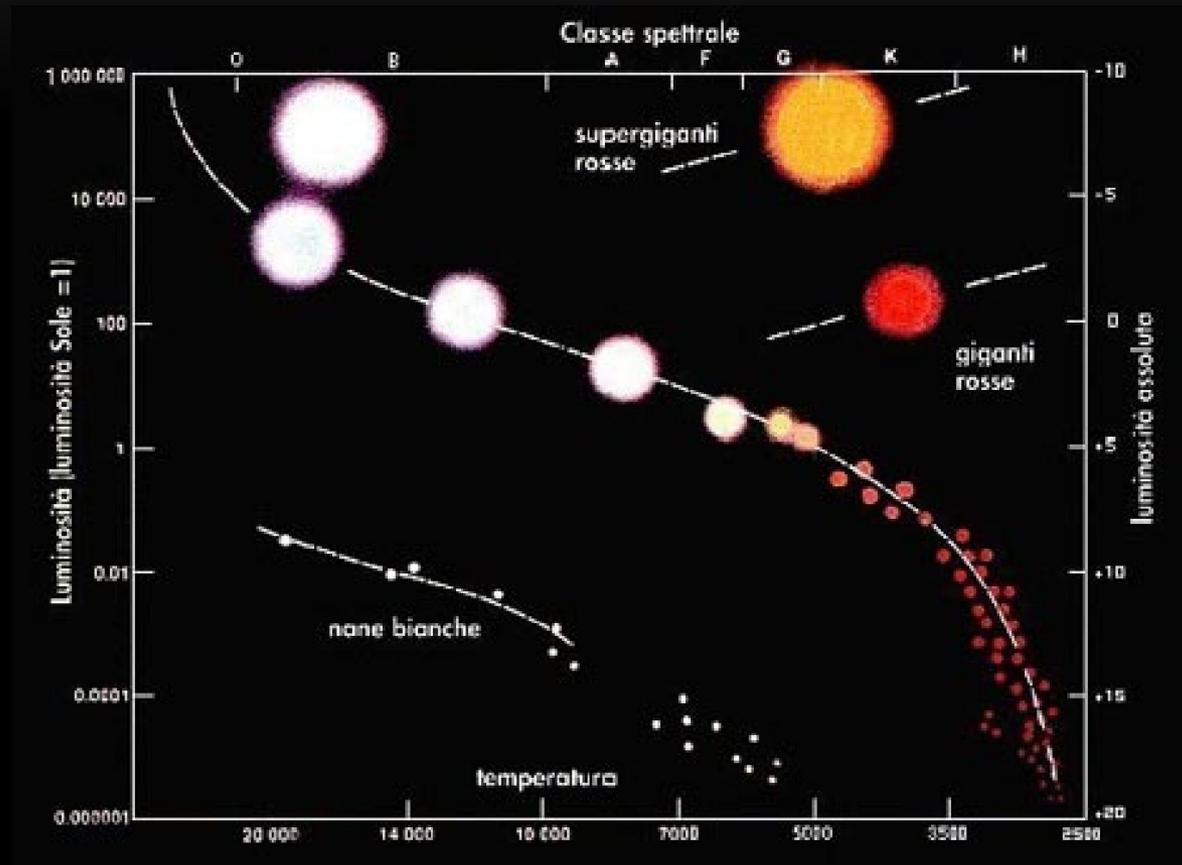


# Nascita della stella

- Con il progressivo aumento della densità, la temperatura cresce e così l'emissione di radiazione, fino a quando la protostella non inizia ad emettere luce visibile.
- Quando la temperatura all'interno del nucleo raggiunge i 10 milioni di gradi, si realizzano le condizioni perché s'innesci la fusione nucleare dell'idrogeno in elio.
- Il meccanismo di fusione è la c.d. *catena protone-protone*.
- Affinché tali condizioni si verificino, la protostella deve avere una massa superiore a 0,1 masse solari.
- Il vento solare della nuova stella spazza via gli strati più esterni della protostella.



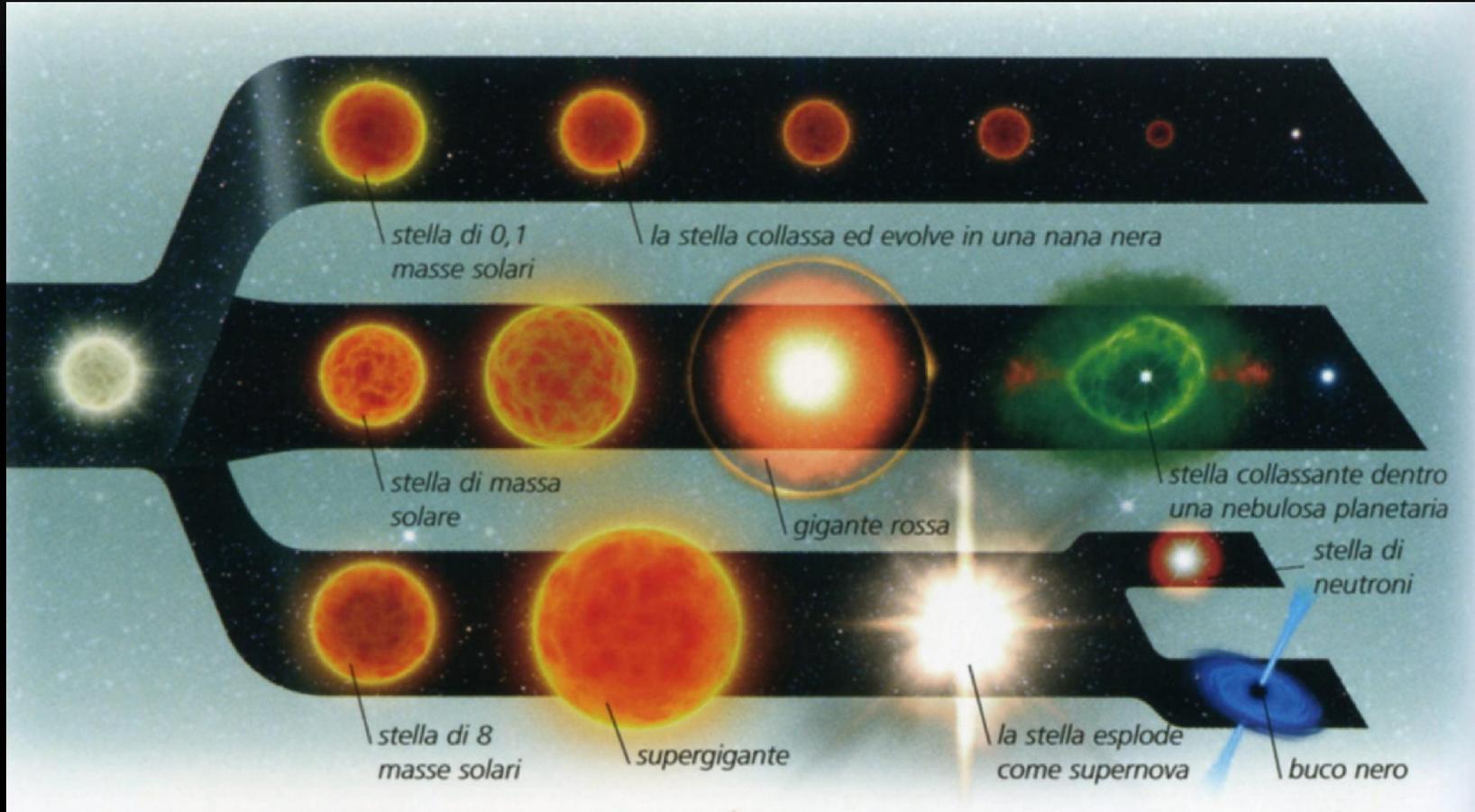
# Il diagramma HR



- Il diagramma HR è la rappresentazione grafica della relazione statistica che intercorre tra la luminosità e la temperatura superficiale (e, quindi, la massa) di una stella.
- 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, gonfiandosi enormemente rispetto alle dimensioni iniziali.
- 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.

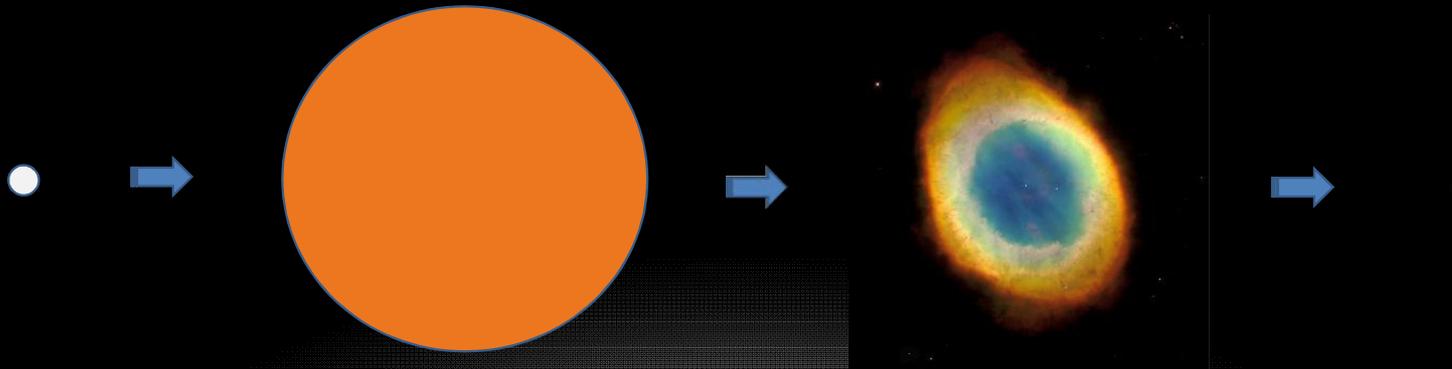


# Percorsi evolutivi



# Caso 1 – Evoluzione delle stelle con massa fino a 8 volte quella solare

- Costituiscono il 97% delle stelle della Galassia.
- Con l'esaurimento dell'idrogeno nel nucleo, le reazioni di fusione nucleare proseguono con dinamiche che variano in funzione della dimensione della stella.
- Questa abbandona la sequenza principale ed aumenta enormemente il proprio volume per trasformarsi in una stella *gigante rossa*.
- Quando le reazioni di fusione non sono più possibili, l'astro termina la propria esistenza sotto forma di *nebulosa planetaria*, al termine della quale resta il solo nucleo sotto forma di *nana bianca*.



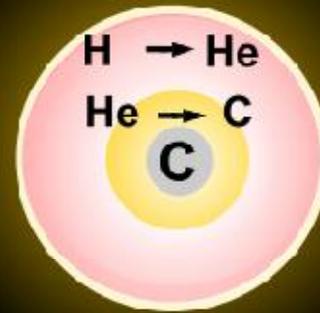
# Le giganti rosse

- Terminata la fusione dell'idrogeno nel nucleo, cessa l'emissione di radiazione che controbilancia la forza di gravità della stella. Il nucleo inizia a contrarsi sotto il peso della sua stessa massa e degli strati sovrastanti. Per effetto di ciò, si riscalda.
- Quando il nucleo ha raggiunto una temperatura sufficiente, la reazione di fusione dell'idrogeno s'innesca in un guscio di materia adiacente.
- In seguito alla massiccia ripresa dell'emissione della radiazione, gli strati esterni della stella si dilatano enormemente e, contestualmente, si raffreddano: la stella si è trasformata in una gigante rossa, collocandosi nel corrispondente ramo del diagramma HR.
- Se la massa della stella è sufficiente ( $> 0,5 M_{\odot}$ ), il nucleo continua a contrarsi fino a quando, raggiunta la temperatura di 100 milioni di gradi, non s'innesca la fusione dell'elio in carbonio, che procede contemporaneamente alla fusione dell'idrogeno nel nucleo circostante.



# Le giganti rosse

- Quando l'elio nel nucleo si esaurisce, il nucleo a base di carbonio e ossigeno si contrae e si riscalda ulteriormente.
- Se la massa della stella è sufficiente, a questo punto può innescarsi la fusione dell'elio nel guscio di materia che circonda il nucleo. All'esterno avremo un ulteriore guscio in cui avviene la fusione dell'idrogeno.
- Quando ciò si verifica, questa è la fase finale della vita di una stella di massa fino a 8 volte quella del Sole: la temperatura del nucleo non riesce a raggiungere il valore sufficiente per innescare la fusione del carbonio.
- La stella diventa molto instabile e, con una serie di parossismi, espelle nello spazio gli strati esterni, dando momentaneamente origine ad una nebulosa planetaria e, quindi, ad una nana bianca.



# Le giganti rosse



- Nella fase di gigante, il Sole potrebbe aumentare le proprie dimensioni fino a 130 volte quelle attuali, arrivando forse a raggiungere l'attuale orbita della Terra.
- Ciclo di vita del Sole (valori indicativi):
  - Sequenza principale: 10 miliardi di anni.
  - Gigante rossa: 2 miliardi di anni.
  - Nebulosa planetaria: 10.000 anni
  - Nana bianca: 100 miliardi di anni (?)

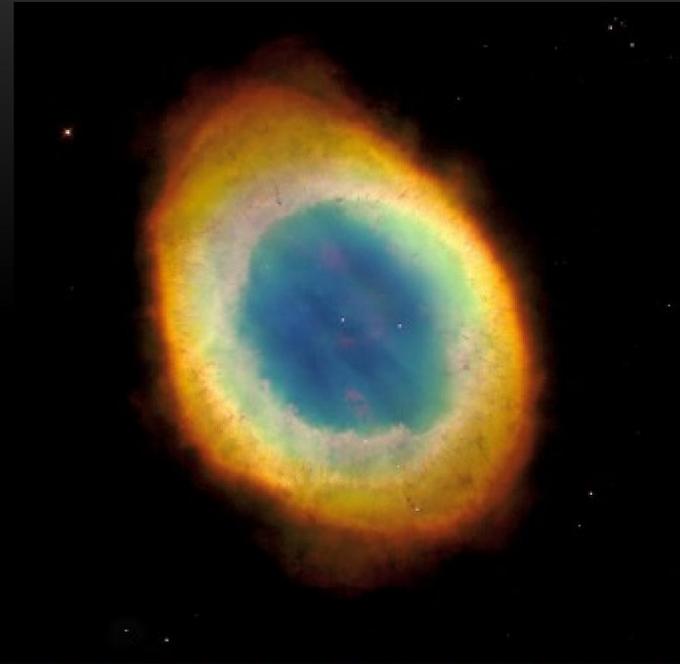
# Le nebulose planetarie

- Con una serie di parossismi, la stella disperde nello spazio i suoi strati esterni, che formano una nuvola di materiale che si espande attorno al nucleo.



# Le nebulose planetarie

- L'intensa emissione di radiazione UV rilasciata dal nucleo caldissimo ionizza i gas, che ci appaiono pertanto luminosi.
- La simmetria delle nebulose planetarie non è necessariamente sferica. Essa può assumere altre forme, a seconda delle dinamiche interne della stella.
- Quando i gas si saranno rarefatti al punto da non emettere più luce, la nebulosa planetaria cessa d'esistere e resta solo il nucleo inerte e caldissimo, che prende il nome di nana bianca.



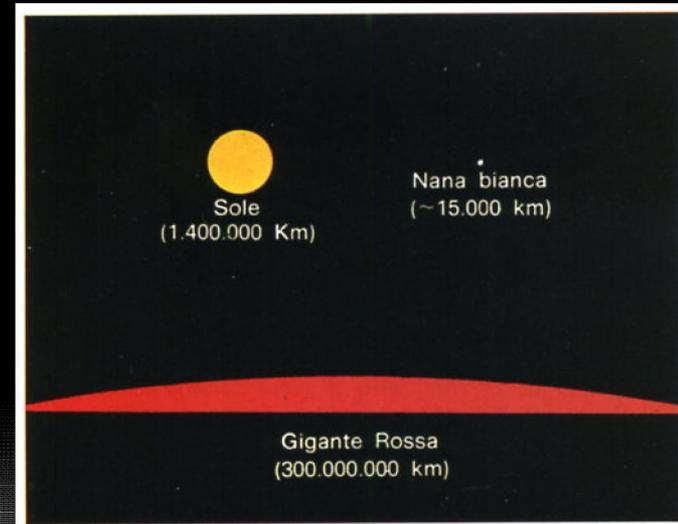
Planetary Nebula M2-9  
PRC97-38a • ST ScI OPO • December 17, 1997  
B. Balick (University of Washington) and NASA

HST • WFPC2



# Le nane bianche

- Il nucleo della stella sopravvive sotto forma di nana bianca. Se la stella originaria aveva massa inferiore alla metà del Sole, esso conterrà solo elio; in tutti gli altri casi, sarà costituito prevalentemente da carbonio e ossigeno.
- Si tratta di un oggetto dalle dimensioni paragonabili a quelle di un pianeta, ma con una massa dell'ordine di grandezza del Sole, quindi con densità altissime, dell'ordine di  $1 \div 1,5 \text{ t / cm}^3$ , e temperature che possono arrivare anche a diverse decine di migliaia di gradi.



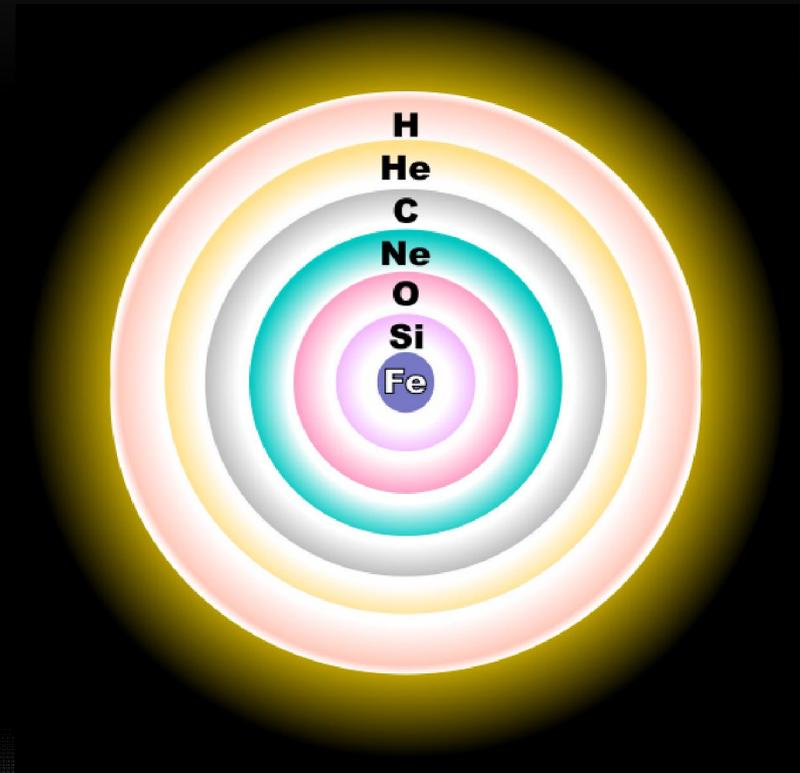
# Le nane bianche

- Nelle nane bianche la materia si presenta in uno stato detto *degenere*. Gli elettroni non sono più legati ai nuclei degli atomi, che possono così avvicinarsi tra loro occupando uno spazio minore. La pressione degli elettroni degeneri controbilancia la forza di gravità che, in assenza di reazioni nucleari, tenderebbe a far collassare la materia del nucleo.
- C'è un limite superiore, detto limite di Chandrasekhar, a tale meccanismo; esso è pari a 1,44 masse solari, valore che corrisponde ad una massa iniziale della stella di circa 8 volte quella del Sole.



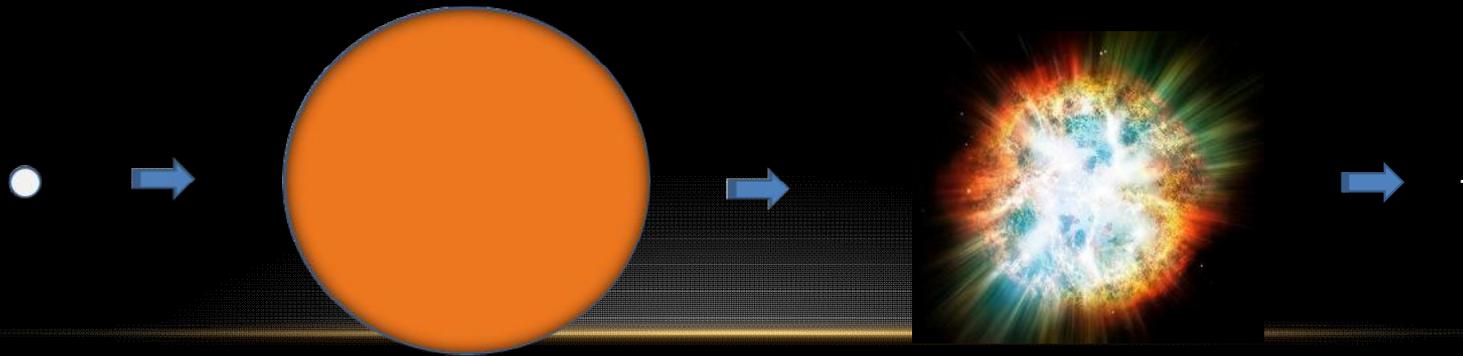
# Caso 2 – Evoluzione delle stelle con massa da 9 a 20 volte quella del Sole

- Le prime fasi post sequenza principale sono analoghe a quelle di massa minore: le reazioni di fusione continuano con dinamiche diverse e ciò provoca l'enorme espansione della stella, che diventa una *supergigante rossa*.
- La massa della stella è tale, in questo caso, per cui all'interno del nucleo si raggiungono temperature sufficienti per la fusione del C in elementi più pesanti.
- Le reazioni si sviluppano in maniera progressiva verso il centro della stella, secondo uno schema definito «a cipolla».



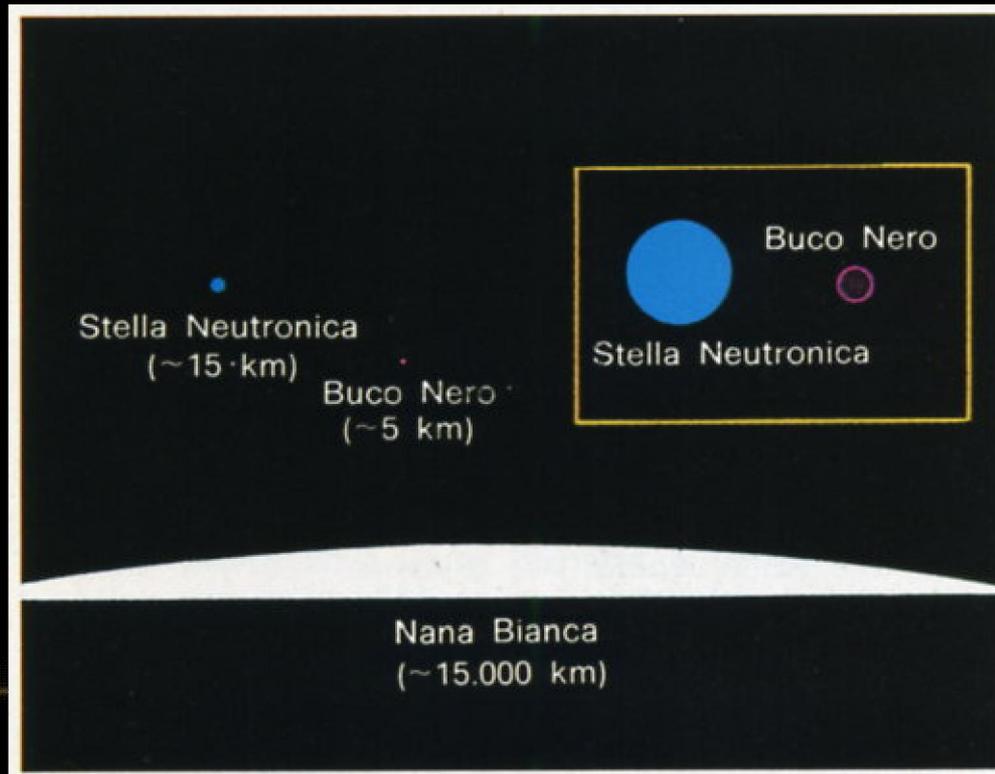
# Caso 2 – Evoluzione delle stelle con massa da 9 a 20 volte quella del Sole

- Il ferro non è più in grado di fondere in elementi più pesanti, e le reazioni nucleari al centro del nucleo si arrestano.
- Il nucleo riprende a contrarsi; ma poiché la sua massa supera il limite di Chandrasekhar di  $1,4 M_{\odot}$ , gli elettroni non riescono a resistere alla forza di gravità e si fondono con i protoni per formare neutroni.
- Si genera, a questo punto, un'onda d'urto che fa esplodere la stella in maniera violentissima sotto forma di supernova, che proietta nello spazio i propri strati esterni.



# Caso 2 – Evoluzione delle stelle con massa da 9 a 20 volte quella del Sole

- Ciò che resta di queste stelle, è il nucleo che si è trasformato in una stella di neutroni, con diametro di qualche decina di Km.
- La densità di questi oggetti è spaventosa: circa 100 milioni di t / cm<sup>3</sup>!



# Caso 3 – Evoluzione delle stelle con massa oltre 20 volte quella del Sole

- Anche per le stelle di neutroni esiste un limite di massa oltre il quale non è possibile controbilanciare la forza gravitazionale. Tale valore è pari a 3,8 masse solari ed è detto *limite di Tolman – Oppenheimer – Volkoff*. In tutte le stelle la cui massa iniziale > 20 masse solari, il nucleo è destinato a superare tale limite.
- Nessuna forza, neanche quella dei neutroni a contatto tra loro, è più in grado di contrastare l'enorme gravità della stella. Il nucleo collassa su se stesso fino a raggiungere dimensioni inferiori al *raggio di Schwarzschild*, oltre il quale nulla, neanche la luce, sfugge all'attrazione gravitazionale. E' nato un *buco nero*.
- Per questa forma di materia non sono più valide le leggi della fisica a noi note.
- A parte lo stadio finale, il ciclo della stella è analogo a quello della categoria precedente, fino allo stadio di supernova. Data la grande velocità delle reazioni, necessaria per contrastare l'immenso peso della stella, la loro vita sarà molto breve, dell'ordine di alcune decine di milioni di anni.

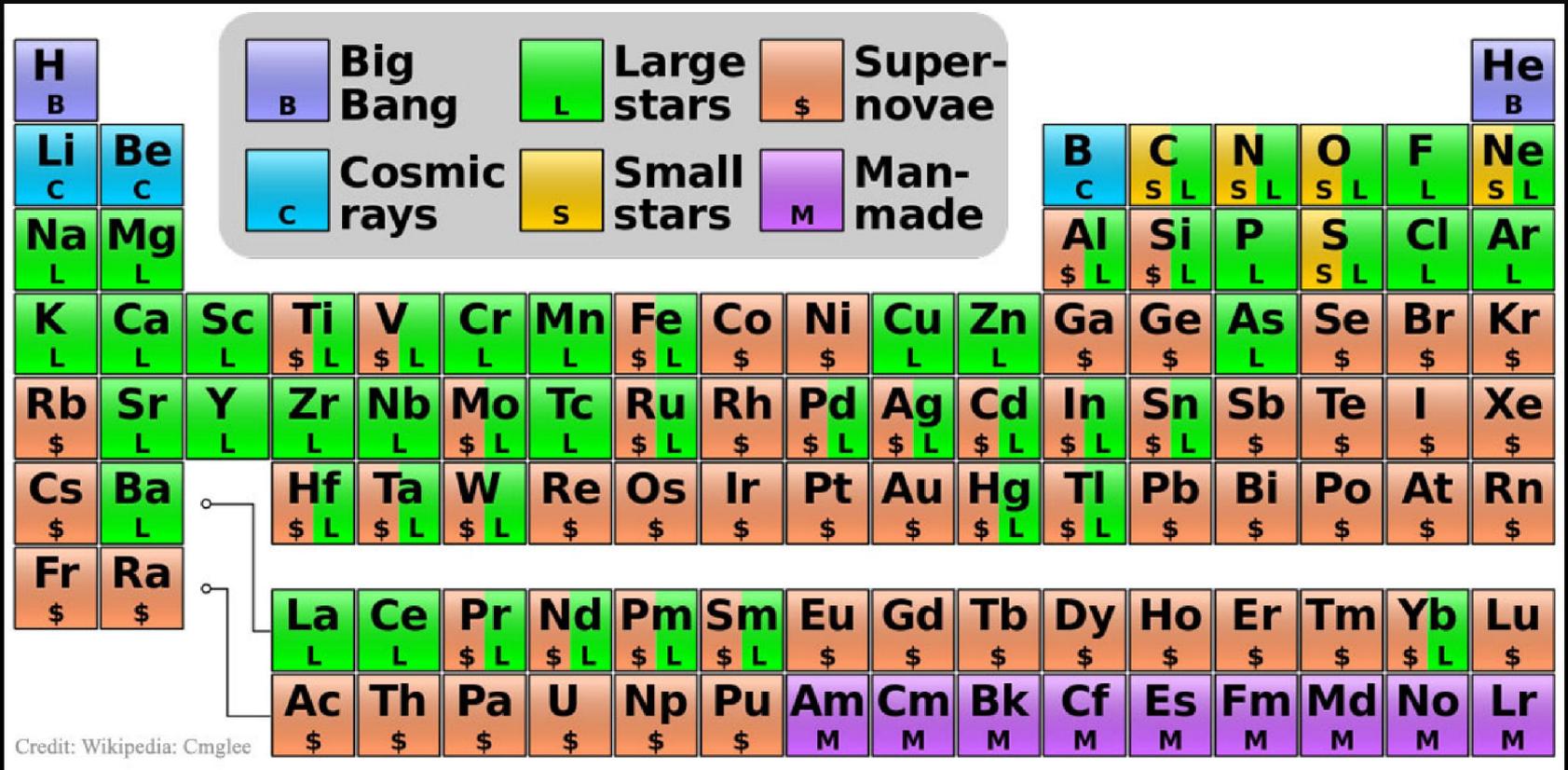


# Percorsi evolutivi

Massa originale (in $M_{\odot}$ )	Luminosità nella SP (in $L_{\odot}$ )	Durata della SP ( $\times 10^3$ anni)	Prodotto finale della fusione	Fenomeno terminale	Massa espulsa (in $M_{\odot}$ )	Natura del residuo	Massa del residuo (in $M_{\odot}$ )	Densità del residuo ( $\times 10^3$ kg $m^{-3}$ )	Raggio del residuo (in m)	Accel. di gravità (in $m\ s^{-2}$ )
30	10 000	0,006	ferro	supernova tipo Ib	24	buco nero	6	$3 \times 10^{15}$	6192,21	$5,19 \times 10^{12}$
10	1 000	0,01	silicio	supernova tipo II	8,5	stella di neutroni	1,5	$5 \times 10^{14}$	17861,44	$2,5 \times 10^{12}$
3	100	0,30	ossigeno	nebulosa planetaria	2,2	nana bianca	0,8	$2 \times 10^7$	$2,67 \times 10^8$	$1,49 \times 10^7$
1	1	10	carbonio	nebulosa planetaria	0,3	nana bianca	0,7	$10^7$	$3,22 \times 10^8$	$8,99 \times 10^6$
0,3	0,004	800	elio	vento stellare	0,01	nana bianca	0,3	$10^6$	$5,22 \times 10^8$	$1,46 \times 10^6$



# Perché siamo figli delle stelle

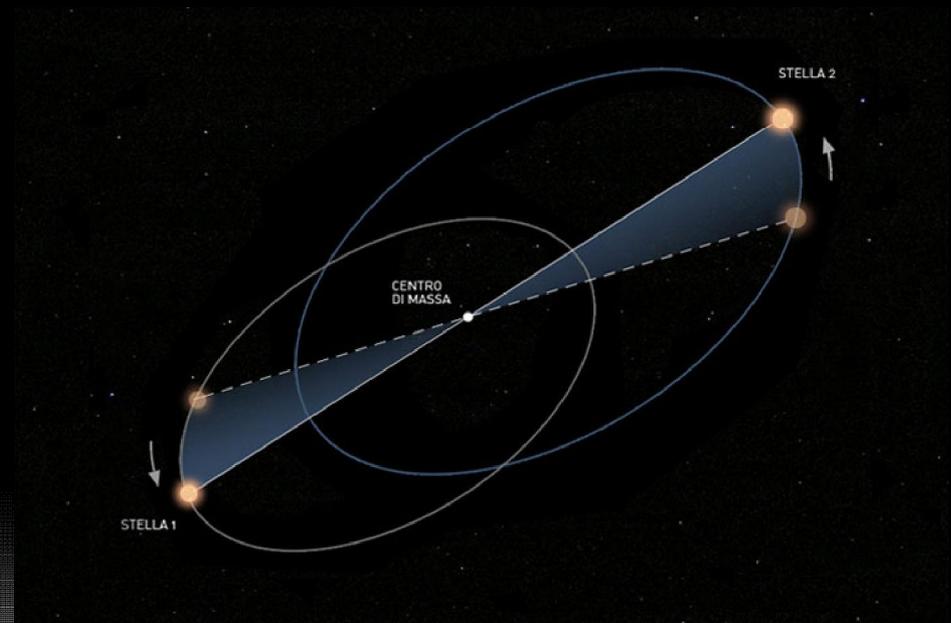


# Abbiamo idea delle dimensioni in gioco?



# Sistemi di stelle multipli

- Si tratta di sistemi di stelle associati gravitazionalmente tra loro, condizione frequente quando esse hanno origine dalla stessa nebulosa.
- I più comuni sono o sistemi binari, più noti come *stelle doppie*.
- Gli astri orbitano attorno al centro di massa comune, seguendo le leggi della gravitazione.



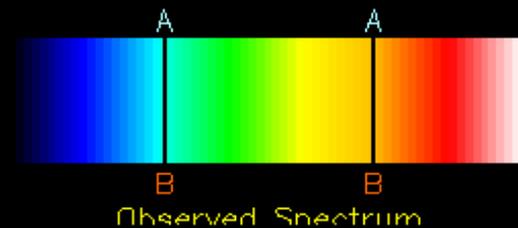
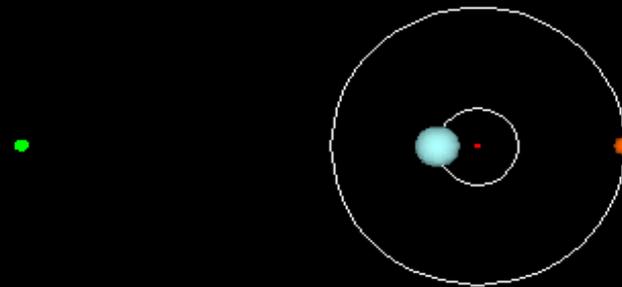
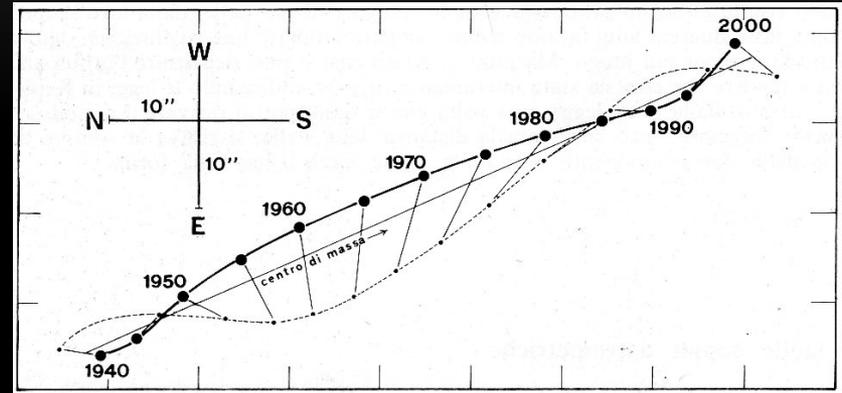
# Sistemi di stelle multipli

- Le stelle, pur essendosi formate contemporaneamente, possono avere massa diversa e, conseguentemente, un diverso stadio evolutivo. E' quindi frequente ammirare lo spettacolo di coppie costituite da una stella bianca e brillante in SP ed una che ha raggiunto lo stadio di gigante rossa.
- Accanto ai sistemi multipli fisici, distinguiamo anche le cosiddette *doppie ottiche*, in cui la vicinanza tra le stelle è solo prospettica, ma che non hanno, in realtà, nessuna relazione gravitazionale tra loro. Un esempio, alla portata di un modesto binocolo, è dato dalle stelle Alcor e Mizar nell'Orsa Maggiore.



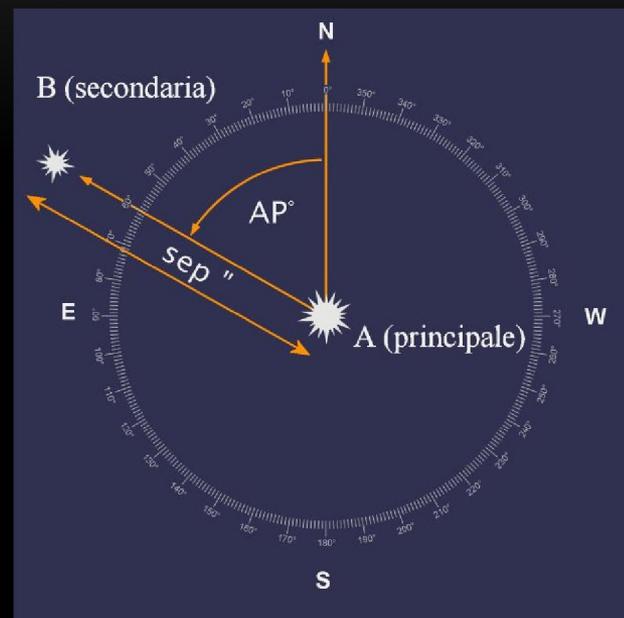
# Classificazione dei sistemi di stelle multipli

- Binarie visuali
- Binarie astrometriche – Le componenti sono troppo vicine tra loro per poter essere separate. E' possibile individuarle attraverso la misura della loro posizione nel corso degli anni, che evidenzia un moto attorno ad un centro di massa esterno alla stella (es. Sirio).
- Binarie spettroscopiche – Anche queste non risolubili otticamente, ma individuate grazie all'effetto Doppler delle sue componenti.
- Binarie fotometriche (o variabili ad eclisse).



# Sistemi di stelle multipli – I parametri

- La **magnitudine** delle componenti.
- La **separazione angolare**, espressa normalmente in secondi d'arco.
- L'**angolo di posizione AP**, formato dalla congiungente tra le due stelle e l'asse nord – sud, ossia il meridiano.



AR (2000)	Dec (2000)	magnitudine	separazione	AP
02 hh 03,9 mm	+42° 20'	2.1/4.8	9.8''	64°

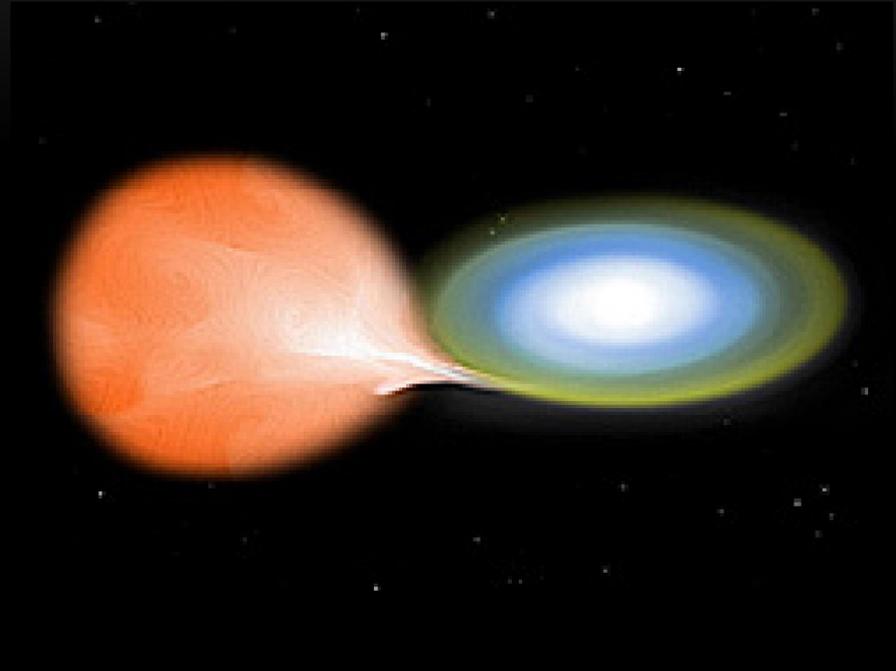
Almach



# Sistemi multipli - Casi particolari di esplosioni stellari

## A) Le Novae

- Le stelle *novae*, soprannominate così in passato per via della loro improvvisa apparizione nel Firmamento, sono dovute a fenomeni esplosivi d'intensità inferiore a quelle delle supernovae.
- Esse hanno origine in sistemi binari stretti in cui una delle due componenti è entrata nella fase di nana bianca, mentre l'altra è nella fase di gigante rossa.
- La nana bianca sottrae continuamente idrogeno dagli strati esterni rarefatti della compagna, finché si innesca una reazione di fusione che spazza via questo strato dalla sua superficie.



# Sistemi multipli - Casi particolari di esplosioni stellari

## B) Le Supernovae tipo Ia

- Le SN Ia si devono all'esplosione di una nana bianca molto massiccia, la cui massa è vicina al limite di Chandrasekhar (1,4 Ms), appartenente ad un sistema binario molto stretto, in cui la compagna è generalmente una gigante o supergigante rossa. Il meccanismo è del tutto analogo a quello delle novae.
- La nana bianca, con il suo intensissimo campo gravitazionale, sottrae continuamente una corrente di materia dagli strati più esterni della compagna, finché la sua temperatura non raggiunge il valore per la fusione del carbonio.
- L'innesco della reazione rilascia una quantità enorme ed incontrollata di energia, non frenata dalla presenza del guscio stellare precedentemente disperso, tale da disgregare la stella in una violenta esplosione.
- Le SN Ia sono le supernovae più potenti ed hanno un picco di luminosità assoluta costante, tanto da essere utilizzate come candele standard, ossia uno strumento di misura delle distanze intergalattiche.



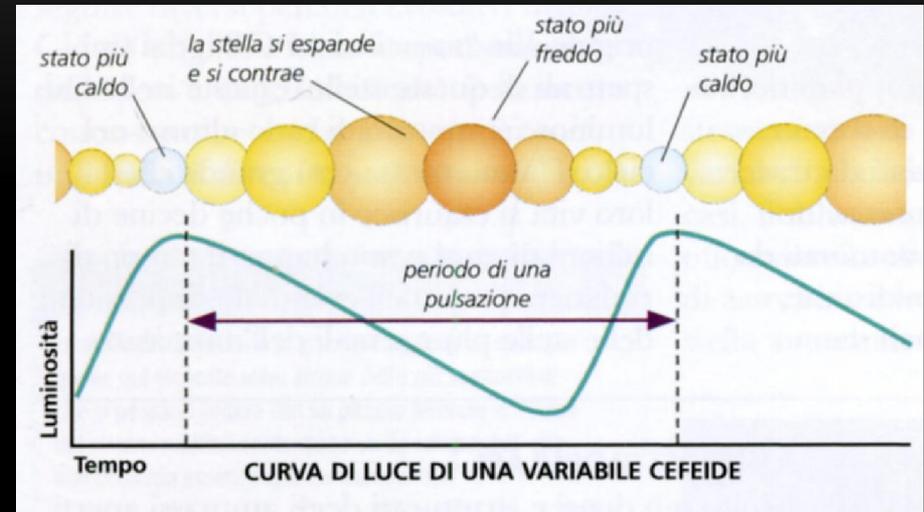
# Stelle variabili

- Non tutte le stelle hanno una luminosità costante nel tempo. Molte di esse sono soggette a cicli di luminosità che possono durare da poche ore a pochi anni, passando da un massimo ad un minimo di luminosità.
- Possiamo dividere le stelle variabili in due grandi macrocategorie, a seconda del meccanismo che dà origine alla variazione di luminosità:
  - *Variabili intrinseche*, la cui luminosità oscilla realmente, per esempio a causa di cambiamenti nelle dimensioni dell'astro.
  - *Variabili estrinseche*, che non hanno in sé alcuna variazione di luminosità ma il cui flusso luminoso verso la Terra è disomogeneo per varie ragioni.
- Un'ulteriore suddivisione si ha tra le variabili a corto o lungo periodo.
- Le tipologie delle variabili sono numerose. In questa sede prenderemo in considerazione le due categorie principali, costituite dalle *stelle pulsanti* e dalle *variabili ad eclisse*.



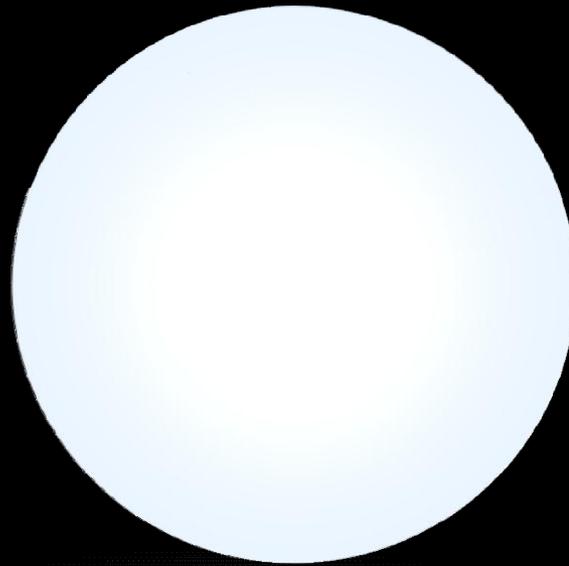
# Stelle pulsanti

- La variabilità è generalmente dovuta al mutare delle dimensioni della stella; questa si espande, raffreddandosi e diminuendo la propria luminosità, per poi contrarsi e diventare più luminosa per l'innalzamento della temperatura della sua superficie.
- Poiché tale fenomeno è dovuto ad un'instabilità nel meccanismo interno di produzione dell'energia, si tratta di protostelle o, più spesso, stelle che hanno abbandonato la fase di sequenza principale per passare al ramo delle giganti.
- L'esempio più noto è dato dalle variabili cefeidi, c.d. dalla stella  $\delta$  della costellazione di Cefeo.



- Le cefeidi sono stelle variabili giganti, luminosissime, da 1000 a 10.000 volte più del Sole, la cui luminosità oscilla con grande regolarità tra un massimo ed un minimo, in un arco temporale che può andare da alcuni giorni ad un centinaio di giorni.

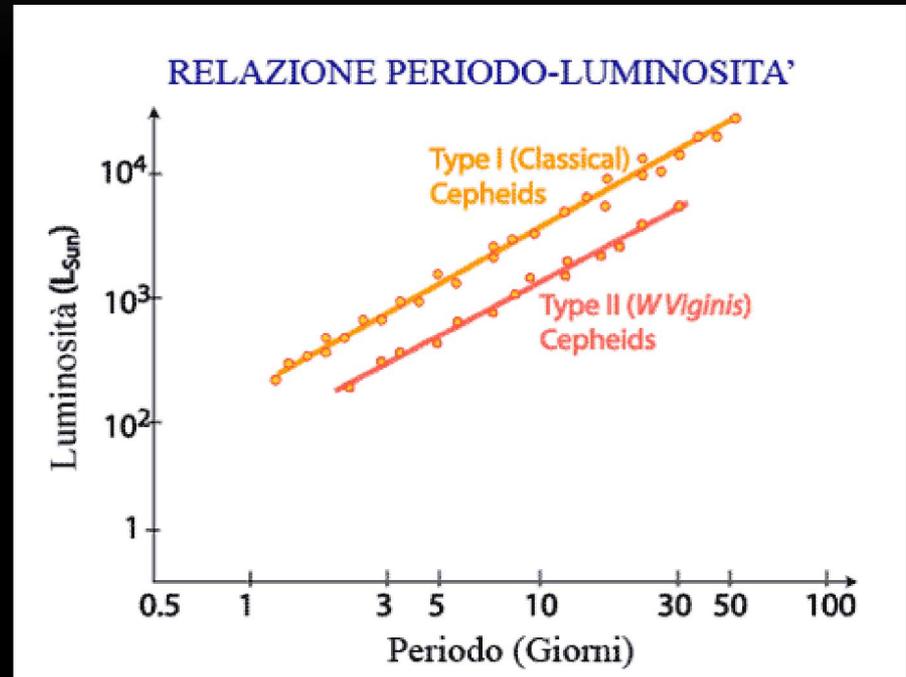
# Una cefeide all'opera



# Le cefeidi come “candele standard”

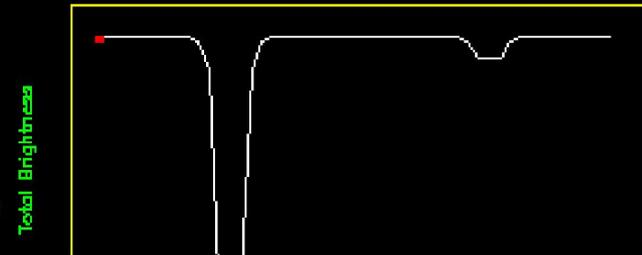
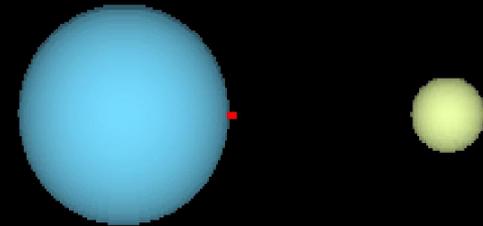
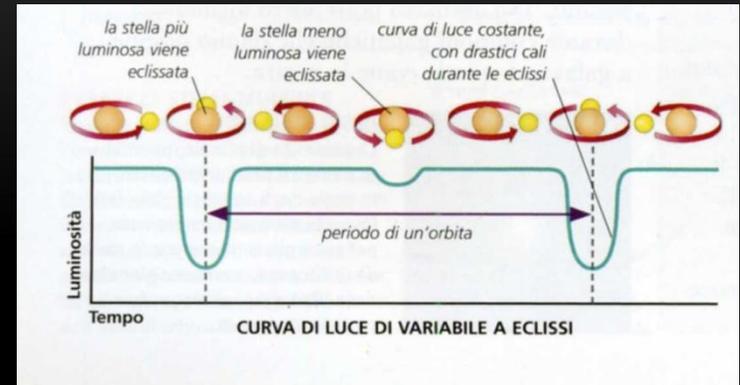
- La caratteristica delle cefeidi è che la loro luminosità è correlata con il loro periodo: all'aumentare di quest'ultimo aumenta anche la magnitudine assoluta della stella.
- Esse, pertanto, sono un ottimo strumento per determinare la distanza di ammassi stellari e galassie, tramite la relazione che lega tra loro la distanza e le magnitudini apparenti ed assoluta:

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



# Le variabili ad eclisse

- Sono sistemi binari in cui la variazione di luminosità è dovuta alle periodiche eclissi reciproche di due stelle il cui piano orbitale giace sulla linea d'osservazione della Terra.
- Se le stelle hanno diversa luminosità, si hanno due minimi di luminosità, detti primario o secondario, a seconda che la stella più luminosa passi davanti o dietro la compagna.
- Un esempio alla portata ad occhio nudo è Algol ( $\beta$  Persei), la cui magnitudine apparente scende da 2,1 a 3,4 ogni 2 giorni e 21 ore.



Grazie per l'attenzione

