

# La vita delle stelle

di Francesco Battistelli (2011)

## 1. che cos'è una stella?

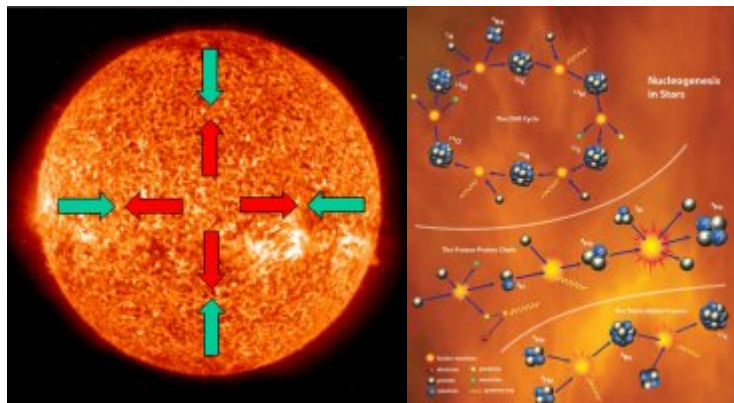
Le stelle accompagnano le nostre notti brillando nell'oscurità. Ma che cosa sono questi gioielli luccicanti che emergono dal buio della notte? Per secoli le stelle sono state considerate immutabili ed eterne, ma oggi noi sappiamo che non è così.

Una stella è una **sfera di gas in equilibrio**: infatti è essenzialmente una palla formata prevalentemente da idrogeno, l'elemento più semplice e più diffuso nell'universo. Il gas non ha un recipiente che lo contiene, ma non si disperde nello spazio circostante perché viene tenuto insieme dalla gravità.



La **forza di gravità** provoca la contrazione della la stella, ma questa non collassa verso il centro a causa di una fortissima pressione che controbilancia la gravità. La pressione verso gli strati esterni viene prodotta dalle **reazioni termonucleari** che all'interno del nucleo caldissimo sviluppano la grande quantità di energia che raggiunge la Terra sotto forma di luce e calore.

Solo il 10% della stella è coinvolta nella generazione di energia, che viene prodotta nel nucleo. Data l'altissima temperatura e densità (nel nucleo del Sole la pressione è 300 miliardi di atmosfere e la temperatura di quasi 15 milioni di gradi) nel nucleo avvengono le reazioni nucleari, che comportano una trasformazione di un elemento chimico in uno più pesante con una perdita di massa: questo comporta, in base alla nota formula  $E = mc^2$ , che viene sviluppata una immensa energia. La fusione dell'idrogeno nelle stelle avviene con due tipi di reazioni in cui quattro protoni si trasformano in un nucleo di elio: nel Sole in ogni secondo 600 milioni di tonnellate di idrogeno si trasformano in elio, con una perdita di massa dello 0,7%. Le stelle più massicce bruciano velocemente il loro carburante e quindi muoiono nel giro di pochi milioni di anni, le stelle piccole bruciano più lentamente e possono vivere diversi miliardi di anni.



La diffusione dell'energia all'interno di una stella avviene principalmente per convezione e per irraggiamento. L'irraggiamento è un trasferimento di radiazione, ma i fotoni possono percorrere solo distanze molto piccole a causa dell'opacità del gas, emergendo alla superficie solo dopo molto tempo (nel Sole decine di migliaia di anni) e dopo avere perso gran parte della sua energia. La convezione, simile a ciò che avviene in una pentola d'acqua sul fuoco, è più efficace nel trasportare energia ma funziona solo in condizioni particolari, ovvero nel nucleo delle stelle massicce e nel mantello delle stelle simili al Sole.

## 2. la nascita delle stelle

Le stelle nascono grazie alla forza di gravità, che provoca la contrazione dei gas e delle polveri interstellari che si trovano nello spazio. Quando un gas viene compresso si riscalda, e se la contrazione dovuta alla gravità provoca un aumento tale delle temperature da innescare le reazioni nucleari nasceranno nuove stelle.



© disegno di V.Spinsanti

Le regioni di formazione stellare sono le cosiddette **nebulose diffuse**, estese nubi di gas e polveri a bassa densità, composte in prevalenza di idrogeno ed elio, che di solito si trovano nei bracci nella nostra Galassia. Possono presentarsi come nebulose ad emissione, a riflessione e ad assorbimento, spesso in relazione fra loro.

- Le **nebulose ad assorbimento** sono nubi oscure di polvere interstellare che assorbono la luce delle stelle retrostanti. Si osservano nella Via Lattea come aree oscure che la interrompono come se nella zona non fosse alcuna stella: il più famoso insieme di nebulose oscure è la cosiddetta Fenditura del Cigno, osservabile nelle sere d'estate, notevole per la sua caratteristica forma è la nebulosa **Testa di Cavallo**, distante circa 1.200 a.l. da noi (un anno luce corrisponde a poco più di 9.500 miliardi di km).



La Nebulosa oscura "Testa di Cavallo"

- Le **nebulose diffuse ad emissione** sono nubi di gas incandescente costituite principalmente di idrogeno ionizzato dalla radiazione ultravioletta di stelle giovani e calde. Il gas idrogeno di queste nebulose emette luce rossa e in queste regioni può avvenire la formazione stellare. Le nebulose più brillanti si osservano nell'emisfero australe verso il Braccio di Orione e quella più brillante e famosa alle nostre latitudini è la *Grande Nebulosa di Orione* (M42 e M43), distante circa 1.500 a.l., una gigantesca nube di idrogeno ionizzato dai raggi ultravioletti delle giovani stelle calde, alcune delle quali sono circondate da dischi di materia. Un'altra intensa regione di formazione stellare è la *nebulosa Aquila* (M16), distante circa 7.000 a.l. nella costellazione del Serpente, una splendida nebulosa ad emissione che avvolge l'ammasso di stelle da lei generate.



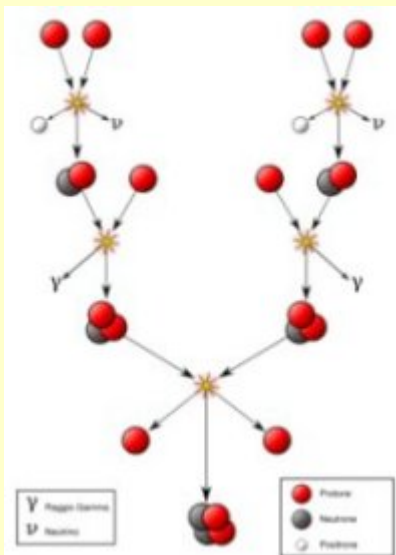
A sinistra la Grande Nebulosa di Orione, a destra la Nebulosa Aquila

- Le **nebulose diffuse a riflessione** sono invece nubi fredde di gas e polvere che risplendono diffondendo la luce proveniente dalle stelle vicine. Emettono luce azzurra, come il cielo che diffonde la luce solare e nelle Pleiadi è possibile osservare i resti della nebulosa dalla quale si sono formate le luminose stelle giovani dell'ammasso.

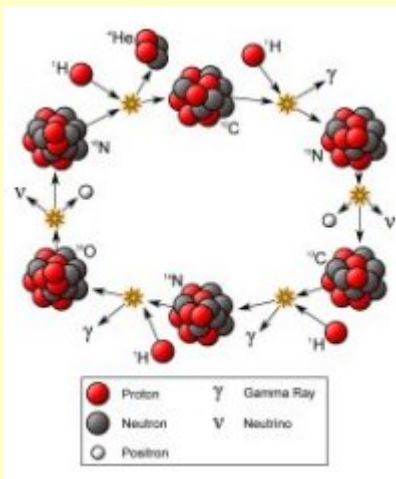


L'Ammasso aperto delle Pleiadi

A basse temperature e densità le reazioni nucleari non avvengono perché i nuclei carichi si respingono, ed è necessario che i nuclei si scontrino a velocità abbastanza elevata per superare la barriera elettrostatica (con il cosiddetto effetto tunnel) e interagire con le forze nucleari. Le stelle al loro interno bruciano innanzitutto **idrogeno**, l'elemento più semplice e più abbondante dell'Universo. La fusione dell'idrogeno nelle stelle avviene con due tipi di reazioni in cui quattro protoni si trasformano in un nucleo di  $^4\text{He}$ : la **catena P-P**, che richiede una temperatura di circa 14 milioni di K e il **ciclo CNO**, che prevale a temperature superiori a 20 milioni di K. Il ciclo CNO è il meccanismo principale che produce azoto, elemento essenziale per la vita.



La catena P-P



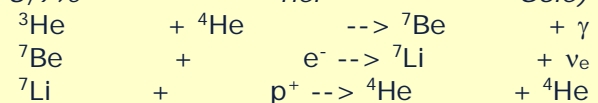
Il ciclo CNO

## DALL'IDROGENO ALL'ELIO

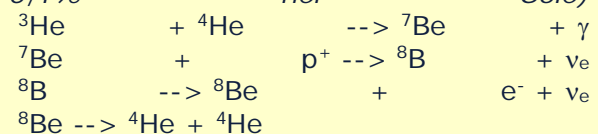
Il bruciamento dell'idrogeno nelle stelle avviene secondo due cicli principali di reazioni. Il primo, detto **catena P-P** (catena protone-protone), risulta nella fusione di quattro protoni in un nucleo di He-4 e necessita di una temperatura tra 10 e 14 milioni di K.

1.  $p^+ + p^+ \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$  (1,18 MeV) (1,4  $\cdot 10^9$  anni)  
Questa reazione, mediata dalle forze deboli, è la più lenta e regola l'efficienza globale della catena.
2.  $^2\text{H} + p^+ \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$  (5,49 MeV) (6 secondi)
3. *ramo PPI* (tra 10 e 14 milioni K, frequenza: 69% in generale, 91% nel Sole):  
 $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + p^+ + p^+$  (12,85 MeV) ( $10^6$  anni)

Questo ultimo passo della catena presenta dei rami secondari con probabilità inferiori:  
*ramo PPII* (tra 14 e 23 milioni K, frequenza: 8,9% nel Sole)



*ramo PPIII* (oltre 23 milioni K, frequenza: 0,1% nel Sole)



Un secondo metodo con cui le stelle più grandi del Sole possono fondere l'idrogeno e produrre l'elio è

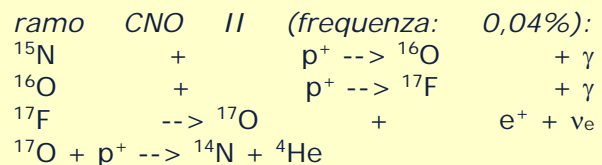
il **ciclo C-N-O**, più efficiente della catena P-P sopra i 20 milioni K. In questo ciclo il carbonio, l'azoto e l'ossigeno vengono creati e distrutti, quindi agiscono solamente da catalizzatori della reazione.

1.  $^{12}\text{C} + \text{p}^+ \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$  (1,95 MeV) ( $1,2 \cdot 10^7$  anni)
2.  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e$  (1,50 MeV) (7 minuti)
3.  $^{13}\text{C} + \text{p}^+ \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$  (7,54 MeV) ( $3 \cdot 10^6$  anni)
4.  $^{14}\text{N} + \text{p}^+ \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$  (7,35 MeV) ( $3 \cdot 10^9$  anni)

Questa è la reazione più lenta, quindi perché il ciclo sia a regime si deve accumulare azoto (tanto che il ciclo CNO è il maggior responsabile della produzione dell'azoto-14).

5.  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e$  (1,73 MeV) (82 secondi)
6. *ramo CNO I:*  
 $^{15}\text{N} + \text{p}^+ \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$  (4,96 MeV) ( $1,5 \cdot 10^5$  anni)

Questo ultimo passo della catena presenta un ramo secondario con probabilità inferiori:



Nelle stelle meno massicce (come il Sole) nel nucleo si brucia idrogeno tramite il ciclo P-P e il trasferimento è radiativo, nell'involucro esterno l'energia si trasporta per convezione e fuoriesce all'esterno anche se il gas è relativamente freddo. Nelle stelle più massicce si brucia idrogeno con il ciclo CNO, a causa delle temperature maggiori il nucleo è convettivo (rifornendo il nucleo di idrogeno degli strati superiori) mentre l'involucro che lo circonda è radiativo.

### 3. la vita delle stelle

L'unico modo che abbiamo per conoscere le caratteristiche principali delle stelle è l'analisi della luce che riceviamo. Le principali quantità fisiche che possiamo misurare sono la luminosità assoluta, la velocità radiale, la temperatura superficiale, la massa e le dimensioni.

- Per conoscere la **luminosità assoluta** di una stella è indispensabile conoscerne la distanza, in quanto la magnitudine apparente, ovvero la luminosità delle stelle che vediamo in cielo, dipende sia dalla luminosità intrinseca dell'astro che dallo spazio che la luce ha dovuto percorrere per giungere fino a noi (la luminosità decresce con il quadrato della distanza). Per esempio nel cosiddetto "Triangolo estivo" osserviamo tre stelle di luminosità comparabile, ma mentre le due più luminose hanno distanze di poche decine di anni luce e per questo sono luminose rispettivamente 50 volte (Vega) e 10 volte (Altair) rispetto al nostro Sole, quella che ai nostri occhi appare come la meno luminosa (Deneb)

è in verità la più luminosa delle tre: infatti la sua distanza stimata è di oltre 1.000 anni luce, pertanto la luminosità assoluta di Deneb corrisponde alla luminosità di 50.000 Soli!.










Il "triangolo estivo" visibile d'estate verso lo zenit

- Per conoscere la **velocità radiale** (velocità di avvicinamento o di allontanamento) delle stelle si osserva lo spettro: quando un fascio di luce solare diffusa da un prisma viene proiettato su una parete si ottiene una banda colorata simile all'arcobaleno e questa banda viene chiamata spettro. Le righe nere che si vedono nello spettro delle stelle ci danno informazioni sui gas che compongono la loro atmosfera. Confrontando la posizione delle righe di sorgenti fisicamente simili con le righe analoghe prodotte in laboratorio, se osserviamo le stesse righe spostate verso il blu (il cosiddetto *blue shift*) possiamo dedurre che la sorgente si sta avvicinando verso di noi, se osserviamo le stesse righe spostate verso il rosso (il cosiddetto *red shift*) possiamo dedurre che la sorgente si sta allontanando da noi.

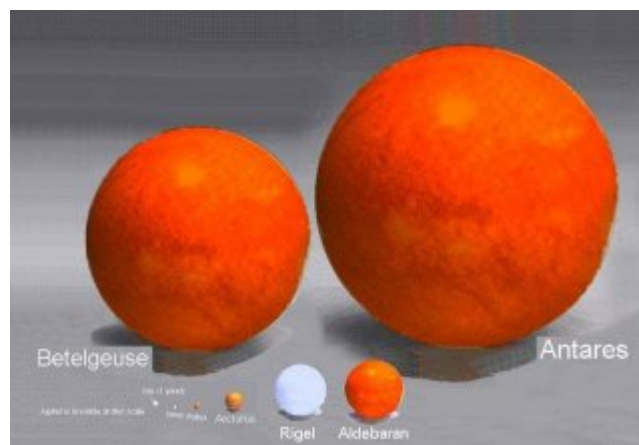


- Per conoscere la **temperatura superficiale** di una stella è sufficiente analizzare l'intensità della radiazione ricevuta alle diverse lunghezze d'onda. Tutti i corpi caldi emettono radiazioni la cui intensità cresce all'aumentare della temperatura, e se un corpo si trova in uno stato di equilibrio termodinamico tra radiazione e materia (il cosiddetto *corpo nero*), la distribuzione della radiazione emessa dipende solo dalla sua temperatura: questo avviene nelle stelle, e più la temperatura superficiale è elevata più il suo colore va dal rosso verso il bianco-azzurro. Padre Angelo Secchi catalogò grazie allo spettro oltre 4.000 stelle in 4 classi spettrali (I, II, III, IV), e attualmente le stelle vengono classificate secondo il metodo di Harvard in tipi spettrali indicati da O a M in ordine di temperatura superficiale decrescente, temperatura conosciuta grazie allo studio della radiazione ricevuta e alla *legge del corpo nero*. Ogni classe spettrale individua il colore della stella e

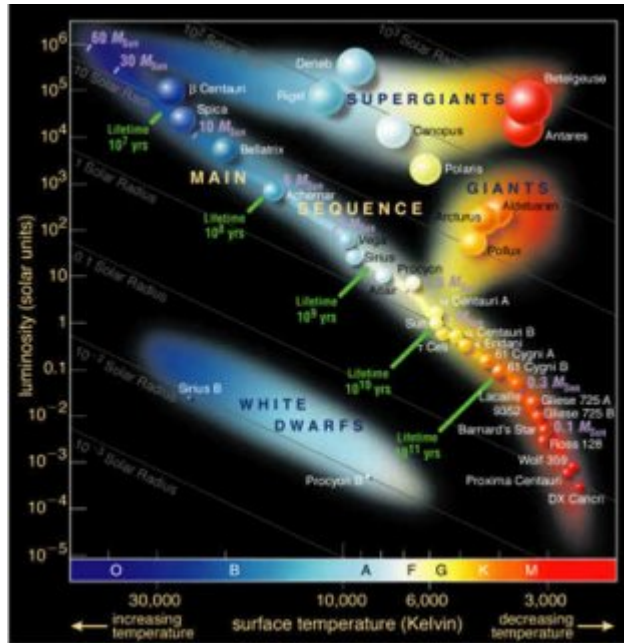


Classe spettrale	Temperatura di superficie (gradi Kelvin)	Colore	Esempi di stelle
O	30.000		10 Lacerta (O9)
B	20.000		Rigel (B8)
A	10.000		Sirio (A1)
F	7000		Canopo (F0)
G	6000		Sole (G2)
K	4000		Aldebaran (K5)
M	3000		Betelgeuse (M2)

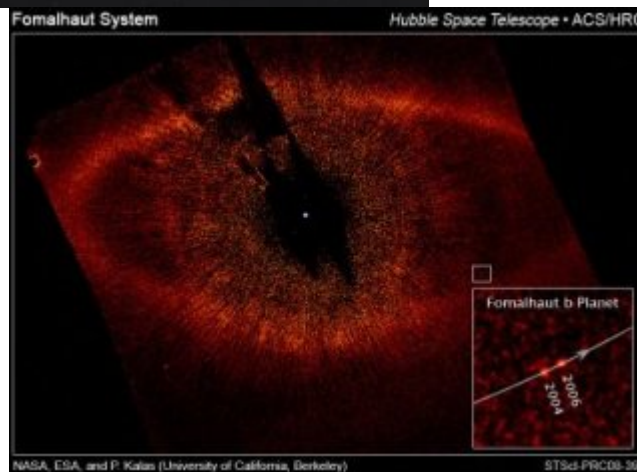
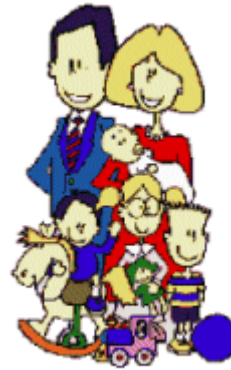
- Poiché la quasi totalità delle stelle appare puntiforme anche agli strumenti di ultima generazione, la **massa** e le **dimensioni** di una stella vengono ricavate dagli astrofisici in via indiretta, studiando la meccanica dei sistemi binari e analizzando il rapporto tra la temperatura superficiale e la luminosità.



Il cosiddetto **diagramma di Hertzsprung-Russell** mette in relazione la luminosità, le dimensioni e la temperatura: nel loro diagramma (detto diagramma H-R) le stelle vengono distribuite in base alla temperatura e alla luminosità assoluta. Si nota la sequenza principale, ovvero la diagonale che va da piccole stelle rosse, con curve di corpo nero corrispondenti a temperature di 3.000 K, fino a grandi e caldissime stelle azzurre, con curve di corpo nero corrispondenti a temperature di 30.000 K. Nella sequenza principale è presente anche il nostro Sole, una stella media in tutti i sensi. Esistono anche tipologie di stelle al di fuori della sequenza principale, in cui le dimensioni non sono proporzionali alla temperatura, come le nane bianche molto calde e le giganti e supergiganti più fredde.



Osservando il cielo si vede che molte stelle amano stare in coppia o in sistemi multipli, e ogni giorno si scoprono nuovi pianeti (siamo a oltre 500) che le accompagnano, pianeti che si sono formati insieme alle stelle dalle nebulose primordiali.



A sinistra Albireo, al centro un disegno di V. Spinsanti ©, a destra il pianeta di Fomalhaut "visto" da HST

Le stelle "abitano" nelle **galassie**, gruppi costituiti da miliardi di stelle tenute insieme dall'attrazione gravitazionale. La nostra galassia, come la nebulosa di Andromeda (M31) che ci accompagna a 2 milioni e 200 mila anni luce (è l'oggetto più lontano visibile ad occhio nudo!), è una galassia a spirale che ha la forma di disco con un bulbo centrale e braccia a spirale.





Galassia di Andromeda (ca. 2.200.000 a.l.)

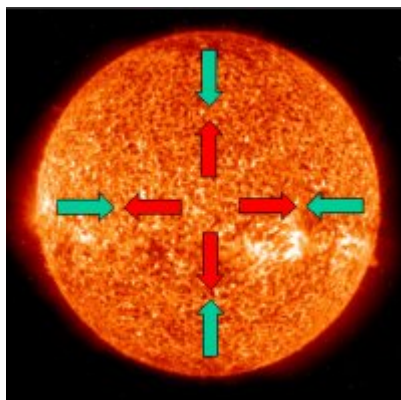
Le stelle vengono classificate in stelle di **popolazione I**, ovvero le stelle più giovani, che si trovano nel bulbo o nel disco Galattico, spesso riunite in ammassi aperti (o galattici), e in stelle di **popolazione II**, stelle più anziane che preferiscono abitare tranquillamente in periferia negli ammassi galattici, lontani dalla confusione del centro...



A sinistra il Doppio ammasso aperto di Perseo (ca. 7.400 a.l.), a destra l'Ammasso globulare di Ercole (ca. 25.000 a.l.)

## 4. l'evoluzione delle stelle

Una stella resta stabile finché viene prodotta energia nel nucleo: quando l'idrogeno al centro si esaurisce (nel Sole avverrà tra circa 4 miliardi di anni) la stella si dovrà adattare ad un nuovo equilibrio. Infatti la pressione cala e la stella si restringe riscaldando il nucleo, permettendo nuove reazioni con la fusione degli elementi più pesanti dell'idrogeno, dall'elio in poi.

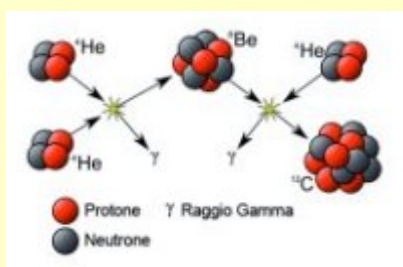


A destra un disegno di V. Spinsanti ©

Il cosiddetto **ciclo 3-alfa** permette la fusione di atomi di elio con la produzione diretta di carbonio, e l'energia liberata fa espandere l'atmosfera della stella che diventa una **gigante rossa**. In questa fase la convezione porta in superficie il carbonio prodotto nel nucleo, l'elio continua a bruciare nel nucleo trasformandosi in carbonio e in ossigeno (grazie alla combinazione di un atomo di carbonio e un atomo di elio). L'idrogeno continua a bruciare nello strato successivo, al cui esterno la temperatura non consente reazioni nucleari, e questa situazione rimane tale finché la stella non esaurisce l'elio.



Confronto tra le dimensioni della Terra, del Sole e di una gigante rossa



Il ciclo 3- $\alpha$

### DALL'ELIO AL CARBONIO E ALL'OSSIGENO

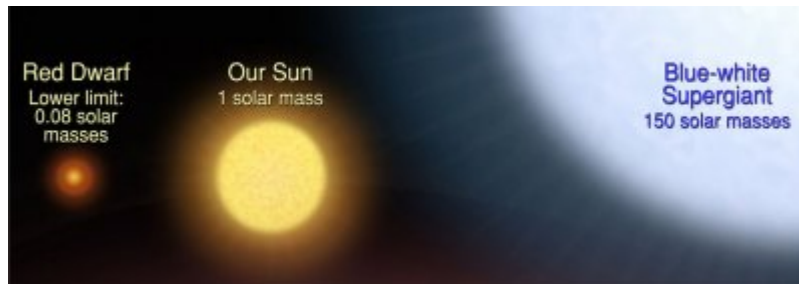
Finito di bruciare l'idrogeno, il nucleo di una stella ricomincia a contrarsi e aumenta la sua temperatura finché la temperatura diventa abbastanza alta da innescare il bruciamento dell'elio, che brucia attraverso il cosiddetto **ciclo 3- $\alpha$** , in cui tre particelle  $\alpha$  (nuclei di elio-4) si fondono con una reazione intermedia che produce berillio-8 in un nucleo di carbonio-12. Poiché il berillio-8 è molto instabile, Fred Hoyle propose il processo per cui nelle stelle si forma direttamente carbonio in uno stato particolare di risonanza senza che resti energia cinetica che possa distruggere il nucleo. Questo ciclo è una reazione a tre corpi, quindi dipende dal cubo della densità e necessita di una temperatura di almeno 100 milioni K.

1.  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$  (-100 keV)
2.  ${}^8\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$  (100 keV) ( $10^{-17}$  secondi)  
 ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \gamma$  (7,3 MeV)  
 Reazione risonante che ha una probabilità maggiore della corrispondente reazione non risonante; il nucleo di carbonio nello stato eccitato decade allo stato fondamentale tramite emissione di fotoni.
3.  ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$  (7,1 MeV)

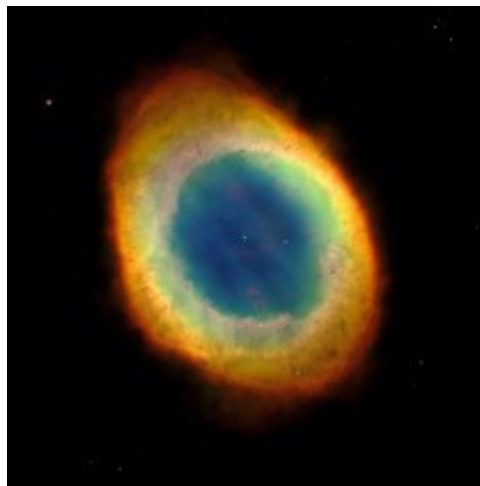
Il tipo di accensione dell'elio dipende dalla massa della stella: se la stella è meno massiccia di 0,5 masse solari la pressione degli elettroni degeneri ferma il collasso del nucleo prima dell'accensione dell'elio, se la stella tra 0,5 e 2,25 masse solari l'elio si accende in modo esplosivo (*flash* dell'elio) in un nucleo degeneri, se la stella supera le 2,25 masse solari l'elio si accende nel nucleo non degeneri in modo non esplosivo. Il *flash* dell'elio si ferma quando la temperatura diventa tale da

rimuovere la degenerazione degli elettroni, e la pressione termica fa quindi espandere violentemente il nucleo.

Giunta allo stadio di gigante rossa, la sorte successiva di una stella dipende dalla sua massa:

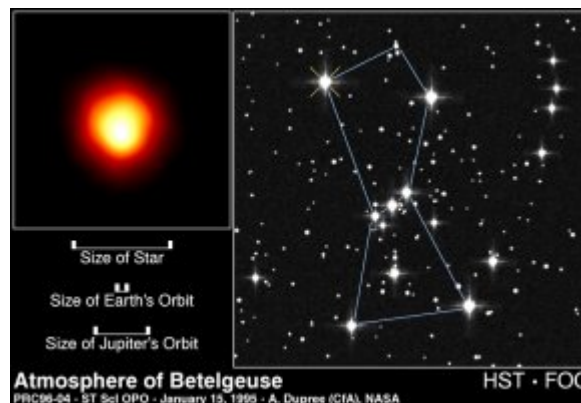


- nelle stelle come il Sole non si arriva alla fusione di carbonio, all'esaurimento dell'elio la parte esterna viene espulsa in un guscio di gas chiamato **nebulosa planetaria**.



La nebulosa planetaria della Lira (M57)

- nelle stelle massicce all'esaurimento dell'elio si ha un collasso che riscalda la stella tanto da fondere il carbonio. Esaurito il carbonio il nucleo si contrae di nuovo e si raggiungono temperature più elevate e vengono bruciati in successione il neon, l'ossigeno e il silicio: ad ogni passo successivo si raggiunge una temperatura superiore e la nucleosintesi continua a fondere elementi più pesanti fino alla fusione del silicio con la produzione di nichel-56 che decade in ferro-56. La stella è una **supergigante rossa** che assomiglia a una cipolla, il nucleo di ferro è circondato da gusci con gli elementi più pesanti al centro e leggeri verso la superficie.



## DAL CARBONIO AL FERRO

Dopo l'elio, se la temperatura dell'interno della stella riesce a diventare abbastanza alta, il successivo combustibile ad accendersi è il carbonio. Ogni volta che termina un bruciamento, senza fonte di energia interna il nucleo si contrae e l'involuppo si espande, e quando inizia un successivo bruciamento il nucleo si espande e l'involuppo si contrae.

- FUSIONE DEL CARBONIO** (almeno 4 masse solari, temperatura 600 milioni di K, si esaurisce in 100 anni)
 reazioni più frequenti:
 
$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$$

$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$$
 reazioni meno frequenti:
 
$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$$

$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Mg} + n$$

$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Na} + p^+$$
- FUSIONE DEL NEON** (almeno 8 masse solari, 1200 milioni di K, si esaurisce in 1 anno)
 
$$^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$$

$$^{20}\text{Ne} + ^4\text{He} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$$
 ramo alternativo:
 
$$^{20}\text{Ne} + n \rightarrow ^{21}\text{Ne} + \gamma + e^- + \text{anti-}\nu_e$$

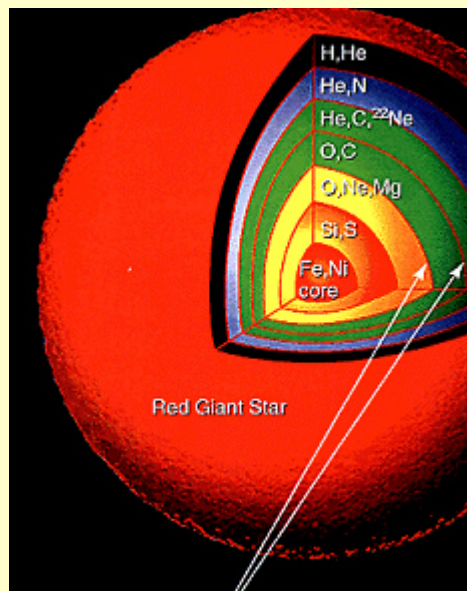
$$^{21}\text{Ne} + ^4\text{He} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + n$$
- FUSIONE DELL'OSSIGENO** (1500 milioni di K, si esaurisce in qualche mese)
 reazione più frequente:
 
$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$$
 reazioni meno frequenti:
 
$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{32}\text{Si} + \gamma$$

$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{Si} + n$$

$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{P} + p^+$$

$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$$
- FUSIONE DEL SILICIO** (2700 milioni di K, si esaurisce in 1 giorno)
 
$$^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni} + \gamma$$
 Dal silicio-28 si formano direttamente zolfo-32, cloro-36, argon-40 e altri nuclei fino al nichel. Il nichel decade in ferro con processi di neutronizzazione (un protone cattura un elettrone producendo un neutrone e un neutrino) che necessitano di energia:
 
$$^{26}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} + e^+ + \nu_e$$

$$^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe} + e^+ + \nu_e$$



A questo punto la stella supergigante è formata da una serie di gusci concentrici, il nucleo di ferro è circondato da strati di combustione degli elementi precedenti della serie, formando una struttura a cipolla:

( Fe ) Si, S,  
Ar ) <sup>16</sup>O, <sup>28</sup>Si, <sup>32</sup>S ) <sup>16</sup>O, <sup>20</sup>Ne, <sup>24</sup>Mg ) <sup>16</sup>O, <sup>12</sup>C, <sup>20</sup>Ne ) <sup>4</sup>He ) <sup>1</sup>H, <sup>2</sup>He )

Gli elementi più pesanti restano al centro, i più leggeri verso la superficie. In queste condizioni, assorbendo protoni ed emettendo positroni, si possono produrre nei vari gusci elementi con numeri di nucleoni diversi dai multipli di 4 (per esempio F-19, Na-23). Per gli

elementi più pesanti del ferro occorrerà aspettare la fine violenta della stella.

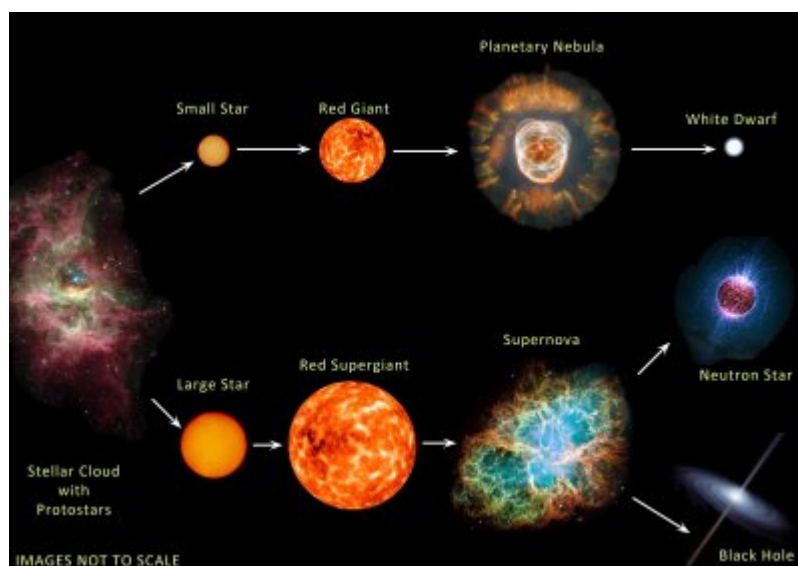
- Le stelle con masse superiori a 8 masse solari hanno una fine spettacolare. Infatti nel loro nucleo il ferro non può essere bruciato per produrre energia, perché il ferro è l'elemento più stabile che esista, e per creare elementi più pesanti è necessario introdurre energia. Quando la forza gravitazionale riesce a comprimere il nucleo degenere di ferro, il nucleo di ferro collassa e si raffredda, i nuclei di ferro vengono disintegrati e i protoni catturando gli elettroni si trasformano in neutroni rilasciando neutrini. Quando il gas di neutroni diventa degenere, il collasso si ferma e parte una violenta onda d'urto che espelle violentemente tutto il materiale sovrastante nell'Universo circostante, irradiando raggi X, ultravioletti e luce visibile: la stella è diventata una **supernova di tipo II**, e in questa fase vengono generati gli elementi più pesanti del ferro. Una supernova è visibile come una stella di luminosità enorme che appare velocemente e scompare in pochi mesi.



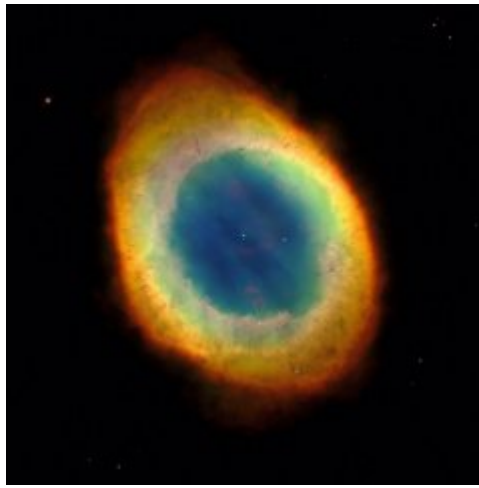
Il cielo prima e dopo l'apparizione della Supernova 1987A ([Anglo-Australian Observatory](#))

## 5. fine della storia?

Quello che resta di una stella dopo la sua morte dipende dalla sua massa: abbiamo visto che stelle piccole diventano nebulose planetarie, stelle grandi e massicce esplodono in spettacolari supernovae.

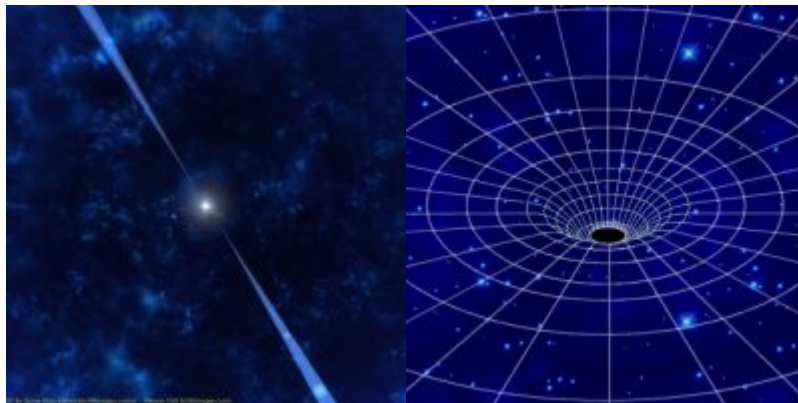


- nelle stelle come il Sole dopo l'espulsione del guscio di gas oltre alla nebulosa planetaria resta una **nana bianca**, una palla calda di carbonio e ossigeno avvolta da elio e tracce di idrogeno.



Al centro della nebulosa della Lira si nota la nana bianca residua.

- Nelle stelle più massicce, se la materia rimasta dopo l'esplosione della supernova ha meno di 3 masse solari resta una **stella di neutroni**, che emette onde radio periodiche regolari e viene osservata come **pulsar**. Se invece il nucleo ha una massa superiore alle 3 masse solari collassa in un **buco nero**, dal quale neppure la luce può emergere. I buchi neri non vengono osservati direttamente, ma se ne possono misurare gli effetti gravitazionali sulle masse circostanti.



Ma la storia non finisce qui... infatti il materiale delle stelle viene espulso nello spazio circostante con tutto il carico degli elementi pesanti che sono stati cucinati nelle ultime fasi convulse della sua esistenza. Nelle stelle più piccole vengono dispersi nello spazio gli elementi più leggeri, dalle stelle più pesanti (circa il 10% del totale) vengono gli elementi più pesanti. Il guscio dei gas espulsi continua ad espandersi e a raffreddarsi, come si può vedere nella nebulosa del Granchio (M1), il resto di una supernova esplosa nel 1054.



La Nebulosa del Granchio ([NASA](#), [ESA](#), Allison Loll/Jeff Hester)

Quando il materiale espulso dalle stelle incontrerà altre nubi di gas e polveri nasceranno stelle di nuova generazione che saranno accompagnate da altri pianeti e così via... e noi stessi siamo

formati da atomi "cucinati" all'interno di una stella tanto tempo fa, atomi dispersi nell'Universo alla sua morte, atomi riuniti in una nube di gas che con il tempo si è contratta ed ha formato il nostro Sistema Solare... per questo possiamo confermare che, come dice una canzone ormai passata alla storia, **NOI SIAMO FIGLI DELLE STELLE...**