



# STELLE ED EVOLUZIONE STELLARE 1

CORSO DI FORMAZIONE DI ASTRONOMIA E ASTROFISICA  
PER DOCENTI DI SCUOLA SECONDARIA  
ANNO 2019-2020 - CICLO 1

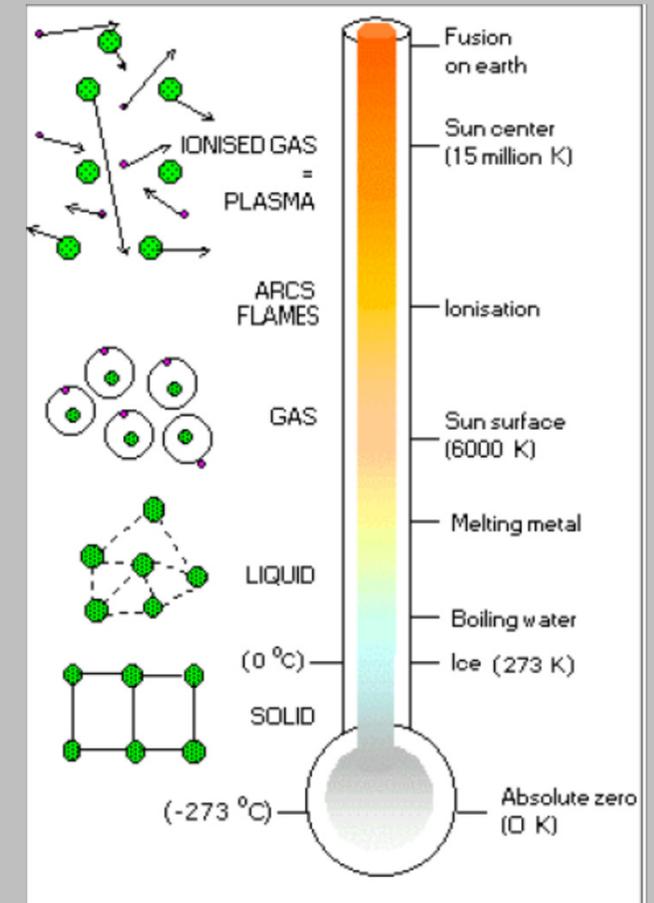
## DEFINIZIONE DI STELLA

- E' uno sferoide allo stato di plasma che genera energia dalle reazioni di fusione nucleare.
- E' in equilibrio idrostatico: la forza gravitazionale uguaglia la forza di pressione prodotta dalle reazioni di fusione.
- $M_{\text{lim}} \sim 0.080 M_{\odot} = 80 M_{\text{giove}}$ : massa limite per le reazioni di fusione nucleare di  ${}^1\text{H}$  in  ${}^4\text{He}$ .
- $M_{\text{lim}} \sim 0.013 M_{\odot} = 13 M_{\text{giove}}$ : limite minimo per le reazioni di fusione nucleare del deuterio  ${}^2\text{H}$  in  ${}^3\text{He}$ .
- Nana Bruna: se la massa cade nell'intervallo  $0.013 \div 0.080 M_{\odot}$ .



# PLASMA

- Al crescere della temperatura, la materia passa da uno stato aggregato (solido o liquido) ad uno stato gassoso neutro e a quello di gas parzialmente e poi totalmente ionizzato.
- Non tutti i gas ionizzati possono essere definiti un plasma.
- Anche se un plasma completamente isolato è nel suo insieme elettricamente neutro, i moti delle particelle sono regolati dalle forze elettromagnetiche anziché da quelle idrodinamiche (collisionali) di un gas neutro.
- Un plasma mostra un comportamento collettivo: i moti delle particelle non dipendono solo dalle condizioni locali del plasma ma anche dalle sue condizioni in regioni lontane.



G. Bosia - Fisica del plasma confinato

## ALCUNI ESEMPI DI PLASMI ASTROFISICI

- In un plasma è essenziale la presenza di cariche elettriche libere.
- Il grado di ionizzazione è determinato:
  - dall'energia di ionizzazione del gas;
  - dalla temperatura del gas (agisce sulla dissociazione degli elettroni)
  - dalla densità degli atomi per unità di volume (agisce sulla ricombinazione degli elettroni con gli atomi e sul moto delle particelle).
- La condizione di plasma è determinata da una combinazione di densità e temperatura.

	$L$	$n$	$T$
	cm	$\text{cm}^{-3}$	K
Ionosfera	$10^7$	$10^3 \div 10^6$	$10^2 \div 10^3$
Vento solare	$10^{13} \div 10^{15}$	$1 \div 10^4$	$10^2 \div 10^3$
Corona solare	$6 \times 10^9 \div 10^{11}$	$10^8 \div 10^{12}$	$10^6 \div 10^7$
Interni stellari	$10^{10} \div 10^{12}$	$10^{27}$	$4 \times 10^7$
Stelle di neutroni	$10^6$	$10^{42}$	$10^6 \div 10^9$
Gas interstellare	$10^1 \div 10^{22}$	$10^{-3} \div 10$	$10^2$
Gas intergalattico	$\geq 10^{24}$	$\leq 10^{-5}$	$10^5 \div 10^6$
Nuclei galattici	$\leq 10^{15}$	$\leq 10^{12}$	$\geq 10^8$
Plasma termonucleare	$10^2$	$10^{16}$	$10^8$

$L$  = dimensione del sistema

$n$  = densità del gas

$T$  = Temperatura del gas

## PARAMETRI FONDAMENTALI DI UNA STELLA

### Parametri

- Massa
- Raggio
- Luminosità
- Temperatura
- Tipo Spettrale e Classe di Luminosità

### Sole

$M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$   
 $R_{\odot} = 696\,000 \text{ km}$   
 $L_{\odot} = 3.83 \cdot 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $T_{\odot} = 5\,750 \text{ }^{\circ}\text{K}$   
G2 V

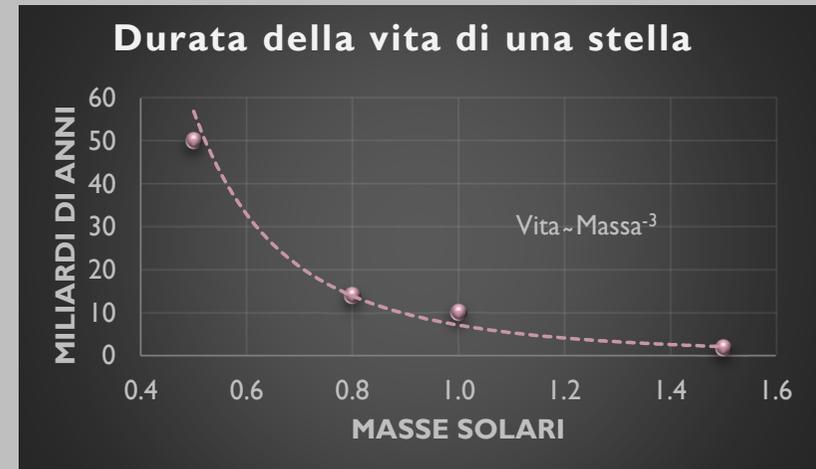
$$L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$
$$L \propto M^{\alpha} \quad (\alpha \sim 4)$$

T ↔ Tipo e Classe Spettrale

# MASSA

- La massa è il parametro determinante nella produzione di energia e nell'evoluzione di una stella.
- La composizione chimica influisce sull'evoluzione ma in prima battuta può essere trascurata.
- La massa di una stella determina quanto durerà ogni fase dell'evoluzione della stella, la durata totale della sua vita e come questa si concluderà.

Massa	Vita (anni)
0.5	50 miliardi
0.8	14 miliardi
1 (Sole)	10 miliardi
1.5	1.7 miliardi
6	70 milioni
25	2 milioni



## COME SI CALCOLA LA MASSA DELLE STELLE (1/2)

### ■ Sistemi binari

- Utilizzando la definizione di centro di massa e la terza legge di Keplero:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1},$$

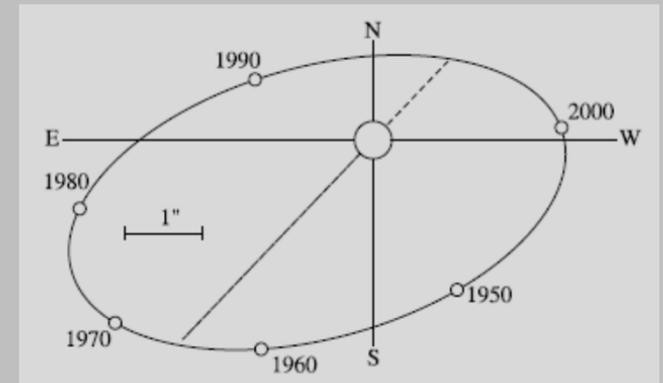
$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3.$$

$$a = a_1 + a_2.$$

$a$  = semiasse maggiore dell'orbita relativa vera della stella secondaria rispetto alla primaria.

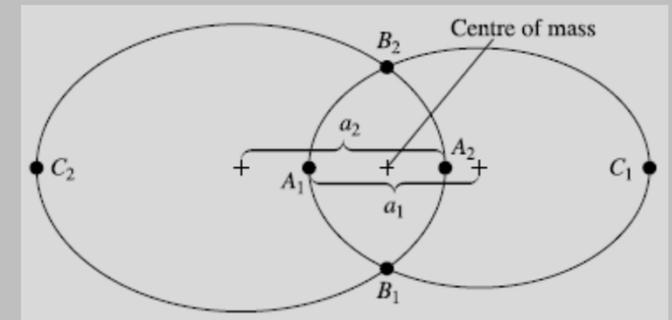
- Relazione Massa-Luminosità ( $L \propto M^\alpha$ ).
- Per confronto con i valori tipici di stelle di massa nota, che abbiano Tipo Spettrale e Classe di Luminosità simili.

Binaria visuale



Orbita relativa apparente.

Source: Fundamental Astronomy - H. Karttunen

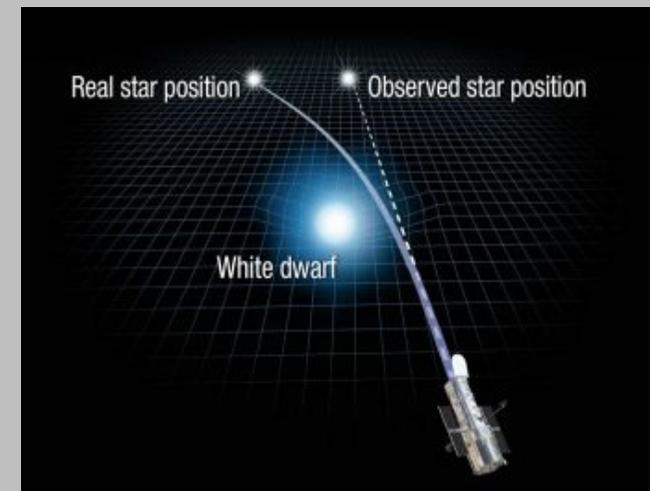
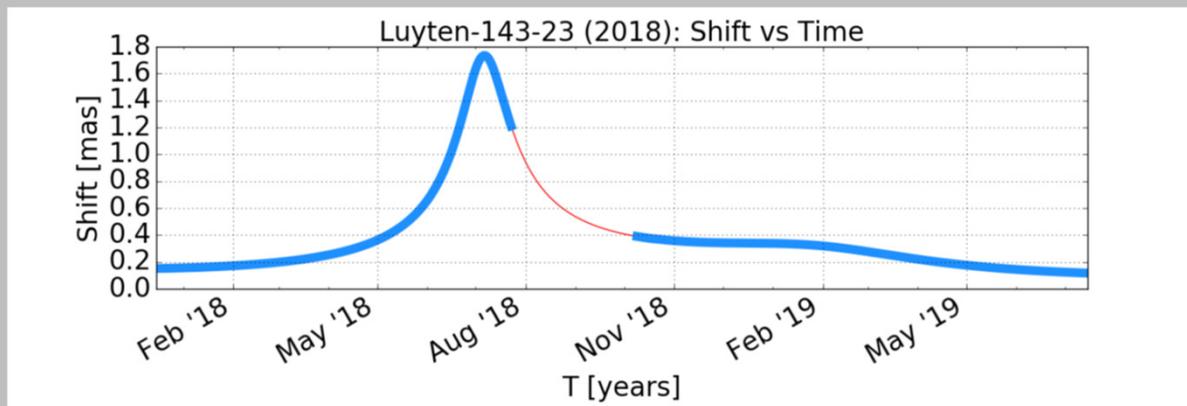


Orbite delle due componenti intorno al centro di massa.

Source: Fundamental Astronomy - H. Karttunen

## COME SI CALCOLA LA MASSA DELLE STELLE (2/2)

- Lenti gravitazionali.
  - Sfrutta la deflessione relativistica della luce di stelle di fondo causata dalla presenza di una stella posta lungo la linea di vista.



Luyten 143-23: distanza 14 anni luce, moto proprio: 1600 mas/anno.

- ❖ “Relativistic deflection of background starlight measures the mass of a nearby white dwarf star”.
- ❖ “Ongoing Astrometric Microlensing Events of Two Nearby Stars”.

## RAGGI STELLARI

- Richiede la conoscenza della distanza della stella.
- A parte il Sole, pochissime stelle, viste dalla Terra, presentano un disco misurabile direttamente.

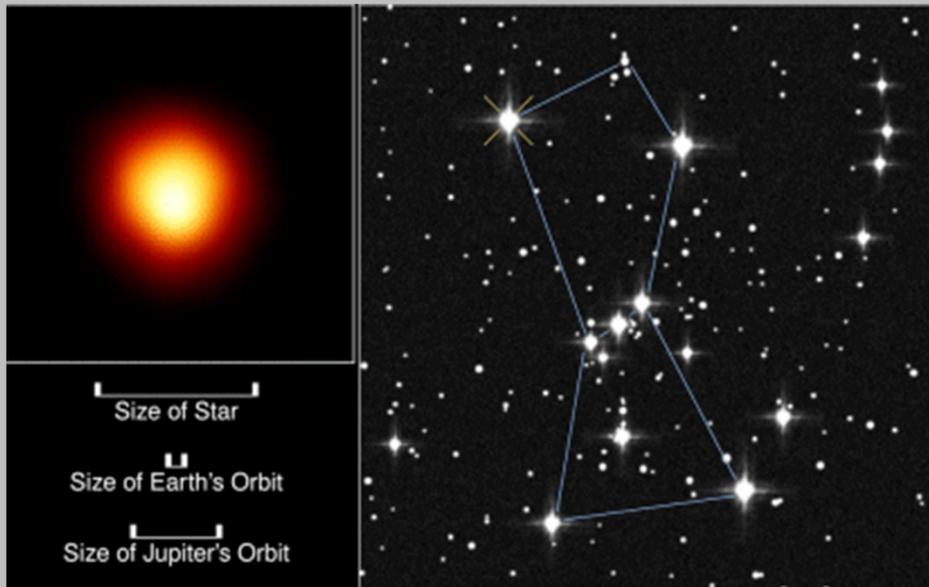


Immagine di  $\alpha$  Ori – HST (1996)

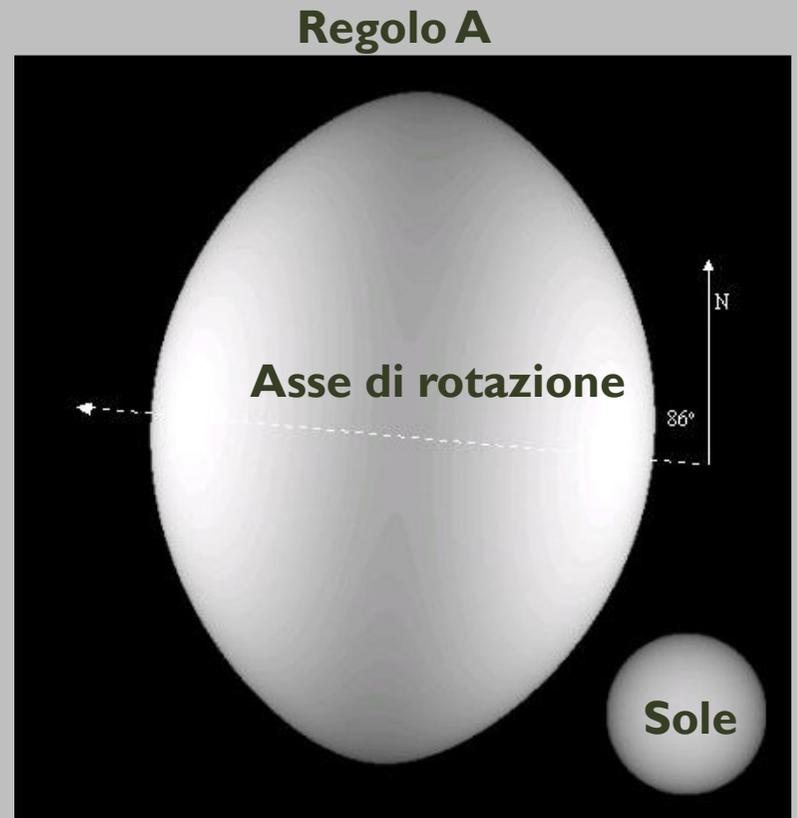
Metodi per determinare la dimensione angolare del disco stellare:

- interferometria;
- occultazioni lunari;
- binarie spettrofotometriche
- $L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$
- Per confronto con i valori tipici di stelle di raggio noto, che abbiano Tipo Spettrale e Classe di Luminosità simili.

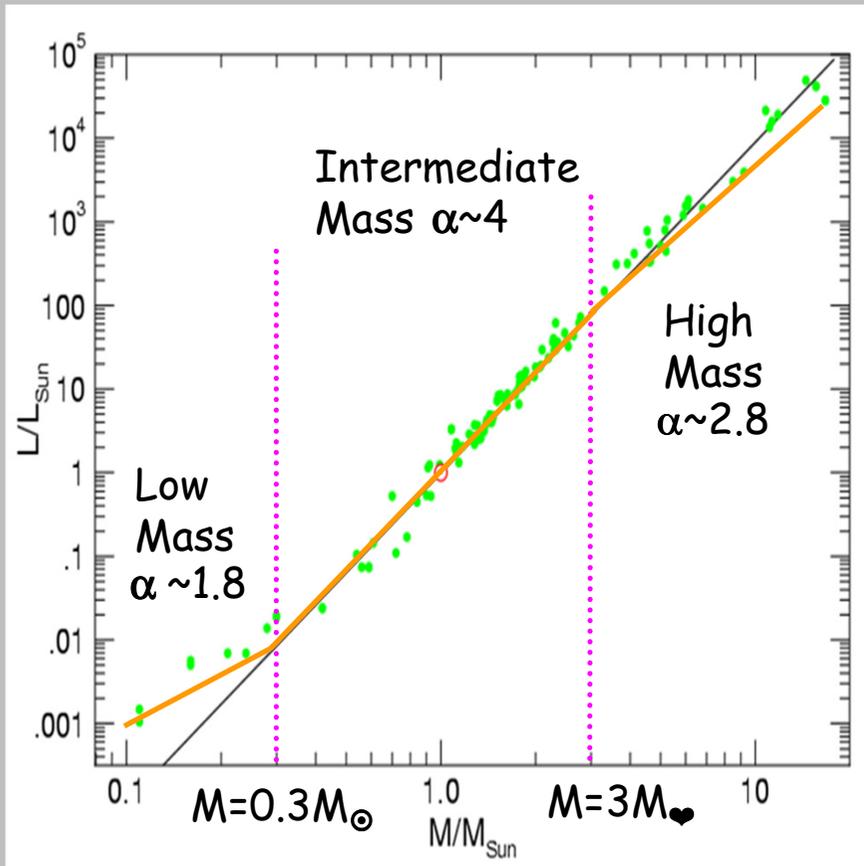
## VELOCITÀ DI ROTAZIONE E SCHIACCIAMENTO POLARE

### Regolo ( $\alpha$ Leo)

- Raggio: 4.21 (equatoriale), 3.21 (polare)  $R_{\odot}$ .
- Lo schiacciamento polare della stella è dovuto all'alta velocità di rotazione: 14h 38m.
- La velocità di rotazione equatoriale è di 337 km/s che corrisponde al 96% della velocità critica, la velocità alla quale la stella inizierebbe a disintegrarsi.



# RELAZIONE MASSA-LUMINOSITÀ



Crediti: Rosaria Tantalo, Antonio Maggio

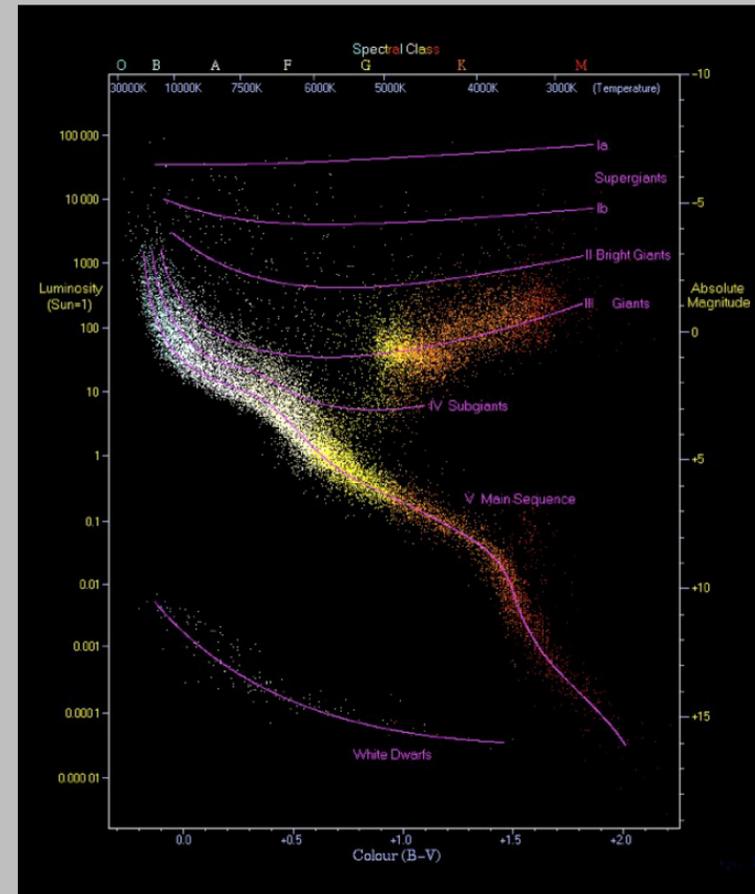
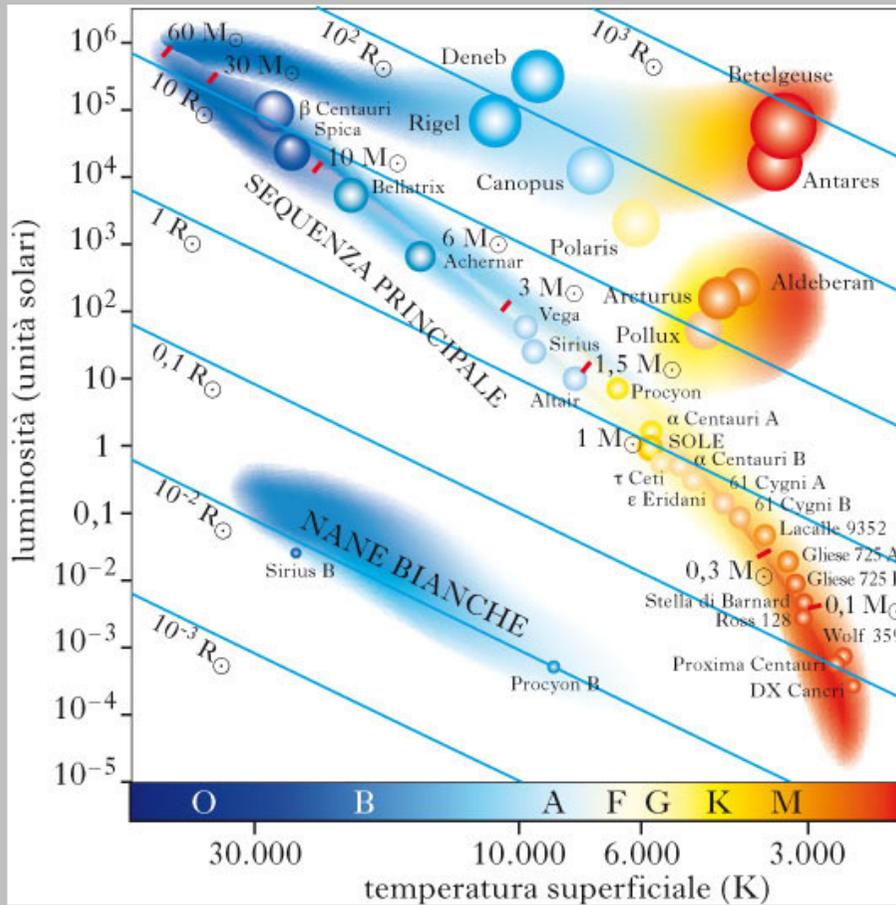
Luminosità e Massa di una stella sono legate dalla relazione:

$$\frac{L}{L_{\odot}} \propto \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}$$

Dove il valore di  $\alpha$  dipende dalla massa della stella:

- $\alpha \sim 1.8$  per masse inferiori a 0.3 masse solari;
- $\alpha \sim 4$  per masse comprese tra 0.3 e 3 masse solari;
- $\alpha \sim 2.8$  per masse superiori a 3 masse solari.

# MASSE E RAGGI NEL DIAGRAMMA H-R



## MAGNITUDINE APPARENTE E MAGNITUDINE ASSOLUTA

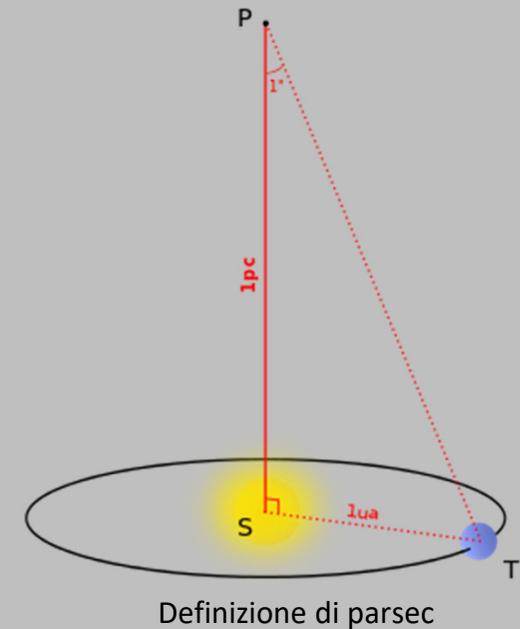
- La **magnitudine apparente**  $m$  misura l'intensità luminosa di una stella misurata dall'osservatore.
- Per poter confrontare le intensità luminose intrinseche si definisce come **Magnitudine assoluta**  $M$ , la magnitudine apparente che la stella avrebbe se fosse posta alla distanza di 10 pc (32.6 anni luce).

$$M - m = 5 - 5 \cdot \text{Log}_{10} d \quad (\text{se } d \text{ in parsec})$$

$$M - m = 5 + 5 \cdot \text{Log}_{10} \pi \quad (\text{se } \pi \text{ in secondi d'arco})$$

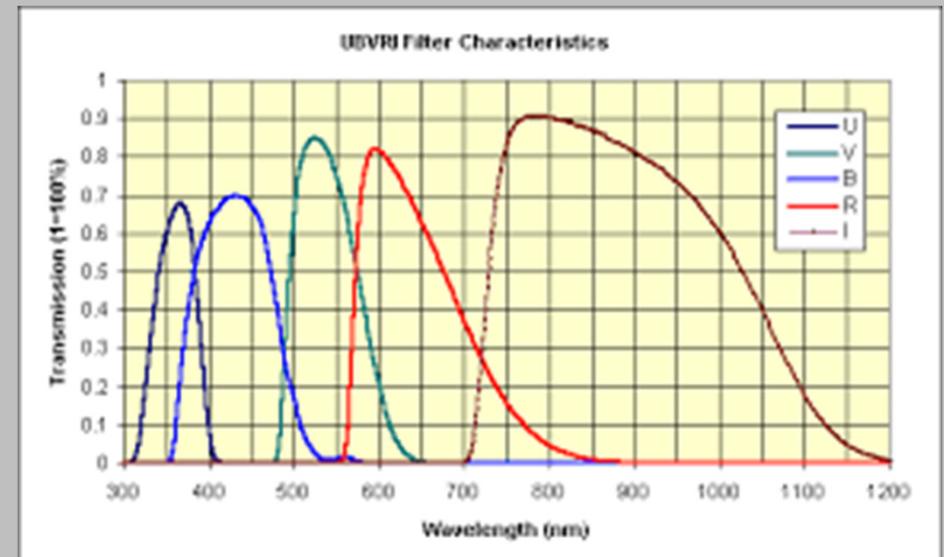
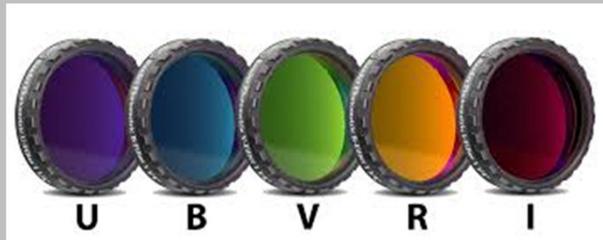
- Se sono in grado di determinare la magnitudine assoluta  $M$  di un astro, misurata la sua magnitudine apparente  $m$ , posso determinarne sempre la distanza con l'equazione:

$$d = 10^{[-(M-m-5)/5]} \quad (d \text{ in parsec})$$



## SISTEMI DI MAGNITUDINE STANDARD

- Quando si esprime una magnitudine occorre specificare anche in che filtro o banda dello spettro elettromagnetico è misurata.
- Esistono vari sistemi standard, ad esempio:
  - Standard Johnson-Cousins (Filtri U, B, V, R, I).
  - Filtri J, H, K.
  - Sistema Gun (Filtri g, r, i, z).



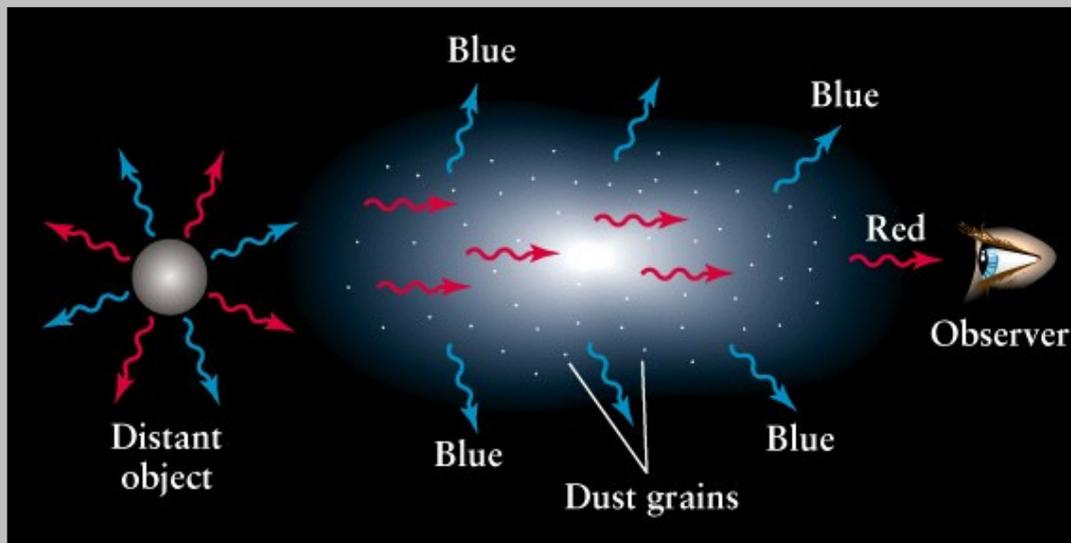
Banda passante dei filtri U, B, V, R, I  
del sistema di Johnson-Cousins

## MAGNITUDINI STRUMENTALI E MAGNITUDINI STANDARD

- Per poter confrontare le misure della stessa stella di osservatori diversi (con strumenti diversi) non è sufficiente utilizzare filtri standard ma è necessario trasformare le magnitudini apparenti strumentali in magnitudini apparenti standard.
- Per quali ragioni:
  - Il telescopio e i sensori sono generalmente diversi.
  - Anche se uguali, telescopio e sensori possono avere risposte spettrali diverse.
  - I sensori (CCD) hanno generalmente una sensibilità diversa o anche se uguali.
- La conversione avviene attraverso dei coefficienti che dipendono solo dalla strumentazione (telescopio + filtro + CCD).

Magnitudini strumentale → Magnitudini standard  
(coefficienti di trasformazione)

# ESTINZIONE INTERSTELLARE



- Estinzione interstellare:  $A_\lambda = f(\lambda^{-1})$
- Si misura in mag. / kpc
- Varia con la latitudine galattica.
- Aumenta al diminuire della lunghezza d'onda

Tipico valore di  $A_V$ : 0.7 mag. / kpc

$$m_{\text{intrinseca}} = m_{\text{osservata}} - A_\lambda * (d/1000)$$

$A_\lambda$  = coefficiente di estinzione interstellare

d = distanza in parsec

## INDICE DI COLORE E TEMPERATURA

- **Indice di colore:** è la differenza della magnitudine di una stella misurata in filtri ('colori') diversi, ad esempio per la stella Polare ( $\alpha$  UMi):

**Magnitudine:** U = +3.00, B = +2.62, V = +2.02, R = +1.53, I = +1.22

### Indice di colore:

$$U-B = +0.38$$

$$B-V = +0.60$$

$$V-R = +0.49$$

$$V-I = +0.80$$

Tipo e Classe	Sottotipo	Temperatura (°K)	V-R	
O V	5-9	40'000 - 28'000	-0.19	-0.17
B V	0-9	28'000 - 9'900	-0.16	-0.02
A V	0-9	9'900 - 7'400	-0.01	+0.17
F V	0-9	7'400 - 6'030	+0.16	+0.31
G V	0-9	6'030 - 4'900	+0.32	+0.44
K V	0-9	4'900 - 3'480	+0.45	+0.85
M V	0-9	3'480 - 2'400	+0.86	+1.65

## FORMAZIONE STELLARE

- Dalle osservazioni della nostra Galassia e di altre galassie abbiamo l'evidenza che le stelle si formano in due diversi tipi di regioni:
  - Nelle nubi molecolari giganti (GMC, Giant Molecular Clouds).
  - Regioni di idrogeno ionizzato (HII).
- Il collasso della nube molecolare, inizia con la frammentazione in tanti nuclei più densi, ciascuno dei quali forma una stella.
- Collassando, l'energia gravitazionale del gas si trasforma in energia termica ed il gas si riscalda.
- Il collasso continua sino al raggiungimento nel nucleo della temperatura necessaria alla fusione dell'idrogeno.



Crediti: HST - NASA/ESA

## CONDIZIONE PER IL COLLASSO

- La nube inizia a collassare quando il potenziale gravitazionale supera l'energia cinetica del gas.

$$\frac{3M_C kT}{\mu m_H} < \frac{3GM_C^2}{5R_C}$$

- $M_C$  = massa del nube .
- $R_C$  = raggio della nube.
- $G$  = costante di gravitazione universale ( $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ ).
- $\mu$  = peso molecolare medio ( $\mu=2$  per un gas di solo idrogeno).
- $m_H$  = massa atomo di H.
- $k$  = costante di Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ).
- $T$  = temperatura del gas.

## MASSA E LUNGHEZZA DI JEANS

- Sviluppando la precedente condizione, si ottiene:
  - la massa della nube necessaria per il collasso:
  - Il raggio minimo per cui una nube di densità iniziale  $\rho_0$  collasserà.

$$M_C > \left( \frac{3}{4\pi\rho_0} \right)^{1/2} \left( \frac{5kT}{G\mu m_H} \right)^{3/2}$$

$$R_C > \left( \frac{15kT}{4\pi G\mu m_H \rho_0} \right)^{1/2}$$

# STABILITÀ E COLLASSO

## Nubi di idrogeno neutro

$$M_C \sim 10 \text{ Masse solari}$$

$$T \sim 100 \text{ K}$$

$$n_H \sim 5 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$$

$$\rho_0 \sim n_H \cdot m_H \sim 8.35 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\mu = 1 \text{ (100\% HI)}$$

Calcolando la massa di Jeans si ottiene:

$$M_{\text{Jeans}} \sim 4000 \text{ Masse solari} \gg M_C$$

Le nubi HI sono stabili e non formano stelle.

## Nubi di idrogeno molecolare

$$M_C \sim 10 \text{ Masse solari}$$

$$T \sim 10 \text{ K}$$

$$n_H \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$$

$$n_H \cdot m_H \sim 1.67 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\mu = 2 \text{ (100\% H}_2\text{)}$$

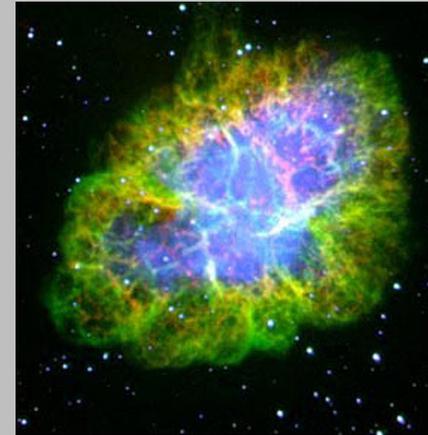
$$M_{\text{Jeans}} \sim 1 \text{ Massa solare} \sim 1M_C$$

I nuclei densi delle nubi molecolari giganti hanno massa critica, una piccola perturbazione può causarne il collasso.

## POSSIBILI CAUSE DI PERTURBAZIONE

Le possibili cause di generazione di onde d'urto che, comprimendo il gas, possono generare il collasso della nube sono:

- Esplosione di una Supernova:
- Fronti di ionizzazione (regioni HII): le stelle più calde di tipo O e B generano grandi quantità di radiazione ionizzante. Questa determina una bolla di gas ionizzato ( $T \sim 10000$  K). La regione HII si espande provocando un'onda d'urto nel gas freddo circostante.
- Collisioni tra nubi molecolari giganti.



Esplosione di Supernova

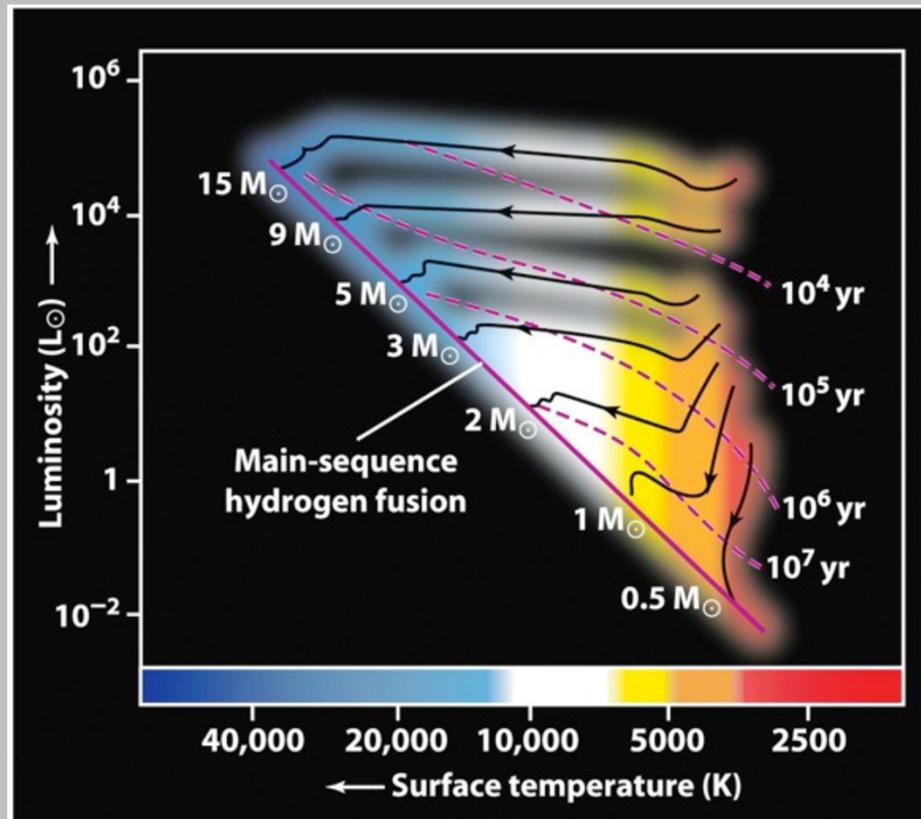


Fronte di ionizzazione

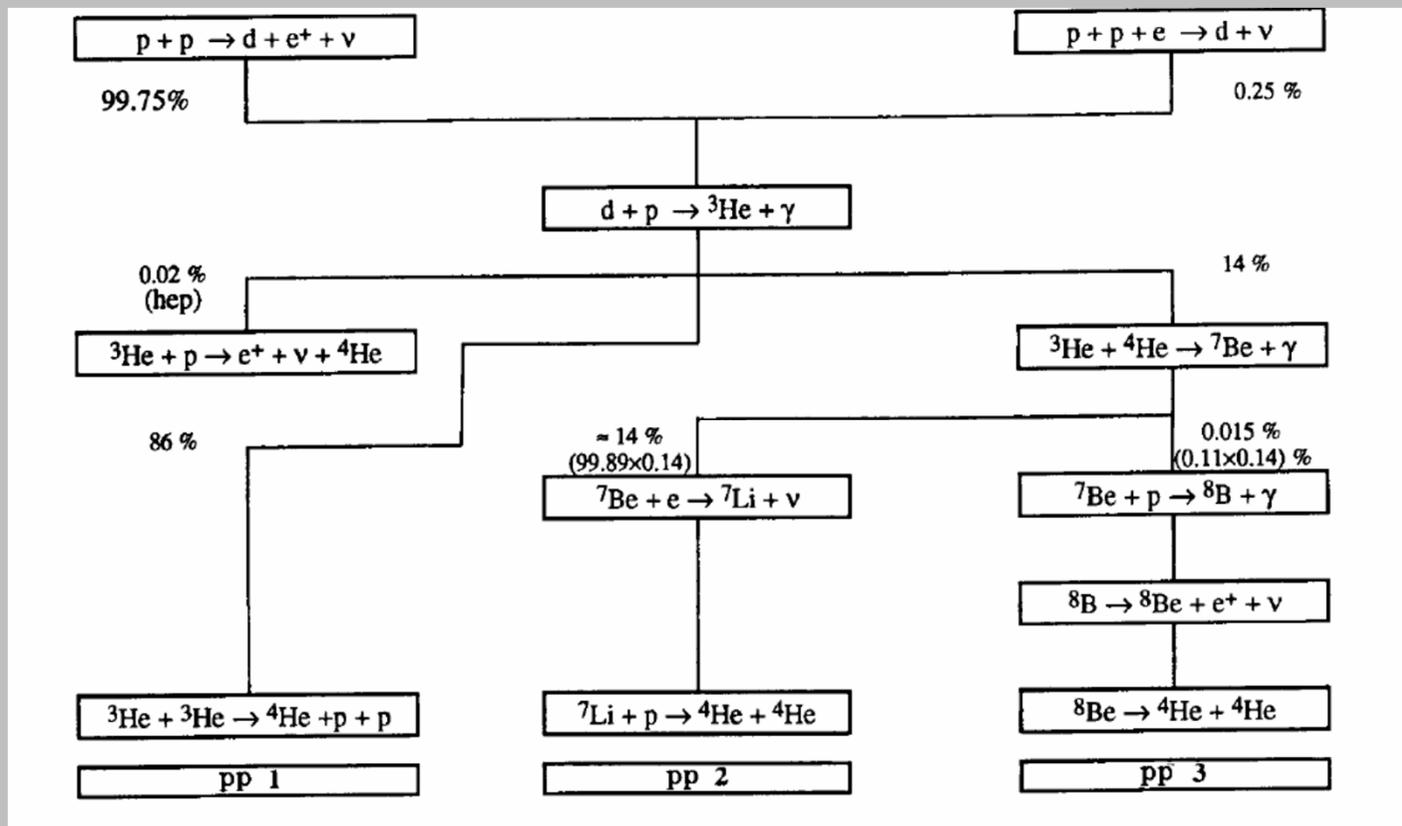
## NEBULOSA DI ORIONE E AMMASSO APERTO



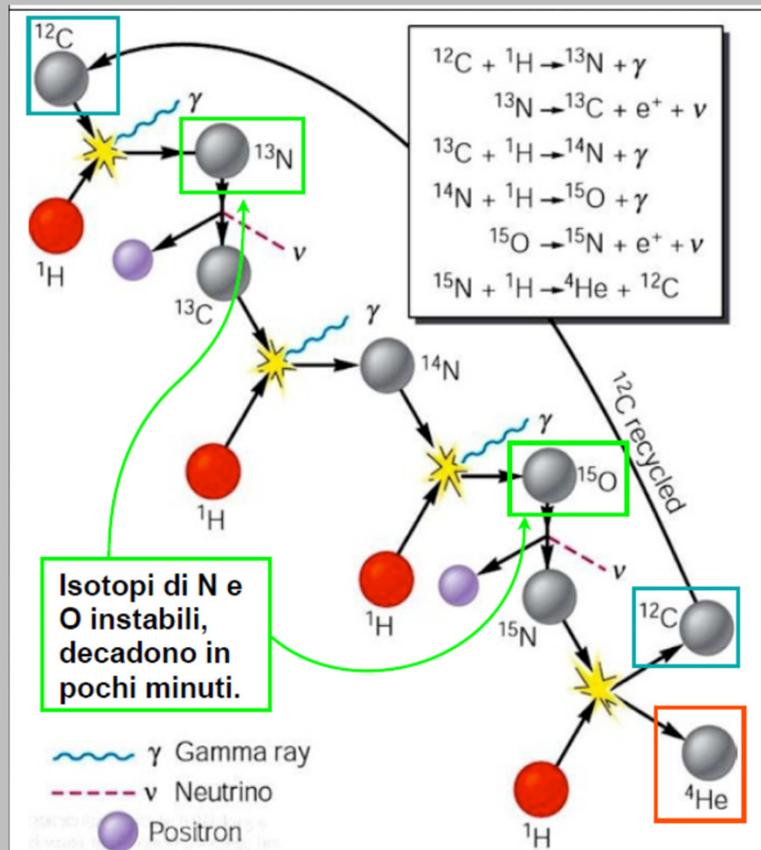
## TRACCE EVOLUTIVE DI PRE-SEQUENZA



# REAZIONI DI FUSIONE – CATENA P-P



## REAZIONI DI FUSIONE - CATENA CNO



- Il ciclo CNO è trascurabile in stelle di massa simile o inferiore a quella del Sole.
- E' predominante nelle stelle più massicce in quanto richiede una temperatura maggiore di  $1.8 \cdot 10^7$  K.
- Il carbonio ( $^{12}\text{C}$ ) agisce come catalizzatore.
- Gli isotopi di N e O sono prodotti negli stadi intermedi ma decadono entro pochi minuti.