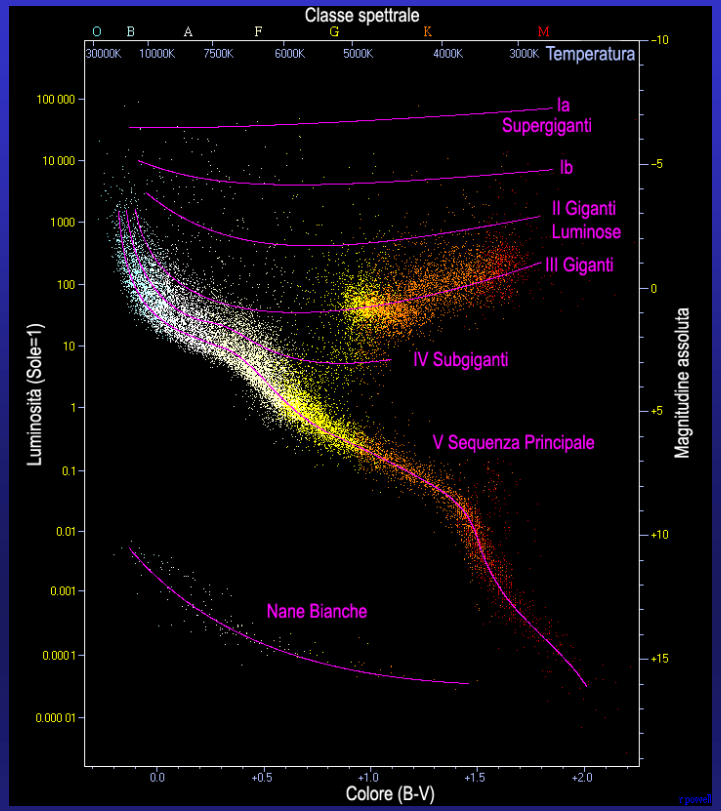
Il Sole



Primo Levi 2017

Roberto Bedogni

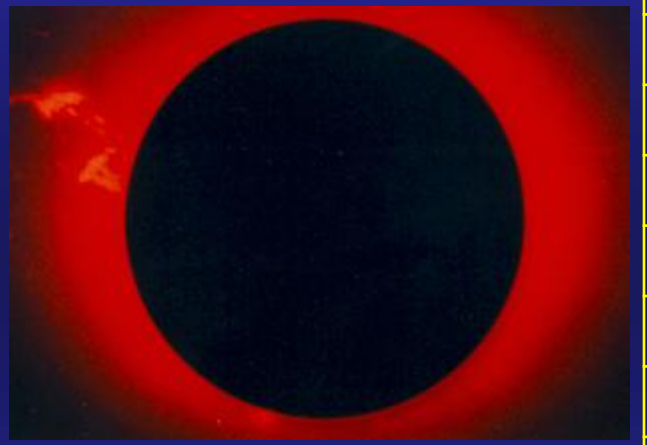
INAF Osservatorio Astronomico di Bologna

http://www.bo.astro.it/~bedogni/primolevi

Email :roberto.bedogni@oabo.inaf.it

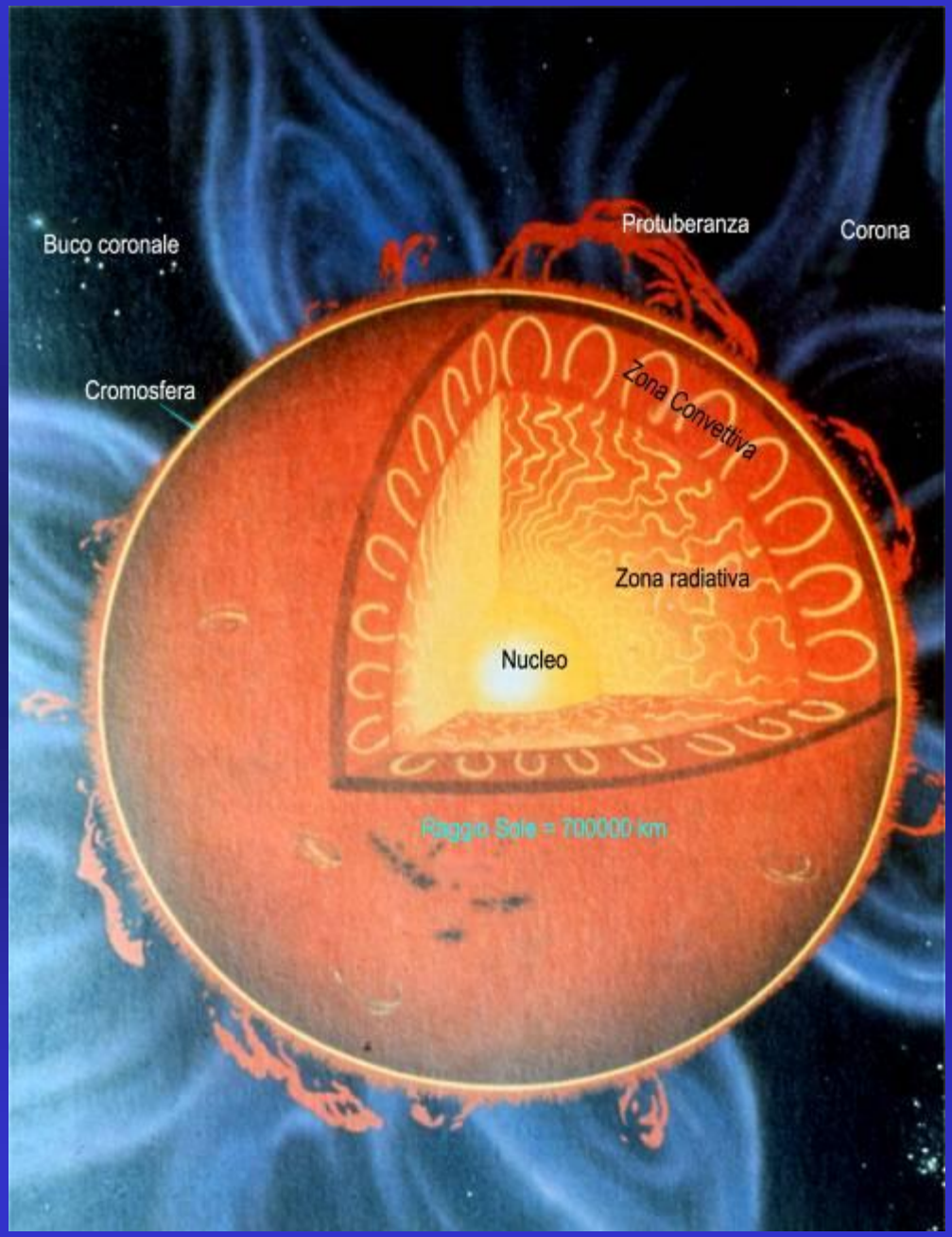
Sole

Il Sole nella riga H α



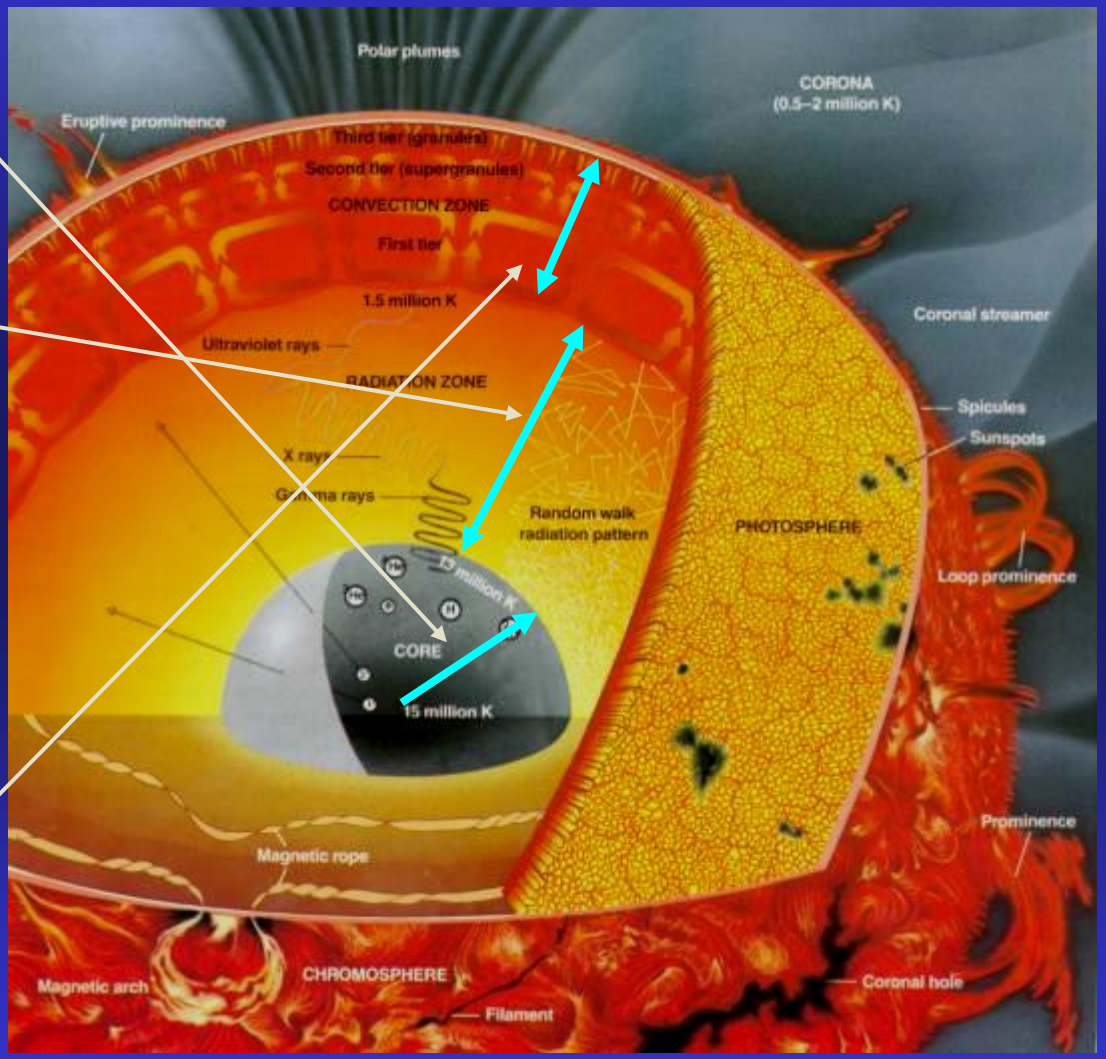
Distanza (km)	149 597 970 km ±2
Massa (kg)	$1{,}989\times10^{30}$
Massa	332 830 M_T
Raggio equatoriale (km)	695 000
Raggio equatoriale	109 R_T
Periodo di rotazione (giorni)	25-36
Densità media (kg/m^3)	1410
Densità al centro (kg/m^3)	151300
Pressione al centro (bars)	$2{,}334 \cdot 10^{11}$
Pressione fotosferica (bars)	0,0001
Temperatura al centro (°K)	15,6 milioni °K
Temperatura fotosferica (°K)	5780
Temperatura coronale (°K)	Da 2 a 3 milioni °K
Velocità di fuga (km/sec)	618
Accelerazione di gravità (m/sec ^{2})	274
Luminosità (J/s)	$3{,}86\times10^{26}$
Magnitudine visuale	-26,8
Magnitudine assoluta bol.	4,74
Età (miliardi di anni)	4,55

L’evoluzione del Sole



Il Sole – struttura stellare interna

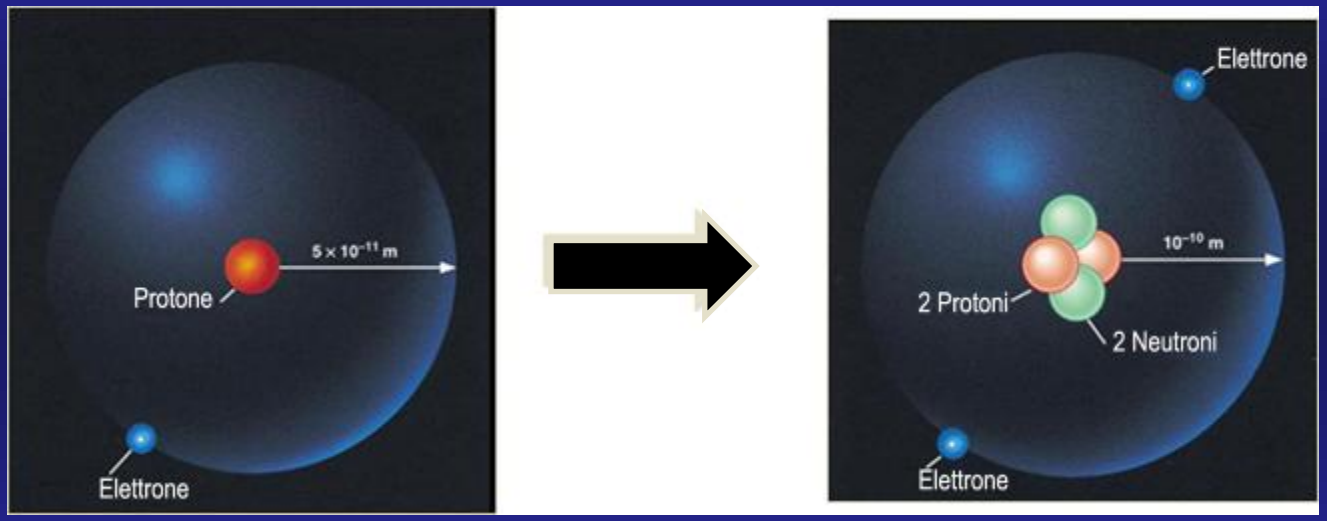
- Nucleo 0 ⇒ 0,25 $R_\odot$
  - Dove viene prodotta l'energia
  - La fusione nucleare Nucleo trasforma 7×10^{11} kg al secondo di idrogeno in elio
- Zona Radiativa 0,25 ⇒ 0,75 $R_\odot$
  - l'energia viene trasportata per radiazione
  - Sebbene i fotoni prodotti viaggino alla velocità della luce, vengono deviati così tante volte dal denso materiale, che impiegano circa 170000 anni (? Anche >1 Ma secondo altri autori) per raggiungere la zona convettiva
- Zona Convettiva 0,75 ⇒ 1 $R_\odot$
  - L'energia viene trasportata per convezione in superficie, come in una pentola d'acqua che bolle



Energia nucleare ?

$4 \times {}^{1}H \longrightarrow {}^{4}He + \text{neutrini} + \text{energia}$

4 X



0,007 della massa di un atomo di Idrogeno è trasformata in energia

Sarà sufficiente?

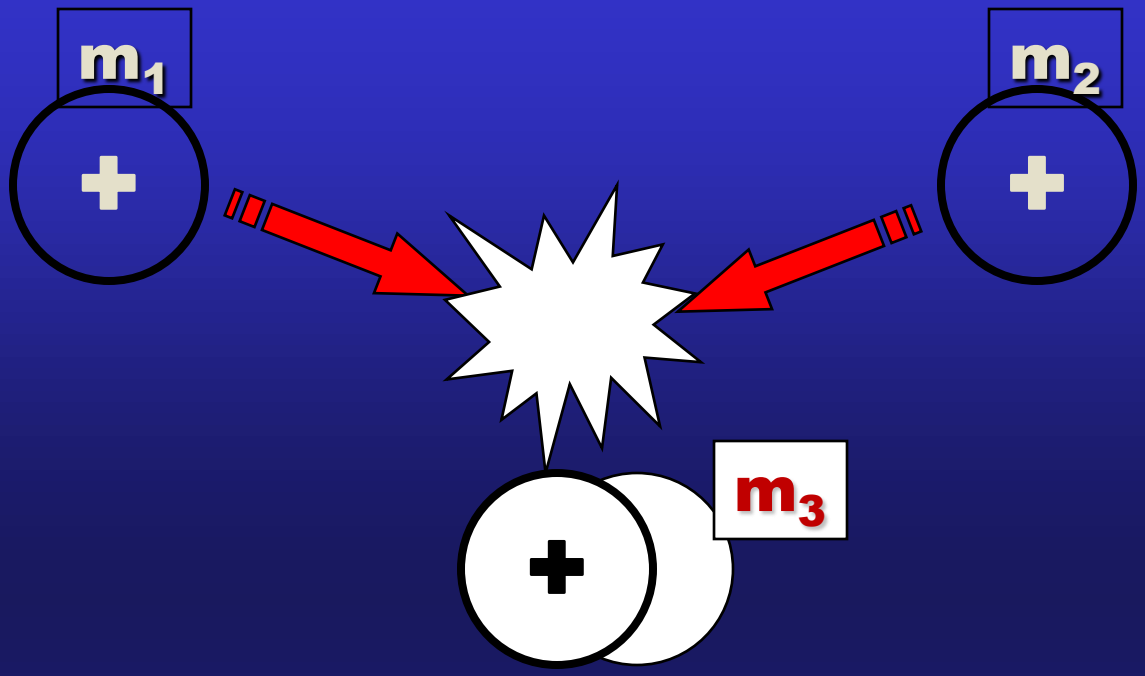
Energia sviluppata in Watt

$4 \cdot 10^{26}$ Watt

=

400.000.000.000.000.000.000.000 Watt

Come avviene il processo di Fusione ?

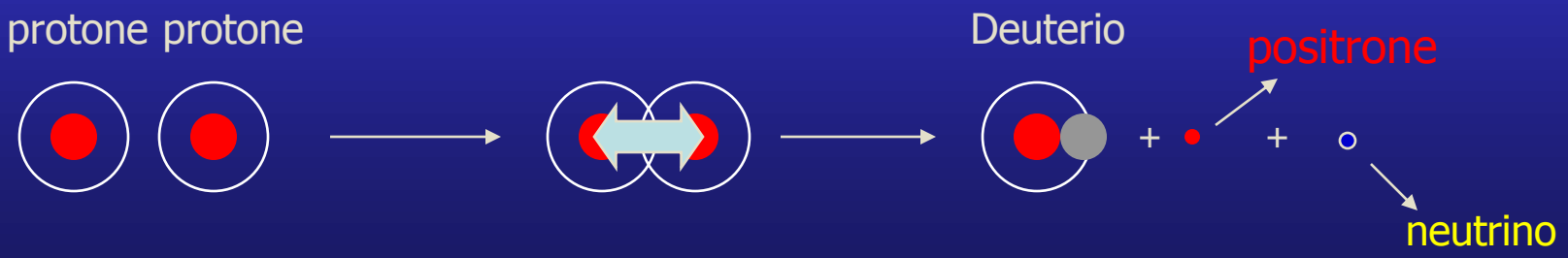


$$m_1 + m_2 > m_3$$

$$\delta m$$

$$E = mc^2$$

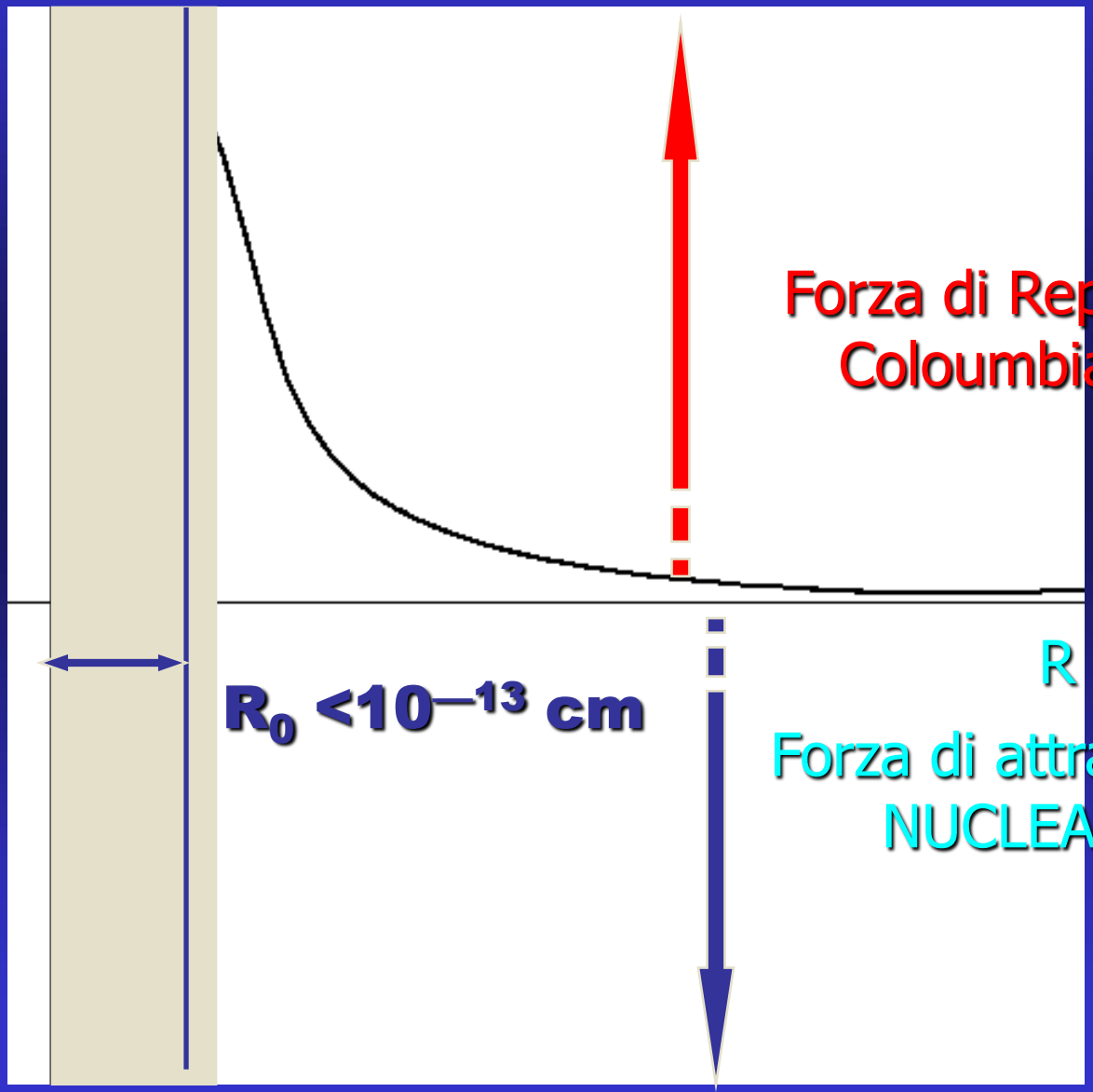
La fusione nucleare dell'idrogeno H: ciclo p-p

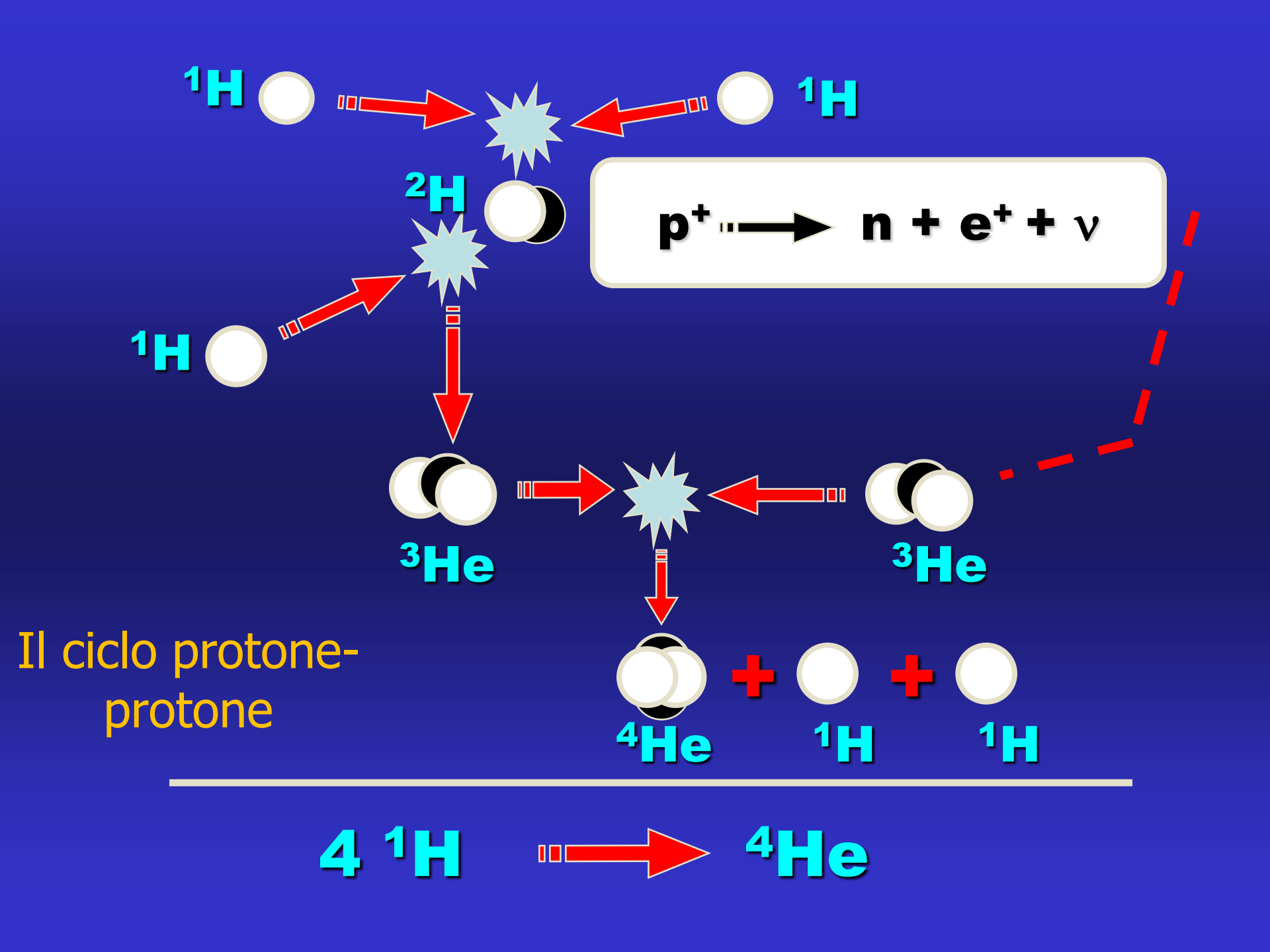


Affinché due protoni possano unirsi e formare un nucleo di deuterio, D, occorre superare la barriera coulombiana, poi agiscono le forze nucleari, che tendono ad unire le due particelle.

Questa circostanza si verifica in condizioni di altissima densità e temperatura attorno ai dieci milioni di gradi

C'è un problema: l'effetto tunnel




^1H
^1H
^2H
$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu$
^1H
^3He
^3He
Il ciclo protone-protone
^4He
^1H
^1H
4 ^1H
^4He

Il Sole oggi

Il Sole oggi

Il bruciamento dell'H avviene nel nucleo e l'energia è trasportata verso la zona convettiva in modo radiativo.

Il gas del nucleo è un "gas perfetto" ad alta temperatura

NB Ga=giga-anni=10^9 anni

Età=4,55 Ga

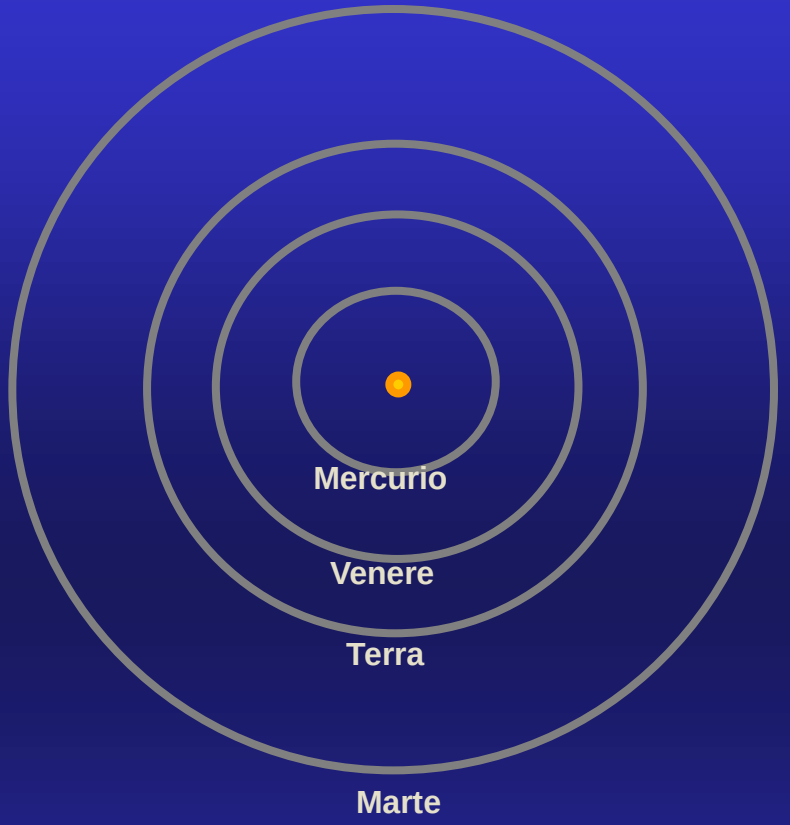
$M_\odot = 1{,}99\times10^{30}$ kg

$R_\odot = 700\ 000$ km

$L_\odot = 3{,}8\times10^{26}$ Watt

$T_\odot = 5789$ °K

Il Sole termina la fase di sequenza principale



Il Sole esaurisce l'idrogeno nel nucleo

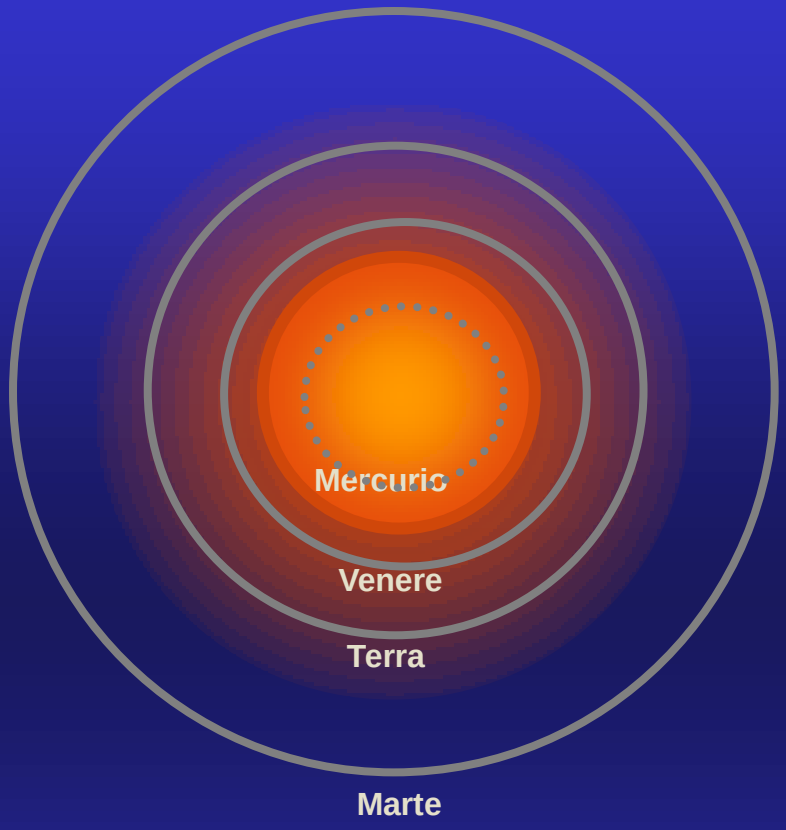
Età=10,9 Ga
ΔEtà=durata=6,35 Ga
R= 1,58 $R_\odot$
L= 2,2 $L_\odot$

La fase di post-sequenza-1

Il Sole si trasforma in una subgigante

Età=11,6 Ga
ΔEtà=durata=0,7 Ga=700 Ma
R= da 1,58 a 2,3 $R_\odot$
L= 2,2 $L_\odot$ (costante)
T= da 5517 a 4900 °K

La fase di post-sequenza-2



Il Sole diventa una gigante rossa

Età=12,233 Ga
ΔEtà=durata=0,63 Ga=630 Ma
R= da 2,3 a 166 $R_\odot$
L= da 2,2 a 2350 $L_\odot$
T= da 4900 a 3107 °K

La fase di post-sequenza-3

Il Sole brucia l'elio nel nucleo (flash He)

Inizio del flash dell'He

Età=12,234 Ga
ΔEtà=durata=0,001 Ga=1 Ma
R= da 2,3 a 9,5 $R_\odot$
L= da 2350 a 41 $L_\odot$
T= da 4900 a 4724 °K

Fine del flash dell'He

Età=12,344 Ga
ΔEtà=durata=0,11 Ga=110 Ma
R= da 9,5 a 18 $R_\odot$
L= da 41 a 110 $L_\odot$
T= da 4724 a 4450 °K

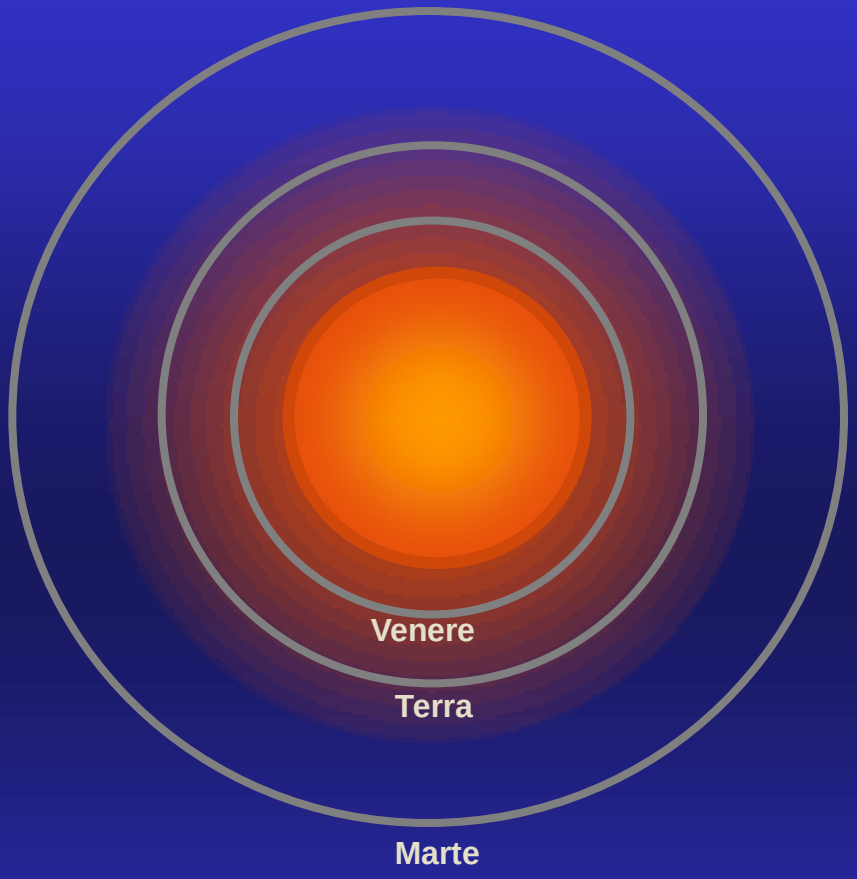
Termina la fase di post-sequenza

Il Sole esaurisce
la combustione
dell'elio nel nucleo

Età=12,344 Ga
ΔEtà=durata=0,11 Ga=110 Ma
R= da 9,5 a 18 $R_\odot$
L= da 41 a 110 $L_\odot$
T= da 4724 a 4450 °K

La fase di gigante rossa

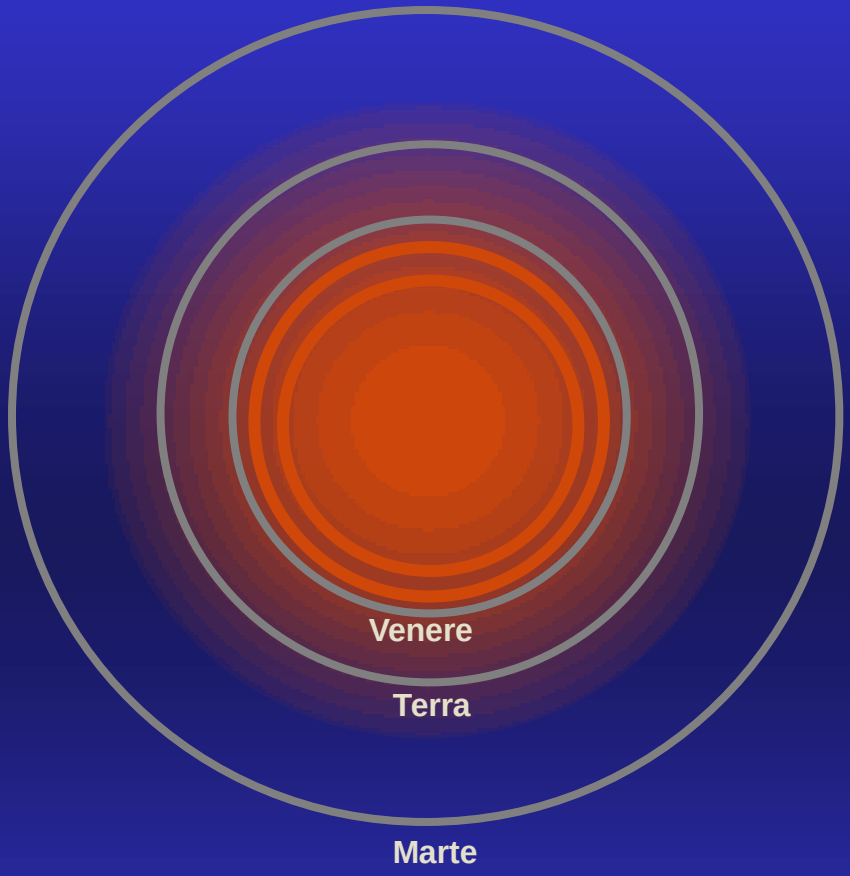
Il Sole diviene
per la seconda volta
una gigante rossa



Età=12,365 Ga
ΔEtà=durata=0,021 Ga=21 Ma

La fase del Sole pulsante

Il Sole pulsa
e diviene instabile



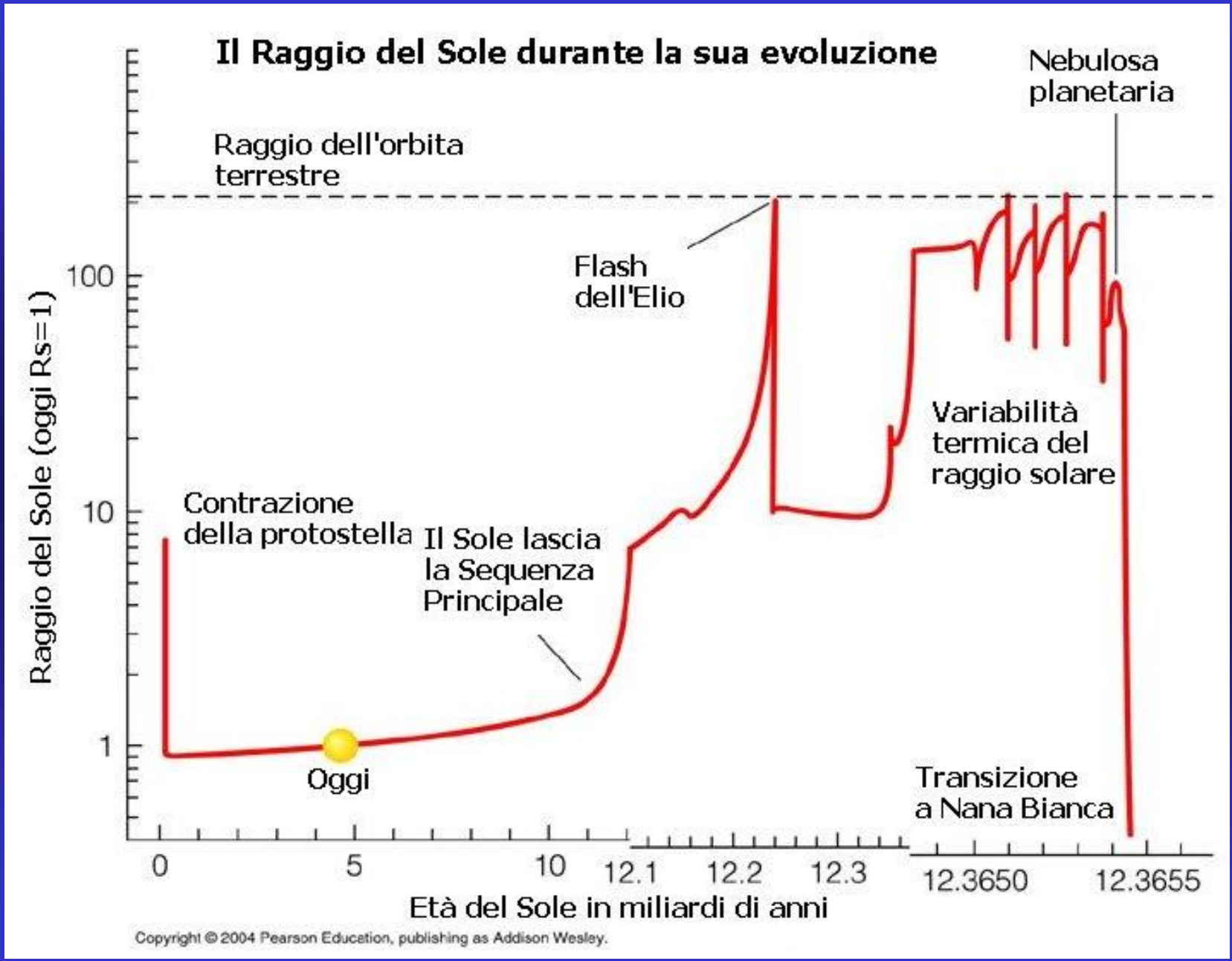
Età=12,366 Ga
ΔEtà=durata=0,001 Ga=1 Ma

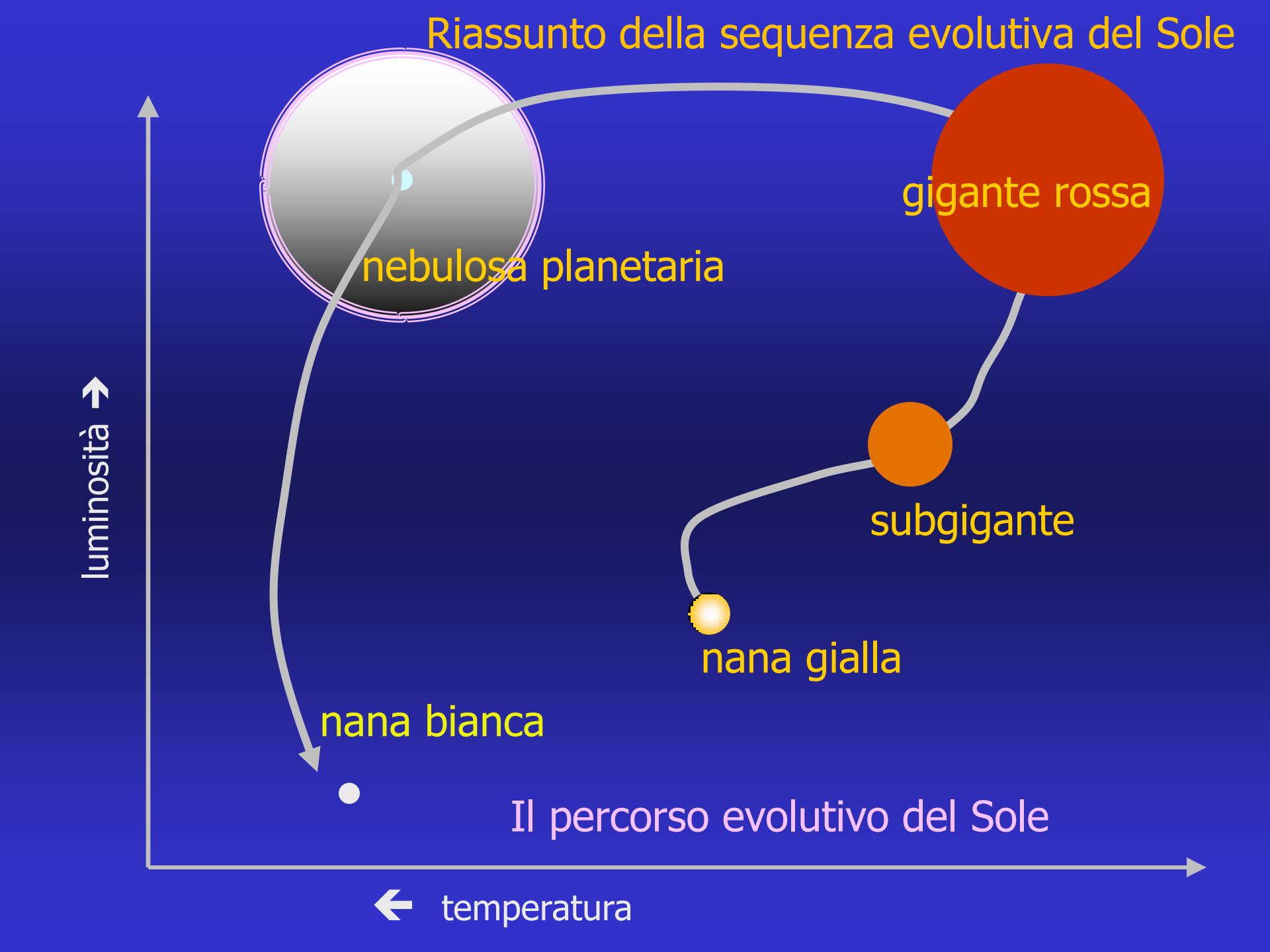
La fase di Nana Bianca

Il Sole diviene
una Nana Bianca

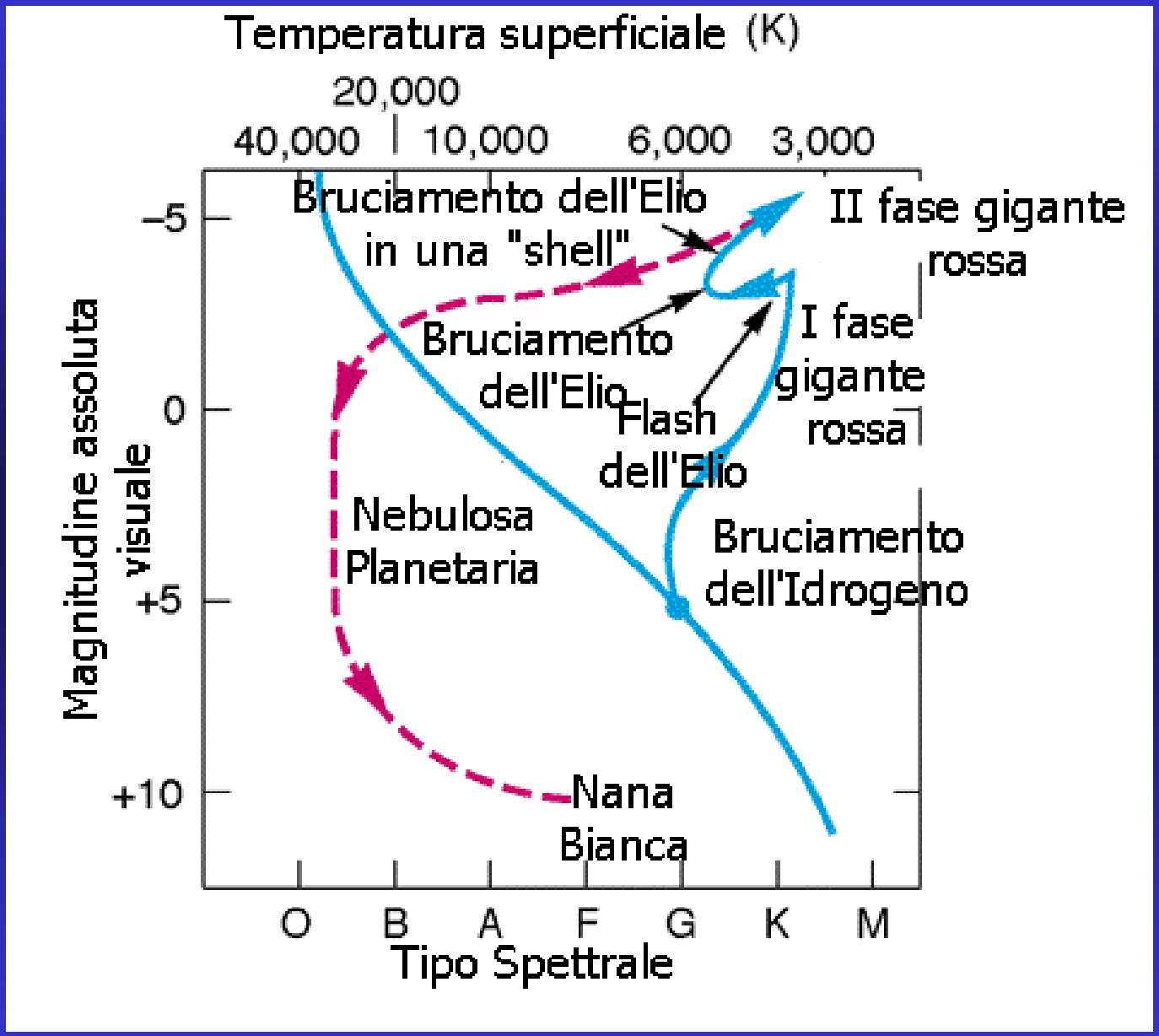
Età >12,4 Ga
ΔEtà=durata=0,034 Ga =34 Ma

Variazione del Raggio del Sole

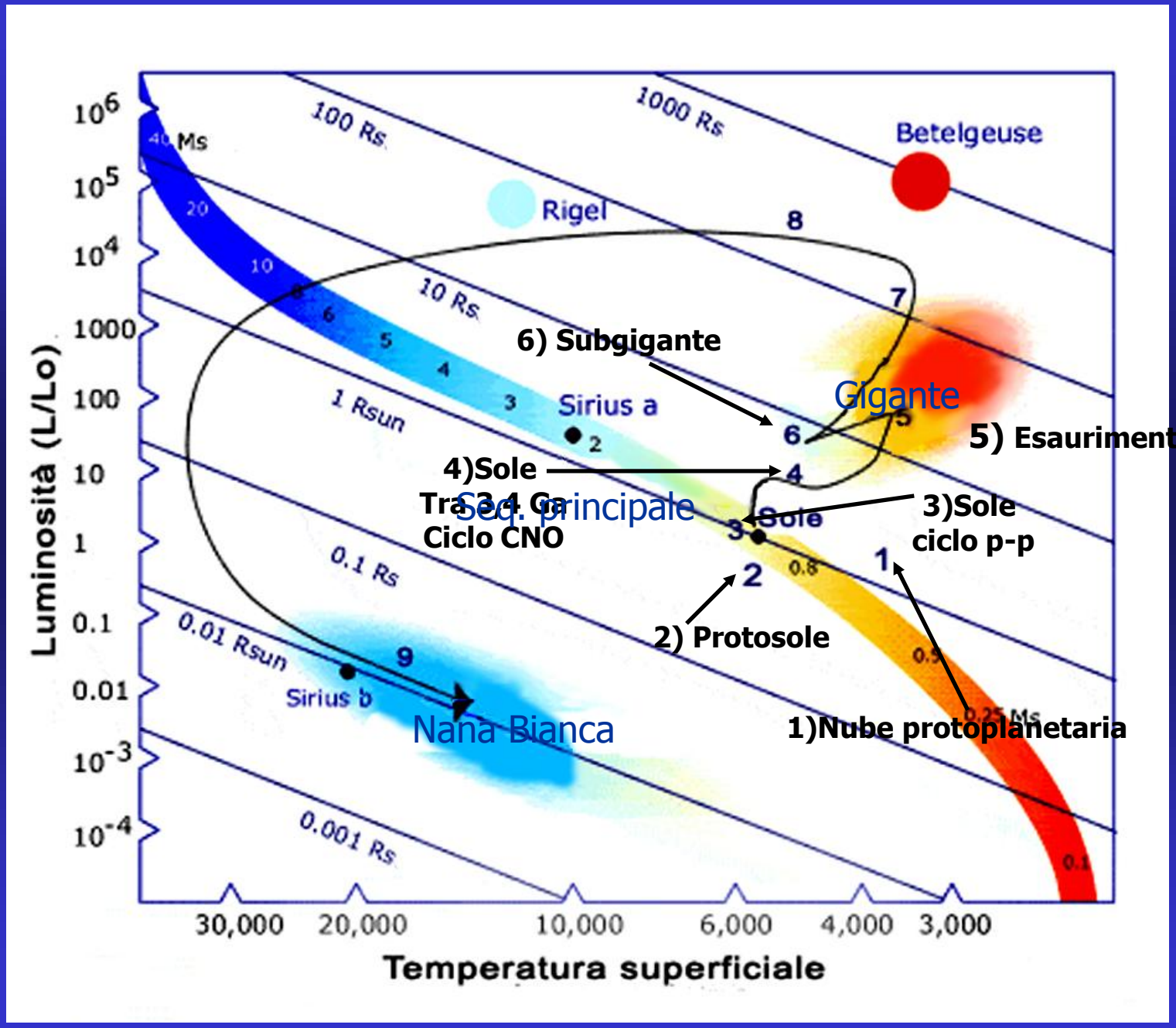



Riassunto della sequenza evolutiva del Sole
gigante rossa
nebulosa planetaria
subgigante
nana gialla
nana bianca
luminosità
temperatura
Il percorso evolutivo del Sole

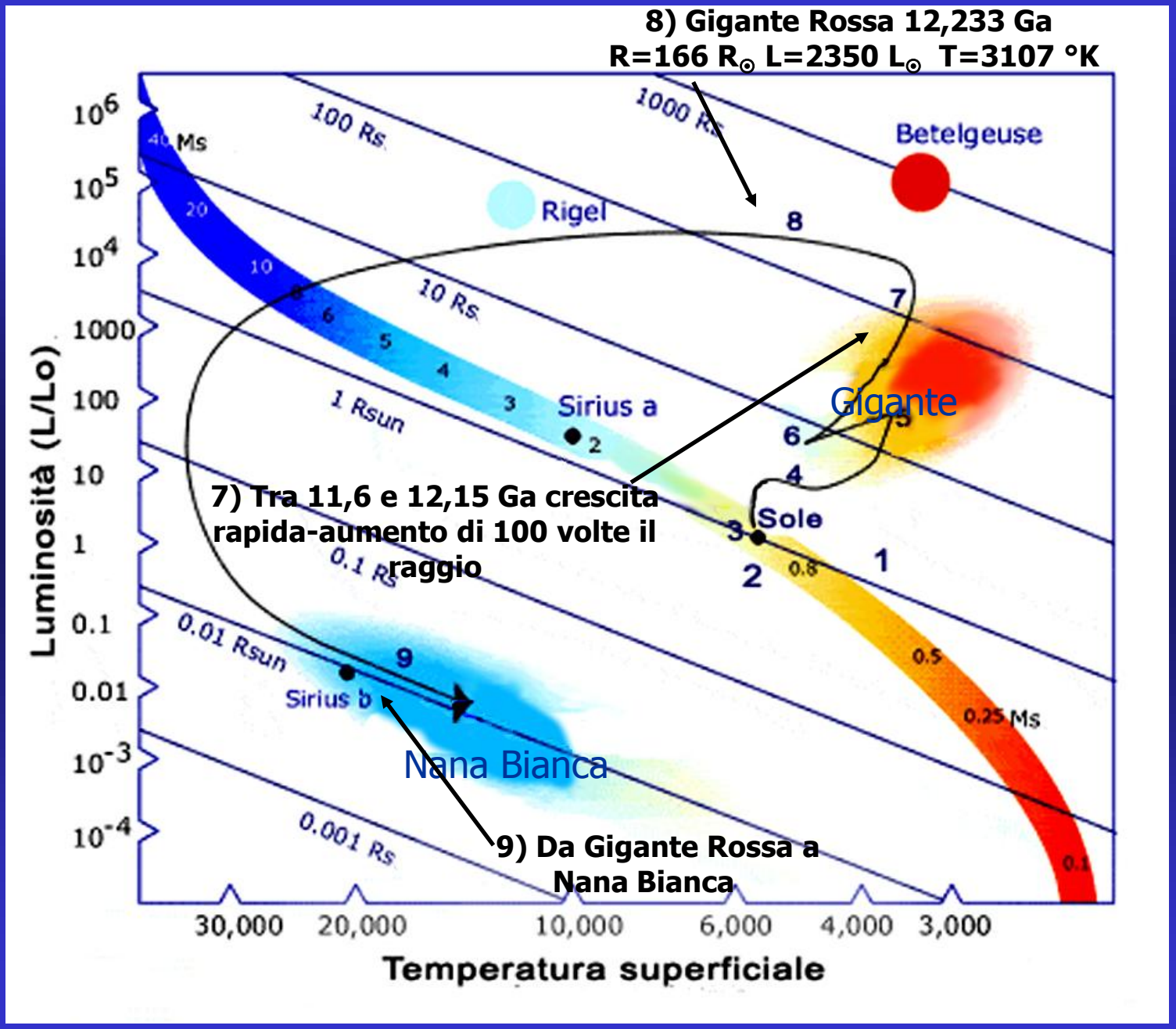
Evoluzione del Sole



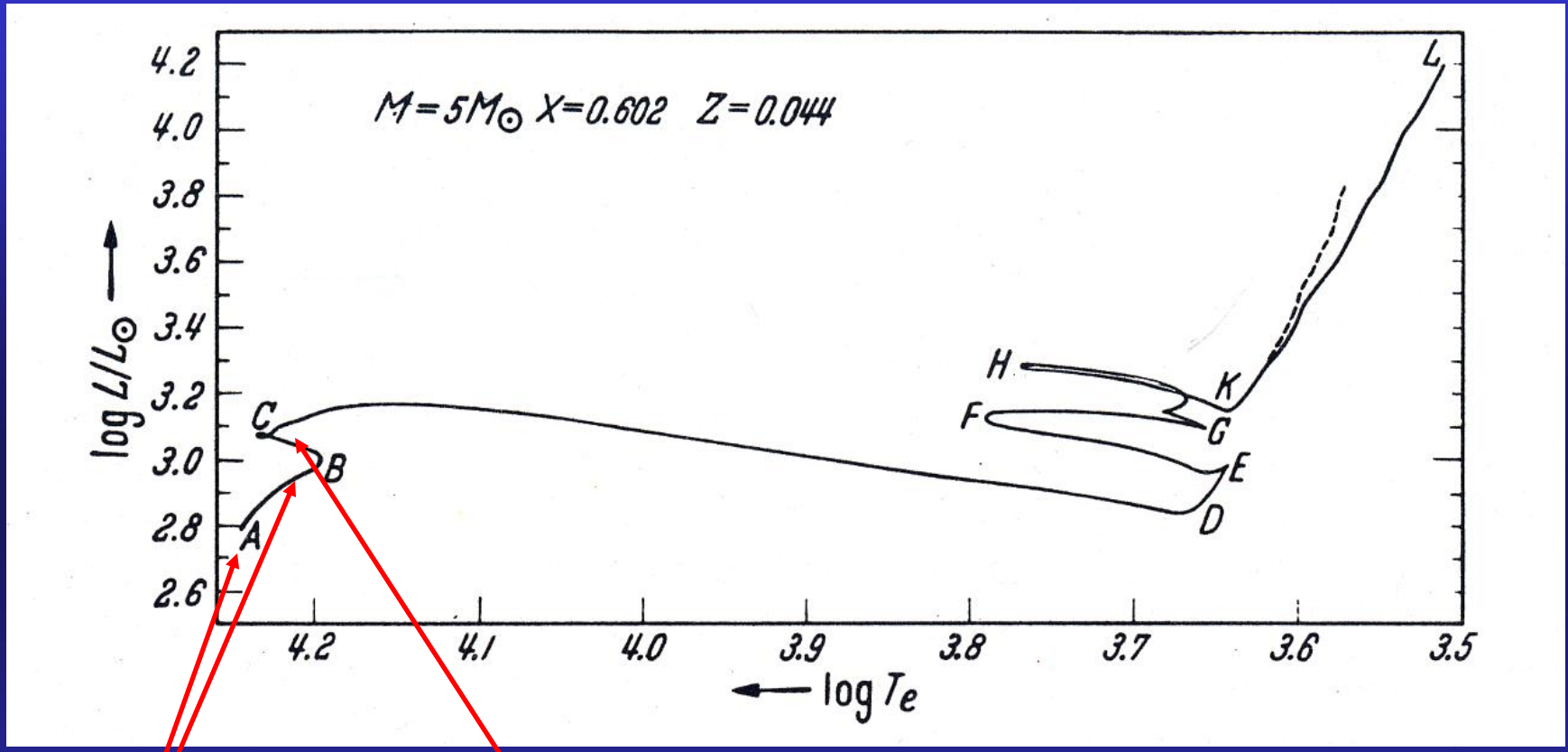
Evoluzione Sole I



Evoluzione Sole II



Evoluzione di una stella di 5 masse solari (I)

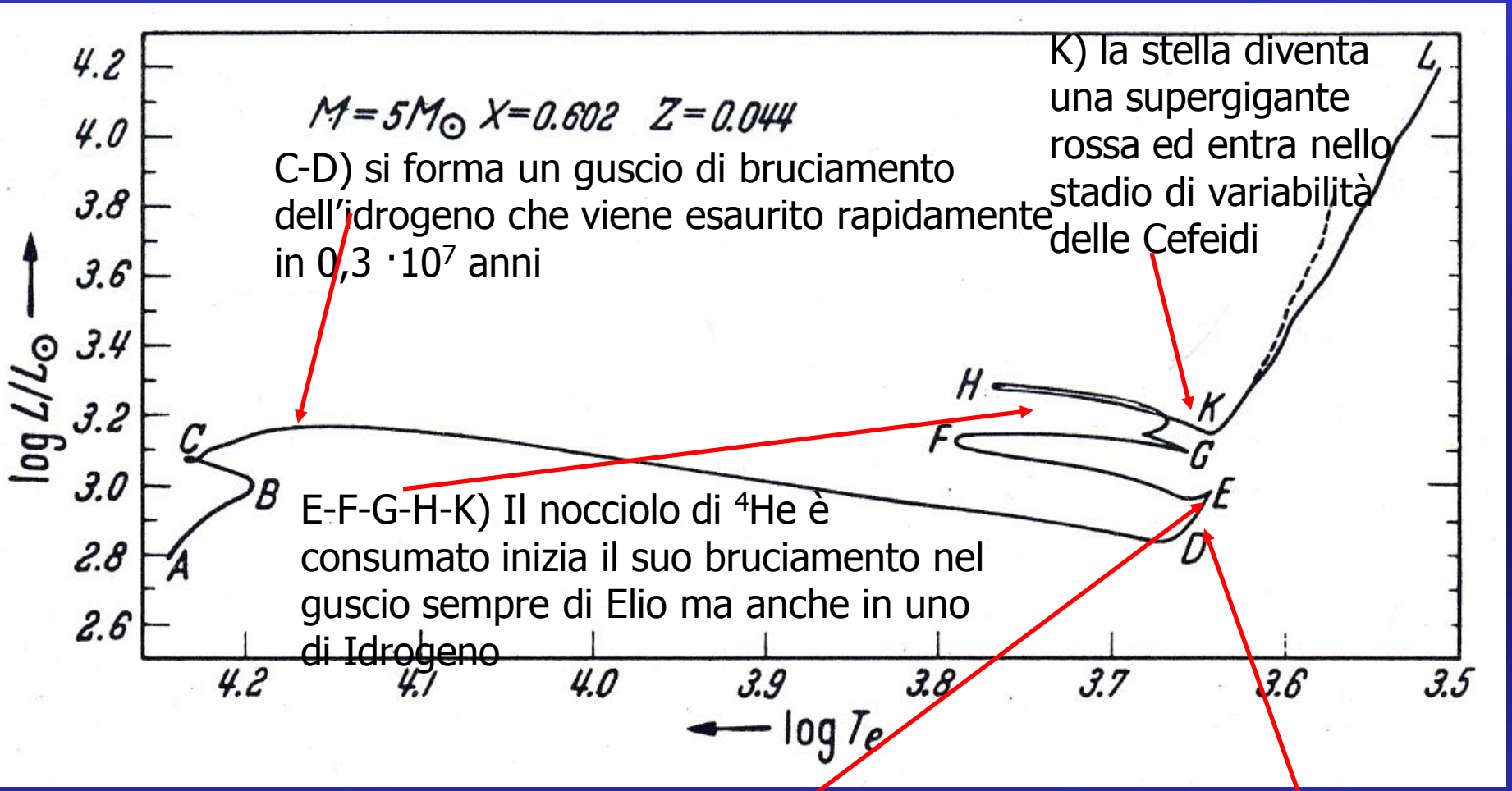


A) T=17500 °K R=2,58 $R_\odot$ M_{bol}=-2,24 T_c=26,4×10^6 °K P_c=5,5×10^{10} atm

A-B) ciclo CNO l'idrogeno si trasforma in Elio

B-C) si riunisce una zona di convezione con mescolamento dei prodotti nucleari per un tempo di evoluzione (A-B-C) di 5,6×10^7 anni

Evoluzione di una stella di 5 masse solari (II)



C-D) si forma un guscio di bruciamento dell'idrogeno che viene esaurito rapidamente in $0{,}3 \cdot 10^7$ anni

K) la stella diventa una supergigante rossa ed entra nello stadio di variabilità delle Cefeidi

E-F-G-H-K) Il nocciolo di ^4He è consumato inizia il suo bruciamento nel guscio sempre di Elio ma anche in uno di Idrogeno

E) Inizia la fusione di ^4He in ^{12}C a T_c ~130-180×10 ^{6} °K mediante il processo 3 α

D-E) Fase di Gigante Rossa