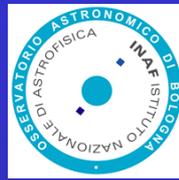


Università "Primo Levi"



23 Marzo 2018

Il Sole-evoluzione

Bedogni Roberto INAF Osservatorio Astronomico di Bologna

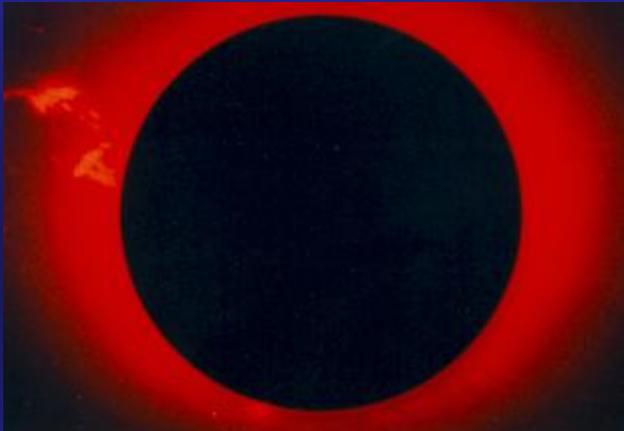
<http://davide2.bo.astro.it/~bedogni/primolevi/>

email: roberto.bedogni@oabo.inaf.it oppure

robob5206@gmail.com

Sole

Il Sole nella
riga H α



Distanza (km)	149 597 970 km ± 2
Massa (kg)	$1,989 \times 10^{30}$
Massa	$332\,830 M_{\text{T}}$
Raggio equatoriale (km)	695 000
Raggio equatoriale	$109 R_{\text{T}}$
Periodo di rotazione (giorni)	25-36
Densità media (kg/m ³)	1410
Densità al centro (kg/m ³)	151300
Pressione al centro (bars)	$2,334 \times 10^{11}$
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)	$3,86 \times 10^{26}$
Magnitudine visuale	-26,8
Magnitudine assoluta bol.	4,74
Età (miliardi di anni)	4,55

Equazioni fondamentali per gli interni stellari

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM_r}{r^2}$$

Equilibrio idrostatico per una sfera di gas soggetta all'autogravità

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon$$

Produzione di energia

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\chi \rho}{T^2} \frac{L_r}{4\pi r^2}$$

Trasporto di energia per irraggiamento

$$\frac{dT}{dr} = -\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}$$

Trasporto di energia per convezione

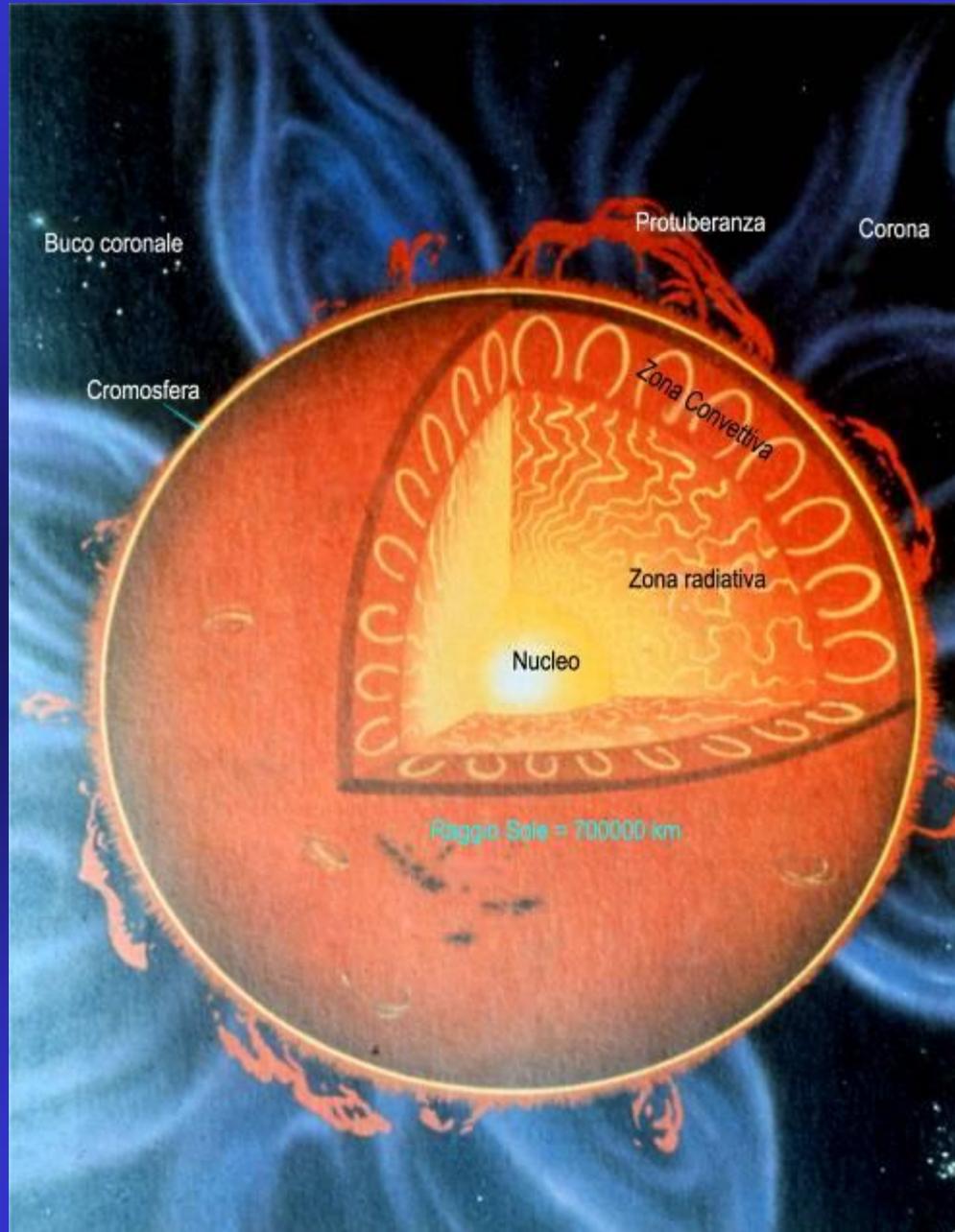
P = pressione, T = temperatura, ρ = densità, χ = opacità, r = raggio, M_r =massa al raggio r , L_r =luminosità al raggio r , γ = coefficiente adiabatico, c =velocità luce, $a=4\sigma/c$ con σ =costante di Stefan-Boltzmann- G =costante gravitazionale, ε =efficienza di produzione nucleare

Elementi critici nel calcolo di modelli stellari

Le sequenze evolutive delle stelle sono state sviluppate in seguito alla determinazione delle energie di legame dei nucleoni ed allo sviluppo di calcolatori capaci di velocizzare le tecniche di soluzione numeriche applicate alle equazioni della fisica degli interni stellari

1. χ = opacità (quantità che media "macroscopicamente" le caratteristiche microscopiche dei diversi costituenti il gas solare)
2. **Strato radiativo o convettivo**: ci sono dei precisi criteri che stabiliscono quando uno strato di un interno stellare diventa instabile ed incominciano a prodursi dei moti "convettivi". NB tra questi fattori essenziale è l'opacità. **Nei modelli stellari è necessario individuare quando lo "strato" diventa instabile ed applicare le regole del "bruciamento nucleare" con regole che almeno approssimativamente tengono conto della convezione (Teoria della Mixing-Length)**
3. **Perdite di massa**: le instabilità nelle fasi evolutive determinano la produzione di "venti stellari" che producono fino a Nebulose Planetarie
4. **Autoinquinamento**: le reazioni nucleari cambiano gli elementi ed inquinano l'interno stellare gettando le premesse per nuove reazioni
5. **Stato del gas**: si passa durante l'evoluzione della stella dalla descrizione del gas come "gas perfetto" a quella, nelle fasi finali, di "gas degenerato" di elettroni o di neutroni (relativistico ed ultrarelativistico)

Una descrizione della struttura del Sole



Il Sole – struttura stellare interna

□ Nucleo 0 \Rightarrow 0,25 R_{\odot}

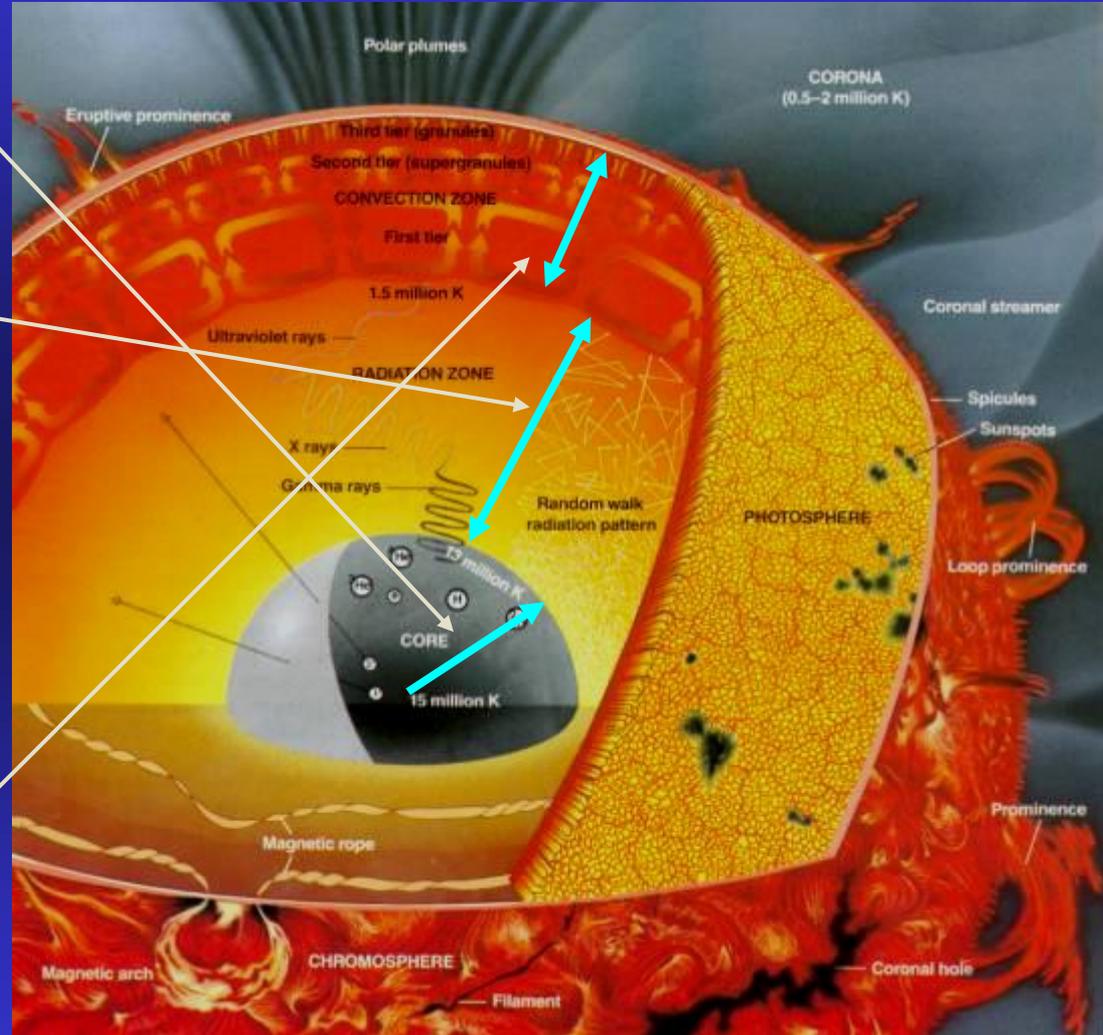
- Dove viene prodotta l'energia
- La fusione nucleare Nucleo trasforma 7×10^{11} kg al secondo di Idrogeno in Elio, $T = 15 \times 10^6$ °K, $\rho_{ceb} = 245$ g/cm³

□ Involuppo Radiativo 0,25 \Rightarrow 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

□ Involuppo Convettivo 0,75 \Rightarrow 1 R_{\odot}

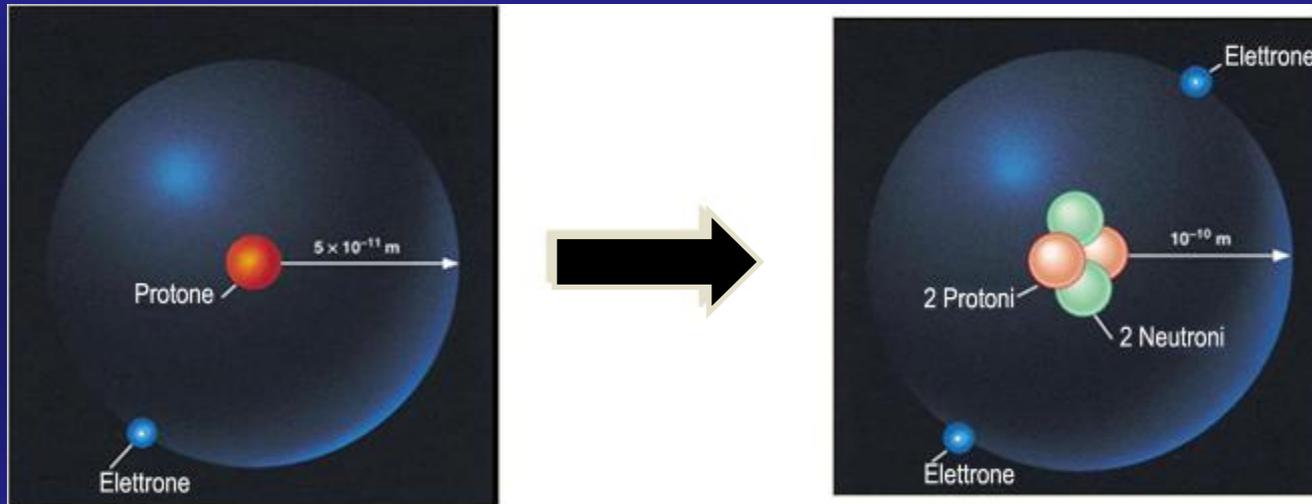
- L'energia viene trasportata per convezione in superficie, come in una pentola d'acqua che bolle. Alla base della zona convettiva $R = 0,741 R_{\odot}$, $T_{ceb} = 2 \times 10^6$ °K, $\rho_{ceb} = 0,134$ g/cm³



Energia nucleare ?



4 X



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

Sarà sufficiente?

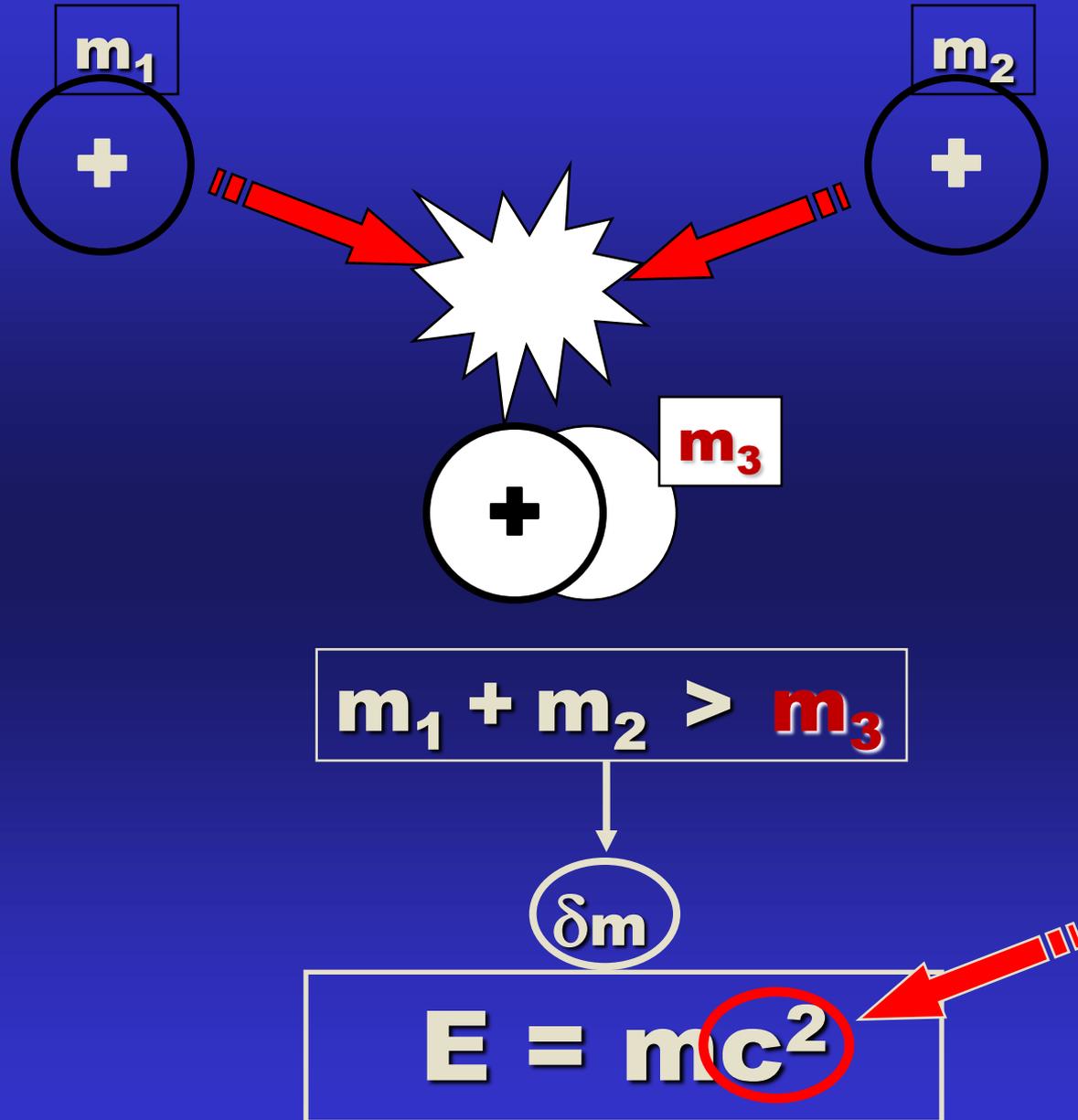
Energia sviluppata in Watt

$$4 \cdot 10^{26} \text{ Watt}$$

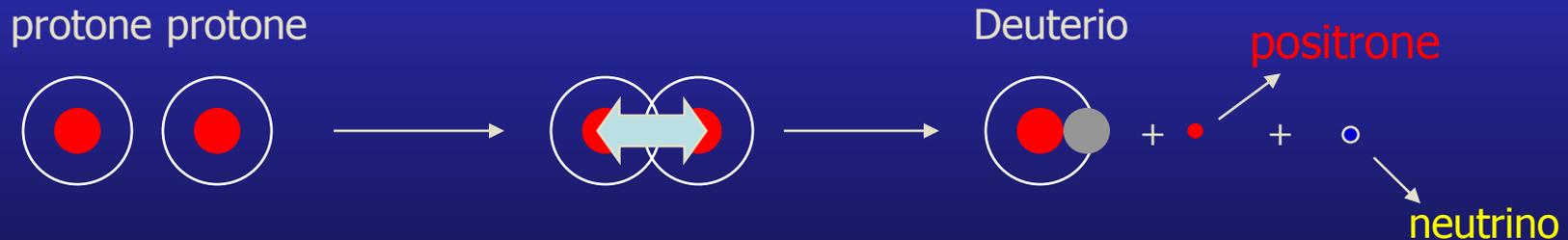
=

400.000.000.000.000.000.000.000.000 Watt

Come avviene il processo di fusione nucleare ?



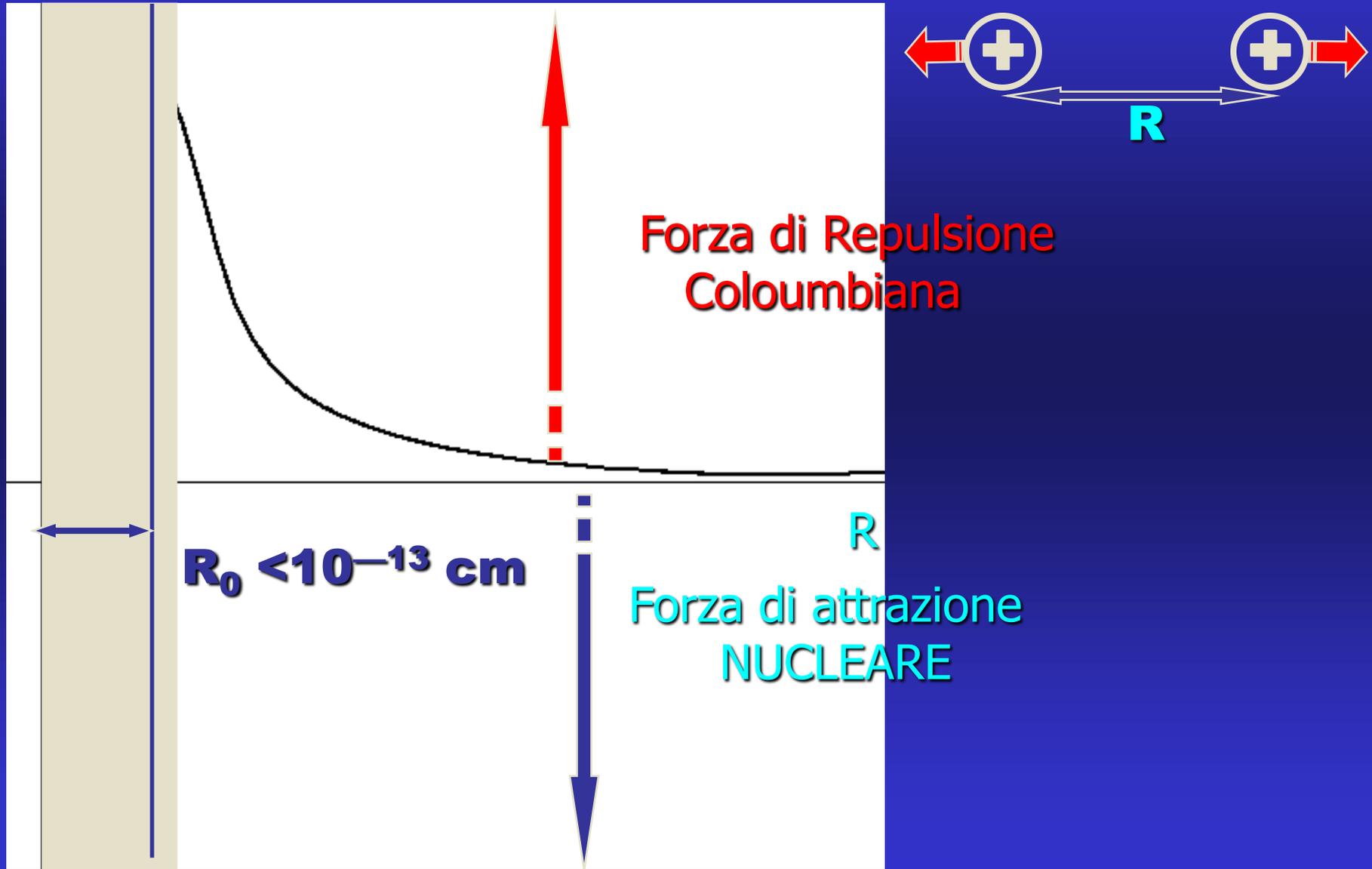
La fusione nucleare dell'Idrogeno H: ciclo p-p



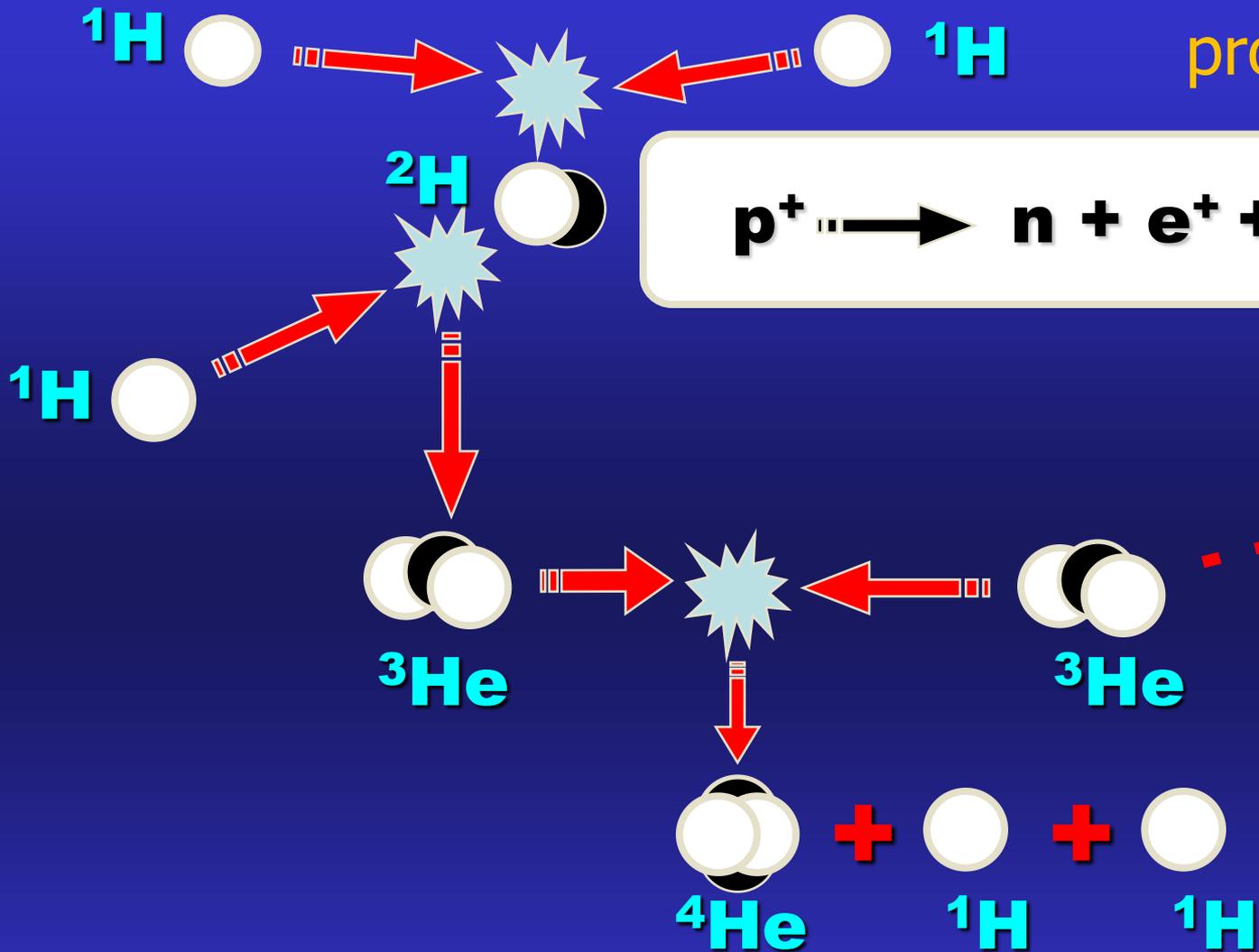
Affinché due protoni possano unirsi e formare un nucleo di Deuterio, D, **occorre superare la barriera coulombiana**, poi agiscono le forze nucleari, che tendono ad unire le due particelle.

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

Effetto tunnel quantistico



Il ciclo protone-protone



L'evoluzione del Sole

CHARACTERISTICS OF OUR STANDARD SOLAR MODEL (WITH $\eta = 0.6$) AS A FUNCTION OF TIME^a

Point	Time (Gyr)	M (M_{\odot})	M_{ceb} (M_{\odot})	$M_{x=0}$ (M_{\odot})	L (L_{\odot})	T_e (K)	R (R_{\odot})
P	0	1	0 ^b	...	19.95	4400	7.706
Near-MS ^c	~0.031	1	0.9716	...	~0.893	~5600	~1.01
A	0.048	1	0.9750	...	0.7015	5586	0.8970
B	4.550	1	0.9832	...	1.0009	5779	1.0008
C	~7.56	1	~0.986	...	~1.33	5843	~1.13
D	9.37	1	0.9841	0.00005	1.67	5819	1.275
E	10.91	1	0.9643	0.0311	2.21	6517	1.575
F	11.64	0.9998	0.5516	0.1352	2.73	4902	2.30
Min- M_{ceb} ^d	12.088	0.9971	0.2445	0.2068	17.3	4664	6.38
G	~12.15	0.9935	~0.26	~0.240	~34.	~4540	~9.5
H	12.233	0.7249	0.46241	0.45945	2349.	3107	165.8
I	12.233	0.7249	0.56430	0.45945	57.7	4595	12.0
J	12.234	0.7249	0.60843	0.45945	41.0	4724	9.5
Red-HB ^e	12.239	0.7241	0.59654	0.45951	45.9	4688	10.3
K	12.316	0.7133	0.64796	0.48187	42.4	4819	9.4
End-He-core ^f	12.344	0.7086	0.57975	0.48857	110.	4453	17.6
L	~12.345	~0.708	~0.57	~0.49	~130.	~4375	~20.
Pre-flash-1 ^g	12.365066	0.59101	0.53302	0.52968	2999.	3160	180.3
Post-flash-4 ^h	12.365355	0.54545	0.53832	0.53770	5190.	3660	177.0
Peak-flash-5 ⁱ	12.365446	0.54137	0.54137	0.54082	90.	74080	0.058

^a M is the Sun's total mass, M_{ceb} the mass coordinate at the base of the convective envelope, and $M_{x=0}$ the mass coordinate at the base of the hydrogen-burning shell; see § 3.2 for an explanation of the time-points (P and A through F).

^b The entire Sun is convective at this pre-main-sequence starting point P.

^c The Sun closely approaches the main sequence at this point.

^d Deepest convective envelope on the red giant branch (first dredge-up is completed at this point).

^e "Red edge" (coolest effective temperature) on the horizontal branch.

^f Core helium exhaustion.

^g Start of the first helium shell flash (note that the maximum radius of $213.4 R_{\odot}$ is reached in the postflash expansion).

^h Maximum expansion immediately following the fourth shell flash: maximum luminosity is reached at this point.

ⁱ Peak of the fifth and final shell flash, during cooling toward white dwarf stage: computations terminated here.

Formazione del Protosole



Protosole

$$M = M_{\odot}$$

$$R = 7,7 R_{\odot}$$

$$L = 20 L_{\odot}$$

$$T = 4000 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

Il sole si è formato all'interno di una fredda e densa nube, costituita da molecole di Idrogeno e polveri (minuti grani di silicati e grafite).

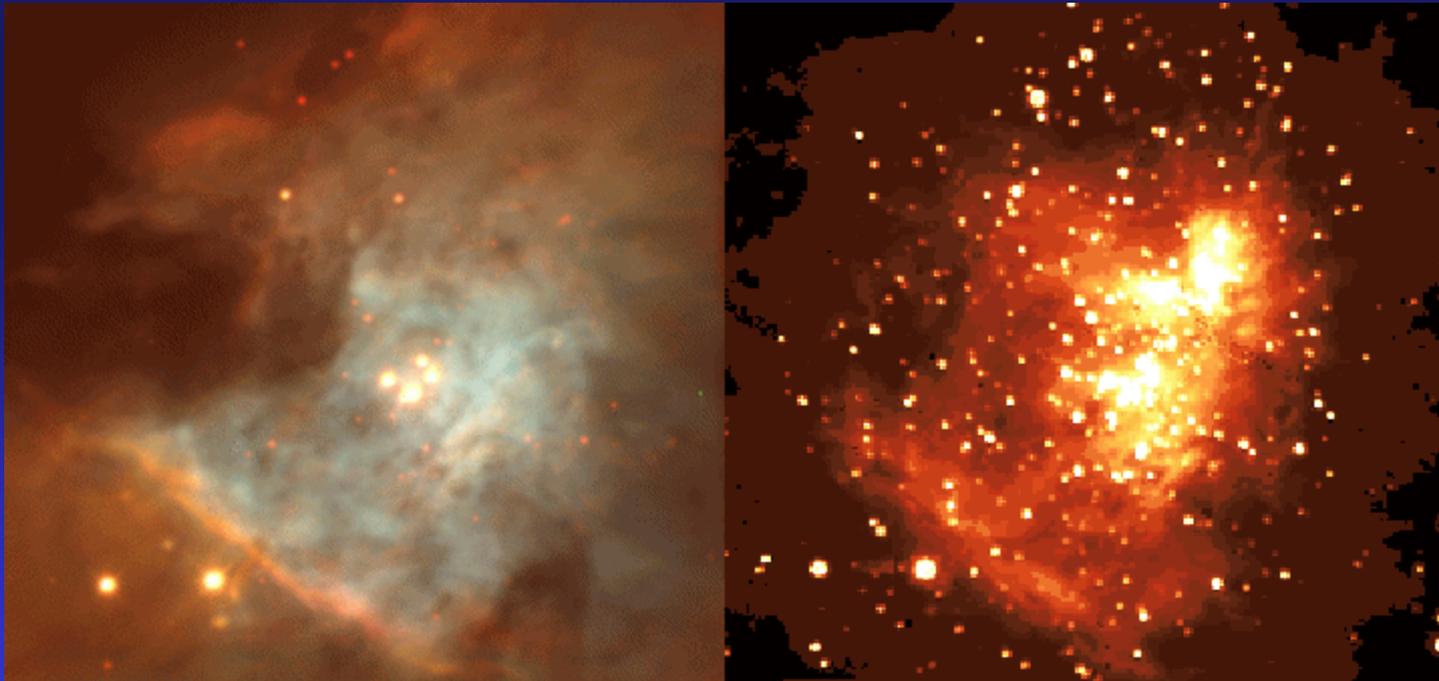
Il processo di formazione ha attraversato le seguenti fasi:

- formazione di un denso globulo di gas, da cui sono nati il Sole ed i pianeti
- separazione dal resto della nube
- contrazione e riscaldamento.

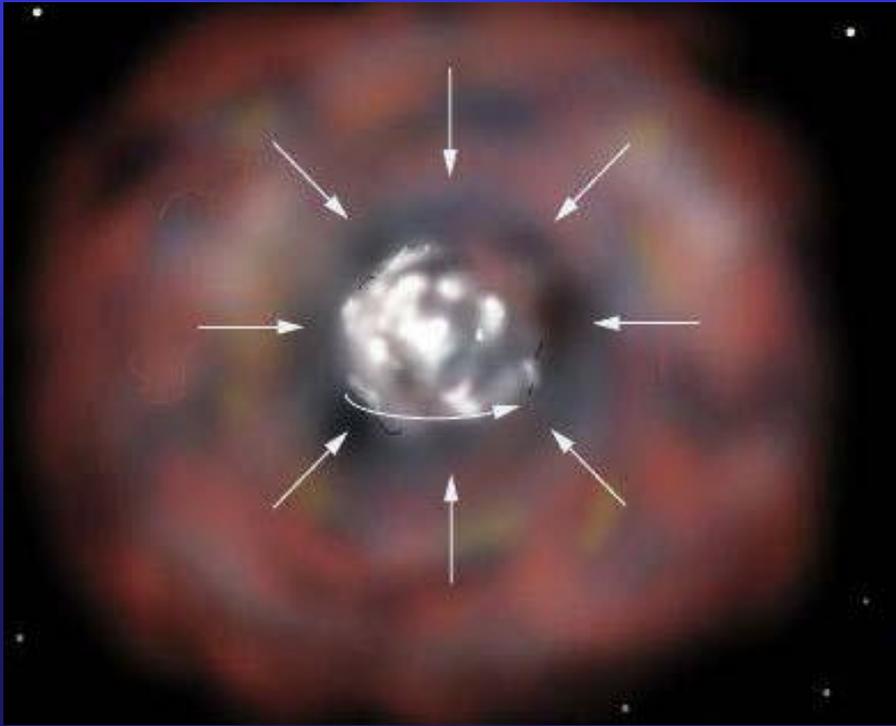
Si forma il Protosole

Il **protosole** si è formato dalla contrazione della parte centrale del globo gassoso, che ne offuscava la visibilità dall'esterno. Esso emanava unicamente un debole bagliore infrarosso, l'unica radiazione in grado di superare lo schermo offerto dal gas denso e dalla polvere.

Per meglio comprendere questa fase si osservi l'immagine che rappresenta una delle più attive fucine di stelle nella nostra galassia, **la nebulosa di Orione**.



Contrazione del Protosole



A-P contrazione del Protosole

Età=0,031 Ga

$M = M_{\odot}$

$R = \text{da } 7,7 \text{ a } 1,01 R_{\odot}$

$L = 0,9716 L_{\odot}$

$T = \text{da } 4400 \text{ a } 5600 \text{ }^{\circ}\text{K}$

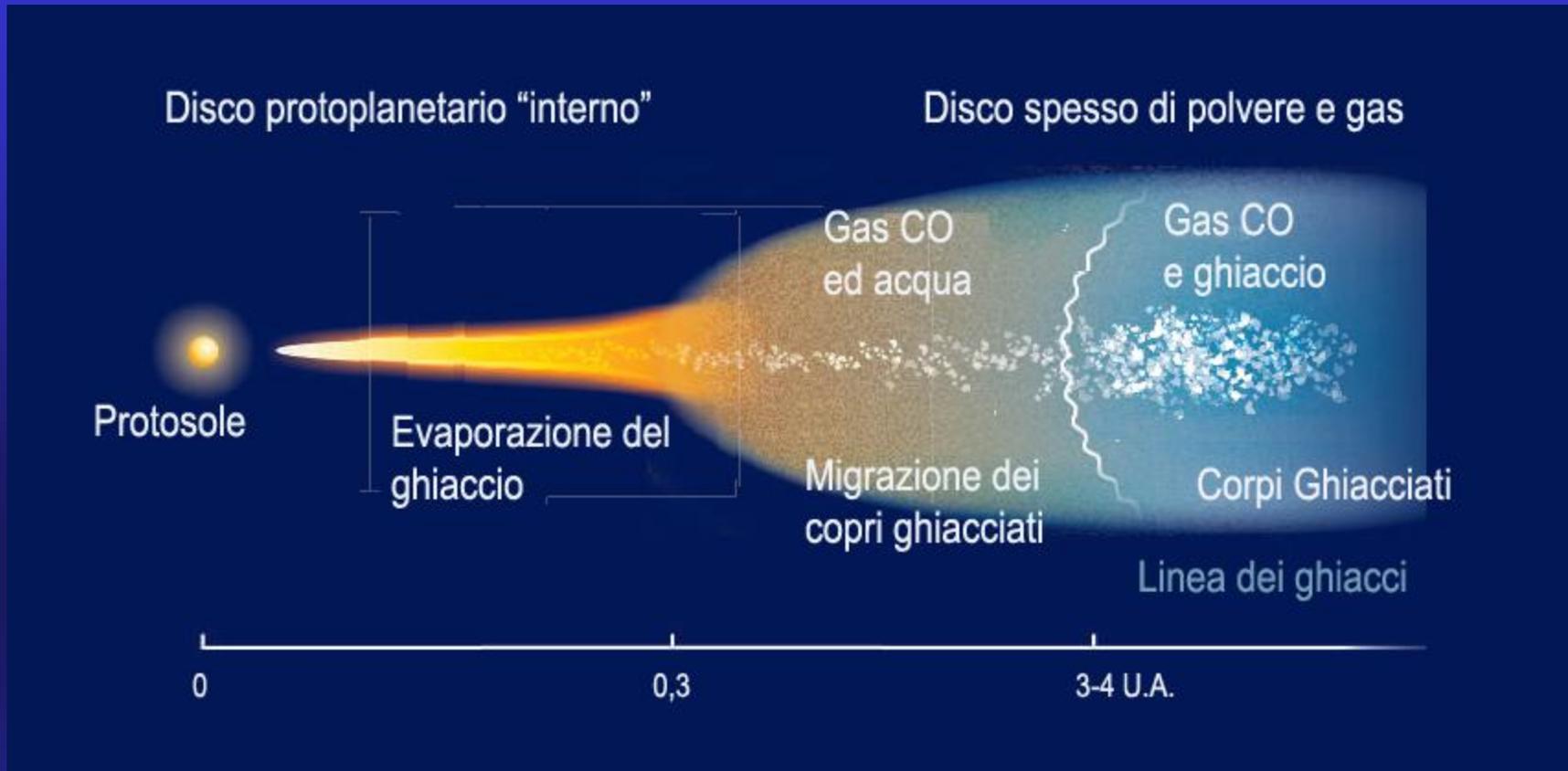
La contrazione del protosole continua generando un aumento della temperatura T da 4000 a 5600°K e una diminuzione del raggio R da 7,7 ad $1,01 \times R_{\odot}$.

Quando la temperatura centrale supera il valore di 10 milioni di gradi Kelvin si avviano le reazioni nucleari di combustione dell'Idrogeno,

L'energia sviluppata procura un aumento di pressione dei gas, che arresta la contrazione della stella.

La luce sprigionata dal Sole ed un forte vento stellare spazzano via il gas e la polvere rimanenti, che circondano ancora la stella, eccezion fatta per un sottile disco equatoriale più denso, dal quale in seguito si formeranno i pianeti.

Stella T-Tauri forte "vento solare" ed inizio fusione H



A Inizio fusione di H

Età = 0,048 Ga

$M = 1,99 \times 10^{30}$ kg

$R = 0,9 R_{\odot}$

$L = 0,7 L_{\odot}$

$T = 5586$ °K

$T_{\text{nucleo}} = 10$ milioni °K

La combustione dell'Idrogeno inizia dopo 480 Ma

NB:

Ga=giga-anni= 10^9 anni= 1 miliardo di anni

Ma=mega-anni=1 milione di anni

Il Sole oggi

Il bruciamento dell'Idrogeno 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.

Dopo 4,55 Ga il 50% delle riserve di Idrogeno nel nucleo sono state consumate e già trasformate in Elio.



B Sole oggi

Età = 4,55 Ga

$M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30}$ kg

$R_{\odot} = 695000$ km

$L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26}$ Watt

$T_{\odot} = 5779$ °K

$T_{\text{nucleo}} = 15,4$ milioni °K

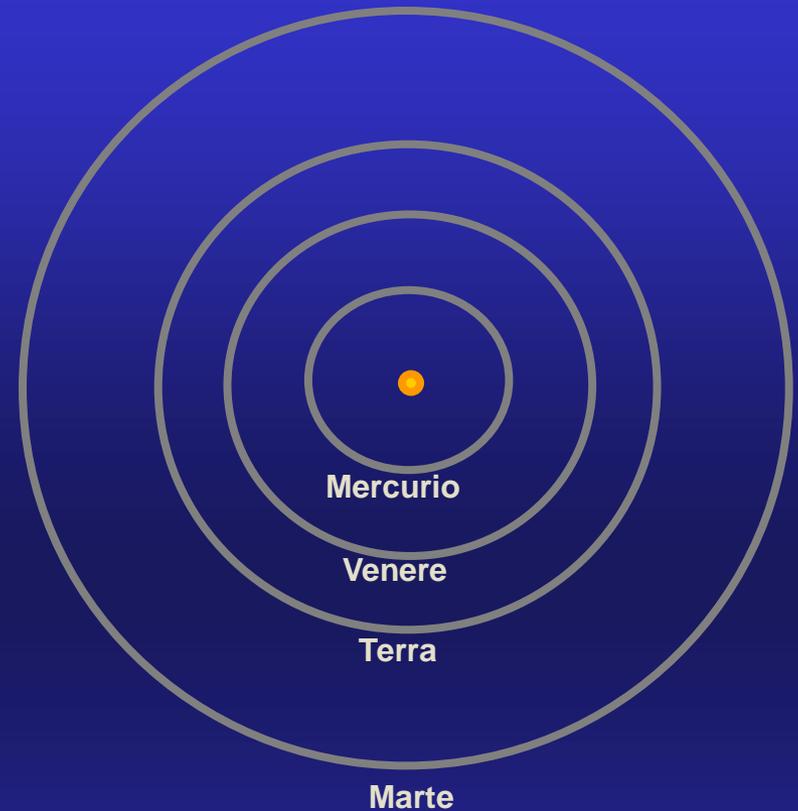
$\rho_{\text{nucleo}} = 145$ g/cm³

Il Sole si riscalda-la Terra subisce un effetto serra

All'età di 7,56 Ga, la luminosità del Sole sarà aumentata circa di un 30% raggiungendo il suo massimo sulla Sequenza Principale.

Questo comporterà un aumento della temperatura superficiale della Terra e con aumento dell'effetto serra.

Il vapor d'acqua sfuggirà dal campo gravitazionale del pianeta e la Terra diverrà in breve molto secca perdendo gran parte delle forme di vita continentali.



C: Sequenza principale

Età=7,56 Ga

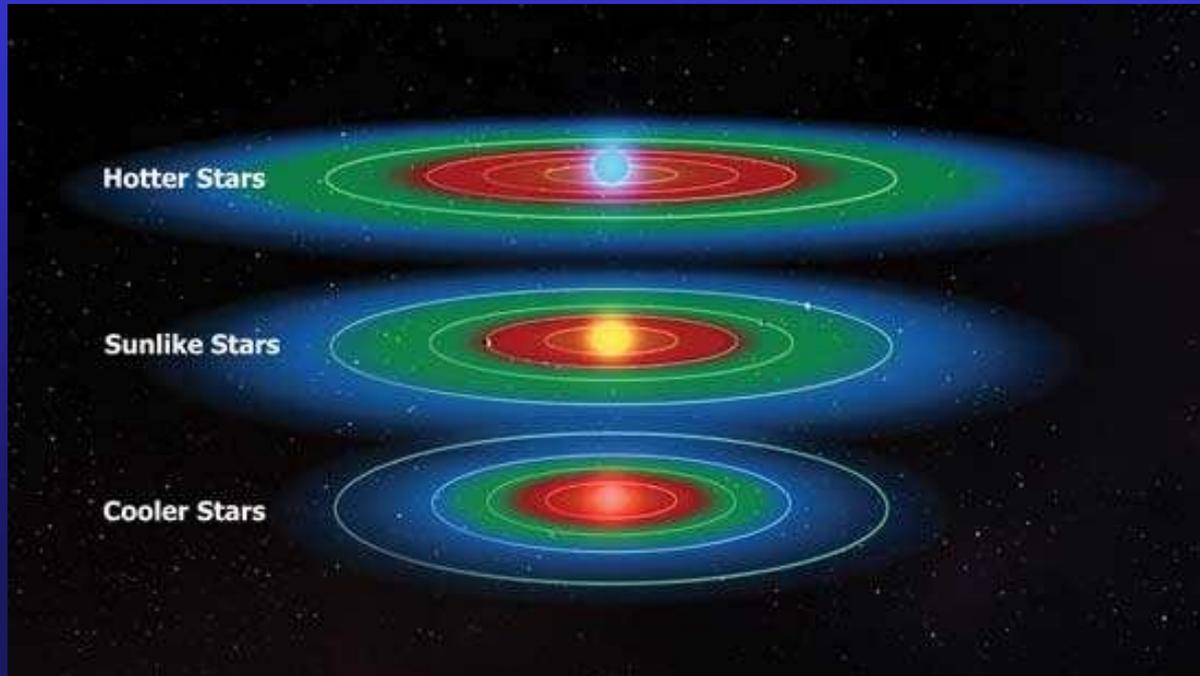
$M = M_{\odot}$

$R = 1,13 R_{\odot}$

$L = 1,33 L_{\odot}$

$T \sim 5843 \text{ }^{\circ}\text{K}$

La fase di sequenza avanzata e l'abitabilità planetaria



D: Sequenza
principale

Età=9,37 Ga

$M = M_{\odot}$

$R = 1,275 R_{\odot}$

$L = 1,67 L_{\odot}$

$T = 5819 \text{ }^{\circ}\text{K}$

Quando il Sole avrà un'età di 9,37 miliardi di anni e si avvierà a concludere la fase di sequenza principale, le sue condizioni saranno ancora mutate: infatti la sua luminosità sarà cresciuta di un 60% rispetto al valore attuale.

Tale cambiamento sarà drammatico specialmente per i pianeti interni.

La temperatura salirà ancora e l'effetto serra già consistente diverrà catastrofico ed irreversibile. L'aumento di temperatura del nostro pianeta farà sì che tutta la Terra diverrà in tutto e per tutto simile a come ora si presenta Venere e ciò comporterà l'estinzione di ogni forma di vita.

Il Sole termina la fase di Sequenza Principale

Ad una età di 10,9 Ga il Sole esaurirà nel nucleo l'Idrogeno quasi interamente trasformato in Elio (potrebbe rimanerne meno del 10%).

La temperatura aumenta ancora a 6517 °K

E: Fine Sequenza Principale

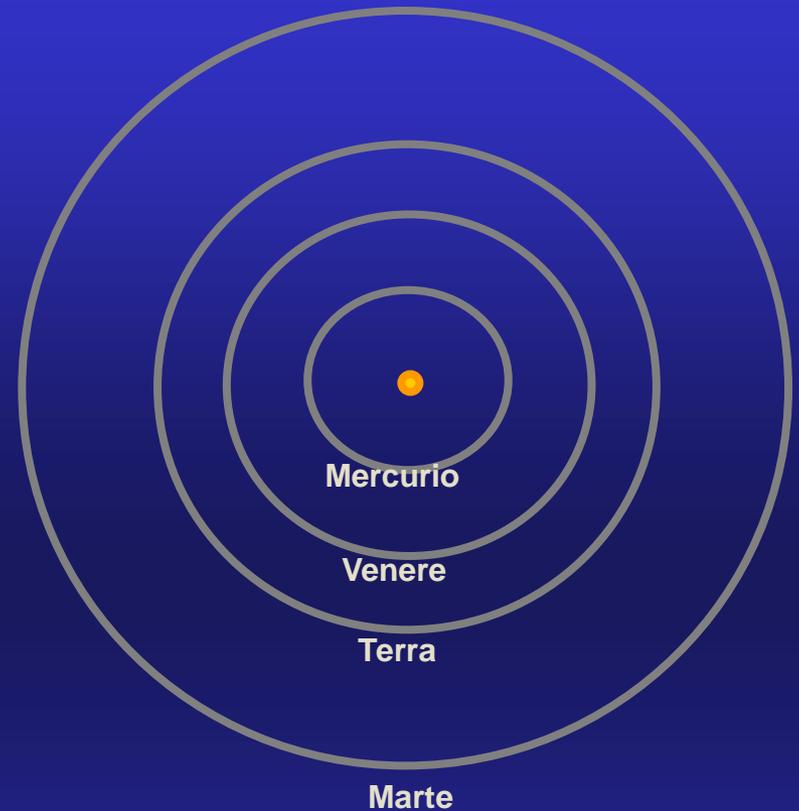
Età=10,9 Ga

$M = M_{\odot}$

$R = 1,575 R_{\odot}$

$L = 2,21 L_{\odot}$

$T = 6517 \text{ }^{\circ}\text{K}$



Inizia la fase di post-sequenza bruciamento H in "shell"

Il nucleo inerte di Elio, sotto il suo stesso peso, inizierà a contrarsi, aumentando la propria densità e temperatura.

Il sole entra in una nuova fase della sua evoluzione



F: Inizio post-sequenza

Età=11,64 Ga

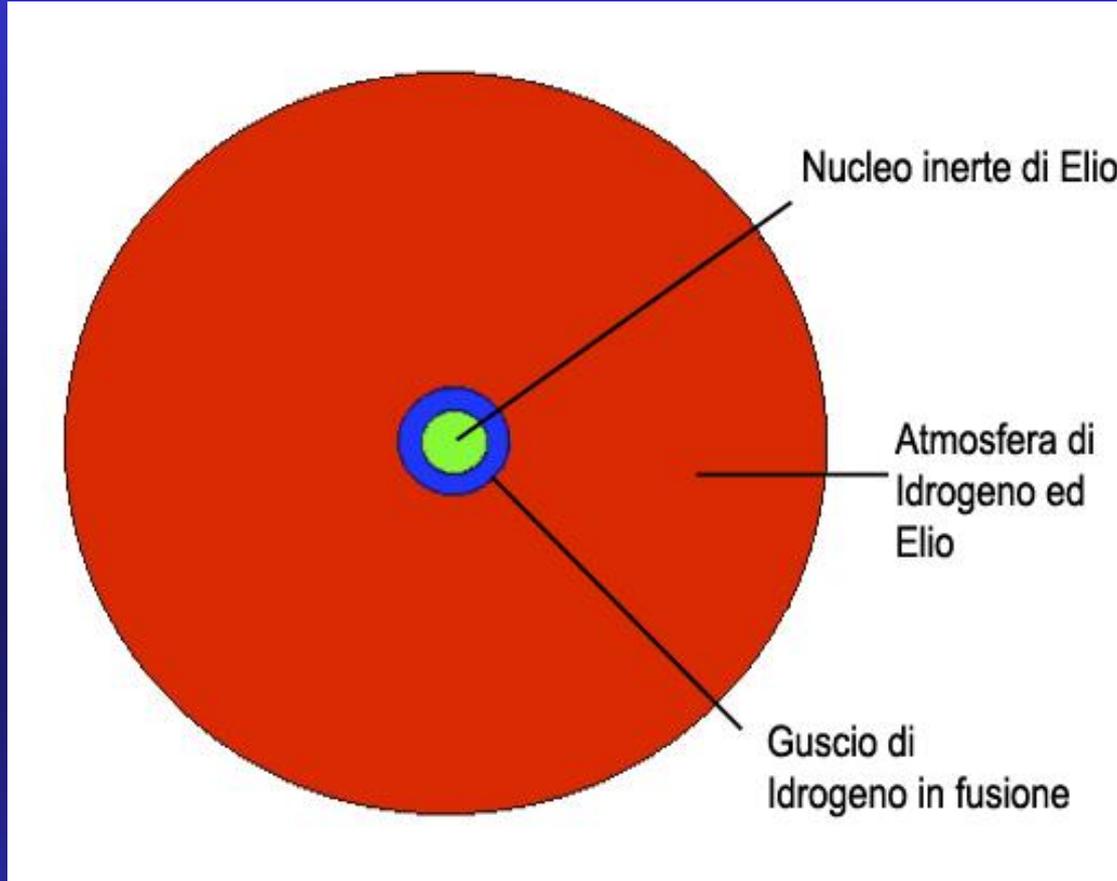
$M = 0,9998 M_{\odot}$

$R = 2,3 R_{\odot}$

$L = 2,73 L_{\odot}$ (costante)

$T = 4902 \text{ }^{\circ}\text{K}$

Inizia la fase di post-sequenza bruciamento H in "shell"



F: Inizio post-sequenza

Età=11,64 Ga

$M = 0,9998 M_{\odot}$

$R = 2,3 R_{\odot}$

$L = 2,73 L_{\odot}$ (costante)

$T = 4902 \text{ }^{\circ}\text{K}$

Tale riscaldamento farà aumentare la temperatura anche **negli strati immediatamente adiacenti al nucleo**, che sono ancora ricchi di Idrogeno, e quando la temperatura supererà i dieci milioni di gradi all'interno di questo guscio **l'Idrogeno riprenderà di nuovo a fondere in Elio**. **Il Sole si trasforma in sub-gigante aumentando il raggio da 1,58 a 2,3 R_{\odot}**

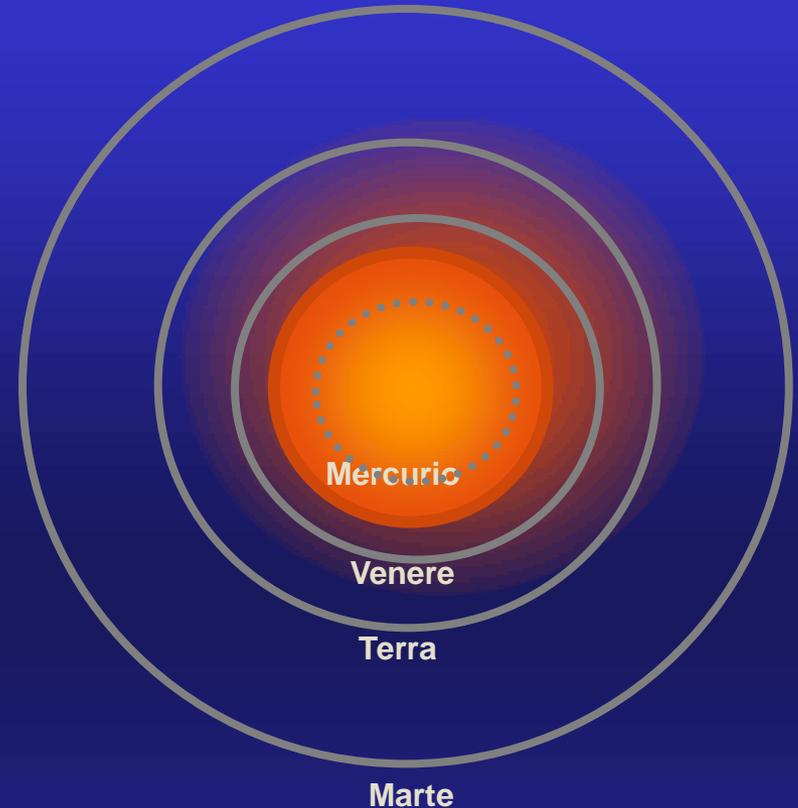
La fase di post-sequenza verso una Gigante Rossa

Tra gli 12,1 ed i 12,23 miliardi di anni si ha una crescita rapida delle dimensioni del Sole.

Col crescere delle sue dimensioni il Sole manifesta **un violento vento stellare** che dopo i 12,15 miliardi di anni in pochi milioni di anni disperde nello spazio circostante circa il 28% della sua massa, strappandola agli strati più esterni, ormai ben lontani dal centro della stella ed assai rarefatti.

La stella ha aumentato il suo raggio di cento volte e la gravità in superficie si è ridotta ad 1/10000 di quella iniziale.

Il Sole diventa una Gigante Rossa, si espande e si raffredda, negli strati esterni.



G-H: Fase Ramo delle Giganti

Età= da 12,1 a 12,233 Ga

M= da 0,9971 a 0,9935 M_{\odot}

R= da 2,3 a 166 R_{\odot} $R_{\max} \sim 0,8$ UA

L= da 2,2 a 2350 L_{\odot}

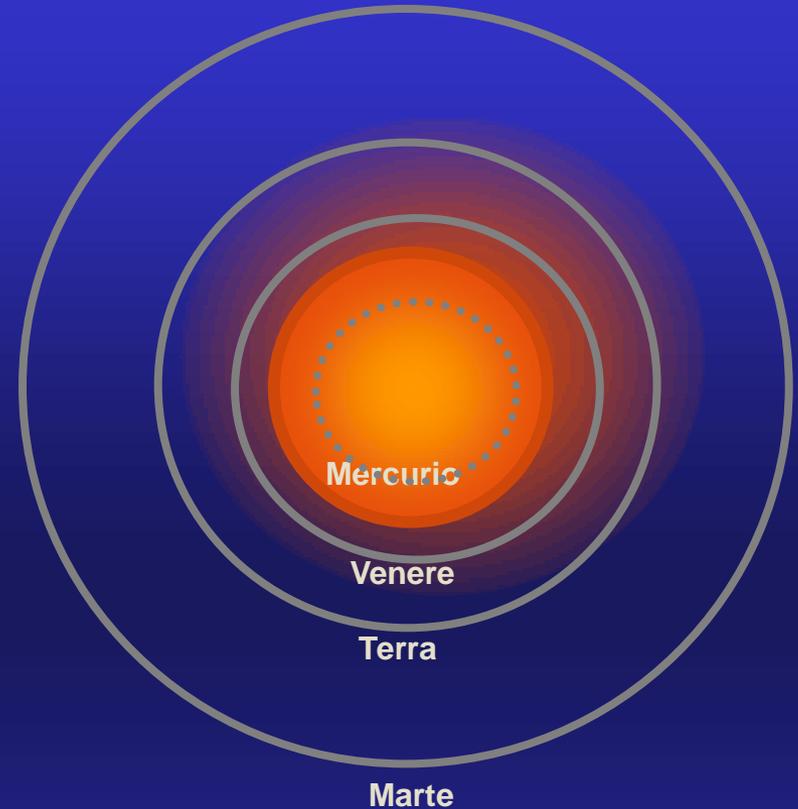
T= da 4900 a 3107 °K

Dalla fase di Gigante Rossa verso il bruciamento dell'Elcio

I pianeti interni del Sistema solare planetario risentono immediatamente dei cambiamenti subiti dal Sole.

Mercurio viene inglobato dall'estesa atmosfera della stella, mentre Venere, Terra e Marte sono letteralmente inondati ed arrostiti dalla radiazione intensissima della gigante rossa.

Si può stimare che la temperatura superficiale della Terra aumenti di un fattore 10 rispetto a quella attuale.



H-I : Fase RGB di Gigante Rossa

Età=12,233 Ga

M= 0,7249 M_{\odot}

R= da 166 a 12 R_{\odot}

L= da 2350 a 58 L_{\odot}

T= da 3107 a 4595 °K

$T_{\text{nucleo}} = 100$ milioni °K

Fusione dell'Elio-Flash dell'Elio nel nucleo

Mentre il Sole raggiunge la massima estensione come gigante rossa, il suo nucleo continua a contrarsi ed a crescere di temperatura.

Quando la temperatura tocca i 100 milioni di gradi Kelvin, l'Elio inizia a bruciare formando Carbonio ed Ossigeno.

Nella stella si hanno due sorgenti di energia: nel nucleo brucia l'Elio, mentre la fusione dell'Idrogeno continua in un guscio esterno.



J: Fusione dell'Elio (He)

Età=12,234 Ga

$M = 0,7249 M_{\odot}$

$R = 9,5 R_{\odot}$

$L = 41 L_{\odot}$

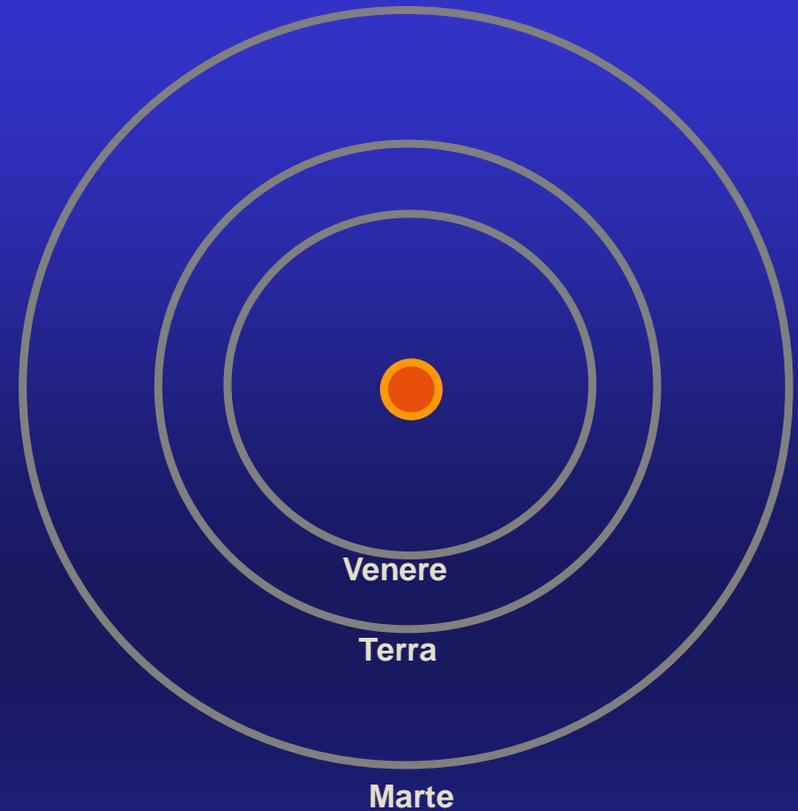
$T = 4724 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$T_{\text{nucleo}} = 100 \text{ milioni } ^{\circ}\text{K}$

Verso la fine della combustione dell'Elío

Questa fase di relativa tranquillità della stella dura circa 110 milioni di anni.

In tale periodo i **prodotti della combustione dell'Elío, carbonio ed ossigeno**, si accumulano nel nucleo della stella molto più velocemente di quanto non fosse accaduto nel corso della combustione dell'Idrogeno, che ha avuto una durata mille volte superiore.



K: Verso la fine del flash dell'He

Età=da 12,239 a 12,316 Ga

M= da 0,7241 a 0,7133 M_{\odot}

R= da 10,3 a 9,4 R_{\odot}

L= da 45,9 a 42,4 L_{\odot}

T= da 4688 a 4819 °K

Fine della combustione dell'Elío

Quando il Sole raggiunge l'età di 12,344 miliardi di anni, l'Elío del nucleo è completamente esaurito,

Il nucleo di carbonio ed ossigeno, non più sostenuto, riprende a contrarsi, densità e temperatura del nucleo riprendono a crescere

Vi sono due gusci in cui le reazioni nucleari continuano: in quello più interno brucia l'Elío, mentre in quello più esterno brucia ancora l'Idrogeno.

Alla fine la stella si ritrova in condizioni simili a quelle vissute al momento dell'esaurimento dell'Idrogeno nel nucleo.



Fine combustione dell'He

Età=12,344 Ga

$M = 0,7086 M_{\odot}$

$R = 17,6 R_{\odot}$

$L = 110 L_{\odot}$

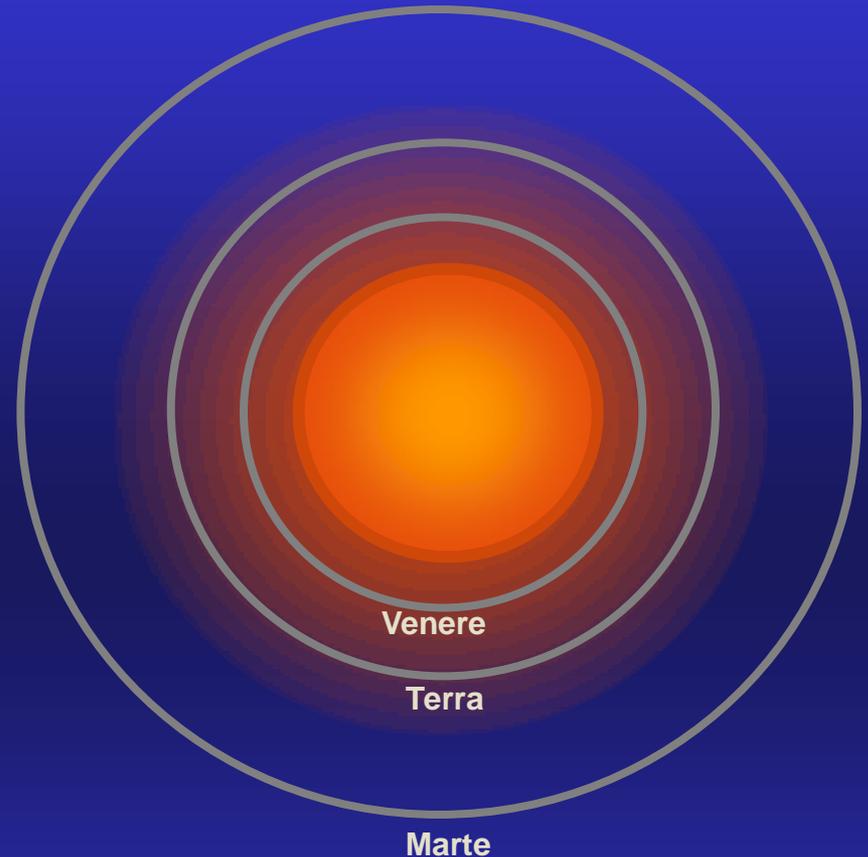
$T = 4453 \text{ }^{\circ}\text{K}$

La (seconda) fase di gigante rossa

Tali fatti determinano l'inizio di una nuova crescita, simile a quella che ha portato la stella nella regione delle giganti rosse.

Il processo è molto più rapido ed impiega solo 20 milioni di anni invece dei 600 milioni della fase precedente.

La stella diviene in breve nuovamente una **gigante rossa**, ancora più luminosa ed estesa.



L: Gigante Rossa

Età=da 12,345 a 12,365 Ga

$M \sim 0,708 M_{\odot}$

$R \sim 20 R_{\odot}$

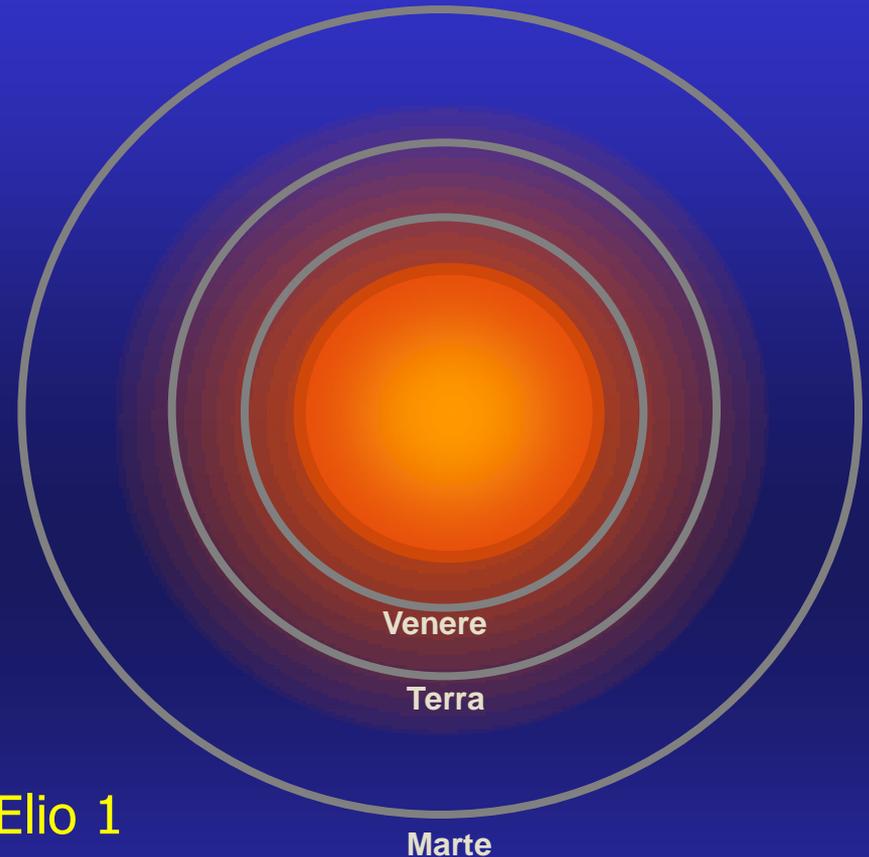
$L \sim 130 L_{\odot}$

$T \sim 4375 \text{ }^{\circ}\text{K}$

La (seconda) fase di Gigante Rossa: pre-flash Elio

In queste condizioni nuovamente si instaura un forte vento stellare che porta ad una nuova, consistente perdita di massa.

Al termine di questa seconda fase di gigante rossa, si calcola che il Sole abbia perso nello spazio circa il 46% della sua massa iniziale.



Gigante Rossa : pre-flash Elio 1

Età=12,365066 Ga

$M = 0,59101 M_{\odot}$

$R = 180,3 R_{\odot} = 1,2 \text{ UA}$

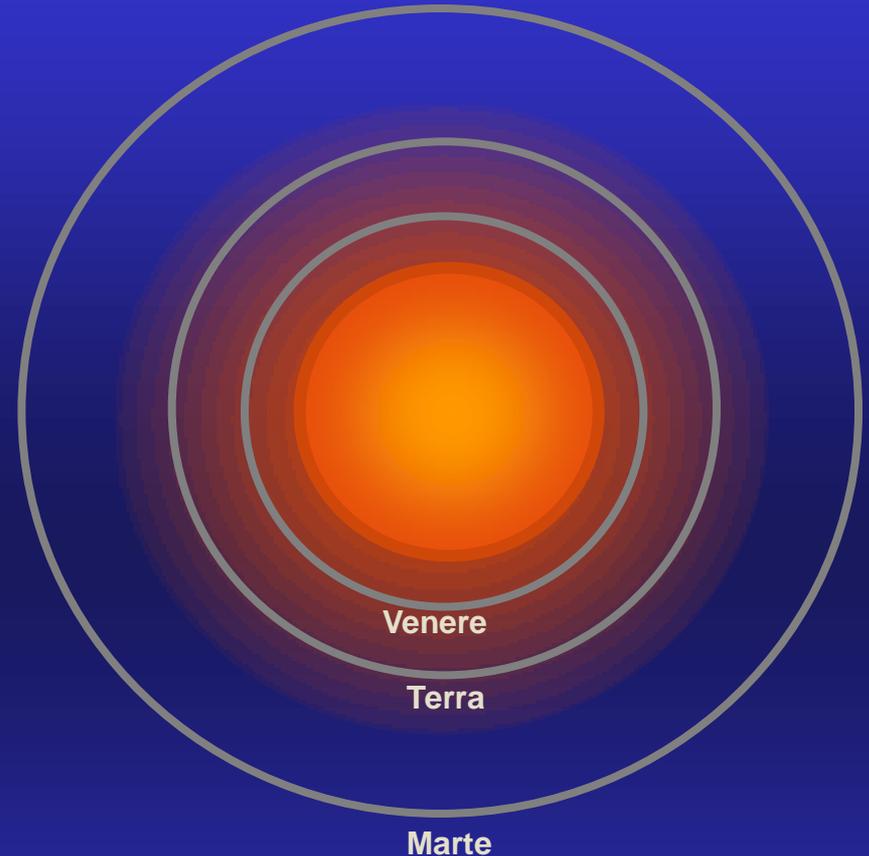
$L = 3000 L_{\odot}$

$T = 3160 \text{ }^{\circ}\text{K}$

La (seconda) fase di gigante rossa si spostano i pianeti interni

La perdita di massa ha un sensibile effetto sui pianeti, la diminuita attrazione gravitazionale del Sole li porta ad orbitare su posizione sempre più distanti: l'orbita di Venere si porta ad una distanza di 1,22 U.A. dal Sole, mentre la Terra orbita ad 1,69 U.A.

Lo spostamento verso l'esterno evita ai pianeti di essere inghiottiti dall'enorme gigante rossa.



Gigante Rossa : post-flash Elio 4

Età=12,365355 Ga

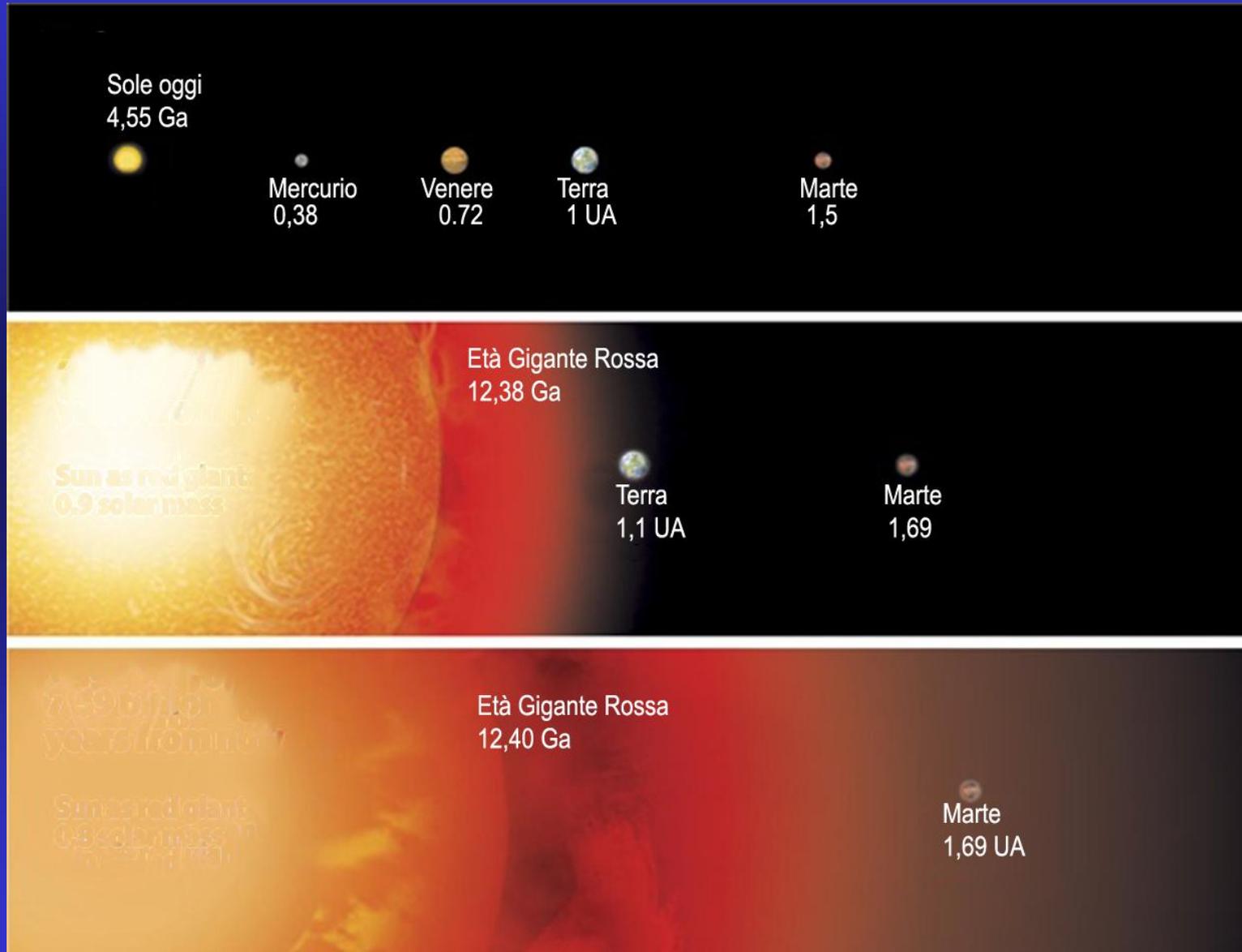
$M = 0,54545 M_{\odot}$

$R = 177 R_{\odot}$

$L = 5190 L_{\odot}$

$T = 3660^{\circ}\text{K}$

La (seconda) fase di gigante rossa si spostano i pianeti interni

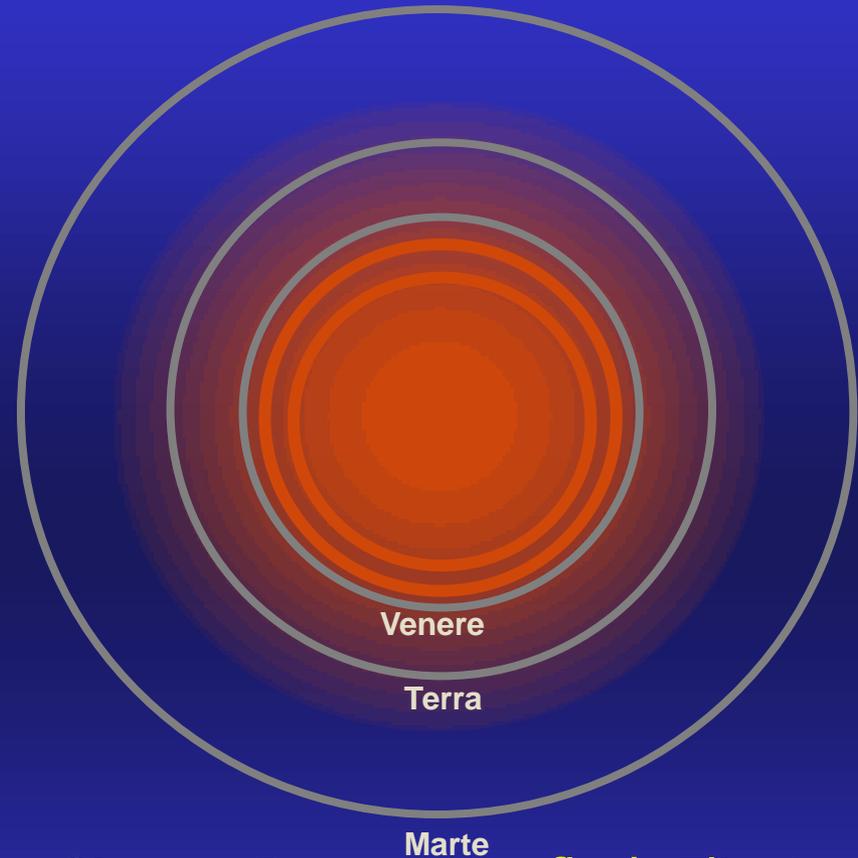


Instabilità: la vecchia stella pulsa (4° Flash Elio)

La stella è ormai priva di sorgenti di energia, l'unica fonte deriva dalle reazioni nel guscio esterno al nucleo, che deve sostenere una luminosità altissima e che ben presto diviene instabile.

In questa situazione la velocità con cui procedono le reazioni nucleari diviene sensibilissima alle variazioni di temperatura.

Per cui un piccola variazione di temperatura, produce un'immane surplus di energia, che non riesce a propagarsi verso l'esterno in modo tranquillo, ma genera una vigorosa onda d'urto che fa pulsare la stella violentemente ogni 100000 anni.



Gigante Rossa: post-flash Elio 4

Età = 12,3653 Ga

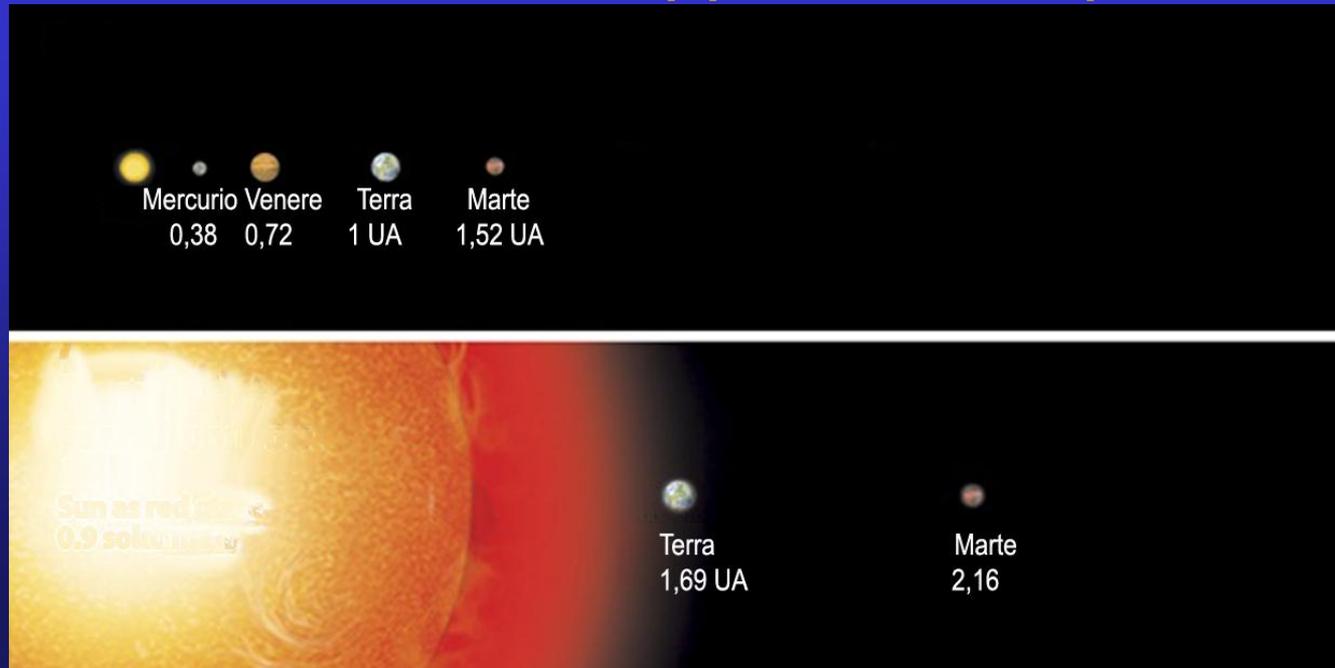
$M = 0,545 M_{\odot}$

$R = 177 R_{\odot}$

$L = 5190 L_{\odot}$

$T = 3660 \text{ }^{\circ}\text{K}$

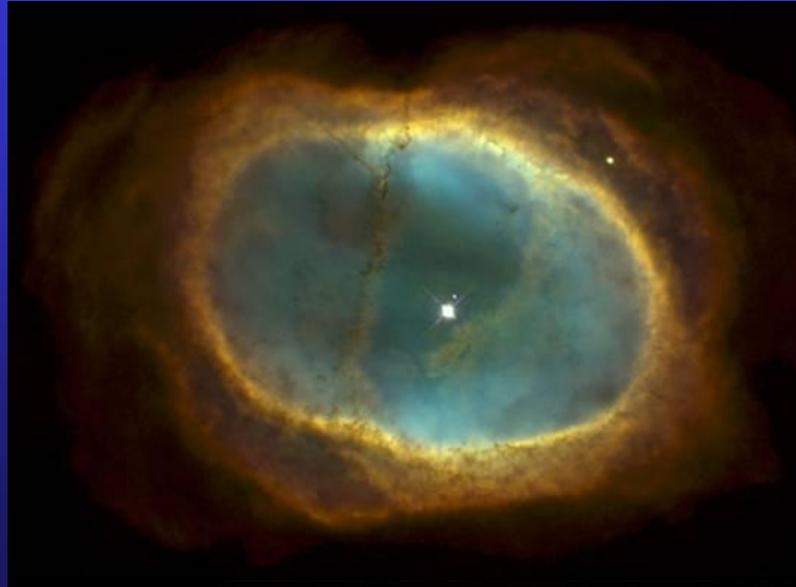
Instabilità: l'involuppo viene espulso



Nel corso di ogni pulsazione il raggio cresce: $R = 177 R_{\odot}$ la luminosità aumenta vertiginosamente: $L = 5200 L_{\odot}$, ad ogni pulsazione una parte sempre più consistente dell'involuppo esteso come non mai della stella viene eiettata nello spazio circostante.

I modelli teorici predicono che il Sole effettuerà 4 o 5 pulsazioni e nel corso dell'ultima perderà l'ultima parte del suo involucro. Ciò che rimane dell'immensa gigante rossa è un nucleo di carbonio ed ossigeno, la cui temperatura superficiale raggiunge i 120000 gradi e mentre le dimensioni sono paragonabili a quelle di un pianeta come la Terra. La gigante rossa si è autodistrutta. La stella Sole è morta.

La nebulosa planetaria



La stella ormai non è più tale, le sue dimensioni sono ridotte ai minimi termini e la sua luminosità è bassissima, tale da non poter essere visibile che a piccola distanza. Tuttavia è ancora caldissima ed emette in grande quantità fotoni ultravioletti, che, raggiunto l'involuppo ormai lontano, espulso in precedenza, ne eccitano gli atomi e lo fanno risplendere.

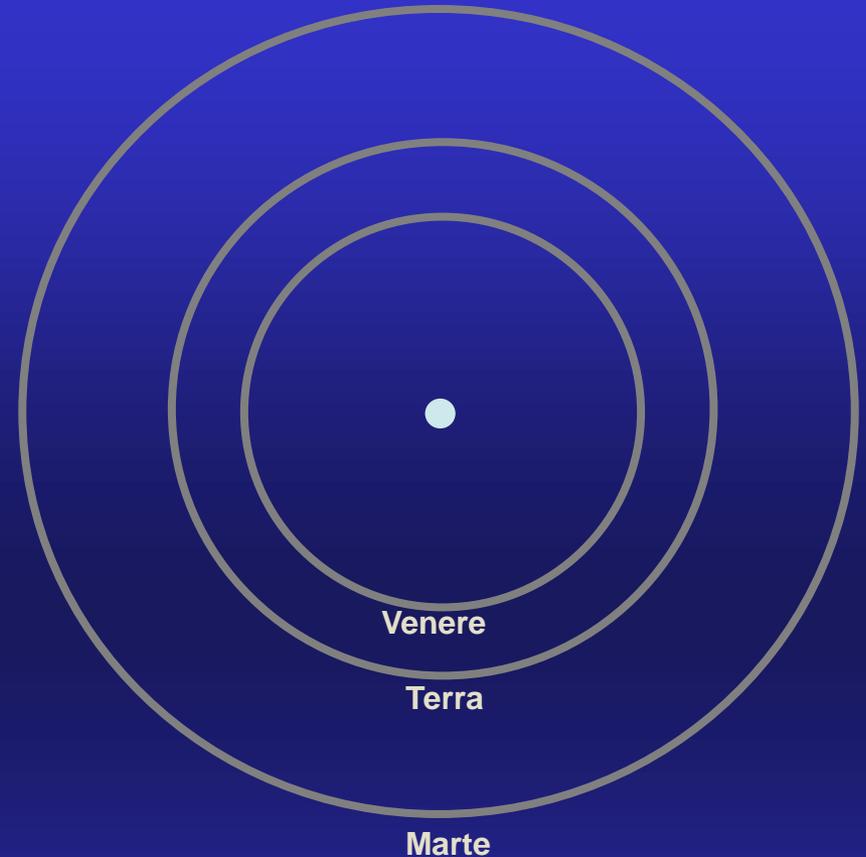
Attorno al nucleo inerte della stella si accende una nebulosa planetaria, che rappresenta uno degli oggetti più colorati e spettacolari del cielo.

Nel giro di 10000 anni la nebulosa è destinata a disperdersi nel buio dello spazio, ove i gas dell'involuppo che appartenne della stella si mescolano a quelli del mezzo interstellare.

La fase terminale-(5° Flash Elio)

Dopo il quinto flash dell'Elio il nucleo di carbonio ed ossigeno della stella evolve come una **Nana Bianca** con massa pari a circa $0,54 M_{\odot}$ ma con dimensioni simili a quelle di un pianeta come la Terra.

Il nucleo si trova in una situazione **stabile**: la pressione dei gas degenerati al suo interno supporta la gravità dell'intera struttura.



Quinta Pulsazione-post flash Elio 5

Età $> 12,3654$ Ga

$M = 0,54137 M_{\odot}$

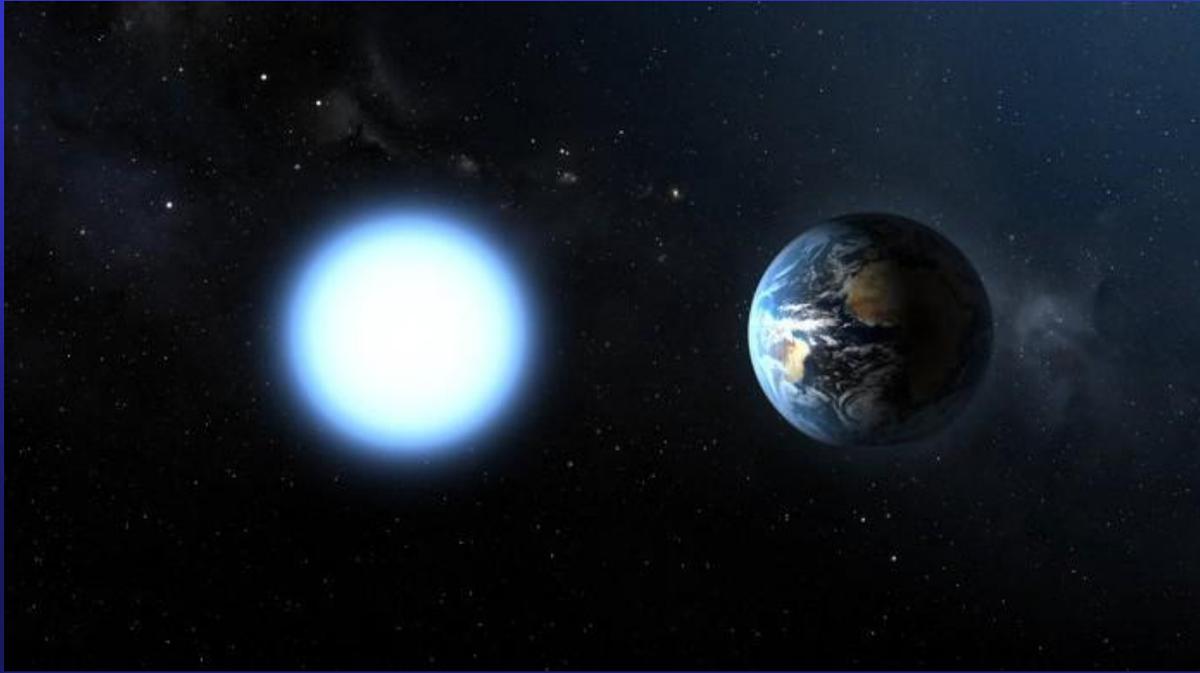
$R =$ da $0,058 R_{\odot}$ ad $1 R_{\oplus}$

$L = 90 L_{\odot}$

$T = 74080$ °K

$\rho = 1$ ton/cm³ Nana Bianca

Nana Bianca



La Nana Bianca non riesce a contrarsi ulteriormente e quindi ad aumentare la sua temperatura.

Esso è destinato a rimanere in questo stato ed a raffreddarsi assai lentamente emettendo energia termica , sino a raggiungere la temperatura dello spazio interstellare ed a sparire in esso, diventando una nana nera.

Poiché tuttavia l'irraggiamento avviene in modo poco efficiente, essendo la superficie esterna assai ridotta, l'intero processo si svolge in un tempo lunghissimo, maggiore dell'età dell'universo.

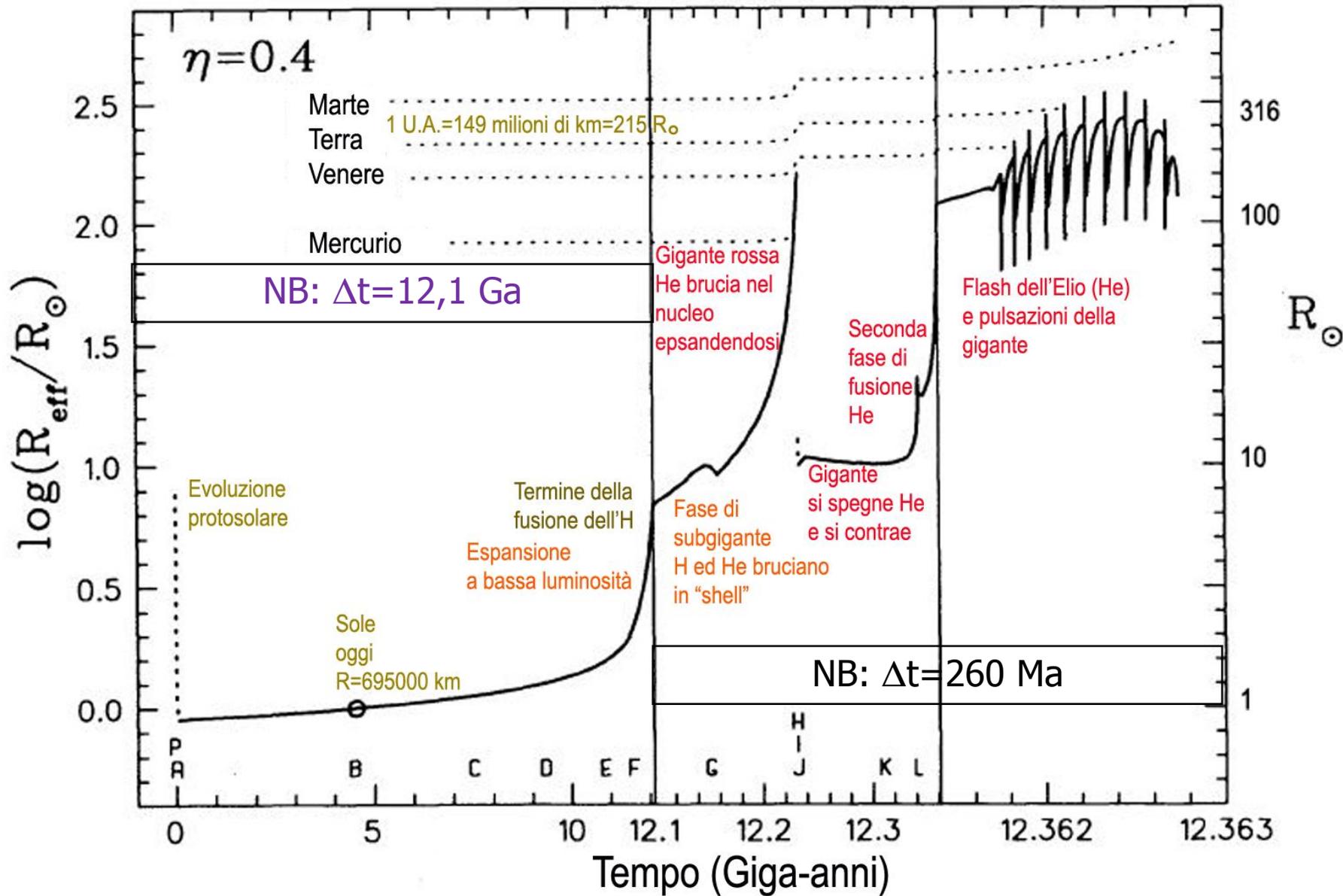
Il Sistema solare attorno ad una Nana Bianca



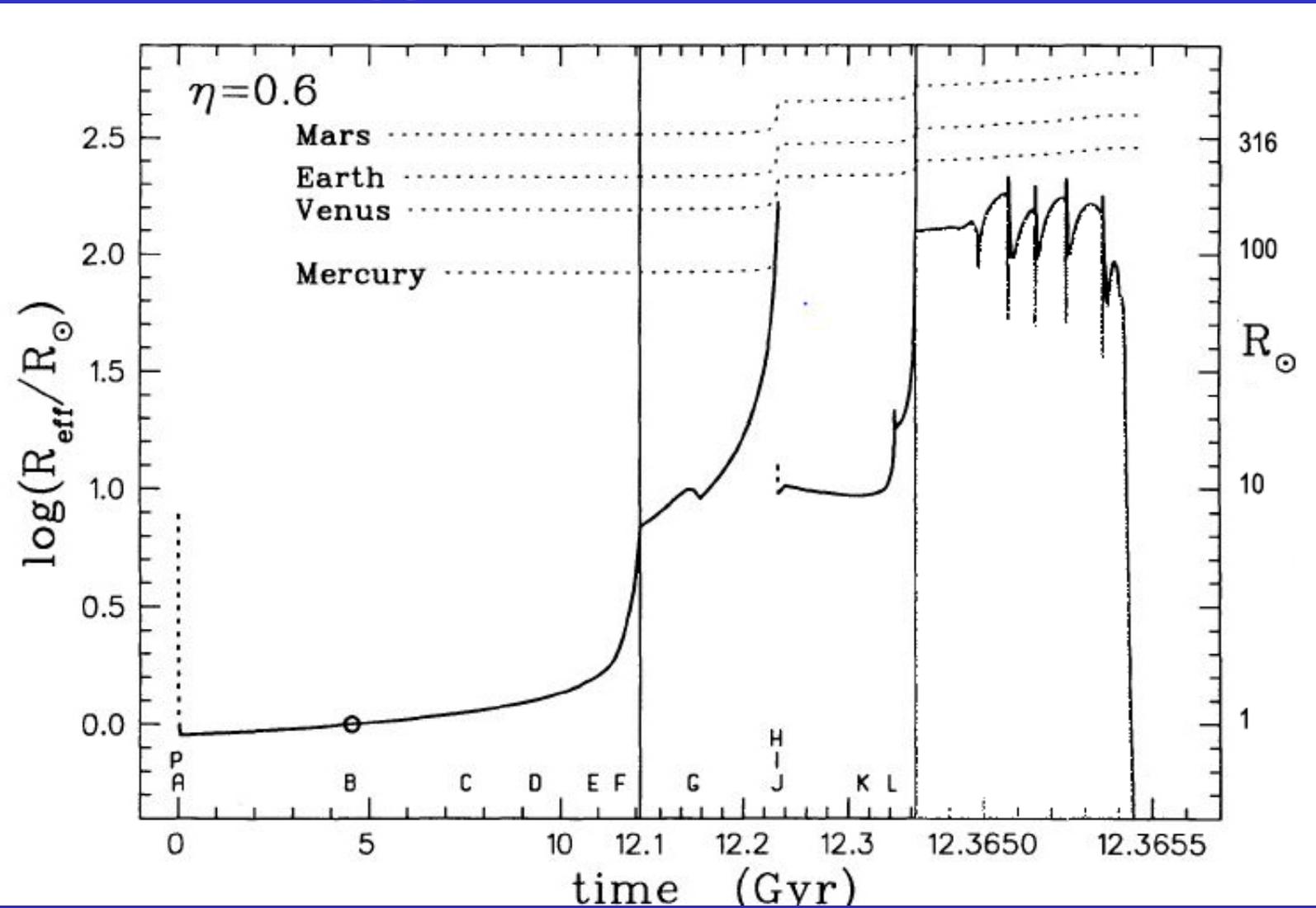
I pianeti del Sole, a seguito della ridotta massa della Nana Bianca, si vanno a posizionare sulle loro orbite finali con:

- Venere, che si sposta ad una distanza di 1,34 U.A.
- Terra a 1,85 U.A.
- Marte a 2,8 U.A.

Nulla può più cambiare la massa della Nana Bianca e la configurazione planetaria non muta più.



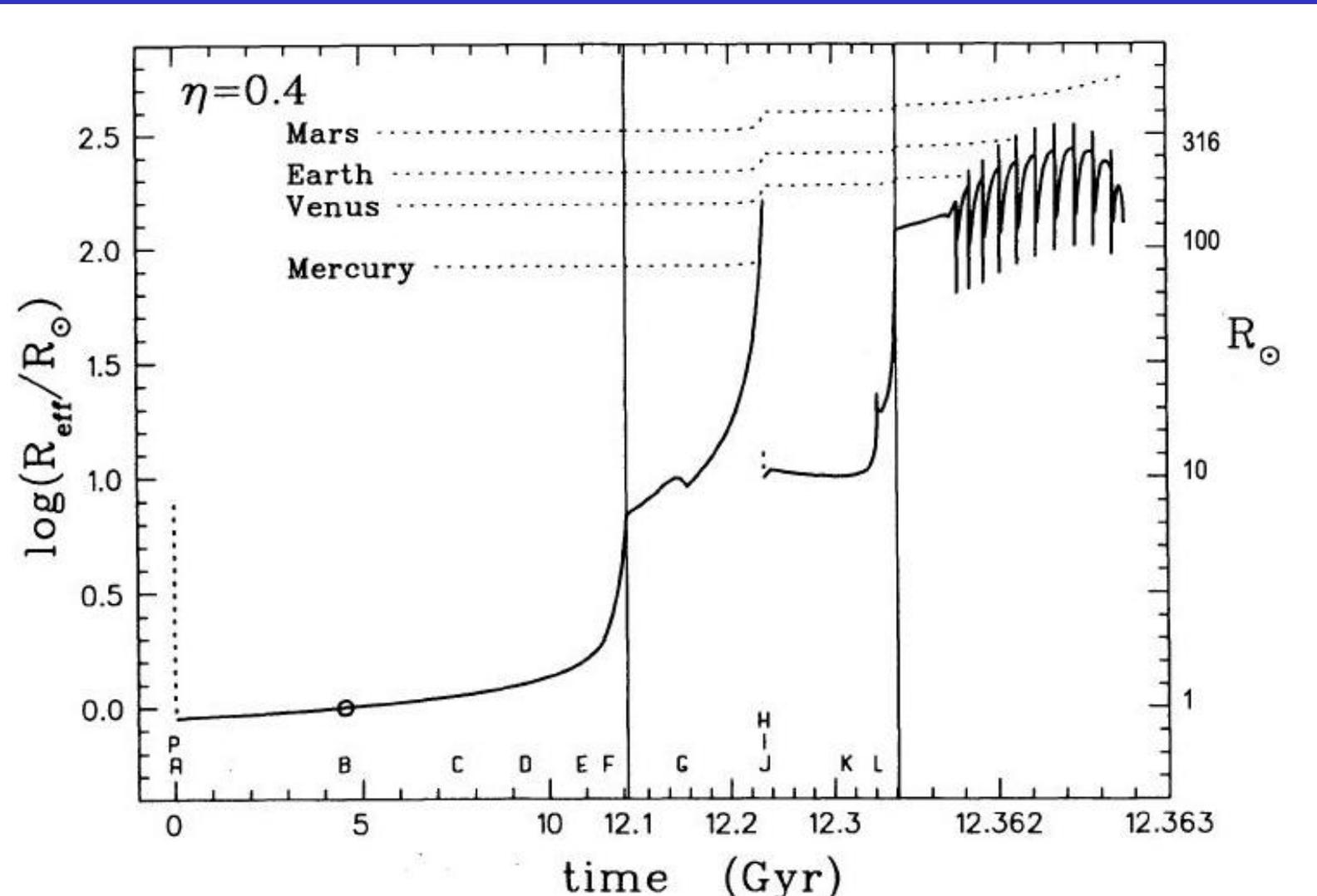
Variazione del Raggio del Sole durante la sua evoluzione



NB:

Ga=giga-anni= 10^9 anni= 1 miliardo di anni-Ma=mega-anni=1 milione di anni
 $R_{\odot} = 695000 \text{ km}$ $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26} \text{ Watt}$
 $1 \text{ U.A.} = 215 R_{\odot}$

Variazione del Raggio del Sole durante la sua evoluzione



NB:

Ga=giga-anni= 10^9 anni= 1 miliardo di anni-Ma=mega-anni=1 milione di anni
 $R_{\odot} = 695000 \text{ km}$ $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26} \text{ Watt}$
 $1 \text{ U.A.} = 215 R_{\odot}$

Tempi scala durante l'evoluzione del Sole

Stato evolutivo	Tempo (Ga)	Luminosità (L_{\odot})	Raggio (R_{\odot})
A-E sequenza principale	10,9	0,7-2,2	0,9-1,6
E-F verso gigante rossa	0,7	2,3	1,6-2,3
F-H gigante rossa	0,6	2,3-2300	2,3-166
I-L ramo orizzontale	0,11	44	~10
L primo flash He : ramo asintotico	0,02	44-2000	10-1130
Ramo asintotico pulsazioni	0,0004	500-5000	50-200
Verso la nebulosa planetaria	0,0001	3500	100-0,08

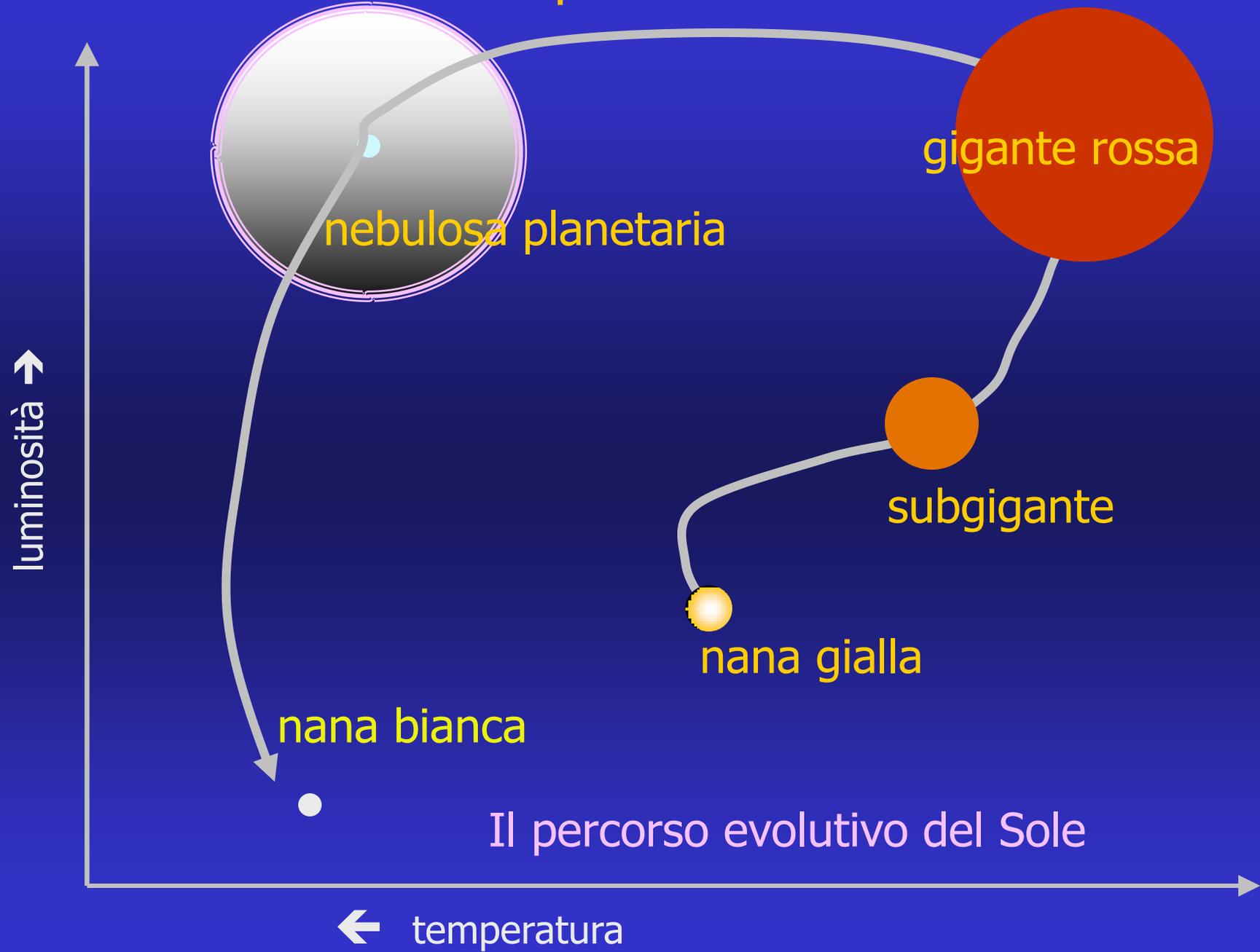
NB:

Ga=giga-anni= 10^9 anni= 1 miliardo di anni-Ma=mega-anni=1 milione di anni

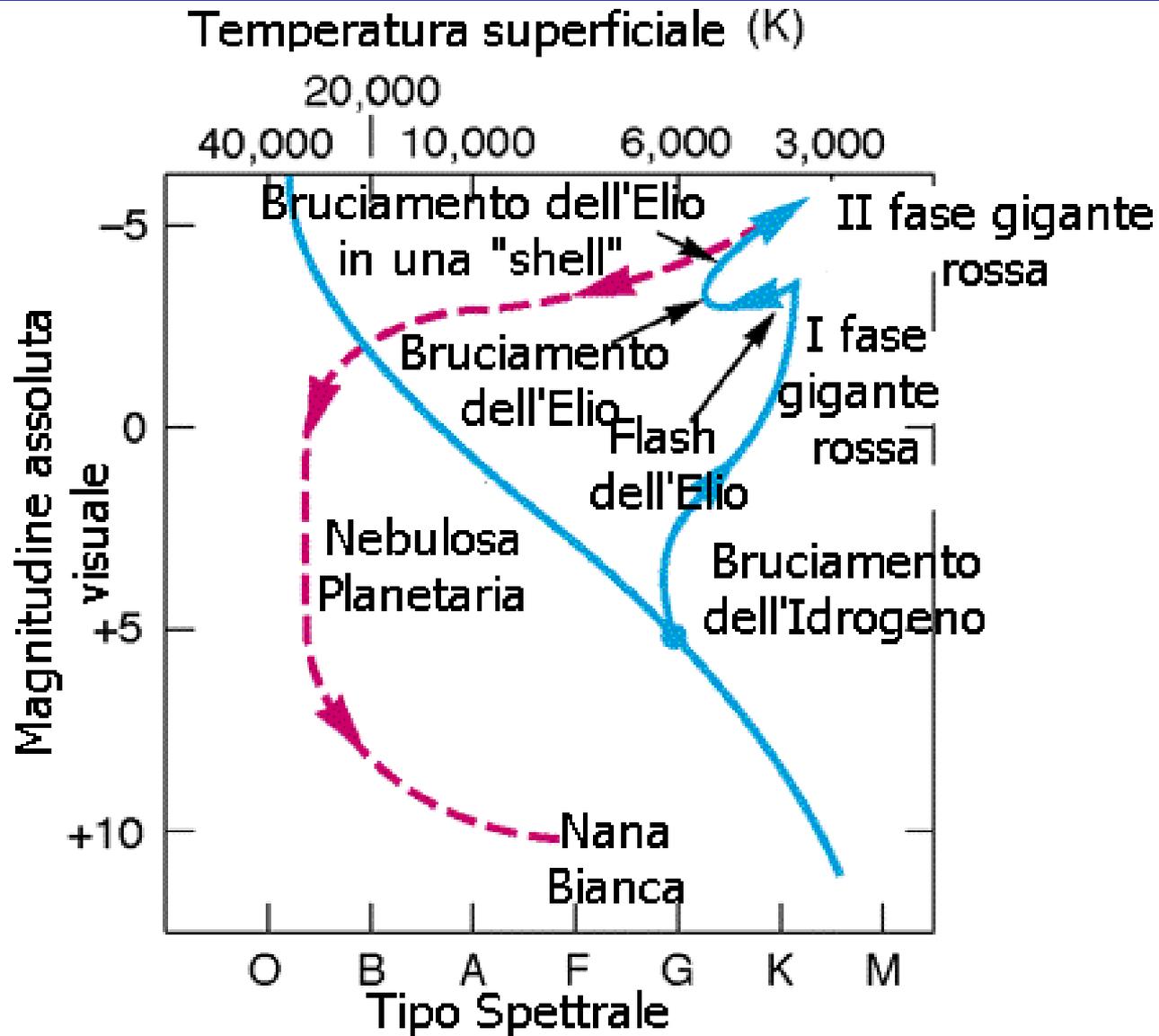
$R_{\odot} = 695000$ km $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26}$ Watt

1U.A.= 215 R_{\odot}

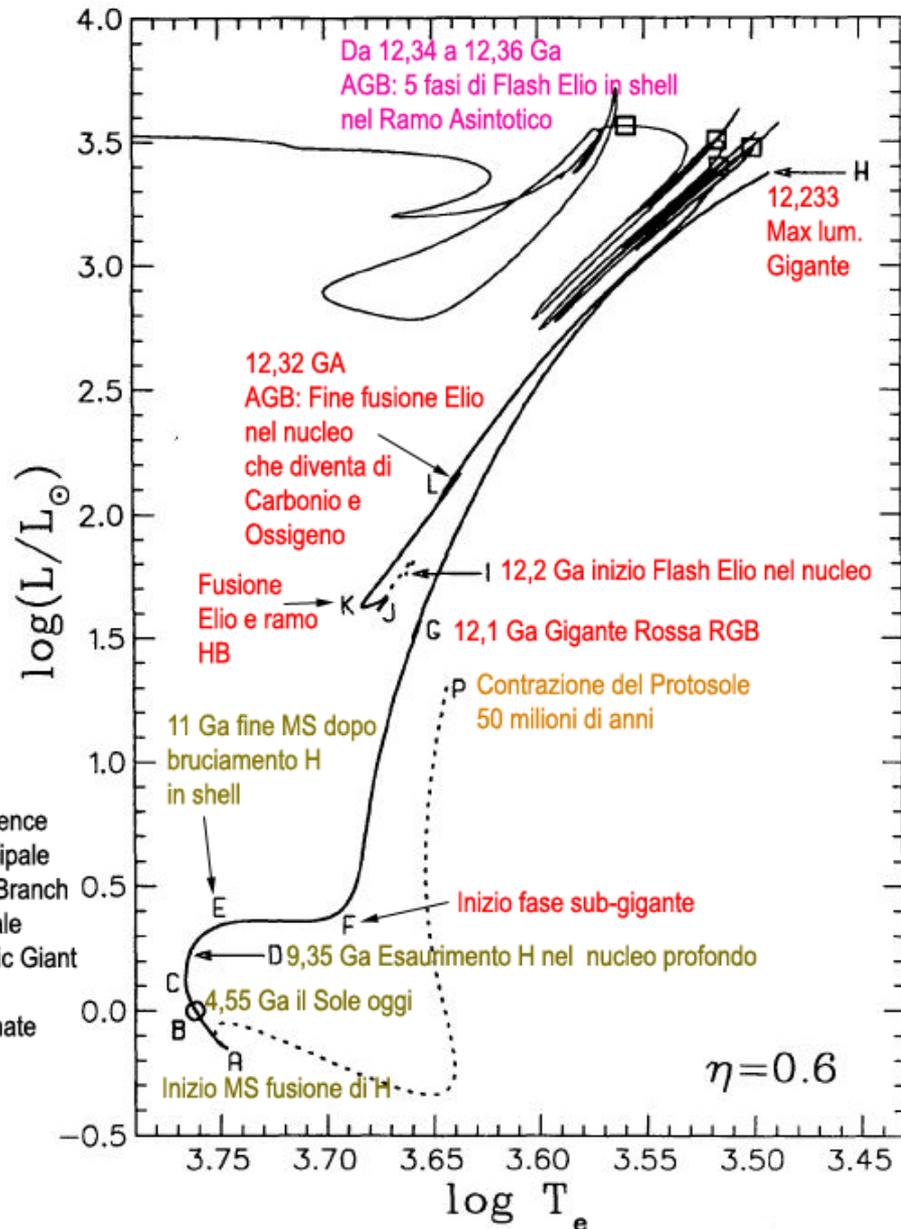
Riassunto della sequenza evolutiva del Sole



Evoluzione del Sole



Evoluzione del Sole



NB:

- 1)MS=Main Sequence o Sequenza Principale
- 2)HB=Horizontal Branch o Ramo Orizzontale
- 3)AGB=Asymptotic Giant Branch o Ramo Asintotico Orizzontale

Evoluzione del Sole

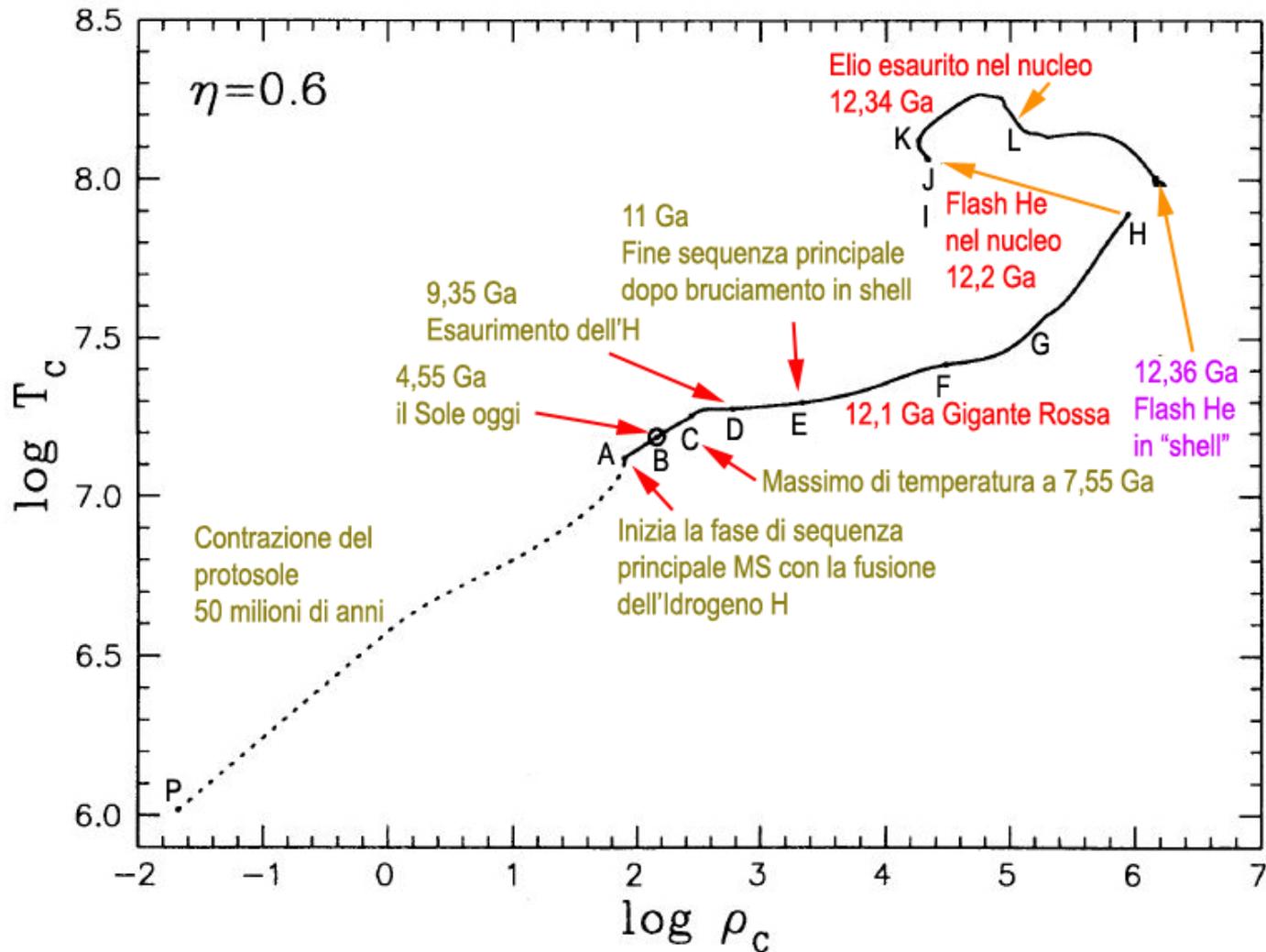
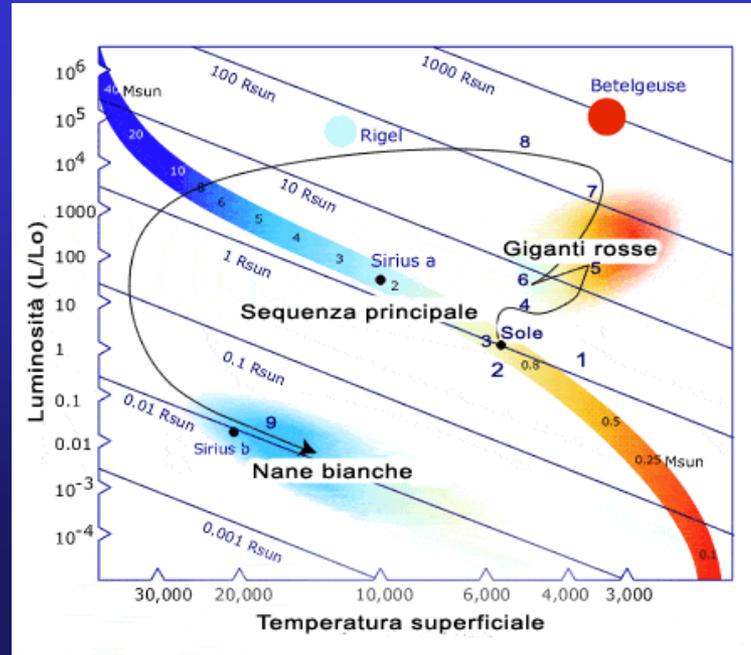


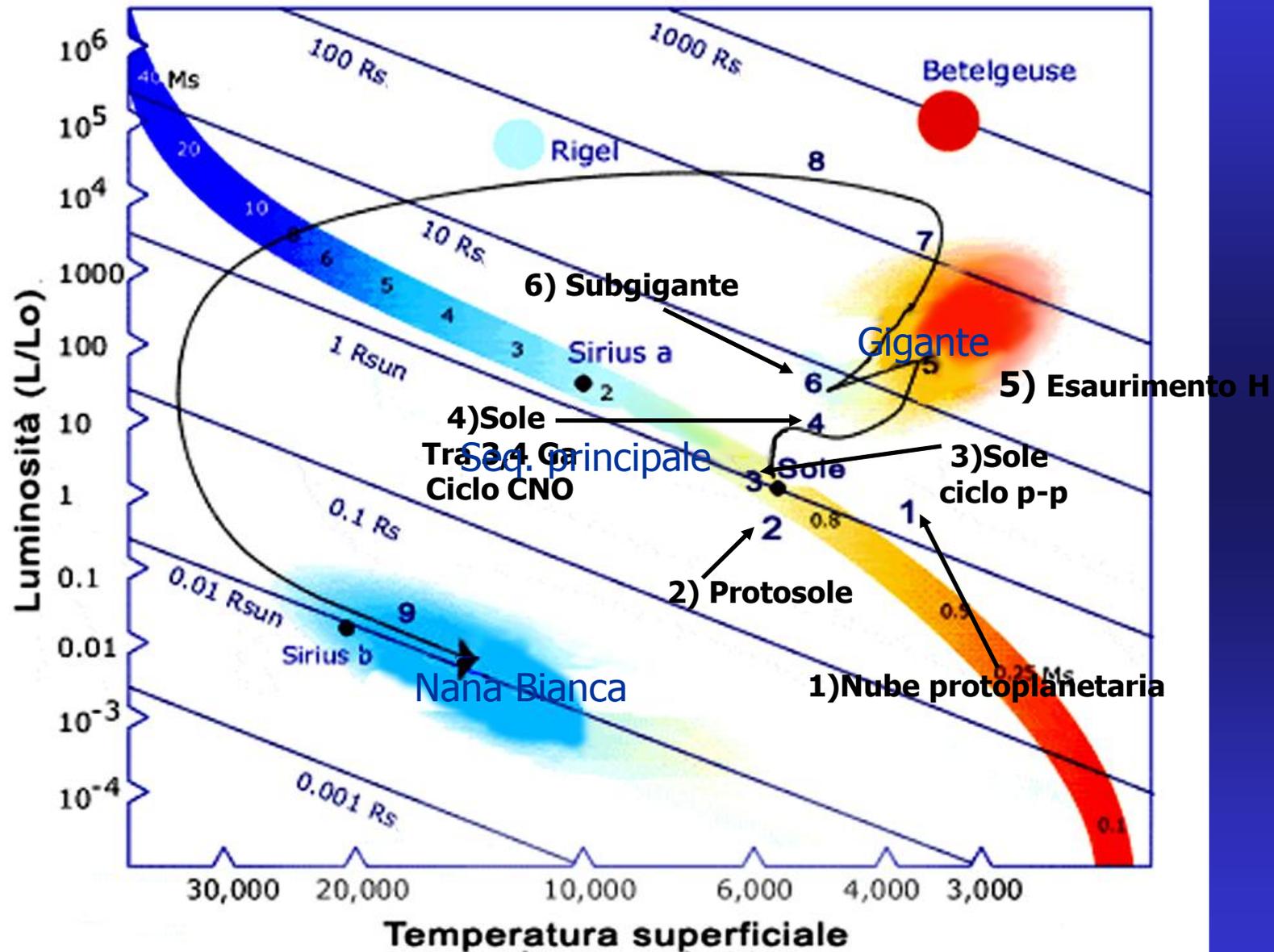
FIG. 3.—Evolution of the Sun's central density and temperature, for our preferred case. Symbols have the same meaning as in Fig. 2.

Evoluzione Sole-Riassunto



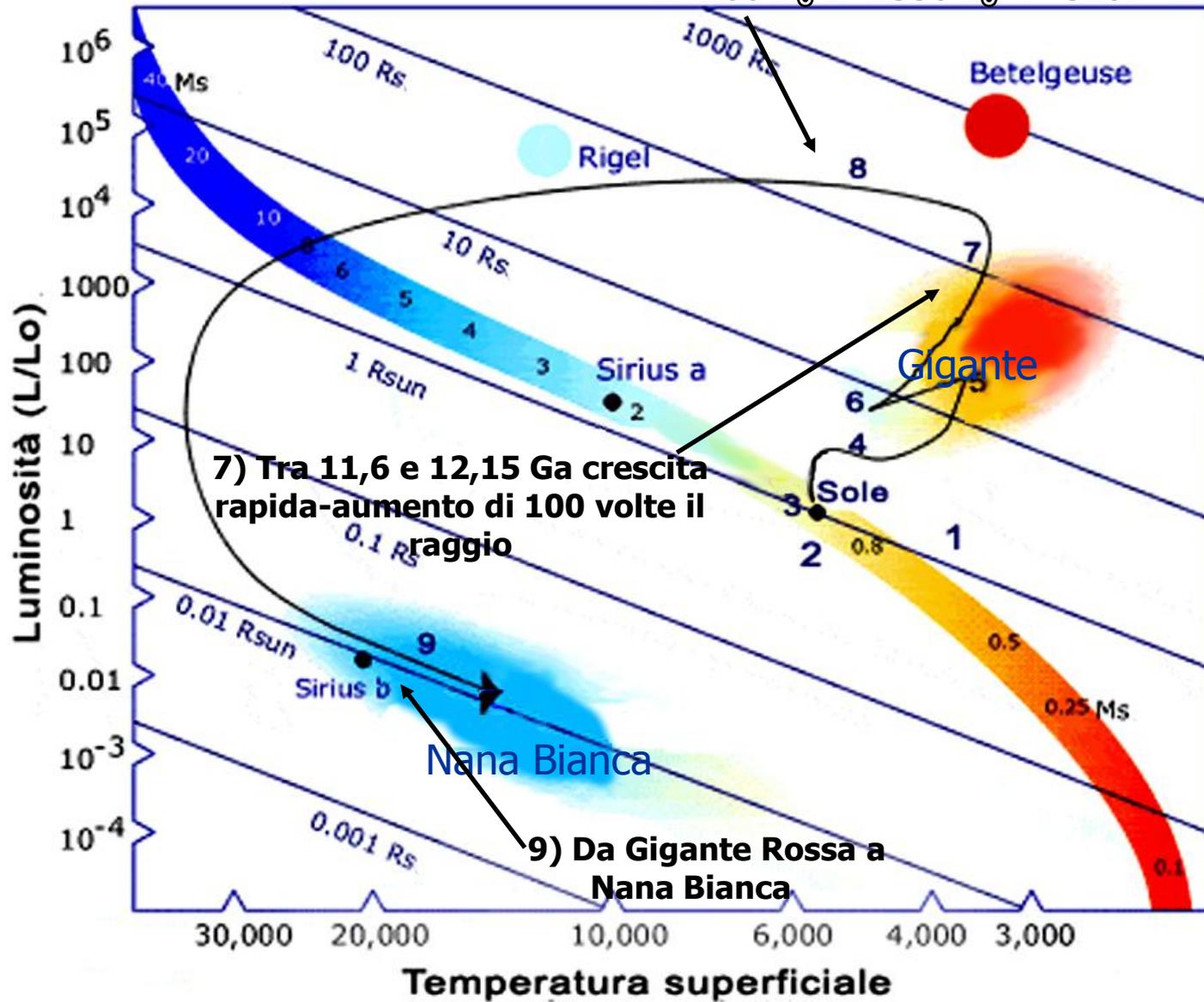
1. Nube protoplanetaria formazione del Sole
2. Protosole
3. Combustione dell'Idrogeno (fase di sequenza principale) Sole oggi dopo 4,55 miliardi di anni (Ga)
4. Sequenza principale avanzata tra 3,4 Ga
5. Esaurimento dell'Idrogeno nel nucleo 10,9 Ga $R=1,58 R_{\odot}$ $L=2,2 L_{\odot}$ $T= 5789 \text{ }^{\circ}\text{K}$
6. Subgigante 11,6 Ga $R=$ da 1,58 a 2,3 R_{\odot} L rimane costante a $L=2,2 L_{\odot}$ T diminuisce a $5517 \text{ }^{\circ}\text{K}$
7. Tra 11,6 e 12,15 Ga crescita rapida-aumento di 100 volte il raggio
8. Gigante Rossa 12,233 Ga $R=166 R_{\odot}$ $L=2350 L_{\odot}$ $T=3107 \text{ }^{\circ}\text{K}$
9. Da Gigante Rossa a Nana Bianca

Evoluzione Sole I

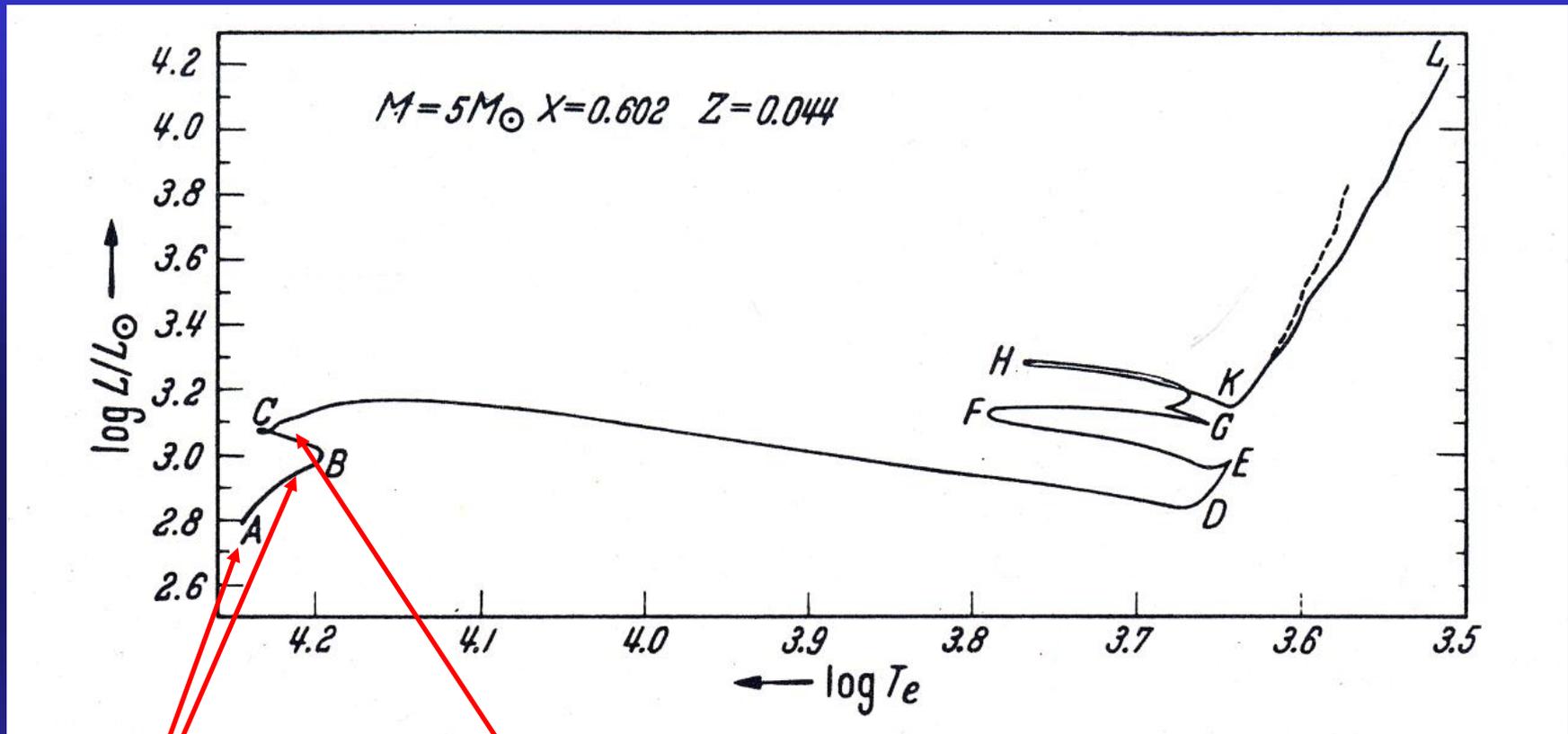


Evoluzione Sole II

8) Gigante Rossa 12,233 Ga
 $R=166 R_{\odot}$ $L=2350 L_{\odot}$ $T=3107 \text{ }^{\circ}\text{K}$



Evoluzione di una stella di 5 masse solari (I)

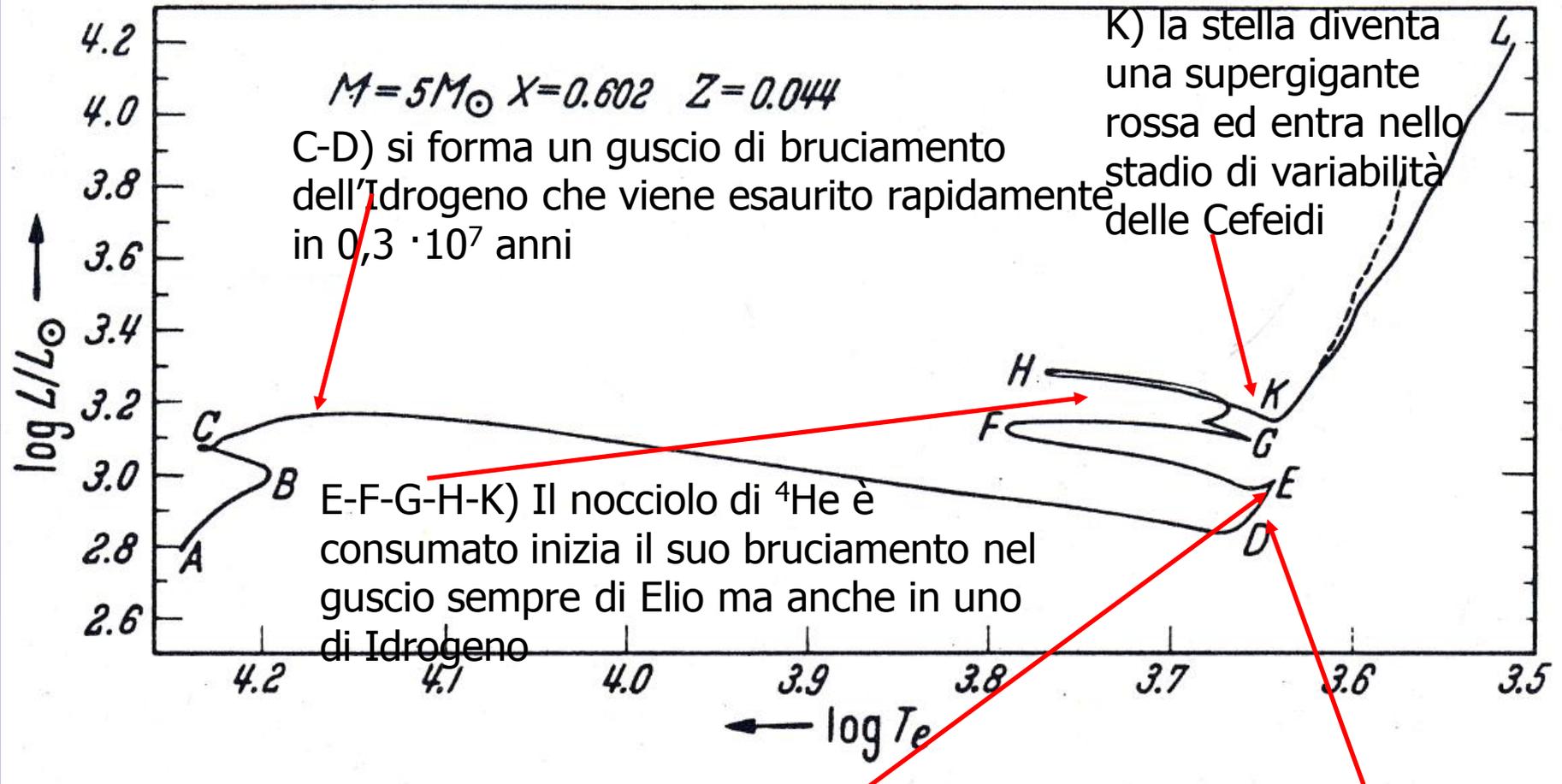


A) $T=17500$ °K $R=2,58 R_{\odot}$ $M_{bol}=-2,24$ $T_c=26,4 \times 10^6$ °K $P_c=5,5 \times 10^{10}$ atm

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 $5,6 \times 10^7$ anni

Evoluzione di una stella di 5 masse solari (II)



E) Inizia la fusione di ${}^4\text{He}$ in ${}^{12}\text{C}$ a $T_c \sim 130-180 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ mediante il processo 3α

D-E) Fase di Gigante Rossa