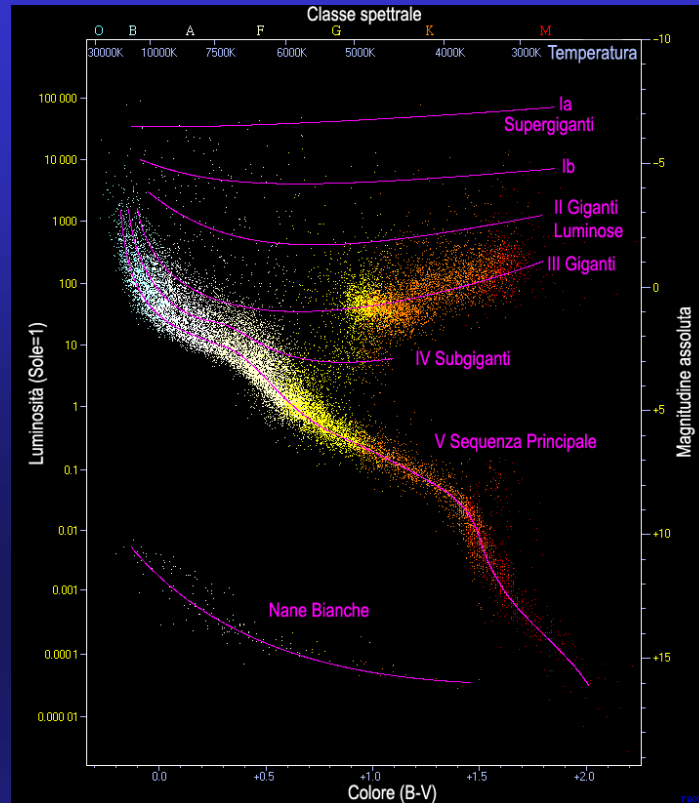


Modelli di evoluzione stellare



Primo Levi 2017

Roberto Bedogni

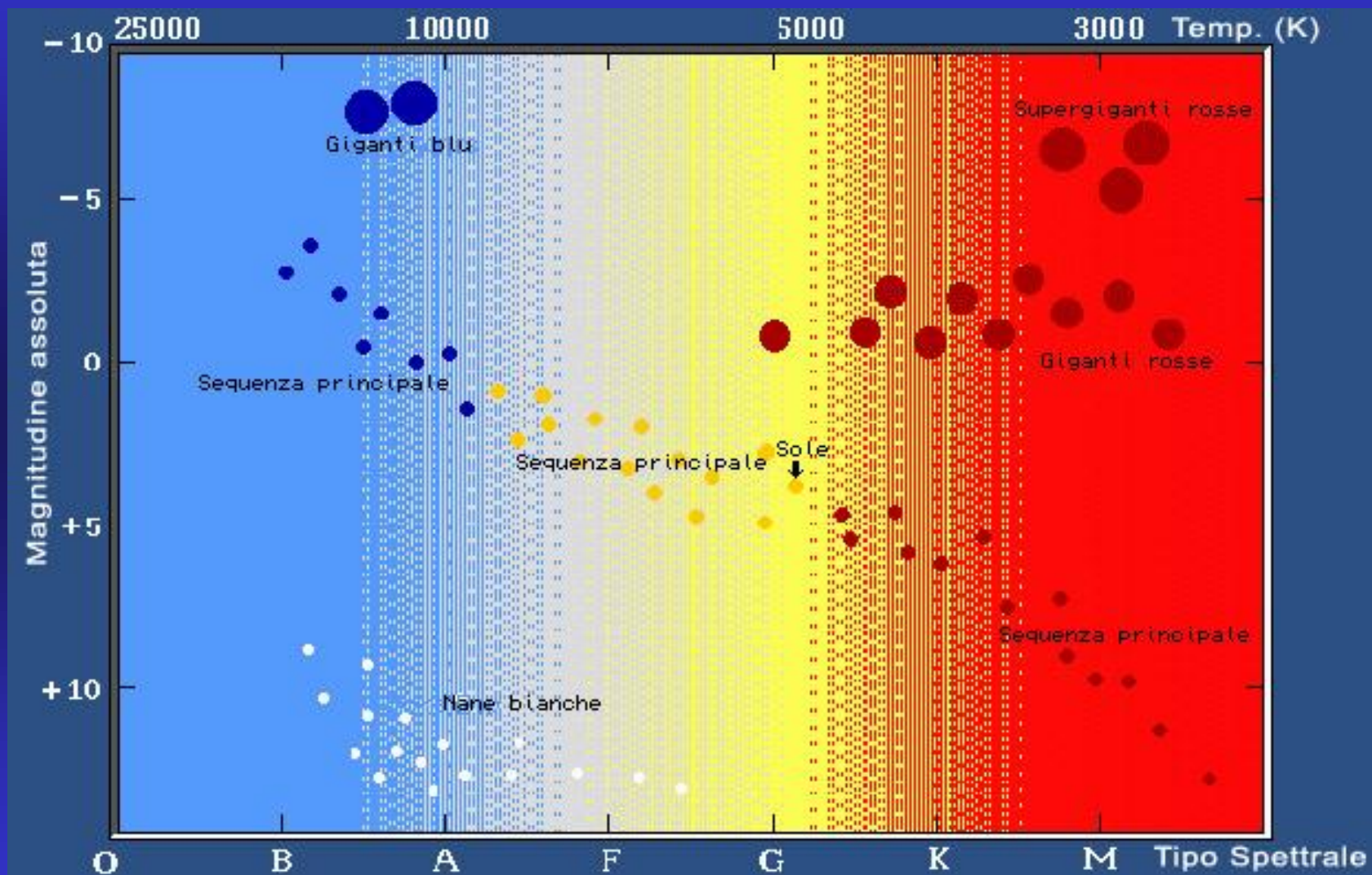
INAF Osservatorio Astronomico di Bologna

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

Email : roberto.bedogni@oabo.inaf.it

Evoluzione in ammassi stellari

Il diagramma HR



I diagrammi HR degli ammassi stellari

Problema: vari sono i fattori che influenzano la luminosità e la temperatura di una stella, quindi la sua posizione nel diagramma HR:

1. età
2. composizione chimica
3. massa

Come isolarli?

Occorreva un gruppo di stelle omogeneo, formato da stelle che avessero in comune almeno due dei parametri suddetti.

Gli ammassi stellari.

Gli ammassi stellari

Gli ammassi stellari sono gruppi di stelle legate tra loro gravitazionalmente, formatesi nella stessa epoca e dalla stessa nube di gas e polveri.

Esse hanno in comune l'età e la composizione chimica. L'unico parametro che le differenzia resta la massa.

Ci sono due tipi di ammassi nella nostra galassia:

- gli ammassi globulari

- gli ammassi galattici od aperti

Agli ammassi aperti e globulari vanno aggiunte le associazioni OB

Gli ammassi globulari



Ammasso globulare M13

- ✓ Gli ammassi globulari sono sferici
- ✓ Contengono 100.000 - 1.000.000 di stelle
- ✓ Contengono poca materia interstellare
- ✓ Sono oggetti vecchi (13 miliardi di anni)
- ✓ Le stelle più luminose hanno colore rosso

Gli ammassi aperti



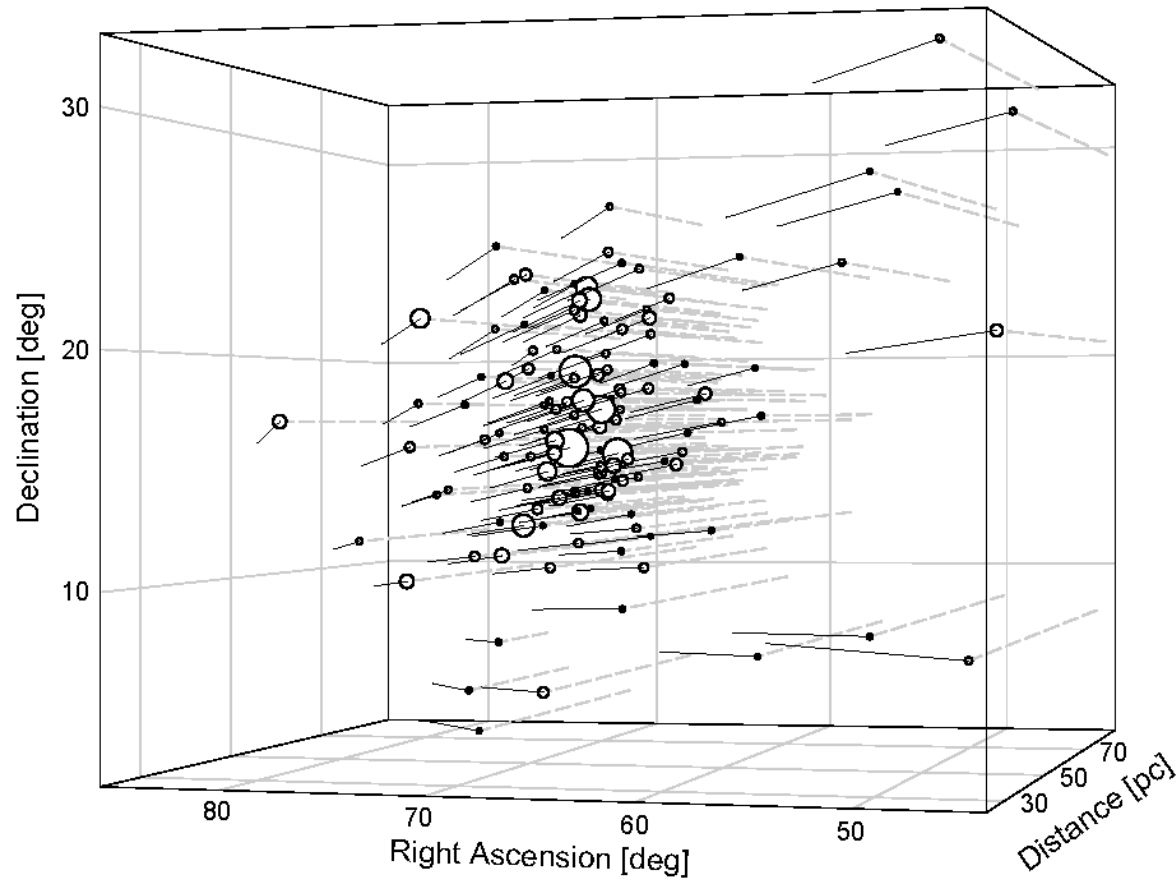
Ammasso aperto delle Pleiadi

- ✓ Gli **ammassi aperti** hanno forma irregolare
- ✓ Contengono da qualche centinaio a qualche migliaio di stelle
- ✓ Sono ricchi di materia interstellare
- ✓ Sono oggetti giovani (vi si formano stelle)
- ✓ Le stelle più luminose hanno colore azzurro.
- ✓ La stima delle distanze si effettua con le parallassi di gruppo

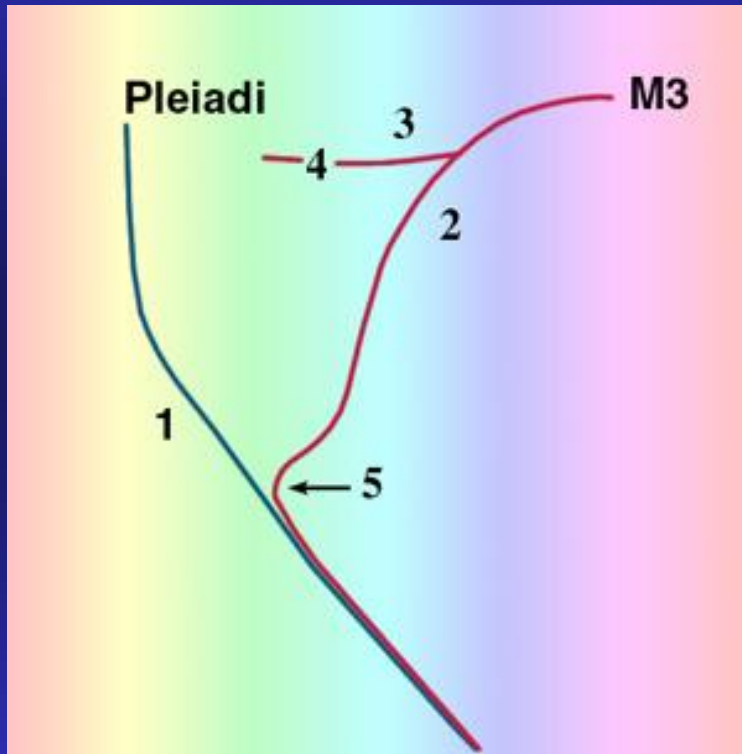
Lista di ammassi aperti entro 500 pc

Nome	R.A.	Dec.	Costellazione	Distanza (pc ed a.l)	Età (Ma)
Hyades-Mel 25	04 ^h 26.9 ^m	+15° 52′	Taurus	46=150 a.l	625
Coma	12 ^h 22.5 ^m	+25° 51′	Coma Berenices	90=293.4	400-500
Pleiades-Mel 22-M45	03 ^h 47.4 ^m	+24° 07′	Taurus	135=440	100
Pleiadi del sud-IC 2602	10 ^h 43.2 ^m	−64° 24′	Carina	147=479.2	30
Omicron velorum-IC 2391	08 ^h 40.6 ^m	−53° 02′	Vela	148=482.5	30
Presaepe M44-NGC 2632	08 ^h 40.4 ^m	+19° 41′	Cancer	160=521.6	830
NGC 2451 A	07 ^h 45.4 ^m	−37° 58′	Puppis	189=616	50
Alpha Persei	03 ^h 26.0 ^m	+49° 07′	Perseus	200=652	50
Blanco 1	00 ^h 04.3 ^m	−29° 56′	Sculptor	253=824.7	100
Amm. Tolomeo-M7-NGC 6475	17 ^h 53.8 ^m	−34° 47′	Scorpius	280=912.8	224
M39-NGC 7092	21 ^h 31.8 ^m	+48° 27′	Cygnus	311=1014	280
NGC 2232	06 ^h 26.4 ^m	−04° 45′	Monoceros	325=1060	53
IC 4756	18 ^h 39.0 ^m	−05° 27′	Serpens	330=1076	500
NGC 2516-Mel 82	07 ^h 58.0 ^m	−60° 48′	Carina	346=1128	141
IC 4665-Mel 179	17 ^h 46.3 ^m	+05° 43′	Ophiuchus	352=1147.5	43
Trumpler 10	08 ^h 47.8 ^m	−42° 29′	Vela	365=1190	35
NGC 752-Mel 12	01 ^h 57.7 ^m	+37° 47′	Andromeda	400=1304	1700–2000
NGC 3532-Mel 103	11 ^h 06.4 ^m	−05° 42′	Carina	405=1320	316
Collinder 140	07 ^h 24.5 ^m	−31° 51′	Canis Major	410=1336.6	35
NGC 2547-Mel 84	08 ^h 10.8 ^m	−49° 18′	Vela	433=1411.6	38

L'ammasso aperto delle Iadi

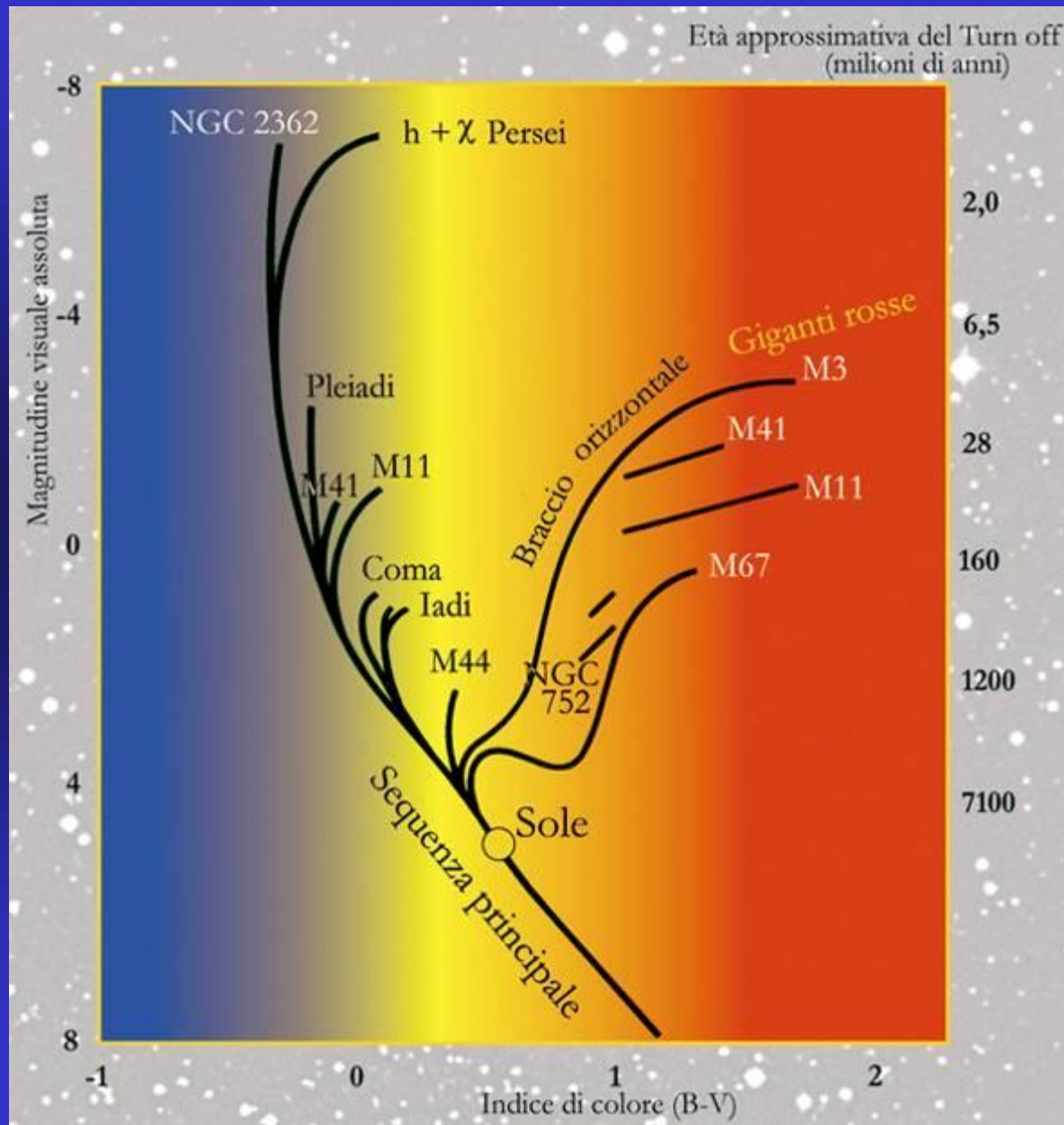


I diagrammi HR degli ammassi "aperti"



1. Negli ammassi aperti la Sequenza Principale è completa
2. Negli ammassi globulari è presente il Ramo delle Giganti Rosse
3. È presente pure un **Braccio Orizzontale**
4. Il Braccio orizzontale appare interrotto da una lacuna, detta Lacuna delle RR Lyrae o variabili di ammasso
5. Il punto in cui il Braccio delle Giganti Rosse si stacca dalla Sequenza Principale è detto Turn Off

Diagramma colori-luminosità ammassi aperti

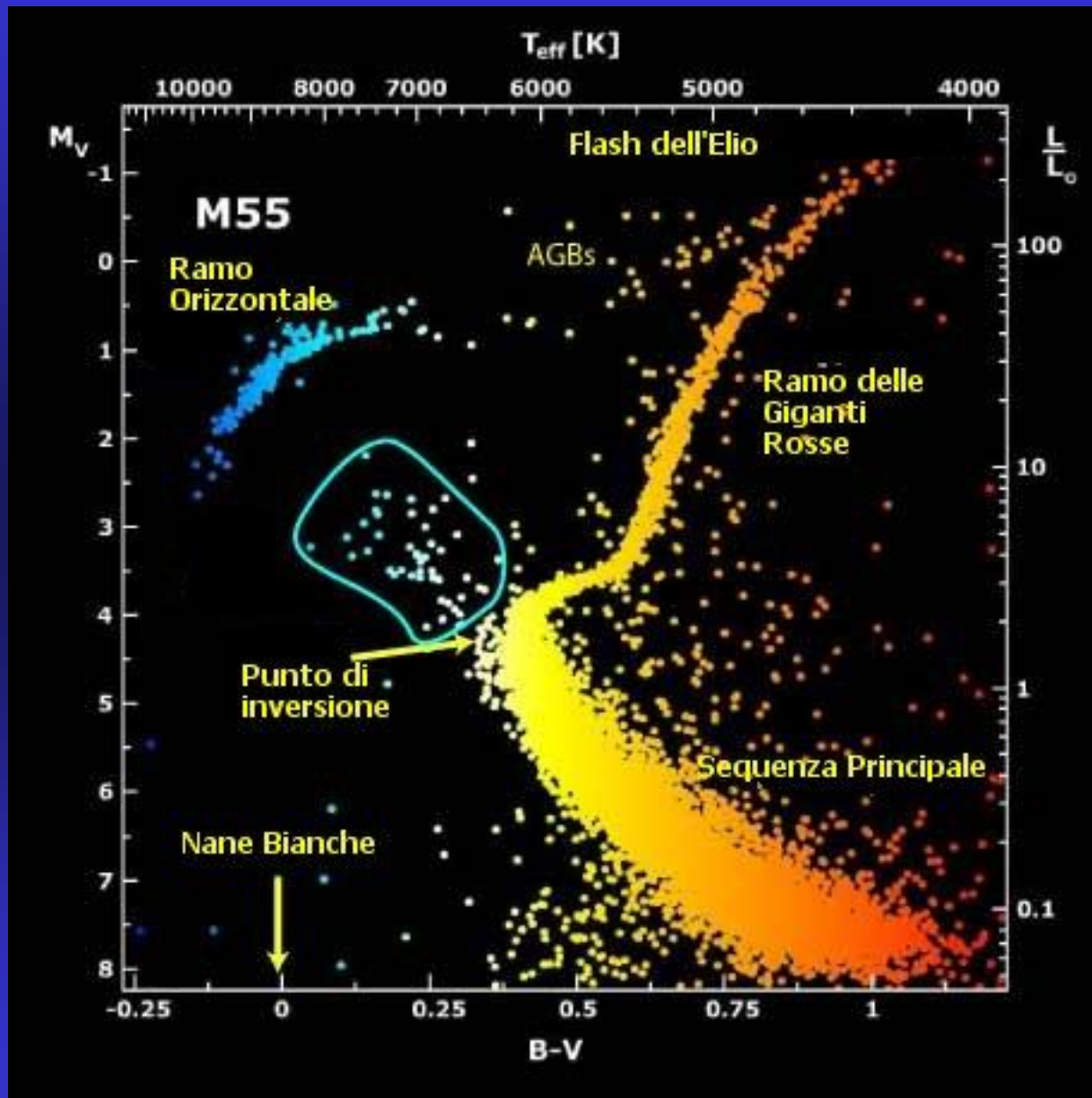


Ammassi Globulari nell'alone della Via Lattea

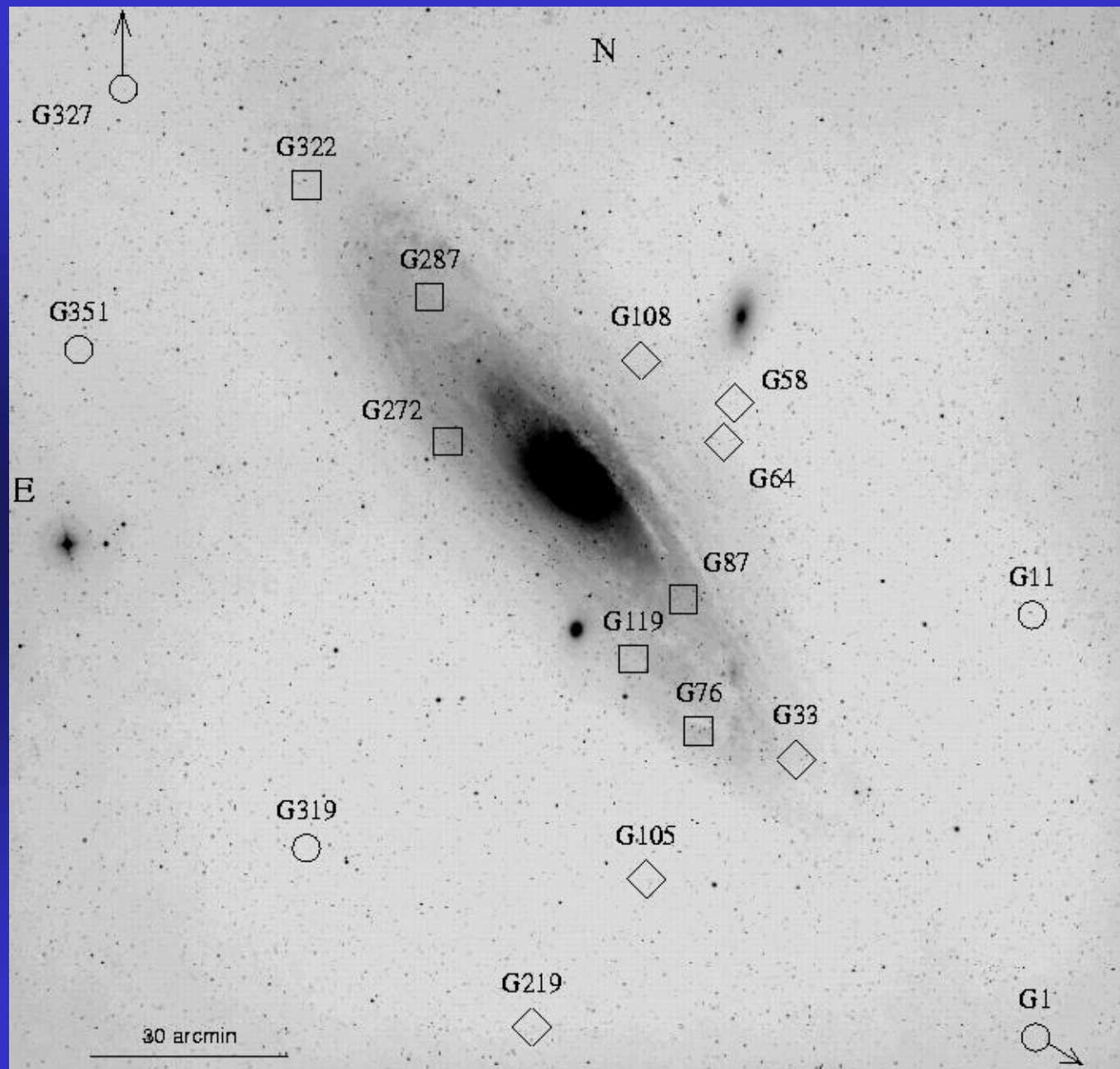
Catalogo Messier	Catalogo NGC	Distanza (1000 a.l.)	Costellazione	Magnitudine apparente
M4	NGC 6121	7	Scorpius	7.5
M22	NGC 6656	10	Sagittarius	5.1
M71	NGC 6838	12	Sagitta	8.5
M10	NGC 6254	13	Ophiuchus	7.5
M55	NGC 6809	17	Sagittarius	7.0
M12	NGC 6218	18	Ophiuchus	8.0
M28	NGC 6626	18	Sagittarius	8.5
M107	NGC 6171	20	Ophiuchus	10.0
M13	NGC 6205	22	Hercules	5.8
M62	NGC 6266	22	Ophiuchus	8.0
M5	NGC 5904	23	Serpens	7.0
M30	NGC 7099	25	Capricornus	8.5
M69	NGC 6637	25	Sagittarius	9.0
M9	NGC 6333	26	Ophiuchus	9.0

NB dal momento che gli ammassi globulari sono nell'alone della galassia e posti ad una stessa distanza dall'osservatore le loro magnitudini apparenti si possono usare, a meno di un fattore di scala sull'asse y, come se fossero assolute

Ammasso globulare M55



Ammassi globularari in Andromeda (M31)



Confronto tra diagrammi

1. Negli ammassi aperti la Sequenza Principale è completa
2. Maggiore è l'età di un **ammasso aperto** e maggiore è il suo contenuto di giganti rosse
3. L'età degli ammassi si stabilisce dalla posizione del turn off
4. Minore è la massa di una stella maggiore è il suo tempo di permanenza sulla sequenza principale.
5. Le stelle di massa maggiore evolvono assai più rapidamente delle stelle di massa minore

Modelli di evoluzione stellare approfondimento

Modelli stellari

Ricapitoliamo le nostre conoscenze

1. gli **ammassi globulari** sono più vecchi di **quelli aperti**;
2. esistono popolazioni stellari diverse; le popolazioni più vecchie sono caratterizzate da un basso contenuto di *metalli*, ossia di elementi più pesanti dell'Idrogeno e dell'Elio; le popolazioni più giovani hanno un contenuto di metalli maggiore;
3. è ipotizzabile uno schema evolutivo che segnala l'invecchiamento di un ammasso a seconda della presenza più o meno accentuata di giganti rosse;
4. le giganti rosse rappresentano una fase evolutiva stellare, successiva a quella di stella di sequenza principale;
5. le stelle di alta sequenza principale evolvono più rapidamente di quelle di bassa sequenza;
6. la sequenza principale è più popolata che non il ramo delle giganti;
7. l'evoluzione di una stella è una conseguenza della variazione della sua composizione chimica, prima formata da elementi leggeri con bassa percentuale dei metalli, che va via via crescendo nel corso dell'evoluzione

Modelli stellari

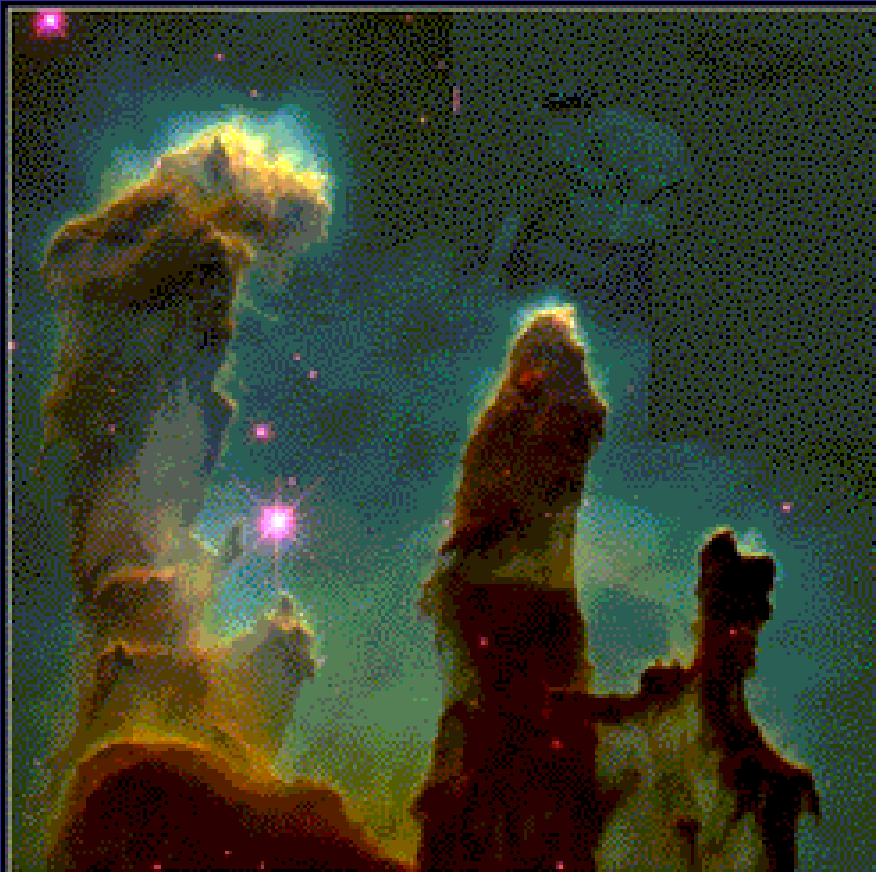
- ❑ L'utilità dei modelli
- ❑ I modelli
 - Le protostelle
 - Stelle di sequenza principale (o normali)
 - Giganti Rosse
 - Nane Bianche
 - Stadi avanzati
 - Stadi finali (Le supernovae)

Le protostelle



- Nubi di gas e polveri
- Nuclei di condensazione
- Contrazione gravitazionale
- Riscaldamento (energia gravitazionale)
- Protostella
- Inserimento sulla sequenza principale

Le protostelle



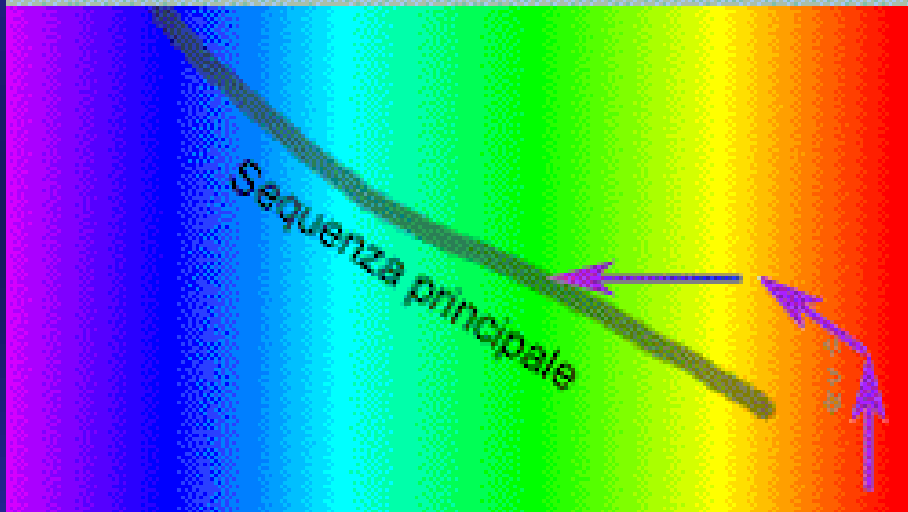
Pilastri gassosi in M16

HST - WFPC2

Il Telescopio Spaziale Hubble ha accuratamente indagato il processo di formazione stellare

Da protostella a stella

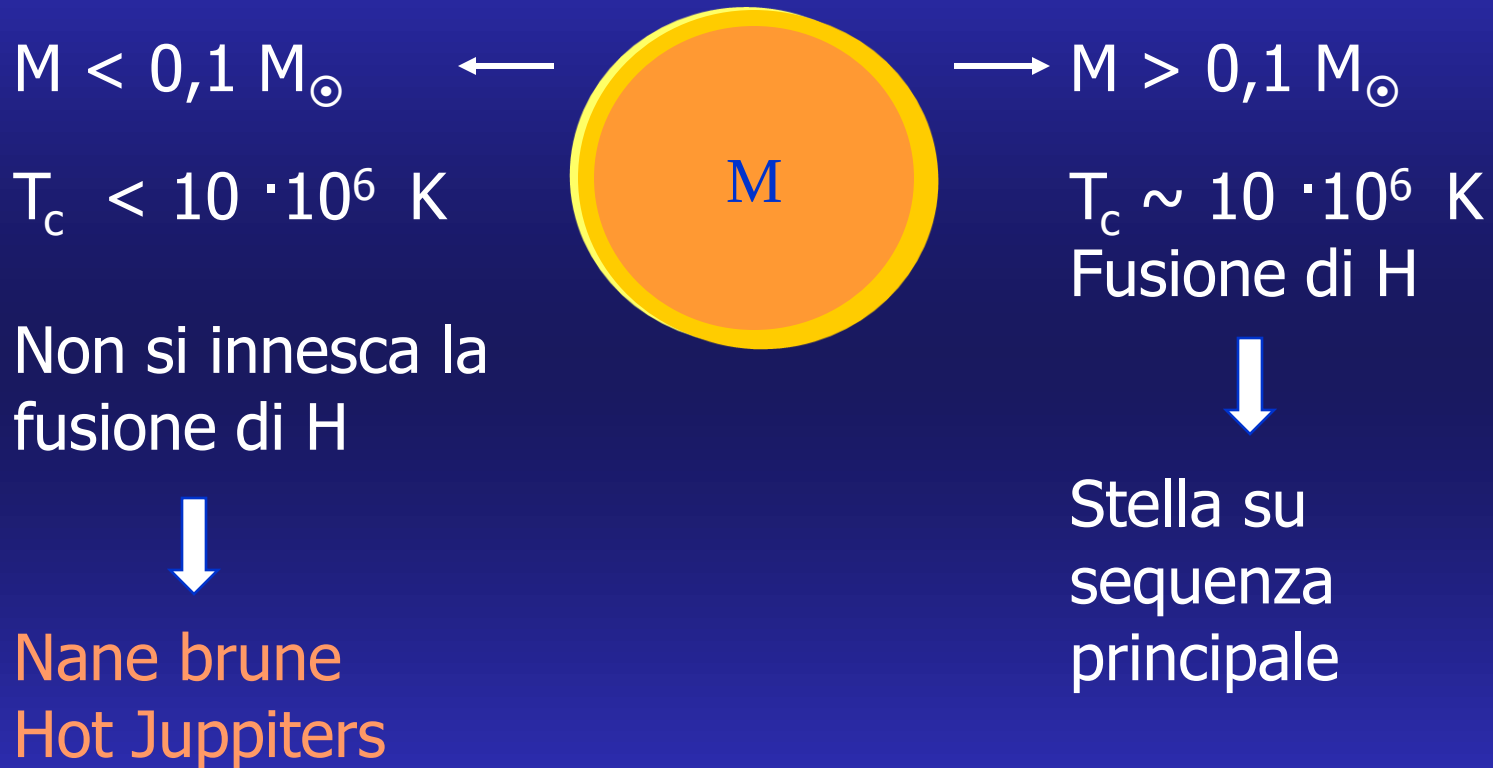
Traccia evolutiva di una protostella verso la sequenza principale



La fase protostellare cessa con l'innesco della combustione dell'idrogeno nel nucleo: la protostella diviene stella.

La posizione della stella sulla sequenza principale è definito dalla sua massa e dalla composizione chimica.

Stella solo se ...



Fusione dell'idrogeno (H) in elio (He)

Fusione dell'elio ciclo protone-protone



 protone  neutrone

Fusione di H in He

Ciclo p-p	$M < M_{\odot}$
Ciclo CNO	$M > M_{\odot}$

La fase di sequenza principale

M ($M_{\odot}$)	L ($L_{\odot}$)	T_c (10^6 K)	R ($R_{\odot}$)	T_{ev} (10^6 anni)
0,8	0,25	11,4	0,68	20.000
1(Sole)	0,77	13,5	0,88	10.000
2,0	16,9	20,9	1,6	800
5,0	515	34,3	2,6	78
30	120.000	37,3	7,13	6

Tempo evolutivo

La fase di sequenza principale termina quando la stella ha raggiunto il suo tempo evolutivo.

Questo coincide con l'intervallo di tempo necessario affinché $1/10$ della massa del nucleo della stella si sia trasformato in elio a seguito della combustione dell'idrogeno.

Il tempo evolutivo dipende fortemente dalla massa della stella.

Giganti Rosse

- La fusione di H non sostiene più la luminosità della stella
- La stella inizia a contrarsi ed il nucleo a riscaldarsi

$$M < 0,5 M_{\odot}$$

La stella non riesce ad innescare la combustione di He.

Termina la sua evoluzione come nana bianca



$$M > 0,5 M_{\odot}$$

La stella diviene una gigante rossa

$$T_c > 100 \cdot 10^6 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

Combustione di He

Formazione di C (carbonio)

Giganti Rosse: struttura

Una gigante rossa è costituita da

1. Un nucleo povero di idrogeno in contrazione
2. Uno strato esterno al nucleo nel quale la contrazione ha innalzato la temperatura ed avviato la combustione di H (H shell burning)
3. Un involucro ancora ricco di H

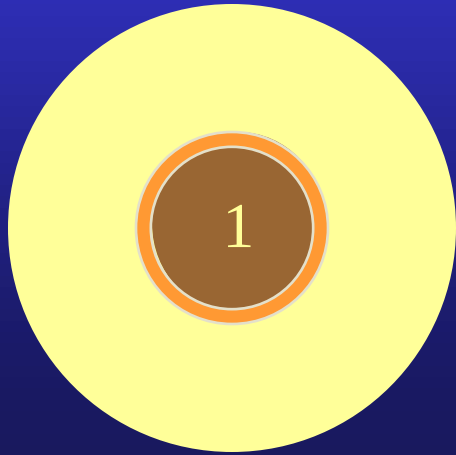
In queste condizioni

- a. Il nucleo continua a contrarsi, scaldarsi ed aumentare di massa
- b. La shell continua a spostarsi verso l'esterno
- c. La stella aumenta continuamente il suo raggio.

Giganti Rosse: struttura

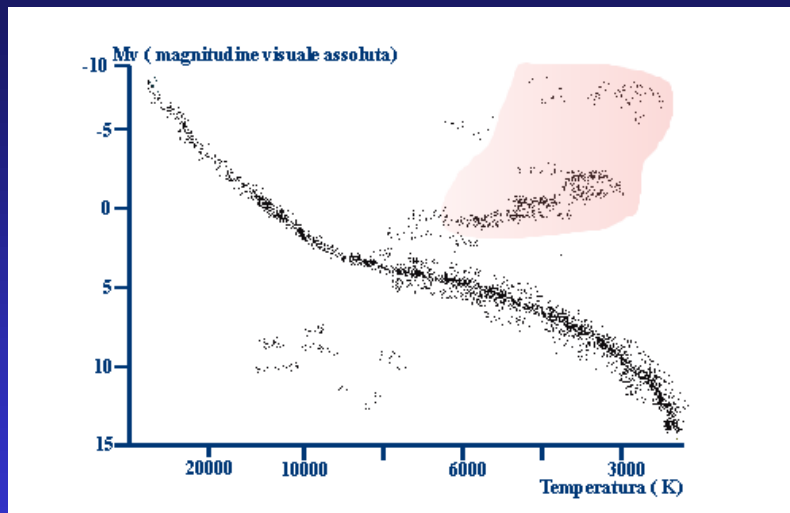


Giganti Rosse: termine della fase



La fase di gigante rossa termina quando il nucleo di elio (1), che ormai racchiude il 40% della massa della stella, raggiunge i 100 milioni di gradi.

Inizia allora la combustione dell'elio (He burning phase), questa è assai rapida e la stella risale rapidamente il ramo delle giganti (Giant Branch Tip)



Evoluzione: stadi finali

Una stella è un sistema fisico che irraggia nello spazio l'energia fornita dalle reazioni nucleari, che avvengono nel suo interno.

Quando nella stella cessano le reazioni nucleari, la stella si spegne.

La fase finale può essere di tipo

- Quiescente (nana bianca, stelle di piccola massa)
- Esplosivo (supernova, stelle di grande massa)

Stadi finali: nane bianche

Tutte le stelle che non divengono giganti rosse, oppure quelle che al termine della fase di gigante rossa, fusione del Carbonio, posseggono una massa

$$M < 1,44 M_{\odot} \quad [\text{limite di Chandrasekhar}]$$

terminano la loro esistenza come **nane bianche**.

In questa fase la stella possiede un nucleo inerte ed un involucro non troppo massiccio, che non è in grado di comprimere ulteriormente il nucleo, innalzandone la temperatura ed avviando ulteriori reazioni nucleari. Dopo una turbolenta fase di instabilità, nel corso della quale la stella si libera di gran parte degli strati esterni, essa inizia la fase di raffreddamento per irraggiamento.

La stella è morta.

Il processo di ulteriore raffreddamento è molto lento e dura miliardi di anni.

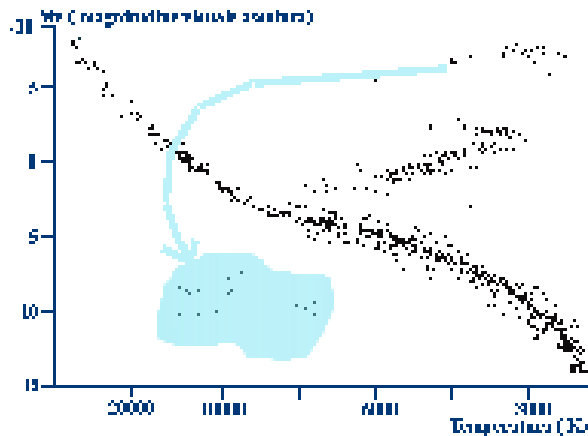
Stadi finali: nane bianche

Le stelle $0,08 < M < 0,5$ masse solari, nane rosse, si contraggono molto lentamente ed evolveranno in Nane Bianche in tempi anche maggiori dell'età attuale dell'Universo

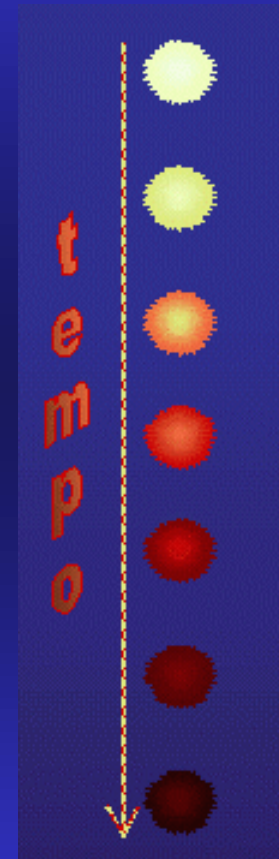
Le stelle $0,5 < M < 8$ masse solari hanno un'evoluzione molto più turbolenta con varie fasi di espansione e contrazione con, alla fine, una fase parossistica di Nebulosa Planetaria al cui centro rimane una Nana Bianca

Appena formata la Nana Bianca ha una temperatura di 100-200 milioni di °K che diminuisce lentamente in seguito allo scambio di calore (raffreddamento) con l'ambiente esterno

Da gigante rossa a nana bianca



15000 °K
 10^{10} anni
4000 °K



Eventi esplosivi: supernovae

Quando nel nucleo termina la fusione del ferro, ulteriori processi di fusione non forniscono ma sottraggono energia.

Il nucleo si spegne rapidamente ed il massiccio involucro crolla letteralmente su di esso.

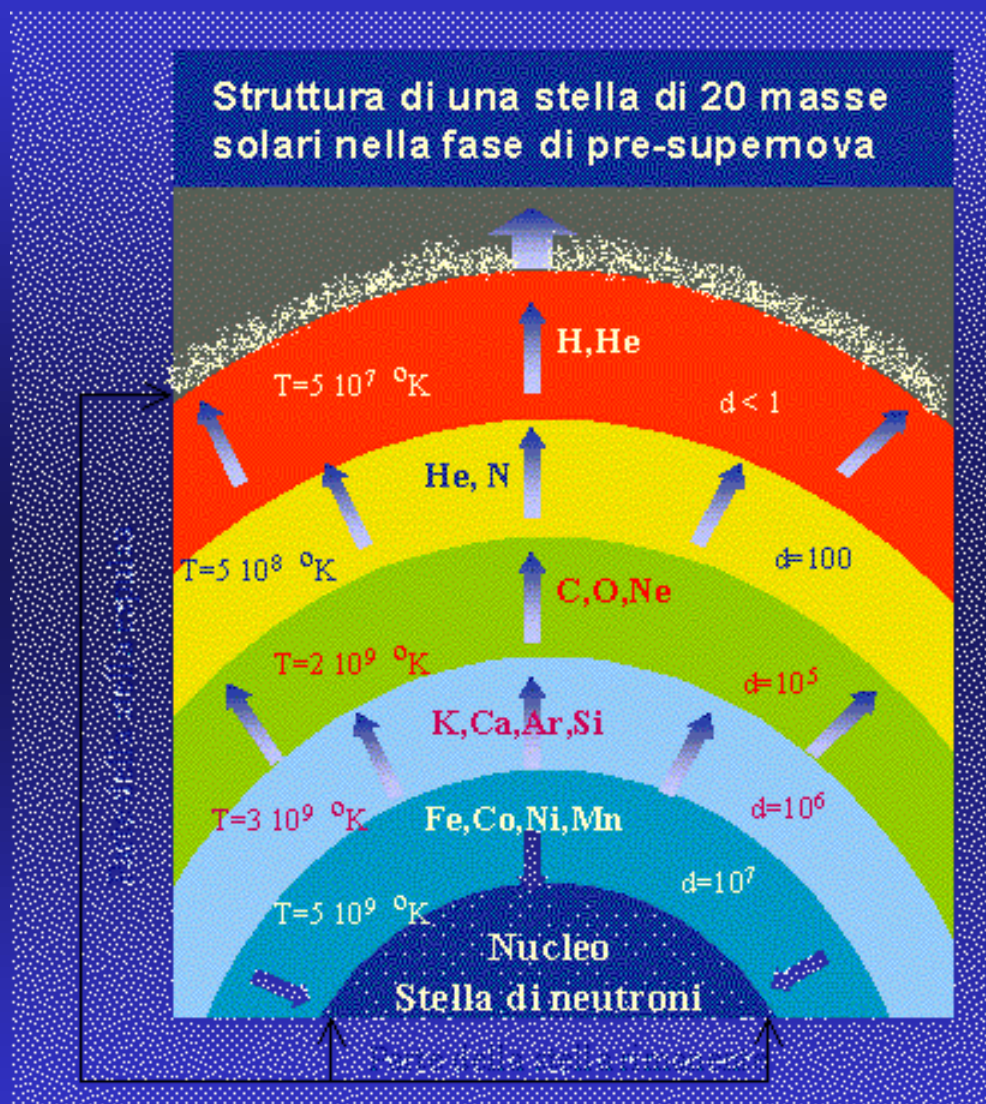
Tale evento dura alcuni minuti.

Sotto tale pressione tutti gli elementi nel nucleo si disfano: esso diviene un mare di protoni, neutroni ed elettroni. Gli elettroni vengono catturati dai protoni. Il nucleo diviene un mare di neutroni, con densità altissima.

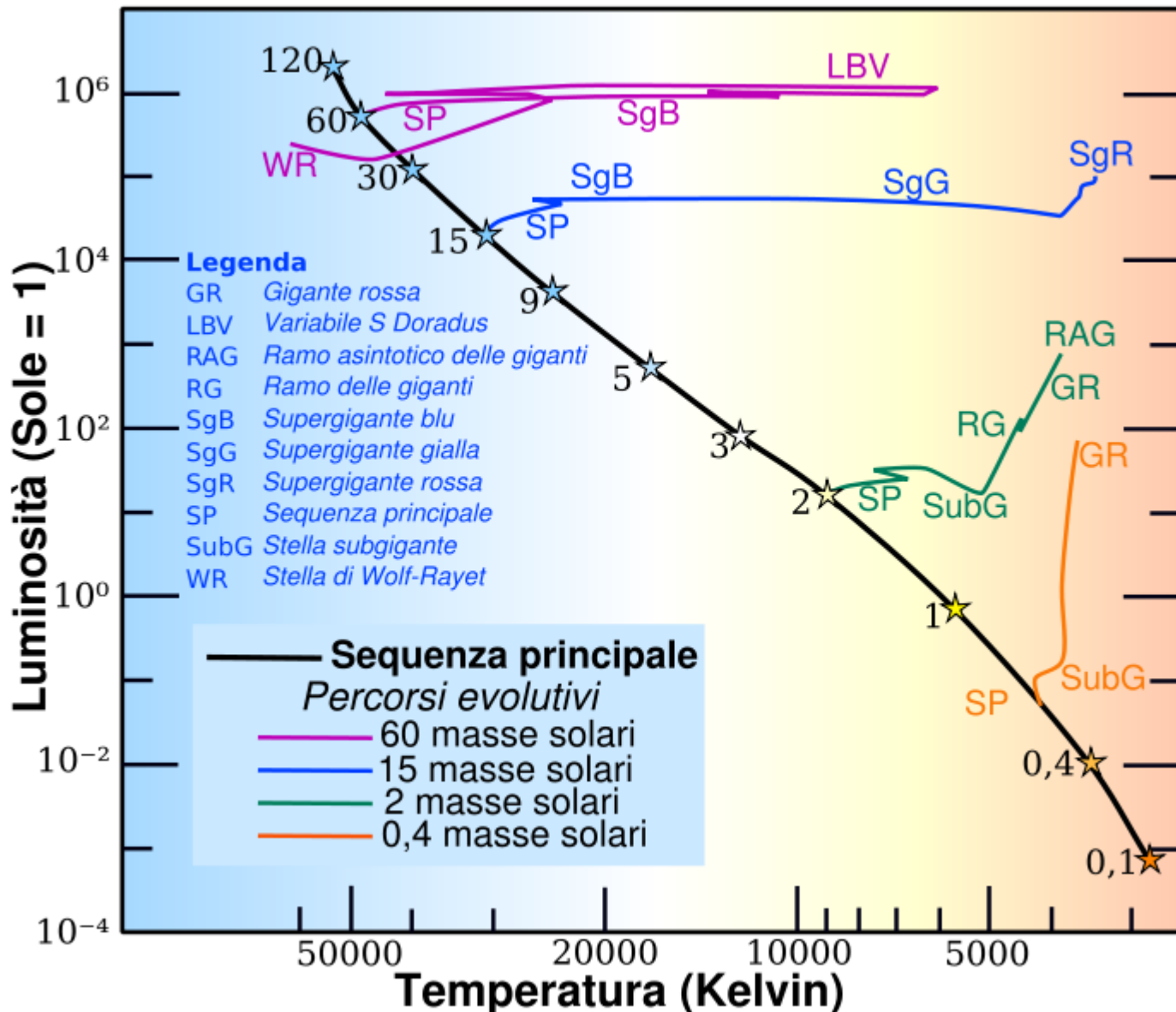
L'involucro si schiaccia su di esso e rimbalza via.

Si realizza così l'evento di supernova

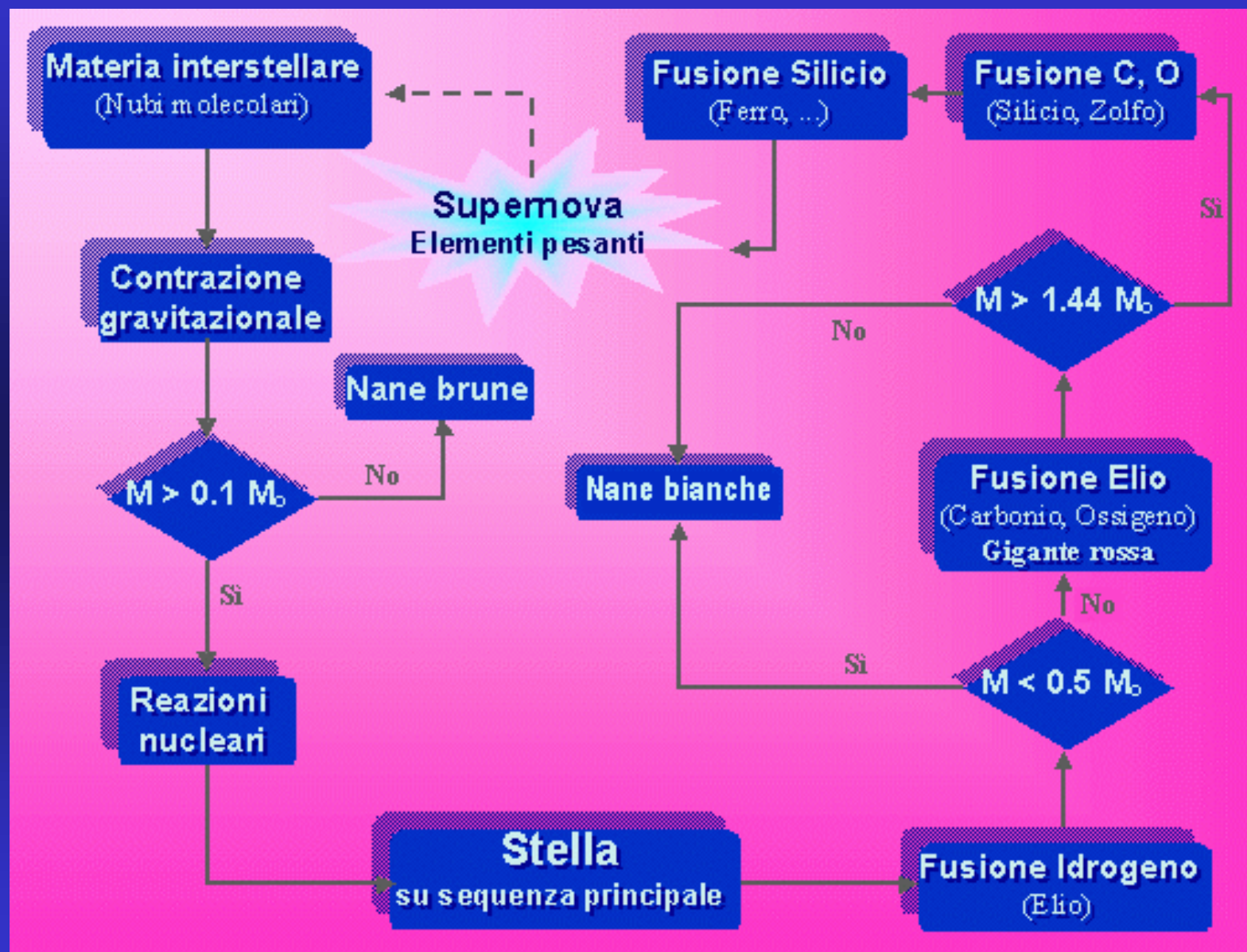
Eventi esplosivi: supernovae



I modelli - sequenza evolutiva delle stelle



Il ciclo di formazione stellare



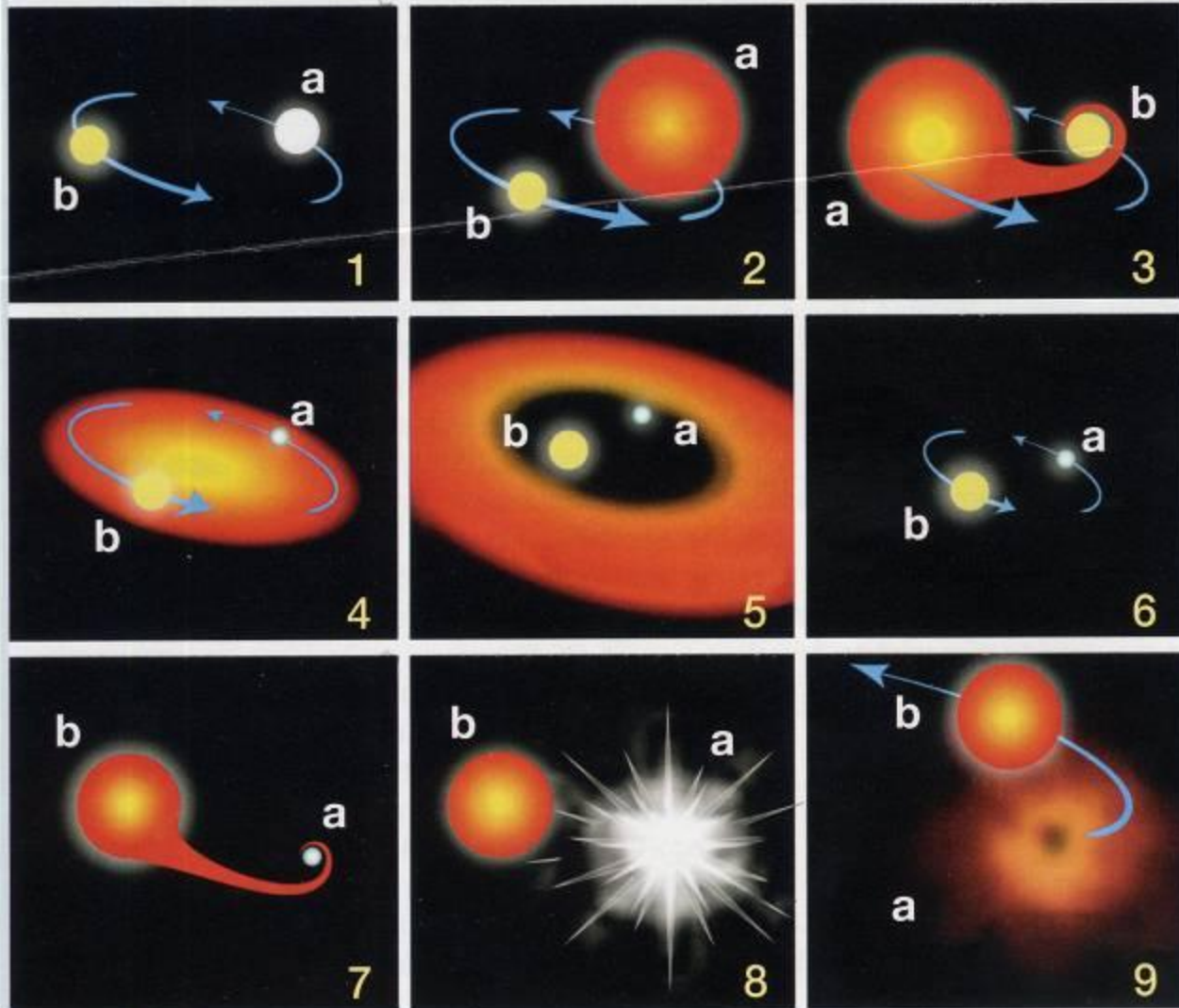
Eventi esplosivi: supernovae



La supernova della Grande Nube di Magellano 1987

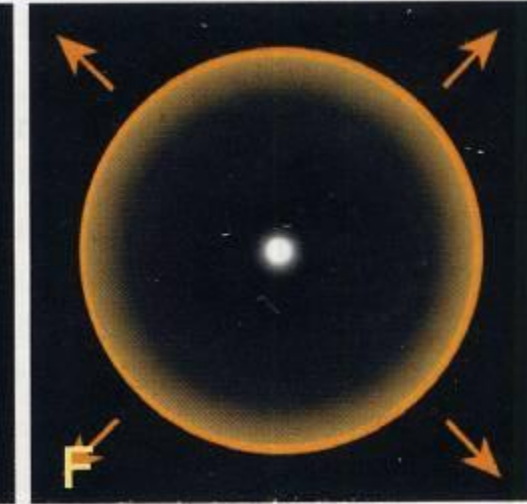
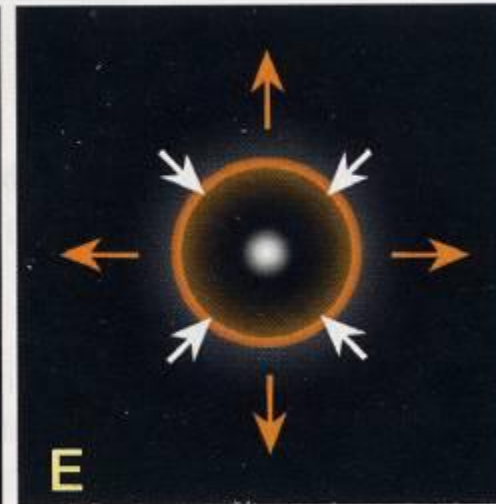
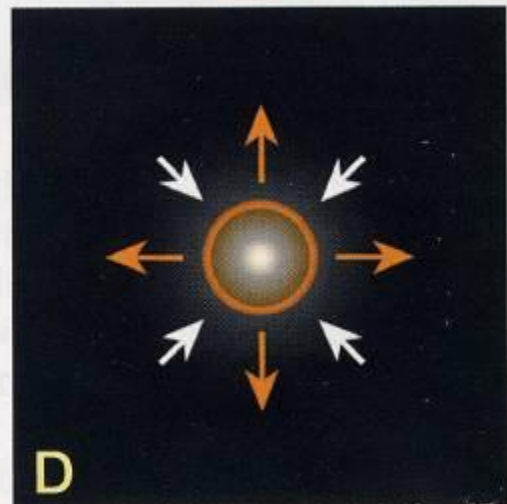
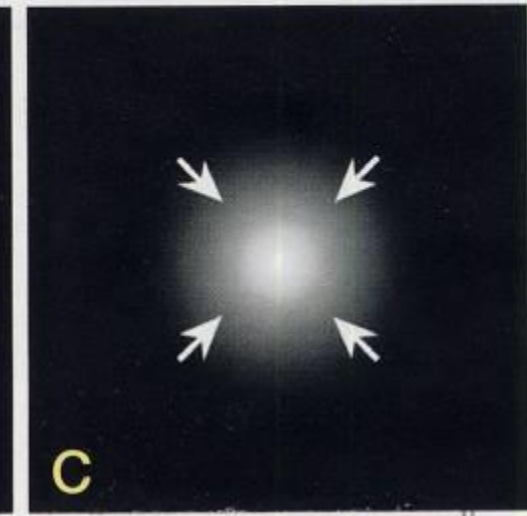
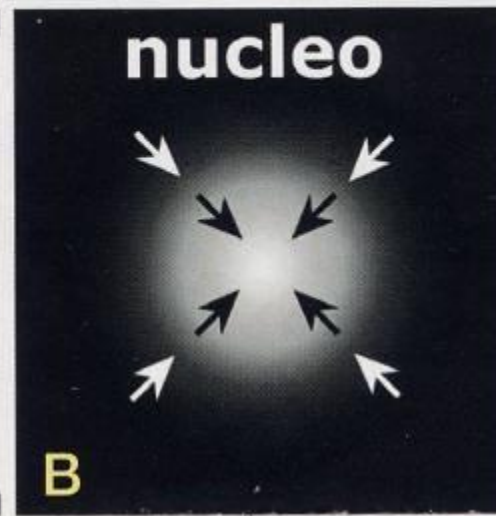
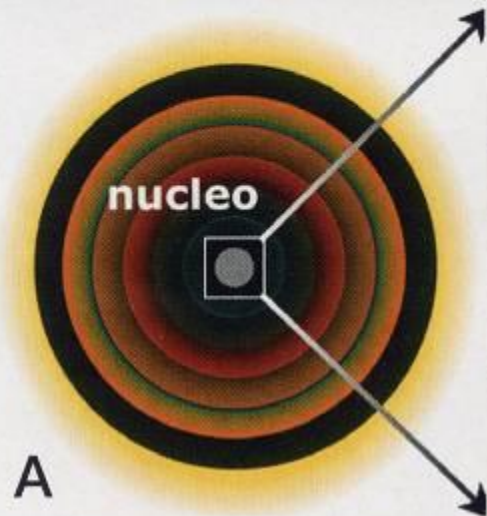
Eventi esplosivi: supernovae Tipo Ia

Così esplodono le supernovae di Tipo Ia



Eventi esplosivi: supernovae Tipo II

Così esplodono quelle di Tipo II



Supernovae: energia e frequenza

L'energia che si sviluppa nel collasso gravitazionale è pari a
 10^{44} Joule = 10^{51} erg
l'energia emessa dal nostro Sole in 9 miliardi di anni.

Non esiste meccanismo in grado di convogliare all'esterno
una tale energia: la stella non può non esplodere

La frequenza di tali eventi per ogni galassia è stimata
tra una supernova ogni 30 anni ad una ogni 300 anni.

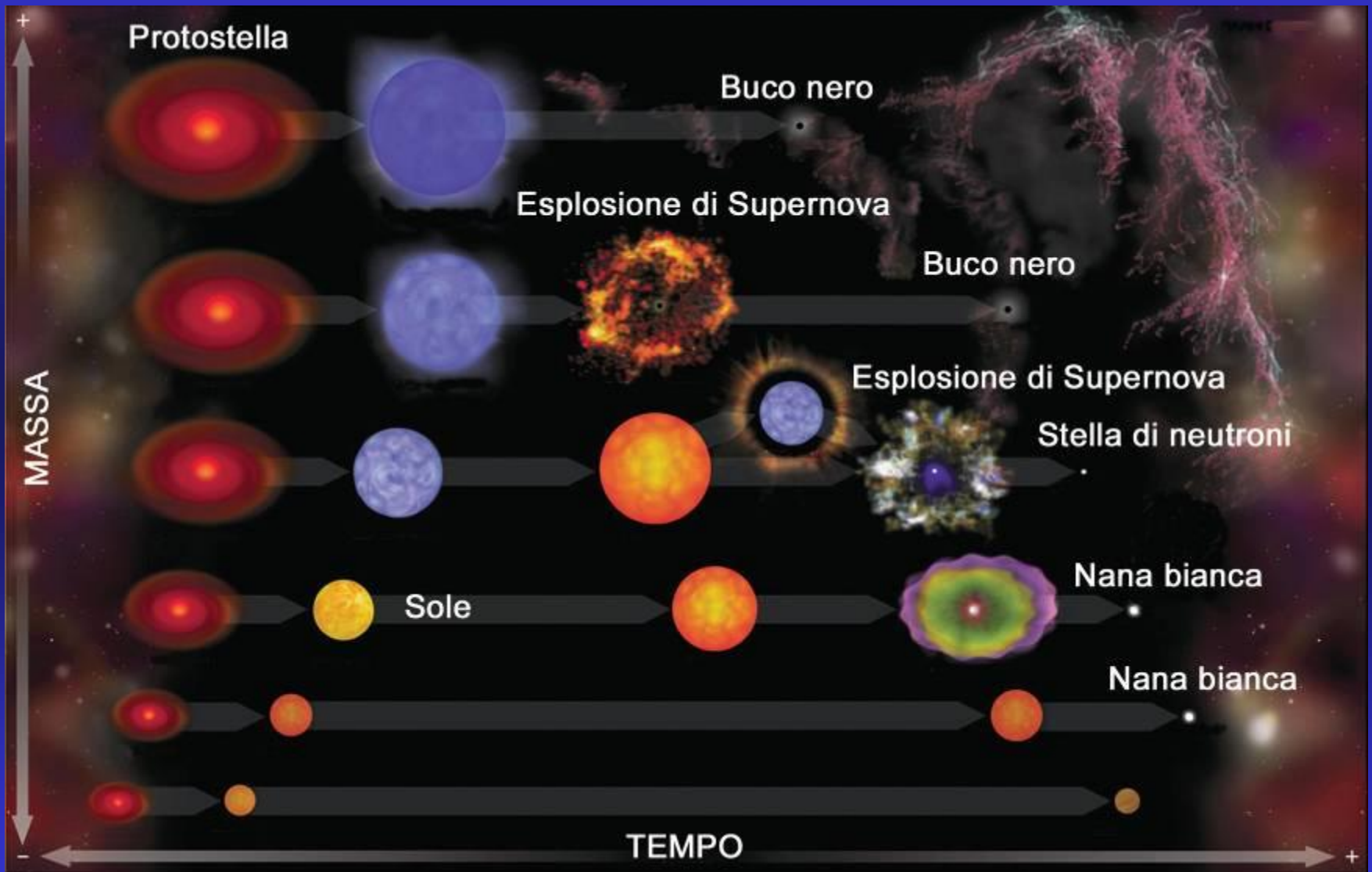
Il ruolo delle supernovae

Tutti gli elementi pesanti che si trovano nell'universo sono il prodotto di nucleosintesi nel corso di eventi di supernova



Probabilmente in passato gli eventi di supernova devono essere stati molto frequenti (Star bursts in galassie giovani)

Il ciclo di formazione stellare



Evoluzione chimica

- L'evoluzione chimica dell'Universo è dovuta alla nucleosintesi stellare
- Le supernovae determinano una ridistribuzione nello spazio del materiale processato negli interni stellari
- Successive popolazioni di stelle si formano quando questo materiale si aggrega in nubi. Esse sono più ricche di elementi pesanti

Buchi neri-proprietà

Classe	Dimensioni	Massa
Buco Nero supermassiccio	$\sim 0,001-10 \text{ UA}$	$\sim 10^5-10^9 M_{\odot}$
Buco Nero intermedio	$\sim 10^3 \text{ km} = R_{\text{terra}}$	$\sim 10^3 M_{\odot}$
Buco Nero Stellare	$\sim 30 \text{ km}$	$\sim 10 M_{\odot}$
Micro Buco Nero	Fino a $\sim 0,1 \text{ mm}$	Fino a $\sim M_{\text{Luna}}$

Raggio di Schwarschild

$$R_{\text{sh}} = 2GM/c^2 \sim 2,95 M/M_{\odot} \text{ in km}$$

Stelle degeneri e buchi neri

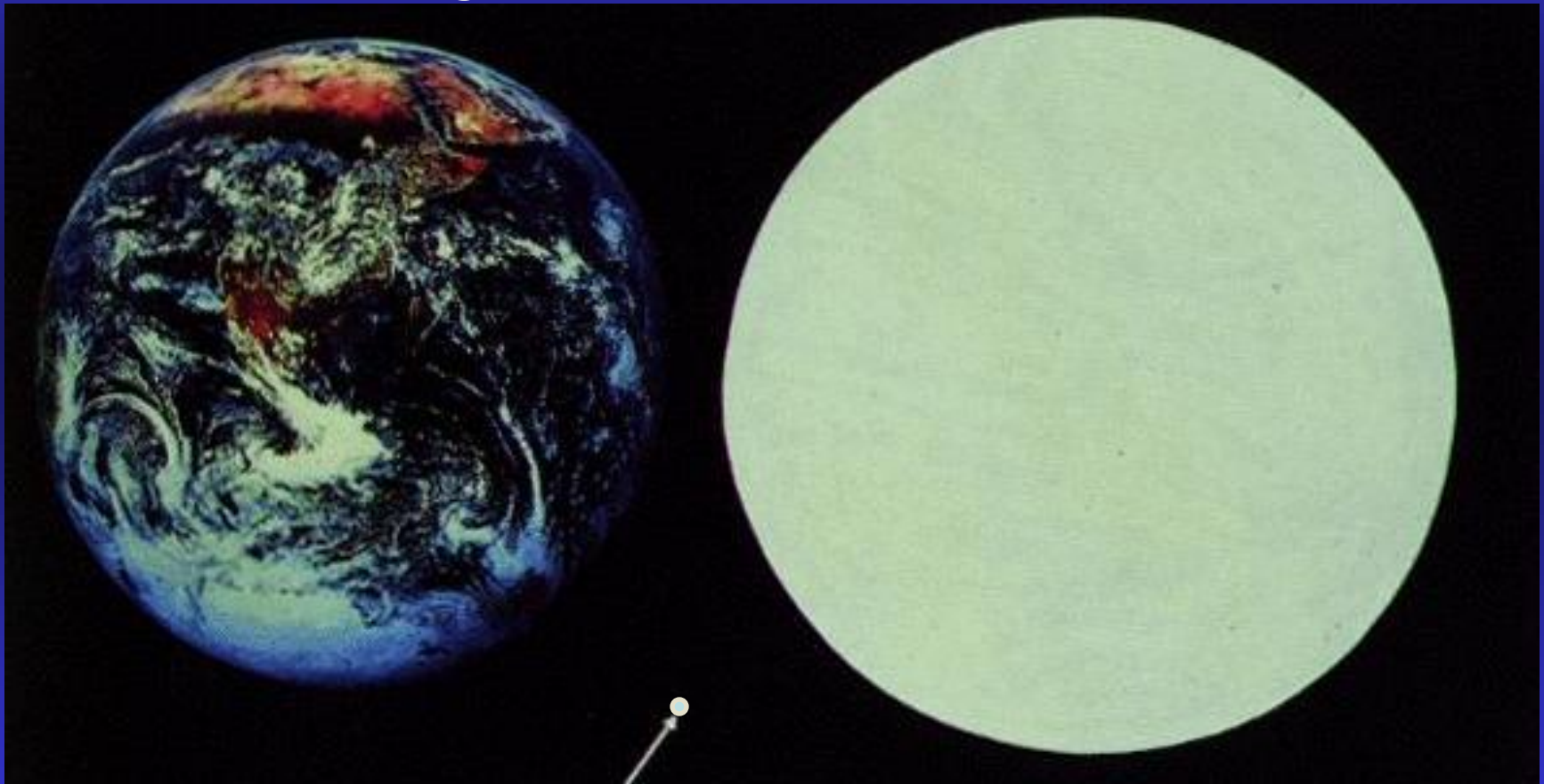
Oggetti collassati: Nane Bianche e stelle di neutroni

Terra

Densità: $5,4 \text{ gr/cm}^3$

Nana Bianca

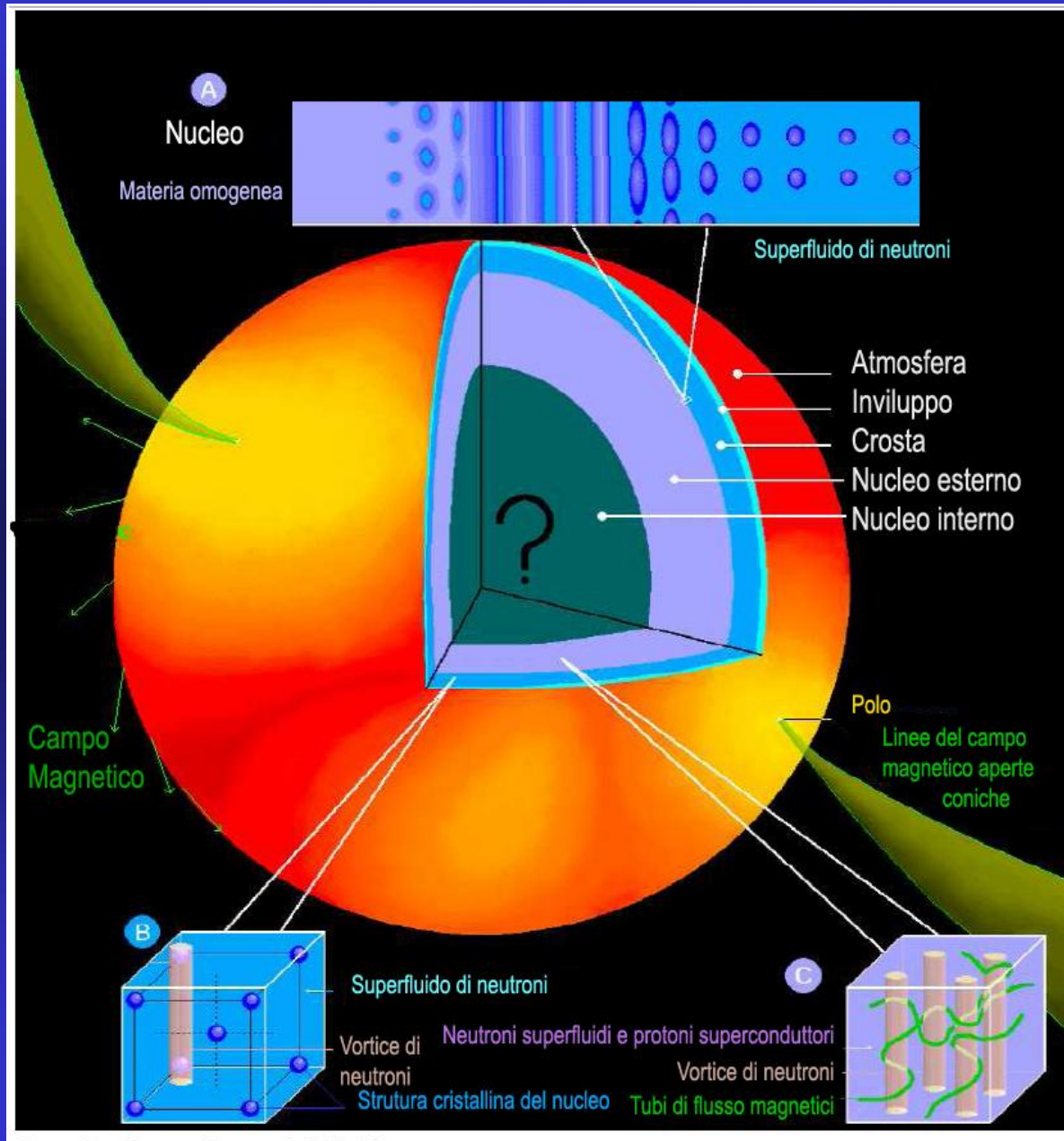
Densità: 10^6 gr/cm^3



Stella di Neutroni

Densità: 10^{15} gr/cm^3

Stelle di neutroni-struttura interna

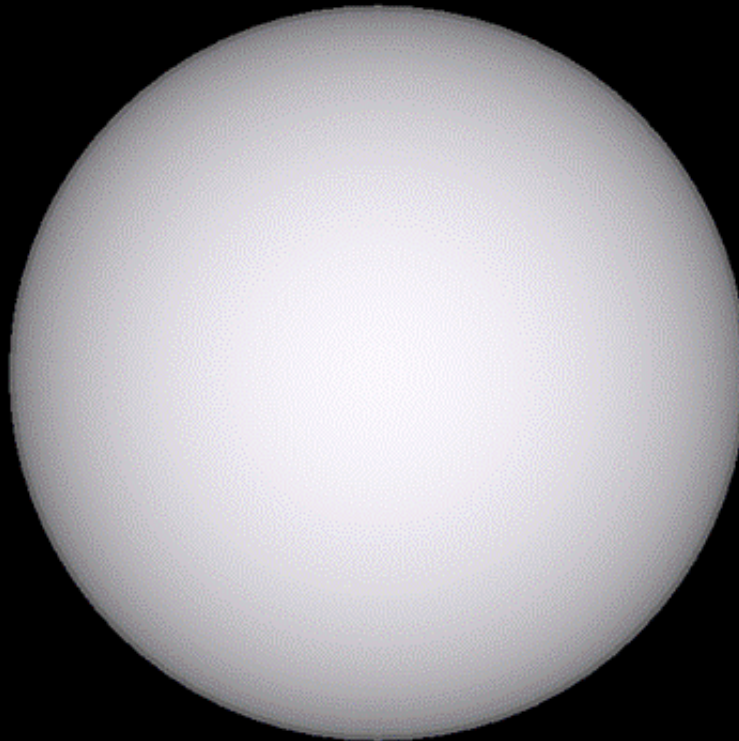


Stelle di neutroni e buchi neri



Manhattan

(spaceimaging.com)

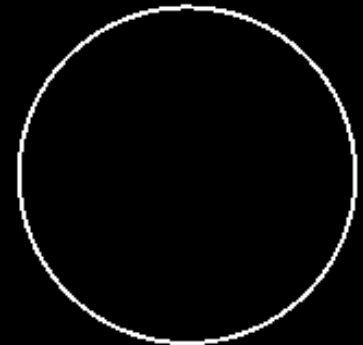


Stella di Neutroni

$M=1.5 M_{\odot}$

$R=10 \text{ km}$

Densità: 10^{15} gr/cm^3



Buco Nero

$M=1.5 M_{\odot}$

$R=4.5 \text{ km}$

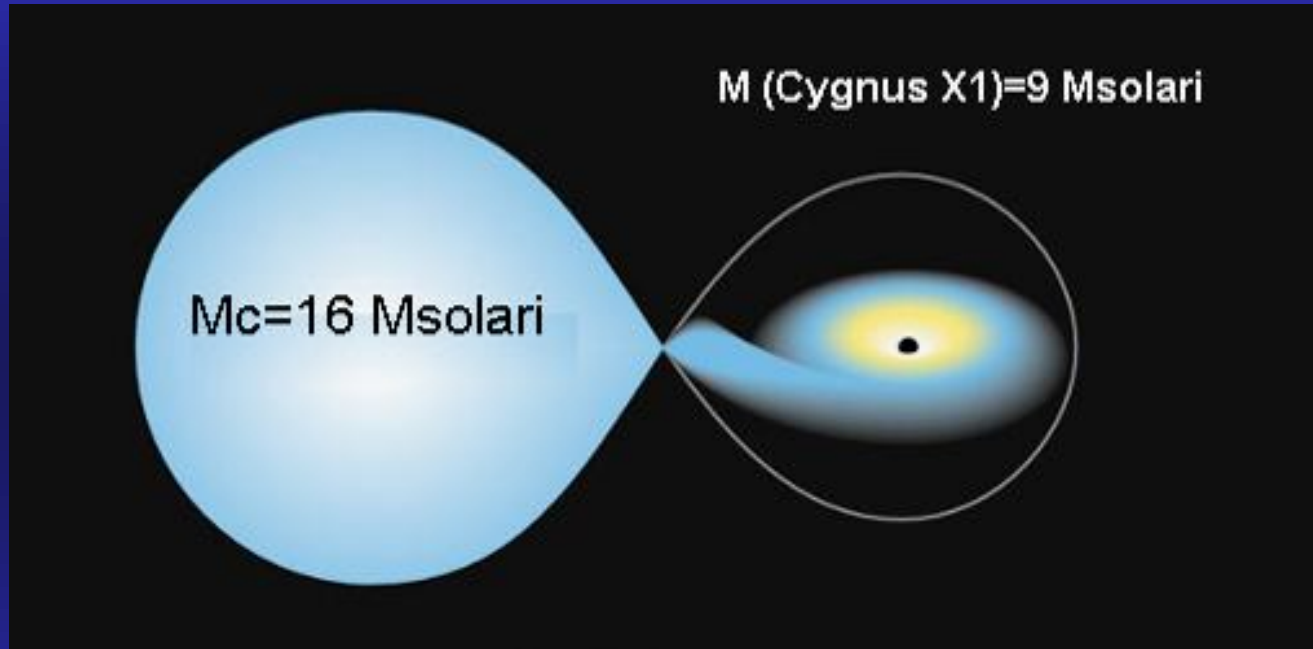
I buchi neri interagiscono con l'ambiente

I buchi neri si manifestano indirettamente attraverso gli effetti indotti sull'ambiente che li circonda dalla loro estrema gravità.

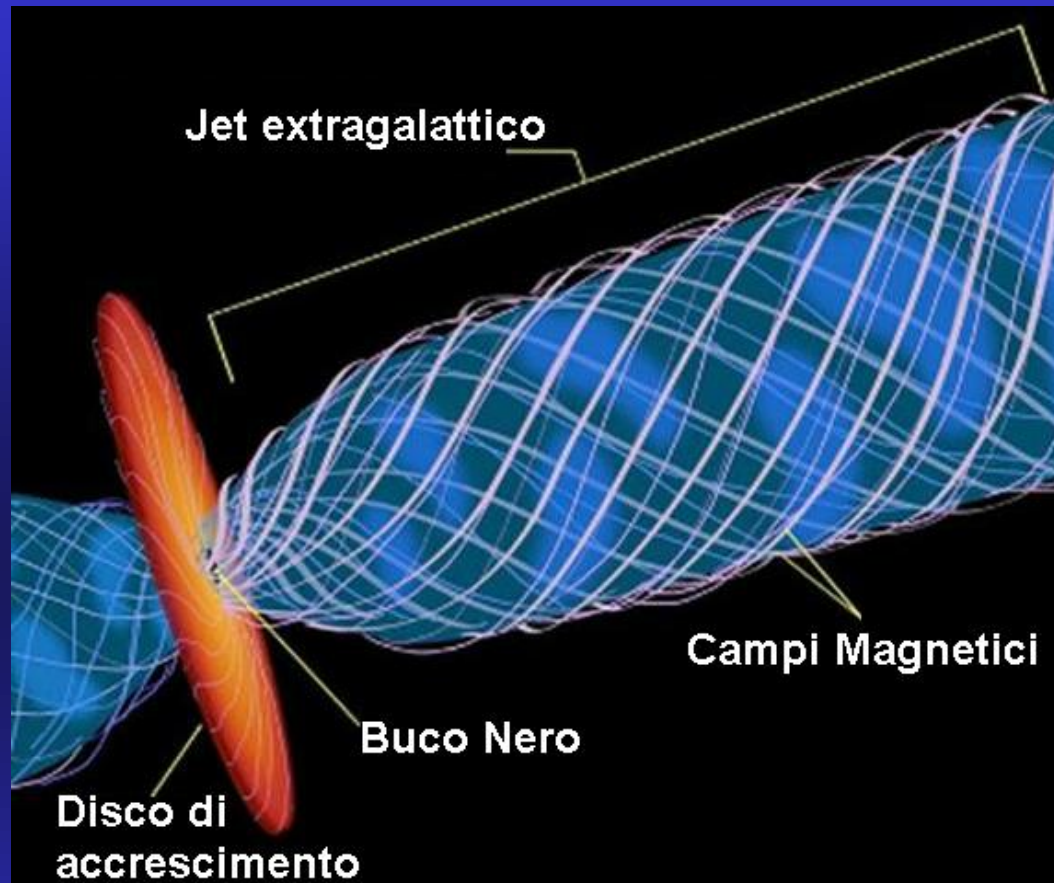
L'accrescimento di gas porta a un'intensa emissione di radiazione vicino al buco nero.

Cygnus X-1-un Buco Nero stellare

Sistema
binario a
8000
anni-luce
dalla
Terra



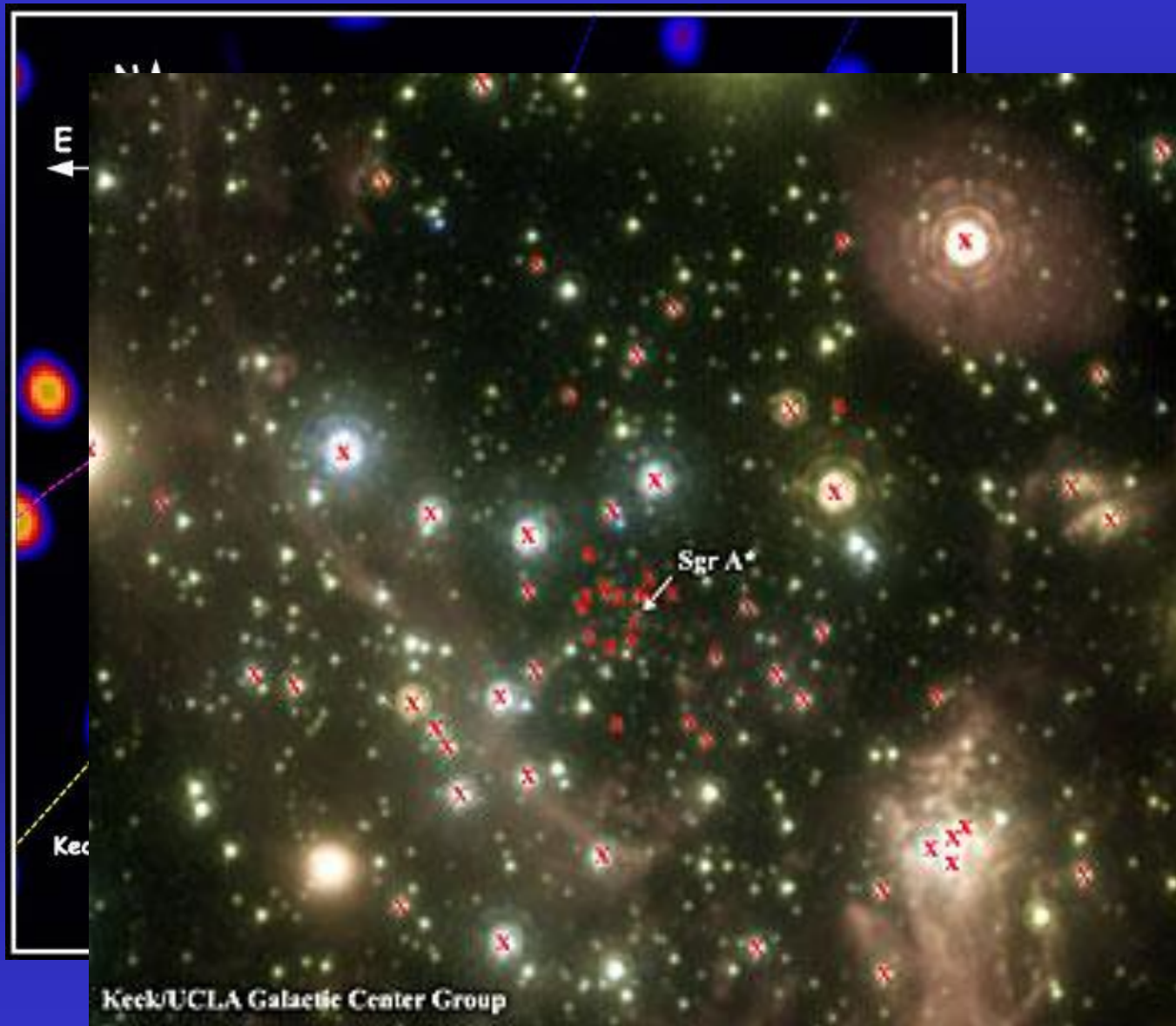
Buchi neri giganti-Nuclei di galassie attive



Il **disco di accrescimento** è gas molto caldo: avvicinandosi all'orizzonte del buco nero viene emessa radiazione sempre più energetica, fino all'X e al gamma.

I **getti** sono un plasma di particelle che procedono a velocità relativistiche.

Un buco nero al centro della Via Lattea



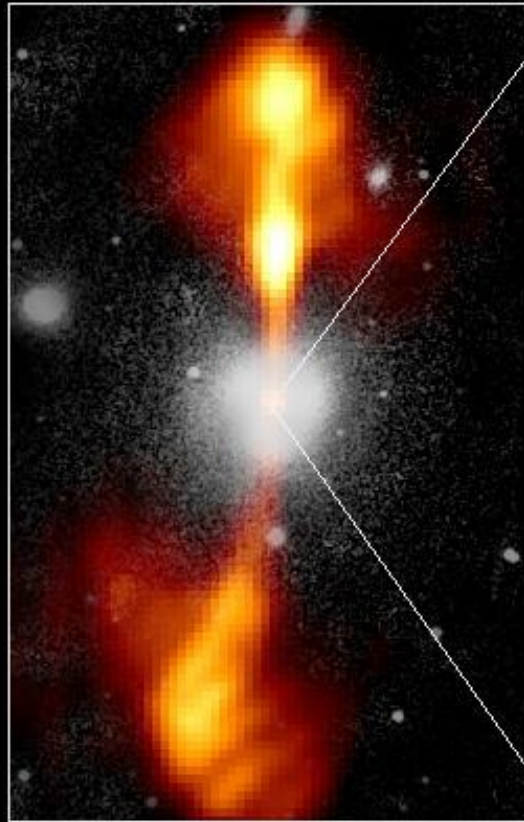
Al centro
della Via
Lattea
sembra
esserci un
buco nero
di 3,7
milioni di
masse
solare

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

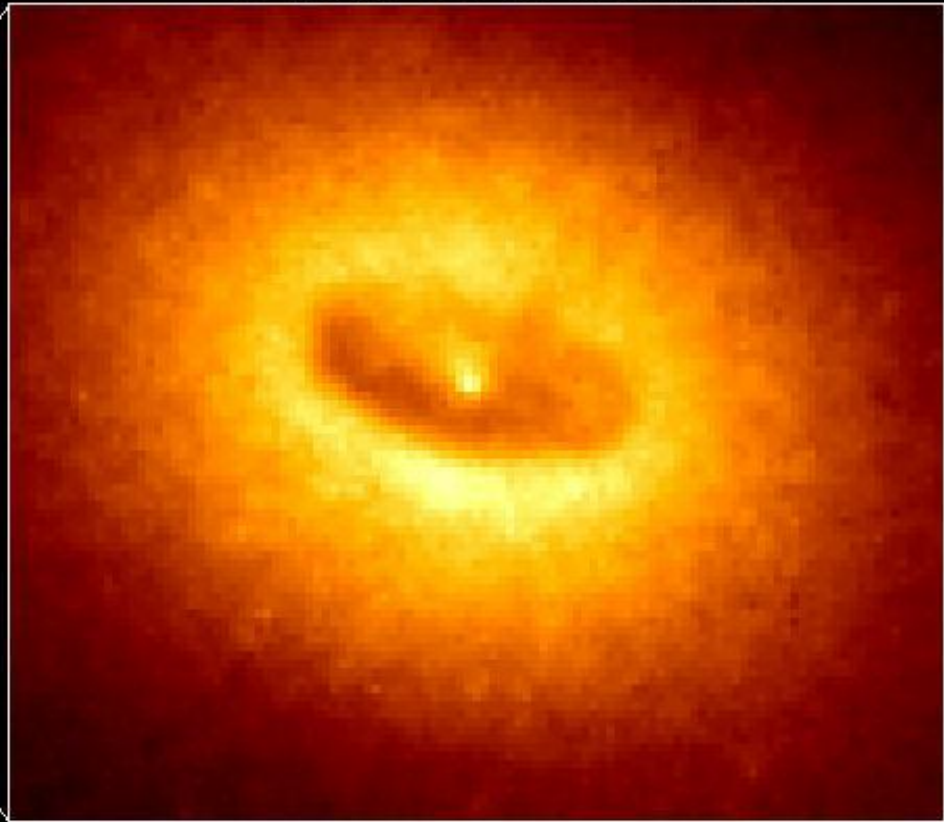
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



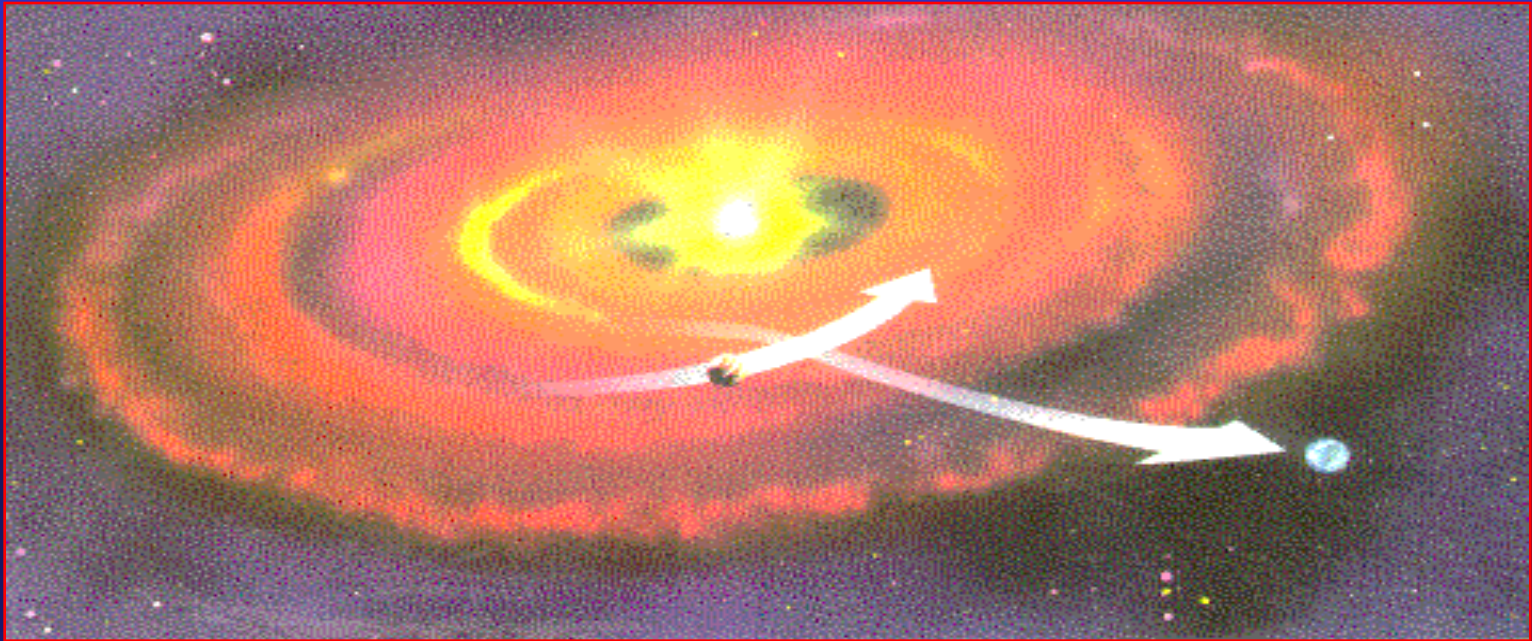
380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



1.7 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS

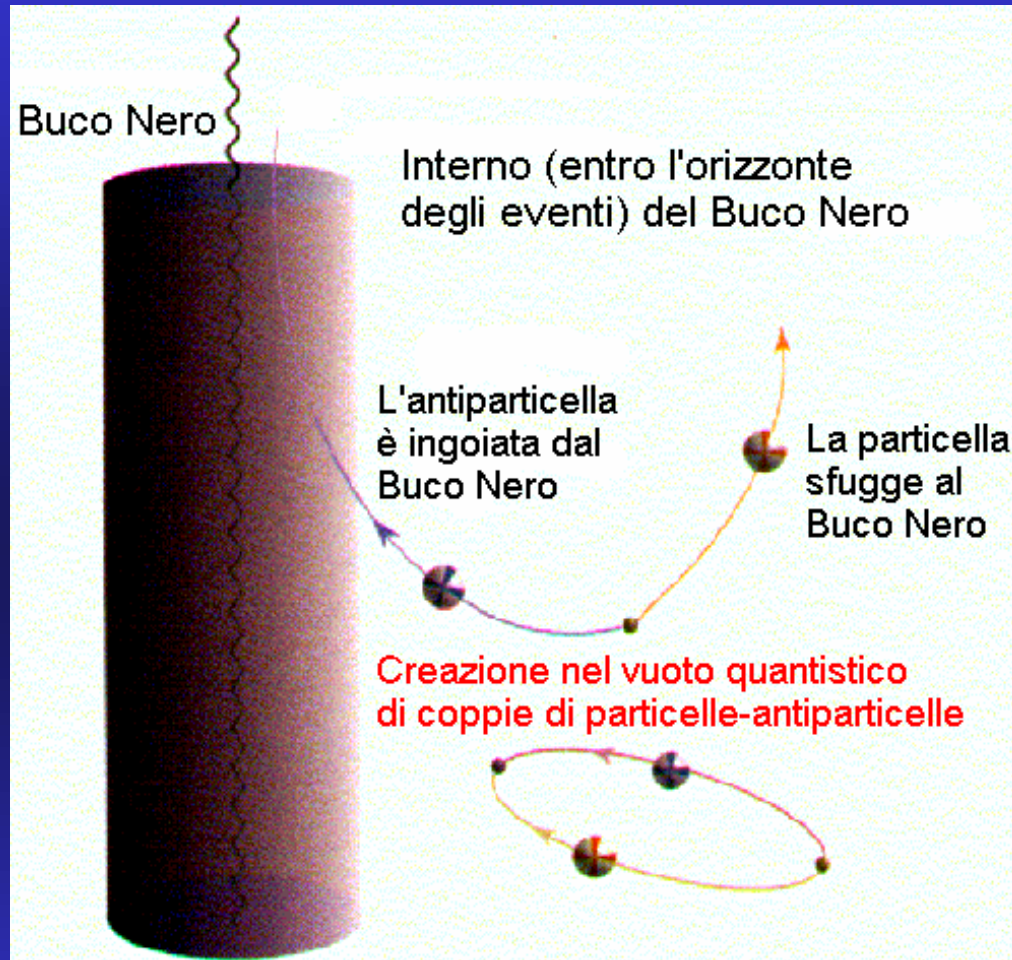
La fine della Galassia



A causa degli incontri ravvicinati, il 90% delle stelle sarà espulso dalla Galassia, e il restante 10% sarà inghiottito dal gigantesco buco nero centrale...

TEMPO CARATTERISTICO:
 10^{19} anni (10 miliardi di miliardi di anni)

I buchi neri evaporano (Hawking 1975)



La grande scoperta di
S. Hawking

Il primo e per ora
unico calcolo di
Gravità quantistica

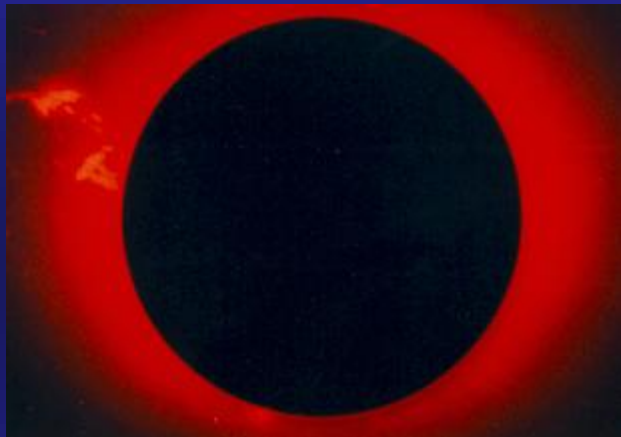
Gravità-quantum-
entropia

TEMPO CARATTERISTICO:

10^{64} anni per un buco nero con la massa del Sole.
 10^{98} anni per un buco nero galattico.

Sole

Il Sole nella
riga $H\alpha$



Distanza (km)	149 597 970 km ± 2
Massa (kg)	$1,989 \times 10^{30}$
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)	$3,86 \times 10^{26}$
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

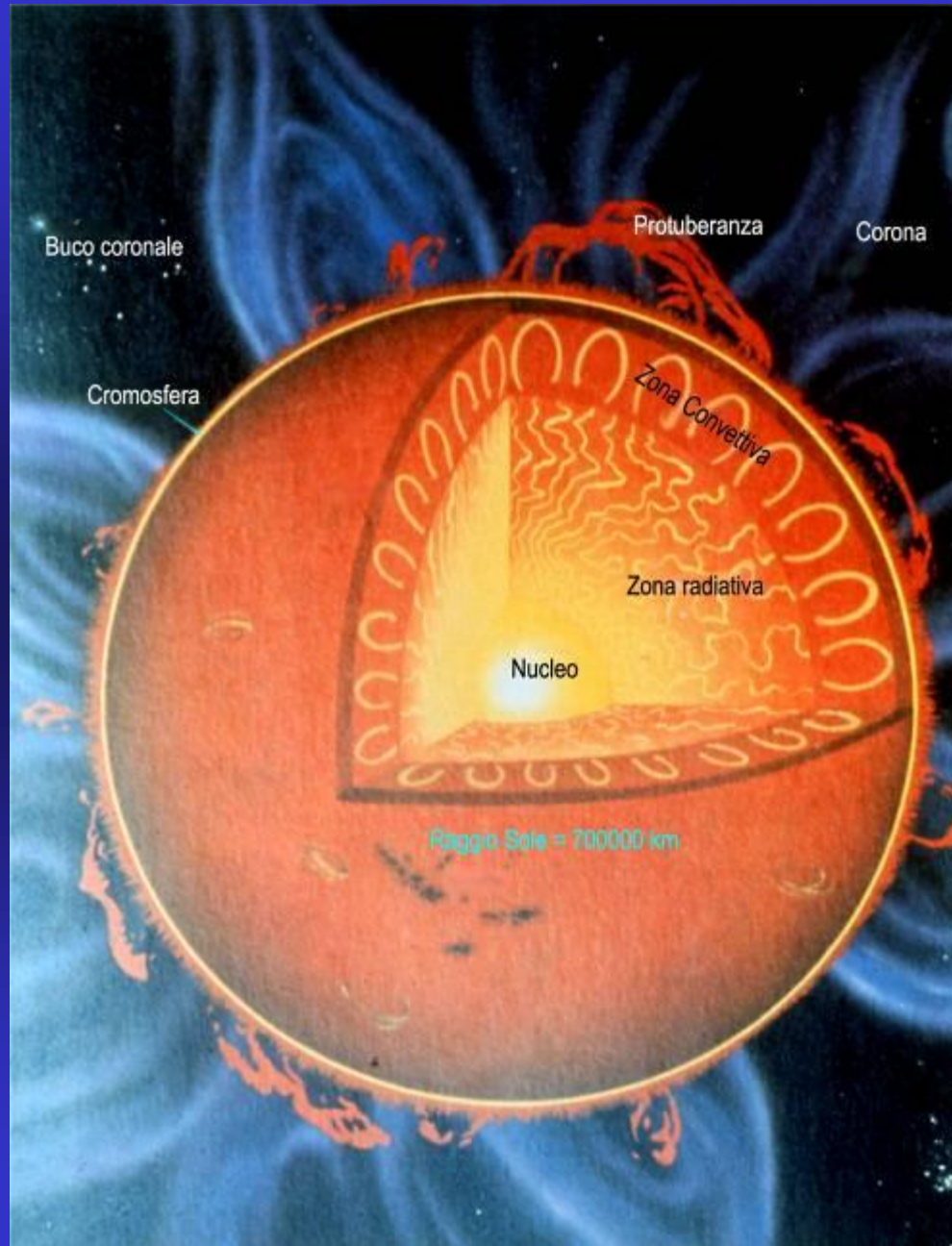
P = pressione, T = temperatura, ρ = densità, χ = opacità, r = raggio, M_r =massa al raggio r , L_r =luminosità al raggio r , γ = coefficiente adiabatico, c =velocità luce, $a=4\sigma/c$ con σ =costante di Stefan-Boltzmann- G =costante gravitazionale, ε =efficienza di produzione nucleare

Elementi critici nel calcolo di modelli stellari

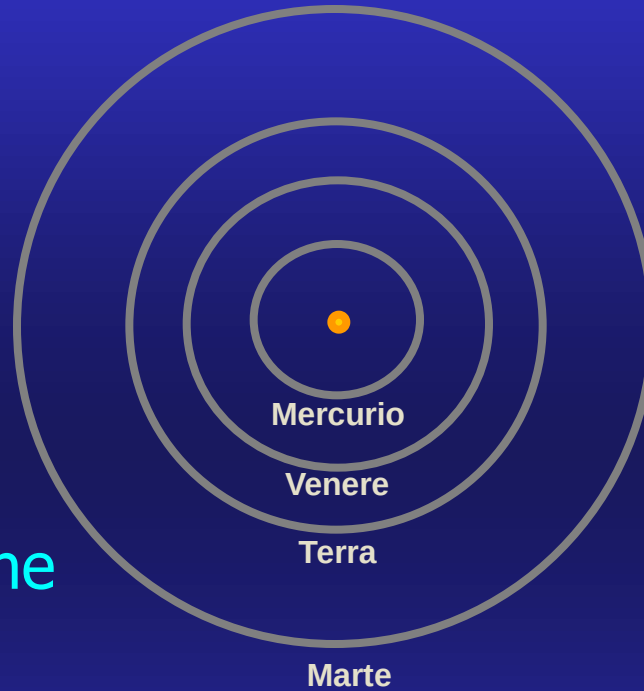
Le sequenze evolutive delle stelle sono state sviluppate in seguito alla determinazione delle energie di legame dei nucleoni ed allo sviluppo di calcolatori capaci di velocizzare le tecniche di soluzione numeriche applicate alle equazioni della fisica degli interni stellari

1. χ = opacità
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 importante 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 degenerare in elettroni o di neutroni (relativistico ed ultrarelativistico)

L'evoluzione del Sole



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

Età=4,55 Ga

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

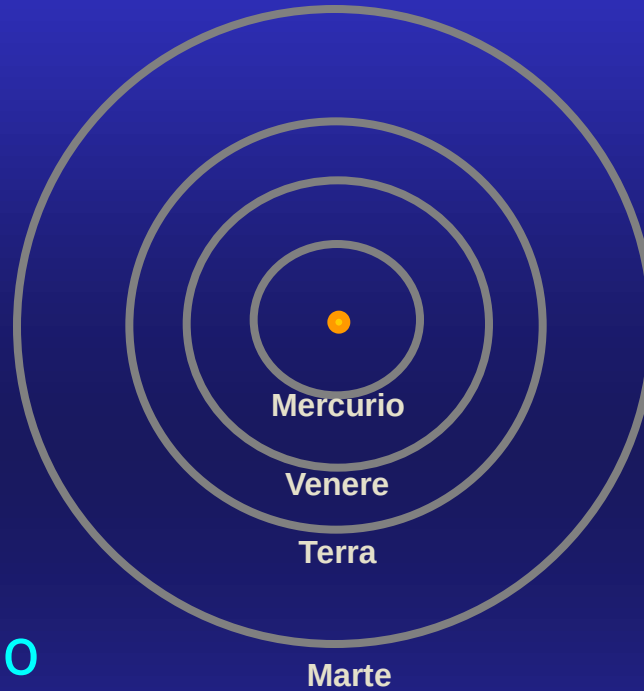
$R_{\odot} = 700\,000 \text{ km}$

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

$T_{\odot} = 5789 \text{ °K}$

NB Ga=giga-anni= 10^9 anni

Il Sole termina la fase di sequenza principale



Il Sole esaurisce l'idrogeno
nel nucleo

Età=10,9 Ga
 Δ Età=6,35 Ga
 $R = 1,58 R_{\odot}$
 $L = 2,2 L_{\odot}$

La fase di post-sequenza – Sole subgigante



Il Sole diviene una
subgigante

Età=11,6 Ga

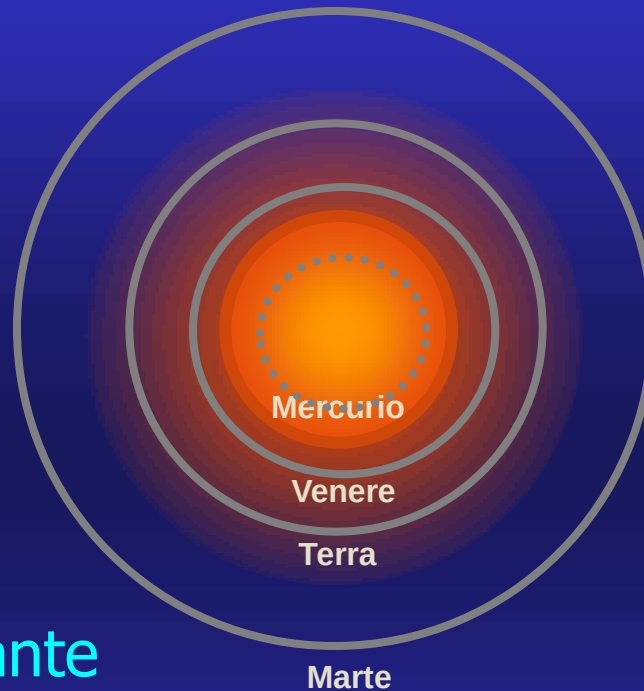
Δ Età=0,7 Ga

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 – Sole gigante rossa



Il Sole diviene una gigante
rossa

Età=12,233 Ga

Δ Età=0,63 Ga

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 – Sole brucia l'Elio



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

Inizio del flash dell'He

Età=12,234 Ga

Δ Età=0,001 Ga

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 Δ Età=0,11 Ga

R= da 9,5 a 18 $R_{\odot}$

L= da 41 a 110 $L_{\odot}$

T= da 4724 a 4450 °K

La fase di post-sequenza – Sole esaurisce l'Elio

Il Sole esaurisce
la combustione
dell'elio nel nucleo



Età=12,344 Ga

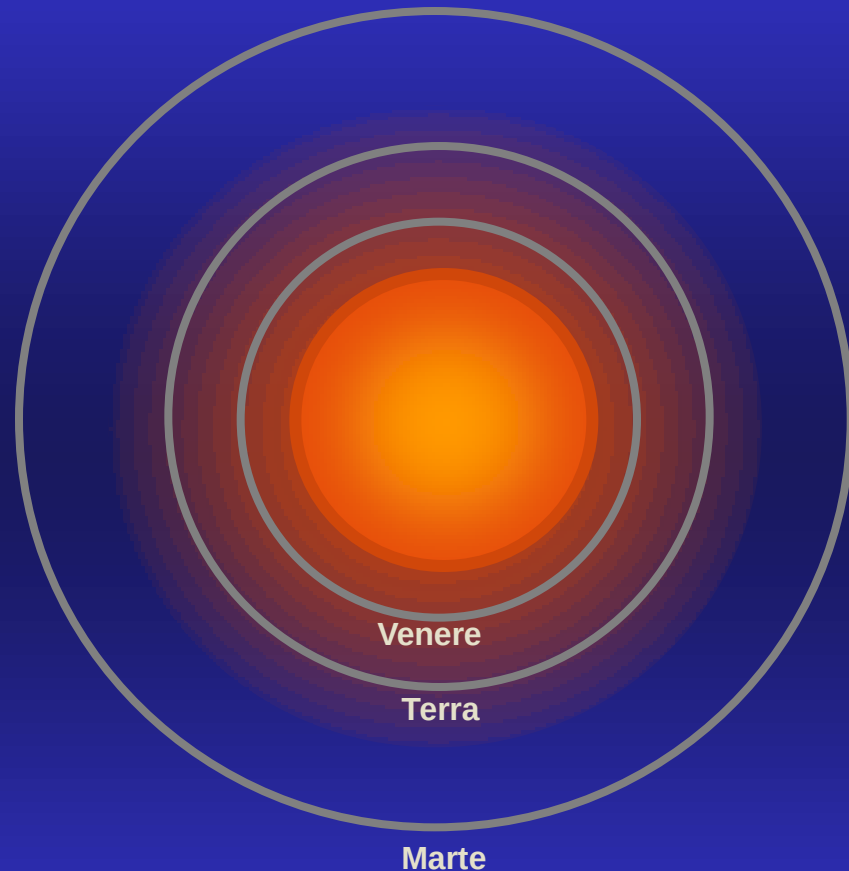
Δ Età=0,11 Ga

R= da 9,5 a 18 $R_{\odot}$

L= da 41 a 110 $L_{\odot}$

T= da 4724 a 4450 °K

La fase di post-sequenza – Sole gigante rossa

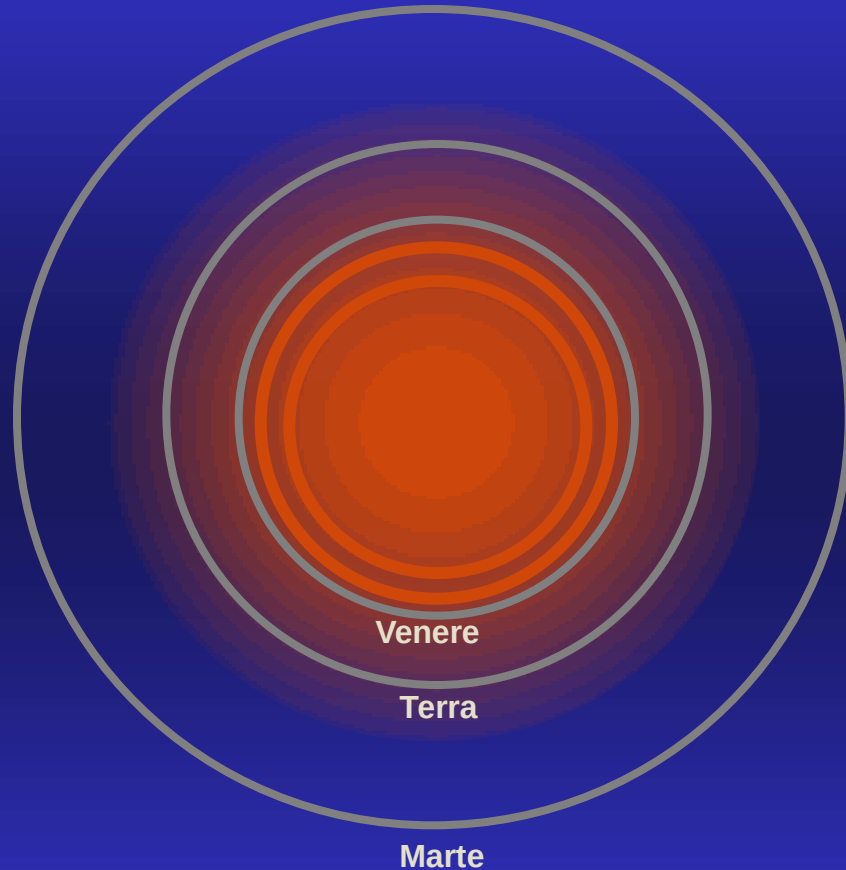


Il Sole diviene
per la seconda volta
una gigante rossa

Età=12,365 Ga
 Δ Età=0,021 Ga

La fase di post-sequenza – Sole pulsante

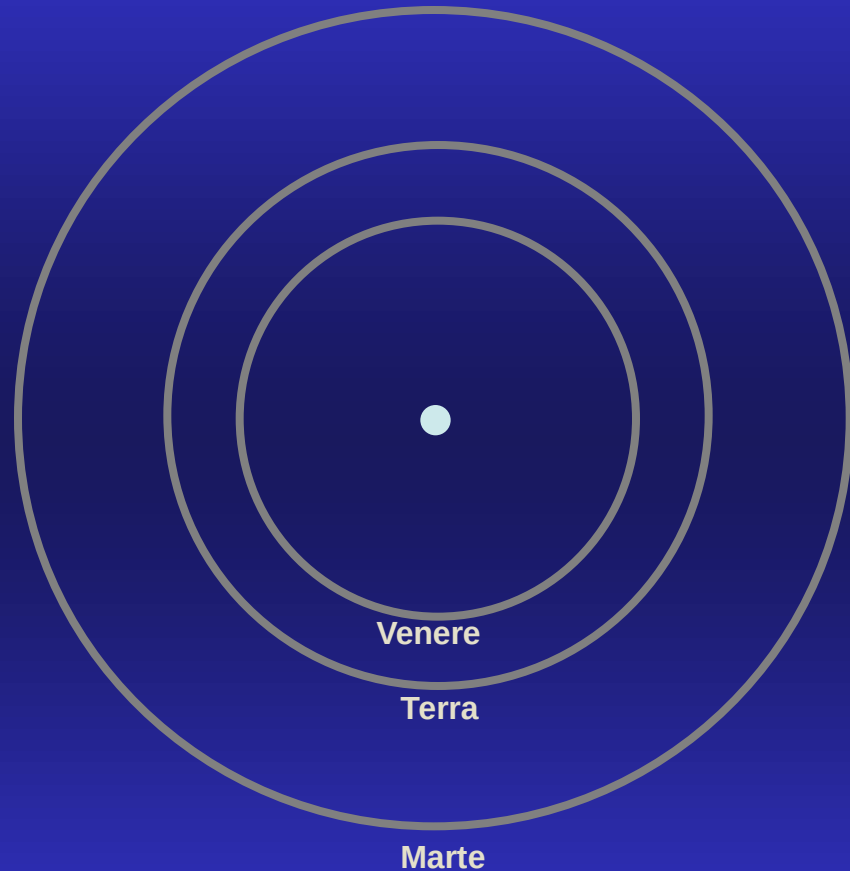
Il Sole pulsa
e diviene instabile



Età=12,366 Ga
 Δ Età=0,001 Ga

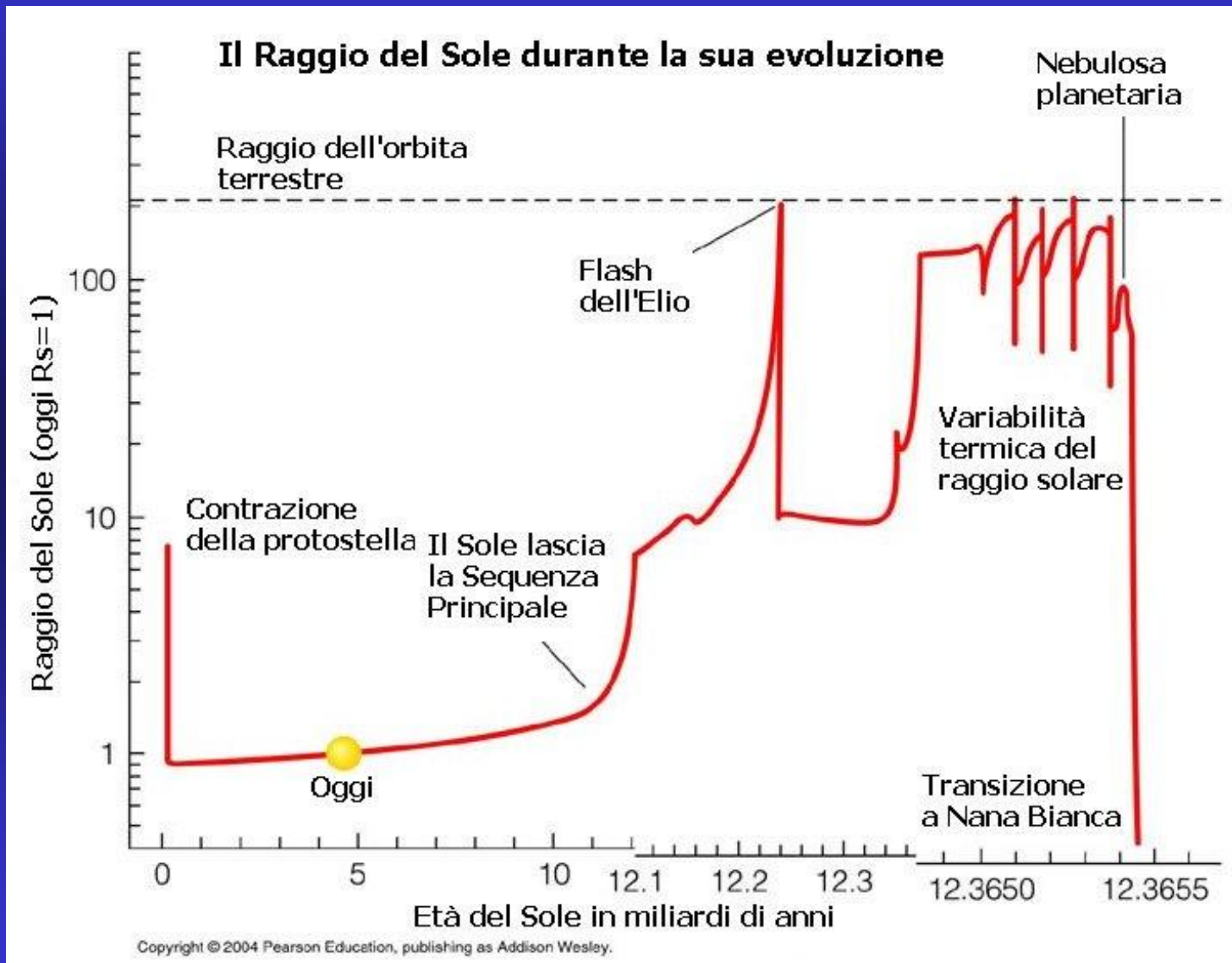
La fase di post-sequenza – Sole Nana Bianca

Il Sole diviene
una Nana Bianca

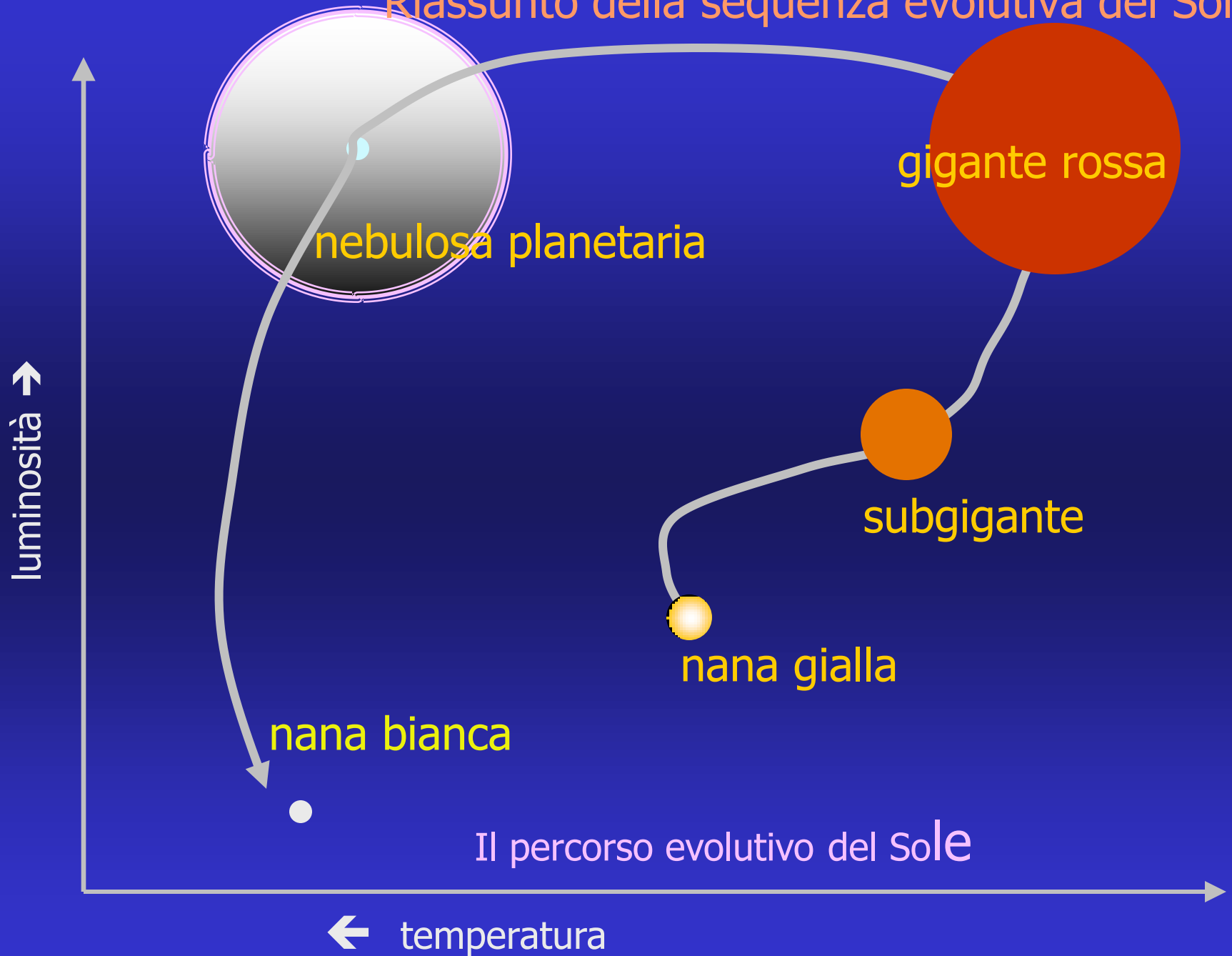


Età > 12,4 Ga
 $\Delta\text{Età} = 0,034$ Ga

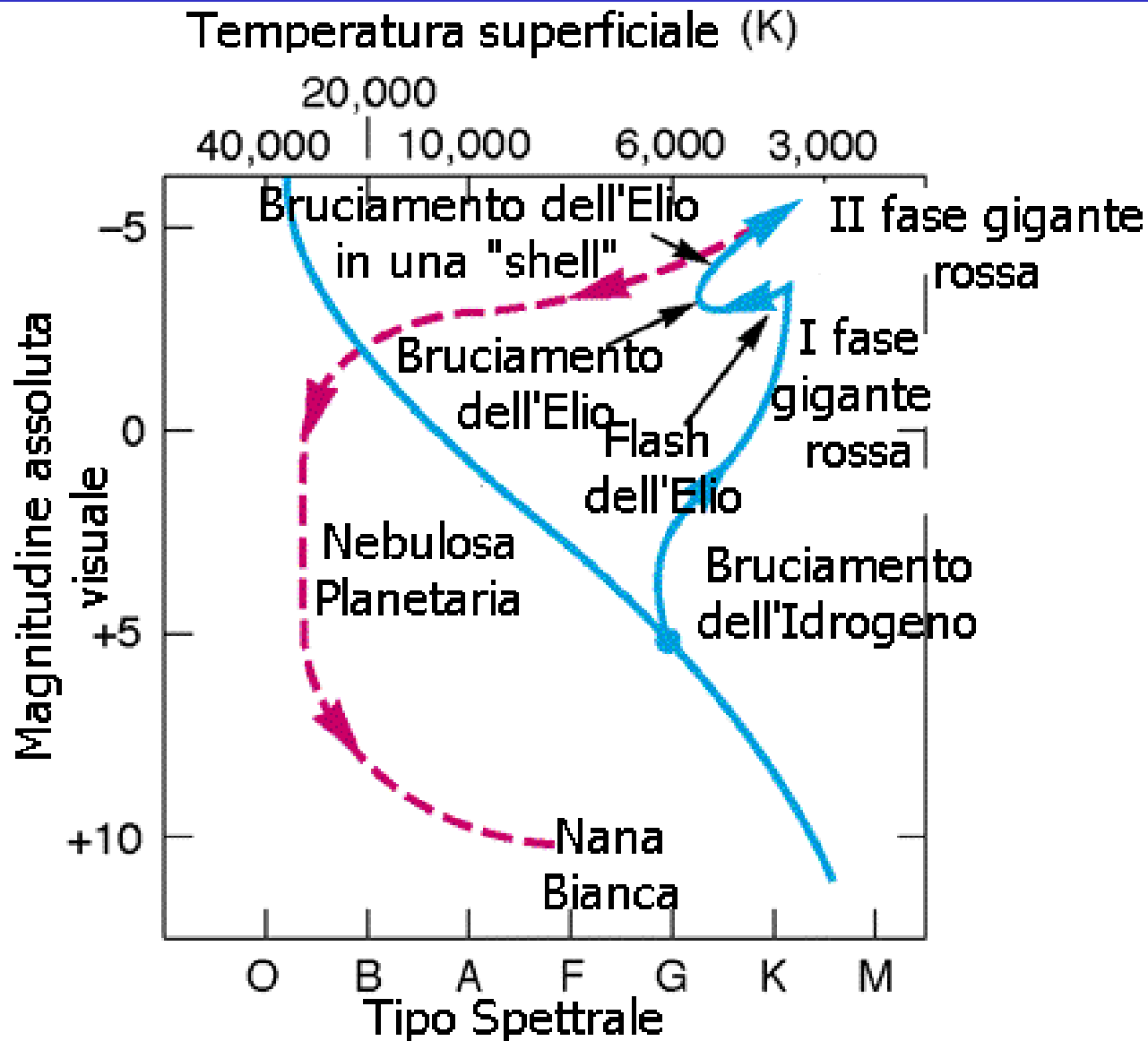
Variazione del Raggio del Sole



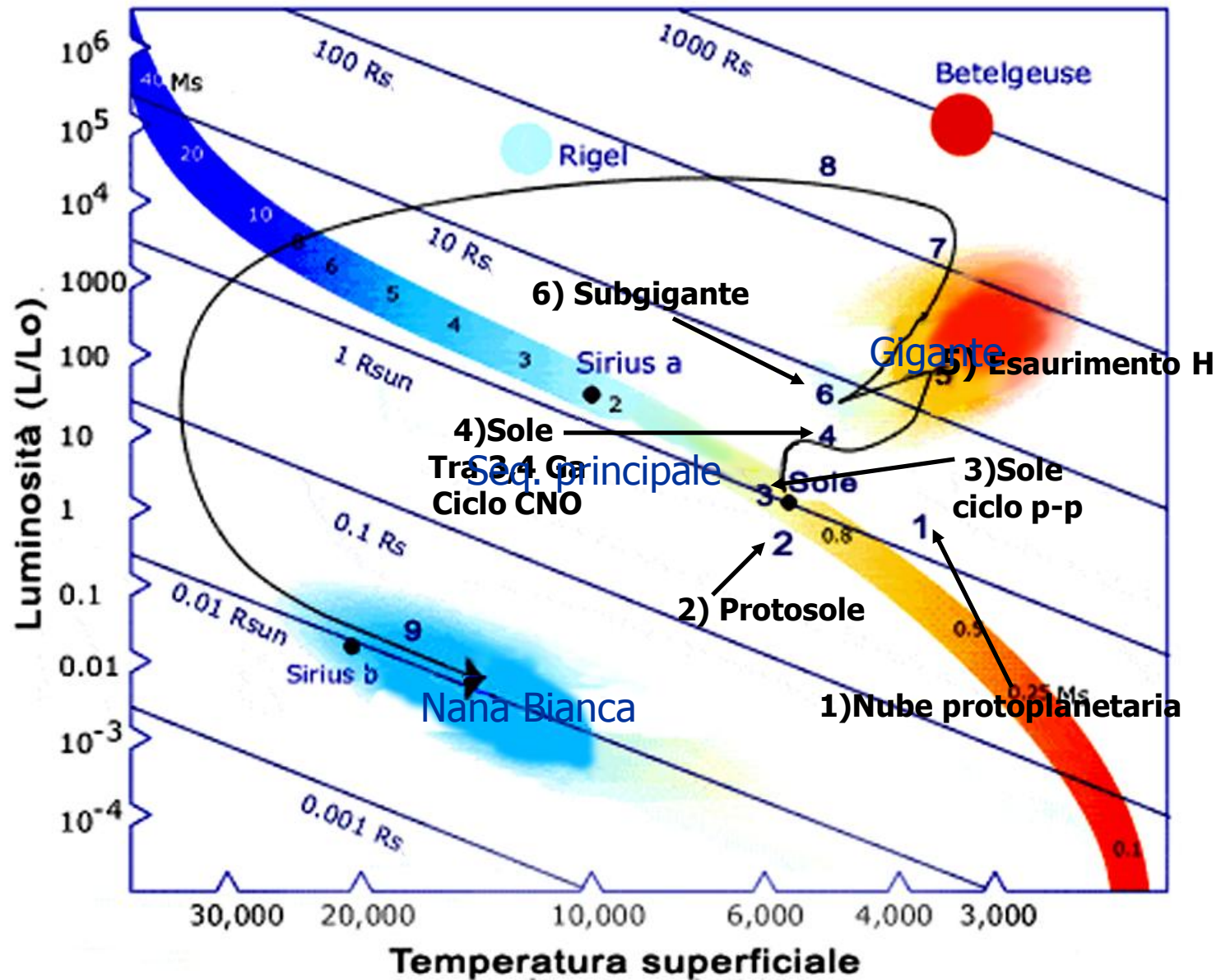
Riassunto della sequenza evolutiva del Sole



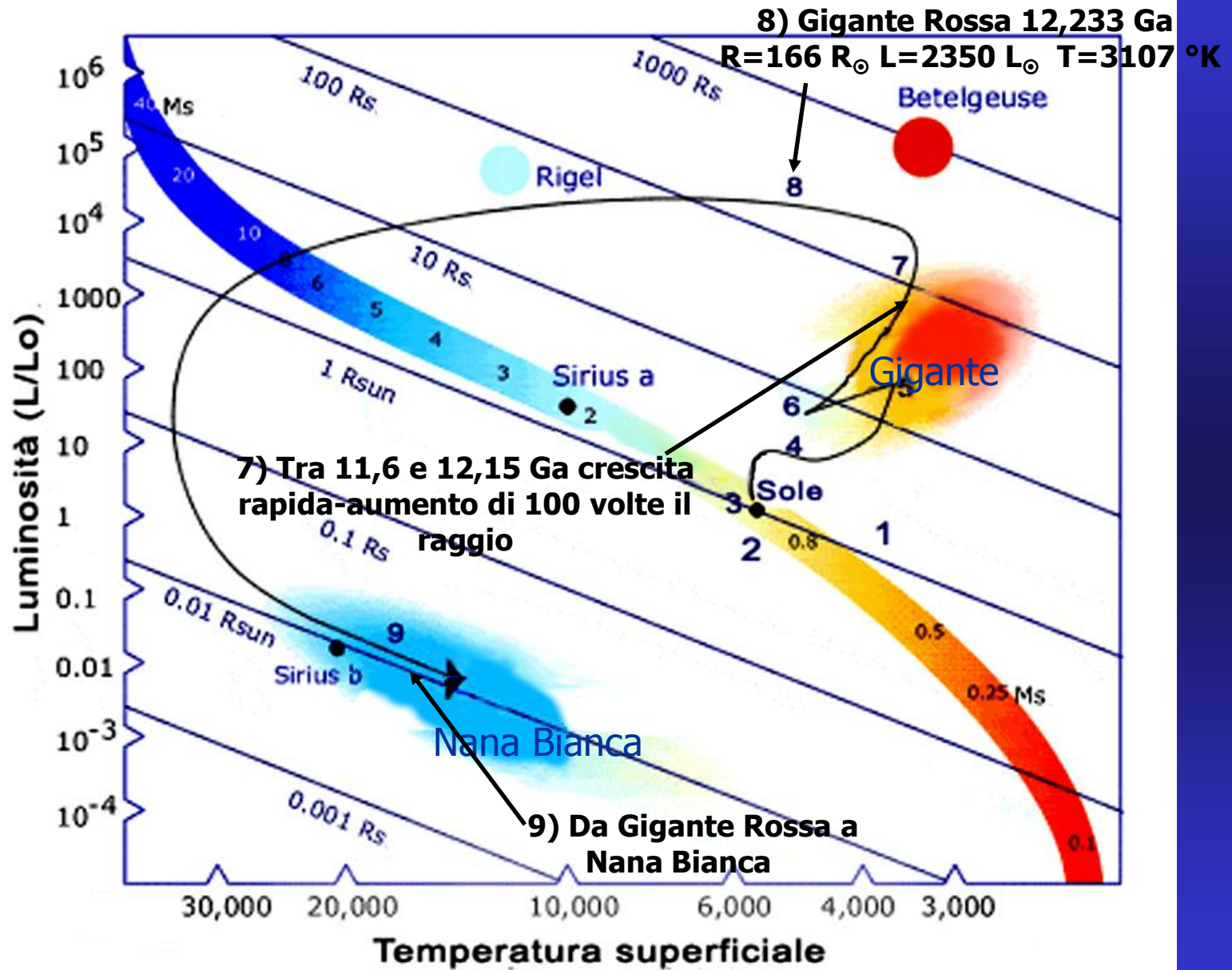
Evoluzione del Sole



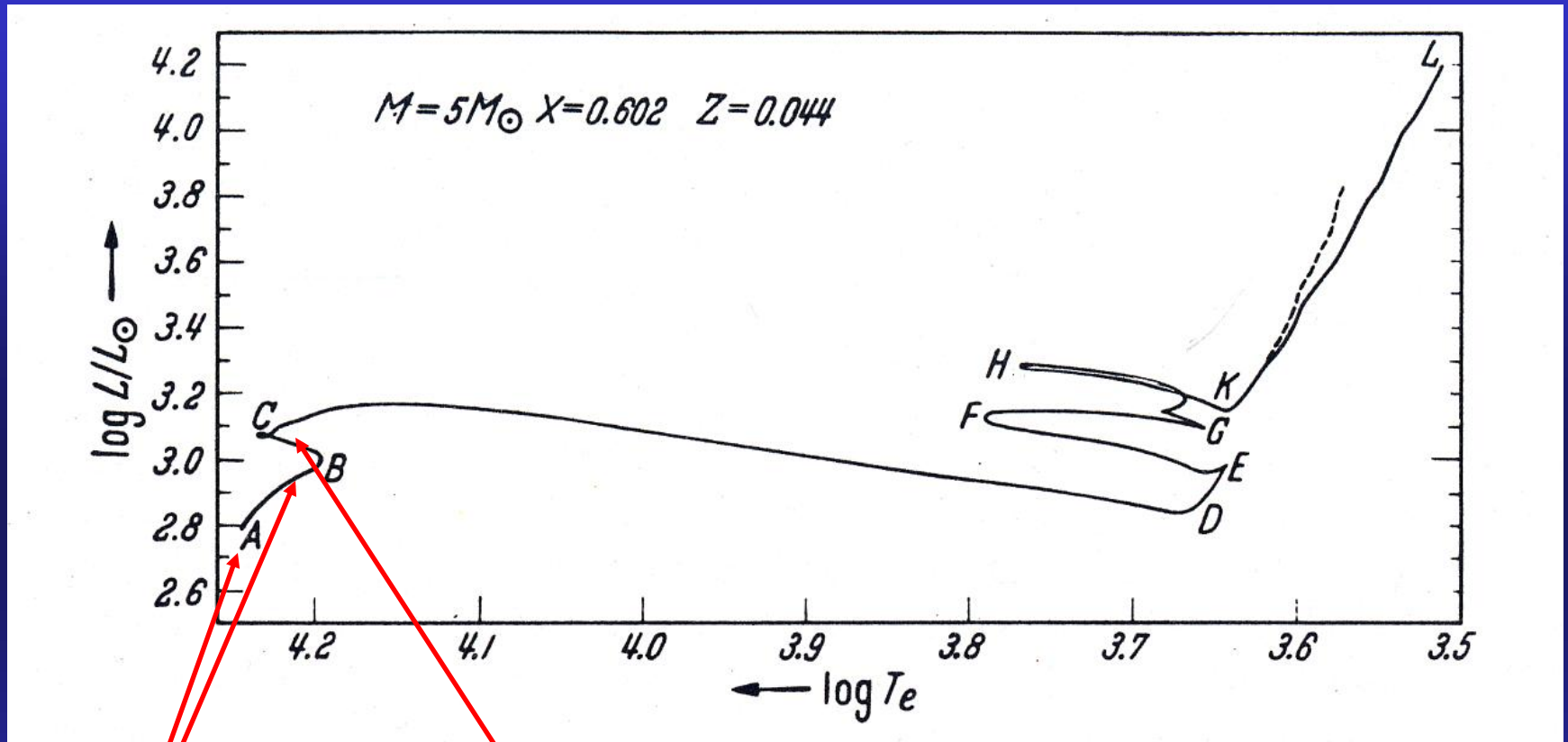
Evoluzione Sole I



Evoluzione Sole II



Evoluzione di una stella di 5 masse solari (I)

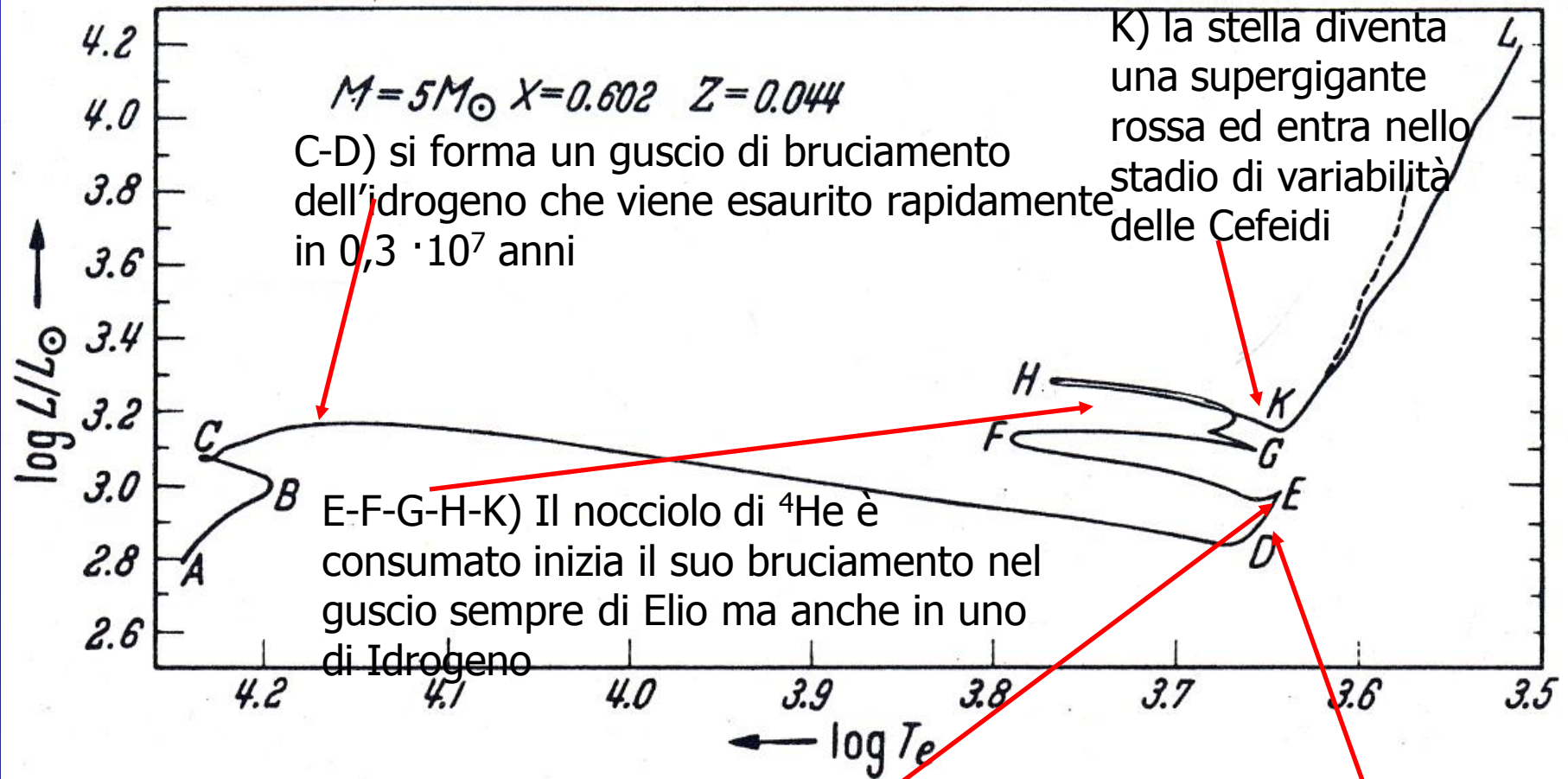


A) $T = 17500 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $R = 2,58 R_{\odot}$ $M_{\text{bol}} = -2,24$ $T_c = 26,4 \cdot 10^6 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $P_c = 5,5 \cdot 10^{10} \text{ atm}$

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 $5,6 \cdot 10^7$ anni

Evoluzione di una stella di 5 masse solari (II)



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

D-E) Fase di Gigante Rossa