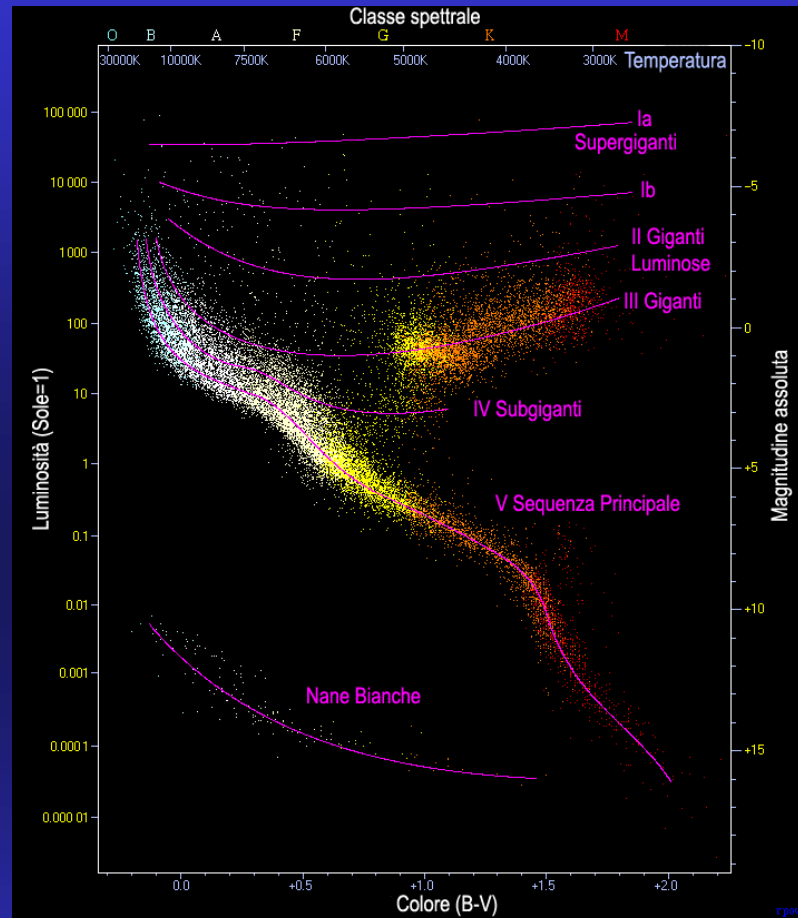


Evoluzione stellare



20 Aprile 2018 Primo Levi

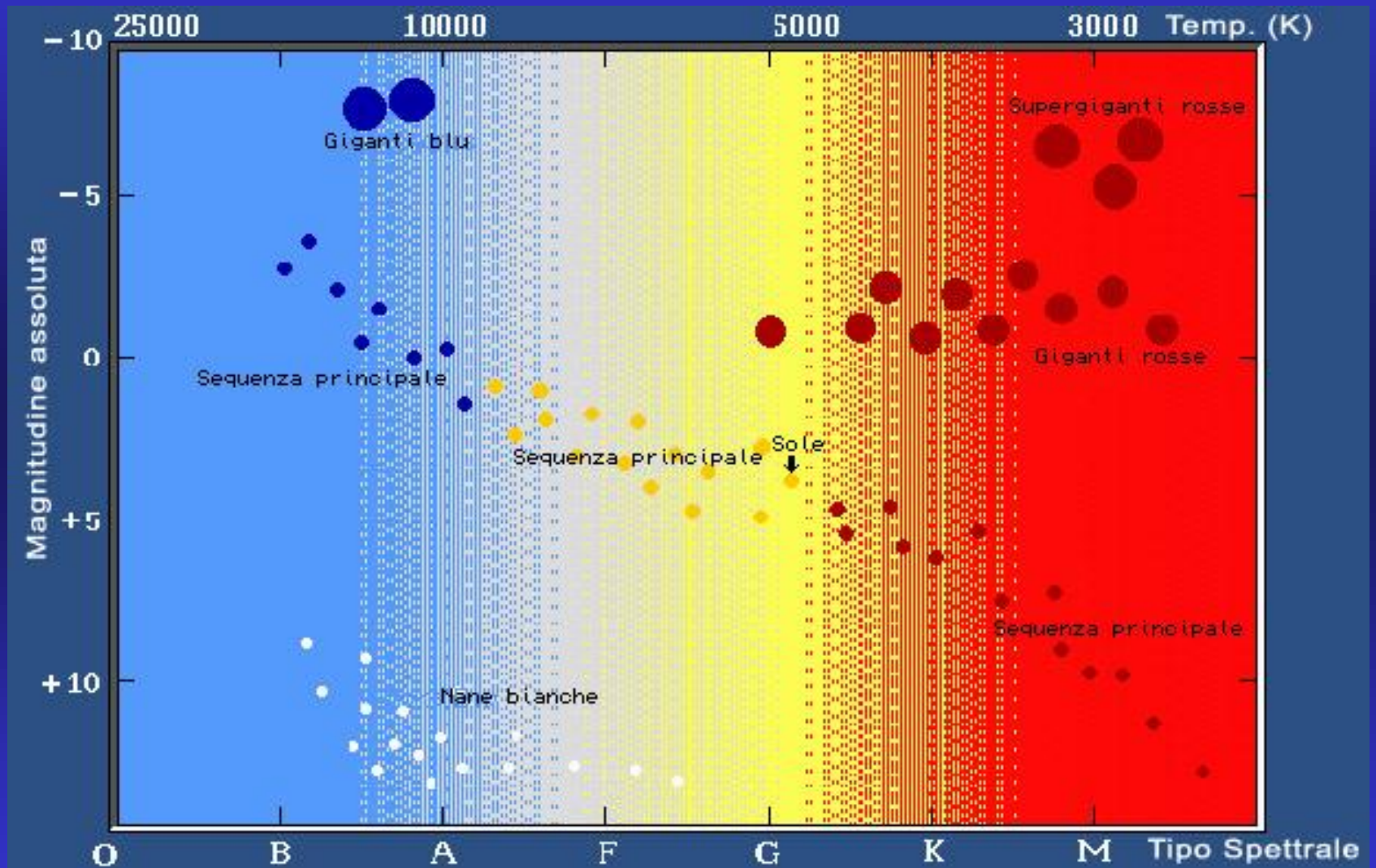
Roberto Bedogni

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

Email :roberto.bedogni@oabo.inaf.it

Evoluzione in ammassi stellari

Il diagramma HR: Hertzsprung-Russell



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?

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

Gli ammassi stellari.

Gli ammassi stellari



Westerlund 2

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.

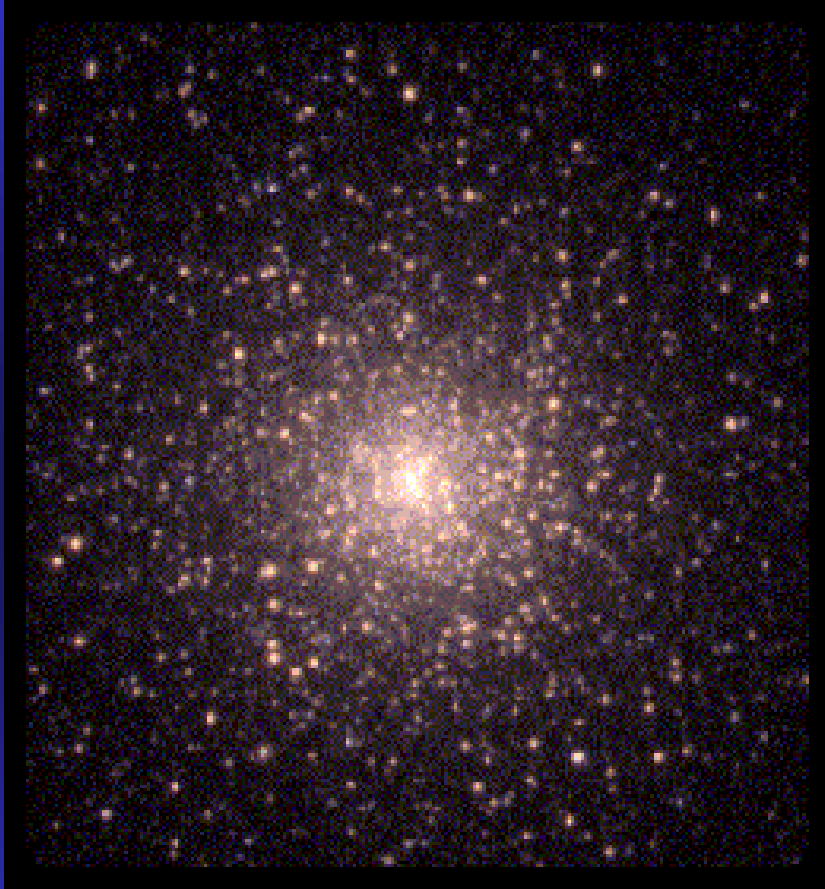
Ci sono due tipi di ammassi nella nostra galassia:

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

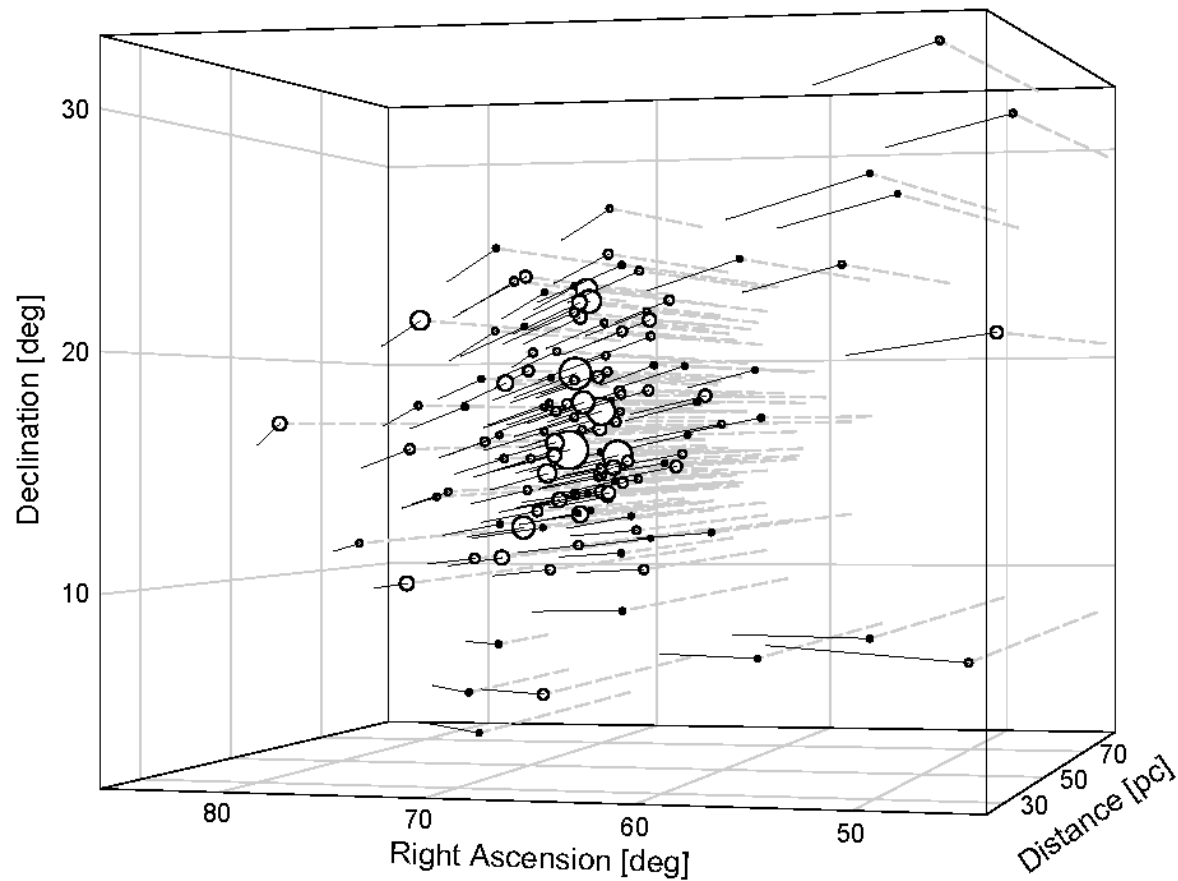
Gli ammassi aperti



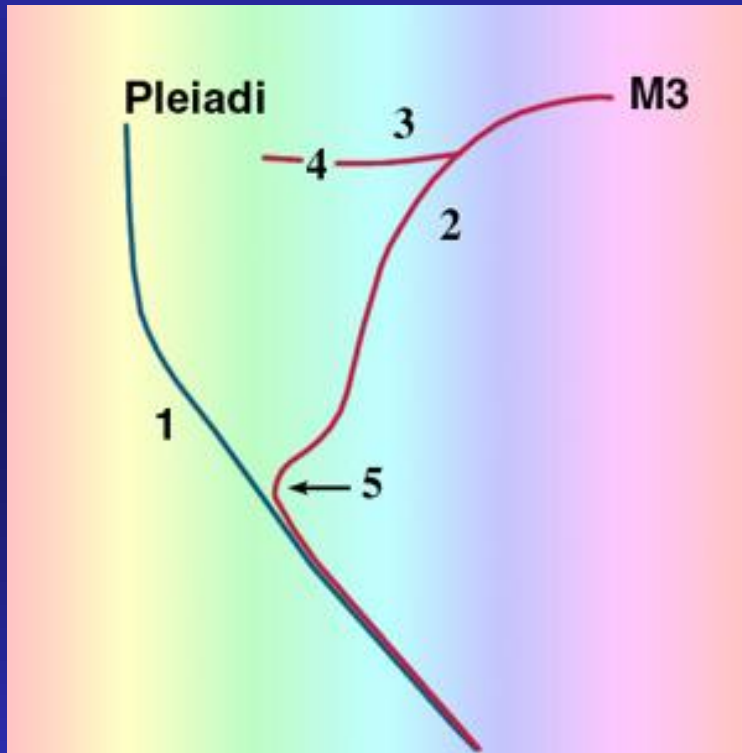
Ammasso aperto delle Pleiadi

- ✓ 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

L'ammasso aperto delle Iadi

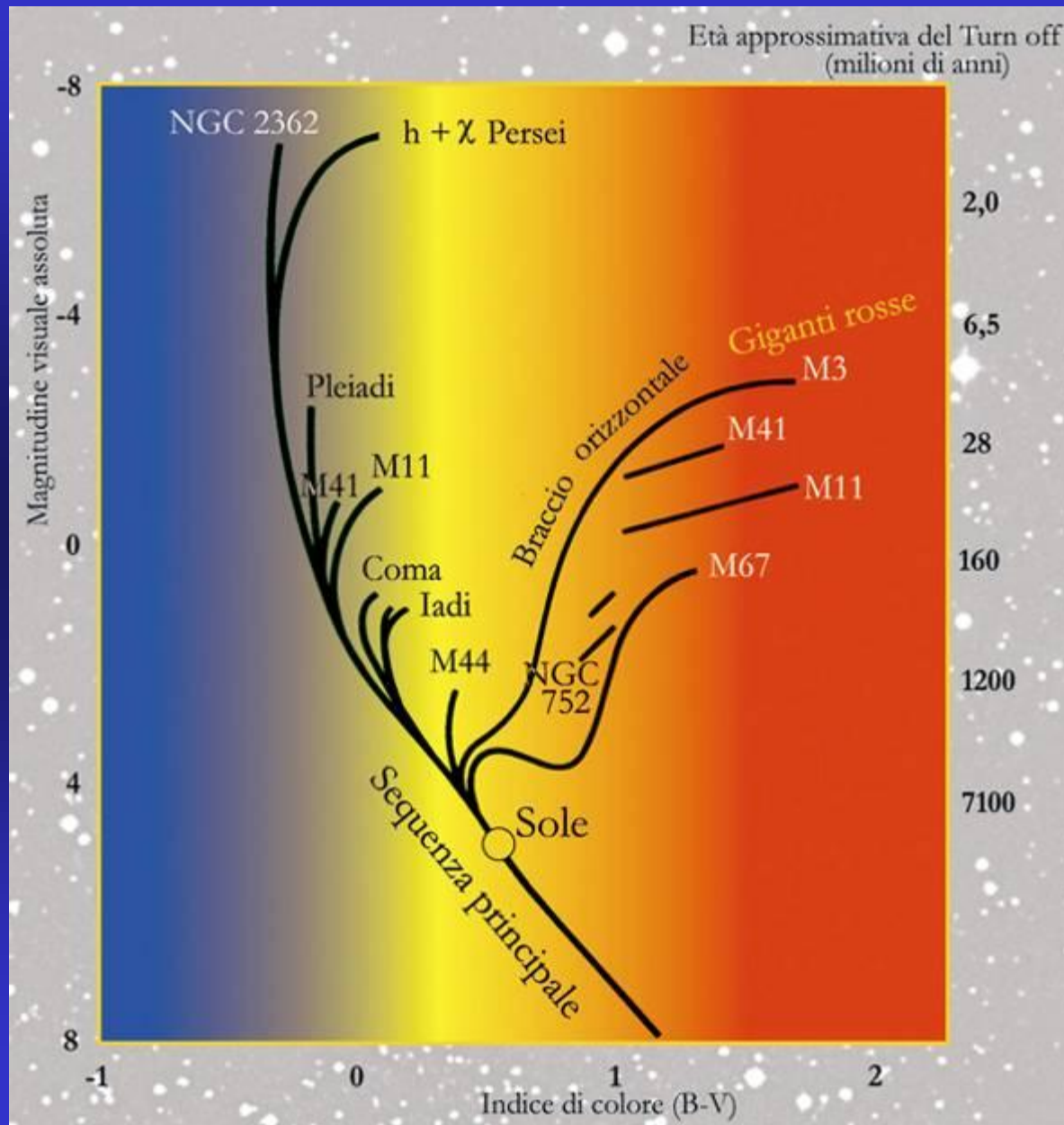


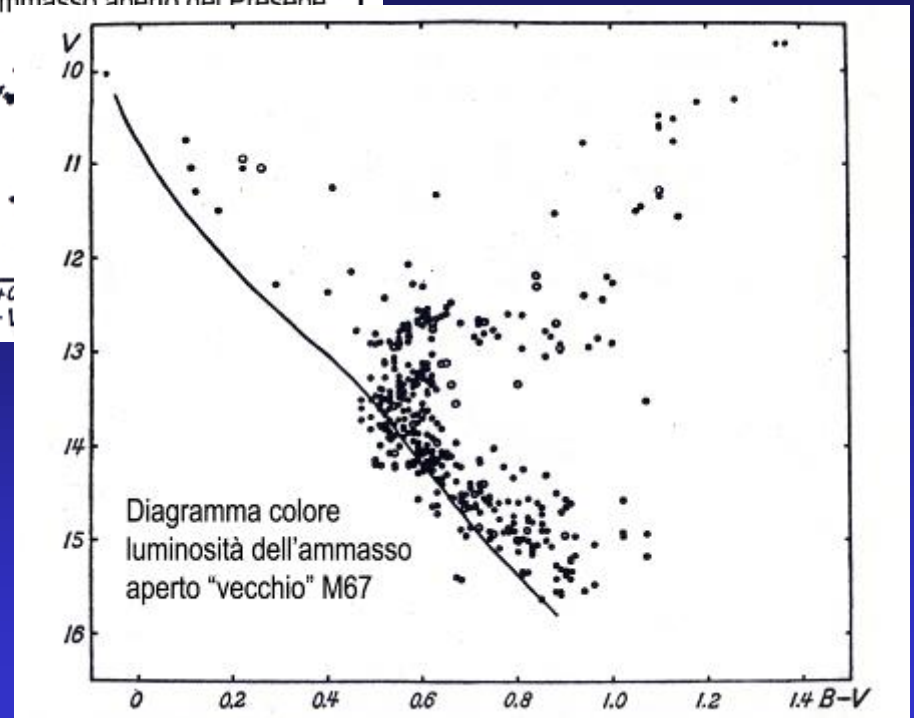
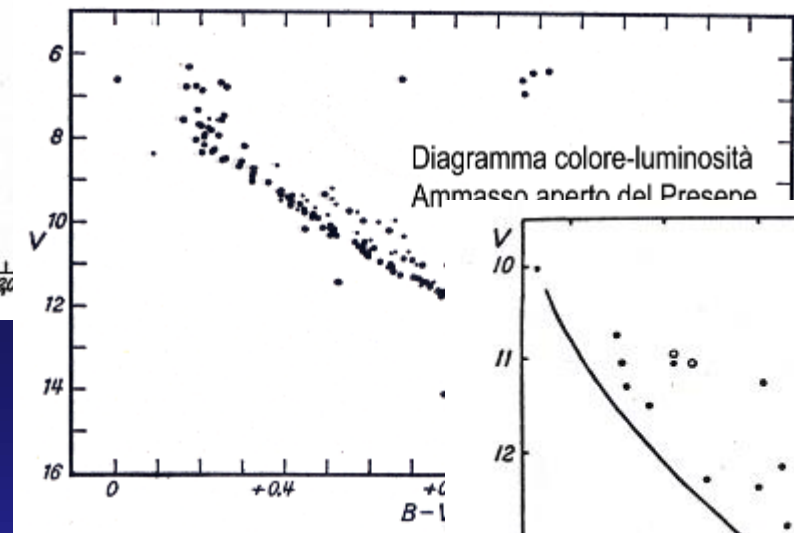
I diagrammi HR degli ammassi



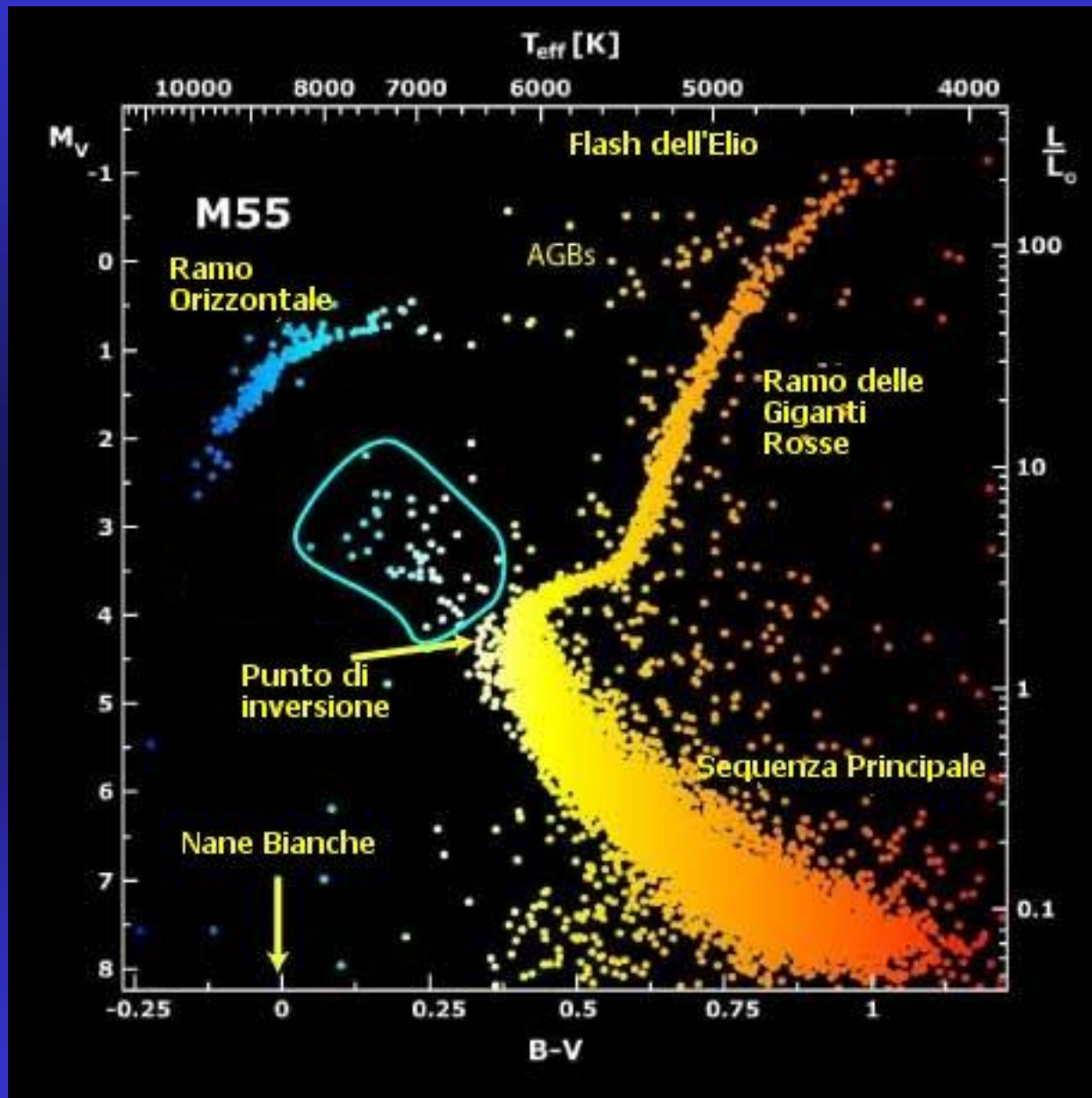
1. Negli **ammassi aperti** la Sequenza Principale è completa
2. Negli **ammassi globulari** è presente il Ramo delle Giganti Rosse
3. È presente pure un **Braccio Orizzontale**
4. Il Braccio orizzontale appare interrotto da una lacuna, detta Lacuna delle RR Lyrae o variabili di ammasso
5. Il punto in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

Diagramma colori-luminosità ammassi aperti

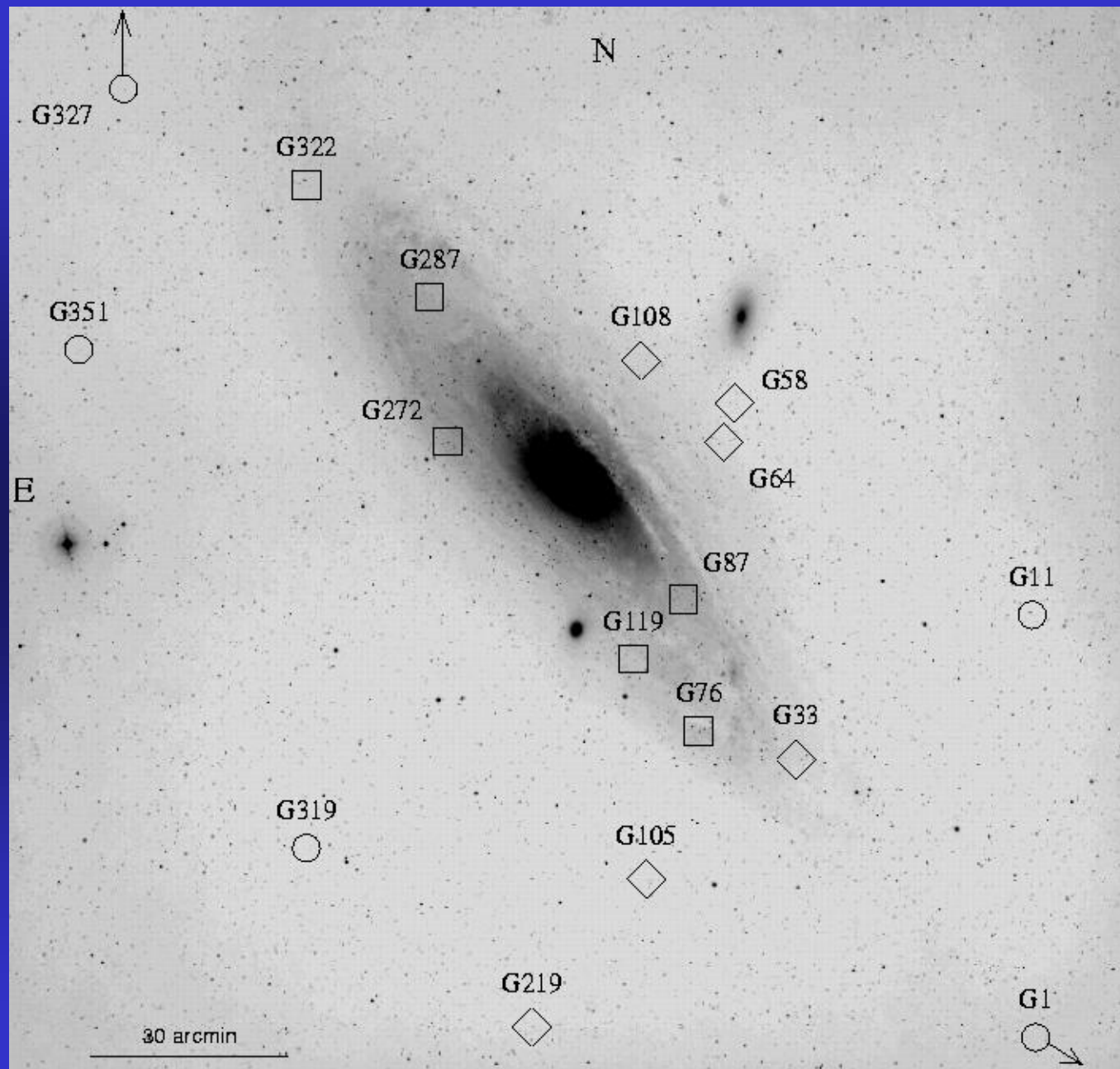




Ammasso globulare M55



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

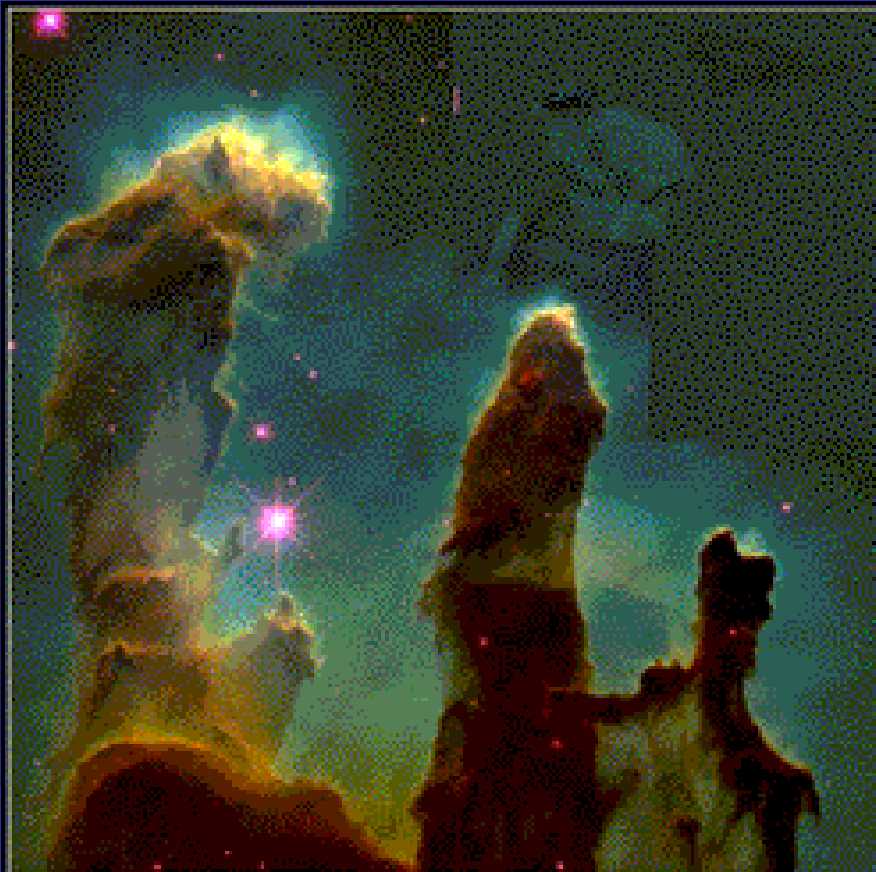
- ❑ L'utilità dei modelli
- ❑ I modelli
 - Le protostelle
 - Stelle di sequenza principale (o normali)
 - Giganti Rosse
 - Nane Bianche
 - Stadi avanzati
 - Stadi finali (Le supernovae)

Le protostelle



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

Le protostelle



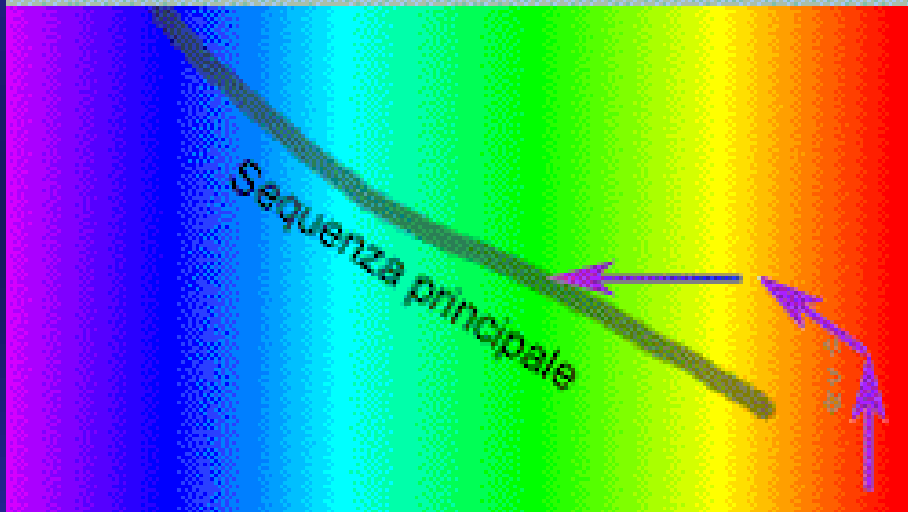
Pilastri gassosi in M16

HST - WFPC2

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

Da protostella a stella

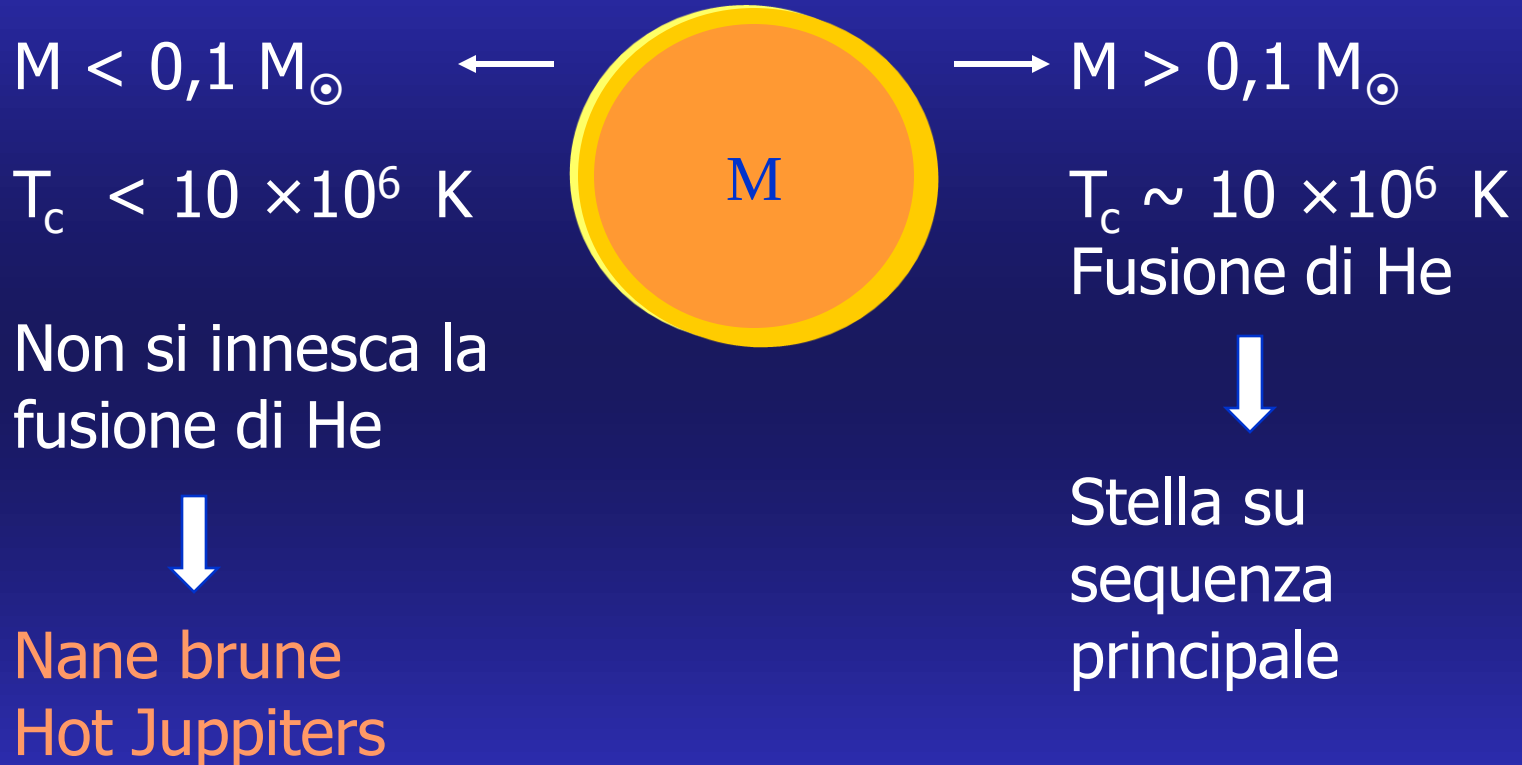
Traccia evolutiva di una protostella verso la sequenza principale



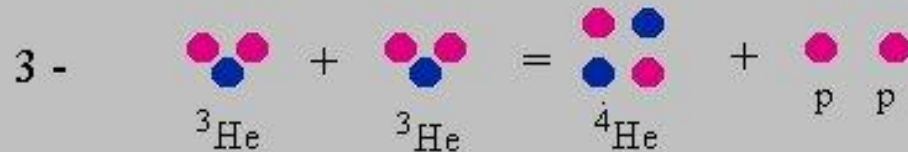
La fase protostellare cessa con l'innesco della combustione dell'idrogeno nel nucleo: la protostella diviene stella.

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

Stella solo se ...



Fusione dell'idrogeno



 protone  neutrone

Fusione di H

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

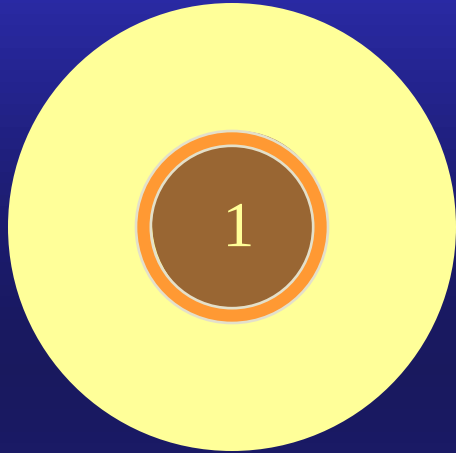
In queste condizioni

- 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

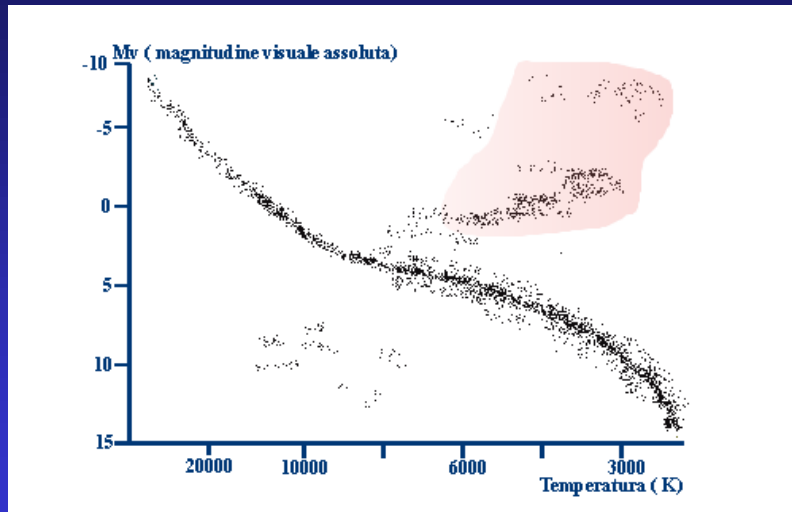


Giganti Rosse: termine della fase



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.

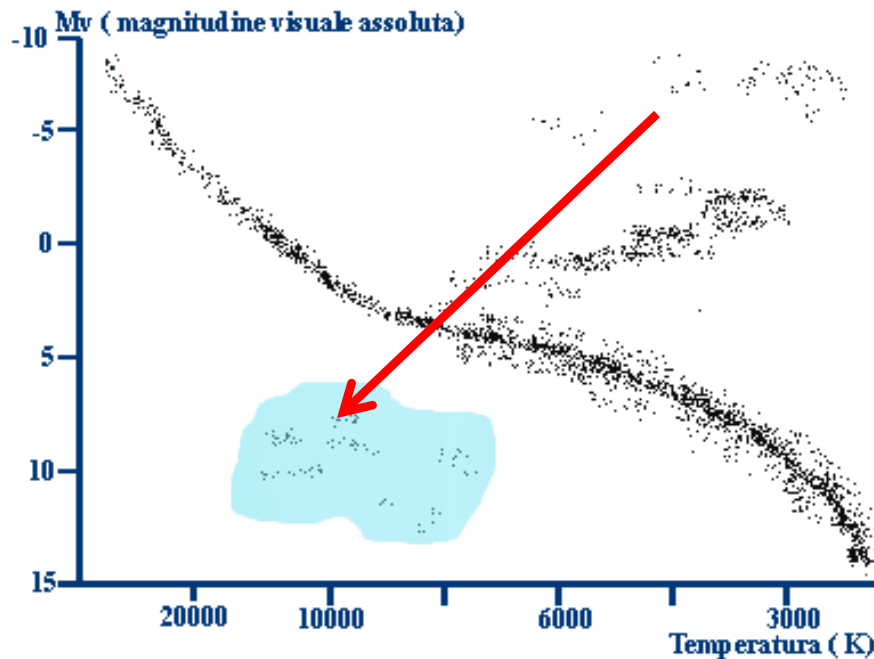
Stadi finali: Nane Bianche

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

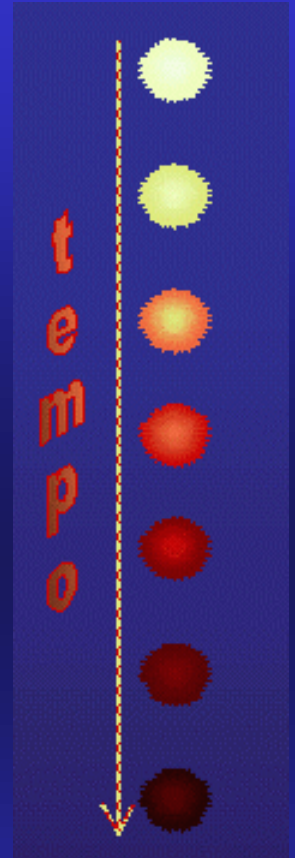


Diagramma temporale dell'evoluzione di una nana bianca.

Le stelle che si trovano in questa fase hanno un raggio assai piccolo, oltre cento volte inferiore a quello che avevano quando si trovavano sulla sequenza principale e per questo sono dette nane. Inoltre esse hanno una temperatura superficiale molto elevata, da cui l'attributo di bianche. Tale fatto deve essere messo in relazione alla perdita delle parti esterne della stella a seguito di una precedente, complessa fase di instabilità con conseguente esposizione degli strati più interni e caldi.

La luminosità si è ridotta a qualche centesimo o millesimo di quella posseduta nella fase di sequenza principale ed è in continua, lenta diminuzione.

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.

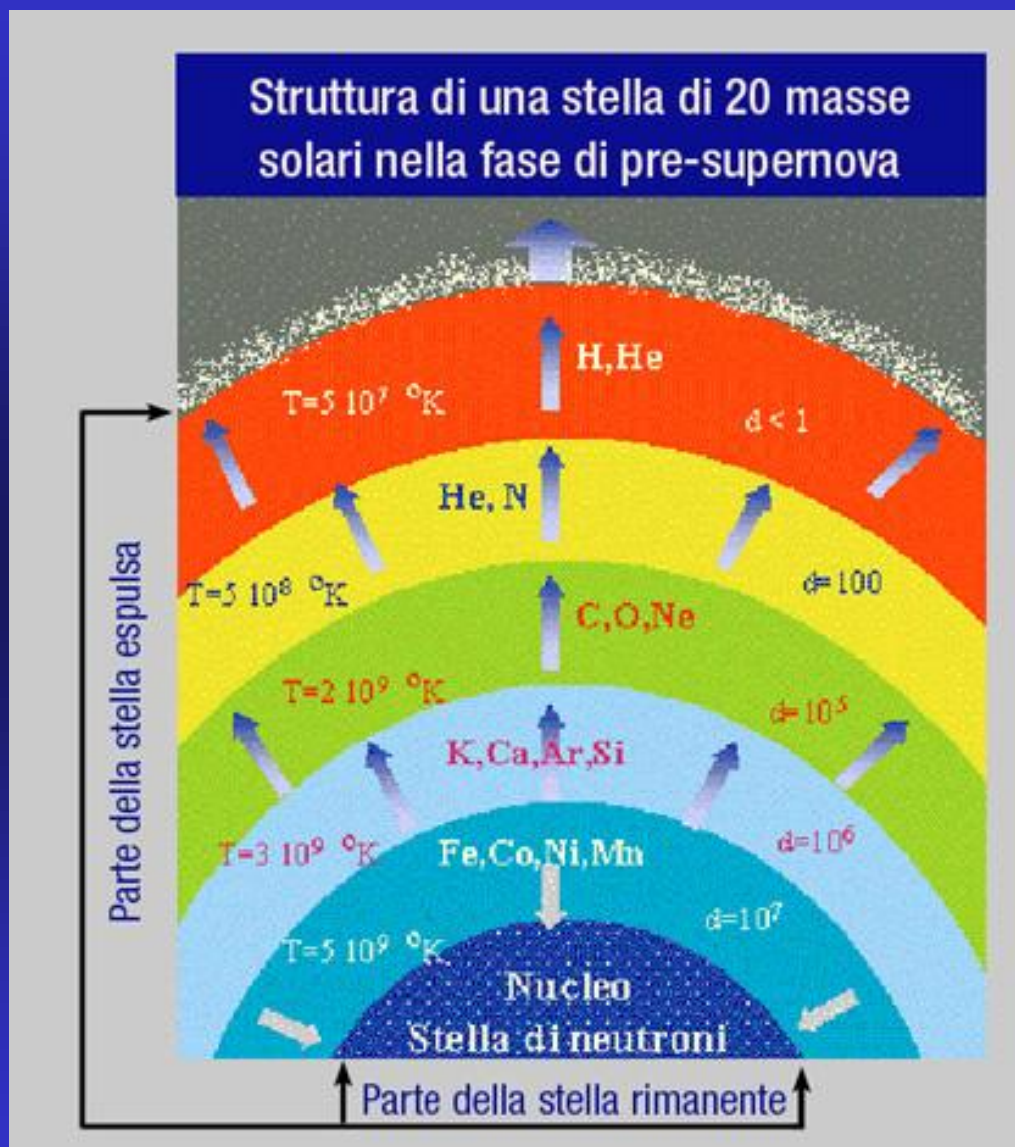
Tale evento dura alcuni minuti.

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



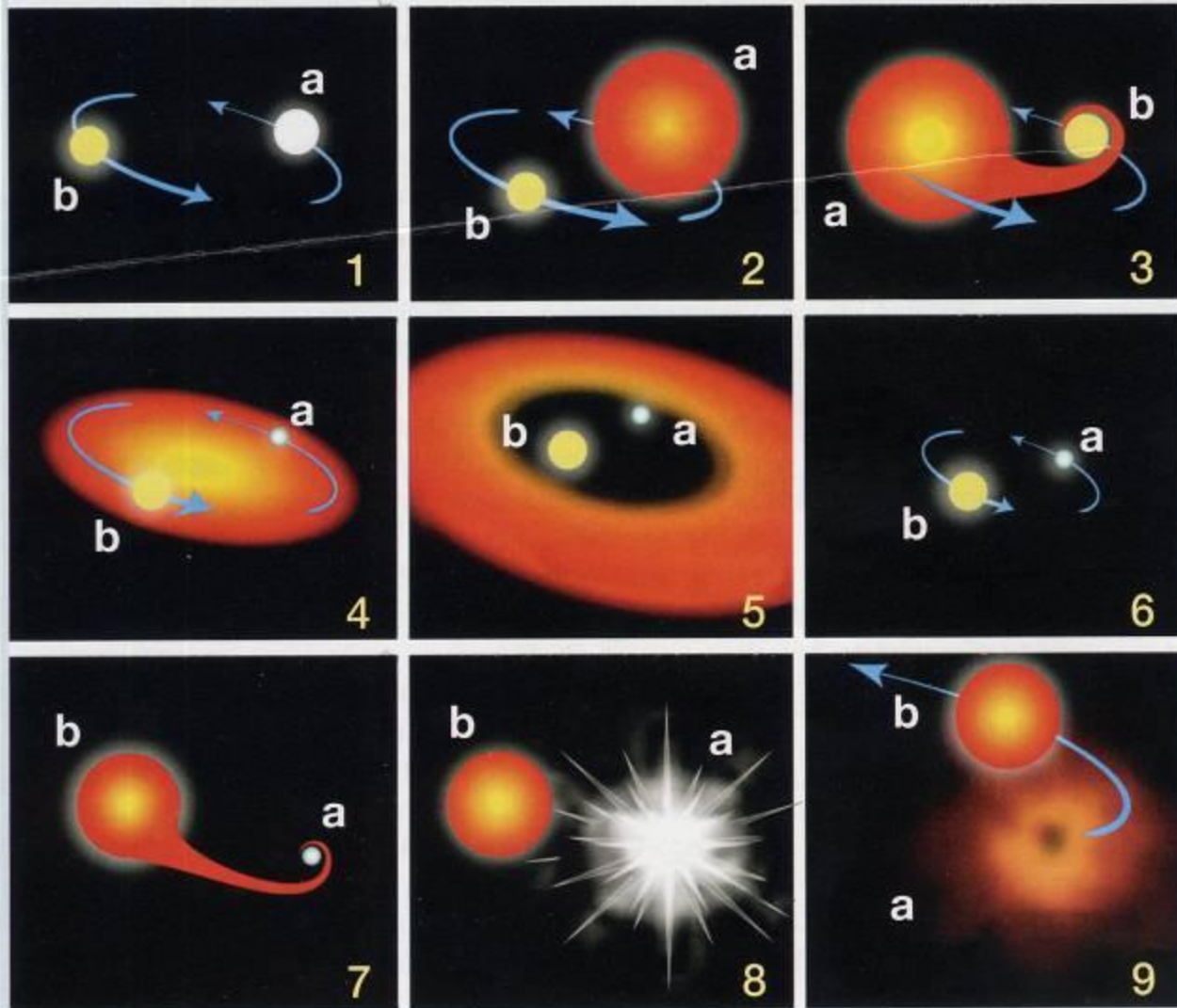
Eventi esplosivi: supernovae



La supernova della Grande Nube di Magellano 1987

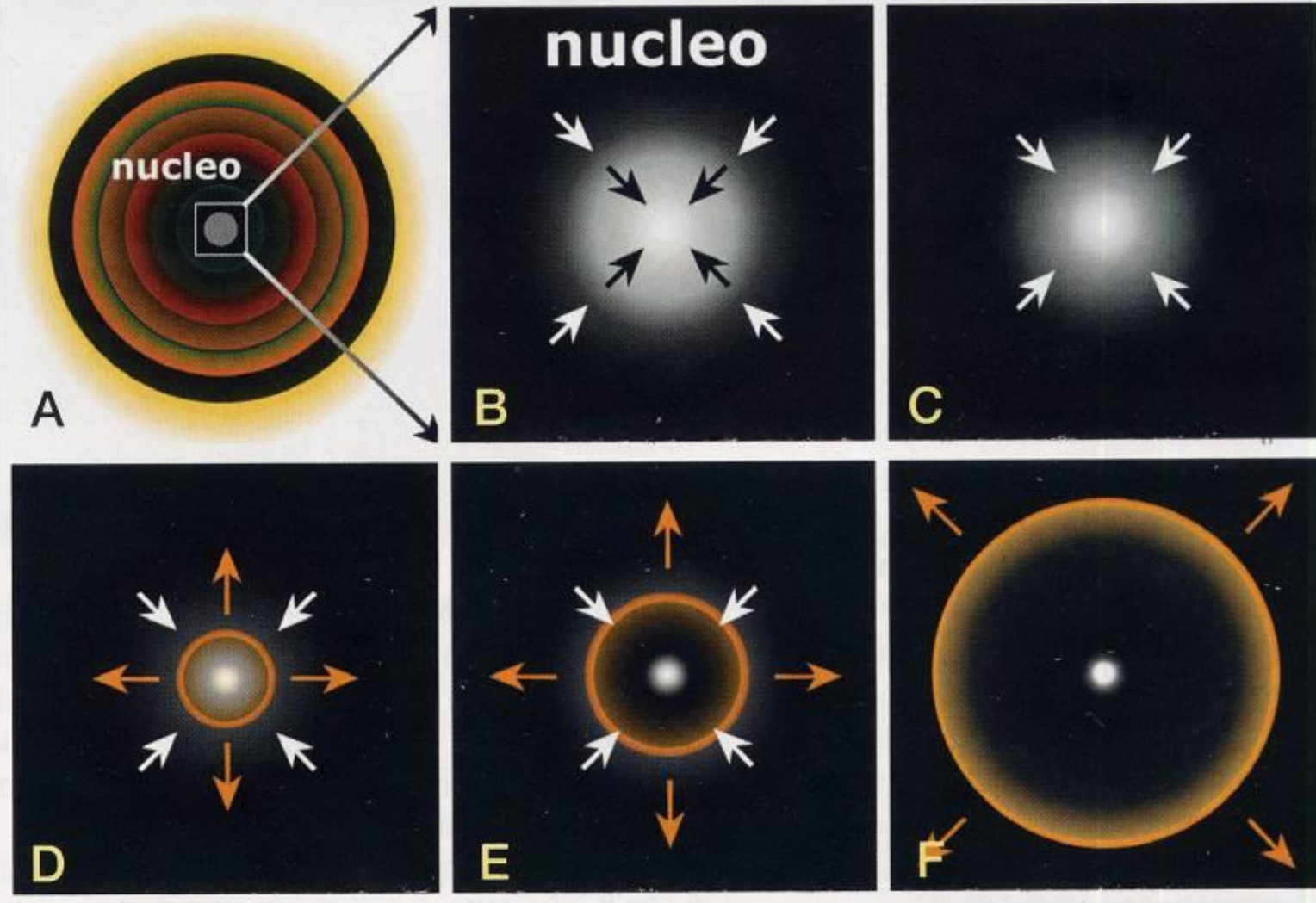
Eventi esplosivi: supernovae Tipo Ia

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

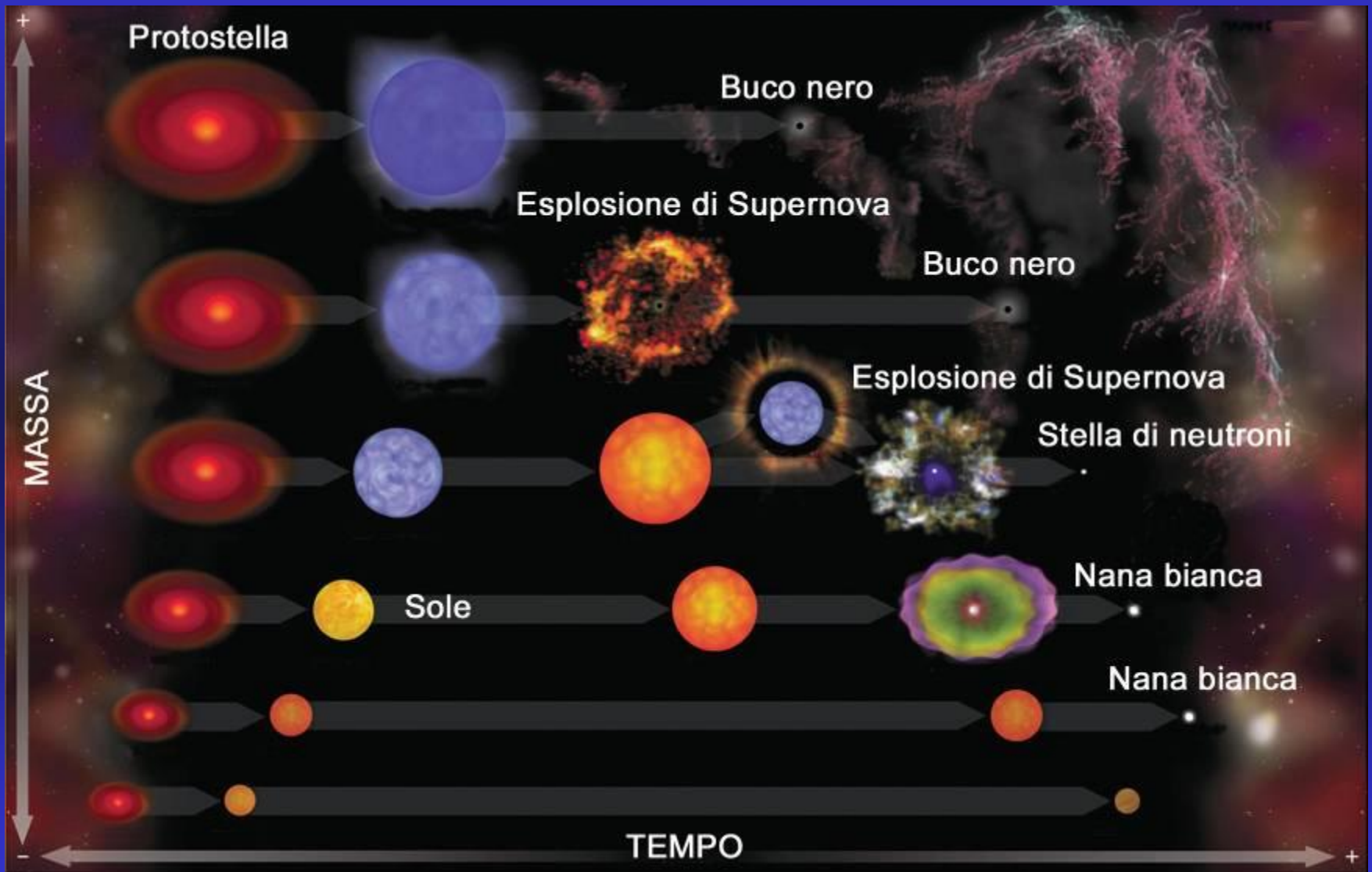


Tutti gli elementi pesanti che si trovano nell'universo sono il prodotto di nucleosintesi nel corso di eventi di supernova



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

Stelle degeneri e buchi neri

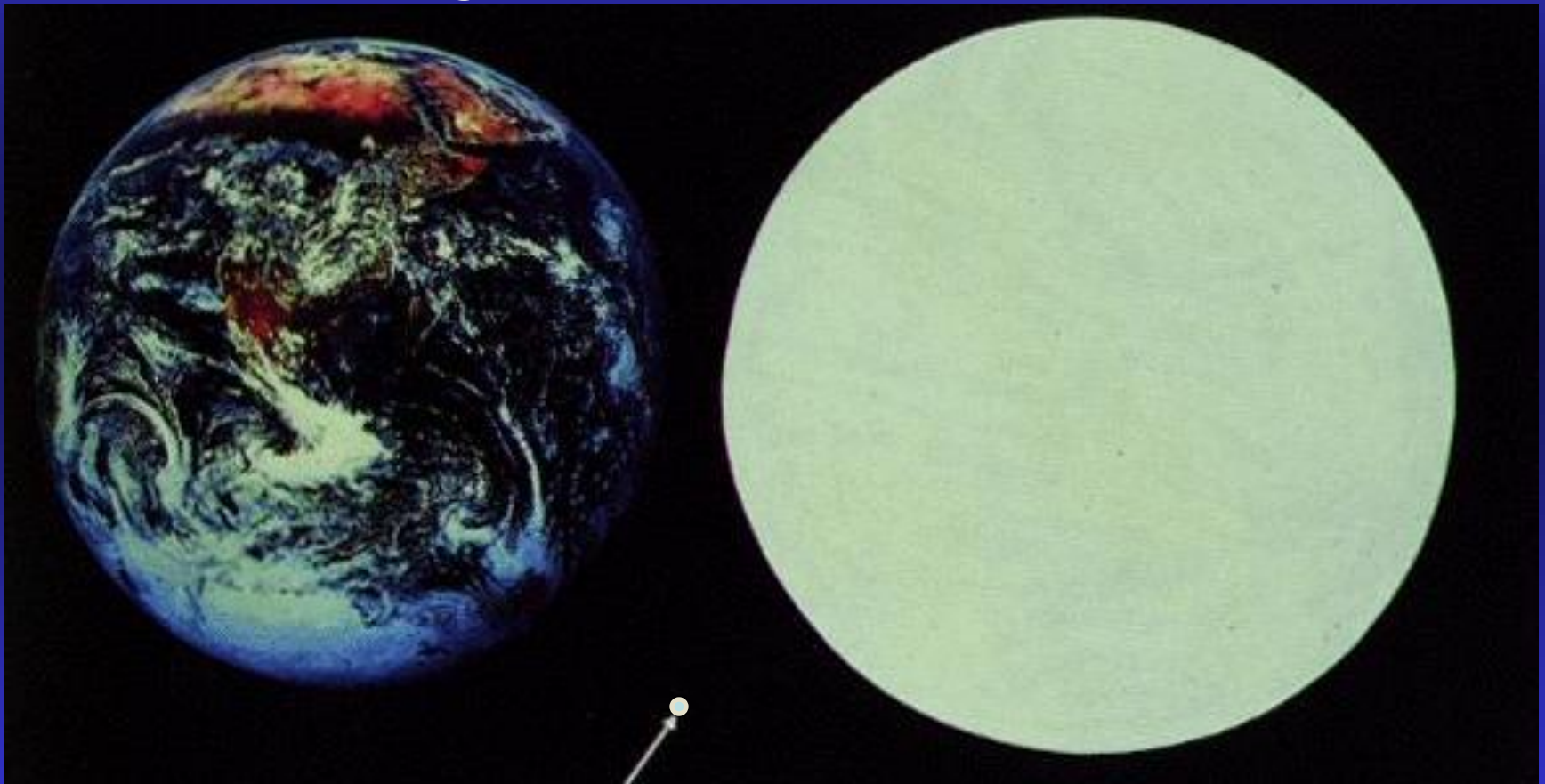
Oggetti collassati: Nane Bianche e stelle di neutroni

Terra

Densità: $5,4 \text{ gr/cm}^3$

Nana Bianca

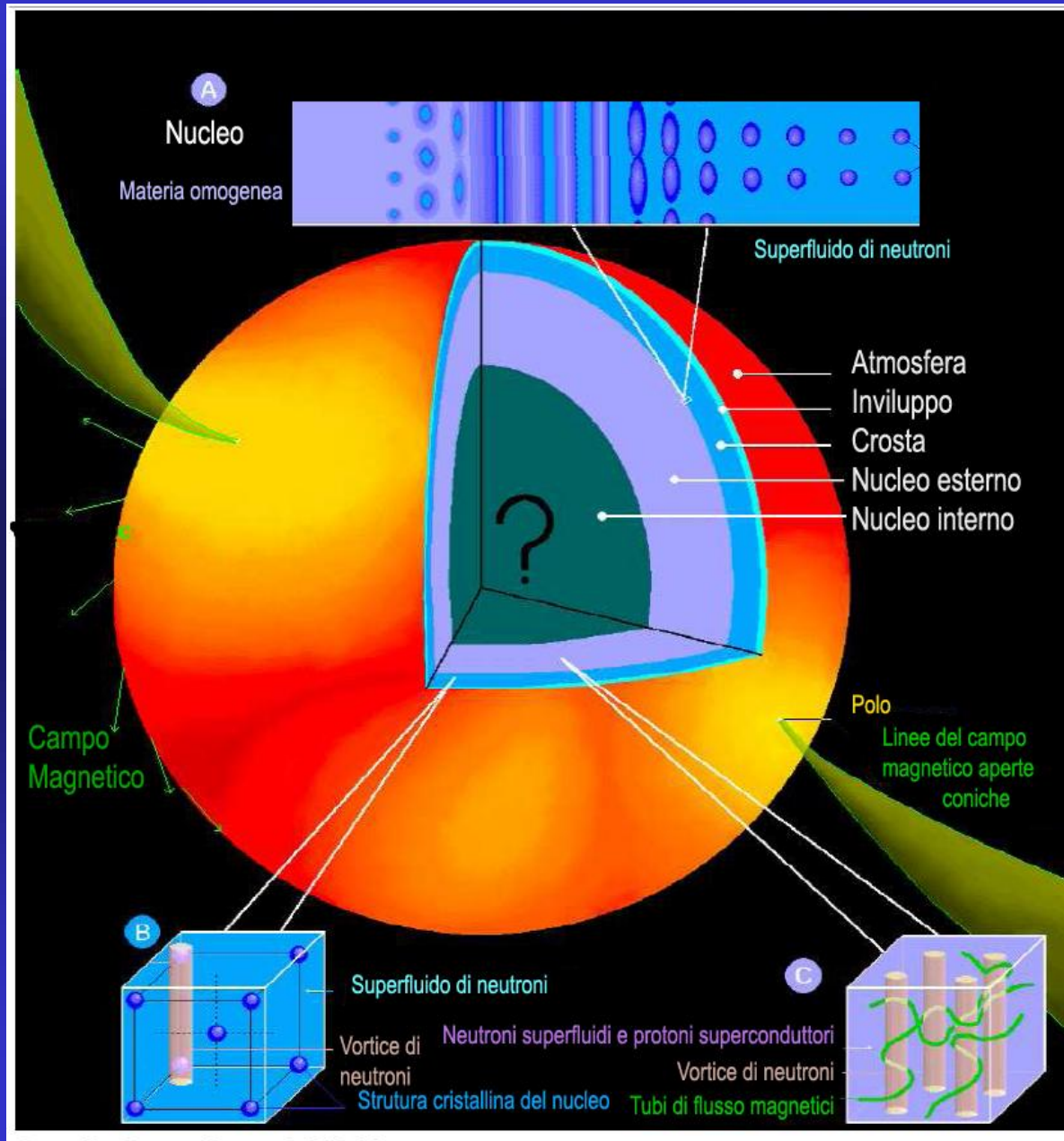
Densità: 10^6 gr/cm^3



Stella di Neutroni

Densità: 10^{15} gr/cm^3

Stelle di neutroni-struttura interna



Stelle di neutroni-struttura interna

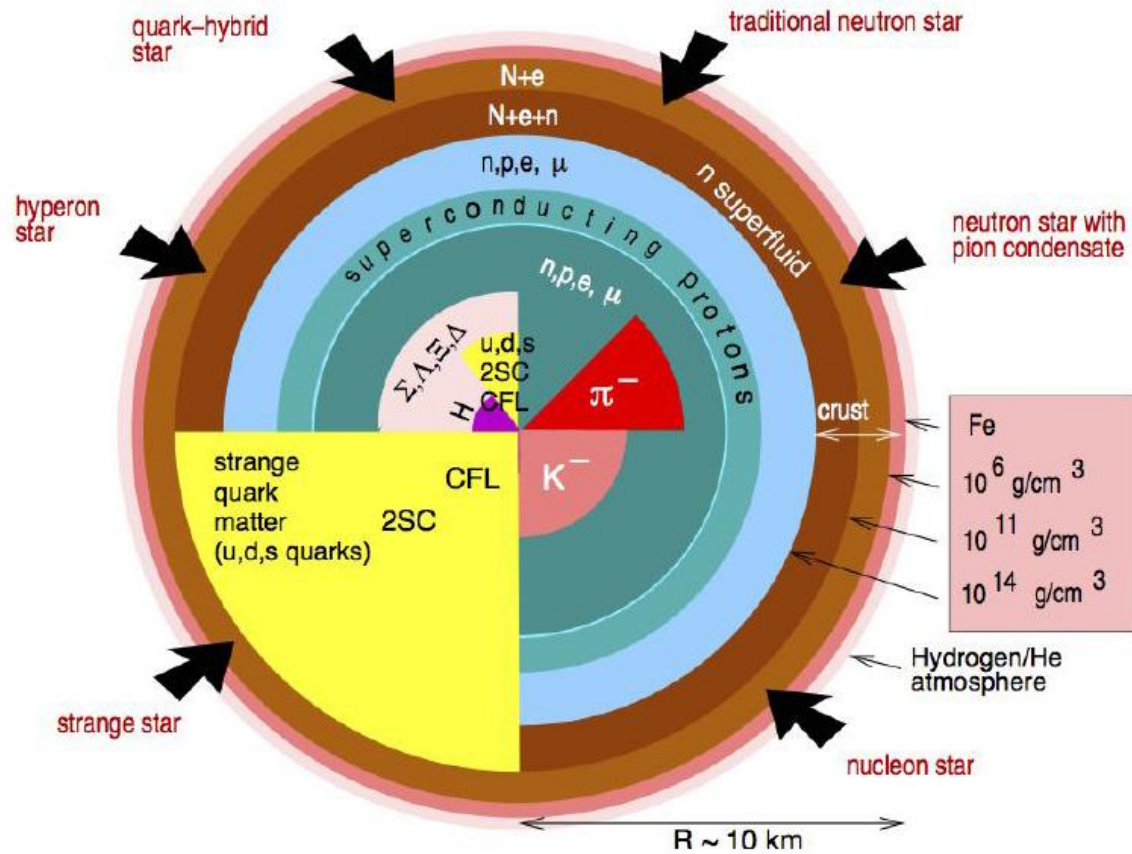
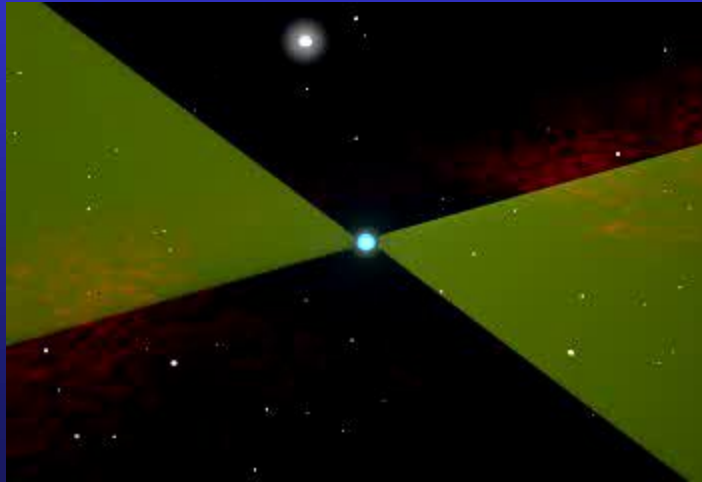


Figure: Neutron star interior as predicted by theory

Stelle di neutroni e pulsar

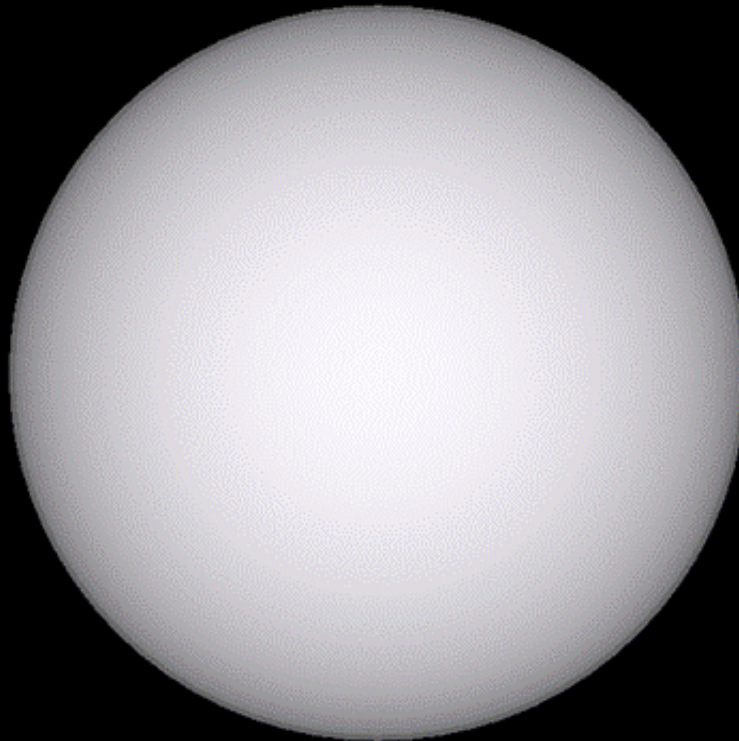


Stelle di neutroni e buchi neri



Manhattan

(spaceimaging.com)

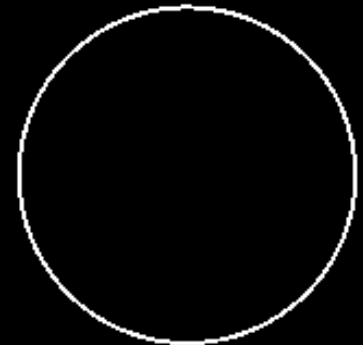


Stella di Neutroni

$M=1.5 M_{\odot}$

$R=10 \text{ km}$

Densità: 10^{15} gr/cm^3



Buco Nero

$M=1.5 M_{\odot}$

$R=4.5 \text{ km}$

Stelle oscure newtoniane



Pierre Simon De
Laplace.

"Una stella luminosa, della stessa densità della Terra, e con un diametro pari a 250 volte quello del Sole, non permetterebbe, a causa della sua attrazione gravitazionale, ai suoi raggi luminosi di raggiungerci; è dunque possibile che i corpi celesti più grandi e più luminosi siano, per questo motivo, invisibili". Così si esprimeva Laplace nel 1798 nell'opera *Esposizione del sistema del mondo*.

Stelle oscure newtoniane

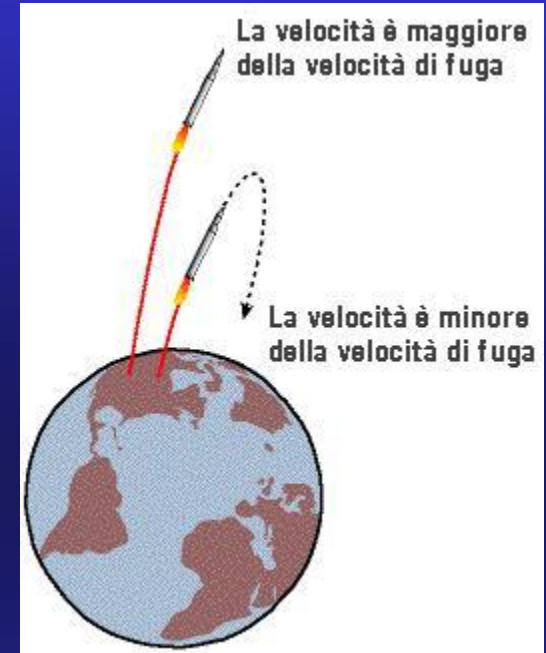
Velocità di fuga dalla superficie terrestre:
11 km/s

A parità di massa, minore è il raggio e
maggiore è la velocità di fuga

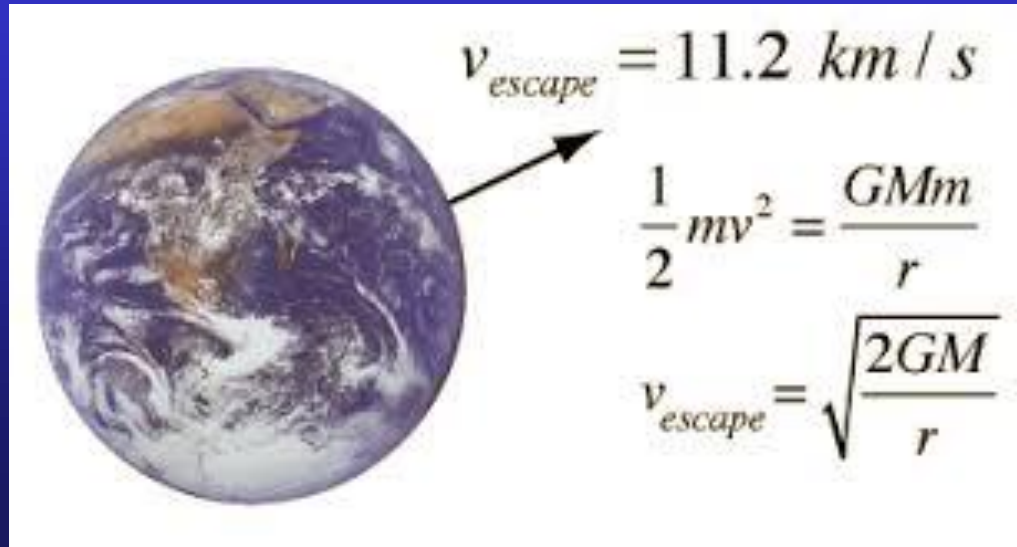
Se concentriamo la massa entro un raggio critico,
la velocità di fuga diventa superiore a quella della luce.
Abbiamo una "dark star".

...supposing a light to be attracted by the same force in proportion to its inertial mass, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity (John Mitchell, 1784)

Nel 1796 anche Laplace menziona questa possibilità.



Velocità di fuga



Se lanciamo un sasso questo, a causa della forza di gravità, rallenterà sempre di più fino a raggiungere un'altezza massima per poi ricadere a terra. Se ripetiamo l'esperimento imprimendo una forza maggiore esso raggiungerà un'altezza più elevata prima di invertire il suo moto. Esiste però una velocità limite oltre la quale si allontanerà definitivamente dalla Terra sfuggendo alla sua gravitazione.

Questa velocità limite si chiama velocità di fuga.

Velocità di fuga di stelle

La velocità di fuga dipende dalla massa e dal raggio del corpo celeste dal quale si intende sfuggire.

Ad esempio nel caso della **Terra** si ha $v_{f(\text{Terra})} = 11.2 \text{ km/sec}$ mentre per il **Sole** risulta $v_{f(\text{Sole})} = 618 \text{ km/sec}$.

Vi sono però delle stelle come le **Nane Bianche**, con massa paragonabile a quella del Sole ma con un raggio pari a quello della Terra, per le quali la velocità di fuga sale a $v_f = 7000 \text{ km/sec}$.

Per stelle ancora più massicce, come le **stelle di neutroni**, la velocità di fuga supera i 150.000 km/sec .

Di questo passo un piccolo aumento di massa, od una riduzione del raggio, porterebbero ad una velocità di fuga maggiore della velocità della luce, pari a 300.000 km/sec !

La soluzione di Schwarzschild

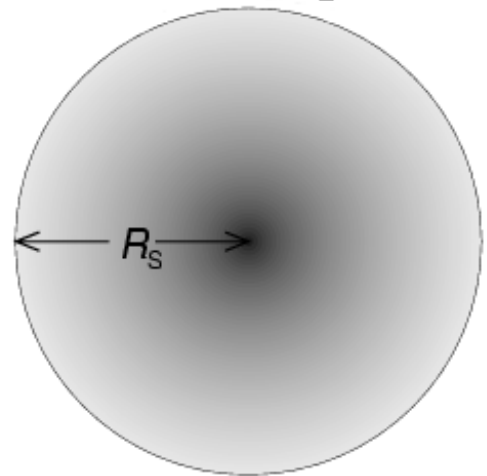
Nel 1916 l'astrofisico Karl Schwarzschild trova per primo una soluzione alle equazioni della relatività di Einstein per un oggetto sferico, statico e immerso in uno spazio vuoto. Se l'oggetto è concentrato entro un raggio critico, allora nulla, neanche la luce, può più uscirne.



Raggio di Schwarzschild

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$
$$R_s (km) \approx 3 \times \frac{M_{stella}}{M_{Sole}}$$

Orizzonte degli eventi



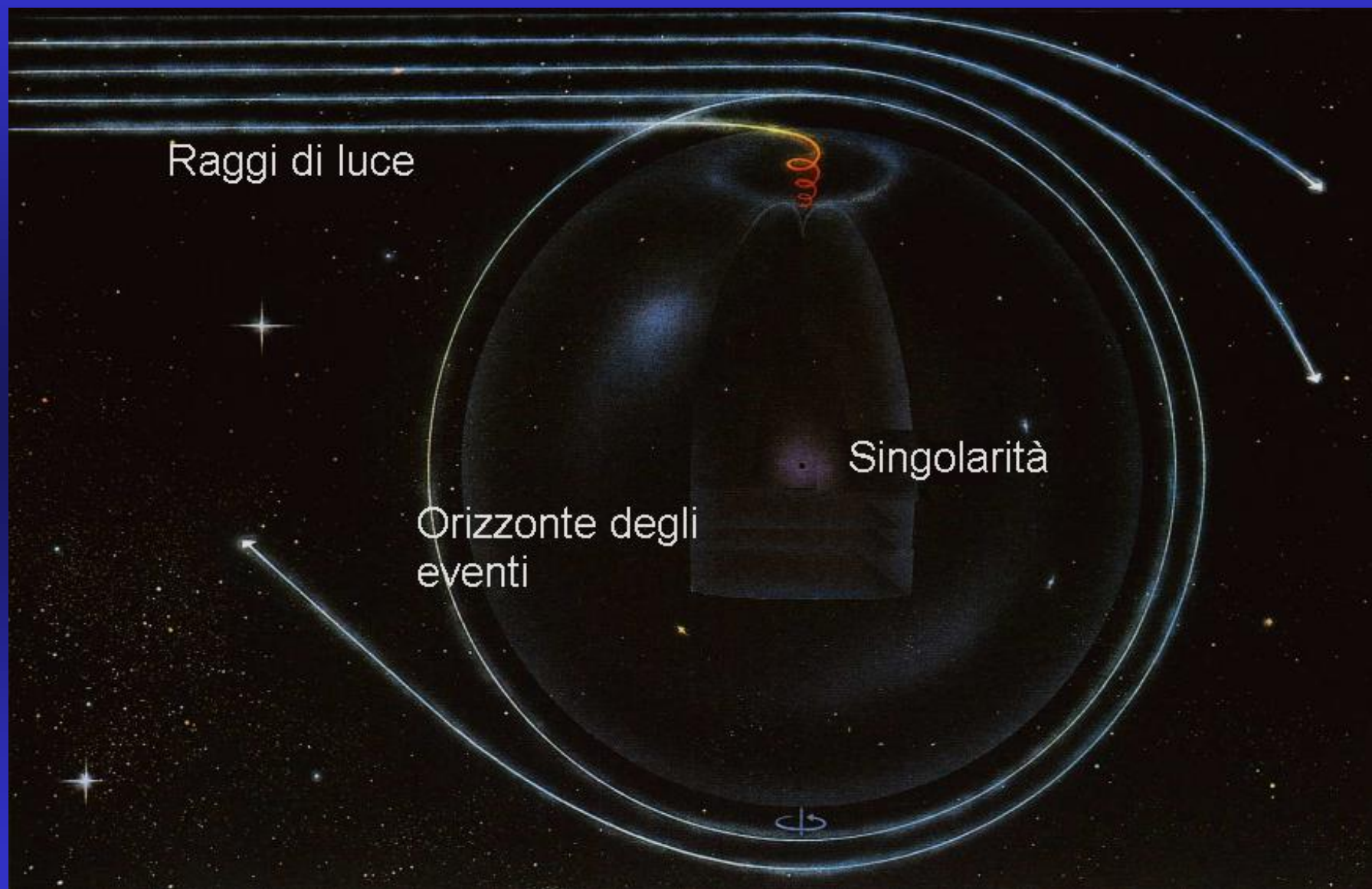
Karl Schwarzschild (1873-1916)

I Buchi Neri



Nel 1967, J.A. Wheeler li battezza Buchi Neri

Deviazione dei raggi di luce



Caduta in un buco nero



Visto da un osservatore esterno, il tempo di caduta sull'orizzonte di un buco nero è infinito.

Un osservatore che cade in un buco nero misura invece un tempo finito di caduta nella singolarità.

Attenzione alle forze di marea!



Vicino all'orizzonte degli eventi, le forze di marea diventano fortissime (se il buco nero non è supermassiccio)

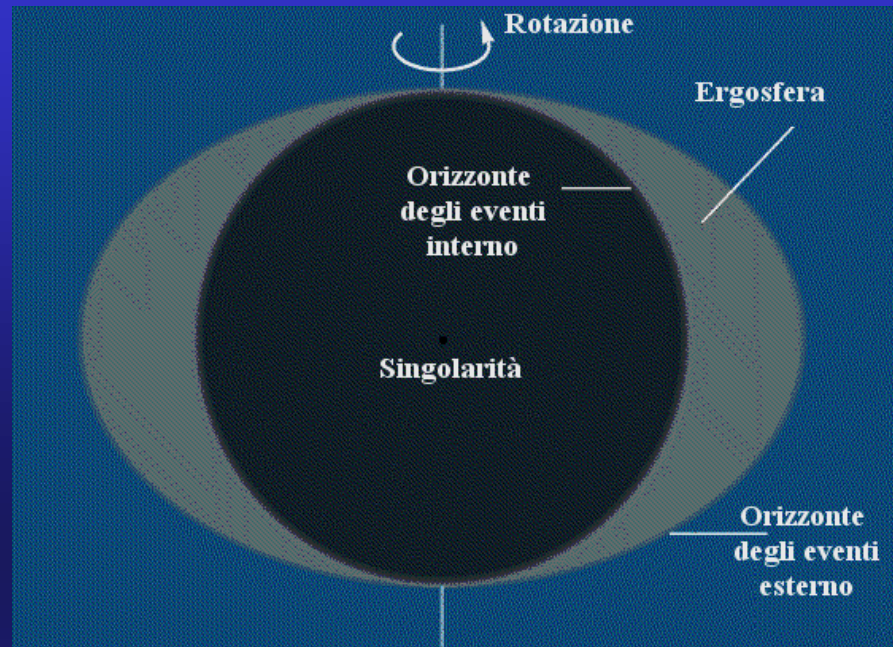


SPAGHETTIFICAZIONE

E' meglio cadere in un buco nero molto grosso (di milioni di masse solari) che in uno "piccolo" di poche masse solari.



Buco nero in rotazione



Si può entrare e uscire dall'ergosfera di un buco nero rotante

Nell'ergosfera è impossibile seguire una traiettoria radiale diretta verso il buco nero: lo spazio-tempo è trascinato dal moto di rotazione.

Tutta l'energia associata alla rotazione di un buco nero si trova immagazzinata nell'ergosfera e può dunque essere estratta.

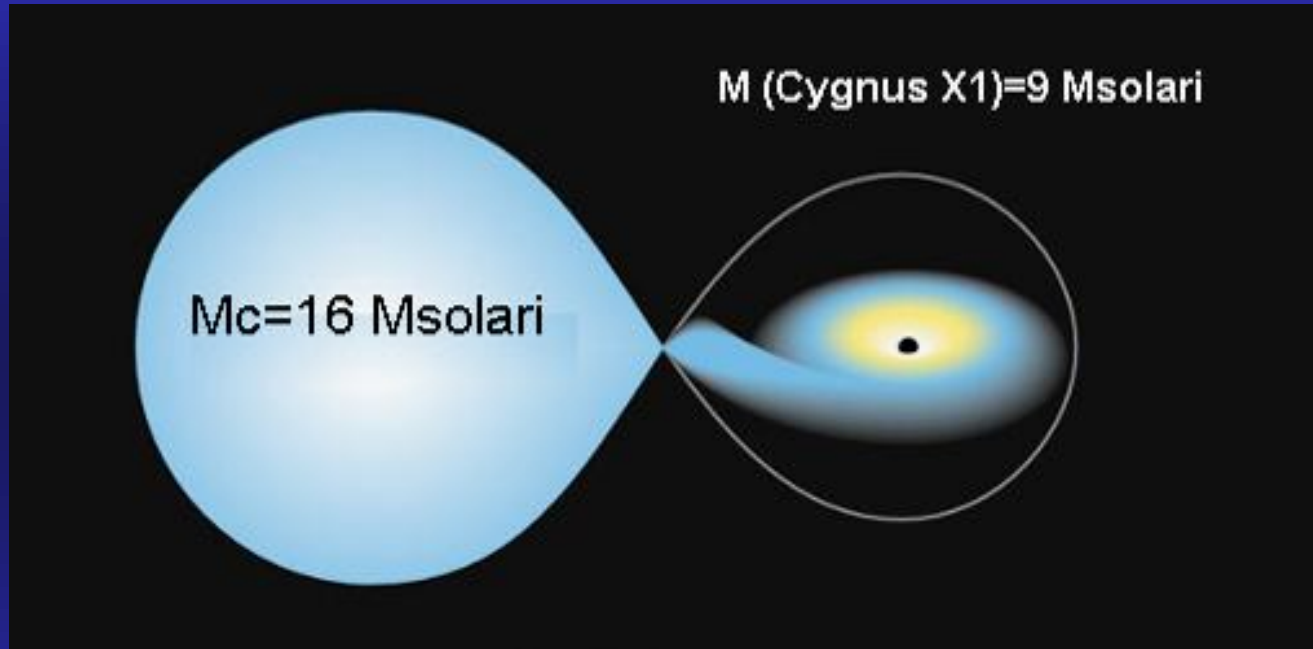
I buchi neri interagiscono con l'ambiente

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

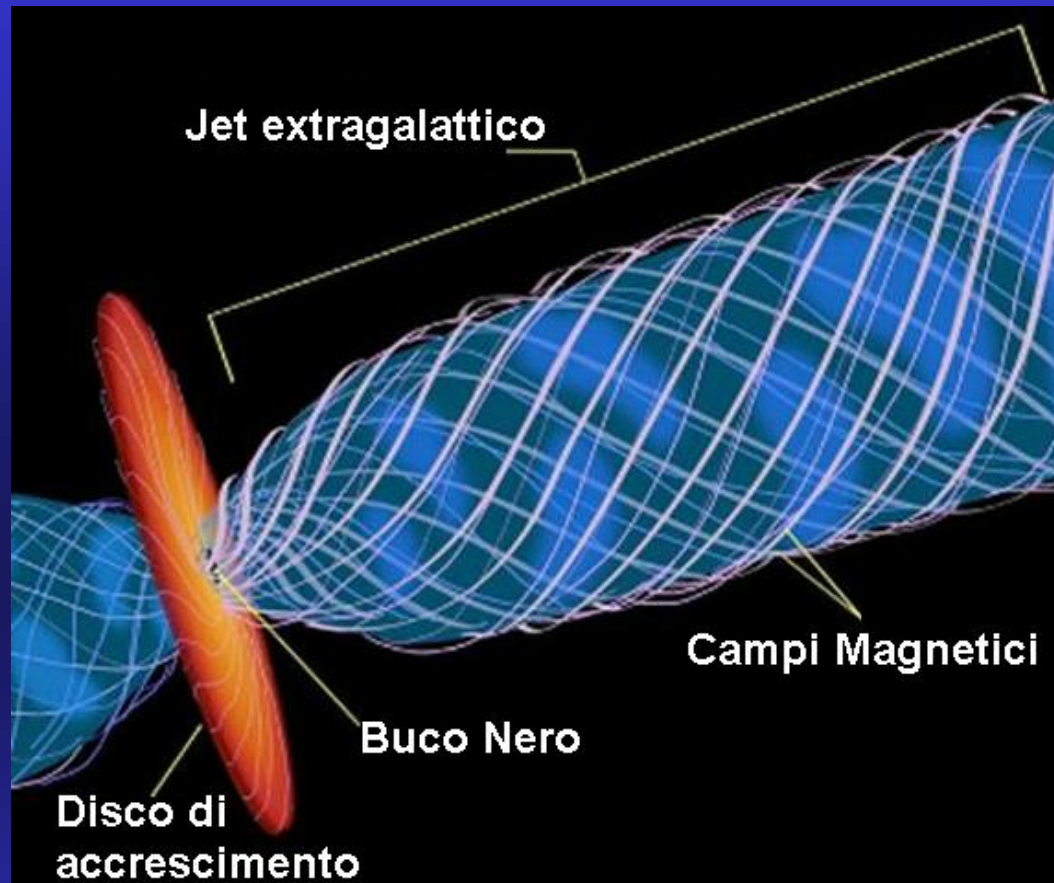
L'accrescimento di gas porta a un'intensa emissione di radiazione vicino al buco nero.

Cygnus X-1-un Buco Nero stellare

Sistema
binario a
8000
anni-luce
dalla
Terra



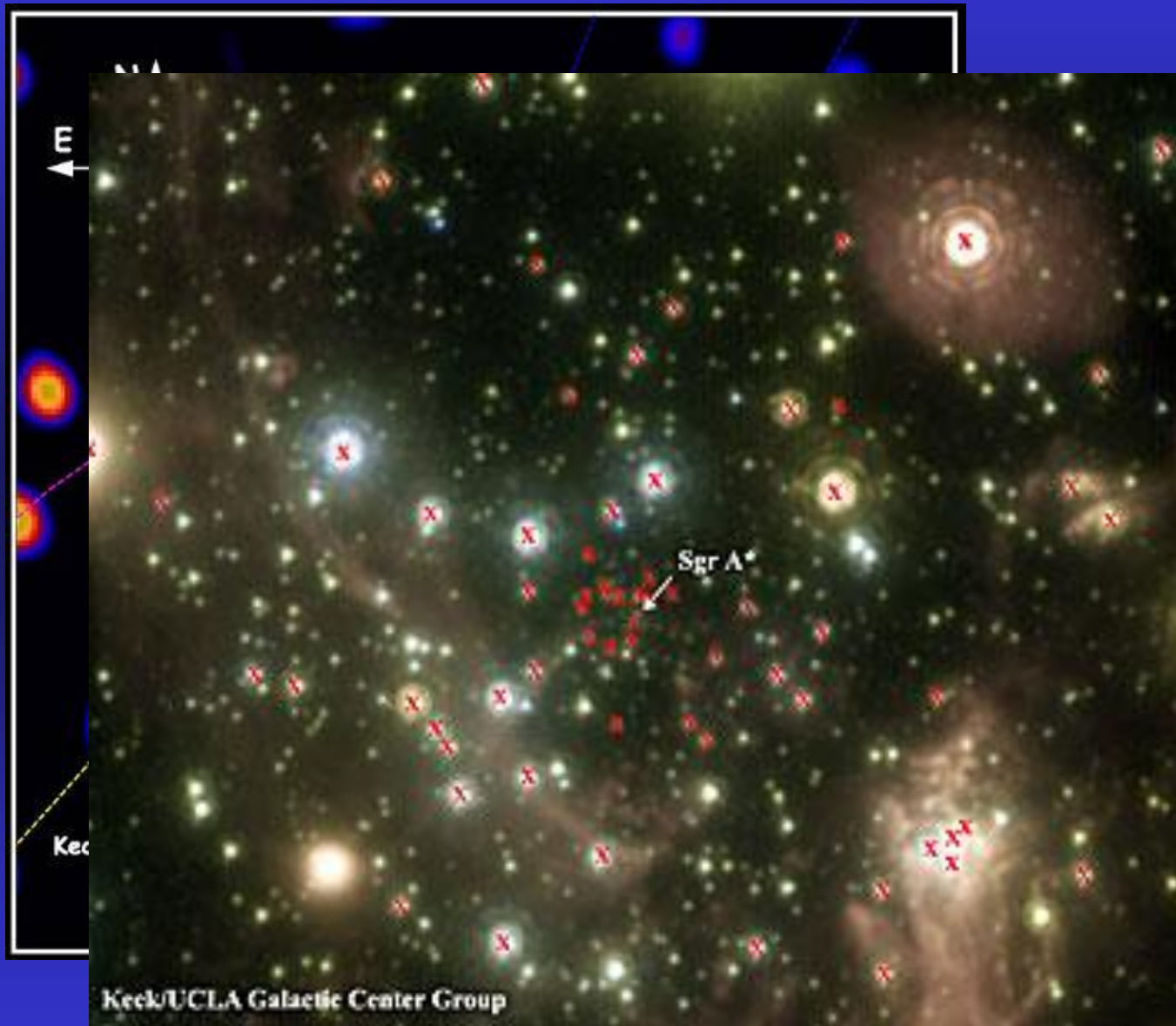
Buchi neri giganti-Nuclei di galassie attive



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



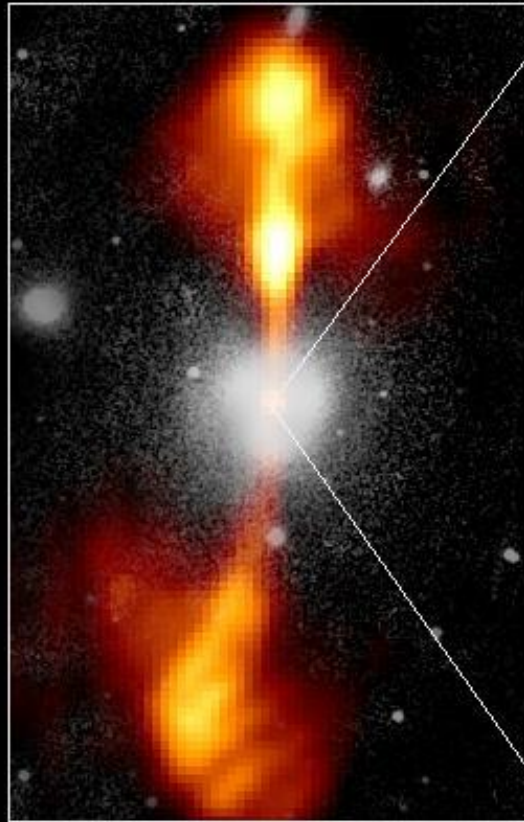
Al centro
della Via
Lattea
sembra
esserci un
buco nero
di 3,7
milioni di
masse
solare

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

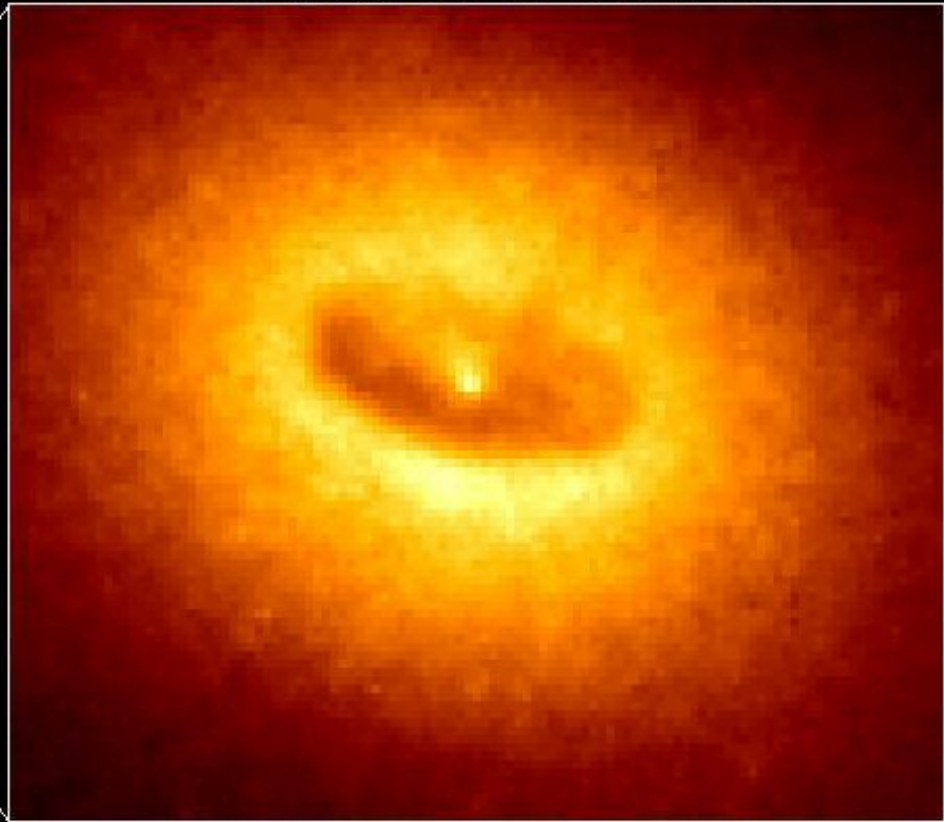
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



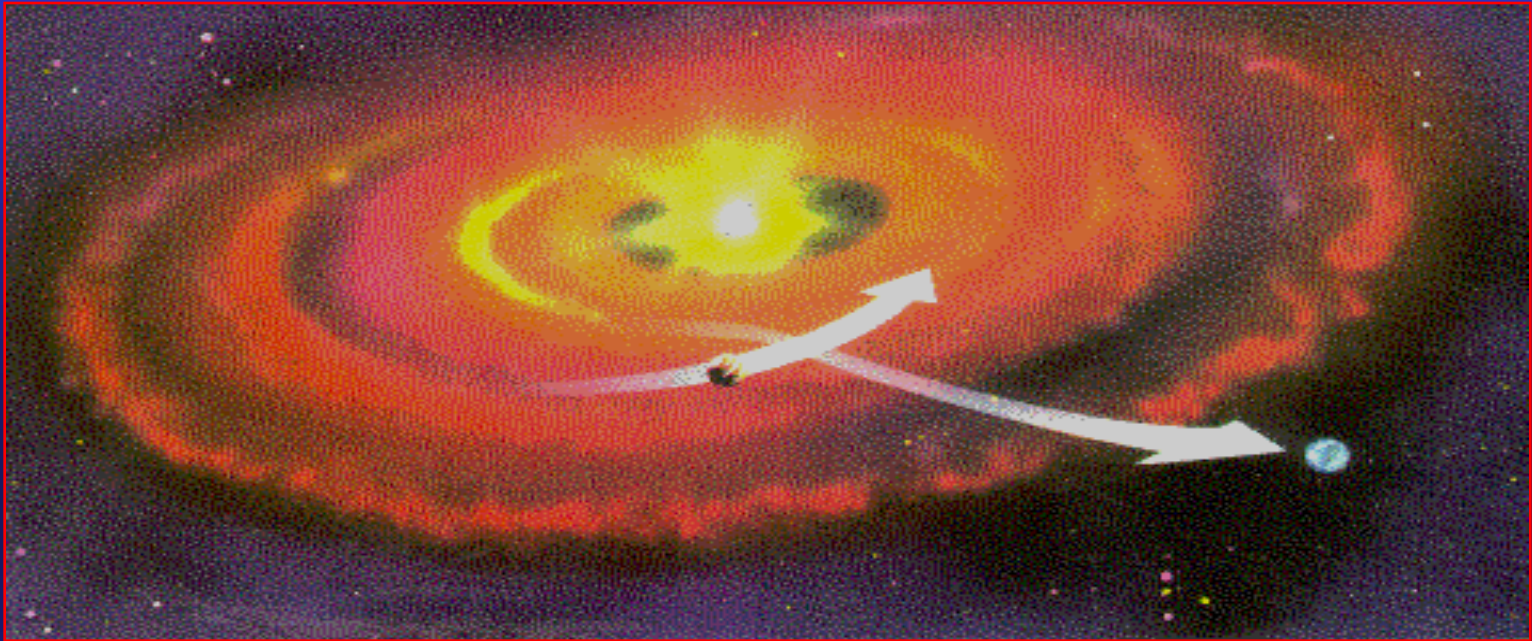
380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



1.7 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS

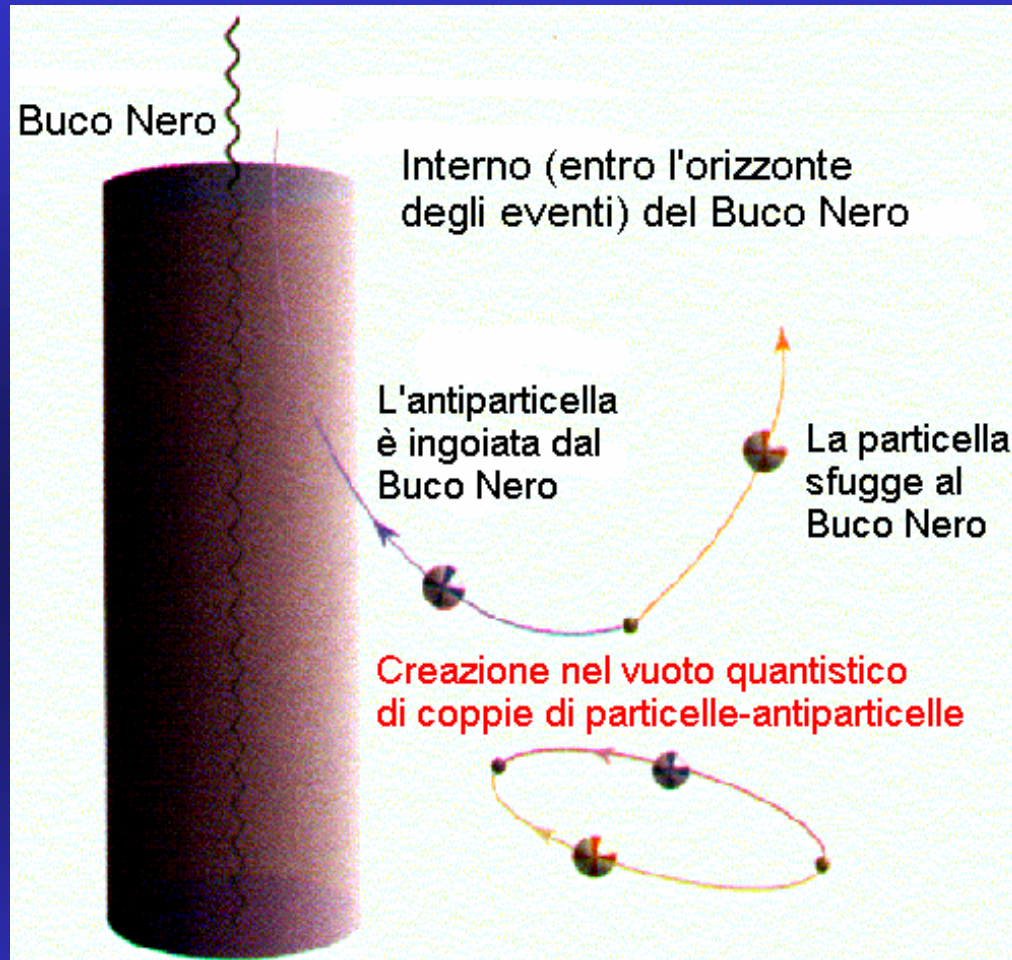
La fine della Galassia



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.

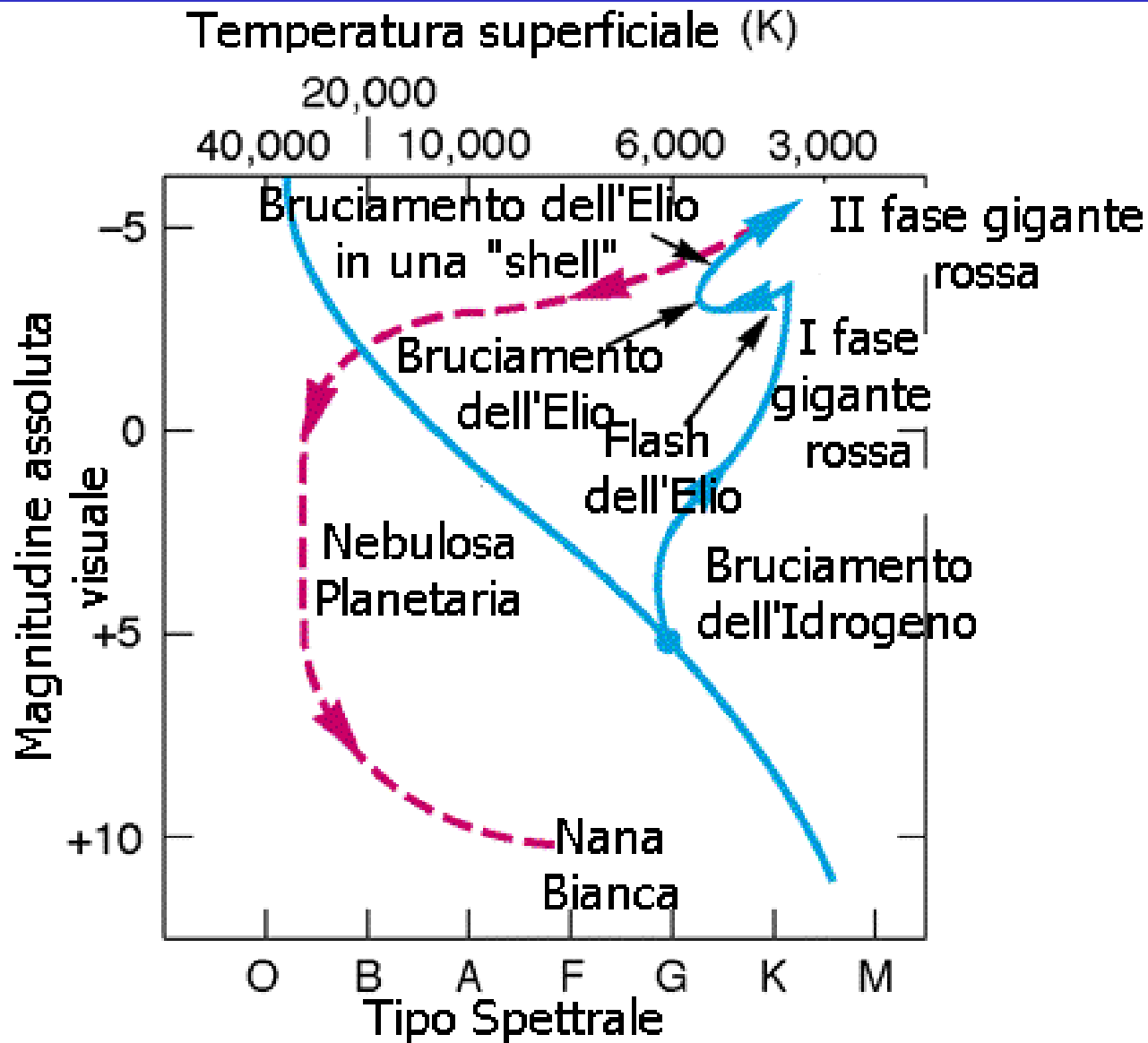
Buchi neri-proprietà

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 $\sim M_{\text{Luna}}$

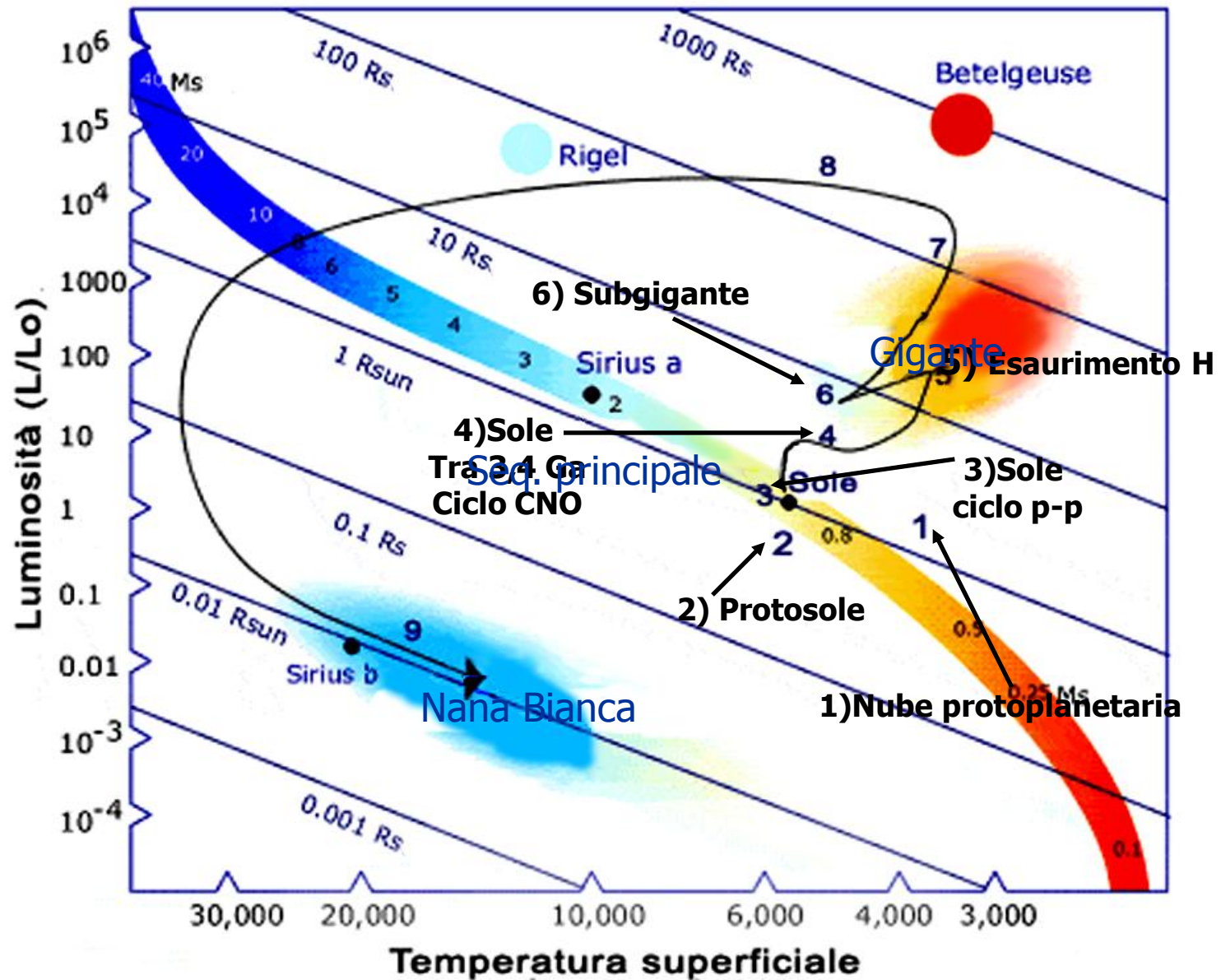
Raggio di Schwarschild

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

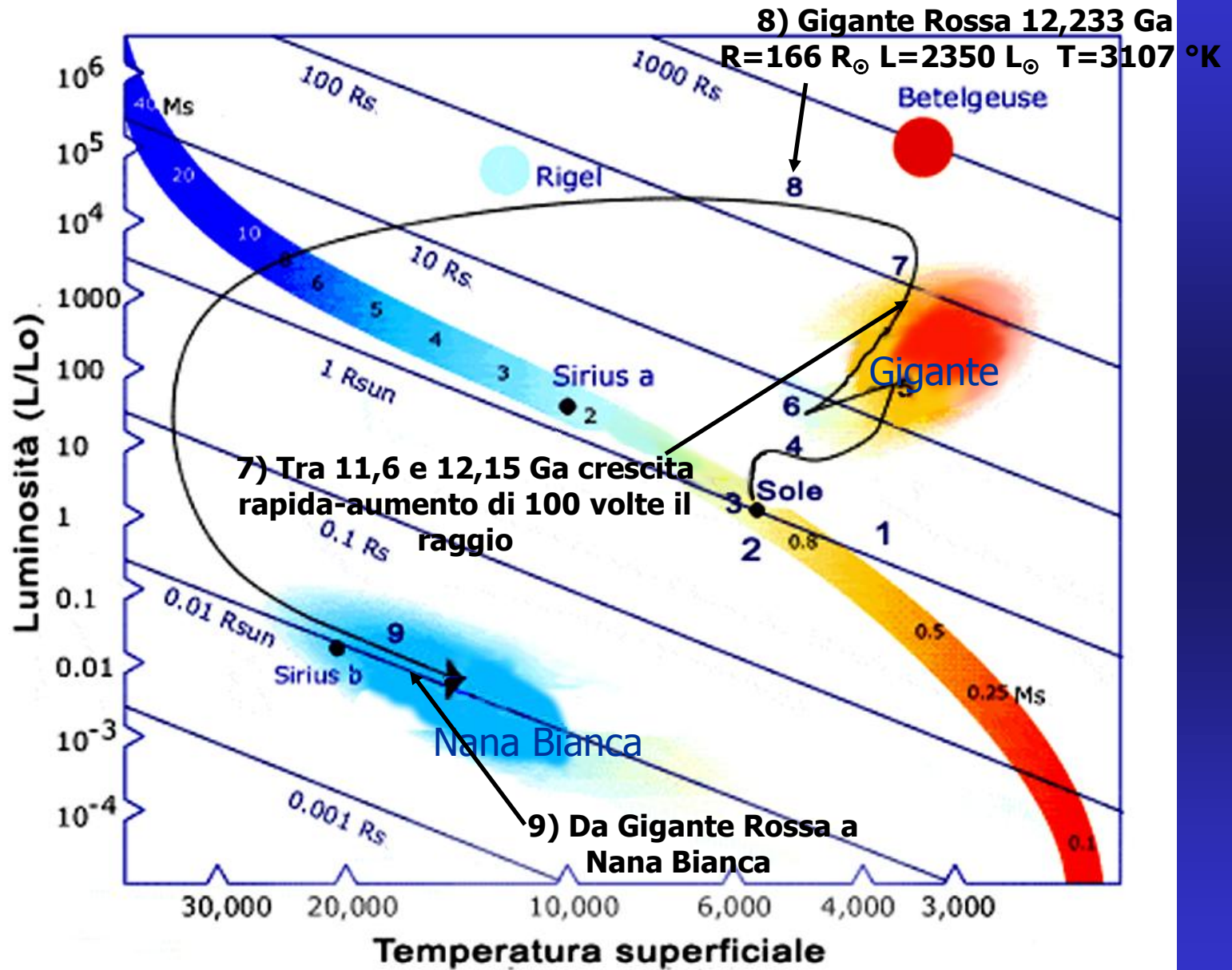
Evoluzione del Sole



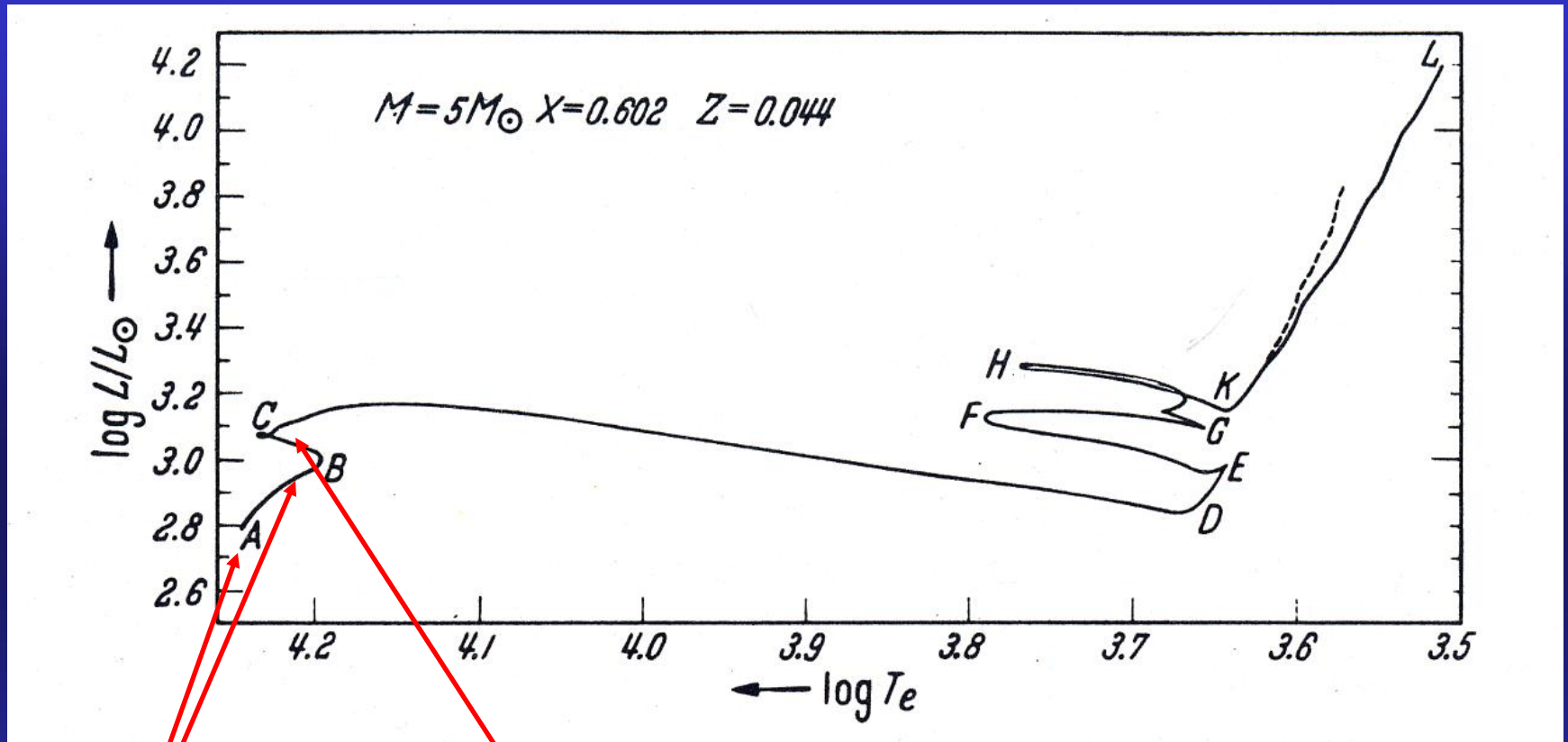
Evoluzione Sole I



Evoluzione Sole II



Evoluzione di una stella di 5 masse solari (I)

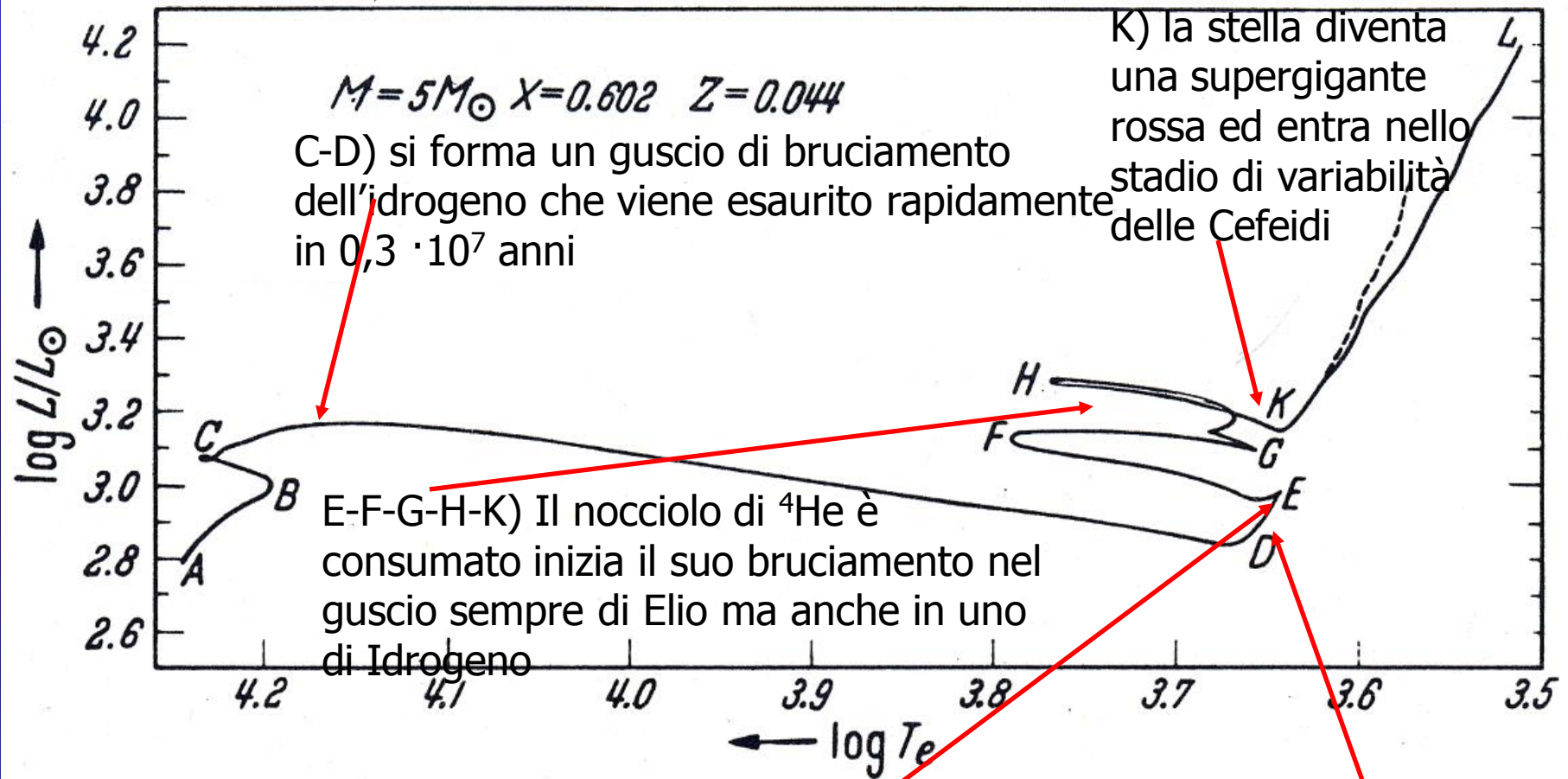


A) $T = 17500 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $R = 2,58 R_{\odot}$ $M_{\text{bol}} = -2,24$ $T_c = 26,4 \cdot 10^6 \text{ }^{\circ}\text{K}$ $P_c = 5,5 \cdot 10^{10} \text{ atm}$

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

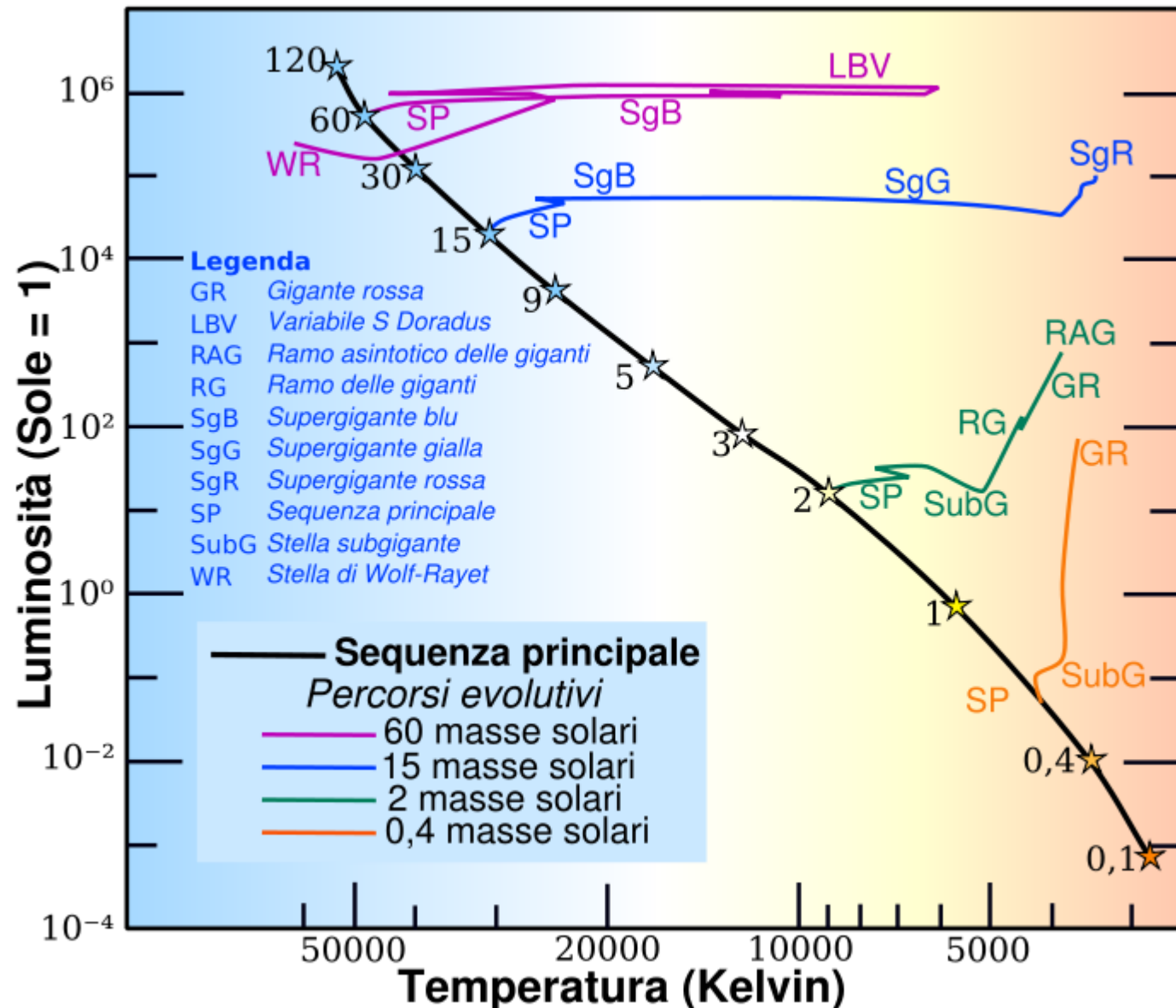
Evoluzione di una stella di 5 masse solari (II)



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

I modelli - sequenza evolutiva delle stelle



Il ciclo di formazione stellare

