



STELLE ED EVOLUZIONE STELLARE 2

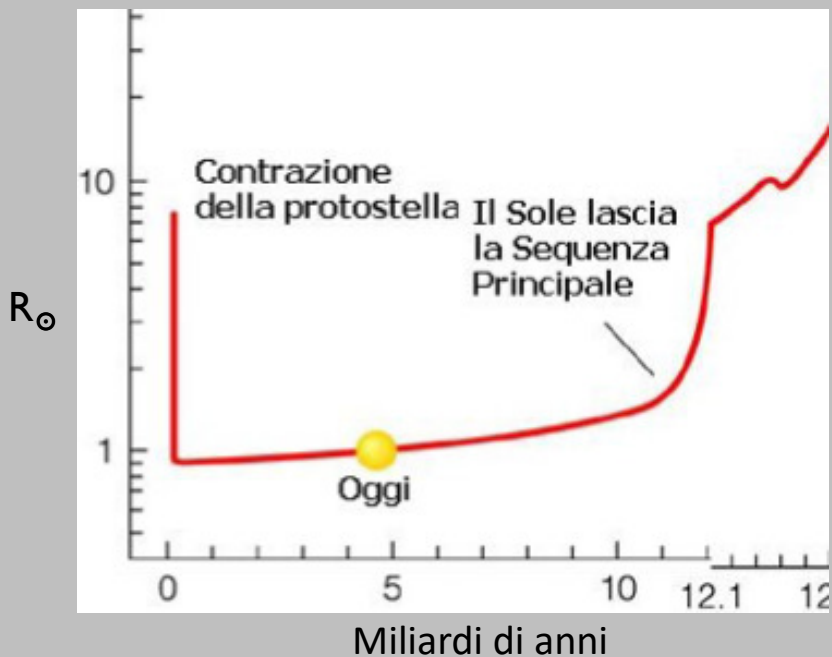
CORSO DI FORMAZIONE DI ASTRONOMIA E ASTROFISICA
PER DOCENTI DI SCUOLA SECONDARIA
ANNO 2019-2020 - CICLO 1

PARAMETRI FONDAMENTALI SULLA SEQUENZA PRINCIPALE

Massa (M_{\odot})	Raggio (R_{\odot})	Luminosità (L_{\odot})	T Superficiale (K)	T centrale (10^6 K)	Densità centrale ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
30	6.6	140'000	44'000	36	3'000
15	4.7	21'000	32'000	34	6'200
9	3.5	4'500	26'000	31	7'900
5	2.2	630	20'000	27	26'000
3	1.7	93	14'000	24	42'000
1.5	1.2	5.4	8'100	19	95'000
1.0	0.87	0.74	5'800	14	89'000
0.5	0.44	0.038	3'900	9.1	78'000

Valori tipici allo Zero Age Main Sequence (ZAMS)

VARIAZIONI DURANTE LA FASE DI SEQUENZA PRINCIPALE



- Durante la vita sulla sequenza principale i parametri della stella variano leggermente.
- Consumando H, diminuisce il numero totale di nuclei atomici e il nucleo si contrae leggermente per gravità.
- Aumentano densità, temperatura centrali e il tasso di reazioni di fusione.
- Aumenta la pressione del nucleo, il raggio e la luminosità della stella aumentano leggermente.
- Per il Sole, raggio e luminosità diventeranno:
 - $R = 1.58 R_{\odot}$
 - $L = 2.2 L_{\odot}$

TEMPO EVOLUTIVO E PERMANENZA SULLA SEQUENZA PRINCIPALE

Massa (M_{\odot})	Permanenza sulla sequenza principale (anni)
30	$4.9 \cdot 10^6$
15	$10 \cdot 10^6$
9	$22 \cdot 10^6$
5	$68 \cdot 10^6$
3	$240 \cdot 10^6$
1.5	$2 \cdot 10^9$
1.0	$10 \cdot 10^9$
0.5	$30 \cdot 10^9$
0.1	10^{13}

- Occupa la maggior parte della vita di una stella: 80% per il Sole.
- La fase di Sequenza Principale termina quando 1/10 della massa del nucleo della stella si è trasformato per fusione dell'Idrogeno in Elio (Tempo evolutivo).
- Il tempo evolutivo t (permanenza sulla sequenza principale) dipende:
 - dall'energia E (massa dell'idrogeno) disponibile;
 - dal tasso di perdita di energia (luminosità L).
- In prima approssimazione:
$$t \propto E/L \propto Mc^2 / M^4 \propto M^{-3}$$

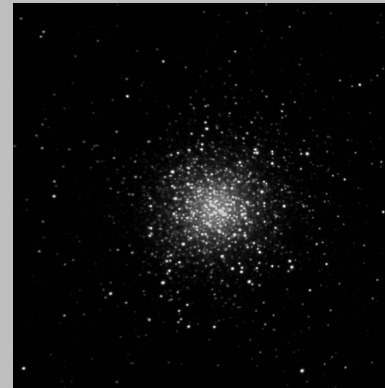
DIAGRAMMI H-R DI AMMASSI STELLARI

- Il fatto che le stelle abbiano diverse vite medie si può anche evidenziare costruendo i diagrammi H-R di ammassi stellari.

	Ammassi Aperti	Ammassi Globulari
Numero di stelle	$10^2 \div 10^3$	10^5
Età	10-100 milioni di anni	10 miliardi di anni
Posizione	sui bracci della galassia	alone galattico
Sistema gravitazionale	instabile	stabile

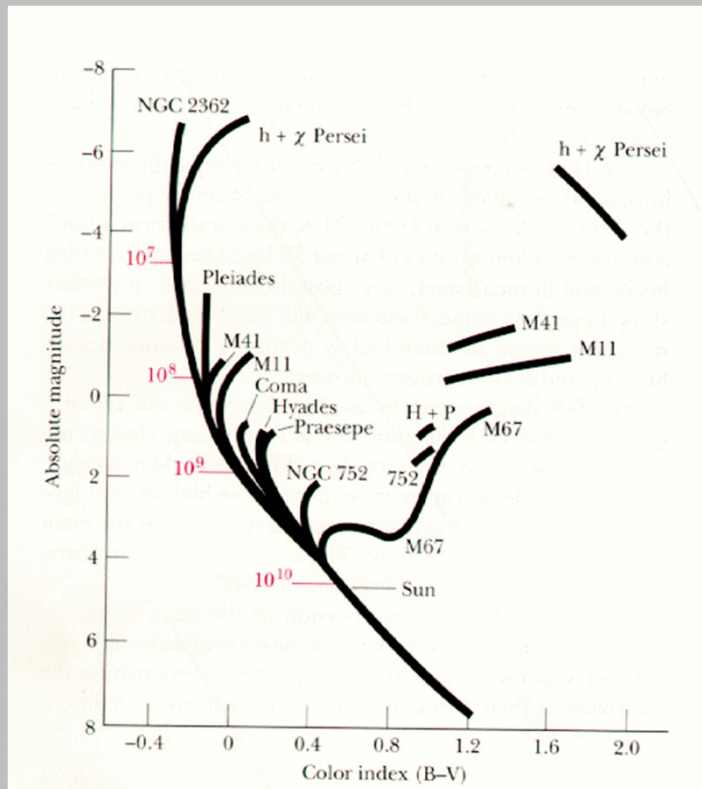


M45 - Esempio di ammasso aperto



M13 - Esempio di ammasso globulare

DIAGRAMMI H-R DI VARI AMMASSI APERTI E M13



Diagrammi H-R di ammassi aperti

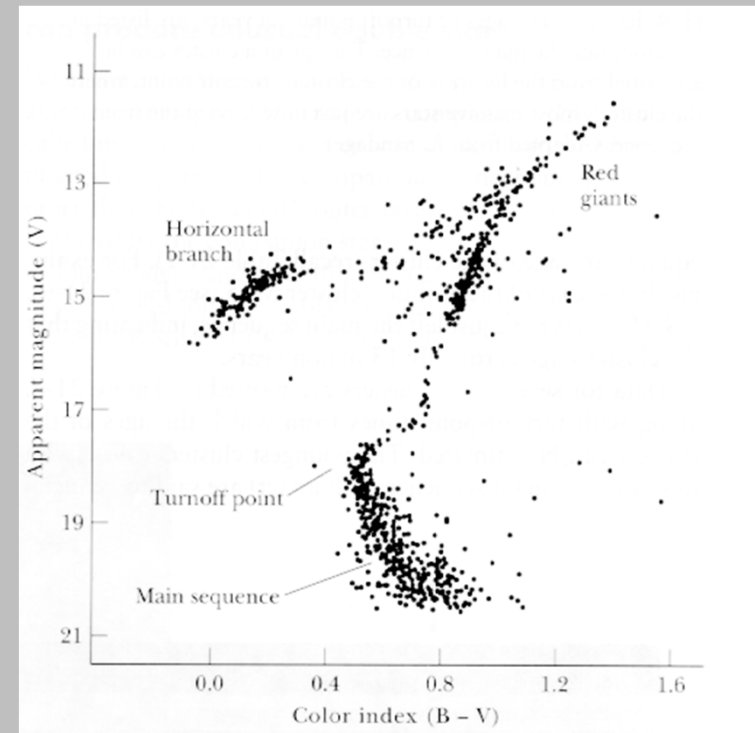
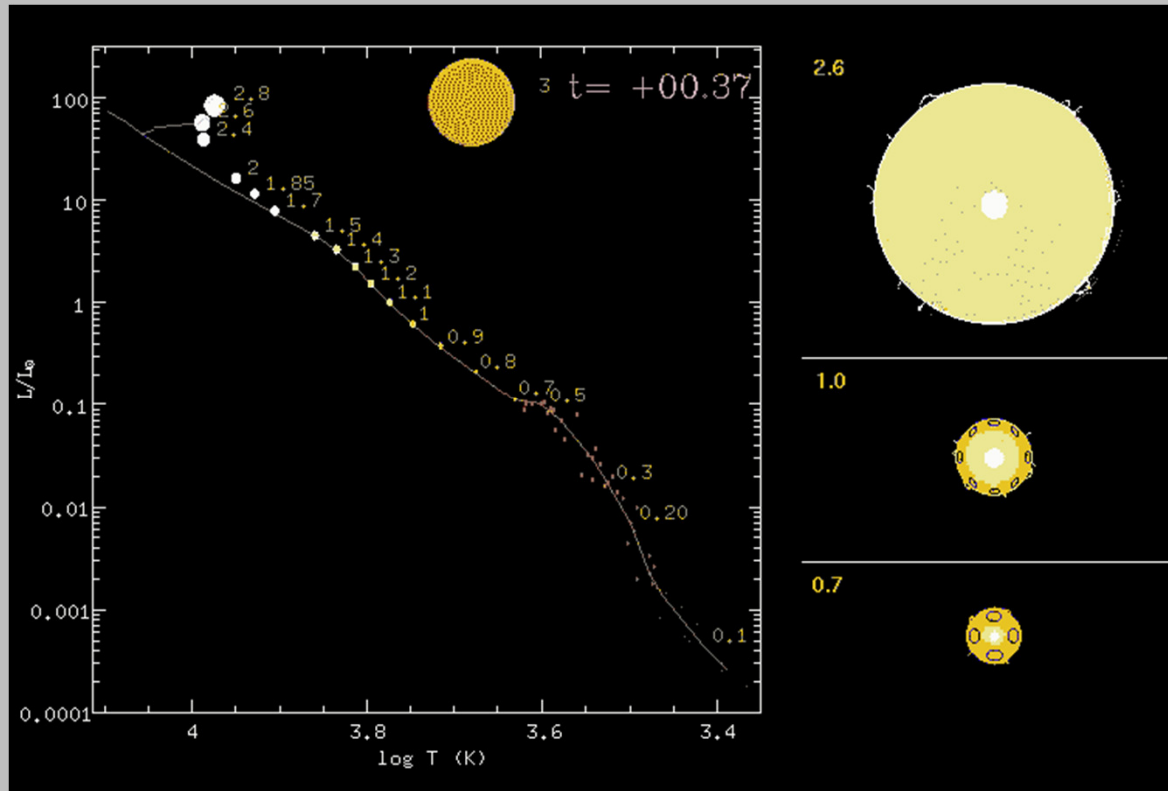


Diagramma H-R ammasso globulare M13

TRACCE EVOLUTIVE NEL DIAGRAMMA H-R



Simulazione del tempo di permanenza sulla sequenza principale

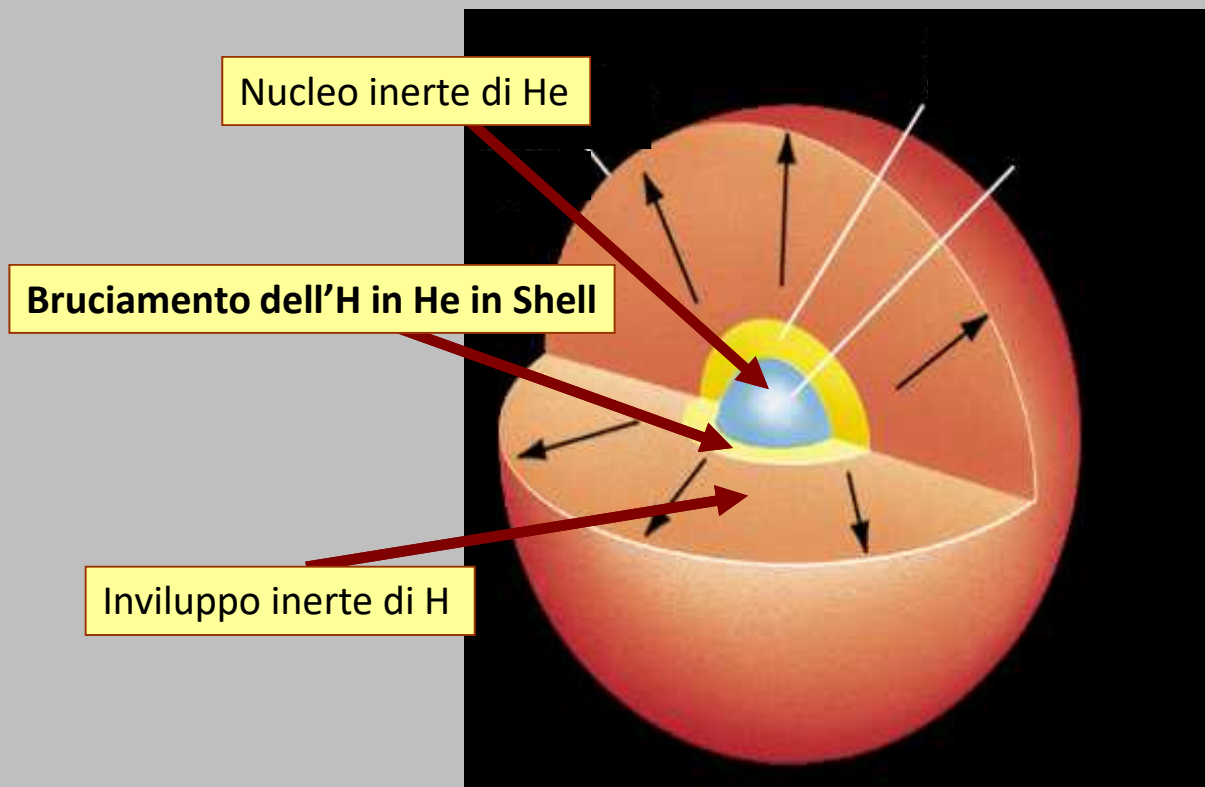
ESPANSIONE IN GIGANTE ROSSA

- Al tempo evolutivo, la fusione dell'idrogeno in elio non è più efficace a contrastare la forza gravitazionale.
- La stella inizia a contrarsi, perché la forza gravitazionale prevale sulla pressione, e il nucleo a riscaldarsi, per trasformazione di energia gravitazionale in energia termica.

$M \leq 0.5 M_{\odot}$	$M > 0.5 M_{\odot}$
La stella non riesce a raggiungere la temperatura centrale sufficiente ad innescare le reazioni di fusione dell'He.	La stella è in grado di raggiungere la temperatura centrale per la fusione dei nuclei di Elio in nuclei di $(100 \cdot 10^6 \text{ K})$.
Termina la sua vita nello stato di Nana Bianca	La stella diventa una Gigante Rossa .

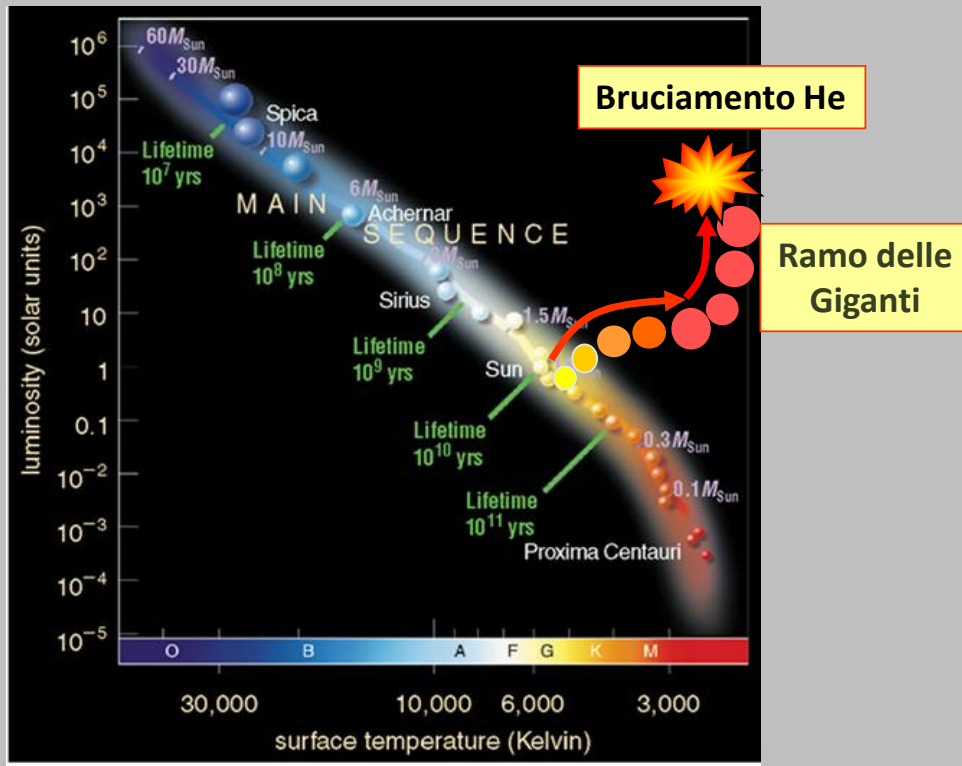
- Il riscaldamento del nucleo, innalza la temperatura degli strati di idrogeno (Shell) che circondano il nucleo 'inerte', ricco di elio.

STRUTTURA DI UNA GIGANTE ROSSA



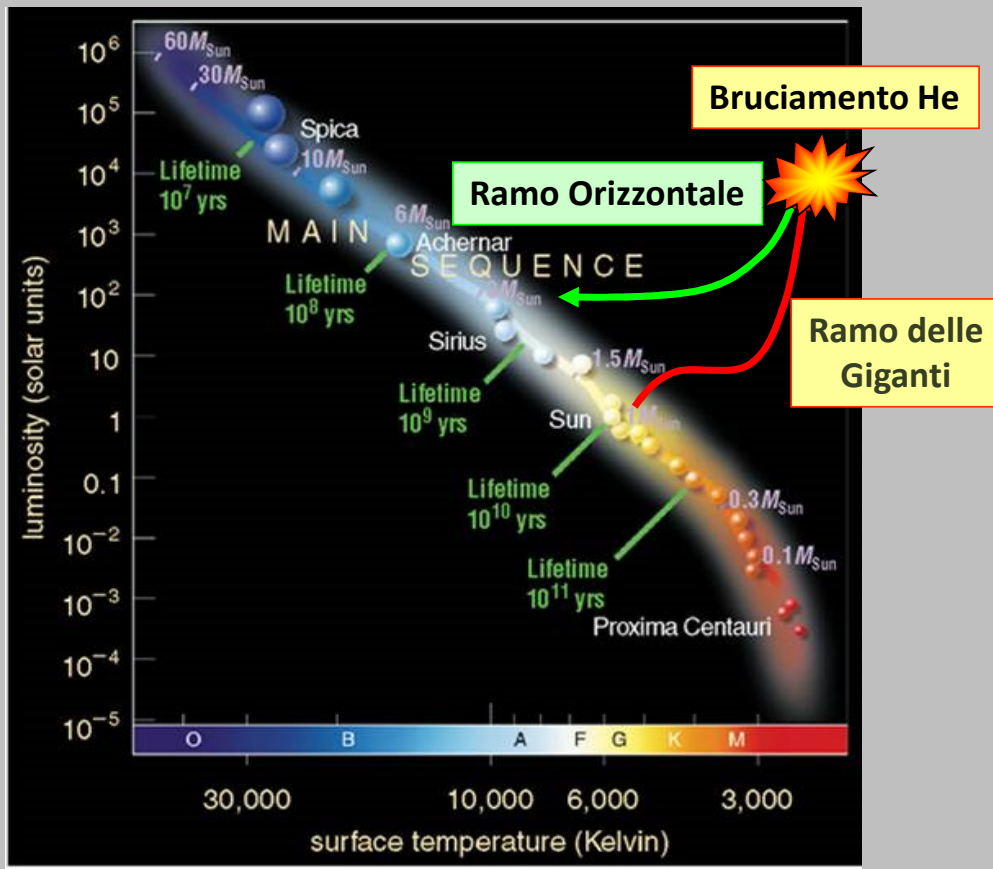
- Un nucleo inerte di He e povero di H.
- Uno strato, esterno al nucleo, nel quale la contrazione gravitazionale ha innalzato la temperatura e avviato la combustione di H (H shell burning).
- Un involucro esterno ricco di H.
- Il nucleo continua a contrarsi, scaldarsi ed aumentare di massa.
- La shell di H continua a spostarsi verso l'esterno.
- La stella aumenta continuamente il suo raggio.
- La temperatura superficiale della stella diminuisce.

PERMANENZA LUNGO IL RAMO DELLE GIGANTI



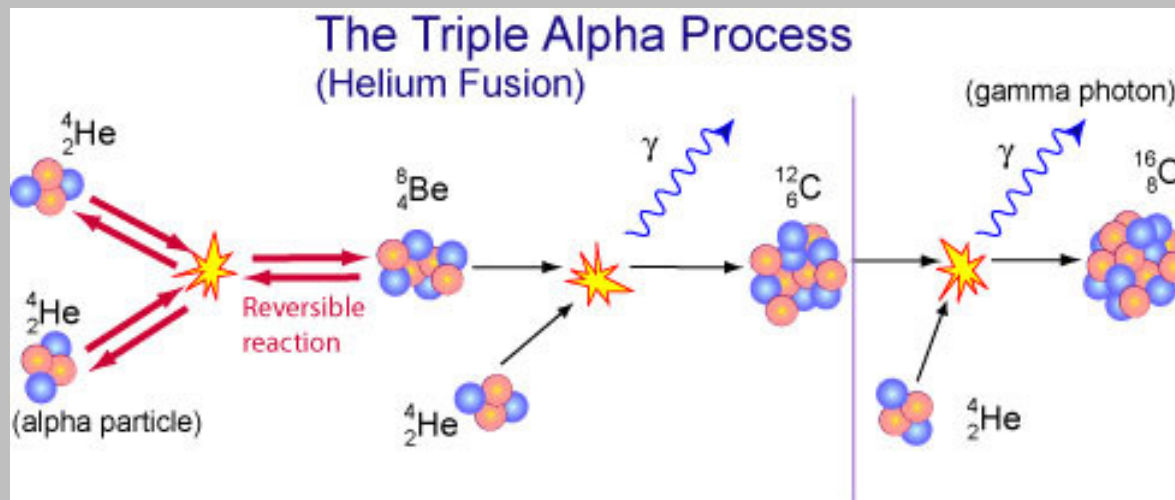
M_{\odot}	Dalla Sequenza al Ramo delle Giganti (10^6 anni)	Permanenza nel Ramo delle Giganti (10^6 anni)
30	0.55	0.3
15	1.7	2
9	0.2	5
5	2	20
3	9	80
1.5	280	0
1.0	680	0

IL BRUCIAMENTO DELL'ELIO E IL RAMO ORIZZONTALE DELLE GIGANTI



- Quando la stella innesca le fusioni dell'elio, lascia il Ramo delle Giganti e si sposta a temperature più alte e luminosità più basse e brucia l'He sul cosiddetto **Ramo Orizzontale**.
- Per stelle di piccola massa ($< 2-3 M_{\odot}$), la fusione iniziale dell'He può non essere graduale e avvenire all'improvviso (Helium Flash).
- Al picco dell'Helium Flash, per pochi secondi, la stella può emettere un'energia da 10^{11} a 10^{14} volte la luminosità solare.
- Al termine dell'Helium Flash, il nucleo si stabilizza e le reazioni di fusione dell'He avvengono con un tasso costante.

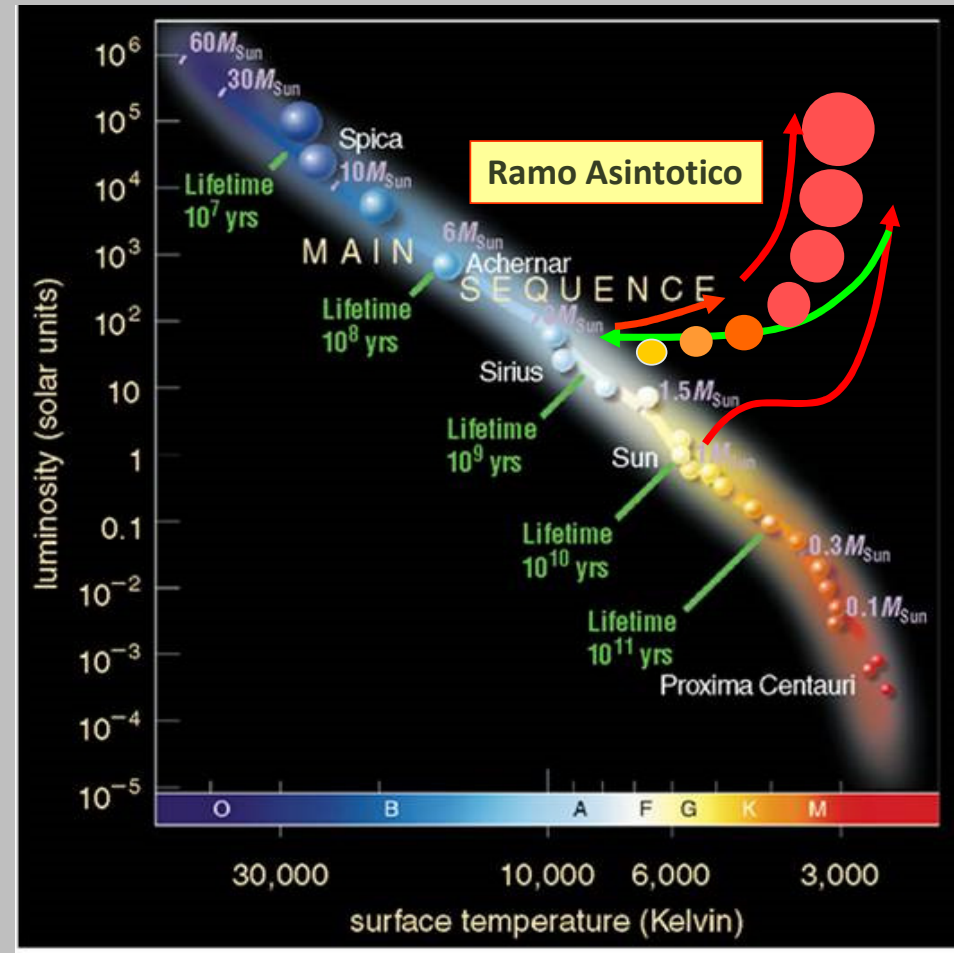
FUSIONE 3-ALFA



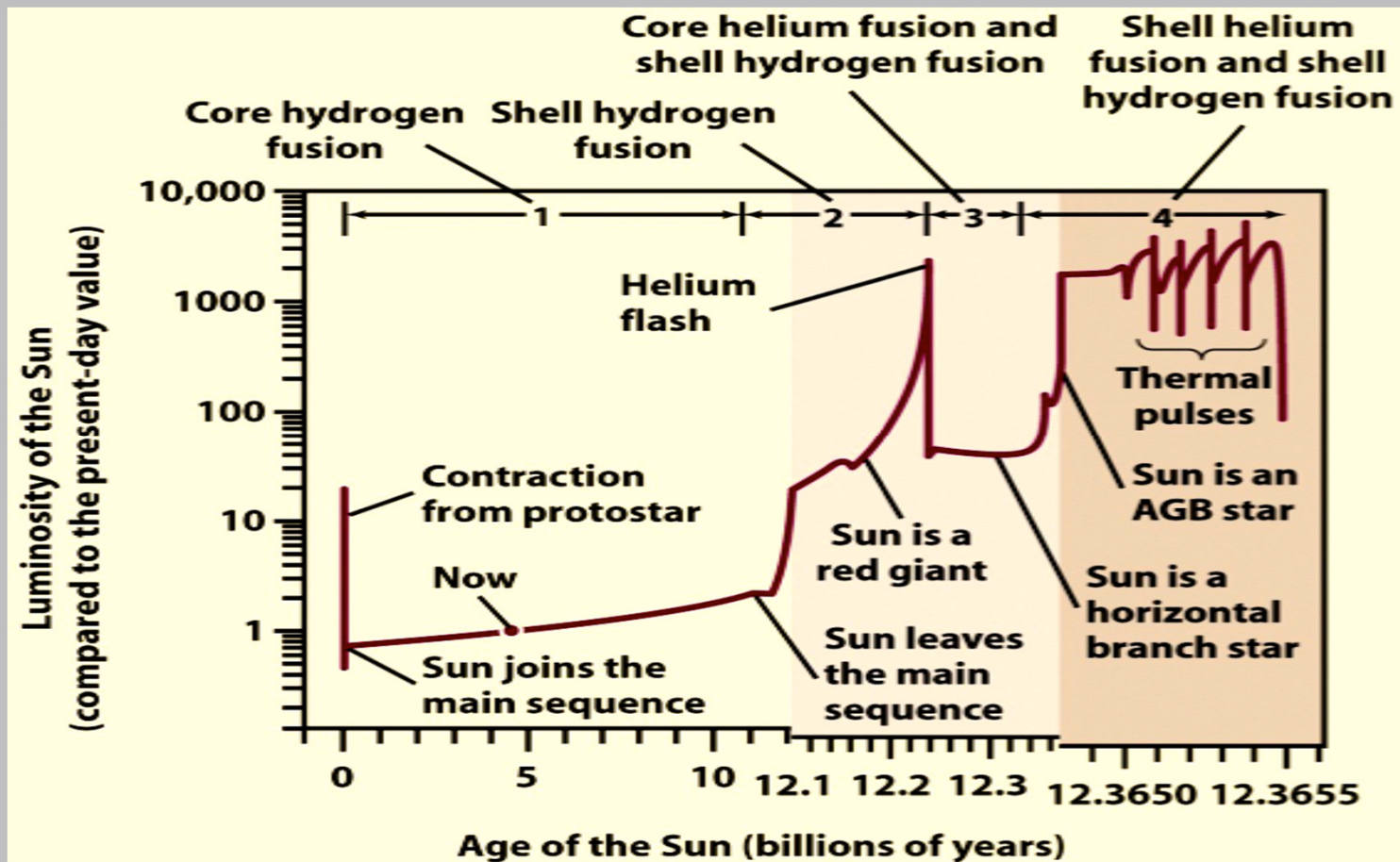
Per stelle come il Sole la fusione dell'He ha una durata di circa 100 milioni di anni.

IL RAMO ASINTOTICO

- Quando l'He comincia ad esaurirsi nel nucleo la stella lascia il Ramo Orizzontale e si sposta nuovamente verso temperature più basse per risalire lungo il Ramo Asintotico.
- Le stelle con massa iniziale $< 5M_{\odot}$ non sono in grado di innescare il bruciamento del ^{12}C .
- In generale, le stelle con massa iniziale $< 8M_{\odot}$, rilasciano l'involuppo esterno.
- Si forma una **Nebulosa Planetaria** e il nucleo centrale si trova allo stato di **Nana Bianca**.

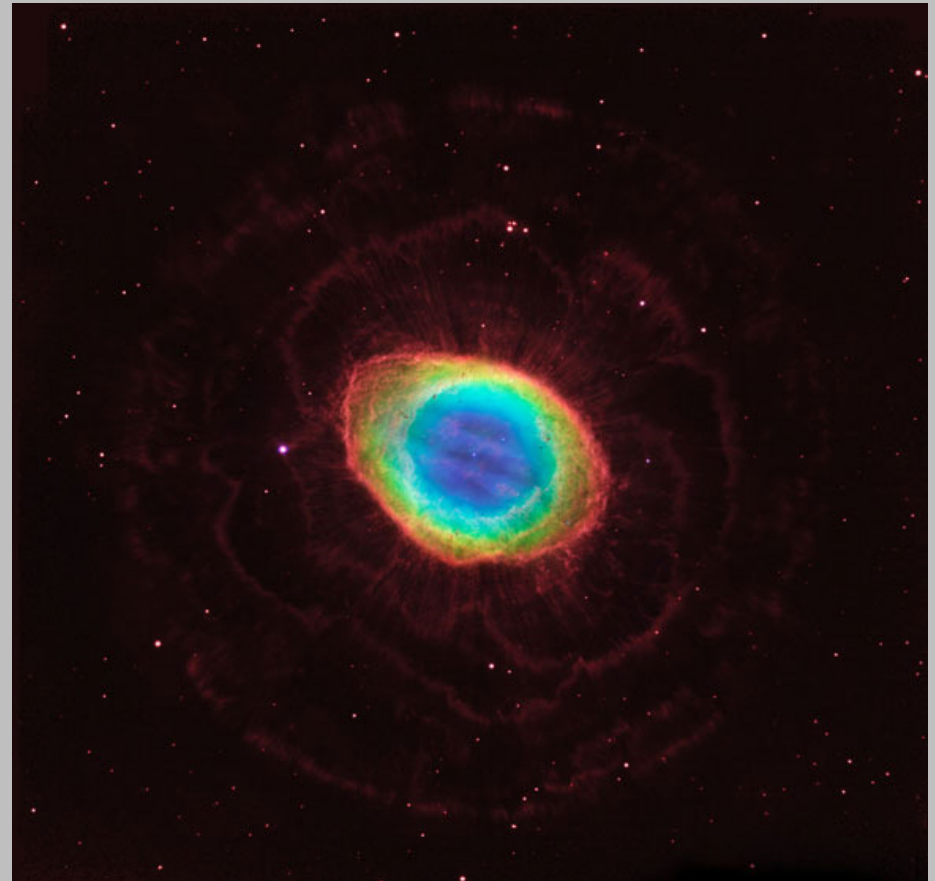


ESEMPIO: LE FASI EVOLUTIVE DEL SOLE



ESEMPIO DI NEBULOSA PLANETARIA

- Raggio: 1.3 anni luce
- Inizio espansione: 4'000 anni fa.
- Durata dell'espansione: 15'000 anni
- Espansione anello: 70'000 km/h

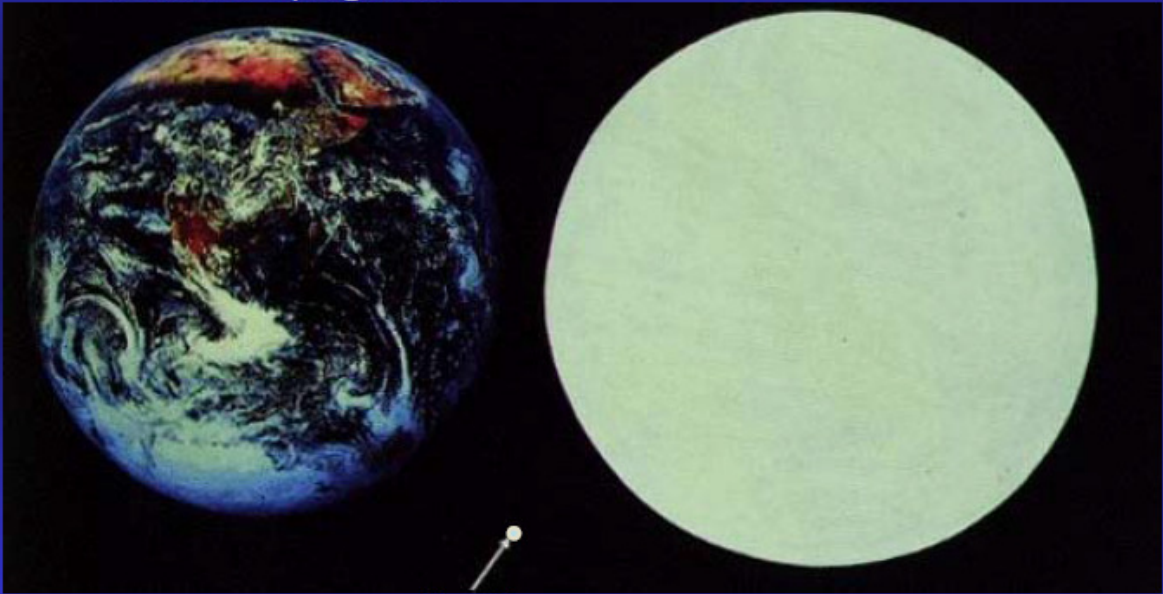


M 57 - 2300 anni luce

NANE BIANCHE

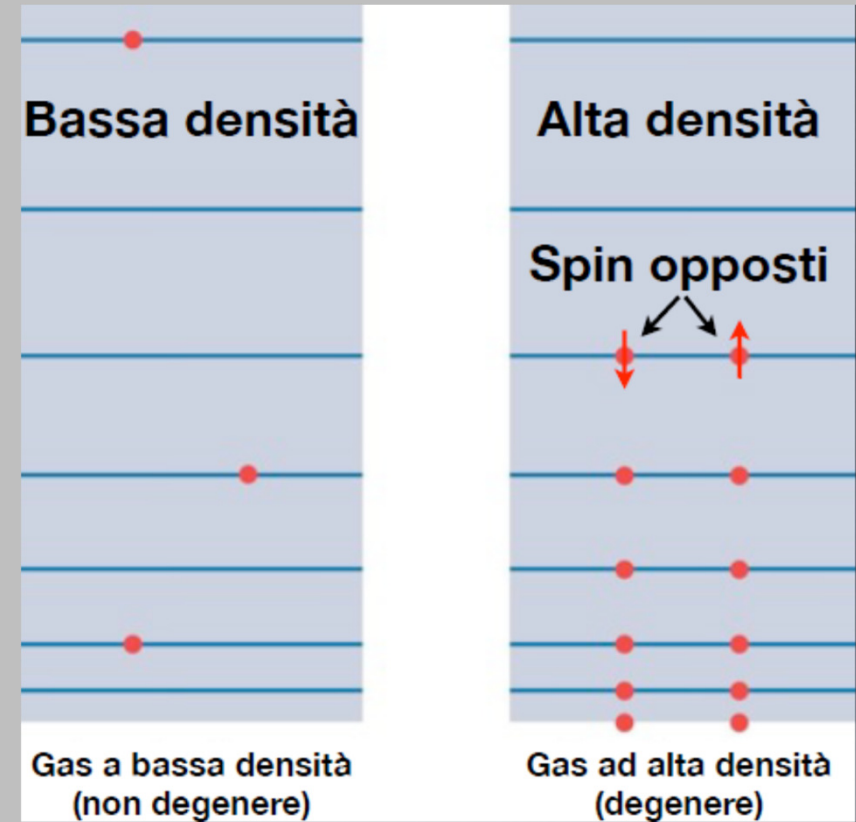
Terra
Densità: $5,4 \text{ gr/cm}^3$

Nana Bianca
Densità: 10^6 gr/cm^3



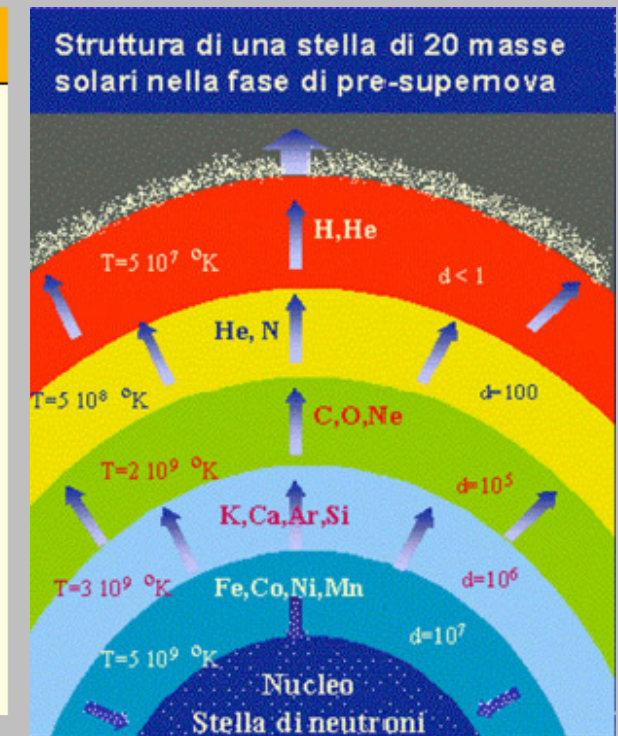
Stella di Neutroni
Densità: 10^{15} gr/cm^3

The image shows three celestial bodies side-by-side for comparison. On the left is Earth, showing continents and oceans. In the middle is a large, pale green sphere representing a white dwarf. On the right is a tiny white dot representing a neutron star, with a thin white line pointing to it from the text below.



LE FASI EVOLUTIVE SUCCESSIVE ALLA FUSIONE DEL CARBONIO


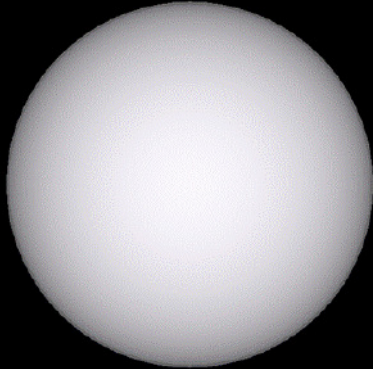
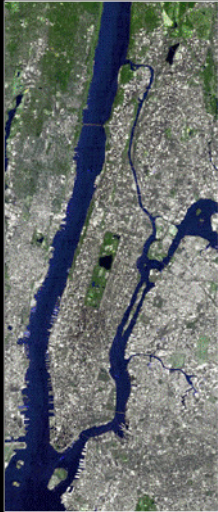
Stage	Core temperature (K)	Core density (kg/m ³)	Duration of stage
Hydrogen fusion	4×10^7	5×10^3	7×10^6 years
Helium fusion	2×10^8	7×10^5	7×10^5 years
Carbon fusion	6×10^8	2×10^8	600 years
Neon fusion	1.2×10^9	4×10^9	1 year
Oxygen fusion	1.5×10^9	10^{10}	6 months
Silicon fusion	2.7×10^9	3×10^{10}	1 day
Core collapse	5.4×10^9	3×10^{12}	1/4 second
Core bounce	2.3×10^{10}	4×10^{15}	milliseconds
Explosive (supernova)	about 10^9	varies	10 seconds



SUPERNOVAE, STELLE DI NEUTRONI E BUCHI NERI



Stelle di neutroni e buchi neri

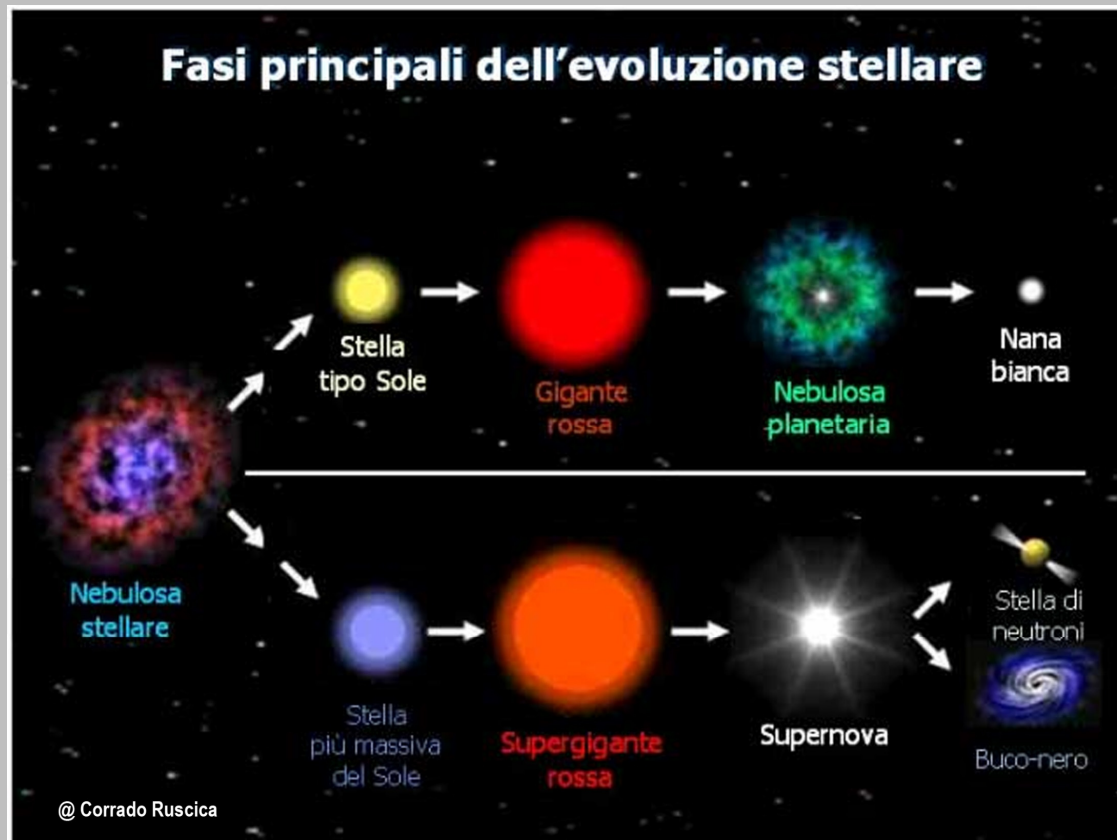


Manhattan
(spaceimaging.com)

Stella di Neutroni
M=1.5 Ms
R=10 km
Densità: 10^{15} gr/cm³

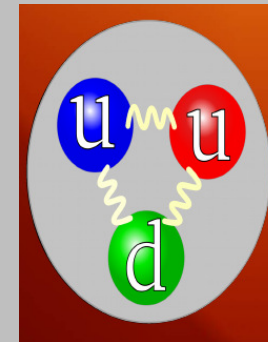
Buco Nero
M=1.5 Ms
R=4.5 km

RIASSUNTO DELLE FASI DELL'EVOLUZIONE STELLARE

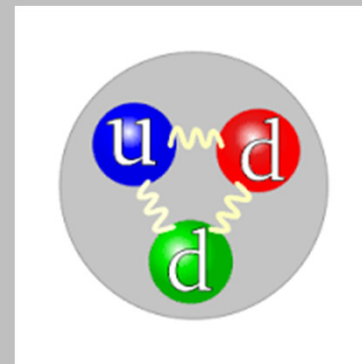


PARTICELLE ELEMENTARI E QUARK

	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z^0 Z boson
Leptons	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W^\pm W boson
				Gauge Bosons

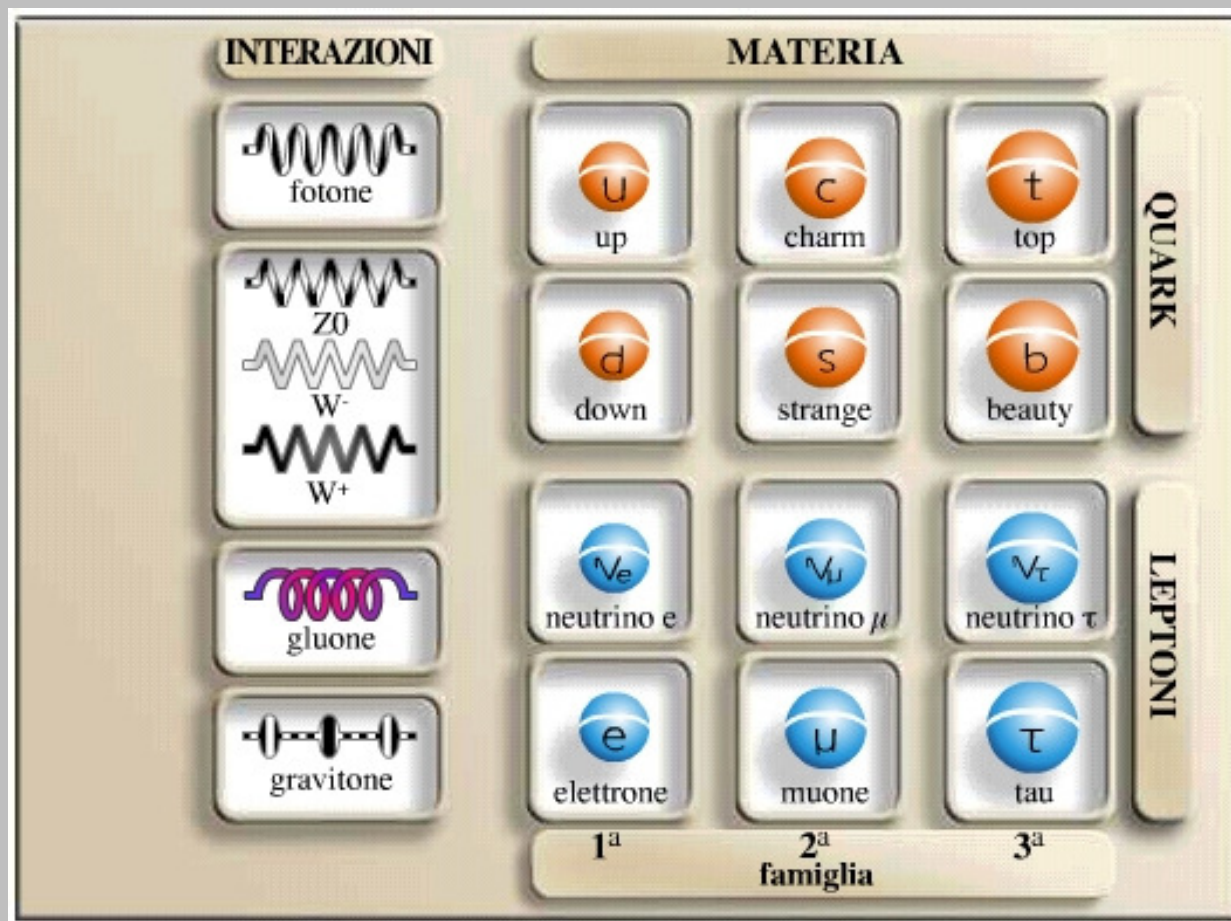


Protone



Neutrone

MATERIA E FORZE FONDAMENTALI



MATERIA STRANA E STELLE DI QUARK

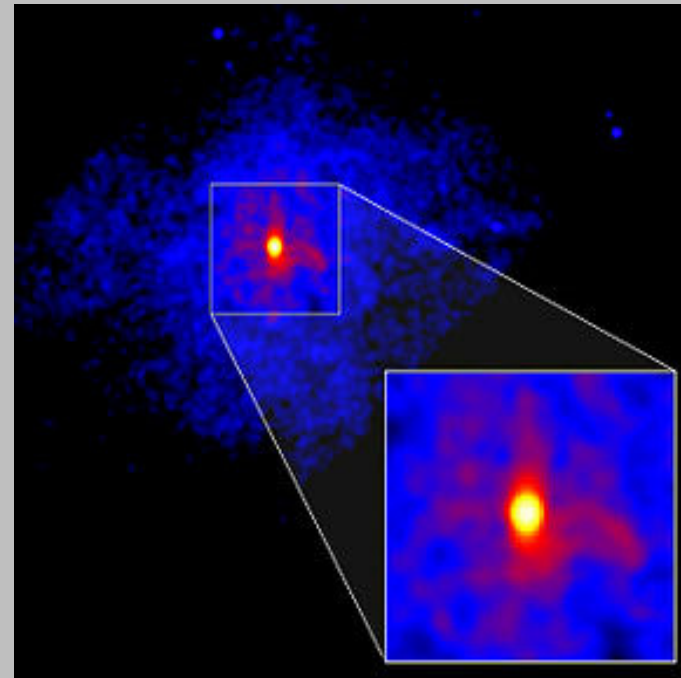
In condizioni estreme, per esempio all'interno di una stella di neutroni:

- Temperatura = 10^{12} K;
- Densità e pressioni elevate.

Si ipotizza sia possibile separare i quark dai gluoni, creando un plasma di Quark e Gluoni (materia strana).

Una stella di quark si trova al confine tra una stella di neutroni ed un buco nero.

Candidati ad essere stelle di quark sono RX J185635-3754 e 3C58, precedentemente considerate stelle di neutroni.



CARATTERISTICHE DI UNA STELLA DI QUARK

Dimensioni inferiori rispetto alle normali stelle di neutroni.

Elevata frequenza di rotazione pur mantenendo la stabilità del sistema rispetto alla tendenza a disgregarsi.

Emissioni oltre il limite di Eddington (luminosità massima sostenibile da una stella in equilibrio idrostatico).

