Nucleosintesi nell'Universo

Francesco L. Villante
Universita' dell'Aquila and INFN-LNGS

Composizione chimica dell'Universo

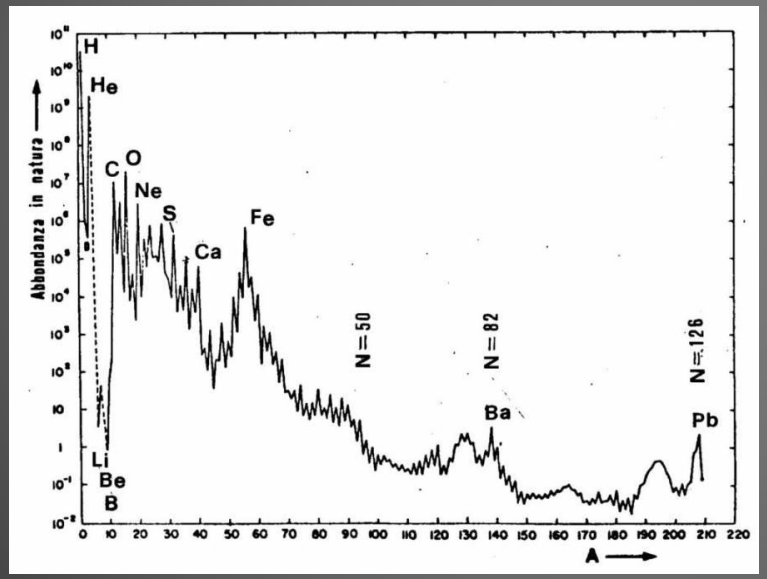
L'Universo e' prevalentemente composto da idrogeno e elio-4

$$\frac{M(H)}{M_{tot}} \simeq 75\%$$

$$\frac{M(\,^4He)}{M_{tot}} \simeq 25\%$$

gli altri elementi sono presenti con piccole abbondanze

Log_Abundance



N.B. La composizione chimica della Terra non e' rappresentativa dell'intero Universo

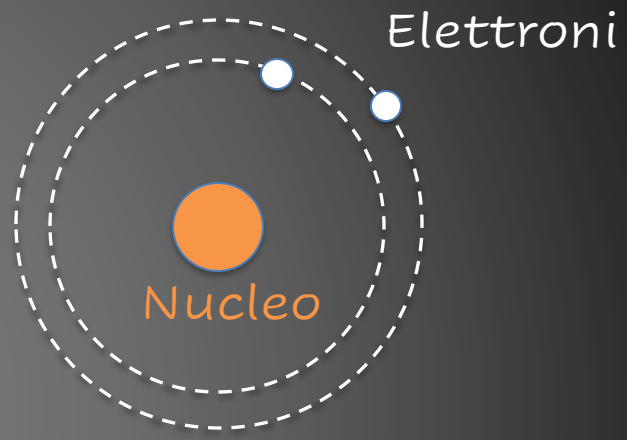
Come/dove sono stati sintetizzati i nuclei che compongono oggi l'Universo?

Outline

- ✓ Cenni di Fisica Nucleare
- ✓ La nucleosintesi primordiale
- ✓ Nucleosintesi nelle stelle

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Nucleo
Contiene quasi tutta la massa dell'atomo
Occupa un volume trascurabile dell'atomo
Composto da nucleoni (protoni e neutroni)



p = carica positiva
n = carica neutra

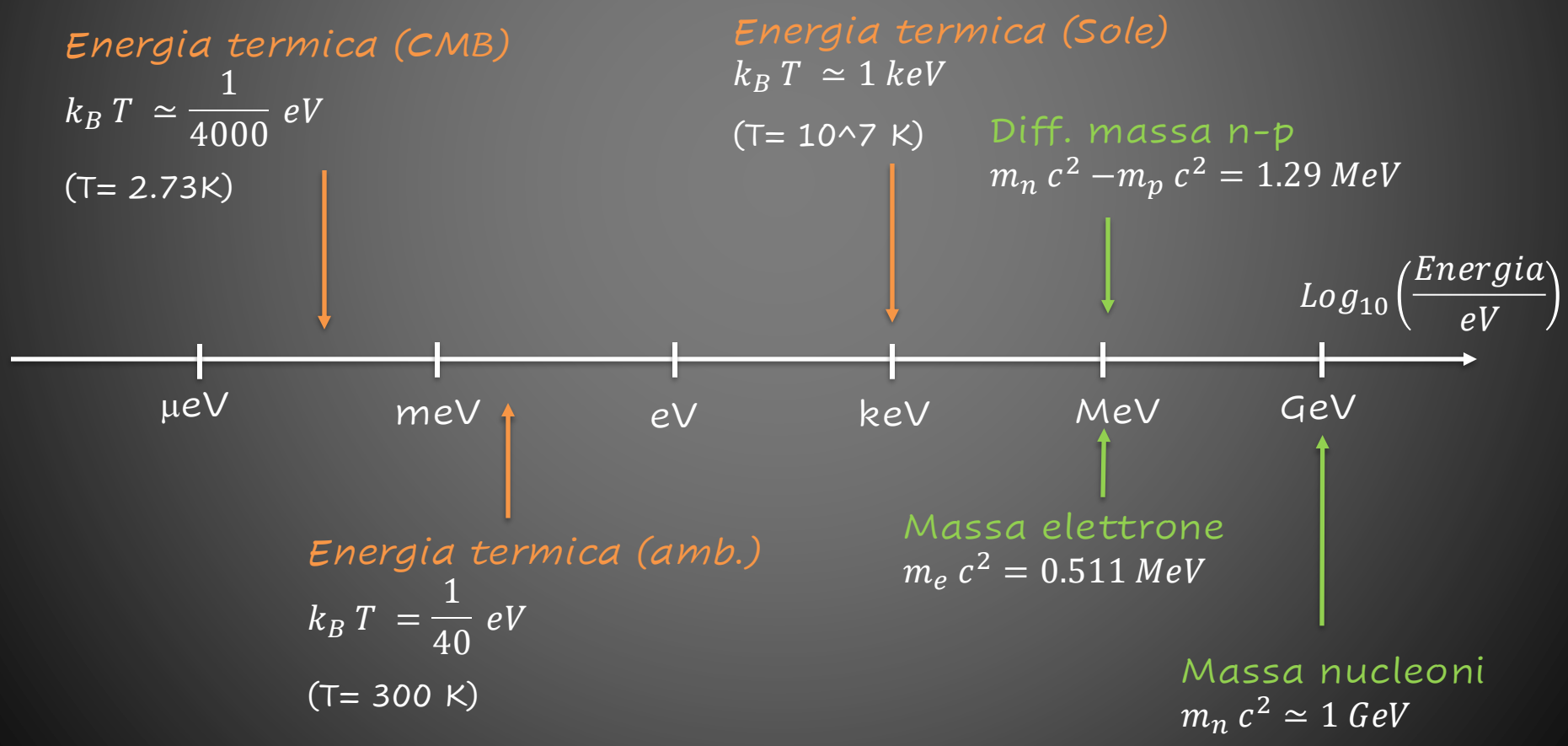
$$m_p \approx m_n \approx 2000\, m_e \approx \frac{1\mathrm{GeV}}{c^2}$$

$$m_n - m_p = 1.29 \frac{MeV}{c^2} > 0$$

$$R_{atomo} \approx 1\, Angstrom = 10^{-10}\, m$$

$$R_{nucleo} \approx (1\, fm)\, A^{\frac{1}{3}} \quad = (10^{-15}\, m)\; A^{\frac{1}{3}}$$

Scale di energia



Scale di energia

Fisica "atomica" ~ $1\ eV$
$B(H) = 13.6\ eV$

Energia termica (CMB)
$k_B\,T \simeq \frac{1}{4000}\ eV$
(T= 2.73K)

Energia termica (Sole)
$k_B\,T \simeq 1\ keV$
(T= 10^7 K)

Diff. massa n-p
$m_n\,c^2 - m_p\,c^2 = 1.29\ MeV$

$Log_{10}\left(\frac{Energia}{eV}\right)$

μeV | meV | eV | keV | MeV | GeV

Energia termica (amb.)
$k_B\,T = \frac{1}{40}\ eV$
(T= 300 K)

Massa elettrone
$m_e\,c^2 = 0.511\ MeV$

Massa nucleoni
$m_n\,c^2 \simeq 1\ GeV$

Scale di energia

Fisica "atomica" ~ 1 eV
$B(H) = 13.6\ eV$

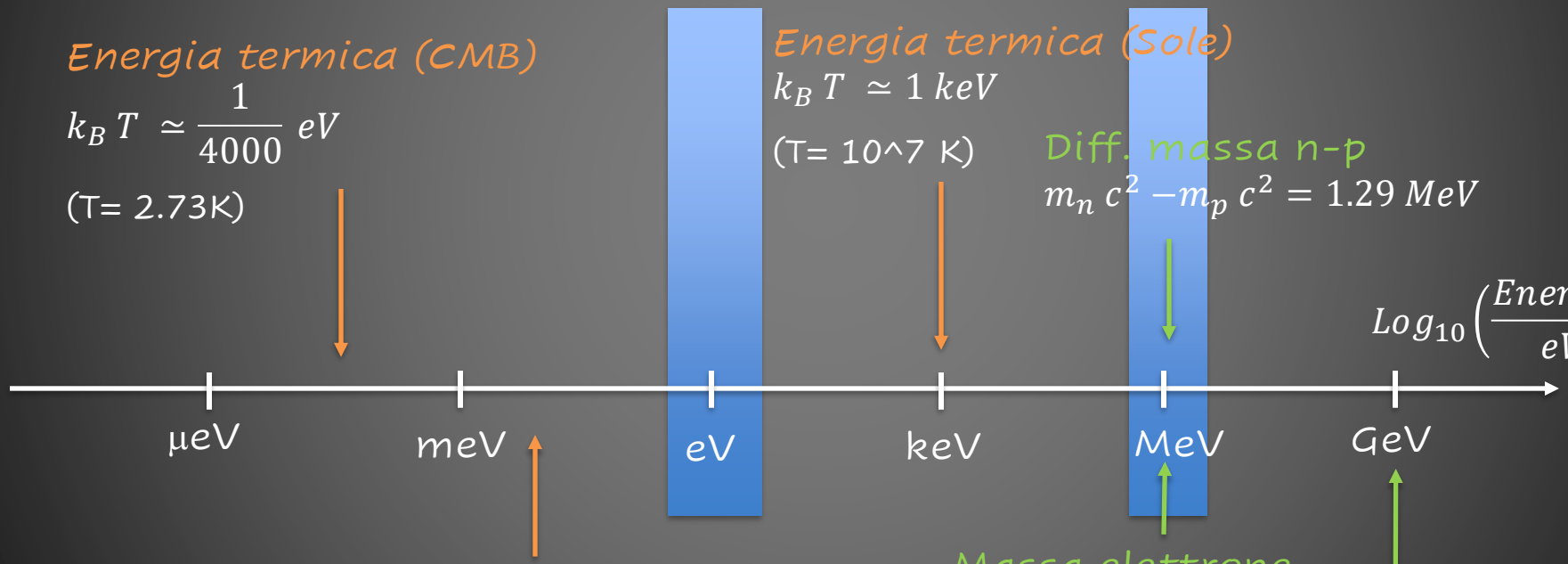
Fisica "nucleare" ~ 1 MeV
$\frac{B(A)}{A} = few\ MeV$

Energia termica (CMB)
$k_B\,T \simeq \frac{1}{4000}\ eV$
(T= 2.73K)

Energia termica (Sole)
$k_B\,T \simeq 1\ keV$
(T= 10^7 K)

Diff. massa n-p
$m_n\,c^2 - m_p\,c^2 = 1.29\ MeV$

$Log_{10}\left(\frac{Energia}{eV}\right)$



Energia termica (amb.)
$k_B\,T = \frac{1}{40}\ eV$
(T= 300 K)

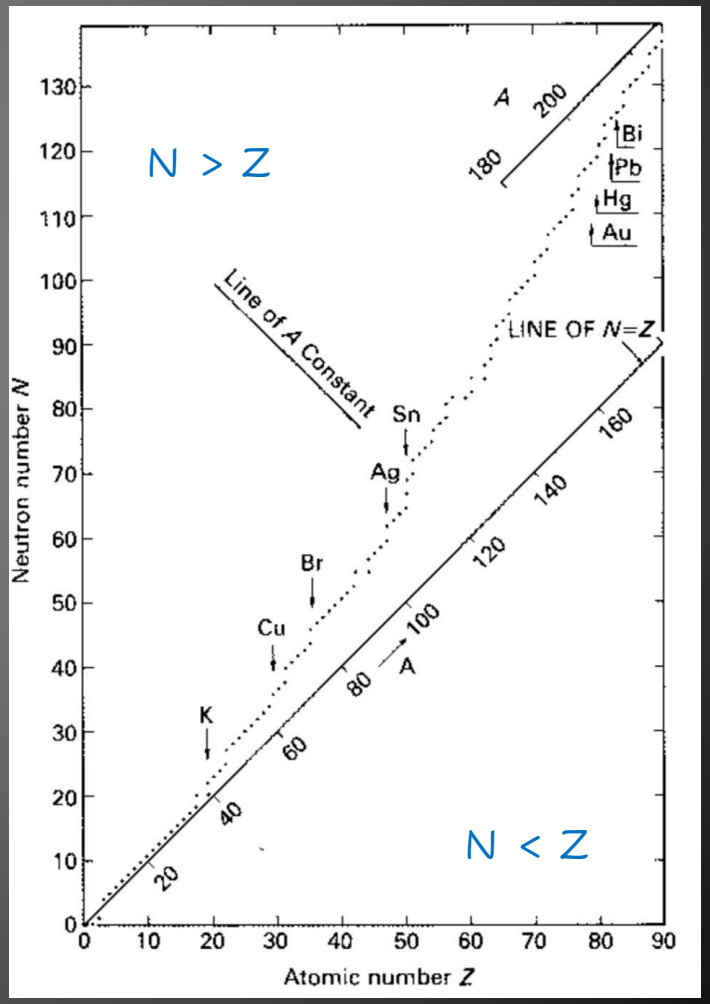
Massa elettrone
$m_e\,c^2 = 0.511\ MeV$

Massa nucleoni
$m_n\,c^2 \simeq 1\ GeV$

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Z = Numero atomico = Numero di protoni
A = Numero di massa = Numero di nucleoni
N = A – Z = Numero di neutroni

Nuclei stabili (A = dispari)



"Valle" di stabilita'
I nuclei stabili si dispongono lungo una sequenza nel piano (Z,N). Per i nuclei leggeri:

$$Z \approx N$$

Le interazioni forti non "distinguono" tra neutroni e protoni

$$V_{pp} \approx V_{nn} \approx V_{pn}$$ Simm. Isospin

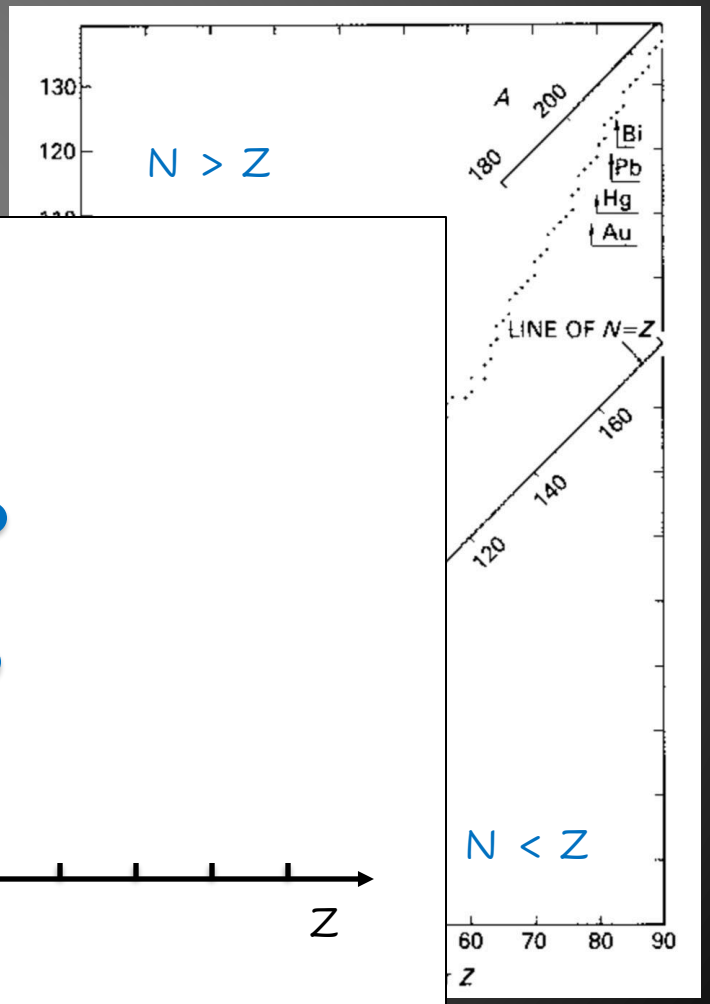
Possono avvenire trasformazioni tra neutroni e protoni (int. deboli)

$$p \leftrightarrow n$$

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Z = Numero atomico = Numero di protoni
A = Numero di massa = Numero di nucleoni
N = A – Z = Numero di neutroni

Nuclei stabili (A = dispari)

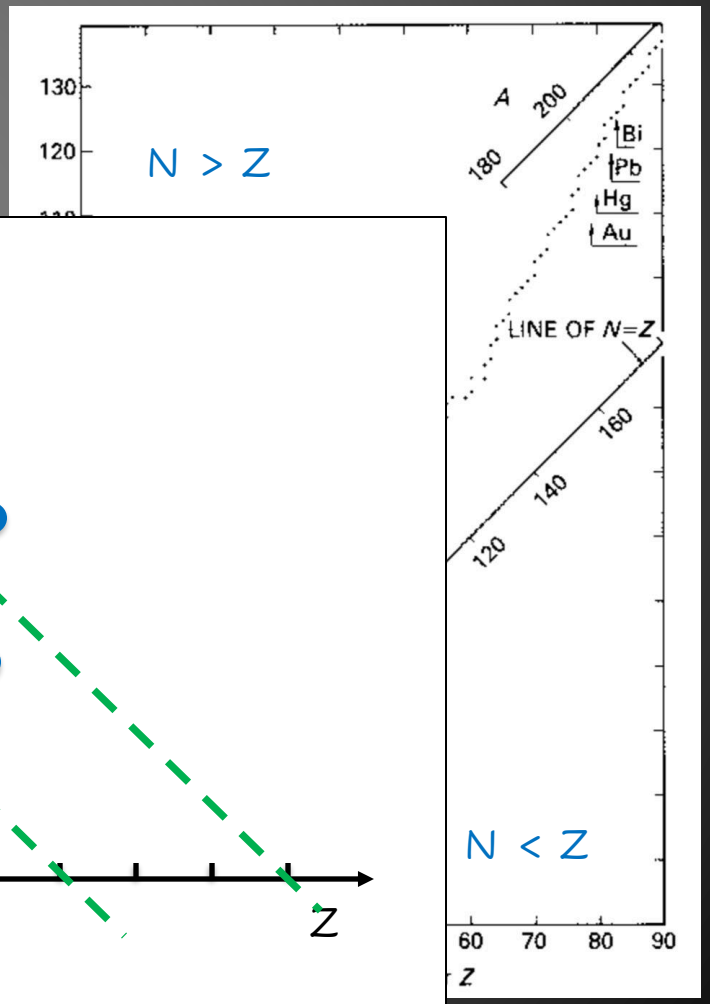


Nuclei leggeri

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Z = Numero atomico = Numero di protoni
A = Numero di massa = Numero di nucleoni
N = A – Z = Numero di neutroni

Nuclei stabili (A = dispari)



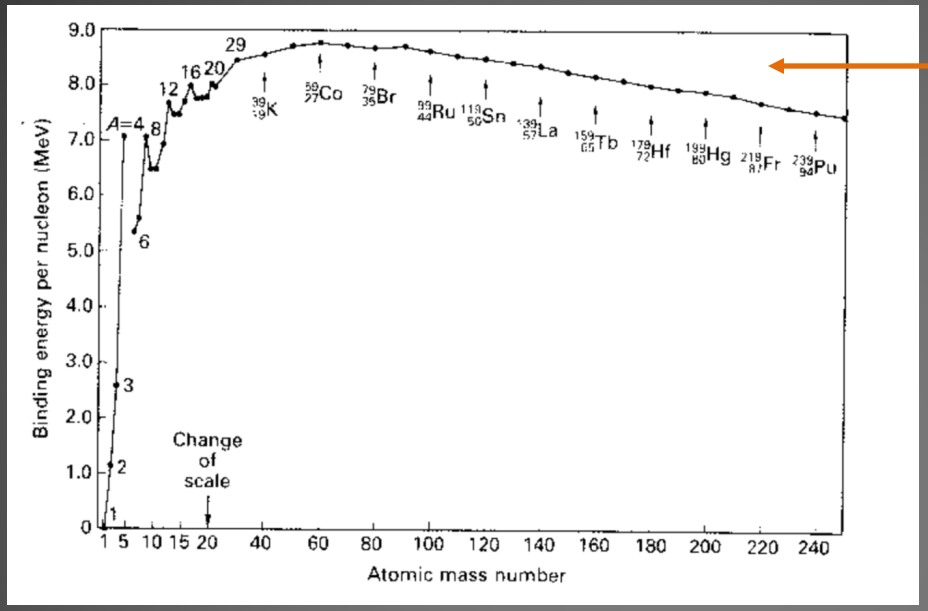
Nuclei leggeri

Non esistono nuclei stabili per:

A=5
A=8

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Energia di legame per nucleone



Le interazioni forti tra nucleoni sono a "corto raggio"

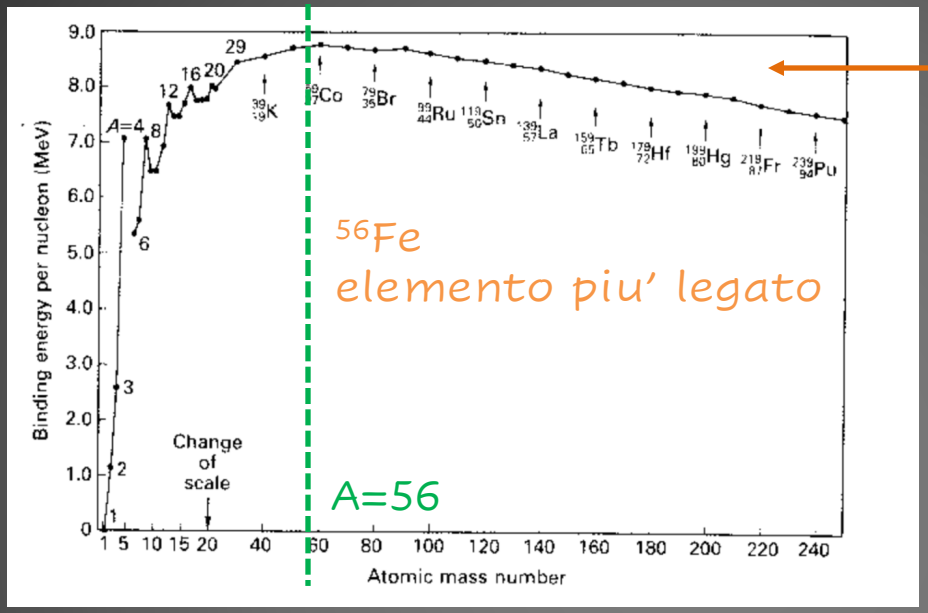
-> sono dominanti solo a distanze minori di $\simeq 1\, fm$

$$\epsilon(A) \equiv \frac{B}{A} \simeq few \frac{MeV}{nucleon}$$

$B = Energia\ di\ legame$

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Energia di legame per nucleone



Le interazioni forti tra nucleoni sono a "corto raggio"

-> sono dominanti solo a distanze minori di $\simeq 1\, fm$

$$\epsilon(A) \equiv \frac{B}{A} \simeq few \frac{MeV}{nucleon}$$

$B = Energia\ di\ legame$

Processi esoenergetici (liberano energia):

Nuclei leggeri

$$(Z_1, A_1) + (Z, A_2) \rightarrow (Z_1 + Z_2, A_1 + A_2)$$

Fusione nucleare

Nuclei pesanti

$$(Z_1 + Z_2, A_1 + A_2) \rightarrow (Z_1, A_1) + (Z, A_2)$$

Fissione nucleare

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Perche' gli elementi leggeri non fondono spontaneamente?

Le int. forti sono "a corto raggio"

Per reagire, i nuclei devono avvicinarsi a distanze $\simeq 1\,fm$

→ I nuclei sono carichi positivamente

→ La repulsione Coulombiana impedisce ai nuclei di avvicinarsi

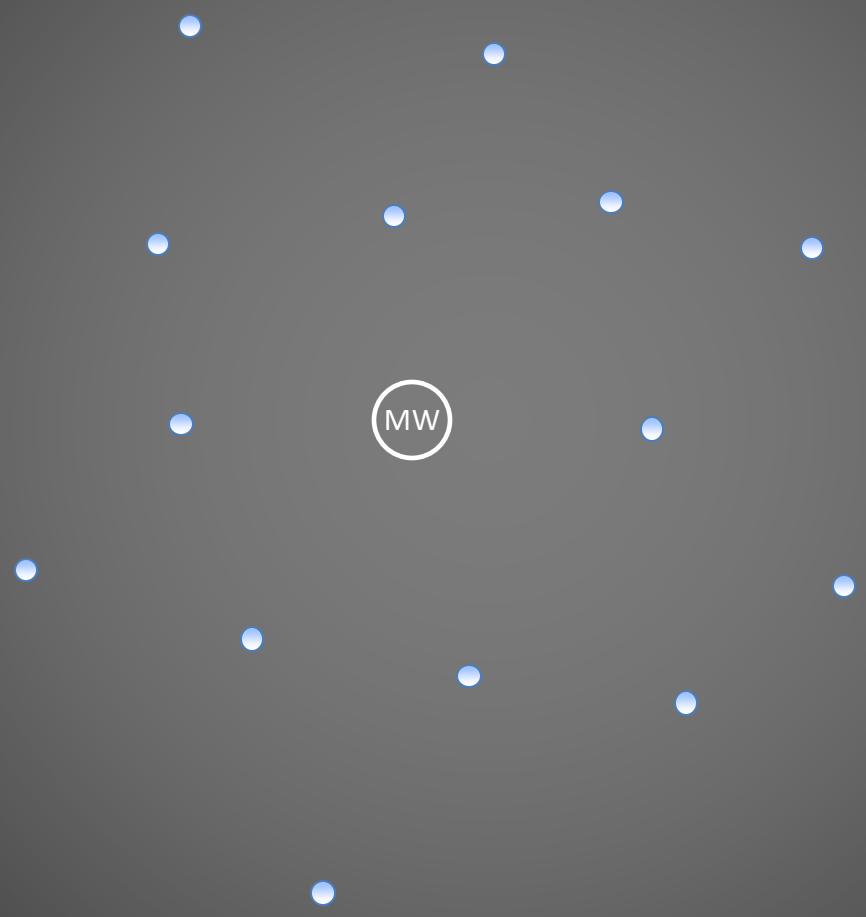
$$\mathrm{V_{Coul}} \simeq 1.4\,MeV\,\frac{Z_1 Z_2}{(r/1fm)}$$

Notare:
nell'Universo non ci sono neutroni liberi:
- I neutroni sono instabili e decadono in $\tau \simeq 10\,min$

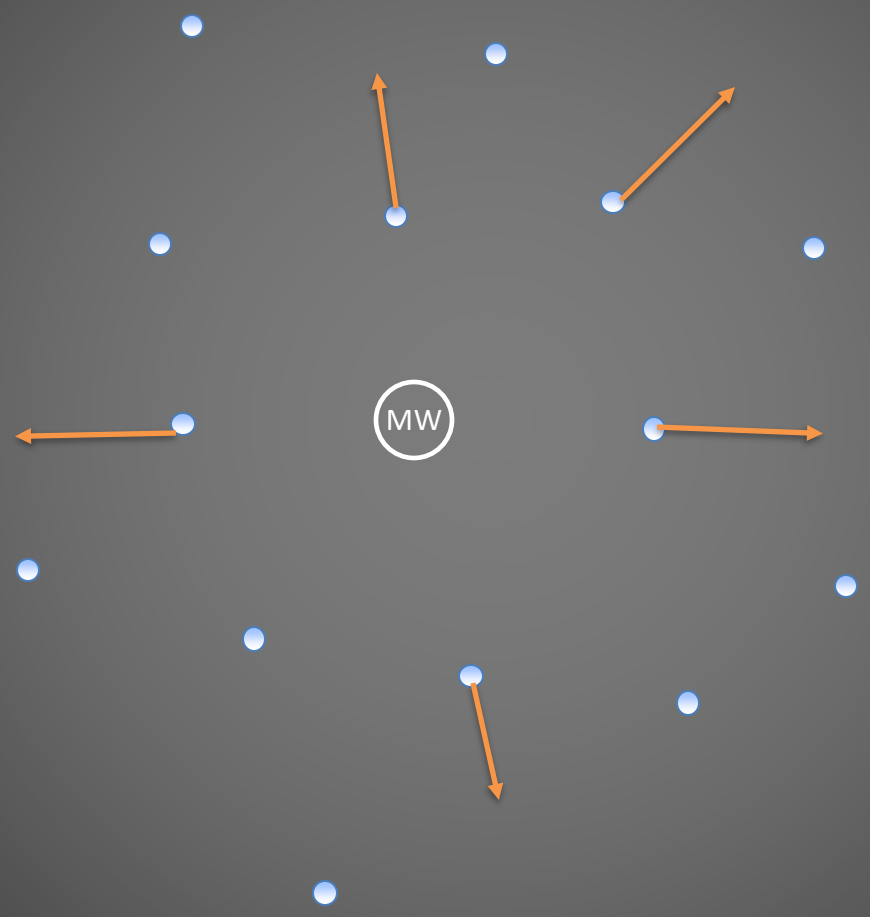
$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu_e}$$

La nuclesintesi primordiale

Espansione dell'Universo



Espansione dell'Universo



Le altre galassie si allontanano da noi
(misure di Redshift)

Espansione dell'Universo

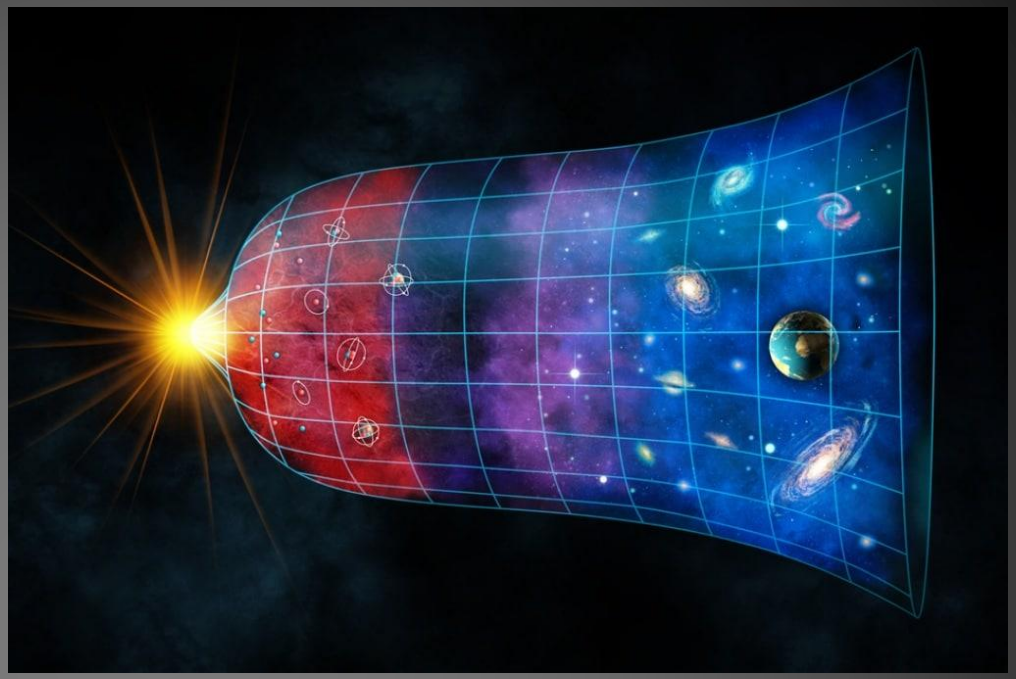
Espansione dell'Universo

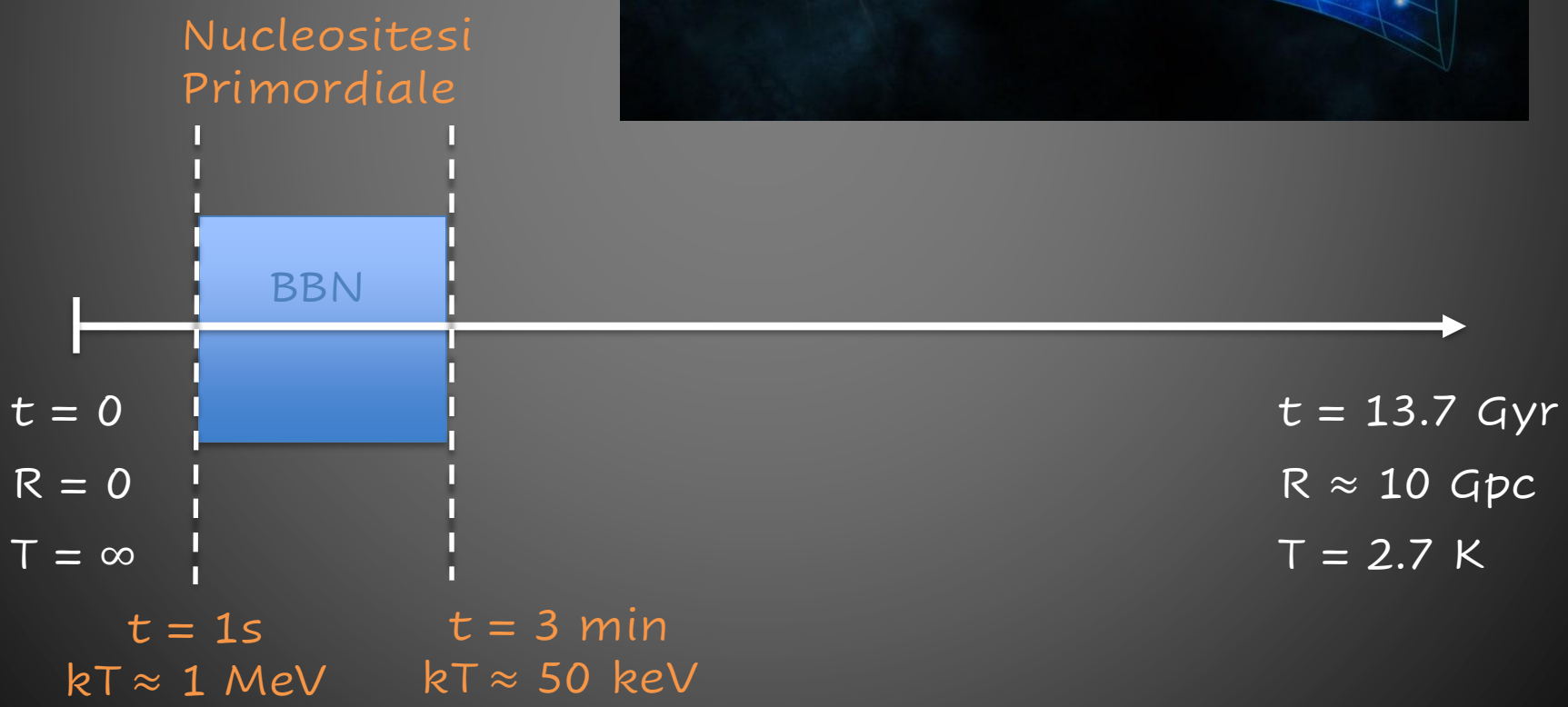
Legge di Hubble:
la velocita' di allontanamento e' proporzionale alla distanza

$$v = H_0 \, d$$

Il Big Bang

- Nell' Universo primordiale le temperature sono talmente alte che i nuclei non sono legati



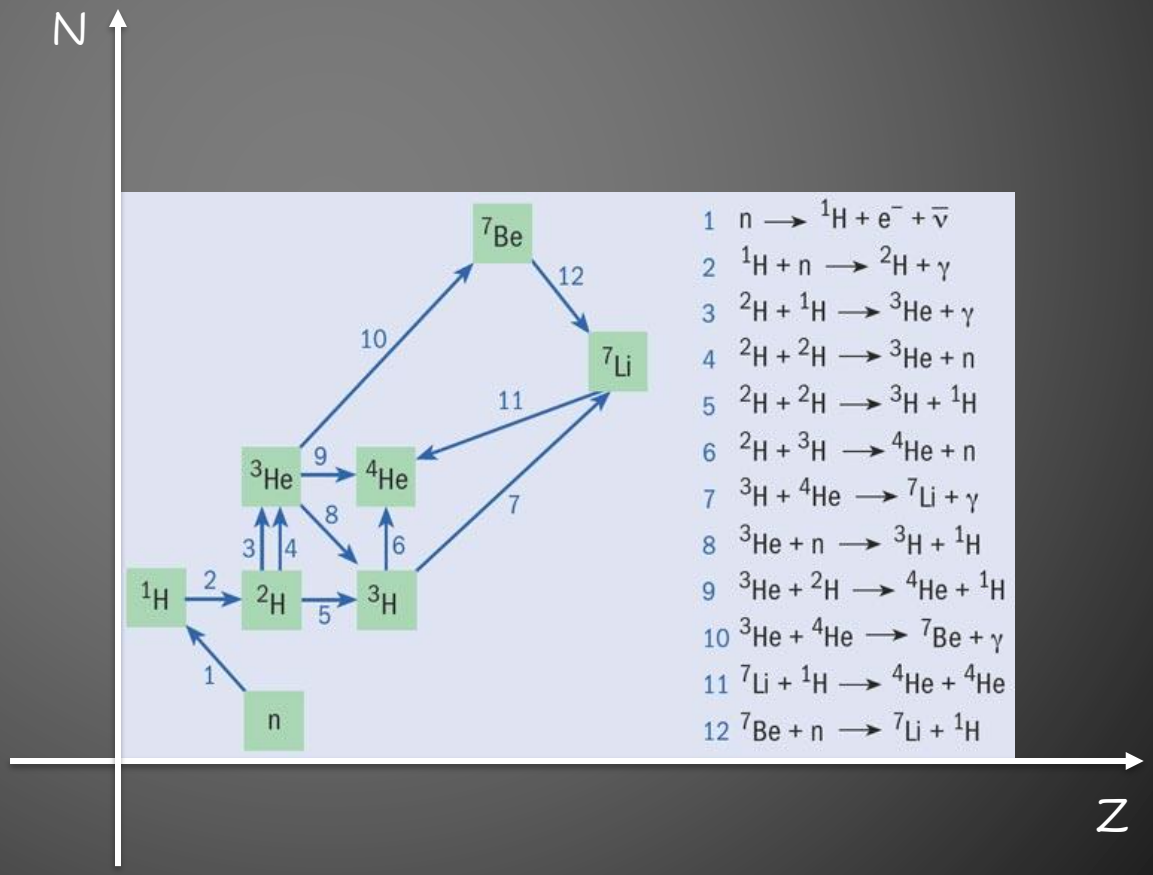


La nucleosintesi primordiale

I nuclei leggeri vengono sintetizzati durante i primi 3 minuti attraverso una rete di reazioni nucleari

Notare

- Una frazione di neutroni sopravvive fino all'inizio della nuclesintesi

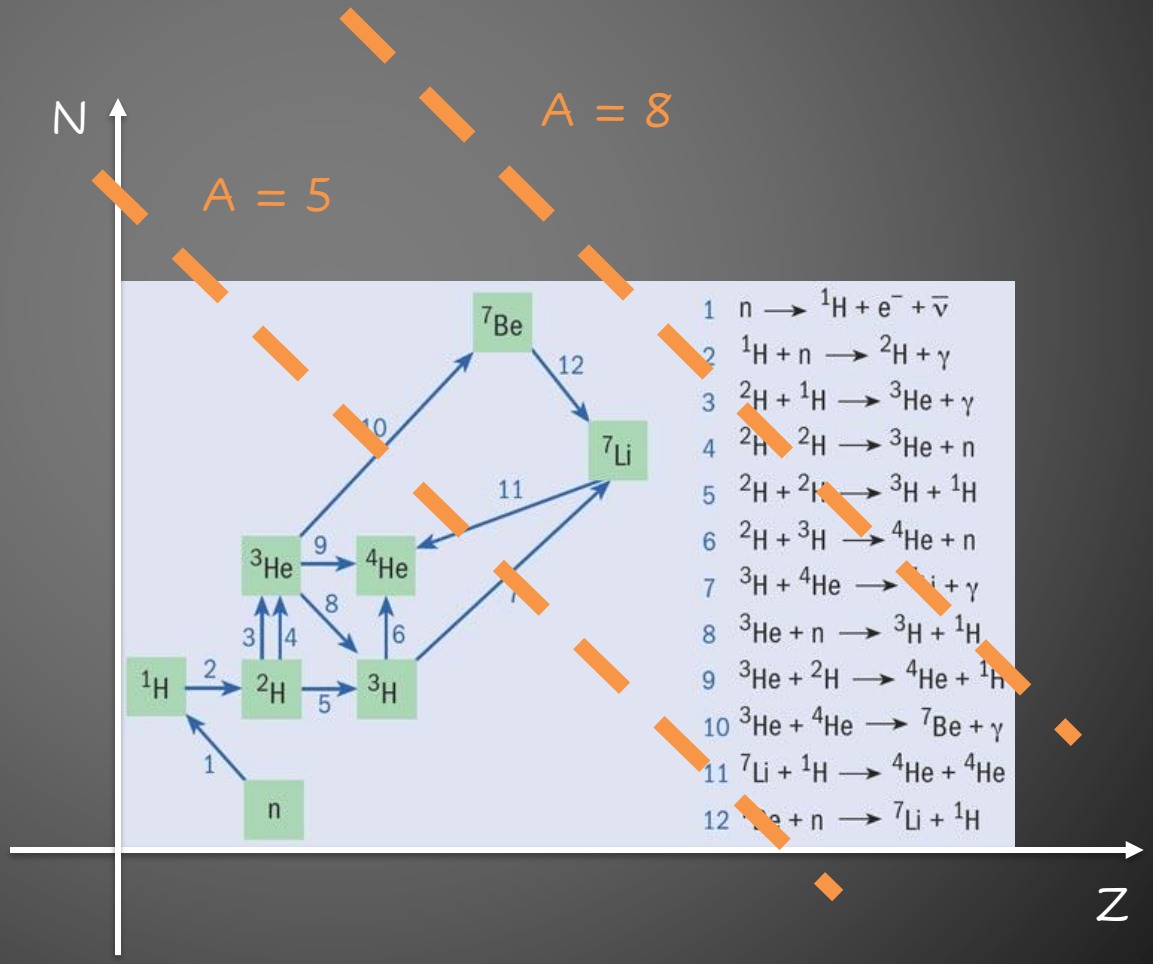


La nucleosintesi primordiale

I nuclei leggeri vengono sintetizzati durante i primi 3 minuti attraverso una rete di reazioni nucleari

Notare

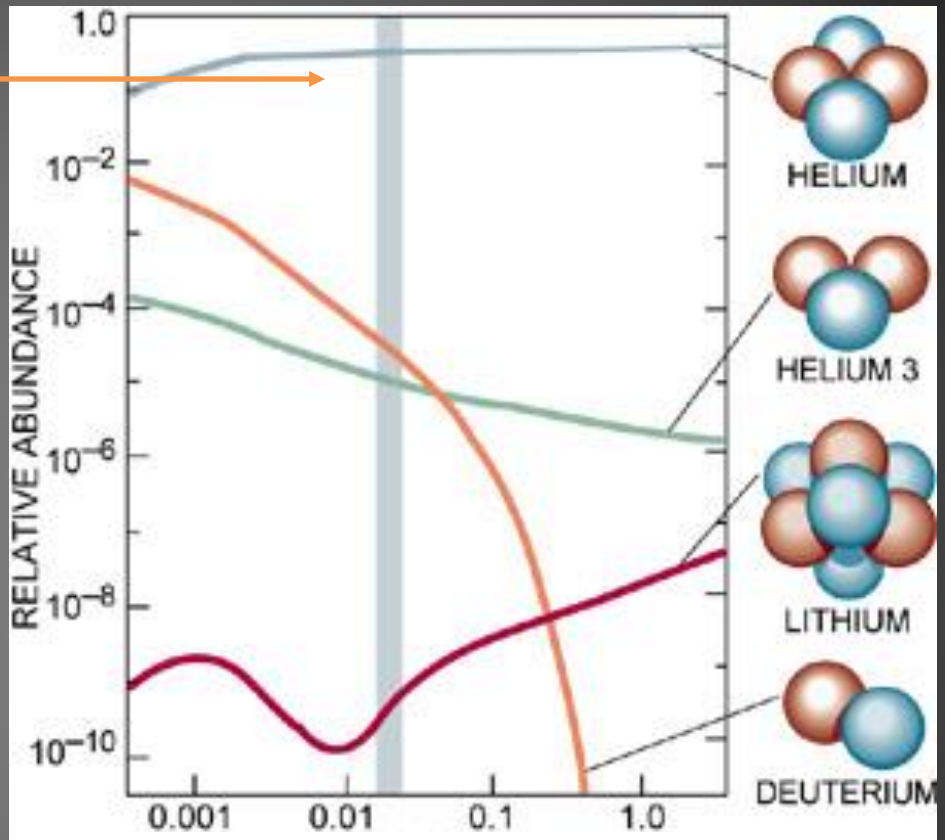
- Una frazione di neutroni sopravvive fino all'inizio della nuclesintesi
- L'assenza di nuclei stabili con A = 4 e A = 8 impedisce la formazione di elementi pesanti



La nucleosintesi primordiale

$$\frac{M(\,^4He)}{M_{tot}} \simeq 25\%$$

I nuclei di elio-4 presenti nell'Universo sono quasi tutti di origine primordiale

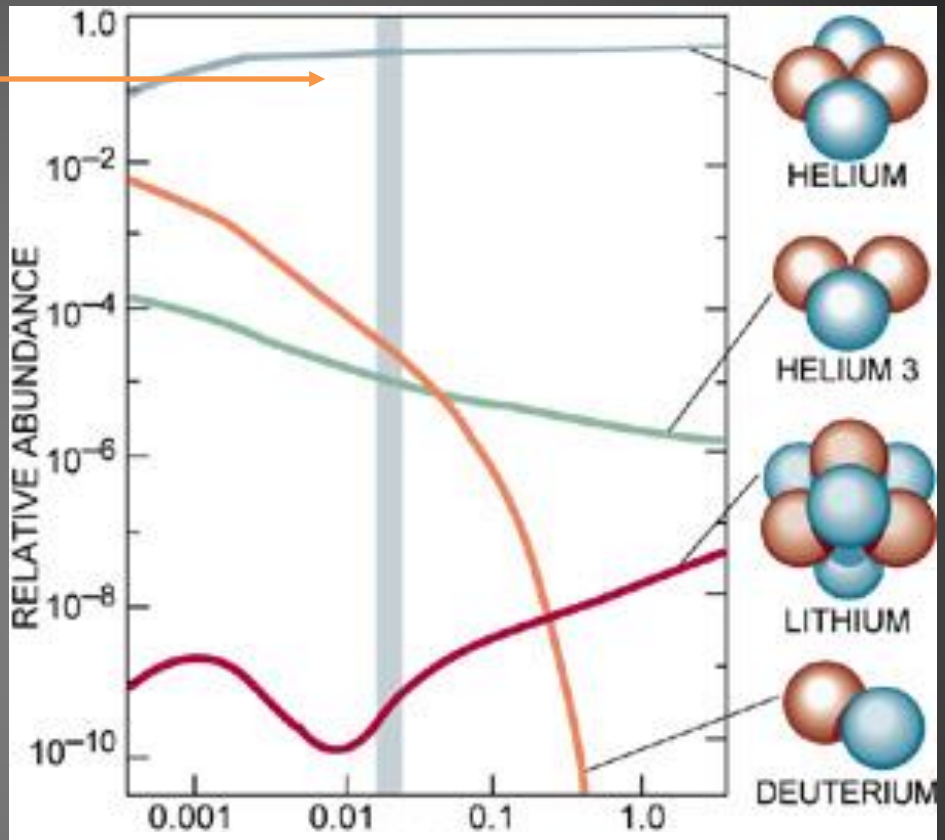


Densita' di nucleoni nell'Universo

La nucleosintesi primordiale

$$\frac{M(^4He)}{M_{tot}} \simeq 25\%$$

I nuclei di elio-4 presenti nell'Universo sono quasi tutti di origine primordiale



Densita' di nucleoni nell'Universo

- La nucleosintesi primordiale non produce elementi pesanti (C, N, O, Fe, ...)
- Come vengono prodotti questi elementi?

Nucleosintesi nelle stelle

La nucleosintesi stellare

All'interno delle stelle si verificano condizioni di densita' e temperatura che rendono possibili le reazioni nucleari

Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

$$E_g = -2\,E_i \longrightarrow G\,\frac{M^2}{R} \simeq \frac{M}{m_H}\,k_B T$$

La nucleosintesi stellare

All'interno delle stelle si verificano condizioni di densita' e temperatura che rendono possibili le reazioni nucleari

Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

$$E_g = -2\,E_i \longrightarrow G\,\frac{M^2}{R} \simeq \frac{M}{m_H}\,k_B T$$

$$L = -\frac{dE_{tot}}{dt} = -\frac{dE_g}{dt} - \frac{dE_i}{dt} = \frac{dE_i}{dt} \longrightarrow$$

Conservazione dell'Energia

Per effetto della emissione di energia dalla sua superficie, una stella diventa sempre piu' densa e sempre piu' calda

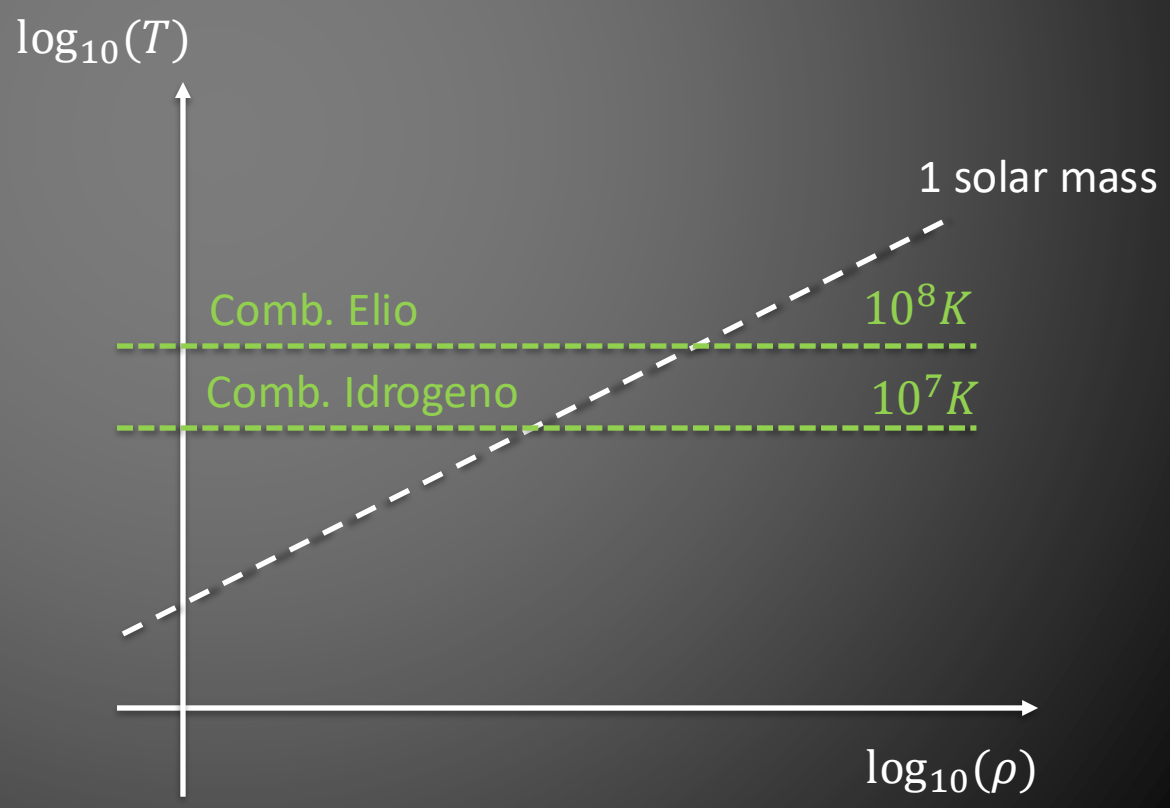
La nucleosintesi stellare

Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

$$G\, m_H \frac{M}{R} \simeq k_B T \xrightarrow{\rho \simeq M/R^3} G\, m_H\ \rho^{\frac{1}{3}}\ M^{\frac{2}{3}} \simeq k_B T$$

Notare:
Non e' vero che le stelle sono calde perche' ci sono le reazioni nucleari ...

... al contrario, le reazioni nucleari possono avvenire perche' le stelle sono calde



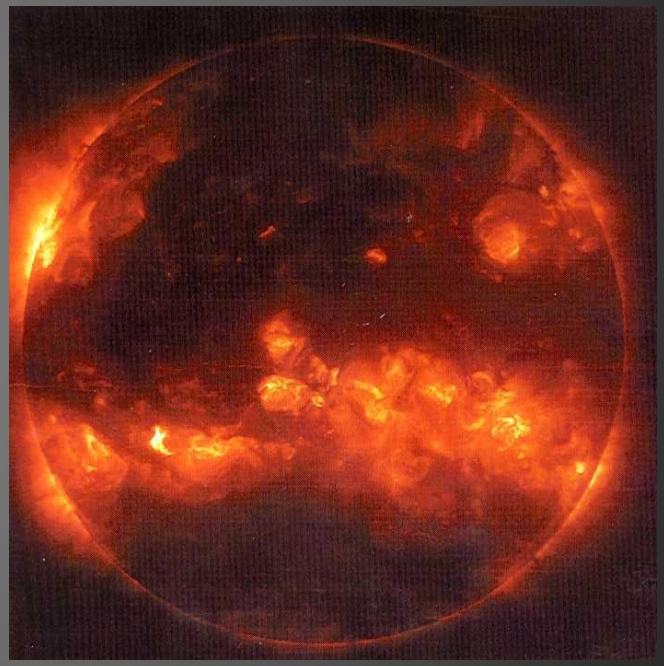
La nucleosintesi stellare

Le reazioni nucleari sono pero' essenziali per spiegare i lunghissimi tempi evolutivi delle stelle

- Kelvin: L'energia gravitazionale (1keV/particella) può sostenere la luminosità del Sole per circa 30.000.000 di anni.

- Troppo poco per rendere conto dell'evoluzione dei processi biologici e geologici.

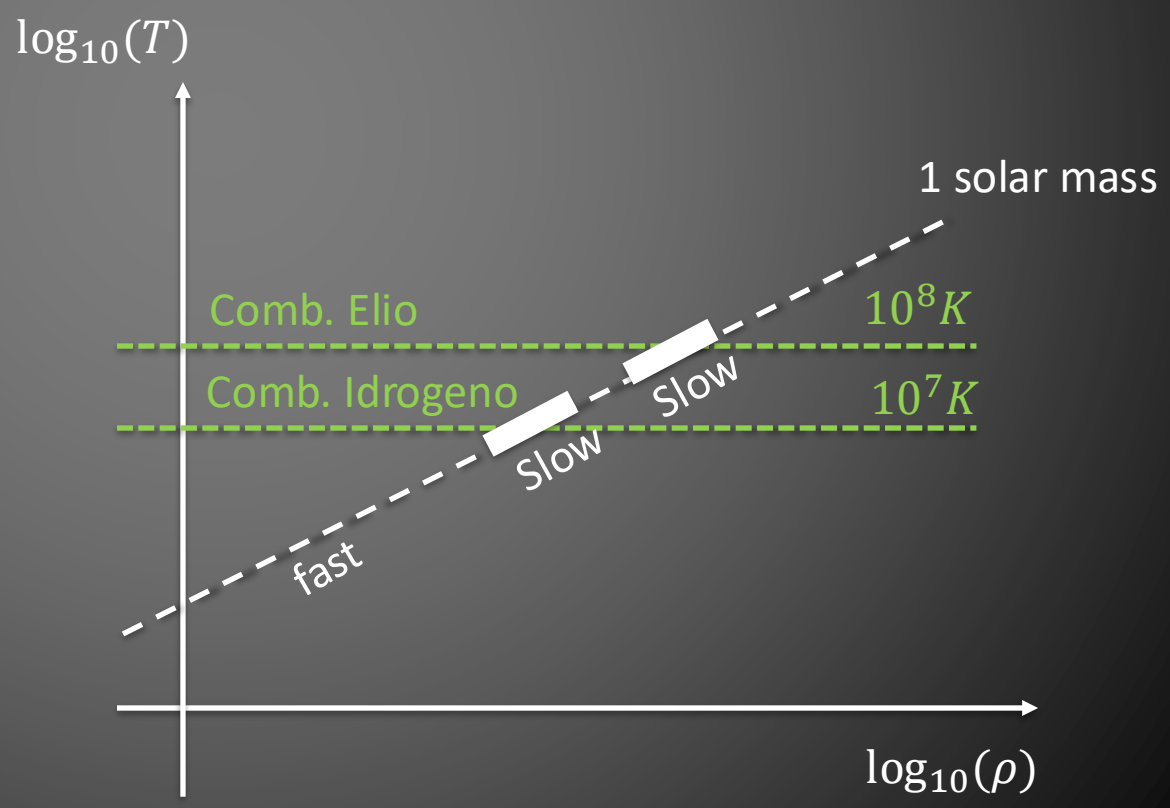
- Per spiegare i tempi evolutivi delle stelle (10 Gyr per il Sole) abbiamo bisogno di una sorgente di energia 1000 volte piu' grande (1MeV/particella) → Reazioni Nucleari



La nucleosintesi stellare

Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

$$G\, m_H \frac{M}{R} \simeq k_B T \longrightarrow G\, m_H\ \rho^{\frac{1}{3}}\ M^{\frac{2}{3}} \simeq k_B T$$

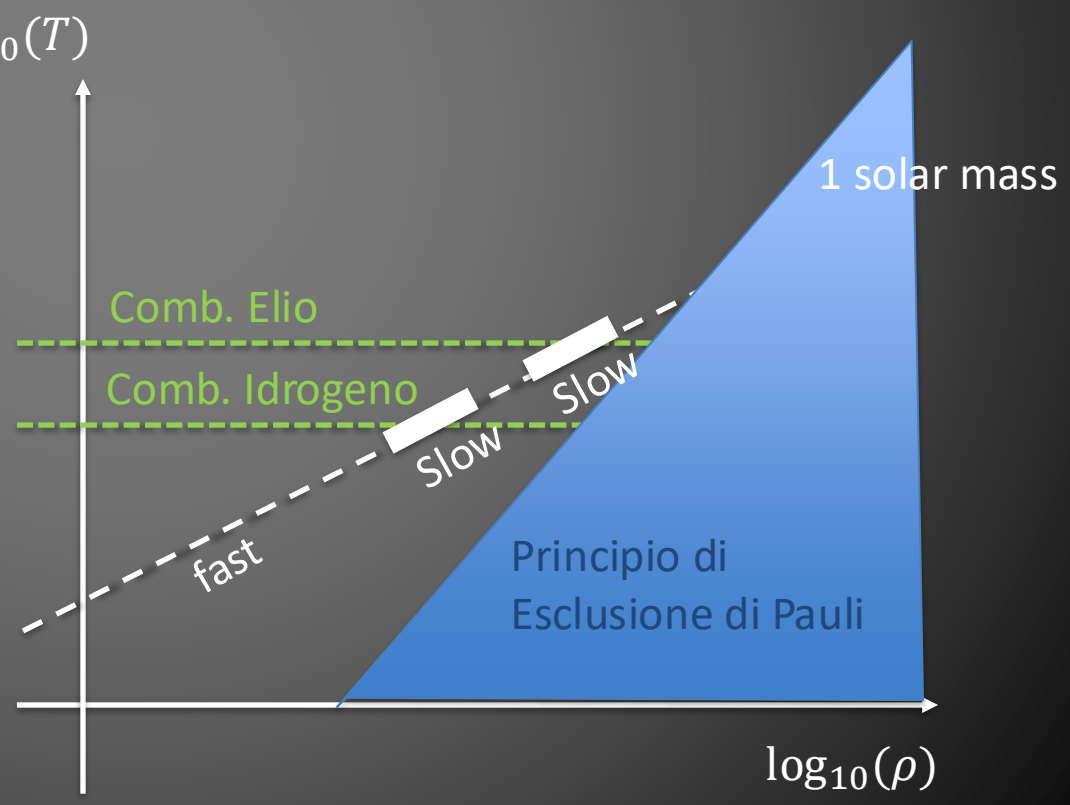


La nucleosintesi stellare

Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

$$G\, m_H \frac{M}{R} \simeq k_B T \longrightarrow G\, m_H\ \rho^{\frac{1}{3}}\ M^{\frac{2}{3}} \simeq k_B T$$

Il principio di Esclusione di Pauli puo' bloccare la contrazione ed il riscaldamento degli interni stellari → Formazione di oggetti compatti (e.g. WD)



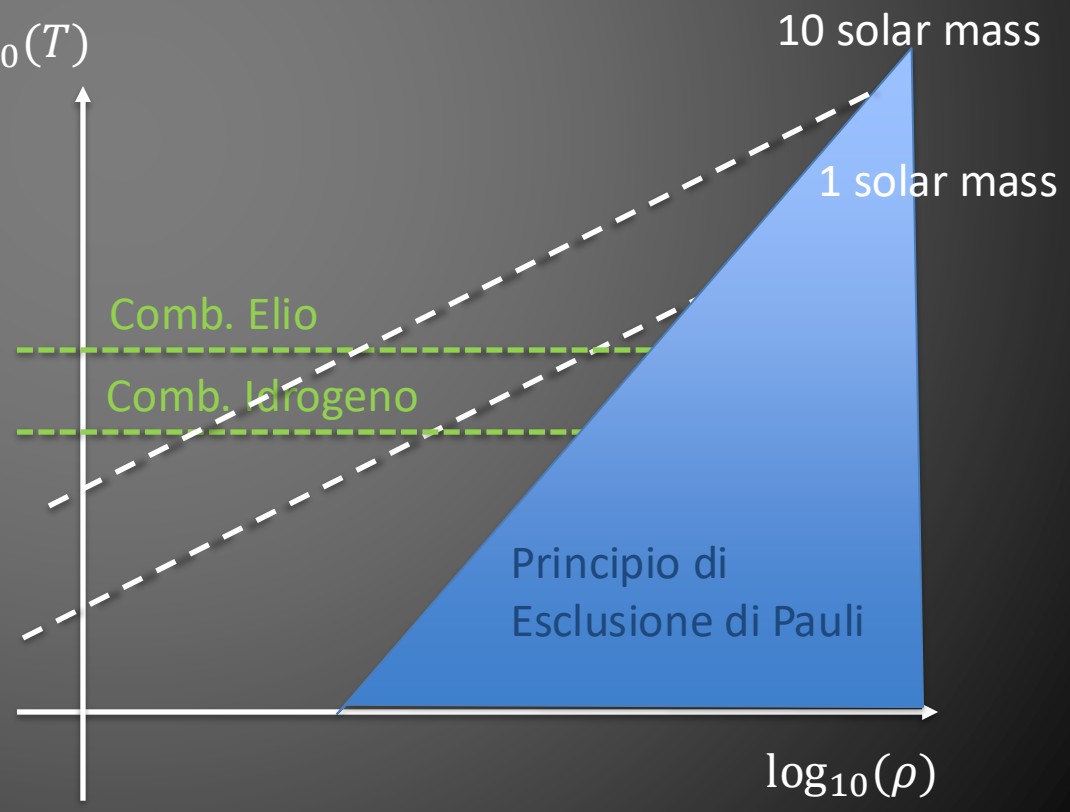
La nucleosintesi stellare

Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

$$G\, m_H \frac{M}{R} \simeq k_B T \longrightarrow G\, m_H\ \rho^{\frac{1}{3}}\ M^{\frac{2}{3}} \simeq k_B T$$

Il principio di Esclusione di Pauli puo' bloccare la contrazione ed il riscaldamento degli interni stellari → Formazione di oggetti compatti (e.g. WD)

Stelle piu' massiccie raggiungono temperature piu' alte e possono produrre elementi piu' pesanti



La nucleosintesi stellare

Combustione dell'idrogeno (H → ^{4}He)

$$4\,H + 2e^- \rightarrow {}^4He + 2\,\nu_e$$

- Catena pp
- Ciclo CNO

- Neutrini solari
(osservati e.g. @LNGS)

Combustione dell'elio (^{4}He → C,O)

$$^4He + {}^4He + {}^4He \rightarrow {}^{12}C + \gamma$$ (reazione 3α)

$$^4He + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O + \gamma$$

- N.B. – La reazione 3α e' un processo "raro" (a tre corpi) che non ha tempo di svilupparsi nella nucleosintesi primordiale

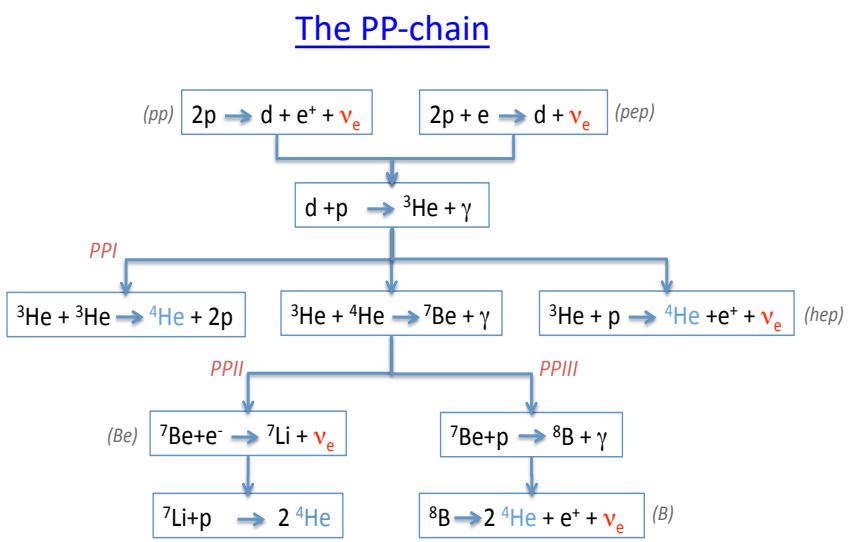
Combustione dell'idrogeno: catena pp e ciclo CNO

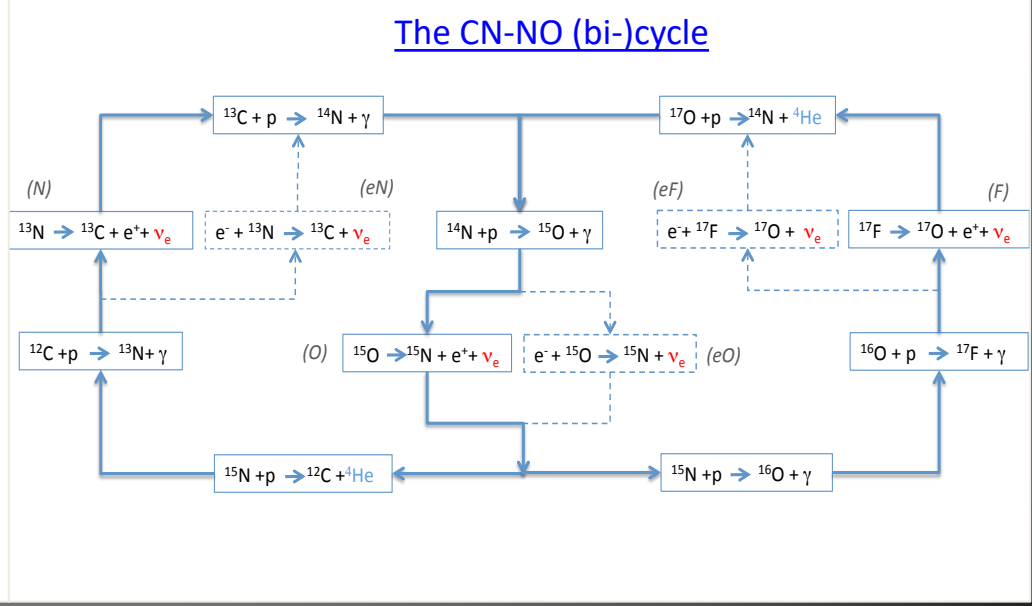
Il Sole e' "sostenuto" da reazioni di fusione dell' idrogeno in ^4He:

$$4H + 2e^- \rightarrow {}^4He + 2\nu_e + \text{energy}$$

Q = 26,7 MeV (globalmente)

Free streaming – 8 minuti per raggiungere la Terra.



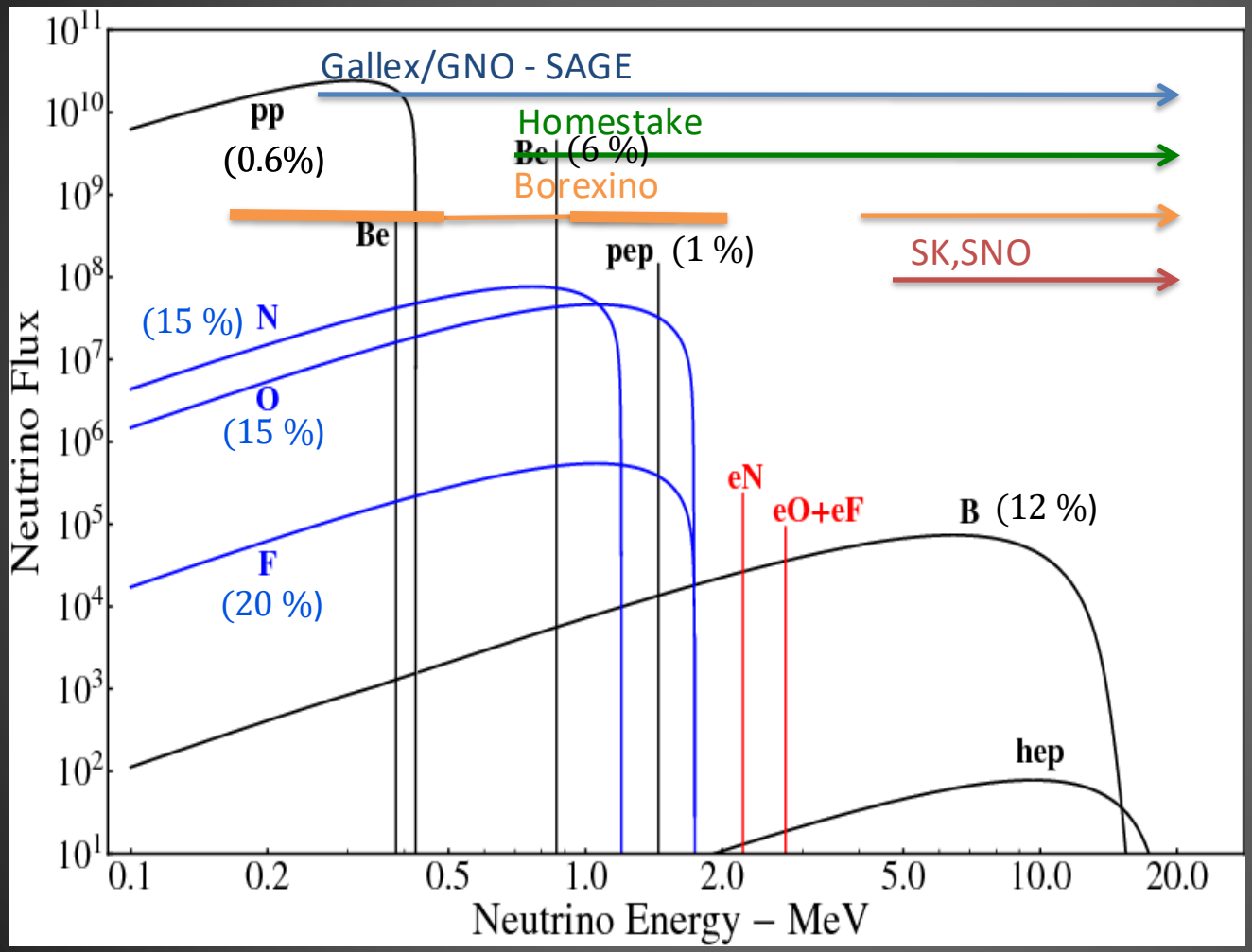


La catena pp e' responsabile di circa il 99% della energia e dei neutrini prodotti nel Sole

Il ciclo CNO e' responsabile di circa 1% della energia e dei neutrini prodotti nel Sole.

E' pero' dominante in stelle piu' grandi del Sole e in fasi evolutive piu' avanzate

Lo spettro dei neutrini solari



The different comp. of the solar neutrinos flux have been **directly** determined by Borexino with accuracy level:

pp: ~ 10%
pep: ~ 10%
^{7}Be: ~ 3 %
^{8}B: ~ 2 % (SK,SNO)
CNO: ~ 30%

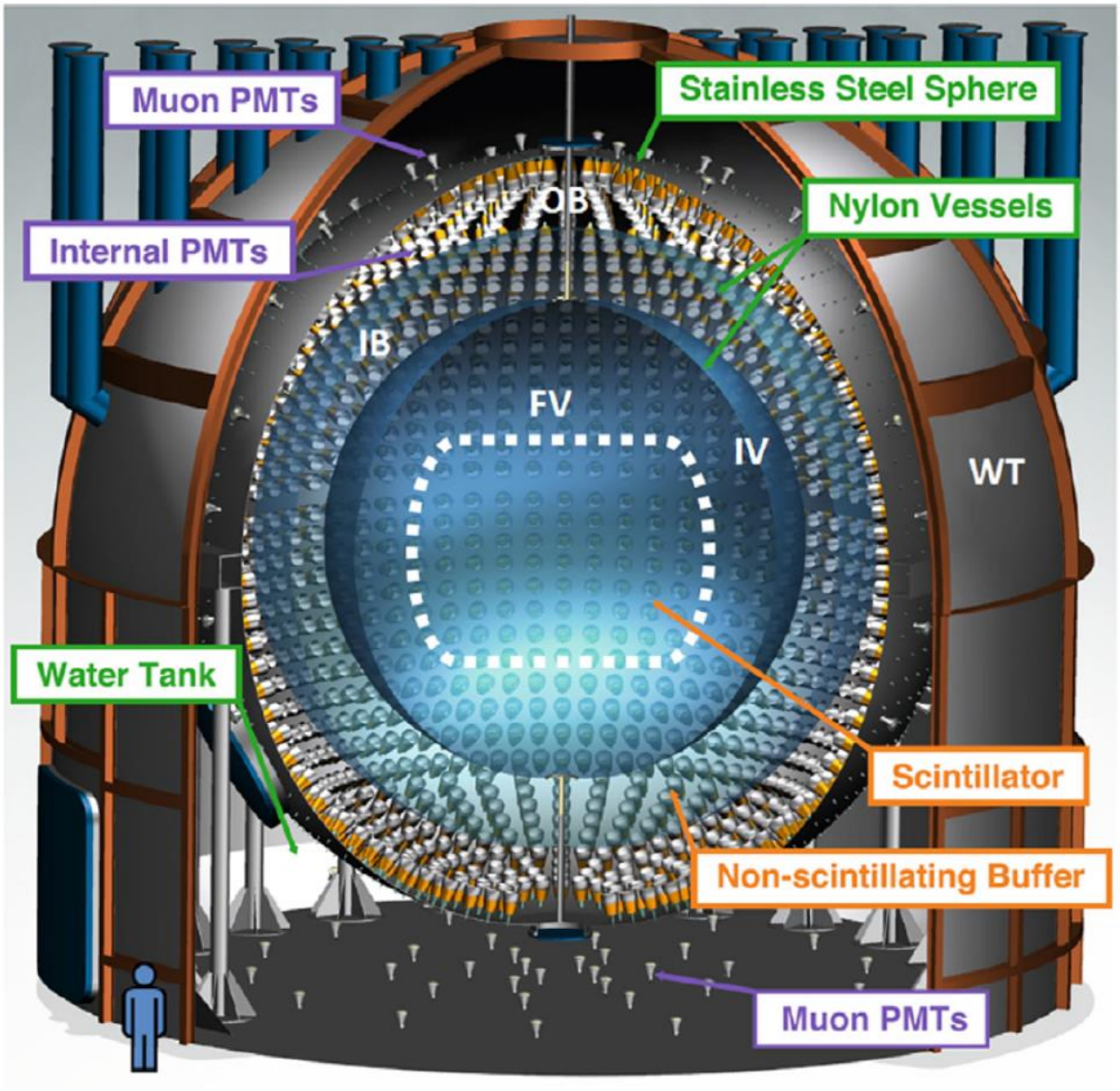
The Borexino detector @ LNGS

Active volume: 280 tons of liquid scintillator.

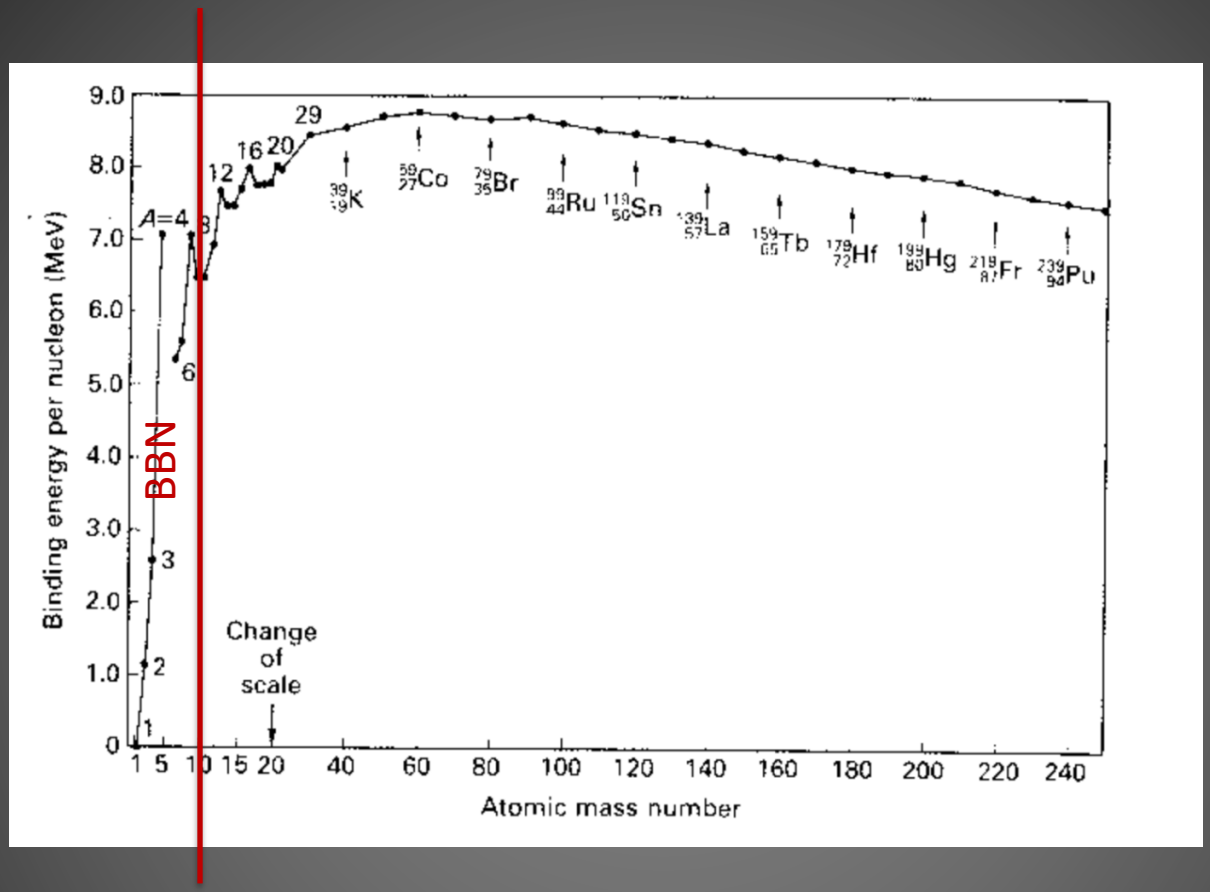
Detection principle

$$\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$$

Elastic scattering off the electrons of the scintillator. Threshold at ~ 60 keV (electron energy)

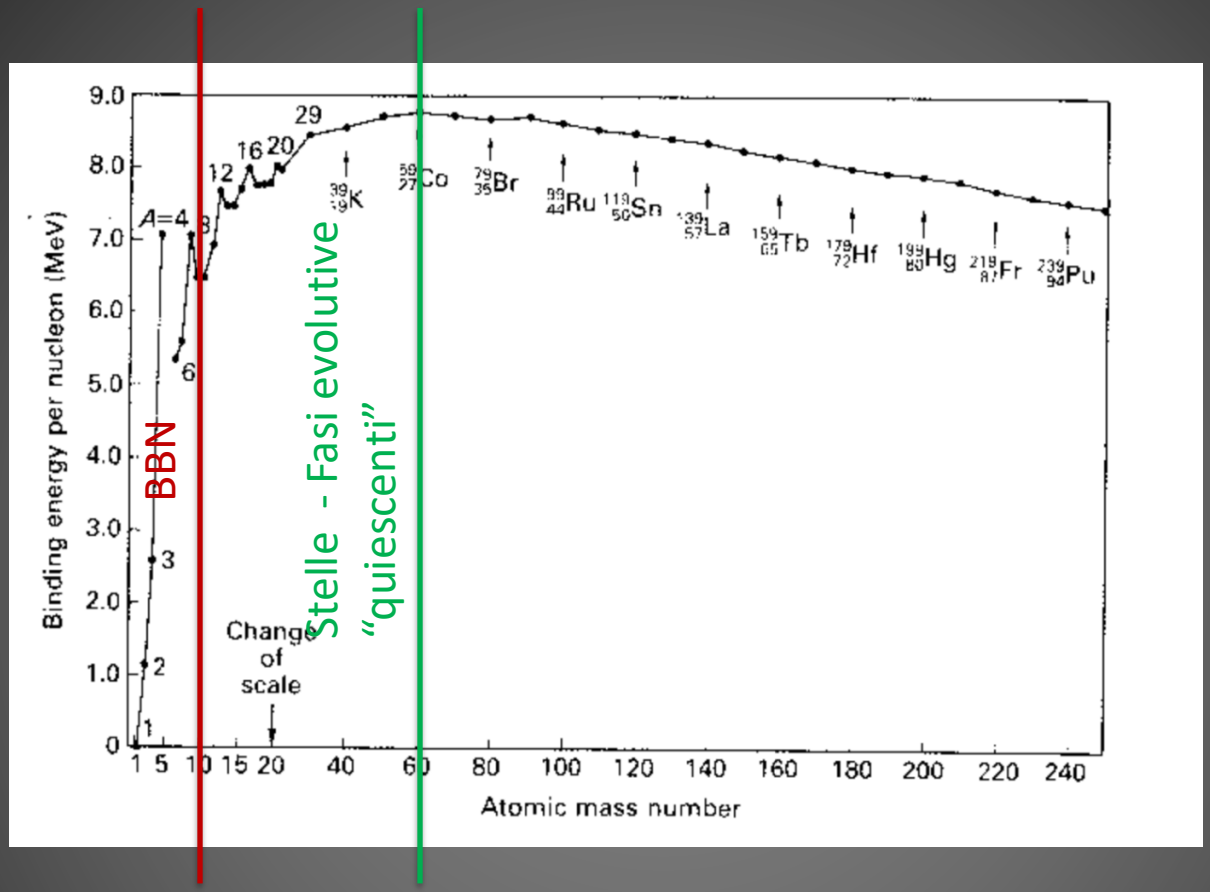


La nucleosintesi stellare



Superata la "lacuna" A = 8, le stelle possono produrre gli elementi pesanti

La nucleosintesi stellare



Superata la "lacuna" A = 8, le stelle possono produrre gli elementi pesanti

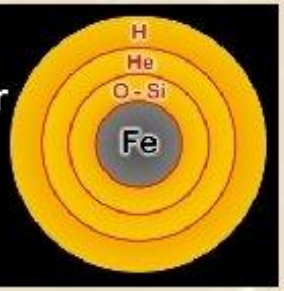
A < 56 → Reazioni esoenergetiche → Stelle stabili

A > 56 → Reazioni endoenergetiche → Stelle instabili → Esplosioni Stellari (e.g. SN)

Meccanismi di esplosione delle stelle

Thermonuclear vs. Core-Collapse Supernovae

Thermonuclear (Type Ia)	Core collapse (Type II, Ib/c)
• Carbon-oxygen white dwarf (remnant of low-mass star) • Accretes matter from companion	• Degenerate iron core of evolved massive star • Accretes matter by nuclear burning at its surface



Chandrasekhar limit is reached – $M_{Ch} \approx 1.5\, M_{sun}\, (2Y_e)^2$

COLLAPSE SETS IN

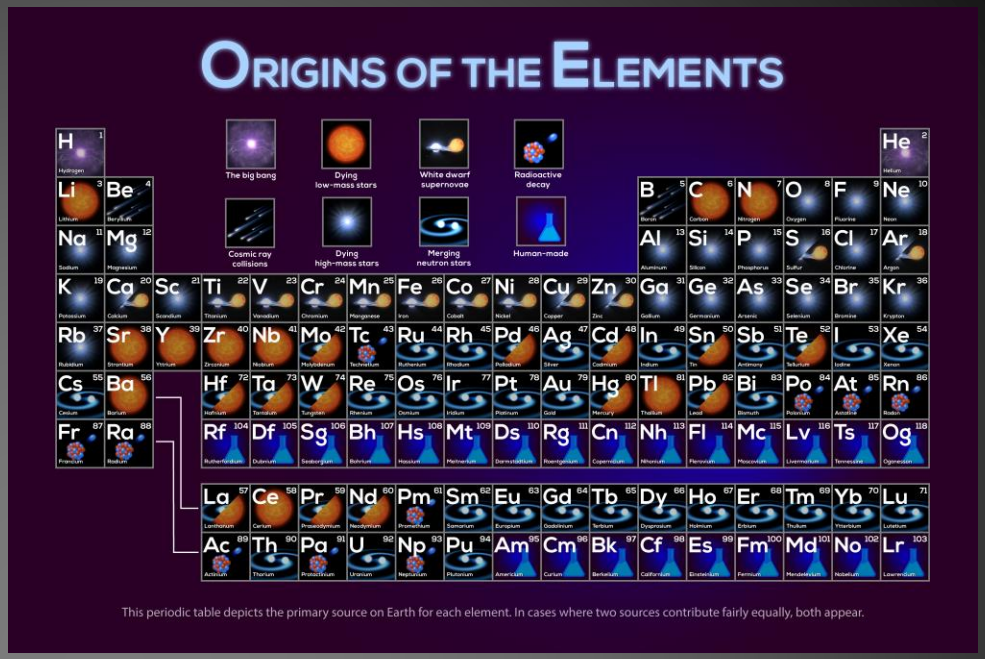
Nuclear burning of C and O ignites → Nuclear deflagration ("Fusion bomb" triggered by collapse)	Collapse to nuclear density Bounce & shock Implosion → Explosion
Powered by nuclear binding energy	Powered by gravity
Gain of nuclear binding energy ~ 1 MeV per nucleon	Gain of gravitational binding energy ~ 100 MeV per nucleon 99% into neutrinos

Comparable "visible" energy release of ~ 3×10^{51} erg

Georg Raffelt, Max-Planck-Institut für Physik, München, Germany — Neutrino Physics & Astrophysics, 17-21 Sept 2008, Beijing, China

From Prof. G. Raffelt

Conclusioni



Siamo in grado di "tracciare" l'origine degli elementi

- Gli elementi leggeri (e.g. D e ^{4}He) hanno origine cosmologica
- I "metalli" (A>4; e.g. C, N, O, Fe, ...) non possono essere prodotti nella Nucleosintesi primordiale. Sono stati prodotti dalla evoluzione stellare

Siamo "figli delle stelle"

- La produzione degli elementi piu' pesanti avviene in "fasi esplosive" della evoluzione stellare