

Nucleosintesi nell'Universo

Francesco L. Villante

Universita' dell'Aquila and INFN-LNGS

Outline

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

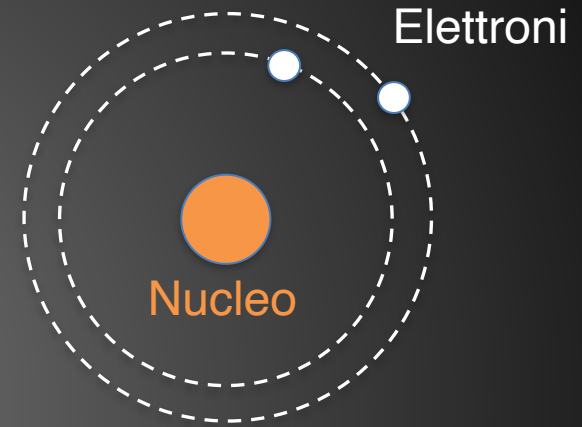
Alcuni elementi di Fisica Nucleare

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



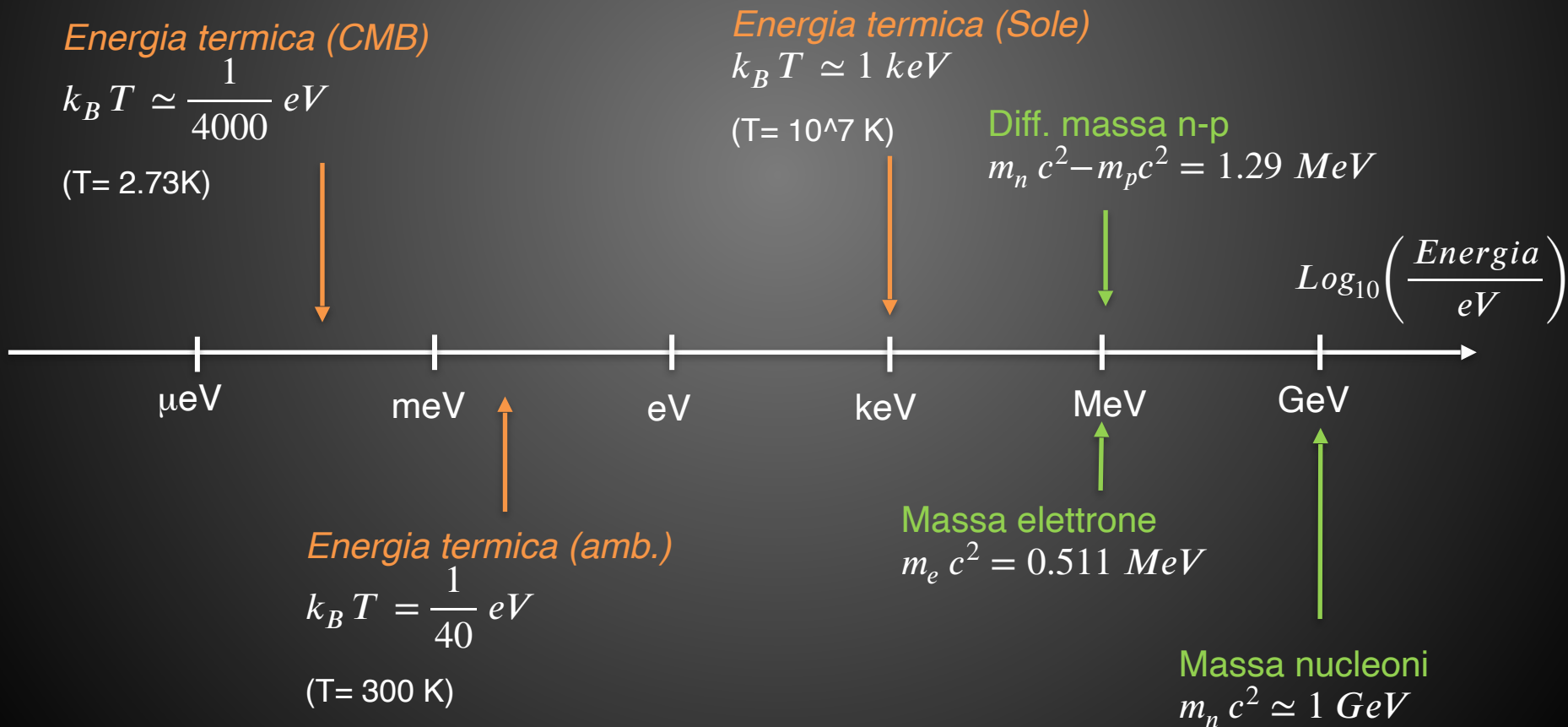
$$m_p \approx m_n \approx 2000 m_e \approx \frac{1 \text{ GeV}}{c^2}$$

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

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

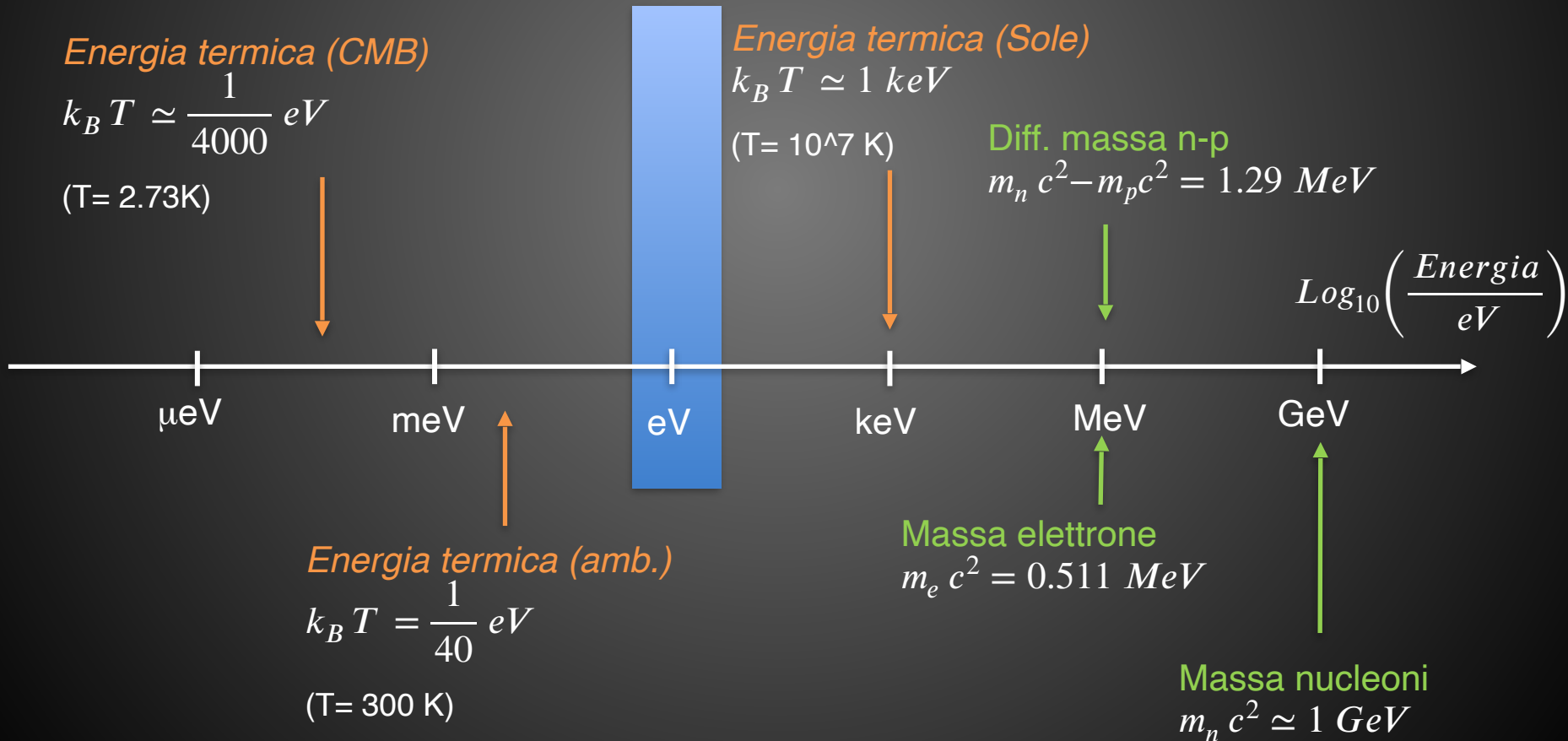
$$R_{\text{nucleo}} \approx (1 \text{ fm}) A^{\frac{1}{3}}$$
$$= (10^{-15} \text{ m}) A^{\frac{1}{3}}$$

Scale di energia



Scale di energia

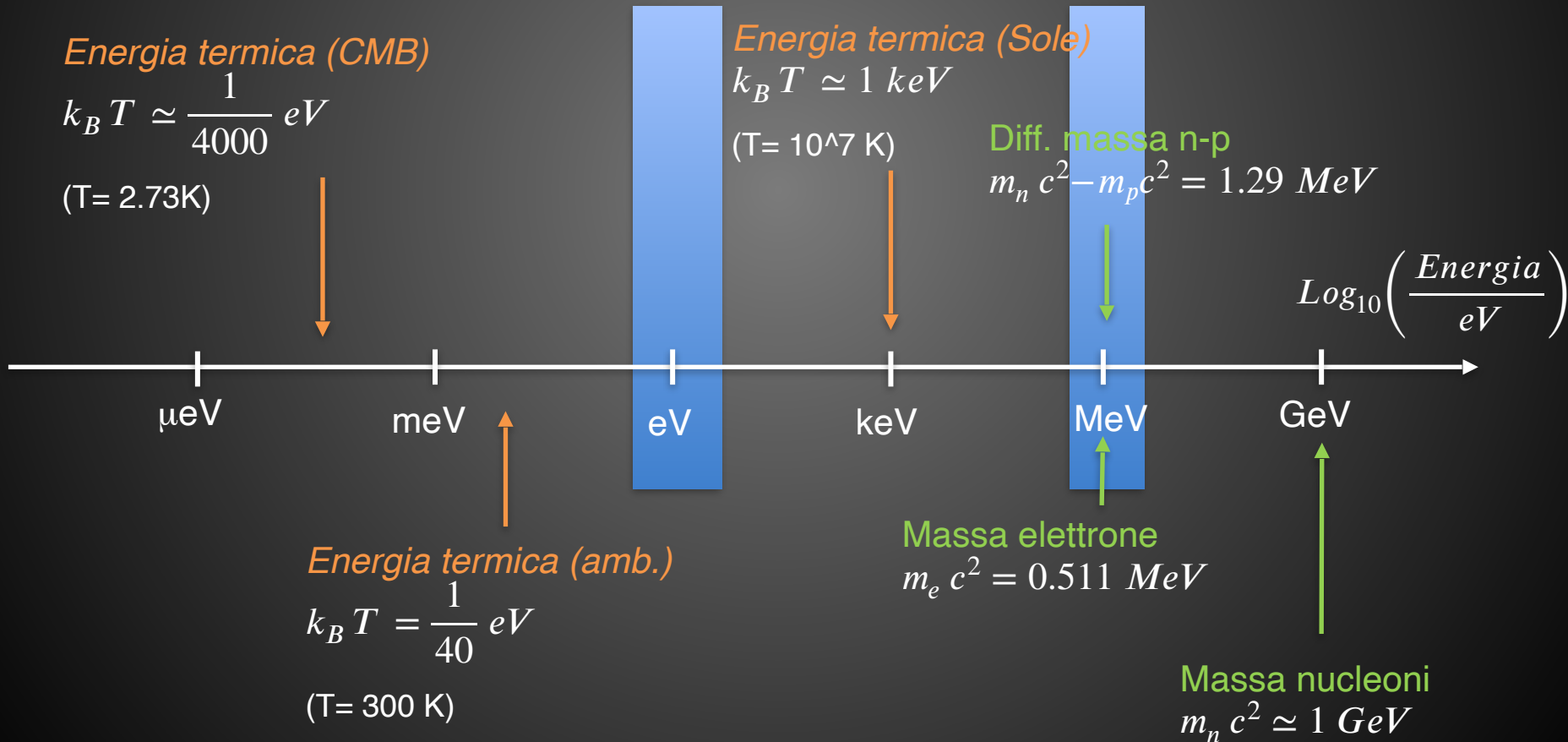
Fisica "atomica" $\sim 1 \text{ eV}$
 $B(H) = 13.6 \text{ eV}$



Scale di energia

Fisica "atomica" $\sim 1 \text{ eV}$
 $B(H) = 13.6 \text{ eV}$

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



Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Z = Numero atomico = Numero di protoni

A = Numero di massa = Numero di nucleoni

$N = A - Z$ = Numero di neutroni

“Valle” di stabilita’

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

$$Z \approx N$$

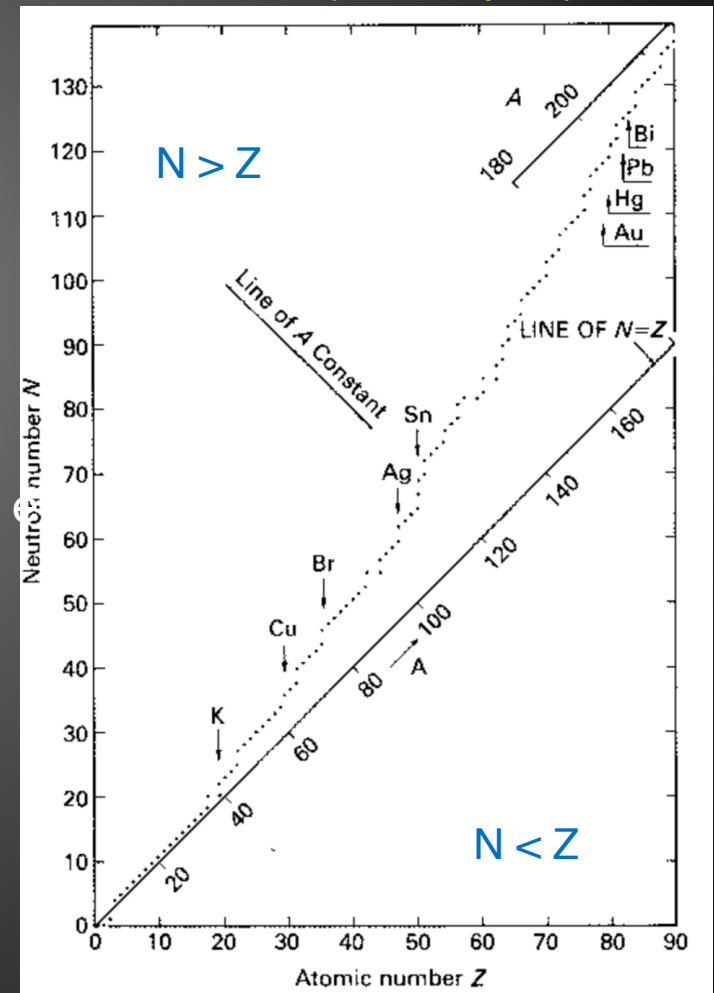
Le interazioni forti non “distinguono” tra neutroni e protoni

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

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

$$p \leftrightarrow n$$

Nuclei stabili ($A = \text{dispari}$)



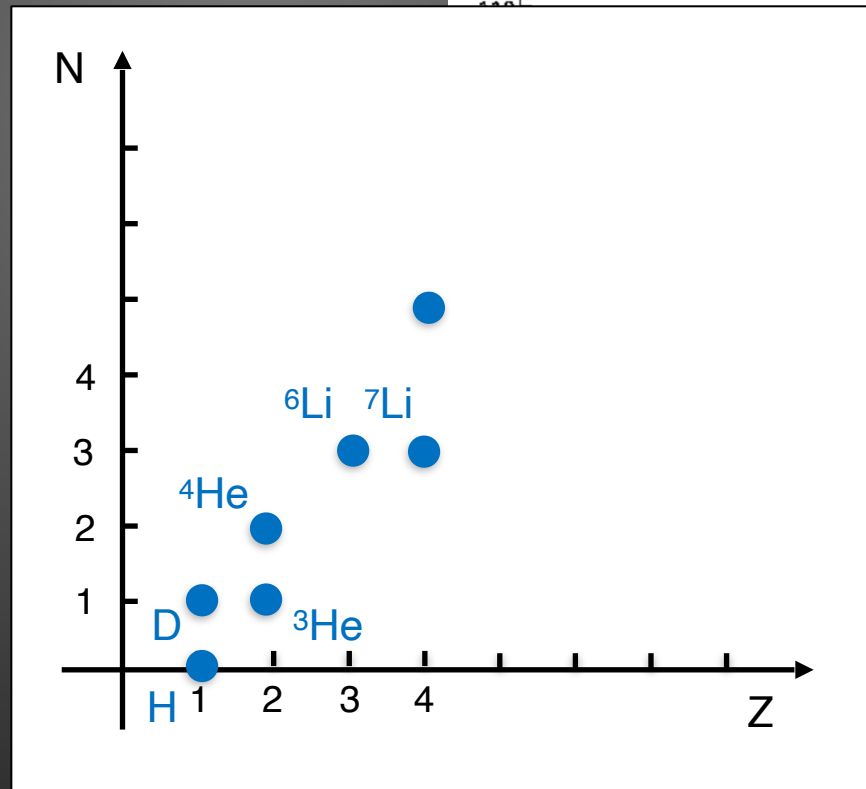
Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Z = Numero atomico = Numero di protoni

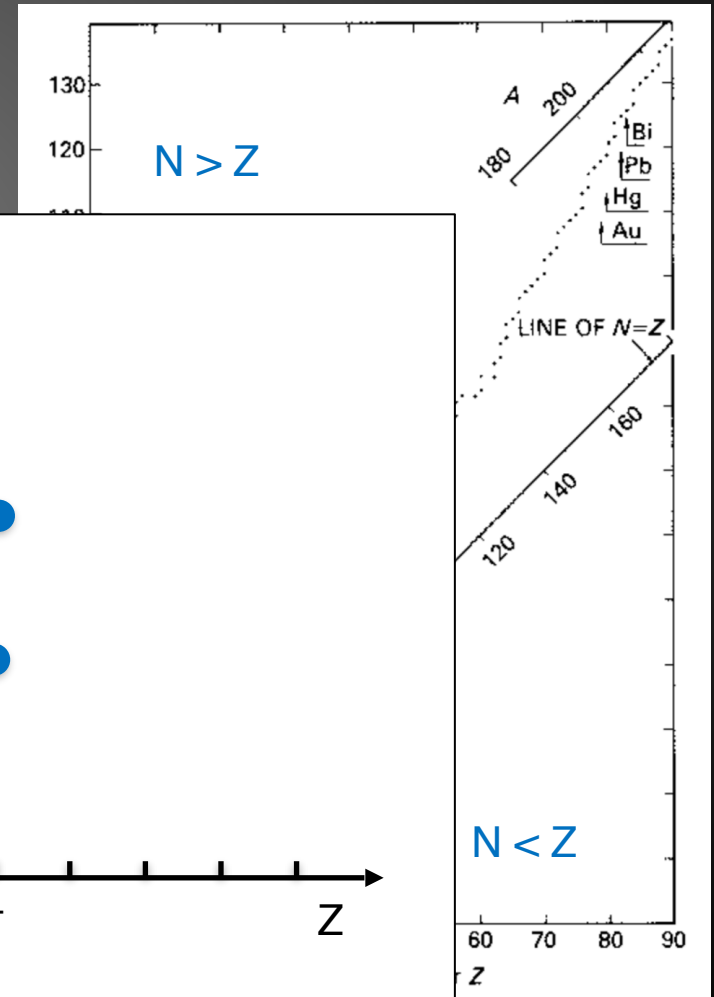
A = Numero di massa = Numero di nucleoni

$N = A - Z$ = Numero di neutroni

Nuclei leggeri



Nuclei stabili ($A = \text{dispari}$)



Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Z = Numero atomico = Numero di protoni

A = Numero di massa = Numero di nucleoni

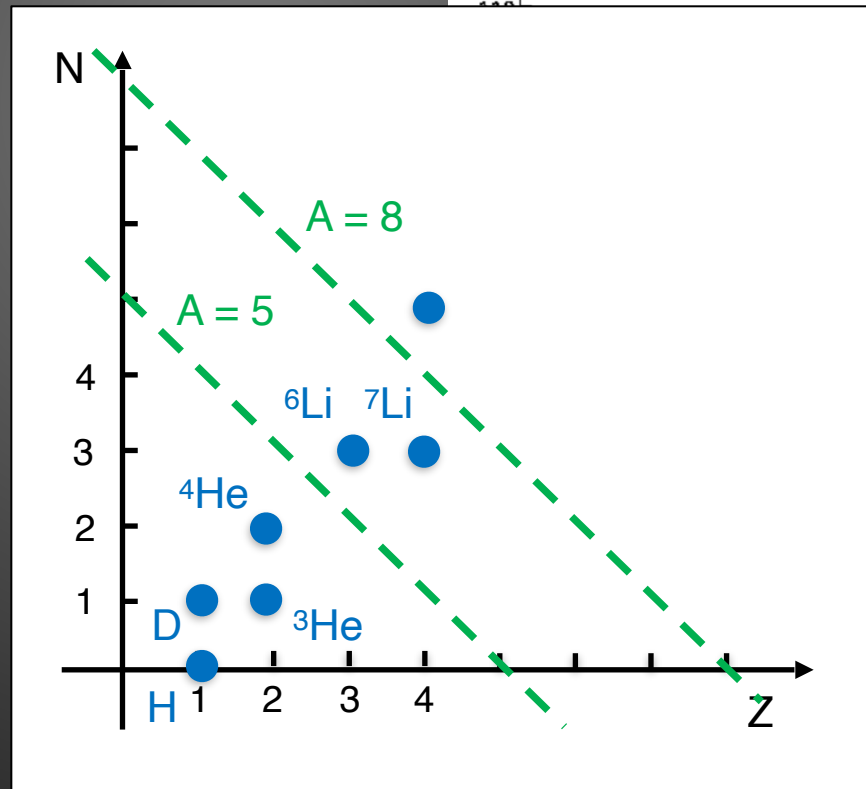
$N = A - Z$ = Numero di neutroni

Non esistono nuclei stabili per:

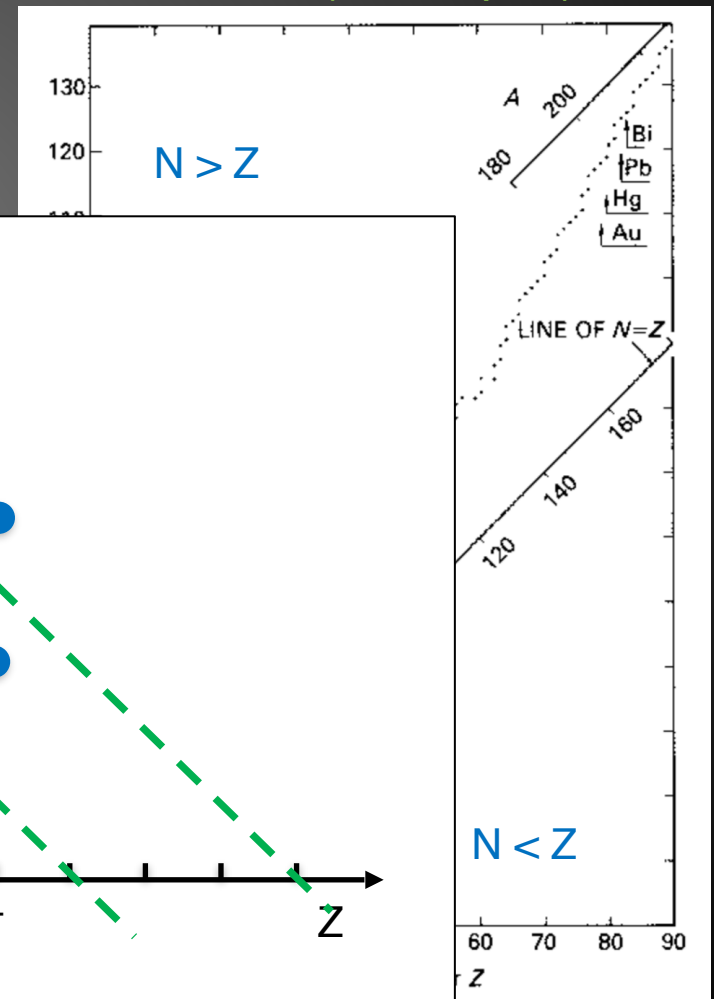
$A=5$

$A=8$

Nuclei leggeri

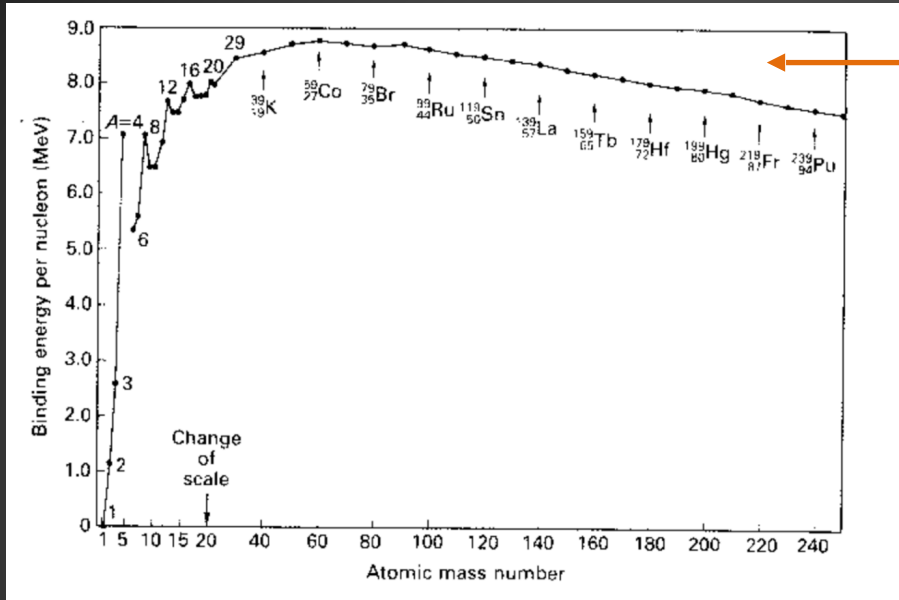


Nuclei stabili ($A = \text{dispari}$)



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

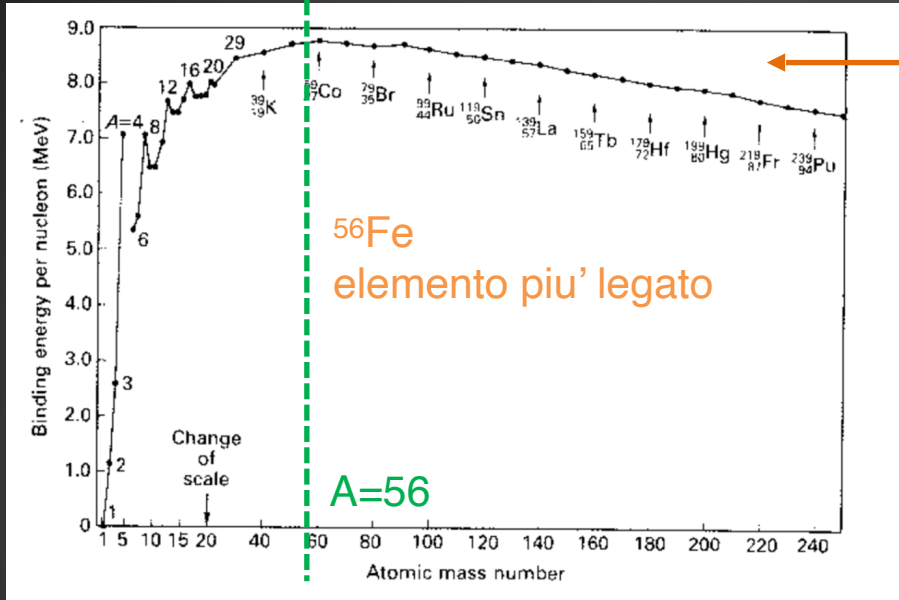
$$\simeq 1 \text{ fm}$$

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

$B = \text{Energia di legame}$

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

$$\simeq 1 \text{ fm}$$

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

$B = \text{Energia di legame}$

Processi esoenergetici (liberano energia):

Nuclei leggeri



Fusione nucleare

Nuclei pesanti



Fissione nucleare

Alcuni elementi di Fisica Nucleare

Perche' gli elementi leggeri non fondono spontaneamente?

Le int. forti sono "a corto raggio"



I nuclei sono carichi positivamente



La repulsione Coulombiana impedisce ai nuclei di avvicinarsi

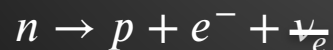
Per reagire, i nuclei devono avvicinarsi a distanze $\simeq 1 \text{ fm}$

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

Notare:

nell'Universo non ci sono neutroni liberi:

- I neutroni sono instabili e decadono in $\tau \simeq 10 \text{ min}$



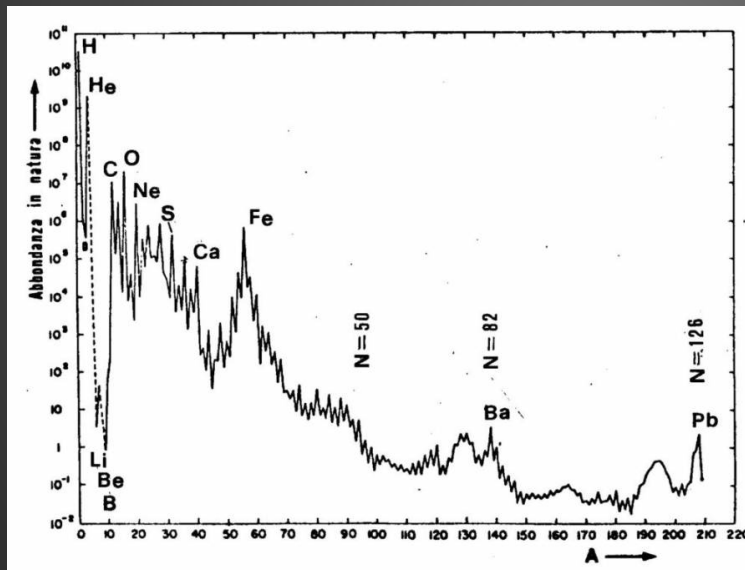
Alcuni elementi di Fisica Nucleare

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

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

gli altri elementi sono presenti con piccole abbondanze

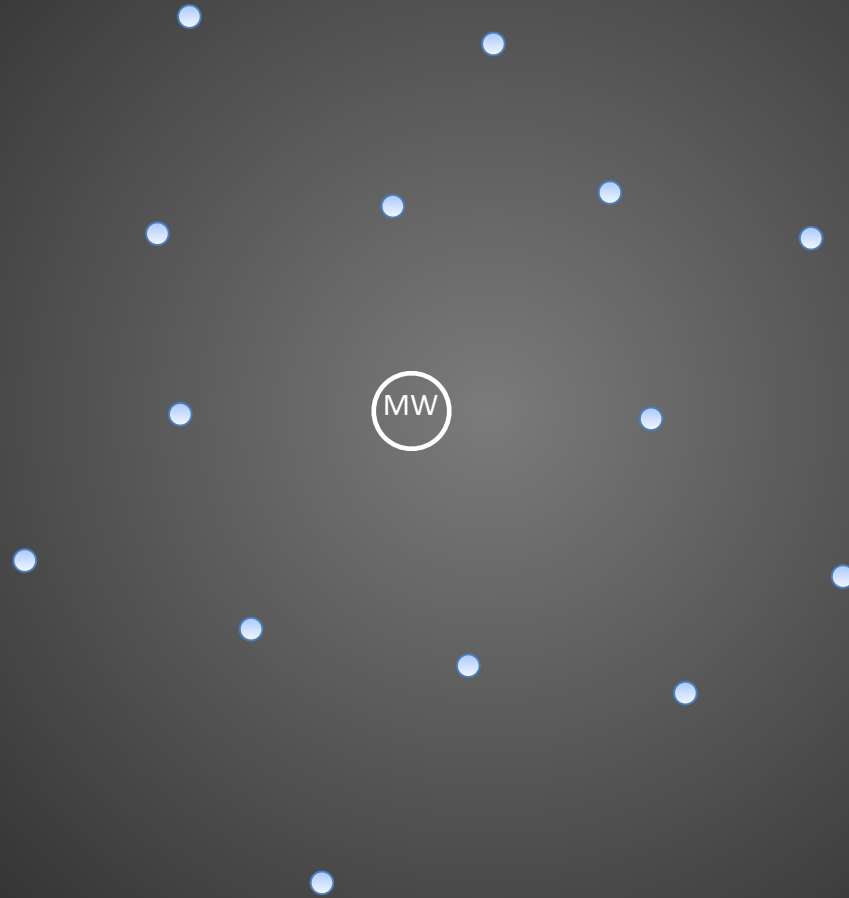
Log_Abundance



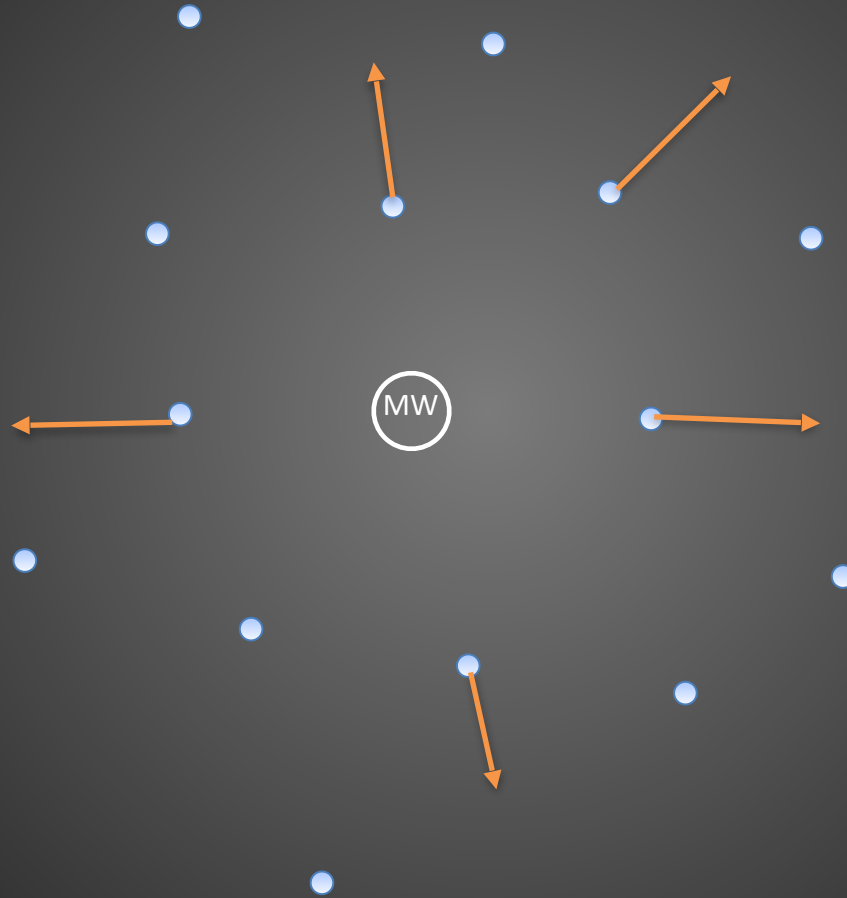
N.B. La composizione chimica della Terra non e' rappresentativa dell'intero Universo

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

Espansione dell'Universo

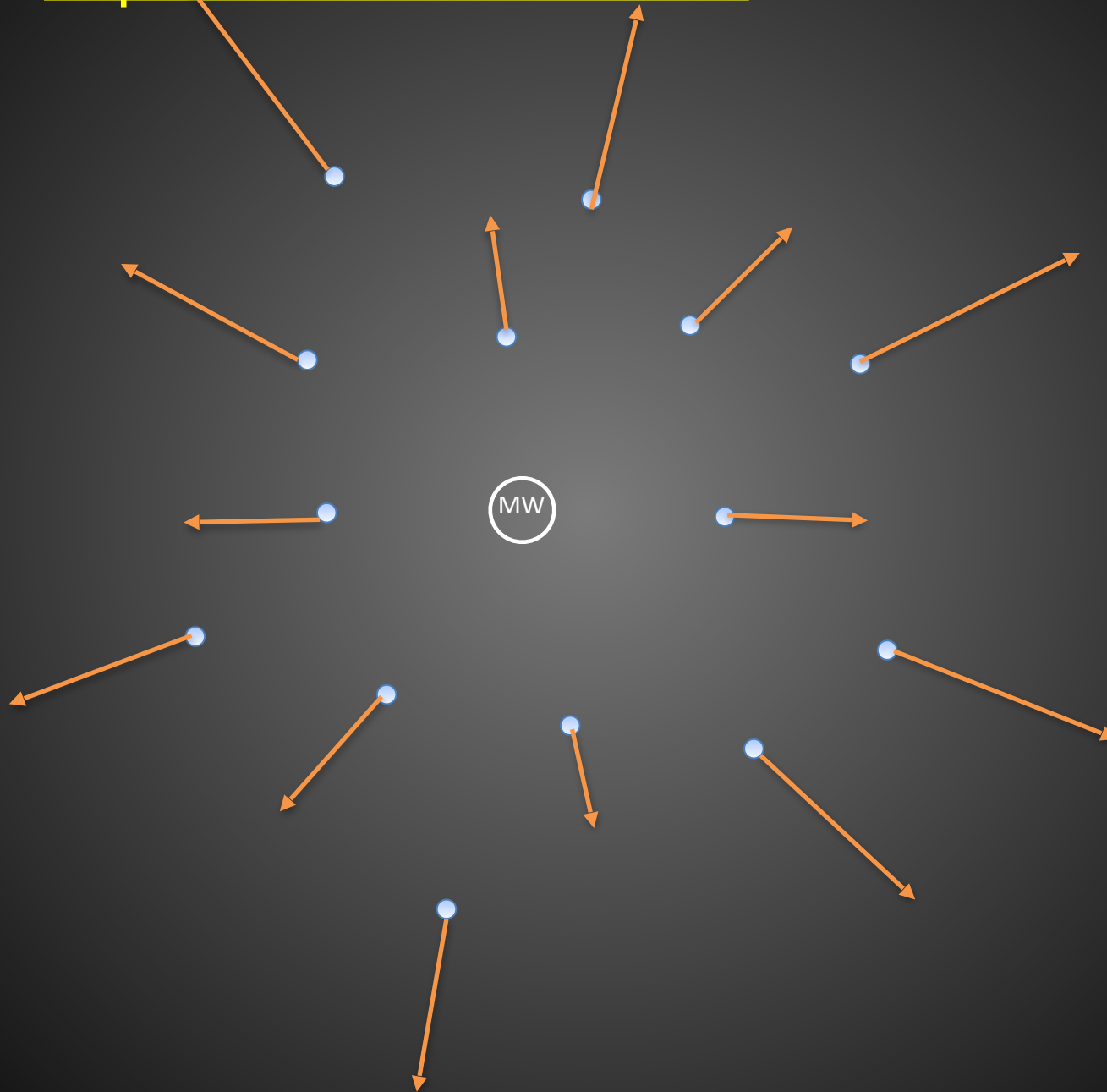


Espansione dell'Universo

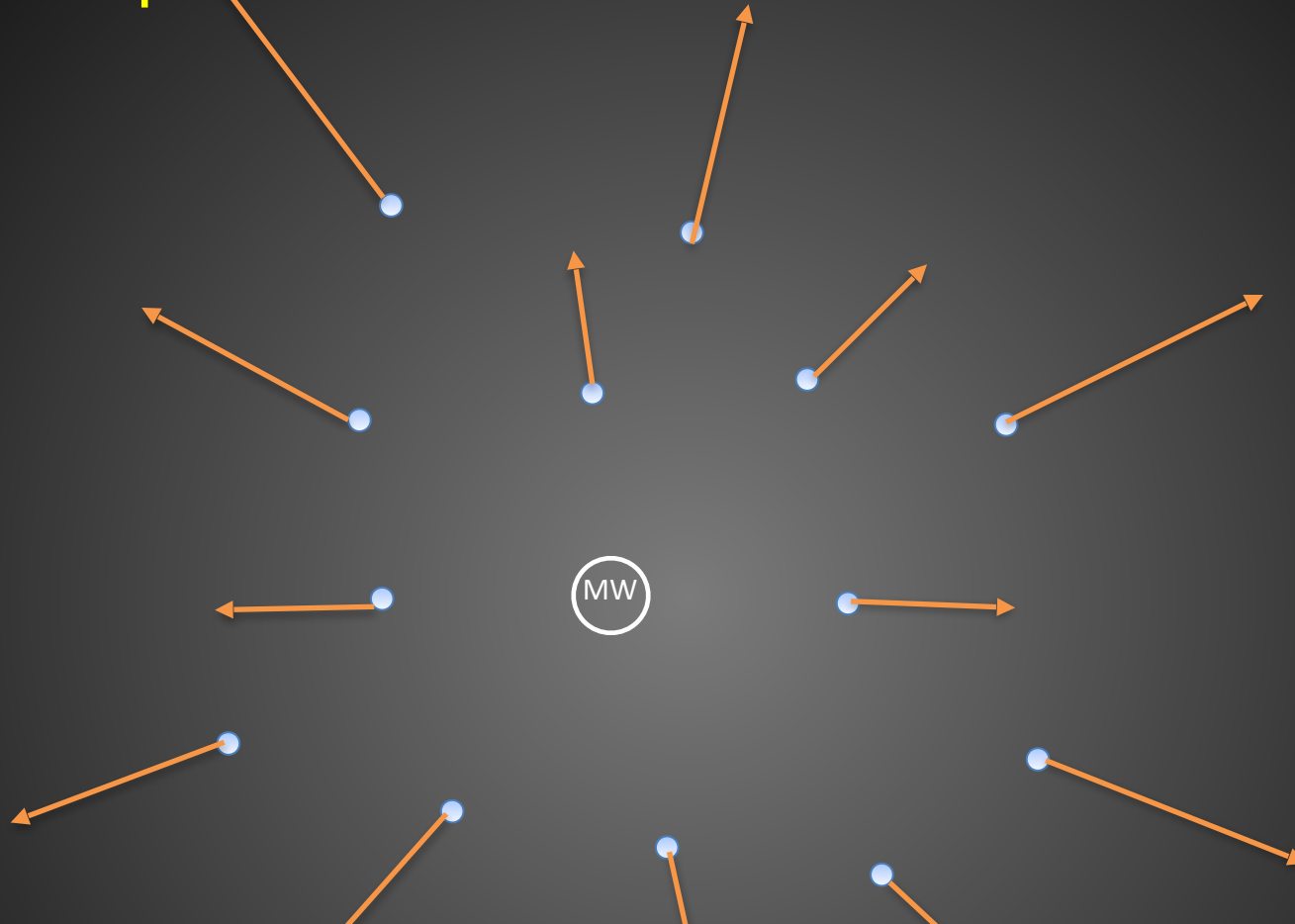


Le altre galassie si allontanano da noi
(misure di Redshift)

Espansione dell'Universo



Espansione dell'Universo



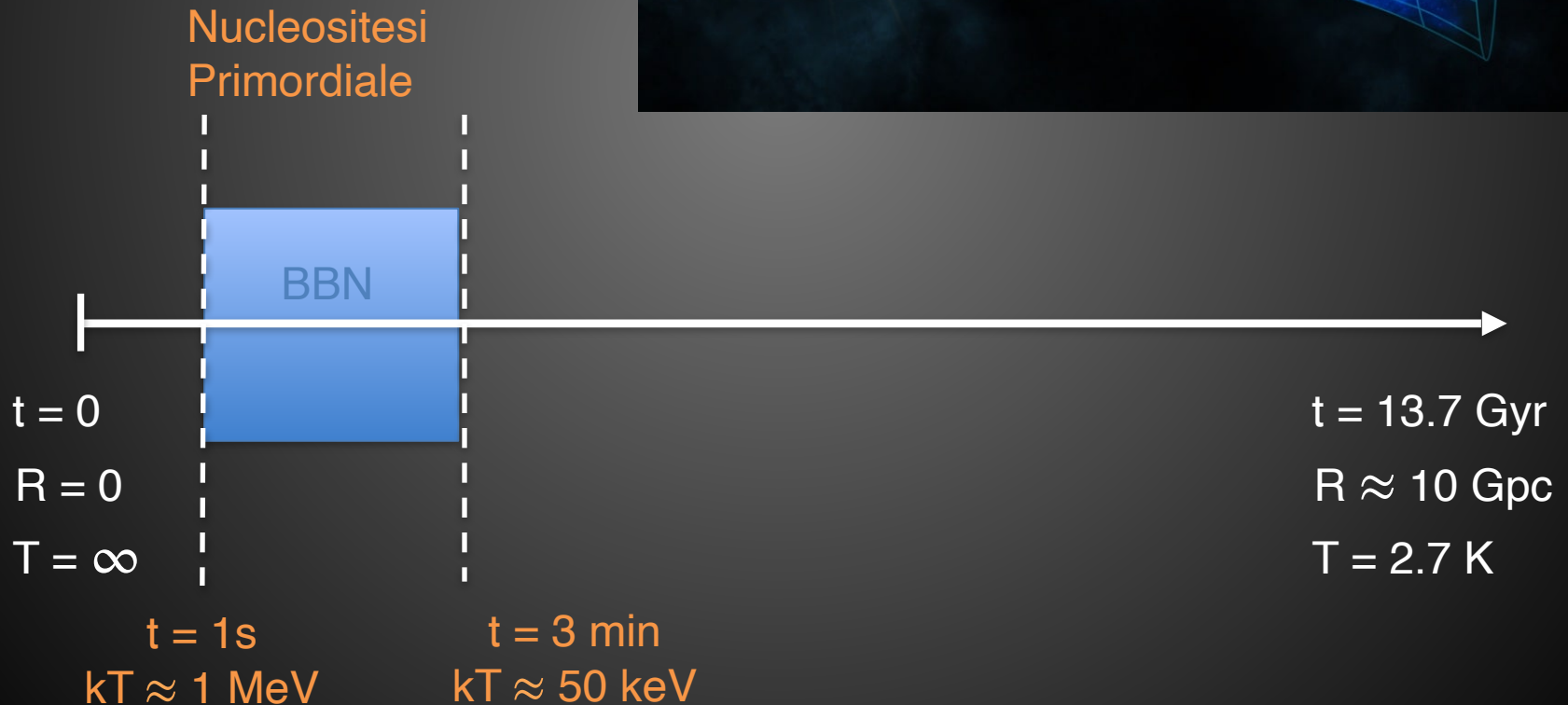
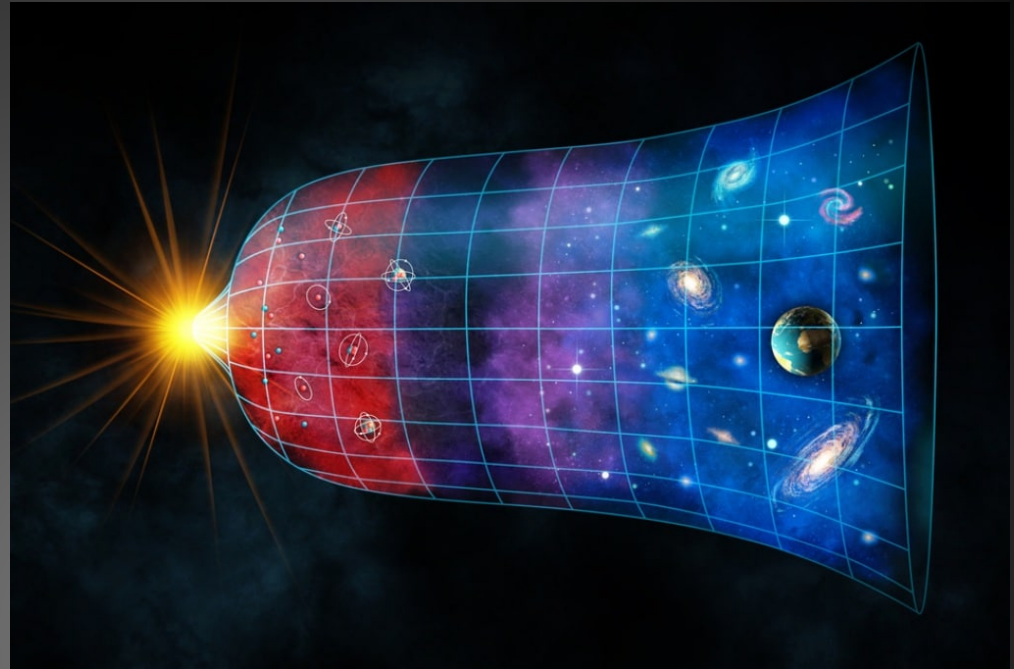
Legge di Hubble:

la velocità di allontanamento è proporzionale alla distanza

$$v = H_0 d$$

Il Big Bang

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

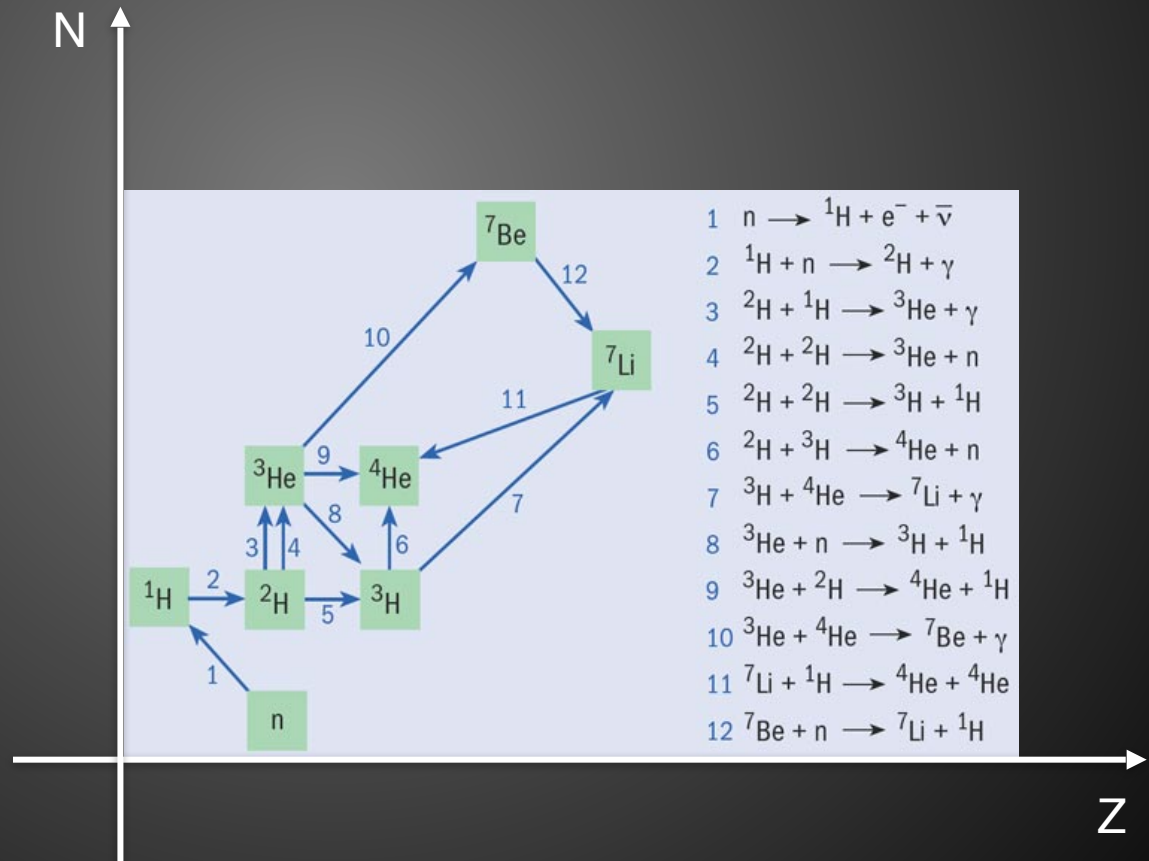


La nucleosintesi primordiale

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 nucleosintesi

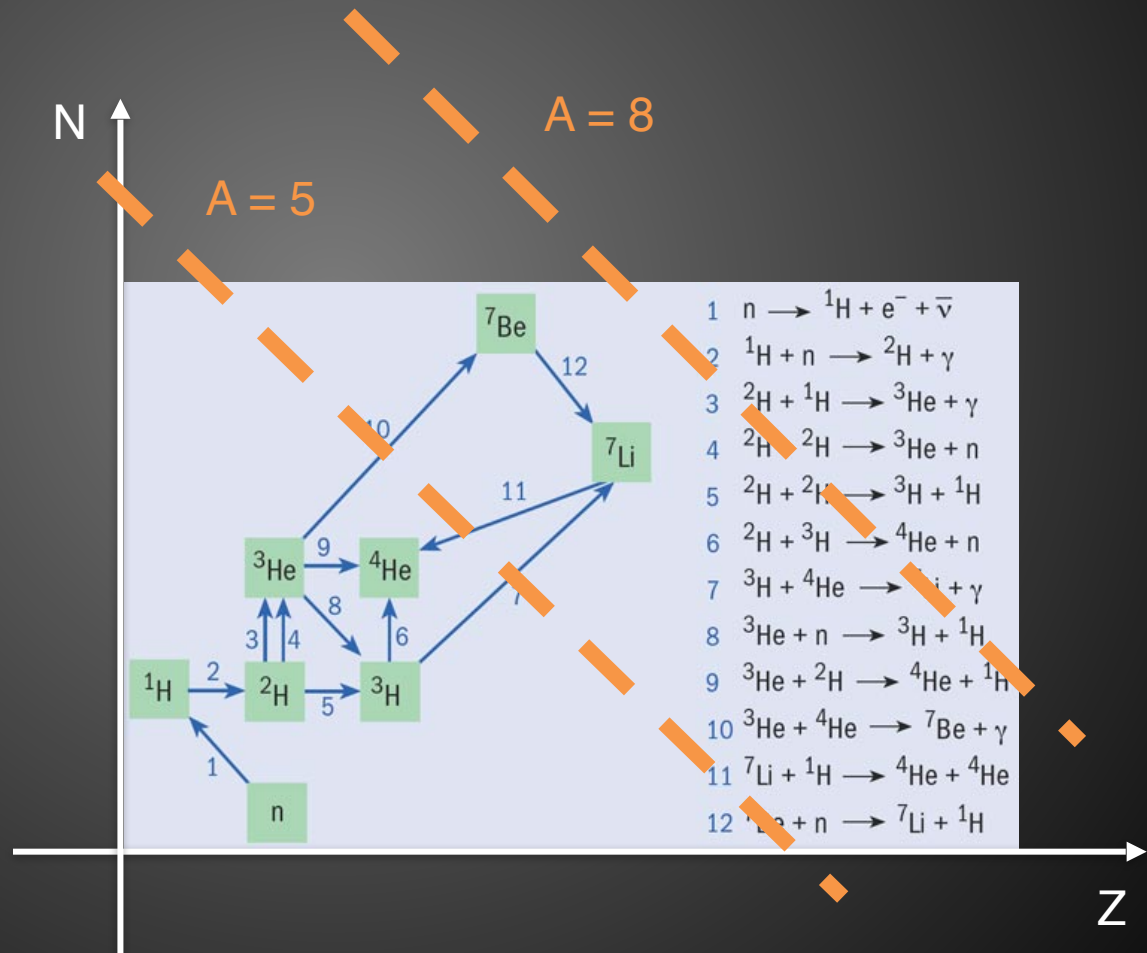


La nucleosintesi primordiale

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

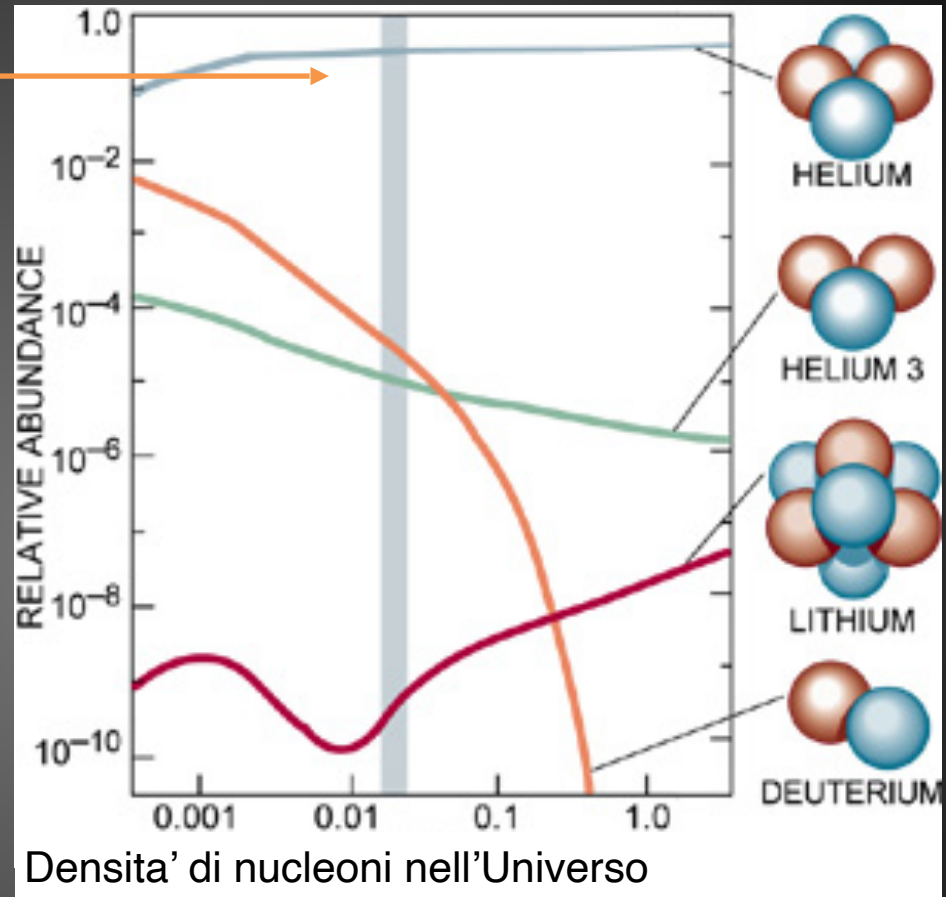
Notare

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



La nucleosintesi primordiale

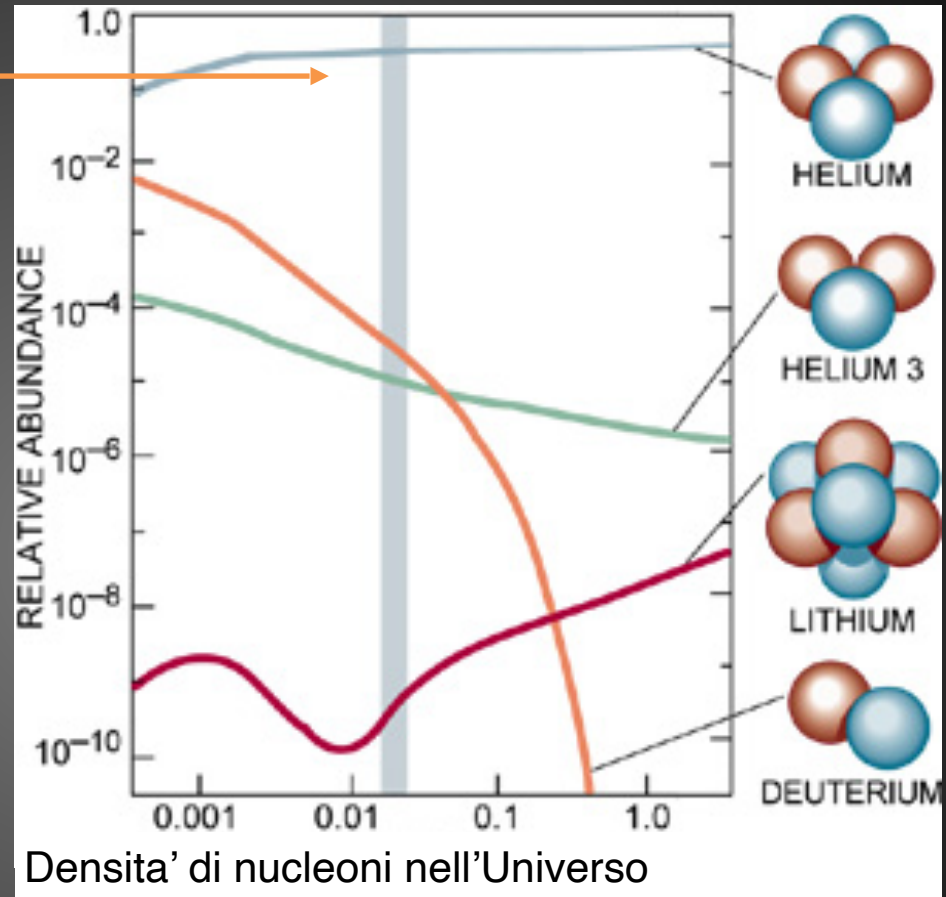
I nuclei di elio-4 presenti nell'Universo sono quasi tutti di origine primordiale



La nucleosintesi primordiale

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

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



La nucleosintesi stellare

All'interno delle stelle si verificano condizioni di densità 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

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

La nucleosintesi stellare

All'interno delle stelle si verificano condizioni di densità 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

$$E_g = -2 E_i$$



$$G \frac{M^2}{R} \simeq \frac{M}{m_H} k_B T$$



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



Conservazione dell'Energia

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

La nucleosintesi stellare

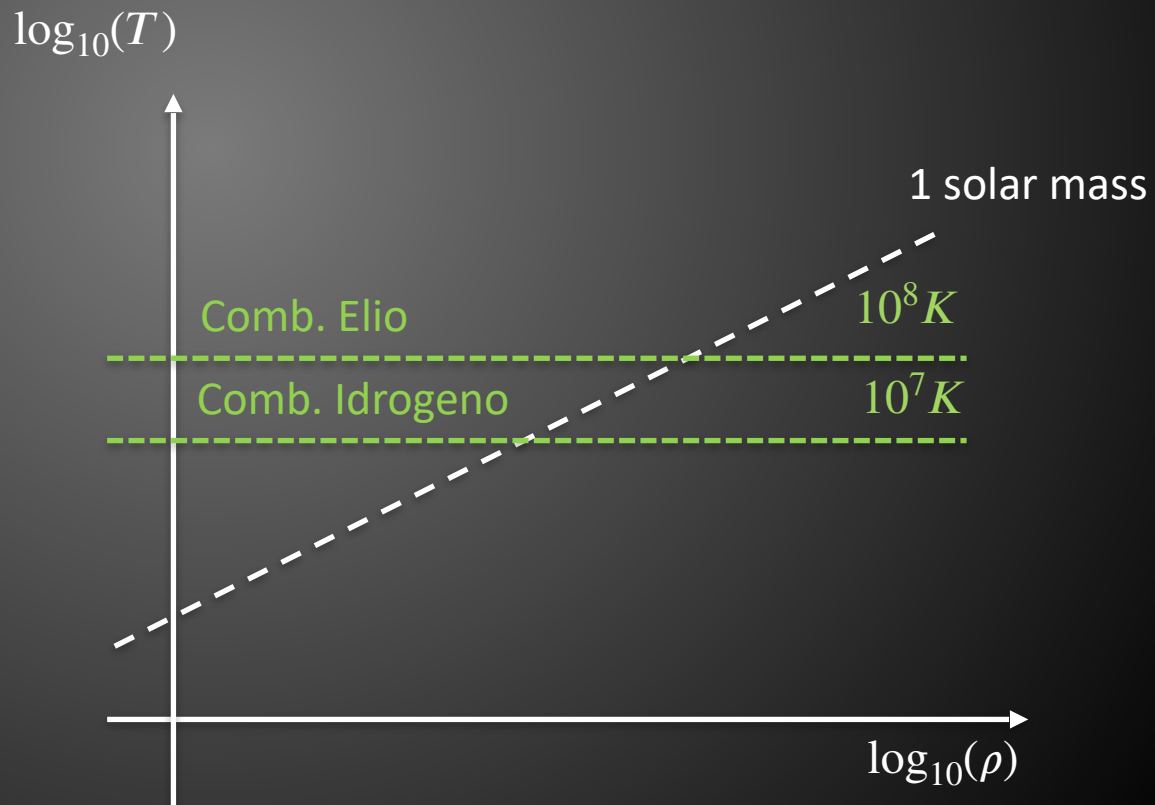
Teorema del Viriale – Esiste un legame tra l'energia gravitazionale e l'energia interna (termica) di una stella

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

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 però 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 più grande (1MeV/particella)
→ **Reazioni Nucleari**

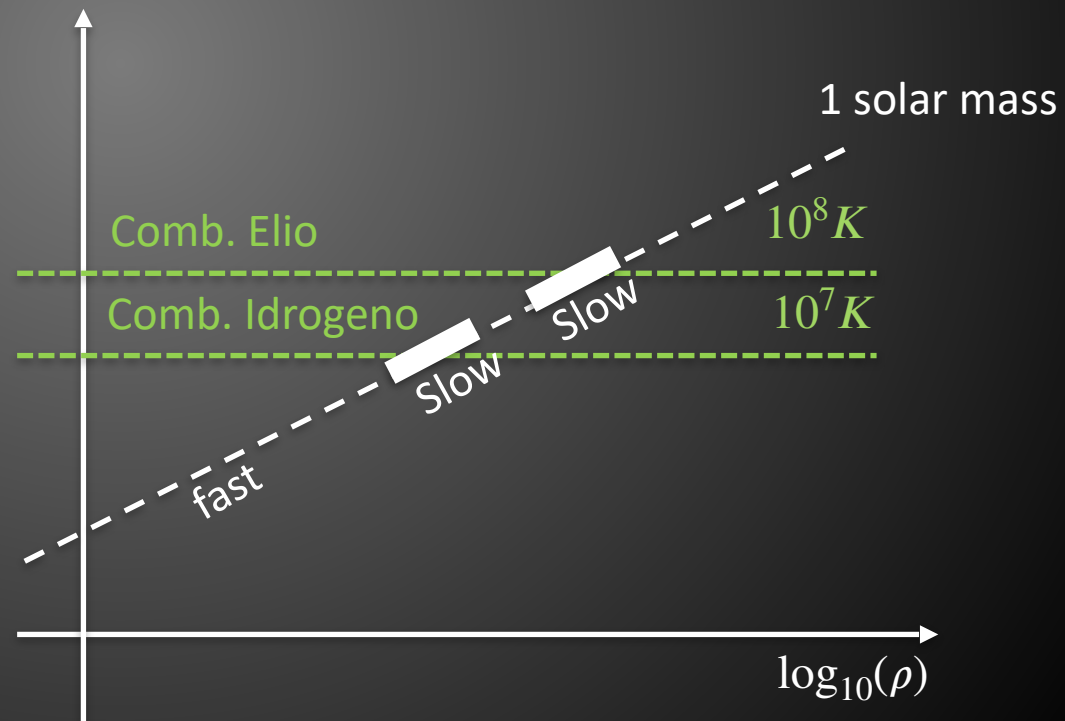


La nucleosintesi stellare

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

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

$\log_{10}(T)$

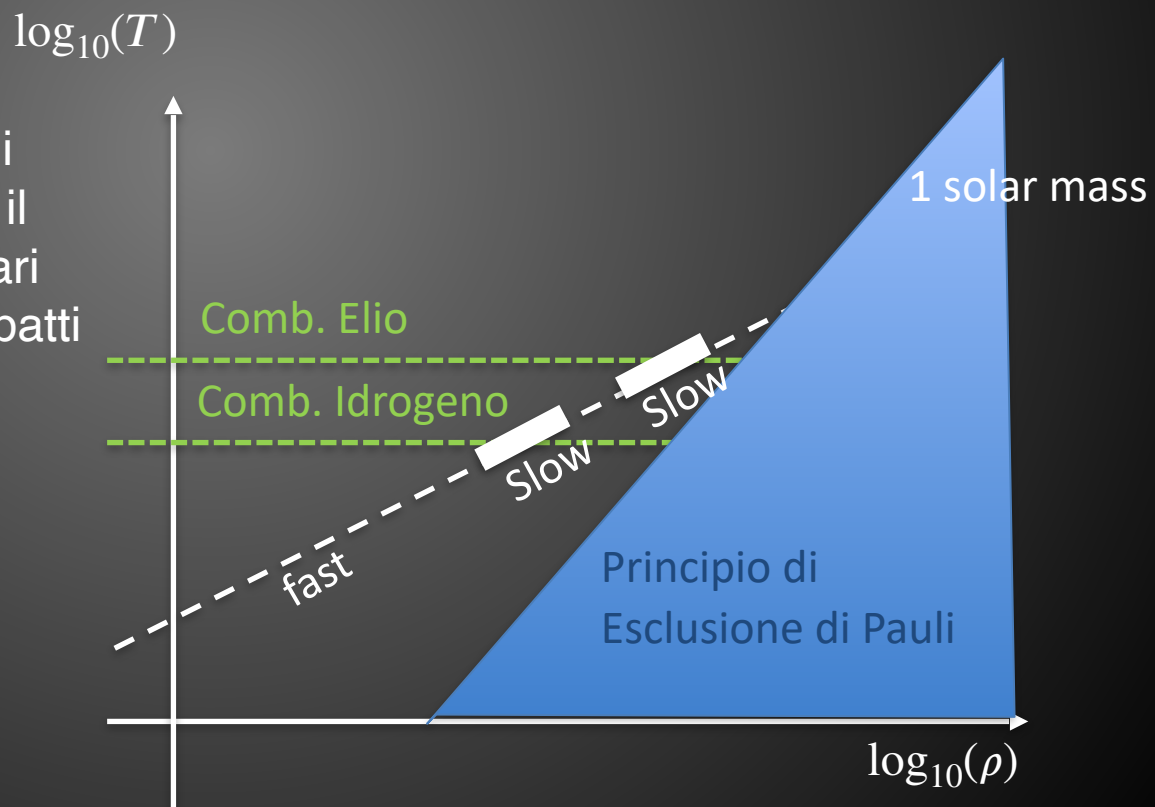


La nucleosintesi stellare

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

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

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



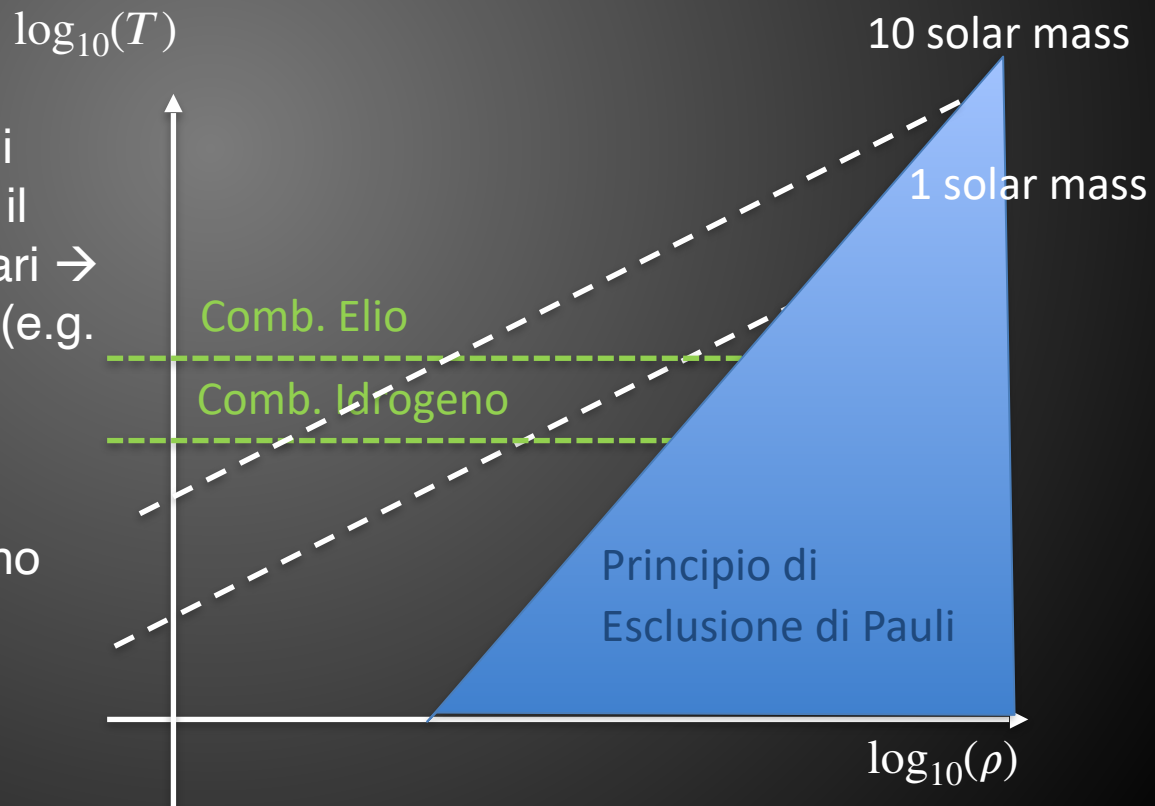
La nucleosintesi stellare

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

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

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 ($H \rightarrow {}^4\text{He}$)

- Catena pp
- Ciclo CNO

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

Combustione dell'elio (${}^4\text{He} \rightarrow \text{C,O}$)

(reazione 3α)

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

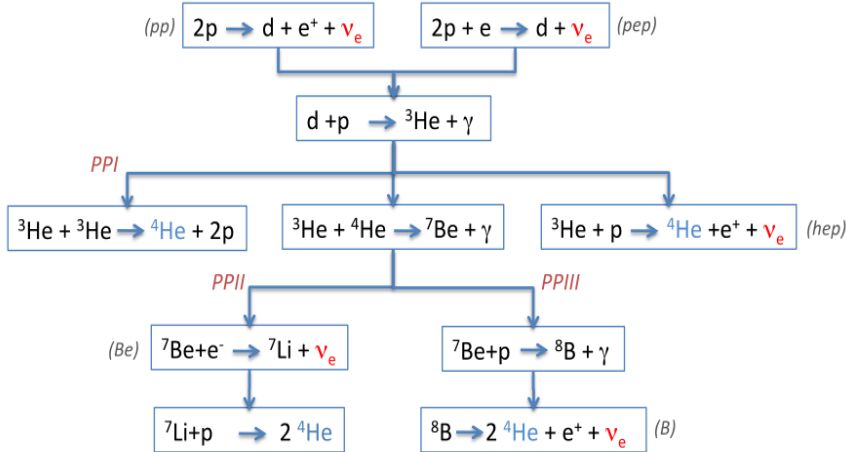
Combustione dell'idrogeno: catena pp e ciclo CNO

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

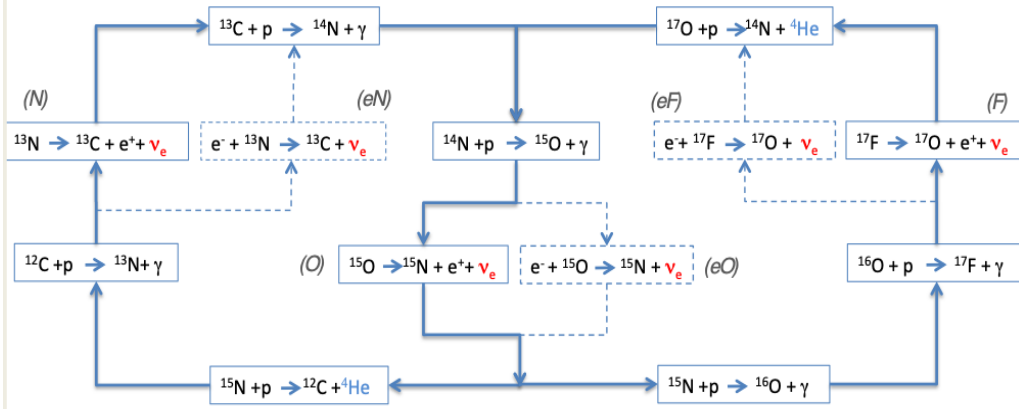


Free streaming – 8 minuti per raggiungere la Terra.

The PP-chain



The CN-NO (bi-)cycle

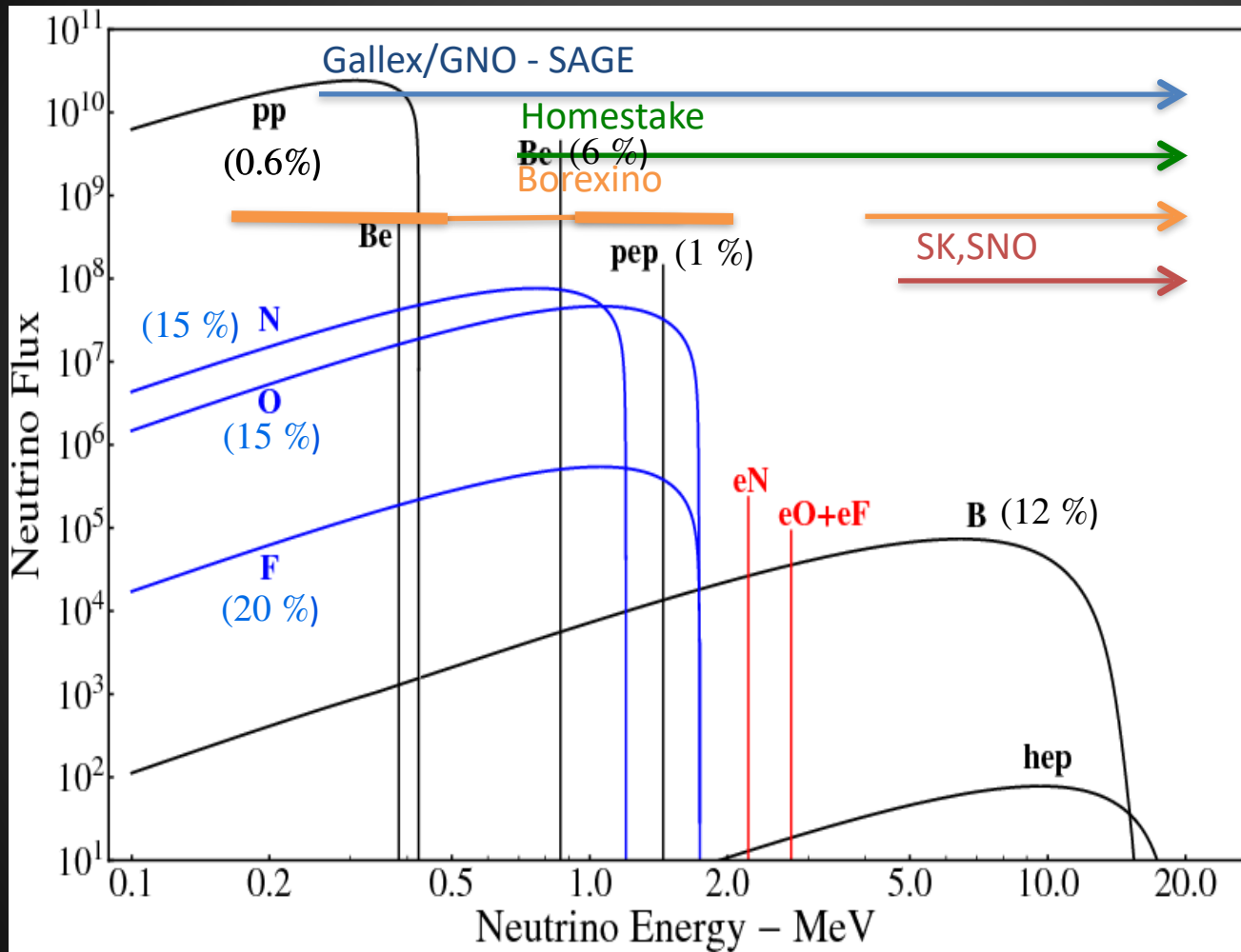


La **catena pp** e' responsabile di circa il 99% della energia e dei neutrini prodotti nel Sole

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%

^7Be : ~ 3 %

^8B : ~ 2 % (SK, SNO)

CNO: ~ 30%

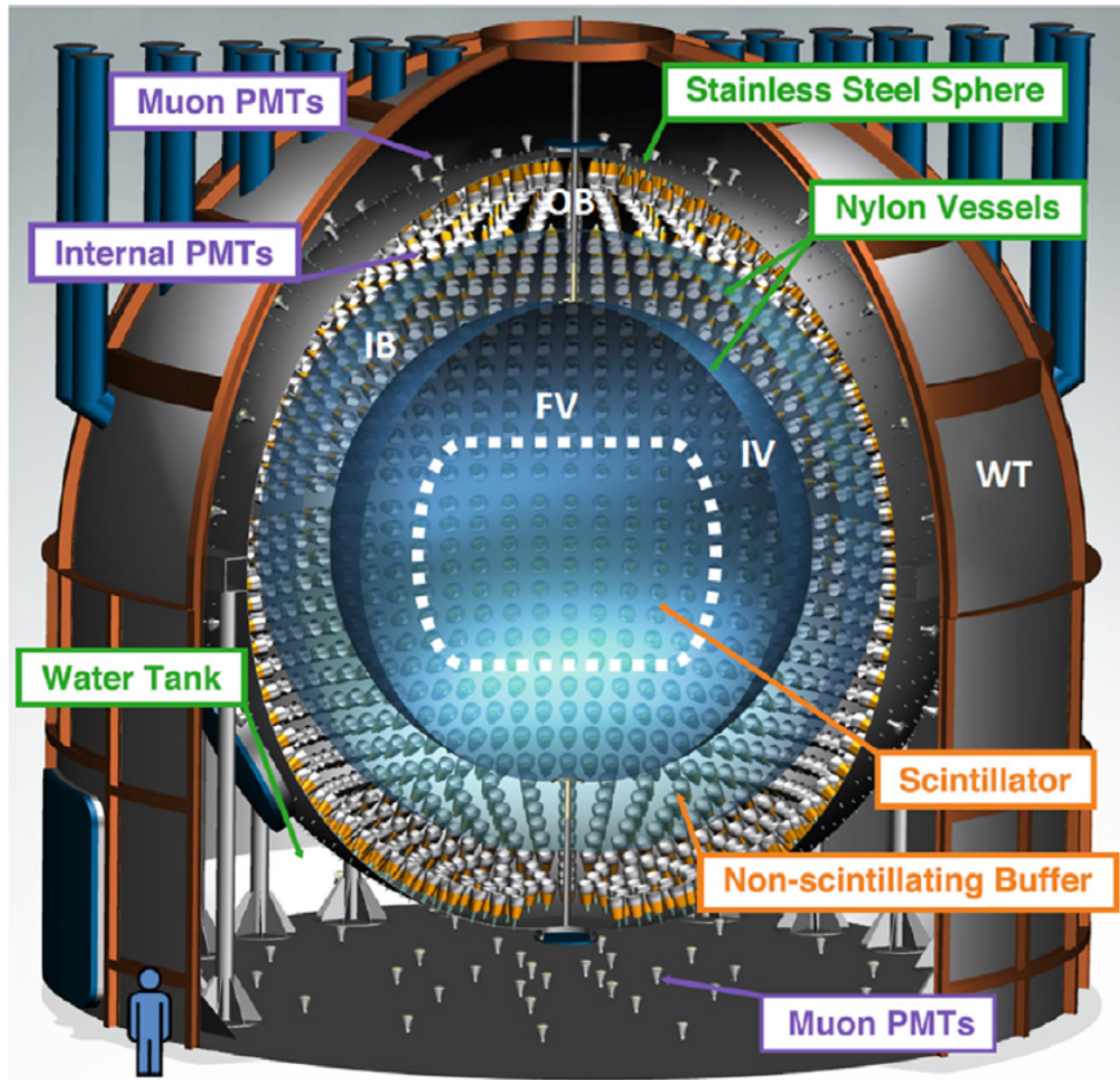
The Borexino detector @ LNGS

Active volume:
280 tons of liquid
scintillator.

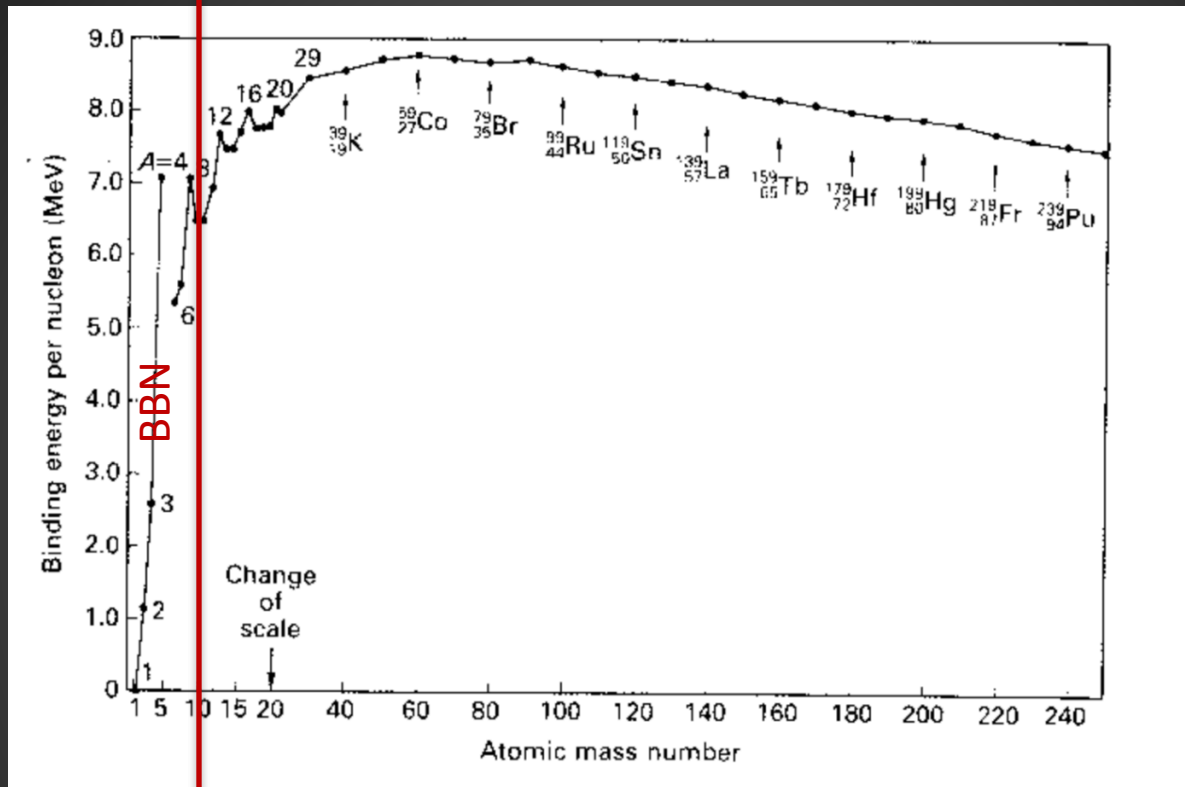
Detection principle

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

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

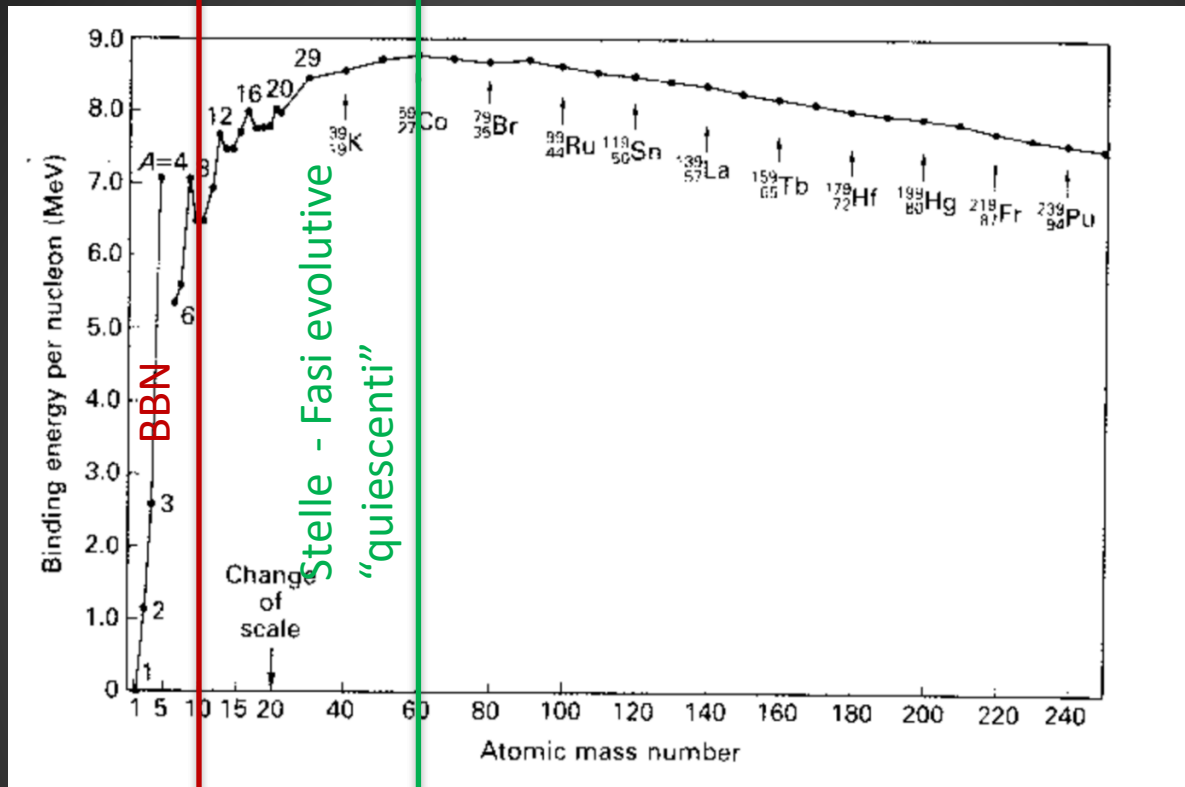


La nucleosintesi stellare



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

$A < 56 \rightarrow$ Reazioni esoenergetiche \rightarrow Stelle stabili

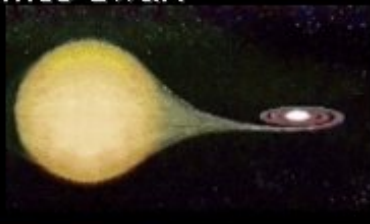
$A > 56 \rightarrow$ Reazioni endoenergetiche \rightarrow Stelle instabili \rightarrow Esplosioni Stellari (e.g. SN)

Meccanismi di esplosione delle stelle

Thermonuclear vs. Core-Collapse Supernovae

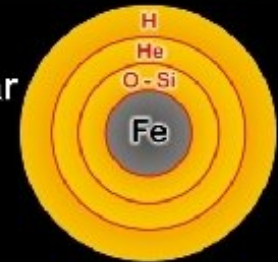
Thermonuclear (Type Ia)

- Carbon-oxygen white dwarf (remnant of low-mass star)
- Accretes matter from companion



Core collapse (Type II, Ib/c)

- Degenerate iron core of evolved massive star
- Accretes matter by nuclear burning at its surface



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

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

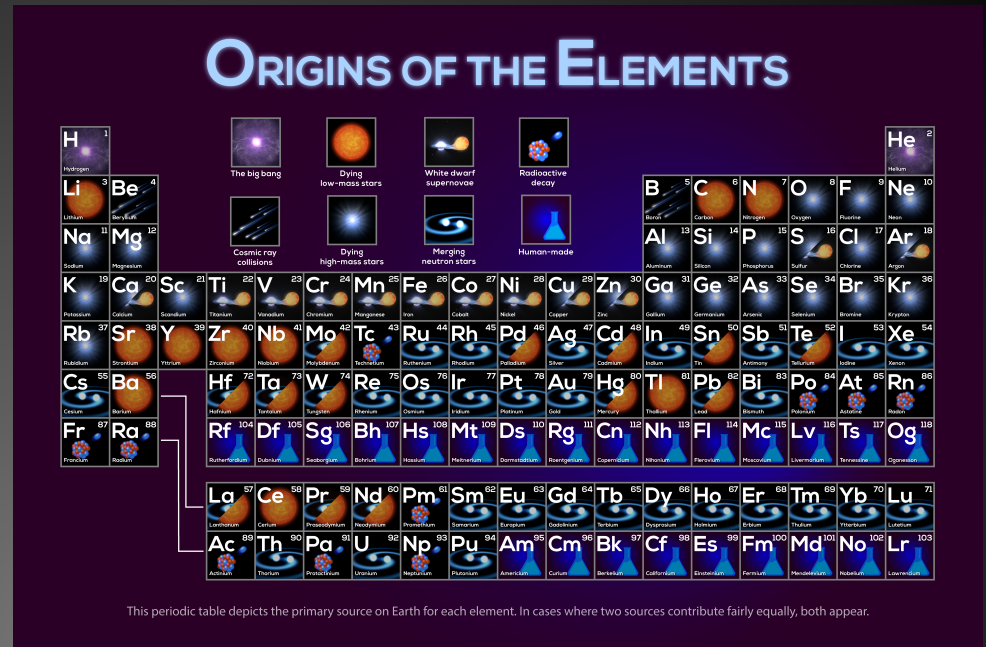
Powered by gravity

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 $\sim 3 \times 10^{51}$ erg

Conclusioni



Siamo in grado di “tracciare” l’origine degli elementi

- Gli elementi leggeri (e.g. D e ^4He) 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