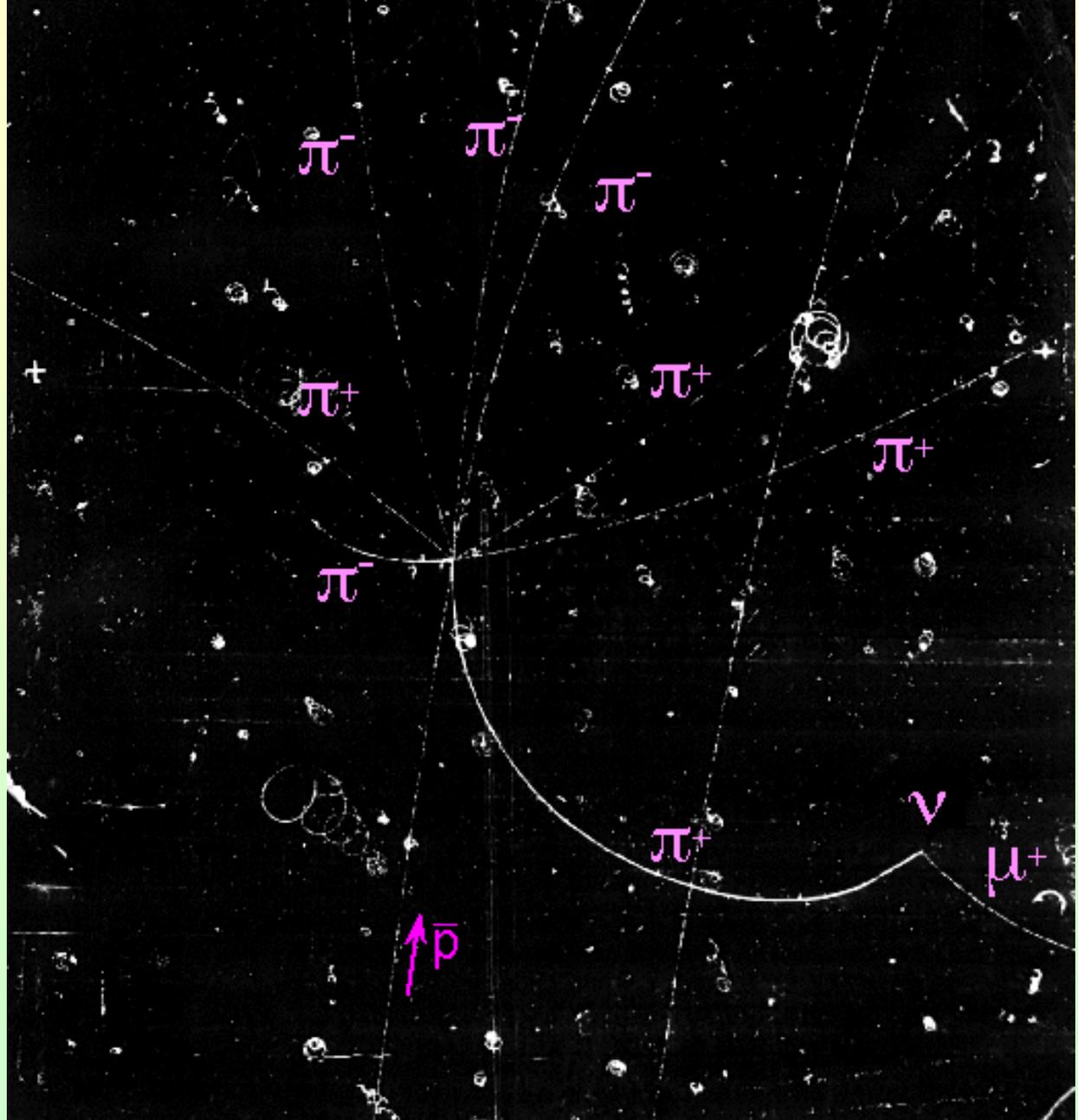


Parte terza

Fisica nucleare

**Esempio di
interazione
nucleare**



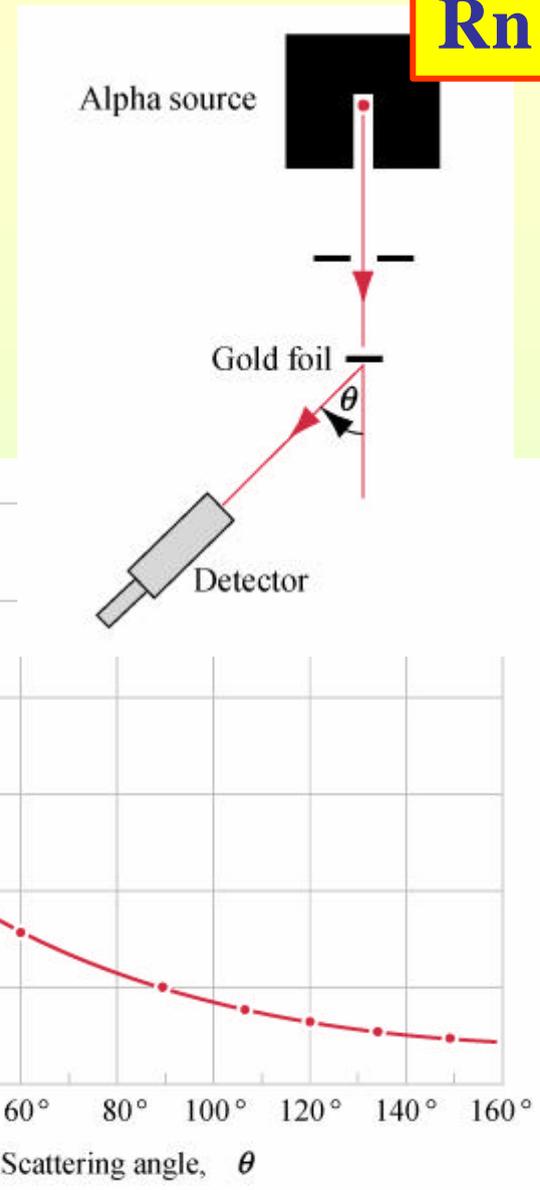
L'esperimento di Rutherford, realizzato da Geiger e Marsden, portò alla scoperta dei nuclei degli atomi.

Dalla legge di conservazione dell'energia si può calcolare facilmente la minima distanza a cui arriva una particella α da un nucleo di Au ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_a q_{\text{Au}}}{d} = 5,3 \text{ MeV}$$

$$d = \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})}{4\pi\epsilon_0 (8,8 \cdot 10^{-12}) \cdot 5,3} =$$

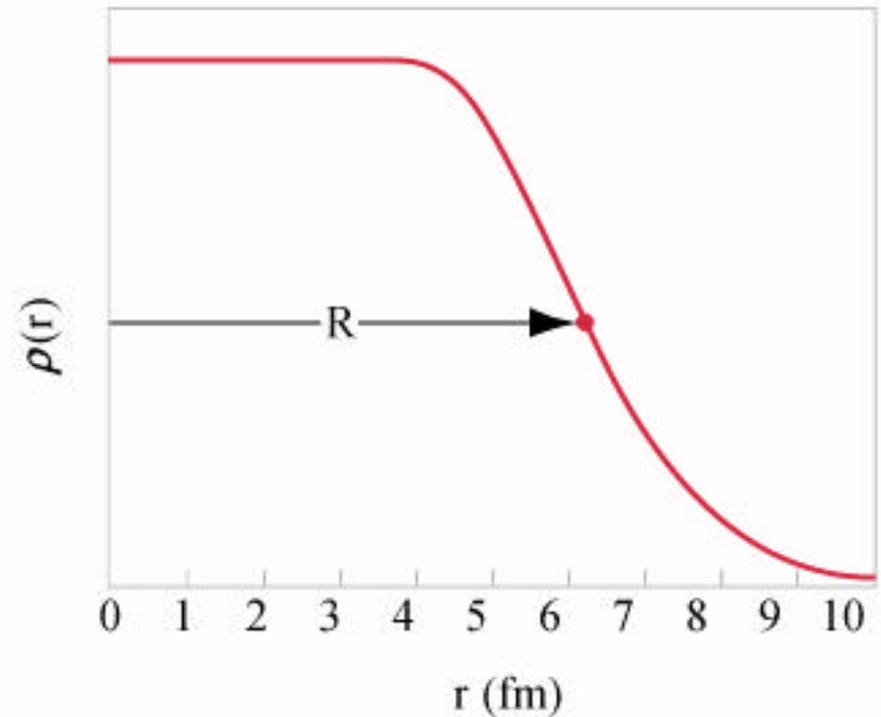
$$= 4,3 \cdot 10^{-14} \text{ fm} = 43 \text{ fm}$$



Le dimensioni di un nucleo sono date da:

$$r = r_0 A^{1/3}$$

dove $r_0 \sim 1.2 \cdot 10^{-15} \text{m}$. Il volume di un nucleo e' dunque proporzionale a A



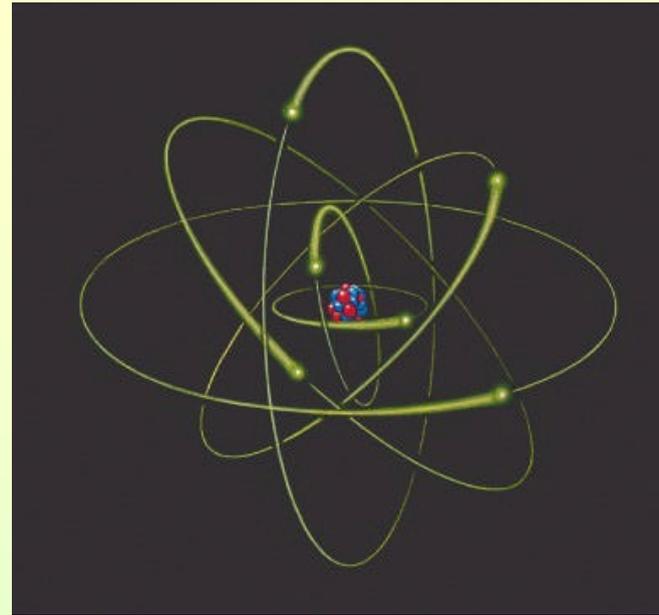
I nuclei sono stabili perche' le forze nucleari forti (attrattive e a corto range) tra nucleoni sono piu' intense delle forze repulsive (elettrostatiche) tra protoni fino a $Z = 83$; dopo questo valore di numero atomico inizia l'instabilita' nucleare.

I nuclei sono caratterizzati da:

- un *numero di massa* A (detto anche *peso atomico*). Si dicono **isobari** i nuclei con A costante. Il peso atomico esprime il numero di nucleoni nel nucleo, ossia la somma di protoni (con carica $+1$) e neutroni (con carica 0).

- un *numero atomico* Z . Si dicono **isotopi** i nuclei con Z costante. Il numero atomico Z esprime il numero di protoni nel nucleo, uguale al numero di elettroni orbitali per atomi neutri.

- un *numero neutronico* N . Sono detti **isotoni** i nuclei con N costante. Ovviamente deve essere $A = Z + N$

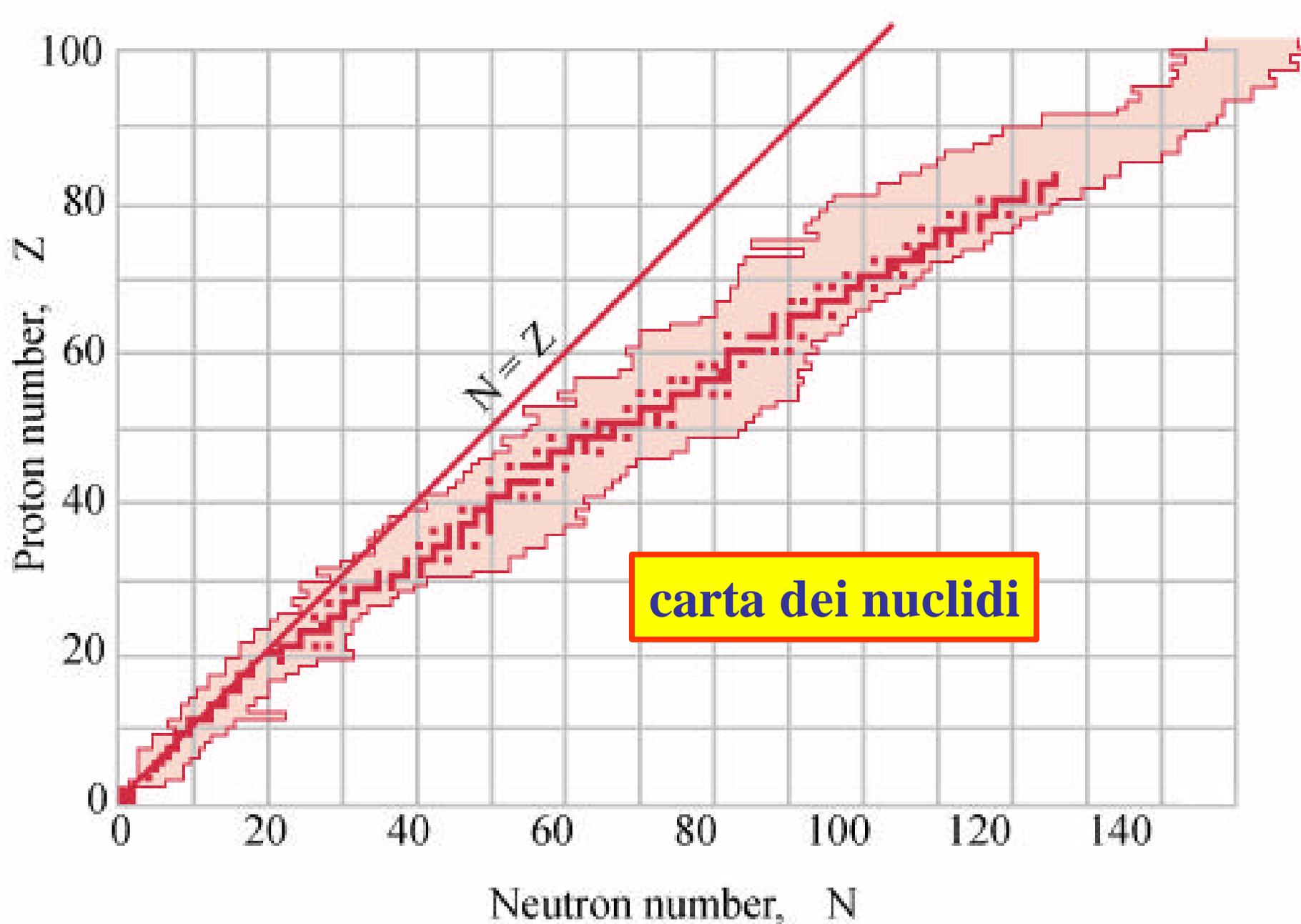


Nuclidi (nuclei) e nucleoni (protoni e neutroni) sono termini generici. Un nucleo si indica, ad esempio, con:



I nuclei di idrogeno e di elio sono spesso detti *p* e *a*.
 Le masse dei costituenti la materia ordinaria (elettroni, protoni e neutroni) e dell'atomo di idrogeno sono riportate in tabella.

	protone	neutrone	elettrone	atomo H
kg	1,6726 10 ⁻²⁷	1,6750 10 ⁻²⁷	9,109 10 ⁻³¹	1,6735 10 ⁻²⁷
MeV/c²	938,28	939,57	0,511	938,78



La distribuzione degli isotopi naturali indica che solo gli elementi leggeri hanno uguale numero di protoni e neutroni; al crescere del peso atomico gli isotopi hanno un numero di neutroni maggiore del numero di protoni.

In figura, le linee verticali rappresentano gli isotopi, le orizzontali gli isotoni e quelle oblique gli isobari.

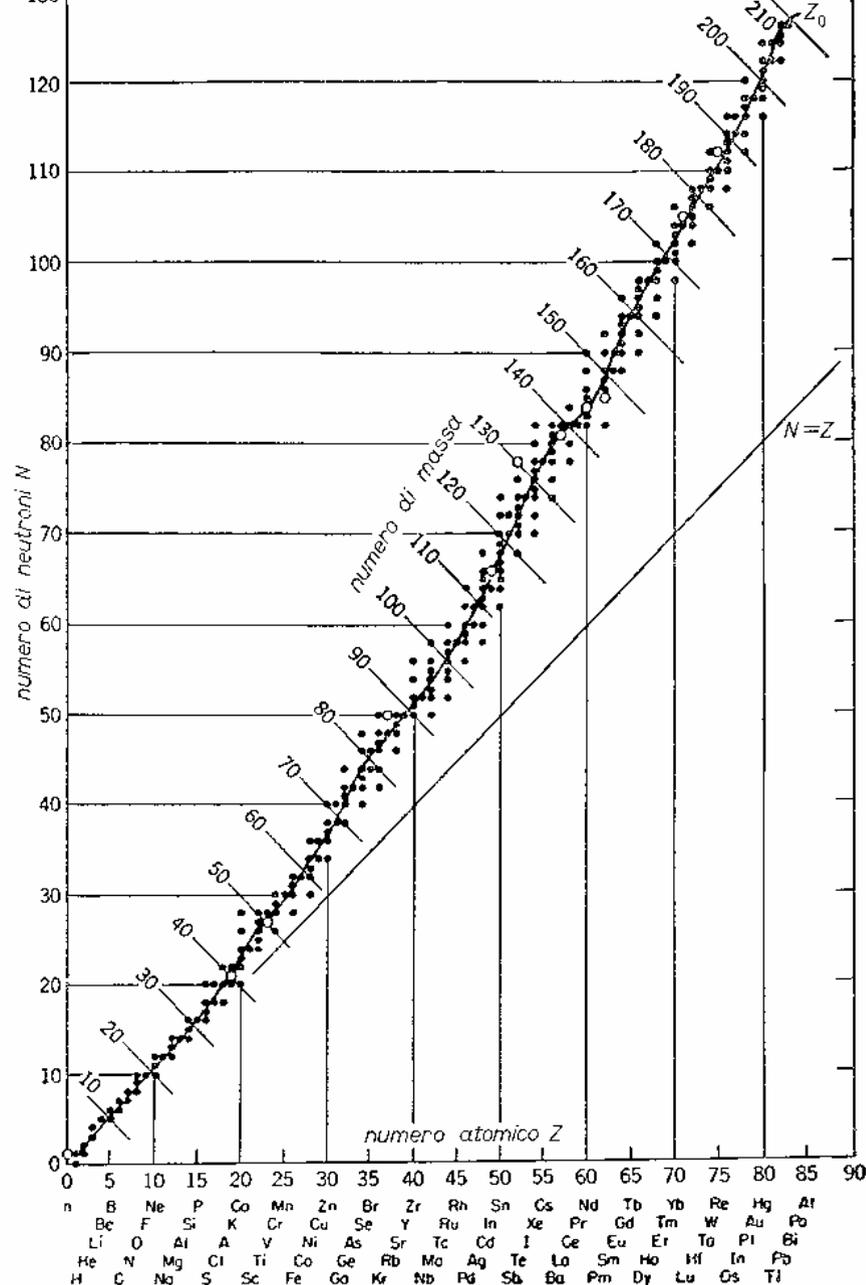


Fig. 13. - Carta dei nuclei naturali per $Z \leq 83$. I nuclei naturali giacciono su una curva che definisce il fondo della valle di stabilità β e presentano un eccesso neutronico $N - Z$ tale da bilanciare la repulsione coulombiana dei protoni (da R. D. EVANS: op. cit., p. 287): ● nuclei stabili, ○ nuclei radioattivi.

Proton number, Z

82	¹⁹⁷ Pb 8 min	¹⁹⁸ Pb 2.4 h	¹⁹⁹ Pb 1.5 h	²⁰⁰ Pb 21.5 h	²⁰¹ Pb 9.42 h	²⁰² Pb 5250 y	²⁰³ Pb 52.0 h
81	¹⁹⁶ Tl 1.84 h	¹⁹⁷ Tl 2.83 h	¹⁹⁸ Tl 5.3 h	¹⁹⁹ Tl 7.4 h	²⁰⁰ Tl 26.1 h	²⁰¹ Tl 73.6 h	²⁰² Tl 12.2 d
80	¹⁹⁵ Hg 9.5 h	¹⁹⁶ Hg 0.15 %	¹⁹⁷ Hg 64.1 h	¹⁹⁸ Hg 10.0 %	¹⁹⁹ Hg 16.9 %	²⁰⁰ Hg 23.1 %	²⁰¹ Hg 16.2 %
79	¹⁹⁴ Au 39.5 h	¹⁹⁵ Au 183 d	¹⁹⁶ Au 6.18 d	¹⁹⁷ Au 100 %	¹⁹⁸ Au 2.70 d	¹⁹⁹ Au 3.14 d	²⁰⁰ Au 48.4 min
78	¹⁹³ Pt 50 y	¹⁹⁴ Pt 32.9 %	¹⁹⁵ Pt 33.8 %	¹⁹⁶ Pt 25.3 %	¹⁹⁷ Pt 18.3 h	¹⁹⁸ Pt 7.2 %	¹⁹⁹ Pt 30.8 min
77	¹⁹² Ir 74.2 d	¹⁹³ Ir 62.7 %	¹⁹⁴ Ir 19.2 h	¹⁹⁵ Ir 2.5 h	¹⁹⁶ Ir 52 s	¹⁹⁷ Ir 5.8 min	¹⁹⁸ Ir 8 s
76	¹⁹¹ Os 15.4 d	¹⁹² Os 41.0 %	¹⁹³ Os 30.5 h	¹⁹⁴ Os 6.0 y	¹⁹⁵ Os 6.5 min	¹⁹⁶ Os 35 min	
	115	116	117	118	119	120	121

Neutron number, N

Schema dei possibili decadimenti di un nucleo e prodotti finali del decadimento

numero di protoni

			α, n	α, γ
	p, n	p, γ d, n	d, γ α, d	α, p
	γ, n p, d		n, γ d, p	
p, α	γ, d d, α	n, d γ, p	n, p	
γ, α	n, α			

numero di neutroni

I isotopi: Z costante, A variabile (perche` varia N).

I sobari: A costante, Z e N variabili (Z + N costante).

I sotoni: N costante, A variabile (perche` varia Z).

La **scala dei pesi atomici** e` nata sulla base delle combinazioni chimiche degli elementi, assegnando il valore 16 all'ossigeno (scala chimica).

Dopo aver scoperto, e misurate le abbondanze di altri isotopi dell'ossigeno, e` stato assegnato il peso atomico 16,004411 a questo elemento chimico (scala fisica).

La densita`
nucleare vale

$$\mathbf{r} = \frac{Am_n}{\frac{4}{3}\mathbf{pr}^3} = \frac{Am_n}{\frac{4}{3}\mathbf{pr}_0^3 A} = \frac{3m_n}{4\mathbf{pr}_0^3} = 2 \cdot 10^{17} \text{ kg} / \text{m}^3$$

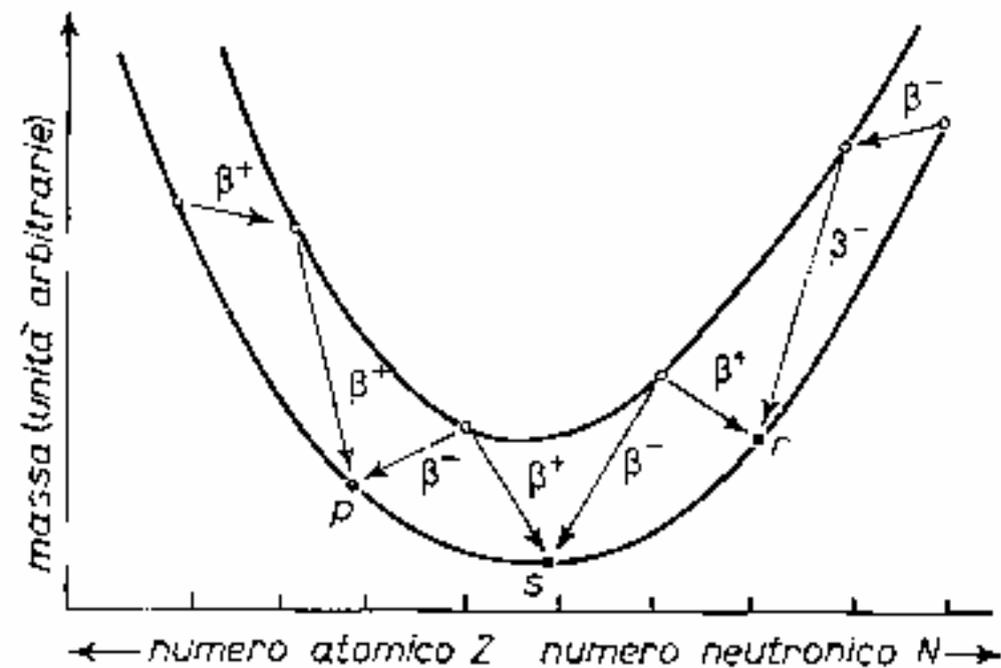
Le masse degli isobari non sono date semplicemente da A , ma dalla formula delle masse di **Von Weizaker**:

$$M(A, Z) = aA + bZ + gZ^2 \pm d$$

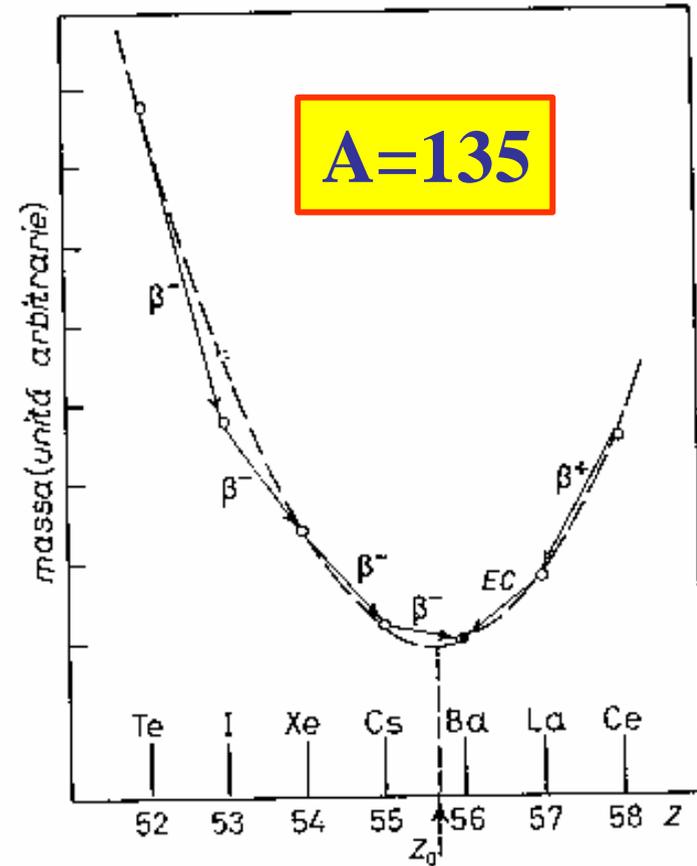
Si ottiene una singola parabola per i nuclei con A dispari ($\delta = 0$) e due parabole per quelli con A pari: $\delta < 0$ per Z e N entrambi pari, e $\delta > 0$ per Z e N entrambi dispari.

Un nucleo è legato, e quindi stabile, perché *la sua massa è minore della somma delle masse dei nucleoni* che lo costituiscono. Il difetto di massa, meglio noto come **energia di legame**, di un nucleo è definito da questa differenza

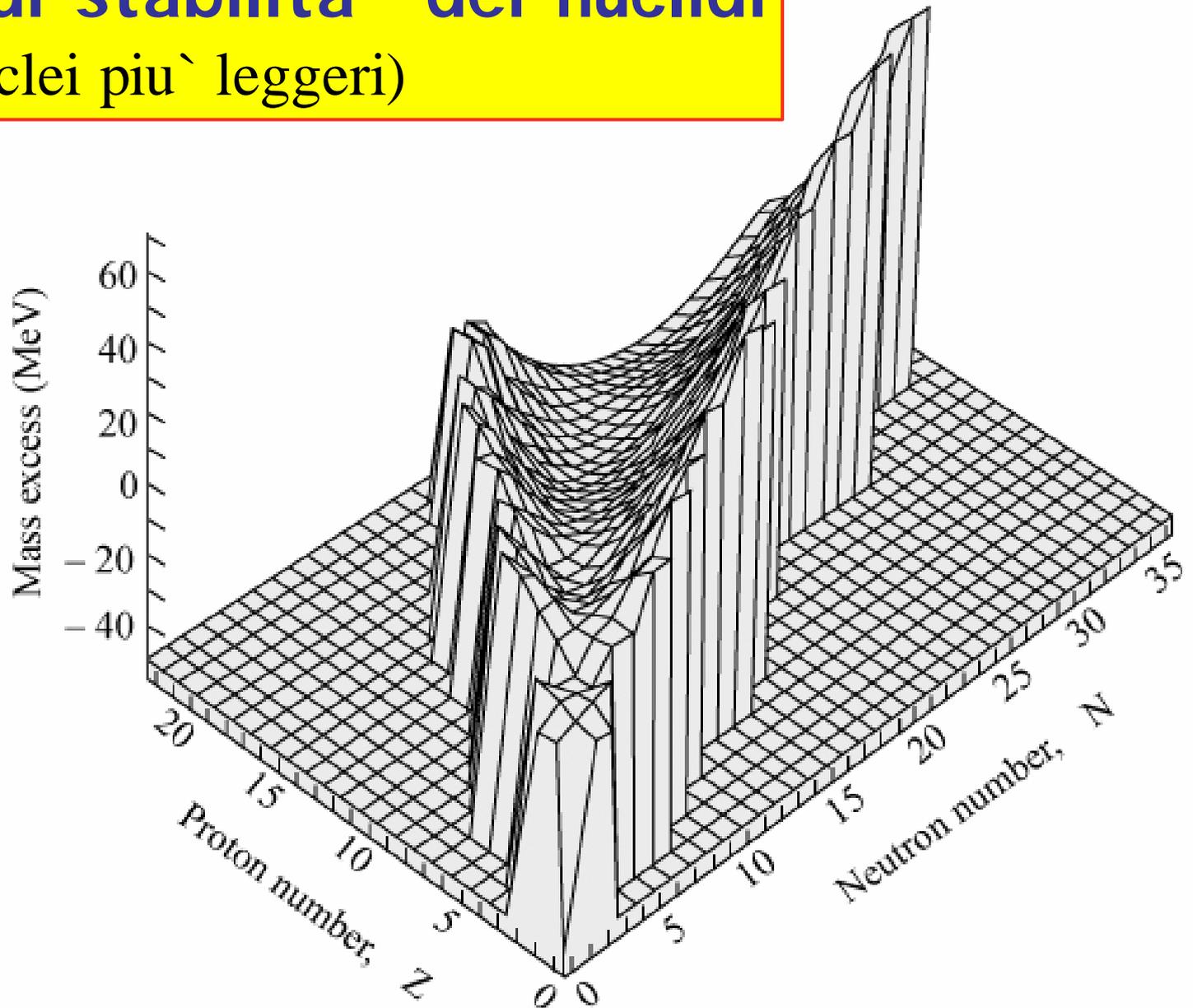
$$\Delta E = \sum mc^2 - Mc^2$$



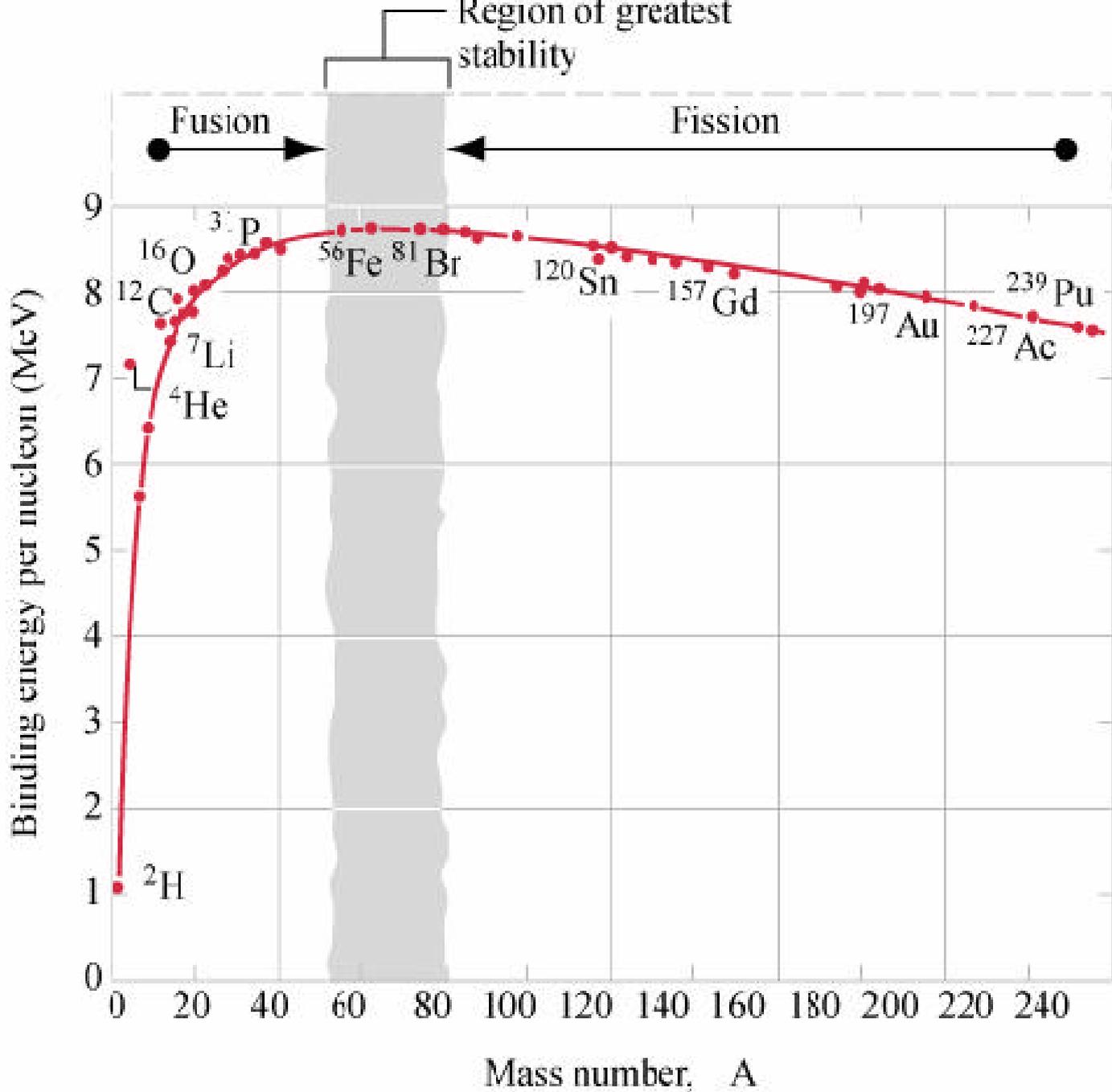
Sezioni della carta dei nuclidi per gli isobari ($A = \text{costante}$)



Valle di stabilita` dei nuclidi (per i nuclei piu` leggeri)



Per esempio l'energia di legame del *deutone* (nucleo dell'idrogeno pesante ${}^2\text{H}$) è $2,2 \text{ MeV}/c^2$, quella di una *particella α* (nucleo di ${}^4\text{He}$) è $27,3 \text{ MeV}/c^2$, in quanto la sua massa è $3728,4 \text{ MeV}/c^2$ mentre la massa complessiva di $2p$ e $2n$ è $3755,7 \text{ MeV}/c^2$. La diminuzione di massa ΔE divisa per il numero di nucleoni ($n = 4$ nel caso delle particelle α) fornisce il parametro **$\Delta E/A$** (*energia di legame per nucleone*). Per semplicità, nella fisica nucleare delle alte energie spesso si assume $c = 1$, per cui le particelle α hanno $\Delta E/A \sim 7 \text{ MeV}/n$. Gli elementi più legati in natura sono quelli del cosiddetto *gruppo del ferro* (**$A \sim 60$**) ed il massimo di $8,8 \text{ MeV}/n$ si ha per il ${}^{62}\text{Ni}$.

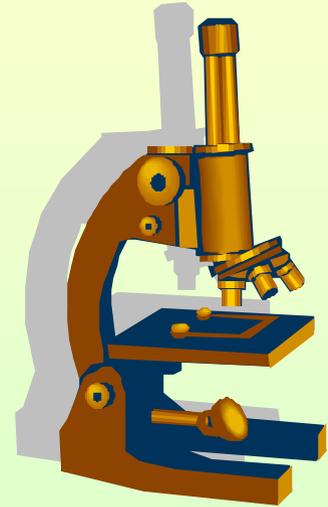


RADIOATTIVITA` NATURALE

Nel 1815 W.Prout suggerì l'esistenza di una relazione tra gli elementi chimici.

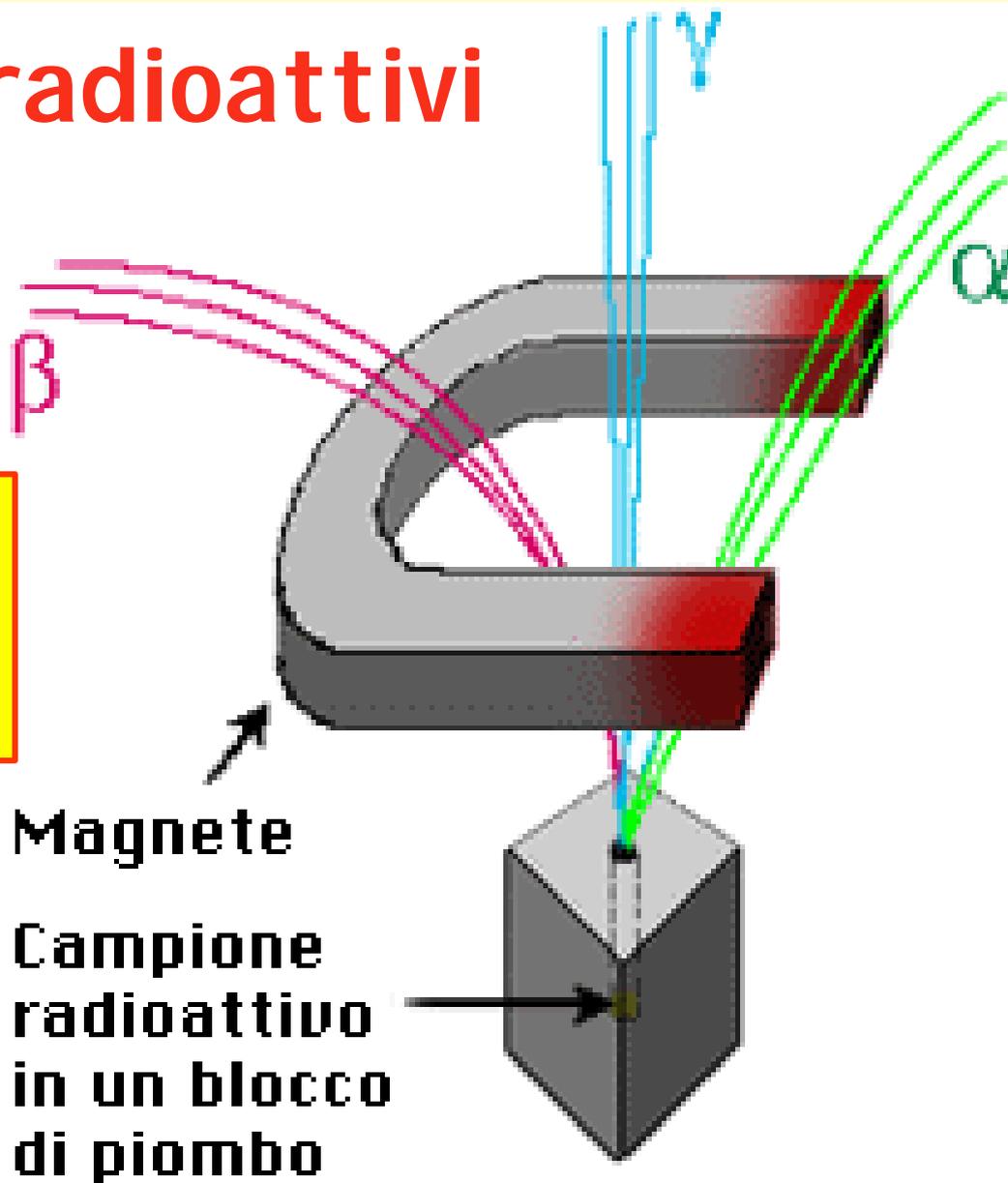
Nel 1864 J.Newlands osservò che le proprietà chimiche si ripetevano ogni otto elementi.

Nel 1869 D.Mendeleev e L.Meyer formularono la tabella degli elementi chimici (quelli noti nel 1895 erano 65, ora sono 118).



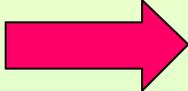
Decadimenti radioattivi

- a nuclei di He ($Z=+2$)
- b elettroni ($Z=-1$)
- g fotoni ($Z=0$)

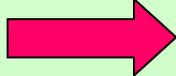


La maggior parte dei nuclei non sono eterni ma hanno vita finita e si trasformano in altri nuclei emettendo particelle (**a**, **b**, **g**).

Il decadimento di un nucleo e` un fenomeno puramente statistico, ossia non e` possibile prevedere quali nuclei decadranno ma solo il ritmo (*rate*) di decadimento.

Se si hanno N nuclidi con costante di decadimento λ (s^{-1}), le leggi che regolano il decadimento sono 

N_0 rappresenta il numero di nuclidi presenti ad un tempo arbitrario t_0 .

Se anziche` il numero di nuclidi sopravvissuti al tempo t si vuole il rate R di decadimento, si ha 

da cui **$R = \lambda N$** .

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda (t - t_0)$$

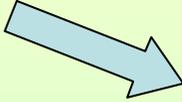
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ (per } t_0 = 0)$$

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

La frequenza R di decadimento di un dato campione si dice **attività**. Nel S.I. l'attività si misura in Bequerel (1 Bq corrisponde a 1 decadimento al s).

Talvolta si usa ancora il Curie (1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq) oppure i conteggi/s.

dalla $R = R_0 e^{-\lambda t}$ si ricava il tempo di dimezzamento


$$R = \frac{1}{2} R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

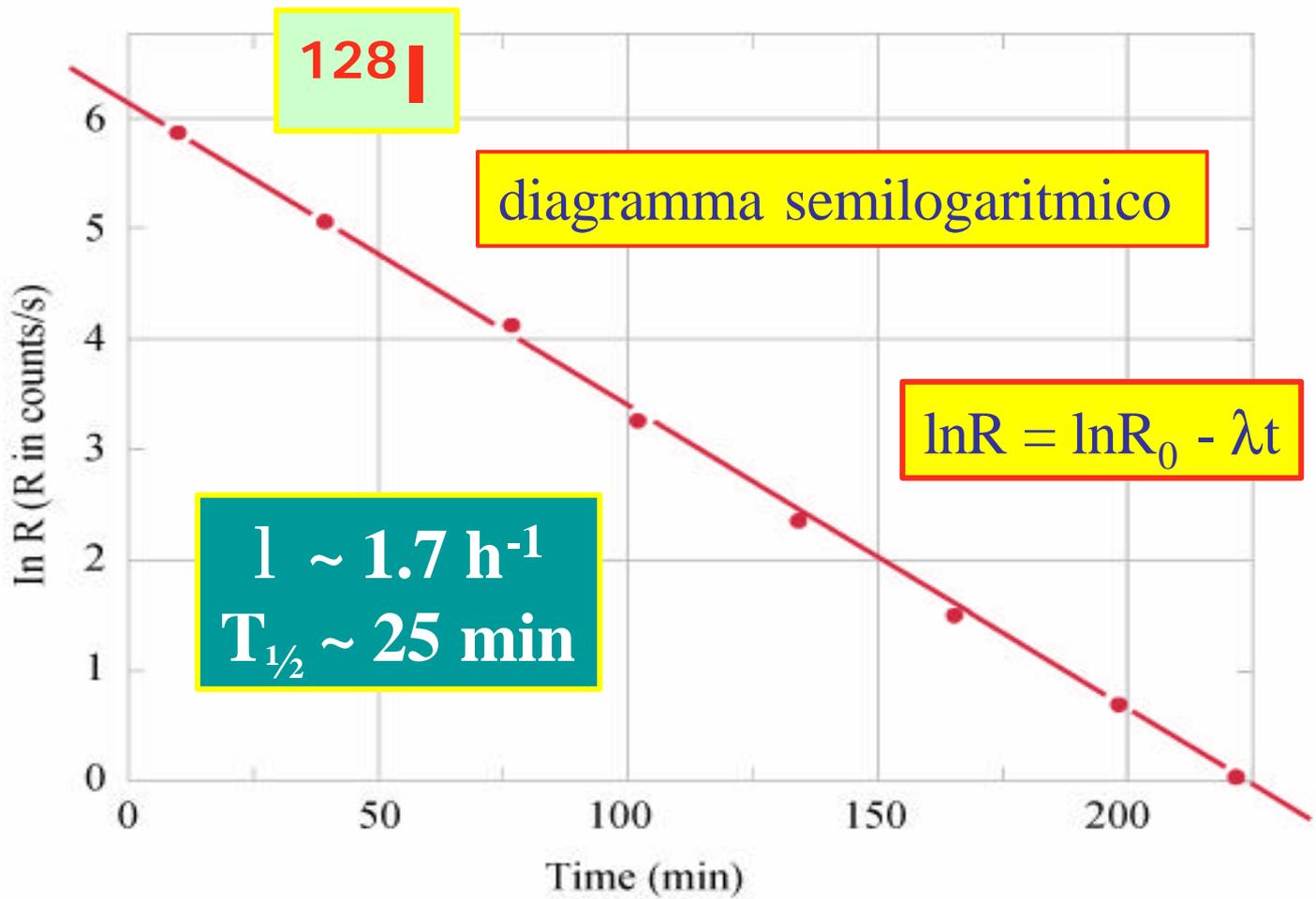
e la vita media



$$R = e^{-1} R_0 = R_0 e^{-\lambda t}$$
$$\lambda t = 1, t = \frac{1}{\lambda}$$

tempo di dimezzamento e vita media sono legati tra loro dalla relazione

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = t \ln 2$$

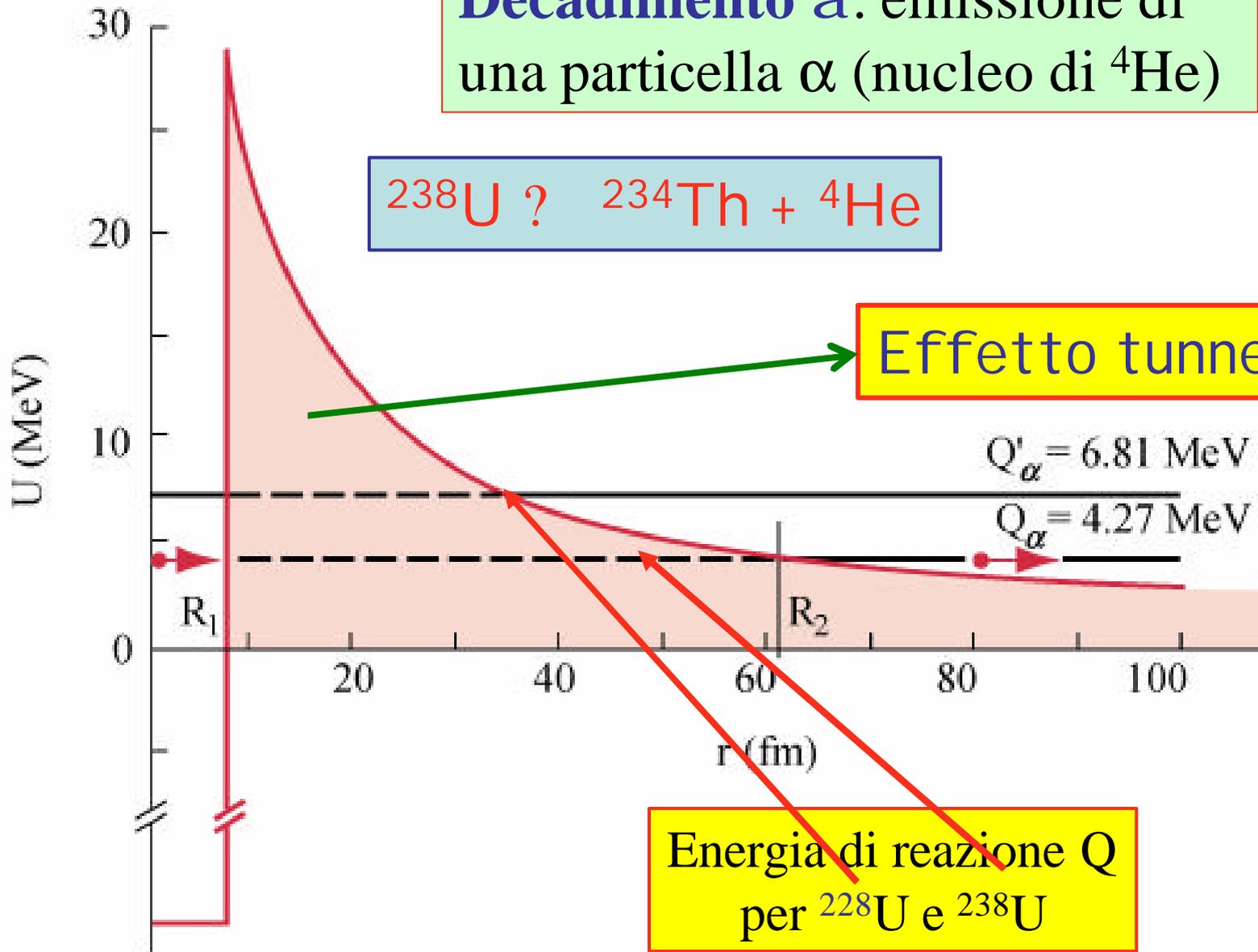


t (min)	4	36	68	100	132	164	196	218
R (c/s)	392.2	161.4	65.5	26.8	10.9	4.56	1.86	1.00

Decadimento α : emissione di una particella α (nucleo di ${}^4\text{He}$)



Effetto tunnel



Il processo di decadimento è spontaneo perché la massa del nucleo che decade è superiore alla somma delle masse dei nuclei prodotti nel decadimento. L'eccesso di massa (energia di reazione Q), per i decadimenti è detta energia di disintegrazione del decadimento.

Le vite medie degli isotopi considerati in figura sono:

$$T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9 \text{ anni per } ^{238}\text{U},$$
$$T_{1/2} = 9,1 \text{ minuti per } ^{228}\text{U}$$

Per esempio 1 mg di uranio, che contiene $2,5 \cdot 10^{18}$ atomi di ^{238}U , dopo $T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ anni = $1,4 \cdot 10^{17}$ s, avrà perso $1,25 \cdot 10^{18}$ atomi. Il ritmo di decadimento, statisticamente, è $R \sim 9$ atomi al secondo.

Per superare la barriera repulsiva elettrostatica la particella α , che supponiamo formatasi nell'interno del nucleo, batte contro le pareti del nucleo stesso e viene quasi sempre respinta. Se si assume una velocità della particella α di 10^7 m/s, il numero di urti al secondo contro la barriera è:

$$t^{-1} = \frac{v}{s} \approx \frac{10^7 \text{ m/s}}{10^{-14} \text{ m}} = 10^{21}$$

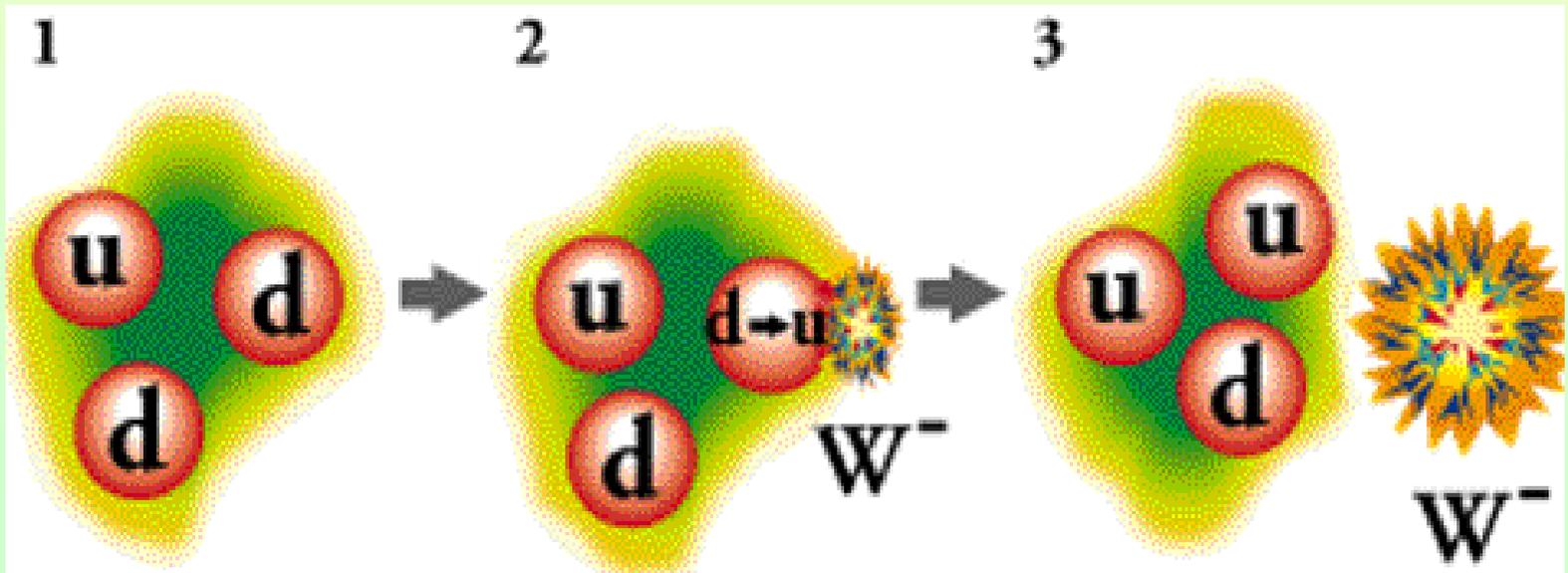
Decadimento β del neutrone:



Un neutrone decade in un protone, un elettrone e un antineutrino elettronico. Il processo è detto decadimento beta del neutrone, perché gli elettroni prodotti nei decadimenti nucleari venivano chiamati raggi beta prima che si scoprisse che fossero elettroni. Il neutrone libero decade spontaneamente ($\tau \sim 14,8$ min) perché la sua massa è superiore a quella del protone $m_n - m_p = \Delta m \sim 1,3 \text{ MeV}/c^2$.

- 1 - Un neutrone (carica = 0) è costituito di **1 quark up** e **2 quark down**.

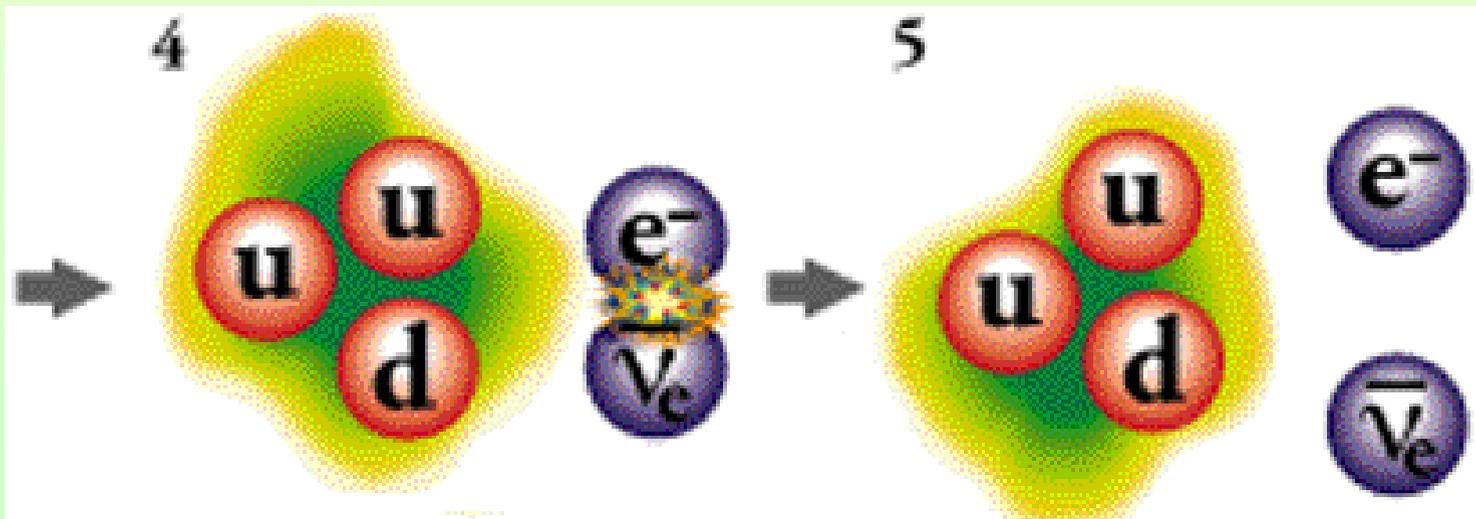
- 2 - Uno dei quark down si trasforma in un quark up. Dato che il down ha carica $-1/3$ e l'up $2/3$, per conservare la carica bisogna che il processo sia mediato da una particella W^- virtuale, che porti via la carica -1 .
- 3 - Il neutrone così è diventato un protone. La W^- emessa si allontana.



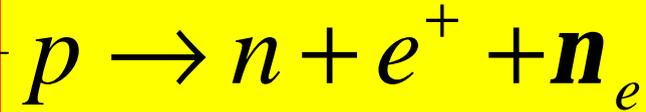
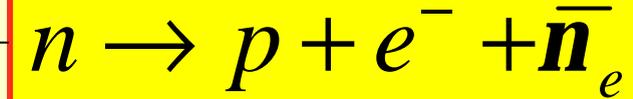
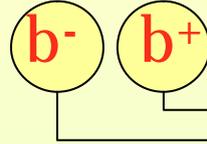
4 - Un elettrone e un antineutrino si materializzano dal bosone virtuale W^- .

5 - Il protone, l'elettrone e l'antineutrino si allontanano l'uno dall'altro.

Le fasi intermedie di questo processo avvengono in meno di un miliardesimo di miliardesimo di secondo, e non sono osservabili

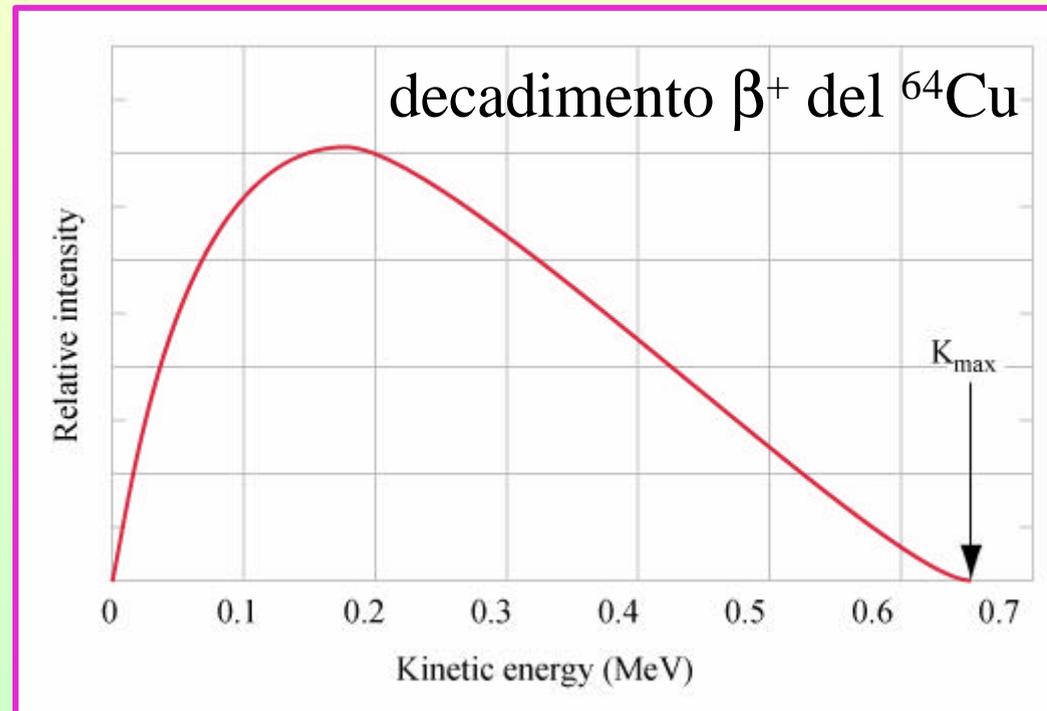


A livello nucleare i decadimenti β sono trasformazione di protoni in neutroni e viceversa:



Nel 1930 Pauli ipotizzò l'esistenza del neutrino e nel 1934 Fermi formulò la teoria del decadimento β

Devono valere le leggi di conservazione:
dell'energia,
dell'impulso,
del numero barionico,
del numero leptonico.



Nel decadimento β non cambia il peso atomico (nucleo parente e nucleo prodotto sono isobari). Cio` conferma che protoni e neutroni non sono particelle elementari ma composte di quark.

A differenza del decadimento α , nel quale la particella α ha energia cinetica costante, nel decadimento β l'elettrone viene emesso con uno spettro continuo di energie, segno che deve esistere un'altra particella (invisibile) il neutrino per la conservazione dell'energia.

Il neutrino, scoperto da Reines e Cowan nel 1953, ha sezione d'urto σ molto piccola e quindi interagisce molto poco con la materia. Per esempio, come vedremo, i neutrini prodotti nell'interno del Sole ne escono praticamente inalterati pur essendo $R_{\odot} \sim 7 \cdot 10^8$ m.



$$Q = \Delta m = K_{\max}$$

La fisica atomica e quella nucleare comportano che particelle e fotoni (di energia $\mathbf{E = hn}$) interagiscano con la materia per opera di diversi processi: *bremsstrahlung, ionizzazione, effetto Compton, creazione di coppie*.
L'intensità della radiazione e il flusso di particelle diminuiscono con lo spessore di materia attraversata.

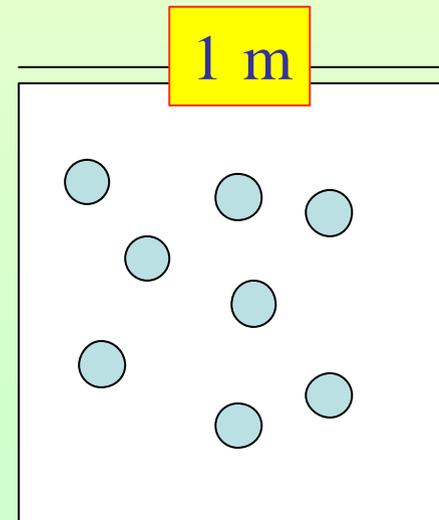
$$dI = -I \mu dx$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx$$

$$\ln I = -\mu x + A$$

$$I = e^A e^{-\mu x} = I_0 e^{-\mu x}$$

Si definisce sezione d'urto e si misura in m^2 o in barn ($1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$) la quantità σ tale da avere $\mu = N\sigma$, dove N è la densità numerica di nuclei bersaglio. Si definisce libero cammino medio di una particella (e si misura in m) la quantità $\lambda = \mu^{-1}$. Si deve avere $\lambda N\sigma = 1$.



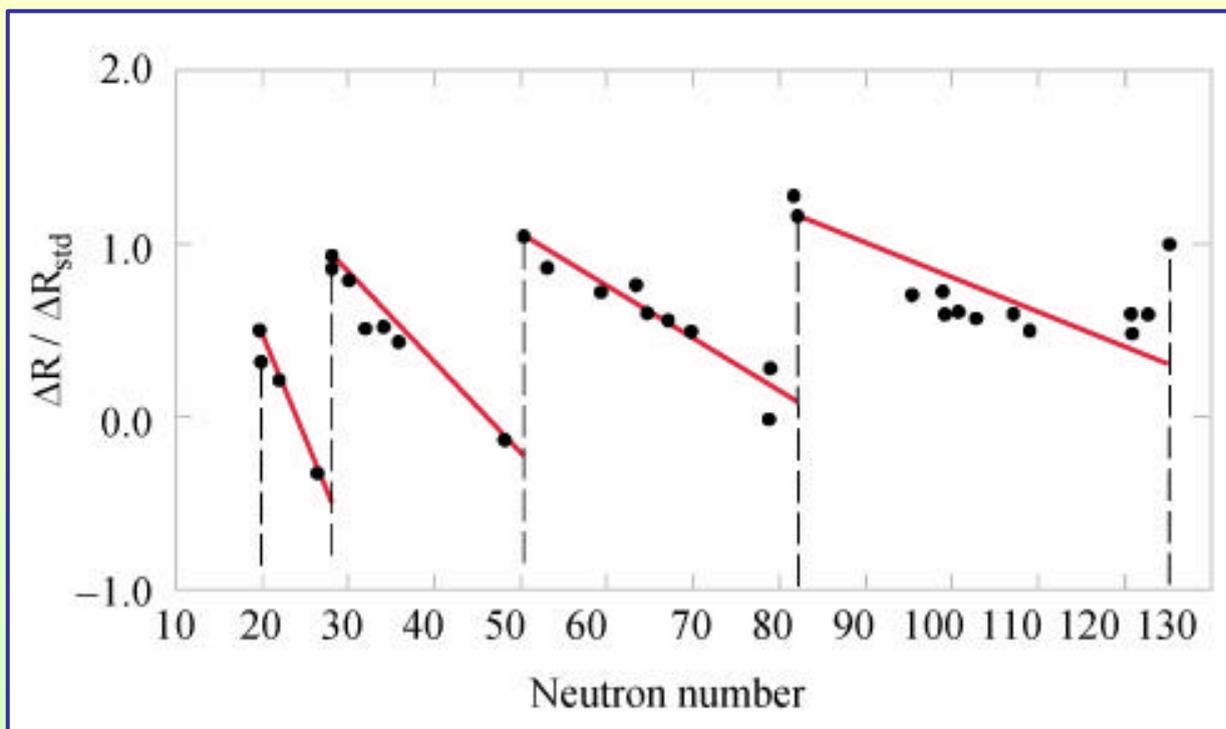
Modelli nucleari

A differenza degli atomi, per i nuclei non esiste una teoria generale della loro struttura, ma solo modelli.

- ***Modello collettivo a goccia*** (Bohr): ogni reazione nucleare passa attraverso un nucleo composito, instabile, che decade in un altro nucleo in modo indipendente dalla sua produzione.
- ***Modello a particelle indipendenti***: ogni nucleone si muove in una buca di potenziale e occupa stati diversi (per protoni e neutroni) a causa del principio di esclusione di Pauli.

I numeri magici sono un'ovvia conseguenza di questo modello:

$$Z \text{ o } N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$$



Per questo motivo la **particella α** (doppiamente magica nel numero di protoni e di neutroni) è particolarmente stabile. Infatti non esiste un nucleo stabile con $A = 5$, e il ${}^8\text{Be}$ è meno legato di 2 particelle α .

Le interazioni delle particelle con la materia sono rappresentabili con la **formula di Bohr e Bethe**, dalla quale si ottiene il percorso r (**range**).

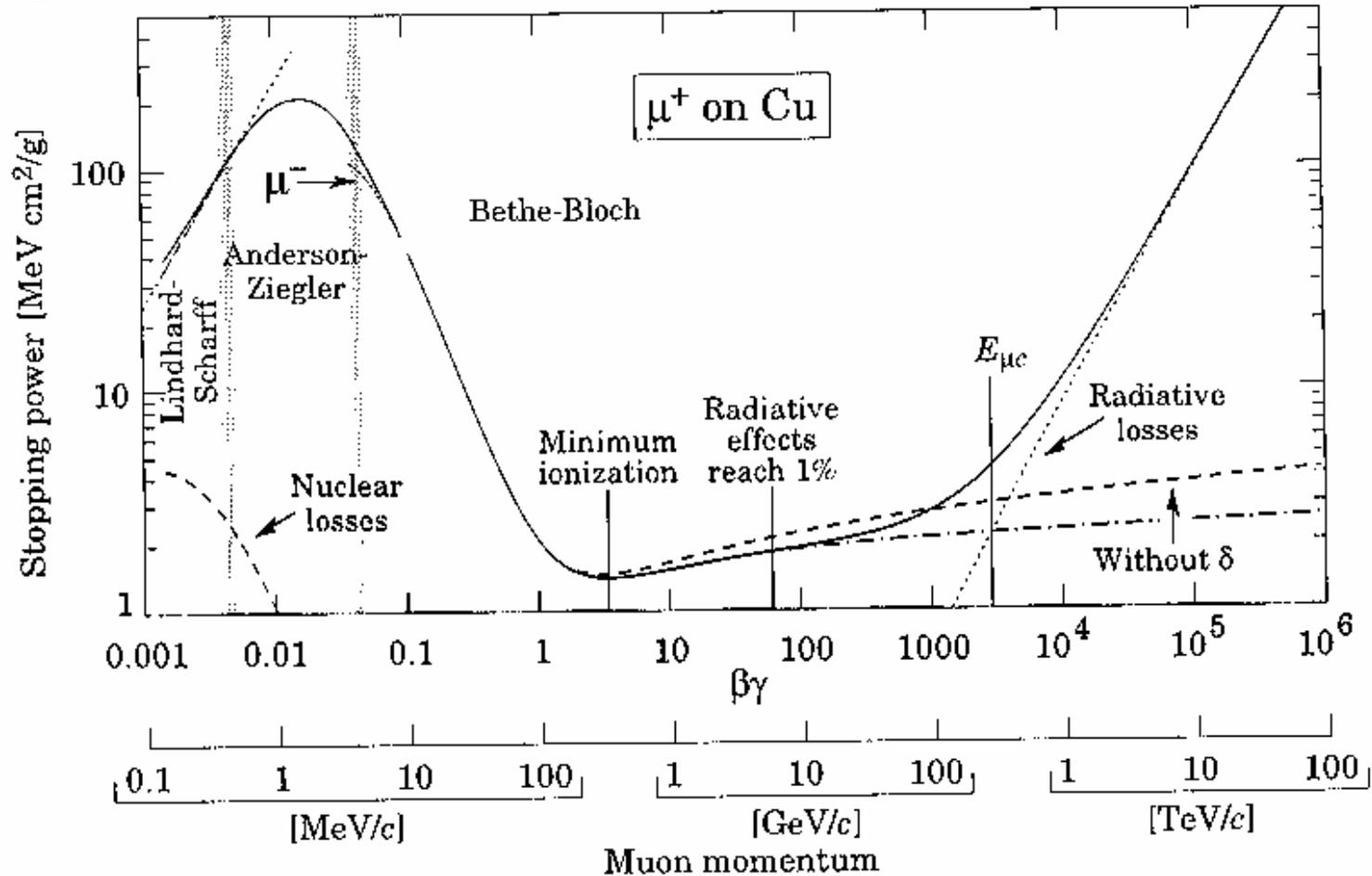


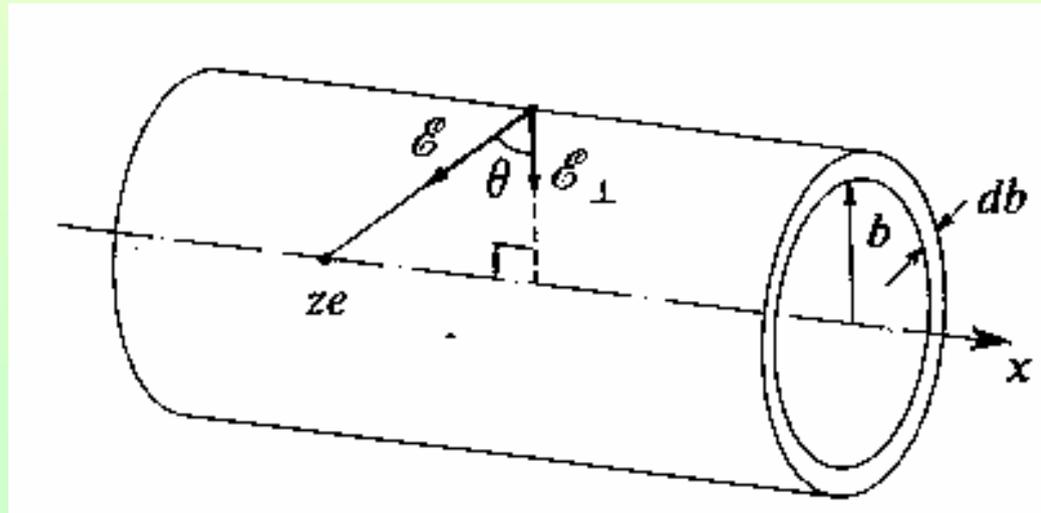
Fig. 23.1: Stopping power ($= -dE/dx$) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/Mc$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy) [1]. Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [2], and data at higher energies are from Ref. 1. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled " μ^- " illustrate the "Barkas effect," the dependence of stopping power on the sign of the projectile charge at very low energies [3].

Dosimetria

La radiazione è un termine generico che comprende fotoni (UV, X e γ) e particelle (p, n, e, α); se assorbita produce effetti sui tessuti biologici. L'intensità della radiazione è definita come la quantità di energia che incide su un corpo nell'unità di area e di tempo.

Esiste radioattività naturale e artificiale; la componente neutra, ossia fotoni di alta energia e neutroni, è la più pericolosa.

La ionizzazione è dovuta all'interazione del campo elettrico di una particella carica con gli elettroni del mezzo attraversato.



La **ionizzazione specifica** misura il potere ionizzante della radiazione, ossia il numero di ioni prodotti per unita` di lunghezza. Il percorso e la ionizzazione specifica sono inversamente proporzionali.

In acqua (o in un tessuto animale) particelle di energia $E = 1 \text{ MeV}$, hanno i seguenti percorsi:

Particella	α	e	γ	n
Percorso (m)	10^{-6}	10^{-2}	0,1	1

A parita` di carica elettrica e energia cinetica, le particelle di massa maggiore hanno maggiore ionizzazione specifica. Per questo motivo le α hanno la massima ionizzazione specifica e, quindi, il percorso piu` breve. I neutroni, non avendo carica elettrica, non producono ionizzazione ma, come i fotoni, producono ionizzazione indiretta.

Le principali grandezze dosimetriche sono la dose di esposizione, la dose di assorbimento e la dose biologica equivalente.

- **La dose di esposizione** riguarda solo raggi X e γ con $E = 3 \text{ MeV}$; questa grandezza definisce la quantità di radiazione attraverso la carica elettrica prodotta in un volume unitario di aria. Si misura in **roentgen** [1 R equivale a $3.33 \cdot 10^{-10} \text{ C/cm}^3 = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$ in aria] o in milliroentgen.

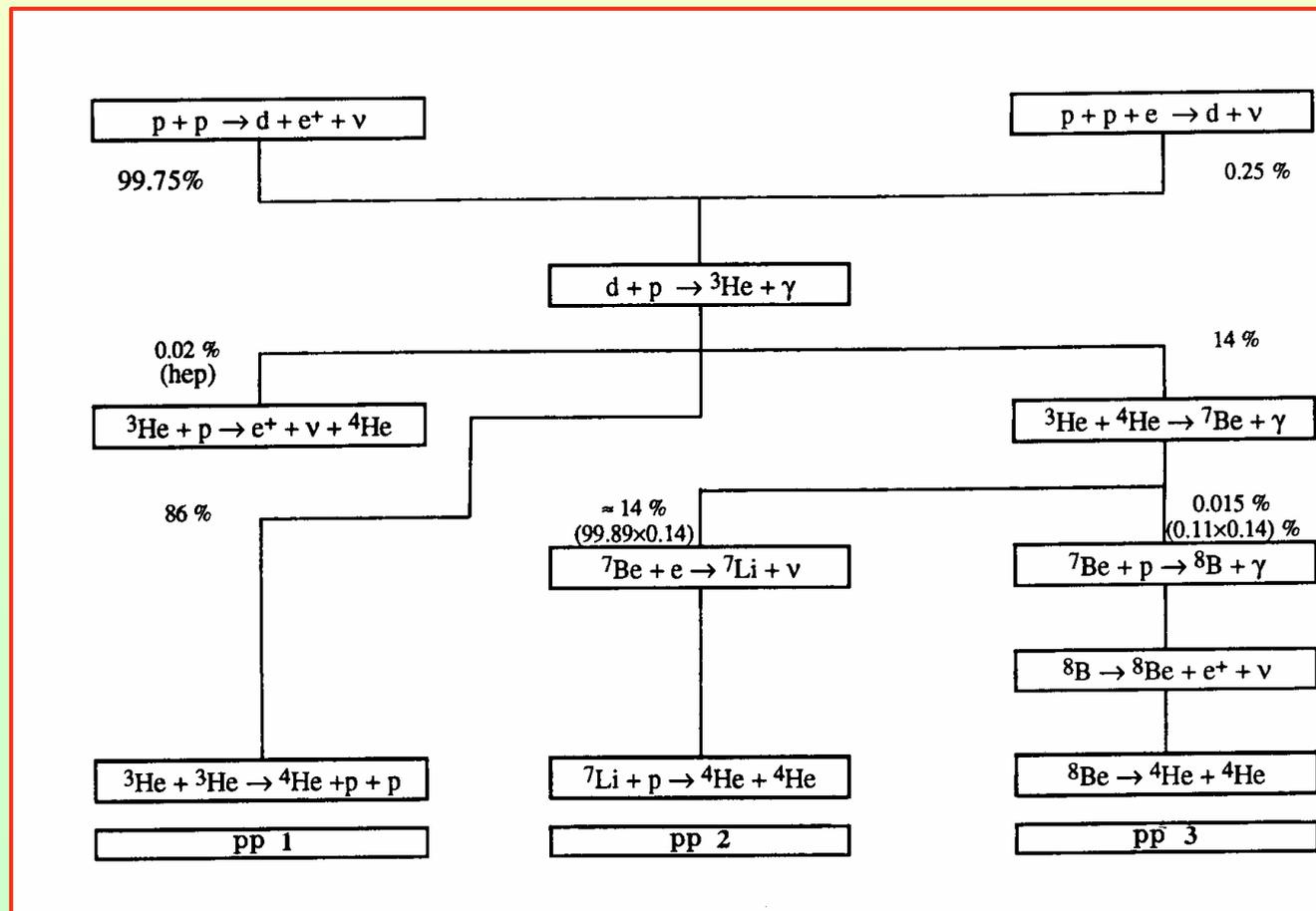
- **La dose di assorbimento** definisce la quantità di energia assorbita per unità di massa del tessuto. Si misura in **gray** [1 gray equivale a 1 J/kg] oppure in **rad** [1 rad = $100 \text{ erg/g} = 10^{-2} \text{ J/kg}$], da cui $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

- **La dose biologica equivalente** si riferisce alla dose assorbita, ma tiene conto del fatto che particelle diverse producono effetti biologici diversi. Come riferimento si assumono fotoni X da 200 keV, a cui si attribuisce un'*efficacia biologica relativa* $EBR = 1$. Nel S.I. la dose biologica equivalente si misura in **Sievert** [1 Sv = 100 rad per EBR]; ma ancora usato è il **rem** [1 rem = 10^{-2} Sv]. Ad esempio le particelle α hanno EBR tra 10 e 20, i neutroni tra 2 e 10 e le altre radiazioni tra 0,6 e 2, confermando che α e n sono le radiazioni più dannose ai tessuti biologici.
- La **dose massima ammessa** è stabilita per legge in ogni paese (in Italia 5 rem/anno)

FUSIONE NUCLEARE



La più semplice reazione di fusione è quella che trasforma il nucleo del primo elemento chimico ($Z = 1$, idrogeno) nel nucleo del secondo elemento ($Z = 2$, elio), attraverso la **catena protone-protone** (pp).



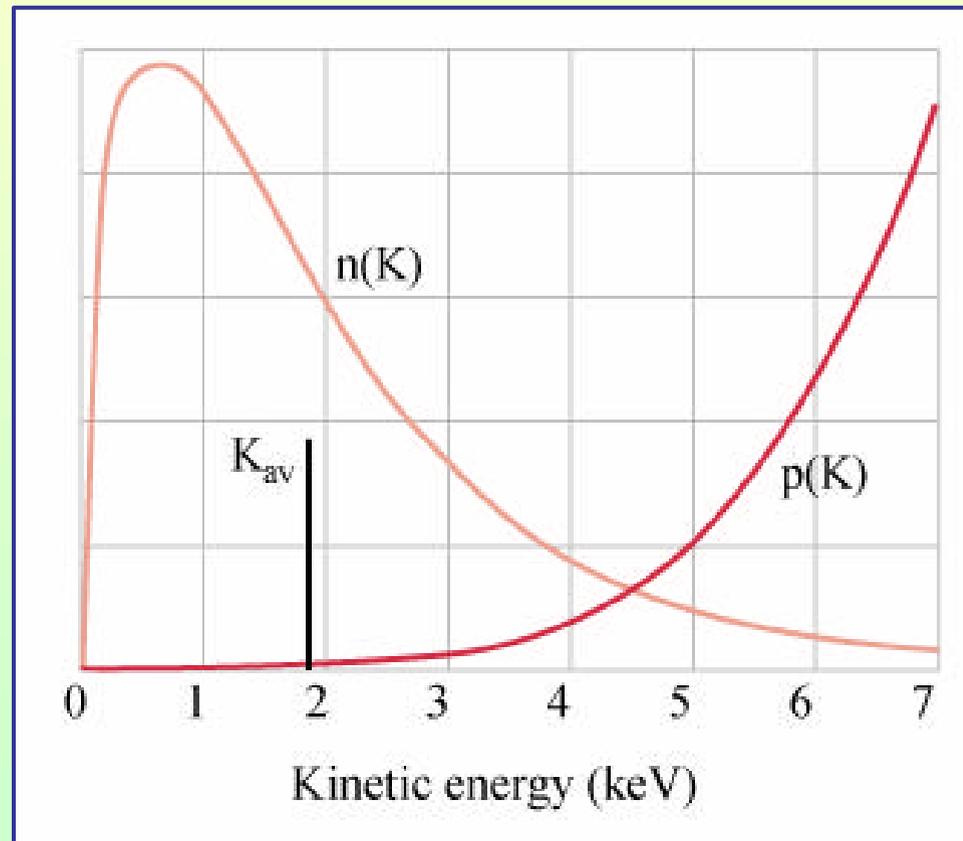
La reazione iniziale avviene se due protoni hanno energia cinetica K sufficiente a superare la reciproca repulsione coulombiana e venire a contatto tra loro perché subentrino le forze nucleari (attrattive) forti. Se $R = 1$ fm è il raggio di ogni protone, l'energia cinetica totale e la corrispondente temperatura si calcolano dalla:

$$2K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2R} = 2 \frac{3}{2} kT$$

Si ottiene così:

$$K \sim 400 \text{ keV}, T \sim 3 \cdot 10^9 \text{ K.}$$

le reazioni iniziano quando il picco di Gamow, dato dalla convoluzione delle due curve in figura, diventa significativo.



II Sole: un reattore a fusione controllata

Nel Sole (e nelle stelle) avvengono spontaneamente le reazioni di fusione termonucleare che bruciano idrogeno in elio, l'unico processo in grado di spiegare la loro lunga esistenza. Due condizioni permettono di stimare le condizioni interne del Sole:

- equilibrio idrostatico (legge di Stevino $dP = \mathbf{r}g d h$)
- equazione dei gas perfetti ($pV = nRT$)

Dalla prima si ricava la pressione al centro del Sole:

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\rho g = -\rho \frac{GM(r)}{r^2} = -\frac{4}{3} \pi G \rho^2 r$$

$$\int_r^{R_o} \frac{4}{3} \pi \bar{\rho}^2 G r dr = \frac{2}{3} \pi \bar{\rho}^2 G (R_o^2 - r^2) = P(r) - P(R_o)$$

$$P(r=0) = P_c = \frac{2}{3} \bar{\rho}^2 G R_o^2 = \frac{3GM_o^2}{8\pi R_o^4} = \frac{\bar{\rho} GM_o}{2R_o} \approx 6 \cdot 10^{14} \text{ Pa}$$

Dalla seconda si ricava la temperatura al centro del Sole: $T_c \sim 1,5 \cdot 10^7 \text{ K} \sim 1 \text{ keV}$

$$P = \frac{nRT}{V} = NkT = \frac{k}{mm_H} rT$$

un valore ~ 400 volte inferiore all'energia elettrostatica dei protoni.

Il numero di urti tra protoni si puo` calcolare conoscendo il loro libero cammino e la velocita` media:

$$c = \frac{1}{SN} = \frac{m^2 v^2}{p \hbar^2 N} = \frac{2mkT}{p \hbar^2 N} \approx 10^{-7} \text{ m}$$

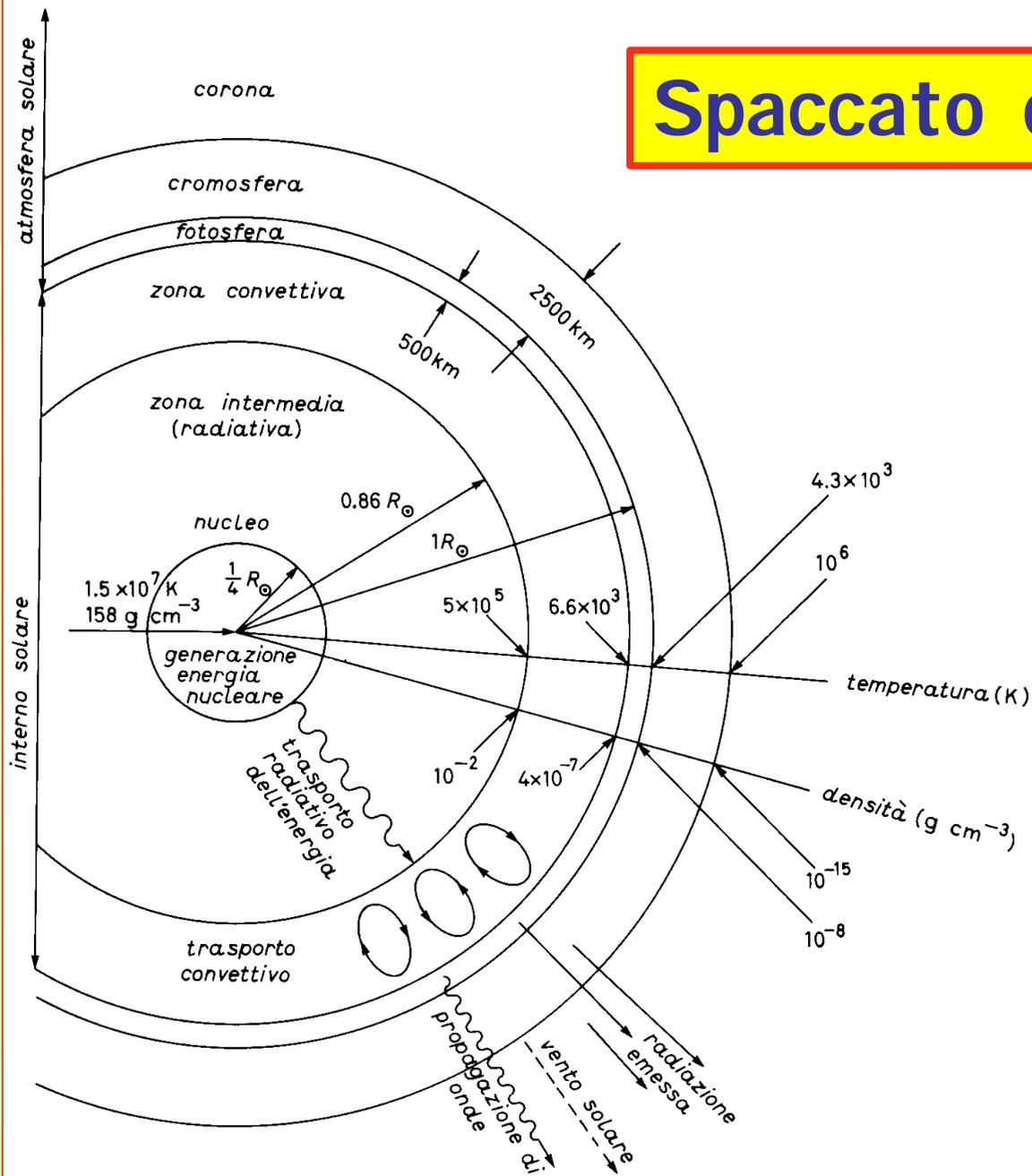
$\bar{v} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \approx 5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ Si ottiene:

$$t^{-1} = \frac{\bar{v}}{c} \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ urti al secondo}$$

Gli urti sono in maggior parte elastici, ma i protoni di energia piu elevata, grazie anche all'effetto tunnel, possono venire a contatto tra loro e produrre la fusione termonucleare. Si libera nel complesso l'energia di legame dell'elio e quella di annichilazione dei 2 positroni ($e^+e^- \rightarrow 2\gamma$), ossia $\sim 0,7\%$ dell'energia a riposo dei 4 protoni.

La massa viene trasformata in energia con efficienza $\epsilon \sim 0,007$, che corrisponde a $\epsilon = 0,007 c^2 = 6 \cdot 10^{14} \text{ J/kg}$

Spaccato del Sole



I valori di temperatura e densità ($\rho \sim 10^5 \text{ kg/m}^3$) al centro del Sole, permettono di calcolare il ritmo delle reazioni di fusione:

meccanismi di feedback tra T, R e raggio solare

$$R = \int_0^{\infty} N_A N_B v \mathbf{S}(v) D(v) dv = R_0 r^2 T^h \approx 5 \cdot 10^8 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{da cui } t = \frac{1}{R} = \frac{6 \cdot 10^{26}}{5 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^7} = 4 \cdot 10^{10} \text{ anni per protone}$$

Dalla luminosità solare ($3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$) e dall'energia liberata per protone nel ciclo ($7 \text{ MeV} \sim 10^{-12} \text{ J}$), si ottiene il numero di protoni, e quindi la massa che si trasforma in α al secondo.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{3,9 \cdot 10^{26}}{10^{-12}} = 3,9 \cdot 10^{38} \text{ p/s}$$

$$\frac{dm}{dt} = m_p \frac{dn}{dt} = 6,5 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}$$

L'energia prodotta nelle parti interne, calde, del Sole è:

$$\frac{E}{M_c} \approx \frac{4 \cdot 10^{26}}{4 \cdot 10^{29}} = 10^{-3} \text{ W/kg} \approx 100 \text{ W/m}^3$$

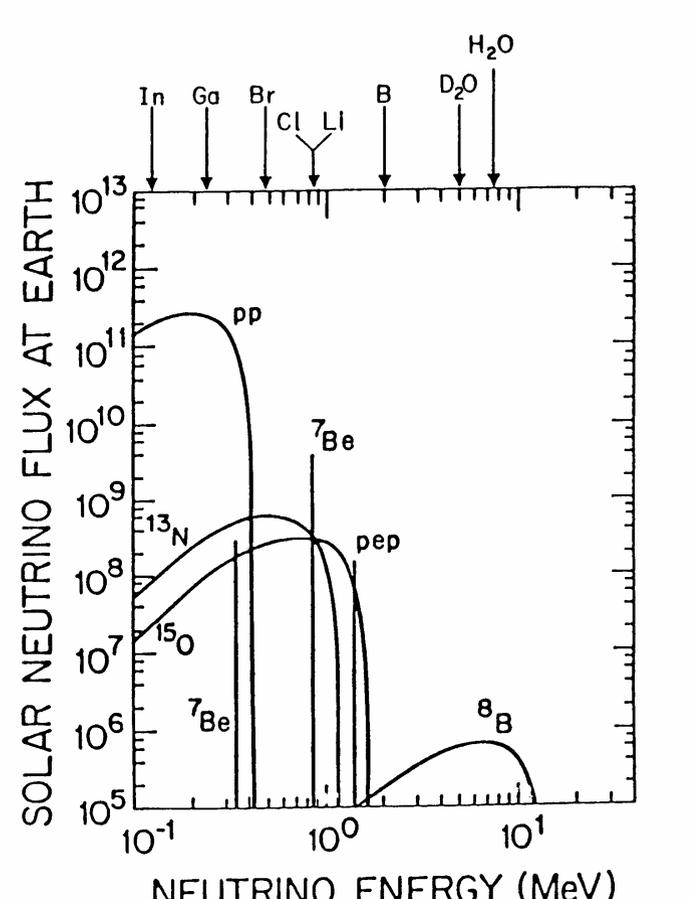
I positroni si annichilano ben presto in fotoni ($e^+e^- \rightarrow 2\gamma$) e quindi il processo di fusione dell'idrogeno avviene con emissione di fotoni e neutrini. Per definizione il loro libero cammino medio è dato da:

$$c_f \leq \frac{1}{N_e \sigma_T} \approx 10^{-3} m \text{ per fotoni, } c_n = \frac{1}{n\sigma} \approx 10^{18} m \text{ per neutrini}$$

Mentre i fotoni diffondono lentamente verso la superficie del Sole, da cui vengono emessi dopo un tempo di oltre 10^{12} s ($\sim 10^5$ anni), i neutrini sfuggono immediatamente dal Sole e sono rivelabili a Terra con grandi esperimenti sotterranei.

Rate di eventi

$$R = \sum_i \int_{E_{th}}^{E_{Max}} \Phi_i(E) \sigma(E) dE$$



Tempi evolutivi solari

Il Sole deve avere un'età almeno pari a quella della Terra ($4,5 \cdot 10^9$ anni) e non deve aver avuto variazioni troppo grandi di luminosità. Ciò vuol dire che, nel complesso, deve aver prodotto l'energia.

$$E = Lt = 4 \cdot 10^{26} \cdot 4,5 \cdot 10^9 \cdot 3,1 \cdot 10^7 \approx 6 \cdot 10^{43} \text{ J}$$

corrispondente a $\epsilon \sim 3 \cdot 10^{13}$ J/kg. L'ossidazione del carbonio fornisce solo $\epsilon \sim 9 \cdot 10^6$ J/kg, mentre la contrazione gravitazionale può aver prodotto, in tutto l'energia:

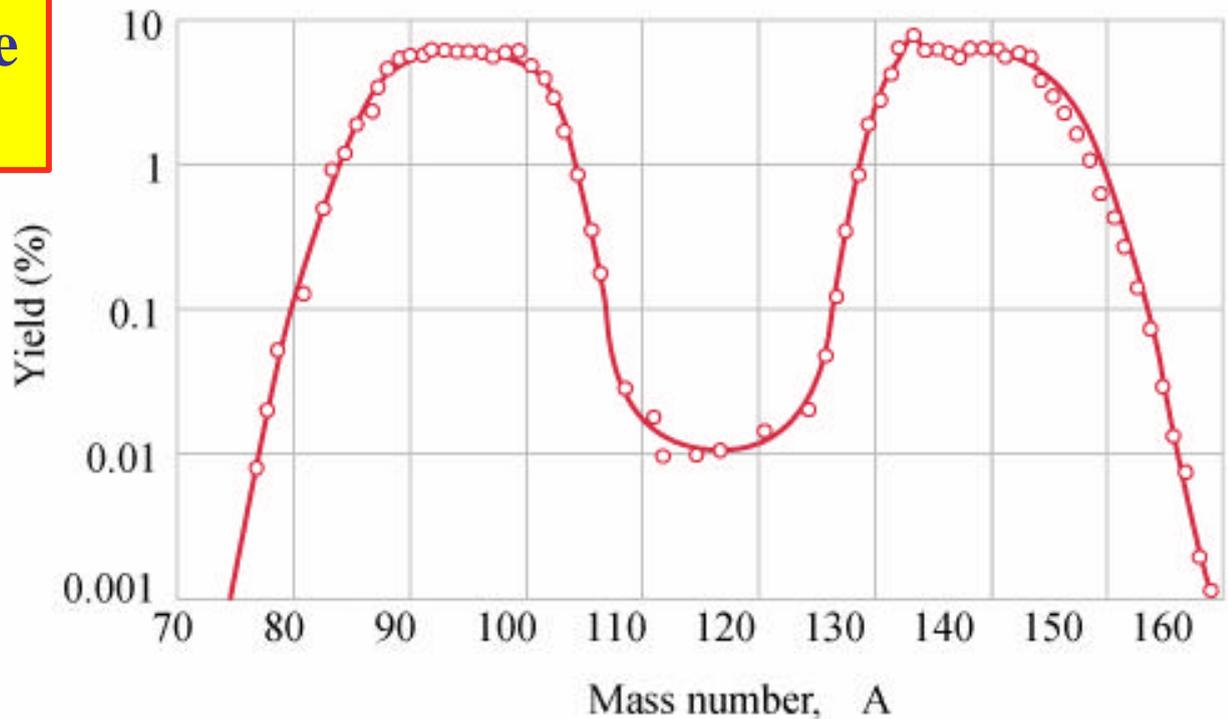
Le reazioni di fusione di H in He sono invece in grado di produrre $\epsilon \sim 6 \cdot 10^{14}$ J/kg e di garantire l'esistenza del Sole per oltre 10^{10} anni.

$$E_p = - \int_0^R \left(\frac{4}{3} \rho r^3 \right) (4 \pi r^2 dr) \frac{G}{r} =$$
$$= - \frac{1}{3} (4 \pi \rho)^2 G \int_0^R r^4 dr = - \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} = 2 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

Fissione nucleare

Il neutrone n (ipotizzato da Pauli nel 1930, scoperto da Chadwick nel 1932, utilizzato da Fermi nel 1934 e da Meitner e Hahn nel 1939 per bersagliare nuclei pesanti) è il proiettile ideale per la fissione perché, essendo privo di carica elettrica, a differenza di p e α non subisce la repulsione coulombiana da parte dei nuclei bersaglio.

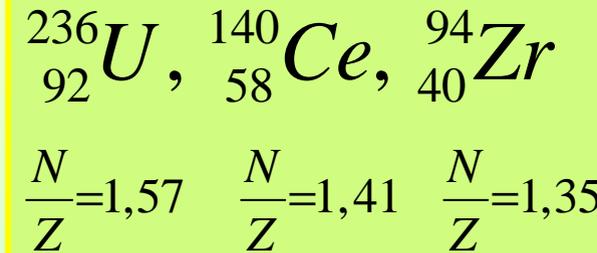
Prodotti di fissione
 ^{235}U



Esaminiamo per esempio la fissione dell'uranio ^{235}U , che nel 7% circa dei casi produce nuclei con $A \sim 95$ e $A \sim 140$.

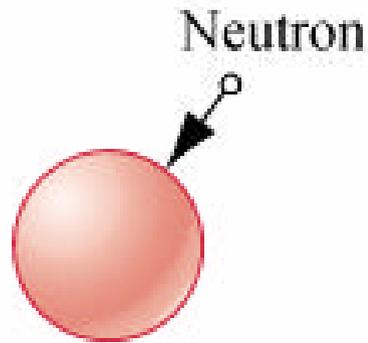


	^{140}Xe	^{140}Cs	^{140}Ba	^{140}La	^{140}Ce
$T_{1/2}$	14s	64s	13d	40h	stabile
Z	54	55	56	57	58



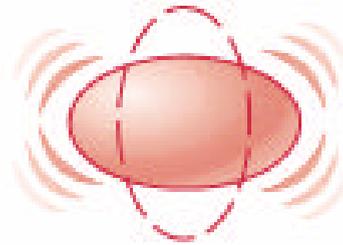
	^{94}Sr	^{94}Y	^{94}Zr
$T_{1/2}$	75s	19m	stabile
Z	38	39	40

Per arrivare ai nuclei finali stabili devono seguire decadimenti β^+ ai prodotti di fissione. Infatti ci sono 144 neutroni iniziali e 136 finali.



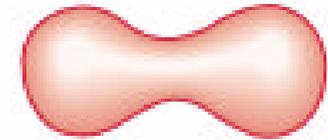
A ^{235}U nucleus
absorbs a thermal
neutron

(a)



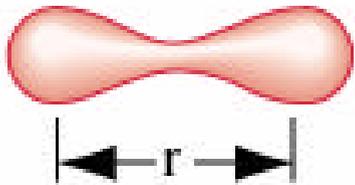
It forms a ^{236}U nucleus,
with excess energy; it
oscillates violently

(b)



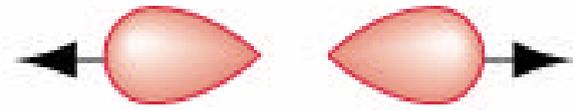
The motion may
produce a neck

(c)



Coulomb forces stretch it out

(d)



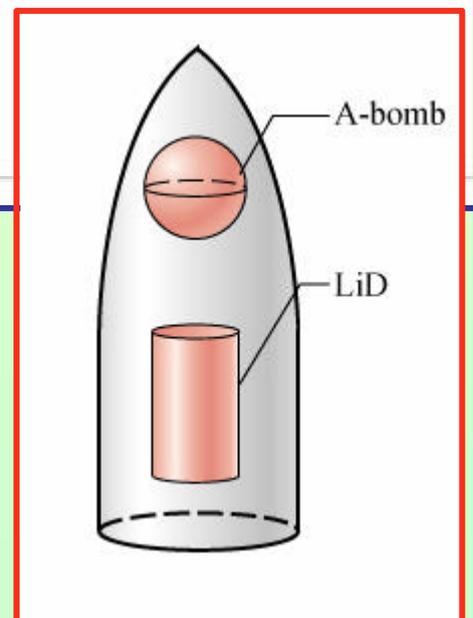
Fission occurs

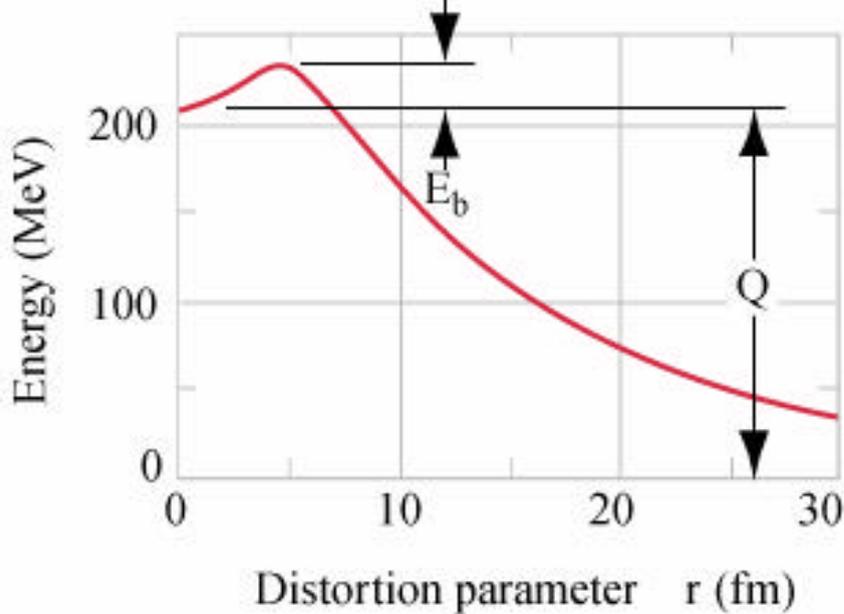
(e)



The fragments separate; prompt neutrons boil off

(f)





Secondo il modello a goccia esiste una barriera di potenziale E_b che deve essere superata (anche per effetto tunnel) perché avvenga la fissione del nucleo. Il neutrone assorbito (termico o non termico) fornisce l'energia di eccitazione E_n .

Nuclide bombardato	Nuclide soggetto a fissione	E_n (MeV)	E_b (MeV)	Fissionabile da neutroni termici?
^{235}U	^{236}U	6.5	5.2	Si
^{238}U	^{239}U	4.8	5.7	No
^{239}Pu	^{240}Pu	6.4	4.8	Si
^{243}Am	^{244}Am	5.8	5.8	No

Hiroshima
Nagasaki

Cronologia e datazione

Una delle principali applicazioni della fisica nucleare è la datazione di oggetti, fatta utilizzando nuclidi con opportune costanti di decadimento: ^{14}C per tempi brevi ($T_{1/2} = 5730$ a), ^{40}K ($T_{1/2} = 1.2 \cdot 10^9$ a), ^{235}U ($T_{1/2} = 7 \cdot 10^8$ a), ^{238}U ($T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ a) per tempi lunghi.

Per esempio, si può determinare l'età di una roccia lunare in cui si è misurato il rapporto numerico 10.3 tra le abbondanze di ^{40}Ar e ^{40}K . Se si suppone che tutto l'Ar sia prodotto nel decadimento del K, si ha:

$$N_K = N_0 e^{-\lambda t}, \quad N_{Ar} = N_0 - N_K \quad \text{da cui} \quad \lambda t = \ln\left(1 + \frac{N_{Ar}}{N_K}\right) = \ln(11.3)$$
$$t = \frac{1.2 \cdot 10^9 \ln 11.3}{\ln 2} = 4.4 \cdot 10^9 \text{ anni}$$

Come altro esempio si consideri il rapporto isotopico $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 7.2 \cdot 10^{-3}$. Quanto valeva questo rapporto $2 \cdot 10^9$ anni fa?

Poiche` $N_5(t) = N_5(0)e^{-I_5 t}$ e $N_8(t) = N_8(0)e^{-I_8 t}$

deve essere $\frac{N_5(0)}{N_8(0)} = \frac{N_5(t)}{N_8(t)} e^{(I_5 - I_8)t}$

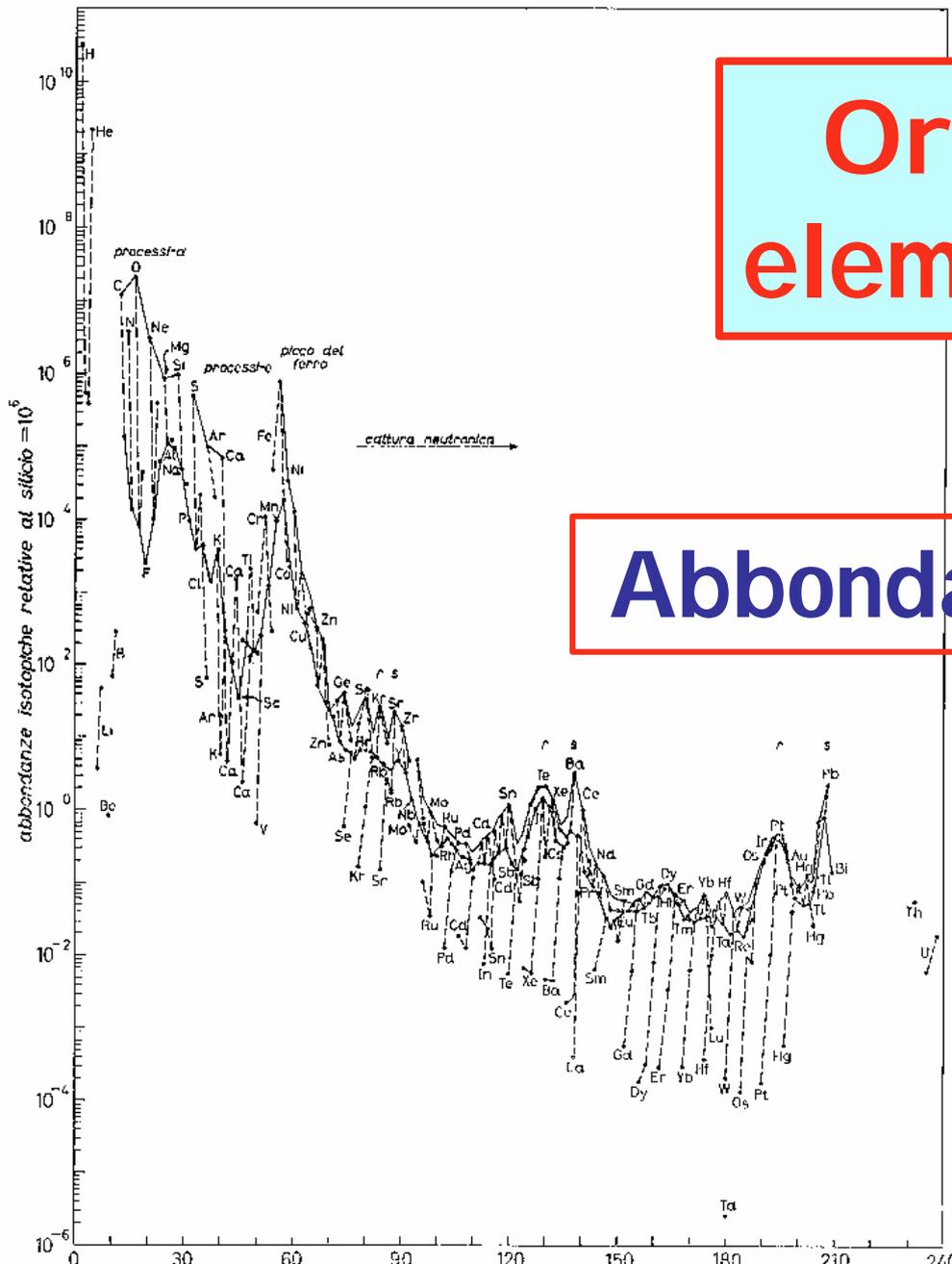
dalla definizione di
vita media si ha

$$I_5 = \frac{\ln 2}{t_5} = \frac{0.693}{7.04 \cdot 10^8} = 9.85 \cdot 10^{-10} \text{ (anni)}^{-1}$$
$$I_8 = \frac{\ln 2}{t_8} = \frac{0.693}{44.7 \cdot 10^8} = 1.55 \cdot 10^{-10} \text{ (anni)}^{-1}$$

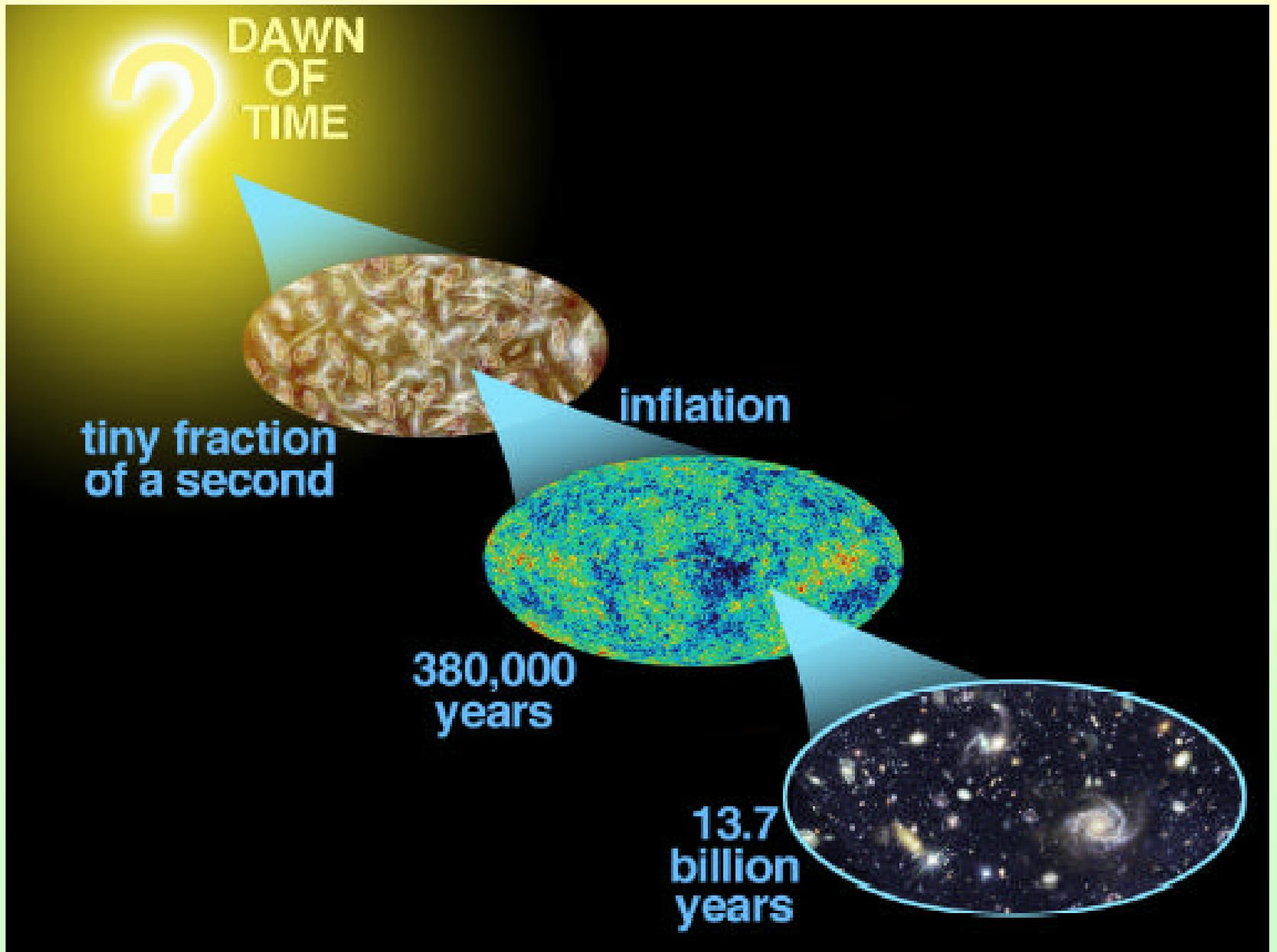
da cui $(I_5 - I_8)2 \cdot 10^9 = 1.66$

e infine $\frac{N_5(0)}{N_8(0)} = \frac{N_5(t)}{N_8(t)} e^{(I_5 - I_8)t} = 0.0072 \cdot e^{1.66} = 3.8\%$

Origine degli elementi chimici



Abbondanze universali



Planck epoch

the beginning of spacetime

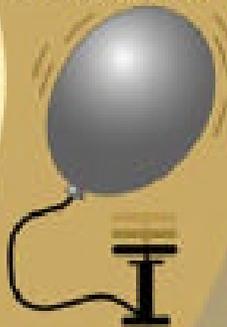
10^{-43} seconds



cosmic inflation

unstable vacuum blows apart

$\ll 10^{-32}$ seconds



creation of light

vacuum energy converted to light

$\ll 10^{-10}$ seconds



creation of matter (quark soup)

more matter than antimatter

$< 10^{-10}$ seconds



quark soup chills out

first protons and neutrons

10^{-4} seconds



10^{32} kelvins

the universe cools down

first nuclei

creation of light elements

100 seconds



spectral decoupling

blackbody spectrum of background radiation

one month



matter/radiation decoupling

fluctuations in background radiation

400,000 years



dark ages

first stars and heavy elements

< 1 billion years



galaxy formation

stars and galaxies directly visible

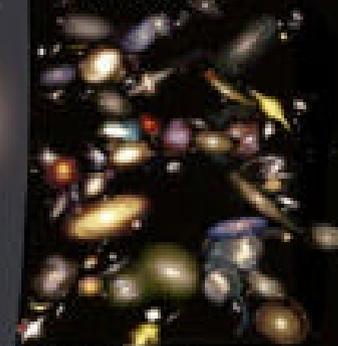
1-6 billion years



present

galaxies arranged in superclusters

13 billion years

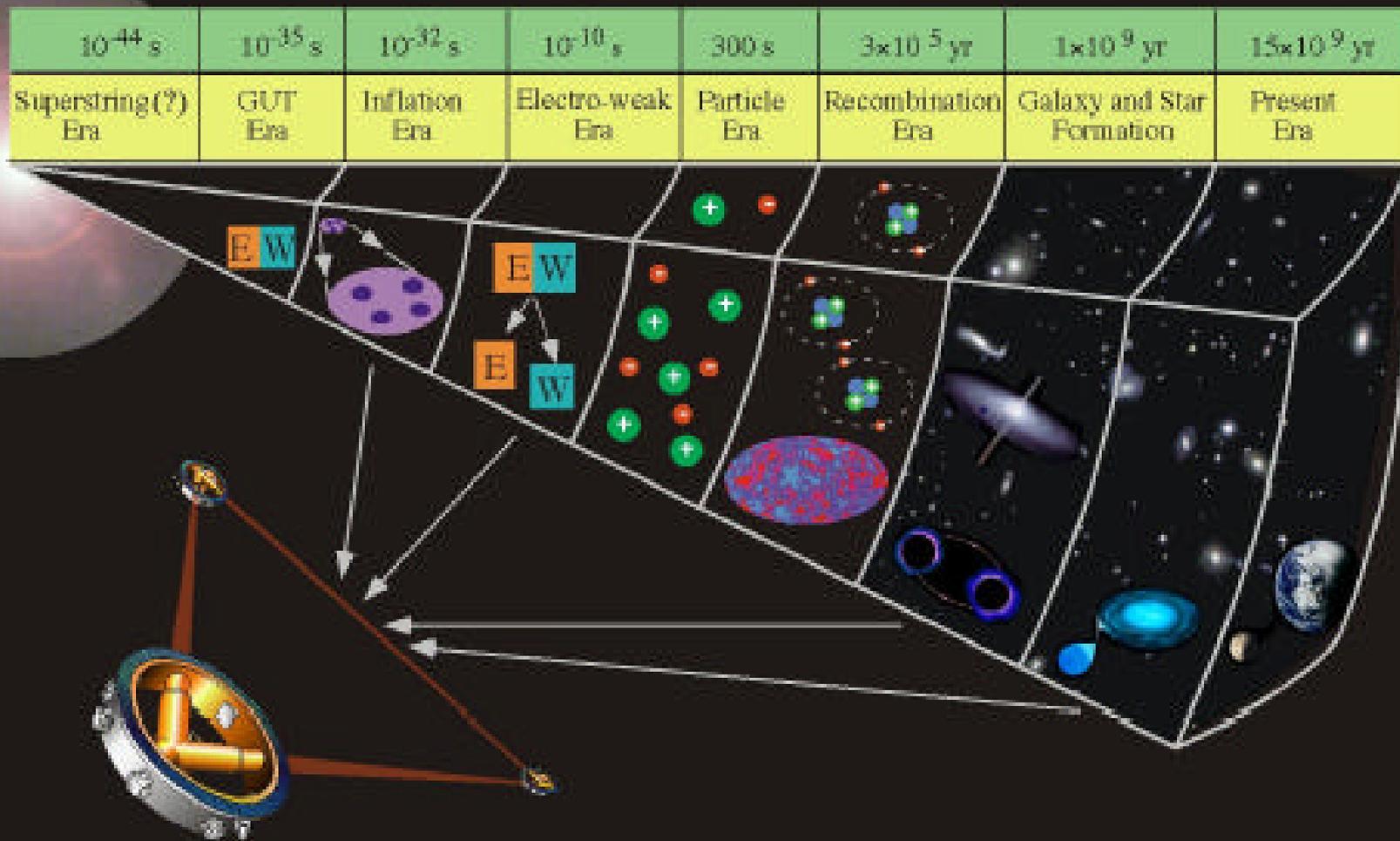


the universe gets even colder

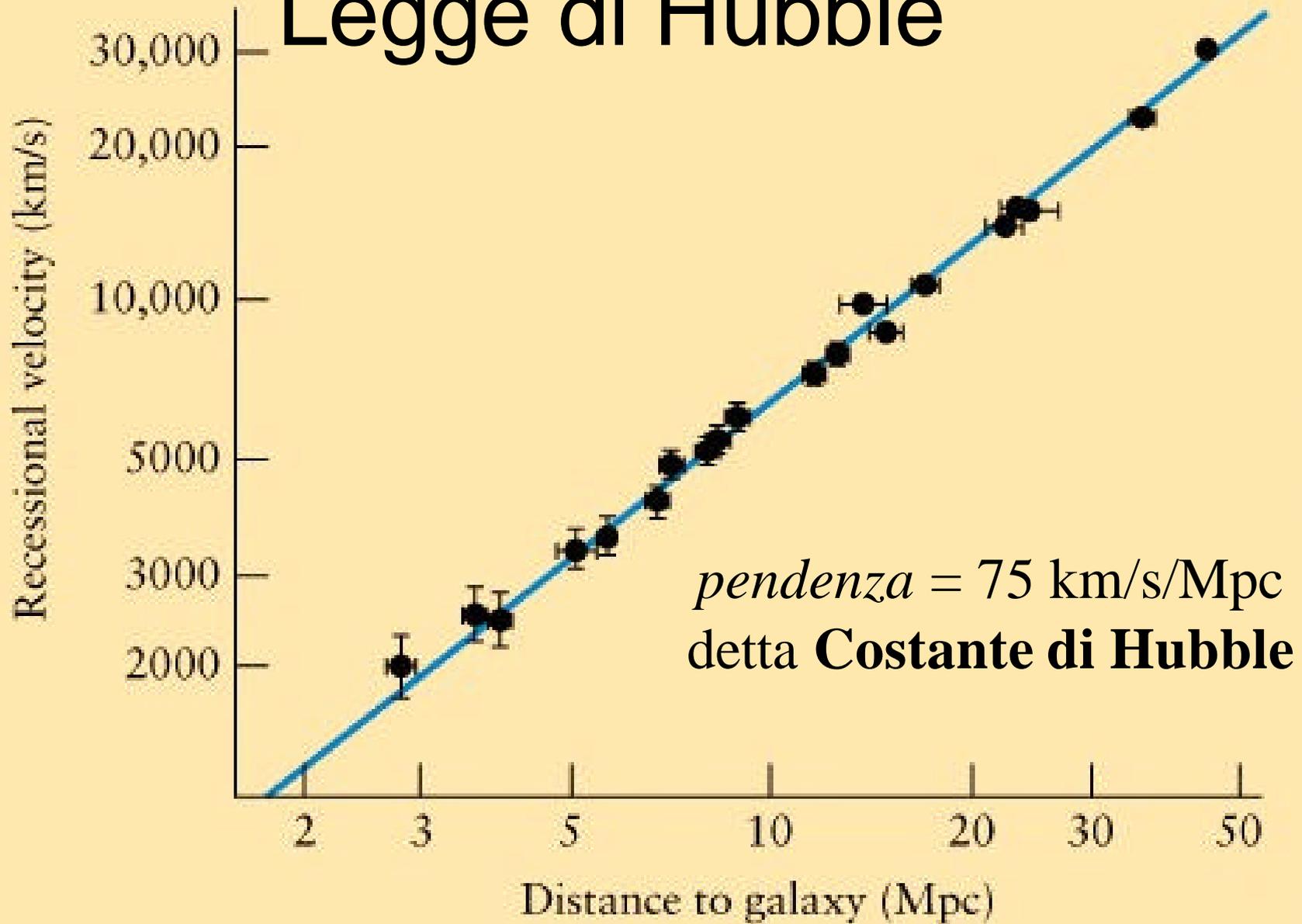
2,725 kelvins

Big Bang

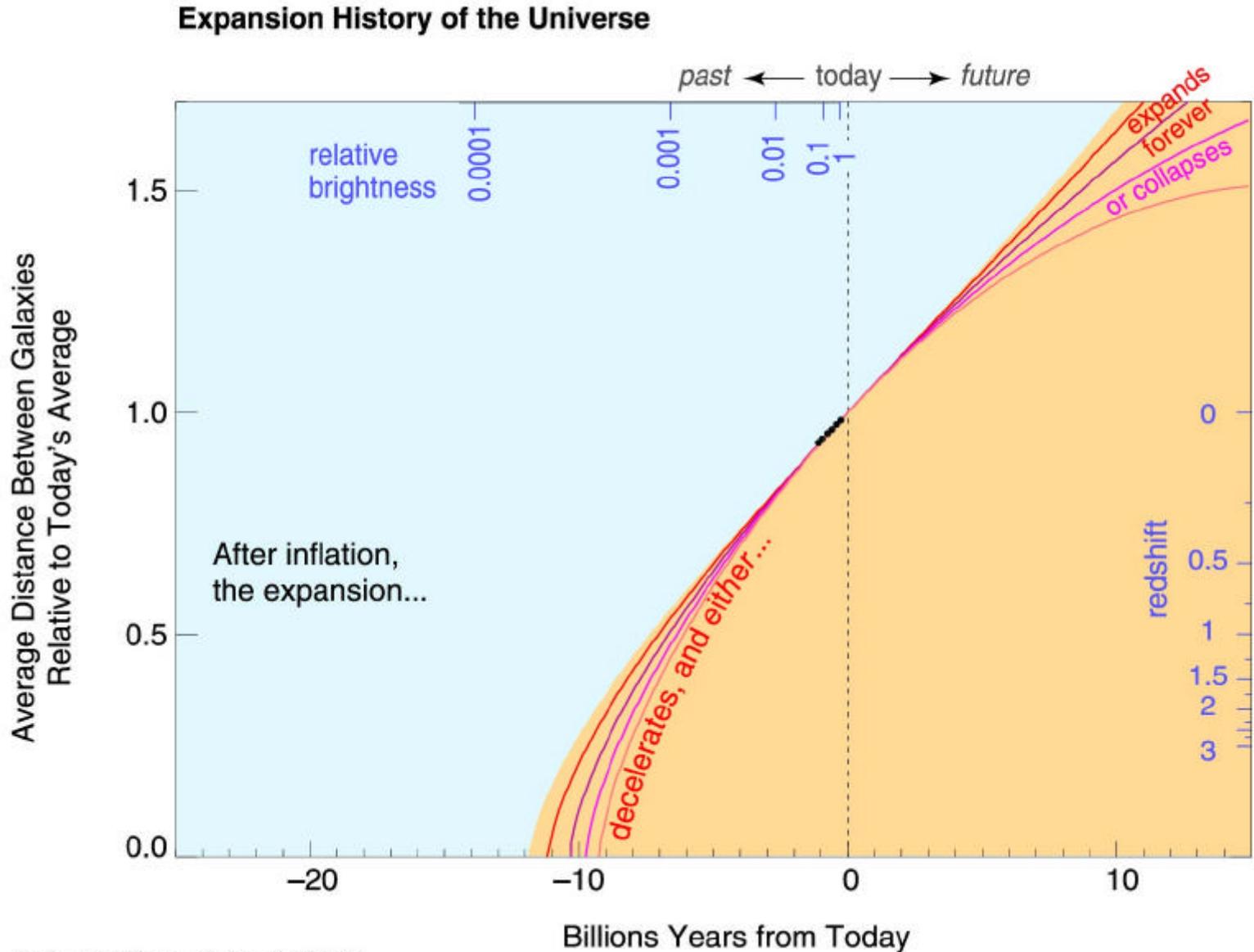
Time \longrightarrow



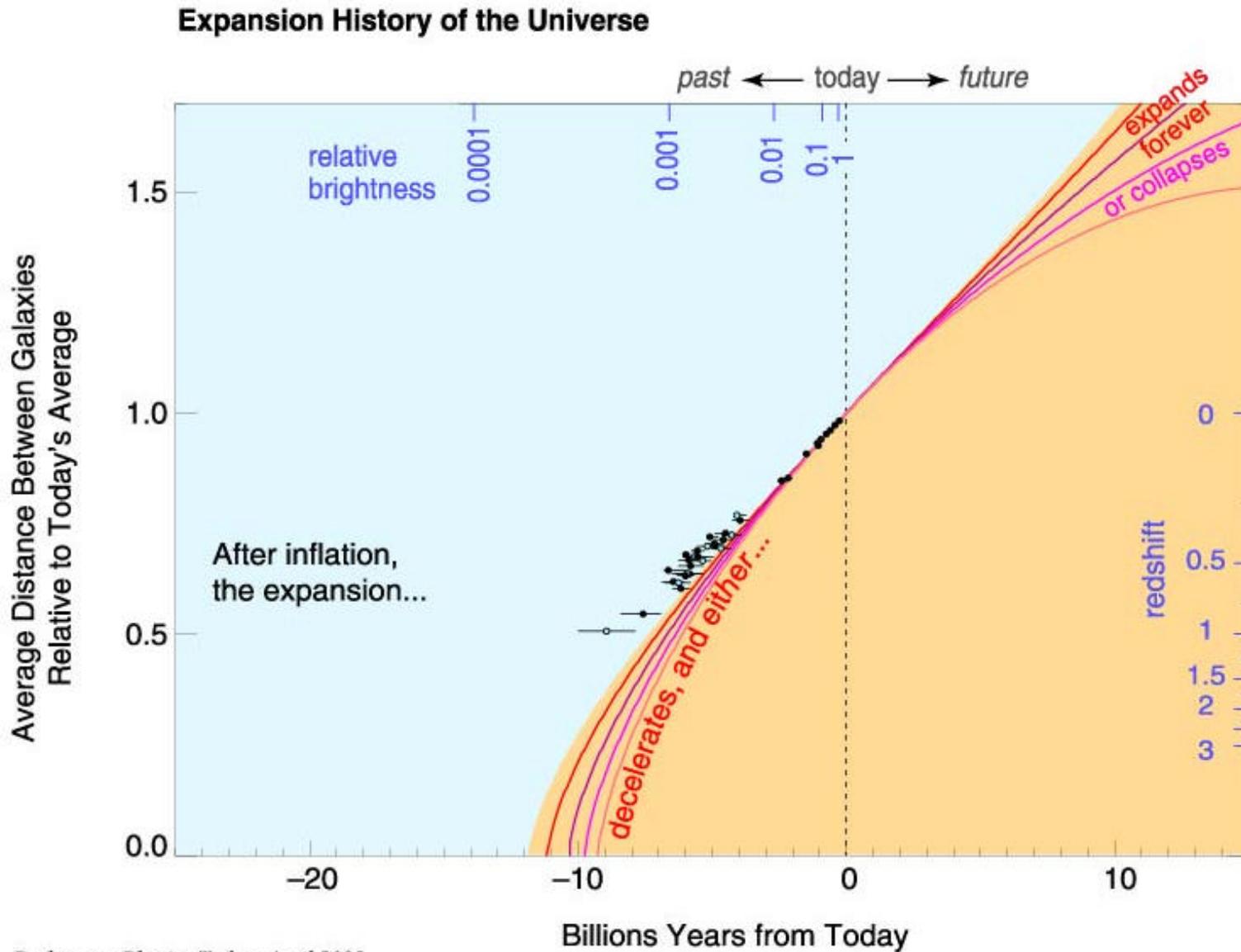
Legge di Hubble



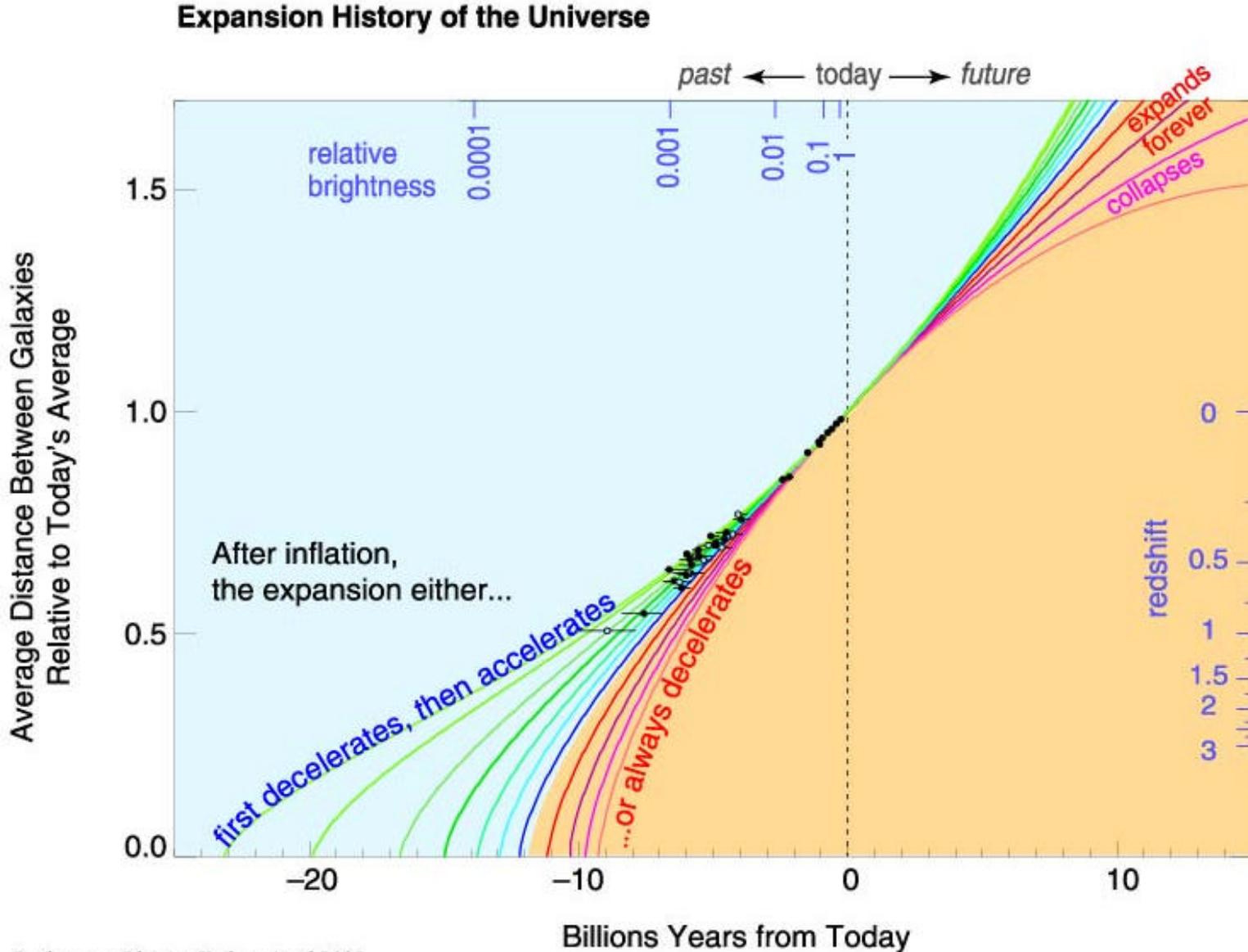
Supernovae: Local



Supernovae: Mapping Expansion

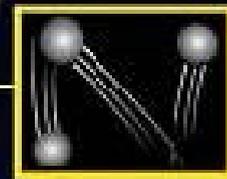
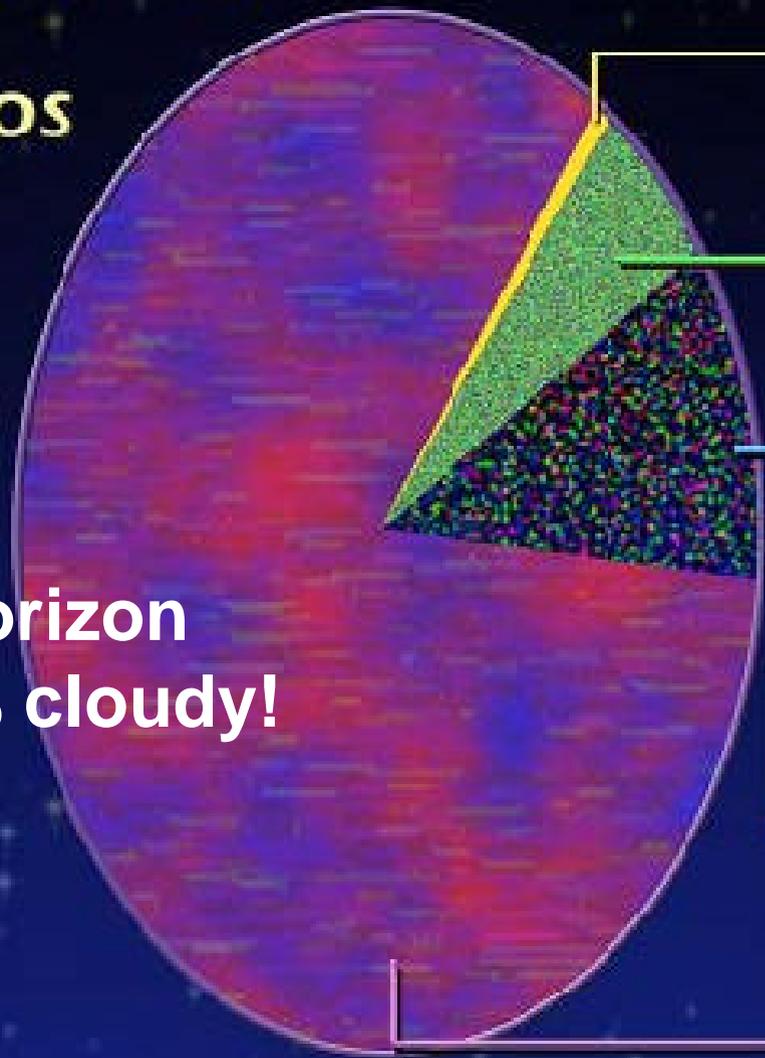


Supernovae: Acceleration



Composition of the Cosmos

The horizon is 95% cloudy!



Neutrinos:
0.6%



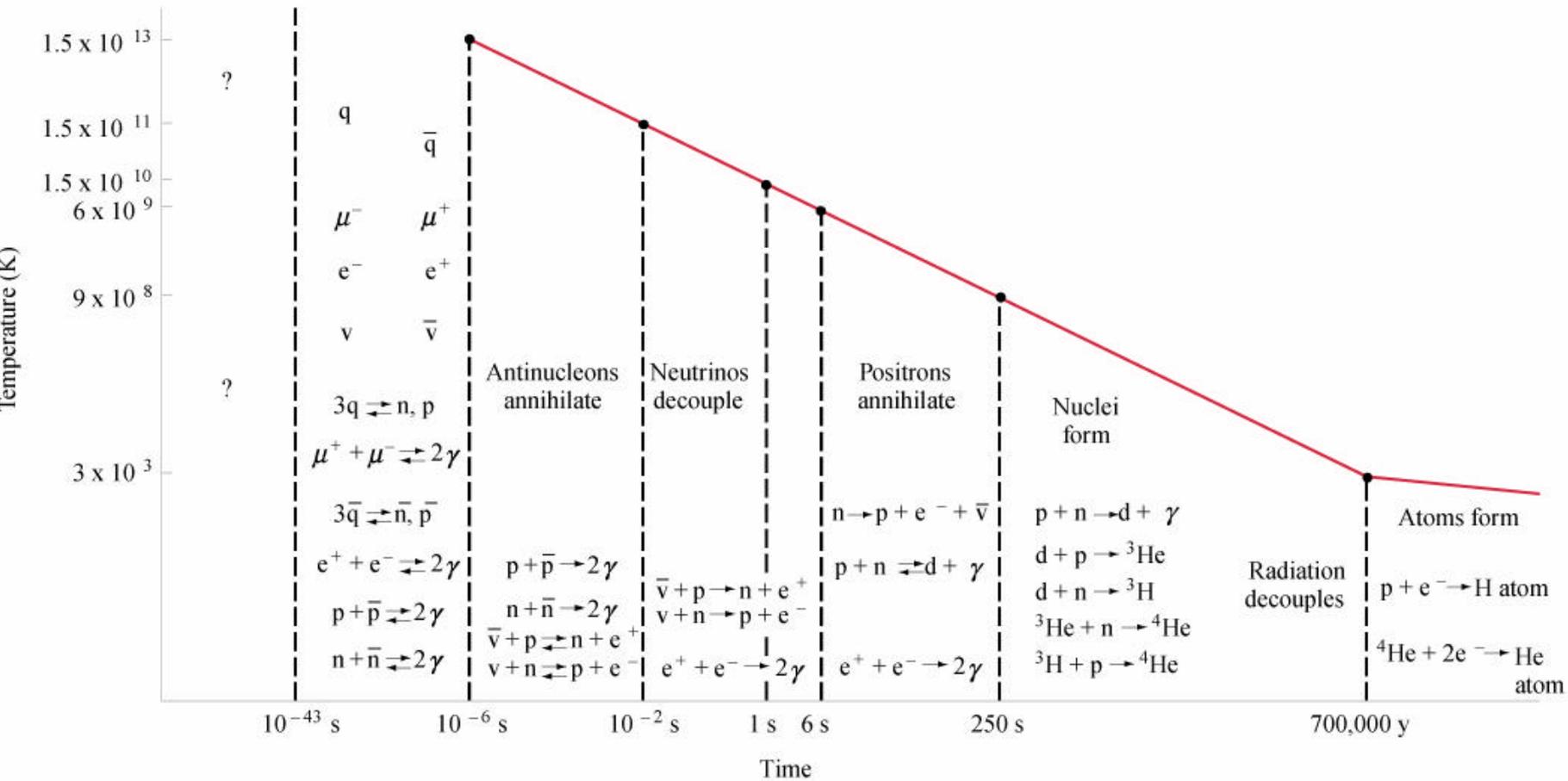
Baryons (atoms):
comprising
stars, heavy
elements, and
helium and
free hydrogen:
4.4%



Dark
matter:
22%



Dark
energy:
73%



RUOLO DELLA MASSA NELL'EVOLUZIONE STELLARE

Legami molecolari ~ 0.1 eV

Legami atomici ~ 10 eV

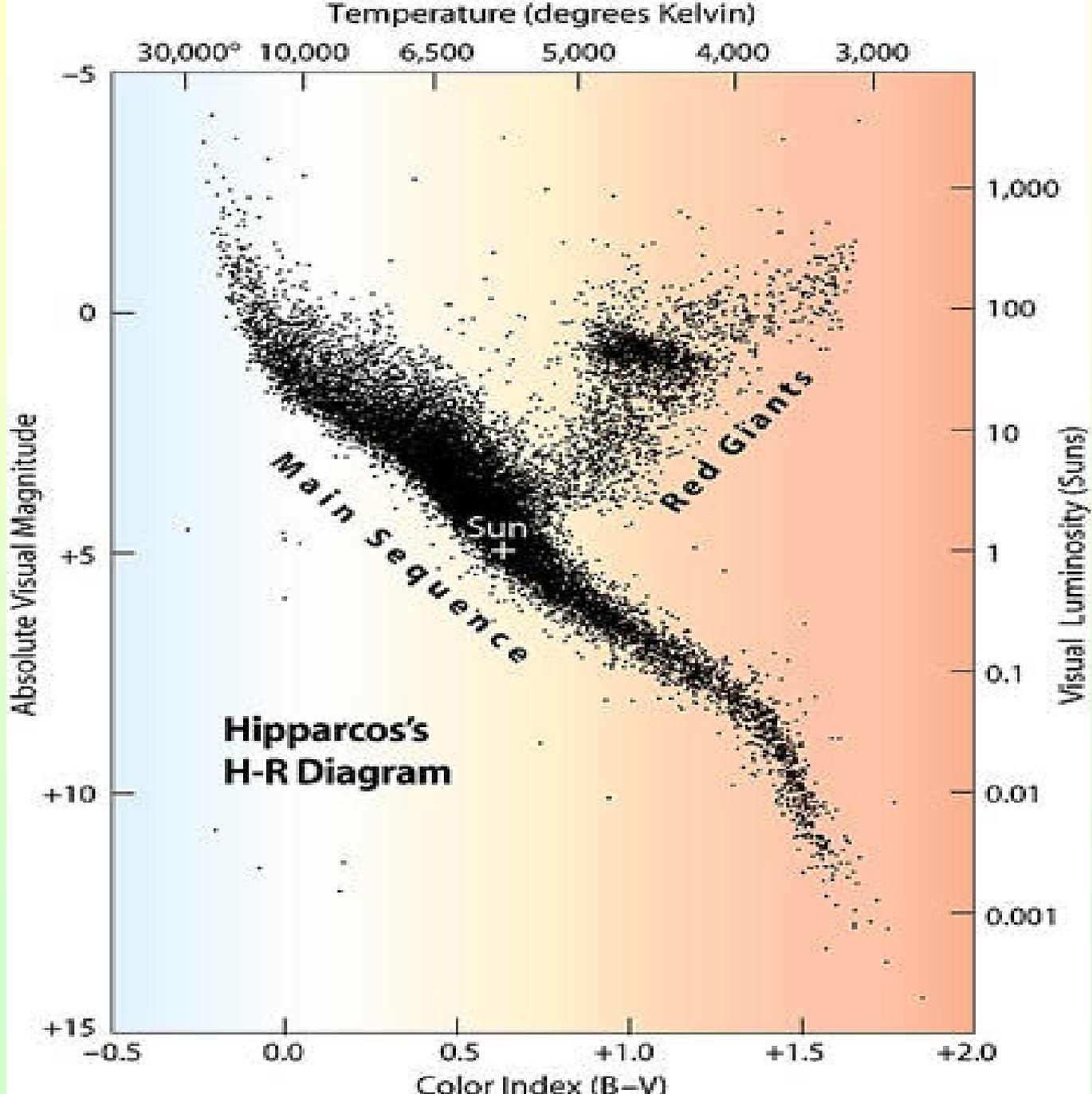
$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

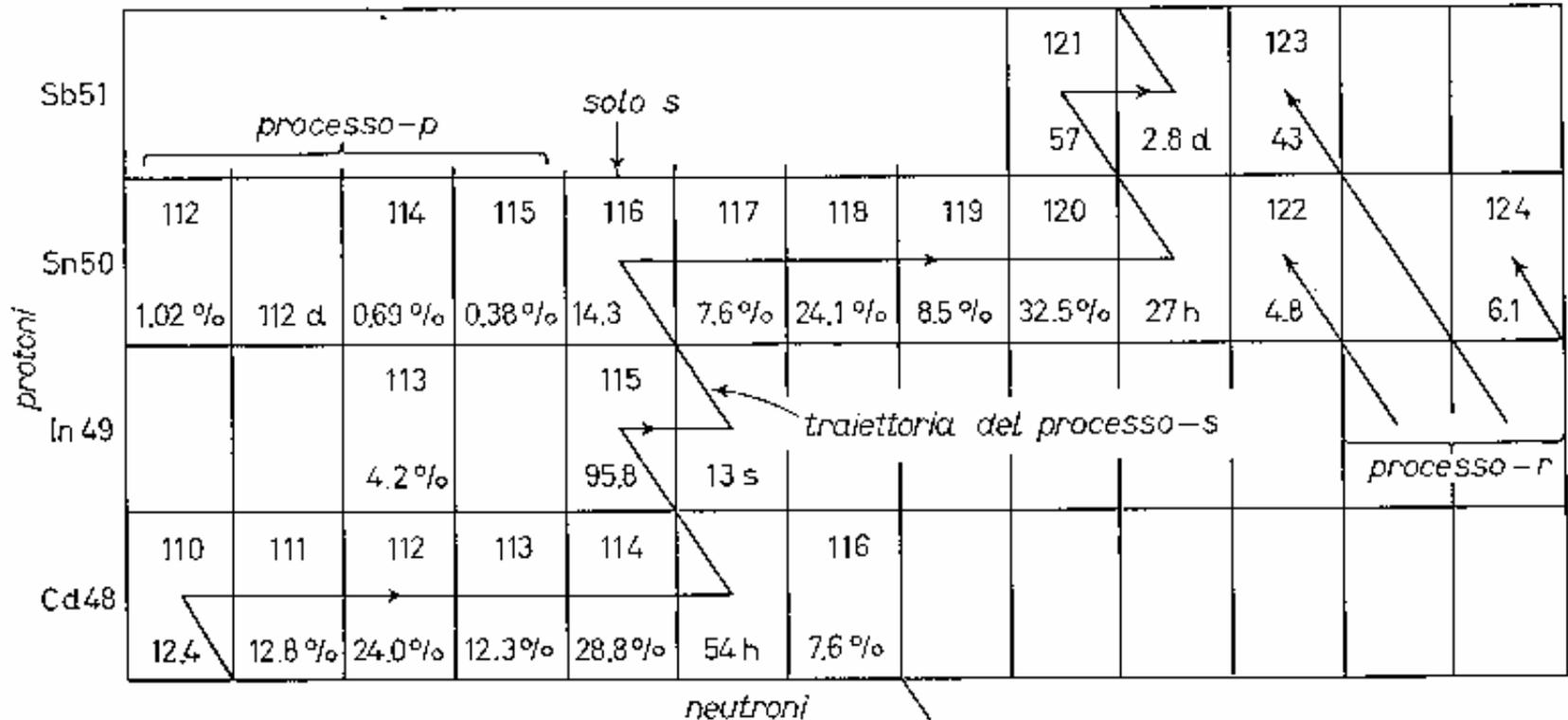
$$M(r) = \frac{4}{3} \rho r^3$$

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g = -\rho G \frac{M(r)}{r^2} = -\rho G \frac{4\rho r^3}{3r^2}$$

$$P(r) = P_c - \frac{2\rho}{3} G r^2 r^2; \quad P_c = \frac{2\rho}{3} G r^2 R^2 = \frac{3M^2 G}{8\rho R^4}$$

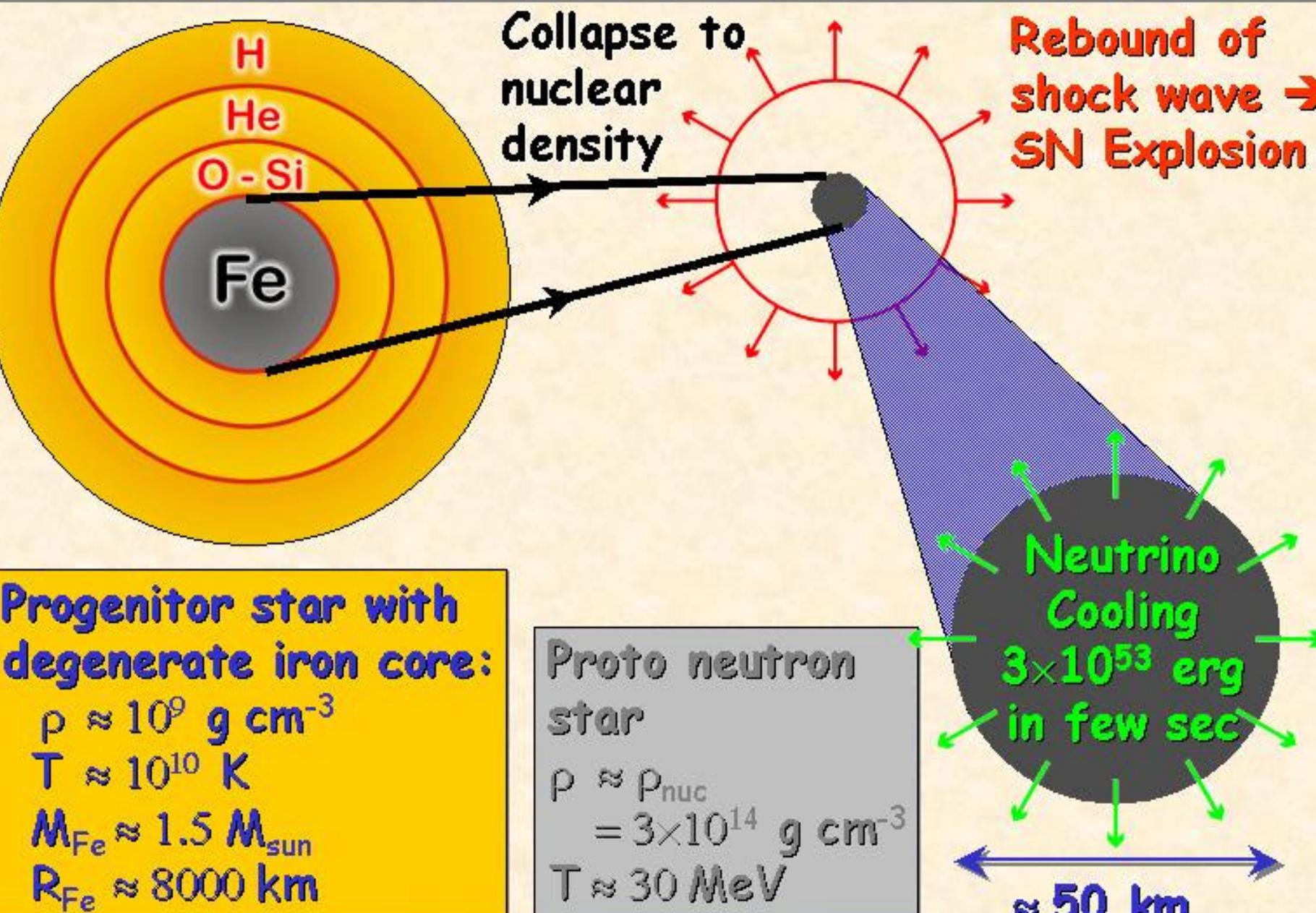
$$e = \frac{P_c}{n} = \frac{3M^2 G}{8n\rho R^4}$$





esempio di traiettoria di nucleosintesi per processi s

Stellar Collapse and Supernova Explosion



Progenitor star with degenerate iron core:
 $\rho \approx 10^9 \text{ g cm}^{-3}$
 $T \approx 10^{10} \text{ K}$
 $M_{\text{Fe}} \approx 1.5 M_{\text{sun}}$
 $R_{\text{Fe}} \approx 8000 \text{ km}$

Proto neutron star
 $\rho \approx \rho_{\text{nuc}} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$
 $T \approx 30 \text{ MeV}$

Neutrino Cooling
 $3 \times 10^{53} \text{ erg}$
in few sec
 $\approx 50 \text{ km}$

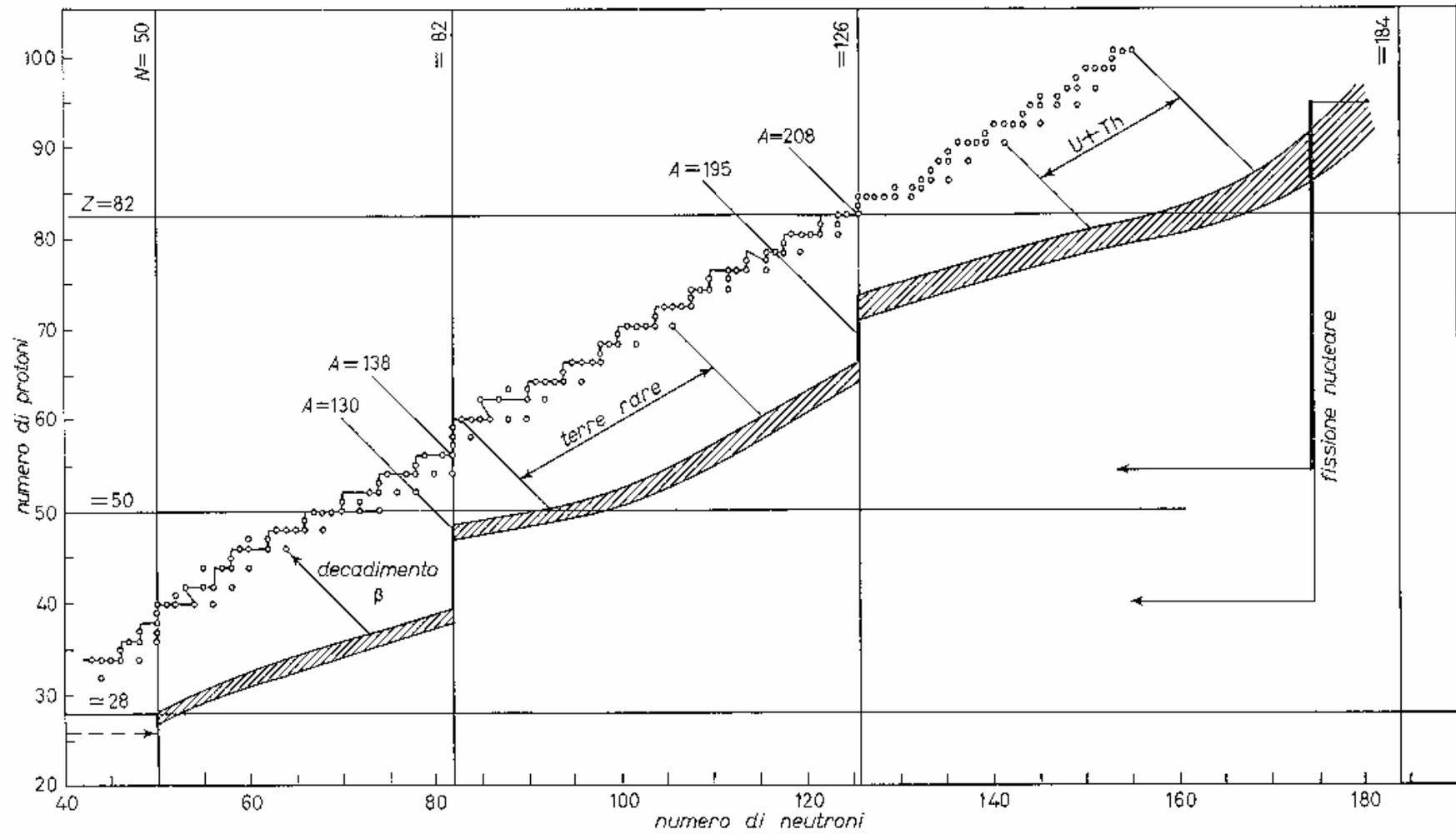
banduleak -69 202



Supernova 1987A

23 February 1987





Raggio di Schwarzschild

$$E_P = G \frac{mM}{R}; E_C = \frac{1}{2} mv^2$$
$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}; R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

Per il Sole $R_S \sim 3$ km, per la Terra $R_S \sim 1$ cm
per l'intero universo R_S e' poco inferiore alle
dimensioni dell'universo stesso

1912

Il fisico austriaco Victor Hess compie dei voli in pallone a quota 5000 metri con degli elettroscopi per scoprire l'origine delle misteriose particelle che sembravano pervadere l'atmosfera e che si ipotizzava provenissero dalla Terra.



Scopre invece che più si sale di quota e più queste particelle aumentano e ne deduce che le particelle devono arrivare dallo Spazio, oltre il Sole.

E' la scoperta dei raggi cosmici (Millikan, 1925)

... le particelle elementari ...

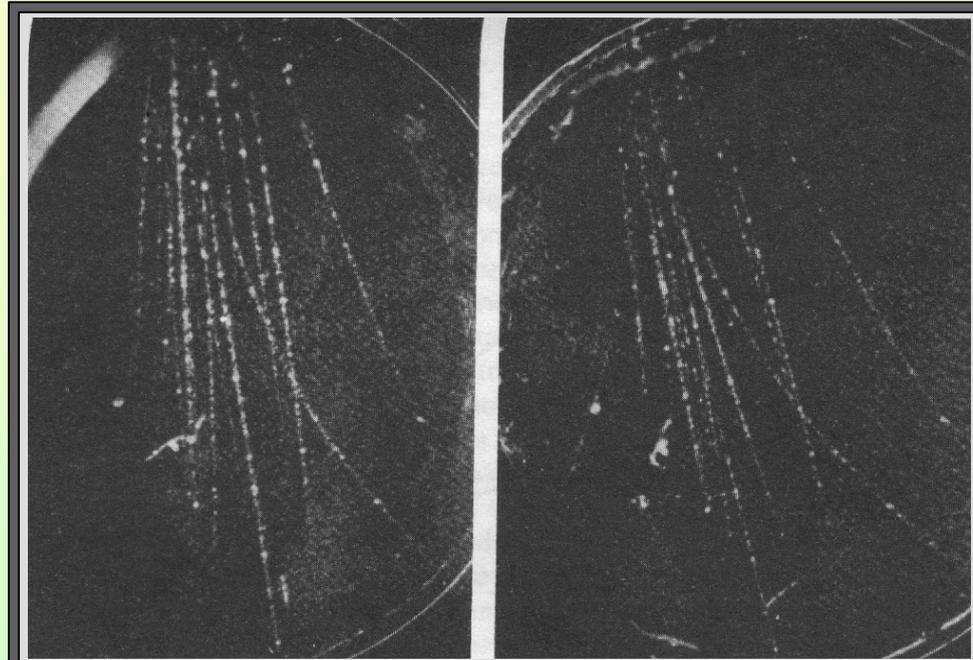
... continuano le osservazioni in laboratorio (camera a nebbia) e ...

1927 **Dimitry Skobelzyn**
fotografa le prime **tracce** da
particelle di raggi cosmici

1932 **Carl Anderson** scopre
il **positrone**

1933 **Patrick Blackett e**
Giuseppe Occhialini
fotografano la coppia
positrone-elettrone

1937 **Seth Neddermeyer e**
Carl Anderson scoprono il
muone



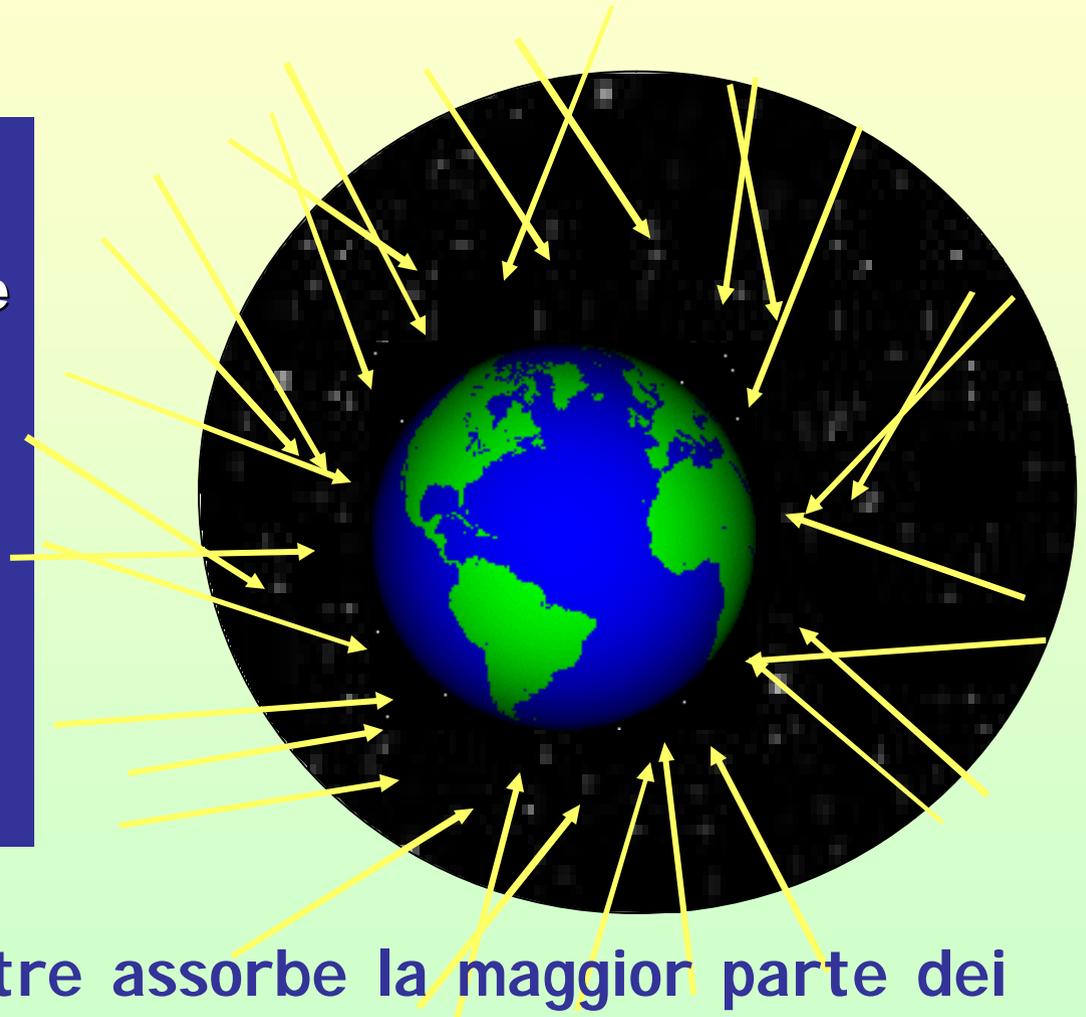
Fotografia stereoscopica di uno sciame
(P. Blackett & G. Occhialini, 1933)

... prende vita la scienza della fisica delle particelle elementari ...

Cosa sono i raggi cosmici (CR) ?

I **raggi cosmici** sono particelle subatomiche cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra.

Lo **spettro energetico** inizia da circa 10^9 eV e sembra non avere un limite superiore.



L'atmosfera terrestre assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.

