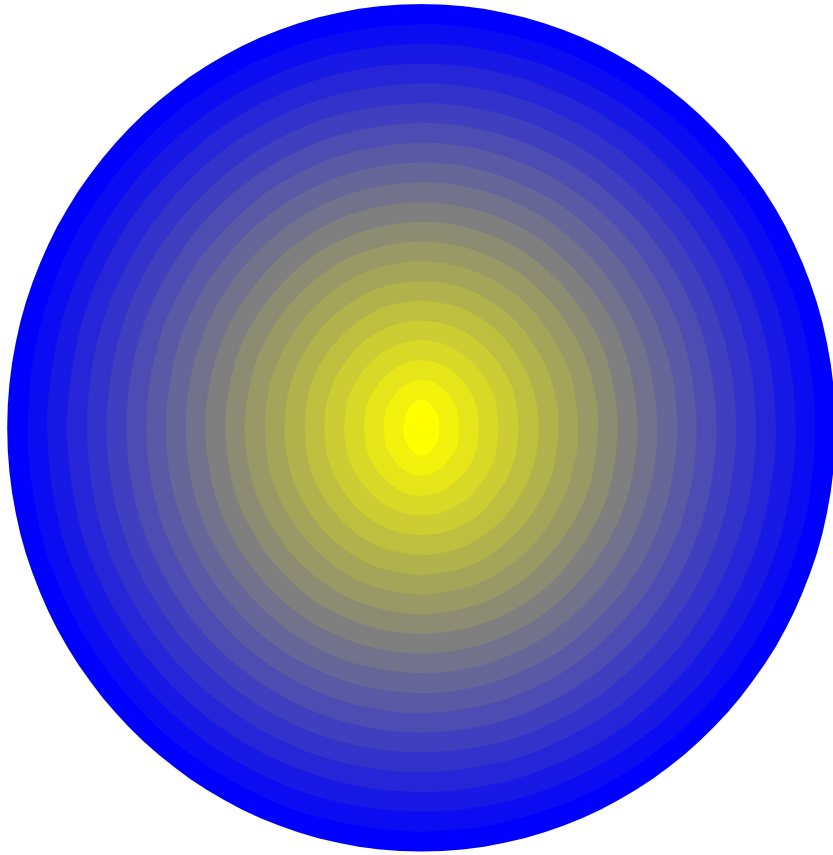


Il nucleo dell'atomo



L'atomo si può considerare suddiviso in due regioni:

- Il nucleo, carico positivamente: è formato di **protoni e neutroni**
- La nuvola elettronica, carica negativamente: lo spazio intorno dove “può essere trovato” un elettrone

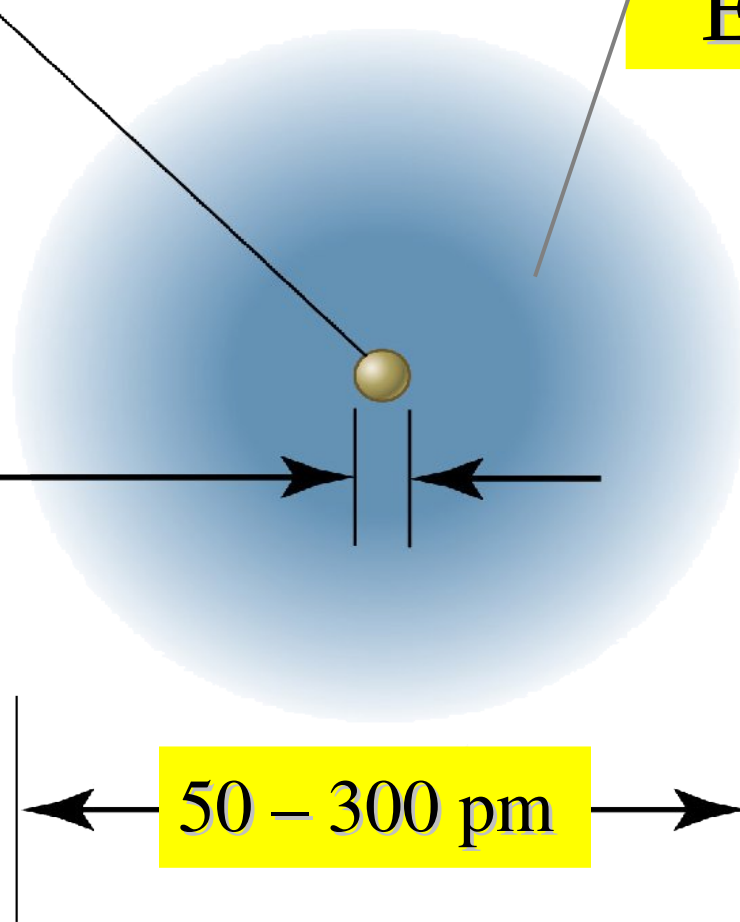
	Elettrone	Protone	Neutrone
Carica (C)	$-q_e = -1.67 \times 10^{-19}$	$+q_e$	0
Massa (kg) (amu)	9.11×10^{-31} 0.000549	1.673×10^{-27} 1.00728	1.675×10^{-27} 1.00866

Dimensioni tipiche

Nucleo

Elettroni

$1 - 10 \text{ fm} =$
 $0.001 - 0.01 \text{ pm}$



$50 - 300 \text{ pm}$

Dimensioni tipiche

- Se un atomo si estendesse occupando uno stadio da calcio (100 m) il suo nucleo avrebbe le dimensioni di una piccola pastiglia (qualche mm).
- Il nucleo contiene quasi tutta la materia dell'atomo: la densità di materia all'interno del nucleo è dell'ordine di 10^{17} kg/m^3 !!

confronto con

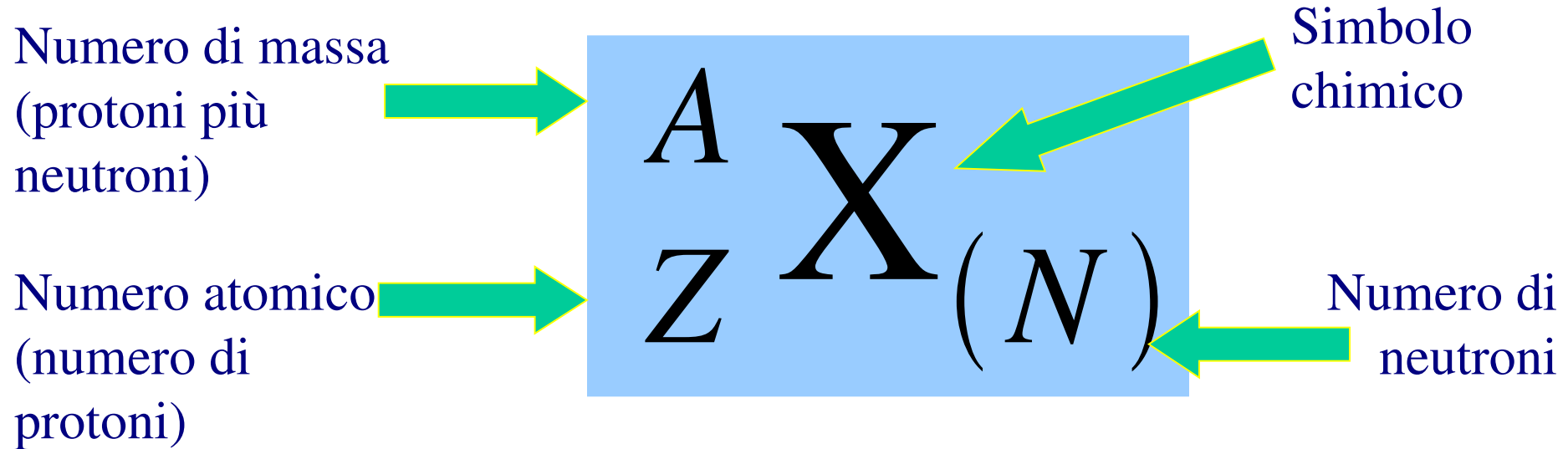
$\rho_{\text{aria}} \sim 1.0 \text{ kg/m}^3$ (a 20°C e pressione atmosferica)

$\rho_{\text{acqua}} \sim 1000 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{ferro}} \sim 8000 \text{ kg/m}^3$

*la materia è formata soprattutto di **spazio** quasi **vuoto***

Notazione di base



Esempi: ^1_1H , $^{12}_6\text{C}$, $^{127}_{53}\text{I}_{74}$

Notazione:

- spesso il numero di neutroni $N = A - Z$ non si indica
- a volte neanche Z si indica (è sottinteso nel simbolo chimico)

Tavola periodica

H	IIA																IIIA IVA VA VIA VIIA					He	
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
Cs	Ba	La Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
Fr	Ra	Ac Lr	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Une	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo						
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							

Gas

Liquid

Solid

Radio isotopi naturali

Radio isotopi artificiali

diversi **isotopi** occupano stessa casella
(stesso Z = stesso simbolo chimico, diversi N e quindi A)

La valle di stabilità dei nuclei

Isotopi:

stesso numero di protoni Z
diverso numero di neutroni N
(stessa specie chimica, diversa massa)

stabili oppure

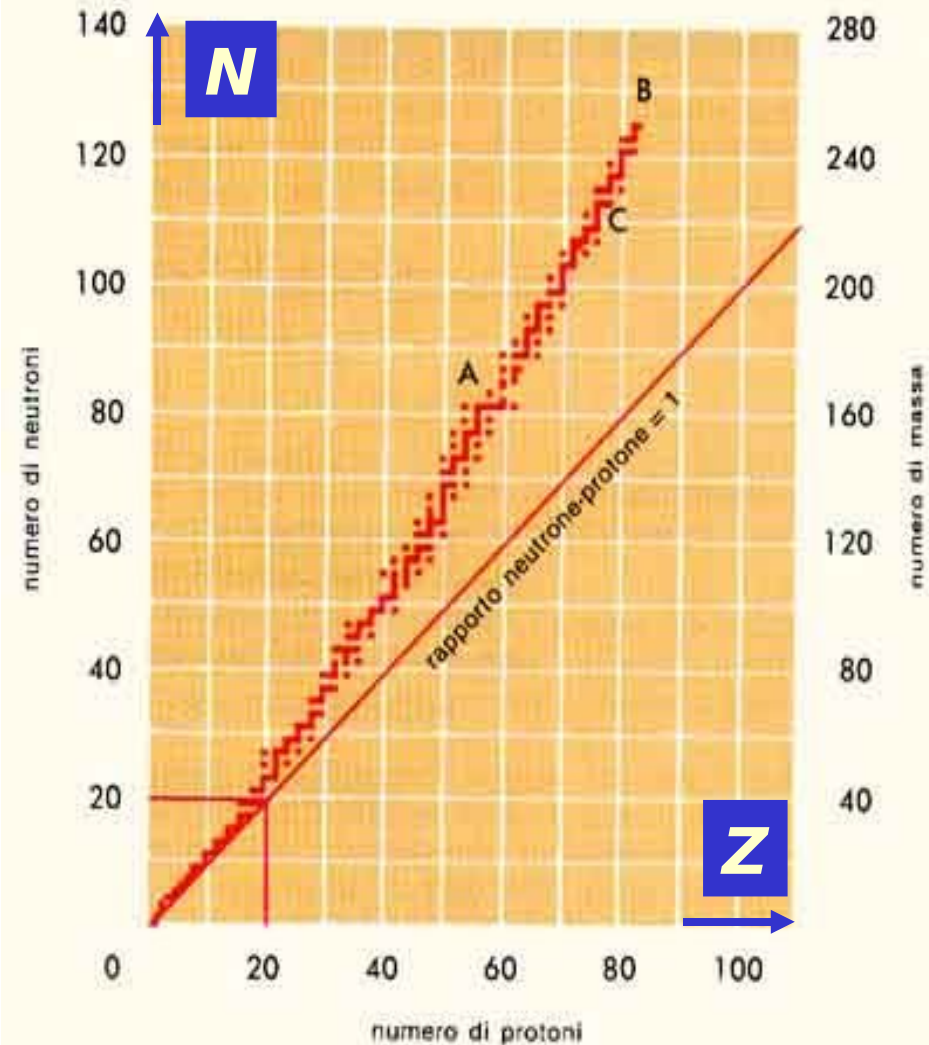
radioattivi (naturali e artificiali)

Stabilità dei nuclei:

Nuclei leggeri ($Z \leq 20$) $\Leftrightarrow N = Z$

Nuclei pesanti ($Z > 20$) $\Leftrightarrow N > Z$

altri N danno spesso nuclei instabili
che decadono radioattivamente



Ma i protoni non si respingono?

Nel nucleo ci sono Z protoni molto vicini tra loro ($r \approx 10^{-15}$ m).

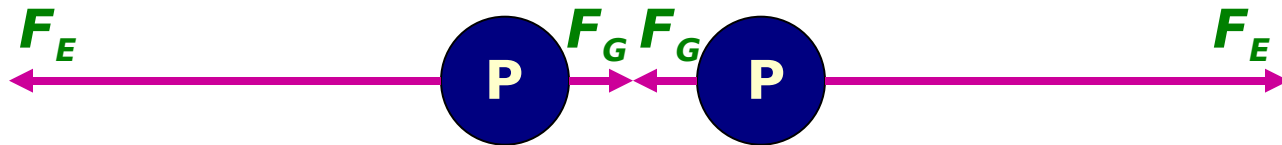
Essi risentono delle seguenti forze reciproche:

attrazione
gravitazionale

$$F_G = -G \frac{m_p m_p}{r^2} = -6.67 \cdot 10^{-11} \frac{(1.67 \cdot 10^{-27})^2}{(10^{-15})^2} = -2 \cdot 10^{-34} \text{ N}$$

repulsione
elettrostatica

$$F_E = + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_p q_p}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} = 230 \text{ N}$$



?!

In base alle forze che conosciamo (gravitazionale ed elettromagnetica) i protoni dovrebbero **respingersi** violentemente queste forze dovrebbero **distuggere i nuclei atomici, o impedirne la formazione**

Ci dev'essere un'altra forza attrattiva a tenere insieme i nuclei

La “colla” nucleare

All'interno dei nuclei atomici si manifesta una, anzi due, nuove forze d'attrazione, capaci di “incollare” tra loro i protoni vincendo la loro repulsione coulombiana.

Per tenere uniti i protoni sono necessari anche i neutroni!

Forza nucleare forte:

- È sempre attrattiva
- Si manifesta solo a distanze $d \approx 10^{-15}$ m
- Non fa differenza tra protoni e neutroni

Forza nucleare debole:

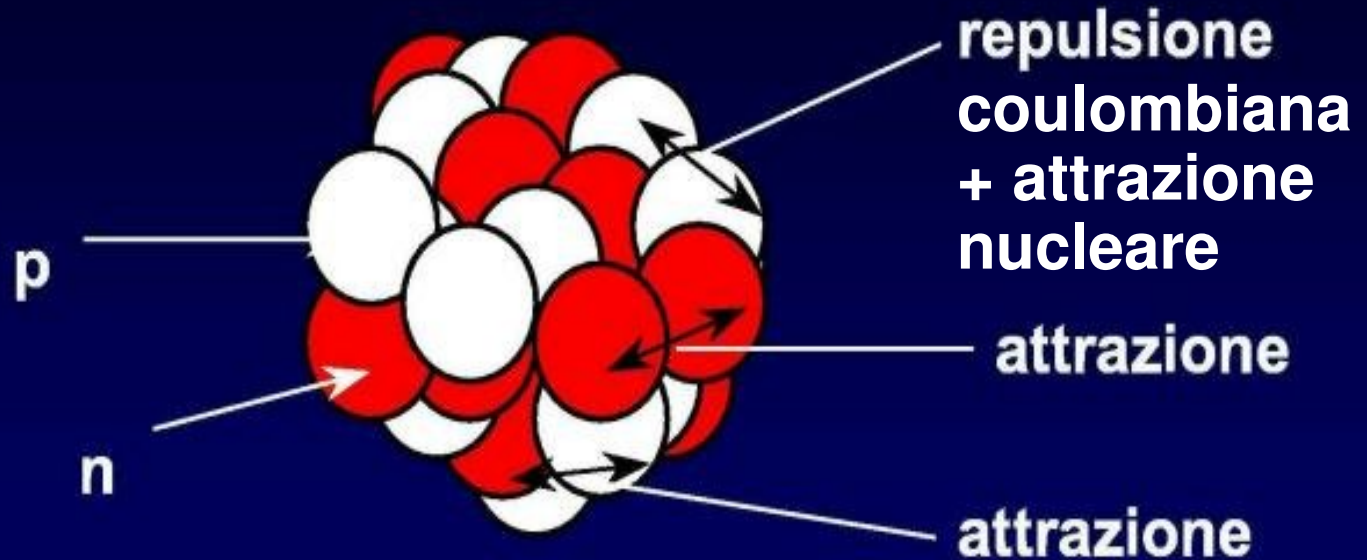
- Si manifesta solo a distanze $d \approx 10^{-15}$ m
- Agisce su protoni e neutroni, ma anche elettroni (e^- / e^+) e neutrini (ν)

Le 4 forze fondamentali della natura

forza	intensità relativa	raggio d'azione
gravitazionale	$\approx 10^{-38}$	infinito ($\propto 1/r^2$)
elettromagnetica	$\approx 10^{-2}$	infinito ($\propto 1/r^2$)
nucleare debole	$\approx 10^{-14}$	$r_{\text{nucl}} \approx 10^{-15} \text{ m}$
nucleare forte	1	$r_{\text{nucl}} \approx 10^{-15} \text{ m}$

Il nucleo come stato legato many-body

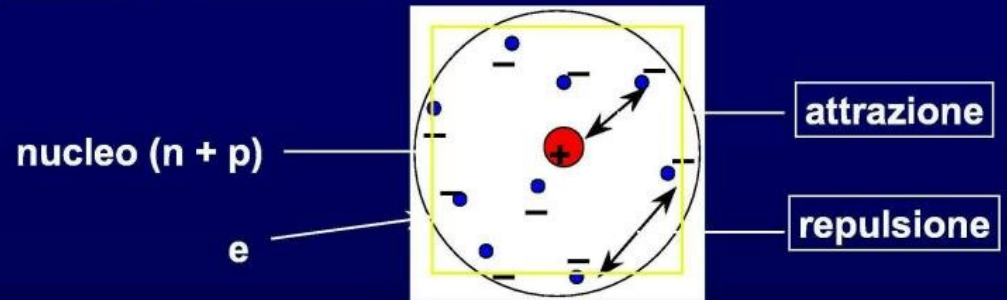
Nucleo (Interazioni particelle nucleari)



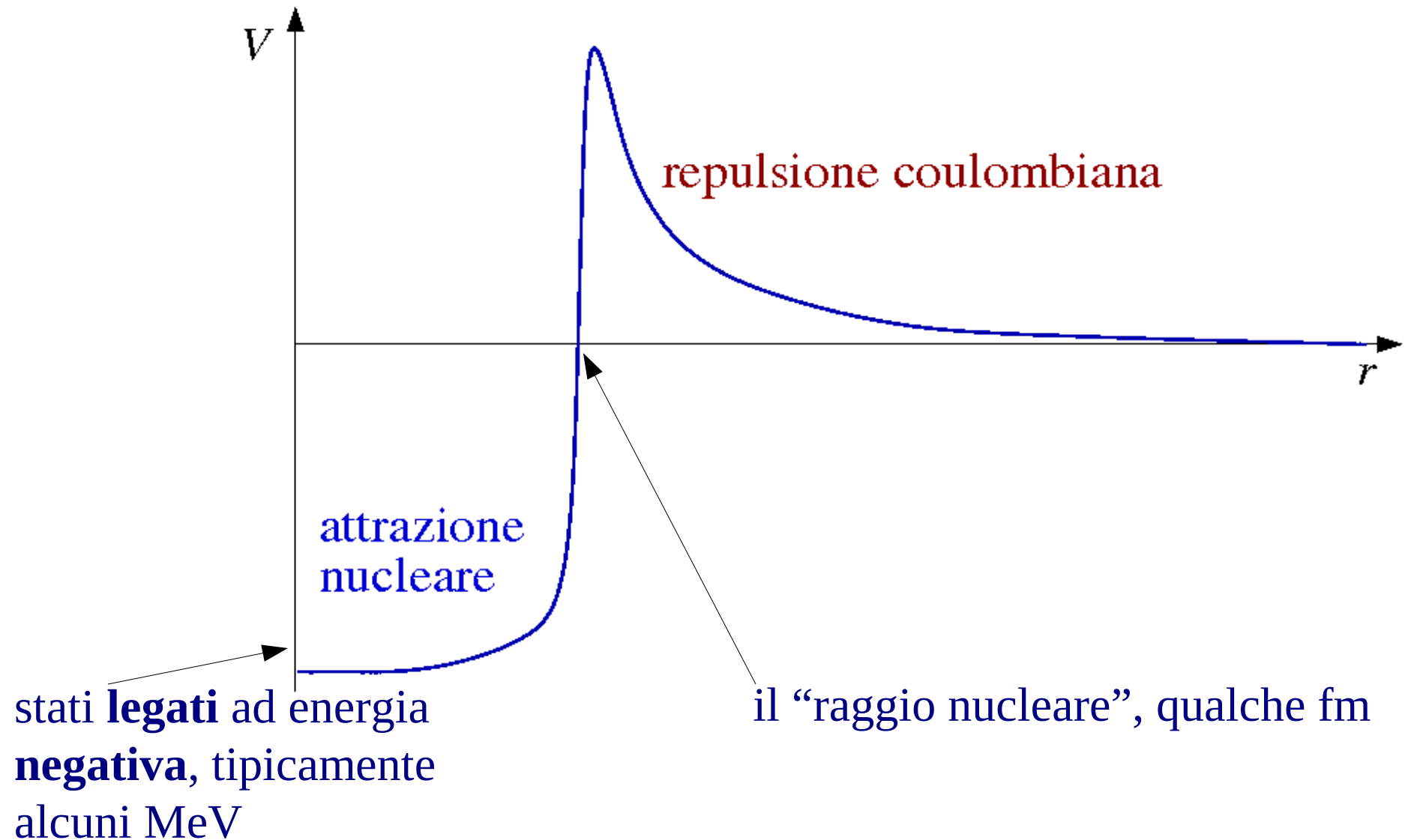
Confronto con atomo:

- ha un centro naturale (il nucleo)
- solo interazioni elettromagnetiche
- elettroni tutti identici che si respingono tra loro

Atomo (interazioni nuclei-elettroni)



Interazione di un protone con il resto del nucleo

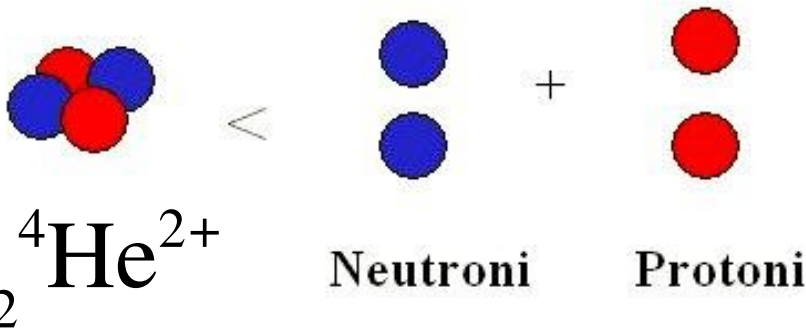


Energia di legame = difetto di massa

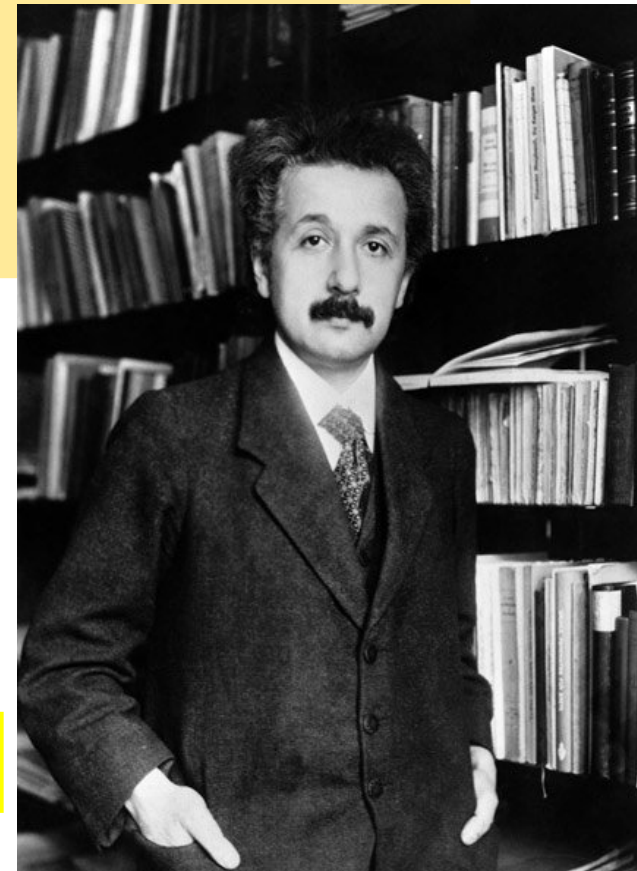
- I nuclei hanno una **massa minore** della somma delle masse dei nucleoni quando sono liberi.
- Questa massa mancante dipende dall'energia (negativa) dello stato legato che è il nucleo stesso rispetto alle sue componenti.
- L'equazione di Einstein

$$E = mc^2 \quad c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

fissa il legame tra massa ed energia.



$$m_{\alpha} = 4.002602 \text{ amu} < 4.032980 \text{ amu} = 2m_n + 2m_p$$



Energia di legame

Esempio 1: energia di legame del **deuterone**

In base alla sola somma delle masse $D = {}^2\text{H}$ dovrebbe avere massa:

$$M_D^{\text{sum}} = m_p + m_e + m_n = 2.01649 \text{ amu}$$

Invece la misura sperimentale della massa atomica di deuterio dà:

$$M_D = 2.01410 \text{ amu}$$

La differenza $\Delta m = M_D - M_D^{\text{sum}} = -0.00239 \text{ amu}$ misura l'energia **negativa** con cui p-n si legano nel nucleo di deuterio $\Delta E = \Delta m c^2 = -2.22 \text{ MeV}$

Esempio 2: energia di legame dell'**ossigeno-17**

In base alla sola somma delle masse ${}^{17}\text{O}$ dovrebbe avere massa:

$$M_{17\text{O}}^{\text{sum}} = 8 (m_p + m_e) + 7 m_n = 17.1406 \text{ amu}$$

Invece la misura sperimentale dà:

$$M_{17\text{O}} = 17.0091 \text{ amu}$$

La differenza $\Delta m = M_D - M_D^{\text{sum}} = -0.13142 \text{ amu}$ misura l'energia **negativa** con cui i p e n si legano nel nucleo $\Delta E = \Delta m c^2 = -122.4 \text{ MeV}$

cioè un'**energia di legame** $E_A = -\Delta E / A = 7.20 \text{ MeV}$ per nucleone

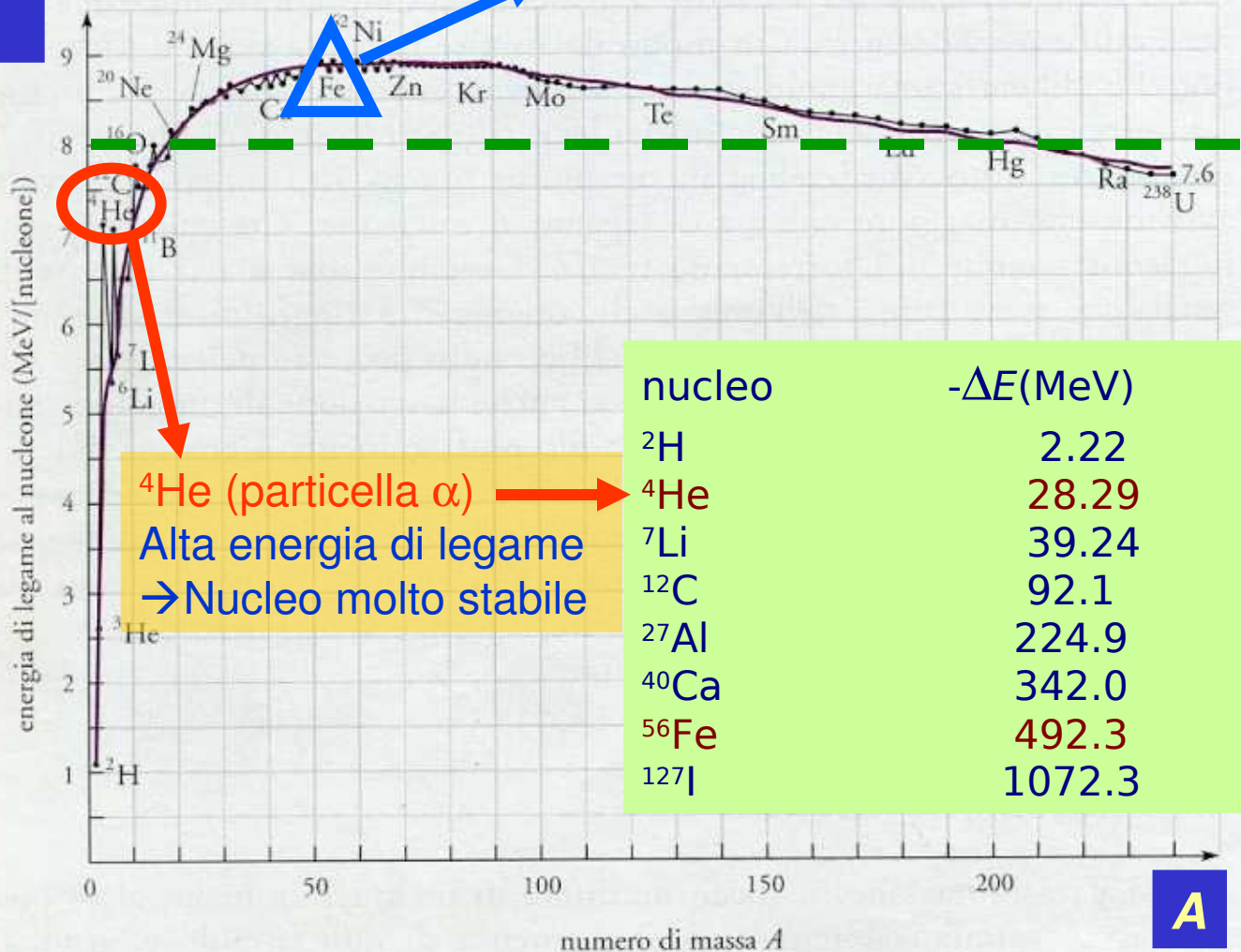
Energia di legame per nucleone

simile: $E_A \approx 8 \text{ MeV}$ per tutti i nuclei, tranne i più leggeri

MeV/A

^{56}Fe nucleo più stabile (max.energia di legame)

8 MeV



A

Confronto degli ordini di grandezza dell'energia di legame

Chimica: $\approx 1 \div 10$ eV/molecola

Nucleare: $\approx 10 \div 100$ MeV/atomo

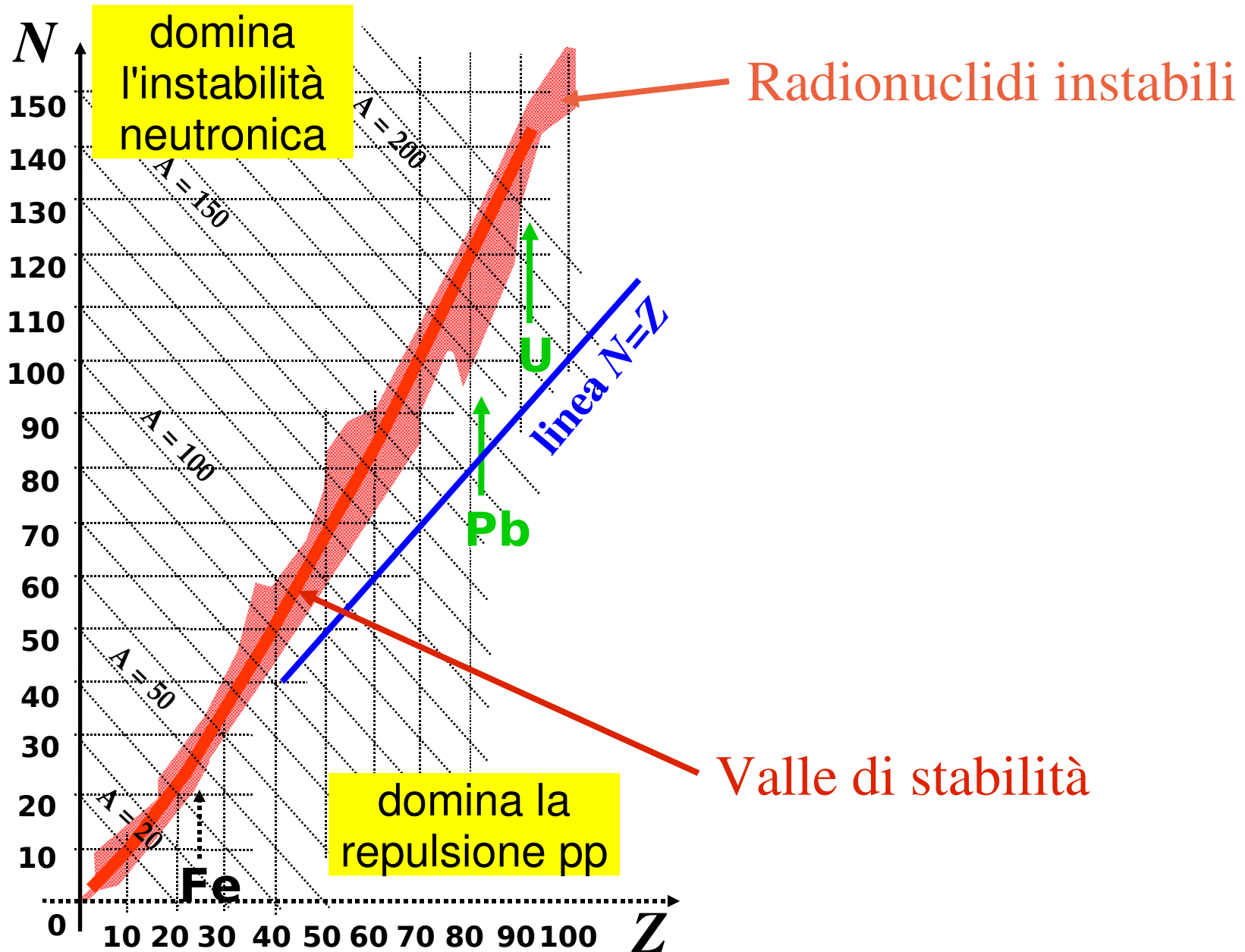


Combustione di 16 g di CH_4
(pari a una mole di CH_4)
 $\rightarrow 890 \text{ kJ} \equiv 0,247 \text{ kWh}$ ($1 \text{ J} \equiv 1 \text{ W s}$)
 $\equiv 1$ lampadina da 100 W accesa per 2h 28 min.



Fissione di 16 g di ^{235}U (0,07 mol di ^{235}U)
 $\rightarrow 1,2 \times 10^9 \text{ kJ} \equiv 3,33 \cdot 10^5 \text{ kWh}$ ($1 \text{ J} \equiv 1 \text{ W s}$)
 $\equiv 100\,000$ lampadine da 100 W
accese per 3h 20 min.

Tavola dei nuclidi



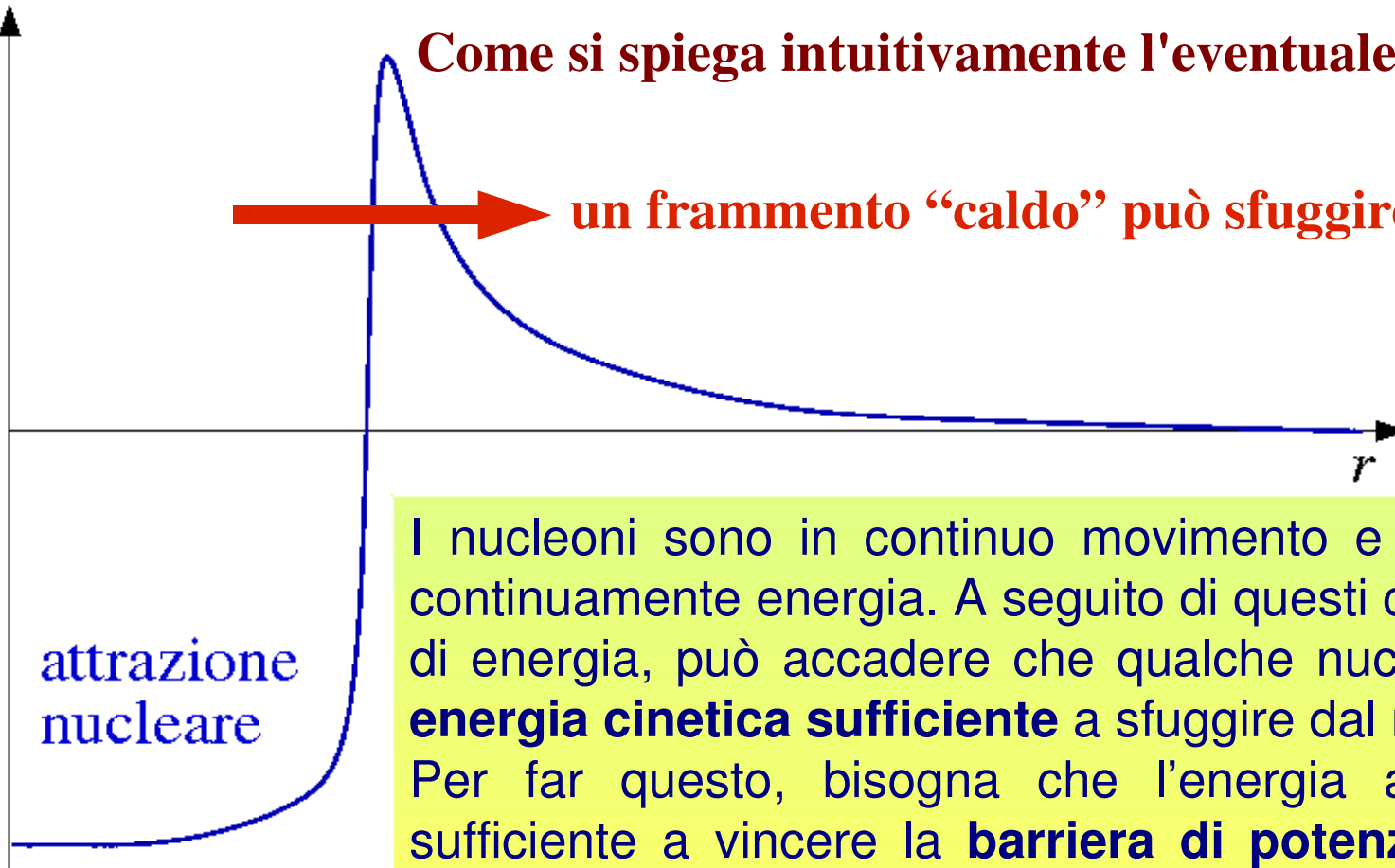
Nuclei stabili e instabili

In natura esistono
circa 270 nuclei stabili
circa 1000 nuclei instabili

In laboratorio si sono
prodotti artificialmente
circa 1500 nuclei instabili

Come si spiega intuitivamente l'eventuale instabilità?

 un frammento “caldo” può sfuggire



I nucleoni sono in continuo movimento e si scambiano continuamente energia. A seguito di questi casuali scambi di energia, può accadere che qualche nucleone acquisti **energia cinetica sufficiente** a sfuggire dal nucleo. Per far questo, bisogna che l'energia acquistata sia sufficiente a vincere la **barriera di potenziale** nucleare generata dall'interazione nucleare forte.

Radioattività



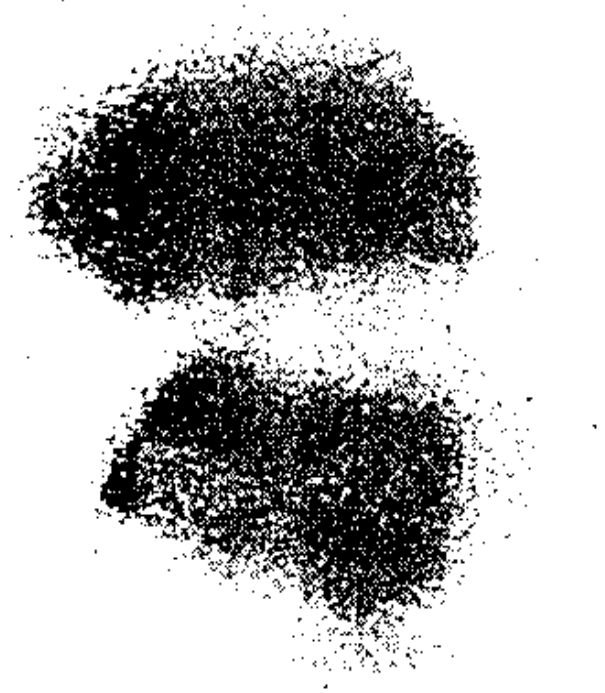
Becquerel (1896) osservò
emissione spontanea di
energia

Pierre e Marie Curie (1899)
dimostrarono la radioattività
del radio.

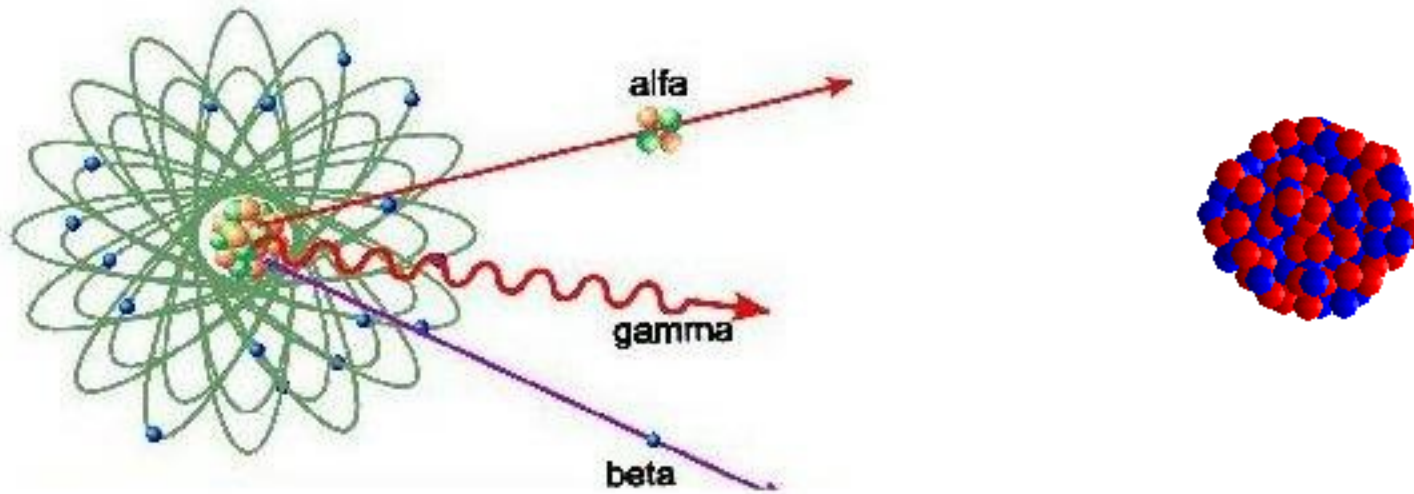


Annerimento della lastra fotografica provocata dai sali di
uranio che Becquerel vi aveva inavvertitamente poggiato .

16. 11. 1896. Solfato double d'uranyle et de Potassium
Purifié par Curie & Curie. Minus.
Exposé au soleil le 17. et à la lumière diffuse le 18. et
l'insolation le 19. mars.

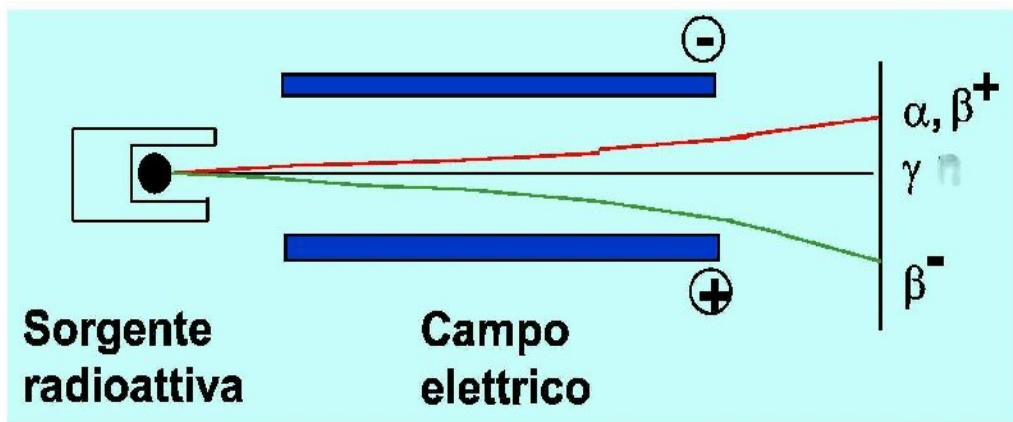


Decadimenti

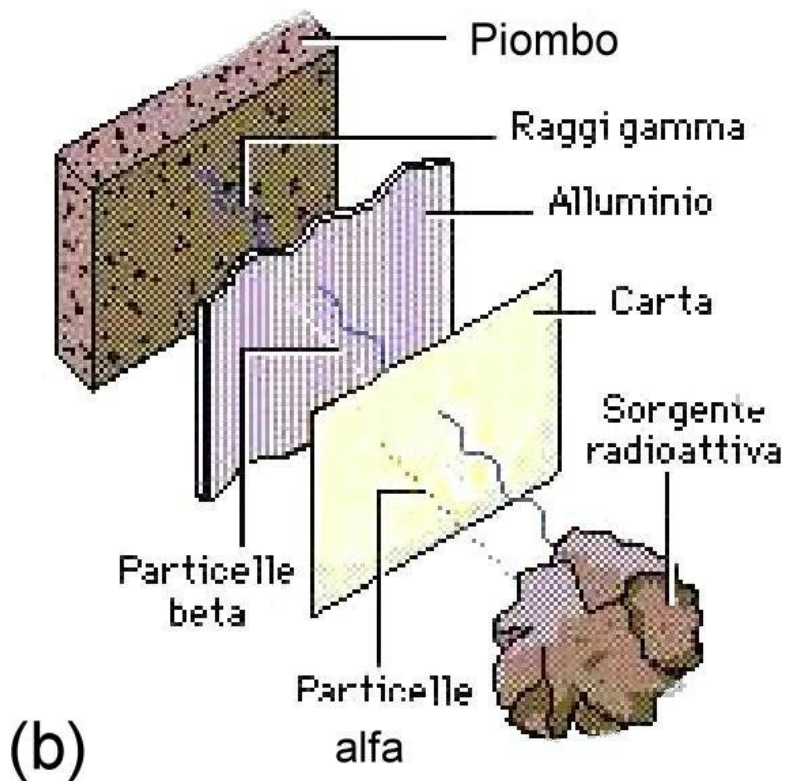


- α , β : espulsione di “radiazione” corpuscolare (massa & carica)
- γ : radiazione elettromagnetica (come diseccitazione di atomi)
- fissione: il nucleo si spezza in due pezzi simili, più eventuali frammenti minori

Tipi più comuni di radiazione

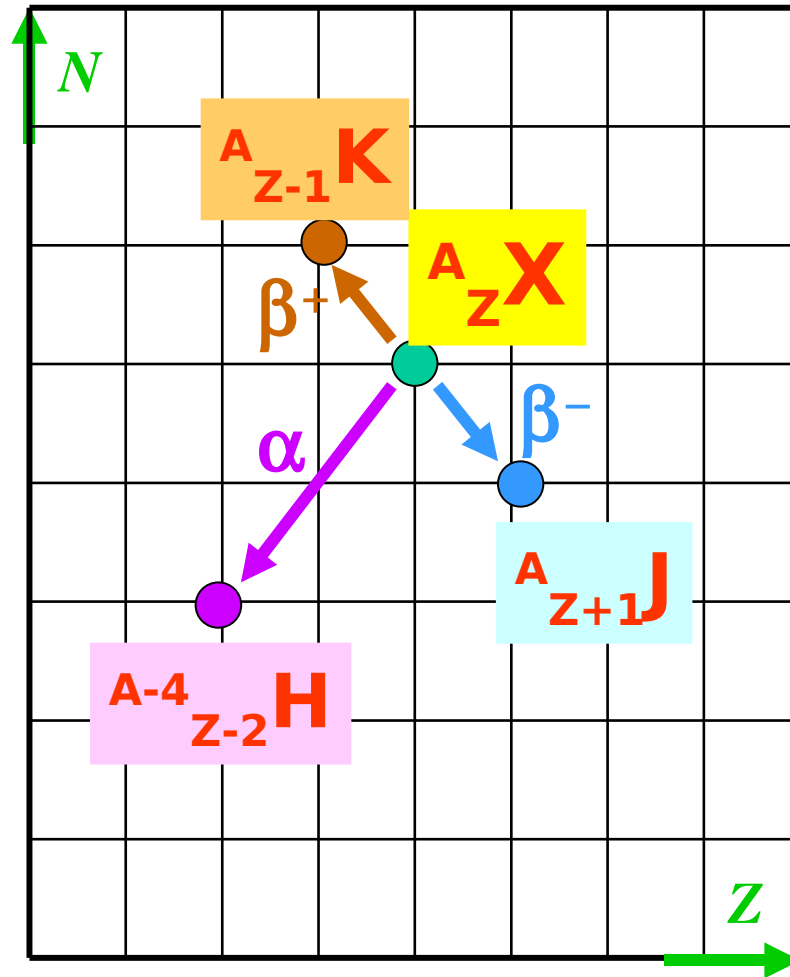


Q, m



α : $Q = +2$	$m = 4.00151$ amu	nuclei di elio
β : $Q = -1(+1)$	$m = 0.000549$ amu	elettroni
γ : $Q = 0$	$m = 0$	fotoni

Una visualizzazione dei decadimenti



Attività radioattiva

Attività $A = -\Delta N / \Delta t$: num. di decadimenti/s

$A = \text{rate} = \text{tasso}$ (“velocità”, “frequenza”) di decadimento

Unità di misura SI:

Becquerel: 1 Bq = 1/s (identico a 1 Hz)

1 Bq = 1 decadimento al secondo [**unità molto piccola**]

Vecchia unità pratica:

curie: 1 Cu = attività di 1 g di radio 226
(decadimento α : $^{226}\text{Ra} \Rightarrow ^{222}\text{Rn}$, $T_{1/2} = 1602$ anni)

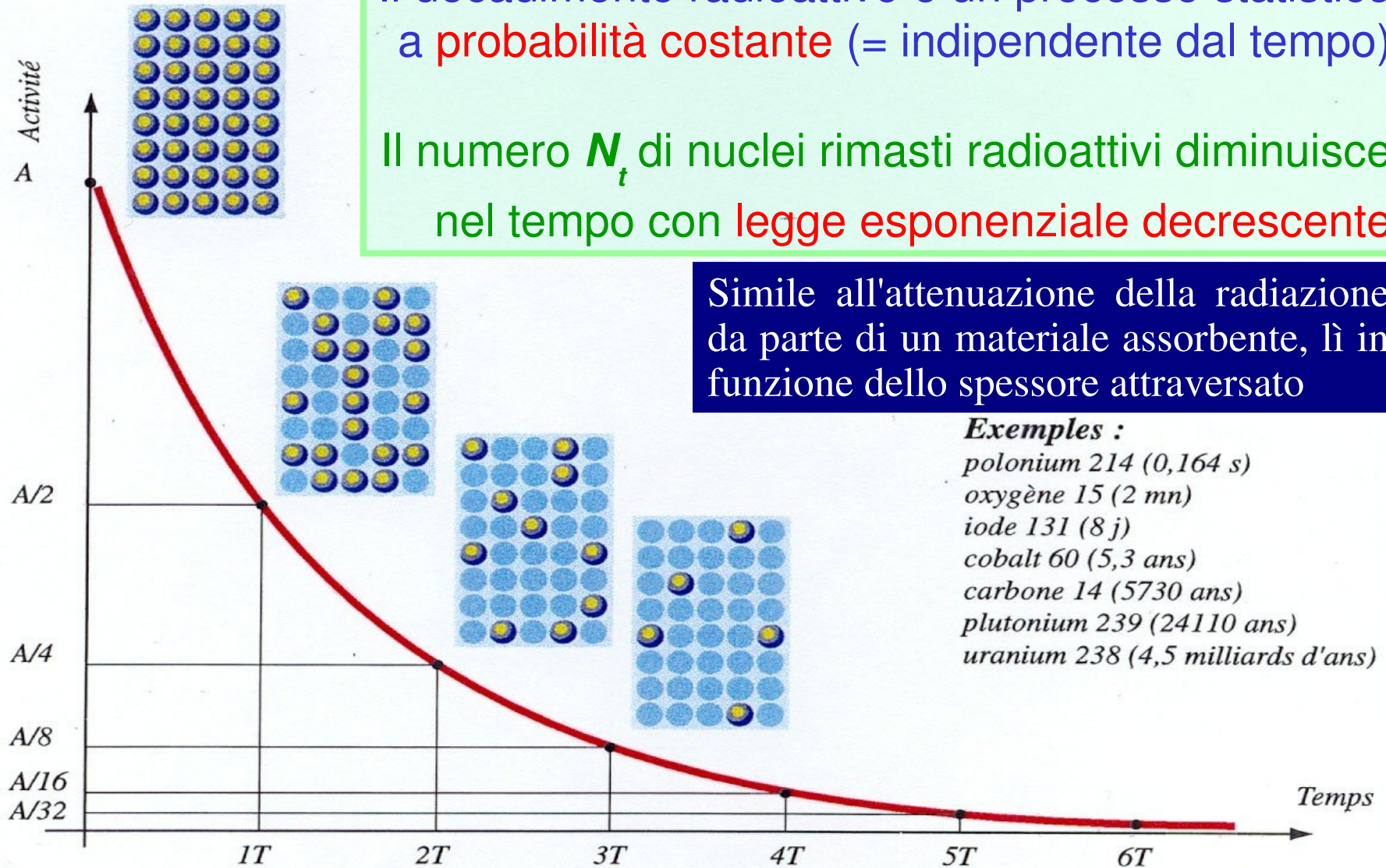
$$1 \text{ Cu} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

Legge del decadimento

Il decadimento radioattivo è un processo statistico a **probabilità costante** (= indipendente dal tempo)

Il numero N_t di nuclei rimasti radioattivi diminuisce nel tempo con **legge esponenziale decrescente**

Simile all'attenuazione della radiazione da parte di un materiale assorbente, lì in funzione dello spessore attraversato



Exemples :

polonium 214 (0,164 s)

oxygène 15 (2 mn)

iode 131 (8 j)

cobalt 60 (5,3 ans)

carbone 14 (5730 ans)

plutonium 239 (24110 ans)

uranium 238 (4,5 milliards d'ans)

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

Decadimento a tasso relativo costante

Il numero dei nuclei che decadono nell'unità di tempo è proporzionale al numero di nuclei non ancora decaduti:

$$-\Delta N / \Delta t \propto N \longrightarrow \text{Attività istantanea } A = \lambda N$$

$$A = -\Delta N / \Delta t = \lambda \cdot N$$

λ = costante di decadimento

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$1/\lambda = \tau = \text{vita media}$$

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

$$\text{Attività: } A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-t/\tau}$$

Tempi di dimezzamento

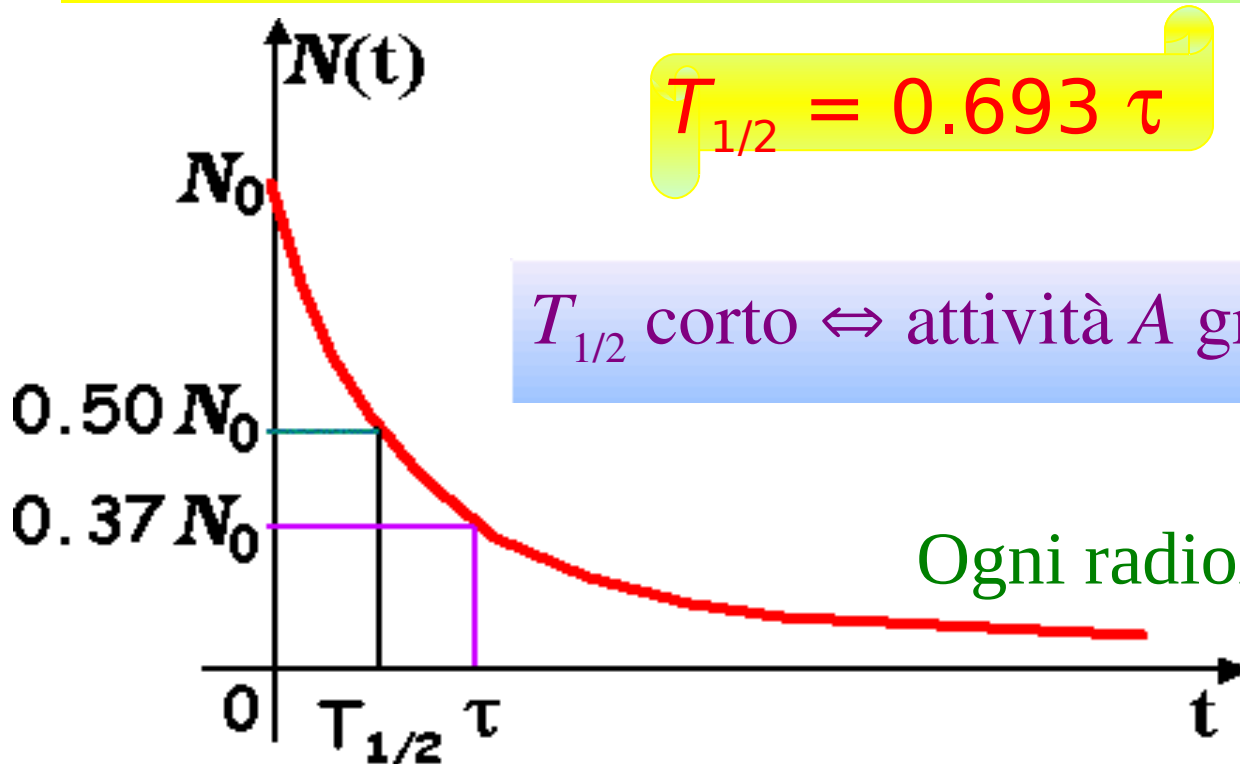
Vita media τ =

tempo dopo il quale rimangono il 37 % dei nuclei ($=1/e$)

Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ =

tempo dopo il quale rimangono il 50 % dei nuclei.

$T_{1/2}$ varia da frazioni di secondo a miliardi di anni



$$T_{1/2} = 0.693 \tau$$

$T_{1/2}$ corto \Leftrightarrow attività A grande (e viceversa)

Ogni radioisotopo ha il suo $T_{1/2}$

Esempi

Radioisotopo (decadimento)

$T_{1/2}$

^3H (β)

12.33 anni

^{14}C (β)

5730 anni

^{24}Na [β (+ γ + γ)]

15 ore

^{40}K (β)

$1.28 \cdot 10^9$ anni

^{60}Co (β)

5.3 anni

^{137}Cs (β)

30 anni

^{131}I (β)

8 giorni

^{222}Rn (α)

3.82 giorni

^{235}U (α)

$7.04 \cdot 10^8$ anni

^{238}U (α)

$4.47 \cdot 10^9$ anni

Esercizio - ^{63}Ni - $T_{1/2} = 100.1$ anni

Quantità residua di ^{63}Ni

$n \ t_{1/2}$	grammi residui	tempo, anni
0	100	0
1	50	100
2	25	200
3	12,5	300
4	6,25	400
....		
10	0,0977	1000

Il decadimento richiede molto tempo (1/1000 in 10 $t_{1/2}$)

^{63}Ni viene utilizzato nei rivelatori di fumo.

$T_{1/2}$ fisico, biologico ed effettivo

Tempo di dimezzamento fisico = $T_f = T_{1/2}$

In un organo o tessuto vivente, la quantità di radioisotopo istantaneamente presente (es. perché inalato e/o ingerito) diminuisce, oltre che per il decadimento radioattivo della sostanza, anche a causa del **metabolismo** dell'organo (escrezione, scambi liquidi/gassosi,...)

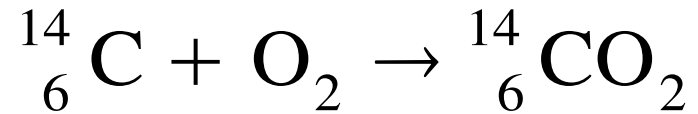
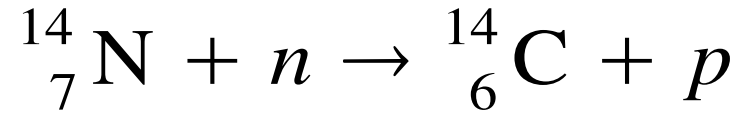
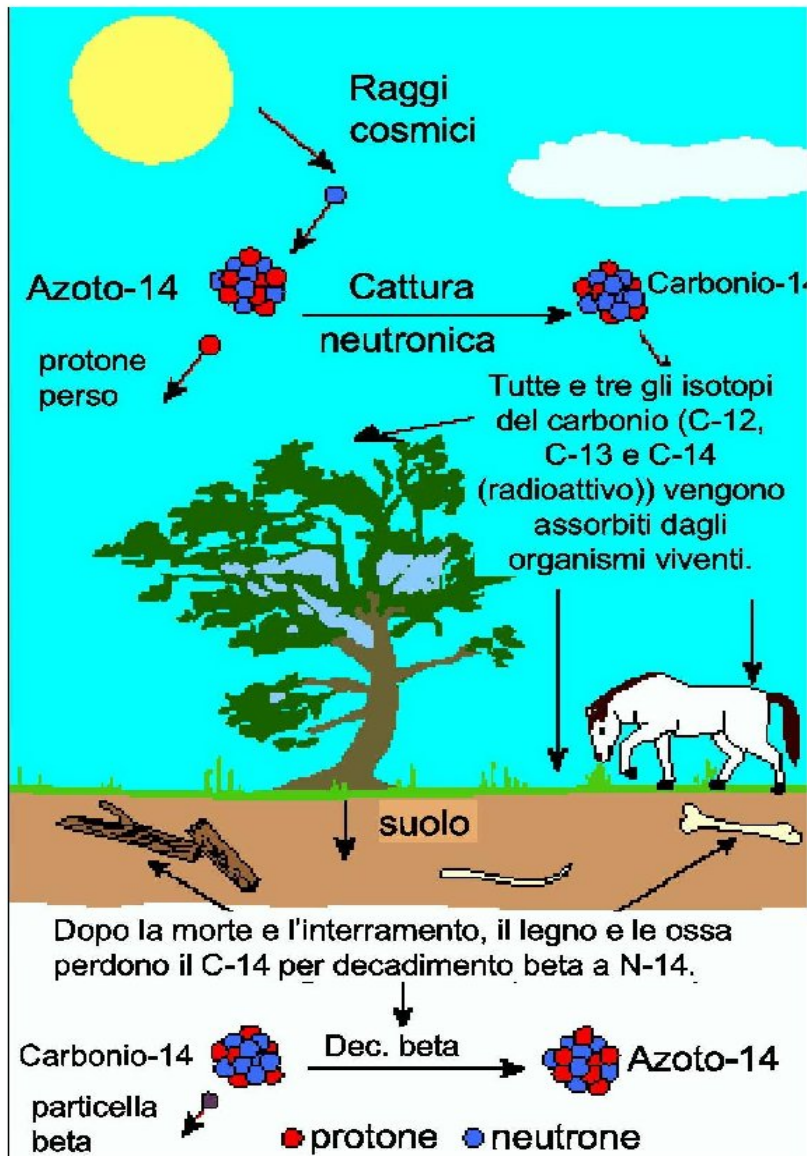
Tempo di dimezzamento biologico = T_b

Tempo di dimezzamento effettivo = T_e , si sommano i tassi di decadimento, quindi vale la seguente **relazione**:

$$1/T_e = 1/T_f + 1/T_b$$

Es.	^{131}I :	$T_f = 8 \text{ gg}, T_b = 8 \text{ gg}$	$\Rightarrow T_e = 4 \text{ gg}$
	^3H :	$T_f = 12 \text{ anni}, T_b = 10 \text{ gg}$	$\Rightarrow T_e = 10 \text{ gg}$

Ciclo del carbonio



Fotosintesi clorofilliana
zuccheri e proteine

Cibo erbivori

Cibo carnivori

Applicazione: datazione radiometrica

In atmosfera e negli esseri viventi:

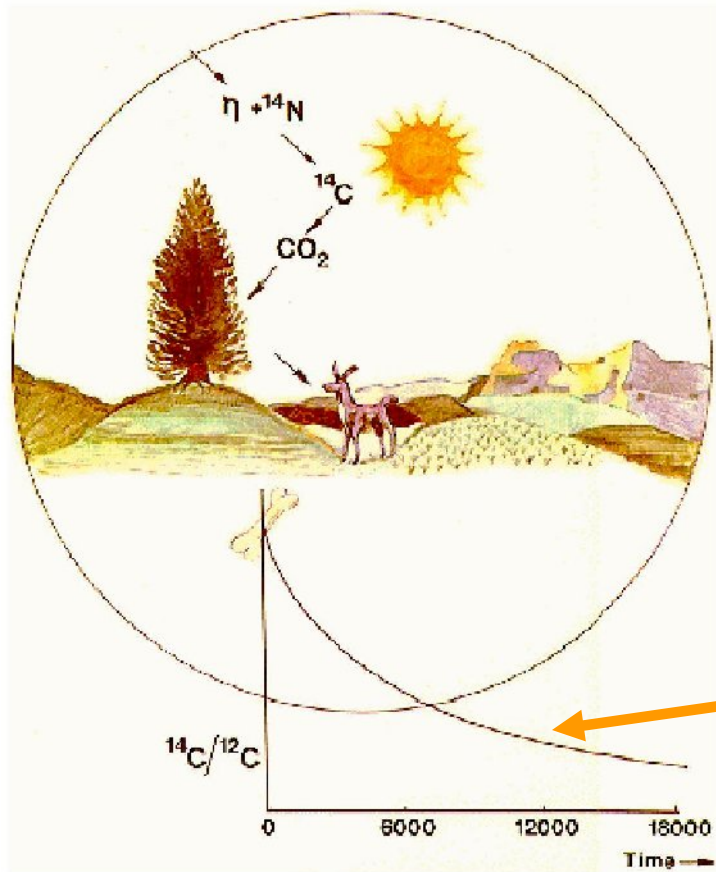
$$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = \text{fisso} \simeq 10^{-12}$$

Morte essere vivente:

^{14}C decade

$$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = e^{-t/\tau}$$

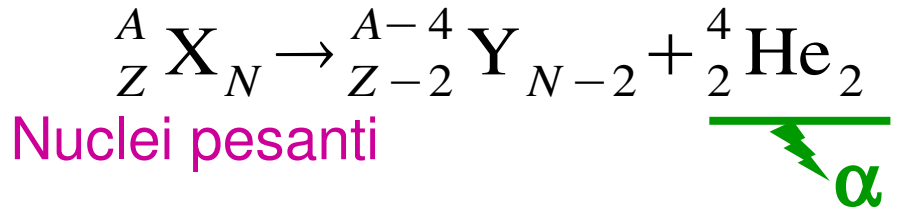
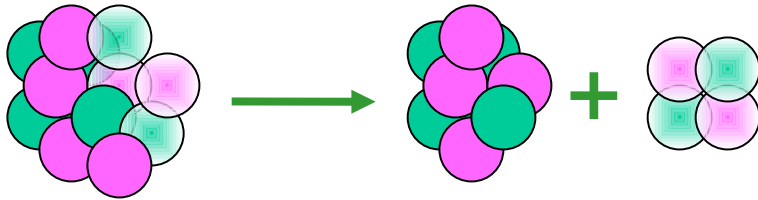
$$T_{1/2} = 5730 \text{ anni}$$



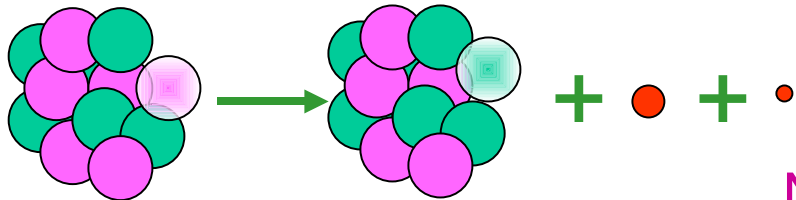
Spettrometria di massa permette di misurare la percentuale di ^{14}C residuo e quindi di “**datare**” il campione ex-vivente

Tipi di decadimenti radioattivi

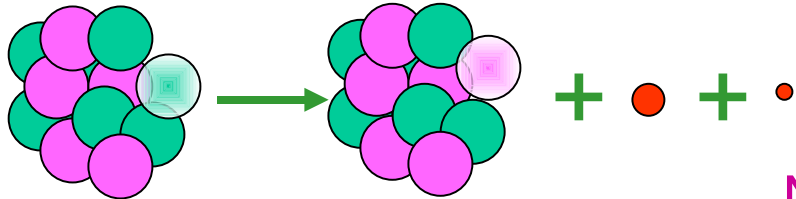
α



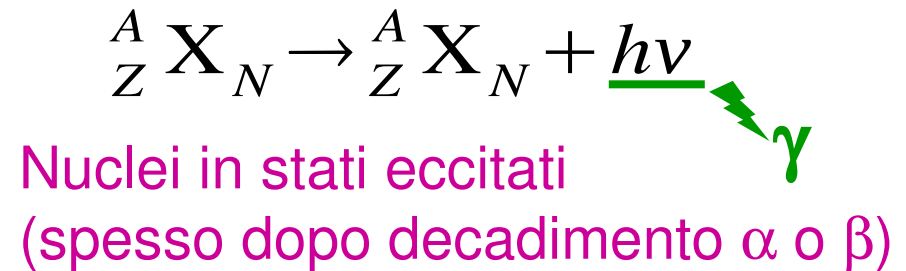
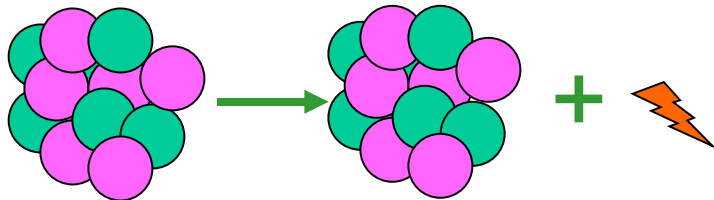
β^-



β^+

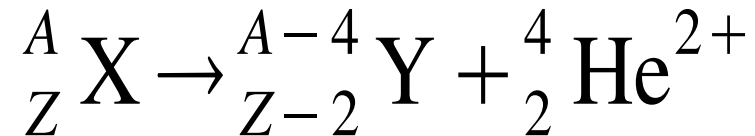
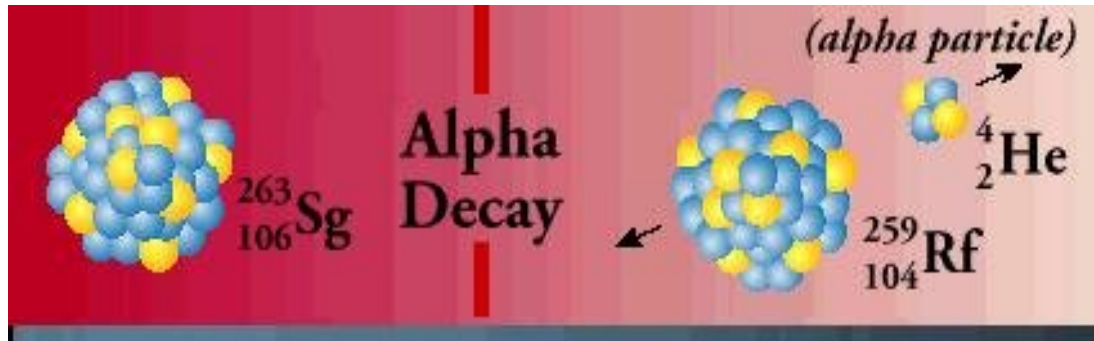


γ



I decadimenti sono comunque impossibili se non rispettano la
conservazione della massa-energia!

Decadimento alfa (α)



Possibile se $M(Z,A) > M(Z-2,A-4) + M(^4\text{He})$

- Sorgente: nuclidi radioattivi pesanti ($A > 200$)
- Energia: raramente inferiore ai 4 MeV.
- Velocità: 15.000 - 20.000 km/s (10% c)

Energia emissione alfa (α)

Energia di disintegrazione \longrightarrow $Q = (M_P - M_F - M_\alpha)c^2$

\downarrow
Energia cinetica $\alpha \rightarrow E_c^\alpha = Q/[1 + M_\alpha/M_F]$

\downarrow
Radiazione monoenergetica, $E_c^\alpha = 4\text{-}9 \text{ MeV}$

$T_{1/2}: 10^{-7} \text{ secondi} - 10^{10} \text{ anni}$

\nearrow $T_{1/2}$ alto, E_c^α bassa

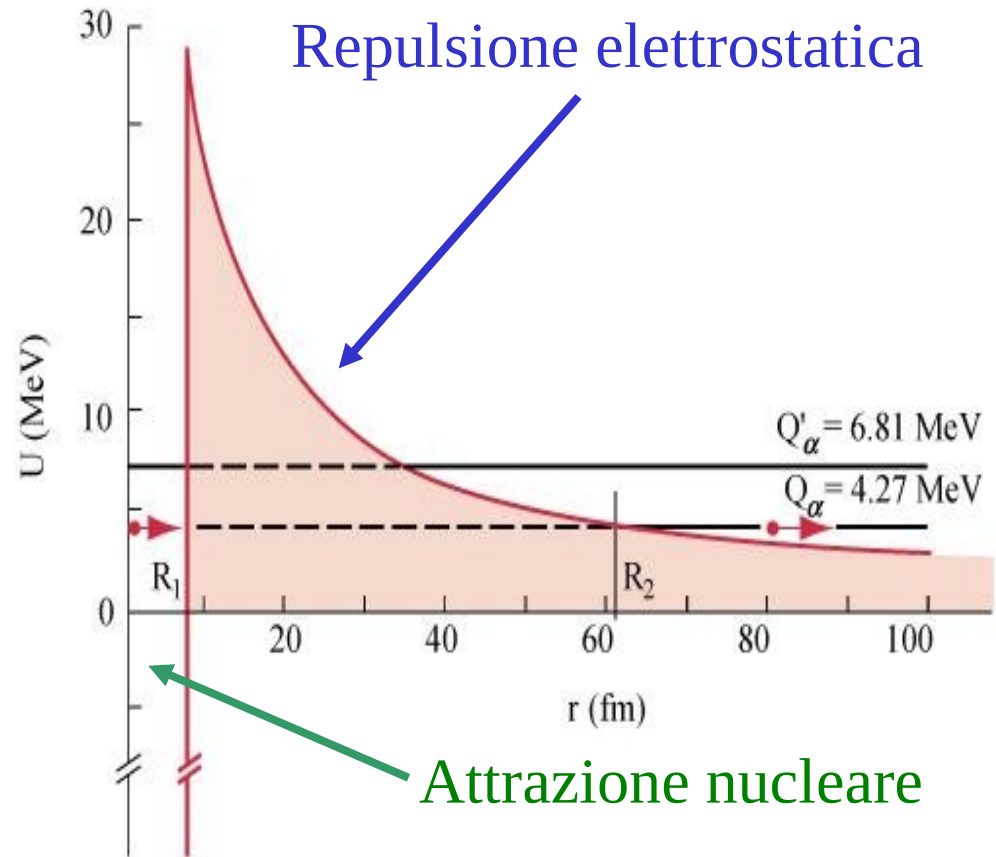
\searrow $T_{1/2}$ basso, E_c^α alta

α emessi per effetto tunnel

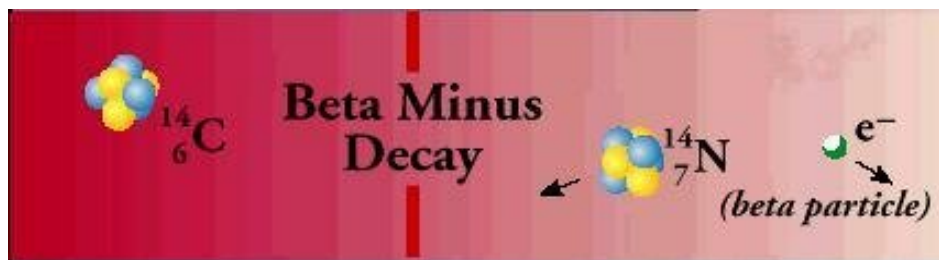
$Q > 0 \rightarrow$ emissione α

$T_{1/2}$ miliardi di anni

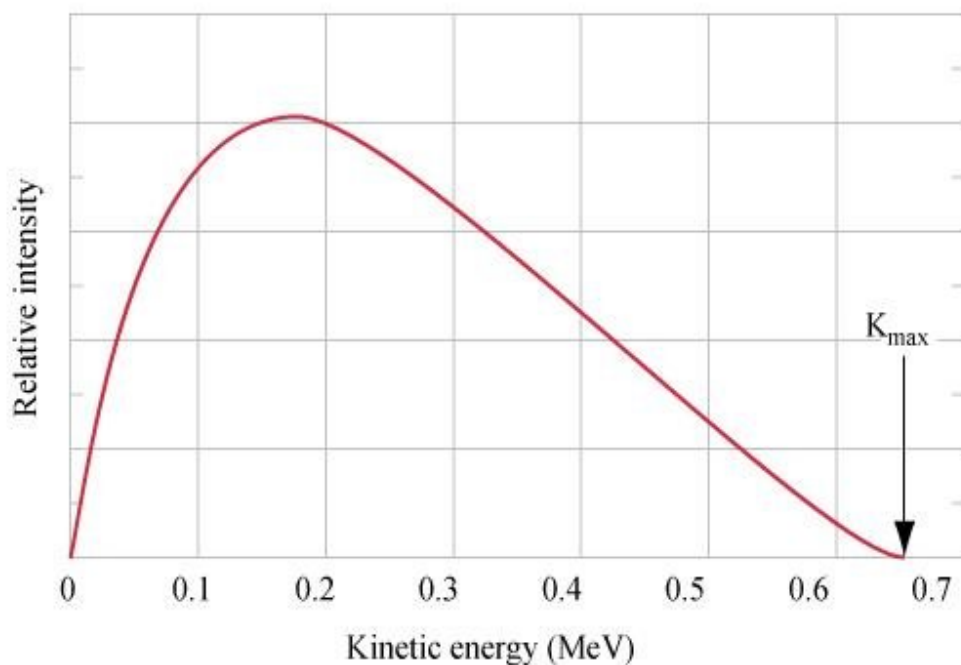
Spesso i nuclei ad alto Z
($Z > 82$) emettono α
per effetto tunnel
attraverso la barriera
coulombiana



Decadimento Beta (β)



Possibile se $M(Z,A) > M(Z+1,A) + m_e$



Energia di disintegrazione



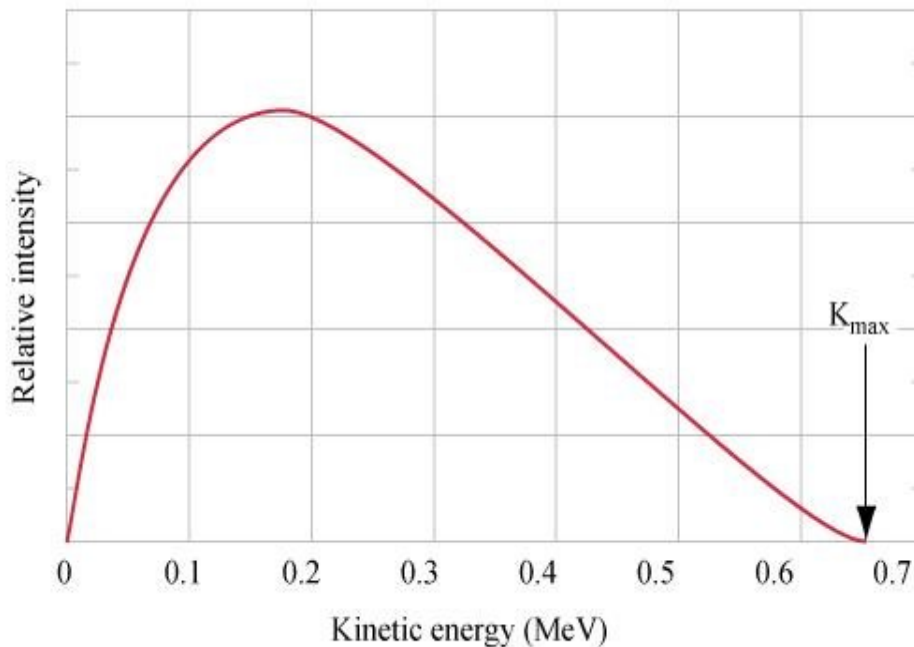
$$Q = (M_P - M_F - M_\beta)c^2$$

Una parte dell'energia la piglia il neutrino \Rightarrow **spettro continuo**

Decadimento Beta (β)

Conservazione energia e quantità di moto

neutrino: $m_{\nu}=0$



Q suddiviso tra elettrone e neutrino in modo casuale. Conosco solo massimo (Q) e minimo (0) dell' energia.

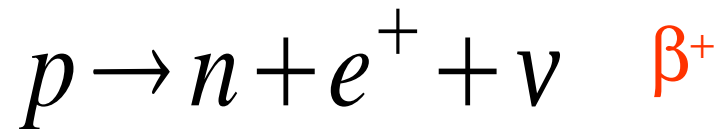
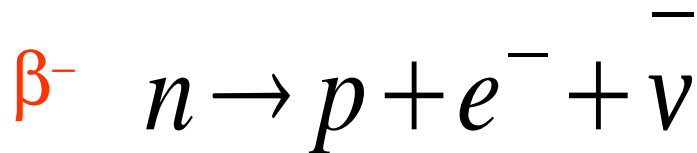
$$E_c^{\max} = Q$$

Decadimento Beta (β)

Nucleo = protoni+neutroni

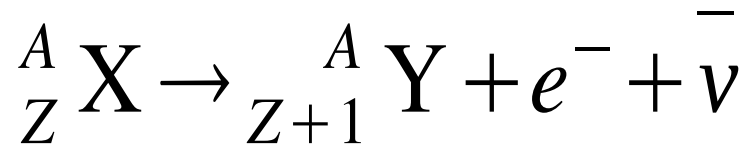
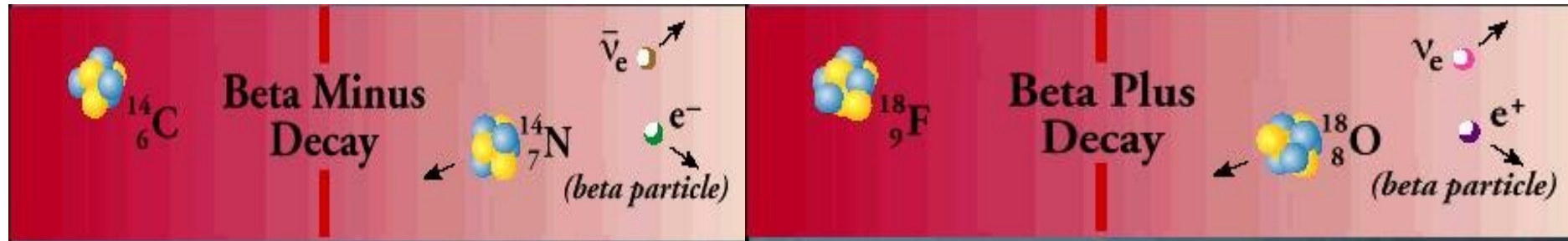
da dove viene l'elettrone emesso????

**forze nucleari deboli “mescolano”
nucleoni con leptoni (elettroni & neutrini)**

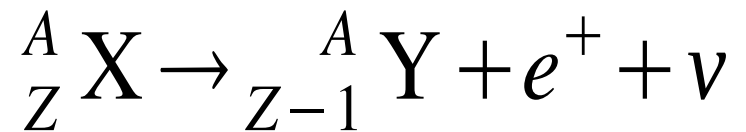


conversione neutrone-protone e viceversa

Decadimento β^\pm

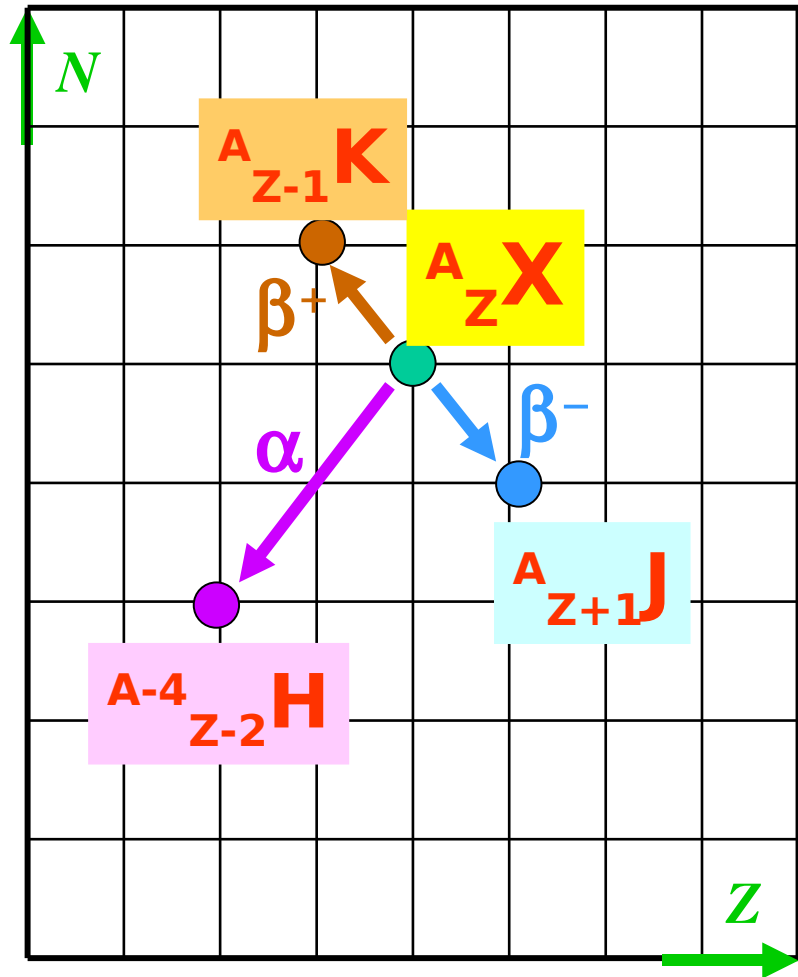


Elettrone
antineutrino



Positrone
neutrino

Decadimento β^\pm

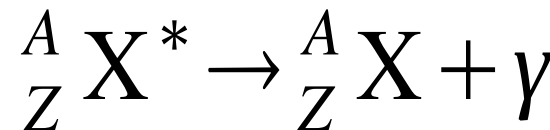
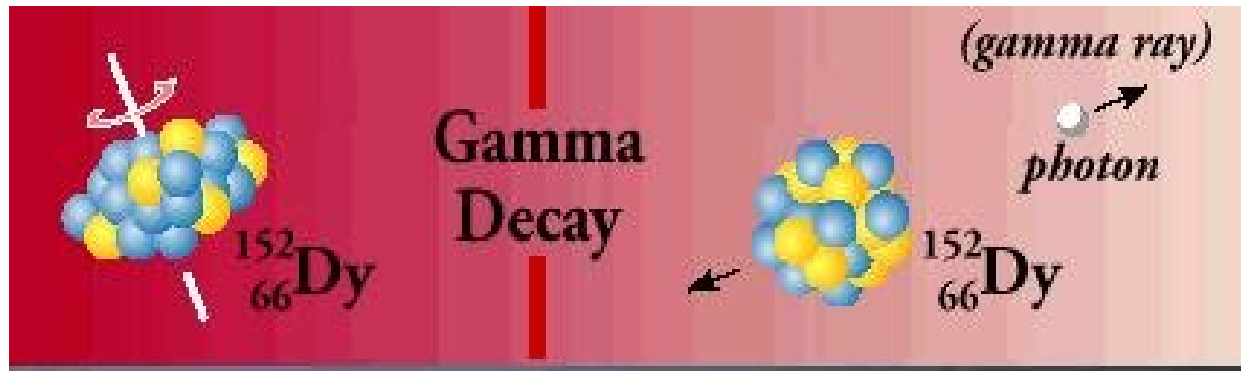


Il decadimento β^\pm e' il più comune:
tutti gli elementi radioattivi hanno
isotopi che decadono in questo
modo

Il decadimento β avvicina il
nucleo alla curva di stabilità:
 A rimane invariato
 Z aumenta o diminuisce di 1

$T_{1/2}$: estremamente vario

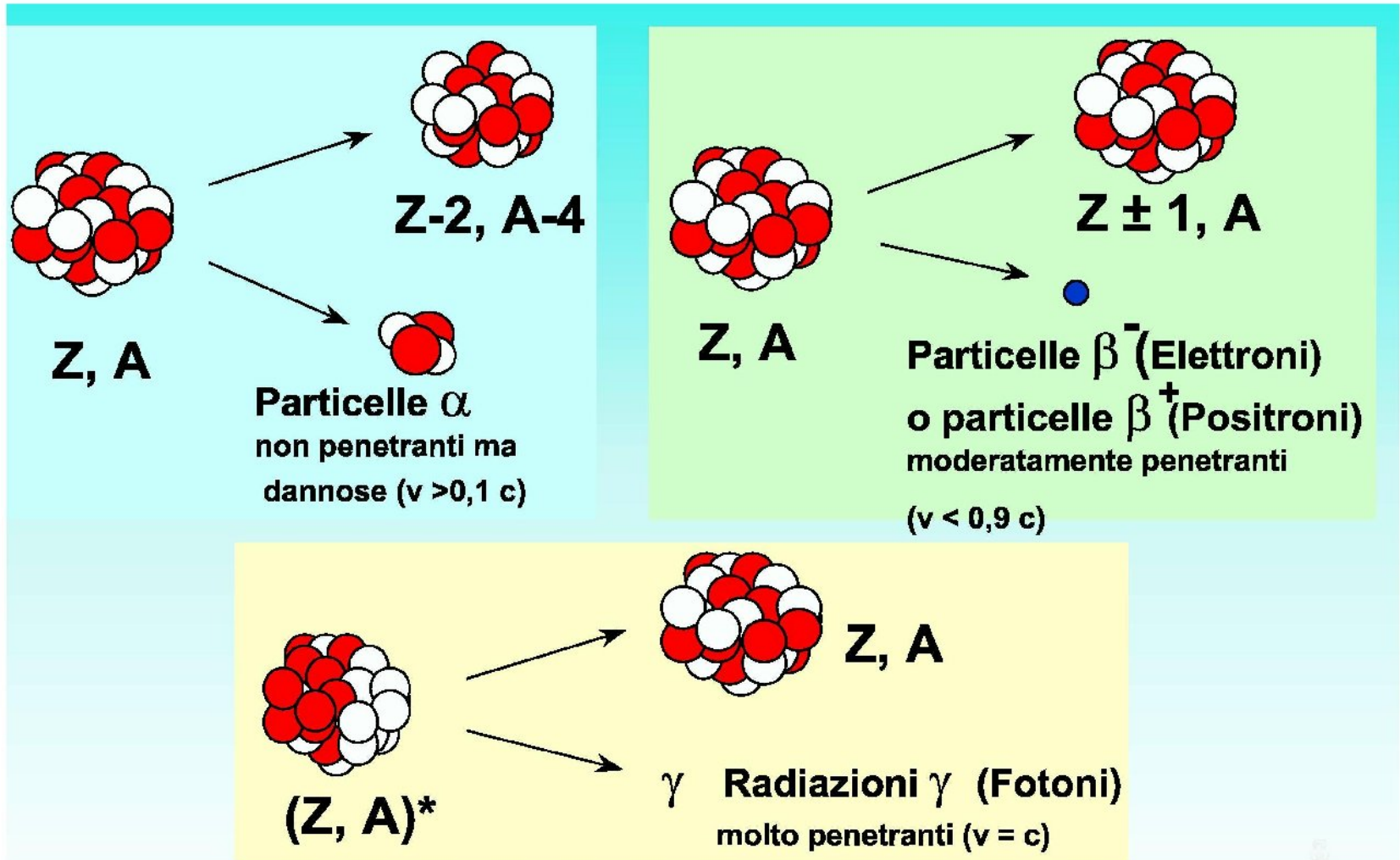
Decadimento gamma (γ)



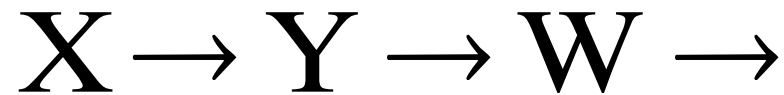
- Sorgente : nuclidi in stati eccitati
- Energia: da 10 keV a 10 MeV
- Velocità: c

Radiazione
elettromagnetica

Confronto tra i decadimenti



Serie radioattive



3 “famiglie” naturali

- | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| •famiglia del torio, | ^{232}Th ($A=4n$) | ($T_{1/2}=1.4 \cdot 10^{10}$ y) |
| •famiglia del radio (o uranio), | ^{238}U ($A=4n+2$) | ($T_{1/2}=4.5 \cdot 10^9$ y) |
| •famiglia dell'attinio, | ^{235}U ($A=4n+3$) | ($T_{1/2}=7.13 \cdot 10^8$ y) |

La quarta famiglia naturale ^{237}Np ($A=4n+1$) è già estinta ($T_{1/2}=351$ y)

Serie radioattive

Caratteristiche comuni

- Capostipite: elemento a vita media molto lunga, presente dall'inizio della vita del pianeta
- L'ultimo è sempre un isotopo del **piombo**
- C'è un nuclide allo stato **gassoso** (radon)

Isotopo gassoso e nome del decadimento:

- famiglia del torio: ^{220}Rn , “toron”
- famiglia del radio: ^{222}Rn , radon (*radium emanation*)
- famiglia dell'attinio: ^{219}Rn , “attinon”

Serie ($A=4n+2$) del radio (uranio)

radionuclide	Tempo dimezzamento	Principali radiazioni emesse
U-238	4,5E9 anni	α
Th-234	24 g	β, γ
Pa-234m	1,2 min	β, γ
U-234	2,5E5 anni	α
Th-230	8E4 anni	α
Ra-226	1,6E3 anni	α, γ
Rn-222	3,82 g	α
Po-218	3,1 min	A
Pb-214	27 min	β, γ
Bi-214	20 min	α, β, γ
Po-214	2E-4 s	α
Pb-210	21 anni	α, β, γ
Bi-210	5 g	β
Po-210	140 g	α

Serie del radio (uranio)

