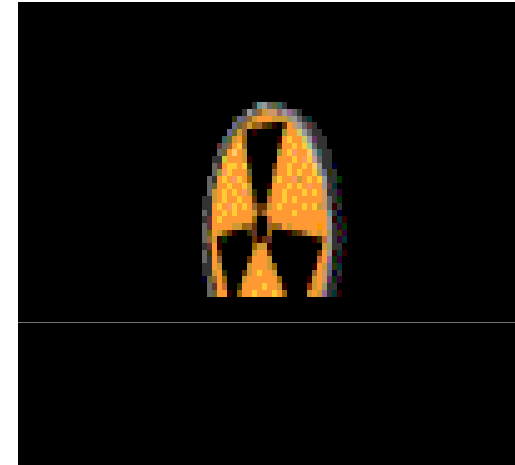
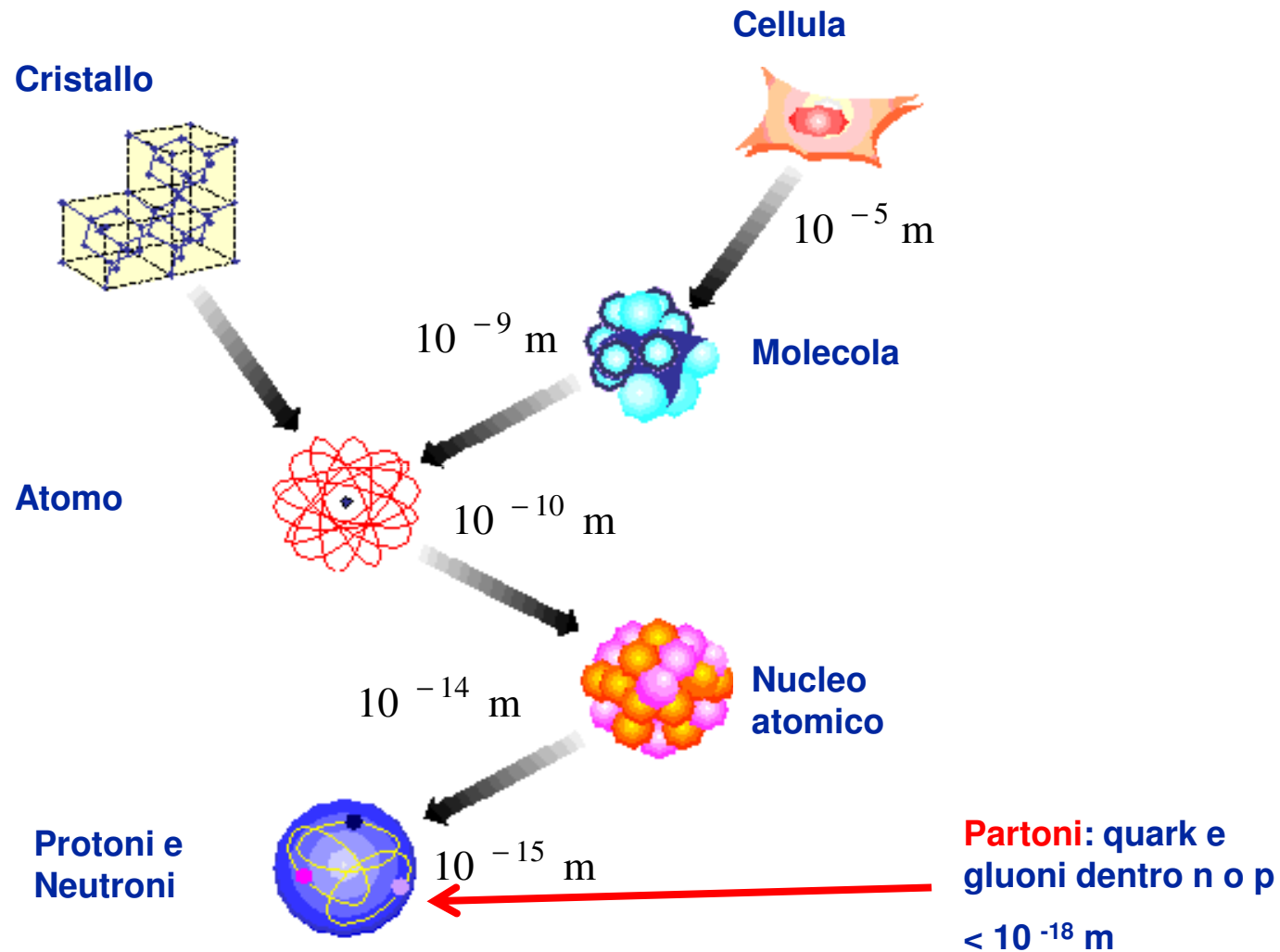


IL DECADIMENTO RADIOATTIVO

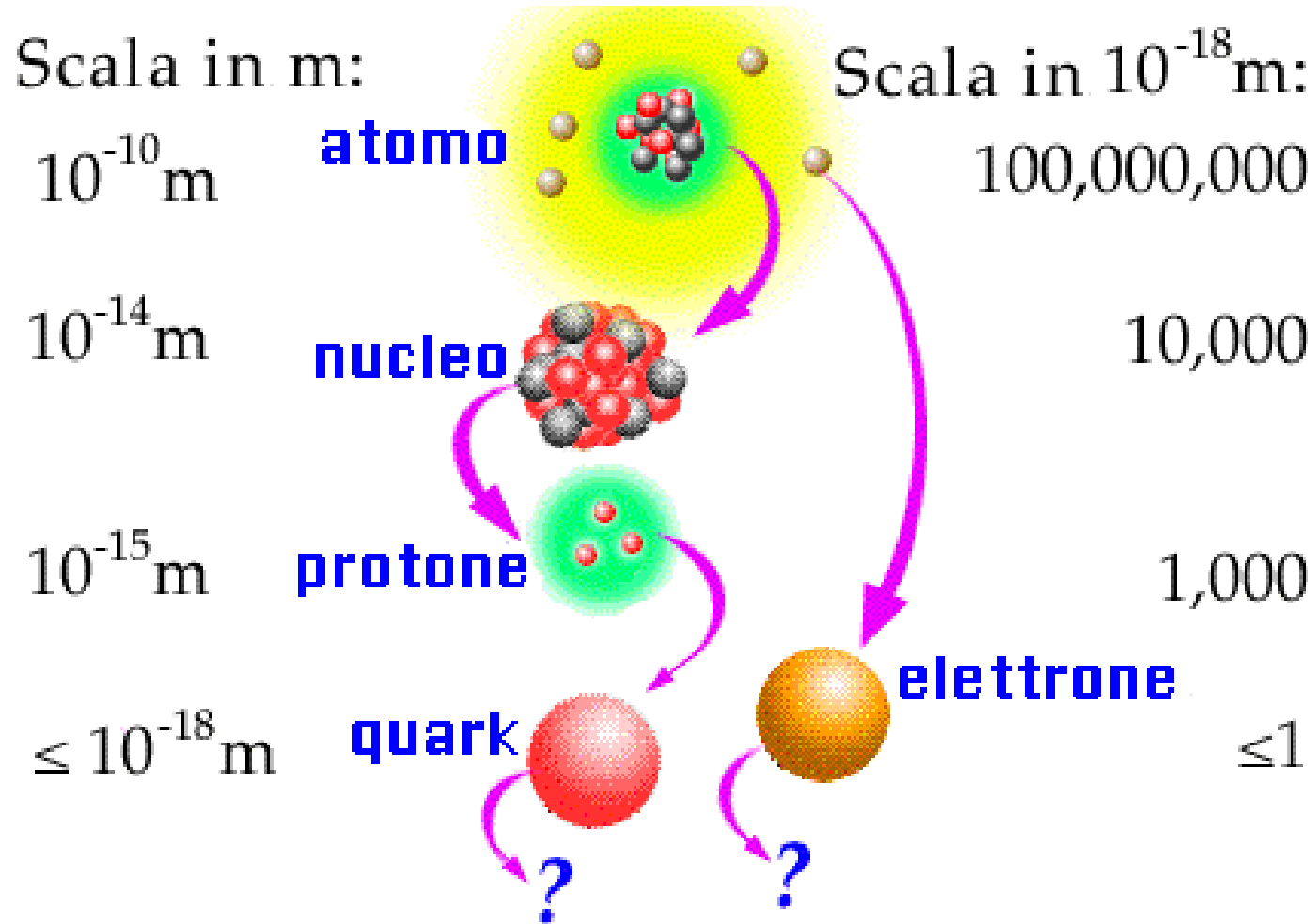
Principi di fisica sub-nucleare
Le interazioni fondamentali
Principi di fisica nucleare
Stabilità dei nuclei
Tipi di decadimento
Bilancio energetico
Attività
Legge del decadimento radioattivo
Vita media e tempo di dimezzamento
Misura di vita media
Radiodatazione col ^{14}C
L'energia nucleare



Dalla cellula ai "partoni" ...



Atomi, nuclei, particelle: le loro dimensioni



Le 4 forze fondamentali della natura

TABELLA 32-1 Le quattro forze della natura

Tipo	Intensità relativa (per due protoni in un nucleo, all'incirca)	Particella mediatrice
Nucleare forte	1	Gluone* (mesone)
Elettromagnetica	10^{-2}	Fotone
Nucleare debole	10^{-6}	W^{\pm} e Z^0
Gravitazionale	10^{-38}	Gravitone (?)

*Fino agli anni '70 si pensava fossero i mesoni, oggi i gluoni (par. 32-10).



Il "Modello Standard"

Modello Standard: insieme delle teorie che descrivono le interazioni fondamentali (esclusa la gravitazione) e le particelle elementari che ne sono coinvolte

Interazione

Teoria

Raggio d'azione

elettromagnetica

Elettrodebole (EWK)

infinito ($\propto 1/r^2$)

nucleare debole

Elettrodebole (EWK)

$r_{\text{nucl}} \approx 10^{-13}$ cm

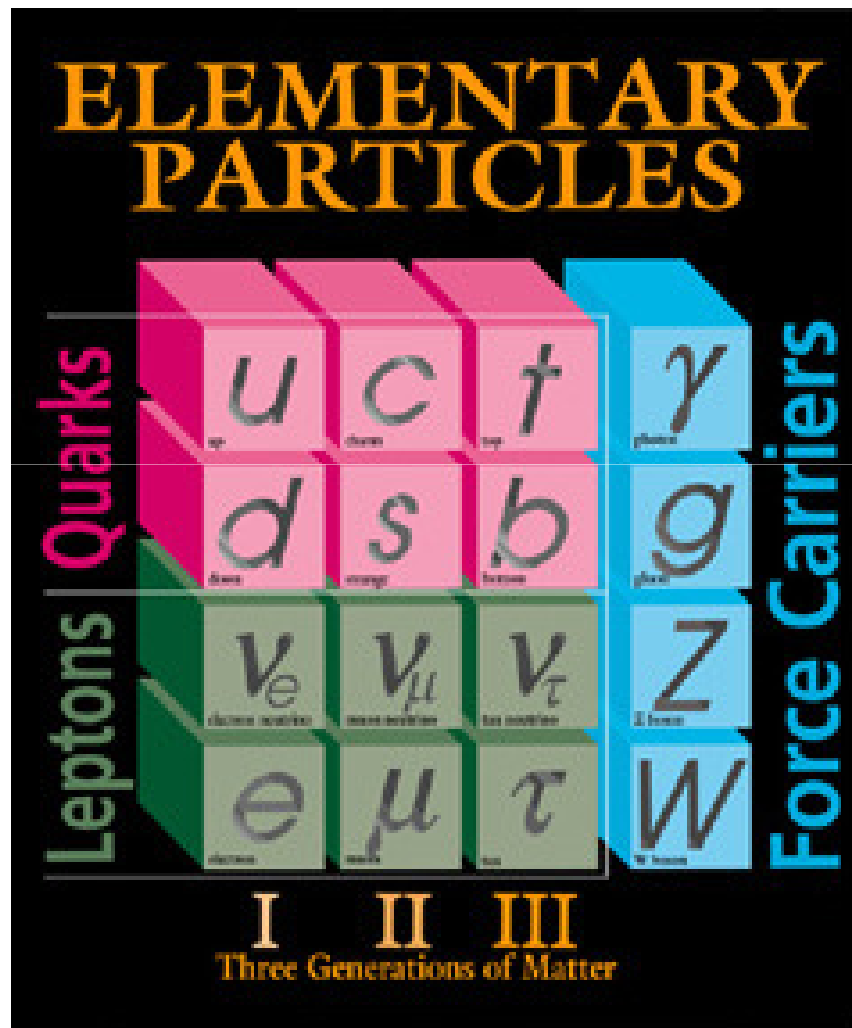
nucleare forte

Cromodinamica
quantistica (QCD)

$r_{\text{nucl}} \approx 10^{-13}$ cm

Teorie "unificate": le interazioni elettromagnetica e debole sono due aspetti diversi di una sola interazione fondamentale (elettrodebole)

I "mattoni" fondamentali della materia: quark, leptoni e mediatori:

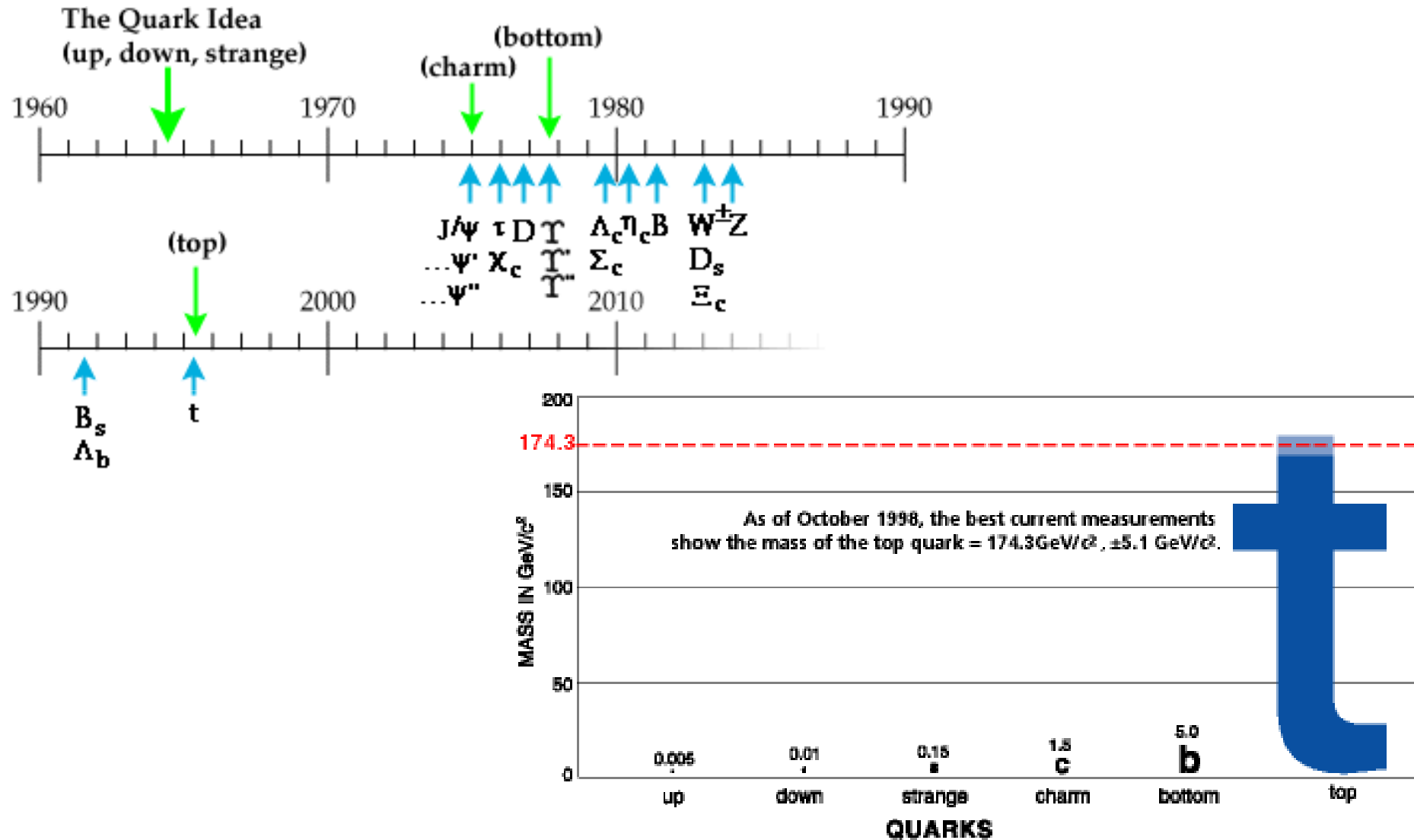


... e relative
"anti-particelle"
(es. positrone: e^+)

Quark e leptoni: proprietà generali

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2,...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	APPROX. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$< 7 \times 10^{-9}$	0	u up	0.005	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.01	-1/3
ν_μ muon μ neutrino	< 0.0003	0	c charm	1.5	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.2	-1/3
ν_τ tau τ neutrino	< 0.03	0	t top (initial evidence)	170	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.7	-1/3

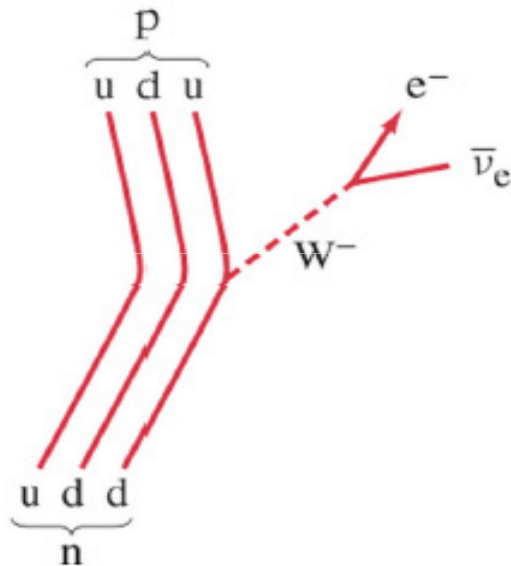
I quark dal punto di vista storico



Le interazioni come "scambio" di mediatori

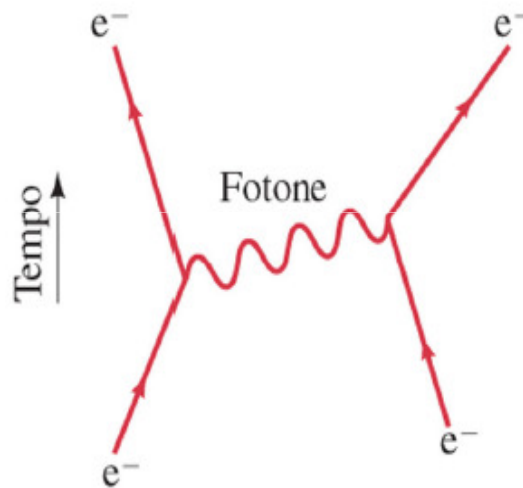
Rappresentazione "pittorica": i diagrammi di Feynman

Debole



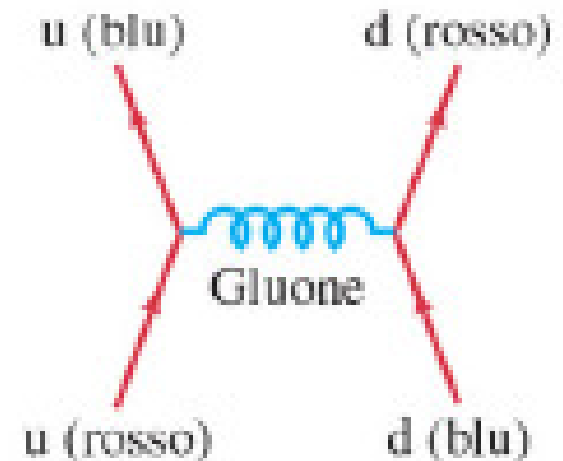
$n \rightarrow p + e^- + \text{anti-}\nu$
(decadimento β^-)

Elettromagnetica



$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$
(int. e.m. elastica)

Forte



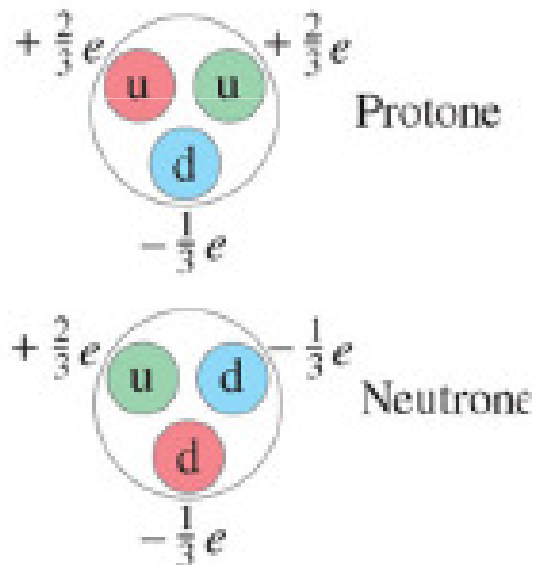
$u + d \rightarrow u + d$
(int. forte elastica)

La struttura a quark degli adroni

Adroni: particelle che interagiscono con interazione forte

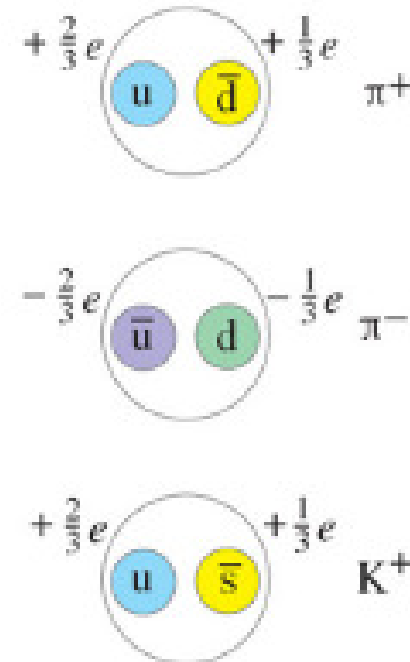
Barioni:

adroni formati da 3 quark oppure 3 antiquark (es. p, n)

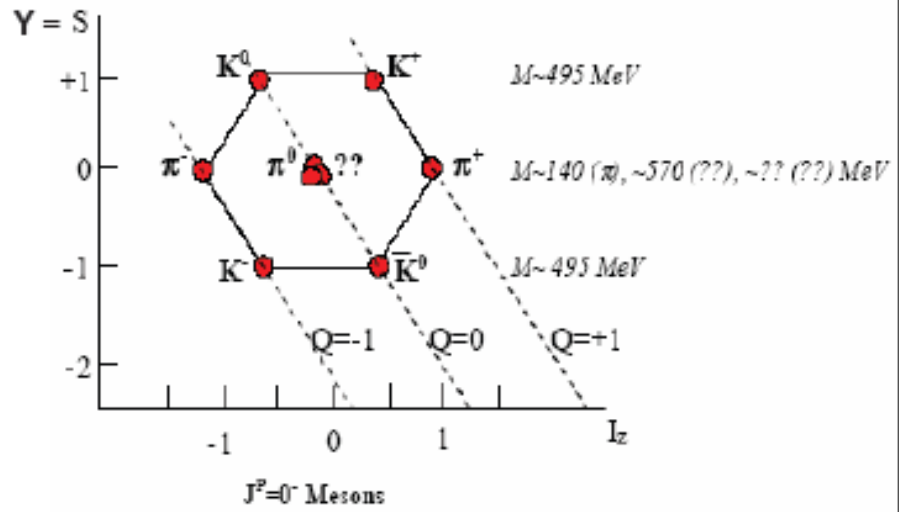


Mesoni:

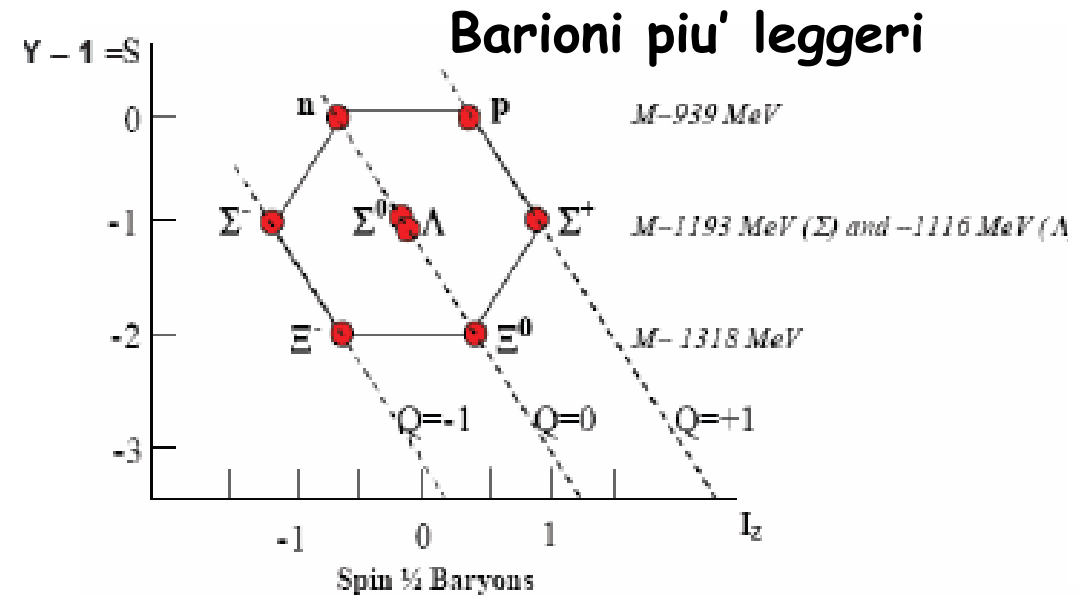
adroni formati da coppia quark-antiquark (es. π , k)



La "spettroscopia adronica"



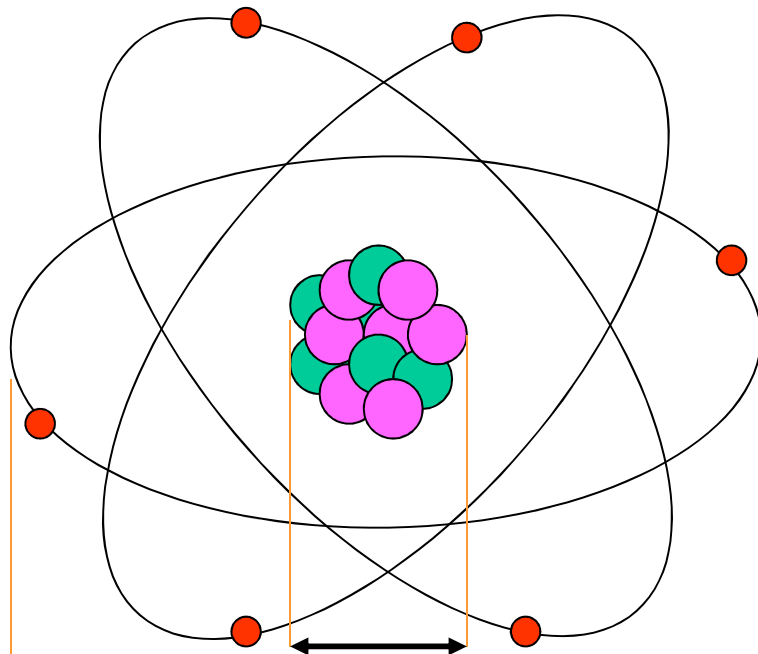
Mesoni piu' leggeri



Barioni piu' leggeri

Murray Gell-Mann:
 il Mendeleev del nostro tempo...
 Raggruppando gli adroni noti in "tavole", ordinate secondo opportuni "numeri quantici", ha predetto l'esistenza di nuovi adroni e interpretato le "simmetrie" di queste tavole in termini del modello a quark.

Com'è fatto un atomo



$$R_{\text{nucleo}} \approx 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

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

il nucleo è 100000 volte più piccolo dell'atomo!



Z protoni

$$m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938.27 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = +e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



N neutroni

$$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = 0$$

Z elettroni



$$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\frac{R_{\text{atomo}}}{R_{\text{nucleo}}} \approx 10^5!$$

Numero di massa:

$$A = Z + N$$

Notazione: $\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$

Numero atomico e peso atomico

- 92 elementi naturali
- atomi
 - nucleo (protoni, neutroni) + elettroni
 - dimensioni $\approx 10^{-8} \text{ cm} = \text{Å}$

Z = numero atomico
A = numero di massa
N = numero di neutroni

$$A = Z + N$$

- Peso atomico:
riferito all'isotopo 12 del carbonio (^{12}C)

unità di misura SI :

1 unità di massa atomica (u.m.a.: "u") = (Massa ^{12}C)/12 = 1 dalton = $1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$

NB: $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow m_p = 1.007276 \text{ u}; m_n = 1.008665 \text{ u}$

- grammo-atomo (analogia con mole...)

Le particelle subatomiche

	elettrone	protone	neutrone
carica elettrica	$- e$	$+ e$	0
dimensione	$< 10^{-18} \text{cm}^{(*)}$	$\approx 10^{-13} \text{cm}$	$\approx 10^{-13} \text{cm}$
massa	$9.07 \cdot 10^{-28} \text{g}$	$1.67 \cdot 10^{-24} \text{g}$	$1.67 \cdot 10^{-24} \text{g}$
vita media	stabile	stabile	$\approx 17 \text{min}^{(**)}$

(*) limite superiore

()** neutrone libero

Masse atomiche e nucleari

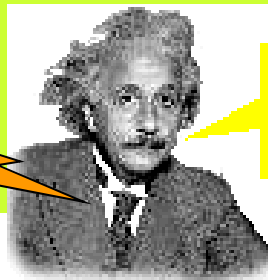
Sommando le masse dei componenti, dovrebbe essere:

$$\begin{aligned}M_{\text{nucleo}} &= Zm_p + Nm_n \\M_{\text{atomo}} &= M_{\text{nucleo}} + Zm_e \\&= Zm_p + Nm_n + Zm_e\end{aligned}$$

Invece sperimentalmente si misurano **masse inferiori**.

Spiegazione: il **legame atomico/nucleare**, essendo legato a forze attrattive, equivale a una situazione di **minor energia potenziale**...
... che appare come **minor massa!**

Einstein $\rightarrow E=mc^2$



La massa è solo
una forma di
energia

...infatti per togliere
un elettrone da un atomo
o un nucleone da un nucleo
bisogna **compiere lavoro**
cioè **fornire energia**

$$E = mc^2$$

Z protoni

$$m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.0073 \text{ uma} \quad \rightarrow \text{massa protone}$$

$$m_p c^2 = (1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.5 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 938.27 \text{ MeV}/c^2$$

N neutroni

$$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.0087 \text{ uma} \quad \rightarrow \text{massa neutrone}$$

$$m_n c^2 = (1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.5 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 939.57 \text{ MeV}/c^2$$

Z elettroni

$$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ uma} \quad \rightarrow \text{massa elettrone}$$

$$m_e c^2 = (9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 8.2 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

In Fisica Nucleare le masse si esprimono in unità di MeV/c^2 :

$$m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2, \quad m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2, \quad m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

Massa e difetto di massa

Mediante spettrometro di massa si misura la massa atomica:

$$M_{\text{atomo}} = M_{\text{nucleo}} + Zm_e - B_e$$

Per differenza
si determina la massa del nucleo:

$$\begin{aligned} M_{\text{nucleo}} &= M_{\text{atomo}} - (Zm_e - B_e) \\ &= Zm_p + Nm_n - B_A \end{aligned}$$

B_e = energia di legame degli elettroni atomici:

$$B_e \approx (13.6 \text{ eV}) Z$$

($B_e \ll m_e$, trascurabile)

B_A = energia di legame del nucleo

B_A = Energia di legame del nucleo =

= lavoro necessario per separare tutti i nucleoni del nucleo

Δm = Difetto di massa = massa equivalente a questa energia

= differenza tra la somma delle masse dei nucleoni (p ed n) e la massa effettiva del nucleo

Energia di legame (I)

È l'energia ceduta ($E < 0$) durante il "montaggio" del nucleo a partire dai nucleoni liberi, ovvero l'energia che bisogna fornire ($E > 0$) per "decomporre" il nucleo nei suoi costituenti. Tipicamente si considera la seconda definizione:

$$B_A = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{nucleo}}) \cdot c^2$$

Le masse degli atomi di tutti i nuclidi stabili possono essere misurate con grandissima precisione con gli spettrometri di massa.

In un nucleo stabile $B_A > 0$.

Per "strappare" un nucleone ad un nucleo **stabile** occorre fornire dell'energia.

Stato Legato

- per trasformare un nucleo in un insieme di nucleoni occorre fornire energia;
- la massa del nucleo è minore della somma delle masse dei costituenti;
- le forze attrattive tra nucleoni sono così intense che l'energia di legame risulta essere una frazione significativa della massa totale.

La massa di un nucleo è <1% della somma delle masse dei singoli nucleoni

Energia di legame (II)

Es. differenza idrogeno-deuterio

In base alla sola somma delle masse: $M_D = 1m_p + 1m_e + 1m_n = M_H + 1m_n$

$$M_H = (938.27 + 0.51) \text{ MeV}/c^2 = 938.78 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_D = (938.27 + 939.57 + 0.51) \text{ MeV}/c^2 = 1878.35 \text{ MeV}/c^2$$

Invece la misura sperimentale dà $M_D = 1876.12 \text{ MeV}/c^2$

L'energia di legame p-n nel nucleo di deuterio è

$$B_A = (1878.35 - 1876.12) \text{ MeV} = 2.23 \text{ MeV}$$

Es. massa ^{17}O

Somma delle masse dei costituenti: $8m_p + 8m_e + 9m_n = 15966.37 \text{ MeV}/c^2$

Misura sperimentale: $M_{O_{17}} = 15843.93 \text{ MeV}/c^2$

→ Energia di legame:

$$B_A = 122.44 \text{ MeV}$$

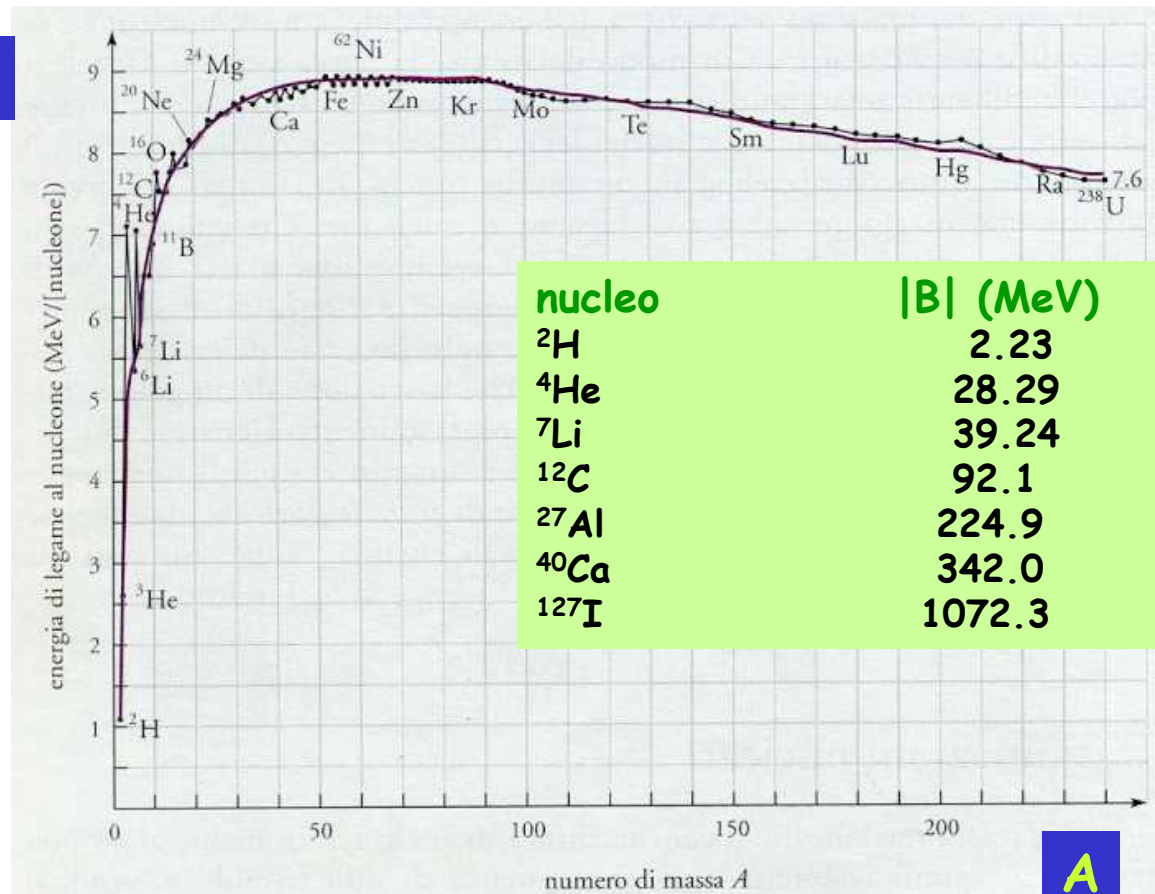
Energia di legame media per nucleone:

$$E_A = B_A/A = (122.44 \text{ MeV})/17 = 7.20 \text{ MeV}$$

Energia di legame media per nucleone

Energia di legame media per nucleone: $E_A = B_A/A$
pressoché costante: $E_A \approx 8 \text{ MeV}$ (per $A > 10$)

MeV/A



A

Ma i protoni nel nucleo non si respingono?

Nel nucleo ci sono Z protoni molto vicini tra loro ($d \approx 10^{-15}$ m).
Essi risentono delle forze di:

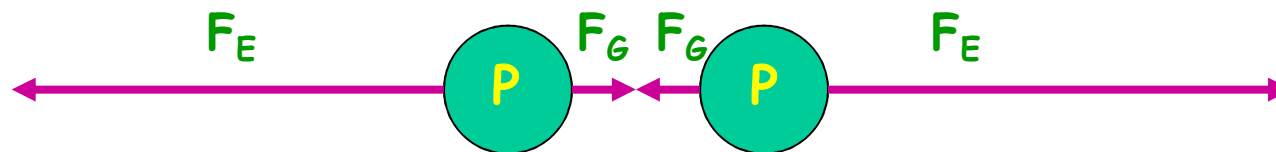
attrazione
gravitazionale

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

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
e quindi distruggere o impedire la formazione dei nuclei atomici.

A MENO CHE... →

La "colla" nucleare

← A MENO CHE...

All'interno dei nuclei atomici si manifesti una ulteriore nuova forza di attrazione, capace di "incollare" tra loro i protoni vincendo la loro repulsione coulombiana.

Per tenere uniti i protoni sono necessari anche i neutroni!

FORZA NUCLEARE FORTE:

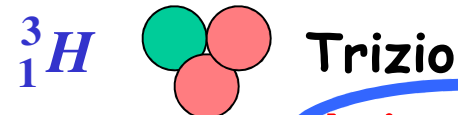
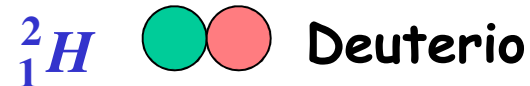
- E' sempre attrattiva
- Si manifesta solo a distanze $d \approx 10^{-15}$ m
- Vale tra protoni, tra neutroni, tra protoni e neutroni

... ma ancora non basta a spiegare come sono fatti i nuclei...

Guardando i nuclei leggeri...

... si vede che quando ci sono troppi o pochi neutroni il nucleo non è stabile

Idrogeno: $Z=1$

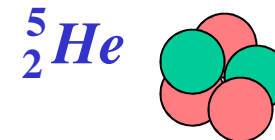


→ instabile!

Elio: $Z=2$



Non esiste!



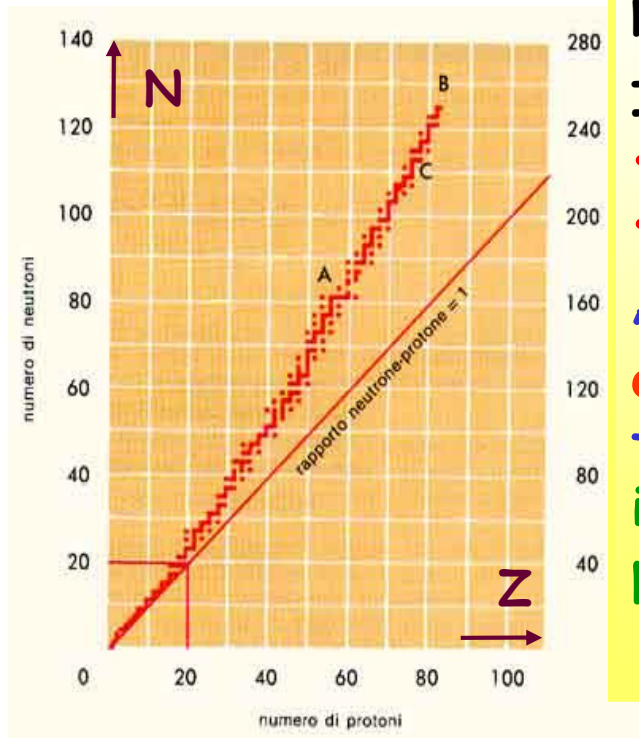
→ instabile!

La forza nucleare non basta ancora:
ci deve essere un'altra forza
responsabile dei decadimenti nucleari →

**FORZA
NUCLEARE
DEBOLE**

Ma quanti neutroni ci vogliono nel nucleo?

Né troppi,
né troppo pochi!



La forza nucleare p-p, p-n, n-n è uguale.
Quindi il rapporto tra protoni e neutroni nel nucleo non dovrebbe influenzarne la stabilità, tranne che per la repulsione elettrostatica tra i protoni.

Invece si verifica che in natura esistono solo

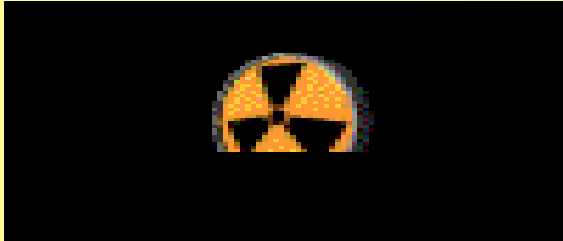
- nuclei leggeri ($Z \leq 20$) con $N \approx Z$
- nuclei pesanti ($Z > 20$) con $N > Z$

Altri nuclei non esistono, o - se prodotti - decadono spontaneamente dopo un certo tempo, emettendo particelle, o trasformandosi in altre specie, o spezzandosi in nuclei più piccoli.

RADIOATTIVITA'

Radioattività'

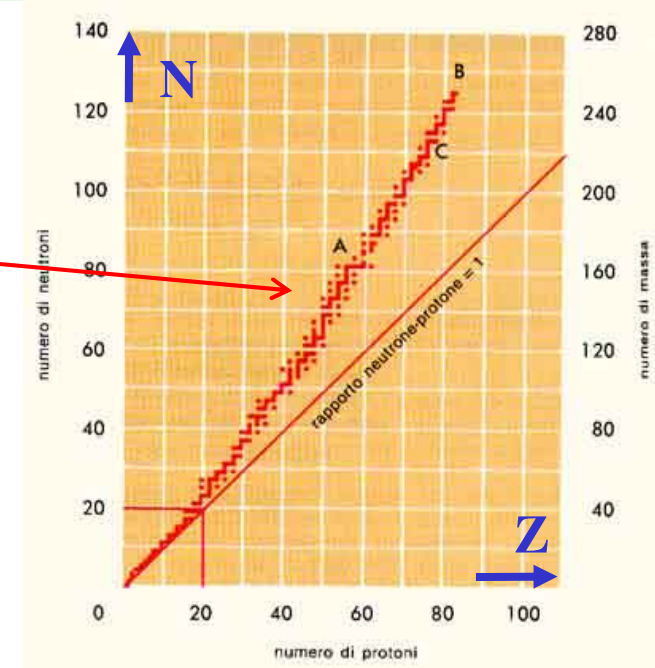
Radioattività = trasformazione spontanea o indotta
(→ radioattività naturale o artificiale)
dei nuclei con emissione di radiazione
corpuscolare → particelle
elettromagnetica → energia



Quando?

Nei nuclei **non** compresi
nella "valle di stabilità":

- nuclei con troppi protoni ($Z > 92$)
- nuclei con troppi neutroni
- nuclei con pochi neutroni
- nuclei con troppa energia



Radioattività: quadro generale

		Group																																								
		I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII																							
1	1	H																		2	He																					
2	3	Li	4	Be											5	6	7	8	9	10	B	C	N	O	F	Ne																
3	11	Na	12	Mg											13	14	15	16	17	18	Al	Si	P	S	Cl	Ar																
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hb	Ht	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo						
8	119																	119	Uue																							
*Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71												La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
** Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103												Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	No	Lr

Elementi chimici
atomi con diverso Z

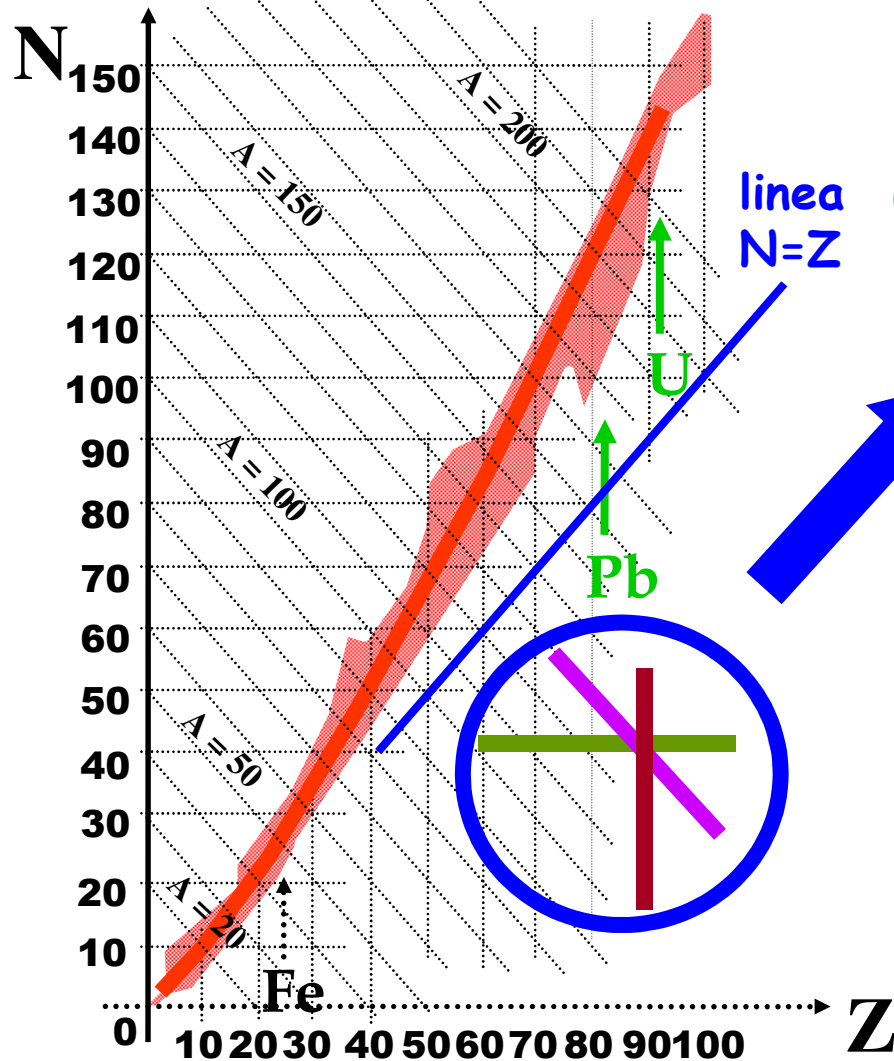
naturali:
da idrogeno (Z=1)
a uranio (Z=92)

artificiali:
tecnezio (Z=43) e
transuranici (Z>92)

Tavola periodica colorata in base alla radioattività dell'isotopo maggiormente stabile.

- Elemento con tutti gli isotopi stabili.
- Elemento radioattivo con isotopi che possiedono tempi di dimezzamento molto lunghi.
Emivita di oltre un milione di anni, radioattività nulla o trascurabile.
- Elemento radioattivo con isotopi che possono causare modesti pericoli per la salute.
Emivita di più di 500 anni, radioattività paragonabile con i livelli naturali.
- Elemento radioattivo con isotopi che possono causare elevati pericoli per la salute.
Emivita di oltre un giorno, livelli di radioattività pericolosi.
- Elemento con isotopi altamente radioattivi.
- Elemento con isotopi estremamente radioattivi.

Nuclei isotopi, isotoni, isobari



ISOTOPI

→ uguale Z
(linea verticale)

ISOTONI

→ uguale N
(linea orizzontale)

ISOBARI

→ uguale A
(linea obliqua)

■ nuclei instabili
■ nuclei stabili

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

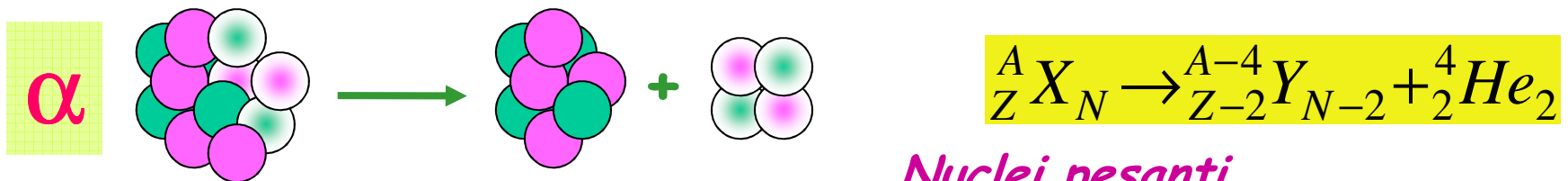
Come si spiega intuitivamente l'eventuale instabilità?

I nucleoni (p, n) 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.

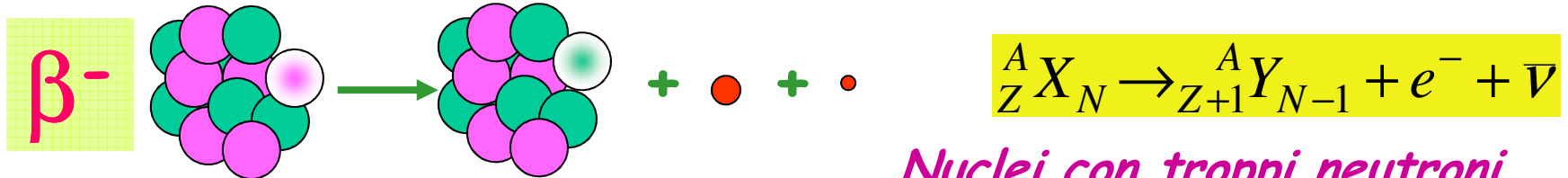
Nei **nuclei stabili**, a causa dell'energia di legame molto alta (= barriera di potenziale negativo molto profonda) questo processo non può avvenire.

Nei **nuclei instabili** invece questo processo può avvenire **casualmente** con una certa **probabilità**.

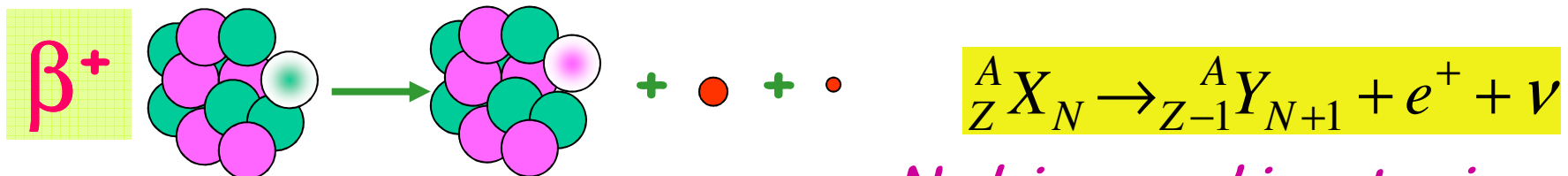
Decadimenti radioattivi



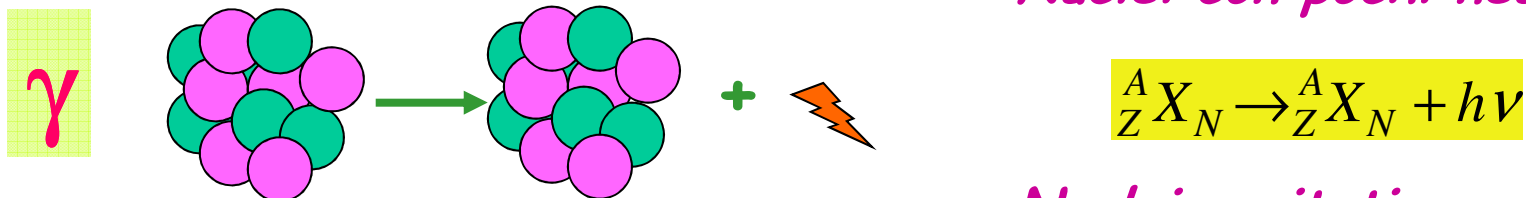
Nuclei pesanti



Nuclei con troppi neutroni



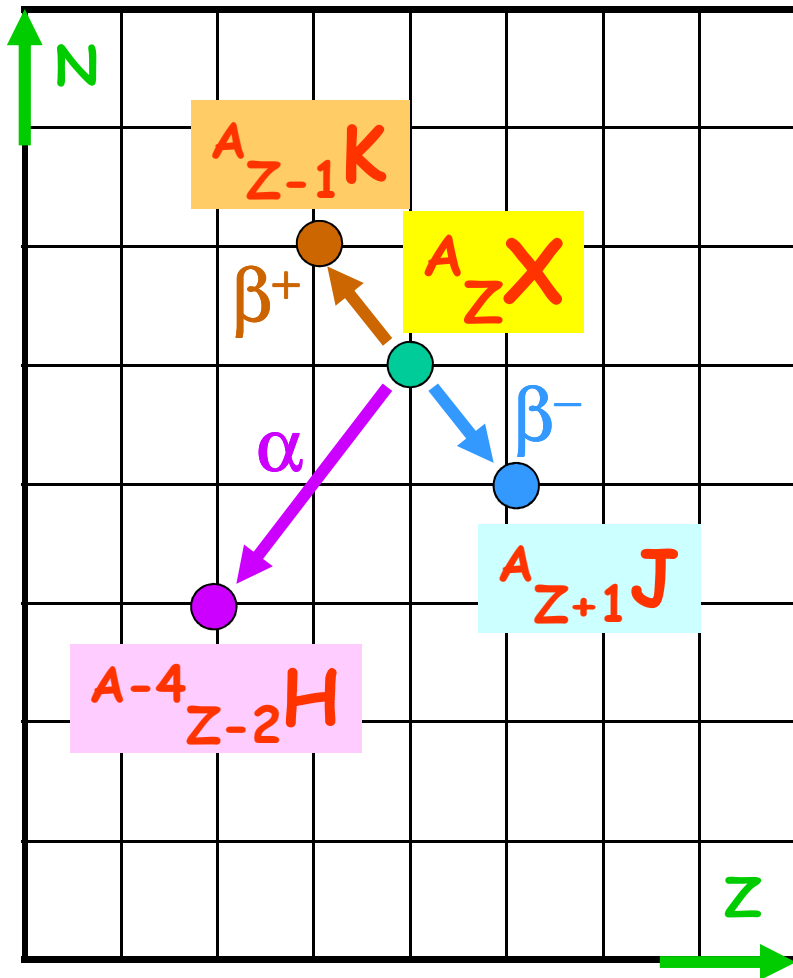
Nuclei con pochi neutroni



Nuclei eccitati

(Spesso dopo decadimento α o β)

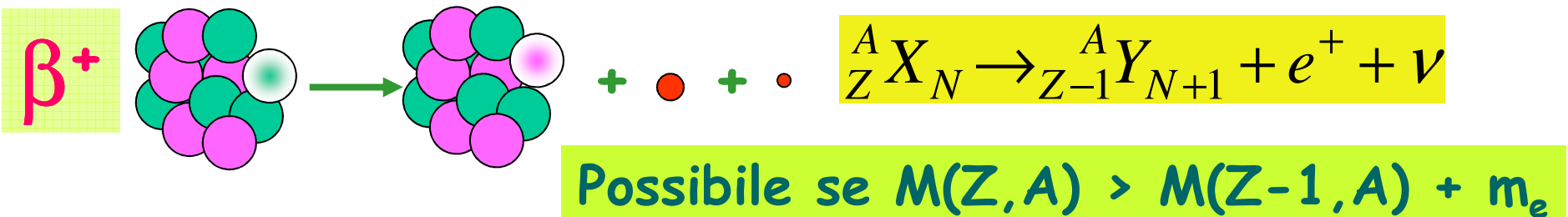
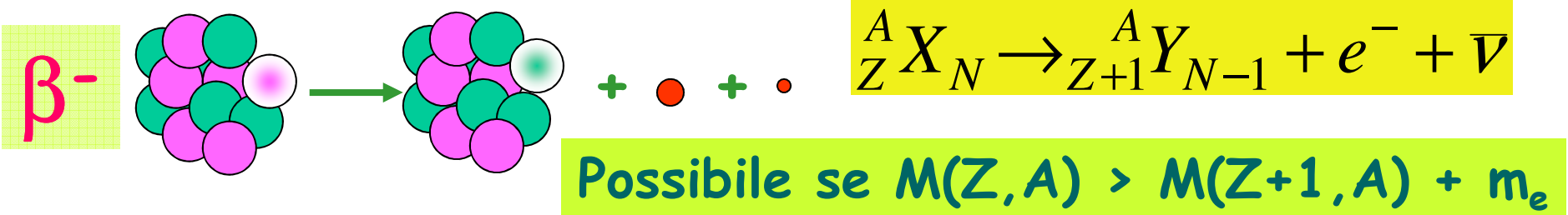
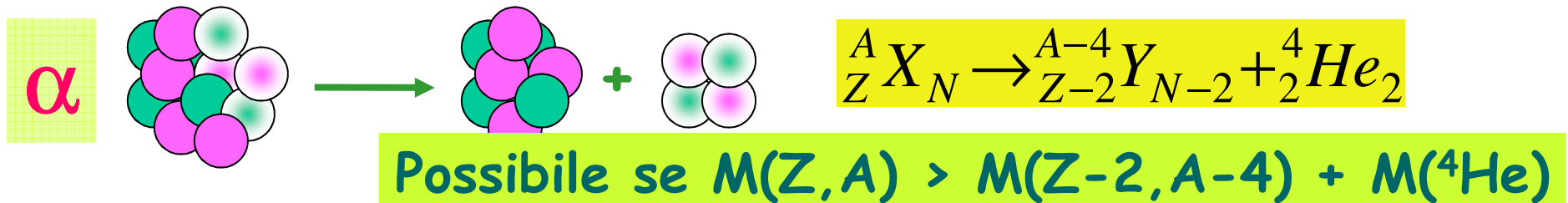
Uno sguardo sui decadimenti



Decadimento Alfa (α)	${}^4_2\text{He}^2$ ${}^{234}_{92}\text{U}^{142}$ ${}^{230}_{90}\text{Th}^{140}$
Decadimento Beta (β^-)	${}^{11}_5\text{B}^6$ ${}^{11}_4\text{Be}^7$
Decadimento Beta (β^+)	${}^{11}_5\text{B}^6$ ${}^{11}_6\text{C}^5$
Decadimento Gamma (γ)	${}^{11}_5\text{B}^6$ ${}^{11}_5\text{B}^{6*}$ γ
Fissione spontanea	${}^{140}_{56}\text{Ba}^{84}$ ${}^{106}_{42}\text{Mo}^{64}$

Bilancio energetico nei decadimenti

I decadimenti sono comunque impossibili se non rispettano la **conservazione della massa-energia** ($E = mc^2$).



Bilancio energetico: esempi

$^{23}_{11}\text{Na}$

Decadimenti ammessi
(masse in MeV/c^2):

$$\beta^-: ^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{23}_{12}\text{Mg} + e^- (+\bar{\nu})$$
$$21413.53 < 21417.59 + 0.51$$

NO

$$\beta^+: ^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{23}_{10}\text{Ne} + e^+ (+\nu)$$
$$21413.53 < 21417.91 + 0.51$$

NO

$$\alpha: ^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{19}_9\text{F} + \alpha$$
$$21413.53 < 17695.82 + 3728.17$$

NO

→ NUCLEO STABILE

$^{22}_{11}\text{Na}$

Decadimenti ammessi
(masse in MeV/c^2):

$$\beta^-: ^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{12}\text{Mg} + e^- (+\bar{\nu})$$
$$20486.41 < 20492.49 + 0.51$$

NO

$$\beta^+: ^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ (+\nu)$$
$$20486.41 > 20483.57 + 0.51$$

SI

$$\alpha: ^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + \alpha$$
$$20486.41 < 16766.73 + 3728.17$$

NO

→ NUCLEO INSTABILE
dec. β^+

Decadimento α

Table 1.2. Characteristics of some alpha emitters

Isotope	Half-life	Energies [MeV]	Branching
^{241}Am	433 days	5.486 5.443	85% 12.8%
^{210}Po	138 days	5.305	100%
^{242}Cm	163 days	6.113 6.070	74% 26%



Conservazione energia-quantità di moto \Rightarrow
l'energia cinetica della particella α è determinata univocamente \Rightarrow
spettro energetico costituito da una sola riga

Decadimento β

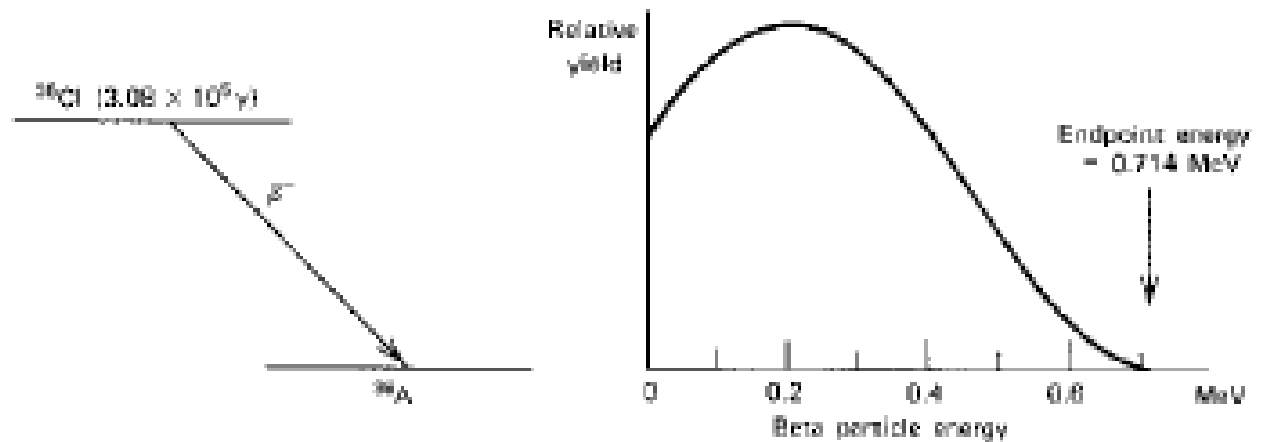


TABLE 4-1 Some "Pure" Beta-Minus Sources

Nuclide	Half-Life	Endpoint Energy (MeV)
^3H	12.26 y	0.0186
^{14}C	5730 y	0.156
^{32}P	14.28 d	1.710
^{33}P	24.4 d	0.248
^{35}S	87.9 d	0.167
^{36}Cl	3.08×10^5 y	0.714
^{45}Ca	165 d	0.252
^{63}Ni	92 y	0.067
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	27.7 y/64 h	0.546/2.27
^{99}Tc	2.12×10^5 y	0.292
^{147}Pm	2.62 y	0.224
^{187}Tl	3.81 y	0.766

Data from Lederer and Shirley.¹

The decay scheme of ^{36}Cl and the resulting beta particle energy distribu-

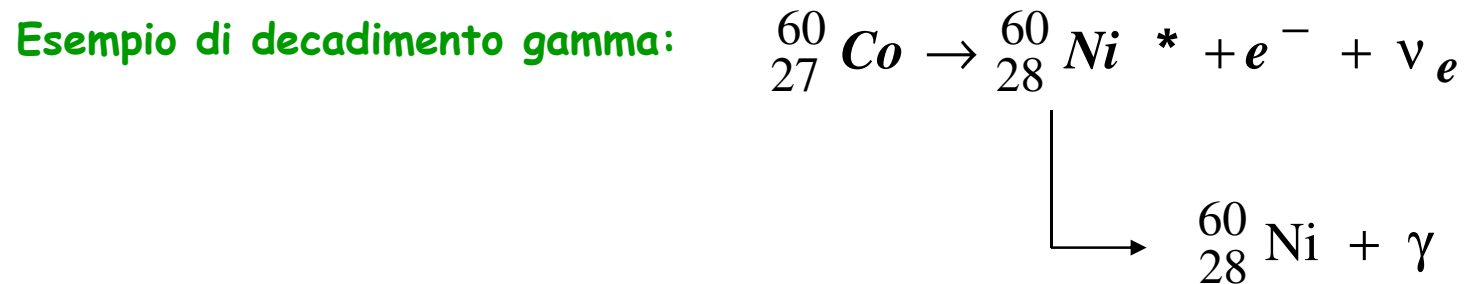
Il processo è dovuto alle interazioni deboli. La presenza del neutrino spiega lo spettro continuo dell'elettrone prodotto: infatti l'energia disponibile è suddivisa tra elettrone e neutrino. L'energia massima dello spettro corrisponde a:

$$T_e^{\max} = M_X c^2 - M_e c^2 - M_{\nu} c^2$$

Decadimento γ

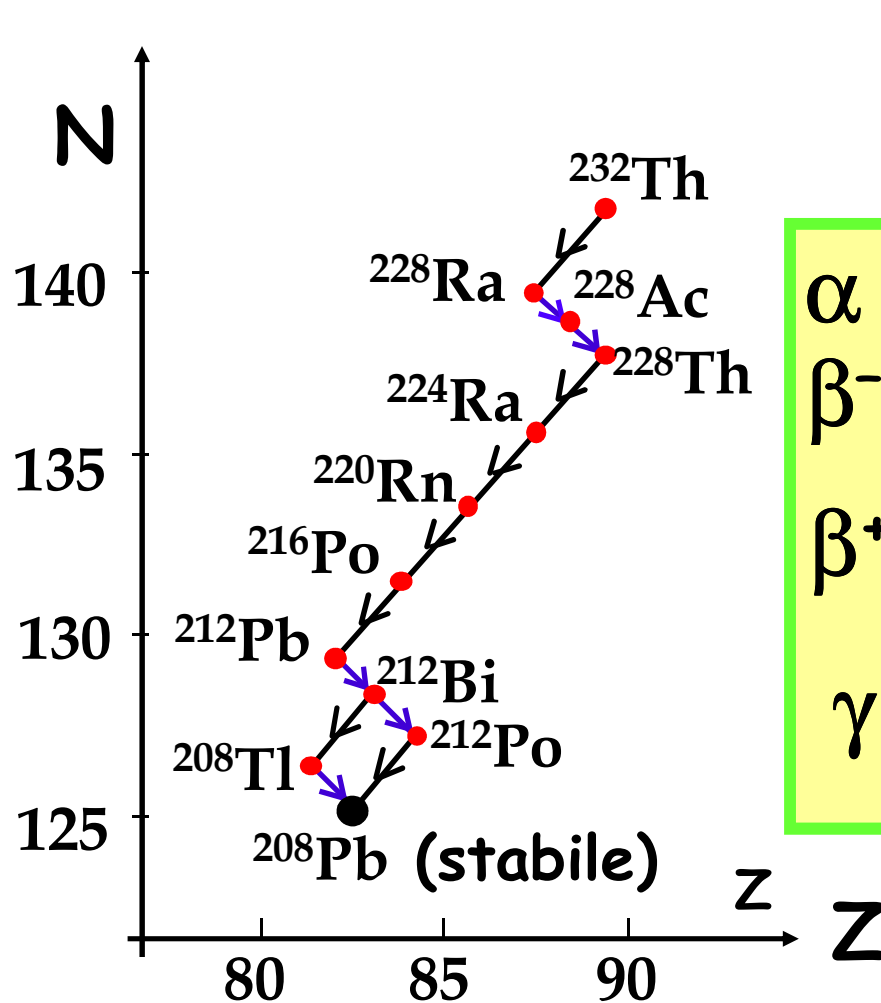
Nella diseccitazione gamma un nucleo passa da uno stato ad energia più alta ad uno stato ad energia più bassa emettendo un fotone di energia pari all'energia di transizione. Questo tipo di decadimento avviene generalmente dopo un decadimento α o β : il discendente viene prodotto in uno stato eccitato e si diseccita gamma .

L'emissione del fotone gamma avviene in tempi dell'ordine 10^{-10} - 10^{-20} s. Come l'elettrone nella struttura a "shell" dell'atomo, anche il nucleo è caratterizzato da livelli discreti di energia. Le transizioni tra questi livelli possono aver luogo a seguito dell'emissione (o assorbimento) di radiazione e.m. di energia pari alla differenza di energia tra i livelli: questi fotoni sono chiamati raggi gamma (energie da 100 keV ad alcuni MeV).



Decadimenti a catena

Es.: decadimenti dell'isotopo ^{232}Th



\rightarrow decadimento α
 \rightarrow decadimento β^-

$$\alpha : (Z, N, A) \rightarrow (Z-2, N-2, A-4)$$

$$\beta^- : (Z, N, A) \rightarrow (Z+1, N-1, A)$$

(con emissione di neutrini)

$$\beta^+ : (Z, N, A) \rightarrow (Z-1, N+1, A)$$

(con emissione di neutrini)

$$\gamma : (Z, N, A) \rightarrow (Z, N, A)$$

Attività radioattiva

Attività radioattiva (attività) = n. decadimenti/s
→ rate o tasso (o "velocità" o "frequenza") di decadimento

Unità di misura SI:

becquerel → $1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$

dimensionalmente
uguale all'hertz

$1 \text{ Bq} = 1$ decadimento al secondo → unità troppo piccola

Unità pratica:

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

$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Legge esponenziale negativa

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

Il numero di nuclei rimasti diminuisce nel tempo con **legge esponenziale negativa**

... provare per credere... → lancio delle monete



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)

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

Legge del decadimento radioattivo

Il numero dei nuclei che decadono nell'unità di tempo è proporzionale al numero di nuclei presenti:

$$-\Delta n / \Delta t \propto n$$

$$\text{Attività } a = \lambda n$$

$$-\Delta n / \Delta t = \lambda \cdot n$$

λ = costante di decadimento
(= prob. di dec. nell'unità di tempo)

$$n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$$

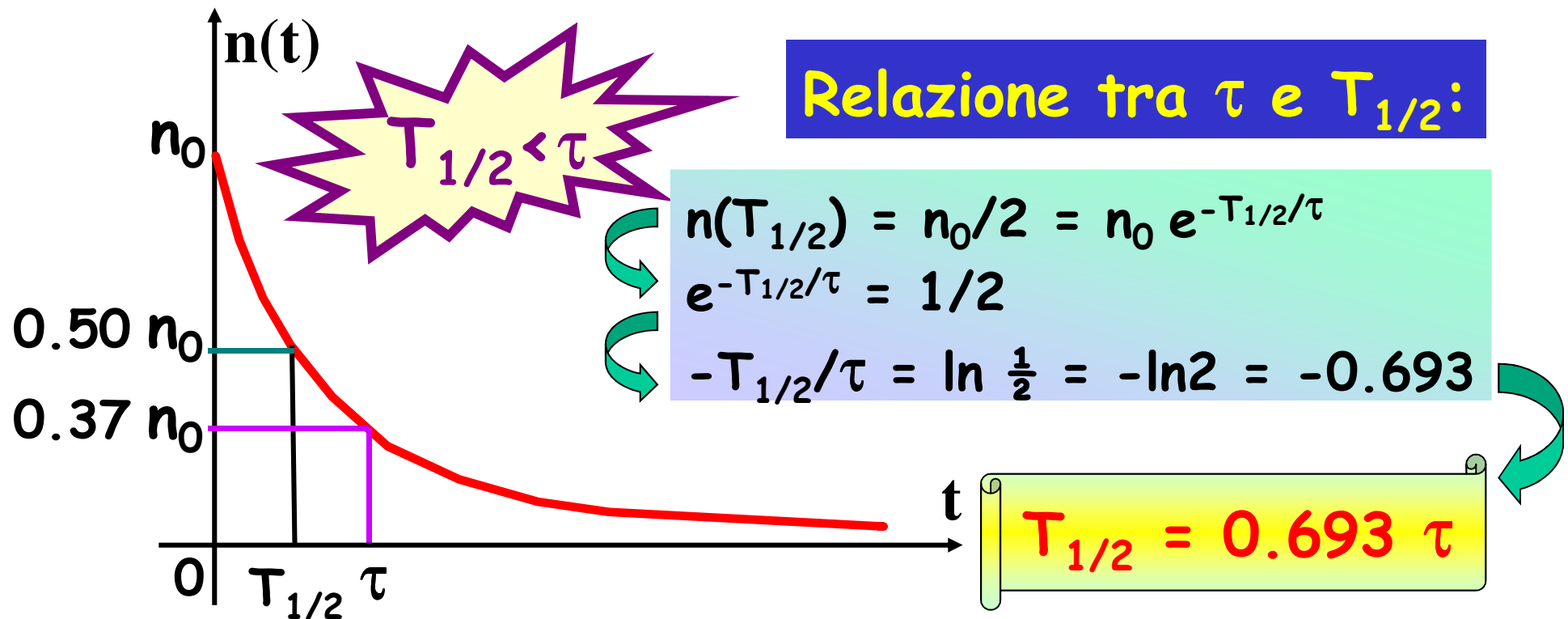
$$1/\lambda = \tau = \text{vita media}$$

$$n(t) = n_0 e^{-t/\tau}$$

$$\text{Attività: } a(t) = \lambda \cdot n(t) = \lambda \cdot n_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-t/\tau}$$

Periodo di dimezzamento (o emivita)

Vita media τ = tempo dopo il quale rimangono il $\sim 37\%$ dei nuclei ($= 1/e$)
Periodo di dimezzamento $T_{1/2}$ = tempo dopo il quale rimangono il 50% dei nuclei



Misura di vita media (o di $T_{1/2}$)

Misura di **attività** al tempo t
(ad es. con contatore Geiger):
 dn decadimenti nel tempo dt
(relativ. piccolo) in un campione
di $n(t)$ nuclei al tempo t

$$a(t) = \left| \frac{dn}{dt} \right|_t = \lambda \cdot n(t) =$$
$$= \frac{n(t)}{\tau} = n(t) \cdot \left(\frac{0.693}{T_{1/2}} \right)$$
$$\tau = \frac{n(t)}{a(t)}$$
$$T_{1/2} = \frac{0.693 \cdot n(t)}{a(t)}$$

Esempi di periodi (o "tempi")
di dimezzamento:

decadimento	$T_{1/2}$
^3H (β)	12.33 anni
^{11}C (β)	20 min
^{14}C (β)	5730 anni
^{40}K (β)	$1.28 \cdot 10^9$ anni
^{60}Co (β)	5.7 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

Misura di vita media: esempi

Vite medie lunghe

→ Variazione trascurabile di attività
(cioè di N : $N \sim \text{cost}$) nel tempo
→ una sola misura di attività

$$a = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N}{\tau}$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{N}{a} = \frac{M(\text{g}) \cdot N_A}{aA}$$

Es. vita media del $^{147}_{62}\text{Sm}$

Misura: $a = 680 \text{ Bq}$ da 1 g

$$\tau = \frac{N}{a} = \frac{M \cdot N_A}{a \cdot A} = \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{(680 \text{ Bq}) \cdot 147}$$

$$= 6.02 \cdot 10^{18} \text{ s} = 1.91 \cdot 10^{11} \text{ y}$$

Es.

Vite medie brevi

→ Variazione apprezzabile
di attività nel tempo ($N = N(t)$)
→ (Almeno) due misure di attività

$$C_1 = a(t_1)\Delta t = \frac{N(t_1)\Delta t}{\tau} = \frac{N_0 e^{-t_1/\tau} \Delta t}{\tau}$$

$$C_2 = a(t_2)\Delta t = \frac{N(t_2)\Delta t}{\tau} = \frac{N_0 e^{-t_2/\tau} \Delta t}{\tau}$$

$$\Rightarrow \frac{C_1}{C_2} = \frac{e^{-t_1/\tau}}{e^{-t_2/\tau}} = e^{(t_2-t_1)/\tau} \Rightarrow \tau = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln \frac{C_1}{C_2}}$$

Es. vita media di un radionuclide

2 misure a 24 h di distanza per 30 min

$C_1 = 9800$

$C_2 = 7380 \text{ Bq}$

$$\tau = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right)} = \frac{(86400 \text{ s})}{\ln(9800/7380)}$$

$$= 304645 \text{ s} \approx 3.5 \text{ d}$$

Es.

Misura di vita media: esempi

Qual è la vita media di un radionuclide se...

...dopo 155 ore, l'attività si è ridotta al 20% di quella iniziale.

Es.

$$a(t) = a_0 e^{-t/\tau}$$

$$\rightarrow 0.20 a_0 = a_0 e^{-155h/\tau}$$

$$\rightarrow \ln(0.20) = -155h/\tau$$

$$\rightarrow \tau = -155h / \ln(0.20) \\ = 96.3 \text{ h} \approx 4 \text{ d}$$

... l'attività è passata in 5 min da un valore iniziale $a_0 = 10^4$ Bq a un valore $a(t) = 7 \cdot 10^3$ Bq.

Es.

$$a(t) = a_0 e^{-t/\tau}$$

$$\rightarrow 7 \cdot 10^3 = 10^4 e^{-5\text{min}/\tau}$$

$$\rightarrow \ln(7 \cdot 10^3 / 10^4) = -5 \text{ min}/\tau$$

$$\rightarrow \tau = -5 \text{ min} / \ln(7 \cdot 10^{-1}) = 14 \text{ min}$$

Tempi di decadimento: esempi

Es.

In un laboratorio di ricerca si sta utilizzando il radioisotopo ^{24}Na , che ha tempo di dimezzamento di 15 ore. L'autorità di controllo ha rilevato un'attività 100 volte maggiore del limite accettabile, e impone la chiusura del laboratorio fino a che la radioattività non scenda a livelli accettabili. Per quanto tempo dovrà rimanere chiuso il laboratorio?

$$a(t) = (1/100) a_0 = a_0 e^{-t/\tau}, \text{ con } \tau = T_{1/2} / 0.693 = 21.64 \text{ h}$$

$$\rightarrow \ln 0.01 = -t/\tau$$

$$\rightarrow t = -\tau \cdot (\ln 0.01) = 100 \text{ ore}$$

Misure di attività: esempi. La radiodattazione col ^{14}C

Tale metodo, usato tipicamente in campo archeologico e paleontologico, è basato sulla misurazione, nei resti organici da datare, del rapporto fra la quantità di ^{14}C (radioattivo, con decadimento β^- in ^{14}N) e di ^{12}C e ^{13}C (non radioattivi), tenendo conto del fatto che tale rapporto ($\sim 1.3 \times 10^{-12}$), costante nell'organismo vivente, diminuisce gradualmente dopo la sua morte. Dalla conoscenza della vita media del ^{14}C , si può valutare il tempo trascorso dalla morte dell'organismo. Finché un organismo è vivo, il rapporto tra la sua concentrazione di ^{14}C e quella degli altri due isotopi si mantiene costante e uguale a quello che si riscontra nell'atmosfera (dove rimane costante grazie all'interazione dei raggi cosmici con l'azoto gassoso). Dopo la morte, l'organismo non scambia più carbonio con l'esterno (principalmente CO_2 assimilato da fotosintesi e alimentazione). Per effetto del decadimento, quindi, la concentrazione c (\propto attività) di ^{14}C diminuisce in modo regolare secondo la formula:

$$c = c_0 e^{-\Delta t / \tau}$$

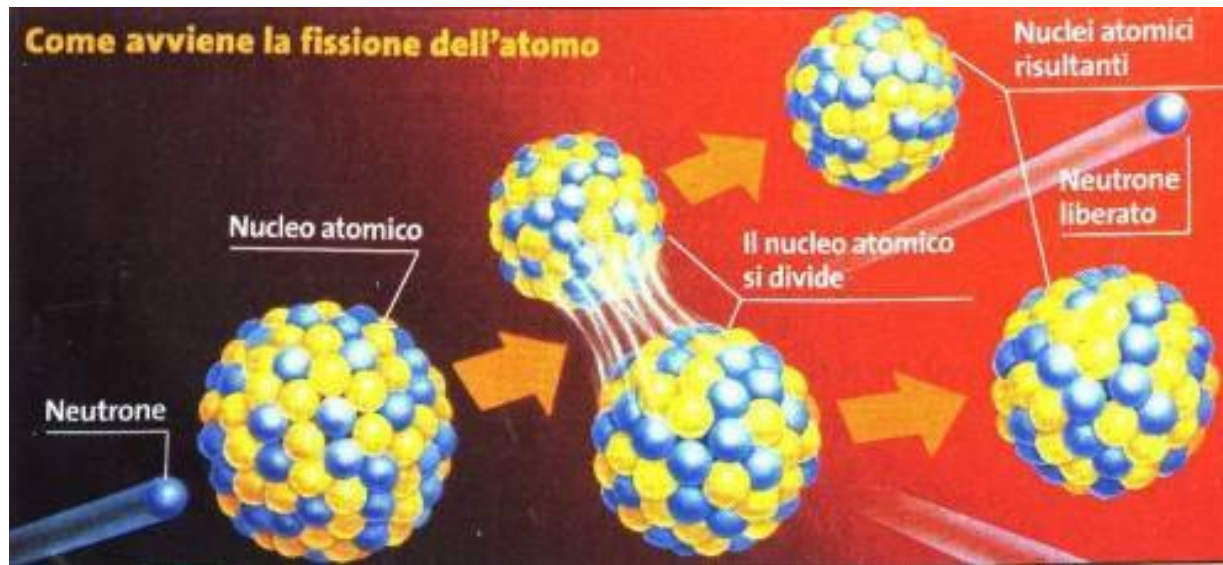
dove c_0 è la concentrazione di ^{14}C nell'atmosfera, Δt il tempo trascorso dalla morte dell'organismo, τ la vita media del ^{14}C ($\tau = 8267$ anni). Misurando dunque la quantità di ^{14}C presente nei resti organici (per mezzo ad es. della misura della sua attività residua), se ne ricava l'età applicando la seguente formula:

$$\Delta t = -\tau \cdot \ln(c/c_0)$$

NB: la datazione radiometrica basata sull' $^{238}_{92}\text{U}$ serve per stabilire l'età delle rocce.

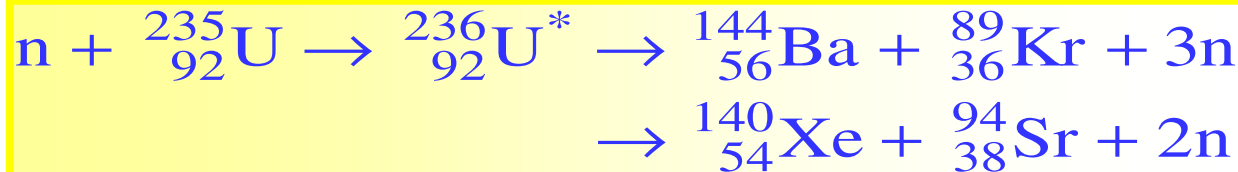
La fissione nucleare (cenni)

I nuclei pesanti ($Z \sim 92$), se bombardati ad es. con neutroni, tendono a decadere spezzandosi in due nuclei di massa circa metà di quella di partenza, emettendo inoltre altri neutroni, che possono provocare una reazione a catena.



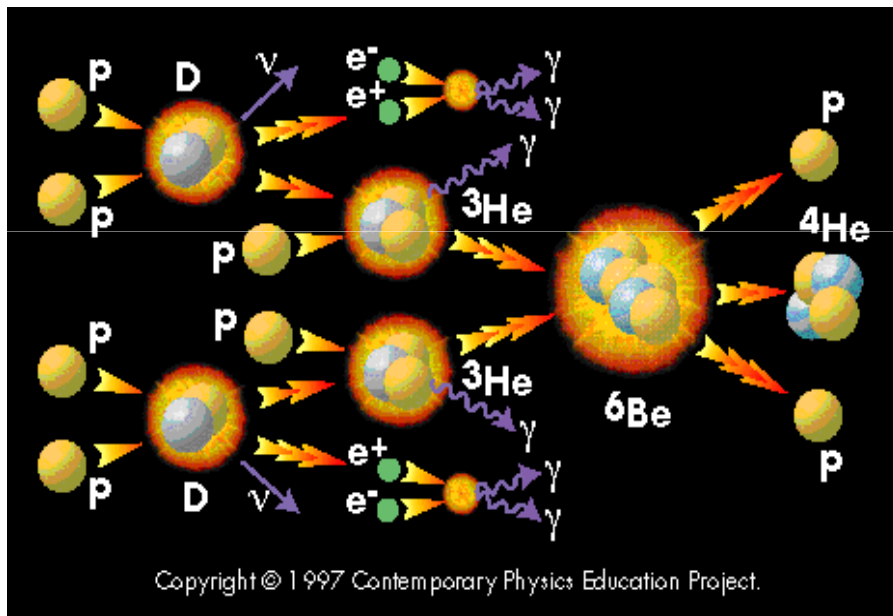
Nella fissione viene emessa **energia**:
circa 200 MeV
(contro i 20 eV delle reazioni chimiche)

1g di fissione →
30000 kWh di energia
= consumo familiare
di 5 anni!!!



La fusione nucleare (cenni)

I nuclei leggeri ($Z < 15$), in condizioni particolari (es. altissime temperature) in cui riescono ad avvicinarsi l'un l'altro a piccolissime distanze, possono fondersi a due a due in nuclei più pesanti.



Nella fusione viene emessa **energia**:
alcuni MeV
(contro i 20 eV
delle reazioni chimiche)

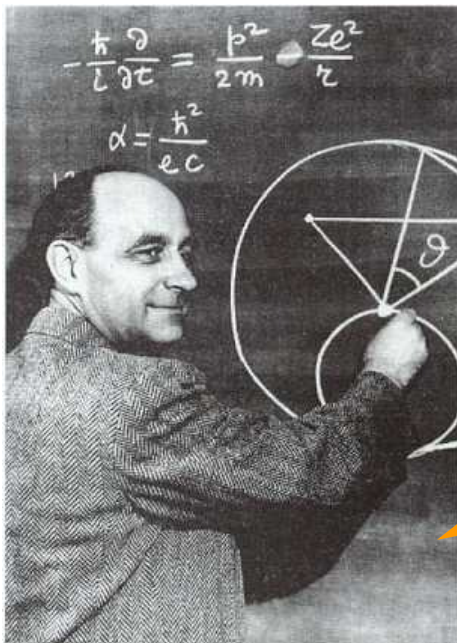
Nel Sole, a ogni secondo,
564500 kg di idrogeno
si convertono in 560000 kg di elio;
i restanti 4500 kg diventano energia
che viene irradiata nello spazio.

Domanda: quale è la potenza totale irradiata dal Sole ?

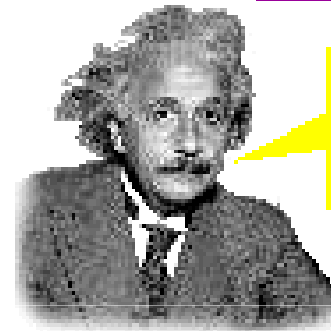
Verso l'energia nucleare: le tappe

Dai fenomeni naturali...

- 1895: Roentgen → raggi X
- 1896: Becquerel → radioattività naturale
- 1898: Curie → elementi radioattivi
- 1899: Rutherford → radiazioni α , β , γ



1905: Einstein
→ $E=mc^2$



La massa è solo
una forma di
energia

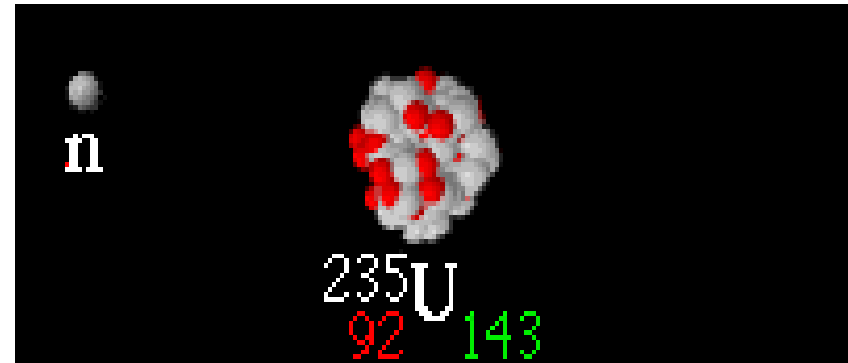
...ai fenomeni artificiali

- 1919: Rutherford → reazioni nucleari
- 1932: Chadwick → neutrone
- 1934: Curie → produzione di radioisotopi
- 1934: Fermi → neutroni lenti su uranio
- 1938: Hahn-Strassmann → fissione
- 1942: Fermi → reattore nucleare

I neutroni lenti e l'uranio

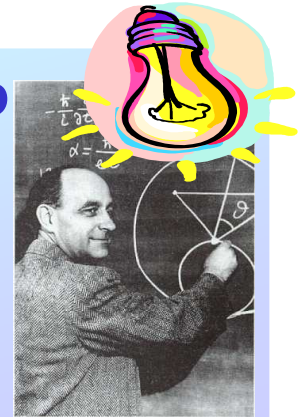
1932: scoperta del neutrone

Il neutrone è neutro, e quindi non è soggetto a repulsione elettrica. Ha quindi un'elevata capacità di penetrazione nel nucleo.



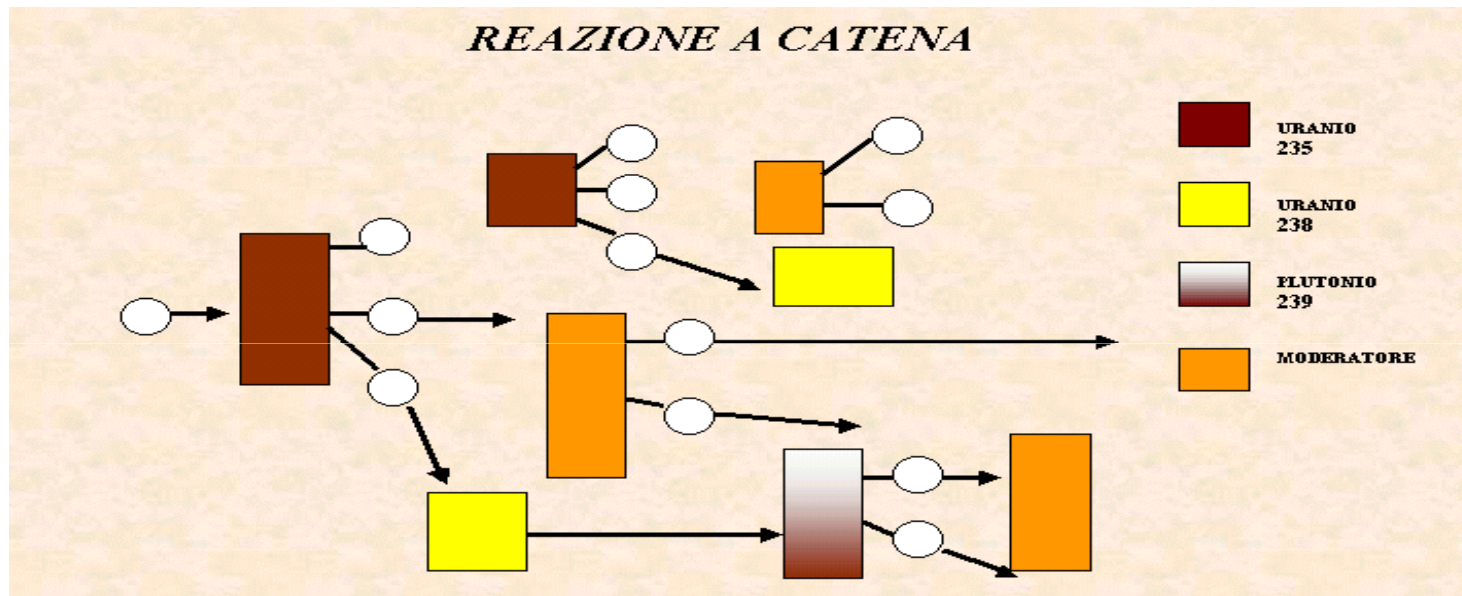
Bombardando nuclei di uranio con neutroni si ottengono moltissime sostanze radioattive.

Se i neutroni passano attraverso sostanze particolari (**moderatori**: es. acqua o paraffina) che diminuiscono la loro velocità, l'effetto radioattivo aumenta molto. Inoltre vengono emessi **altri neutroni** che possono essere utilizzati a loro volta per continuare il processo a **catena**.



Reazioni a catena

La fissione nucleare può avvenire con reazioni a catena.



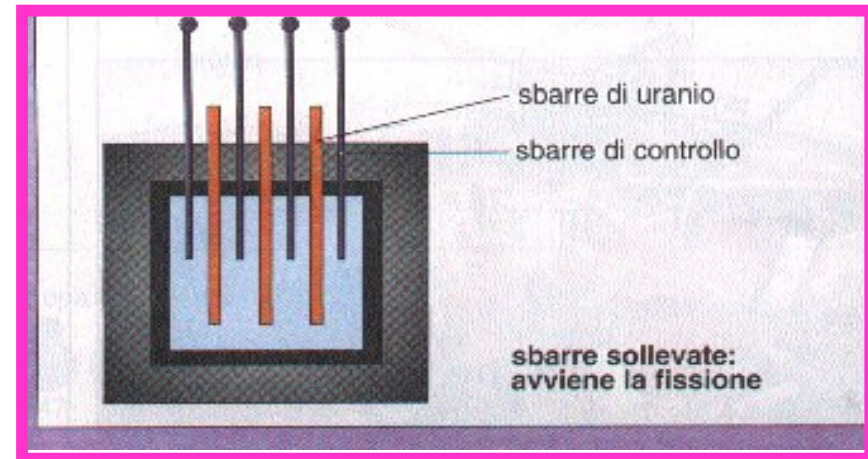
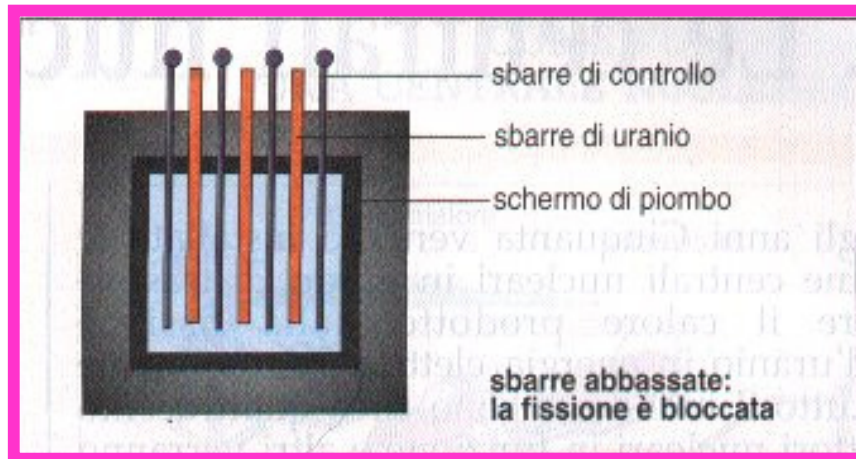
Se controllata, è una enorme sorgente di energia!

Se incontrollata, ha effetti devastanti!

Il reattore nucleare

- **Cubo di grafite** (moderatore dei neutroni)
- **barre di uranio**
- **barre di controllo** di boro e cadmio (assorbitori dei neutroni in eccesso)

Pila di Fermi,
Chicago 1942



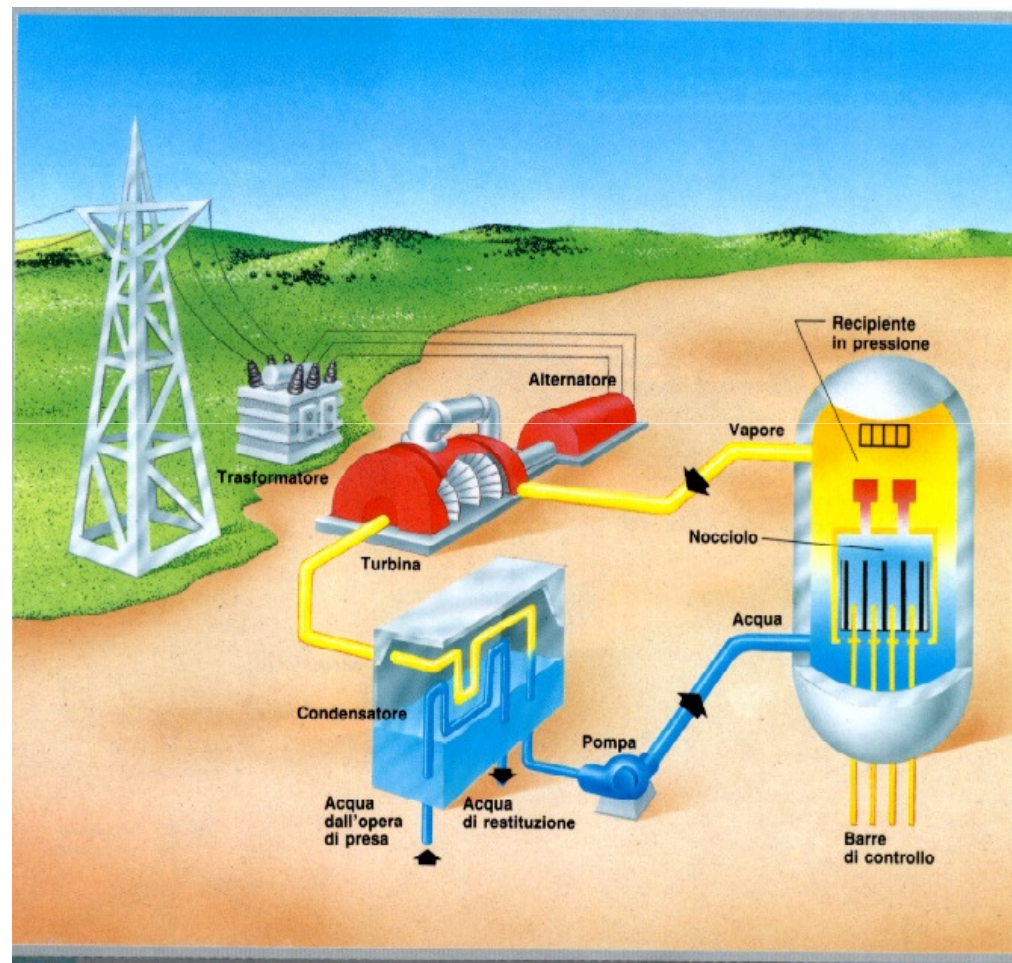
Sollevando o abbassando le barre di controllo, è possibile innescare o bloccare la reazione a catena.

Centrali nucleari

Reattore protetto da una campana di rivestimento + sistema di raffreddamento in cui circola **acqua**.

L'acqua trasformata in vapore mette in azione una turbina collegata con un alternatore che produce energia elettrica.

Il vapore uscito dalla turbina passa in un condensatore dove viene raffreddato e trasformato in acqua. Quest'acqua viene di solito inviata al reattore per essere riutilizzata.



Esercizi (I)

Es. 1

Determinare la vita media ed il tempo di dimezzamento del ^{226}Ra sapendo che, per definizione, l'attività di 1 g di tale radioisotopo è pari a circa 1 Ci.

Es. 2

Il radionuclide ^{13}N ($T_{1/2} \sim 10$ min) è uno dei radioisotopi tipicamente utilizzati nella scansione PET. Per via del loro basso tempo di dimezzamento, tali radioisotopi devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET. Supponendo che una tipica dose iniettata per scopi radiodiagnostici contenga almeno 1 g di ^{13}N , quale deve essere il contenuto in ^{13}N alla produzione della dose, supposta avvenire entro mezz'ora prima dell'utilizzo?

Es. 3

Il trizio, isotopo ^3H , è soggetto a decadimento β con $T_{1/2} \sim 12.5$ anni. Un campione arricchito di idrogeno gassoso, contenente 0.1 g di trizio, produce 21 calorie di calore per ora. Calcolare l'energia media delle particelle β emesse.

Es. 4

Stimare l'età dei resti di un albero la cui radioattività, legata al decadimento del ^{14}C ($T_{1/2} \sim 5730$ anni), è $1/3$ di quella di un albero ad esso paragonabile, ma ancora in vita.



Esercizi (II)

Es. 5

Si supponga di avere due sorgenti radioattive A e B costituite dallo stesso radionuclide. La massa della sorgente A sia pari a 0.3 g e la sua attività sia di 1.1 Ci. Determinare la massa della sorgente B se la sua attività è di 10 Ci.

Es. 6

Determinare l'energia cinetica con cui vengono emesse le particelle α ($m = 4.002603$ u) nel decadimento dell' $^{232}_{92}\text{U}$ ($m = 232,037146$ u) in $^{228}_{90}\text{Th}$ ($m = 228,028731$ u).

Es. 7

Si supponga che un campione del radioisotopo ^{11}C , avente tempo di dimezzamento pari a $T_{1/2} = 20$ m, presenti ad un dato istante un'attività di 1 Ci. Quale sarà la sua attività dopo 30 min?

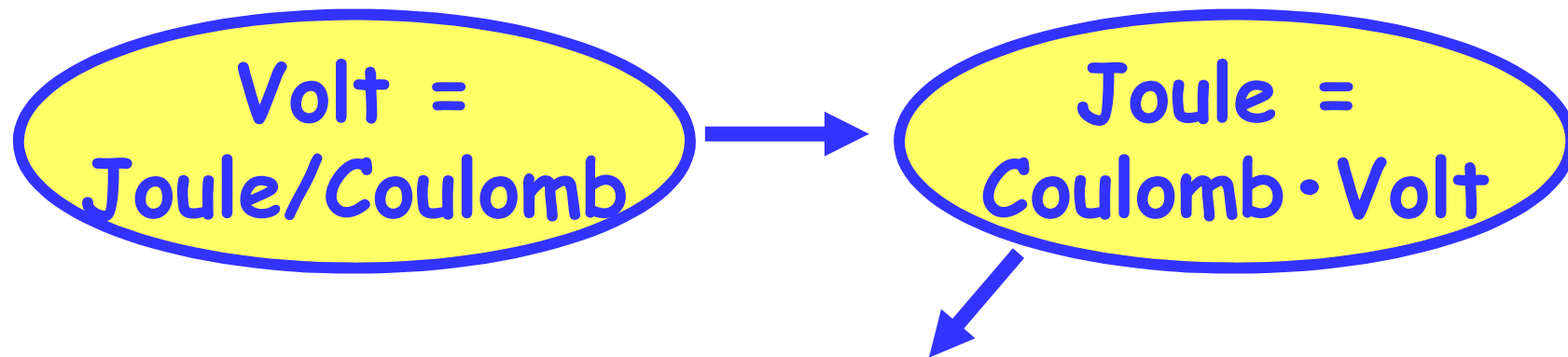
Es. 29.1 (BMD)

Sono necessari 8 decadimenti α e 6 decadimenti β^- affinché un atomo di $^{238}_{92}\text{U}$ raggiunga la stabilità. Quali sono il numero atomico, il numero di massa e il nome chimico dell'atomo finale ?



Appendice: L'ElettronVolt

Unità di misura pratica di energia su scala atomica:
aumento di energia di 1 elettrone in una d.d.p. di +1 V



Lavoro = Energia = Carica elettrica · Potenziale elettrico

$$\text{elettronVolt (eV)} = \underbrace{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})}_{e} \cdot (1 \text{ V}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$e \rightarrow$ carica elettrone

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ J} = 1/(1.6 \cdot 10^{-19}) \text{ eV} = 6.25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$