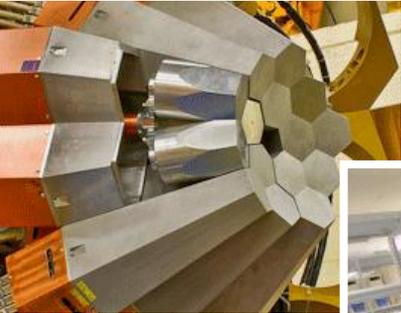


Edizione 2015

dal 15 al 26/06/2015



Gerti Xhixha



xhixha@fe.infn.it



Introduzione alla fisica nucleare

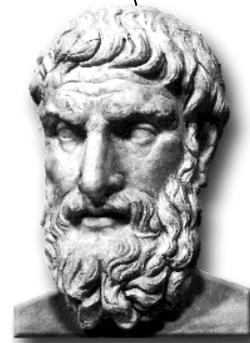
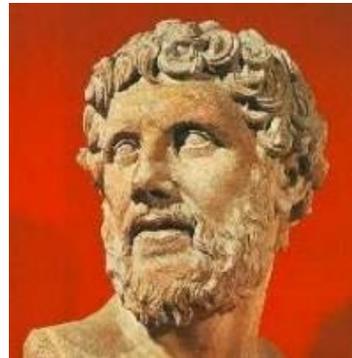
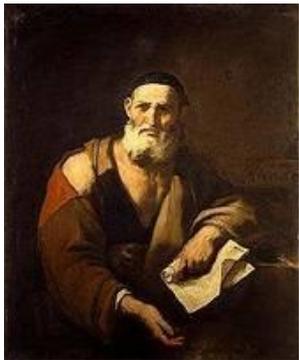
- **Breve storia dell' atomo**
- **I costituenti dei nuclei atomici**
- **Leggi di conservazione**
- **Scale di lunghezza, massa e tempo**
- **La tavola dei nuclei**
- **Breve storia della radioattività**
- **La legge del decadimento radioattivo**
- **Vita media fisica, biologica ed effettiva**

La storia dell' atomo

Ceni sulla dottrina dei filosofi greci **Leucippo**, **Democrito** ed **Epicuro**:
teoria degli atomi.

Il mondo pertanto si costituisce assumendo una figura ricurva; e la sua formazione seguì questo processo: poiché gli atomi sono soggetti a un movimento casuale e non preordinato e si muovono incessantemente e con velocità grandissima

Per ciascuna forma vi è un numero infinito di atomi simili, tuttavia quanto alle differenze di figure, gli atomi non sono infiniti ma solo illimitati Gli atomi si muovono incessantemente ed eternamente. Alcuni rimbalzano a lunga distanza l'uno dall'altro, altri invece trattengono il rimbalzo quando si trovano compresi in aggregato o quando sono contenuti da altri atomi tra loro intrecciati. Ciò avviene a causa della natura del vuoto che separa ciascun atomo dall'altro.



Atomo dal greco ἄτομος (àtomos) - **indivisibile**

è la più piccola parte di ogni elemento esistente in natura che ne conserva le caratteristiche chimiche.

L'evoluzione della conoscenza dell'atomo

Con la scoperta dell'elettrone inizio l'esplorazione delle particelle che compongono l'atomo: si dimostrò l'esistenza di un nucleo costituito **neutroni e protoni**.

1808 John Dalton



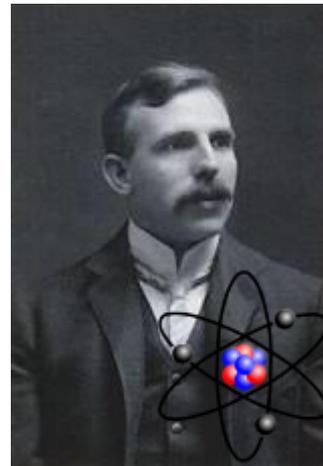
suggerì una struttura della materia composta da atomi "sfere"

1898 J. J. Thomson



scopri l'elettrone "modello atomico a panettone"

1910 E. Rutherford

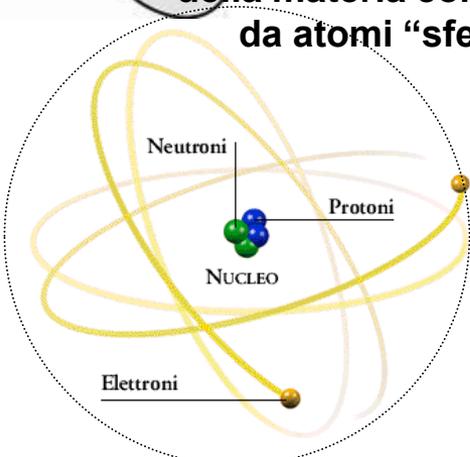


modello atomico "planetario" con il nucleo centrale positivo

1913 Niels Bohr



modello atomico con orbitali elettronici



Particella	Simbolo	Carica (C)	Massa (kg)
Elettrone	e^-	$-1,6 \times 10^{-19}$	$9,1 \times 10^{-31}$
Protone	p	$+1,6 \times 10^{-19}$	$1,672 \times 10^{-27}$
Neutrone	n	0	$1,675 \times 10^{-27}$

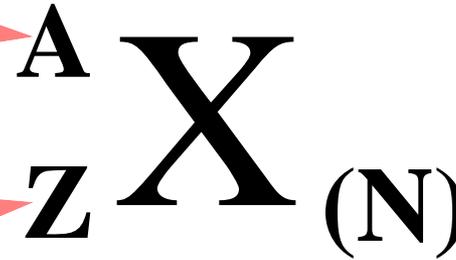
La caratterizzazione di un nucleo

A = Numero di massa:
la somma del numero di
neutroni e protoni nel
nucleo

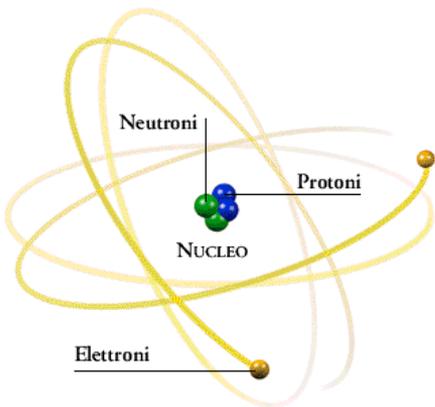
Z = Numero atomico:
il numero dei protoni
nel nucleo

N = Numero dei neutroni:
il numero dei neutroni
nel nucleo

$$A = Z + N$$



NOTA: Poiché $A = Z + N$, basta conoscere due quantità e la terza è automaticamente determinata, per questo motivo per semplificare la notazione non viene riportato N.



$$N = A - Z = 2$$

Leggi di conservazione

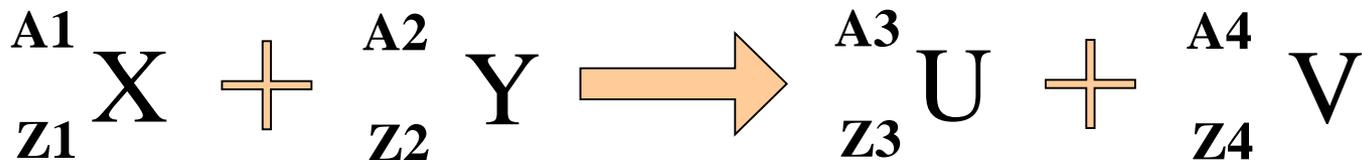
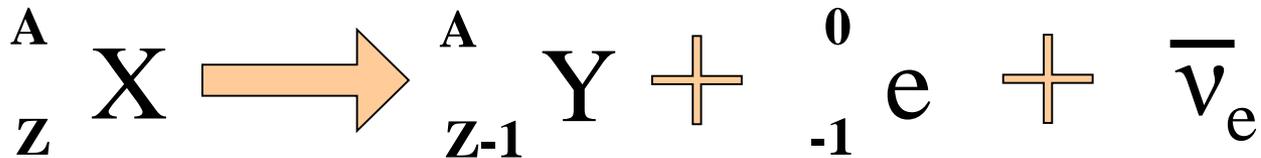
Perché sono importanti Z ed A?

Z

In ogni processo fisico è **conservata la carica elettrica**.

A

In ogni processo fisico è **conservato il numero barionico**, che nella fisica nucleare corrisponde al **numero di massa**.



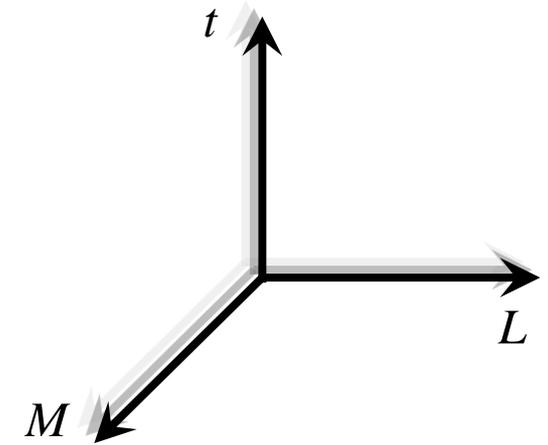
dove

$$A1 + A2 = A3 + A4$$

$$Z1 + Z2 = Z3 + Z4$$

Scala di lunghezza, massa e tempo

Un sistema di unità di misura (ad es. MKS) è definito in termini di tre grandezze campione, di lunghezza (metri), di tempo (secondi) e di massa (chilogrammi).



Ogni sistema/processo fisico è dunque caratterizzato da tre grandezze, che lo individuano.



• **Esempio 1:** Grandezze caratteristiche per il corpo umano:

- $L \sim 1 \text{ m}$
- $M \sim 100 \text{ kg}$
- $t \sim 100 \text{ anni}$

• **Esercizio 1:** Quanti secondi ci sono in 100 anni?
Accettereste 1.000.000 di euro per contare da 1 a 3 miliardi?



• **Esempio 2:** Grandezze caratteristiche per la Terra:

- $L \sim 6 \times 10^6 \text{ m}$
- $M \sim 6 \times 10^{24} \text{ kg}$
- $t \sim 6 \times 10^9 \text{ anni}$

Dimensioni dei nuclei

Il volume dei nuclei cresce linearmente con la massa atomica (A), ossia:

$$V = k A$$

come per le gocce d'acqua...

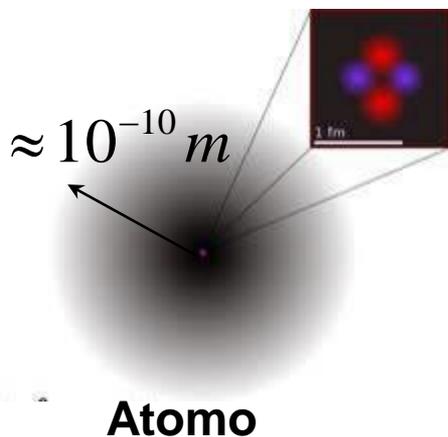
Le dimensioni nucleari dei nuclei crescono dunque come:

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

dove la costante di proporzionalità vale:

$$r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}$$

$$\approx 10^{-15} \text{ m}$$



NOTA: Le dimensioni lineari di un atomo sono 10^5 volte più grandi confronto al nucleo.

NOTA: I raggi dei nuclei sono nel intervallo tra ~ 1 a ~ 7 fm.



Masse dei nuclei



In una prima, rozza, approssimazione, la massa di un nucleo è uguale alla somma delle masse dei suoi costituenti:

$$M(Z, N) \sim Zm_p + Nm_n$$

Si noterà che **la massa di un atomo è concentrata nel nucleo**, visto che la m_e è molto minore di m_p e m_n .

NOTA: La massa di un protone è circa 1800 volte più grande della massa di un elettrone.

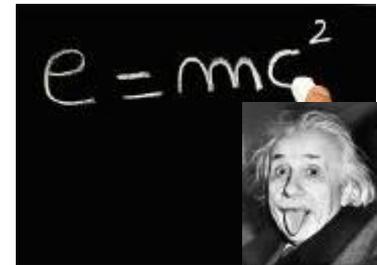
Particella	Massa (kg)
Elettrone	$9,1 \times 10^{-31}$
Protone	$1,672 \times 10^{-27}$
Neutrone	$1,675 \times 10^{-27}$

Secondo la relatività, la massa di un sistema è l'energia totale nel suo riferimento di quiete ($E = mc^2$), e dunque vi contribuiscono anche le energie di interazione fra i costituenti:

$$M(Z, N) = Zm_p + Nm_n - E_b/c^2$$

dove E_b è **l'energia di legame** del sistema.

NOTA: Nel caso dei nuclei, il termine E_b/c^2 è dell'ordine di 1/1000 rispetto agli altri termini; per confronto negli atomi questo termine è dell'ordine 1/10⁹.



Scale dei tempi nucleari

Ci sono vari tempi che posso caratterizzare un nucleo!

Un tempo caratteristico è quello che impiega la luce ad attraversare le dimensioni di un nucleo:

$$t_\gamma = r/c \sim 10^{-23} \text{ s}$$

dove $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Qualsiasi processo avvenga all'interno di un nucleo richiede almeno questo tempo, perché la velocità della luce è un limite per qualsiasi segnale si propaghi nel nucleo.



Per confronto, la luce impiega circa 1.28 secondi ad attraversare la distanza Terra – Luna.

Per nuclei instabili, che si trasformano spontaneamente in altri nuclei, un tempo importante è il **tempo di dimezzamento**, cioè quello dopo il quale il numero dei nuclei si è ridotto alla metà, e di cui parleremo più diffusamente nel seguito.

Tavola periodica dei elementi

Nella tabella di Mendeleev sono organizzati 118 elementi .

Gruppo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Periodo																			
1	1 H																	2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

Solo i primi due elementi si sono formati nel Big Bang.
Tutti gli altri elementi vengono formati nelle stelle.

* Lantanoidi

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

** Attinoidi

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

In natura si trovano elementi con $Z < 92$.

Tutti gli elementi oltre il polonio ($Z = 84$) sono radioattivi.

Tavola dei nuclei

Esistono migliaia di tipi di nuclei (nuclidi), rappresentati nel piano (N,Z)

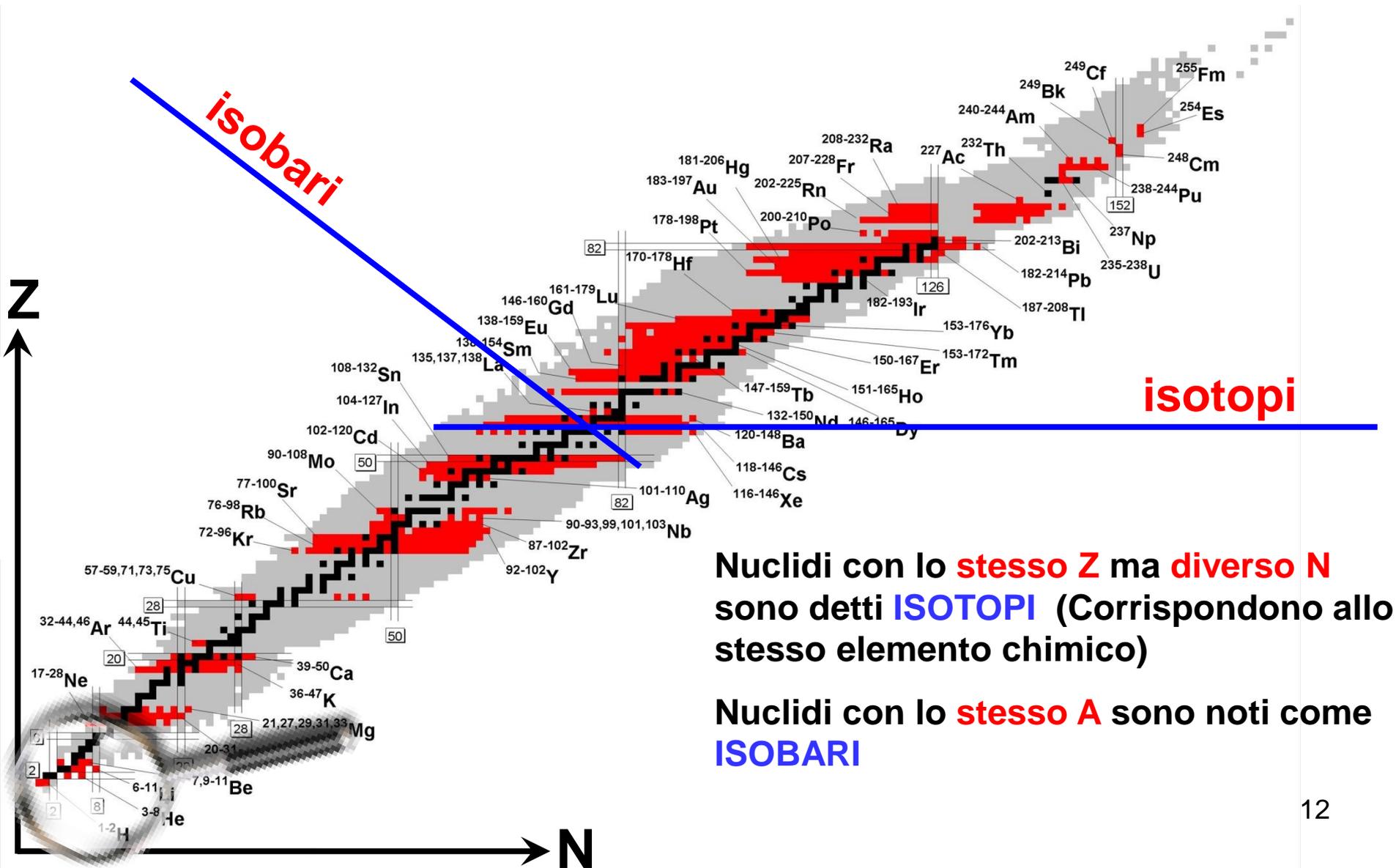
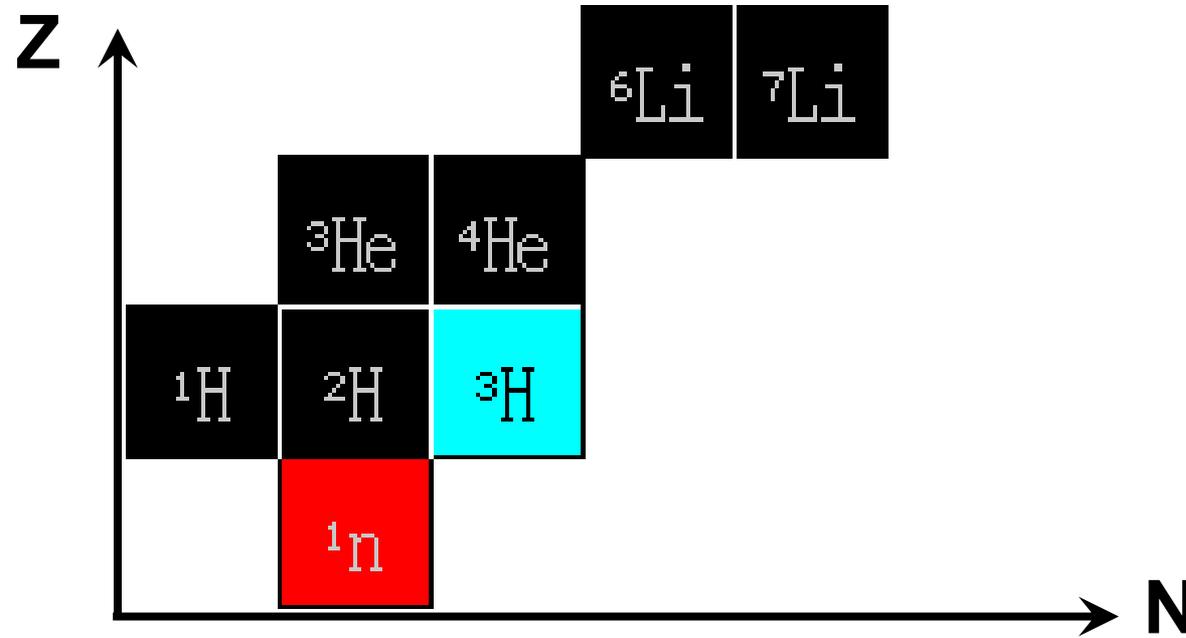


Tavola dei nuclei (fino ad $A = 5$)



- in **nero** i nuclei stabili,
- in **azzurro** nuclei con tempo di dimezzamento di almeno 10 anni,
- in **rosso** quelli che durano almeno 1 minuto;

NOTA: non sono segnati altri nuclidi, con tempi di dimezzamento molto brevi.

Osservazioni:

Il neutrone è instabile.

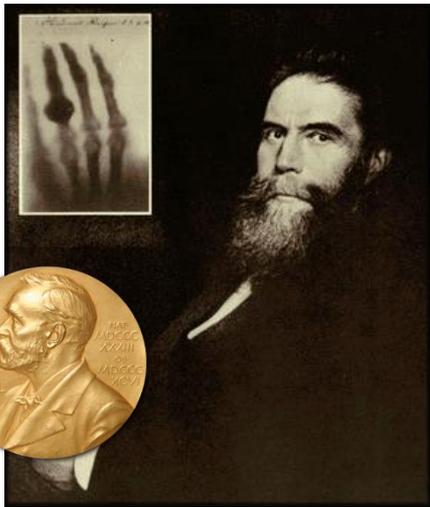
L'idrogeno ha due isotopi stabili e un terzo, il trizio, instabile.

Ci sono due isotopi stabili dell'elio.

Quali nuclei nella tavola sono isobari?

NOTA IMPORTANTE: in natura esistono nuclei stabili con $A = 1, 2, 3, 4$ ma non con $A = 5$ (così anche per $A = 8$).

I pionieri della radioattività



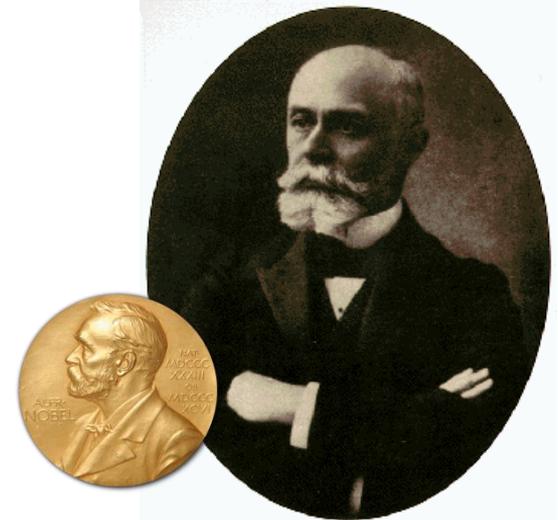
1895 Roentgen:

Scoprì i raggi X



1897 Rutherford:

Scoprì i raggi alpha e beta



1896 Becquerel:

Scoprì la radioattività



1900-1908 M.me Curie:

Scoprì il radio e il polonio



Marie Skłodowska–Curie



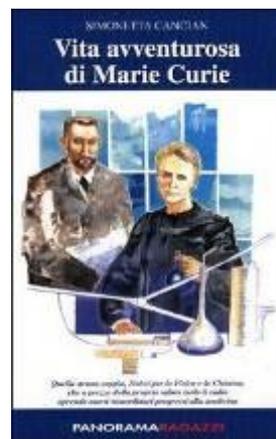
M.me Curie non fu solo dedita alle ricerche di base, ma si occupò anche delle possibili applicazioni delle stesse.

Durante la prima guerra mondiale, promosse l'impiego di unità mobili per la radiografia, montate su autovetture note come Petites Curie, per il trattamento dei soldati feriti.

Queste unità erano alimentate con tubi ad emanazione di Radon, un gas incolore e radioattivo sprigionato dal Radio.



M.me Curie nella I Guerra Mondiale, alla guida di una petite-Curie



Radioactive FASHION!

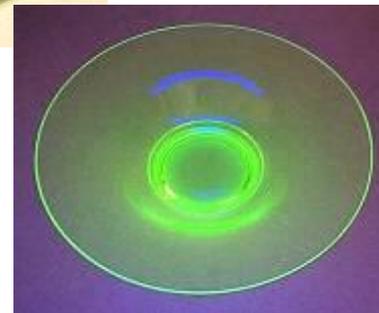
Radium Watch Dials



Test di radiografia X per vedere se ti vanno bene le scarpe!!!



Così appare un vetro con radio esposto alla luce UV



Radioactive lens



Il torio veniva aggiunto alle lenti per incrementare l'indice di rifrazione (che permetteva di avere lenti più sottili e più leggere)

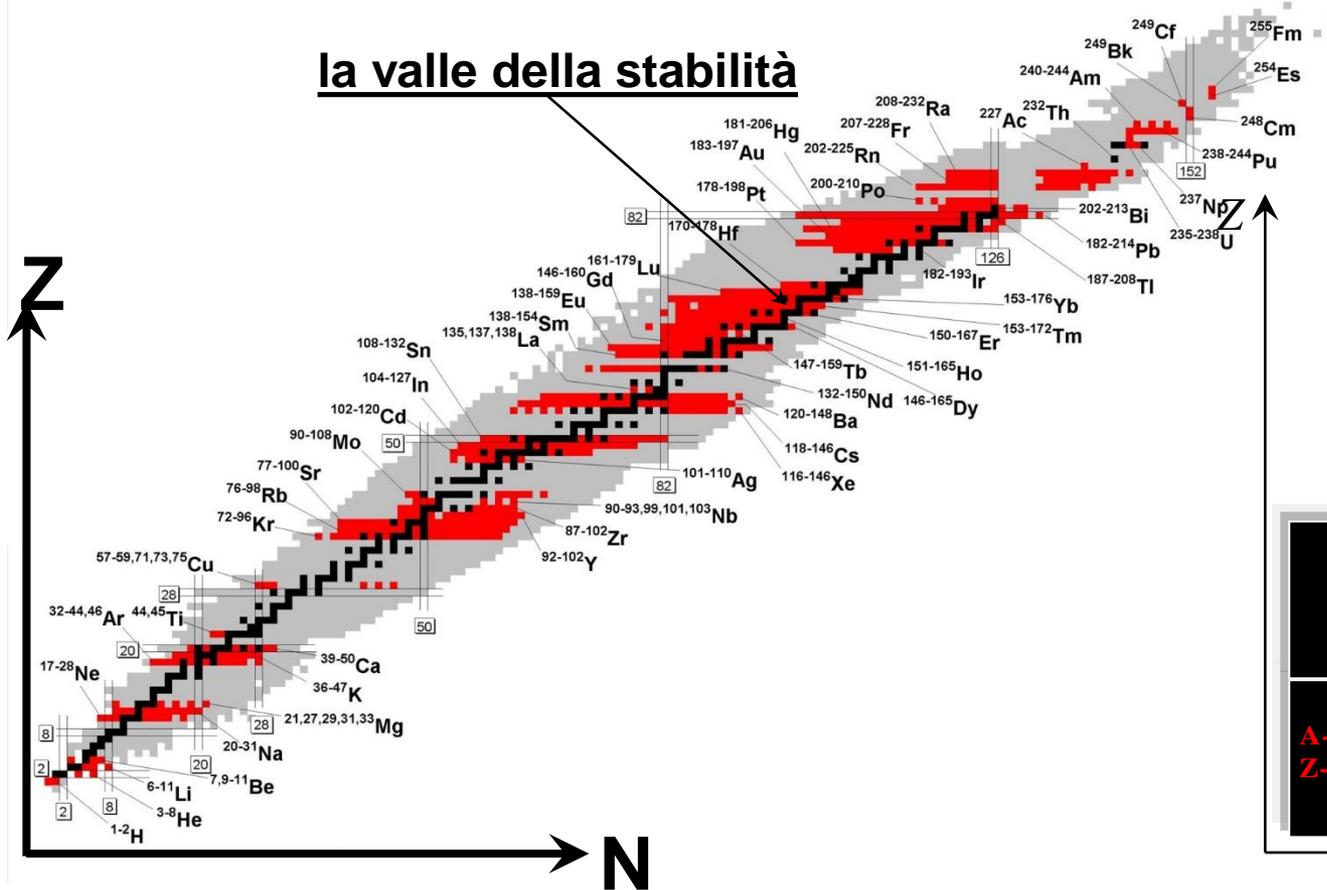


Tritium Gas Tubes dials

La valle della stabilità

I **nuclei stabili** si trovano solo in una banda molto stretta nel piano Z-N (**la valle della stabilità**) e sono indicati in nero.

Tutti gli altri nuclei sono instabili e decadono spontaneamente in vari modi.



La radioattività

La radioattività è un fenomeno fisico che si verifica quando il nucleo di un atomo instabile raggiunge un nuovo stato di equilibrio emettendo radiazioni.

La radioattività viene quantificata in termini di disintegrazione per unità di tempo.

1 Becquerel (Bq) = 1 disintegrazione al secondo



Una storica unità è il Curie (Ci), la quantità di radiazione emessa da 1 grammo di radio (^{226}Ra).

1 Curie (Ci) = 3.7×10^{10} disintegrazione al secondo

ossia:

1 Curie (Ci) = 3.7×10^{10} Bq or 37 GBq

Diversi tipi di radiazione

<http://atom.kaeri.re.kr/>



Emissione α

Particella: $2p + 2n$

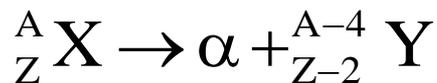
Massa: $6.68 \cdot 10^{-27}$ kg

Carica: positiva

Penetrazione: bassa
[foglio di carta]

Ionizzazione: alta
[$\sim 10^5$ coppie prod.]

Reazione:



Emissione β

Particella: e

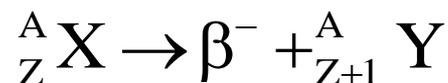
Massa: $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg

Carica: negativa (positiva)

Penetrazione: media
[1 mm di Pb]

Ionizzazione: media
[$\sim 10^4$ coppie prod.]

Razione:



Emissione γ

Particella: fotone

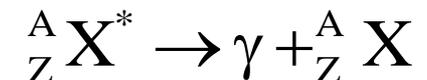
Massa: 0

Carica: neutra

Penetrazione: alta
[> 10 cm di Pb]

Ionizzazione: bassa
[~ 1 coppie prod.]

Reazione:



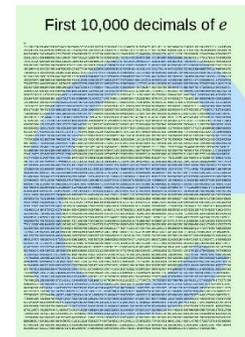
La matematica del decadimento radioattivo

Esistono molti processi importanti in natura i quali implicano un funzione esponenziale sia crescente o decrescente (Es. il cambiamento in decrescita della pressione atmosferica con la crescita dell'altezza sopra la superficie della Terra).

La relazione esponenziale occorre quando un cambiamento continuo di una quantità è proporzionale con la quantità preesistente.

$$f(x) = e^x$$

dove $e = 2.718$ è il numero di Nepero.



$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n$$



Esercizio: Supponete di aver depositato 1000€ in una banca MOLTO generosa che vi paga 1% di interesse ogni giorno. Quanto sarà cresciuto il vostro deposito entro 3 giorni.

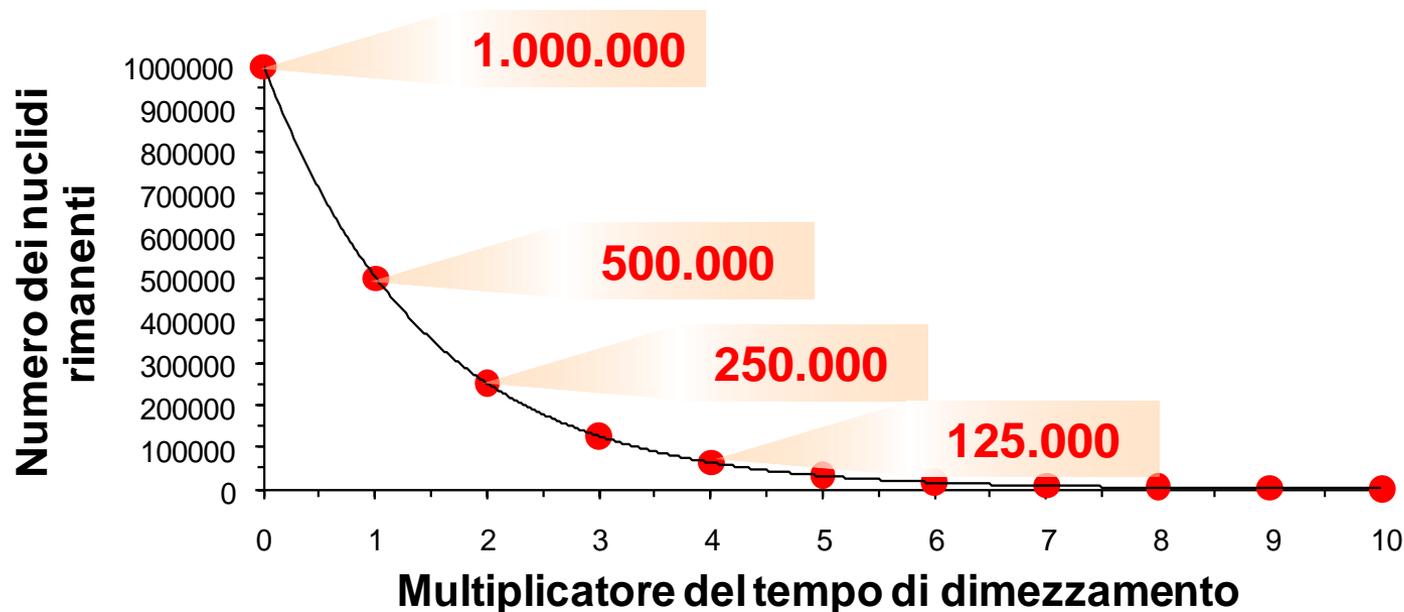
Si può esprimere, generalizzando, la crescita dei risparmi con un esponenziale?

La legge universale di decadimento radioattivo

Se al tempo $t = 0$ ho N_0 nuclei, dopo un tempo t ne avrò un numero $N(t)$ dato da:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

dove $T_{1/2}$ è il tempo di dimezzamento, cioè il tempo dopo il quale la metà dei nuclei sono decaduti, e dunque la metà è sopravvissuta.



L'attività

Il numero di nuclei che decadono nell'unità di tempo, $\Delta N/\Delta t$, si chiama attività.

Si può dimostrare che l'attività è data da:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = -N \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

Si può dimostrare che la vita media di un nucleo è:

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{0.693} = 1.443 T_{1/2}$$

• **Esercizio:** Possiamo calcolare l'attività di 1 g di ^{226}Ra (**Ricordate: la definizione del unità di Curie**), sapendo che:

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \frac{\text{atomi}}{\text{mol}}$$

$$M_{^{226}\text{Ra}} = 226.03 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$T_{1/2} = 1600 \text{ anni}$$



La radioattività in funzione del tempo

Esistono dei parametri di tempo particolari in fisica:

Tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$): è il tempo necessario perché il numero dei nuclidi padri diventi la metà.

Vita media (τ): è il tempo necessario perché il numero dei nuclidi padri si riduca a un fattore $1/e$ (ossia diventi circa il $\sim 37\%$ di quelli iniziali).

Parametri importanti in radioprotezione:

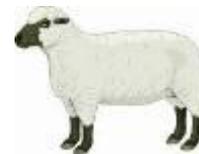
Tempo di dimezzamento biologico: è il tempo necessario perché l'organismo possa espellere un certo elemento.

^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ anni)



1 mese

2-3 settimane



3 mesi



3 mesi

Tempo di dimezzamento effettivo T_{eff} in un organismo:

>3 mesi

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

Esercizi:

Esercizio 1: Dire quali dei seguenti processi possono avvenire, utilizzando la conservazione della carica elettrica e del numero barionico:

$$p \rightarrow e^+ + \gamma$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$H_e \rightarrow 2p + n$$

HINT: $e^- = {}_{-1}^0e^-$

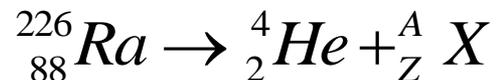
$$e^+ = {}_{+1}^0e^+$$

$$n = {}_0^1n$$

$$p = {}_{+1}^1p$$

Esercizio 2: ${}^{238}_{92}\text{U}$ decade in ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ emettendo nuclei di ${}^4_2\text{He}$ ed elettroni. Quanti nuclei di elio e quanti elettroni vengono prodotti nella catena di decadimento?

Esercizio 3: Quale nucleo si forma al termine di questo processo:



Esercizio 4: Calcolare la massa di un nucleo di ${}^4_2\text{He}$ sapendo che l'energia di legame e' di circa 28 MeV.

Esercizio 5: Si tagli in due una barretta di gesso (CaSO_4) lunga 10 cm, e quindi ancora in due, e così via fino a raggiungere le dimensioni della molecola di gesso (circa 10^{-10} m). Quanti tagli sono necessari?