

LE RADIAZIONI IONIZZANTI

- **Mauro Magnoni**
- **ARPA Piemonte**
- Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici
- Via Jervis, 30 - 10015 Ivrea (TO)



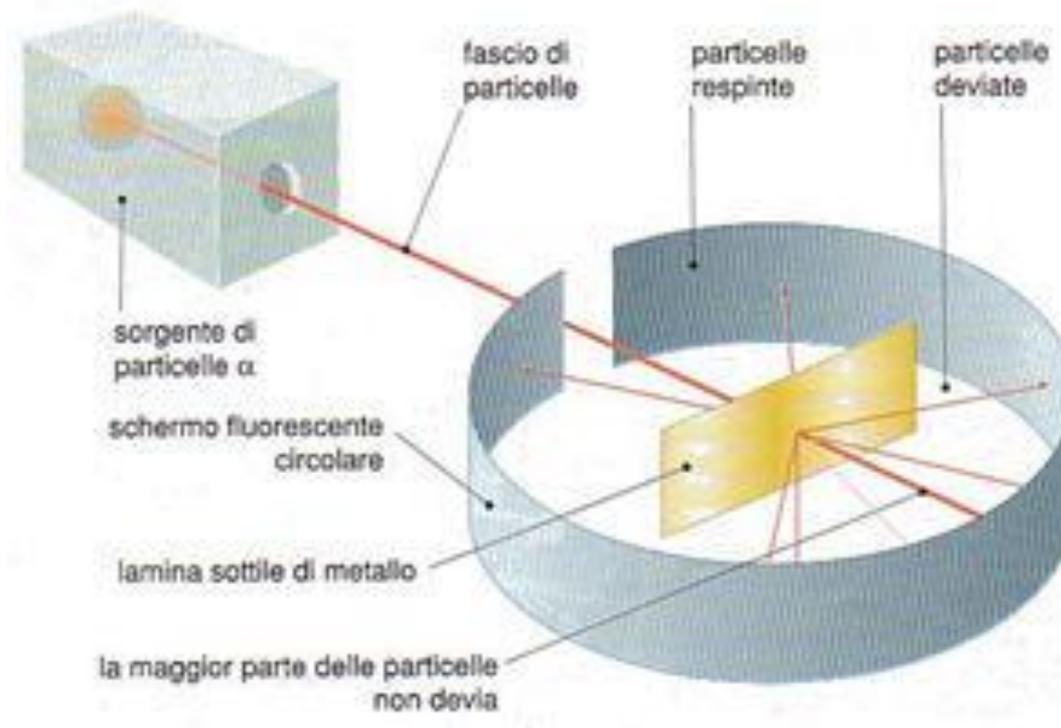
Argomenti della presentazione

1. Il concetto di radiazione, richiami elementari di struttura della materia e sul processo di ionizzazione
2. Il fenomeno della radioattività: una fonte di radiazioni ionizzanti

La struttura della materia

- Dopo l'antichità (il filosofo greco Democrito), la teoria atomica viene ripresa in epoca moderna nell'Ottocento prima da Thompson, poi da Rutherford (inizi del '900) e quindi da Bohr che introduce per primo lo schema quantistico dei livelli energetici
- Dal punto di vista concettuale, il primo significativo passo verso la moderna concezione atomica fu fatto da Rutherford

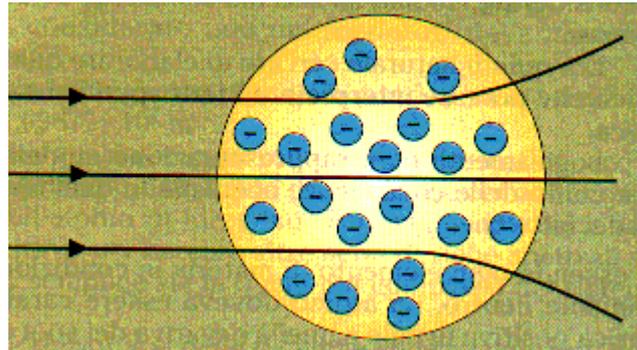
L'esperienza di Rutherford



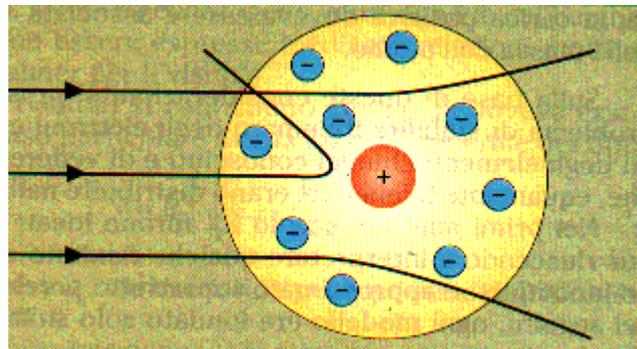
**Una particella
su 2000 viene
respinta
indietro!**

Interpretazione dell'esperimento

- Quello che ci si aspettava (atomo di Thompson):

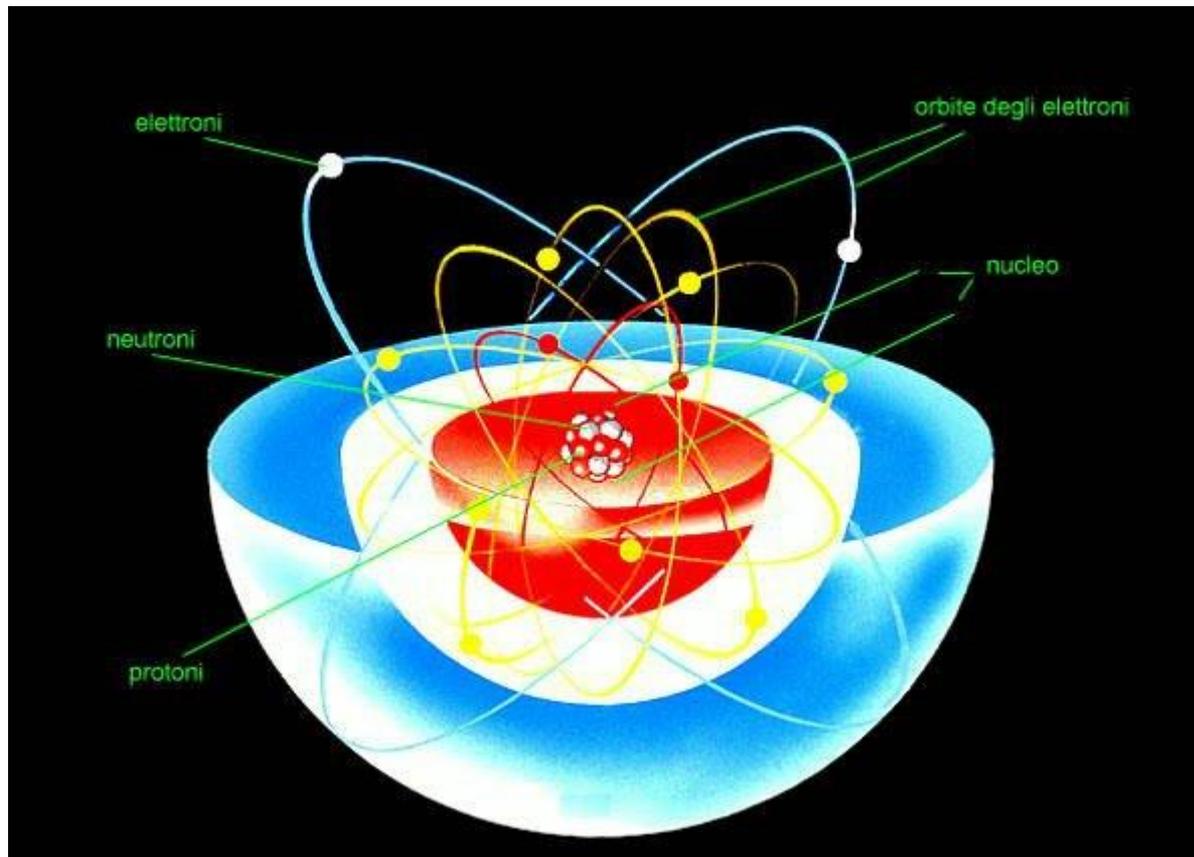


- La possibile spiegazione: (atomo di Rutherford):

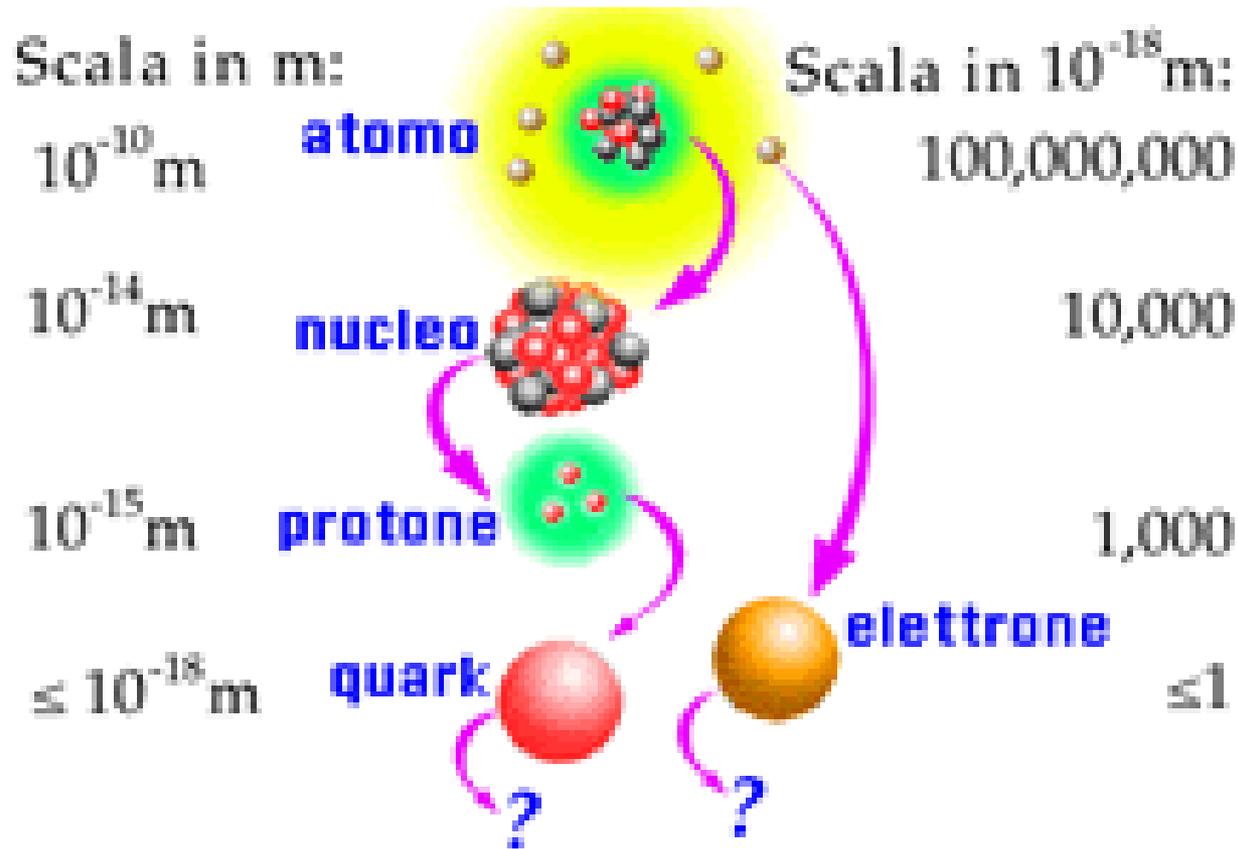


- Per Rutherford l'atomo è costituito da un nucleo, dove sono concentrate le cariche positive (protoni, p), mentre quelle negative (elettroni, e^-) sono particelle che orbitano a grande distanza dal nucleo: la massa dell'atomo è concentrata prossoché esclusivamente nel nucleo
- **Gran parte del volume “occupato” dall'atomo è vuoto !!!**

- L'attuale concezione atomica è la seguente e viene di solito schematizzata in questo modo (disegno **NON** in scala) :



Le dimensioni dell'atomo



- La nuova teoria atomica (atomo come sistema “planetario”) pose immediatamente alcuni problemi ai fisici: in base alle leggi fino ad allora conosciute non avrebbe potuto esistere!
- Con il fisico danese Niels Bohr si giunge allora alla definizione dei **livelli energetici** degli elettroni: gli elettroni cioè ruoterebbero attorno al nucleo con orbite ben definite da una particolare energia; inoltre il passaggio da un’orbita all’altra comporterebbe l’emissione o l’assorbimento d’energia
- L’atomo di Bohr non spiega però perché l’atomo è stabile, ma solo come funziona l’assorbimento e l’emissione dell’energia da parte dell’atomo
- Per giungere a una spiegazione occorrerà attendere una nuova teoria fisica: la Meccanica Quantistica (Schroedinger e Heisemberg, anni '20 del 1900) che rivoluziona i concetti della Meccanica Classica (newtoniana)

La struttura dell'atomo

- L'atomo, in condizioni normali, è elettricamente neutro. In esso vi sono però delle cariche elettriche
- Si possono distinguere due componenti:
 - a) il NUCLEO
 - b) gli elettroni
- Nel nucleo, che costituisce la parte centrale dell'atomo, è concentrata gran parte della massa dell'atomo stesso e vi sono le particelle cariche positivamente (i protoni, p) assieme a delle particelle neutre, aventi massa pressoché uguale, i neutroni (n)
- Gli elettroni (e^-), carichi negativamente, orbitano a grande distanza dal nucleo

- Per caratterizzare un generico atomo, bisogna specificare come è costituito il suo nucleo (si usa infatti talvolta anche il termine nuclide). In particolare dobbiamo sapere:

- **Il suo numero di protoni p , Z**
- **Il suo numero di neutroni n , N**

Il numero di elettroni (e^-), se l'atomo è neutro (cioè non ionizzato), è uguale a quello dei protoni, cioè a Z

- Tuttavia, le orbite degli elettroni non sono da intendersi come traiettorie analoghe a quelle dei pianeti attorno al Sole, come prevedeva il modello planetario di Rutherford
- In realtà gli elettroni non possono essere descritti come corpuscoli orbitanti attorno a un nucleo: non si può infatti assegnare loro una precisa traiettoria. Ciò che si può dire di essi è che occupano un certo spazio attorno al nucleo con una certa probabilità (“nuvole di probabilità”)

- Il motivo per cui accade questo è da ricercarsi nel fatto che le particelle atomiche o subatomiche non sono descrivibili come punti o oggetti materiali, bensì come onde molto particolari
- Per questo motivo: *“non si può dire con precisione dove sia una singola particella e a che velocità si muova in ogni istante”*
- In conseguenza di ciò non è possibile descrivere con precisione la traiettoria di una particella atomica o subatomica (in questo caso l’elettrone)
- Questo fatto è espresso da un principio che è uno dei caposaldi della Fisica Quantistica:

Il principio di indeterminazione di Heisenberg

Werner Heisenberg (1901 – 1976)

- E' impossibile misurare contemporaneamente con precisione assoluta la posizione (x) e la quantità di moto ($p=mv$) di una particella

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

dove h costante di Planck, un numero molto piccolo, ma $\neq 0$



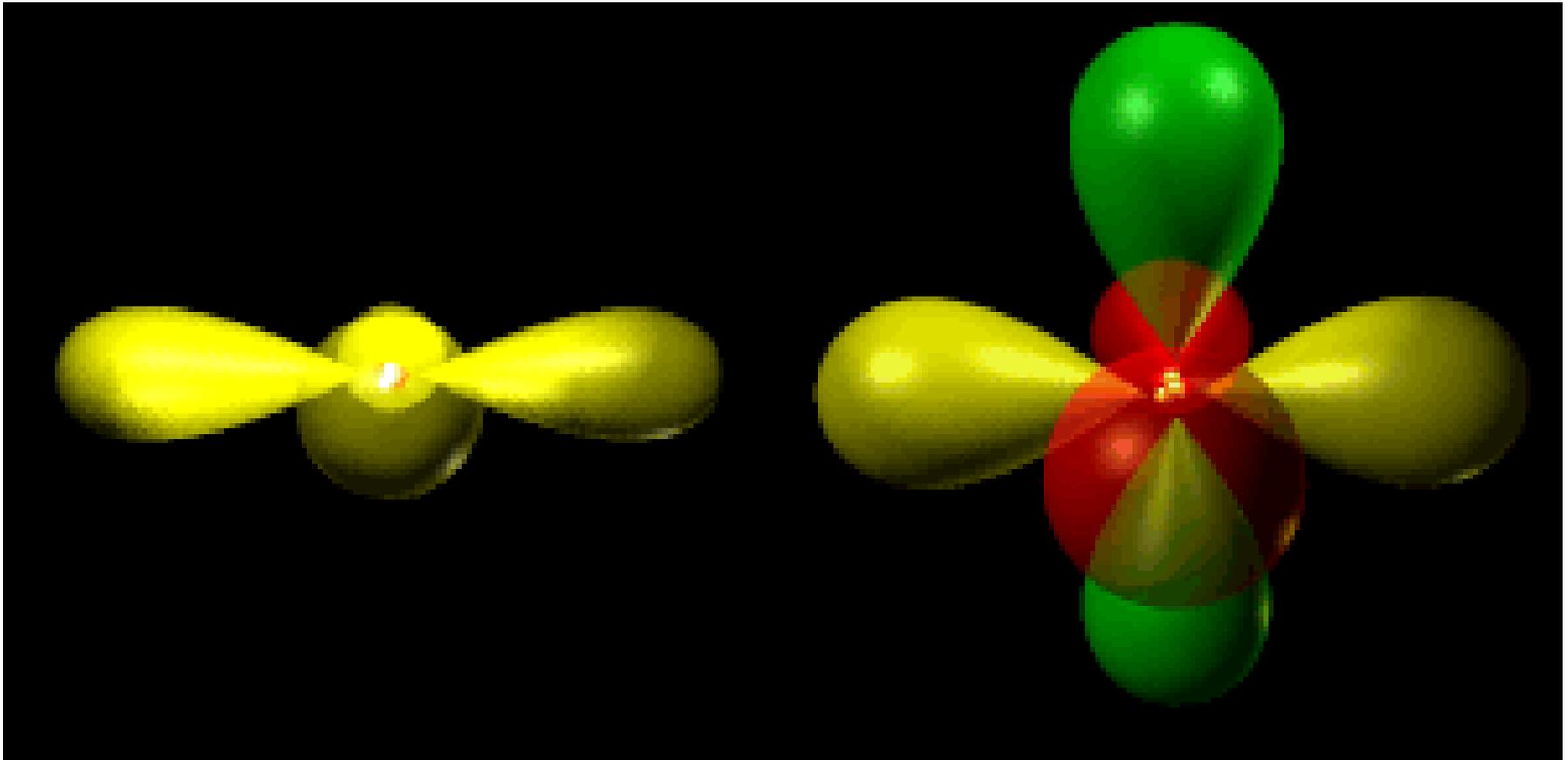
- Questa nuova e sorprendente visione della realtà fisica, affermata negli anni '20 del Novecento va sotto il nome di Meccanica Quantistica
- Le “nuvole di probabilità” degli elettroni di un atomo sono descritte matematicamente grazie a un oggetto matematico detto funzione d’onda, indicate con la lettera greca psi:

$$\psi = \psi(x, y, z, t)$$

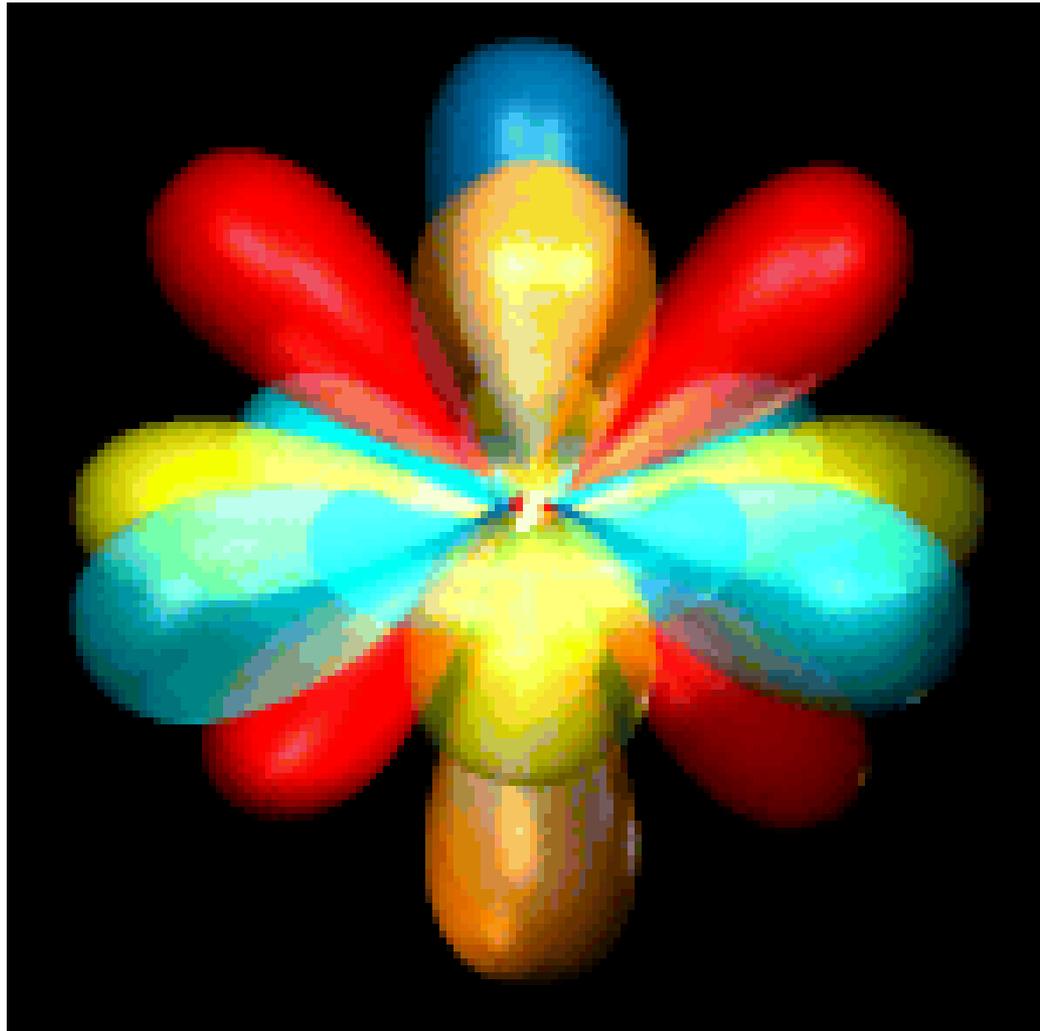
così chiamata perché obbedisce a una particolare equazione delle onde, detta **Equazione di Schroedinger**, dal nome del fisico austriaco che per primo la formulò

- Queste “nuvole di probabilità”, definiscono i cosiddetti orbitali

- Esempi di orbitali:



- Atomo con vari elettroni e relativi orbitali:



Il processo di ionizzazione della materia

- Considerando l'atomo come l'entità fondamentale con cui è costituita la materia, abbiamo visto che esso è costituito da cariche elettriche positive e negative che, normalmente, si bilanciano
- Il fenomeno della ionizzazione determina uno “sbilanciamento” delle cariche elettriche atomiche
- Tale fenomeno può essere indotto nella materia a seguito di alla cessione di grosse quantità di energia agli atomi da parte di una radiazione sufficientemente energetica

Unità di misura dell'energia

- Nel Sistema Internazionale si usa il Joule (simbolo J), un'unità di misura legata alla meccanica:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

Viene talvolta usata anche la caloria:

$$1 \text{ caloria} = 4,186 \text{ Joule}$$

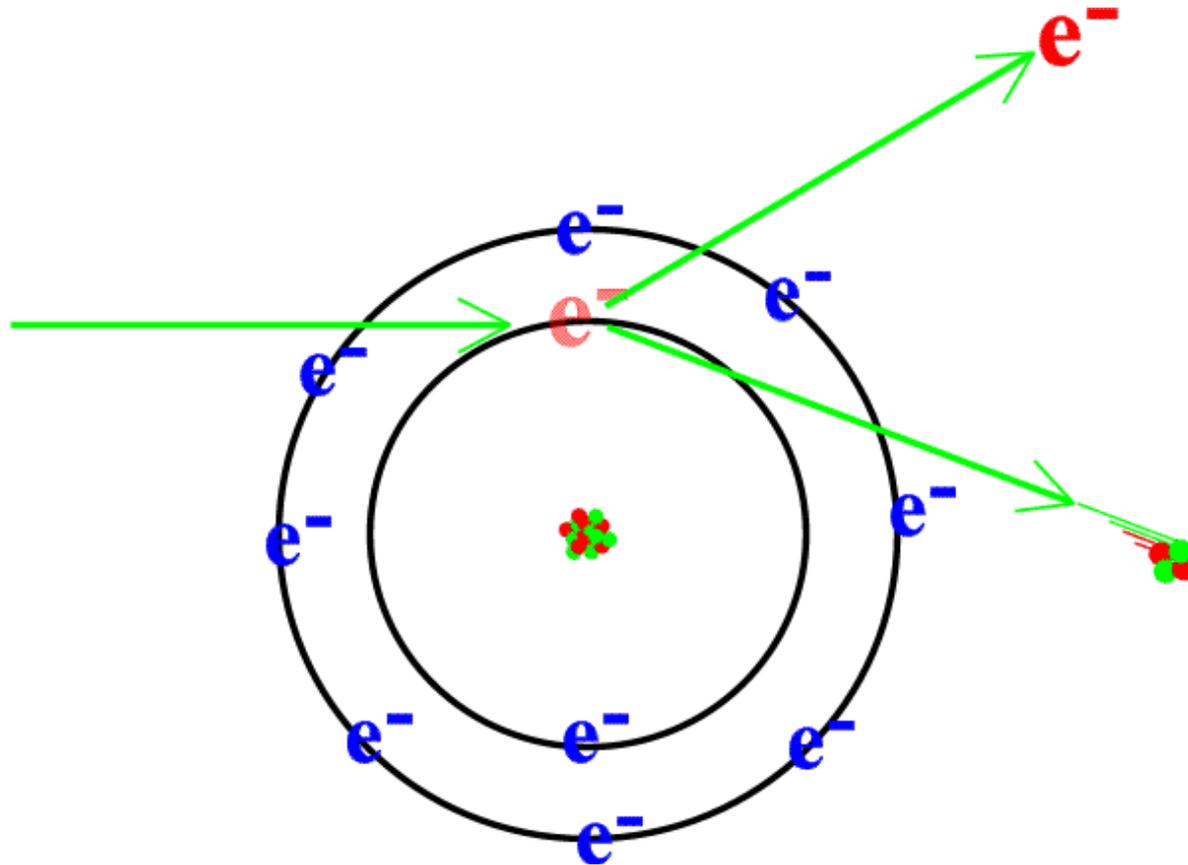
Tutte queste sono unità di misura

“macroscopiche”, enormi a livello di particelle

- Nella Fisica nucleare, che studia i processi in cui sono coinvolte singole particelle atomiche e subatomiche si fa spesso uso di un'unità più piccola, l'elettronvolt (simbolo eV) e dei suoi multipli (keV e MeV, in particolare)

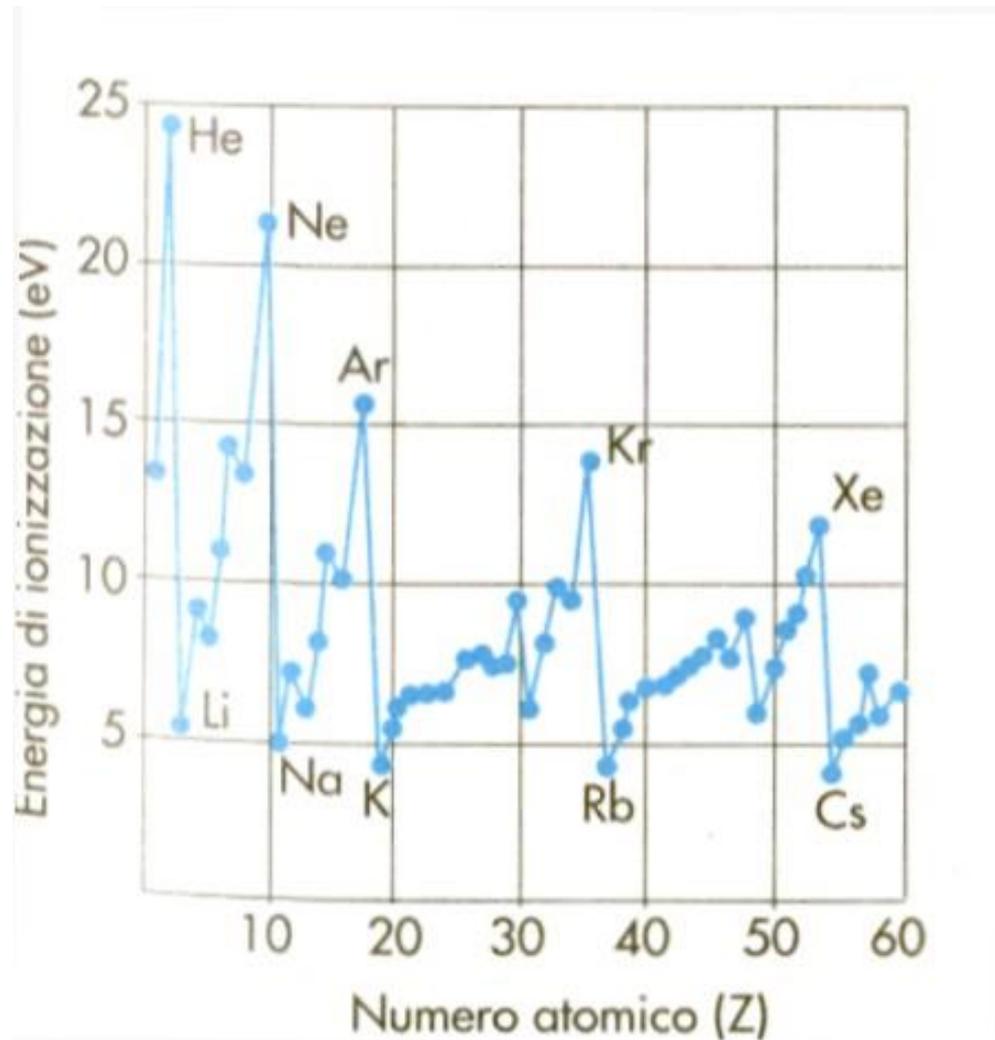
$$1 \text{ eV} = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Il processo di ionizzazione



- Il processo di ionizzazione può essere innescato da una radiazione corpuscolare (cioè avente una massa) o una radiazione elettromagnetica
- La ionizzazione, cioè la capacità di “strappare” un elettrone dal nucleo, avviene però solo se l’energia della radiazione supera un determinato valore soglia. Le radiazioni che superano tale valore sono appunto dette radiazioni ionizzanti
- Tale soglia dipende da quanto fortemente gli elettroni sono “legati” al nucleo: il suo valore varia da elemento a elemento ed è dell’ordine di qualche decina di eV

Energie minime di ionizzazione per alcuni elementi



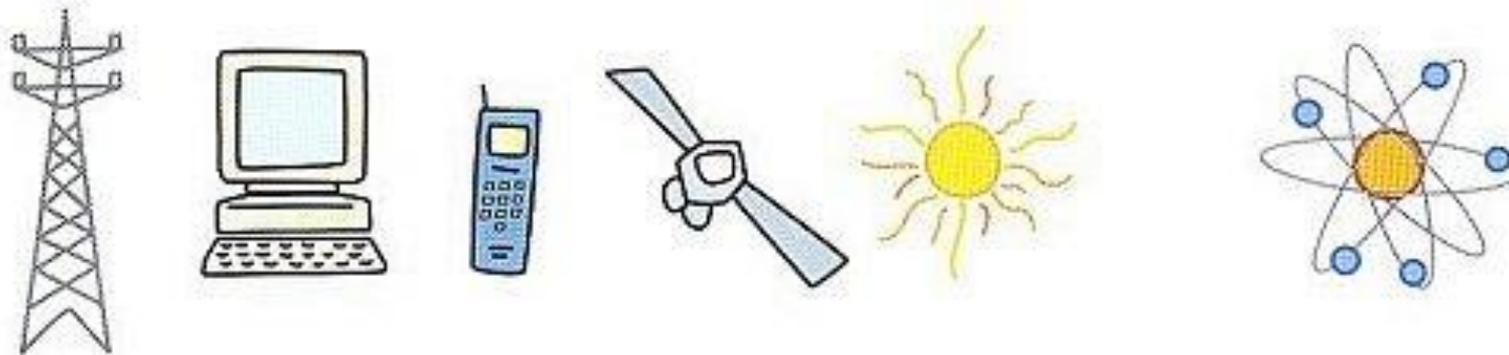
- In pratica però, per creare una coppia di ioni, cioè per ionizzare la materia (ad esempio l'aria), è necessaria un'energia un po' più elevata di quella teorica (una parte dell'energia viene infatti “persa” tramite l'eccitazione): circa 30 eV, leggermente variabile a seconda del mezzo (cioè della sostanza) considerata

Sono quindi da considerarsi radiazioni ionizzanti

- Le radiazioni e.m. ad alta energia: raggi X e γ
In linea teorica si possono considerare ionizzanti quelle radiazioni e.m. la cui energia, espressa secondo **la legge di Planck, $E = h\nu$** , è tale che **$h\nu > 30 \text{ eV}$** , dove la frequenza $\nu = c/\lambda$, con c = velocità della luce, λ lunghezza d'onda ed h costante di Planck che vale $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Inserendo i numeri si ottiene per la lunghezza d'onda la condizione **$\lambda < 41 \text{ nm}$**
- Le radiazioni formate da flussi di particelle cariche, quali: i protoni, gli elettroni, i positroni (elettroni con carica positiva), le particelle α , nuclei pesanti ionizzati, ecc.
- Le radiazioni neutroniche, formate cioè da neutroni

Spettro elettromagnetico

Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti



Particelle cariche

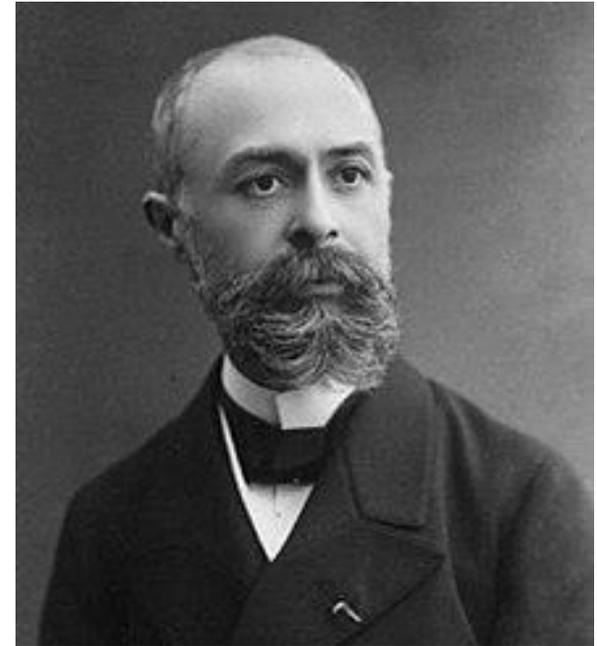
- Tutte le particelle cariche (protoni, elettroni, positroni, particelle α , ecc.) emesse a seguito di processi nucleari sono da considerarsi ionizzanti
- La radioattività è dunque una fonte molto importante di radiazioni ionizzanti

Il fenomeno della radioattività



Marie Skłodowska Curie (1867-1934)

Il processo di disintegrazione spontanea dei nuclei con emissione di particelle (cioè di radiazione) fu scoperto da Antoine **Henri Becquerel** nel 1896. Venne poi indicato con il termine di radioattività (1898) da Maria Sklodowska Curie, scopritrice del radio e premio Nobel per la Fisica e la Chimica

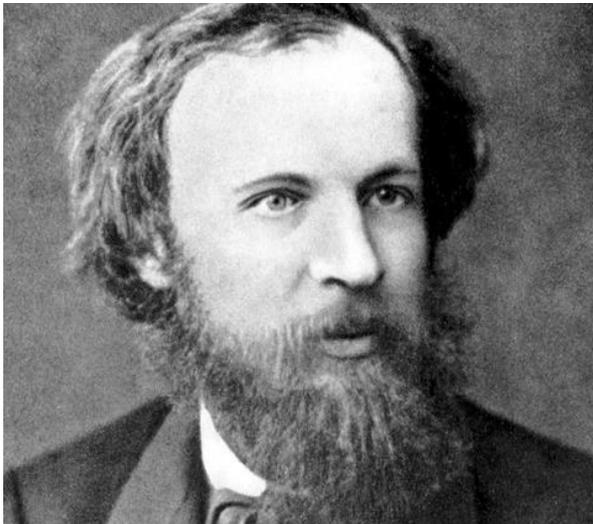


La trasformazione di un dato atomo radioattivo (radioisotopo) porta alla produzione di un altro atomo che, a sua volta, può essere anch'esso radioattivo. Alla fine delle trasformazioni tutti gli elementi radioattivi si trasformano in isotopi stabili

La radioattività: una proprietà della materia molto singolare

- La materia è costituita da elementi atomici primari che combinandosi e legandosi tra loro in diverso modo danno origine a un' innumerevole varietà di sostanze e strutture sotto forma di gas, liquidi e solidi.
- Tali elementi hanno a loro volta una propria struttura interna che ne determina le proprietà chimico-fisiche.

Tavola di Mendeleev



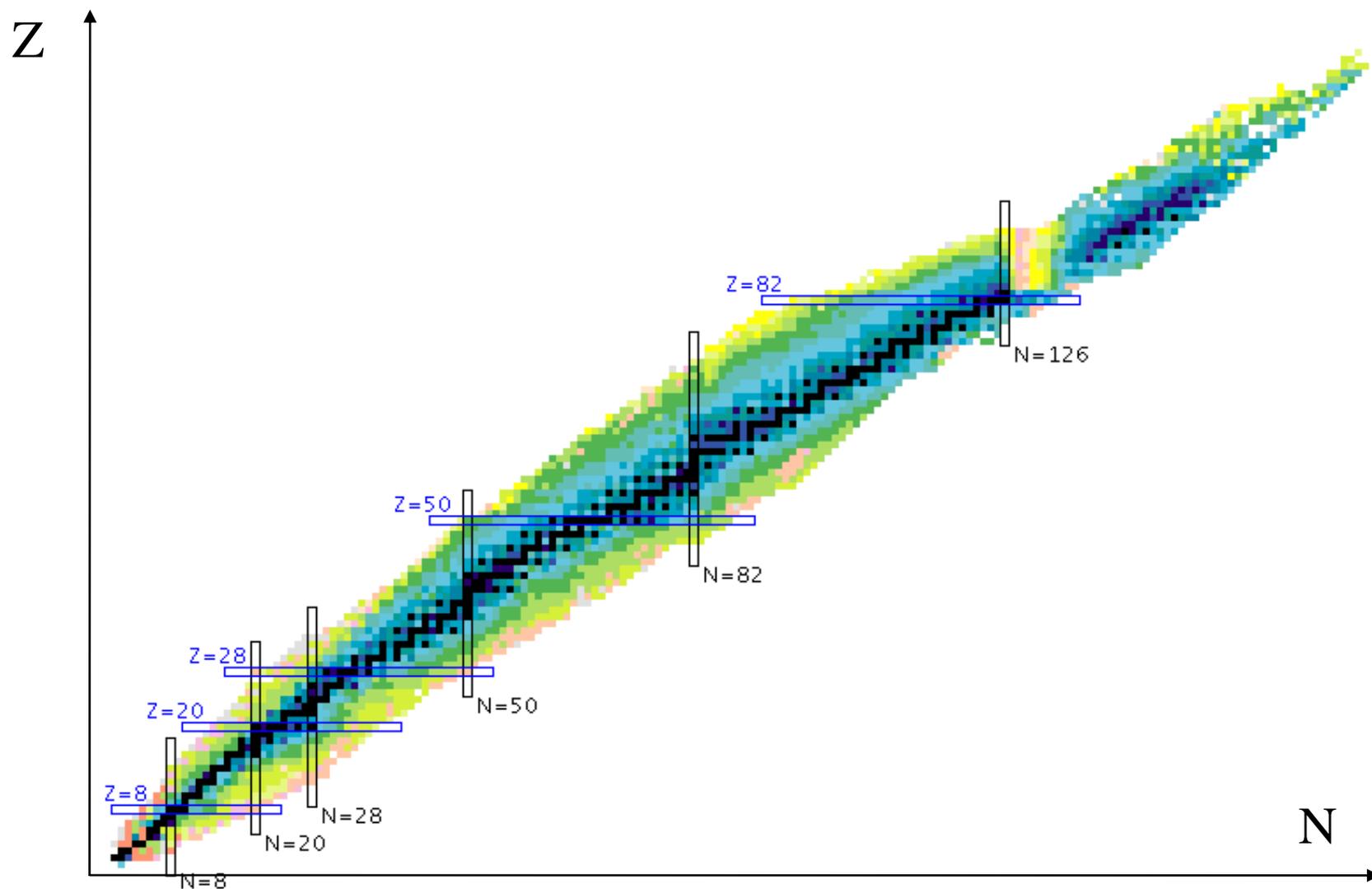
Group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

↓ Period

The Periodic Table of the Elements

1	2																		
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		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		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
Lanthanides			57 La	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		
Actinides			89 Ac	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		

La tavola dei nuclidi e la valle di stabilità



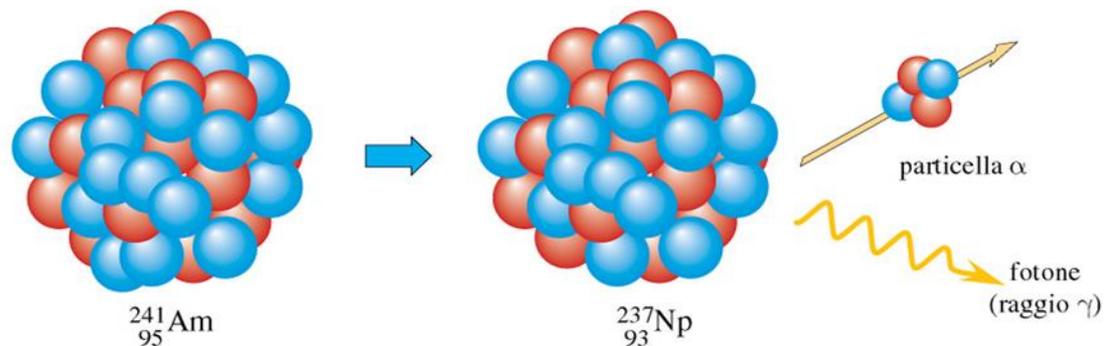
- In un nucleo stabile, le forze nucleari (attrattive) superano ampiamente le forze coulombiane (repulsive)
- Il motivo per cui i nuclei pesanti necessitano di più neutroni per essere stabili sta nel fatto che **le forze nucleari sono a corto range (10^{-13} cm)**, mentre quelle **coulombiane ad alto range (10^{-8} cm)**: per cui per tenere insieme un nucleo pesante, dove le forze repulsive sono elevate, ho bisogno di più “*colla nucleare*” (garantita dai neutroni, la cui presenza nel nucleo non aumenta la forza repulsiva coulombiana)

Radioattività e radiazioni

- Vi sono essenzialmente 3 tipi di radiazioni associate al decadimento radioattivo:
 - 1) La radiazione α
 - 2) La radiazione β
 - 3) La radiazione γ
- Per indicare questi fenomeni si usa anche il termine di **decadimento α , β , γ** , termine riferito al fatto che il nucleo che subisce delle trasformazioni

Decadimento alfa

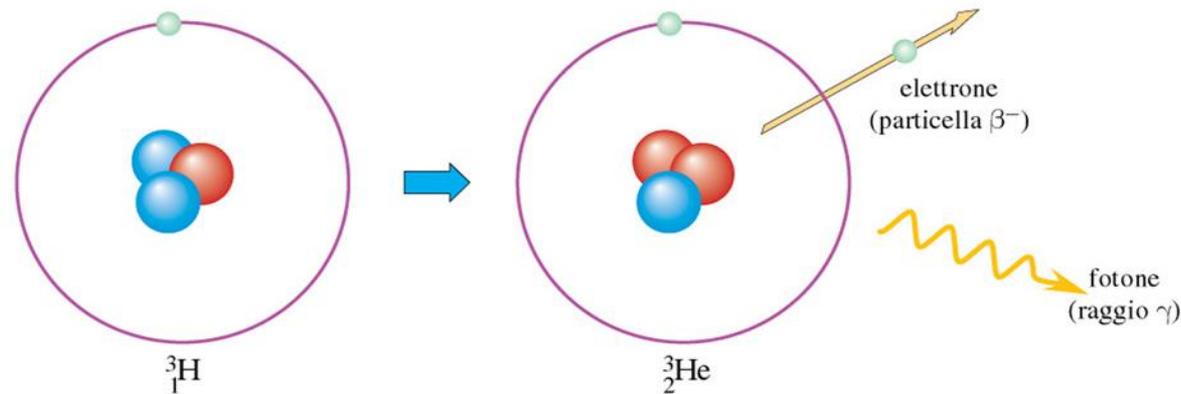
- Decadimento Alfa (α): Consideriamo un nucleo con numero atomico Z e numero di massa $A=Z+N$. In seguito ad un decadimento α , il nucleo emette una particella α , cioè un nucleo di elio composto da due protoni e due neutroni, e si trasforma in un nucleo diverso, con numero atomico $(Z - 2)$ e numero di massa $(A - 4)$
- Un esempio è il decadimento dell'Americio-241 in Nettunio-237.
- L'energia di una singola particella α è molto elevata (qualche MeV) ed ha un valore ben definito



Instabilità per decadimento α : $A > 200$ (con qualche eccezione)

Decadimento beta

- Decadimento Beta (β): Il nucleo emette un elettrone e un antineutrino e si trasforma in un nucleo con numero atomico **(Z + 1)** ma stesso numero di massa **A**. Un esempio è il decadimento del trizio (H-3) in elio (stabile).

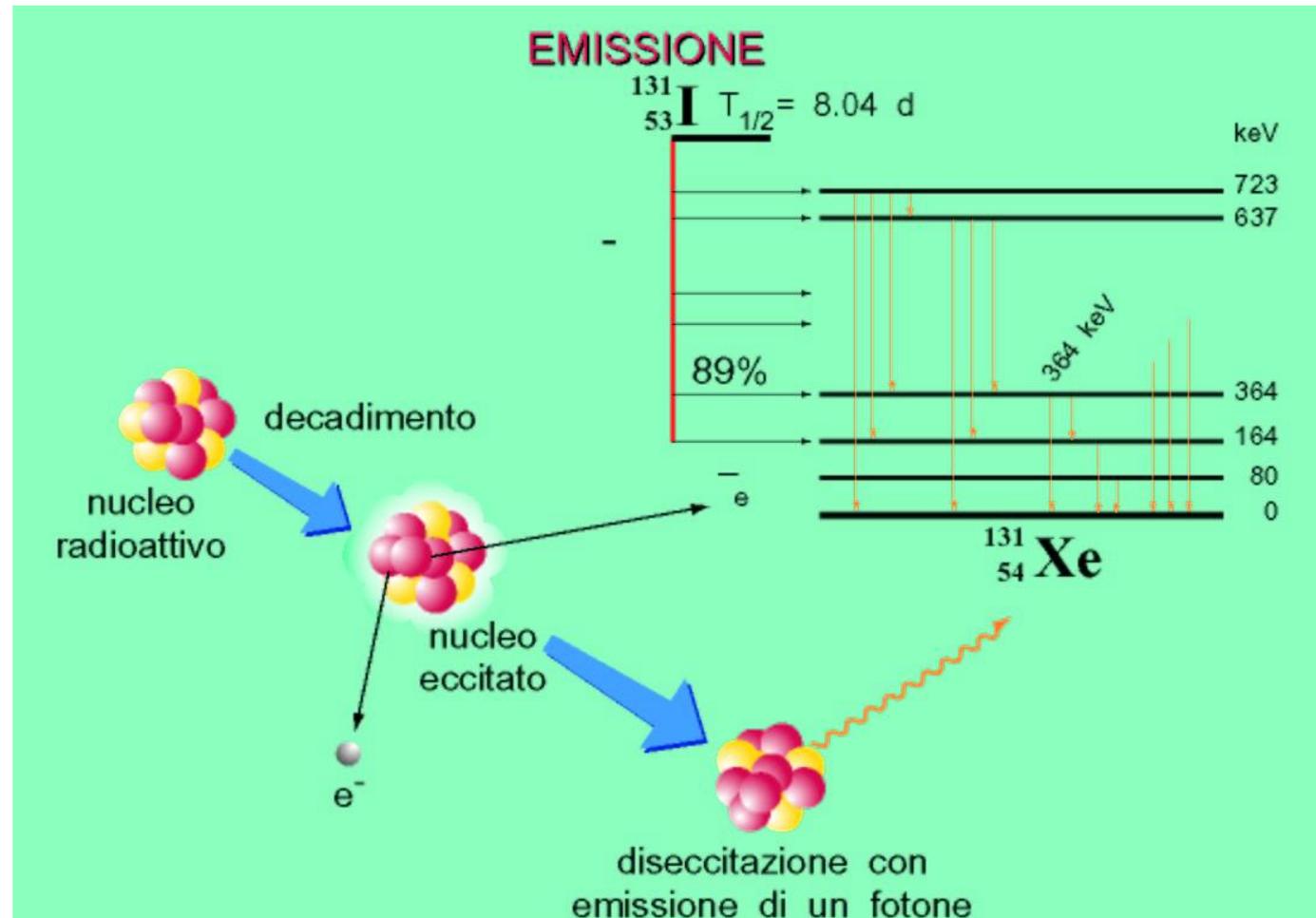


Come si vede il decadimento consiste nella **trasformazione di uno dei neutroni del nucleo di trizio in un protone!** L'energia della particella beta non ha un'energia ben definita ma varia con continuità da zero ad un valore max, caratteristico del radioisotopo.

Approssimativamente, $E_{\text{media}} = 1/3 E_{\text{max}}$

Decadimento (emissione) gamma

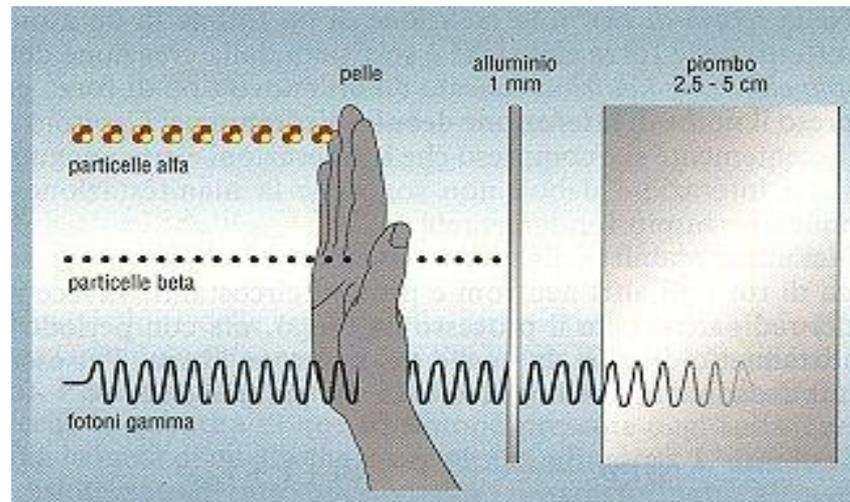
In questo caso il termine decadimento è abbastanza improprio: si dovrebbe forse dire **emissione γ** . Il nucleo che ha subito un decadimento (α o β) infatti non si trasforma ma passa semplicemente da uno stato eccitato a uno **stato di energia inferiore** emettendo un fotone ad altissima energia che vengono detti **radiazione gamma**



L'emissione di **radiazione gamma** (γ) segue di solito (a brevissima distanza di tempo) un decadimento alfa o beta

Potere penetrante delle radiazioni

- Le **radiazioni alfa**, per la loro natura, sono poco penetranti e possono essere completamente bloccate da un semplice foglio di carta.

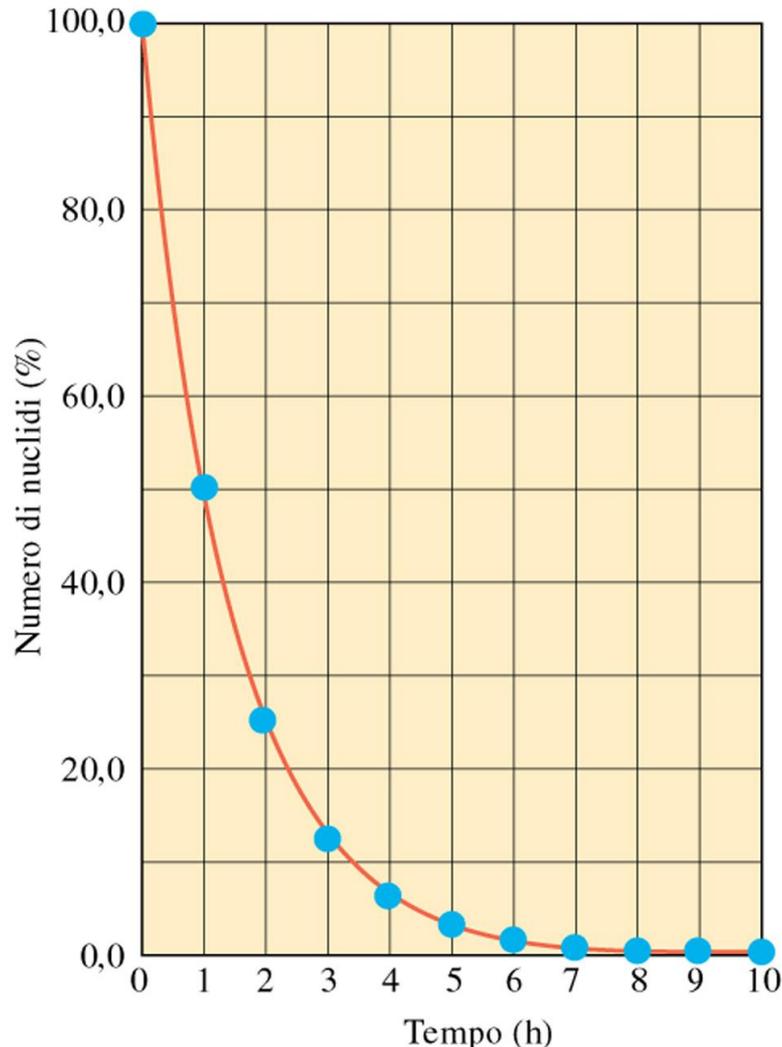


- Le **radiazioni beta** sono più penetranti di quelle alfa, ma possono essere completamente bloccate da piccoli spessori di materiali metallici (ad esempio, pochi millimetri di alluminio).
- Al contrario delle radiazioni alfa e beta, le **radiazioni gamma** sono molto penetranti, e per bloccarle occorrono materiali ad elevata densità come il piombo

Il decadimento radioattivo

- Un'importantissima proprietà comune a tutti i tipi di decadimento radioattivo è la cosiddetta legge esponenziale del decadimento radioattivo
- Venne scoperta sperimentalmente da Rutherford

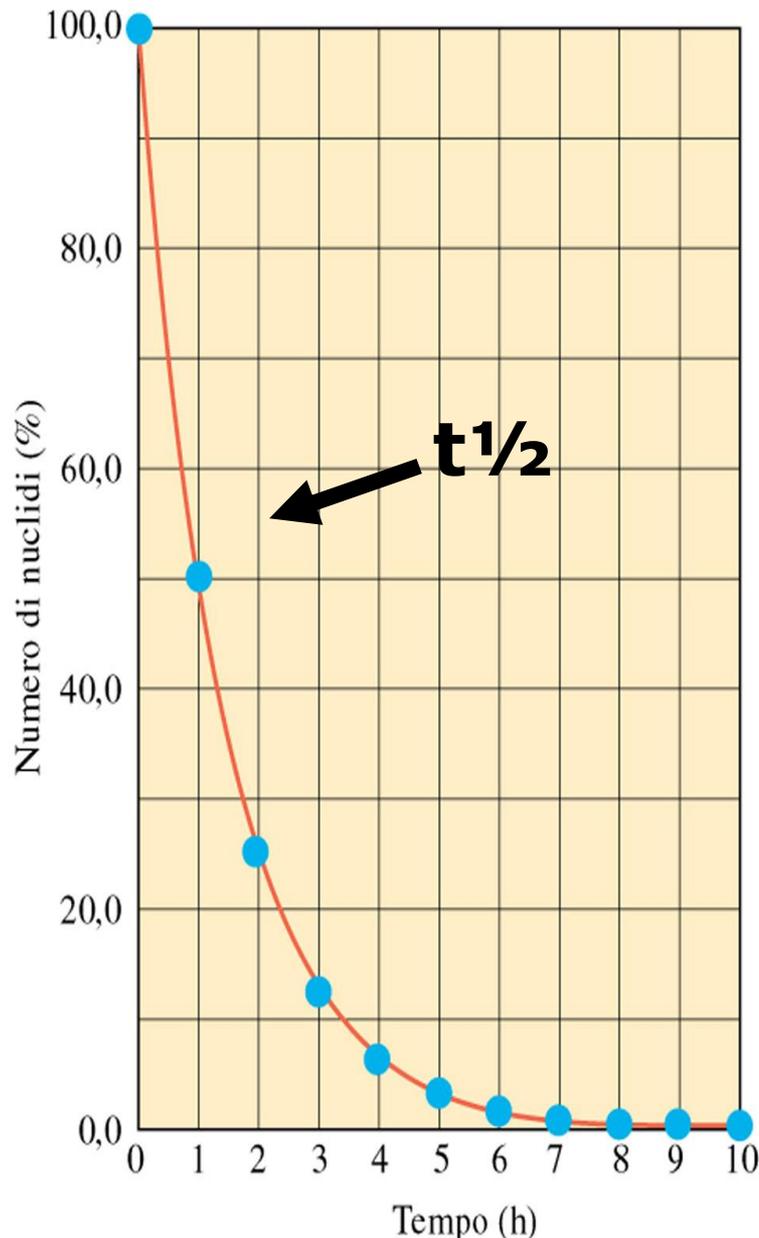
- Il numero di atomi di una sostanza radioattiva diminuisce nel tempo secondo una legge esponenziale:



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

Il parametro che caratterizza (e permette di distinguere i vari decadimenti radioattivi) è **la costante di decadimento λ**

Il significato fisico di λ è la probabilità nell'unità di tempo che un certo nuclide radioattivo decada



Per maggior praticità viene spesso usato un parametro, detto tempo di dimezzamento $t^{1/2}$, che altro non è che il tempo necessario affinché la quantità iniziale di sostanza radioattivi si dimezzi. E' quindi legato a λ dalla seguente relazione matematica:

$$t^{1/2} = \ln(2)/\lambda$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\ln(2) \cdot t / t^{1/2}}$$

Dopo circa 5-6 $t^{1/2}$ il numero di nuclidi si riduce pressoché a zero