

FISICA PER I BENI CULTURALI

II - MATERIA E INTERAZIONE CON LA RADIAZIONE

P. Sapia

Università della Calabria

a.a. 2009/10



Interazioni fondamentali

- **Gravitazionale**

- Debolmente attrattiva, tra tutte le particelle con massa
- A lungo raggio, domina a distanze astronomiche
- A distanze nucleari (10^{-15} m), intensità relativa $\sim 10^{-38}$

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

- **Elettromagnetica**

- Fortemente attrattiva/repulsiva, solo tra particelle cariche
- A lungo raggio, domina a distanze atomiche
- A distanze nucleari (10^{-15} m), intensità relativa $\sim 10^{-2}$

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2}$$

- **Nucleare debole**

- Responsabile dei decadimenti radiattivi, tra tutte le particelle
- A cortissimo raggio (10^{-15} m)
- A distanze nucleari (10^{-15} m), intensità relativa $\sim 10^{-13}$

- **Nucleare forte**

- Fortemente attrattiva, tra tutti i nucleoni
- A cortissimo raggio (10^{-15} m), domina a distanze nucleari
- A distanze nucleari (10^{-15} m), intensità relativa ~ 1
- Indipendente dalla carica
- Indipendente dalla coppia di nucleoni

$$F_n \approx \frac{e^{-\alpha R}}{R}$$



Quali sono di interesse (diretto) per i beni culturali?



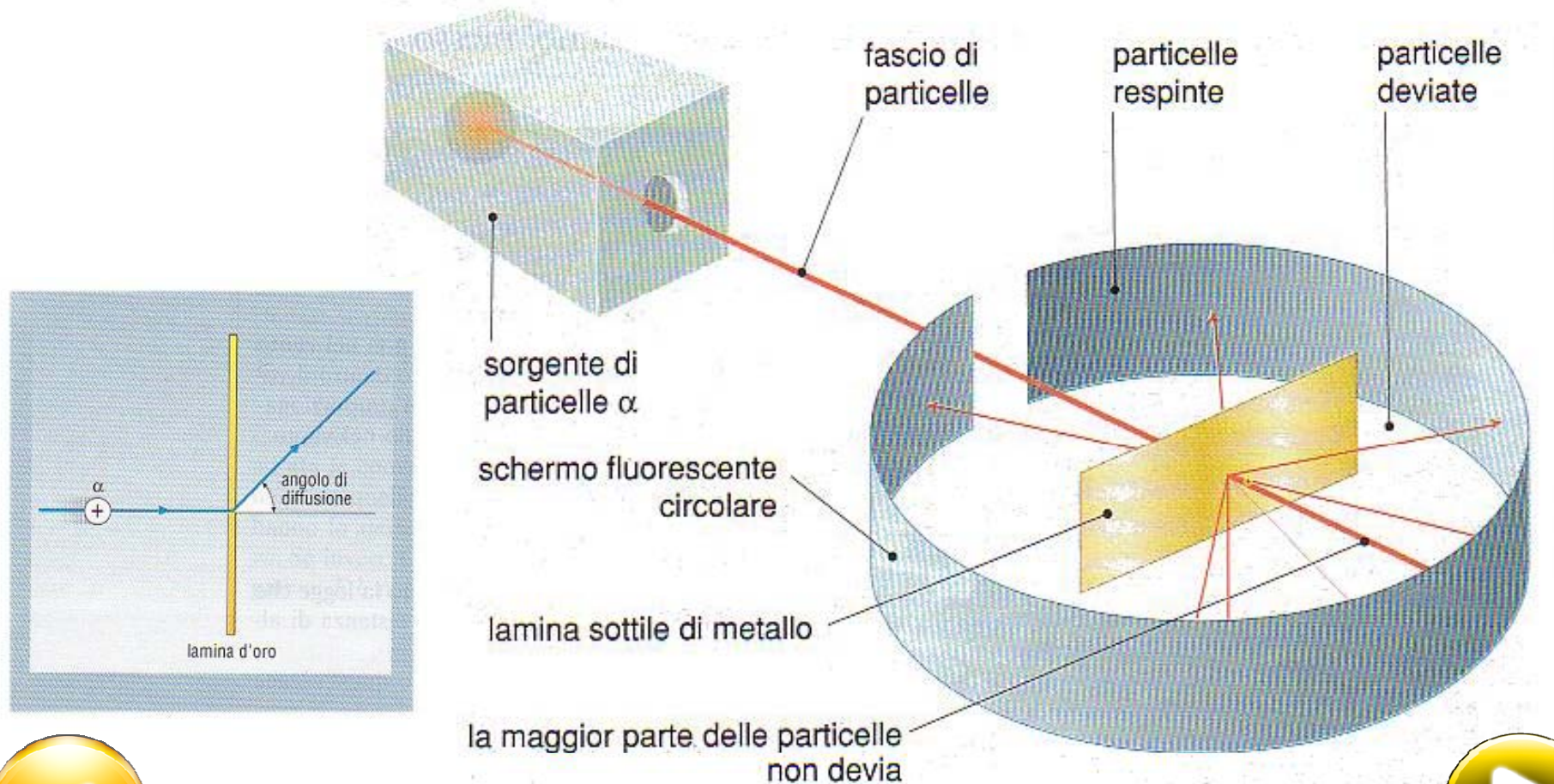
Modelli Atomici

- **Rutherford**
- **Bhor**
- **Meccanica quantistica moderna**



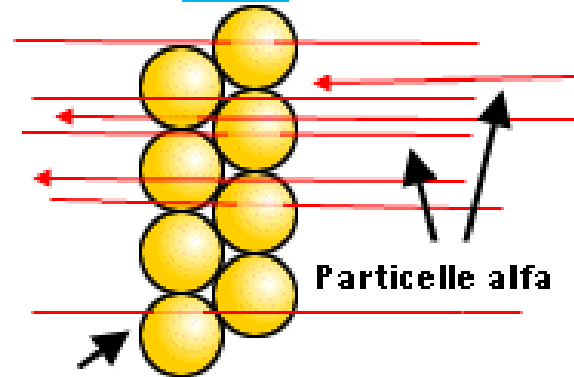
Esperimento di Rutherford

Nel 1911 Rutherford dimostrò che la massa dell'atomo è concentrata in un nucleo molto piccolo e propose il modello planetario delle orbite elettroniche. Infatti le poche deflessioni a grandi angoli osservate delle particelle α potevano essere spiegate solo supponendo che queste urtassero oggetti molto concentrati.

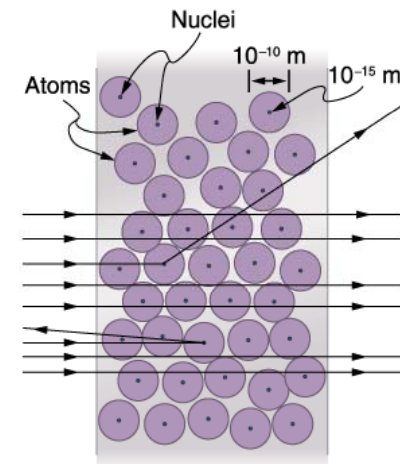
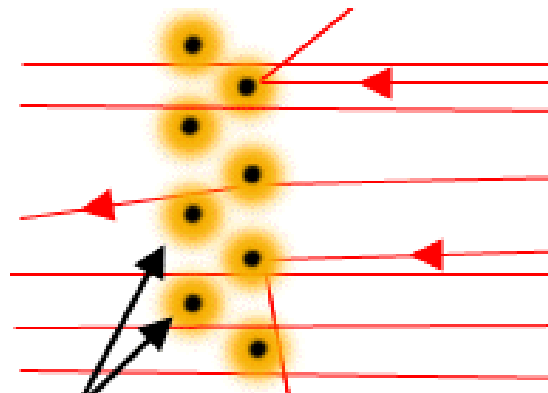


Esperimento di Rutherford

Dettaglio della lamina d'oro
secondo il vecchio modello atomico

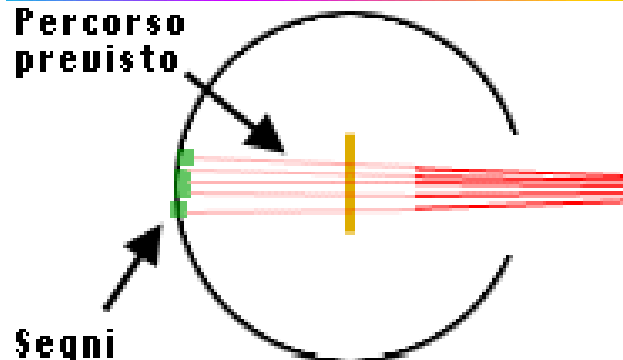


La teoria di un nucleo positivo
spiega la deviazione delle alfa



Il risultato atteso:

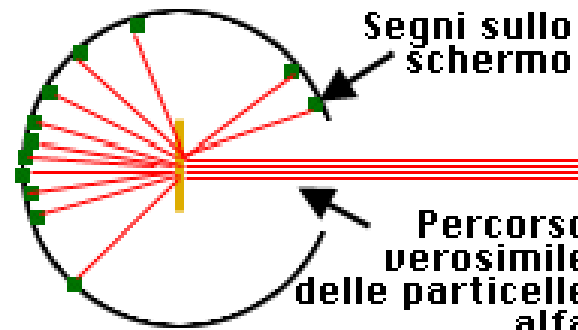
Percorso previsto



Interpretazione del risultato

Segni sullo schermo

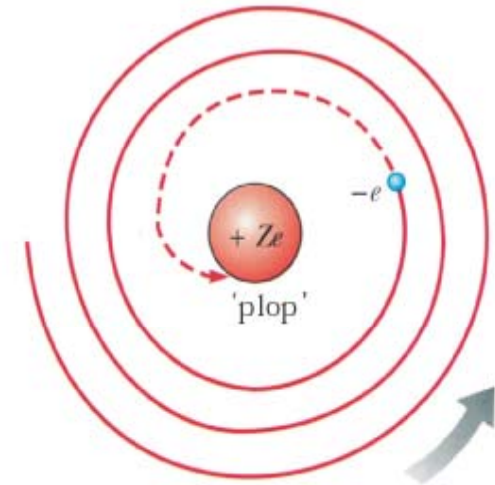
Percorso verosimile delle particelle alfa



Limiti modello di Rutherford

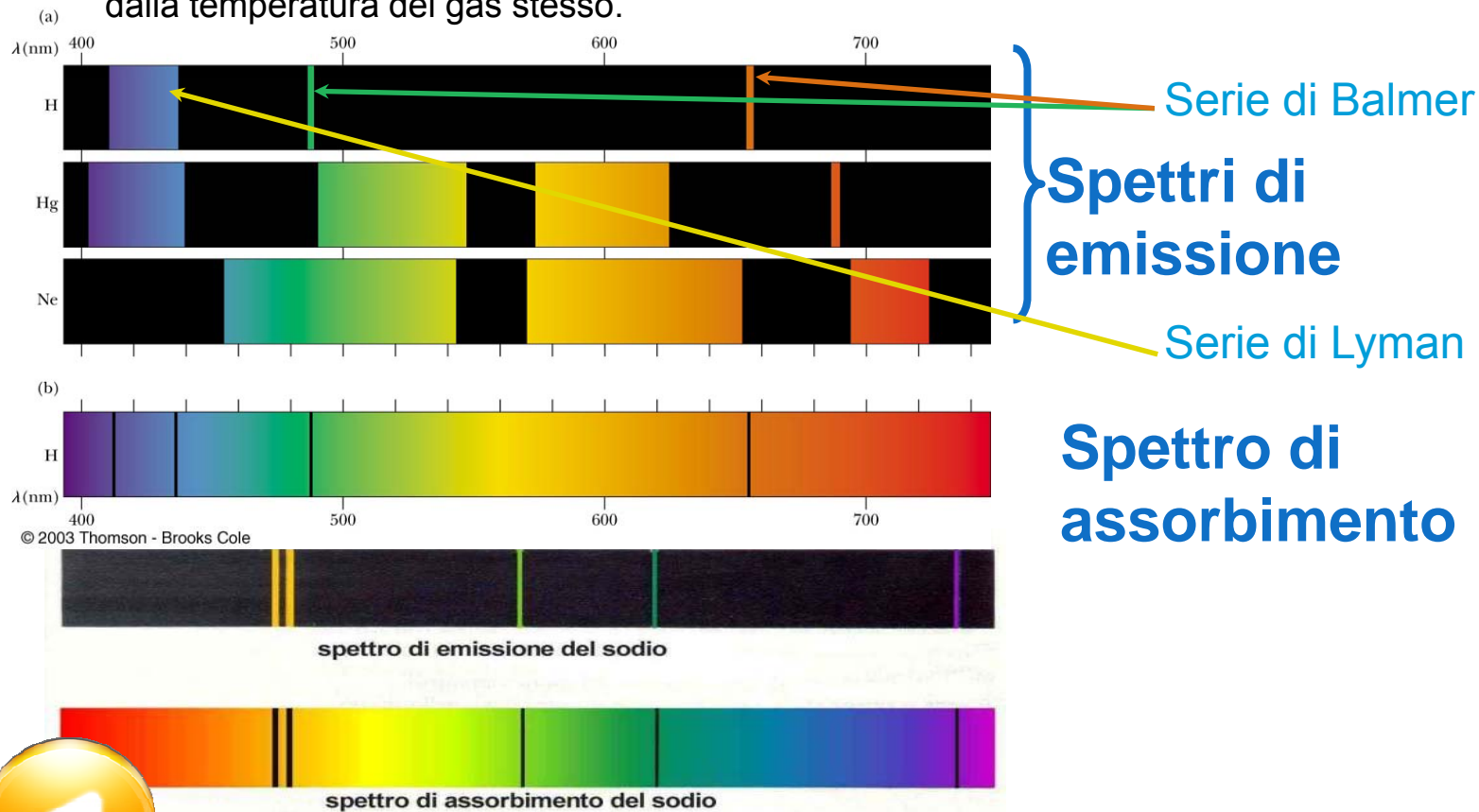
Il modello classico di Rutherford non è comunque soddisfacente perché non spiega:

- La stabilità dei nuclei atomici (gli elettroni sulle orbite, come tutte le particelle cariche accelerate, dovrebbero irraggiare perdendo energia e portandosi su orbite sempre più basse fino ad essere “risucchiati” dal nucleo);
- Le righe degli spettri di emissione ed assorbimento degli atomi, già osservati in spettroscopia fin dal XIX secolo, che mostrano come gli elettroni possono assorbire e rilasciare fotoni solo a frequenze (e quindi energie) ben definite.



Spettri di emissione dei gas

- Applicando una tensione tra due elettrodi in un tubo pieno di un gas a bassa pressione si osserva, una scarica elettrica con emissione di luce.
- L'analisi spettroscopica mostra che la luce non è emessa su tutto lo spettro visibile ma solo a frequenze ben determinate e discrete.
- Analogamente si osserva che lo stesso gas assorbe alle stesse frequenze, se illuminato con luce bianca.
- Le righe osservate sono caratteristiche del gas utilizzato, non dipendono invece dalla pressione o dalla temperatura del gas stesso.

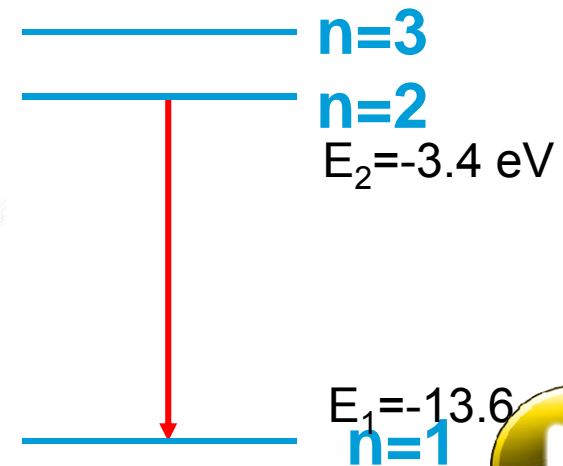
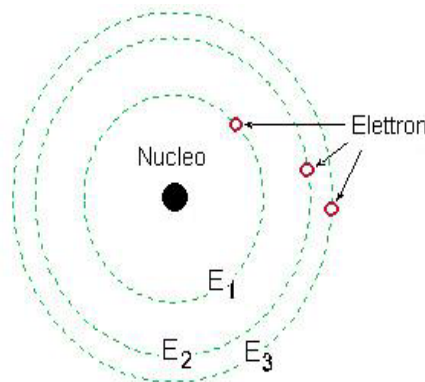


Modello atomico di Bohr

- Per risolvere i problemi posti dal modello di Rutherford, Bohr nel 1913 propose un modello **semiclassico** di atomo in cui gli elettroni potevano “orbitare” intorno al nucleo solo con energie costanti e discrete (quindi quantizzate!), ovvero solo a “distanze” discrete dal nucleo.
- I livelli energetici dell’elettrone nel modello di Bohr sono dati da $E_n = -13.6 \text{ eV}/n^2$
- Gli elettroni in questo modello non irradiano (orbite stazionarie) se non passando da un’orbita all’altra, ovvero da un livello di energia quantizzato ad un altro:
 - un fotone viene emesso quando un elettrone “salta” da un’orbita ad alta energia ad una a più bassa energia, con frequenza ν tale che $\Delta E = |E_i - E_f| = h\nu = E_\gamma$ (energia del fotone emesso);
 - un fotone viene assorbito quando un elettrone “salta” da un’orbita a bassa energia ad una ad energia più alta, con frequenza ν tale che $\Delta E = |E_i - E_f| = h\nu = E_\gamma$ (energia del fotone assorbito).
- Utilizzando l’equivalenza tra energia e lunghezza d’onda (derivante dalla teoria corpuscolare della luce) $E = hc/\lambda = h\nu$, si possono così interpretare le lunghezze d’onda osservate per le serie spettroscopiche dell’idrogeno, l’energia di ionizzazione e l’eccitazione degli elettroni negli atomi.
- Nasce così la prima teoria quantistica dell’atomo.

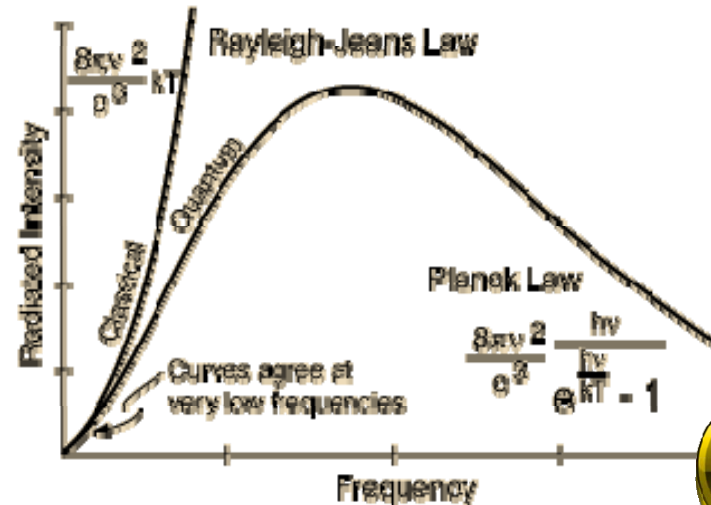
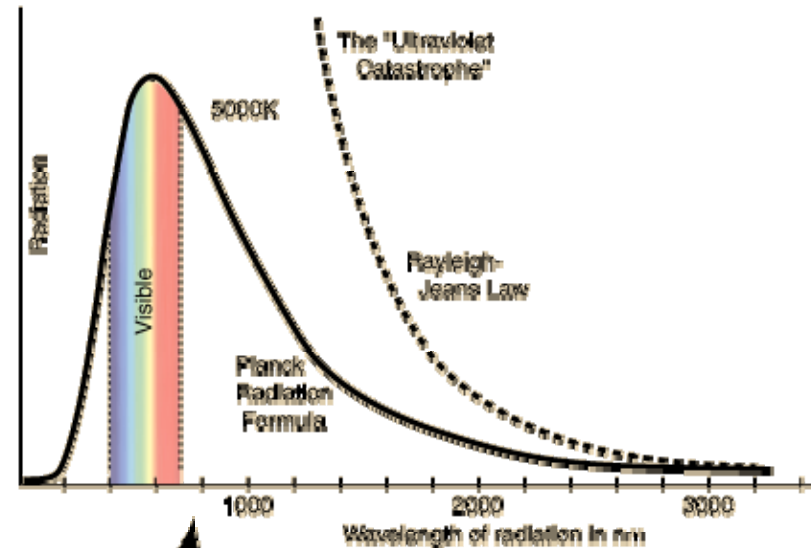
$$E_{\text{fotone}} = hcR \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$E_{\text{fotone}} = 13.6 \text{ eV} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

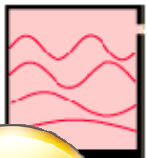


Emissione di corpo nero

- Un “corpo nero” è una cavità che assorbe perfettamente tutta la radiazione incidente ed irradia energia a frequenze caratteristiche del corpo stesso.
- La teoria classica dell’emissione di corpo nero (legge di Stefan-Boltzmann $I = P/S = \sigma \cdot T^4$, legge di Wien $\lambda_{\max} \cdot T = \text{cost}$, distribuzione dei modi occupati uniforme) non può spiegare la curva di emissione, osservata sperimentalmente alla fine del XIX secolo (catastrofe ultravioletta).



Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory



	#Modes per unit frequency per unit volume	Probability of occupying modes	Average energy per mode
CLASSICAL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Equal for all modes	kT
QUANTUM	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	Quantized modes require $h\nu$ energy to excite upper modes, see probable	$\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{RT}} - 1}$

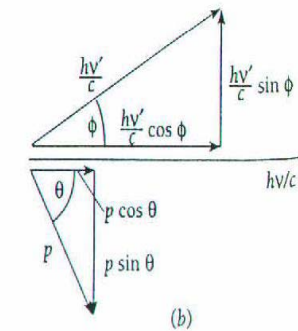
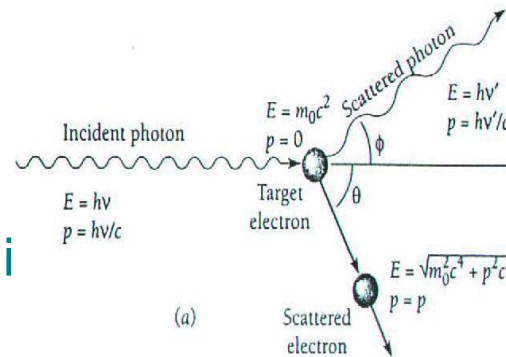
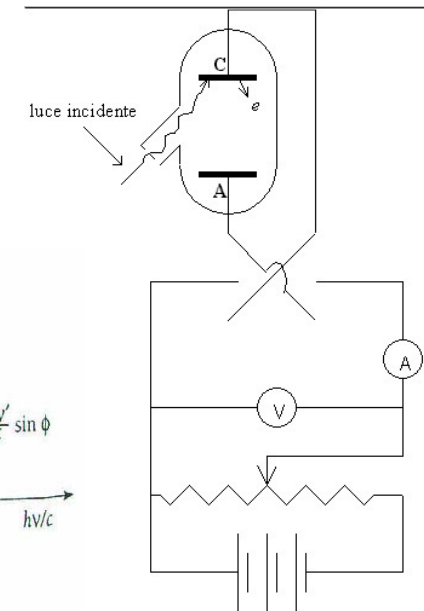


Natura corpuscolare delle luce

Un altro limite interpretativo della teoria classica è l'effetto fotoelettrico (la luce incidente su una lamina metallica ne estrae elettroni, la cui energia non dipende dall'intensità della luce incidente).

La teoria classica non permette di interpretare nemmeno l'effetto Compton (urto elastico di un fotone su di un elettrone).

Nel 1900 Planck propose che la luce avesse natura corpuscolare ed associò ad ogni fotone l'energia $E = h\nu$ (quantizzazione dell'energia), dove h è la costante di Planck. Questa teoria permise quindi di spiegare correttamente la curva di emissione del corpo nero, l'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton.



$$h = 6.626\ 0693(11) \times 10^{-34} \text{ Js.}$$

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi},$$

$$\hbar = 1.054\ 571\ 68(18) \times 10^{-34} \text{ Js}$$



Quantizzazione orbitali (ed ENERGIA)

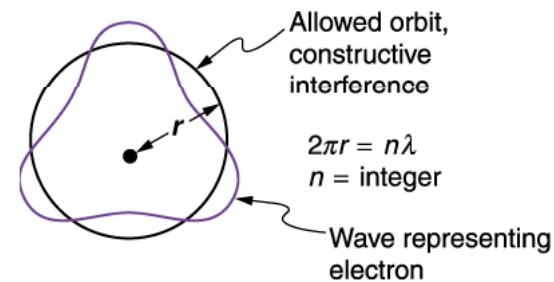
Sfruttando questa relazione $E = h\nu$, poichè $\nu = c/\lambda$ ed $E = pc = mvc$, De Broglie nel 1923 ipotizzò che anche le particelle (quali gli elettroni) avessero natura ondulatoria, con lunghezza d'onda $\lambda = h/mv$.

Quindi gli elettroni possono occupare orbite atomiche solo se queste comportano un numero intero di lunghezze d'onda **(b)**, ossia se possono essere espresse come soluzioni di onde stazionarie **(a)**. Le onde con lunghezze d'onda che non soddisfano questo principio non sono invece permesse **(c)**.

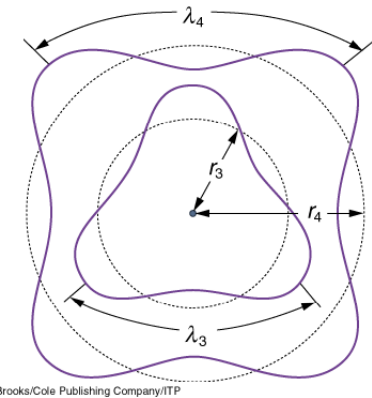
Le orbite degli atomi sono quindi quantizzate e questo è equivalente a quantizzare il momento angolare, ovvero ad imporre che sia un multiplo intero di una certa quantità, in questo caso \hbar : $L = m_e v r = n\hbar/2\pi = n\hbar$



(a)

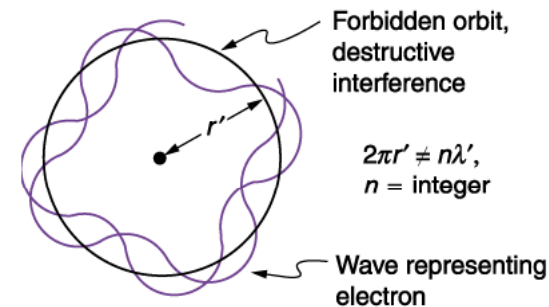


(b)



©Brooks/Cole Publishing Company/ITP

©Brooks/Cole Publishing Comp

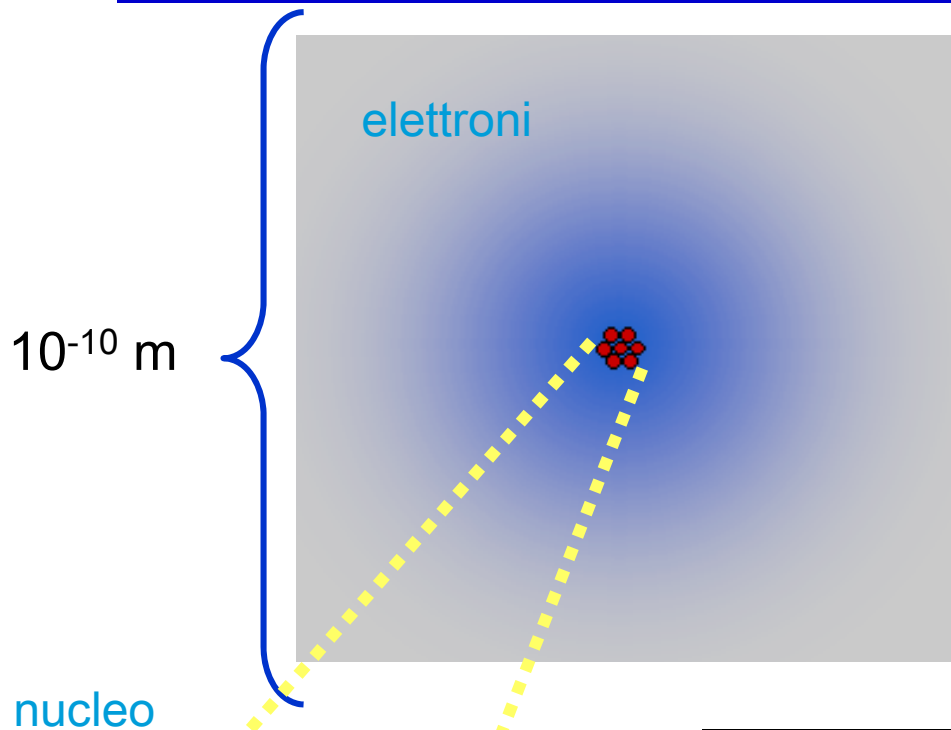


(c)

©Brooks/Cole Publishing Company/ITP



Atomi e nuclei

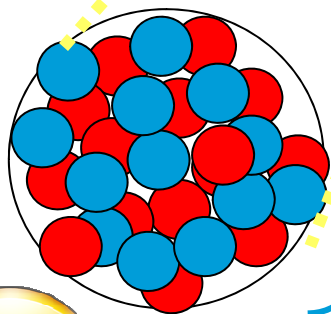


$R_{\text{atomo}} = 10^5 \cdot R_{\text{nucleo}}$
 (la materia è essenzialmente "vuota", il nucleo è come un pallone in un campo di 10 km di raggio!)

$M_{\text{atomo}} \approx M_{\text{nucleo}}$
 ($M_p \approx M_n \sim 2000 \cdot M_e$)

nucleo

	protone	neutrone	elettrone	atomo H
M (kg)	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	$1,6750 \cdot 10^{-27}$	$9,109 \cdot 10^{-31}$	$1,6735 \cdot 10^{-27}$



10^{-15} m

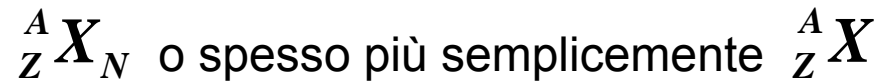
protoni • e neutroni •

legati tramite forze nucleari (energie di legame $\sim 10^7$ volte maggiori delle energie di legame chimico (dovute agli elettroni))



Nuclidi

Nuclide: nucleo identificato da un numero fissato di protoni e di neutroni (nucleoni). Viene indicato come:

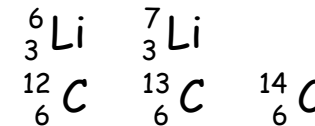
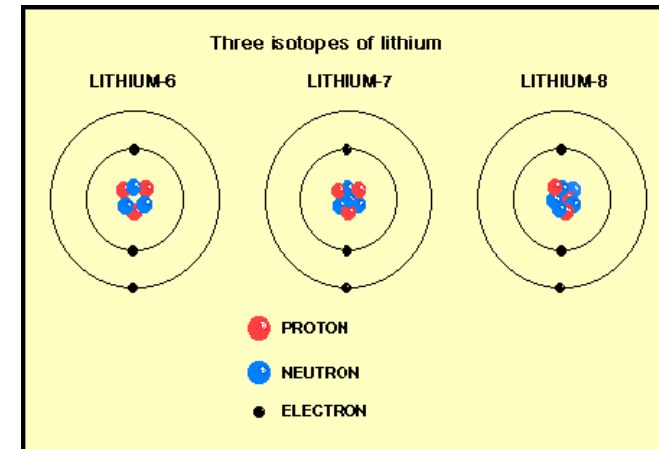


- X : indica l'elemento chimico

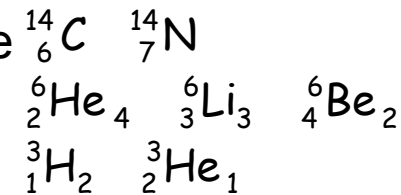
- Z : numero atomico dell'elemento = numero di protoni nel nucleo (\equiv numero di elettroni atomici)

- A : numero di massa del nucleo, cio\`e il numero totale di protoni (Z) e neutroni (N) $\rightarrow A=Z+N$

- N : numero di neutroni $\rightarrow N = A-Z$



Isotopi
(stesso Z)



Isobari
(stesso A)

Name	Symbol	Atomic No.	No. of Neutrons	Mass No.
Hydrogen	${}^1_1 \text{H}$	1	0	1
Helium-4	${}^4_2 \text{He}$	2	2	4
Lithium-7	${}^7_3 \text{Li}$	3	4	7
Beryllium-9	${}^9_4 \text{Be}$	4	5	9
Boron-11	${}^{11}_5 \text{B}$	5	6	11
Aluminum-27	${}^{27}_{13} \text{Al}$	13	14	27
Iron-56	${}^{56}_{26} \text{Fe}$	26	30	56
Silver-108	${}^{108}_{47} \text{Ag}$	47	61	108
Gold-197	${}^{197}_{79} \text{Au}$	79	118	197
Uranium-238	${}^{238}_{92} \text{U}$	92	146	238



Massa atomica

Massa del nucleo: $M(A,Z) = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n$

$$M(A,Z) \simeq M(A) = Am_p \quad (\text{poiché } m_p \simeq m_n, m_e \sim 0)$$

Peso atomico

(riferito all'idrogeno): $p_A = \frac{M}{M_H}$

Unità di massa atomica
(riferita al carbonio): $1\text{amu} = \frac{M_{C12}}{12}$

$$E = mc^2$$

$$1 \text{ MeV} = 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$c^2 = 8.988 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.782 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

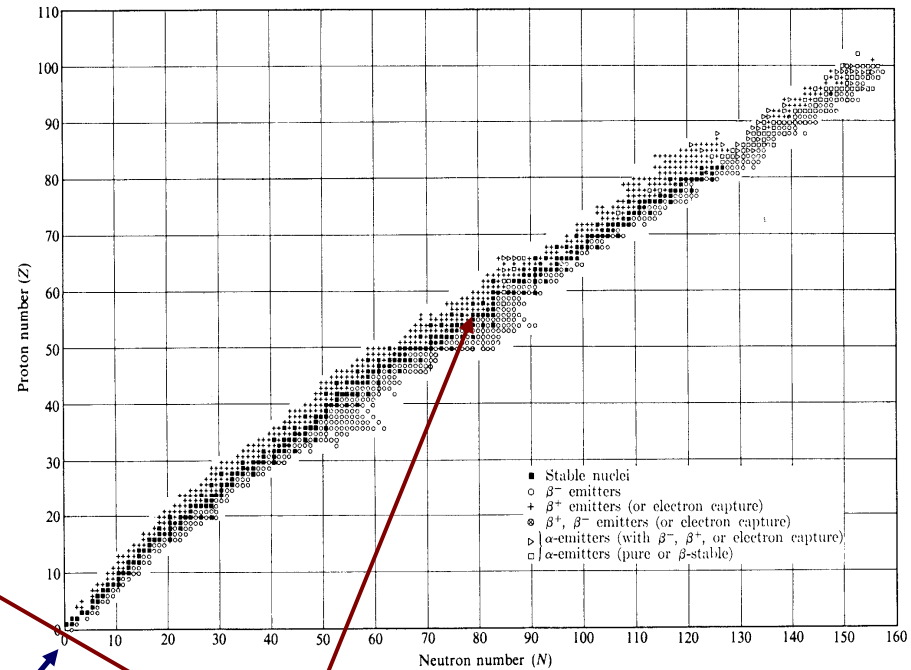
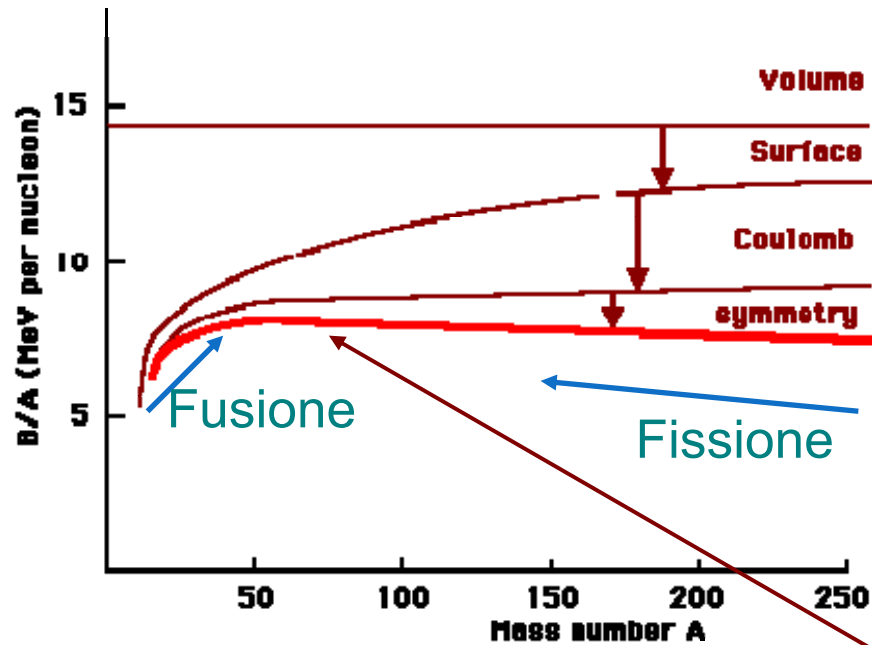
Unità di massa atomica (espressa come energia):

$$1 \text{ amu} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ amu} \cdot c^2 = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 8.988 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1.492 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 931.5 \text{ MeV}$$



Stabilità dei nuclei



composizione tipica dei nuclei stabili a basso Z: $N \approx Z$

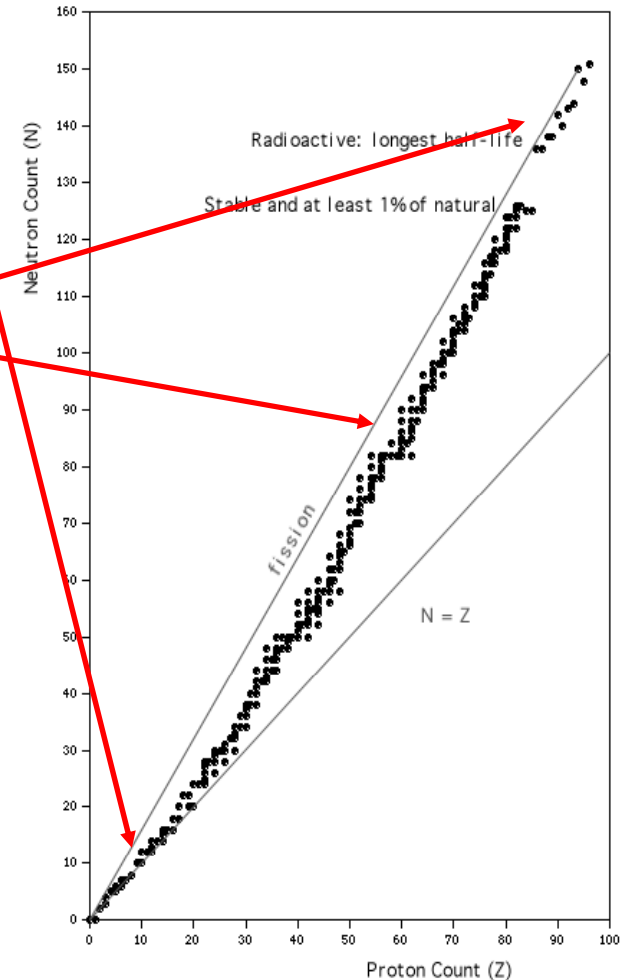
zona di massima stabilità dei nuclei (energia di legame massima)



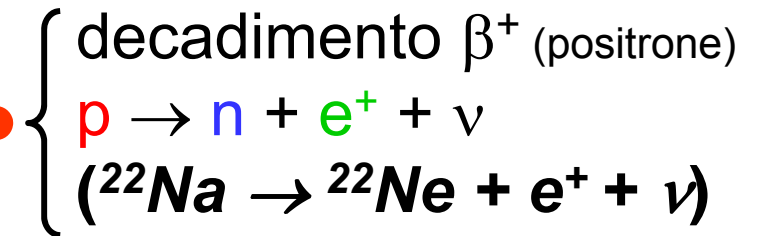
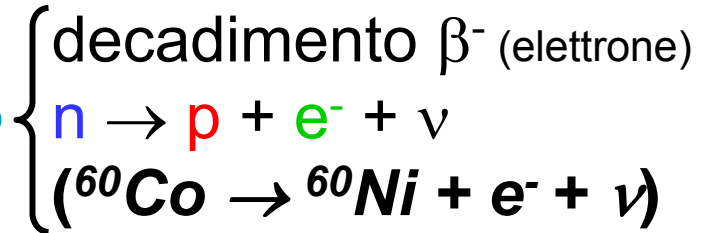
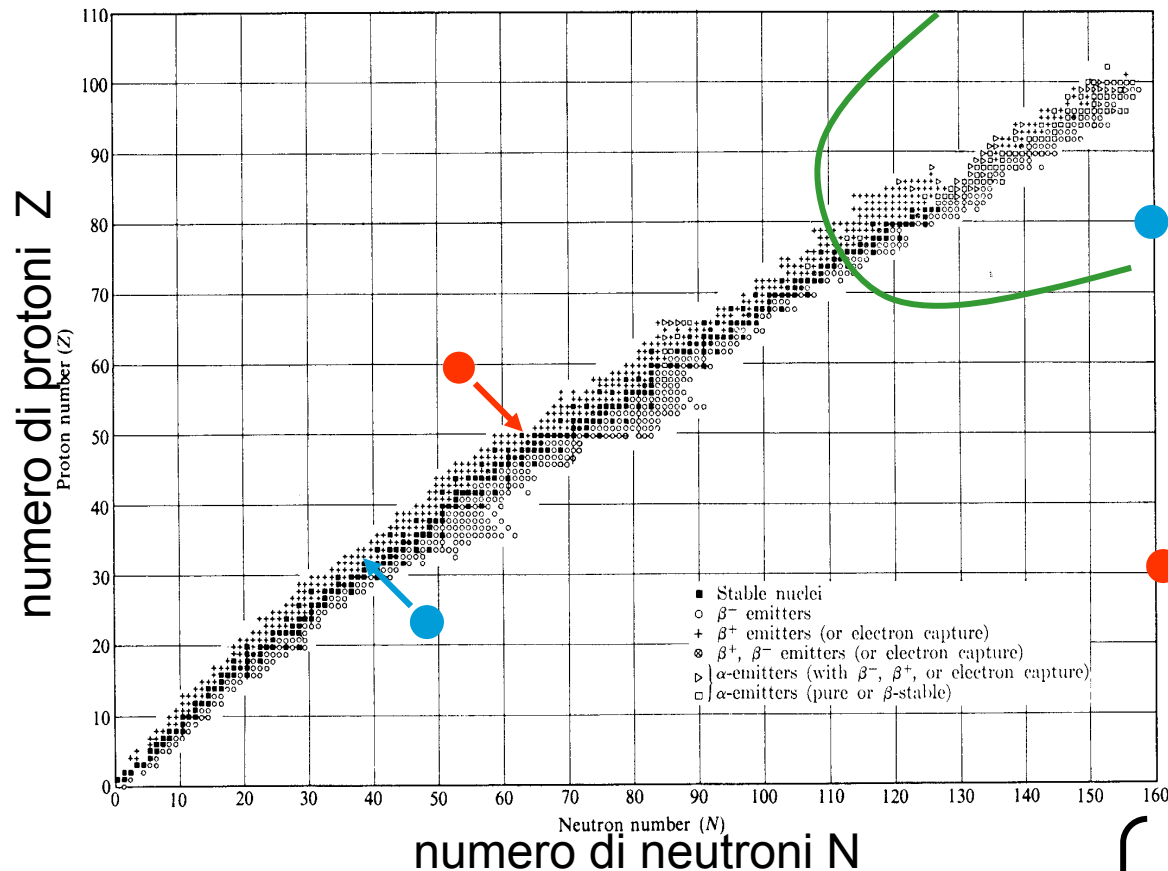
Nuclidi stabili noti

- $N \sim Z$ per atomi leggeri (basso Z)
- Eccesso di neutroni per Z più elevati
- Instabili (radiattivi a vita media lunga) per $Z > 83$ (Bi)

I nuclidi instabili decadono con catene di decadimenti che li riportano nella zona di stabilità



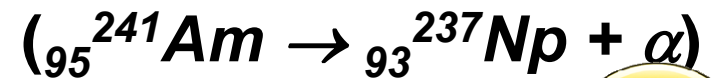
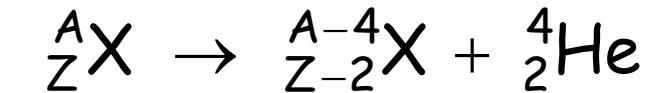
Decadimenti radioattivi



decadimento del neutrone $n \Rightarrow p + \beta^- + \nu_e$

- instabile se non legato in un nucleo
- decadimento β
- vita media $\tau \approx 15$ min

decadimento α (nucleo He)

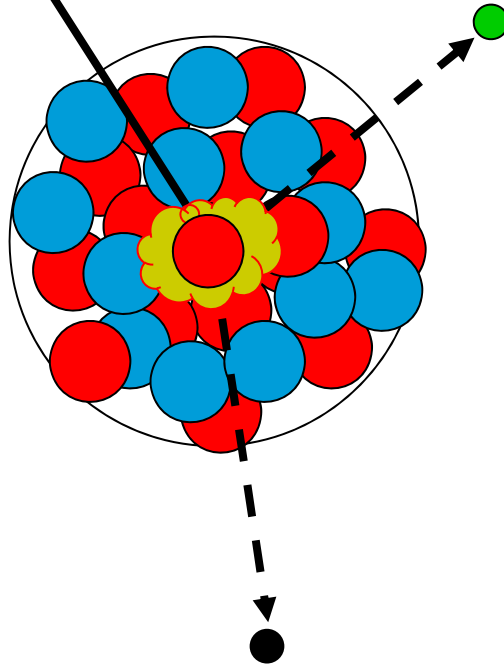


emissione γ ${}_Z^A X^* \Rightarrow {}_Z^A X + \gamma$



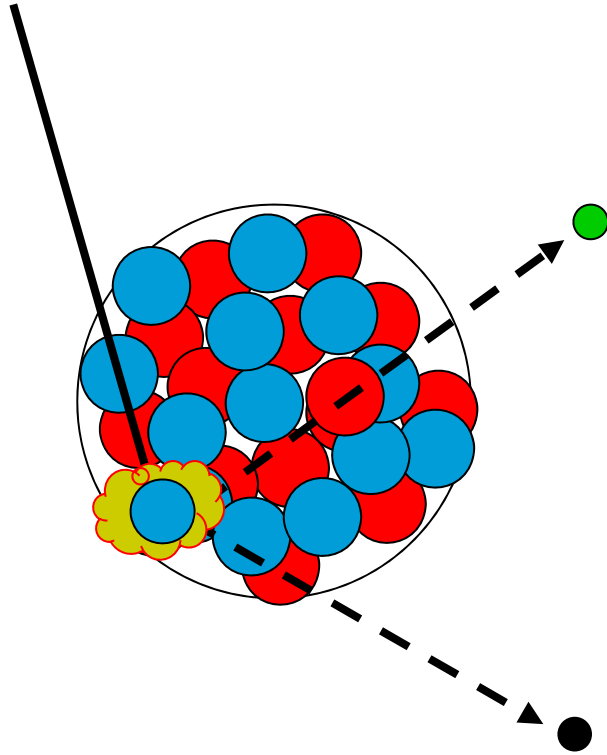
Decadimento β^-

Viene emessa una particella β^- ovvero un elettrone

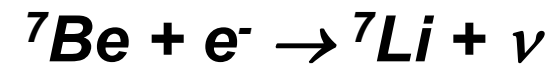
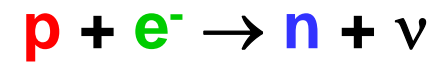
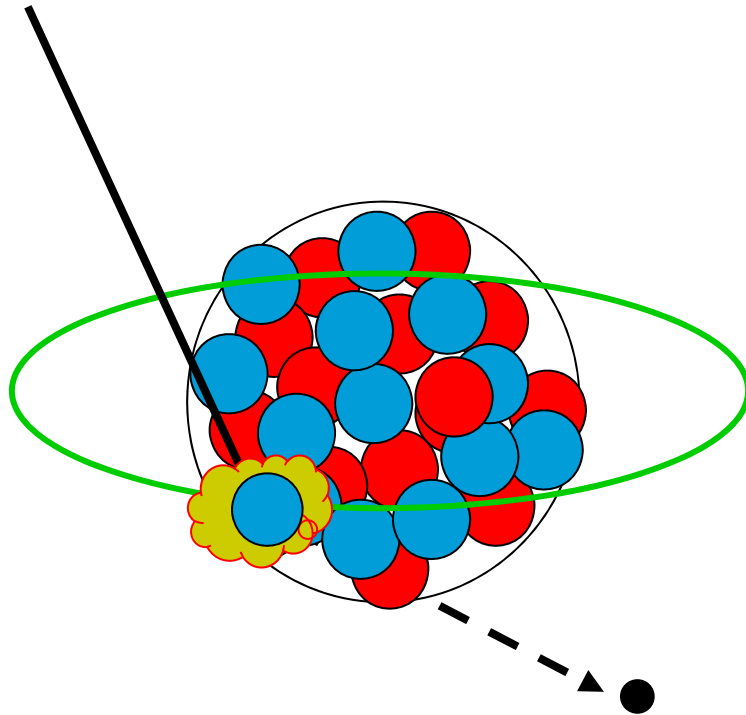


Decadimento β^+

Viene emessa una particella β^+ ovvero un positrone

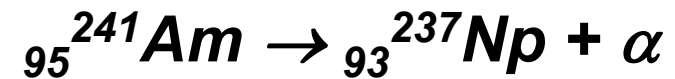
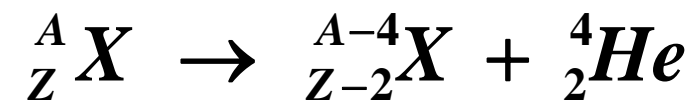
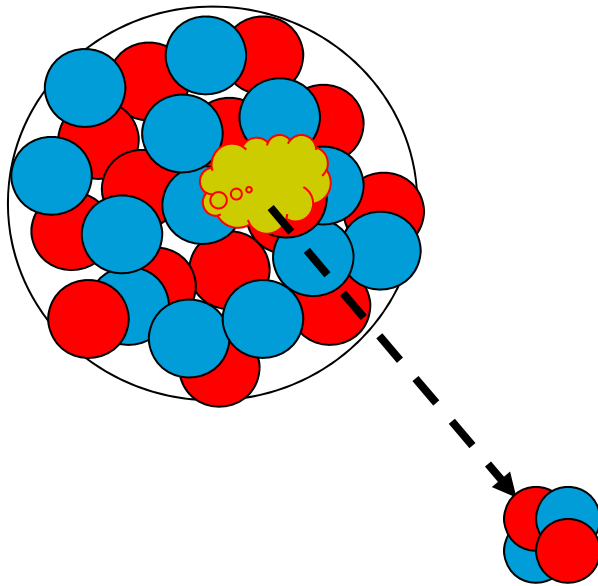


Cattura elettronica



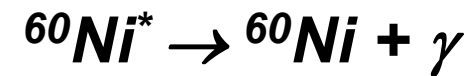
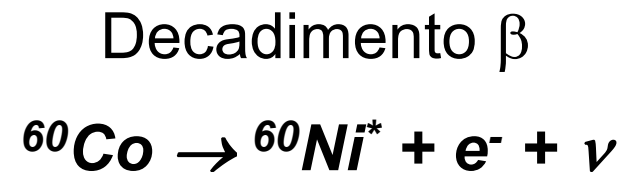
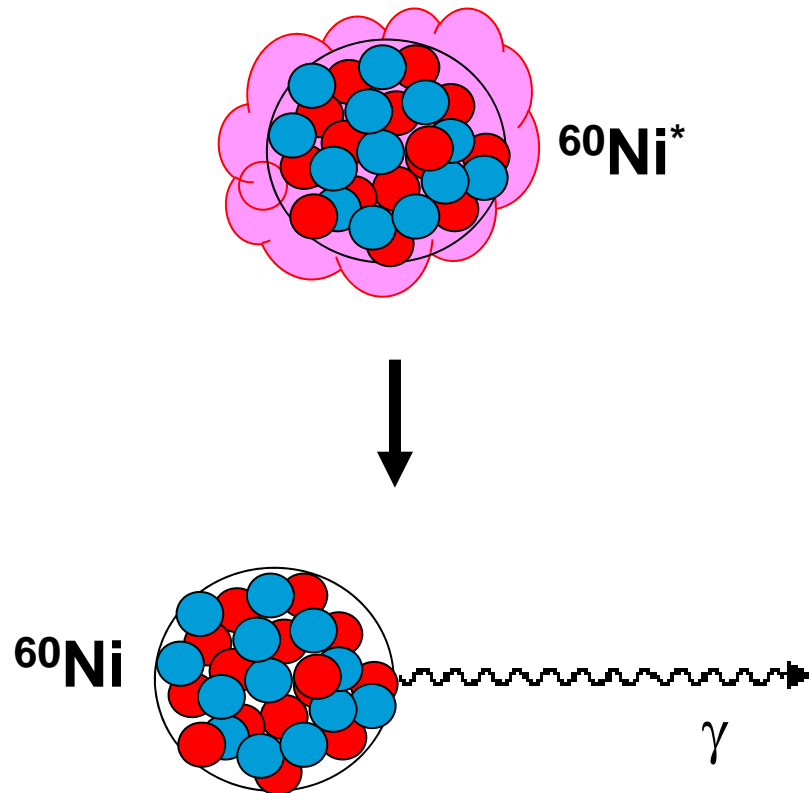
Decadimento α

Viene emessa una particella α ovvero un nucleo di Elio ${}^4_2\text{He}$



Emissione γ

A volte il nucleo "figlio" viene creato in un stato eccitato, da cui si diseccita emettendo radiazione gamma.



Legge del decadimento radioattivo

$$\frac{dN_p}{dt} = -\lambda N_p(t)$$

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

N_p = numero di nuclei del precursore ("parents") non ancora decaduti al tempo t

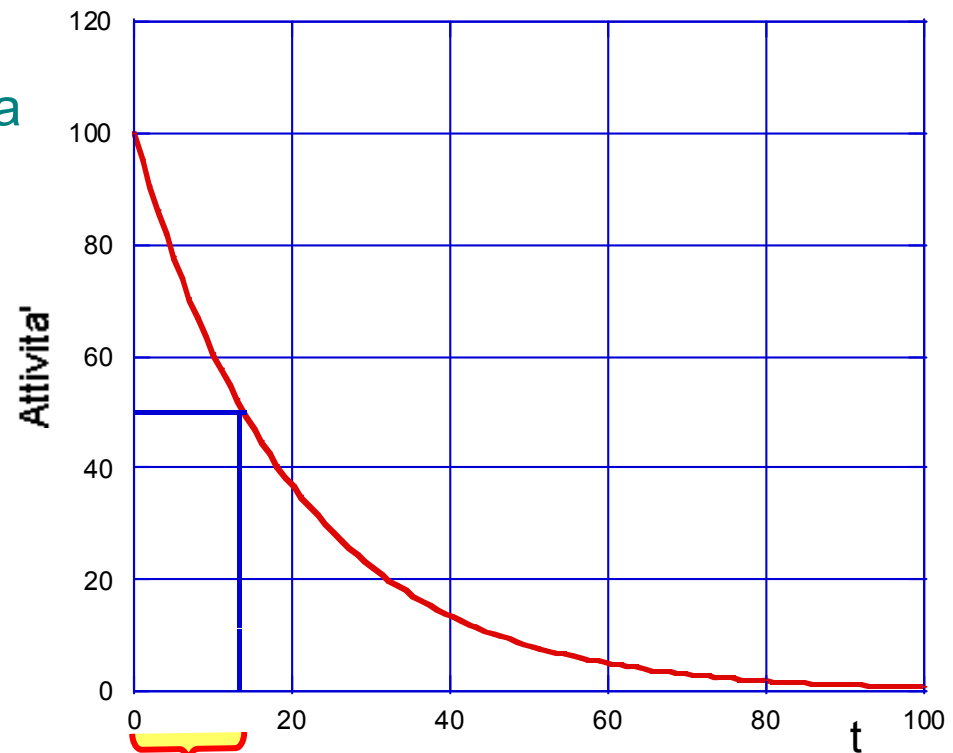
N_0 = numero di nuclei iniziali del nuclide precursore

λ = costante di decadimento (probabilità di decadimento nell'unità di tempo)

Si definisce attività $R(t)$ la frequenza di decadimento (il numero di decadimenti nell'unità di tempo)

$$R(t) = \left| \frac{dN_p(t)}{dt} \right| = N_0 \lambda \cdot e^{-\lambda t} = N_p(t) \cdot \lambda$$

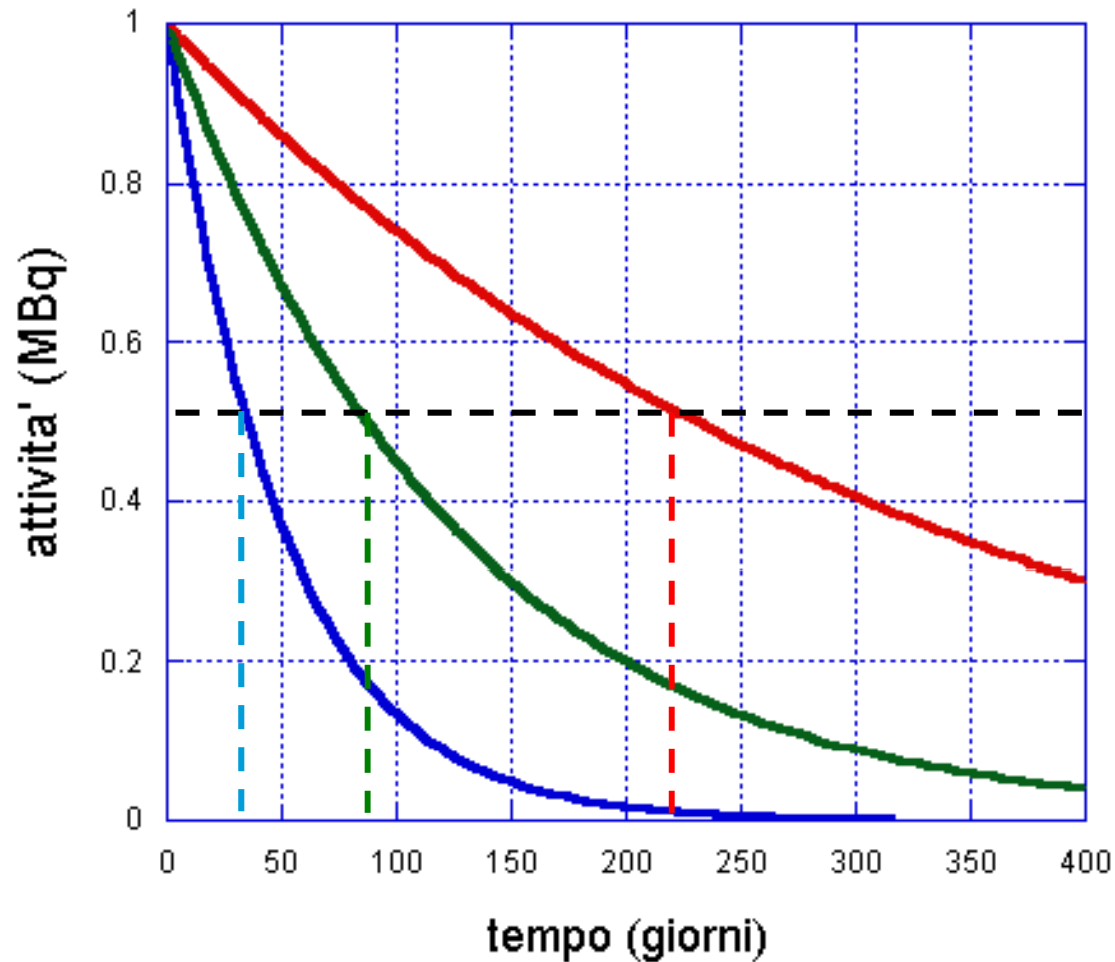
$\tau = 1/\lambda$ è la vita media del nuclide (tempo in cui il numero di nuclei del precursore $N_p(t)$ si riduce ad $1/e$ del valore iniziale N_0) $\rightarrow N_p(\tau) = N_0/e$



$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ è il tempo di dimezzamento del nuclide



Tempo di dimezzamento



$T_{1/2} = 25$ giorni

$T_{1/2} = 80$ giorni

$T_{1/2} = 220$ giorni

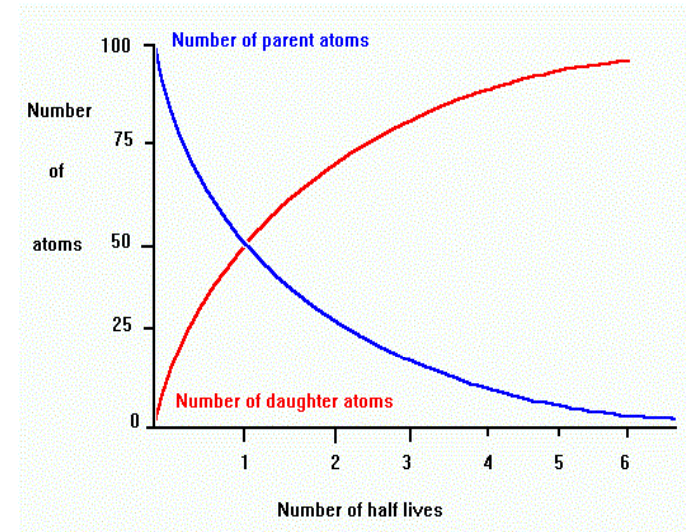
L'attivit  di ogni sorgente radioattiva diminuisce nel tempo!
Maggiore   il valore di $T_{1/2}$ pi  a lungo dura la sorgente



Attività

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

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{N_0}{N_p(t)} \right)$$



- Costante di decadimento λ , sec^{-1}
- Attività R: Bequerel,
1Bq= 1decadimento/secondo
(1Curie = 1Ci = 3.7×10^{10} Bq)
- Vita media: $\tau = 1/\lambda$, fattore $1/e$
- Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$
- Per $t = T_{1/2}$, si deve avere $N = N_0/2$
- Ossia $T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda = \tau \ln 2 = \tau 0.693$

