

# ISOTOPI

Gli atomi sono costituiti da **protoni**, **elettroni** e **neutroni**.

I **protoni** hanno carica positiva e sono localizzati all'interno del nucleo dell'atomo, in una regione di spazio di dimensioni dell'ordine di  $10^{-15}$  m . Il numero di **protoni** determina il numero atomico, **Z**, ed il nome dell'atomo. Nell'atomo (neutro) per ogni protone c'è un elettrone con carica negativa esattamente uguale (in modulo) a quella del protone, ma con una massa molto più piccola (circa 2000 volte). Gli elettroni si muovono in una regione spaziale molto più grande di quella del nucleo, con dimensioni dell'ordine di  $10^{-10}$  m.

C'è una terza particella, il **neutrone**, privo di carica e con massa eguale (leggermente più grande, per la precisione) a quella del protone. I neutroni sono localizzati all'interno del nucleo, insieme ai protoni. Nuclei con lo stesso numero  $Z$  di protoni possono avere diversi valori del numero di **neutroni**,  $N$ . In altre parole, si possono avere diversi **isotopi** dello stesso atomo, caratterizzati dallo **stesso  $Z$  e diversi  $N$** .

$$A = Z + N$$

$A$  = numero di massa

$Z$  = numero atomico (di protoni) (determina il tipo di atomo)

$N$  = numero di neutroni

Le proprietà chimiche degli atomi sono determinate dalla configurazione degli elettroni e quindi sono le stesse per i diversi isotopi di uno stesso elemento.

Isotopi diversi dello stesso atomo hanno però masse diverse e quindi pesi diversi nella gravità. Hanno inoltre diversa inerzia nei loro moti e quindi le molecole che formano avranno diverse velocità e diverse frequenze rotazionali e vibrazionali.

Anche i processi chimici saranno quindi influenzati dalla diversa massa e si potrà osservare, in generale, selettività isotopica nei composti che gli atomi formano.

	Carica ( $1.60 \cdot 10^{-19}$ C)	massa	massa	massa
protone	+1	$1.67262 \times 10^{-27}$ kg	938.28 MeV	1.007276 AMU
neutrone	0	$1.67493 \times 10^{-27}$ kg	939.57 MeV	1.008664 AMU
elettrone	-1	$9.10939 \times 10^{-31}$ kg	0.511 MeV	$\approx 1/1823$ AMU

$$1 \text{ AMU} = m(^{12}\text{C}) / 12 = 1.660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

L'equivalenza fra massa ed energia, espressa dalla famosa relazione di Einstein  $E = mc^2$ , permette di esprimere la massa in termini di energia equivalente. L'energia corrispondente all'unità di massa atomica (1 AMU o anche 1 u) è 931,5 MeV (mega elettronvolt =  $10^6$  eV)

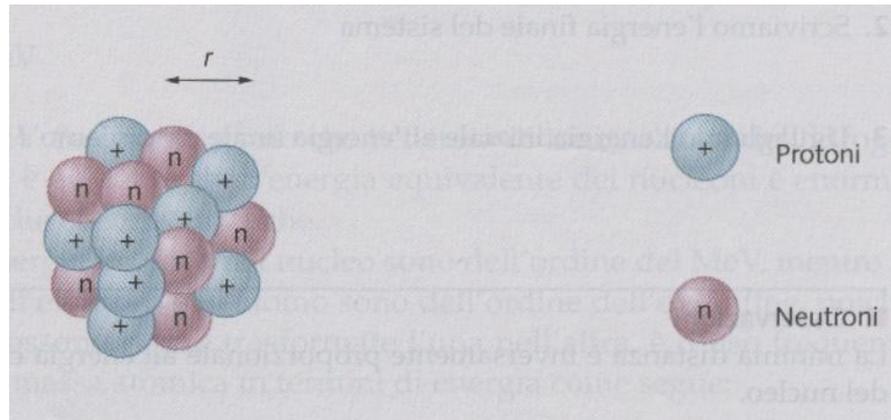
$$\begin{aligned}
 E &= mc^2 = (1 \text{ u})c^2 = \\
 &= (1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) (2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \left( \frac{\cdot 1 \text{ eV}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \right) = \\
 &= 931,5 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

1 eV =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  J (Joule) = differenza di energia potenziale di una carica unitaria tra due punti a potenziali che differiscono di un volt.

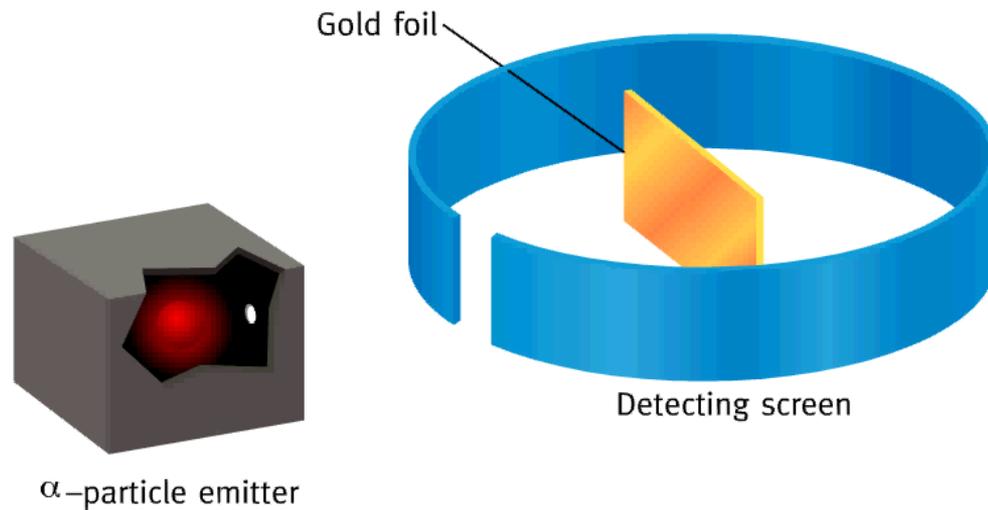
# DIMENSIONE DEL NUCLEO

La prima stima delle dimensioni nucleari fu data da Rutherford sulla base di esperimenti di diffusione di particelle alfa (nucleo dell'atomo di He4) da una lamina di oro. Rutherford stimò un raggio di  $3.2 \cdot 10^{-14}$  m per il nucleo d'oro. Misure di diffusione di particelle varie mostrano che i raggi nucleari aumentano con il numero di massa  $A$  in maniera molto semplice:

$$r = (1.2 \cdot 10^{-15} \text{ m}) A^{1/3}$$



# Modelli di Thompson e Rutherford



$$r = (1.2 \cdot 10^{-15} \text{ m}) A^{1/3}$$

Questo andamento mostra che la densità nucleare è la stessa per tutti i nuclei:

infatti, poiché  $M \approx A u$  ( $A$  volte la massa unitaria, un dodicesimo della massa del  $^{12}\text{C}$ ), se  $\rho_N = \text{cost}$ , allora  $V \propto A$  e quindi  $r \propto V^{1/3}$  risulta a sua volta proporzionale ( $\propto$ ) a  $A^{1/3}$ .

Abbiamo trovato che la densità del nucleo è indipendente dal numero di massa,  $A$ . Ciò significa che un nucleo può essere pensato come un insieme di nucleoni strettamente impacchettati, in modo molto simile a un insieme di palline in un sacchetto.

La densità di un nucleo è incredibilmente alta.

$\rho_N = M/V = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ Kg/m}^3$  (da confrontare con  $\rho_{\text{acqua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

**Z** numero di protoni ed elettroni, indica l'elemento

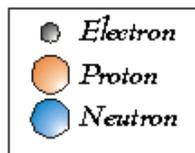
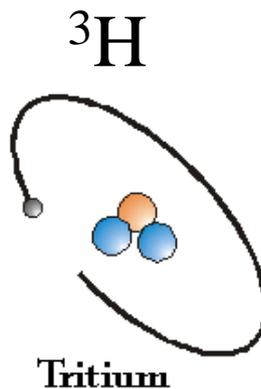
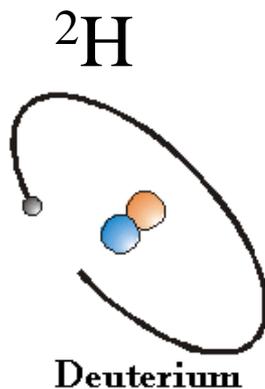
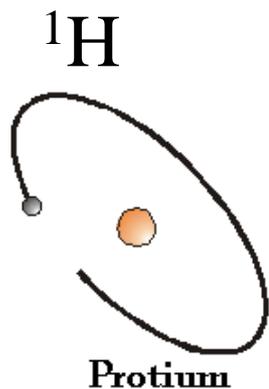
**N** numero di neutroni

**A = Z+N** numero di massa

*L'Uranio ha Z = 92 con gli isotopi N = 142, 143, or 146*

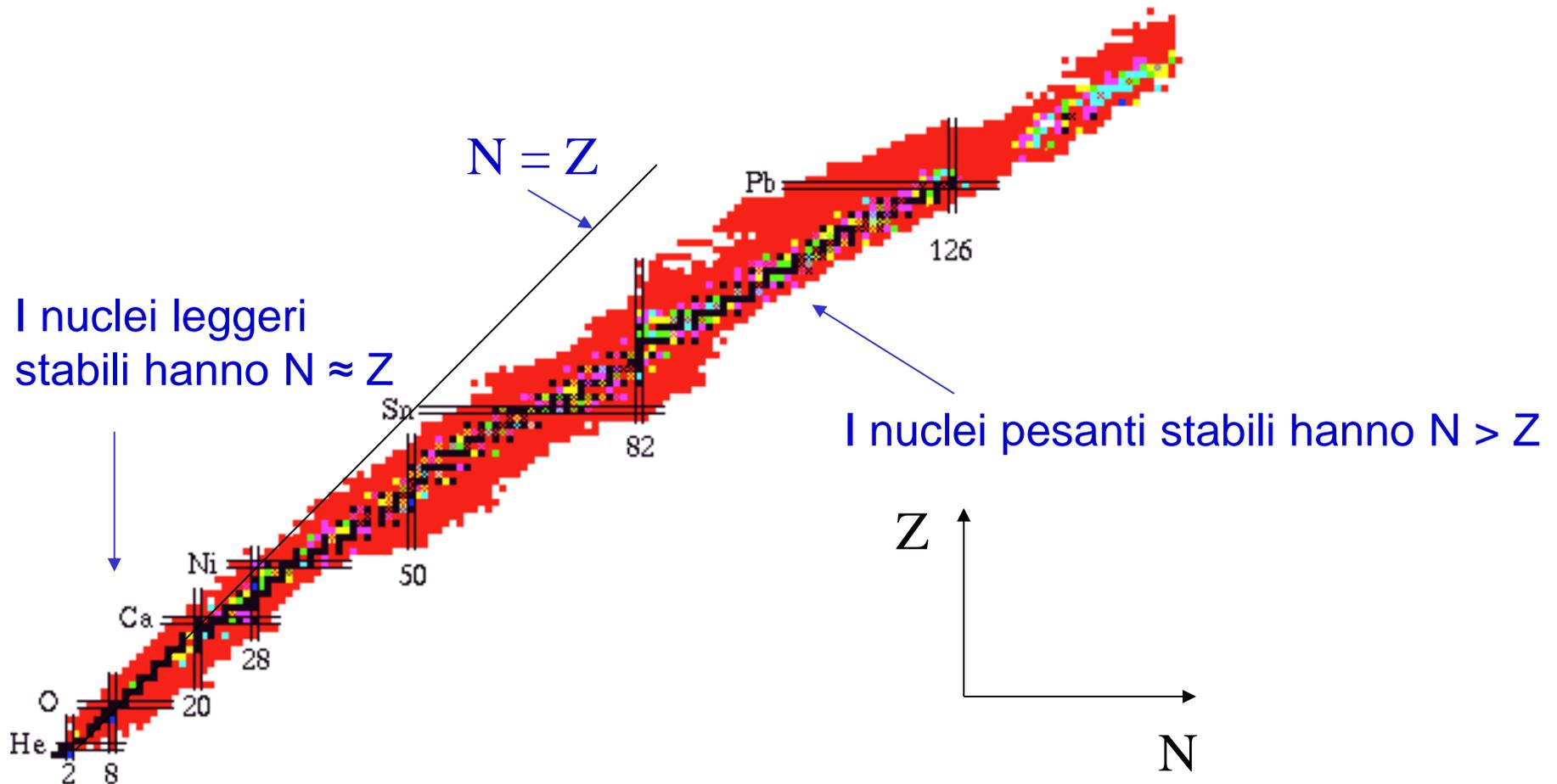
*=>  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ , o più esplicitamente*

$^{234}_{92}\text{U}_{142}$	$^{235}_{92}\text{U}_{143}$	$^{238}_{92}\text{U}_{146}$
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------



L'idrogeno ha tre isotopi, due stabili, ed uno radioattivo, il trizio.

Mappa dei nuclei noti. Ogni linea orizzontale rappresenta un elemento, definito da  $Z$ , numero di protoni ed elettroni dell'atomo neutro. Ogni colonna rappresenta i nuclei di diversi elementi ( $Z$ ) aventi tutti lo stesso numero di neutroni  $N$ . Le linee orizzontali e verticali indicano i cosiddetti "numeri magici" per  $Z$  e  $N$  uguali a 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126.



# ISOTOPI DEL CARBONIO, azoto, ossigeno

		2,7x10 <sup>-6</sup> %			p	p	p	EC	EC	100	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>n</sup>	
8	O	-218,799 -182,959 -118,569	<b>O12</b> 0.40 MeV 0+	<b>O13</b> 8.58 ms (3/2-)	<b>O14</b> 70.606 s 0+	<b>O15</b> 122.24 s 1/2-	<b>O16</b> 0+	<b>O17</b> 5/2+	<b>O18</b> 0+	<b>O19</b> 26.91 s 5/2+	<b>O20</b> 13.51 s 0+	<b>O21</b> 3.42 s (1/2,3/2,5/2)+	<b>O22</b> 2.25 s 0+	<b>O23</b> 82 ms	<b>O24</b> 61 ms 0+		
		15.9994 0.078%	2p	ECp	EC	EC	99.762	0.038	0.200	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>		
7	N	-210,009 -185,799 -146,949	<b>N10</b>	<b>N11</b> 740 keV 1/2+	<b>N12</b> 11.000 ms 1+	<b>N13</b> 9.965 m 1/2-	<b>N14</b> 1+	<b>N15</b> 1/2-	<b>N16</b> 7.13 s 2-	<b>N17</b> 4.173 s 1/2-	<b>N18</b> 624 ms 1-	<b>N19</b> 0.304 s (1/2-)	<b>N20</b> 100 ms	<b>N21</b> 85 ms	<b>N22</b> 24 ms	<b>N23</b>	
		±1±2±3±4±5 14.00674 0.0107%	p	EC3α	EC		99.634	0.366	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup> ,β <sup>α</sup> ,...	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>		
	C	44925 36425	<b>C8</b> 230 keV 0+	<b>C9</b> 126.5 ms (3/2-)	<b>C10</b> 19.255 s 0+	<b>C11</b> 20.39 m 3/2-	<b>C12</b> 0+	<b>C13</b> 1/2-	<b>C14</b> 5730 y 0+	<b>C15</b> 2.449 s 1/2+	<b>C16</b> 0.747 s 0+	<b>C17</b> 193 ms	<b>C18</b> 95 ms 0+	<b>C19</b> 46 ms	<b>C20</b> 14 ms 0+	<b>C21</b>	<b>C22</b> 0-
		±2±4± 12.0107 0.033%	ECp,ECp2α	EC	EC		98.90	1.10	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>		

		2,7x10 <sup>-6</sup> %			p	p	p	EC	EC	100	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>
O		-218,799 -182,959 -118,569	<b>O12</b> 0.40 MeV 0+	<b>O13</b> 8.58 ms (3/2-)	<b>O14</b> 70.606 s 0+	<b>O15</b> 122.24 s 1/2-	<b>O16</b> 0+	<b>O17</b> 5/2+	<b>O18</b> 0+	<b>O19</b> 26.91 s 5/2+	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>
		15.9994 0.078%	2p	ECp	EC	EC	99.762	0.038	0.200	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>
	N		<b>N10</b>	<b>N11</b> 740 keV 1/2+	<b>N12</b> 11.000 ms 1+	<b>N13</b> 9.965 m 1/2-	<b>N14</b> 1+	<b>N15</b> 1/2-	<b>N16</b> 7.13 s 2-	<b>N17</b> 4.173 s 1/2-	<b>N18</b> 624 ms 1-	β <sup>n</sup>
			p	EC3α	EC		99.634	0.366	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup> ,β <sup>α</sup> ,...	β <sup>n</sup>
	C		<b>C9</b> 126.5 ms (3/2-)	<b>C10</b> 19.255 s 0+	<b>C11</b> 20.39 m 3/2-	<b>C12</b> 0+	<b>C13</b> 1/2-	<b>C14</b> 5730 y 0+	<b>C15</b> 2.449 s 1/2+	<b>C16</b> 0.747 s 0+	<b>C17</b> 193 ms	β <sup>n</sup>
			ECp,ECp2α	EC	EC		98.90	1.10	β <sup>-</sup>	β <sup>-</sup>	β <sup>n</sup>	β <sup>n</sup>

# RADIOATTIVITA'

Un nucleo instabile ha una probabilità definita di decadere o disintegrarsi secondo diversi processi che portano all'emissione di radiazione. Chiamiamo questo tipo di processi decadimento di un nucleo, e le varie emissioni che ne risultano sono note collettivamente con il nome di radioattività.

Quando un nucleo subisce un decadimento radioattivo, la massa del sistema diminuisce. Quindi, la massa iniziale del nucleo prima del decadimento è maggiore di quella dei nuclei risultanti sommata alla massa delle particelle emesse. La differenza di massa,  $\Delta m < 0$ , ci appare sotto forma di energia in accordo con la relazione  $E = \Delta m c^2$ .

Durante i vari processi di decadimento sono emessi tre tipi di particelle: **alfa, beta, gamma**.

- **Particelle alfa ( $\alpha$ )**, che sono nuclei di He. Una particella alfa è formata da due protoni e due neutroni. Quando un nucleo decade emettendo particelle alfa, diciamo che emette raggi  $\alpha$ .
- **Particelle beta ( $\beta$ )**. Sono gli elettroni emessi da un nucleo e sono chiamati più precisamente «raggi  $\beta^-$ »; il segno - serve a ricordare che la carica dell'elettrone è -e.
- **Positroni**. Hanno la stessa massa dell'elettrone ma una carica +e. Se un nucleo emette positroni, diciamo che emette raggi  $\beta^+$ . (Un positrone, che è un'abbreviazione di “elettrone positivo”, è l'antiparticella dell'elettrone.)

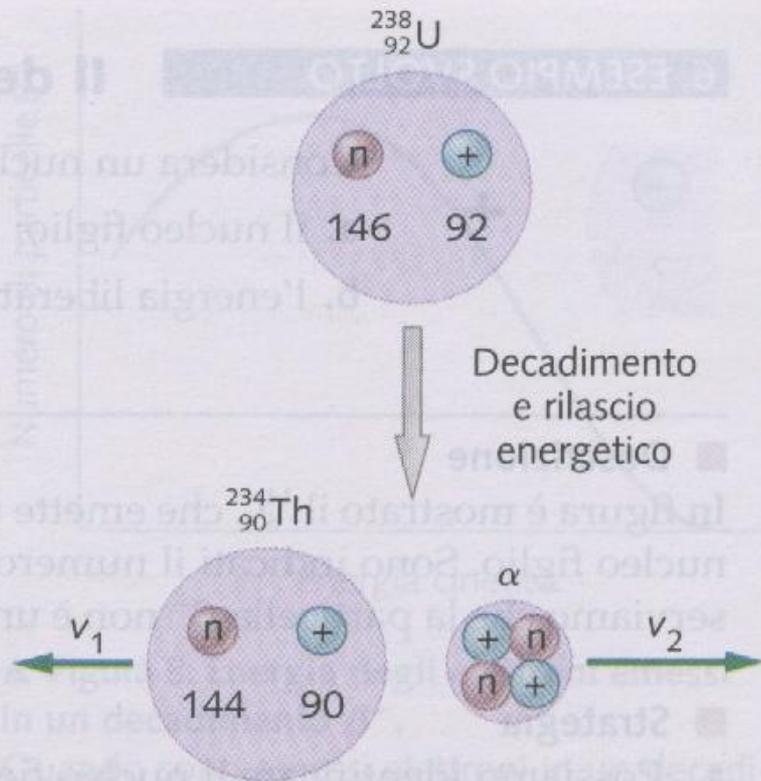
Infine, la radioattività può assumere la forma di un fotone anziché di una particella con una massa:

- Un nucleo in uno stato eccitato può emettere un fotone di alta energia, un raggio **gamma ( $\gamma$ )**, e passare a un livello energetico più basso.

La radioattività fu scoperta dal fisico francese Antoine-Henri Becquerel (1852-1908) nel 1896, quando osservò che l'uranio era in grado di impressionare una lastra fotografica anche se la lastra era coperta. Perciò la radioattività è in grado di penetrare e attraversare vari materiali. I vari tipi di radioattività furono inizialmente chiamati a seconda del loro potere di penetrazione, partendo dai raggi  $\alpha$ , che sono i meno penetranti. Di seguito riportiamo i poteri che caratterizzano i raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  :

- i raggi  $\alpha$  possono a malapena attraversare un foglio di carta e bastano pochi cm di aria per bloccarli. (Pericolosi però se si respira un gas radioattivo o si ingerisce la sostanza radioattiva)
- i raggi  $\beta^-$  (e  $\beta^+$ ) possono penetrare per qualche millimetro nell'alluminio.
- i raggi  $\gamma$  possono attraversare vari centimetri di piombo.





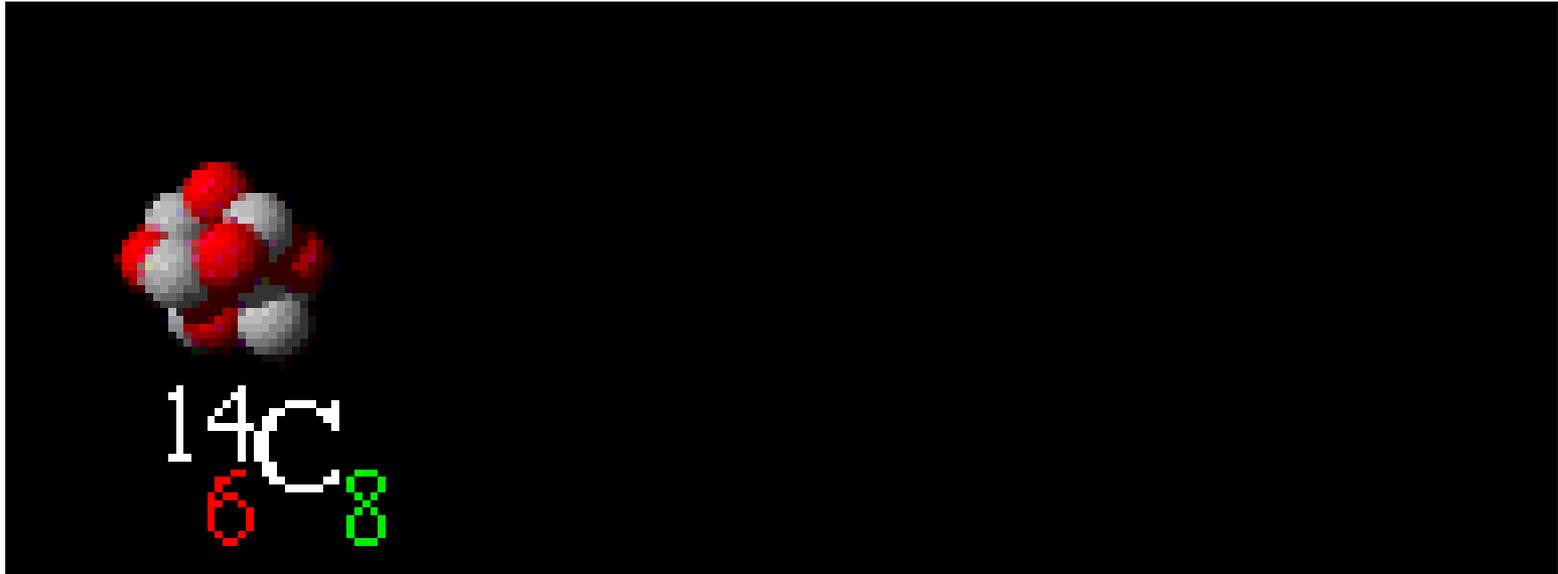
▲ **Figura 2. Il decadimento alfa dell'uranio-238.**

Quando l' $^{238}_{92}\text{U}$  decade nel  $^{234}_{90}\text{Th}$  e in una particella alfa, la massa del sistema diminuisce. La massa «perduta» in realtà è convertita in energia; essa appare sotto forma di energia cinetica del nucleo del  $^{234}_{90}\text{Th}$  e della particella alfa.

Nel processo si deve conservare l'energia. La massa dei due prodotti è inferiore alla massa del nucleo originario e la differenza è andata in energia cinetica del nucleo di torio e della particella alfa.

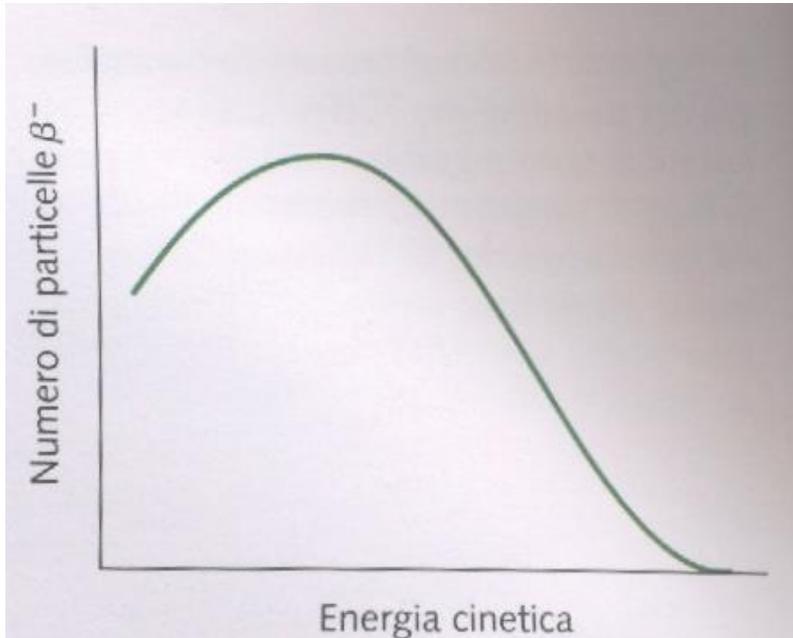
Si deve conservare anche la quantità di moto totale del sistema. Il nucleo di torio rincula con una velocità e con un'energia cinetica più piccole di quella della particella alfa.

## Decadimento beta<sup>-</sup>



Un neutrone decade in un protone ed un elettrone (più l'antineutrino). Elettrone e antineutrino lasciano il nucleo che aumenta il numero atomico  $Z$  e diminuisce il numero di neutroni  $N$  di una unità. Il numero di massa  $A$  resta lo stesso.

La conservazione dell'energia ci consente di calcolare l'esatta quantità di energia cinetica che avrà l'elettrone. In realtà si verifica che, quando misuriamo l'energia cinetica degli elettroni emessi, otteniamo un intervallo di valori, come indicato in figura. In particolare, troviamo che tutti gli elettroni



▲ **Figura 3. Energia degli elettroni emessi in un decadimento  $\beta^-$ .**

Quando sono emessi elettroni in un decadimento  $\beta^-$ , essi emergono con energie in un certo intervallo. Questo indica che anche un'altra particella (il neutrino) deve portar via una parte dell'energia.

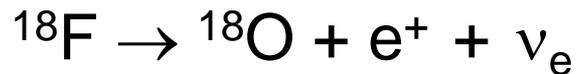
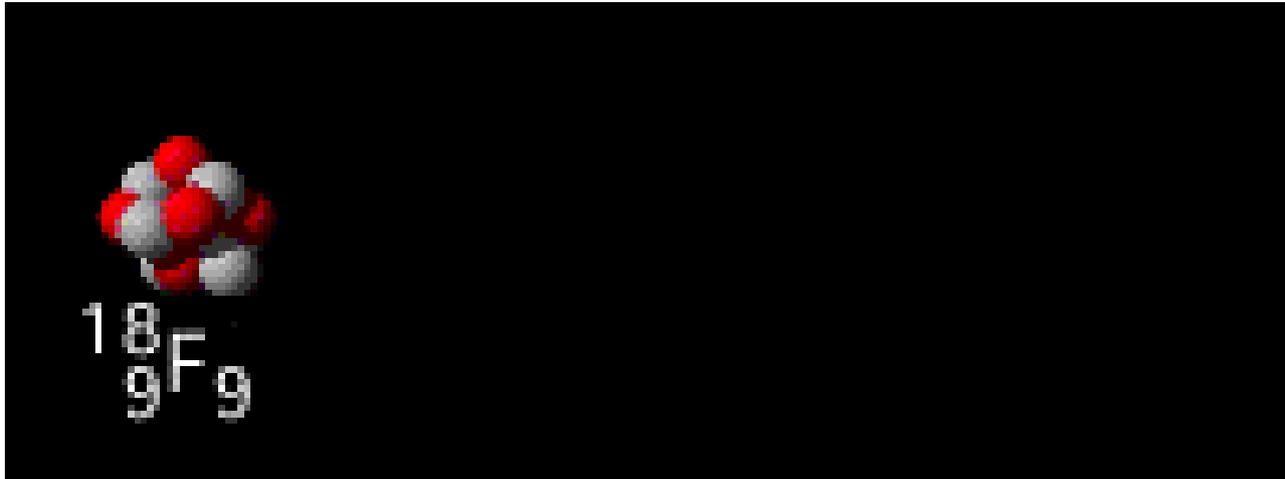
emessi in un decadimento beta hanno energie minori di quella prevista dalla conservazione dell'energia.

Da un'analisi più accurata si è dedotto che il decadimento beta sembra violare anche la conservazione della quantità di moto! Per queste ragioni, il decadimento beta è stato un rompicapo interessante e intrigante per i fisici.

La soluzione di questo problema fu offerta da Pauli nel 1930, quando propose che l'energia e la quantità di moto «mancanti » fossero in realtà portate via da una particella che non era stata osservata negli esperimenti. Perché ciò fosse possibile tale particella doveva avere carica nulla e massa molto piccola o nulla. Fermi chiamò neutrino, che letteralmente significa «particella neutra piccola», questa ipotetica particella di Pauli. Oggi noi sappiamo che in effetti i neutrini esistono e che compensano esattamente l'energia e la quantità di moto mancanti. Essi, tuttavia, interagiscono così debolmente con la materia che solo nel 1950 furono osservati sperimentalmente. Esperimenti recenti suggeriscono che la massa del neutrino è sicuramente molto piccola, minore di circa  $7 \text{ eV}/c^2$ , ma non è ancora certo se la massa del neutrino sia finita o nulla.

Per dare un'idea di quanto debole sia l'interazione dei neutrini con la materia, fra tutti i neutrini che attraversano la Terra soltanto uno ogni 200 milioni interagisce con essa in qualche modo. Per quel che riguarda i neutrini, è quasi come se la Terra non esistesse. Anche adesso, infatti, miliardi di neutrini passano attraverso il nostro corpo ogni secondo, senza il minimo effetto!

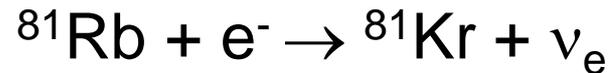
## Decadimento $\beta^+$



$$t_{1/2} = 109.77 \text{ min}$$

Un protone decade in un neutrone ed un positrone (più un neutrino). Positrone e neutrino lasciano il nucleo. Il numero atomico  $Z$  diminuisce ed il numero di neutroni  $N$  aumenta di una unità. Il numero di massa  $A$  resta lo stesso.

## Decadimento per cattura elettronica



Il nucleo di rubidio-81 cattura uno degli elettroni orbitanti, che hanno probabilità non nulla di passare attraverso il volume nucleare. Z diminuisce e N aumenta di una unità. Viene emesso un neutrino.

# Il decadimento gamma

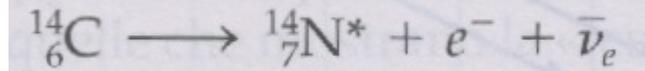
Un atomo in uno stato eccitato può emettere un fotone quando uno dei suoi elettroni scende a un livello di minore energia.

Analogamente, un nucleo in uno stato eccitato può emettere un fotone quando decade in uno stato di minore energia.

Poiché le energie nucleari sono molto più grandi di quelle atomiche, i fotoni emessi da un nucleo sono altamente energetici. Infatti questi fotoni sono collocati ben oltre i raggi X nello spettro elettromagnetico.

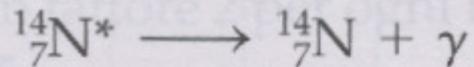
Chiamiamo tali **fotoni** ad alta energia **raggi gamma** ( $\gamma$ ).

Come esempio di una situazione in cui possono essere emessi raggi  $\gamma$ , consideriamo il seguente decadimento beta:



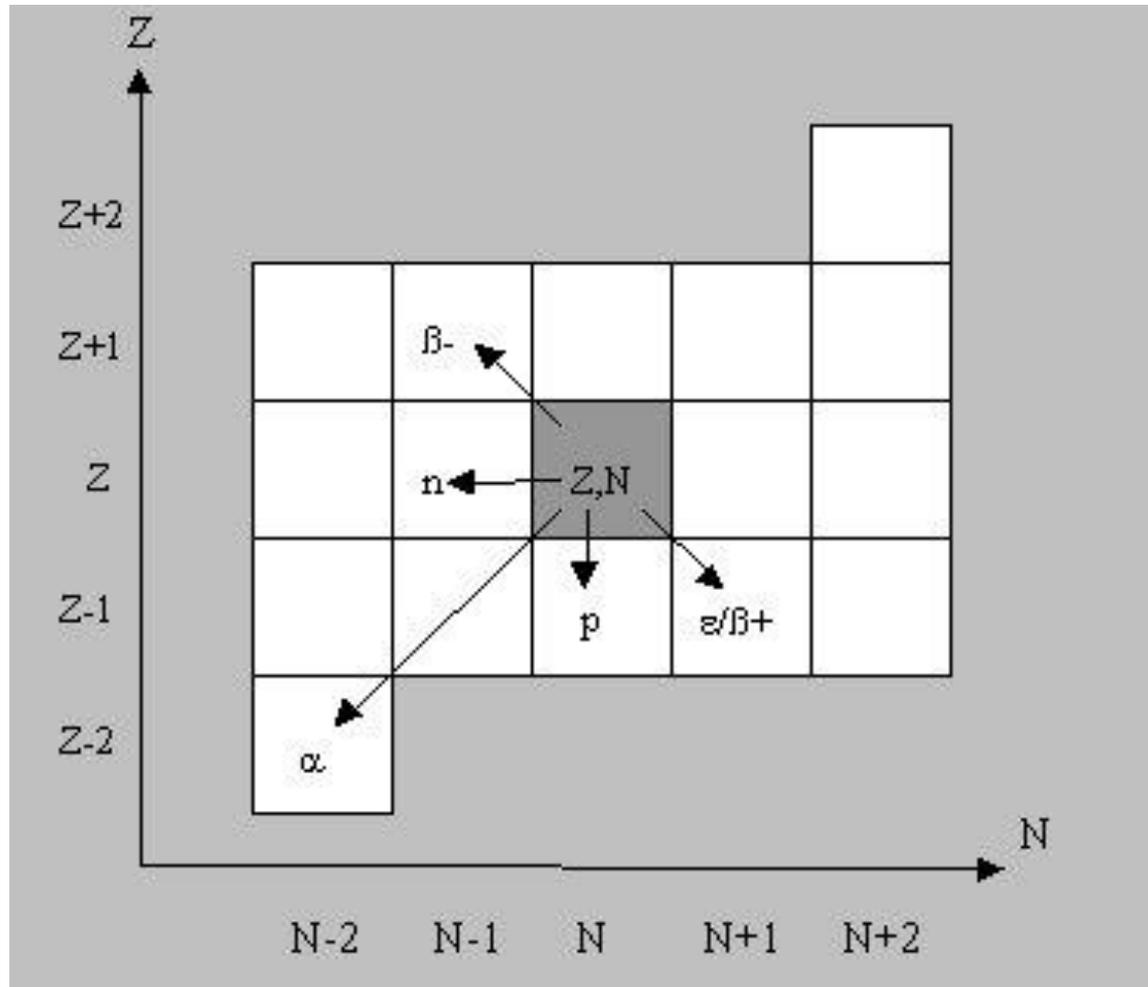
L'asterisco sul simbolo dell'azoto indica che il nucleo dell'azoto è stato lasciato in uno stato eccitato dopo il decadimento beta.

Successivamente, il nucleo dell'azoto può decadere al suo stato fondamentale con l'emissione di un raggio  $\gamma$  :



Osserviamo che né il numero atomico né il numero di massa sono cambiati in seguito all'emissione di raggi  $\gamma$ .

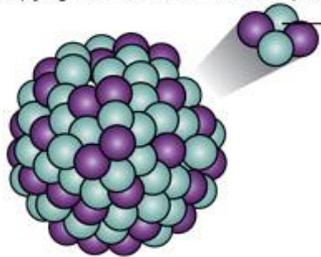
# Tipi di radioattività



Un nucleo con coordinate  $Z, N$  in questo diagramma decade nelle posizioni indicate a seconda del processo di decadimento.

# Radioactive Decay Mechanisms

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



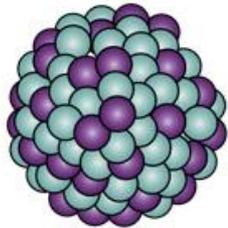
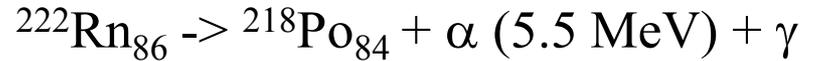
Alpha particle

Daughter nucleus has atomic number 2 less and mass number 4 less than parent nucleus.

**A** Alpha Decay—2 neutrons and 2 protons lost

84	Polonio	Po	210	209,982 86	$\alpha, \gamma$	138,38 giorni
			212	211,988852	$\alpha$	0,299 $\mu$ s
			214	213,995 19	$\alpha, \gamma$	164 $\mu$ s
86	Radon	Rn	222	222,017 574	$\alpha, \beta$	3,8235 giorni

Operates when  $Z \geq 58$

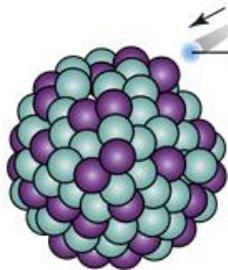
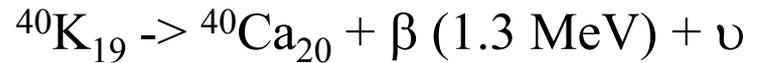
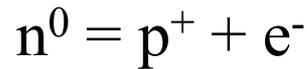


Beta particle (electron)

Daughter nucleus has atomic number 1 higher than parent nucleus. No change in mass number.

**B** Beta Decay—Neutron loses an electron and becomes a proton.

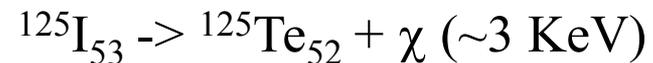
19	Potassio	K	39	38,963 708	93,26	
			40	39,964 000	$\beta^-, \text{EC}, \gamma, \beta^+$	$1,28 \cdot 10^9$ anni
20	Calcio	Ca	40	39,962 591	96,94	



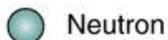
Electron

Daughter nucleus has atomic number 1 lower than parent nucleus. No change in mass number.

**C** Electron Capture—A proton captures an electron and becomes a neutron.



Proton



Neutron



Electron

# Attività

La velocità con la quale avviene il decadimento nucleare, cioè il numero di decadimenti al secondo, è chiamata attività. In un materiale altamente attivo ci sono molti decadimenti ogni secondo. Per esempio, un tipico campione di radio può avere da  $10^5$  a  $10^{10}$  decadimenti al secondo.

Una unità di misura che utilizziamo per misurare l'attività è il **curie**, nome scelto in onore di Pierre (1859-1906) e Marie (1867-1934) Curie, pionieri nello studio della radioattività. Il **curie (Ci)** è definito nel seguente modo:

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ decadimenti/s.}$$

La ragione di questa scelta è che 1 Ci è approssimativamente l'attività di 1 g di radio. Nel SI, misuriamo l'attività in **becquerel (Bq)**:

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

Le unità di attività più spesso incontrate nelle applicazioni pratiche sono il millicurie (1 mCi o  $10^{-3}$  Ci) e il microcurie (1  $\mu$ Ci =  $10^{-6}$  Ci).

# Legge del decadimento esponenziale

Il decadimento di un nucleo, qualunque sia il processo,  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , EC,  $\gamma$ , è un fenomeno quantistico fondamentalmente casuale, nel senso che assolutamente non è possibile conoscere quando un singolo nucleo decadrà. La statistica su un grande numero di nuclei fornisce però delle leggi precise per il decadimento.

Una analogia “classica” può essere quella del lancio di monete o di dadi a sei facce. Sappiamo che, in media, testa nel lancio della moneta esce una volta su due o che “cinque”, in media, esce una volta su sei, ma non possiamo conoscere quale sarà il risultato del prossimo lancio.

Per esempio, nel decadimento  $\alpha$ , possiamo immaginare che complessi di 2 protoni e 2 neutroni siano già presenti all'interno dei nuclei e si muovano molto velocemente incontrando la superficie del nucleo un gran numero di volte al secondo e “provando” ogni volta a saltar fuori. La probabilità di “riuscirci” è però molto bassa.

Per il decadimento beta del  $^{14}\text{C}$ , questa probabilità è  $\lambda = 3.83 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ .

Questo significa che un nucleo di  $^{14}\text{C}$  ha una probabilità  $P = \lambda \Delta t$  di decadere in un intervallo di tempo  $\Delta t$ .

Se i nuclei radioattivi ad un certo istante “t” sono  $N(t)$ , nel successivo intervallo di tempo  $\Delta t$  prevediamo che ne decadranno un numero  $\Delta N$ :

$$\Delta N = N P = N \lambda \Delta t \quad \text{cioè una frazione } \Delta N/N = \lambda \Delta t.$$

Alla fine dell'intervallo  $\Delta t$ , saranno rimasti  $N(t + \Delta t) = N(t) - \Delta N$   
 $= N(t) (1 - \lambda \Delta t)$  nuclei.

La soluzione matematica del problema è data dalla legge esponenziale:

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

dove  $N_0$  è il numero iniziale (al tempo  $t=0$ ) di nuclei radioattivi.

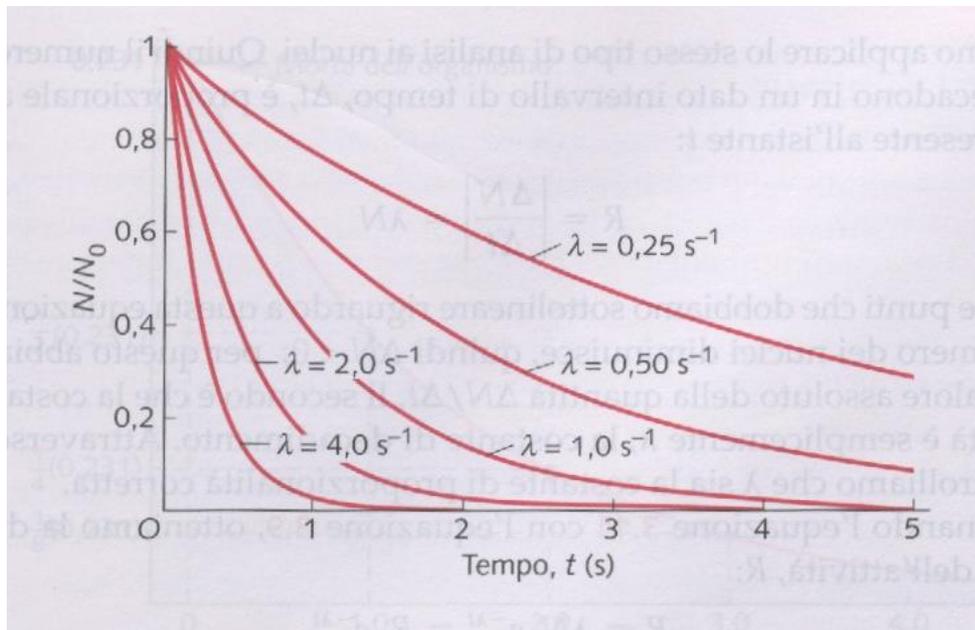
Il tempo di dimezzamento di un dato tipo di nucleo radioattivo è il tempo che occorre perché il numero di questi nuclei diminuisca di un fattore 2, cioè perché il numero di questi nuclei passi da  $N_0$  a  $N_0/2$ , da  $N_0/2$  a  $N_0/4$ , e così via.

Possiamo ricavare questo tempo, chiamandolo  $T_{1/2}$ , ponendo  $N = N_0/2$  nell'equazione sopra:

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Dividendo per  $N_0$  e calcolando il logaritmo naturale di entrambi i membri dell'equazione, troviamo:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$



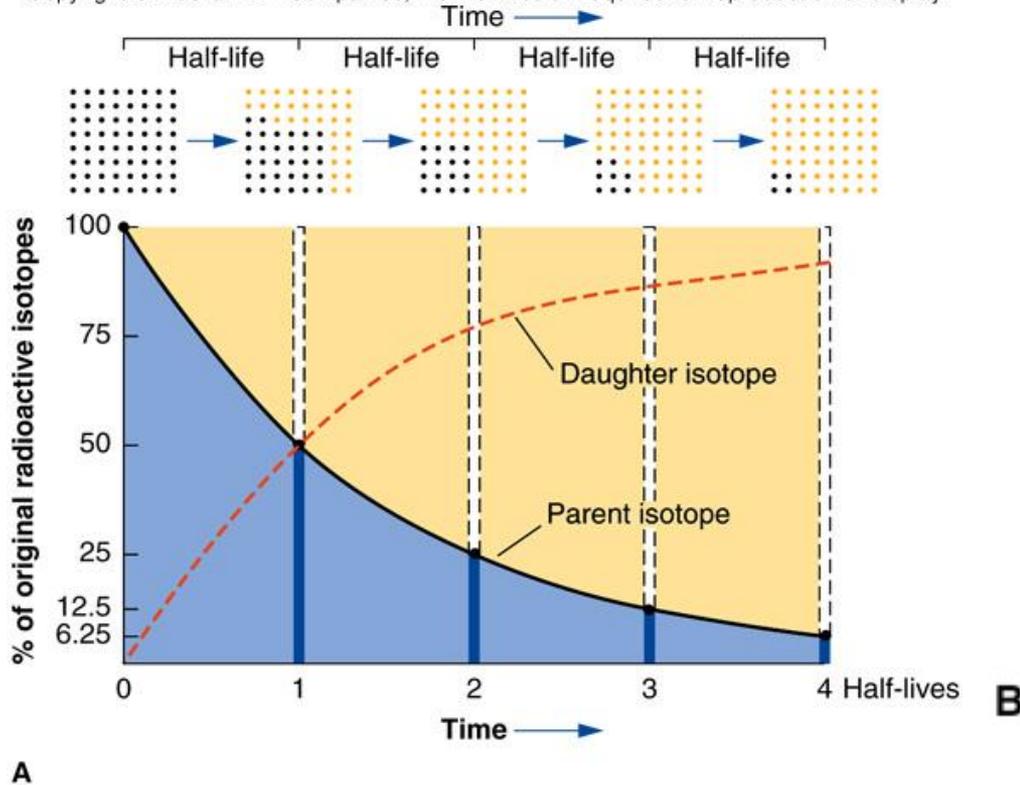
◀ **Figura 6. Dipendenza dalla costante di decadimento.**

Maggiore è il valore della costante di decadimento, più rapidamente la popolazione di un insieme di nuclei diminuisce. In questo grafico, il valore di  $\lambda$  raddoppia andando verso il basso da una curva all'altra.

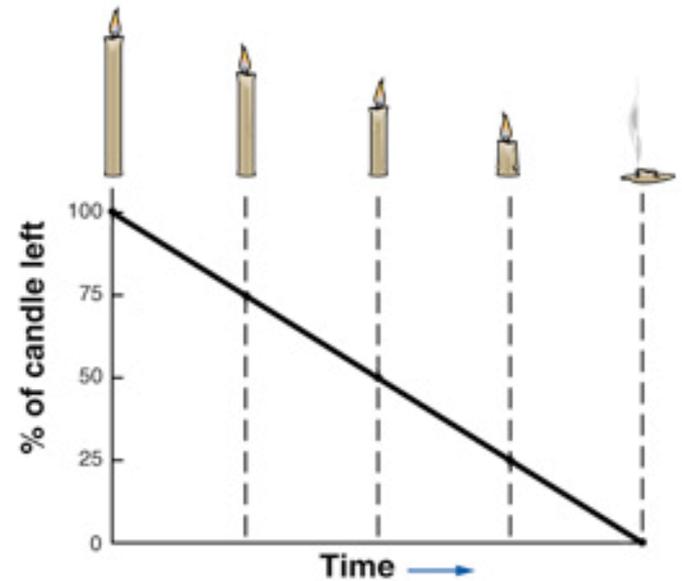
Osserviamo che un valore grande della costante di decadimento corrisponde a un breve tempo di dimezzamento.

# Half-life and exponential decay

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



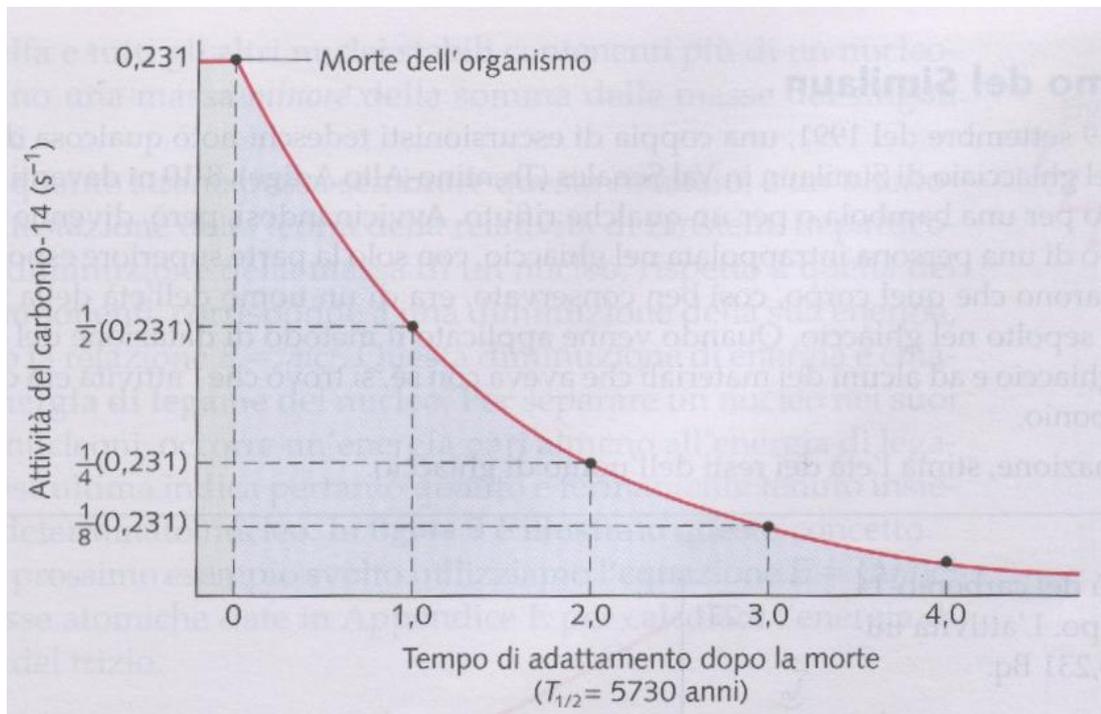
Exponential decay:  
Never get to zero!



Linear decay:  
Eventually get to zero!

Il decadimento è quindi caratterizzato da tre quantità tra loro legate:

- 1)  $\lambda$  costante di decadimento  $\lambda = 3.83 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  per il  $^{14}\text{C}$
- 2)  $T_{1/2}$  tempo di dimezzamento  $T_{1/2} = 5730 \text{ y}$  per il  $^{14}\text{C}$
- 3)  $\tau$  vita media ( $\tau = 1/\lambda$ )  $\tau = 8300 \text{ y}$  per il  $^{14}\text{C}$



## Stabilità del nucleo

Sappiamo che cariche dello stesso segno si respingono l'un l'altra e che la forza di repulsione aumenta rapidamente con il diminuire della distanza. Ne consegue che in un nucleo i protoni, che si trovano a una distanza di circa un fermi (1 femtometro (fm) =  $10^{-15}$  m) fra loro, esercitano gli uni sugli altri una forza relativamente intensa. Applicando la legge di Coulomb, troviamo, per due protoni (carica +e) posti a una distanza di  $10^{-15}$  m l'uno dall'altro, la seguente forza:

$$F = \frac{ke^2}{r^2} = 230 \text{ N}$$

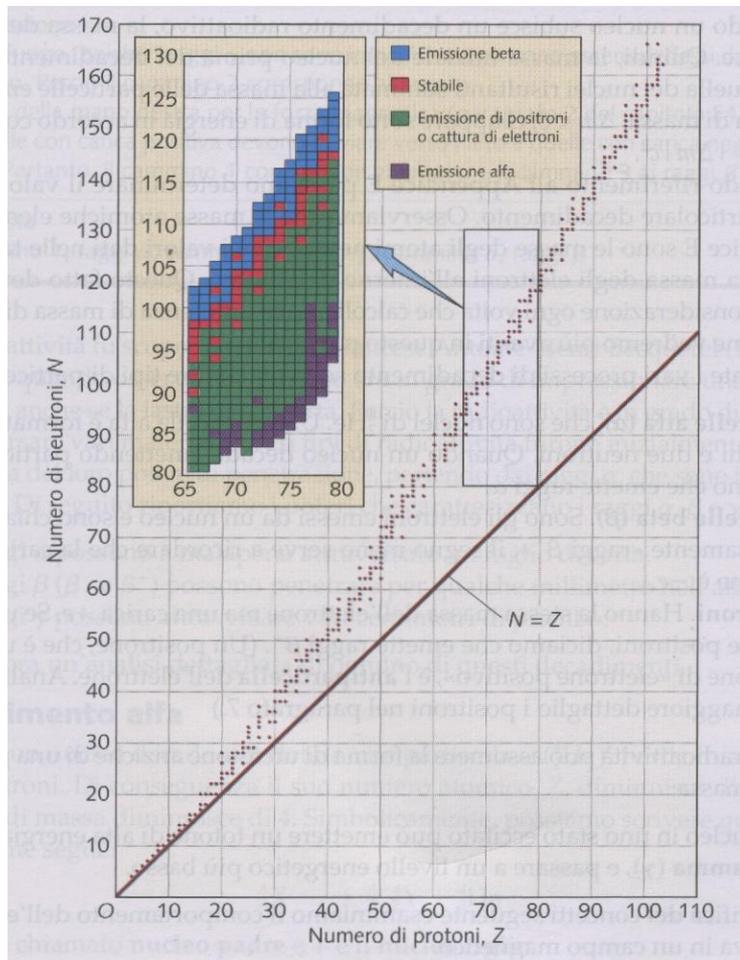
L'accelerazione che una tale forza dovrebbe fornire a un protone è  $a = F/m = (230 \text{ N})/(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) = 1,4 \cdot 10^{29} \text{ m/s}^2$ , che è circa  $10^{28}$  volte l'accelerazione di gravità! Perciò, se il protone all'interno del nucleo risentisse solo della forza elettrostatica, il nucleo esploderebbe in un istante. Quindi dentro allo stesso nucleo devono esserci anche forze attrattive molto intense.

La forza attrattiva che mantiene unito un nucleo è chiamata forza nucleare forte e ha le seguenti proprietà:

- ha un raggio d'azione breve, agendo solo su distanze di un paio di fermi.
- è attrattiva e agisce più o meno allo stesso modo fra protone e protone, fra neutrone e neutrone e fra protone e neutrone.

Il confronto fra le forze elettrostatiche repulsive e le forze nucleari forti attrattive determina la stabilità di un nucleo. In figura i è mostrato il numero,  $N$ , di neutroni e il numero atomico (numero di protoni),  $Z$ , dei nuclei stabili.

Osserviamo che i nuclei con un piccolo numero atomico sono più stabili se il numero di



protoni e di neutroni contenuti nel nucleo è approssimativamente uguale:  $N = Z$ . Per esempio,  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$  sono entrambi stabili. A mano a mano che aumenta il numero atomico, vediamo che i punti corrispondenti ai nuclei stabili si allontanano dalla retta  $N = Z$ . Infatti i nuclei grandi stabili contengono un numero di neutroni significativamente maggiore di quello di protoni.

**$N$  e  $Z$  per nuclei stabili e instabili.** I nuclei stabili sono indicati dai puntini rossi. Osserviamo che i nuclei più grandi hanno un numero di neutroni,  $N$ , significativamente maggiore del numero di protoni,  $Z$ . Il riquadro mostra i nuclei instabili e i loro modi di decadimento nella zona compresa fra  $Z = 65$  e  $Z = 80$  (numero di protoni compreso fra 65 e 80).

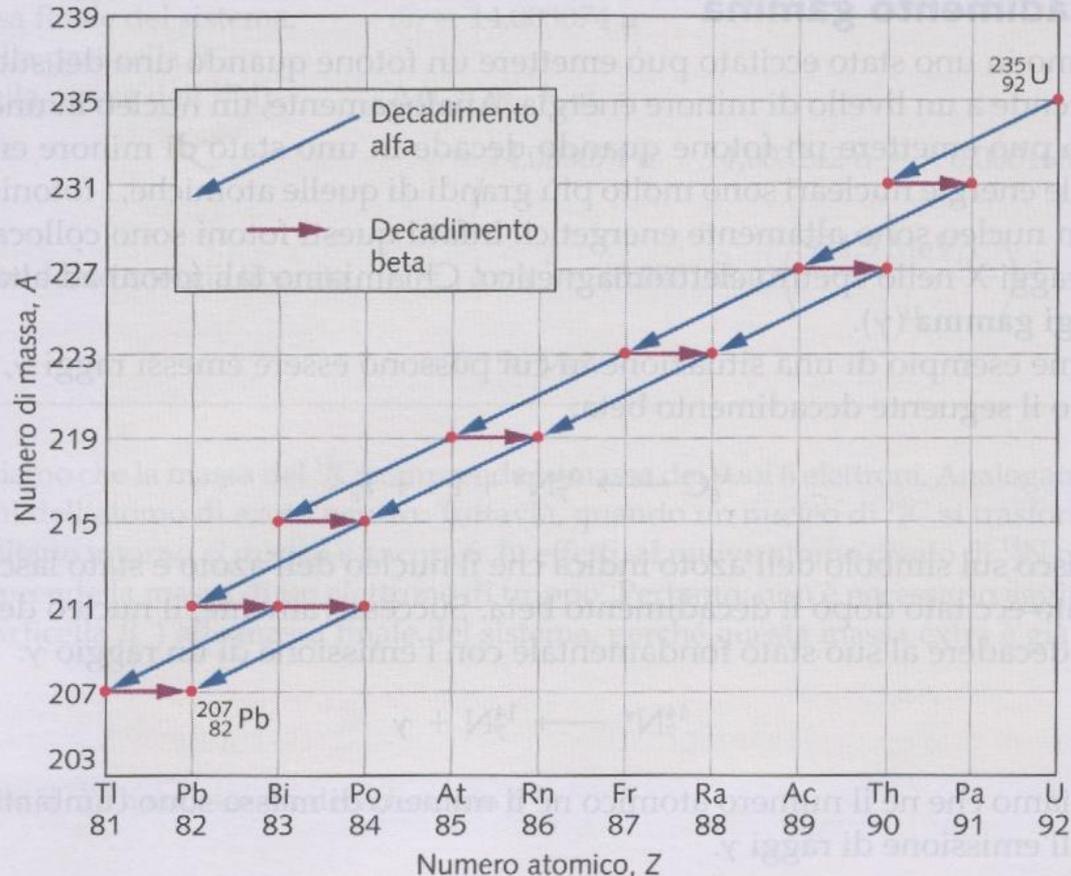
Questo fenomeno è spiegabile se pensiamo che tutti i nucleoni risentono della forza nucleare forte, ma solo i protoni risentono della forza elettrostatica, perciò i neutroni «diluiscono» la densità di carica del nucleo riducendo l'effetto delle forze repulsive, che altrimenti farebbero disintegrare il nucleo.

Aumentando ancora il numero di protoni nel nucleo, raggiungiamo un punto in cui le forze nucleari forti non sono più in grado di compensare le forze repulsive fra protoni. Infatti, il massimo numero di protoni in un nucleo stabile è  $Z = 83$ , corrispondente all'elemento bismuto. I nuclei con più di 83 protoni non sono stabili.

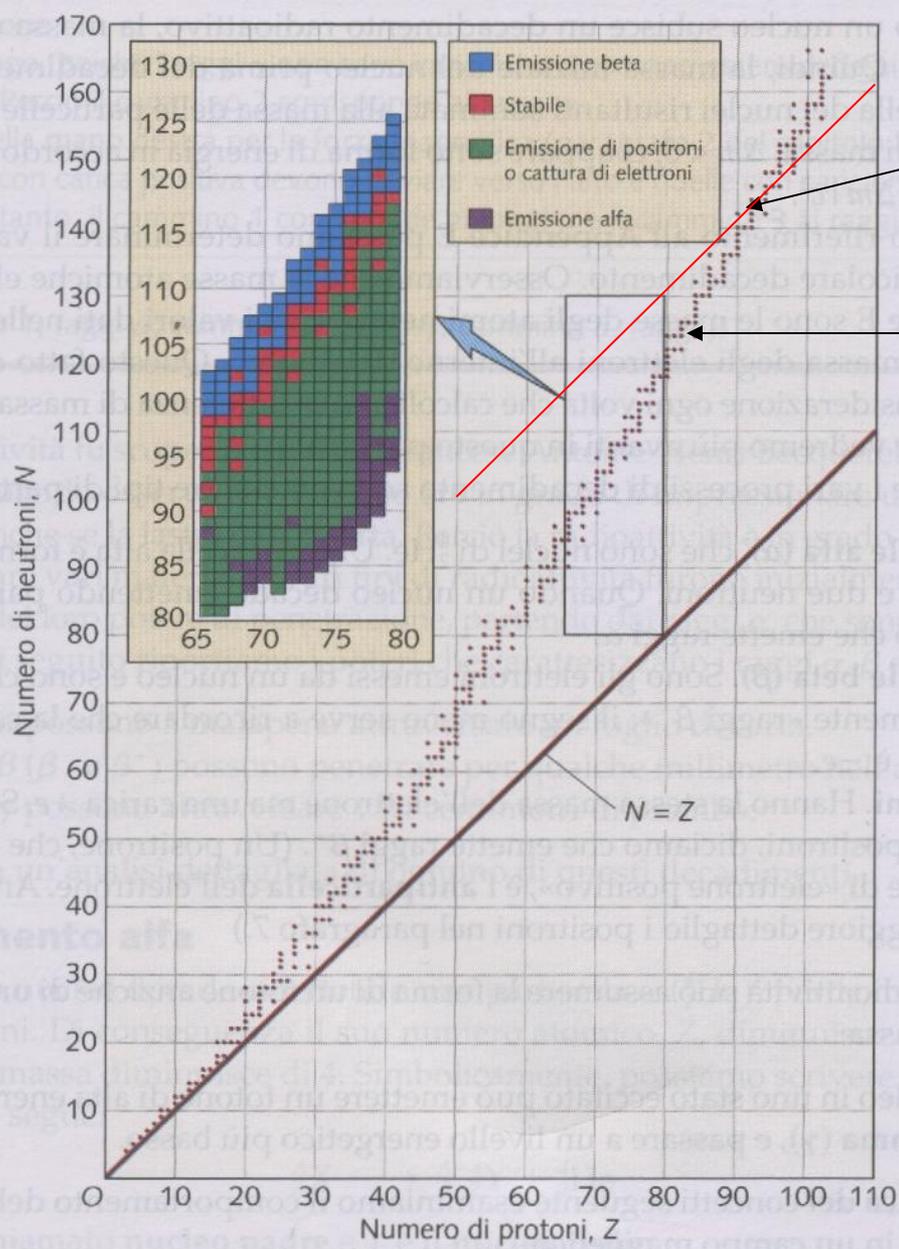
**Serie radioattive.** Consideriamo un nucleo instabile, che decade e genera un nucleo figlio. Se anche questo è instabile, alla fine decadrà e genererà i suoi nuclei figli, che, a loro volta, possono essere instabili. In questi casi un nucleo padre originale può generare una serie di nuclei collegati chiamata serie radioattiva.

Un esempio di serie radioattiva è mostrato in figura. In questo caso, il nucleo padre è l' $^{235}\text{U}$ , e il nucleo finale della serie è il  $^{207}\text{Pb}$ , che è stabile.

Osserviamo che molti dei nuclei intermedi di questa serie possono decadere attraverso uno dei due decadimenti, alfa o beta. Esiste perciò una molteplicità di «cammini» che



un nucleo di  $^{235}\text{U}$  può seguire, per trasformarsi in un nucleo di  $^{207}\text{Pb}$ . Inoltre i nuclei intermedi di questa serie decadono piuttosto rapidamente, almeno su una scala di tempi geologici. Per esempio, l'attinio-227 che era presente quando si è formata la Terra dovrebbe essere già decaduto molto tempo fa. Il fatto che ancora oggi si trovi l'attinio-227 nei depositi naturali di uranio è dovuto alla sua continua produzione in questa e in altre serie radioattive. **Nella sequenza ci sono 7 decadimenti alfa e 4 decadimenti beta.**

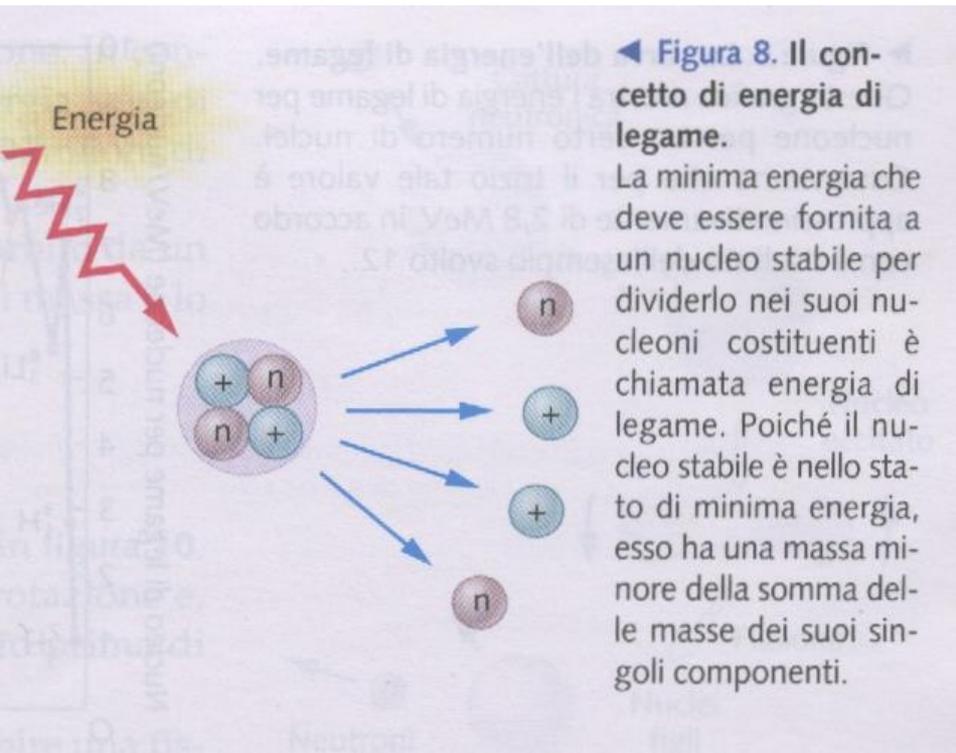


I decadimenti “tendono” a produrre un nuovo nucleo più vicino alla zona di stabilità.

Partendo dall'  ${}^{235}\text{U}$ , con solo decadimenti alfa, si seguirebbe la linea rossa allontanandosi dalla curva di massima stabilità. Una sequenza di 7 decadimenti alfa ( $\Delta N = \Delta Z = -2$ ), accompagnati da 4 decadimenti beta ( $\Delta N = -1, \Delta Z = 1$ ) raggiunge lo scopo.

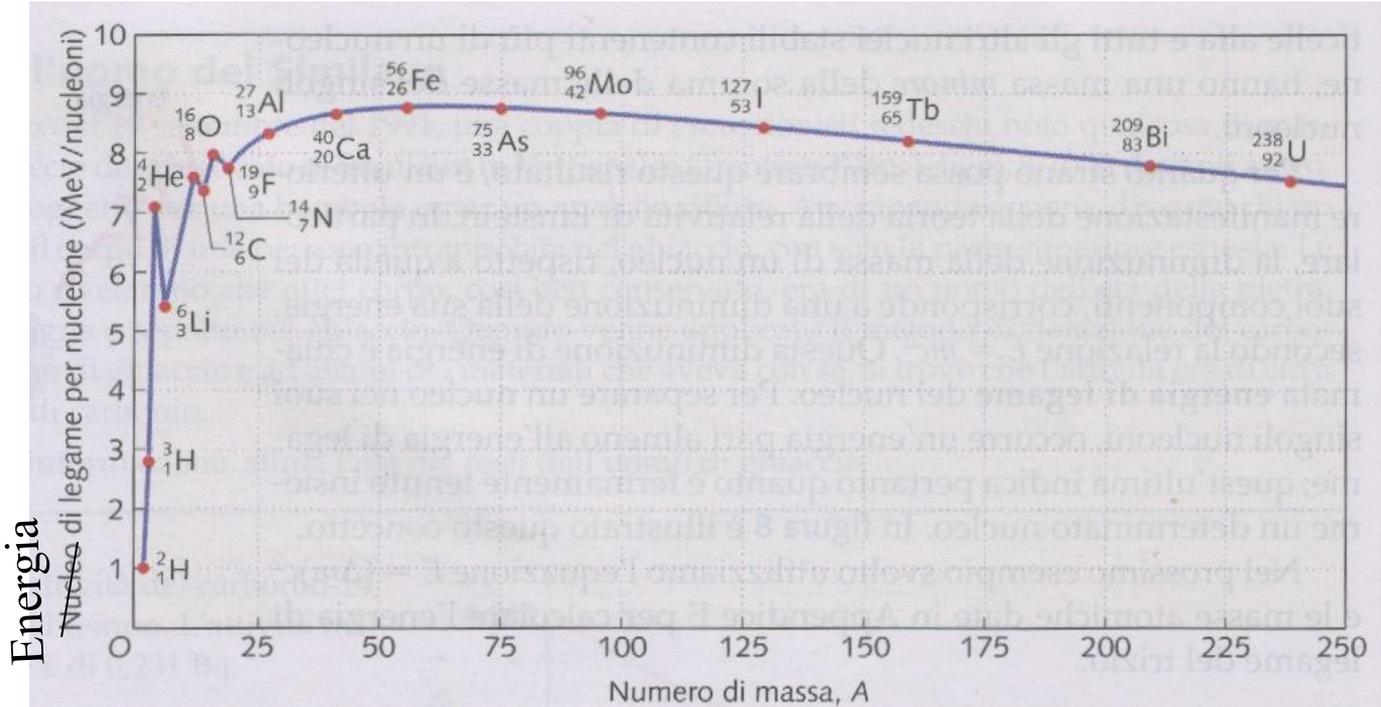
# Energia di legame nucleare

Una particella alfa è formata da due protoni e due neutroni. Possiamo affermare che la sua massa è due volte la massa del protone più due volte la massa del neutrone? Certamente potremmo pensare questo, ma i fatti non sono proprio così. Le particelle alfa e tutti gli altri nuclei stabili contenenti più di un nucleone hanno una massa minore della somma delle masse dei singoli nucleoni.



La diminuzione della massa di un nucleo, rispetto a quella dei suoi componenti, corrisponde a una diminuzione della sua energia, secondo la relazione  $E = mc^2$ . Questa diminuzione di energia è chiamata energia di legame del nucleo. Per separare un nucleo nei suoi singoli nucleoni, occorre un'energia pari almeno all'energia di legame; quest'ultima indica pertanto quanto è fermamente tenuto insieme un determinato nucleo.

Oltre a conoscere l'energia di legame di un dato nucleo, è anche interessante conoscere l'energia di legame per nucleone. Nel caso del trizio ci sono tre nucleoni, quindi l'energia di legame per nucleone è  $(8,482 \text{ Mcv}) = 2,827 \text{ MeV}$ .



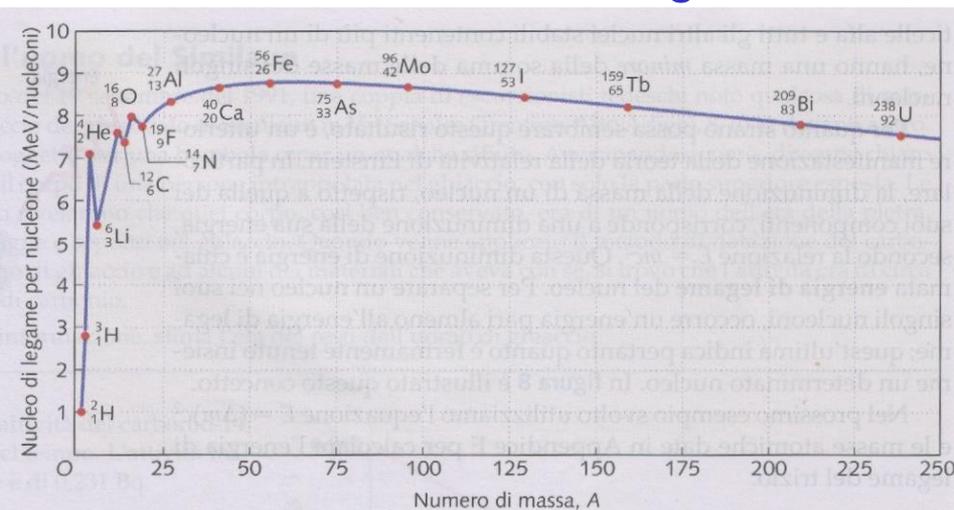
Osserviamo che la curva dell'energia di legame cresce rapidamente fino a raggiungere il suo massimo vicino ad  $A = 60$  e quindi decresce lentamente, diventando quasi costante con un valore di circa 7,2 MeV per nucleone per grandi valori di A. Ne consegue che i nuclei con A nell'intervallo da 50 a 75 sono i nuclei più stabili che si trovano in natura.

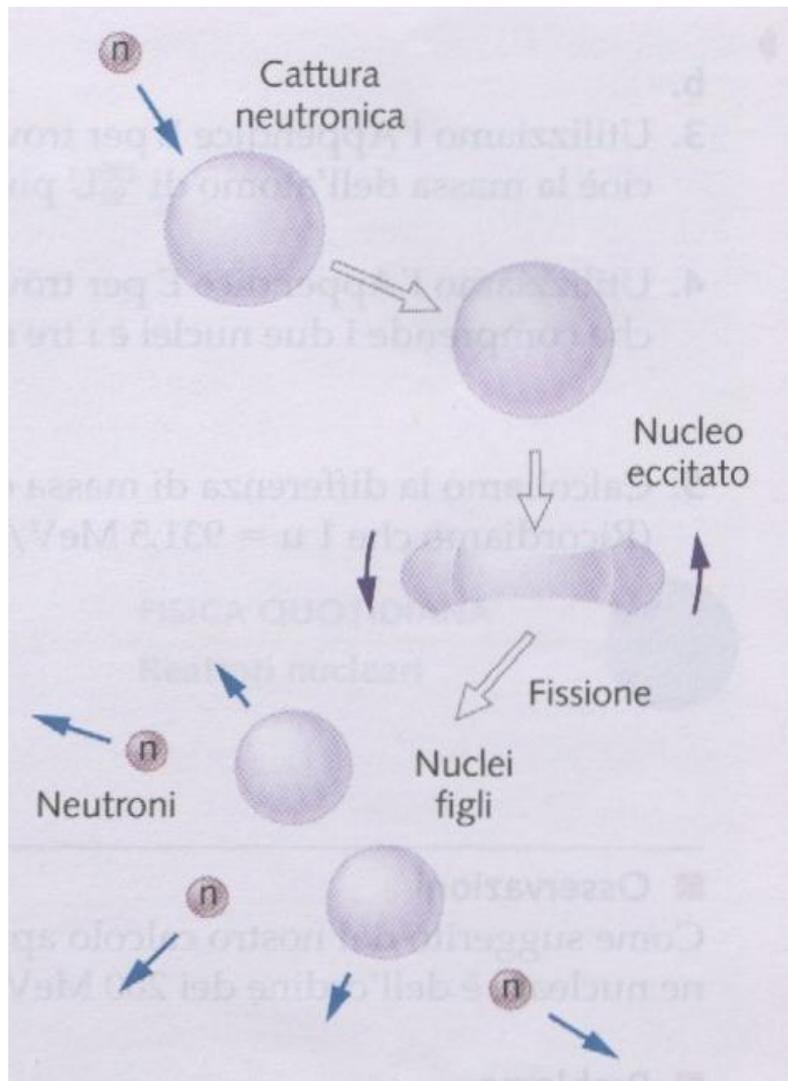
# La fissione nucleare

Nel 1939 fu scoperto un nuovo tipo di fenomeno fisico quando Otto Hahri e Fritz Strassmann trovarono che, in certe condizioni, un nucleo di uranio può essere spezzato in due nuclei più piccoli. Questo processo è chiamato fissione nucleare. La fissione nucleare libera una quantità di energia maggiore di molti ordini di grandezza rispetto all'energia liberata in una reazione chimica. Questo fatto ha influito profondamente sugli eventi storici degli anni che seguirono.

Per avere una stima approssimata della quantità di energia liberata in seguito a una reazione di fissione, consideriamo la curva dell'energia di legame di figura. Per un nucleo grande come l'  $^{235}\text{U}$ , vediamo che l'energia di legame per nucleone è circa 7,2 MeV. Se dividiamo questo nucleo in due nuclei con una massa uguale a circa la metà ( $A \approx 115$ ),

vediamo che l'energia di legame per nucleone aumenta a circa 8,3 MeV. Se tutti i 235 nucleoni del nucleo di uranio originale liberano  $(8,3 \text{ MeV} - 7,2 \text{ MeV})$  1,1 MeV di energia, l'energia totale liberata è:  $(235 \text{ nucleoni}) (1,1 \text{ MeV/nucleone}) = 260 \text{ MeV}$ .





▲ **Figura 10. La fissione nucleare.**

Quando un nucleo grande cattura un neutrone può passare a uno stato eccitato e quindi dividersi in due nuclei più piccoli. Questa è la fissione nucleare.

Una reazione di fissione ha inizio quando un neutrone lento è assorbito da un nucleo di  $^{235}\text{U}$  ; in questo modo aumenta di uno il suo numero di massa e lo lascia in uno stato eccitato:

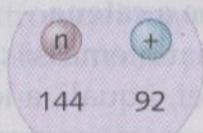


Il nucleo eccitato oscilla violentemente e si deforma, come è illustrato in figura 10. Per molti aspetti il nucleo si comporta come una goccia d'acqua in rotazione e, come una goccia d'acqua, si può deformare solo fino a un certo punto prima di rompersi in pezzetti più piccoli, cioè prima di subire una fissione.

Ci sono circa 90 modi diversi in cui il nucleo dell'  $^{236}\text{U}$  può subire una fissione. Normalmente nel corso di tale processo, oltre alla formazione dei due nuclei più piccoli, vengono emessi 2 o 3 (in media 2,47) neutroni.

### 13. ESEMPIO SVOLTO

### Una reazione di fissione dell'uranio-235



Se l'uranio-235 cattura un neutrone può subire la seguente reazione di fissione:  ${}^{236}_{92}\text{U}^* \longrightarrow {}^{141}_{56}\text{Ba} + ? + 3{}^1_0\text{n}$ .

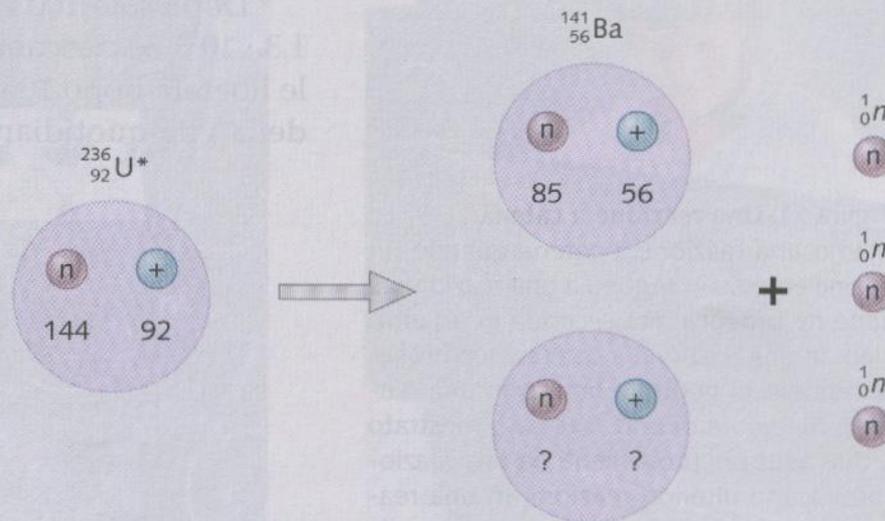
- Completa la reazione.
- Determina l'energia liberata.

#### Descrizione

In figura sono mostrati la reazione di fissione indicata, a partire dal nucleo di  ${}^{236}_{92}\text{U}^*$ , i numeri dei protoni e dei neutroni conosciuti.

#### Strategia

- Il numero totale di protoni e di neutroni deve essere lo stesso prima e dopo la reazione. Perciò, dalla conservazione dei protoni e dei neutroni possiamo determinare i numeri mancanti sul nucleo incognito.
- Come nelle altre reazioni, calcoliamo la differenza di massa,  $|\Delta m|$ , e la moltiplichiamo per  $c^2$ . In entrambi i membri della reazione compare lo stesso numero di elettroni, quindi la massa dell'elettrone non compare quando calcoliamo  $|\Delta m|$ .



#### Soluzione

- Determiniamo il numero di protoni,  $Z$ , il numero di neutroni,  $N$ , e il numero di nucleoni,  $A$ , del nucleo incognito
- Utilizziamo  $Z$  e  $A$  per identificare il nucleo incognito

$$\begin{aligned} Z &= 92 - 56 = 36 \\ N &= 144 - 85 - 3 = 56 \\ A &= Z + N = 36 + 56 = 92 \end{aligned}$$

