

FISICA

Fisica nucleare

*Autore: **prof. Pappalardo Vincenzo***

*docente di **Matematica e Fisica***



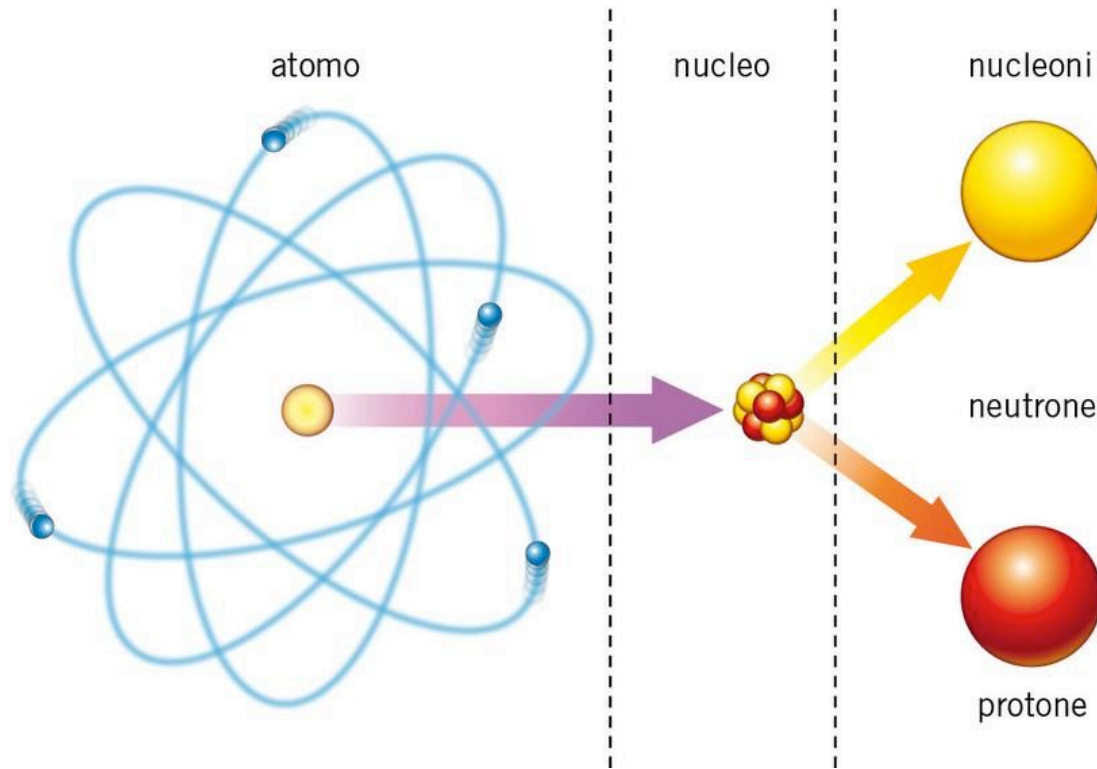
INTRODUZIONE

All'inizio del XX secolo la conoscenza sulla struttura atomica era ancora molto scarsa. Si sapeva che gli atomi contenevano elettroni (scoperti nel 1897 da J.J. Thomson), e che, essendo neutri, contenevano una carica positiva (esperimento di Rutherford del 1911) fortemente concentrata nel centro dell'atomo, il **nucleo**.

Era nota anche la radioattività, scoperta da **Becquerel** (1852–1908, Premio Nobel), nel 1896.

Tutto ciò suggeriva che la struttura in cui si concentra la quasi totalità della massa atomica dovesse avere una certa complessità.

LA STRUTTURA DEL NUCLEO ATOMICO



Gli esperimenti mostrano che il nucleo è formato da **protoni** (carica $+e$, massa $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg) e **neutroni** (carica 0 e massa $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg) scoperti da **Chadwick** (1891–1974; Premio Nobel) nel 1932.

I protoni e i neutroni (insieme si chiamano **nucleoni**) hanno spin $\frac{1}{2}$ per cui sono dei fermioni e ubbidiscono alla statistica di Fermi-Dirac.

Ogni nucleo è caratterizzato dal numero di massa A :

esempio

numero di massa A

$$A = Z + N$$

Z rappresenta anche il numero degli elettroni negli atomi neutri.

numero atomico (numero di protoni) numero di neutroni

atomo di alluminio

A = numero di massa

$^{27}_{13}\text{Al}$

Z = numero atomico

Ogni nucleo è caratterizzato dal:

numero di massa A

$$A = Z + N$$

numero atomico
(numero di protoni)

numero di neutroni

Z rappresenta
anche il numero
degli elettroni negli
atomi neutri.

esempio

atomo di alluminio

A = numero di massa

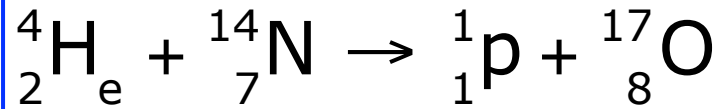
$^{27}_{13}\text{Al}$

Z = numero atomico

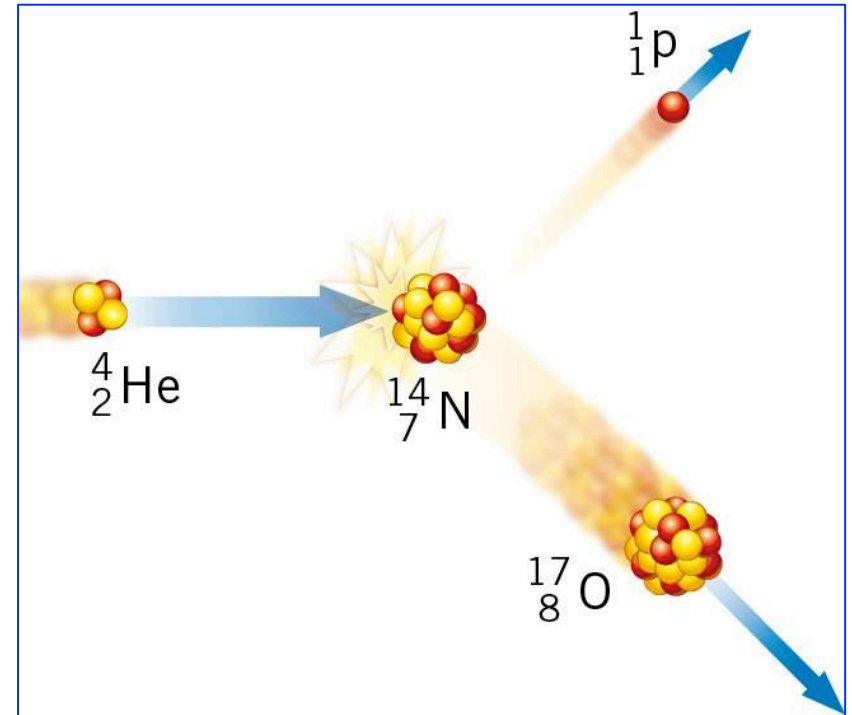
L'esempio fatto ci consente anche di rappresentare sinteticamente le reazioni nucleari (che tratteremo più avanti):

Nelle reazioni nucleari i nuclei reagenti si scambiano protoni e neutroni per formare altri nuclei prodotti della reazione.

Esempio: trasformazione
dell'azoto in ossigeno



Nelle reazioni nucleari il
numero di protoni e neutroni
si deve conservare, ossia



le somme dei numeri scritti in alto e di
quelli scritti in basso devono essere gli
stessi da ambo le parti della reazione

Nel caso della nostra reazione si ha:

$$\begin{aligned} A &: 4 + 14 \rightarrow 1 + 17 \\ Z &: 2 + 7 \rightarrow 1 + 8 \end{aligned}$$

Gli ordini di grandezza della massa atomica vanno da 10^{-25} a 10^{-27} kg. In fisica nucleare, però, spesso si usa come unità di misura il **MeV/c²** (massa a riposo), che è legato all'unità di massa atomica u ($1u=1,6606 \cdot 10^{-27}$ kg) dalla seguente relazione:

$$1u = 931,5 \text{ MeV} / c^2$$

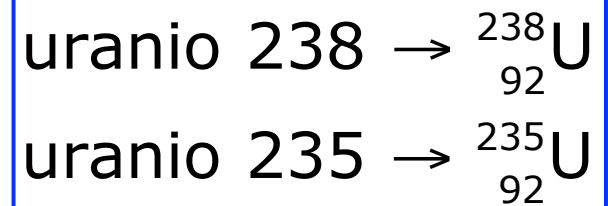
Massa a riposo di alcune particelle

Particella	Massa		
	kg	MeV/c ²	u
elettrone	$9,1094 \cdot 10^{-31}$	0,511	$5,4856 \cdot 10^{-4}$
protone	$1,6727 \cdot 10^{-27}$	938,27	1,007276
neutrone	$1,6750 \cdot 10^{-27}$	939,57	1,008665
atomo ¹ H	$1,6736 \cdot 10^{-27}$	938,78	1,007825

Le proprietà chimiche di un elemento dipendono solo dal numero atomico Z , pertanto due atomi con masse diverse (diversi valori di A) ma con lo stesso Z appartengono a uno stesso elemento e devono occupare un unico posto nella tavola periodica.

Due nuclei che hanno lo stesso Z ma diversi valori di A si dice che sono **isotopi** dell'elemento di numero atomico Z .

Per esempio l'uranio-238 e l'uranio-235 sono due isotopi dell'elemento uranio, in quanto hanno lo stesso numero atomico $Z=92$ ma diverso numero di massa A :



Esempio: isotopi dell'idrogeno



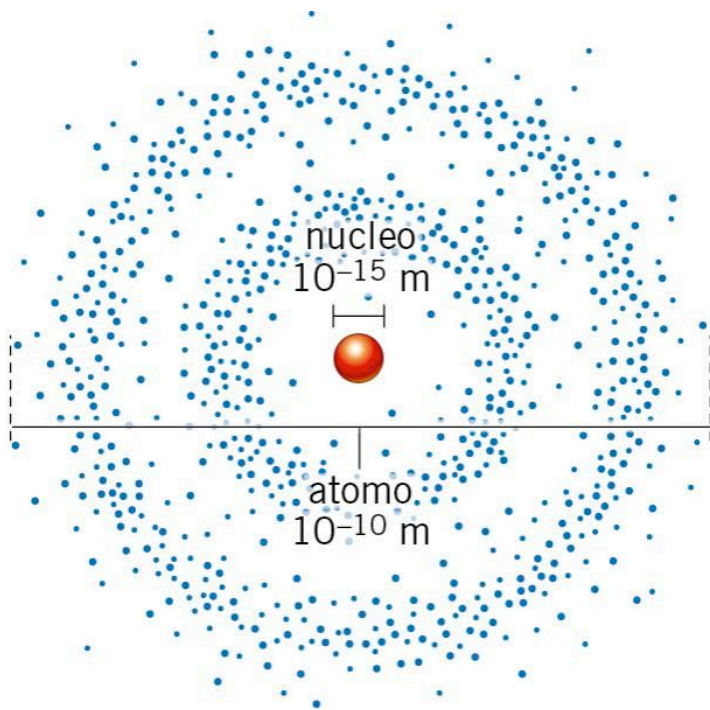
idrogeno «normale» ${}^1_1\text{H}$



deuterio ${}^2_1\text{H}$



trizio ${}^3_1\text{H}$



Il nucleo è circondato dalla “nuvola di probabilità” degli elettroni. L'ordine di grandezza del diametro è **10^{-10} m**.

L'ordine di grandezza del nucleo, invece, è **10^{-15} m**.

Infatti, il raggio del nucleo (considerato una sfera), come avevano mostrato già i primi esperimenti sulla diffusione delle particelle, aumenta con il numero di massa secondo la relazione:

$$R = R_0 \sqrt[3]{A} \quad \text{dove : } R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

LE FORZE NUCLEARI

Tra le forze che agiscono nel nucleo, la forza gravitazionale è del tutto trascurabile rispetto alla forza elettrica di repulsione che agisce tra i protoni.

Se esistesse, però, solo la forza di repulsione, il nucleo non potrebbe sussistere. Visto invece che i nuclei degli atomi sono stabili o tendono ad essere tali, si deve prevedere l'esistenza di un'altra forza responsabile della stabilità del nucleo.

In conclusione, un **nucleo** è sostanzialmente **stabile** perchè:

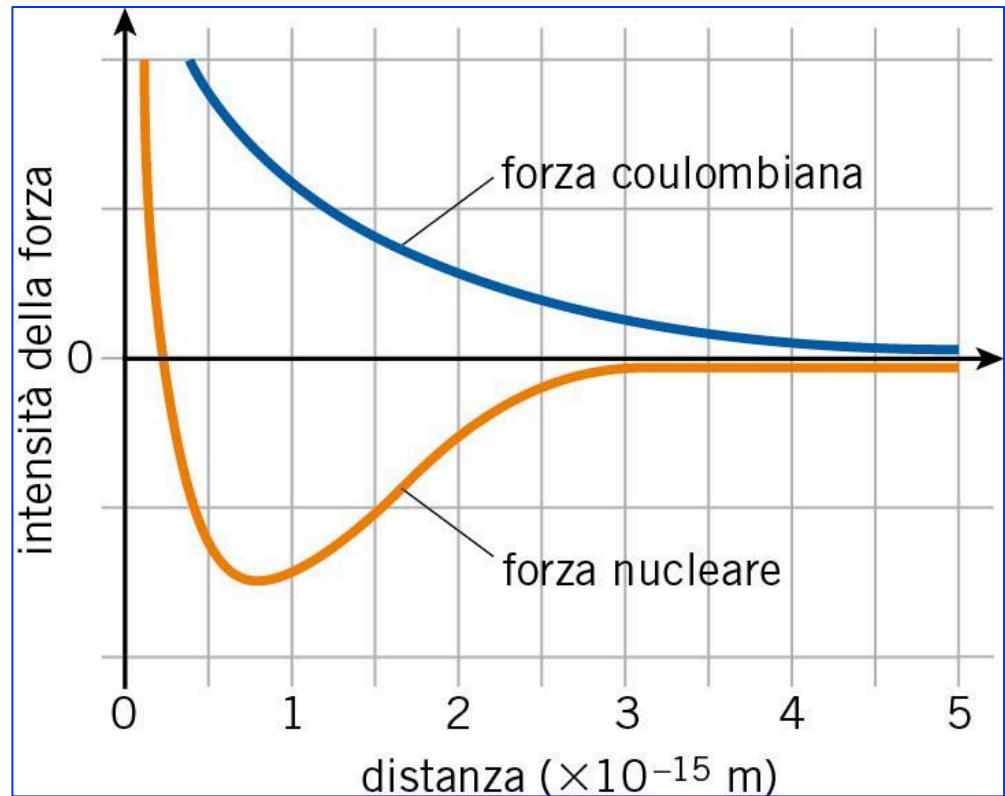
tra i nucleoni agisce una **forza nucleare attrattiva** che prevale su quella elettrica repulsiva.

L'esatta espressione matematica di tale forza non è nota, ma certe evidenze sperimentali fanno ritenere che si tratti di un'espressione molto complessa. Ciò nonostante possiamo elencarne alcune caratteristiche generali:

- E' fortemente attrattiva ed è molto più intensa sia della forza gravitazionale sia di quella elettromagnetica;
- Ha un raggio d'azione molto breve, e la sua intensità diminuisce rapidamente quando i due nucleoni si allontanano;
- Nell'ambito del suo raggio d'azione, determina un'attrazione tra due nucleoni qualsiasi, siano essi due protoni, un protone e un neutrone o due neutroni.

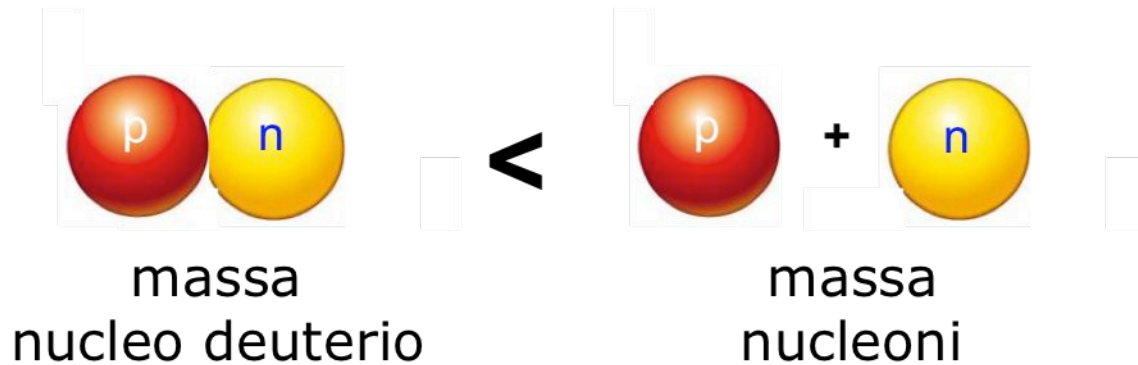
In sintesi:

- distanza $< 0,5 \cdot 10^{-15} \text{m}$, i protoni si respingono;
- $0,5 \cdot 10^{-15} \text{m} < \text{distanza} < 3 \cdot 10^{-15} \text{m}$, i protoni si attraggono (prevale la forza nucleare attrattiva);
- distanza $> 3 \cdot 10^{-15} \text{m}$ i protoni si respingono elettricamente (prevale la forza elettrica repulsiva).



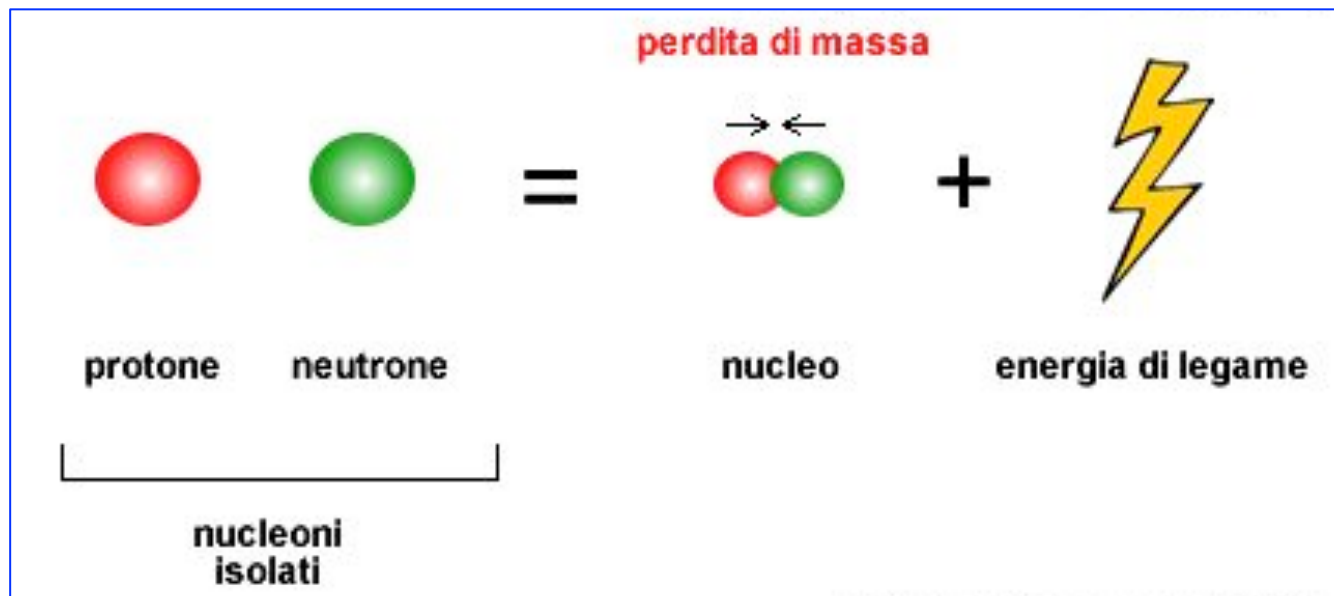
L'ENERGIA DI LEGAME DEI NUCLEI

Se proviamo a “pesare” la massa del nucleo, si osserva che è sempre inferiore alla somma delle masse dei nucleoni.

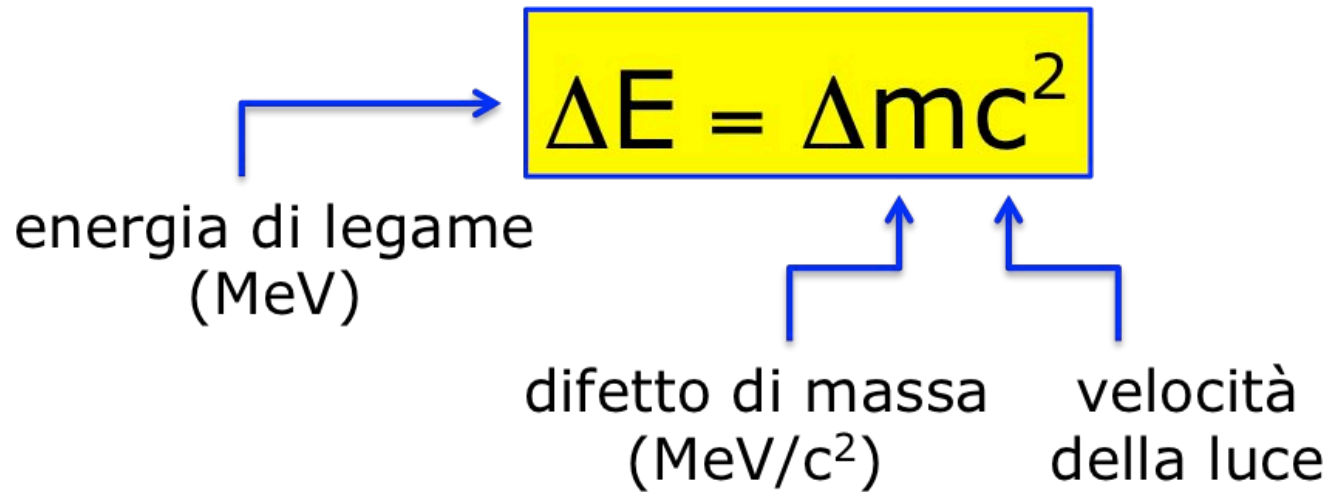


La massa di un nucleo è sempre minore della somma delle masse delle particelle che lo compongono. La differenza di massa si chiama **difetto di massa**.

Per il principio di equivalenza tra massa ed energia ($E=mc^2$), questo **difetto di massa rappresenta l'energia di legame del nucleo**, ossia l'energia liberata nella formazione di un nucleo a partire dai suoi componenti (protoni e neutroni) o, equivalentemente, l'energia necessaria per separare i suoi componenti e portarli allo stato libero.



Se indichiamo con Δm il difetto di massa, l'energia di legame ΔE è data dalla seguente relazione:



The diagram shows the equation $\Delta E = \Delta m c^2$ inside a yellow rectangular box with a blue border. Three blue arrows point from text labels to the equation. One arrow points from the left to the ΔE term, with the label 'energia di legame (MeV)' below it. Two arrows point from below to the Δm and c^2 terms. The first arrow points to Δm with the label 'difetto di massa (MeV/c²)' below it. The second arrow points to c^2 with the label 'velocità della luce' below it.

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

energia di legame
(MeV)

difetto di massa
(MeV/c²)

velocità
della luce

esempio

La massa del nucleo del deuterio è: $m_D = 3,3436 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

La somma delle masse dei suoi nucleoni (protone +neutrone) è:

$$m_p + m_n = (1,6726 + 1,6749) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,3475 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Il difetto di massa vale:

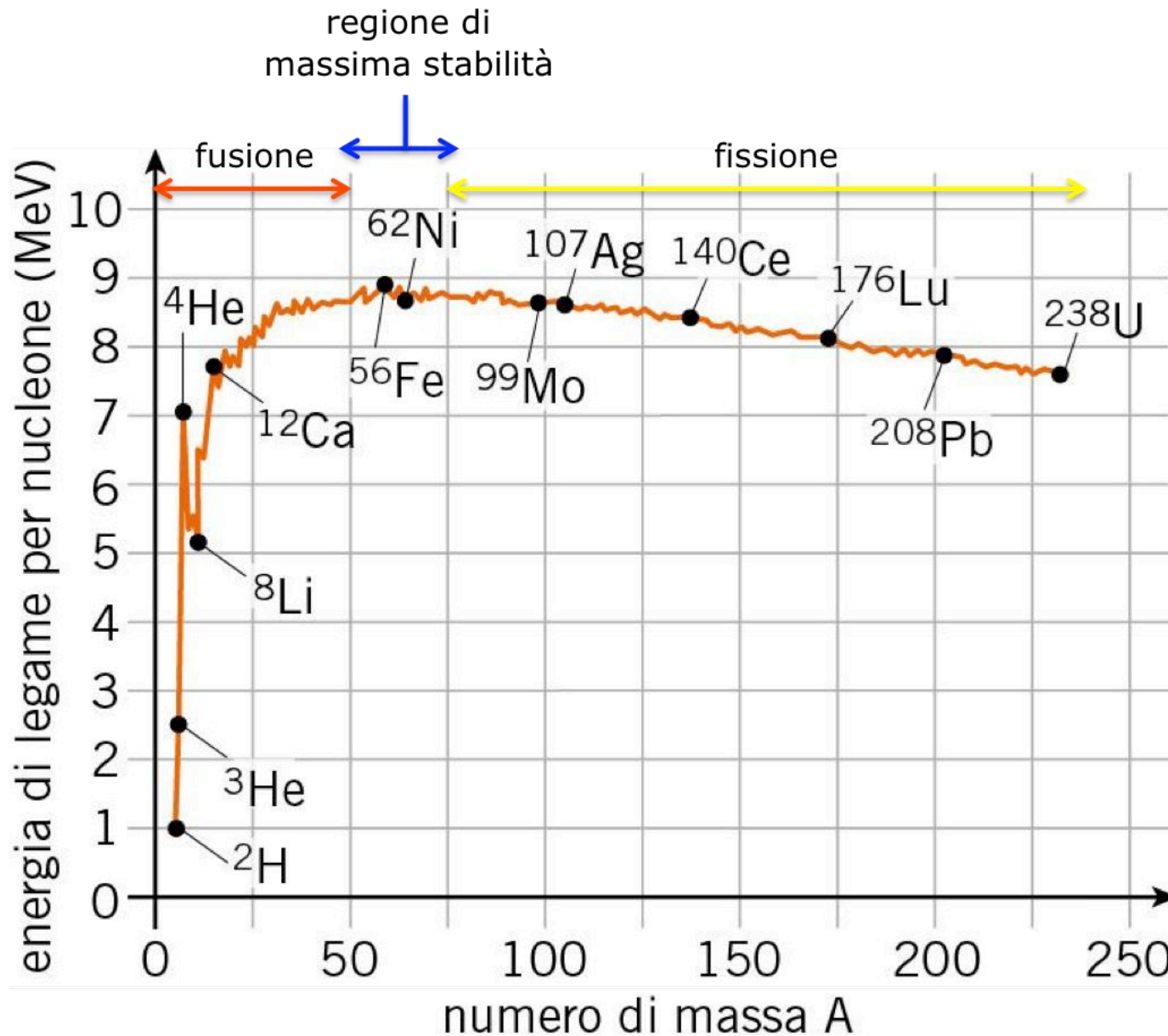
$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = (3,3475 - 3,3436) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,0039 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Pertanto, l'energia di legame ha il seguente valore:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0,0039 \cdot 10^{-27} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 = 3,5 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,2 \text{ MeV}$$

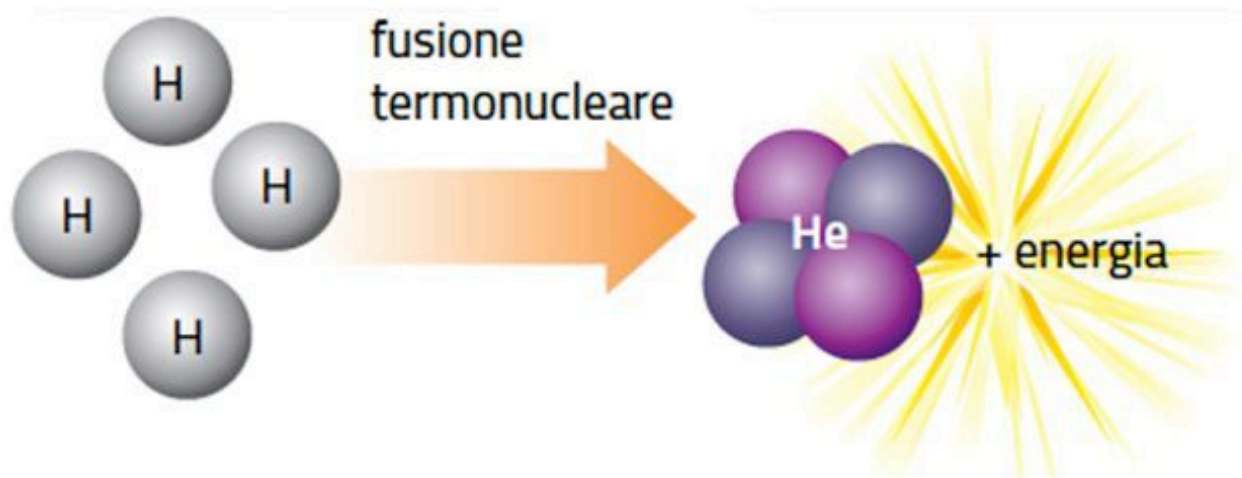
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa

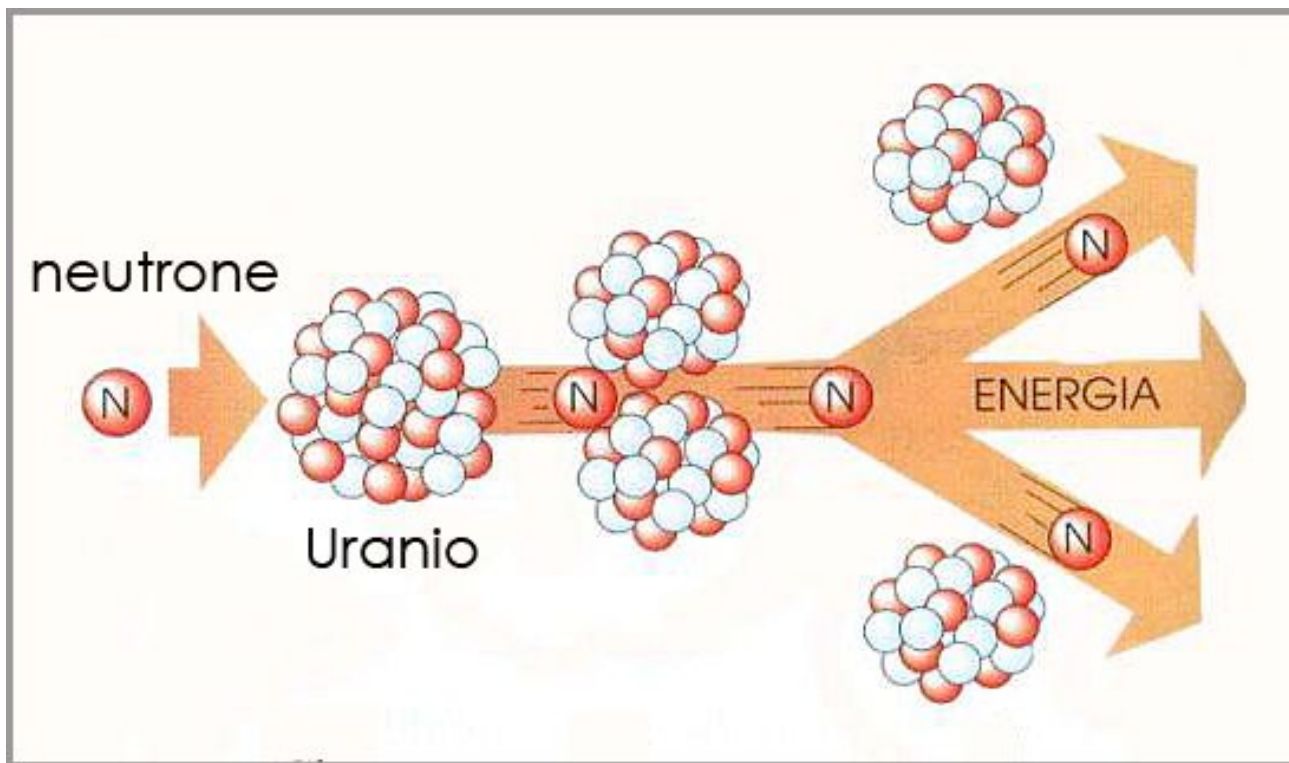


La curva presenta andamenti discendenti ai due estremi, e questo fatto ha conseguenze pratiche molto importanti:

➤ **Fusione nucleare**: si libera energia quando nuclei di piccolo numero di massa si combinano per formare un singolo nucleo di massa intermedia (si sale lungo la curva). E' il caso della reazione termonucleare che avviene nel Sole, dove nuclei d'idrogeno fondono per formare un nucleo di elio con conseguente liberazione di energia.

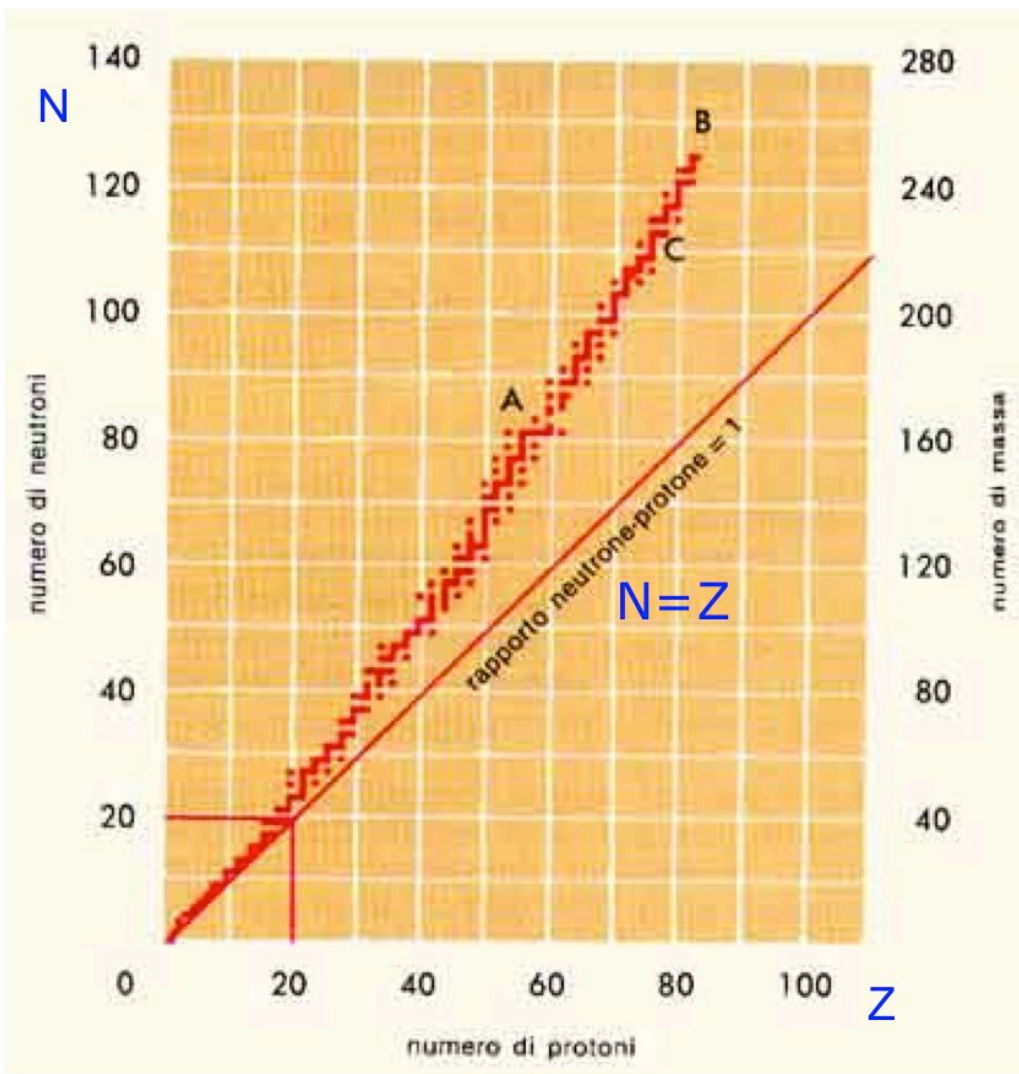


- **Fissione nucleare:** si libera energia quando nuclei di grande numero di massa vengono scissi in due frammenti minori (si sale lungo la curva). E' ciò che avviene nelle centrali nucleari per la produzione di energia elettrica.



La curva presenta anche una zona praticamente costante (**regione di massima stabilità**), in cui i nuclei sono maggiormente legati e quindi più stabili perché ad essi corrisponde il massimo valore dell'energia di legame per nucleone.

Per questi nuclei non è possibile né la fusione e né la fissione.



Mappa dei nuclidi stabili al variare di Z e di N .

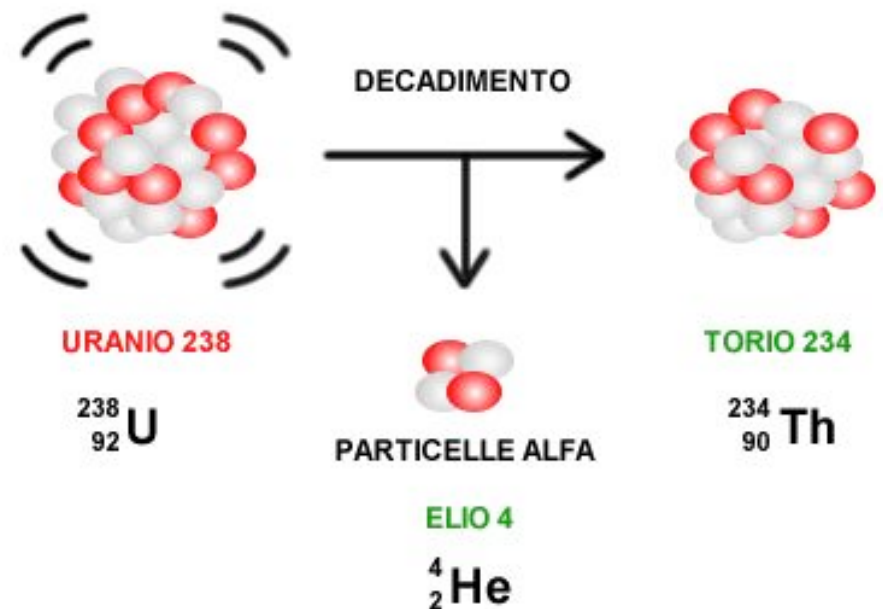
Per piccoli Z , i nuclei stabili si addensano lungo la retta di equazione $N=Z$.

All'aumentare di Z , si discostano.

Affinchè la forza nucleare possa contrastare la crescente repulsione elettrostatica fra i protoni, è infatti necessario un eccesso sempre maggiore di neutroni.

Però, a un certo punto, non basta più un incremento di neutroni rispetto ai protoni per conferire stabilità al nucleo, e quindi, tranne qualche eccezione, tutti i nuclei con numero atomico maggiore di quello del piombo ($Z > 82$) sono instabili, cioè radioattivi.

O s s i a , d e c a d o n o (trasmutano), in un certo intervallo di tempo (tempo di decadimento), in nuclei di energia inferiore raggiungendo uno stato di maggiore stabilità con emissione di radiazioni ionizzanti.



Al pari degli elettroni, e di tutte le particelle subatomiche, anche i protoni e i neutroni hanno una natura ondulatoria, per cui si deve far uso delle ampiezze di probabilità protonica $\Psi_p(x,y,z,t)$ e neutronica $\Psi_n(x,y,z,t)$.

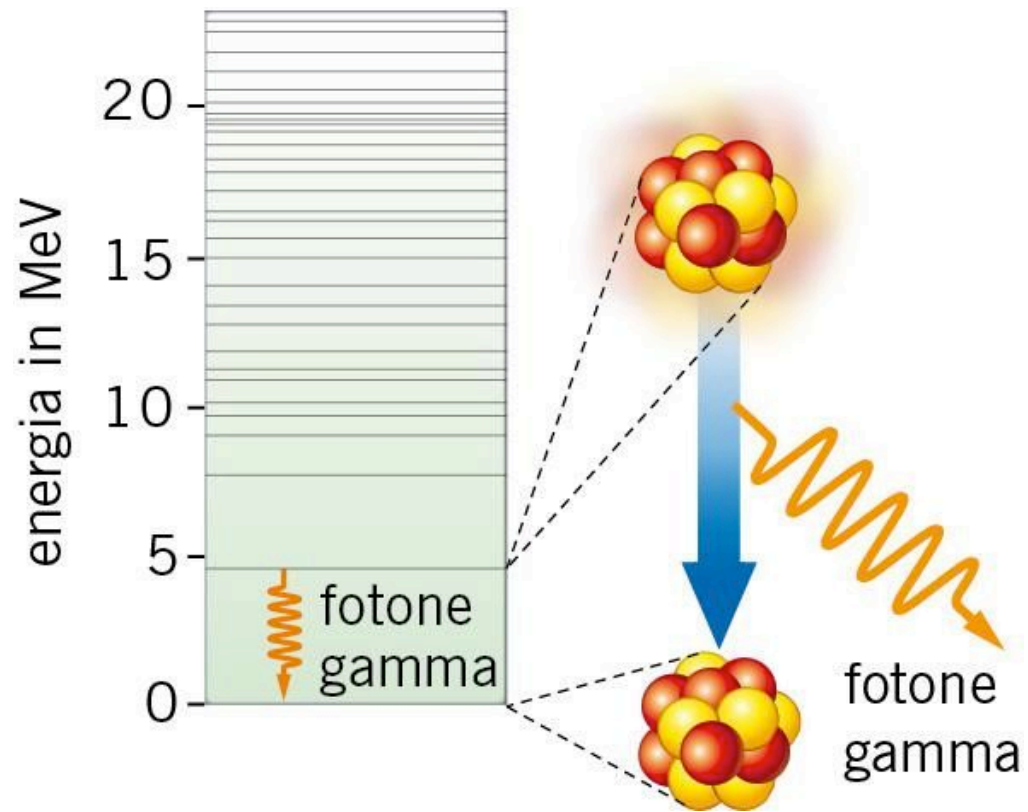
Pertanto i nuclei, essendo governati dalle leggi della meccanica quantistica, non tutte le energie sono permesse. I nuclei:

possono esistere soltanto in certi distinti stati di energia, ciascuno definito da uno specifico valore dell'energia.

Di solito i nuclei si trovano nello stato di energia più bassa (lo stato fondamentale).

Poiché le energie di legame dei nuclei sono di diversi MeV, quando un nucleo effettua una transizione da un livello a un altro livello di minor energia, il fotone emesso è un fotone gamma.

Ossia, le energie dei fotoni emessi sono anch'esse dell'ordine del MeV, molto maggiori di quelle emesse nelle transizioni atomiche.



MODELLI NUCLEARI

I nuclei sono più complicati degli atomi. Per gli atomi la legge che governa la forza fondamentale, la legge di Coulomb, è di forma semplice, ed esiste un centro naturale delle forze, il nucleo. Per i nuclei la legge che ne governa le forze è complessa, e non esiste un centro geometrico cui si applicano le forze, che possa semplificare i calcoli.

Due modelli di nuclei si sono rivelati utili, che pur partendo da presupposti che sembrano inconciliabili, possono essere combinati per creare un singolo modello unificato del nucleo.

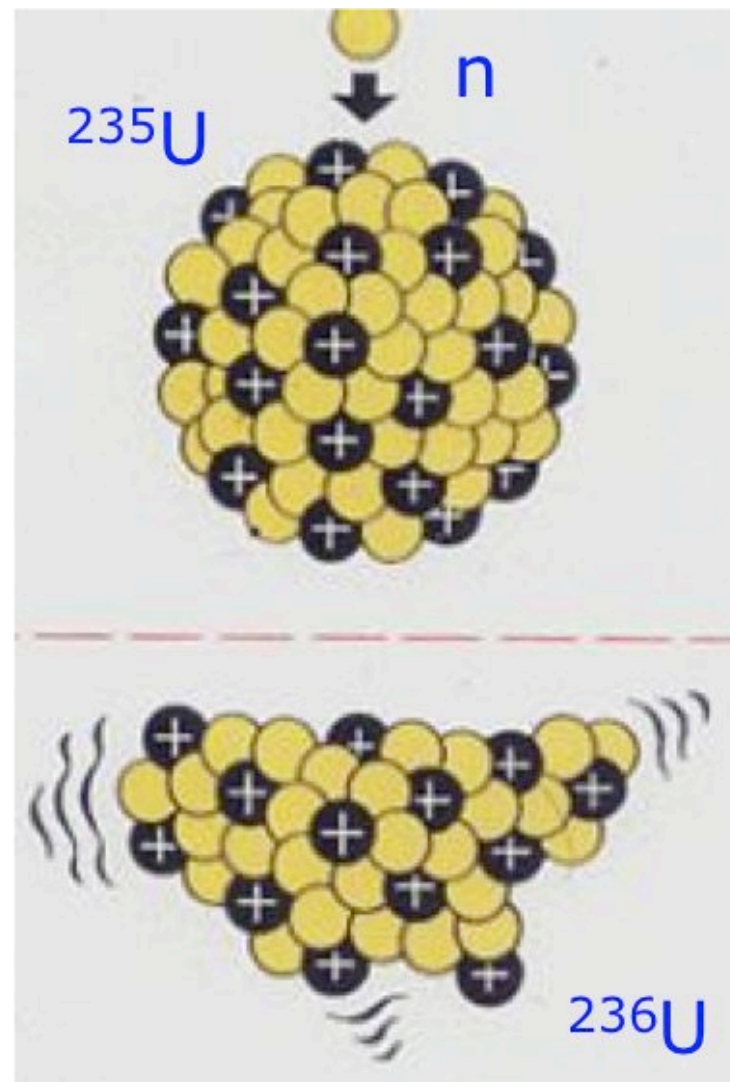
Il modello a goccia

Il fatto che la densità della materia nucleare sia costante, ci dice che tale materia è incompressibile, e questa caratteristica, insieme ad altre, indica una certa somiglianza tra la materia nucleare ed un liquido.

Questa analogia ha portato all'elaborazione del modello nucleare a goccia, un modello molto semplice che è in grado di spiegare, mediante pochi parametri empirici, importanti proprietà dei nuclei.

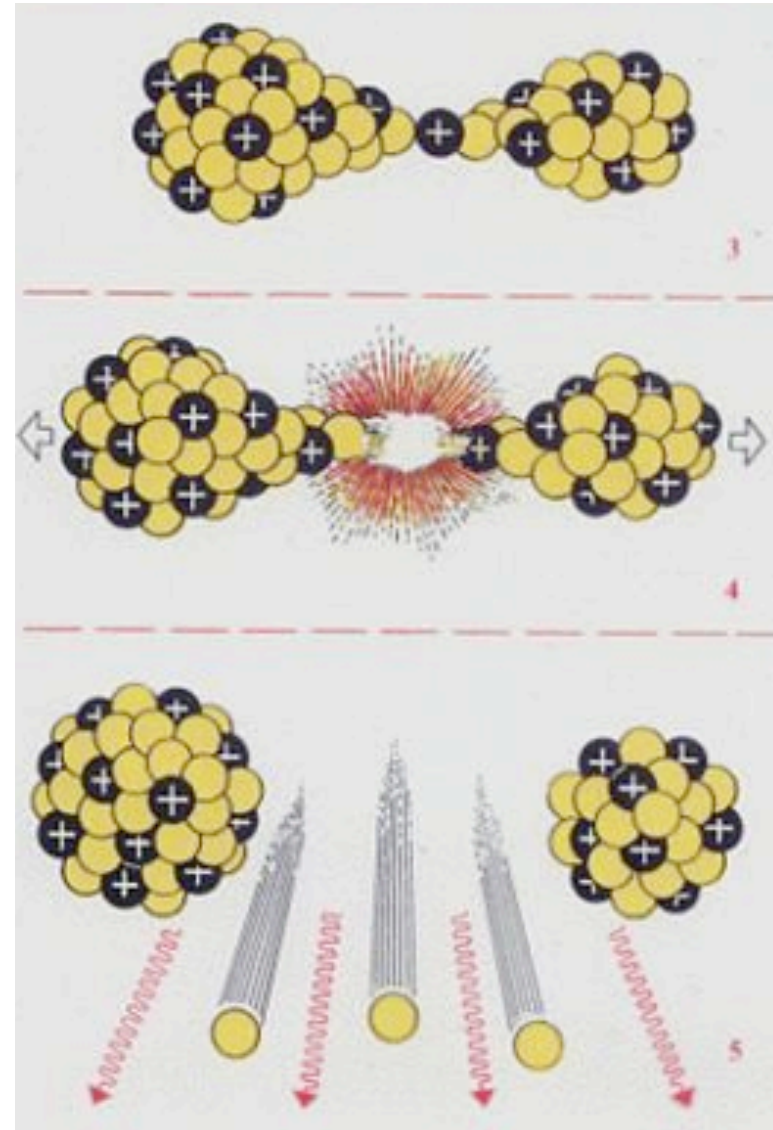
In questo modello i nucleoni interagiscono energeticamente tra loro, con moto caotico, come le molecole di un liquido all'interno di una goccia.

Per descrivere questo modello, consideriamo nucleo di uranio-235. Quando il proiettile neutrone penetra nel bersaglio, forma un nucleo instabile di uranio-236 in quanto gli conferisce una certa quantità di energia di eccitazione. Lo stato di instabilità di ^{236}U è di circa 10^{-16} s, una durata molto lunga se confrontata a quelle delle reazioni nucleari.



In circa 10^{-8} s, il nucleo di ^{236}U si allunga in forma di goccia d'acqua, e le forze coulombiane lo estendono ulteriormente si spezza fino a spezzarlo in due frammenti liberando energia.

Caratteristica essenziale di questo modello è che la formazione del nucleo instabile e il suo successivo decadimento sono eventi totalmente indipendenti.



È come se, dopo la spartizione dell'energia di eccitazione, il nucleo instabile avesse dimenticato come è stato formato, per decadere semplicemente secondo una logica statistica.

Pro e contro del modello a goccia:

- fornisce una corretta idea delle masse nucleari, delle energie di legame e di altri parametri del nucleo.
- non riesce a descrivere gli stati eccitati del nucleo, alcune proprietà dei decadimenti alfa e beta, e altre questioni.

Il modello a shell

È un modello che usa il principio di esclusione di Pauli per descrivere la struttura del nucleo in termini dei livelli energetici.

Questo modello presuppone che ogni nucleone circoli su un orbita ben definita all'interno del nucleo e che ben difficilmente entri in collisione con gli altri.

Pertanto, è un modello parzialmente analogo al modello atomico a shell che descrive la disposizione degli elettroni in un atomo, in particolare la configurazione di "shell piena" cui corrisponde una particolare stabilità nella configurazione elettronica (gas nobili).

Un nucleone dentro un nucleo, come un elettrone in un atomo, ha una serie di numeri quantici che definiscono il suo stato di moto, ed inoltre obbediscono al principio di esclusione di Pauli (due nucleoni non possono occupare uno stesso stato nello stesso tempo).

Nel considerare gli stati dei nucleoni, neutroni e protoni sono trattati separatamente, avendo ciascuno la propria serie di stati quantizzati disponibili.

Il fatto che i nucleoni obbediscono al principio di esclusione di Pauli aiuta a comprendere la relativa stabilità degli stati dei nucleoni. Se due nucleoni devono venire in collisione all'interno del nucleo, l'energia di ciascuno di essi dopo la collisione deve corrispondere all'energia di uno stato stazionario non occupato.

Se questi stati sono già riempiti, la collisione non può avvenire. A tempo debito, a ogni singolo nucleone toccherà l'occasione di una collisione con esito favorevole, ma nel frattempo avrà fatto un numero di rivoluzioni nella sua orbita sufficiente a dare un significato alla nozione di uno stato nucleonico stazionario con un'energia quantizzata ben definita.

Nel mondo degli atomi, la ripetitività delle proprietà fisiche e chimiche, che è l'essenza della tavola periodica degli elementi, è strettamente legata al fatto che gli elettroni periferici si sistemano in strati, o gusci, che godono di una spiccata stabilità quando sono completamente occupati.

Anche i nuclei presentano simili effetti di saturazione dei gusci, associati con certi numeri nucleonici battezzati “numeri magici”:

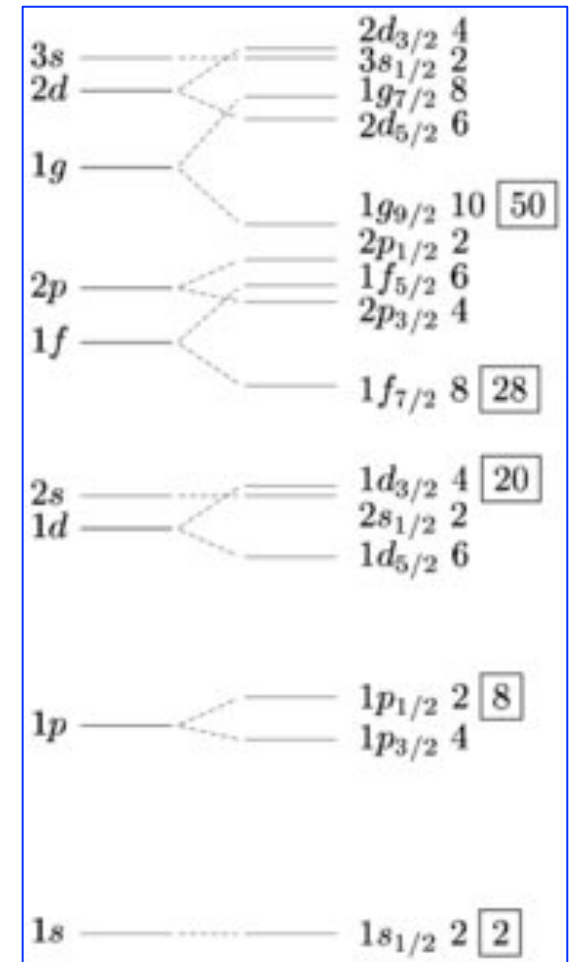
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Ovvero, le configurazioni contenenti questi numeri di nucleoni risultano particolarmente più stabili di quelle contenenti un nucleone in più.

Allora, ogni nuclide in cui Z o N corrisponda a uno di questi valori risulta avere un certo grado di stabilità, come per esempio l'ossigeno ^{18}O ($Z=8$), il piombo ^{208}Pb ($Z=82$, $N=126$), ecc.

I numeri magici sono un indizio dell'esistenza di una struttura interna del nucleo e di una distribuzione regolare delle particelle su livelli energetici od orbite proprio come la distribuzione degli elettroni nell'atomo.

Si può immaginare che l'aggregato di nucleoni su un livello energetico o su livelli molto vicini formi una shell nucleare il cui graduale riempimento conduce alla formazione di nuclei particolarmente stabili, in analogia con la formazione dei gas nobili come risultato del riempimento delle shell atomiche.



La validità del concetto di guscio completo è confermata dal fatto che una particella che si trova immediatamente fuori di un guscio completamente occupato può essere facilmente asportata, mentre per rimuoverne una che fa parte del guscio chiuso occorre un'energia molto superiore.

LA RADIOATTIVITA'

La scoperta della **radioattività** si deve al fisico francese **Becquerel** (1852–1908; Premio Nobel), che nel 1896 scoprì che l'uranile (solfato doppio di uranio e potassio), un minerale caratterizzato da un notevole potere fluorescente, emetteva una radiazione penetrante simile ai raggi X, ma emessa spontaneamente, senza che fosse necessaria alcuna eccitazione.

Becquerel provò a riscaldare il cristallo, a raffreddarlo, a polverizzarlo, a scioglierlo in acidi, insomma a sottoporlo a tutti i trattamenti possibili, ma l'intensità della misteriosa radiazione restava costante.

Questa nuova proprietà della materia, battezzata col nome di *radioattività*, non aveva nulla a che vedere col trattamento chimico o fisico cui era sottoposta, ma era una *proprietà intrinseca dell'atomo*.

Negli anni immediatamente successivi alla scoperta della radioattività, un gran numero di fisici e chimici rivolsero la loro attenzione al nuovo fenomeno, scoprendo altri materiali radioattivi come il polonio (**Marie Curie** 1867–1934; Premio Nobel), il radio e molte altre sostanze radioattive.

La ricerca in questo nuovo ramo della fisica progredì rapidamente, orientandosi verso lo studio delle proprietà della radiazione penetrante.

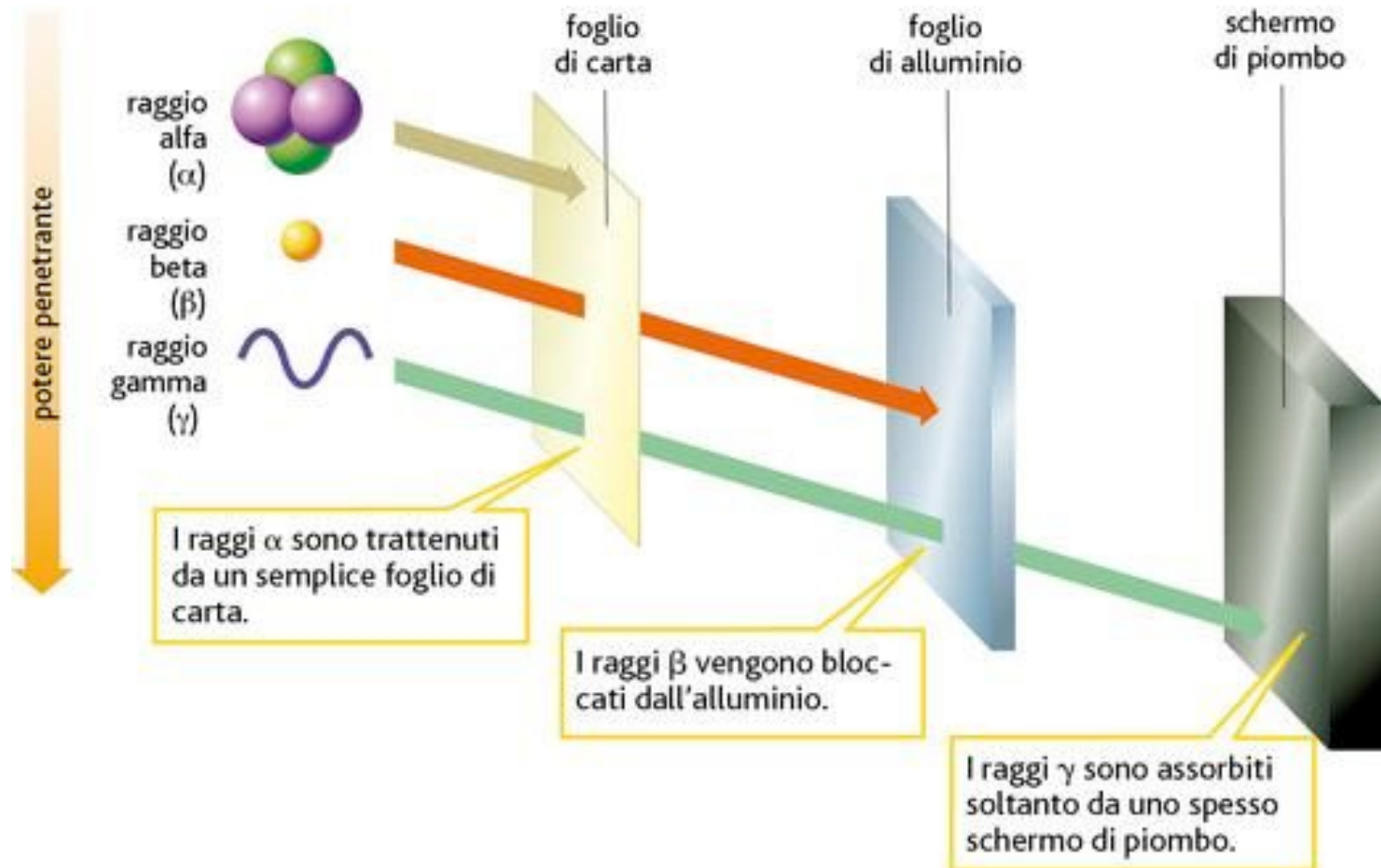
Subito dopo la scoperta della radioattività, Rutherford ed il suo collaboratore **Soddy** (1877–1956; Premio Nobel), annunciarono che il fenomeno della radioattività era il risultato di una trasformazione spontanea di un elemento in un altro tramite l'emissione di radiazione.



Anche gli scettici più convinti dovettero abbandonare la radicata convinzione sull'immutabilità della materia.

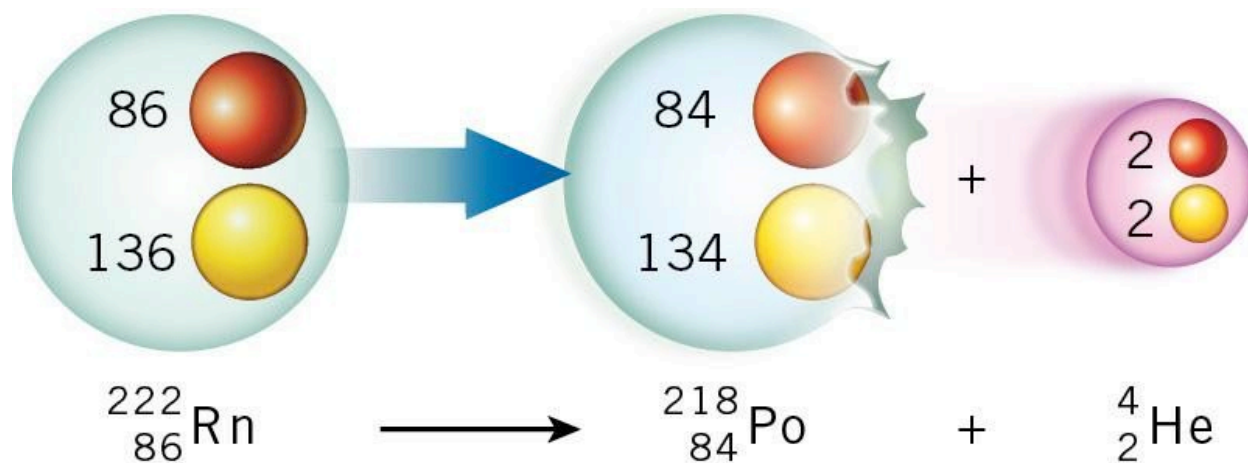
Le radiazioni α , β , γ

In base alle proprietà penetranti, la radiazione può essere di tre tipi:



➤ **Radiazione α (alfa)**: è la radiazione meno penetrante, basta un foglio di carta per fermarla. Nel decadimento α la trasformazione del nucleo è accompagnata dall'emissione di una particella alfa (nucleo di elio).

Un esempio è rappresentato dal nucleo di radon-222, un gas radioattivo naturale emesso dal suolo.

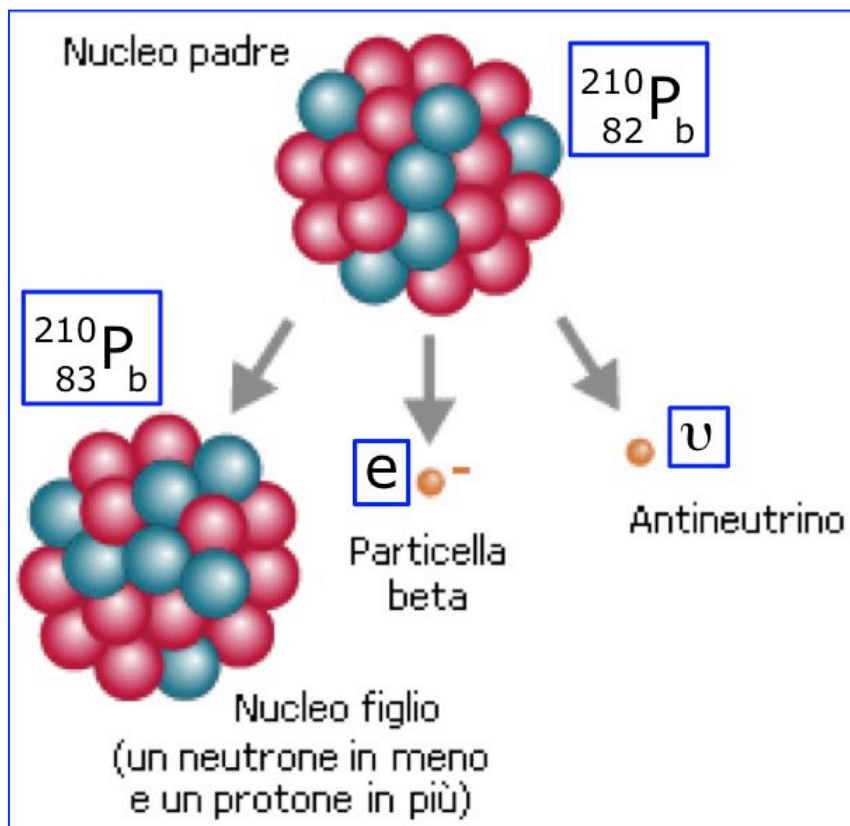


Il nucleo di radon-222 decade spontaneamente in un nucleo di polonio-218, emettendo radiazione (particelle alfa).

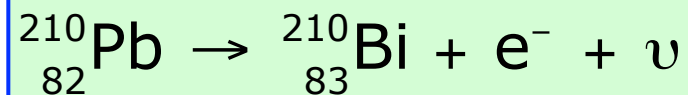
Poiché il numero di protoni e neutroni si deve conservare, allora il numero atomico del nucleo figlio (il polonio) deve diminuire di 2 e il numero di massa di 4 in quanto la particella alfa ha $Z=2$ e $A=4$.

➤ **Radiazione β (beta)**: è più penetrante della radiazione α , e ci vuole una lastra di alluminio di pochi millimetri per bloccarla. Nel decadimento β la trasformazione del nucleo è accompagnata dall'emissione di un elettrone.

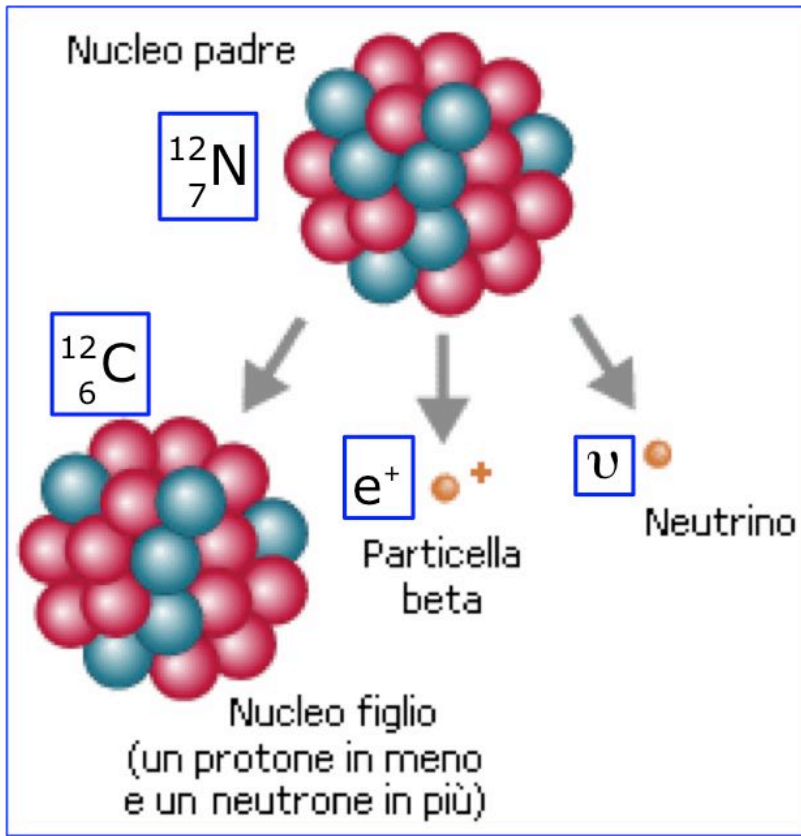
Un esempio è rappresentato dal piombo-210.



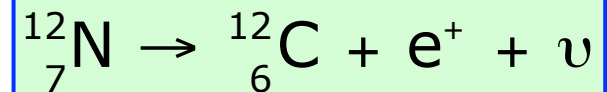
Il nucleo di piombo-210 decade spontaneamente in un nucleo di bismuto-210, emettendo un elettrone (particella beta) e un antineutrino (antiparticella del neutrino con carica neutra e massa quasi nulla):



Nel decadimento β il numero di massa dei due nuclei non cambia, mentre il numero atomico aumenta di una unità perché un neutrone si trasforma in un protone.

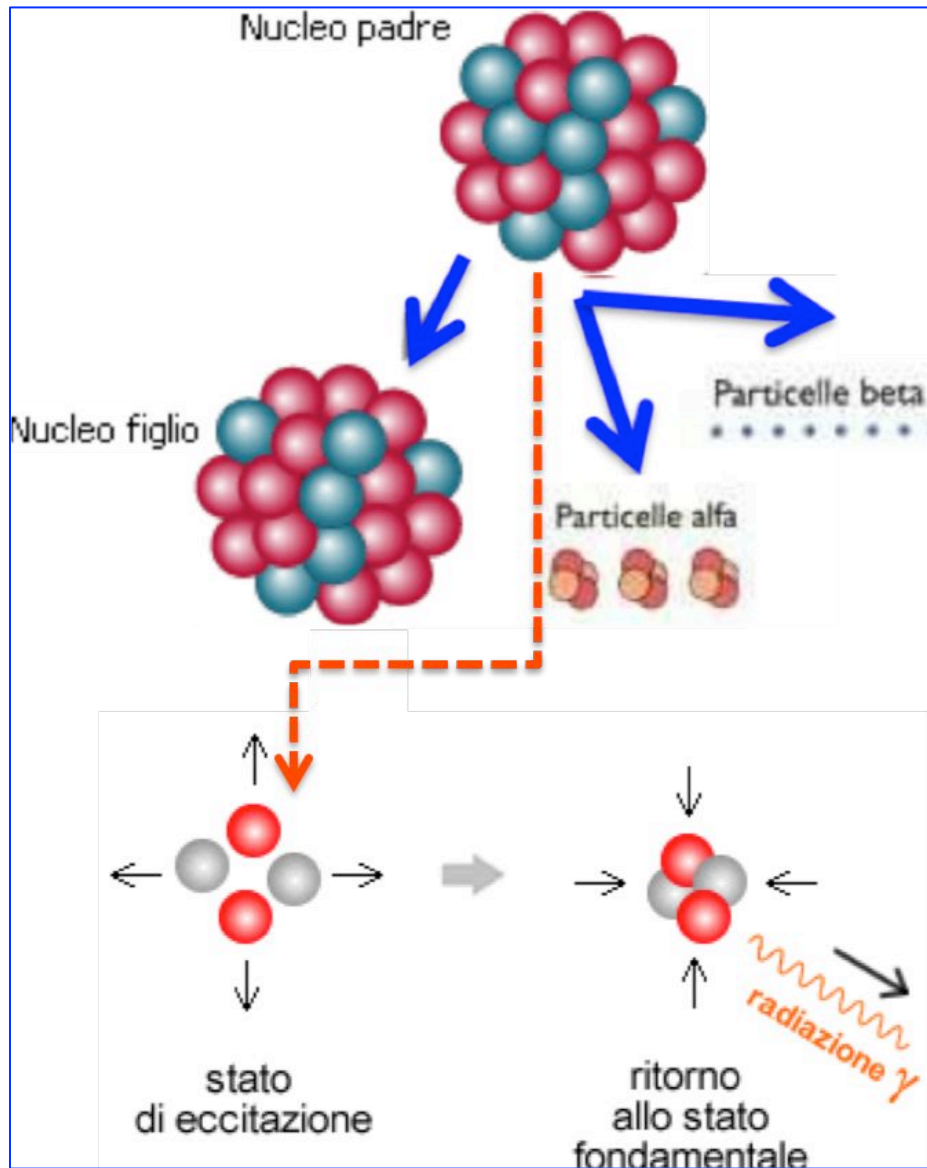


➤ **Radiazione β inversa:** un protone del nucleo si trasforma in un neutrone con emissione di un positone (antiparticella dell'elettrone) e di un neutrino (particella con carica neutra e massa praticamente nulla):



Nel nostro esempio, il nucleo di azoto-12 decade spontaneamente in un nucleo di carbonio-12, emettendo un positone e un neutrino. Il numero di massa rimane invariato e il numero atomico diminuisce di uno.

- **Radiazione γ (gamma)**: è la più penetrante delle tre e ci vuole una lastra di piombo di qualche centimetro per arrestarla. Scoperta dal fisico francese **Villard** (1860-1934), i raggi gamma non sono altro che onde elettromagnetiche, ossia fotoni di altissima energia.



L'emissione di raggi γ è un processo secondario che accompagna l'emissione delle particella α e β . Infatti, in seguito all'emissione di tali particelle il nucleo si porta in uno stato eccitato e, nel ritorno allo stato fondamentale, emette raggi γ .

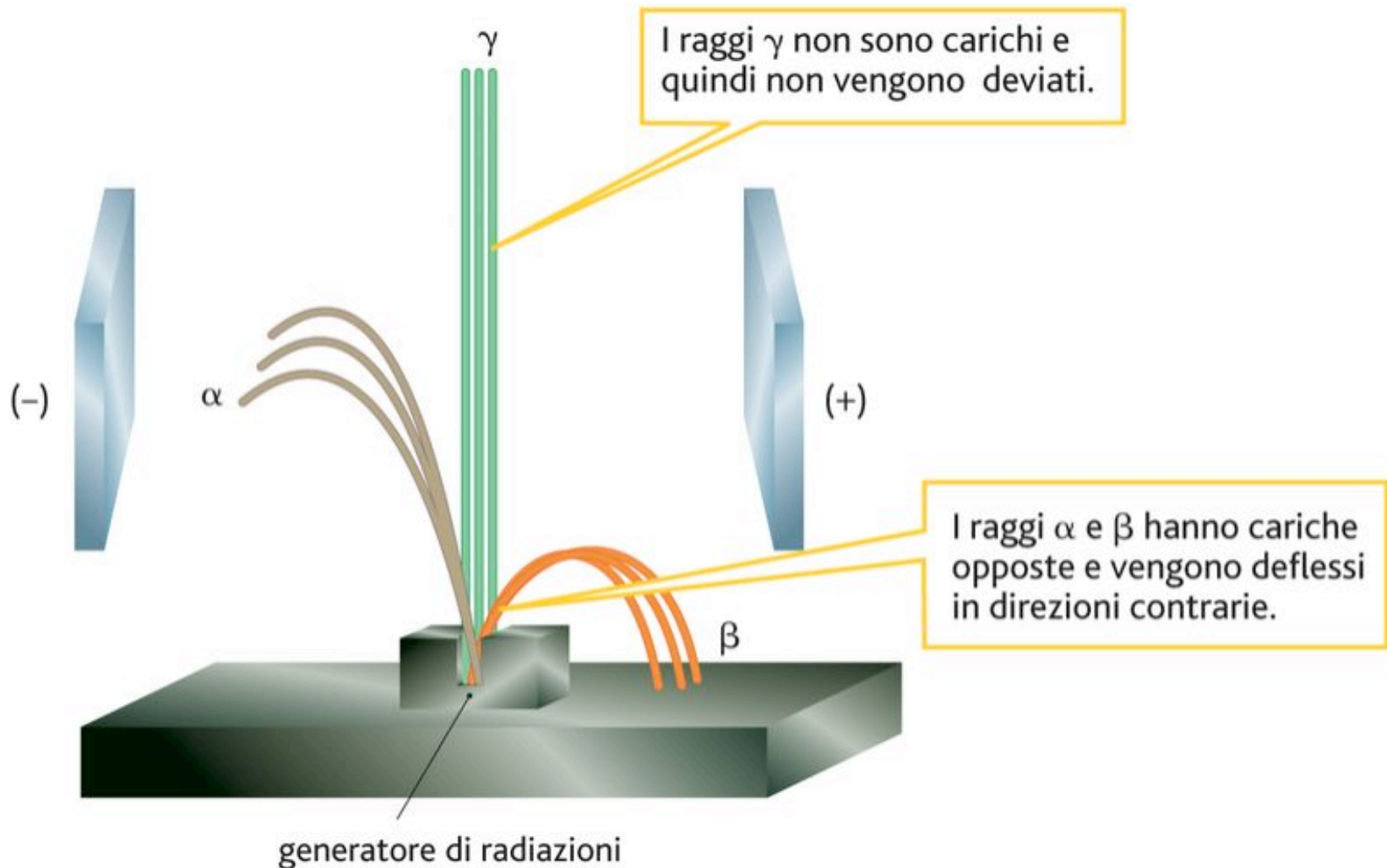
Riepilogando: L'emissione di una particella α ha come risultato la formazione di un elemento spostato di due posti a sinistra nel Sistema Periodico e la cui massa atomica è inferiore di quattro unità rispetto a quello di partenza. L'emissione di una particella β sposta l'elemento di un posto a destra nel Sistema Periodico, mentre ne lascia invariato il peso atomico. L'emissione di raggi γ è un processo secondario che accompagna l'emissione delle particella α e β .

NATURA DELLE RADIAZIONI

Radiazione α	Radiazione β^-	Radiazione β^+	Radiazione γ
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 \alpha^4$ ${}_2 \alpha^4$ = nuclei di elio	${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + {}_{-1} \beta^0 + \bar{\nu}$ ${}_{-1} \beta^0$ = elettrone $\bar{\nu}$ = antineutrino	${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + {}_{+1} \beta^0 + \nu$ ${}_{+1} \beta^0$ = positrone ν = neutrino	${}_Z^* X^A \rightarrow {}_Z X^A + \gamma$ γ = fotone

X = nucleo dell'elemento radioattivo; Y = nucleo dell'elemento originario del decadimento;
 A = numero di massa = numero totale dei nucleoni; Z = numero atomico ${}_Z^* X$ = nucleo in uno stato eccitato.

Il comportamento dei tre tipi di radiazione in un campo magnetico è il seguente:



L'interpretazione del fenomeno della radioattività come un decadimento spontaneo dei nuclei atomici non lasciava alcun dubbio che i nuclei fossero sistemi meccanici complessi costituiti da molte particelle. Il fatto poi che i pesi atomici degli isotopi di tutti gli elementi fossero ben rappresentati con numeri interi, indicava nei protoni il principale costituenti del nucleo.

Quando Bohr parlò a Rutherford di questi fatti, decisero di comune accordo che il solo modo per salvare la situazione, dal punto di vista quantistico, era di supporre l'esistenza di protoni senza carica, che furono chiamati neutroni, scoperti successivamente nel 1932 da Chadwick.

LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

In base alle leggi della meccanica quantistica il decadimento radioattivo di un nucleo è un processo puramente casuale; da ciò discende che mentre è praticamente impossibile determinare l'istante in cui un particolare nucleo si disintegra, ossia decade, si può invece predire la probabilità che un certo numero di nuclei di una data specie decada in un dato intervallo di tempo.

Il decadimento radioattivo ha fornito la prima prova del fatto che le leggi che governano il mondo subatomico sono di natura statistica.

Cerchiamo di capire la legge che regola il decadimento radioattivo.

Se indichiamo con N_0 il numero di nuclei radioattivi presenti in un campione radioattivo a un certo istante, decadendo nel tempo, il loro numero N diminuisce nel tempo.

La variazione negativa ΔN dei decadimenti è direttamente proporzionale al numero N dei nuclei originari ancora presenti nel campione e all'intervallo di tempo Δt durante il quale questi decadimenti sono avvenuti:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

λ =costante di decadimento (unità di misura s^{-1}) differente per ogni nucleo radioattivo considerato.

La relazione precedente, scritta in termini di equazione differenziale, diventa:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

la cui soluzione è la seguente funzione $N(t)$ che decresce esponenzialmente nel tempo:

legge del decadimento radioattivo

Se N_0 è il numero dei nuclei radioattivi all'istante iniziale, il numero N dei nuclei non ancora decaduti in qualunque istante t è:

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

Vediamo cosa succede a un campione radioattivo di radon-222:

- dopo un tempo $t=3,8$ giorni, la quantità iniziale di radon si dimezza;
- dopo un tempo doppio $t=7,6$ giorni, la quantità di radon si dimezza ulteriormente, ossia diventa un quarto del valore iniziale;
- dopo un tempo triplo $t=11,4$ giorni, la quantità di radon diventa un ottavo del valore iniziale;
- e così via.

Come ben si deduce dall'esempio, per caratterizzare i fenomeni radioattivi, al posto della costante di decadimento λ , è conveniente utilizzare il periodo di dimezzamento T così definito:

Il tempo di dimezzamento T è l'intervallo di tempo necessario affinché decada metà dei nuclei N_0 originari presenti nel campione radioattivo:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Infatti, ponendo $N=N_0/2$ e $t=T$ nella legge del decadimento, si ottiene:

$$\begin{aligned} N = N_0 e^{-\lambda t} &\xrightarrow{N=N_0/2; t=T} \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \\ \Rightarrow e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} &\rightarrow e^{\lambda T} = 2 \xrightarrow{\text{soluzione}} \lambda T = \ln 2 \rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned}$$

Grafico del numero di nuclei radioattivi presenti in un determinato campione in funzione del tempo.

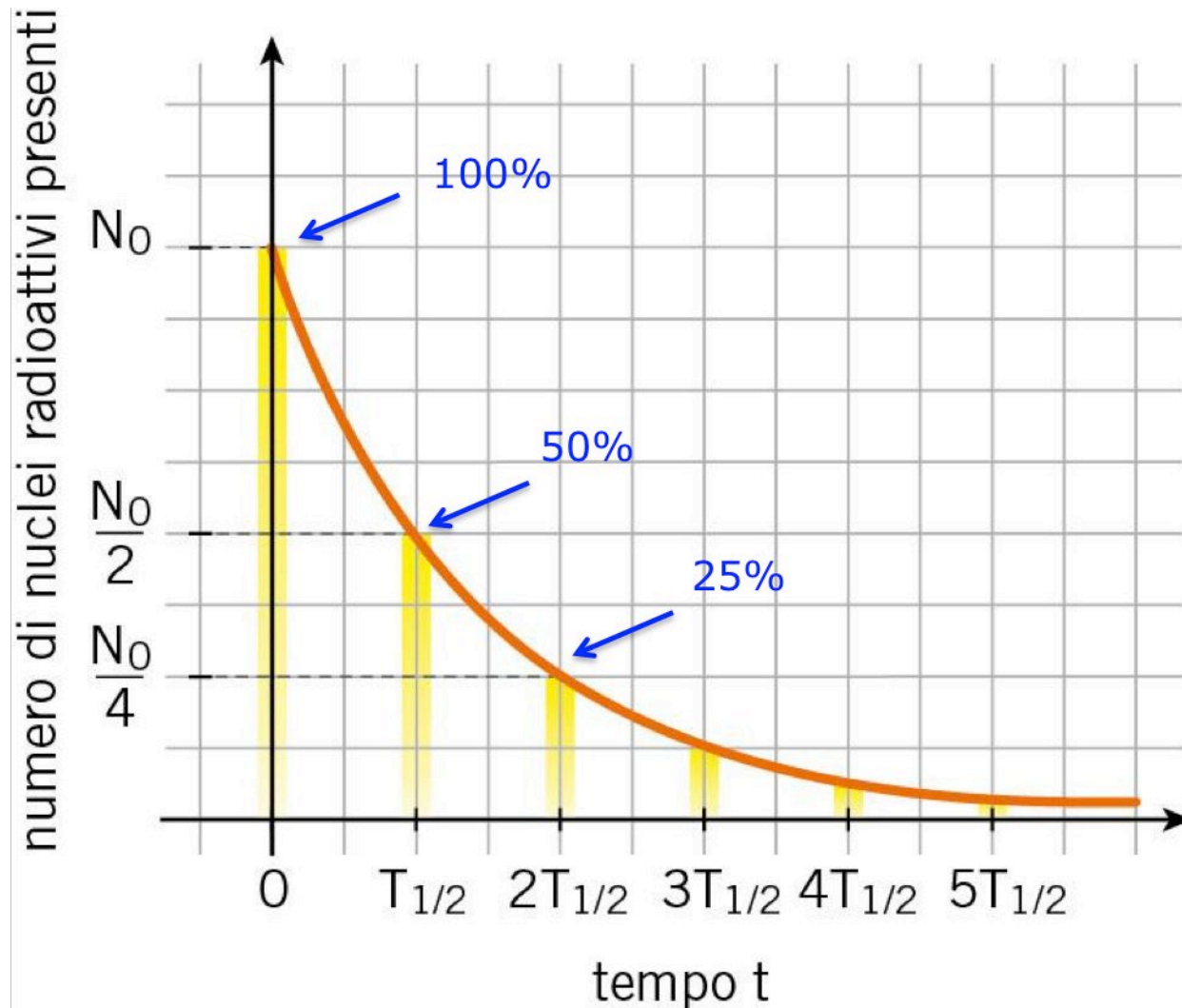


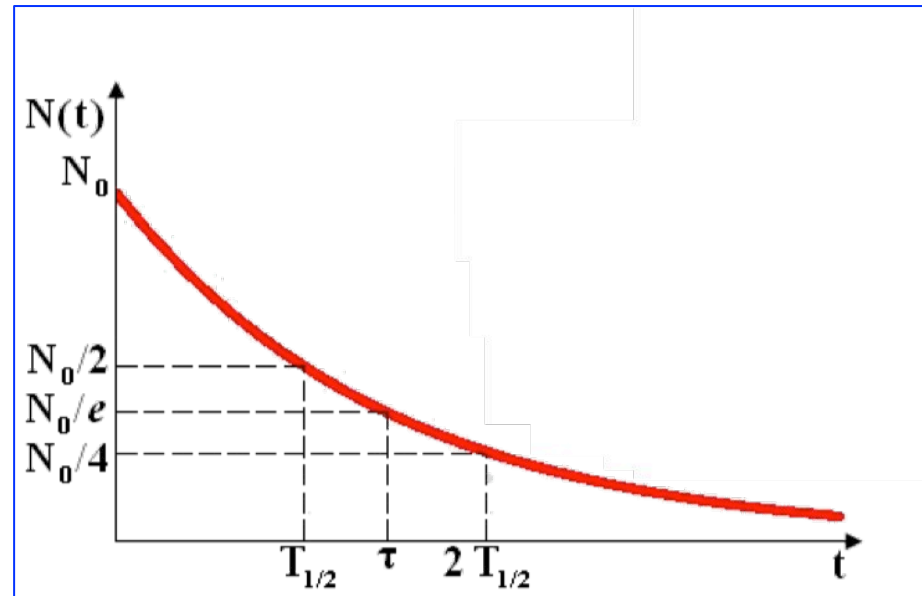
Tabella tempo di dimezzamento di alcuni radioisotopi e relativo tipo di decadimento.

Nuclide	$T_{1/2}$	Decadimento	Origine
${}^3_1\text{H}$	12,3 anni	β^-	artificiale
${}^{14}_6\text{C}$	5730 anni	β^-	presente in natura
${}^{15}_8\text{C}$	124 secondi	β^+	artificiale
${}^{40}_{19}\text{K}$	$1,3 \cdot 10^9$ anni	β^-, γ	presente in natura
${}^{60}_{27}\text{Co}$	5,26 anni	β^-, γ	artificiale
${}^{131}_{53}\text{I}$	8,07 giorni	β^-	artificiale
${}^{188}_{79}\text{Au}$	8 minuti	β^+	artificiale
${}^{201}_{82}\text{Pb}$	9,4 ore	β^+	artificiale
${}^{222}_{86}\text{Rd}$	3,82 giorni	α, γ	presente in natura
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 anni	α	presente in natura
${}^{230}_{90}\text{Th}$	$8 \cdot 10^4$ anni	α, γ	presente in natura
${}^{232}_{90}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$ anni	α	presente in natura
${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ anni	α	presente in natura

La **vita media** del nucleo radioattivo e la costante di decadimento sono così legate:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0,693}$$

La **vita media**, costante tipica di ogni nucleo, rappresenta l'intervallo di tempo necessario affinché i nuclei del campione radioattivo si riducano alla frazione $1/e=0,368$ del numero iniziale.



Molto spesso siamo più interessati a conoscere la frequenza dei decadimenti del campione radioattivo, piuttosto che il loro numero.

Questa velocità dei decadimenti si chiama **attività** ed è così definita:

L'attività R del campione radioattivo rappresenta il numero di decadimenti che avvengono nell'unità di tempo:

$$R = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Se scriviamo la relazione precedente per quantità infinitesime, e tenendo presente la legge del decadimento radioattivo, si ottiene, attraverso l'operazione di derivata della funzione $N(t)$ rispetto al tempo, la seguente relazione per l'attività R :

$$R = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(-N_0 e^{-\lambda t}) \xrightarrow{\text{derivata}}$$

$$R = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \frac{1}{\tau} N_0 e^{-\lambda t}$$

L'attività R aumenta all'aumentare di N_0 (nuclei radioattivi presenti nel campione) e diminuisce all'aumentare della vita media τ (ossia del tempo di dimezzamento del radionuclide).

Nel sistema internazionale l'unità di misura dell'attività radioattiva è il **becquerel (Bq)**, definito come l'attività di un campione radioattivo che subisce un decadimento al secondo:

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

Anche se non più prevista dalla normativa, un'altra unità di misura molto usata è il **curie (Ci)**:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Le famiglie radioattive

Poiché il fenomeno del decadimento può riguardare anche i nuclei figli, fino a ottenere un nucleo stabile (per esempio un nucleo di radon-222 decade in un nucleo di polonio-218 il quale, a sua volta, si trasforma in un altro nucleo radioattivo, il piombo-214, il quale subisce un altro decadimento fino a ottenere un nucleo stabile), allora si possono costruire delle vere e proprie serie radioattive:

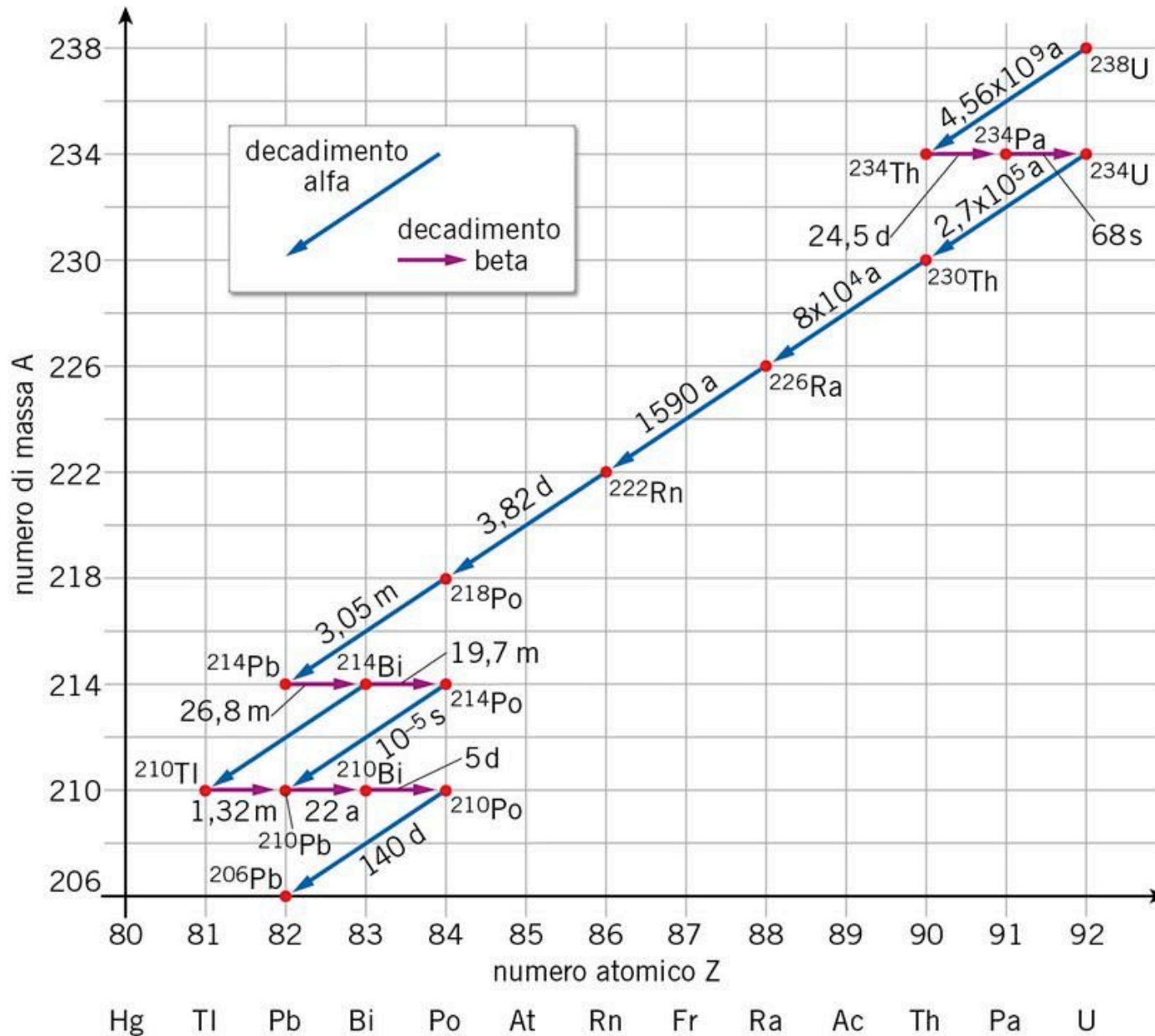
esistono delle famiglie radioattive nelle quali si susseguono elementi radioattivi (alcuni per decadimento alfa, altri per decadimento beta) finché si giunge a un nucleo stabile.

In natura esistono tre grandi famiglie radioattive:

1. La famiglia dell'uranio
2. La famiglia del torio
3. La famiglia dell'attinio

Di seguito è riportata la famiglia dell'uranio, il cui "capostipite" è l'uranio-238 e termina con il piombo-206, che è l'elemento stabile della famiglia.

famiglia radioattiva dell'uranio



La Terra ha circa 4,5 miliardi di anni, per cui in un campione radioattivo contenente uranio (tempo di dimezzamento pari a 4,5 miliardi di anni), sarebbero presenti tutti i prodotti di decadimento della famiglia dell'uranio.

Invece la famiglia del nettunio può essere considerata estinta in quanto il capostipite, il nettunio-237, avendo un tempo di dimezzamento pari a 2,2 milioni di anni, si è ridotto a quantità talmente piccole da sfuggire ad ogni sua possibile identificazione.

LA DATAZIONE RADIOATTIVA

Ogni radionuclide è caratterizzato da una propria vita media τ , per cui possiamo utilizzare il suo decadimento come un orologio.

Il decadimento di nuclei radioattivi con vita media lunga (uranio-238 oppure potassio-40) possono essere utilizzati per datare l'età di rocce terrestri, lunari e meteoriti. I risultati sperimentali ci dicono che hanno tutti approssimativamente la stessa età, intorno a 4,5 miliardi di anni, comunemente accettata come l'età del Sistema Solare.

Vediamo in che modo il decadimento di una sostanza radioattiva viene utilizzato come misuratore di tempo.

Consideriamo la famiglia radioattiva del potassio, che ha come capostipite l'isotopo ^{40}K e termina con l'isotopo stabile ^{40}Ar del gas nobile argon.

Il tempo di dimezzamento di questo decadimento radioattivo è 1,25 miliardi di anni. Misurando il rapporto tra le concentrazioni relative degli isotopi ^{40}K e ^{40}Ar nel campione di roccia in esame, se ne può calcolare l'età.

Vediamo in dettaglio il metodo di datazione.

Indichiamo con N_0 il numero di radionuclidi di ^{40}K , non ancora decaduti, originariamente presenti nel campione di roccia. Dopo un certo intervallo di tempo t , i nuclei di ^{40}K decadono in nuclei di ^{40}Ar , per cui il loro numero si è ridotto a N , mentre i nuclei di ^{40}Ar crescono $N_f = N_0 - N$.

Utilizzando la legge del decadimento radioattivo, si ottiene:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow e^{-\lambda t} = \frac{N}{N_0} \rightarrow e^{\lambda t} = \frac{N_0}{N} \xrightarrow{\text{soluzione}} t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N}$$

Poiché:

$$T = \frac{0,693}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$N_f = N_0 - N \Rightarrow N_0 = N_f + N$$

la relazione precedente diventa:

$$t = \frac{T}{0,693} \ln \frac{N_f + N}{N} = \frac{T}{0,693} \ln \left(1 + \frac{N_f}{N} \right)$$

Pertanto, noto il rapporto N_f/N , e, ovviamente, il tempo di dimezzamento del capostipite (^{40}K) della famiglia radioattiva, è possibile risalire all'età della roccia.

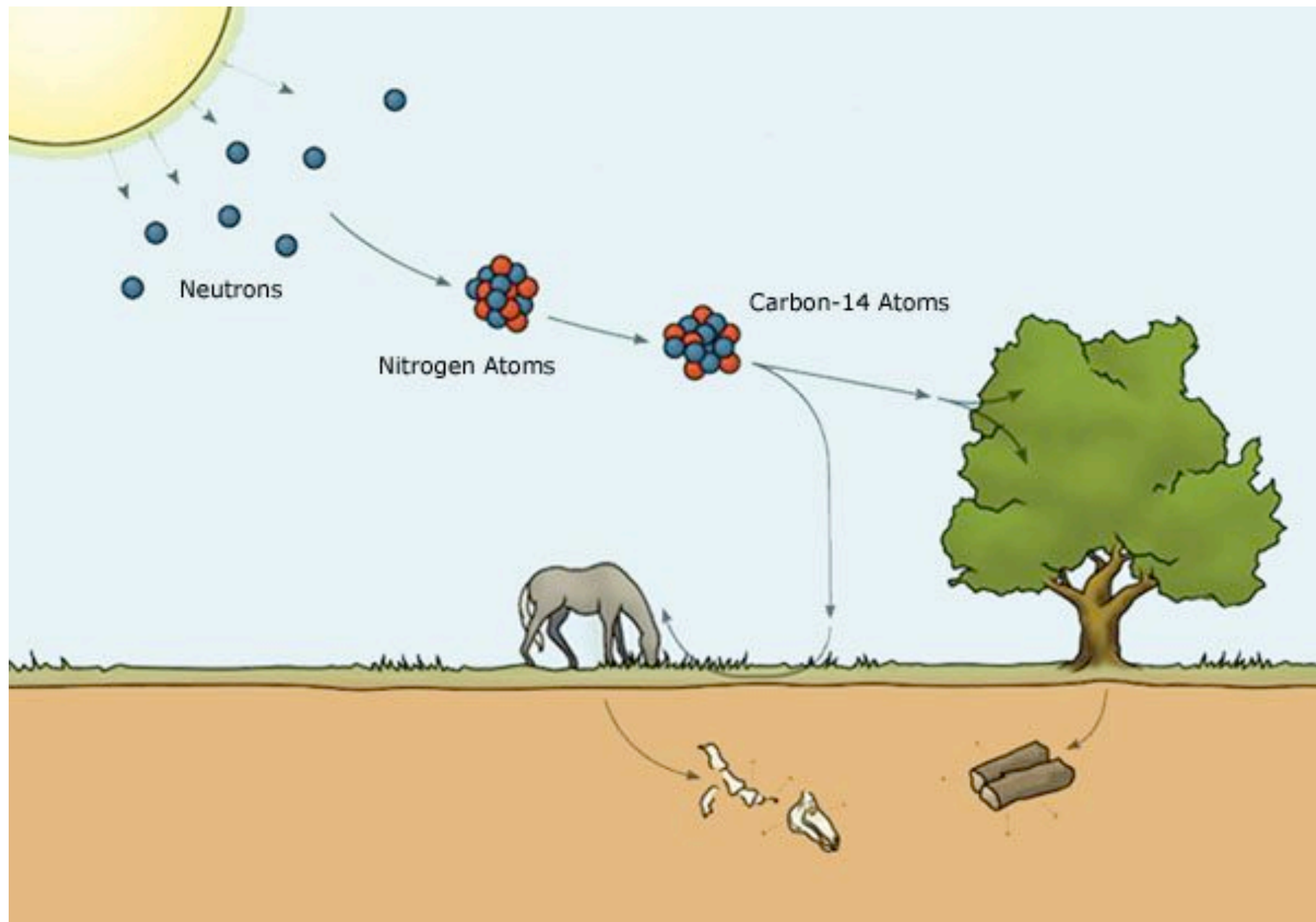
Datazione con il carbonio-14

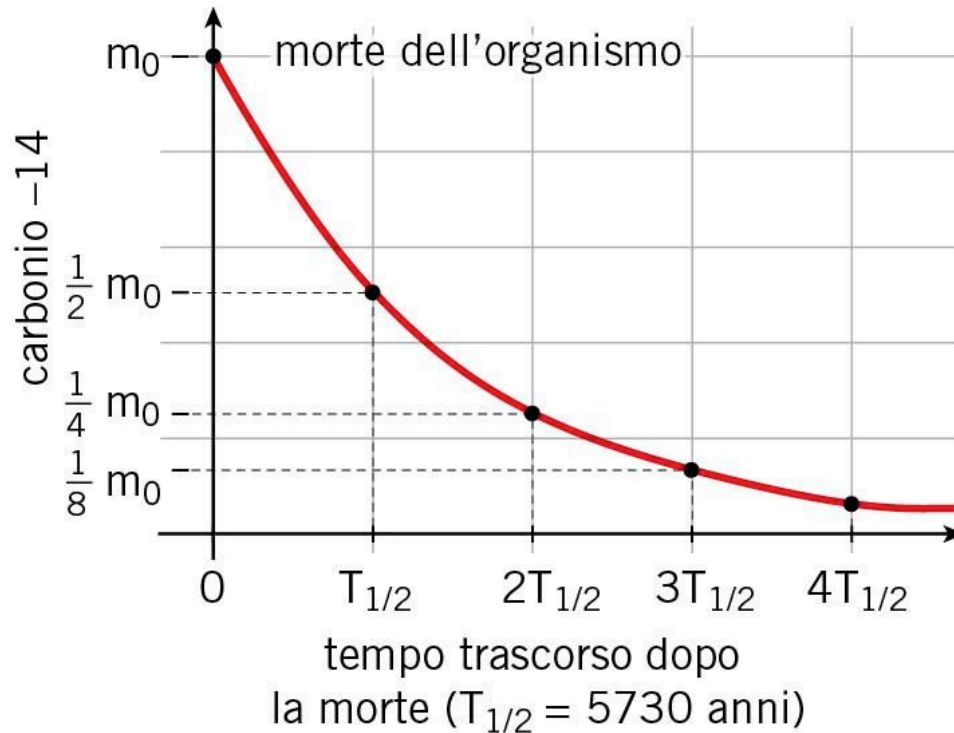
Per datare reperti di natura organica, con età relativamente breve, si usa la datazione con il radiocarbonio-14. Ma come si forma questo radioisotopo e come è presente nei materiali organici?

I neutroni prodotti dai raggi cosmici negli strati alti dell'atmosfera si combinano con l'azoto e producono l'isotopo ^{14}C tramite la seguente reazione nucleare:



Il radiocarbonio si combina con l'ossigeno e si muove liberamente nell'atmosfera sotto forma di anidride carbonica CO_2 . In questo modo viene assorbito dalle piante, dagli animali, e dall'uomo.





Dopo la morte, l'organismo vivente non assorbe più ^{14}C , così, mentre le quantità di isotopi stabili rimangono invariate, la quantità dell'isotopo ^{14}C comincia a diminuire (tempo di dimezzamento 5730 anni) esponenzialmente secondo la legge del decadimento radioattivo.

Grazie alla relazione precedentemente ricavata:

$$t = \frac{T}{0,693} \ln \left(1 + \frac{N_f}{N} \right)$$

misurando il contenuto residuo di ^{14}C in un determinato campione (pergamena, osso, legno, tessuto, ecc.) e paragonato con il contenuto iniziale (la cui concentrazione è costante fino alla morte dell'organismo e coincidente con quella contenuta in una pari quantità della miscela naturale di isotopi del carbonio presente nell'atmosfera), si può risalire all'età del reperto organico.

Con questo metodo di datazione è possibile datare reperti fino a circa 50.000 anni. Dato il tempo di dimezzamento del ^{14}C (5730 anni), per reperti più antichi la misura diventa non attendibile data la scarsa presenza del radiocarbonio nel campione.

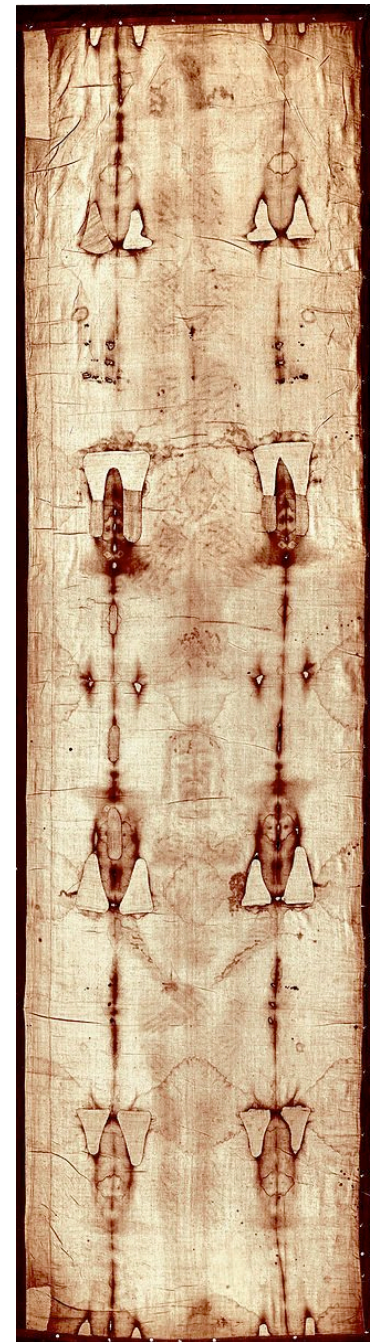
I residui di carbone da focolari preistorici, i rotoli di papiro del Mar Morto, mummie egizie, la Sindone, e molti altri reperti, sono stati datati in questo modo.



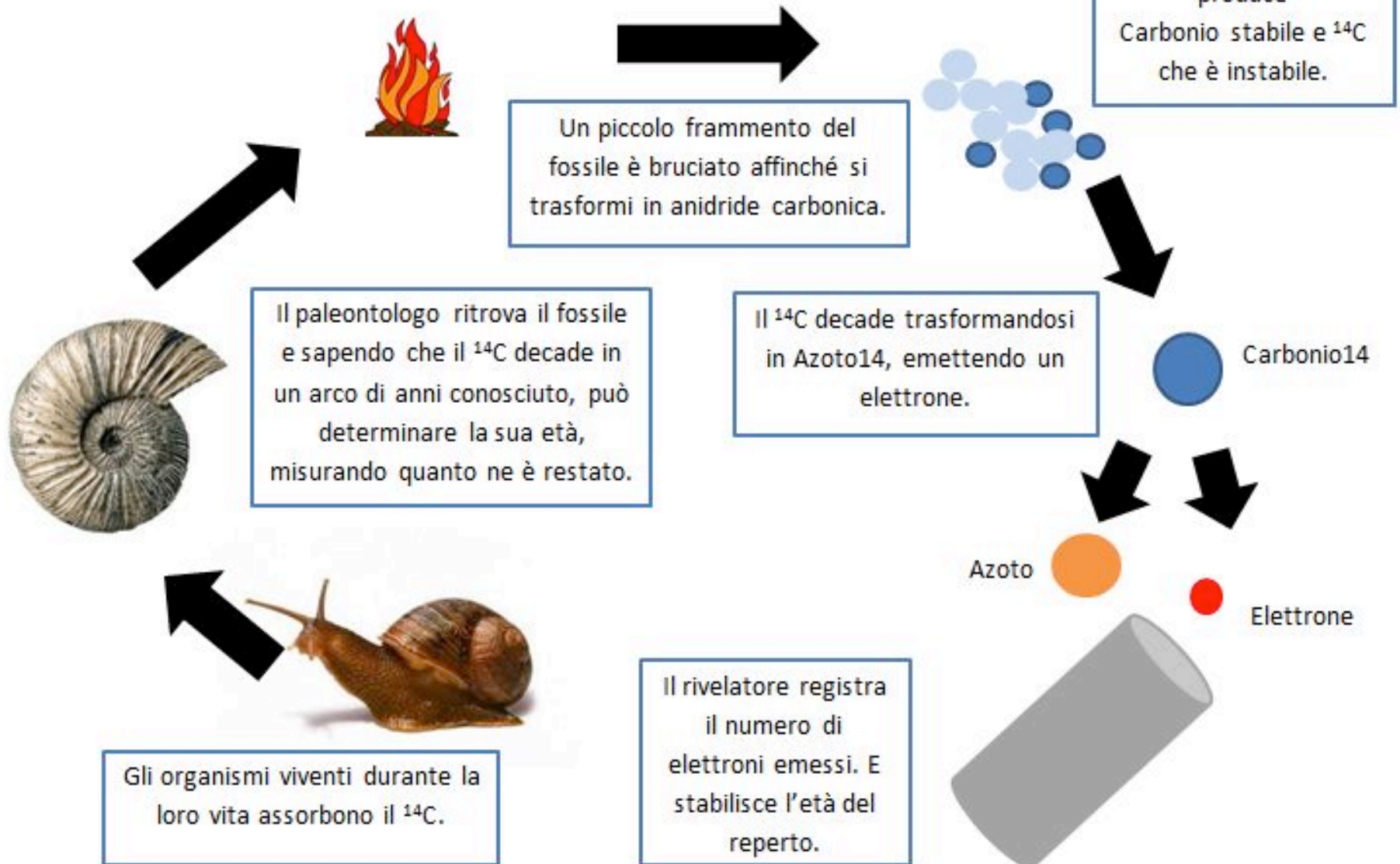
Esempio: datazione della Sindone

Nel 1988, tre laboratori (Tucson, Oxford e Zurigo), in maniera indipendente, effettuarono l'esame del carbonio-14 su un campione di tessuto prelevato dalla Sindone.

L'analisi del reperto, come di qualunque reperto organico, fu fatta nel seguente modo :



Metodo della spettrometria di massa



Misurando la quantità di ^{14}C presente nel campione, che si era ridotta del 10% rispetto a quella originaria, e conoscendo il suo tempo di dimezzamento (5730 anni), l'età stimata del reperto fu di:

$$t = \frac{T}{0,693} \cdot \ln \frac{N_0}{N} = \frac{5730}{0,693} \cdot \ln \frac{N_0}{0,9N_0} \cong 870 \text{ anni}$$

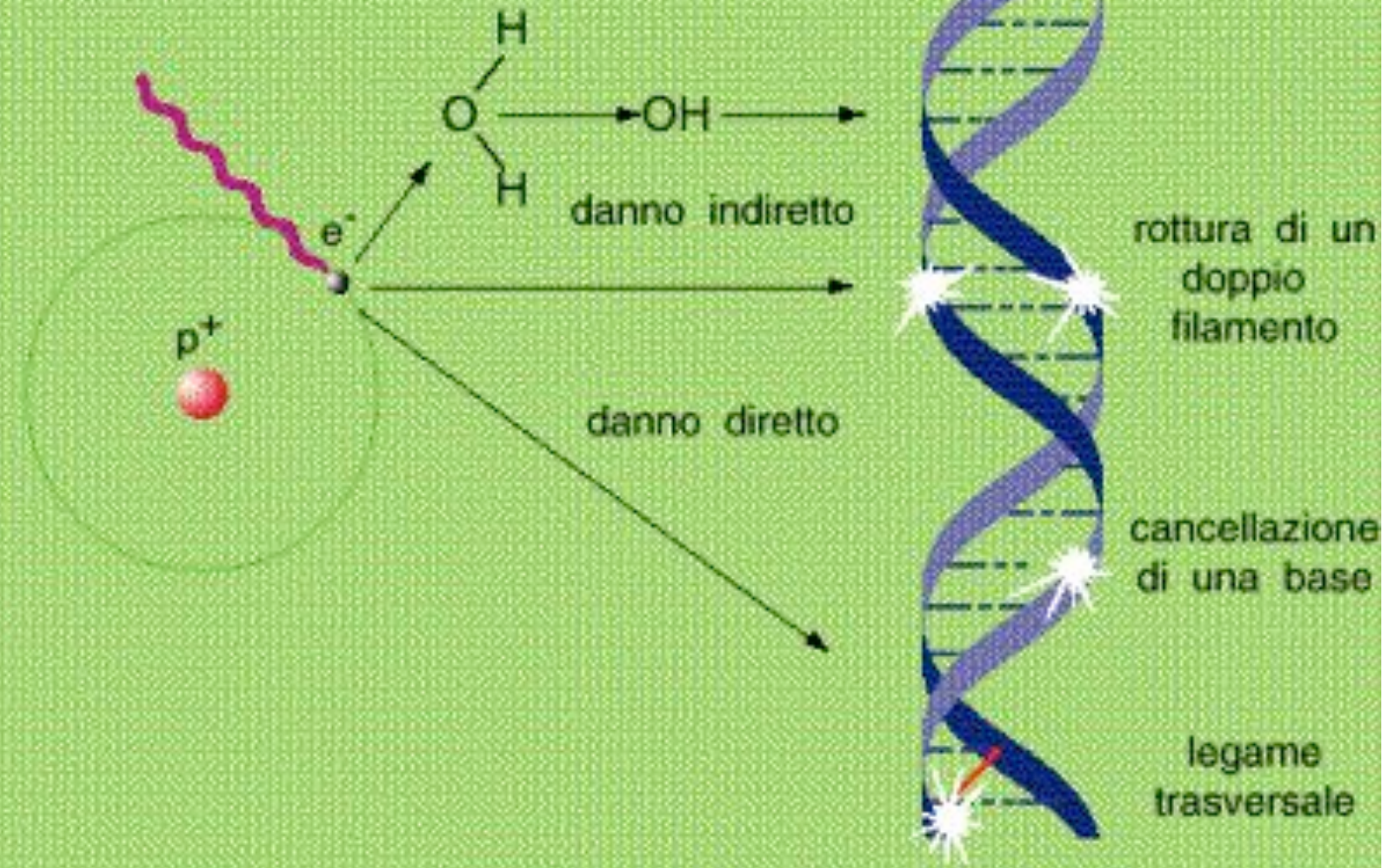
Secondo il risultato dell'esame, il lenzuolo va datato nell'intervallo di tempo compreso **tra il 1260 e il 1390**. Questa datazione corrisponde al periodo in cui si ha la prima documentazione storica che si riferisca con certezza alla Sindone di Torino (1353).

EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI

Le **radiazioni ionizzanti** sono quelle radiazioni (raggi X solari, raggi cosmici, radiazione originata da reazioni nucleari, radiazioni prodotte artificialmente, ecc.) che, assorbite dalla materia, cedono la loro energia strappando elettroni alle molecole, provocando la cosiddetta **ionizzazione**.

La radiazione, ionizzando le molecole di DNA , interferisce con il funzionamento dell'acido nucleico, provocando delle mutazioni genetiche che possono sfociare in episodi di tumore.

DANNO AL DNA



L'effetto della radiazione su un organismo dipende da vari fattori: il tipo di radiazione (raggi X, gamma, beta, ecc.), dalla sua intensità e dall'energia trasportata dalle singole particelle che la compongono.

Per rendere quantitativa questa affermazione, alla luce della pericolosità delle radiazioni ionizzanti per l'uomo, esistono due grandezze che descrivono l'assorbimento della radiazione: la **dose assorbita** e la **dose equivalente**.

Dose assorbita

Misura la quantità di energia ΔE assorbita per radiazione dall'unità di massa del corpo:

$$D = \frac{\Delta E}{m}$$

In sostanza, esprime lo scambio energetico fra la radiazione ionizzante e il materiale irraggiato.

Nel SI, l'unità di misura della dose è il **gray (Gy)**:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J / kg}$$

La dose di 1 Gy corrisponde a 1 J di energia assorbita da una massa di 1 kg.

Si parla, invece, di **intensità di dose assorbita** quando vogliamo avere informazioni sulla dose assorbita in un dato intervallo di tempo (Gy/s, o, molto più spesso gray all'anno Gy/a).

Però la dose assorbita, proprio perché esprime l'interazione fra radiazione e materia dal punto di vista fisico, è poco significativa ai fini della valutazione del danno biologico prodotta dalla radiazione. Infatti, la stessa dose assorbita D , dovuta a radiazioni diverse, provoca danni biologici diversi.

Allora, per valutare gli effetti della radiazione sugli esseri viventi, bisogna tener conto, oltre della dose, anche della natura della radiazione. Quindi, quando si calcola la quantità di radiazione assorbita da un individuo, si fa uso di una nuova grandezza, così definita:

Dose equivalente

E' il prodotto tra la dose assorbita D e un fattore numerico Q chiamato fattore di qualità o pericolosità:

$$H = D \cdot Q$$

Il fattore di pericolosità Q discrimina le radiazioni in base al loro potere ionizzante, e quindi dipende dalla gravità degli effetti che le diverse radiazioni provocano sugli organismi.

Tipo di radiazione	Fattore di qualità Q
Raggi X, γ , β	1
Neutroni	10
Protoni	10
Particelle α	20

Nel SI l'unità di misura della dose equivalente è il **sievert** (**simbolo Sv**).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot Q = 100 \text{ rem}$$

Il **rem** è una precedente unità di misura di H ancora in uso.

Esempio:

A una dose assorbita $D=1 \text{ Gy}$ di raggi X ($Q=1$) corrisponde una dose equivalente pari 1 Sv:

$$H = 1 \text{ Gy} \cdot 1 = 1 \text{ Sv}$$

Un'identica una dose assorbita $D=1$ Gy di raggi α ($Q=20$) corrisponde, invece, una dose equivalente pari 20 Sv:

$$H = 1 \text{ Gy} \cdot 20 = 20 \text{ Sv}$$

Pertanto, anche se la dose assorbita è la stessa nei due casi, l'effetto biologico delle due radiazioni è differente.

La dose minima di radiazione capace di produrre qualche danno biologico è difficile da stimare con precisione. Tuttavia, una dose equivalente intorno a 0,25 Sv, può provocare qualche disfunzione nelle cellule più sensibili. Valori compresi tra 1 Sv e 3 Sv, anche se non letali, producono infiammazioni, emorragie e altri disturbi.

Naturalmente il rischio legato all'esposizione di una data dose equivalente dipende anche dal fatto se la radiazione assorbita è diffusa o localizzata, concentrata o distribuita nel tempo.

L'intensità di dose equivalente misura, invece, la dose equivalente in un dato intervallo di tempo e si misura in Sv/s o spesso in sievert all'anno (Sv/a).

Per tener conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano, si introduce la:

dose efficace

che è la somma ponderata delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad [Sv]$$

dove i pesi w_T tengono conto proprio della diversa radiosensibilità degli organi e dei tessuti irraggiati.

I fattori di sensibilità w_T sono in costante revisione da parte di organi internazionali preposti allo scopo, e variano anche in funzione dell'evoluzione delle conoscenze mediche.

Tessuto	w_T	$\sum w_T$
Midollo osseo (rosso), Colon, Polmone, Stomaco Seno, Tessuti rimanenti *	0,12	0,72
Gonadi	0,08	0,08
Vescica, esofago, fegato, tiroide	0,04	0,16
Superficie dell'osso, cervello, ghiandole salivari, pelle	0,01	0,04
	Totale	1,00

* Tessuti rimanenti: ghiandole surrenali, regione extratoracica, cistifellea, cuore, reni, linfonodi, muscolo, mucosa orale, pancreas, prostata (σ), intestino tenue, milza, timo, utero/cervice (φ).

Fondo naturale di radioattività

Il fondo di radioattività naturale è costituito da radiazioni ionizzanti dovute a cause naturali di origine terrestre (radiosotopi contenuti nella crosta terrestre come il radon) ed extraterrestre (raggi cosmici). Ma ci sono radionuclidi anche nel nostro corpo come il potassio-40 che è soggetto al decadimento beta.

La media mondiale della dose equivalente di radioattività assorbita da un essere umano e dovuta al fondo naturale è di **2,4 millisievert (mSv) per anno**. Questo valore deve costituire il riferimento per stimare eventuali valutazioni di rischio radioprotezionistico.

Per esempio, nella diagnostica medica una TAC comporta l'assorbimento di 10 mSv, che corrisponde a circa 5 anni di esposizione alla radiazione naturale. Per questa ragione è sempre necessario valutare la necessità di questi tipi di esami e terapie, in modo da considerarne il rapporto rischi/benefici.

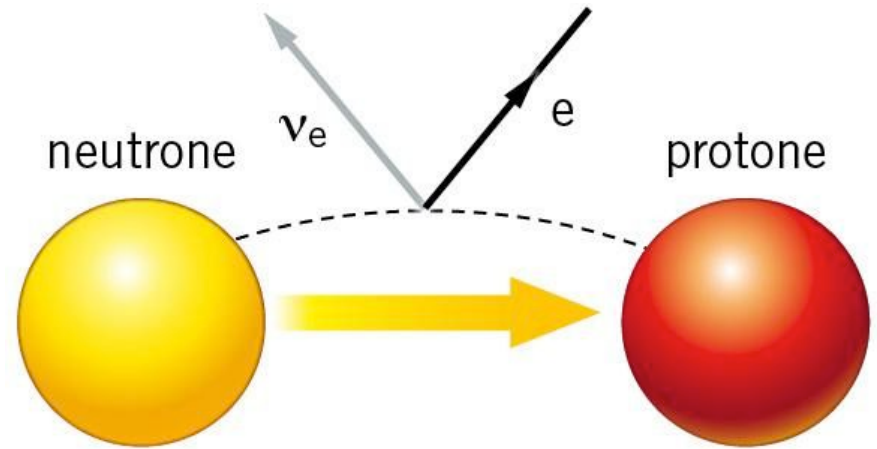
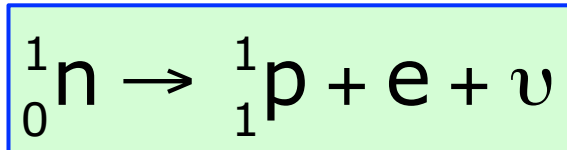
Tuttavia, il livello del fondo naturale di radioattività varia significativamente da luogo a luogo. In Italia, ad esempio, la dose equivalente media valutata per la popolazione è di 3,3 mSv/anno, ma varia notevolmente da regione a regione.

L'INTERAZIONE DEBOLE

Nel decadimento alfa la trasformazione del nucleo è accompagnata dall'emissione di un nucleo di elio (particella alfa) formato da due protoni e due neutroni, i cui costituenti comunque preesistevano all'interno del nucleo di partenza.

Il decadimento beta, invece, non può essere spiegato mediante un meccanismo di questo genere, perché i prodotti del decadimento non preesistono all'interno del nucleo radioattivo.

Consideriamo il seguente processo in cui un neutrone isolato instabile decade trasformandosi in un protone:



I prodotti della reazione, l'elettrone e l'antineutrino, non esistevano prima del decadimento, per cui la loro presenza rivela l'esistenza di un nuovo fenomeno che comporta la creazione di particelle.

Un meccanismo di creazione di particelle avviene anche in un atomo, quando viene emesso un fotone a causa della forza elettromagnetica, nel passaggio da un livello eccitato a uno di energia minore. Infatti, il fotone non preesisteva, ma è creato nel momento della transizione.

Nel 1933 il fisico italiano **Fermi (1901-1954, Premio Nobel)** propose una teoria del decadimento beta partendo proprio da questa analogia.

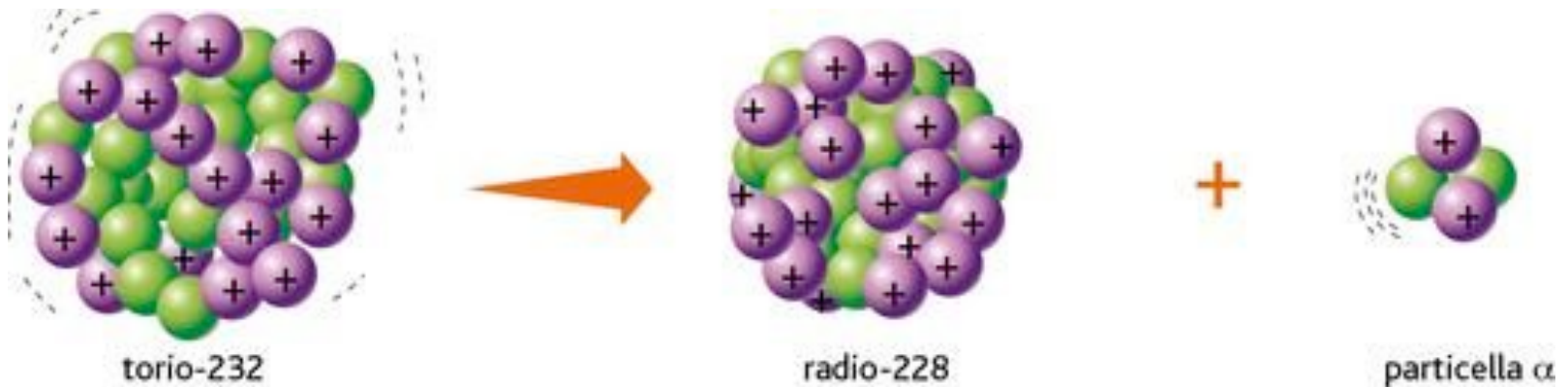
La forza responsabile dell'emissione beta è chiamata **interazione debole**.

L'interazione debole (chiamata anche per ragioni storiche forza nucleare debole) è una delle quattro interazioni fondamentali della natura (le altre sono l'interazione forte, la forza elettromagnetica, la forza di gravità), grazie alla quale un neutrone si trasforma in un protone con l'emissione di elettroni e neutrini.

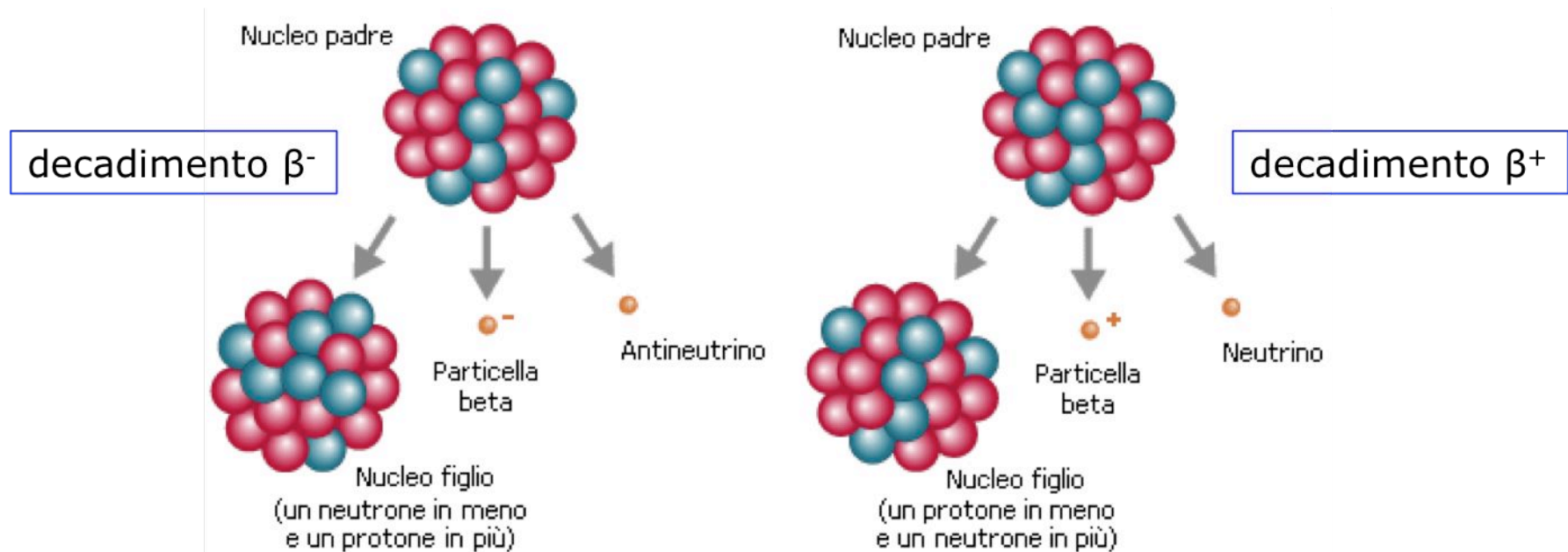
La creazione di particelle (elettrone e neutrino) avviene a spese di una parte dell'eccesso di energia di riposo del neutrone rispetto al protone. Infatti il neutrone ha più energia del protone perché, per l'equivalenza massa-energia ($E=mc^2$), ha una massa maggiore.

Riepilogo:

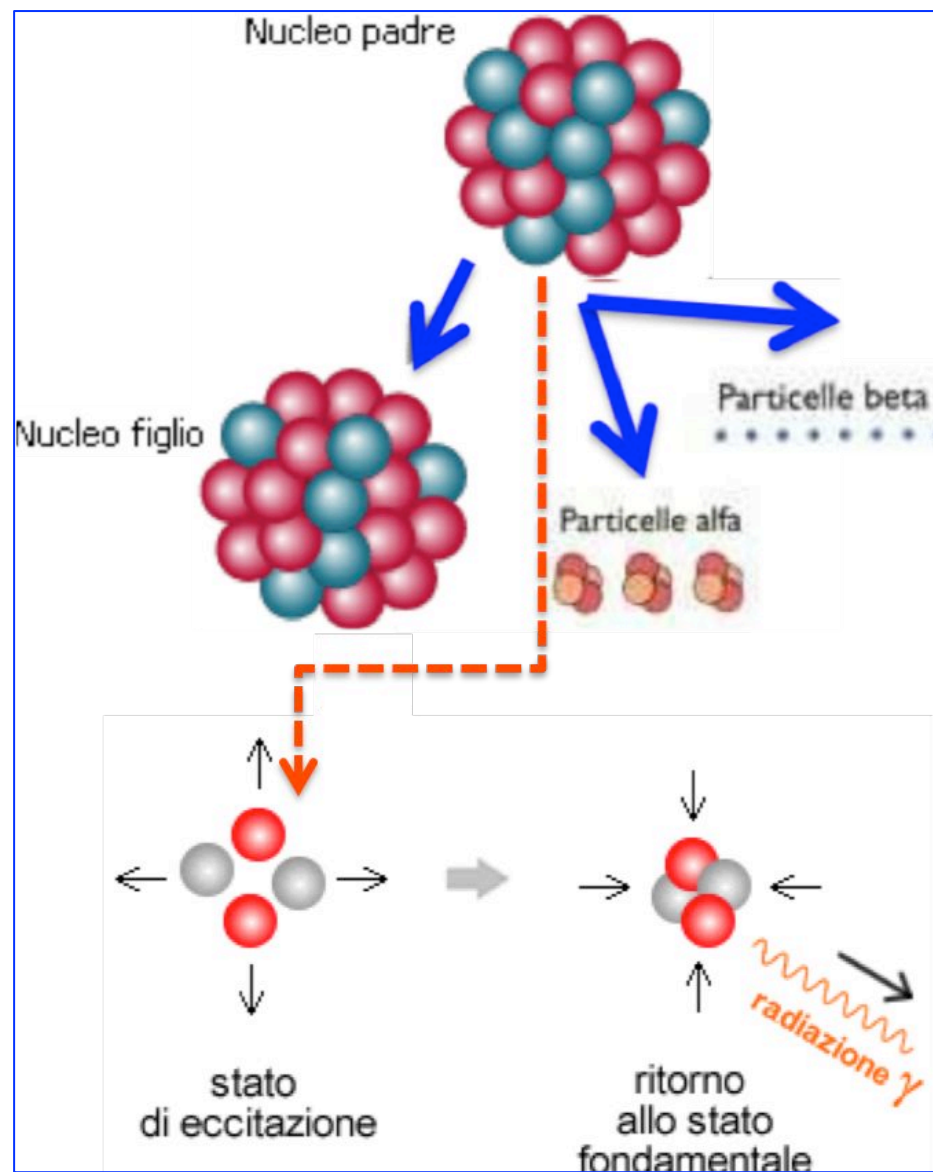
- **Radiazione (decadimento) alfa:** è dovuto all'azione della **forza nucleare** che tiene legati neutroni e protoni a formare un nucleo. Il corpuscolo emesso è una particella alfa, di carica $+2e$ perché formata da due protoni e due neutroni.



- **Radiazione (decadimento beta)**: è effetto della **forza nucleare debole** che fa decadere il neutrone. Sono emessi un elettrone e un antineutrino (decadimento β^-) oppure un positone e un neutrino (decadimento β^+), creati nel momento del decadimento del neutrone.



- **Radiazione (Emissione gamma):** è effetto della **forza elettromagnetica** e avviene dopo un decadimento alfa, un decadimento beta o una reazione nucleare, quando un nucleo, prodotto in uno stato eccitato, si porta in uno stato più legato.



MEDICINA NUCLEARE

I radionuclidi hanno una fondamentale importanza in campo medico-sanitario e biologico. In particolare concentriamo la nostra attenzione sull'uso dei traccianti radioattivi, sulla terapia dei tumori e sulla tomografia a emissione di positoni.

I traccianti radioattivi

I radiotraccianti sono isotopi radioattivi che funzionano come «etichette identificative» per segnalare la presenza e la posizione di una determinata sostanza in un organismo vivente, animale o vegetale.

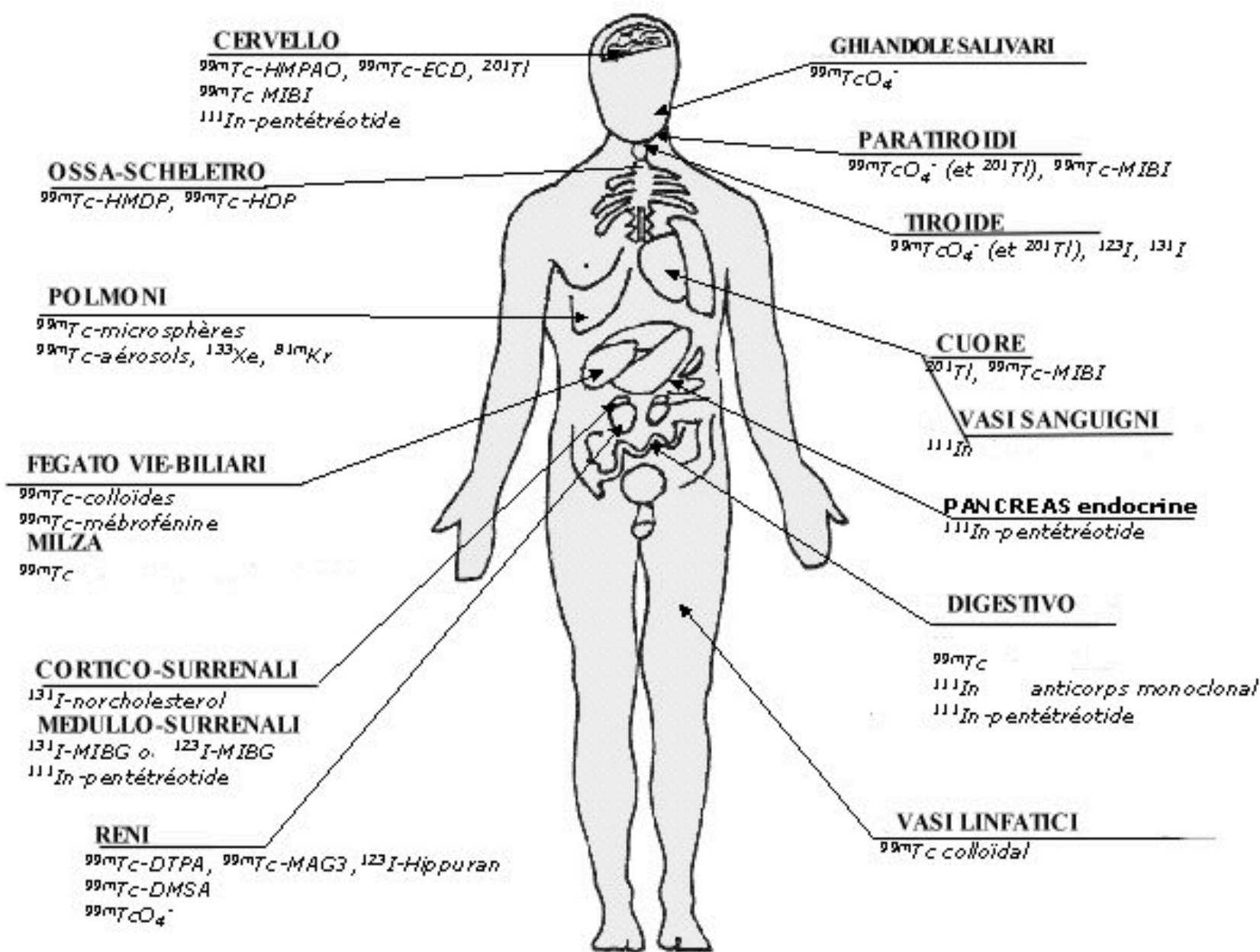
Per esempio, un radioisotopo dello iodio prodotto artificialmente viene adoperato per l'esame della tiroide, una ghiandola che sovrintende alla distribuzione nell'organismo dello iodio.

Si prepara un composto chimico in cui una certa percentuale di atomi di iodio è costituita da atomi radioattivi. Dopo alcune ore dall'ingerimento del composto da parte del paziente, si può determinare, attraverso la misura della radiazione gamma emessa dal radioisotopo, in quali punti del corpo si localizza lo iodio.

Esistono decine di radiofarmaci con delle proprietà chimico-fisiche e biologiche specifiche; la scelta del radiofarmaco è funzione dell'organo da investigare e della patologia.

Per esempio, si possono realizzare delle immagini della tiroide somministrando dello **Iodio**, per il quale questa ghiandola ha una grande affinità; lo **Xenon**, vista la sua natura gassosa, si presta molto bene per degli studi sulla ventilazione polmonare; il **Tallio** viene impiegato negli studi cardiaci. I globuli rossi marcati con **Tecnezio** ci permettono di visualizzare le cavità cardiache o possono venire impiegati nella ricerca di emorragie interne.

Certe molecole sono state sintetizzate artificialmente per rispondere a dei bisogni specifici, ad esempio l'HMPAO (Hexa-Methyl-Propylene-Amine-Oxime) associato con il Tecnezio si fissa in modo quasi proporzionale al volume ematico cerebrale, permettendoci così di visualizzare delle zone di perfusione anomale.



radioterapia

È una terapia medica, in continua evoluzione, utilizzata nella cura dei tumori.

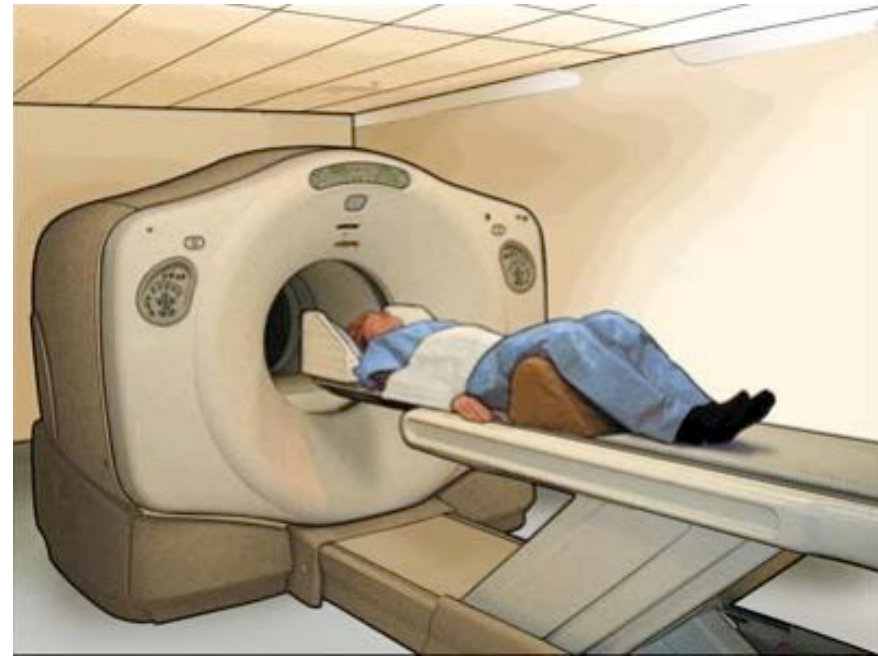
Consiste nell'utilizzo di radiazioni ionizzanti, fasci di fotoni penetranti (fotoni gamma), di 5-10 MeV di energia, emessi da una sorgente di radioisotopi o da un acceleratore di particelle, per danneggiare il patrimonio genetico delle cellule malate e impedire così che proliferino.



Tomografia a emissione di positoni (PET)

La PET è una delle applicazioni più innovative ed efficaci del decadimento radioattivo in campo medico.

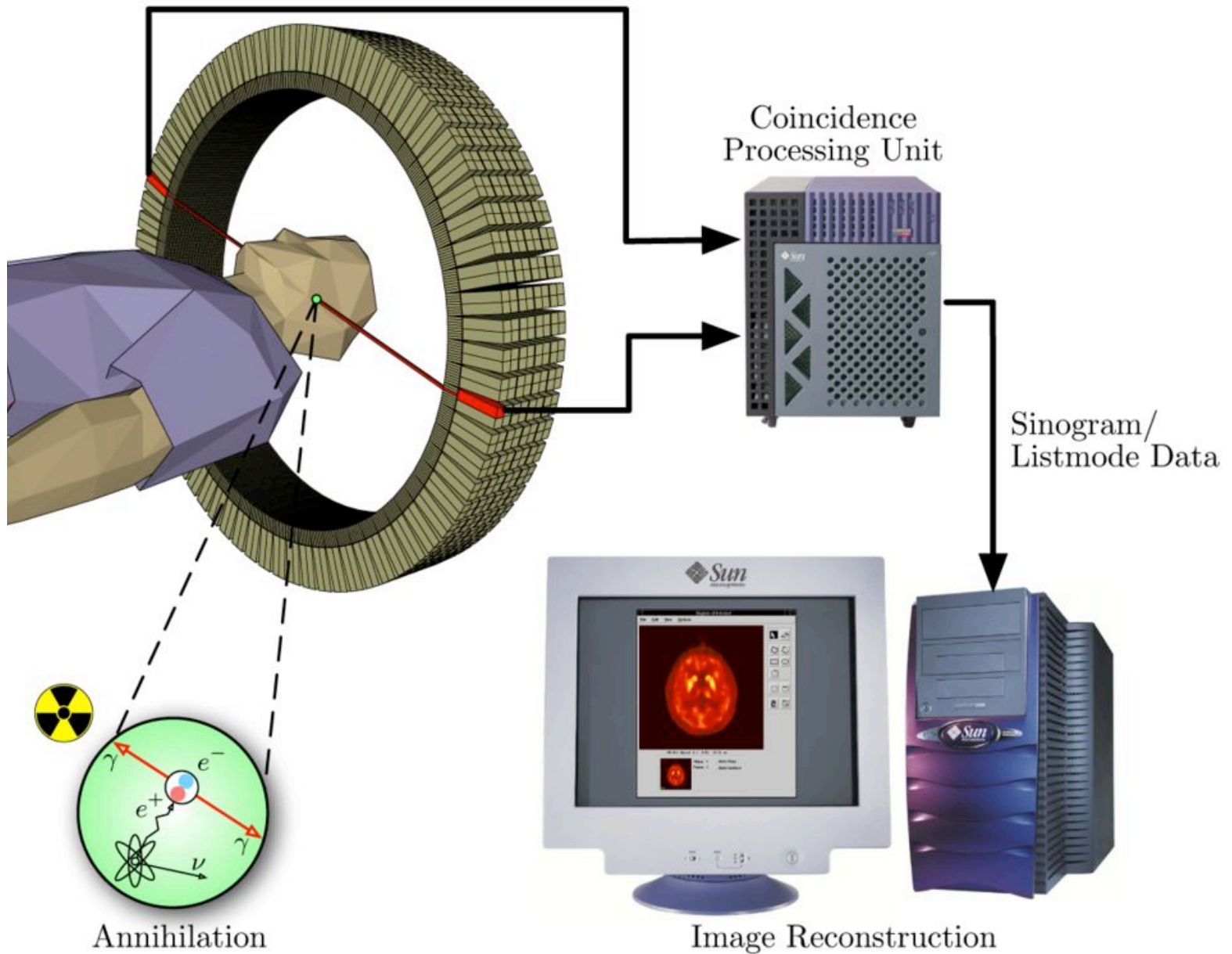
A differenza della tomografia computerizzata (TAC) e della risonanza magnetica (RMN) che forniscono informazioni di tipo morfologico, l'esame PET fornisce informazioni di tipo fisiologico, ossia si ottengono mappe dei processi funzionali (metabolismo) dei tessuti nel corpo umano.



La procedura per l'esame PET inizia con l'iniezione di un radiofarmaco contenente un radioisotopo tracciante con emivita breve, legato chimicamente a una molecola attiva a livello metabolico (vettore), ad esempio il fluorodesossiglucosio (^{18}F -FDG), un radioisotopo del fluoro-18. In sostanza si tratta di uno zucchero che si concentra in tessuti ad alto metabolismo, come i tessuti cancerosi e quelli infiammati.

L'isotopo decade all'interno del corpo, emettendo un positone e^+ . Dopo un percorso di pochi millimetri il positone si annichila nell'incontro con un elettrone, producendo due fotoni γ molto energetici (511 keV).

Questi due fotoni emergono dal corpo in direzioni opposte e vengono rilevati da un apposito rilevatore che circonda il paziente. Misurando la radiazione prodotta, si ha un'immagine computerizzata della parte in esame, per esempio il cervello.



LE REAZIONI NUCLEARI



Enrico Fermi, venuto a conoscenza degli esperimenti dei coniugi Curie sulla radioattività artificiale, intuì che tale processo poteva anche essere provocato utilizzando come proiettili i neutroni.

Con la collaborazione dei suoi “ragazzi di via Panisperna” (tra cui E. Amaldi, B. Pontecorvo, E. Segrè, B. Majorana), Fermi riuscì a produrre e a identificare una cinquantina di elementi radioattivi. Grazie all'intenso lavoro di questo gruppo di giovani scienziati dal 1927 al 1938, la scuola di fisica italiana raggiunse il livello dei più prestigiosi centri di ricerca europei e americani.

Fra i molti elementi bombardati con neutroni vi era l'uranio. Dopo l'irraggiamento, questo elemento pesante si comportava in maniera piuttosto anomala, in quanto la radioattività indotta nel bersaglio era notevolmente superiore a quella ottenuta in simili condizioni con altri elementi.

Sulla base delle conoscenze fino allora acquisite intorno alle reazioni provocate dai neutroni, i fisici romani ipotizzarono la creazione di un elemento transuranico, cioè che l'assorbimento di un neutrone da parte di un nucleo di uranio portasse alla formazione di un elemento più pesante di quello di partenza.

Il processo provocato dai fisici italiani era, però, più rivoluzionario di quanto allora si potesse supporre: non era infatti pensabile che un neutrone, rallentato dal passaggio nell'acqua o nella paraffina, potesse frantumare un nucleo, quando proiettili molto più energici ne erano incapaci.

La vera natura dell'interazione dei neutroni lenti con l'uranio fu scoperta da due fisici tedeschi, **Hahn (1879–1968; Premio Nobel)** e **Strassmann (1902–1980; Premio Nobel)**, che riuscirono a dimostrare che un nucleo di uranio, colpito da un neutrone, può rompersi in due (o più) frammenti. Questo processo, fu chiamato *fissione nucleare*.

Il 27 gennaio 1939, durante una conferenza di fisica teorica a Washington, Fermi venne a conoscenza della scoperta dei fisici tedeschi, andò alla lavagna e scrisse alcune formule relative al fenomeno della fissione.

L'articolo sulla teoria della fissione nucleare di Bohr (e di Wheeler), basato sul modello a goccia del nucleo e pubblicato nel settembre del 1939, fu il primo e ultimo articolo sull'argomento prima che fosse calato il sipario della sicurezza (era scoppiata la Seconda Guerra Mondiale).

Un'altra questione, della quale per secoli gli scienziati si erano occupati, riguardava la causa dello splendore del Sole e delle altre stelle. Era evidente che l'energia sprigionata non poteva derivare da processi chimici o, per esempio, dalla contrazione della massa solare; infatti, tali processi non consentono di produrre energia, nemmeno lontanamente, per circa 5 miliardi di anni, perché tale è l'età del Sole.

Il solo modo per giustificare una tale longevità del Sole è quello di supporre che esso riceva energia da qualche trasformazione nucleare: nell'anno 1929 l'astronomo inglese **Atkinson (1898-1982)** ed il fisico austriaco **Houtermans (1903-1966)**, cercarono in collaborazione di scoprire se ciò poteva essere vero.

Secondo questi due scienziati, le collisioni termiche tra gli atomi costituenti la parte interna ad altissima temperatura della massa solare (20 milioni di gradi), potevano provocare qualche reazione nucleare talmente veloce da fornire la quantità di energia necessaria.

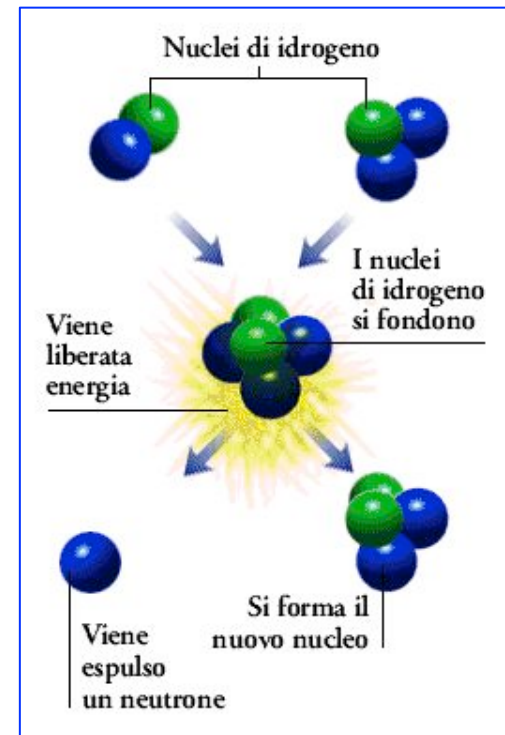
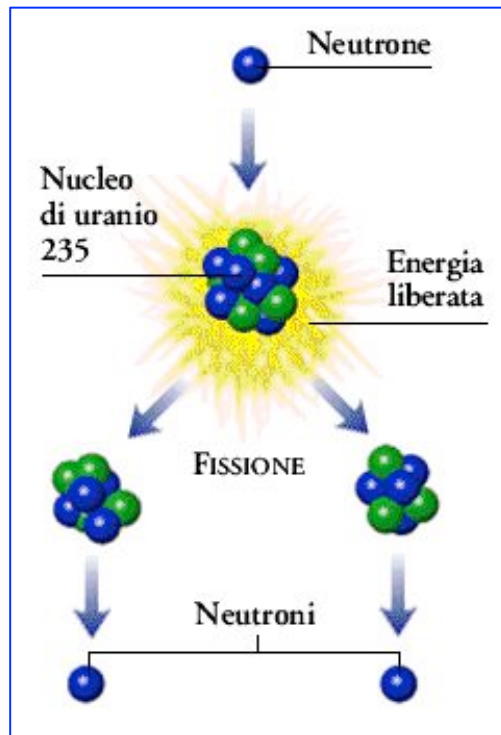
Con l'aiuto della teoria della meccanica ondulatoria sulla penetrazione attraverso le barriere di potenziale nucleare, i due scienziati furono in grado di dimostrare che, con le temperature e le densità esistenti all'interno del Sole, le reazioni termonucleari tra i nuclei d'idrogeno ed i nuclei di altri elementi leggeri, potevano liberare una quantità di energia sufficiente a giustificare l'irraggiamento del Sole.

Nel 1938, quando si ebbe un numero sufficiente di informazioni sulle trasformazioni dei nuclei leggeri colpiti da un protone, **Bethe (1906–2005; Premio Nobel)** descrisse due serie di reazioni ([fusione nucleare](#)) che, a partire dall'idrogeno, portano alla sintesi dell'elio.

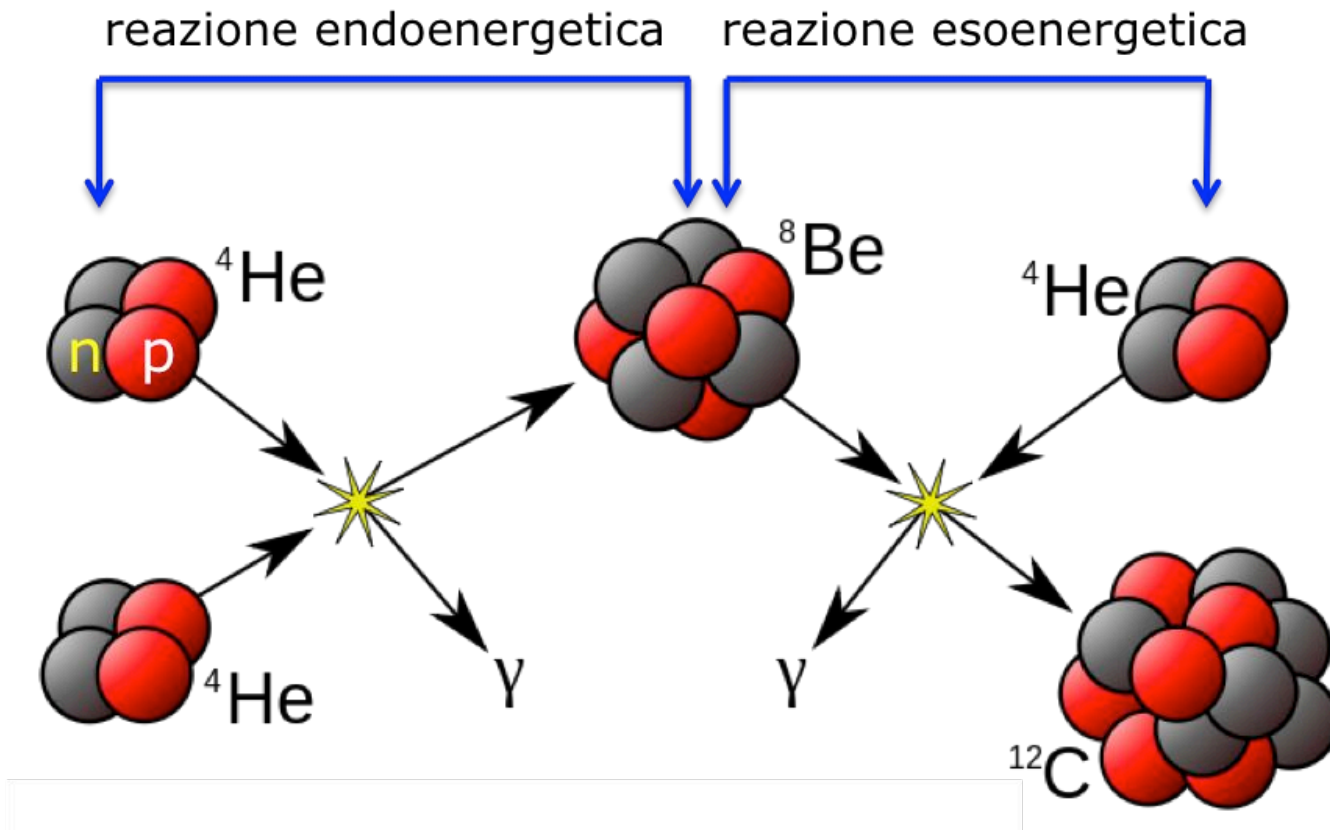
Nelle reazioni nucleari (fissione e fusione) viene liberata o assorbita una certa quantità di energia, detta energia di reazione, dell'ordine di alcuni milioni di elettronvolt perché i legami sono dovuti alle forze nucleari e non a quelle elettriche, come nei legami chimici.

Le reazioni nucleari possono essere di due tipi:

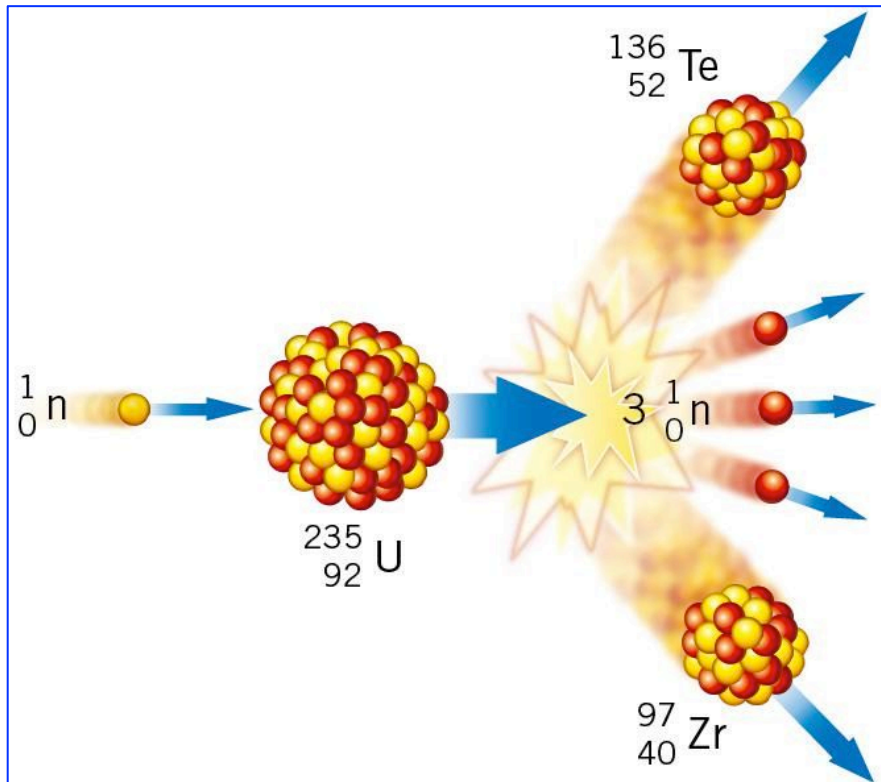
- reazioni esoenergetiche (fissione e molte reazioni di fusione nucleare) che producono energia, in quanto la massa totale dei nuclei finali è minore di quella dei nuclei iniziali (la massa mancante si è trasformata in energia);



- reazioni endoenergetiche (alcune reazioni di fusione che avvengono nelle stelle) quelle che, per avvenire, assorbono energia, e quindi l'energia dei prodotti della reazione è minore di quella dei reagenti.

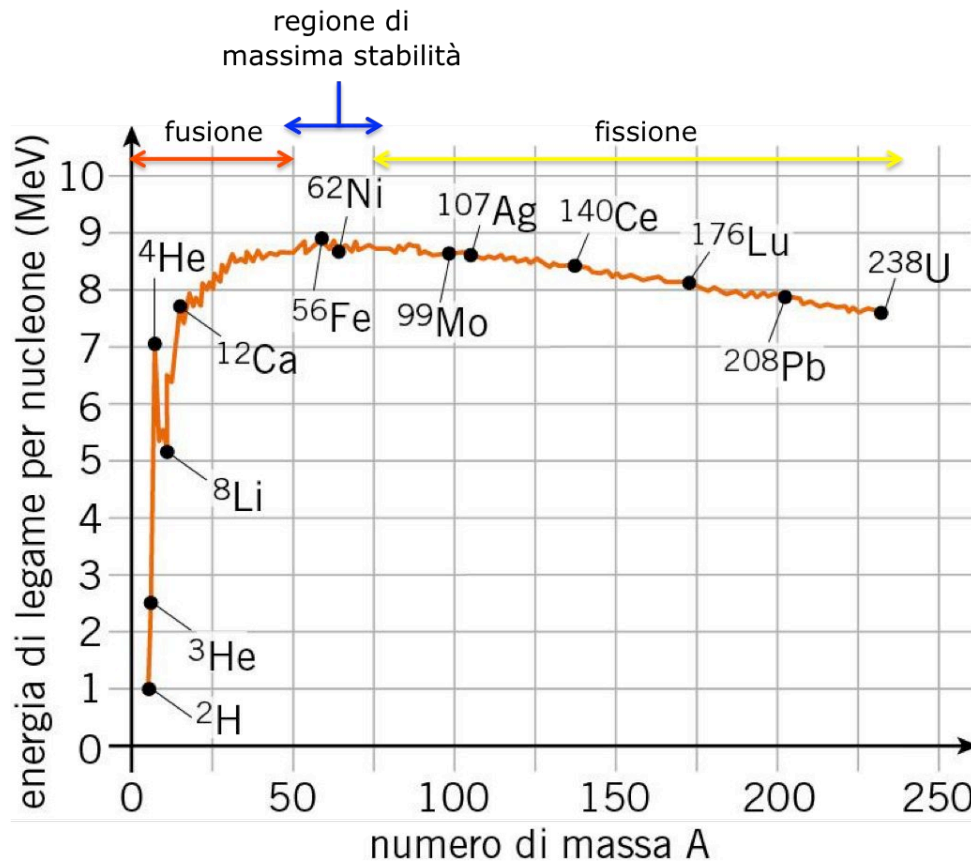


LA FISSIONE NUCLEARE



La **fissione nucleare** è un processo esoenergetico durante il quale un nucleo con elevato numero di massa (per esempio U-235), in seguito alla cattura di un neutrone, decade (si fissiona) in due nuclei più leggeri con emissione di energia.

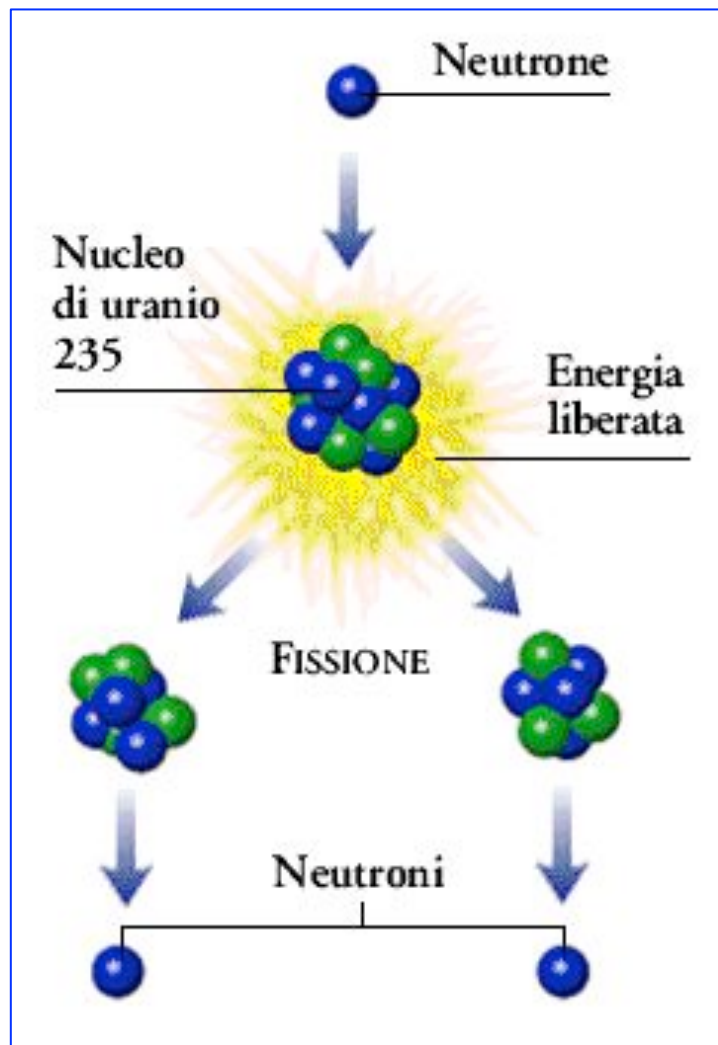
Per capire quali sono i nuclei interessati alla fissione riprendiamo il grafico dell'energia di legame per nucleone.



Questa energia ha un massimo nella zona del ferro e del nichel, che rappresenta la regione di massima stabilità.

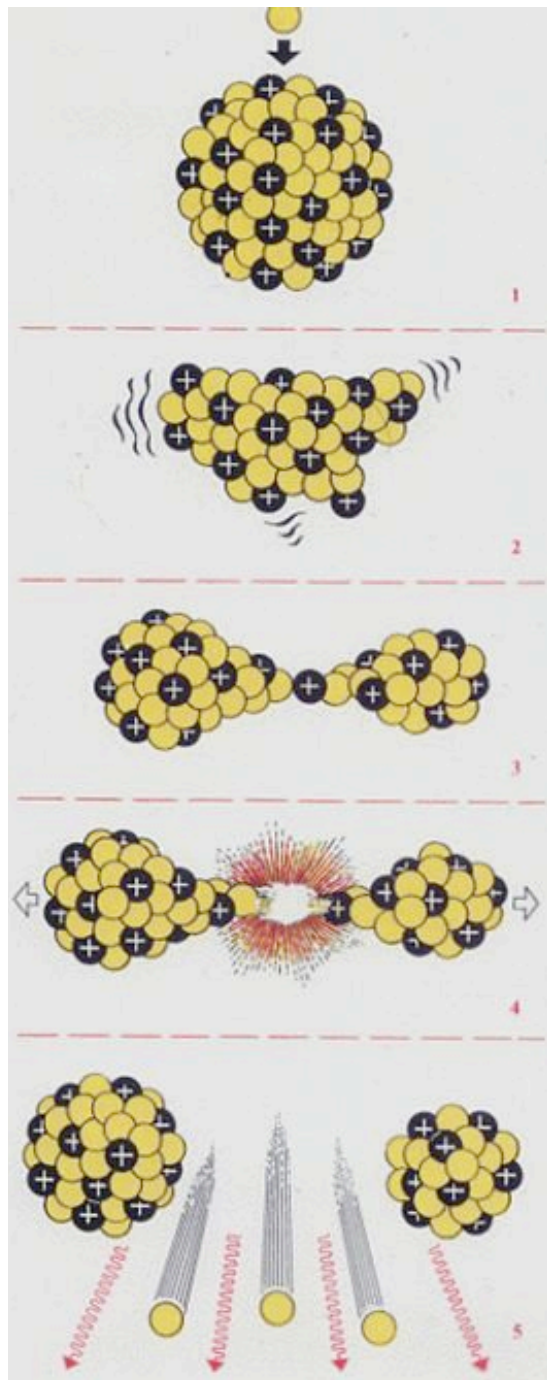
La fissione di un nucleo con elevato numero di massa (a destra della zona di stabilità) da origine a nuclei con energia di legame maggiore.

Ciò significa che la somma delle masse dei frammenti è inferiore alla massa del nucleo originario (**difetto di massa minore**).



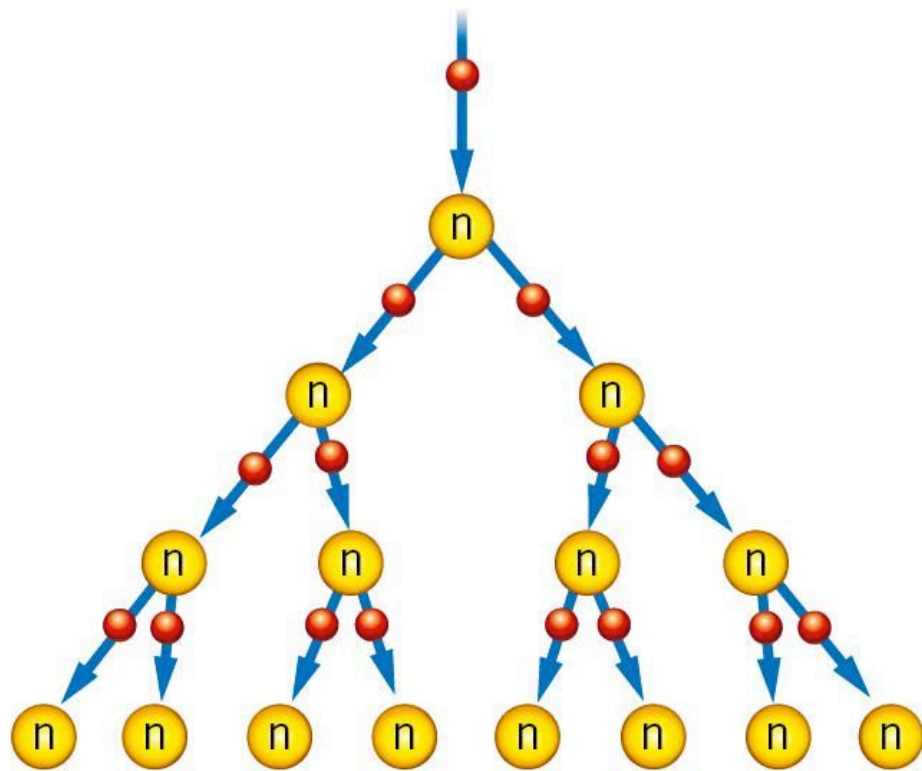
La differenza di massa, per l'equivalenza massa-energia ($E=mc^2$), si trasforma in energia.

Per la fissione del nucleo di uranio-235, l'energia prodotta per ogni nucleone è di 0,9 MeV. Poichè nella fissione intervengono 236 nucleoni (compreso il neutrone proiettile), l'energia totale liberata è di circa 200 MeV.



I meccanismi della reazione di fissione nucleare possono essere spiegati tramite il modello nucleare a goccia già discusso in precedenza .

Quando il nucleo, colpito da un neutrone, comincia ad oscillare, assumendo una lunga successione di forme allungate, l'equilibrio tra le forze di tensione superficiale e quelle elettrostatiche scompare: le prime tendono a riportare il nucleo alla forma sferica originale, mentre le seconde tentano di allungarlo ulteriormente.



Ma la fissione del nucleo di uranio è seguita dalla contemporanea emissione di 2 neutroni i quali, a loro volta, possono colpire altri due nuclei di uranio vicini e spezzarli, producendo altri quattro neutroni che spezzano altri quattro nuclei e così via.

In questo modo si innesca una **reazione a catena** che si propaga rapidamente in tutto il blocco di uranio, provocando la liberazione di un'enorme quantità d'energia nucleare.

Se il rapporto tra l'asse maggiore e quello minore dell'ellissoide supera un certo limite, si produce una strozzatura lungo il piano equatoriale ed il nucleo si spezza in due parti uguali.

LE CENTRALI NUCLEARI

Se la reazione a catena non è controllata, viene liberata un'enorme quantità di energia come nel caso delle bombe atomiche.

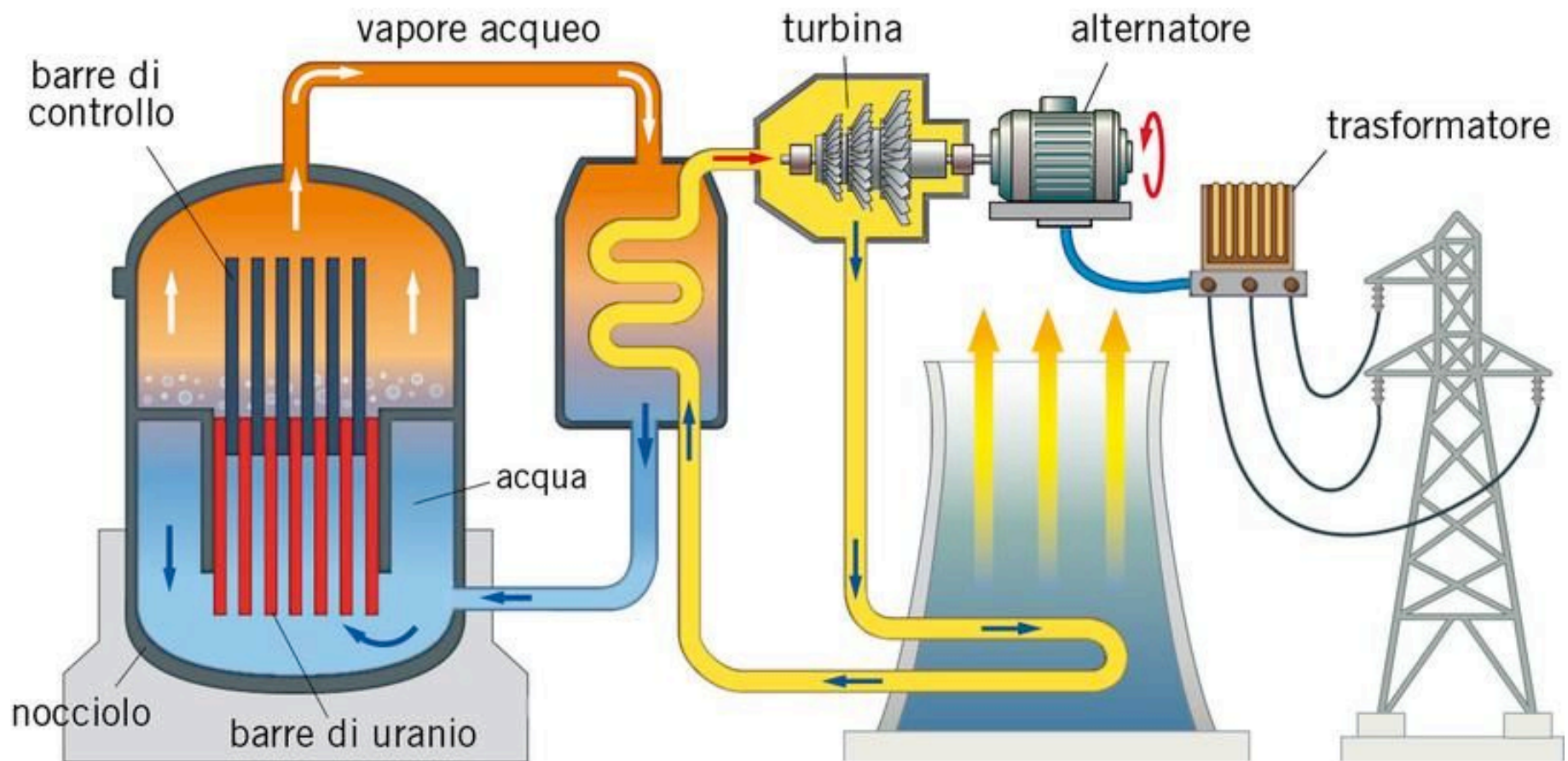
Affinchè la fissione possa essere utilizzata nelle centrali nucleari per produrre energia, deve avvenire in condizioni controllate.

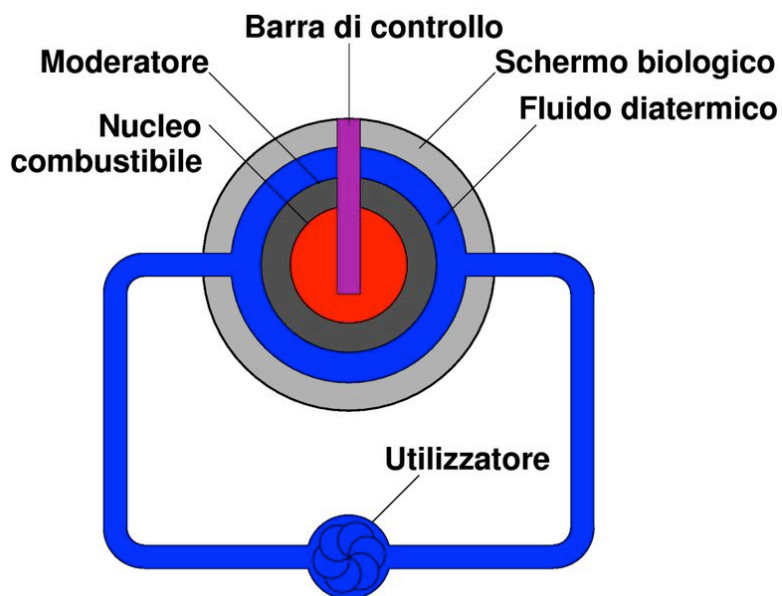
I metodi originali e definitivi per alimentare e mantenere la reazione in uranio naturale furono ideati da Fermi. La prima pila atomica, con reazione a catena controllata, fu costruita da Fermi negli spogliatoi dello stadio dell'Università di Chicago, ed entrò in funzione il 2 dicembre 1942.

Il reattore nucleare di Fermi produceva una potenza di 0,5W, a malapena sufficiente per tenere in funzione una lampadina. Da allora la tecnologia dei reattori nucleari ha fatto enormi progressi, ed oggi producono fino a 1,5 GW di potenza elettrica, capace di alimentare un'intera città.

Anche se fondamentalmente il principio fisico dei reattori nucleari è abbastanza semplice, tuttavia è necessario tenere conto di vari fattori affinché la fissione, una volta innescata, diventi una reazione a catena capace di autoalimentarsi, e che quindi non diventi incontrollabile, garantendo così determinati standard di sicurezza.

Schema di funzionamento di una centrale elettrica nucleare a fissione.





La sorgente di energia è il combustibile presente nel cuore del reattore (**nocciolo**), composto da materiale fissile (tipicamente una miscela di U-235 e U-238).

La probabilità che si verifichi la fissione dell'uranio U-235 aumenta se i neutroni proiettili vengono rallentati finché la loro energia non si riduce a quella di agitazione termica (dell'ordine degli eV). Per rallentare i neutroni e termalizzarli è necessario utilizzare un **moderatore**. Nel moderatore, in genere acqua, sono immerse le **barre di uranio** (il materiale combustibile).

La fissione del nucleo del combustibile genera energia, principalmente sotto forma di energia cinetica dei frammenti della fissione e di raggi gamma.

I frammenti di fissione rallentando nel combustibile generano calore che viene asportato da un fluido refrigerante termovettore (gassoso o liquido, o che subisce un cambio di fase nel processo) che lo trasporta ad un utilizzatore, direttamente o indirettamente per mezzo di generatori di vapore, quasi sempre un gruppo turbo-alternatore per la produzione di energia elettrica nella parte termoelettrica della centrale nucleare.

Il reattore raggiunge la cosiddetta condizione di criticità, ovvero possiede una **massa critica**, quando la reazione a catena si può autosostenere in maniera stabile.

La più piccola quantità di materiale fissile (massa critica) necessaria affinché abbia luogo una reazione a catena autosostenuta e controllata si ha quando $R=1$ (rapporto tra il numero dei neutroni prodotti e quello dei neutroni perduti).

Per controllare la reazione a catena ed eventualmente arrestarla in caso di incidente, il reattore dispone delle cosiddette **barre di controllo** (in genere leghe di argento, cadmio e indio o carburi di boro), che, una volta azionate, assorbono i neutroni in eccesso liberati dalla reazione.

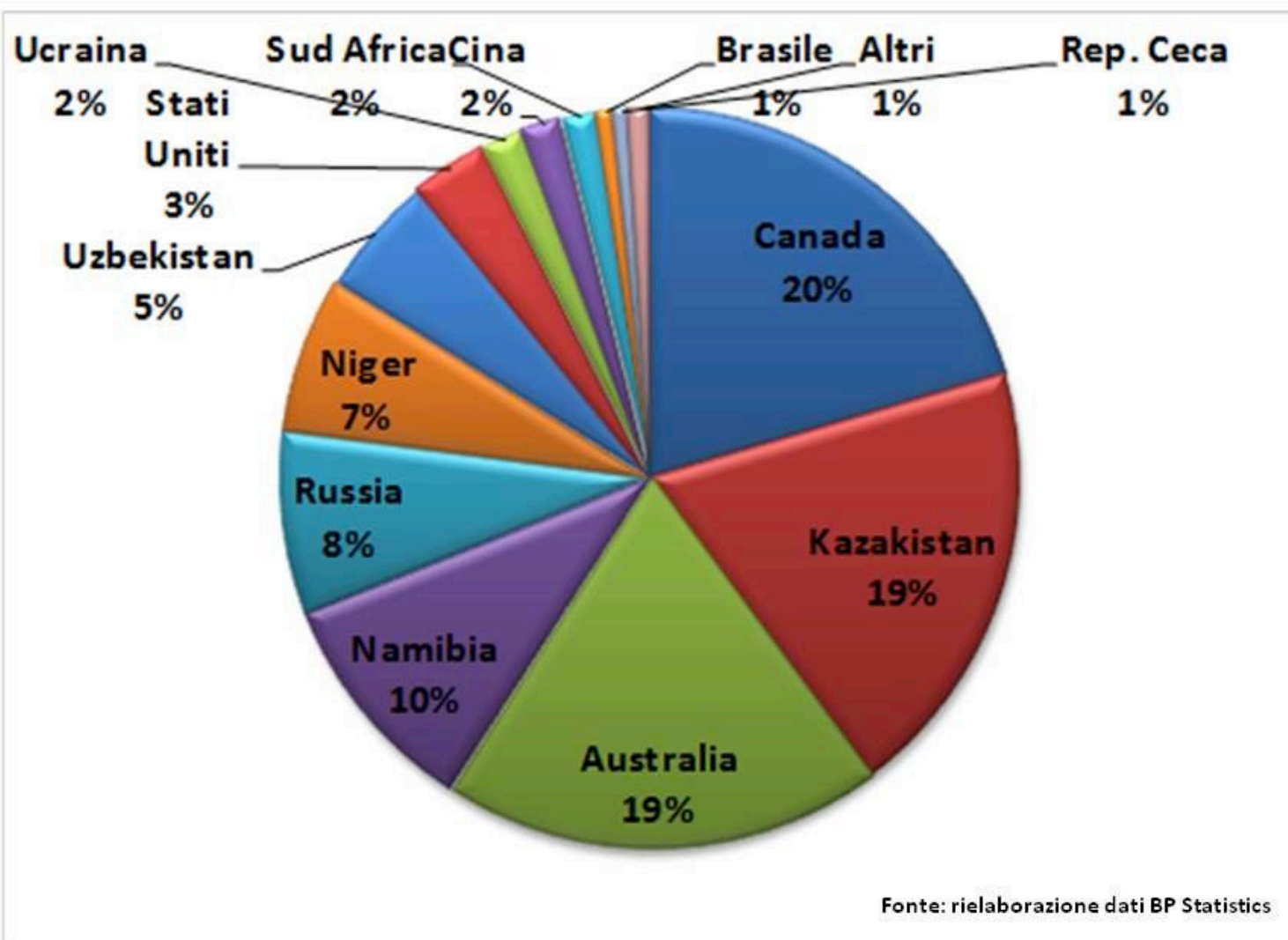
Questo evita ad esempio che la reazione diventi incontrollata con la liberazione di enormi quantitativi di energia che possano condurre alla cosiddetta **fusione del nocciolo** per temperature elevatissime, al successivo cedimento dei vari strati di contenimento del reattore incapaci di resistere meccanicamente a tali livelli di temperatura con dispersione nell'ambiente del materiale radioattivo, e/o alla produzione di gas esplosivi come l'idrogeno con conseguente possibile esplosione del reattore stesso e gravissime conseguenze sulla sicurezza pubblica per diffusione diretta di grandi quantità di materiale altamente radioattivo e livelli di radiazione altrettanto nocivi (si veda incidente nucleare).

Gli elementi prodotti nella fissione dell'uranio-235 sono una trentina e molti di essi danneggiano il buon funzionamento del reattore, perché assorbono neutroni interrompendo la reazione a catena. È quindi necessario, dopo un certo periodo di tempo, sottoporre le barre di uranio a un'azione di ritrattamento chimico, per purificarle dai prodotti indesiderati della fissione.



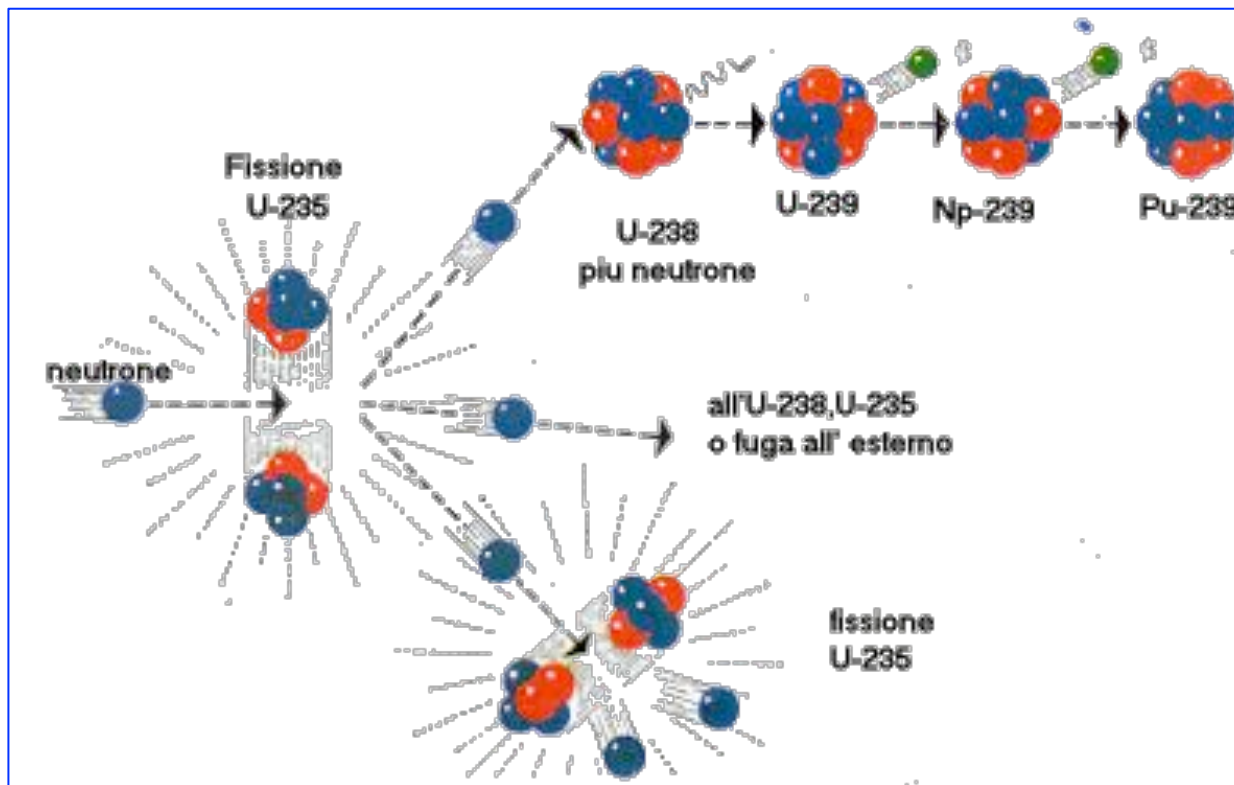
Il consumo del combustibile nucleare nel nocciolo comporta la formazione di materiale di scarto radioattivo (**scorie nucleari**) che deve essere periodicamente rimosso e successivamente smaltito.

Ripartizione produzione di uranio per paesi nel 2008

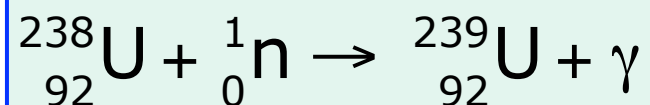


Produzione di energia elettrica con reattori a fissione nel 2011

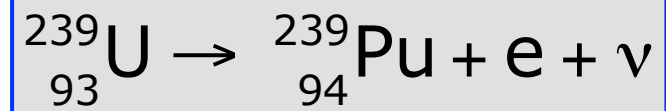
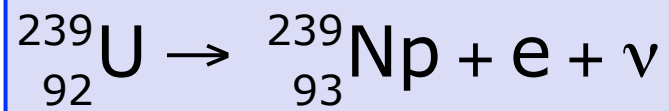
Paese	Numero di reattori nucleari in funzione	Percentuale dell'energia elettrica totale prodotta con reattori nucleari
Belgio	7	51,2%
Canada	17	15,1%
Cina	14	1,9%
Corea del Sud	21	32,3%
Francia	58	74,1%
Germania	9	28,4%
Giappone	55	28,9%
Italia	0	0%
Regno Unito	18	15,7%
Stati Uniti	104	19,6%
Svizzera	5	38,0%
(Dati IAEA 2011)		



L'uranio-238 contenuto nelle barre di combustibile non è fissile ma assorbe neutroni lenti. Assorbendo uno di questi neutroni, un nucleo di uranio-238 si trasforma in uranio-239 ed emette un fotone γ secondo la reazione:



A sua volta, attraverso due decadimenti beta, l'uranio-239 genera spontaneamente il nettunio Np e il plutonio Pu:

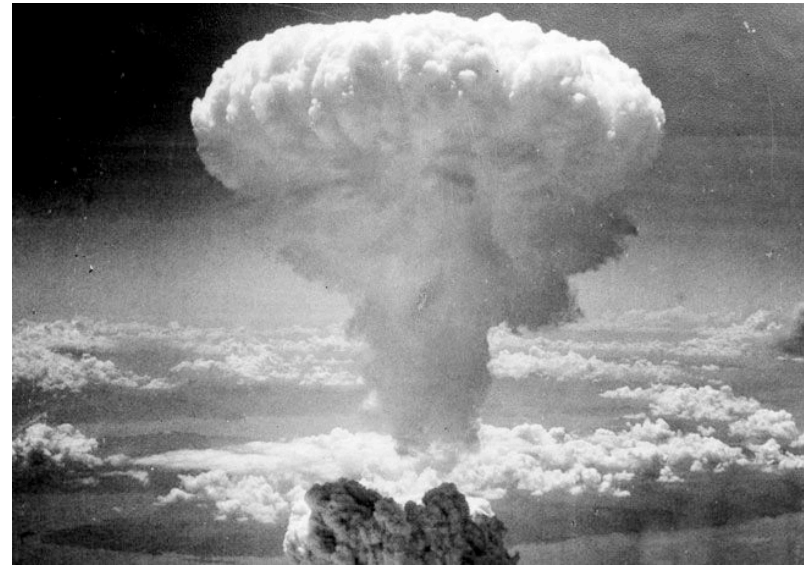


Il plutonio-239 così prodotto, essendo fissile, può essere utilizzato come combustibile nei reattori nucleari.

Ma, per via delle sue caratteristiche, il plutonio-239 è anche un elemento fondamentale per la costruzione delle moderne armi nucleari.

La massa critica per una sfera di plutonio è di 16 chilogrammi.

Una tale quantità corrisponde circa ad una sfera di 10 centimetri di diametro che per completa detonazione libera un'energia di 200 chilotoni (pari a circa 15 volte la bomba atomica sganciata su Hiroshima il 6 agosto 1945).



Sia gli Stati Uniti che l'Unione Sovietica accumularono grandi scorte di plutonio durante gli anni della guerra fredda; si stima che le scorte ammontassero nel 1982 a 300 tonnellate.

Dalla fine della guerra fredda (convenzionalmente fatta coincidere con la caduta del muro di Berlino il 9 novembre 1989) queste scorte sono oggetto di preoccupazione per un'eventuale incontrollata proliferazione di armi nucleari nel mondo.

Negli Stati Uniti è allo studio dal 2003 la conversione di svariati impianti elettronucleari al fine di poterli alimentare con il plutonio al posto dell'uranio arricchito, in modo da smaltire parzialmente queste scorte.

INCIDENTI NUCLEARI

La produzione di energia nucleare presenta rischi e benefici, che possiamo così riassumere:

Svantaggi

- **incidenti nucleari**: non esiste la sicurezza assoluta per le centrali nucleari;
- **produzione e smaltimento del materiale radioattivo** (alcuni radioisotopi hanno un tempo di dimezzamento di milioni di anni);
- **proliferazione di armi nucleari**: il plutonio-239 può essere utilizzato per la costruzione di bombe nucleari;
- **attacchi terroristici**.

Vantaggi

- disponibilità di grandi quantità di energia: nessuna altra fonte di energia (solare, geotermico, eolico, ecc.) permette la costruzione di centrali con potenze dell'ordine di un GW;
- riduzione del consumo di petrolio e metano, che hanno altre applicazioni;
- azzeramento delle emissioni inquinanti (anidride carbonica) responsabili dell'effetto serra.

In sessant'anni circa di utilizzo dell'energia nucleare, sui 440 reattori nucleari funzionanti nel mondo, si sono avuti cinque gravi incidenti.

La IAEA (International Atomic Energy Agency) ha stabilito una scala di gravità degli eventi possibili in una centrale nucleare o in altra installazione, che si articola nei seguenti 8 livelli:

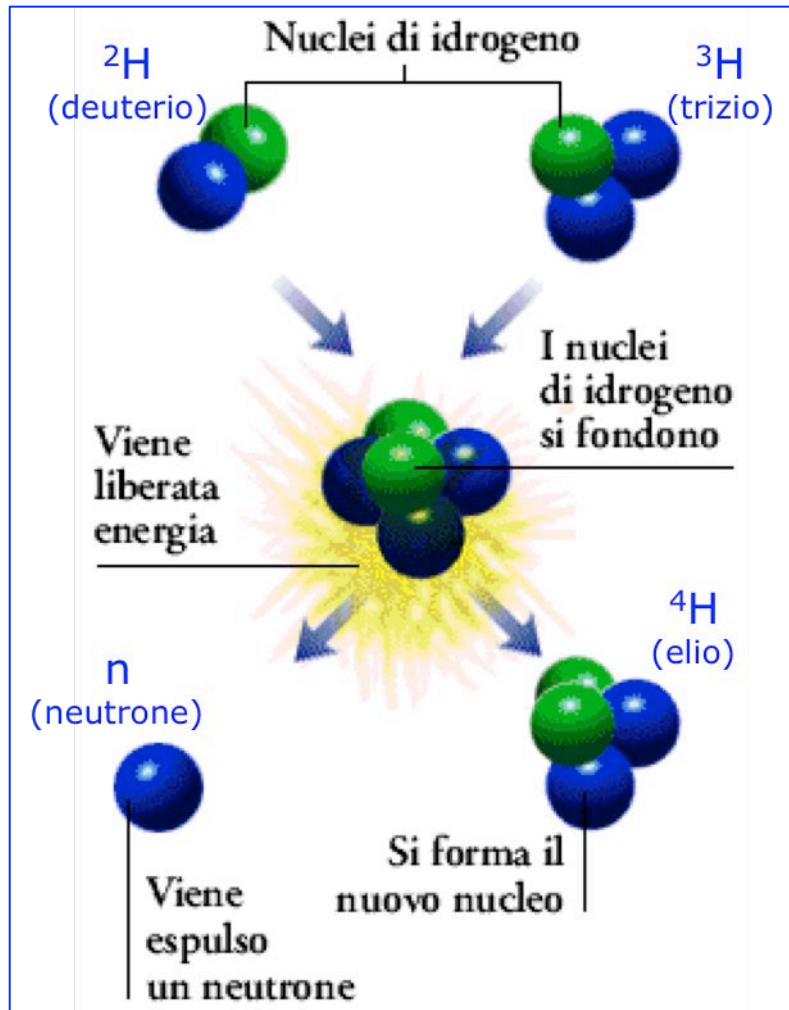
- **Livello 0 (deviazione)**: evento senza rilevanza sulla sicurezza.
- **Livello 1 (anomalia)**: evento che si differenzia dal normale regime operativo, che non coinvolge malfunzionamenti nei sistemi di sicurezza, né rilascio di contaminazione, né sovraesposizione degli addetti.

- **Livello 2 (guasto)**: evento che riguardi malfunzionamento delle apparecchiature di sicurezza, ma che lasci copertura di sicurezza sufficiente per malfunzionamenti successivi, o che risulti in esposizione di un lavoratore a dosi eccedenti i limiti e/o che porti alla presenza di radionuclidi in aree interne non progettate allo scopo, e che richieda azione correttiva.
- **Livello 3 (guasto grave)**: un incidente sfiorato, in cui solo le difese più esterne sono rimaste operative, e/o rilascio esteso di radionuclidi all'interno dell'area calda, oppure effetti verificabili sugli addetti, o infine rilascio di radionuclidi tali che la dose critica cumulativa sia dell'ordine di decimi di mSv.

- **Livello 4 (incidente senza rischio esterno):** evento causante danni gravi all'installazione (ad esempio fusione parziale del nucleo) e/o sovraesposizione di uno o più addetti che risulti in elevata probabilità di decesso, e/o rilascio di radionuclidi tali che la dose critica cumulativa sia dell'ordine di pochi mSv.
- **Livello 5 (incidente con rischio esterno):** evento causante danni gravi all'installazione e/o rilascio di radionuclidi con attività dell'ordine di centinaia di migliaia di TBq, e che possa sfociare nell'impiego di contromisure previste dai piani di emergenza. Esempi: l'incidente di Three Mile Island, USA (1979), l'incidente di Windscale, Gran Bretagna (1957) e l'incidente di Goiânia, Brasile (1987).

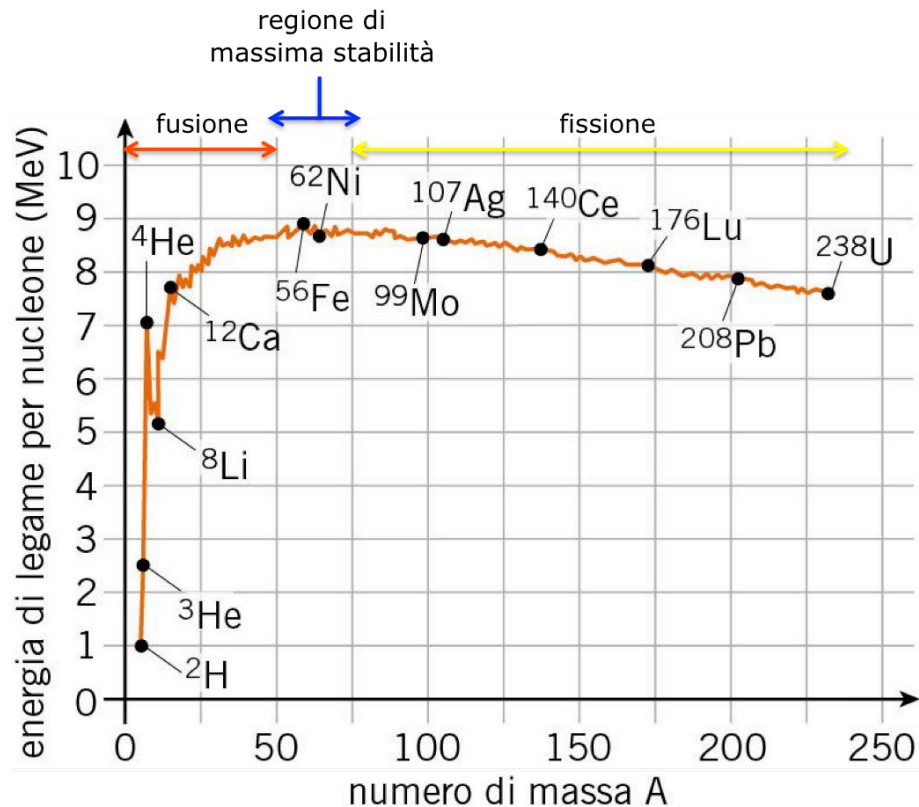
- **Livello 6 (incidente grave)**: evento causante un significativo rilascio di radionuclidi e che potrebbe richiedere l'impiego di contromisure. Esempi: l'Incidente di Kyštym, URSS (1957).
- **Livello 7 (incidente molto grave)**: evento causante rilascio importante di radionuclidi, con estesi effetti sulla salute e sul territorio. Esempi: L'incidente di Černobyl', URSS (1986) e l'incidente di Fukushima, Giappone (2011).

FUSIONE NUCLEARE



La **fusione nucleare** è il processo di reazione nucleare attraverso il quale i nuclei di due o più atomi vengono avvicinati a tal punto da superare la repulsione elettromagnetica e unirsi tra loro generando il nucleo di un elemento di massa minore, o maggiore, della somma delle masse dei nuclei reagenti, con emissione di energia.

Come per la fissione, anche per la fusione dobbiamo utilizzare il grafico dell'energia di legame per nucleone se vogliamo capire quali sono i nuclei interessati alla reazione.



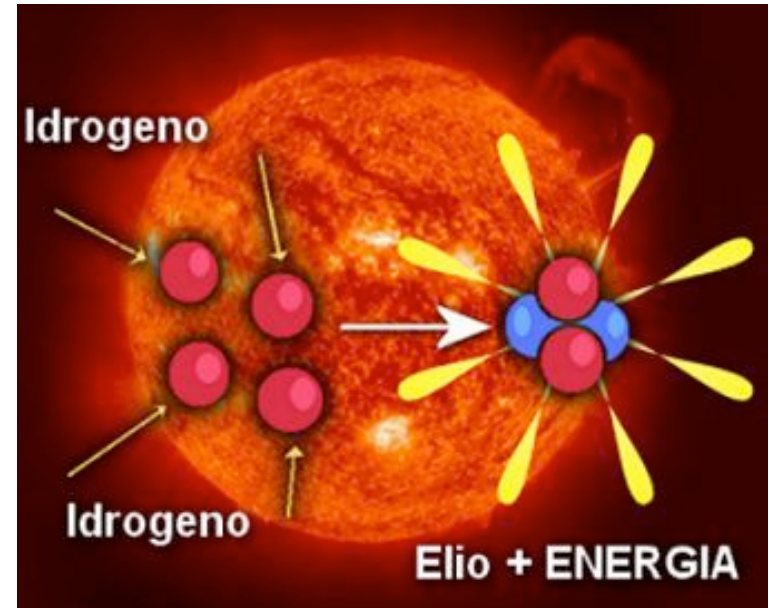
Se si fondono due nuclei con basso numero di massa (siamo alla sinistra della regione di massima stabilità) si ottiene un terzo nucleo più pesante (difetto di massa maggiore), ossia con energia di legame maggiore di quelli di partenza.

Quindi una reazione di fusione del genere produce energia, che per l'equivalenza massa-energia ($E=mc^2$) è pari alla differenza di energie a riposo tra i nuclei iniziali e quello finale.

La condizione affinché avvenga la fusione di due nuclei è che questi si trovino entro il raggio d'azione della forza nucleare forte, ossia si avvicinino fino a una distanza dell'ordine di 10^{-15}m .

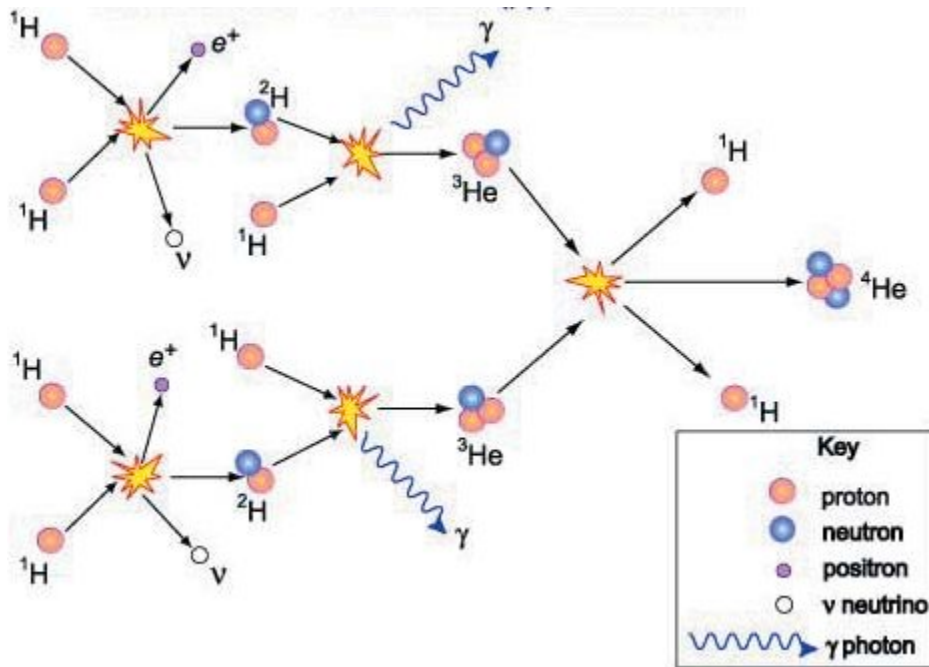
Ma la presenza della forza elettrica di repulsione tra i protoni ostacola questo avvicinamento, per cui i nuclei devono possedere un'elevata energia cinetica (intorno a $0,2\text{ MeV}$).

Se vogliamo ottenere grandi quantità di energia dalla fusione, il processo deve avvenire su larga scala, e in queste condizioni bisogna raggiungere e mantenere una temperatura di almeno 10^7 K, che è quella raggiunta all'interno delle stelle, e in particolare nel Sole.

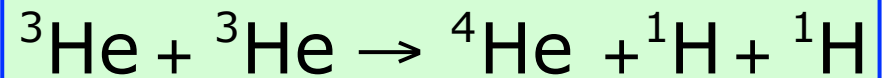
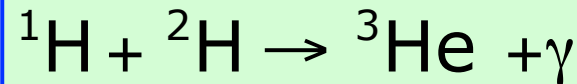
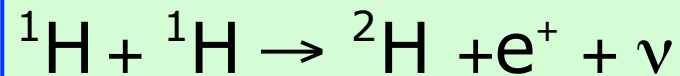


A questa temperatura gli atomi della materia stellare (essenzialmente idrogeno) sono completamente ionizzati, formando quello stato della materia chiamato **plasma**, un gas nel complesso elettricamente neutro, composto da un miscuglio di ioni atomici ed elettroni liberi.

Tra i processi di fusione che avvengono nelle stelle, il più semplice è il **ciclo dell'idrogeno**, che consiste in due serie di reazioni che, a partire dall'idrogeno, portano alla sintesi dell'elio:



Ciclo dell'idrogeno

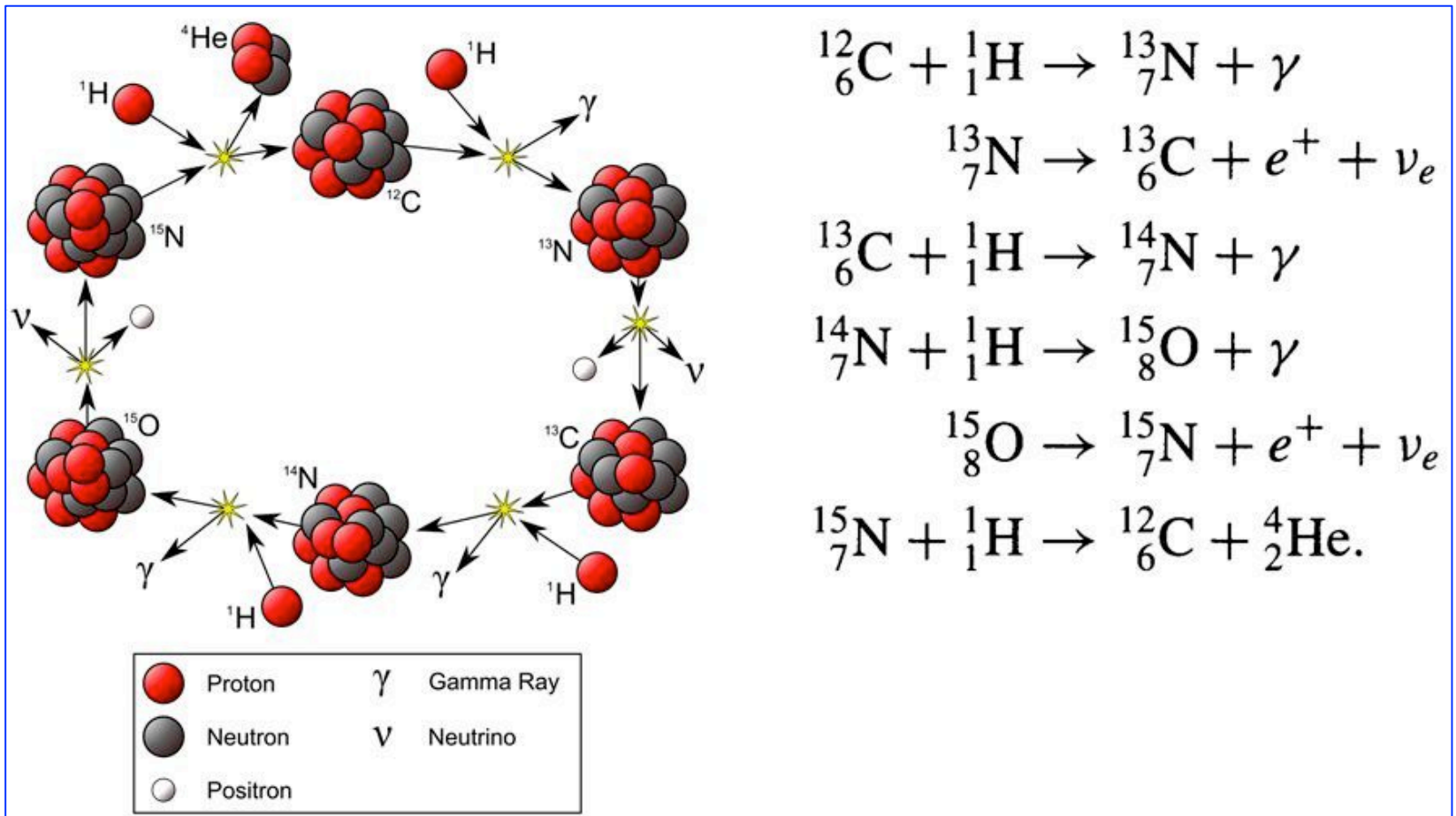


Come si può osservare dalla figura, le prime due reazioni devono avvenire due volte affinché vengano prodotti i due nuclei di elio ^3He necessari per la terza reazione.

In definitiva, l'effetto totale di tutta la serie di reazioni è la combinazione di quattro protoni, da cui si forma un nucleo di elio ^4H con l'emissione di due positroni e^+ , due neutrini ν e due fotoni γ .

L'energia complessiva sviluppata nel ciclo d'idrogeno, somma di tutte le energie prodotte nelle reazioni parziali, è di circa 25 MeV.

Un'altra serie di reazioni, che rappresentano la principale sorgente di energia per le stelle più massicce, è il **ciclo del carbonio-azoto-ossigeno** (indicato con CNO).



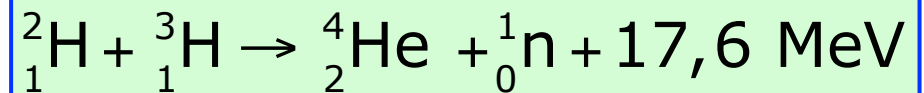
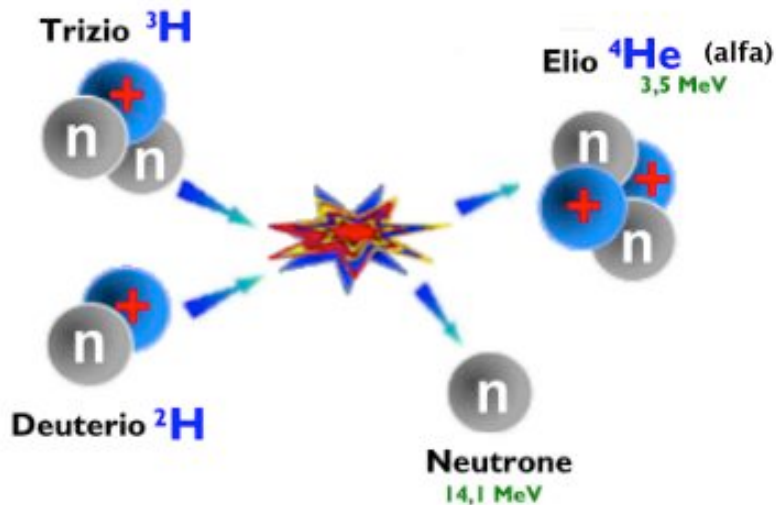
Il risultato netto del ciclo CNO, partendo da quattro protoni, è la produzione di una particella alfa (cioè un nucleo di elio) più due positroni e due neutrini, con rilascio di energia sotto forma di raggi gamma.

I nuclei di carbonio, azoto e ossigeno, svolgono il ruolo di catalizzatori (“velocizzatori” delle reazioni) nella combustione nucleare dell'idrogeno, e ricompaiono come prodotto finale al termine del ciclo, ossia non vengono consumati.

Se vogliamo produrre sulla Terra energia con reazioni di fusione nucleare occorre realizzare un plasma simile a quello che si ha nelle stelle.

La reazione nucleare più conveniente per tale scopo è la **reazione di fusione deuterio-trizio** in cui un nucleo di deuterio ${}^2_1\text{H}$ e un nucleo di trizio ${}^3_1\text{H}$ si fondono per formare un nucleo di elio ${}^4_2\text{He}$ e un neutrone:

Reazione di fusione Deuterio Trizio



I **vantaggi** della produzione di energia tramite fusione rispetto alla fissione sono molteplici ed importanti:

- il deuterio è abbondante e di facile reperimento dall'acqua di mare, mentre il trizio può essere prodotto artificialmente;
- azzeramento quasi totale del pericolo di incidenti;
- considerevole riduzione delle scorie radioattive, che, a parità di potenza generata, si riducono da dieci a cento volte.

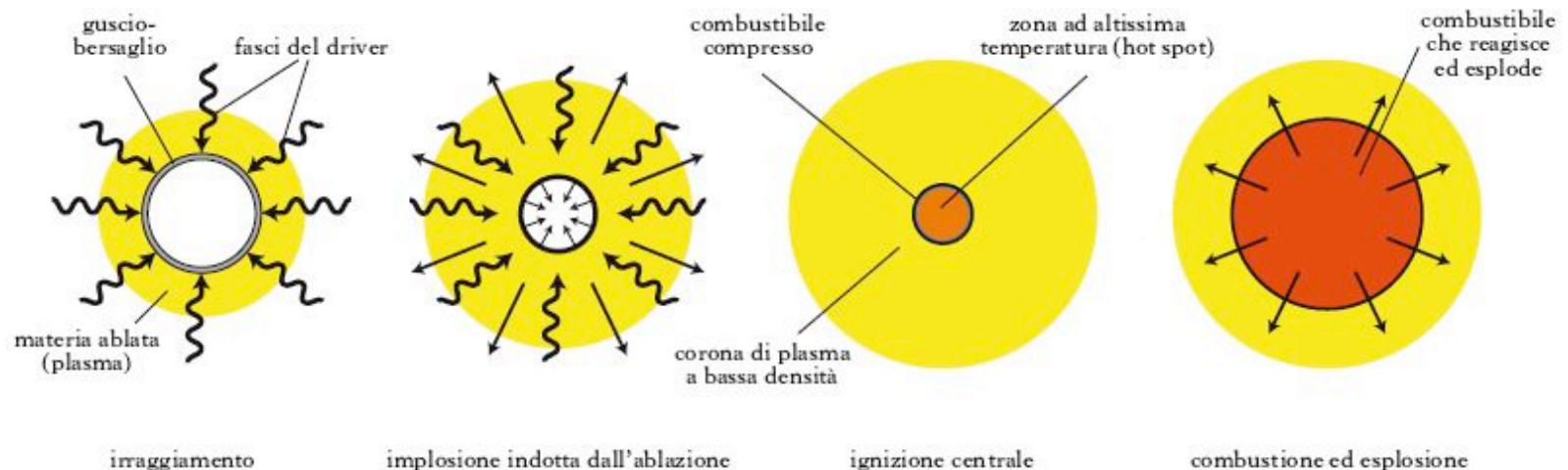
In definitiva, la fusione nucleare fornirebbe energia pulita, economica e praticamente inesauribile.

Tuttavia, la possibilità di sfruttare la fusione nucleare per produrre energia si scontra con difficoltà pratiche. I due maggiori problemi tecnici per la sua realizzazione sono:

- il riscaldamento del gas ad altissime temperature, dell'ordine di milioni di gradi;
- il confinamento del plasma, necessario affinché quest'ultimo non venga a contatto con le pareti del contenitore, e quindi evitare che i nuclei cedano la loro energia alle parti metalliche distruggendole.

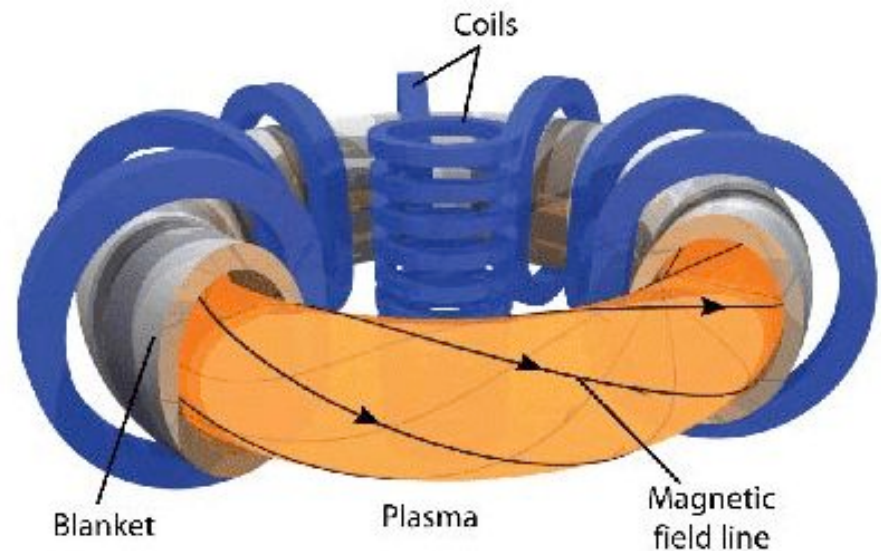
I due metodi attualmente utilizzati per superare le difficoltà tecniche e “accendere il Sole” sulla Terra sono:

➤ **Il confinamento inerziale:** una sfera di deuterio e trizio, dentro una camera sferica, viene bombardata con intensi fasci laser provenienti da varie direzioni. L'intenso irraggiamento provoca la vaporizzazione (plasma) dello strato più esterno della sfera, la cui rapida espansione esercita una spinta sul resto del materiale, inducendo così un'implosione. Le condizioni di temperatura e pressione necessarie a innescare la fusione sono prodotte da questa implosione.



➤ Il **confinamento magnetico**: il plasma è riscaldato con intensi campi elettromagnetici a radiofrequenze, ed essendo costituito da cariche elettriche è confinato all'interno di una regione a forma di ciambella (volume toroidale) e lontano dalle pareti.

Questo tipo di reattore è detto **tokamak** (parola di origine russa che significa *macchina a camera toroidale*).



In Francia è attualmente in costruzione un reattore a confinamento magnetico detto ITER. Tutti i paesi avanzati vi partecipano, compresa l'Italia.