

10. Fisica nucleare

10.1 Come partire da problemi di attualità: il polonio e il caso Litvinenko, l'Iran e gli impianti per la produzione di energia nucleare, l'uranio impoverito

Valenze didattiche: si tratta di tipici problemi di “Fisica-scienza e società”, dai quali si può partire per affrontare argomenti di *fisica nucleare*, ma anche di *relatività*, *fisica quantistica*, *probabilità e statistica*. L'idea alla base è di arrivare a essere in grado di valutare gli aspetti “tecnici” del problema, raccogliere documentazione affidabile, capire il significato di “rischio” associato a certi fenomeni o attività.

Un questionario per riflettere:

- 1) Che cosa avete capito sul problema del Po_{210} : spiegate in poche righe perché è letale. Quali sono state le fonti principali di informazione (media, internet, testi universitari, ecc.) che avete usato per documentarvi? Come avete valutato l'affidabilità delle fonti?
- 2) Che cosa avete capito sul problema del divieto dato all'Iran di procedere nel dotarsi di impianti nucleari: spiegate in poche righe qual è il rischio potenziale. Quali sono state le fonti principali di informazione (media, internet, testi universitari, ecc.) che avete usato per documentarvi? Come avete valutato l'affidabilità delle fonti?
- 3) Che cosa avete capito sul problema dell'uso di “uranio impoverito” nelle testate di missili convenzionali: spiegate in poche righe come è stato usato e qual è il rischio potenziale. Quali sono state le fonti principali di informazione (media, internet, testi universitari, ecc.) che avete utilizzato per documentarvi? Come avete valutato l'affidabilità delle fonti?

Risposte:

- 1) Il Po_{84} è l'ultimo anello in una catena di prodotti di decadimenti radioattivi. Decade alfa in Pb_{82} , che è stabile e non ha decadimenti radiativi di tipo gamma, che possono essere rivelati anche a distanza. Poiché la radiazione alfa del polonio lascia una traccia di pochi micron nella materia, il Po in pratica non lascia tracce rivelabili con strumenti ordinari di misura di radioattività, ma si può solo determinare il residuo di Pb.
- 2) Perché reattori e armi nucleari sono legati? Nel funzionamento di reattori nucleari convenzionali, basati cioè su U_{235} , si producono molti isotopi altamente radioattivi, come il Pu_{239} , che non possono sostenere una reazione a catena controllata, come quella che avviene nel reattore all' U_{235} , ma possono innescare facilmente una reazione incontrollata come quella che serve in una esplosione nucleare. Inoltre l'impianto di arricchimento dell' U_{235} , che porta la frazione di U_{235} dallo 0,7% presente nell'uranio naturale al 2-3% necessario per far funzionare un reattore nucleare convenzionale, implica lo sviluppo di tecnologie e know-how che possono essere impiegate per lo sviluppo di armi nucleari.
- 3) L'uranio impoverito è costituito prevalentemente da U_{238} che è radioattivo. Nella fabbricazione del proiettile, l' U_{238} viene inserito in una certa frazione nella lega usata nella punta del proiettile per indurirla, dato che l'uranio è molto pesante e aumenta la forza d'urto e di penetrazione del proiettile. A livello della testata del proiettile la radioattività rilevata è trascurabile (rientra nei livelli normali). Quando il proiettile si disintegra, l' U_{238} forma un ossido volatile che può essere

inspirato con l'aria: questo ossido, depositandosi sulle pareti dei polmoni e di altre parti delle vie respiratorie può dare rischi da radioattività che, secondo alcune indagini, sono significativi.

10.2 Nuclei concettuali importanti di fisica nucleare

- Forze nucleari: scoperta della radioattività da parte di Becquerel (1896)
- Instabilità nucleare: scoperta delle catene di decadimento radioattivo (Becquerel, Curie, ecc.)
- Energia nucleare: massa ed energia, relatività di Einstein (1905)
- Isotopi, energia di legame nel nucleo e sua dipendenza dal numero di massa
- Decadimenti radioattivi dei nuclei, in particolare dell' U_{238}
- Legge esponenziale del decadimento radioattivo
- Conteggi di eventi stocastici e statistica di Poisson
- Effetti delle radiazioni: unità dosimetriche, rischi da radiazione
- Reazione a catena, funzionamento del reattore nucleare e delle armi nucleari
- Prospettive e sviluppi possibili dell'uso pacifico dell'energia nucleare

Per una discussione più dettagliata, esaminare il sito web www.iapht.unito.it/uranio/

10.3 Energia nucleare e relatività

Equivalenza massa-energia.

In relatività la relazione fra quantità di moto p e velocità v è la seguente:

$$p = m \frac{dx}{dt} = \mathbf{g} m \frac{dx}{dt} = \mathbf{g} m v \quad (1)$$

dove t è il "tempo proprio" e t è il tempo nel sistema di riferimento in cui viene misurato lo spazio percorso x e quindi la velocità v . Confrontando questa relazione con la relazione della meccanica classica, $p=mv$, si vede che tutto succede come se la massa inerziale m fosse moltiplicata per il

fattore di "dilatazione relativistica" \mathbf{g} $\mathbf{g} = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$. Il significato del prodotto $\mathbf{g} m$, cioè

dell'inerzia relativistica, si capisce esaminando la quantità $E = \mathbf{g} m c^2$, che, dimensionalmente, ma anche effettivamente, è una *energia*. Se il corpo ha una velocità molto minore di c , possiamo usare lo sviluppo di \mathbf{g} in serie di Taylor, valido per piccole velocità:

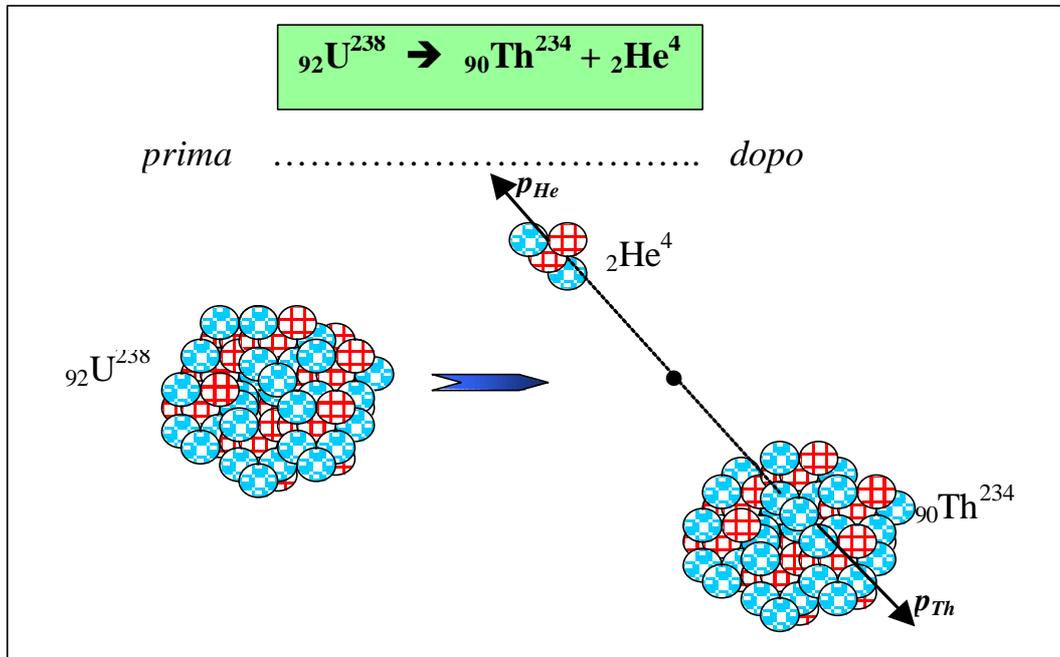
$$E = \mathbf{g} m c^2 = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2$$

Nell'espressione $E = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2$ riconosciamo chiaramente il secondo termine, che è l'energia cinetica, mentre il primo termine rappresenta l'*energia di massa*, cioè quella energia che rimane anche quando il corpo è fermo, cioè la sua energia cinetica è nulla:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{energia di massa} & \xrightarrow{\quad} & E = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 & \xleftarrow{\quad} & \text{energia cinetica} & (2)
 \end{array}$$

Essendoci quindi energia associata alla massa, essa si può trasformare in altre forme di energia, ad esempio in energia cinetica, il che è appunto ciò che avviene in modo vistoso in una reazione

nucleare. Se volessimo dare una rappresentazione pittorica della storica reazione di decadimento α dell'uranio 238, scoperta da Bequerel nel 1897, potremmo immaginarla come nella figura seguente:



Dall'uranio 238, che è fermo, si stacca un gruppetto di quattro nucleoni, cioè la particella α , mentre il resto del nucleo, che, avendo perso due protoni e due neutroni, è diventato torio 234, rincula in senso opposto. Scriviamo la *legge di conservazione della quantità di moto p*:

$$\mathbf{p}_U = \mathbf{p}_{Th} + \mathbf{p}_\alpha$$

Poiché l'uranio era inizialmente fermo, $\mathbf{p}_U=0$, quindi $\mathbf{p}_{Th} = -\mathbf{p}_\alpha$, cioè il torio e l'alfa rinculano uno contro l'altro, in direzione opposta, con quantità di moto uguale e contraria: tutto avviene come in una bomba che scoppia da ferma, i cui i frammenti schizzano in direzioni varie e la *somma vettoriale* delle quantità di moto è nulla. Il fatto che l'alfa e il torio siano prodotti nella reazione con una quantità di moto non nulla, implica anche che essi hanno un'energia cinetica non nulla: da dove proviene, visto che l'uranio era fermo e quindi la sua energia cinetica era nulla? Occorre tenere conto dell'*energia di massa*, cioè riferire la legge di conservazione dell'energia alle *energie totali relativistiche*, che, a piccole velocità, si possono scrivere, secondo l'eq. 2, come somma dell'energia di massa e di quella cinetica:

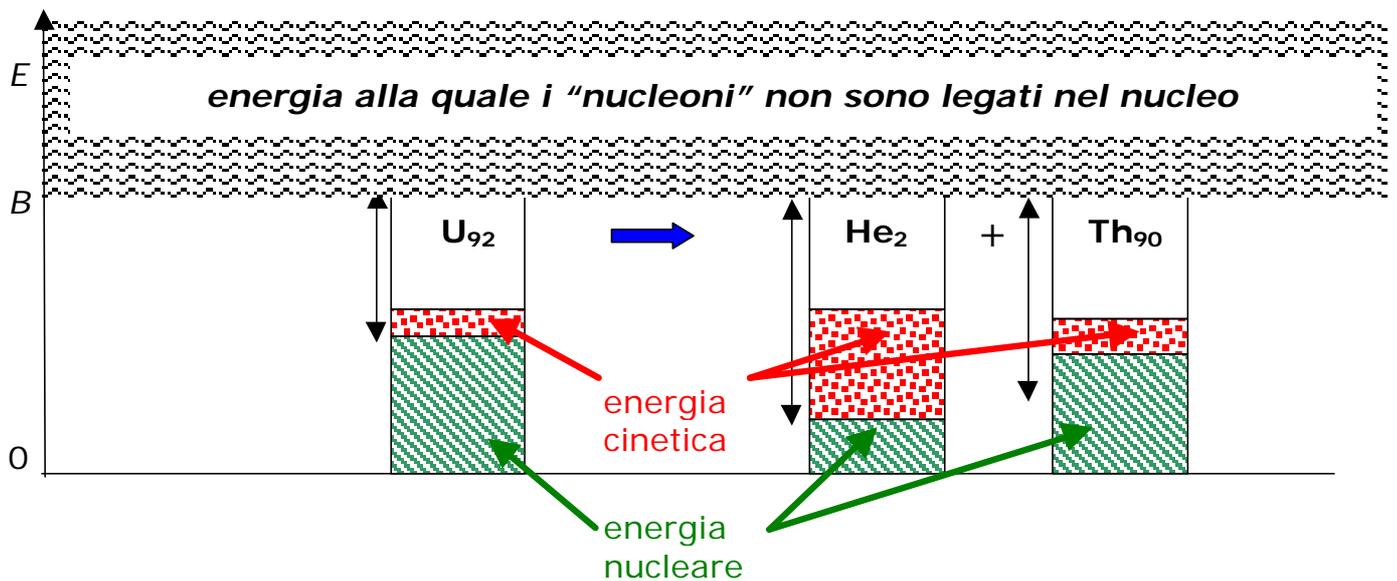
$$m_U c^2 = m_{Th} c^2 + \frac{1}{2} m_{Th} v_{Th}^2 + m_\alpha c^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \quad (3)$$

Si vede subito che, essendo le energie cinetiche del torio e dell'alfa quantità positive, *la massa dell'uranio deve essere maggiore della somma delle masse del torio e dell'alfa*: quindi la massa non si conserva nelle reazioni nucleari¹, anzi nella reazione avviene una trasformazione di "energia di massa" dell'uranio in "energia cinetica" del torio e dell'alfa.

¹ In realtà la massa non si conserva rigorosamente neppure nelle reazioni chimiche: ad esempio, in una reazione chimica "esotermica" come la combustione del metano in presenza di ossigeno, il calore che si sviluppa nella reazione non è altro che energia cinetica disordinata delle molecole prodotte che, a sua volta deriva dalla trasformazione di una piccolissima parte dell'energia "di massa" delle molecole iniziali. Tuttavia, nelle reazioni chimiche, la parte di energia di massa che si trasforma è meno di una parte in un miliardo e quindi non può essere rivelata neppure con la più sofisticata delle bilance analitiche: aveva pertanto pienamente ragione Lavoisier quando enunciò la sua legge della

Non è tuttavia così facile trasformare energia di massa in altre forme di energia, perché la frazione di energia che si trasforma, in una singola reazione, è sempre molto piccola, come si intuisce anche solo guardando l'equazione scritta sopra, dato che la maggior parte dell'energia di massa dell'uranio rimane ancora, dopo il decadimento, sotto forma di energia di massa del torio e dell'alfa. Ciò è dovuto alla legge di conservazione del numero di "nucleoni" (protoni o neutroni): poiché i nucleoni debbono restare tutti e nessuno può scomparire, anche la massa dei nuclei prodotti nella reazione non potrà scendere al di sotto di un valore minimo, ed è questo fatto che garantisce la stabilità sostanziale della materia, cioè il fatto che non corriamo nessun rischio di vedere tutta la materia trasformarsi in energia cinetica e quindi "scompare"!.

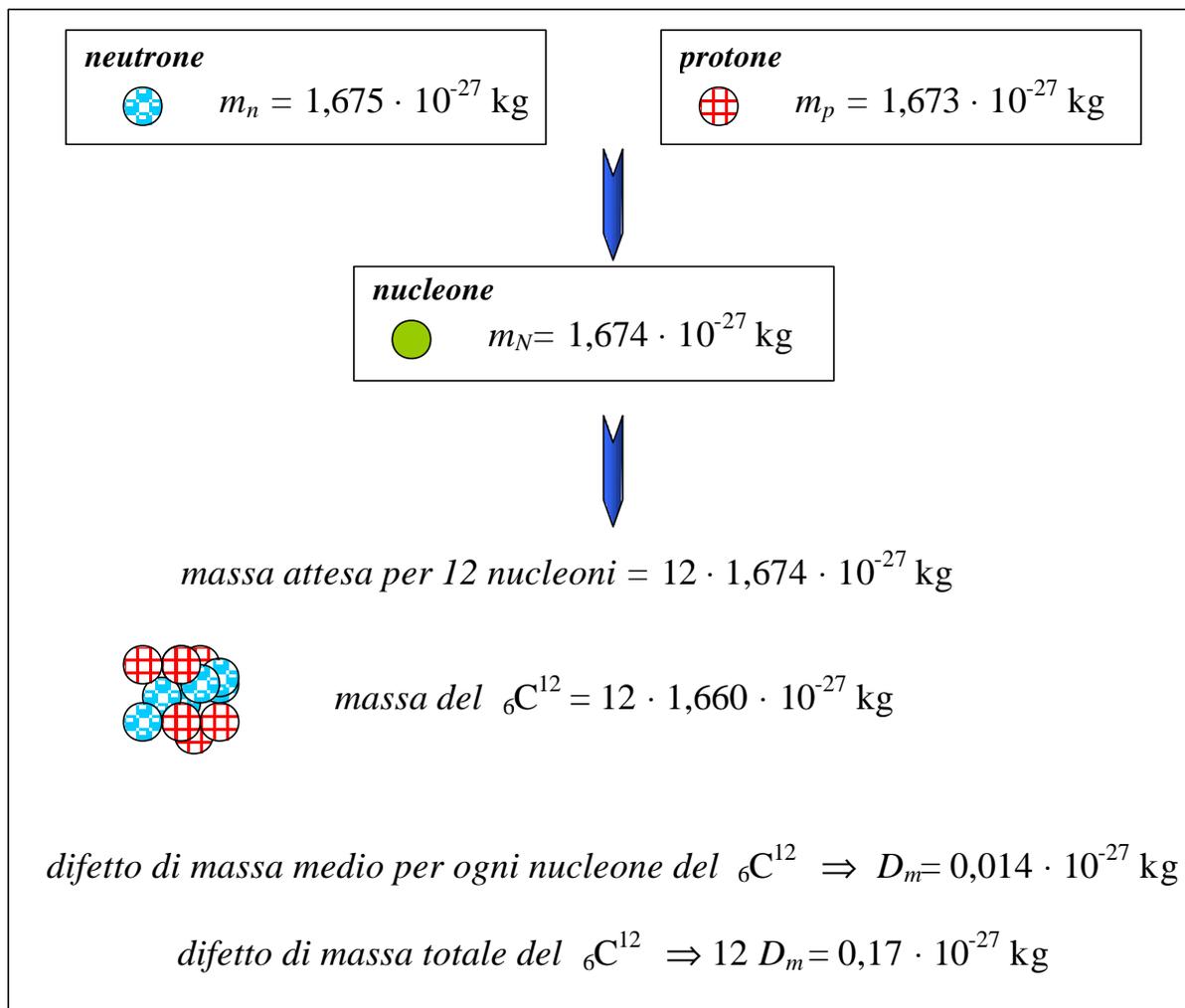
Anziché pensare in termini di "energia di massa" possiamo pensare in termini di "energia nucleare", così come, per spiegare una reazione chimica, abbiamo ragionato in termini di "energia chimica". La trasformazione di energia può quindi essere rappresentata con lo schema seguente, in cui appare evidente che si tratta di una trasformazione di energia nucleare in energia cinetica.



Esaminiamo da vicino che cosa è l'energia di massa di un nucleo. Ogni nucleo ha una sua propria massa caratteristica, che viene misurata con apparati di misura particolari, detti "spettrometri di massa": i primi spettrometri di massa furono sviluppati intorno 1920 proprio per misurare le masse dei nuclei. Ad esempio un nucleo come l'*isotopo* 12 del carbonio, ${}_{6}\text{C}^{12}$, che è particolarmente interessante perché è preso come riferimento per esprimere le masse dei nuclei. Il carbonio 12, ${}_{6}\text{C}^{12}$, è formato da sei protoni e sei neutroni, verrebbe perciò spontaneo pensare che la sua massa debba essere pari alla somma della massa dei sei protoni e dei sei neutroni, invece è minore: la differenza si chiama *difetto di massa*. Il difetto di massa è piccolo, rispetto alla massa totale, ma non è trascurabile: nel riquadro che segue trovate il calcolo dettagliato, che per il ${}_{6}\text{C}^{12}$ è particolarmente semplice. La sua massa infatti è stata presa come riferimento per la definizione dell'*unità di massa atomica*: essa è, per definizione, esattamente 12 u.m.a., mentre le masse degli altri nuclei sono invece, in generale, multipli non interi dell'u.m.a., proprio perché ogni nucleo ha un suo caratteristico difetto di massa.

Il difetto di massa viene generalmente riferito al singolo *nucleone*, cioè a una particella fittizia, la cui massa ha un valore medio fra la massa del protone e quella del neutrone, quindi, per un nucleo di numero di massa A , viene espresso come $A \times D_m$, dove D_m è il *difetto di massa per nucleone*: ciò renderà possibile apprezzare meglio le differenze effettive fra i diversi nuclei, che sono dovute non solo al fatto che varia A ma anche al fatto che varia D_m .

conservazione della massa nelle reazioni chimiche, perché la legge, anche se non è esatta, è comunque valida con altissima precisione. Nelle reazioni nucleari, l'effetto è invece del tutto evidente.



Ci si può chiedere come può un nucleone avere, dentro il nucleo, una massa minore della sua massa reale. Per capirlo occorre ricorrere alla *teoria della relatività* e ragionare non più in termini di massa, ma di *energia di massa*. Se il nucleone fosse “libero”, cioè fuori del nucleo, la minima energia che dovrebbe avere sarebbe proprio quella dovuta alla sua massa: questo se fosse fermo, perché, se fosse in moto, avrebbe in più dell’energia cinetica. Dentro il nucleo ha invece una energia minore dell’energia di massa, cioè gli “manca dell’energia” per diventare libero: questa energia mancante è quindi l’*energia di legame*, E_B , cioè l’energia che occorrerebbe dargli per estrarlo dal nucleo. Per calcolarla, basta moltiplicare il difetto di massa, D_m , per la velocità della luce c al quadrato, secondo la relazione di Einstein:

$$E_B = D_m c^2 \quad (4)$$

È inoltre conveniente esprimere l’energia di legame non nelle unità di misura del SI, ma nelle unità usate nella fisica nucleare, cioè i MeV (megaelettronvolt): 1 eV è l’energia che acquista un elettrone, che ha una carica elettrica pari a $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb quando è accelerato da una differenza di potenziale elettrico di 1 V, quindi il fattore di conversione da J a MeV vale:

$$1 \text{ J} = (1 / 1,6 \cdot 10^{-19}) \text{ eV} = 0,67 \cdot 10^{+19} \text{ eV} = 0,67 \cdot 10^{+13} \text{ MeV} \quad (10)$$

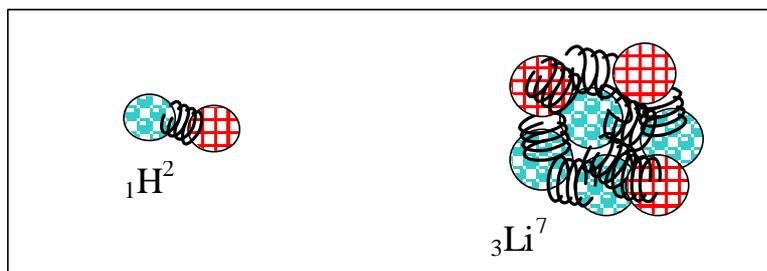
Il calcolo dell'energia di legame del ${}^6\text{C}^{12}$ è riassunto nel riquadro: come si vede ogni nucleone ha una energia di legame di circa 8 MeV, per cui l'energia totale che tiene insieme il ${}^6\text{C}^{12}$ è pari a 12 volte questa energia, cioè 96 MeV, dato che ogni nucleone contribuisce per 8 MeV.

$$\text{energia di legame media per nucleone del } {}^6\text{C}^{12} \Rightarrow E_B = D_m c^2$$

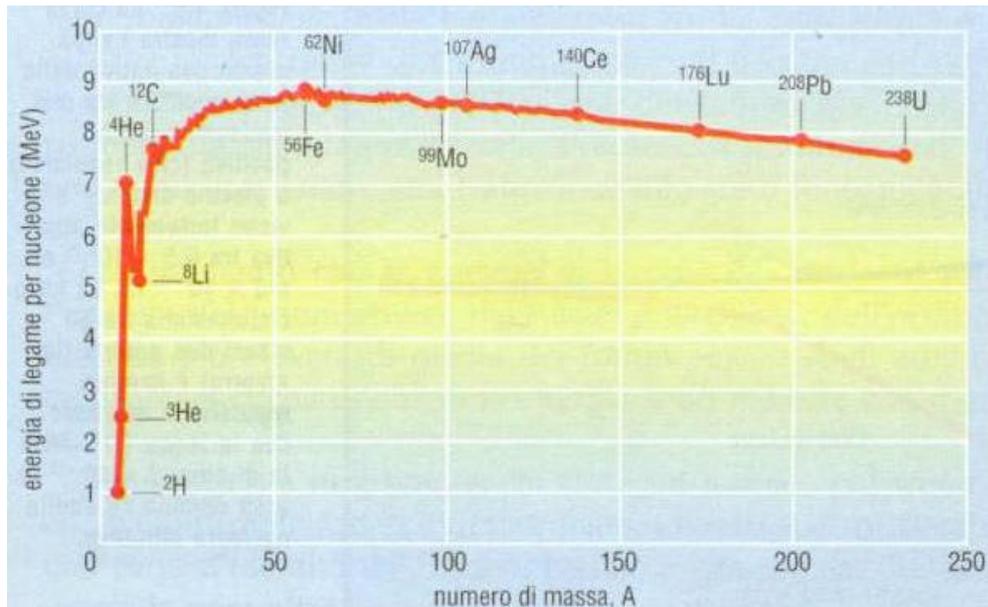
$$E_B = 0,014 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J} = (0,13 \cdot 10^{-11} \cdot 0,67 \cdot 10^{+13}) \text{ MeV} \approx 8 \text{ MeV}$$

$$\text{energia di legame totale del } {}^6\text{C}^{12} \Rightarrow 12 E_B \approx 96 \text{ MeV}$$

L'energia di legame totale del ${}^6\text{C}^{12}$ è l'energia che occorrerebbe spendere per disfare completamente il ${}^6\text{C}^{12}$, cioè per separare i 12 nucleoni e lasciarli tutti completamente liberi di andare per la loro strada. Per calcolare l'energia che si sviluppa in una reazione nucleare, dobbiamo conoscere quanto vale E_B nei vari nuclei, perché, in una reazione nucleare non succede mai che un nucleo si disfi completamente e tutti i nucleoni se ne vadano via liberi, ma i nucleoni semplicemente si riaggregano in modo diverso a formare nuovi nuclei e quel che conta è l'energia di legame E_B che si trovano ad avere nel nuovo nucleo. Infatti E_B non ha sempre lo stesso valore, ma varia da nucleo a nucleo. I motivi sono diversi e alquanto complessi. Per i nuclei piccoli, E_B cresce al crescere del numero di massa. La forza nucleare agisce infatti come una forte "colla" che tende a fare restare "attaccati insieme" i nucleoni: se immaginiamo delle palline coperte di colla, si può intuire che è più facile liberare una pallina se è incollata solo a un'altra pallina anziché se è incollata a sei altre palline! Nella figura è mostrato, come esempio, una rappresentazione pittorica di quello che potrebbe essere un nucleo di deuterio, che è un isotopo dell'idrogeno, con due soli nucleoni, un protone e un neutrone, mentre a fianco c'è un nucleo di ${}^3\text{Li}^7$, che ha 3 protoni e 4 neutroni: ci sono chiaramente molti più legami nel caso del ${}^3\text{Li}^7$, semplicemente perché ci sono più nucleoni e ognuno di essi stabilisce legami con gli altri.



L'effetto "colla", tuttavia, non può continuare a crescere all'infinito, perché, a un certo punto, ci sono troppi protoni nella zona ristretta del volume del nucleo ed essi si respingono tra di loro a causa della carica elettrica, che è di segno positivo per tutti. L'energia di legame raggiunge perciò un valore massimo, pari a circa 9 MeV, per nuclei che hanno A prossimo a 60, come il ferro o il nichel, e poi diminuisce gradualmente. Per l'uranio 238 E_B vale circa 7,5 MeV, come si può apprezzare dalla figura.



Possiamo ora fare il calcolo dell'energia che si libera nel decadimento α dell'uranio 238. Dal grafico della figura si vede infatti che, rispetto all'uranio, l'energia di legame è leggermente maggiore per il torio (circa 0,018 MeV per nucleone), mentre è più piccola per l'alfa (circa 0,5 MeV per nucleone). Nel decadimento, quindi, i 234 nucleoni del torio contribuiscono positivamente per circa $234 \cdot 0,018$ MeV, mentre i 4 nucleoni dell'elio contribuiscono negativamente per $4 \cdot 0,5$ MeV: in totale l'energia DE che si libera vale:

$$DE = 234 \cdot 0,018 - 4 \cdot 0,5 \text{ MeV} \approx 2 \text{ MeV}$$

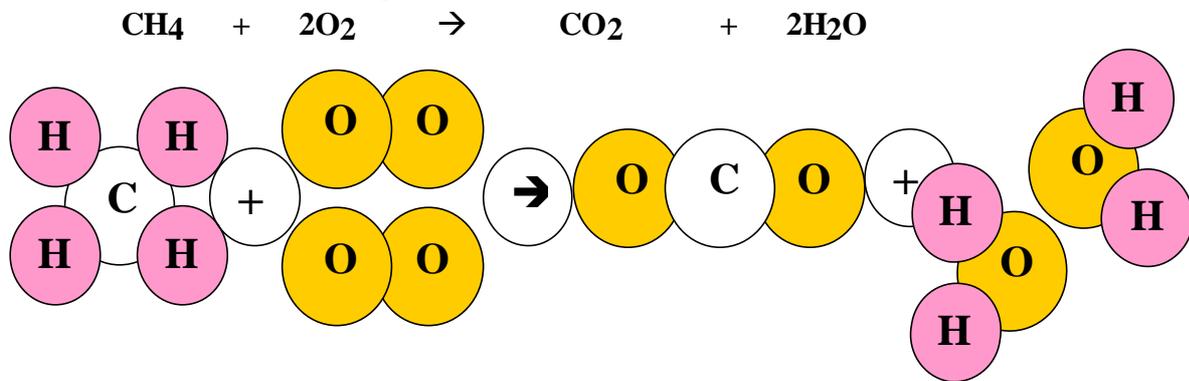
Questa energia viene ripartita sotto forma di energia cinetica fra il torio e l'elio, ma è l'elio a fare la parte del leone, dato che ha massa molto minore. Valori di alcuni MeV sono tipici dell'energia di particelle α emesse nei decadimenti radioattivi: l'energia è sufficientemente elevata perché la particella possa percorrere un tratto abbastanza lungo da poter essere rivelata prima di perdere tutta la sua energia negli urti con le molecole del materiale che incontra, come si può vedere dall'esempio della figura.



Nella figura sono mostrate tracce lasciate da particelle α emesse da una sorgente radioattiva in una "camera a nebbia": la camera è piena di vapori sovrasaturi, al passaggio delle particelle α , si creano dei nuclei di condensazione lungo i percorsi delle particelle che permettono di visualizzarli. La sorgente è posta in basso rispetto alla camera.

10.4 Radiazioni ionizzanti e il rischio nucleare

Il "rischio nucleare" è appunto legato all'alta energia che si libera nella singola interazione, che può recare danno alle cellule se supera una soglia di tolleranza (vedi tabella sui "rischi della vita quotidiana"). Confrontiamo ad esempio l'energia che si libera in una tipica reazione chimica fortemente esotermica come la combustione del metano. Il metano è formato da un atomo di carbonio e 4 atomi di idrogeno (formula chimica CH₄); in presenza di ossigeno (O₂), si forma anidride carbonica (CO₂) e acqua (H₂O).



Anche in una reazione di questo tipo c'è una trasformazione di energia di legame (in questo caso il legame è chimico) in energia cinetica delle molecole: le molecole di metano e di ossigeno hanno piccola energia di legame e piccola energia cinetica, quelle di anidride carbonica e acqua prodotte nella reazione hanno alta energia cinetica (termica) e sono molto legate. Tenendo conto che l'energia di legame è negativa, ciò è in accordo con la legge di conservazione dell'energia. L'energia che si sviluppa in una reazione di questo tipo è di qualche eV².

Queste energie sono circa *un milione di volte minore dell'energia che si sviluppa in una reazione nucleare*, che, come visto sopra, è tipicamente dell'ordine del MeV (mega elettronvolt). Con energie così elevate è facile rilevare la singola interazione radiazione-materia, ad esempio con un semplice contatore geiger, oppure rivelare la traccia della singola particella, come avvenne appunto nello storico esperimento di Becquerel.

10.5 Meccanica quantistica

Un decadimento come quello dell' $\text{U}_{238} \rightarrow \text{Th}_{234} + \text{He}_4$ non può essere descritto classicamente; quantisticamente viene descritto come possibilità dell' He_4 e del Th_{234} di essere presenti in una "sovrapposizione di stati": cioè sia come stati all'interno della buca di potenziale nucleare dell' U_{238} , sia come "stati liberi" all'esterno del nucleo. Inizialmente, l' He_4 e il Th_{234} hanno una probabilità molto più alta di trovarsi nello stato in cui sono all'interno del nucleo, legati fra di loro dalla forza di attrazione nucleare, ma hanno anche una probabilità non nulla di trovarsi nello stato in cui sono "fuori" del nucleo: se i nuclei si trovano in tale stato, essendo abbastanza lontani, la repulsione coulombiana prevale sull'attrazione nucleare e i nuclei si allontanano conservando energia e quantità di moto³.

La probabilità di decadimento per unità di tempo è appunto la probabilità di "passaggio" dallo stato in cui l' He_4 e il Th_{234} sono all'interno del nucleo allo stato in cui sono fuori, passaggio che avviene *stocasticamente* nel tempo. Non è infatti possibile prevedere in quale istante l' U_{238}

² Dello stesso ordine di grandezza è l'energia emessa in una transizione atomica che produce luce visibile, come si calcola facilmente dalla relazione di Planck, $E = hf = hc/\lambda$, con, ad esempio, $\lambda \approx 600 \text{ nm}$. Ne segue che parte dell'energia chimica non si trasforma in energia cinetica dell'intera molecola, ma in energia di eccitazione degli elettroni atomici, che, diseccitandosi, emettono luce: la fiamma infatti appare luminosa e colorata.

³ In principio c'è la stessa probabilità che avvenga la reazione opposta se i due nuclei vengono a trovarsi a una distanza ravvicinata e con quantità di moto ed energie cinetiche tali da poter ricostruire l'energia di massa dell'Uranio. In meccanica quantistica vale la piena reversibilità temporale.

deciderà di decadere (indeterminismo non epistemico), però si può calcolare (e misurare) la probabilità che decada in un certo intervallo di tempo e questa probabilità è uguale per tutti i nuclei di U^{238} .

10.6 Sorgenti di radiazione e unità di misura dosimetriche

Sorgenti naturali di radiazione:

- raggi cosmici
- radionuclidi presenti nell'ambiente (uranio, radon)
- radionuclidi presenti nel corpo (^{40}K , ^{14}C)

Unità dosimetriche

Sono state introdotte per valutare gli effetti sul un corpo dell'assorbimento di energia dovuta alle radiazioni di origine nucleare ("ionizzanti").

Unità di misura:

- "attività" → bequerel (Bq): numero di particelle ionizzanti che colpisce il corpo; l'unità storica, peraltro ancora usata, è il curie (Ci), che è pari a $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
- "dose assorbita" → gray (Gy): energia depositata per kg di peso; $1 Gy = 1 J/kg$
- "dose equivalente" → sievert (Sv): dose assorbita per il "fattore di qualità" della radiazione (alto per neutroni e nuclei pesanti, =1 per elettroni e gamma);
- "esposizione" → roentgen (R): è una unità di misura storica, peraltro ancora usata, ed è la carica elettrica, di ambo i segni, che si sviluppa nello sciume prodotto al passaggio in aria della particella ionizzante ($1 R = 2,58 \cdot 10^{10} C/kg$).

Tipicamente

- la radiazione cosmica è circa 0,3 mSv/anno al livello del mare (circa il doppio a 1000 m)
- i radionuclidi presenti nel corpo umano producono una dose di circa 0,3 mSv/anno
- la radioattività ambientale varia molto da zona a zona

Radioattività ambientale in alcune città italiane

Ancona	0.85	Napoli	2.13
Aosta	0.49	Palermo	0.90
Bari	0.83	Perugia	0.86
Bologna	0.80	Potenza	1.31
Cagliari	0.86	Reggio Cal.	1.28
Campobasso	0.69	Roma	1.58
Firenze	0.77	Torino	0.86
Genova	0.75	Trento	0.84
L'Aquila	0.82	Trieste	0.76
Milano	0.82	Venezia	0.77

Limite raccomandato di esposizione: 15 mSv/anno

Dose "letale": 2,5 - 3 Sv

Per tipici contatori geiger usati per la didattica si può stimare:

- una massa di circa 1 g nella zona sensibile
- energia media depositata dalla singola particella circa $10^{-13} J$ (0,5 MeV)
- fattore di qualità circa 1 (i nuclei pesanti vengono bloccati dalla finestra di protezione del tubo geiger)

Per passare da Bq (conteggio medio al secondo) a mSv/anno:

$1 Bq \approx 10^7$ conteggi/anno (1 anno = 365 giorni * 24 h/giorno * 3600 s/h)

1 conteggio nel contatore → $10^{-13} J/10^{-3} g = 10^{-10} Sv$

10^7 conteggi/anno $\rightarrow 10^{-3}$ Sv/anno = 1 mSv/anno

10.7 The risks of daily life

Activities carrying an average risk of death of one part per million

Activity	Cause(s) of death
Ionizing radiation	
One chest X ray at a good hospital	Cancer from ionizing radiation
Traveling cross-country once by jet	Cancer from cosmic ionizing radiation
Living 1 week in a building	Cancer from indoor radon
Living 5 weeks outdoors	Cancer from outdoor radon
Living 2 months in Denver	Cancer from cosmic ionizing radiation
Living 5 years next to nuclear power plant	Cancer from ionizing radiation
Living 50 yrs within 5 mi of nuclear power plant	Accident
Internal consumption	
Smoking 1.4 cigarettes	Cancer and heart disease
Living 2 months with a cigarette smoker	Cancer and heart disease
Drinking 0.5 liters of wine	Cirrhosis of the liver
Normal consumption of tap water for 1 year	Cancer from chloroform
Drinking 30 12-ounce cans of diet soda	Cancer from saccharin
Eating 40 tablespoons of peanut butter	Liver cancer from aflatoxin B
Eating 100 charcoal broiled steaks	Cancer from benzopyrene
Travel	
3 miles by motorcycle	Accident
10 miles by bicycle	Accident
30 miles by car	Accident
800 miles by train	Accident
1000 miles by commercial airplane	Accident
6000 miles (cross-country) by jet	Cancer from cosmic ionizing radiation
Work	
Spending 1 hour in a coal mine	Black lung disease
Spending 3 hours in a coal mine	Accident
Other	
Living 2 days in New York or Boston	Air pollution

SOURCE: Richard Wilson, "Comparing Risks.." Physics and Society. October 1990. pp. 3-5.

10.8 Energia nucleare: uso, problemi, sviluppo

Si rimanda al seminario "Energia nucleare oggi", scaricabile dal sito www.iapht.unito.it/uranio/

Esercizi

1. Calcoli su un fenomeno di fisica nucleare (obbligatorio): realizzate un calcolo realistico e significativo su un fenomeno di fisica nucleare.
2. Per un tipico problema di fisica nucleare preparate una scheda didattica ad uso dell'allievo indicando
 - contesto, prerequisiti,
 - inserimento a grandi linee nel curriculum, con indicazioni della scaletta dei tempi,
 - scelta degli argomenti specifici da trattare e loro sviluppo,
 - modalità di conduzione.