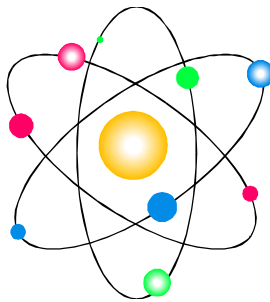


Fisica Nucleare



1 INTRODUZIONE (DEFINIZIONI E UNITÀ DI MISURA).....	2
2 FORZE NUCLEARI E STABILITÀ DEI NUCLEI ATOMICI	4
3 RADIOATTIVITÀ NATURALE	5
4 REAZIONI NUCLEARI. RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE. ELEMENTI TRANSURANICI	11
5 DIFETTO DI MASSA ED ENERGIA DI LEGAME. FISSIONE E FUSIONE	12
6 CLASSIFICAZIONE DELLE PARTICELLE ELEMENTARI E DELLE LORO INTERAZIONI.....	15
7 PROBLEMI RISOLTI	16
8 PROBLEMI PROPOSTI.....	21

1 Introduzione (definizioni e unità di misura)

A partire dalle esperienze di Rutherford si è avuta una evidenza sperimentale per un modello dell'atomo avente un nucleo atomico centrale in cui sono concentrate carica positiva e massa dell'atomo stesso.

Al contrario, gli elettroni, di carica negativa, ruotano attorno al nucleo, lungo delle 'orbite' il cui raggio è determinato dalle condizioni di quantizzazione che Bohr ha posto alla base del suo modello dell'atomo d'idrogeno ed estese, successivamente ad altri atomi idrogenoidi. Lo sviluppo futuro della meccanica quantistica ha precisato il significato di queste condizioni e definito meglio i limiti della loro validità.

Dimensioni Se l'ordine di grandezza delle dimensioni dell'atomo è 10^{-10} m, l'ordine di grandezza delle dimensioni del nucleo è 10^{-15} m (grosso modo, è come avere una biglia di vetro, il nucleo, al centro di uno stadio olimpico, l'atomo, i cui elettroni occupano le gradinate). Il disegno di copertina, oltre ad essere arbitrario sulle 'orbite' degli elettroni, non rende giustizia dei rispettivi ordini di grandezza delle dimensioni dell'atomo e del nucleo.

femtometro A proposito dell'ordine di grandezza delle dimensioni del nucleo atomico, è stato introdotto il femtometro come unità di misura tipica delle distanze nucleari:

$$1 \text{ femtometro} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m},$$

unità di misura che prende il nome da Enrico Fermi, fisico italiano che ha dato notevoli contributi alla fisica del nucleo atomico.

Nucleoni Altre esperienze hanno portato ad attribuire al nucleo atomico una struttura interna in cui sono presenti contemporaneamente protoni (aventi carica positiva uguale a quella dell'elettrone) e neutroni (aventi carica nulla), le cui masse sono da considerarsi *circa* uguali (in realtà, la massa del neutrone è leggermente superiore della massa del protone). I protoni ed i neutroni si chiamano anche *nucleoni*. Per la neutralità (dal punto di vista della carica elettrica) dell'atomo, nel nucleo devono essere presenti tanti protoni quanti sono gli elettroni orbitanti attorno ad esso. Il numero dei protoni (o degli elettroni), indicato con Z e chiamato *numero atomico*, è responsabile delle proprietà chimiche di un determinato elemento (ed in base a questo numero si costruisce la tavola periodica degli elementi chimici). La somma del numero dei protoni (Z) e del numero dei neutroni (N) si chiama *numero di massa* A di un atomo e risulta dunque:

$$A = Z + N.$$

Per indicare un elemento chimico X che ha numero atomico Z e numero di massa A si scrive: ${}^A_Z X$.

Il numero di massa A è responsabile delle proprietà fisiche dell'elemento X . In generale, esiste una relazione empirica che fornisce il **raggio di un nuclide** ${}^A X$ in funzione del suo numero di massa A . Si ha:

$$r = r_0 \sqrt[3]{A},$$

dove r_0 varia da 1.4 a 1.7 fm.

Isotopi In realtà, uno stesso elemento chimico può avere un numero diverso di neutroni all'interno del suo nucleo: si parla allora di *isotopi* di un elemento. Due isotopi di uno stesso elemento hanno le stesse proprietà chimiche, ma proprietà fisiche diverse. Ad esempio, l'idrogeno è presente in natura con tre isotopi: il primo, quello più abbondante, è l'isotopo il cui nucleo ha un solo protone e zero neutroni, il secondo (idrogeno due o deuterio) è quello il cui nucleo ha un protone ed un neutrone, il terzo

(idrogeno tre o trizio) è quello il cui nucleo ha un protone e due neutroni. I tre isotopi dell'idrogeno si indicano rispettivamente con: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ e ${}^3_1\text{H}$.

La separazione dei diversi isotopi di uno stesso elemento viene effettuata mediante uno **spettrometro di massa**: la miscela degli isotopi ionizzati viene inviata (dopo averne fissata la velocità con un opportuno selettore di velocità) in un campo magnetico ortogonale al vettore velocità degli isotopi. Gli isotopi subiscono, allora una deviazione che li costringe ad effettuare una traiettoria semicircolare, il cui raggio dipende, oltre che dalla carica, anche dalla massa degli isotopi:

$$m \frac{v^2}{R} = qvB \Rightarrow \boxed{R = \frac{mv}{qB}}$$

dove B è il campo magnetico esterno e v , q rispettivamente la velocità e la carica degli isotopi; m è la massa di un isotopo particolare ed R il raggio della sua traiettoria semicircolare.

Essendo le cariche degli isotopi uguali ma le loro masse diverse, anche le traiettorie semicircolari avranno raggi diversi: in questo modo è facile separarli, effettuarne il conteggio, determinarne la diversa presenza percentuale nel campione, ecc.

Isotoni Gli atomi che hanno stesso numero di neutroni N ma numero atomico Z diverso si chiamano *isotoni*. Ad esempio sono isotoni gli atomi ${}^{14}_7\text{N}$ e ${}^{13}_6\text{C}$. L'azoto ha 7 protoni e 7 neutroni (numero di massa 14) e il carbonio 13 ha 6 protoni e 7 neutroni (numero di massa 13).

Isobari Gli atomi che hanno stesso numero di massa A , ma N e Z diversi si chiamano *isobari*. Ad esempio, sono isobari gli atomi ${}^{14}_7\text{N}$ e ${}^{14}_6\text{C}$. L'azoto ha 7 protoni e 7 neutroni (numero di massa 14) e il carbonio 14 ha 6 protoni e 8 neutroni (numero di massa 14).

Nuclide Il nucleo di un atomo X si chiama anche *nuclide X* e la tavola dei nuclei atomici *tavola dei nuclidi*.

Elettronvolt Analogamente alla fisica atomica, anche in fisica nucleare si usa molto, come unità di misura dell'energia, l'*elettronvolt* (eV) ed i suoi multipli: 1 eV è l'energia che acquista un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di un volt;

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, \\ 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}, \text{ e così via.}$$

u L'isotopo 12 del carbonio (${}^{12}_6\text{C}$) viene preso come riferimento per introdurre l'*unità di massa atomica* (u), definita come la dodicesima parte della massa di detto isotopo. Allora risulta:

$$1u = \frac{1}{12} (\text{massa di } {}^{12}_6\text{C}) = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.5 \text{ MeV}.$$

Rispetto a questa unità ed alla unità di carica elettrica (C, coulomb) le particelle sinora conosciute si possono riassumere così:

Particella	massa a riposo, m_0	massa a riposo, m_0	$m_0 c^2$ (MeV)	Carica (C)
------------	-----------------------	-----------------------	-----------------	------------

	(kg)	(u)		
Elettrone	9.109×10^{-31}	0.000548	0.511	-1.60×10^{-19}
Protone	1.673×10^{-27}	1.007277	938.256	$+1.60 \times 10^{-19}$
Neutrone	1.675×10^{-27}	1.008665	939.550	0
uma (u)	1.661×10^{-27}	1	931.5	-

Equivalenza tra massa ed energia Per capire il significato della quarta colonna della tabella precedente, bisogna fare riferimento alla teoria della *Relatività Ristretta* (elaborata da A. Einstein nel 1905), secondo cui esiste una **equivalenza tra massa ed energia**, equivalenza fornita dalla formula

$$E = mc^2$$

una particella di massa m è equivalente ad un'energia mc^2 , dove c è la velocità della luce nel vuoto; viceversa, ad una certa energia E si può far corrispondere una massa equivalente E/c^2 .

Se la formula trova conferme sperimentali continue in centinaia di laboratori di tutto il mondo (e nel grande laboratorio della natura, come ad esempio negli sciami di raggi cosmici che bombardano in continuazione la Terra), questo non significa che il passaggio da una forma all'altra sia automatico o facile! Anzi! Gran parte della fisica applicata contemporanea è alla ricerca sfrenata sul **come** realizzare la trasformazione più utile per l'uomo e cioè la trasformazione massa → energia.

Due linee di sviluppo principali di questa trasformazione sono la fissione e la fusione nucleare, cui si accennerà in seguito.

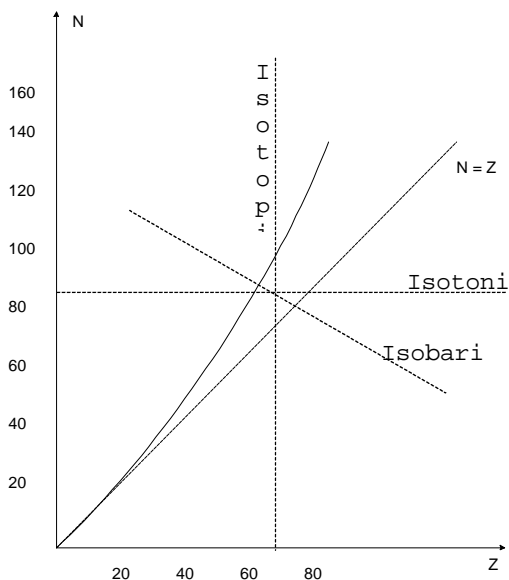
2 Forze nucleari e stabilità dei nuclei atomici

Il nucleo, avendo al suo interno due o più protoni, che hanno carica elettrica positiva, dovrebbe essere instabile a causa delle forze elettriche di repulsione tra i protoni, per di più di intensità non trascurabile essendo molto piccola la distanza reciproca.

Forza nucleare In realtà, il nucleo atomico anche di atomi aventi un numero notevole di protoni, è stabile a causa della presenza, al suo interno, della *forza nucleare* attrattiva, avente intensità superiore alla forza elettrostatica repulsiva ed agente solo a piccolissime distanze, dell'ordine di pochi femtometri. A distanze superiori a pochi femtometri, la forza nucleare è nulla ed agisce solo la forza elettrostatica repulsiva.

La forza nucleare attrattiva agisce tra ogni coppia di nucleoni: p-p, p-n, n-n.

A distanze molto minori di 1 fm, la forza nucleare diventa repulsiva e si parla anche di *cuore nucleare repulsivo*. Questo aspetto potrebbe essere responsabile dell'impossibilità di fondere assieme due o più nucleoni.



A causa del piccolo raggio d'azione delle forze nucleari, per assicurare la stabilità dei nuclei atomici con Z via via crescente, si ha un andamento interessante del numero dei neutroni contenuti nel nucleo di un atomo: per Z piccolo, si ha $N \approx Z$, per Z più grande, si ha $N > Z$, con un andamento che somiglia grossomodo a quello della curva a lato (curva di stabilità dei nuclidi).

L'eccesso di neutroni si ha in quanto le forze elettriche repulsive fra protoni fanno aumentare la distanza media fra i protoni stessi e, quindi la necessità di un aumento del numero dei neutroni rispetto a quello dei protoni. Questo aumento, a causa della forza nucleare $n-n$ e $n-p$, assicura la stabilità del nucleo atomico.

In ogni caso, per un dato Z , i nuclidi stabili sono solo quelli presenti sulla curva di stabilità; quelli che hanno un numero di neutroni maggiore o minore sono instabili e si trasformano ('decadono') spontaneamente in altri nuclidi

mediante emissione di opportune particelle (vedere in seguito il decadimento radioattivo). In ogni caso, bisogna tener presente che alcun nuclide è stabile a partire da $Z = 84$ (polonio). Ad esempio il carbonio ($Z = 6$) ha 8 isotopi (da $A = 9$ ad $A = 16$) di cui solo due sono stabili, il carbonio 12 ed il carbonio 13, come risulta dalla tabella riassuntiva seguente:

Isotopi del carbonio e relativo tempo di dimezzamento T								
A	9	10	11	12	13	14	15	16
T	0.13 s	19 s	20 min	stabile	stabile	5730 a	2.2 s	0.74 s

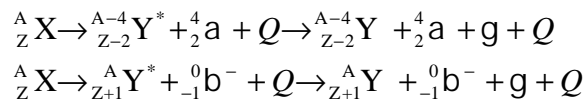
Nel grafico precedente, gli isotopi sono rappresentati su rette parallele all'asse N , gli isotoni su rette parallele all'asse Z e gli isobari su rette perpendicolari alla bisettrice $N=Z$.

3 Radioattività naturale

La **radioattività naturale** è quel fenomeno per cui alcuni nuclidi, spontaneamente, si trasformano in altri nuclidi per emissione di particelle α (nuclei di atomi di elio, quindi due protoni e due neutroni) o β^- (elettroni), seguite ancora da emissioni di assestamento di raggi γ (radiazioni elettromagnetiche molto energetiche). Il fenomeno è stato scoperto casualmente dal fisico francese Becquerel che ha osservato come alcune lastre fotografiche depositate vicino ad un campione di radio (di qui il nome radioattività) erano state impressionate. Dopo la scoperta casuale di Becquerel altre ricerche sono state effettuate, in modo sistematico, sia per scoprire altre sorgenti di radiazioni, sia per studiare il fenomeno dal punto di vista fisico e da quello matematico. Intanto le sorgenti radioattive sono state utilizzate sia ai fini della ricerca scientifica (vedi Rutherford che ha utilizzato le particelle α come proiettili contro bersagli determinati, al fine di studiare la struttura interna dell'atomo), sia dal punto di vista terapeutico (vedi l'uso di certi campioni radioattivi per la cura dei tumori).

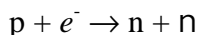
Leggi fisiche del decadimento radioattivo Dal punto di vista fisico, bisogna subito dire che *la radioattività di un determinato campione radioattivo non viene minimamente influenzata da cambiamenti di pressione o di temperatura del campione stesso, né dalla presenza di eventuali agenti chimici esterni.*

Inoltre, se un nuclide genitore X emette una particella, si trasforma in un altro nuclide figlio Y a seconda della particella emessa secondo le equazioni seguenti (*leggi dello spostamento radioattivo di Soddy*):



dove Y^* indica il nuclide in uno stato eccitato, che si diseccita per emissione di una radiazione γ e Q indica l'energia liberata nella reazione (ad esempio sotto forma di energia cinetica del nucleo figlio Y e/o della particella emessa).

Oggi si conosce un altro tipo di radioattività naturale, la **cattura elettronica** (o **cattura K**): un elettrone dell'orbita K può essere catturato dal nucleo, convertendo un protone in neutrone secondo la reazione seguente:



Per il nuclide X che ha effettuato la cattura la reazione è:



In generale, in tutte le reazioni di decadimento radioattivo, il raggio γ viene emesso dopo un tempo dell'ordine di 10^{-13} s. Può accadere, però, che il nucleo figlio sia in uno *stato metastabile*: in tal caso, il nucleo figlio eccitato si chiama anche *isomero* del nucleo nello stato fondamentale e il raggio γ può essere emesso dopo qualche ora (si parla, allora, di *transizione isomerica*). Ad esempio, il ${}^{90}\text{B}$ isomero decade dopo circa 30 min emettendo un raggio γ di 49 keV.

Dunque:

- l'emissione di una particella α porta alla formazione di un nuclide spostato di due posti a sinistra nella tavola periodica di Mendeleev e con un numero di massa minore di 4 unità.
- l'emissione di una particella β^- porta alla formazione di un nuclide spostato di un posto a destra nella tavola periodica di Mendeleev e con lo stesso numero di massa del nuclide genitore.
- la cattura elettronica (o anche l'emissione di una particella β^+) porta alla formazione di un nuclide spostato di un posto a sinistra nella tavola periodica di Mendeleev e con lo stesso numero di massa del nuclide genitore.

Matematica del decadimento radioattivo

Dal punto di vista matematico, bisogna tener conto del fatto che, disponendo di due campioni radioattivi della stessa natura, ma con massa diversa, il numero delle disintegrazioni subite dai due campioni sono mediamente proporzionali alla massa dei campioni stessi. Dunque, se N indica il numero dei nuclidi del campione radioattivo ad un dato istante t , la variazione nel tempo di detto numero (dN/dt) è proporzionale ad N stesso ed è negativa (per tener conto del fatto che N decresce nel tempo).

Dunque si può scrivere l'equazione:

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

dove si è indicata con λ la costante di proporzionalità (chiamata anche *costante di disintegrazione radioattiva*). L'equazione precedente è una semplice equazione differenziale a variabili separabili, che si risolve facilmente:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_0^t \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow$$

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

avendo indicato con N_0 il numero di nuclidi del campione al tempo $t = 0$.

Il valore della costante di disintegrazione λ determina *in modo univoco* la natura del campione radioattivo (radio, uranio, ecc.), nel senso che il suo valore è diverso per ciascun nuclide radioattivo. I radioelementi conosciuti hanno dei valori di λ che vanno da $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ (per ThC') a $1.58 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ (per Th), con un range, quindi, di 10^{24} s^{-1} . La determinazione del valore della costante λ può servire a identificare un radioelemento, come un'analisi chimica qualitativa.

Un altro parametro che determina univocamente un campione radioattivo è il **tempo** (o periodo) **di dimezzamento T**: il tempo necessario a far decadere la metà dei nuclidi disponibili. Allora, cominciando, all'istante $t = 0$, con N_0 nuclidi, dopo un tempo $t = T$, si avranno $N_0/2$ nuclidi, dopo un tempo $t = 2T$ si avranno $N_0/4 = N_0/2^2$ nuclidi, dopo un tempo $t = 3T$ si avranno $N_0/8 = N_0/2^3$ nuclidi, e così via, dopo un tempo t qualunque si avranno $N_0/2^{t/T}$ nuclidi. Quindi:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} .$$

È possibile stabilire una relazione tra costante di dimezzamento e tempo di dimezzamento di un campione radioattivo. Infatti si ha:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \Rightarrow \boxed{T = \frac{\ln 2}{\lambda}} ,$$

da cui si deduce facilmente che costante di decadimento e tempo di dimezzamento di un medesimo campione radioattivo sono inversamente proporzionali.

È utile precisare che le leggi del decadimento radioattivo hanno **carattere probabilistico** e non è in alcun modo possibile precisare l'istante in cui un dato nuclide si trasformerà per emissione di una particella: le leggi viste sopra si riferiscono ad un numero estremamente grande di nuclidi, numero per cui è possibile fare delle previsioni statistiche, previsioni che saranno tanto più attendibili quanto più grande è il numero di nuclidi del campione radioattivo in esame.

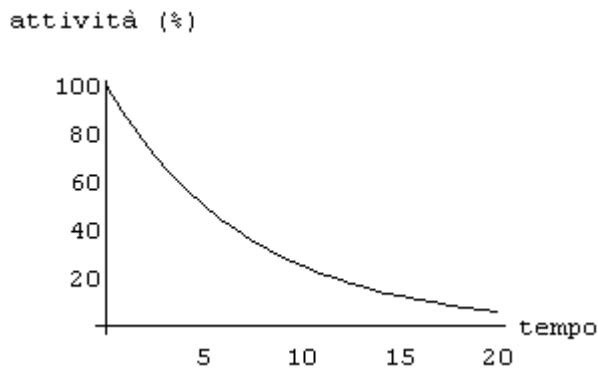
Attività di un campione radioattivo

Si definisce *attività* A di un campione radioattivo il numero di disintegrazioni che il campione subisce in un secondo. Risulta:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} ,$$

avendo definito con $A_0 = \lambda N_0$ l'attività del campione al tempo $t = 0$.

L'unità di misura dell'attività è un *becquerel* (Bq) che corrisponde ad una disintegrazione al secondo, anche se è ancora in uso l'unità *curie* (Ci) che corrisponde a 3.7×10^{10} disintegrazioni/s.



A lato é rappresentata graficamente l'attività (in percentuale rispetto al valore iniziale) di un campione radioattivo in funzione del tempo. Le unità del tempo sono arbitrarie, in quanto tutti i campioni hanno lo stesso comportamento (nella figura, 5 unità di tempo rappresentano il tempo di dimezzamento del campione).

Datazione

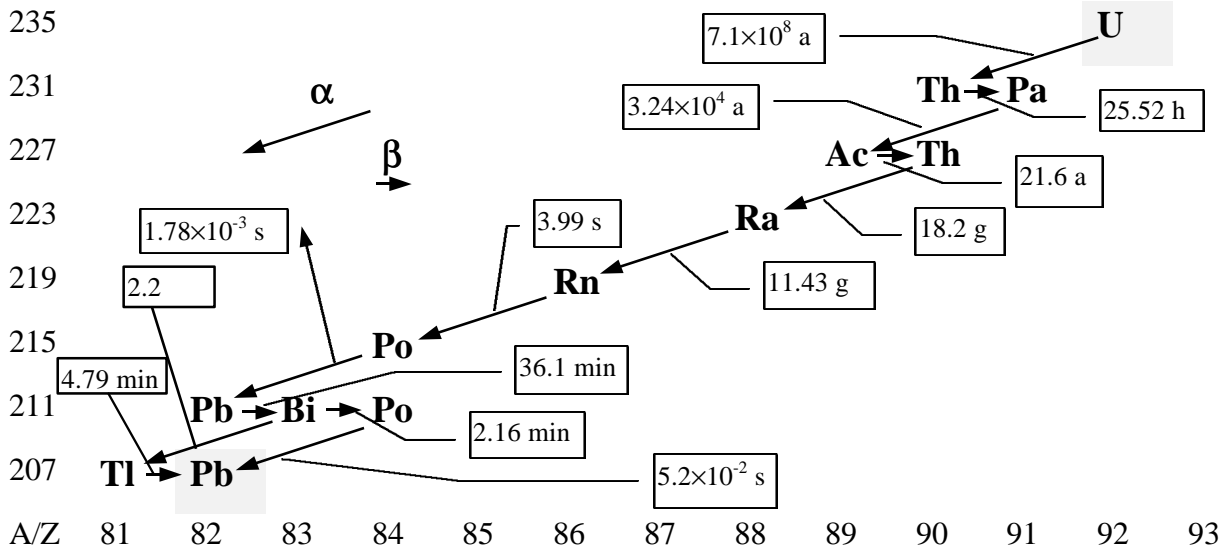
La radioattività consente di datare oggetti o eventi riguardanti la fisica, la geologia, l'archeologia, la paleontologia o altro. La scala dei tempi degli oggetti o degli eventi da datare determina il metodo di datazione da usare. Per esempio, volendo assegnare un'età alla terra, basta studiare l'attività di certi minerali radioattivi: l'età del più vecchio minerale individuato sarà l'età della Terra (circa 5 miliardi di anni). In archeologia é utile il metodo del carbonio 14, che consente di datare oggetti la cui età arriva fino a circa 35.000 anni. A causa del bombardamento da parte dei raggi cosmici, gli organismi viventi sviluppano il carbonio 14, radioattivo, ed il rapporto tra il numero dei nuclei di carbonio 12 e quello del carbonio 14 si mantiene costante. Quando l'organismo muore, il carbonio 14 non si sviluppa più ed il rapporto di cui sopra cambia (aumenta) nel tempo. Conoscendo il tempo di dimezzamento del carbonio 14 (5730 anni) e misurando il rapporto tra i due isotopi del carbonio ancora presenti in ciò che resta direttamente nell'organismo o in un manufatto realizzato a partire da esso, si può risalire all'età dell'organismo o del manufatto.

Serie radioattive

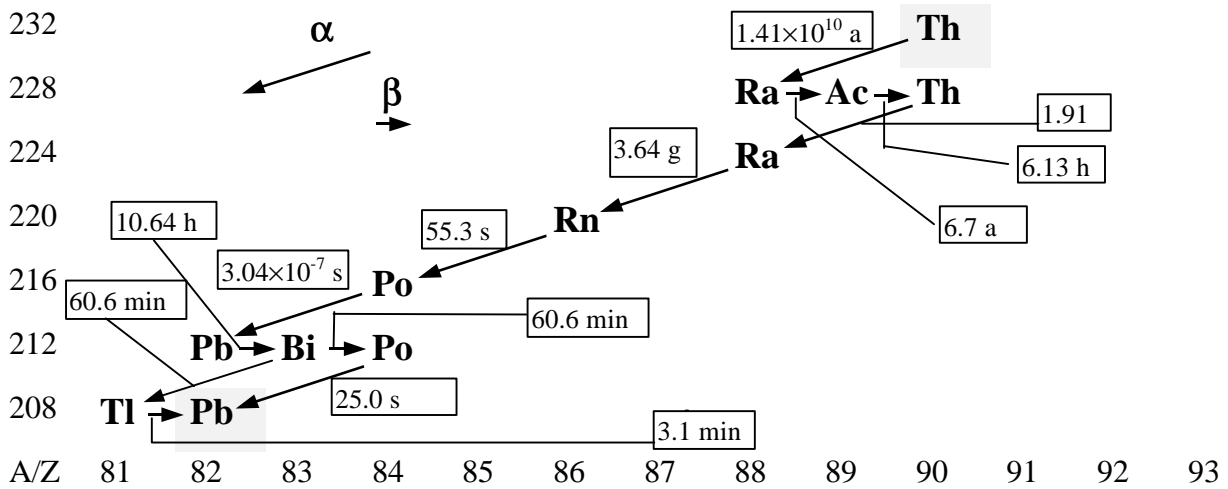
Dal momento che un decadimento α provoca una diminuzione di quattro unità di massa, mentre un decadimento β^- lascia invariato il numero di massa, esistono quattro famiglie o serie radioattive, quelle il cui numero di massa si può esprimere come $4n$ (Serie del torio, il cui elemento avente T massimo ha $T = 1.41 \times 10^{10}$ anni), $4n+1$ (Serie del nettunio, il cui elemento avente T massimo ha $T = 2.14 \times 10^6$ anni), $4n+2$ (Serie dell'uranio, il cui elemento avente T massimo ha $T = 4.51 \times 10^9$ anni), $4n+3$ (Serie dell'attinio, il cui elemento avente T massimo ha $T = 7.10 \times 10^8$ anni), dove n é un numero naturale e dove il nome indicato é quello del capostipite o testa di serie. La serie del nettunio non é più presente in natura, essendo il suo tempo di dimezzamento di gran lungo inferiore all'età media dell'universo. Alla fine della catena di decadimenti di ciascuna serie si trovano nuclidi stabili: il piombo 208 per la serie $4n$, il piombo 206 per la serie $4n+2$, il piombo 207 per la serie $4n+3$, il bi-smuto 209 per la serie $4n+1$.

Seguono le quattro serie radioattive, con tutti gli schemi di decadimento ed i tempi di dimezzamento corrispondenti (se da un nuclide sono possibili due percorsi diversi, uno per decadimento α e uno per decadimento β^- , questi due decadimenti hanno probabilità diverse di verificarsi):

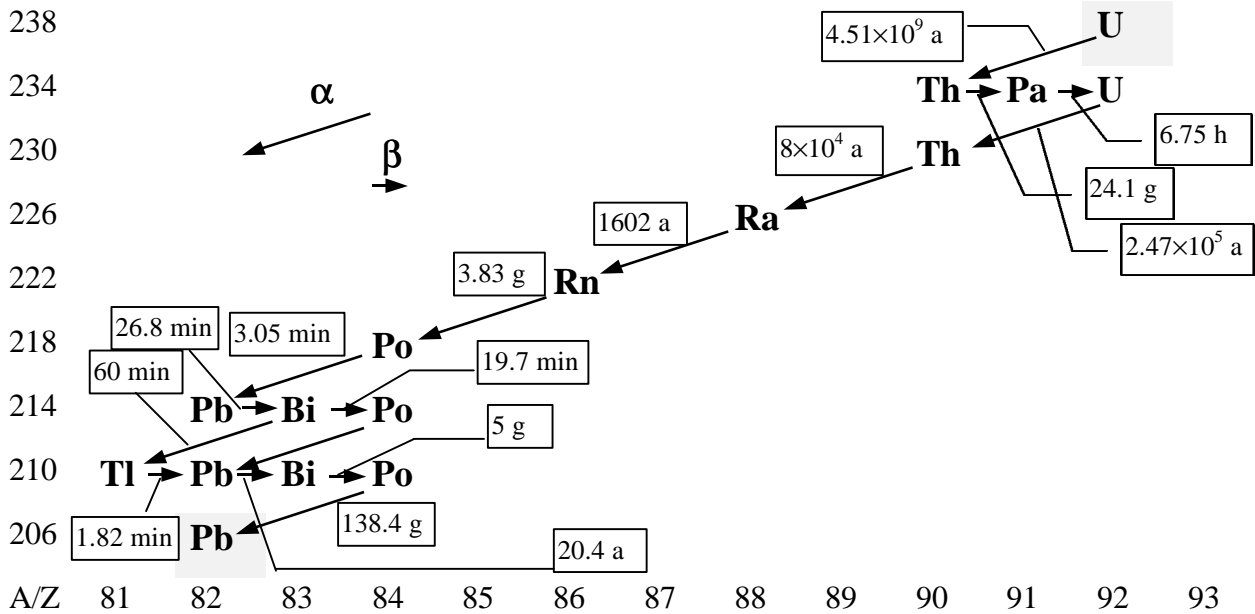
Famiglia o serie dell'Attinio ($A = 4n+2$)



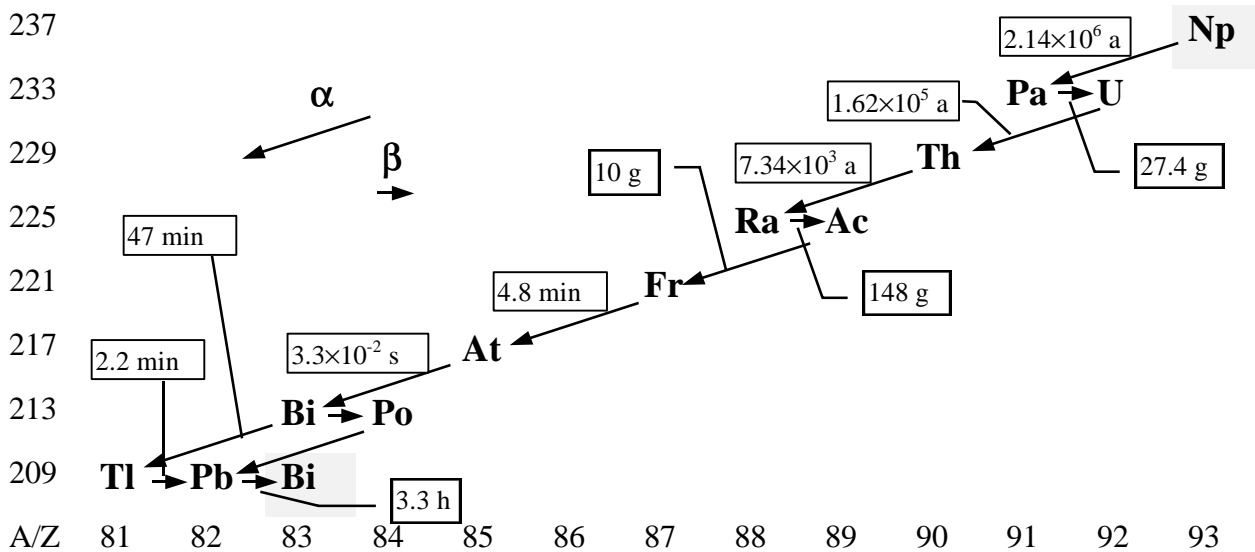
Famiglia o serie del Torio ($A = 4n$)



Famiglia dell'Uranio ($A = 4n+2$)



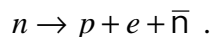
Famiglia o serie del Nettunio (artificiale) ($A = 4n+1$)



Il neutrino

Il *neutrino* é una particella prevista a teoricamente nel 193 dal fisico tedesco W. Pauli per giustificare, nel decadimento β^- , la conservazione dell'energia. Studi ulteriori hanno anche mostrato che il neutrino é necessario per la conservazione della quantità di moto e dello spin (parametro che in pratica indica il verso di rotazione della particella attorno al proprio asse). Questa particella, il cui nome, nella lingua italiana, sta ad indicare un piccolo neutrone, é elettricamente neutra, di massa praticamente nulla, ma con energia cinetica e quantità di moto. Il suo nome pare sia dovuto al fisico italiano E. Fermi, che, nel 1934, ne ha studiato le proprietà in un articolo dal titolo apparentemente modesto (*Tentativo di interpretazione del decadimento β^-*), ma che gli valse il premio Nobel nel 1938 (e la possibilità di fuggire

negli Stati Uniti d'America). In effetti, in ogni decadimento β^- , avviene la trasformazione del neutrone in protone più elettrone più antineutrino elettronico, secondo lo schema seguente:



L'antineutrino è l'antiparticella del neutrino e si distingue da quest'ultimo solo per il segno dello *spin*.

Il neutrino è stato rivelato sperimentalmente solo nel 1956 ed esiste (con le rispettive antiparticelle) sia associato all'elettrone che associato al muone. I neutrini sono particelle stabili e sono creati e distrutti durante il decadimento radioattivo di particelle che coinvolgono l'interazione debole.

Oggi il neutrino è molto studiato in fisica, essendo una particella così sfuggente: ci sono dei neutrini di origine cosmica che viaggiano praticamente alla velocità della luce ed hanno una probabilità abbastanza grande di attraversare tutta la Terra senza interagire con questa, cioè senza essere frenati ed assorbiti (è stata calcolata la distanza media tra due collisioni successive del neutrino con un materiale avente densità normale: questa distanza è dell'ordine di 10^{17} km, contro 1.3×10^4 km del diametro terrestre!). Esiste addirittura una branca della fisica dedicata esclusivamente allo studio del neutrino (la *Fisica del neutrino*): vengono fatti investimenti enormi per studiarne le proprietà sotto montagne (Italia, USA) o in enormi vasche piene d'acqua (Giappone).

4 Reazioni nucleari. Radioattività artificiale. Elementi transuranici

Una reazione nucleare è la trasformazione di un determinato nuclide (padre) in un altro (figlio). Questa trasformazione può essere:

- *spontanea* (come nel caso della radioattività naturale),
- *stimolata* (mediante bombardamento del nucleo padre o bersaglio con opportune particelle: neutrone, protone, deutone, elio, o altro).

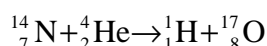
Schematicamente una reazione nucleare si può rappresentare così:



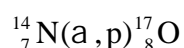
o, in forma compatta:



Ad esempio la reazione nucleare:

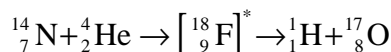


si rappresenta schematicamente con il simbolo:

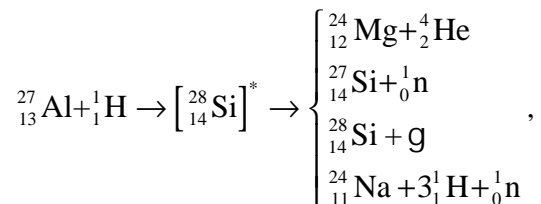


Inoltre, una reazione nucleare può avvenire sia direttamente, sia attraverso la formazione di un nucleo eccitato instabile che si trasforma nei prodotti finali (si parla, in tal caso, di **radioattività**

artificiale). Ad esempio, la reazione precedente avviene con la formazione temporanea di un nucleo di fluoro eccitato instabile:



Infine, in una reazione nucleare, a partire dagli stessi 'reagenti', sono possibili diversi risultati finali, come nell'esempio seguente:

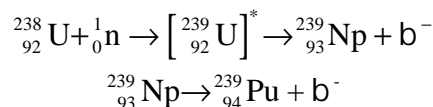


tutto dipende anche dall'energia dei 'reagenti' e quindi da come risulta 'eccitato' il nuclide intermedio di silicio.

Una reazione nucleare (che deve in ogni caso rispettare il principio di conservazione della quantità di moto) se libera energia si dice *esotermica*, se assorbe energia si dice *endotermica*.

Z	Simbolo	Nome
93	Np	nettunio
94	Pu	plutonio
95	Am	americio
96	Cm	curio
97	Bk	berkelio
98	Cf	californio
99	Es	einsteinio
100	Fm	fermio
101	Md	mendelevio
102	No	nobelio
103	Lr	laurenzio
104	Ku	kurchatovio
105	Ha	habnio

Mediante le reazioni nucleari stimolate è possibile sintetizzare degli elementi artificiali, il cui numero atomico è maggiore di 92 (uranio), maggiore cioè del massimo numero atomico esistente in natura. Si parla allora di **elementi transuranici**, per cui esiste anche un laboratorio europeo a Karlsruhe. Si comincia con l'uranio 238 e, mediante cattura di neutroni, cattura elettronica o radioattività β^- , si ottengono artificialmente elementi con $Z > 92$. Ad esempio, i primi due elementi transuranici si ottengono con le reazioni:



Caratteristica comune degli elementi transuranici è che sono *sempre radioattivi* (ciò spiega perché non si trovano in natura), a volte tossici e, quasi sempre, con tempi di dimezzamento molto piccoli. La tavola di sopra mostra i primi 13 elementi transuranici conosciuti (l'elenco, di anno in anno, diventa sempre più lungo).

5 Difetto di massa ed energia di legame. Fissione e fusione

Difetto di massa

Se si considera un dato atomo con la sua massa atomica riportata dalle tabelle chimiche e si confronta questa massa con la somma delle masse di tutti i componenti dell'atomo stesso, si trova che c'è una massa mancante, come risulta dall'esempio seguente (riferito all' ${}^4_2\text{He}$):

massa atomica ${}^4_2\text{He}$:	4.002603 u
- massa 2 protoni:	2.014554 u
- massa 2 neutroni:	2.017330 u
- massa 2 elettroni:	0.001096 u
differenza:	-0.030377 u equivalente a $0.030377 \times 931.5 \text{ MeV} = 28.296 \text{ MeV}$

La differenza $\Delta m = 0.030377\text{u}$ si chiama anche **difetto di massa**.

Energia di legame L'energia $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 28.296 \text{ MeV}$ si chiama anche **energia di legame**, e rappresenta l'energia che bisogna fornire al nucleo di elio per scinderlo nei suoi nucleoni componenti.

Energia di legame per nucleone Dal punto di vista fisico è significativo considerare l'**energia di legame per nucleone** di un determinato nuclide, che, nel caso dell'elio considerato prima, è uguale all'energia di legame divisa per 4, cioè per il numero di nucleoni dell'elio 4. Si ha: $\Delta E/A = 28.296 \text{ MeV}/4 = 7.074 \text{ MeV}$ per nucleone.

E' possibile generalizzare quanto visto nel caso dell'elio 4 per un nuclide ${}^A_Z X$ qualunque. Si ha:

Difetto di massa $\Delta m = M_H Z + M_n(A-Z) - M_X$

Energia di legame Differenza tra la massa complessiva dei componenti separati di un atomo e la massa dell'atomo stesso.

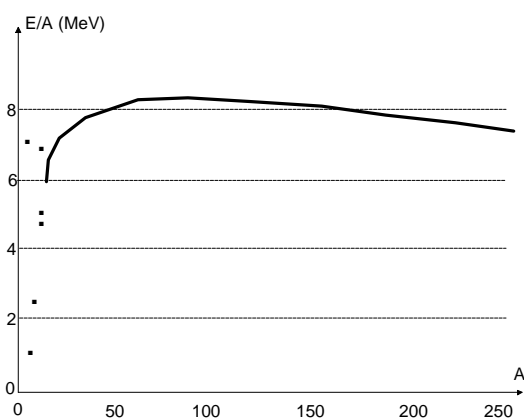
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = [M_H Z + M_n(A-Z) - M_X] c^2$$

Energia di legame per nucleone Energia che bisogna fornire all'atomo per separarlo nei suoi componenti. Questa energia viene liberata al momento della formazione dell'atomo stesso.

$$\Delta E/A = [M_H Z + M_n(A-Z) - M_X] c^2/A$$

Come sopra, ma riferito ad un singolo nucleone.

Nelle formule di sopra, M_H indica la massa dell'atomo d'idrogeno (e così si conta contemporaneamente la massa di un protone e la massa di un elettrone), M_n indica la massa del neutrone e M_X indica la massa dell'atomo X.



Si è calcolata l'energia di legame per nucleone per tutti i nuclidi stabili conosciuti, trovando che questa è circa 8 MeV/nucleone per quasi tutti i nuclidi medi e pesanti. Il massimo della curva si estende approssimativamente da $A = 50$ ad $A = 90$. Il valore massimo assoluto della energia di legame per nucleone è di circa 8.75 MeV per nucleone e corrisponde al ${}^{63}_{29} Cu$. Al contrario, per l' ${}^{235}_{92} U$ l'energia corrispondente è di 7.61 MeV per nucleone. Questo significa che è più difficile rompere un nucleo di rame che non uno di uranio, nonostante che, manifestamente, per l'uranio l'energia *totale* di legame sia maggiore della corrispondente energia *totale* di legame del

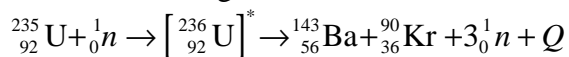
rame. Le due zone che hanno una energia di legame per nucleone inferiore a 8 MeV sono utili per la produzione di energia nucleare, mediante i processi conosciuti sotto il nome di fissione nucleare e di fusione nucleare.

Nei processi di fissione, che si produce per nuclei molto pesanti, un nucleo assorbe un neutrone, diventa instabile, e si divide in due nuclei più leggeri (di massa quasi uguale) liberando energia. Nei processi di fusione, che si produce per nuclei molto leggeri, due nuclei si combinano (si fondono) insieme, formando un nucleo più pesante e liberando energia.

Fissione Energia da fissione si può ottenere bombardando l'uranio 235 con neutroni lenti.

L'uranio si spacca in due nuclei di massa quasi uguale e libera, in media, 2,5 neutroni per fissione. Questi neutroni, a loro volta provocano la fissione di altri nuclei di uranio e si innesca, così, un processo di reazioni a catena.

Una reazione tipica di fissione è la seguente:



In realtà, i due nuclidi figli ottenuti sono instabili: il primo, dopo quattro decadimenti β^- si trasforma in ${}_{60}^{143}\text{Nd}$, stabile; il secondo, dopo quattro decadimenti β^- si trasforma in ${}_{40}^{90}\text{Zr}$, stabile.

Durante ogni reazione di fissione si liberano circa 200 MeV di energia.

In effetti, per la reazione di fissione precedente, si ha:

$$\Delta E = (m_{\text{U}} - m_{\text{Ba}} - m_{\text{Kr}} - 2m_n)c^2 \Rightarrow$$

$$\Delta E = (235,043944 - 142,92054 - 89,91961 - 2 \times 1,008665)931,5 \text{ MeV} \cong 173,7 \text{ MeV}$$

Per altre reazioni di fissione, l'ordine di grandezza delle energie liberate è sempre lo stesso.

Nella *bomba atomica*, il numero di neutroni che producono altre fissioni è maggiore di uno: in questo modo il processo si autoalimenta rapidamente producendo una esplosione.

In un *reattore nucleare*, questo numero viene mantenuto rigorosamente uguale ad uno con opportuni moderatori, in modo che il processo di produzione di energia si autosostiene e produce energia ad un tasso costante nel tempo.

I reattori nucleari (che possono essere di potenza, cioè per produrre energia con potenze dell'ordine di 1000 MW, o di ricerca), sono costituiti essenzialmente di tre elementi:

- il *combustibile* (generalmente uranio o plutonio), raccolto in barrette ed, a volte, arricchito per aumentare la frequenza delle reazioni di fissione
- il *moderatore* (grafite, berillio o acqua pesante), che serve a rallentare i neutroni e a portarli ad un'energia utile a produrre reazioni di fissione
- il *sistema di raffreddamento* che estrae l'energia termica prodotta.

I reattori autofertilizzanti o breeder sono quei reattori che riescono a produrre più atomi fissionabili di quelli che consumano, in quanto i neutroni in eccesso vengono usati per trasformare atomi non fissionabili in atomi fissionabili.

Fusione

Processi di fusione nucleare avvengono in continuazione nel Sole e nelle altre stelle. Qui il combustibile è il deuterio, disponibile anche sulla Terra in gran quantità. Solo che una reazione di fusione (detta anche *reazione termonucleare*), per essere innescata, ha bisogno di temperature elevatissime, dell'ordine di milioni di gradi centigradi.

Dal punto di vista tecnico, è veramente problematico riuscire a confinare il plasma di fusione, a temperature così elevate. Esistono dei progetti di ricerca, europei e non, destinati a studiare le modalità di contenimento (in genere confinamento in opportuni campi magnetici) del plasma, progetti che però hanno bisogno ancora di diversi anni prima che, forse, un giorno potranno fornire dei risultati utili.

Per contro, nella *bomba ad idrogeno*, le temperature molto elevate per l'innescare della reazione di fusione vengono fornite dall'esplosione di una piccola bomba a fissio-

ne.

Per l'energia solare sono stati immaginati due cicli che giustificano non solo la quantità di energia prodotta, ma anche la sua durata (praticamente costante da circa 4 miliardi di anni):

Ciclo protone-protone (Bethe-Weiszacher,1938)		
Reazione	Energia (MeV)	Tempo medio
${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + n$	0.41	7×10^9 anni
${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + g$	5.51	4 sec
${}^{32}_{21}\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2{}^1_1\text{H} + g$	12.98	4×10^5 anni

In questo ciclo, si liberano complessivamente circa 26 MeV (tenendo presente che le prime due reazioni devono avvenire due volte perché la terza possa aver luogo.

Ciclo del carbonio (Bethe, 1939)		
Reazione	Energia (MeV)	Tempo medio
${}^{12}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + g$	1.93	10^6 anni
${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + n + g$	1.20	10 min
${}^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + g$	7.60	2×10^5 anni
${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + g$	7.39	$< 3 \times 10^7$ anni
${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + n + g$	1.71	2 min
${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	4.99	10^4 anni

L'effetto complessivo del ciclo del carbonio è combinare quattro protoni per produrre un nucleo di elio, raggi γ , due neutrini, due positroni che scompaiono per annichilazione con due elettroni, e circa 26 MeV di energia termica, compresa l'energia dei neutrini. Il carbonio di partenza lo si ritrova alla fine del ciclo, il che significa che serve solo da catalizzatore.

6 Classificazione delle particelle elementari e delle loro interazioni

Nei laboratori di alta energia (dove si fa la Big Physics) e nei raggi cosmici sono state scoperte tantissime particelle elementari (circa 400), la cui classificazione in un quadro teorico soddisfacente lascia ancora molto a desiderare. Tuttavia di queste particelle è stata fatta una suddivisione in grandi famiglie:

- i **barioni** (nucleoni, iperoni Λ , Σ , Θ , Ω , certe risonanze, particelle di vita media estremamente ridotta - 10^{-24} secondi) e i corrispondenti antibarioni
- i **mesoni** (mesoni π o pioni, mesoni K o kaoni, mesoni μ , certe risonanze) e i corrispondenti antimmesoni
- i **leptoni** (elettrone, neutrino - elettronico e muonico, muone μ) e i corrispondenti antileptoni
- i **fotoni**

Una caratteristica di ogni particella elementare è quella di possedere la corrispondente antiparticella (il fisico inglese Dirac è stato il primo a fare uno studio teorico della cosiddetta *antimateria* nella sua

meccanica quantistica relativistica): se la particella considerata é carica, l'antiparticella ha segno opposto a quello della particella stessa; se la particella ha carica zero, l'antiparticella può differire dalla particella data ad esempio per il verso di rotazione attorno al proprio asse (*spin*), oppure può coincidere con la particella stessa, come è il caso del fotone e del mesone π^0 .

Anche le interazioni di queste particelle si prestano ad una classificazione. Si hanno 4 tipi di interazione (in ordine decrescente d'intensità, riferita rispetto ad una stessa scala arbitraria):

- l'**interazione nucleare o forte**, a cortissimo raggio d'azione, responsabile della forza che tiene assieme protoni e neutroni, in generale responsabile delle interazioni tra barioni e mesoni (intensità: 1)
- l'**interazione elettromagnetica**, con raggio d'azione infinito, responsabile delle interazioni elettriche e/o magnetiche tra particelle cariche distanti o, in generale, tra leptoni, fatta eccezione per il neutrino (intensità: 10^{-3})
- l'**interazione debole**, o accoppiamento di Fermi, a cortissimo raggio d'azione, responsabile ad esempio del decadimento β (studiato appunto da E. Fermi) ed in generale delle interazioni che interessano il neutrino (intensità: 10^{-14})
- l'**interazione gravitazionale**, con raggio d'azione infinito, responsabile dell'attrazione gravitazionale di tutti i corpi provvisti di massa (intensità: 10^{-40}).

Lo studio delle particelle elementari é estremamente (troppo!) complesso e, per giustificarne alcune proprietà osservate si inventano ogni giorno (in un mare di matematica alquanto difficile, spesso inventata ad hoc) principi di conservazione, a volte validi, a volte no (non si capisce bene perché, l'importante é che tornino i conti), oltre a numeri quantici sempre nuovi e 'strani' (uno di questi é appunto la *stranezza*, senza dimenticare il *colore*, lo *charm*,...). Per fortuna, almeno finora, i fisici sono riusciti a mantenere la *validità, per tutti i tipi di interazione, delle leggi di conservazione dell'energia, della quantità di moto, del momento della quantità di moto*, principi che conservano, allora, un carattere universale.

7 Problemi risolti

Problema 1 A partire dalla relazione che fornisce il raggio di un nucleo atomico: calcolare il raggio, la densità (massa per unità di volume) e la carica elettrica per unità di volume di un nucleo di:

- ${}^4_2\text{He}$ (particella α);
- ${}^{12}_6\text{C}$;
- ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Soluzione:

a) Per l'elio 4 si ha: $r = 1,4 \times 10^{-15} \sqrt[3]{4} \text{ m} \cong 2,2 \times 10^{-15} \text{ m} = 2,2 \text{ fm}$.

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \cong \frac{4 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}{\frac{4}{3} \pi (2,2 \times 10^{-15})^3} \text{ kg / m}^3 \cong 1,5 \times 10^{17} \text{ kg / m}^3.$$

$$\text{densità di carica} = \frac{\text{carica}}{\text{volume}} = \frac{2 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}}{\frac{4}{3} \pi (2,2 \times 10^{-15})^3} \text{ C / m}^3 \cong 7,2 \times 10^{24} \text{ C / m}^3$$

b) Per il carbonio 12 si ha: $r = 1,4 \times 10^{-15} \sqrt[3]{12} \text{ m} \cong 3,2 \times 10^{-15} \text{ m} = 3,2 \text{ fm}$.

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \cong \frac{12 \times 1,67 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\rho(3,2 \times 10^{-15})^3} \text{ kg / m}^3 \cong 1,46 \times 10^{17} \text{ kg / m}^3.$$

$$\text{densità di carica} = \frac{\text{carica}}{\text{volume}} = \frac{6 \times 1,60 \times 10^{-19}}{\frac{4}{3}\rho(3,2 \times 10^{-15})^3} \text{ C / m}^3 \cong 7,0 \times 10^{24} \text{ C / m}^3$$

c) Per l'uranio 238 si ha: $r = 1,7 \times 10^{-15} \sqrt[3]{238} \text{ m} \cong 10,54 \times 10^{-15} \text{ m} = 10,54 \text{ fm}.$

$$\text{densità} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \cong \frac{238 \times 1,67 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\rho(10,54 \times 10^{-15})^3} \text{ kg / m}^3 \cong 0,8 \times 10^{17} \text{ kg / m}^3.$$

$$\text{densità di carica} = \frac{\text{carica}}{\text{volume}} = \frac{92 \times 1,60 \times 10^{-19}}{\frac{4}{3}\rho(10,54 \times 10^{-15})^3} \text{ C / m}^3 \cong 3,0 \times 10^{24} \text{ C / m}^3.$$

Problema 2 Un campione archeologico viene datato con il metodo del carbonio 14 (radioattivo). Sapendo che l'attività del campione è uguale al 32% dell'attività di un analogo organismo vivente e che il tempo di dimezzamento T del carbonio 14 è uguale a 5730 anni, calcolare l'età del campione archeologico.

Soluzione: Essendo $A = 0,32A_0$, si ha:

$$0,32A_0 = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln 0,32 = -\lambda t \Rightarrow t = -\frac{\ln(0,32)}{\lambda} = -\frac{\ln(0,32)}{\ln 2} T.$$

$$\text{E, numericamente: } t = -\frac{\ln(0,32)}{\ln 2} 5730 \text{ anni} \cong 9419 \text{ anni}.$$

Problema 3 Un campione di una roccia contiene contemporaneamente ${}^{238}_{92}\text{U}$ (capofila della famiglia radioattiva dell'uranio) e ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, stabile. Il rapporto tra il numero di atomi di piombo ed il numero di atomi di uranio presenti nel campione è uguale a 0,6. Sapendo che il tempo di dimezzamento dell'uranio è uguale a $4,51 \times 10^9$ anni, calcolare l'età del campione di roccia (supporre che ogni atomo di piombo provenga dalla disintegrazione di un atomo di uranio).

Soluzione: Per le condizioni del problema, se N_U e N_{Pb} rappresentano rispettivamente il numero degli atomi di uranio e quello degli atomi di piombo al tempo t della misura, allora $N_U + N_{Pb}$ rappresenta il numero di atomi di uranio presenti al momento della formazione del campione di roccia.

Dunque, indicando con T il tempo di dimezzamento dell'uranio 238, si ha successivamente:

$$N_U = (N_U + N_{Pb}) e^{-\frac{\ln 2}{T} t} \Rightarrow \frac{N_U + N_{Pb}}{N_U} = e^{\frac{\ln 2}{T} t} \Rightarrow 1 + \frac{N_{Pb}}{N_U} = e^{\frac{\ln 2}{T} t} \Rightarrow$$

$$1 + 0,6 = e^{\frac{\ln 2}{T} t} \Rightarrow t = \frac{\ln 1,6}{\ln 2} T.$$

$$\text{E, numericamente: } t = \frac{\ln 1,6}{\ln 2} 4,51 \times 10^9 \text{ anni} \cong 3,06 \times 10^9 \text{ anni}.$$

Problema 4 a. Un nucleo di berillio ${}^7_4\text{Be}$ cattura un elettrone e dà un nucleo di litio ${}^A_Z\text{Li}$ e un neutrino ${}^0_0\bar{\nu}$.

(Bac 94 - Problema 6)

i) Determinare A e Z .

ii) Mostrare che l'energia liberata nel corso della reazione è $E = 0,862 \text{ MeV}$

(supponendo che la massa del neutrino sia trascurabile).

- iii)** Nella reazione nucleare sopra considerata il 7,10 % della energia liberata viene acquistata dal nucleo di litio. Calcolare il valore del modulo v della velocità di questo nucleo. Si considerino trascurabili le energie cinetiche del nucleo di berillio e dell'elettrone catturato.
- b.** Un campione contiene, ad un istante dato, una massa $m_0 = 2,50 \times 10^{-6}$ kg di berillio radioattivo, di periodo (tempo di dimezzamento) $T = 53,6$ giorni. Calcolare il valore della massa m di berillio contenuta nel campione dopo un anno.
- c.** Praticamente metà dell'energia totale E_T prodotta dal Sole deriva da una serie di reazioni nelle quali si forma del berillio ${}^7_4\text{Be}$ a partire dalla fusione dei nuclei di elio ${}^3_2\text{He}$ e ${}^4_2\text{He}$. Solo il 3,20% di questa energia $\left(\frac{E_T}{2}\right)$ è fornita dalla reazione nucleare considerata in **a**. La potenza totale del Sole è $P = 3,83 \times 10^{26}$ W. Calcolare il numero n di nuclei di berillio che decadono al secondo nel Sole.

Sono dati:

carica elementare	: $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C;
massa del nucleo di berillio ${}^7_4\text{Be}$: $m_{\text{Be}} = 7,0147355$ u;
massa dell'elettrone	: $m_e = 0,0005486$ u;
massa del nucleo di litio ${}^7_3\text{Li}$: $m_{\text{Li}} = 7,0143590$ u;
velocità (celerità) della luce	: $c = 3,00 \times 10^8$ m.s ⁻¹ ;
	$1\text{u} = 931,5$ MeV/c ² = $1,66 \times 10^{-27}$ kg;
	1 anno = 365,25 giorni.

Soluzione:

a. i) La reazione di cattura elettronica si scrive: ${}^7_4\text{Be} + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^0_0\nu$.
Per la conservazione del numero di massa, deve essere $A = 7$.
Per la conservazione della carica elettrica, deve essere $Z = 4 - 1 = 3$.
Dunque si tratta del nuclide ${}^7_3\text{Li}$.

ii) L'energia liberata durante la reazione nucleare è data da:

$$\Delta E = E_{\text{Be}} + E_e - E_{\text{Li}} \text{ e, quindi:}$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= [7,0147355 + 0,0005486 - 7,0143590]uc^2 = \\ &= 0,0009251 \times 931,5 \text{ MeV} = \\ &\cong 0,862 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

iii) Il modulo v della velocità del nucleo di litio (la cui energia cinetica indichiamo con E_c) è uguale a:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_{\text{Li}}}};$$

$$\text{numericamente: } v = \sqrt{\frac{2 \times 9,789 \times 10^{-15}}{7,014359 \times 1,66 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \cong 1,30 \times 10^6 \text{ m/s}.$$

b. La massa M del berillio decresce in funzione del tempo t secondo la legge $m = m_0 e^{-\lambda t}$. La costante di disintegrazione radioattiva è legata al tempo di

dimezzamento T dalla relazione $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$, per cui si può anche scrivere:

$$m = m_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

Allora, dopo un anno ($t = 365,25$ giorni) si ha:

$$m = 2,5 \times 10^{-6} \times e^{-\frac{\ln 2}{53,6} 365,25} \text{ kg} \cong 2,22 \times 10^{-8} \text{ kg}.$$

- c. Le reazioni di cattura elettronica del berillio sul Sole hanno una potenza $P = 0,032 \times 0,5 \times 3,83 \times 10^{26} / (1,60 \times 10^{-19}) \text{ eV/s} \cong 3,83 \times 10^{43} \text{ eV/s}$.
Dunque il numero n di queste reazioni al secondo è uguale a:

$$n = \frac{P}{\Delta E} = \frac{3,83 \times 10^{43}}{0,862 \times 10^6} \cong 4,44 \times 10^{37}.$$

Problema 5
(Bac 89 -
Problema 6)

In una serie di esperimenti proposti dal fisico E. Rutherford, una sottile laminetta metallica veniva bombardata mediante particelle α ; di queste particelle, alcune risultavano deviate dalla laminetta metallica in diverse direzioni. Per interpretare l'insieme dei risultati sperimentali, Rutherford formulò l'ipotesi che la deviazione della singola particella α dovesse essere attribuita al campo elettrico di un'altra particella, il nucleo di uno degli atomi bersaglio, e che questo nucleo fosse da considerare sferico e carico positivamente. Per trovare un ordine di grandezza del raggio di questo nucleo, egli poté limitarsi a considerare particelle α la cui velocità avesse direzione passante per il centro del nucleo, immaginato in quiete (come in figura).



Siano:

- q , la carica della particella α ;
- Q , la carica del nucleo bersaglio;
- m , la massa della particella α ;
- v_0 , la velocità iniziale della particella α .

- a) Considerando una di queste particelle α (velocità diretta verso il centro del nucleo) come sottoposta alla sola azione del campo elettrico del nucleo bersaglio, mostrare che la distanza minima dal nucleo alla quale la particella α può arrivare è:

$$d = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qQ}{\left(\frac{1}{2}mv_0^2\right)}, \text{ dove } \epsilon_0 \text{ è la costante dielettrica del vuoto.}$$

- b) Se la sorgente radioattiva è il polonio ${}^{218}_{84}\text{Po}$ (tempo di dimezzamento $T = 3,00$ min), e le particelle α sono le sole particelle emesse, ciascuna di queste possiede un'energia cinetica $E = 6,00 \text{ MeV}$.
- i) Scrivere la reazione di disintegrazione del polonio 218.
 - ii) Calcolare l'energia totale E' liberata nella reazione nucleare.
 - iii) Calcolare il tempo t necessario per la disintegrazione del 90% della sorgente radioattiva del polonio.
 - iiii) Nel caso in cui il bersaglio metallico sia costituito da nichel ${}^{58}_{28}\text{Ni}$, calcolare d .

Si dà:

unità di massa atomica	: 1 u = 931,5 MeV·c ⁻² ;
carica elementare	: e = 1,60×10 ⁻¹⁹ C;
$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	= 8,99×10 ⁹ N·m ² ·c ⁻² ;
massa atomica del polonio 218	: 218,009007 u
massa atomica del piombo 214	: 213,999842 u
massa atomica dell'elio 4	: 4,002603 u.

Soluzione:

- a) Quando la particella α si trova ad una distanza appastanza grande dal nucleo bersaglio, rispetto a questo ha una energia potenziale elettrostatica praticamente nulla ma energia cinetica definita dalla sua velocità iniziale: $\frac{1}{2}mv_0^2$. Quando la particella si avvicina alla minima distanza possibile d dal nucleo bersaglio, tutta la sua energia cinetica si trasforma in energia potenziale elettrostatica:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{d} \Rightarrow d = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{\frac{1}{2}mv_0^2}.$$

- b) i) ${}^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{214}_{82}\text{Pb} + E'$, dove E' é l'energia liberata durante la reazione (ad esempio sotto forma di energia cinetica del nucleo di piombo e della particella α).

ii) $E' = \Delta m \cdot c^2 = [218,009007 - (213,999842 + 4,002603)]u/c^2 = 0,006562 \times 931,5 \text{ MeV} \cong 6,11 \text{ MeV}.$

L'energia trovata è leggermente superiore all'energia cinetica della particella α ($E = 6,00 \text{ MeV}$). In effetti, la differenza $E' - E = 0,11 \text{ MeV}$ si ritrova sotto forma di energia cinetica del nucleo di piombo, come il calcolo seguente mostra:

La conservazione della quantità di moto richiede che:

$$m_a v_a - m_{\text{Pb}} v_{\text{Pb}} = 0 \Rightarrow \frac{m_{\text{Pb}}}{m_a} = \frac{v_a}{v_{\text{Pb}}} \quad (*)$$

Si suppone che, inizialmente, il nucleo di polonio sia fermo e che la particella α abbia verso opposto di quello del piombo!

Inoltre:

$$\frac{E_{\text{Pb}}}{E'} = \frac{\frac{1}{2}m_{\text{Pb}}v_{\text{Pb}}^2}{\frac{1}{2}m_{\text{Pb}}v_{\text{Pb}}^2 + \frac{1}{2}m_a v_a^2} = \frac{v_{\text{Pb}}^2}{v_{\text{Pb}}^2 + \frac{m_a}{m_{\text{Pb}}}v_a^2} \stackrel{(*)}{=} \frac{v_{\text{Pb}}^2}{v_{\text{Pb}}^2 + \frac{m_a}{m_{\text{Pb}}}\left(\frac{m_{\text{Pb}}}{m_a}\right)^2 v_{\text{Pb}}^2} = \frac{1}{1 + \frac{m_{\text{Pb}}}{m_a}} \cong \frac{1}{1 + \frac{214}{4}} \cong 0,0183 \Rightarrow$$

$$E_{\text{Pb}} = 0,0183 \times E' = 0,0183 \times 6,11 \text{ MeV} \cong 0,11 \text{ MeV}.$$

- iii) Si ha: $0,1 N_0 = N_0 e^{-t} \Rightarrow t = \ln 10 \Rightarrow$

$$t = \frac{\ln 10}{\lambda} = \frac{\ln 10}{\ln 2} T \cong \frac{\ln 10}{\ln 2} 3 \text{ min} \cong 9,97 \text{ min}.$$

- iii) L'energia cinetica di una particella α (in joules) è data da:

$$E = 6,00 \text{ MeV} = 6,00 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 9,6 \times 10^{-13} \text{ J}.$$

Sostituendo nella formula ricavata in a), ove si tenga conto che $q = 2e$ e

$Q = 28 e$, si ha infine:

$$d = 8,99 \times 10^9 \cdot \frac{2 \times 28 \times (1,60 \times 10^{-19})^2}{9,6 \times 10^{-13}} \text{ m} \cong 1,34 \times 10^{-14} \text{ m}.$$

8 Problemi proposti

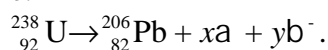
- 1** Alle alte altitudini, l'azoto ${}^{14}_7\text{N}$ si trasforma in carbonio ${}^{14}_6\text{C}$ per bombardamento da neutroni.
- Scrivere l'equazione di questa reazione nucleare.
 - Il nuclide ${}^{14}_6\text{C}$ è radioattivo β^- . Scrivere la reazione di disintegrazione.
 - Il tempo di dimezzamento del carbonio ${}^{14}_6\text{C}$ è 5590 anni. Le piante vive assimilano il carbonio nell'atmosfera. Alla loro morte il processo di assimilazione viene interrotto. Un campione di legno preistorico fornisce 197 disintegrazioni al minuto. Un campione della stessa massa di legno recente fornisce 1350 disintegrazioni al minuto. Qual è l'età del legno preistorico?
- 2** In un campione di ferro irradiato da neutroni si formano degli isotopi ${}^{59}_{26}\text{Fe}$. Questi isotopi sono radioattivi β^- . Sapendo che l'attività iniziale del campione di ferro irradiato è uguale a $10\mu\text{Ci}$ e che il tempo di dimezzamento del ferro radioattivo è uguale a 45,1 ore:
- Scrivere le equazioni delle reazioni nucleari che avvengono durante l'irradiazione del ferro con neutroni e durante la disintegrazione dei nuclei di ferro.
 - Calcolare la costante di disintegrazione del ferro radioattivo.
 - Calcolare l'attività del campione dopo 30 giorni.

Dati:

$$1 \text{ Ci} = 3,70 \cdot 10^{10} \frac{\text{disintegrazioni}}{\text{s}}$$

Estratto tavola periodica degli elementi: ${}_{25}\text{Mn}$ ${}_{26}^{58}\text{Fe}$ ${}_{27}\text{Co}$

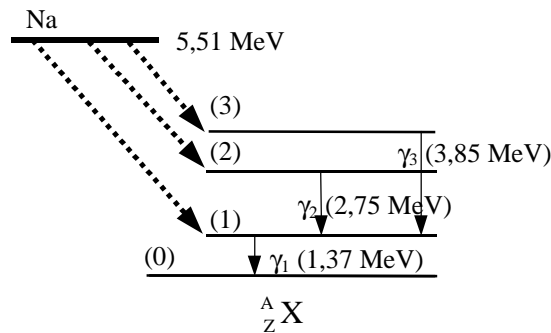
- 3**
- Il nuclide ${}^{14}_6\text{C}$ è radioattivo β^- . Scrivere l'equazione di questa disintegrazione ed individuare il nuclide stabile che si ottiene.
 - Dedurre l'equazione che esprime la dipendenza del numero dei nuclidi radioattivi in funzione del tempo, sapendo che il tempo di dimezzamento del ${}^{14}_6\text{C}$ è di circa 5500 anni.
 - In un determinato istante, un campione di ${}^{14}_6\text{C}$ ha un'attività di $2 \cdot 10^4$ disintegrazioni al secondo.
 - Calcolare la massa del campione.
 - Dopo quanto tempo l'attività del campione si ridurrà a $0,7 \cdot 10^3$ disintegrazioni al s?
- 4** L'uranio 238 è il capofila di una famiglia radioattiva che porta ad un isotopo stabile del piombo 206. Le disintegrazioni successive sono accompagnate da emissioni α o β^- . Il tempo di dimezzamento dei nuclidi intermedi è abbastanza piccolo da poter trascurare la loro presenza nei prodotti di disintegrazione; si può allora riassumere l'insieme delle reazioni di disintegrazione con l'unica reazione:



- Determinare i coefficienti x e y .

- b) Si suppone che all'istante $t = 0$ di formazione del minerale contenente uranio 238 non ci sia alcun nucleo di piombo 206. $N_U(0)$ indica il numero iniziale di nuclei di uranio 238; $N_U(t)$ indica il numero di nuclei di uranio 238 presenti all'istante t ; $N_{pb}(t)$ indica il numero di nuclei di piombo 206 presenti nel minerale considerato all'istante t .
- Sapendo che $N_U(t) = N_U(0) \cdot e^{-\lambda t}$, dove λ è la costante di disintegrazione dell'uranio 238, esprimere il tempo di dimezzamento T dell'uranio 238 in funzione di λ .
 - Esprimere $N_{pb}(t)$ in funzione di λ , t e $N_U(t)$.
 - Esprimere l'età t del minerale in funzione di T e del rapporto $N_{pb}(t)/N_U(t)$.
 - All'istante t , il campione del minerale contiene 1 g di uranio 238 e 10 mg di piombo 206. Calcolare t (età del minerale) sapendo che $T = 4,5 \times 10^9$ anni.

6 Viene rappresentato, nella figura sottostante, lo schema di disintegrazione β^- del sodio ^{24}Na .



(1), (2) e (3) rappresentano tre possibili livelli eccitati del nucleo figlio che, mediante emissione di uno o due radiazioni γ , passa al suo stato fondamentale, non eccitato, (0).

- Qual è il nucleo figlio ^A_ZX ? Calcolare le energie dei diversi livelli eccitati.
- Si ottengono tre radiazioni corrispondenti a tre livelli eccitati di ^A_ZX . Calcolare l'energia cinetica massima degli elettroni emessi in ciascun caso.

7 Si bombarda un nucleo di litio ^7_3Li (massa $m = 7,0144$ u) a riposo con protoni aventi energia cinetica uguale a 600 keV. Si ottengono due particelle α aventi la stessa energia cinetica.

- Scrivere l'equazione della reazione.
- Applicando il principio di conservazione dell'energia, calcolare l'energia cinetica di ciascuna particella α .
- Dire se la reazione è esoenergetica e calcolare l'energia liberata o assorbita.

8 Un neutrone (massa = 1 u) avente energia cinetica uguale a 1,5 MeV e velocità \vec{v} urta un nucleo (numero di massa A), a riposo. Dopo l'urto elastico, le velocità del nucleo e del neutrone hanno la stessa direzione di \vec{v} (urto centrale).

- Applicando le leggi della meccanica classica, scrivere le relazioni che esprimono la conservazione della quantità di moto e dell'energia cinetica.
- Dedurre la velocità \vec{v}' del neutrone dopo l'urto in funzione di A e di \vec{v} .
- Calcolare le velocità del neutrone dopo un urto elastico e centrale contro i nuclidi seguenti:
 - ^9_4Be (massa = 9 u)
 - $^{238}_{92}\text{U}$ (massa = 238 u)
sapendo che $1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

- 9
- Spiegare il significato del termine *difetto di massa* e stabilire la relazione tra difetto di massa ed *energia di legame* di un nucleo.
 - Disegnare un grafico dell'energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa per gli isotopi naturali e mostrare come è possibile fare delle previsioni sulla energia liberata nelle reazioni di fusione e di fissione nucleare.
 - Il Sole ottiene l'energia che irradia da un processo di fusione nucleare. La massa del Sole è 2×10^{30} kg. Il Sole irradia energia con una potenza costante uguale a 4×10^{23} kW. Stimare la vita del Sole in anni se lo 0,7 % della sua massa viene convertita in radiazione durante i processi di fusione e se il Sole perde energia solo irradiando.

È data:

velocità della luce nel vuoto: $c = 3 \times 10^8$ m/s.

- 10 Il polonio ${}^{210}_{84}\text{Po}$, nuclide instabile, subisce una disintegrazione alfa fornendo un nucleo di piombo nel suo stato fondamentale.

- Scrivere l'equazione del bilancio della disintegrazione precisando i numeri di massa e di carica.
- Calcolare, in MeV, l'energia liberata durante la disintegrazione di un nucleo di polonio utilizzando i dati seguenti:

$$\text{Po} \quad m_0 = 209,9369 \text{ u}$$

$$\text{Pb} \quad m_1 = 205,9296 \text{ u}$$

$$\text{He} \quad m_2 = 4,0015 \text{ u}$$

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

- 11 Poco tempo dopo la sua scoperta, il neutrone fu utilizzato per bombardare certi nuclei atomici, per aumentarne la massa atomica. Fermi bombardava l'uranio con neutroni lenti ed era meravigliato di osservare l'emissione di radiazione beta. Questo risultato era di una importanza capitale, perché il numero atomico più grande conosciuto all'epoca era 92. Fermi scriveva: "...si è cercato di identificare chimicamente l'elemento risultante come un isotopo di un elemento molto pesante ...".

- Spiegare perché i protoni sono più difficili da accelerare dei neutroni e perché tuttavia i neutroni si prestano meglio al bombardamento dei nuclei.
- Ci sono essenzialmente due isotopi dell'uranio: ${}^{238}_{92}\text{U}$ e ${}^{235}_{92}\text{U}$. Se ciascuno di questi nuclidi cattura un neutrone, i nuclei ottenuti si disintegrano immediatamente per radioattività β^- . Scrivere le due equazioni nucleari non tenendo conto della conservazione della energia totale. (Queste equazioni spiegano perché Fermi cercava un elemento pesante.)
- In realtà avviene solo la prima di queste reazioni. Invece, se il nucleo di uranio 235 cattura un neutrone, si spacca, per esempio, in ${}^{143}_{56}\text{Ba}$ e ${}^{90}_{36}\text{Kr}$. Scrivere una equazione per questa reazione di fissione e identificare le altre particelle ottenute. Spiegare come questa fissione consente di realizzare una reazione a catena.
- I due nuclidi ottenuti dalla reazione descritta in c) sono instabili: il primo, dopo quattro decadimenti β^- si trasforma in ${}^{143}_{60}\text{Nd}$, stabile; il secondo, dopo quattro decadimenti β^- si trasforma in ${}^{90}_{40}\text{Zr}$, stabile. Scrivere l'equazione della reazione nucleare complessiva e calcolare, in MeV, l'energia media liberata in ciascuna reazione di fissione, spiegando accuratamente l'origine di questa energia (trascurare la massa degli elettroni liberati).

Dati numerici:

$$\text{Massa di } {}^{90}_{40}\text{Zr} \quad : 89,904700 \text{ u}$$

Massa di $^{143}_{60}\text{Nd}$: 142.909779 u
Massa di $^{235}_{92}\text{U}$: 235.043915 u
Massa neutrone	: 1.008665 u
Unità di massa atomica (u):	931.5 MeV/c ²

- 12**
- a.** Alcuni nuclei $^{32}_{15}\text{P}$, appartenenti ad atomi di fosforo, si disintegrano emettendo ognuno una particella β^- , e danno nuclei stabili di zolfo S.
- B**
a
c
- i)** Scrivere l'equazione della reazione nucleare del fosforo 32.
- ii)** Determinare la relazione tra il periodo T di dimezzamento di un radionuclide e la sua costante radioattiva λ .
- iii)** Calcolare, in giorni, il valore del periodo T del fosforo 32 sapendo che la sua costante radioattiva è $\lambda = 5,6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.
- b.** Ad un determinato istante, un campione di fosforo 32 contiene $1,00 \times 10^6$ nuclei. Calcolare:
- i)** il numero dei nuclei rimasti dopo 20 giorni;
- ii)** l'attività A del campione in quello stesso momento;
- iii)** l'energia ΔW liberata dalla disintegrazione di un nucleo radioattivo;
- iv)** la velocità massima di una particella β^- , sapendo che essa possiede il 5% dell'energia ΔW liberata.
- c.** Dimostrare che l'energia cinetica della particella β^- , liberata in un decadimento, è uguale al 5% dell'energia ΔW liberata. Dove va a finire il restante 95% dell'energia liberata? (*Non richiesto al Bac '91*)

Sono dati:

unità di massa atomica	: $1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$;
carica elementare	: $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$;
massa di un elettrone	: $5,49 \times 10^{-4} \text{ u}$;
massa atomica di $^{32}_{15}\text{P}$: 31,9739087 u;
massa atomica dell'isotopo S considerato:	: 31,9720728 u;
velocità della luce	: $3,00 \times 10^8$.