

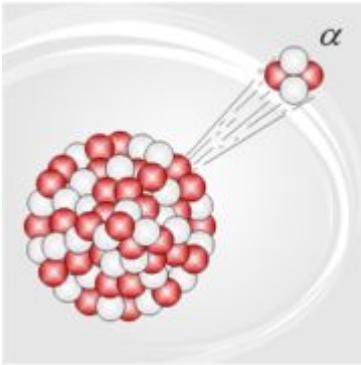
Il decadimento radioattivo

In natura esistono circa 1300 nuclidi diversi a fronte di circa un centinaio di elementi chimici. Tali nuclidi si possono ottenere combinando i possibili valori di Z (da 1 a 102) con i possibili valori di A (da 1 a 260). L'80% di questi nuclidi ha una composizione nucleare che li rende energeticamente instabili. Tali specie nucleari sono chiamati radionuclidi e si portano in condizione di stabilità energetica attraverso l'emissione di radiazione corpuscolare o elettromagnetica.

Il decadimento radioattivo o disintegrazione è quindi il processo di trasformazione, con liberazione di energia nucleare, di un radionuclide padre, in un nuclide figlio, il quale può essere a sua volta stabile o instabile. Se il figlio è stabile, il processo di decadimento è terminato. Se anche il figlio è instabile, inizia un nuovo processo di decadimento che può essere differente rispetto a quello del suo predecessore.

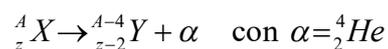
Decadimento α

Il decadimento alfa è uno dei processi per cui atomi instabili (e dunque radioattivi) si trasformano in atomi di un altro elemento, che possono a loro volta essere radioattivi oppure stabili.

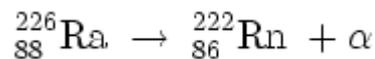


Più precisamente, il decadimento alfa avviene tramite l'emissione di una particella, detta appunto particella alfa, composta da due protoni e due neutroni (nucleo di elio) da parte dell'isotopo di un elemento con elevato numero atomico ($Z > 83$). Perdendo due protoni l'elemento indietreggia di due posizioni nella tavola periodica degli elementi. Le ragioni di tale fenomeno sono da ricercare nella tendenza di tutti i sistemi fisici a cercare condizioni di energia più stabile.

In generale la reazione del decadimento alfa è del tipo



Un esempio di decadimento alfa è quello del radio:



dove Rn è il radon, un gas nobile.

Il decadimento alfa è un decadimento spontaneo ed è un fenomeno intrinsecamente probabilistico.

Spontaneo significa che avviene senza che nessun fattore esterno al nucleo lo provochi. E' pertanto una reazione esoenergetica, che avviene cioè liberando dell'energia (Q di reazione $Q > 0$).

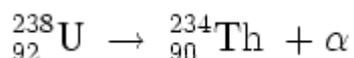
Intrinsecamente probabilistico significa che il decadimento è regolato da leggi statistiche e non deterministiche per cui di un dato nucleo possiamo stimare solo la probabilità che esso ha di decadere in un dato intervallo di tempo ma non sapremo mai calcolare l'esatto istante in cui tale decadimento avverrà. A parità quindi di condizioni iniziali il comportamento dei nuclei può essere diverso e ciascuno può accadere con una data probabilità.

Il decadimento alfa è mediato dalla forza forte e la teoria che sta alla base di tale decadimento è stata sviluppata dal fisico ucraino George Gamow e si basa sull'effetto tunnel.

L'effetto tunnel è un effetto quanto-meccanico che permette una transizione ad uno stato impedita dalla meccanica classica. Nella meccanica classica la legge di conservazione dell'energia impone che una particella non possa superare un ostacolo (barriera) se non ha l'energia necessaria per farlo. Questo corrisponde al fatto intuitivo che, per far risalire un dislivello ad un corpo, è necessario imprimergli una certa velocità ovvero cedergli dell'energia.

La meccanica quantistica invece prevede che una particella abbia una probabilità, piccola ma finita, di attraversare spontaneamente una barriera arbitrariamente alta.

Consideriamo per esempio il decadimento dell'uranio



La particella alfa viene emessa con un'energia di 4.266 Mev. Ebbene, dal punto di vista classico questa energia cinetica non sarebbe sufficiente alla particella alfa per allontanarsi dal nucleo di Torio vincendo la forza nucleare tra nucleoni. Di fatto, in virtù dell'effetto Tunnel, la particella alfa ha una probabilità non nulla di riuscire a sfuggire al nucleo di torio anche se la sua energia cinetica non è classicamente sufficiente. Quando ciò accade ha luogo il decadimento alfa.

Un'altra caratteristica della radiazione alfa è quella di essere **molto ionizzante** e **poco penetrante**, vediamo cosa significa.

Le radiazioni, di qualunque tipo, incontrando la materia perdono energia. Quando una radiazione ha energia sufficiente può ionizzare il mezzo attraversato, ossia produrre cariche positive e negative. In relazione alla quantità di energia ceduta viene prodotta una eccitazione (che indebolisce i legami tra le molecole) o una ionizzazione (perdita di un elettrone). A livello biologico tale cessione di energia, in particolare la ionizzazione, producono effetti patologici e mortali, anche repentinamente.

I raggi alfa, a causa della loro carica elettrica, interagiscono fortemente con la materia e quindi vengono facilmente assorbiti dai materiali e possono viaggiare solo per pochi centimetri nell'aria. Possono essere assorbiti dagli strati più esterni della pelle umana e così generalmente non sono pericolosi per la vita a meno che la sorgente non venga inalata o ingerita. In questo caso i danni sarebbero invece maggiori di quelli causati da qualsiasi altra radiazione ionizzante. Se il dosaggio fosse abbastanza elevato comparirebbero tutti i sintomi tipici dell'avvelenamento da radiazione.

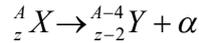
Il decadimento alfa, come gli altri decadimenti radioattivi, rispetta alcuni **principi di conservazione** tra cui:

- 1) nel decadimento si conserva il numero di nucleoni
- 2) nel decadimento si conserva la carica
- 3) nel decadimento si conserva la quantità di moto
- 4) nel decadimento si conserva l'energia, considerando anche la massa come una forma di energia secondo l'equazione di Einstein $E = mc^2$

Poiché il decadimento alfa è un decadimento a due corpi il fascio di particelle alfa emesso è mono-energetico ossia, fissato il nucleo padre, tutte le particelle alfa vengono emesse esattamente con la stessa energia.

Vediamo questo aspetto nel dettaglio:

Consideriamo il generico decadimento:



Se valgono le leggi di conservazione della quantità di moto e dell'energia dovranno essere contemporaneamente soddisfatte le due equazioni (le due equazioni andrebbero in realtà scritte utilizzando le relazioni relativistiche per quantità di moto ed energia ma il risultato non cambia, dunque accontentiamoci delle leggi di conservazione scritte secondo la fisica classica)

$$\begin{cases} m_x v_x = m_y v_y + m_\alpha v_\alpha \\ \frac{1}{2} m_x v_x^2 + m_x c^2 = \frac{1}{2} m_y v_y^2 + m_y c^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + m_\alpha c^2 \end{cases} \quad (1)$$

Fissata la massa del nucleo padre sono automaticamente fissate le masse del nucleo figlio e della particella alfa. Dunque nota l'eventuale velocità a cui si muove il nucleo X il sistema si riduce ad un sistema di due equazioni a due incognite (v_y e v_α) e dunque ammette un'unica soluzione, ossia un'unica coppia (v_y e v_α) che soddisfa il sistema. Queste considerazioni di carattere matematico si traducono fisicamente nel fatto che fissato il nucleo di partenza e le sue condizioni iniziali (la sua eventuale velocità) le energie del nucleo figlio e della particella alfa sono determinate e sempre uguali tra loro (tutti i nuclei Y possiederanno la stessa velocità di rinculo e tutte le alfa sono emesse con uguale velocità).

Le (1) rappresentano le leggi di conservazione di quantità di moto ed energia nel caso più generale, tuttavia molto frequentemente è $v_x=0$ poiché il nucleo è legato all'interno del reticolo cristallino. In questo caso le (1) si riducono alle

$$\begin{cases} 0 = m_y v_y + m_\alpha v_\alpha \\ m_x c^2 = \frac{1}{2} m_y v_y^2 + m_y c^2 + \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 + m_\alpha c^2 \end{cases} \quad (2)$$

Poiché la massa della particella α è molto inferiore a quella del nucleo figlio si ha che $v_y \ll v_\alpha$

(infatti dalla legge di conservazione della quantità di moto si ha: $v_y = -\frac{m_\alpha}{m_y} v_\alpha$). Se poi

consideriamo che quando il nucleo è legato al cristallo è l'intero cristallo a subire l'azione di rinculo ci si rende facilmente conto che nella maggior parte dei casi l'energia cinetica del nucleo figlio ha un valore trascurabile rispetto a quella della particella alfa. Si può allora scrivere:

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

Otteniamo così l'equazione che più spesso utilizziamo per calcolare l'energia del fascio alfa emesso in un determinato decadimento nucleare:

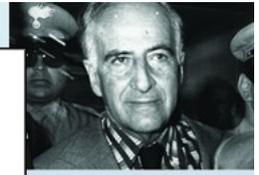
$$\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = (m_x - m_y - m_\alpha) c^2 \quad (4)$$

Come la (4) mette bene in evidenza **nel decadimento alfa si ha nuovamente la trasformazione di massa in energia**. Il decadimento alfa può avere luogo solo quando la massa del nucleo padre è superiore alla somma delle masse dei prodotti. In tal caso durante il decadimento parte della massa

del nucleo di partenza si trasforma in energia che ritroviamo sotto forma di energia cinetica delle particelle alfa emesse.



Esempi di spettri alfa



Due lancette di orologio con vernice luminescente al radio



Spettro dell'Americio.
E = 4,8 Mev

Nello spettro si riconoscono i picchi di emissione del **Radio 226** (4782 KeV), del **Polonio 210** (5305 KeV), del **Radon 222** (5490 KeV), del **Polonio 218** (6002 KeV) e del **Polonio 214** (7687 KeV). Vi è inoltre un picco evidente attorno a 5000 keV che corrisponde all'isotopo **Protoattinio 231** e dei massimi che dovrebbero corrispondere all' **Uranio 235** (residui della raffinazione del radio).



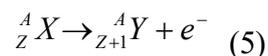
SKYLAB : IL NEUTRINO – UNA TROTTOLA FATTA DI NULLA



Decadimento β

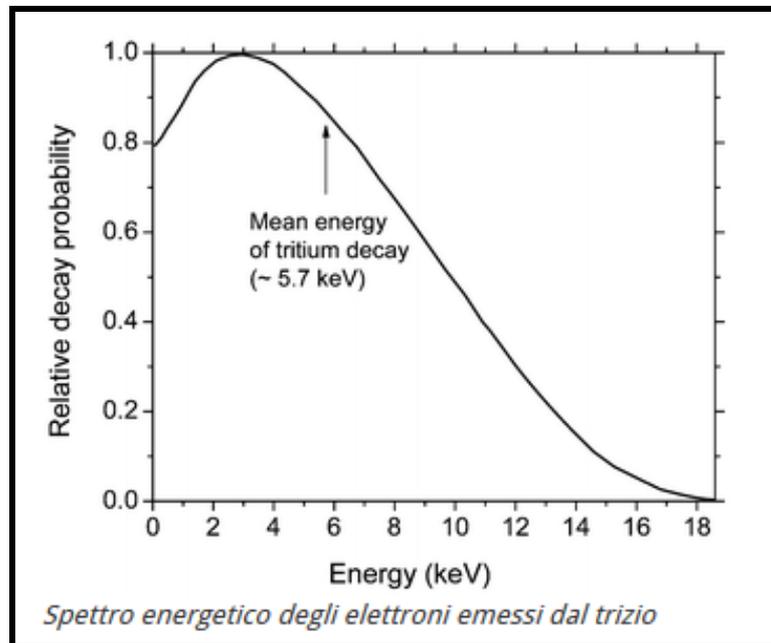
Negli anni successivi alla scoperta della radioattività è stato osservato un diverso comportamento delle particelle emesse dalle sostanze radioattive durante il decadimento. Già nel 1913 i fisici avevano individuato 3 diversi tipi di radiazioni emesse che avevano classificato col nome di α , β e γ .

Nel caso del decadimento β^- la prima interpretazione che venne data prevedeva la trasformazione di un nucleo secondo la legge:



Se il decadimento beta avesse avuto luogo secondo una trasformazione del tipo (5) sarebbe stato un decadimento a due corpi e di conseguenza, come per il decadimento α , ci si sarebbe aspettati di osservare un fascio di elettroni monoenergetico. In altri termini, in un decadimento a due corpi la validità delle leggi di conservazione di energia e quantità di moto impone l'esistenza di una sola velocità con cui viene emesso il fascio di elettroni. Tutti gli elettroni emessi avrebbero dovuto quindi possedere la stessa energia. Questa previsione di tipo teorico non trovava però una conferma

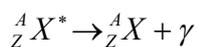
sperimentale. Dalle misure condotte si evidenziava invece che il fascio di radiazione emessa possiede uno spettro continuo di energia, ossia il fascio di radiazione β contiene elettroni che possiedono tutte le energie comprese tra zero ed un valore massimo che varia da elemento ad elemento. I fisici si trovavano così di fronte ad un dilemma apparentemente insolubile: o la (5) era sbagliata o per la prima volta si era scoperto un fenomeno fisico che violava le leggi di conservazione di energia e quantità di moto.



Esempio di spettro energetico di raggi beta.

Decadimento γ

Così come gli elettroni di un atomo possono trovarsi su livelli energetici eccitati e diseccitandosi emettono fotoni così anche i nucleoni nel nucleo possono trovarsi su livelli energetici eccitati. In questi casi, dopo un intervallo di tempo brevissimo il nucleo compie una transizione dal livello eccitato ad un livello energetico inferiore ed emette un'energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, in questo caso un fotone γ . Questo solitamente avviene in seguito ad un decadimento nucleare: tipicamente il nucleo figlio viene prodotto in uno stato eccitato e per portarsi al livello fondamentale emette energia sotto forma di radiazione γ . Il decadimento γ è dunque del tipo:



dove con ${}^A_Z X^*$ si intende un nucleo nello stato eccitato.

Il decadimento γ è dunque l'unico dei decadimenti radioattivi che non muta la specie chimica del nucleo di partenza.

La radiazione γ , così come le onde radio, la luce o come i raggi X è radiazione elettromagnetica, composta da "quanti" ciascuno di massa nulla ed energia $E=hf$ dove h è una costante (costante di Plank; $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ Js) ed f è la frequenza della radiazione. Mentre la luce è composta da quanti di energie dell'ordine di decine di eV i raggi γ assumono invece energie **dell'ordine del Mev**.

Anche il decadimento γ rispetta i soliti principi di conservazione (numero di nucleoni, carica, energia e quantità di moto). In particolare per la legge di conservazione dell'energia si avrà che:

$$M_{X^*}c^2 = M_Xc^2 + hf$$