

RADIOATTIVITA'

1. Introduzione

Radioattività Proprietà di alcuni nuclei atomici di subire trasformazioni spontanee mediante l'emissione di particelle subatomiche o di onde elettromagnetiche estremamente penetranti. Il fenomeno fu scoperto nel 1896 dal fisico francese Antoine-Henri Becquerel, il quale osservò accidentalmente che i sali di uranio emettevano radiazioni capaci di impressionare una lastra fotografica, nonostante questa fosse protetta da uno schermo opaco ai raggi luminosi.

Per definizione, una specie nucleare (un nuclide) si dice radioattiva se subisce trasformazioni spontanee in tempi inferiori a 10^{10} anni; altrimenti è considerata stabile. Nel complesso dei nuclidi esistenti in natura, la maggior parte di quelli stabili con il numero di massa A minore di 50 ha un numero di neutroni (N) circa uguale a quello di protoni (Z), mentre quelli con A maggiore di 50 hanno un numero di neutroni leggermente maggiore di quello di protoni. Inoltre, la massima stabilità si osserva per i nuclidi caratterizzati da Z ed N entrambi pari.

I nuclei stabili possono diventare radioattivi se sottoposti a opportuna sollecitazione, ad esempio mediante il bombardamento con particelle alfa o neutroni. In questo caso si parla di radioattività indotta o artificiale.

2. I primi studi sulla radioattività

Le ricerche iniziate da Becquerel furono riprese dagli scienziati francesi Pierre e Marie Curie, i quali nel 1898 scoprirono che la proprietà di emettere radiazioni penetranti non dipende dallo stato chimico o fisico di un elemento, ma è intrinseca di alcuni nuclidi, e diedero al fenomeno il nome di radioattività. Analizzando l'intensità della radiazione emessa per mezzo di una camera di ionizzazione, essi riconobbero che la pechblenda aveva un'attività maggiore dei sali usati da Becquerel. Poiché al tempo non si conoscevano elementi sufficientemente radioattivi da giustificare l'intensità delle emissioni osservate, i due coniugi dedussero che il minerale analizzato conteneva, oltre all'uranio, altre sostanze ignote estremamente instabili; scoprirono quindi due nuovi elementi radioattivi: il polonio e il radio.

La radioattività del torio venne osservata successivamente dalla stessa Marie Curie, mentre quelle dell'attinio e del radon vennero scoperte nel 1899 rispettivamente dal chimico francese André-Louis Debierne e dai fisici britannici Ernest Rutherford e Frederick Soddy.

A Rutherford si deve inoltre la prima distinzione operata nell'ambito delle emissioni radioattive: egli riconobbe la differenza tra le particelle alfa, che penetrano solo per alcuni millesimi di centimetro nell'alluminio, e le particelle beta, caratterizzate da un potere penetrante cento volte maggiore. Esperimenti successivi, fondati sull'osservazione delle radiazioni in presenza di campi elettrici e magnetici, rivelarono l'esistenza di una terza componente ad alta energia, quella costituita dai raggi gamma.

3. Legge del decadimento radioattivo

Oggi si conoscono diversi tipi di decadimento radioattivo; differiscono per modalità di attuazione, energia e forze coinvolte, ma seguono tutti la stessa legge di decadimento. Si tratta di una funzione esponenziale, che permette di calcolare, dato un campione con un numero iniziale di nuclei instabili N_0 , il numero di nuclei decaduti $N(t)$ al tempo t :

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

Il parametro λ , chiamato costante di decadimento, è specifico per ogni nuclide e determina la velocità del processo di trasformazione.

1. Tempo di dimezzamento

Dalla legge del decadimento radioattivo deriva la definizione del tempo di dimezzamento, un parametro comunemente utilizzato per valutare la velocità di decadimento di una specie radioattiva. Definito come il tempo necessario perché il numero di nuclidi instabili di un campione si dimezzi, è dato da:

$$T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda,$$

dove \ln rappresenta il logaritmo naturale, o logaritmo in base e . Il tempo di dimezzamento può variare molto da nuclide a nuclide: esistono specie radioattive con valori di $T_{1/2}$ dell'ordine del secondo, e altre con valori dello stesso parametro paragonabili all'età della Terra. Ad esempio, lo iodio 131 ha un tempo di dimezzamento di circa 8 giorni, il cobalto 60 di 5,3 anni e l'uranio 238 di 4,5 miliardi di anni.

Spesso, in luogo del tempo di dimezzamento, si indica la "vita media" di un radionuclide, che equivale al periodo di tempo necessario affinché il numero di nuclei instabili si riduca a circa il 37% del suo valore iniziale.

4. Tipi di decadimento radioattivo

Il decadimento radioattivo di un nucleo instabile può avvenire in diversi modi e produrre risultati differenti. Può comportare l'emissione di una o più particelle, con conseguente trasformazione del nucleo padre in un nucleo chimicamente diverso; può produrre soltanto il rilascio di una certa quantità di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica o la scissione del nucleo in due frammenti. I principali tipi di decadimento radioattivo oggi conosciuti sono quello alfa, i due tipi di decadimento beta, il gamma, la cattura elettronica, la fissione e il decadimento esotico.

4.1. Decadimento alfa

Il decadimento alfa consiste nell'emissione, da parte di un nucleo instabile relativamente pesante, di una particella costituita da due protoni e due neutroni; in sostanza, di un nucleo di elio. Il nucleo figlio ha un numero atomico Z inferiore di due unità rispetto al nucleo padre e un numero di massa A inferiore di quattro unità. Ad esempio, l'isotopo dell'uranio con numero di massa 238 si trasforma nel nucleo dell'elemento con numero di massa 234, avente due protoni e due neutroni in meno: il torio 234.

Il decadimento alfa è il principale motore delle serie radioattive, le famiglie di radionuclidi che si trasformano l'uno nell'altro attraverso questa forma di radioattività. Tre isotopi radioattivi naturali quali sono l'uranio 235, l'uranio 238 e il torio 232 decadono spontaneamente nei rispettivi nuclei figli, più leggeri di quattro unità di massa ciascuno,

generando una serie di decadimenti che si susseguono spontaneamente, e si conclude con un diverso isotopo del piombo, stabile. Una quarta serie, con capostipite artificiale, completa il quadro delle serie radioattive.

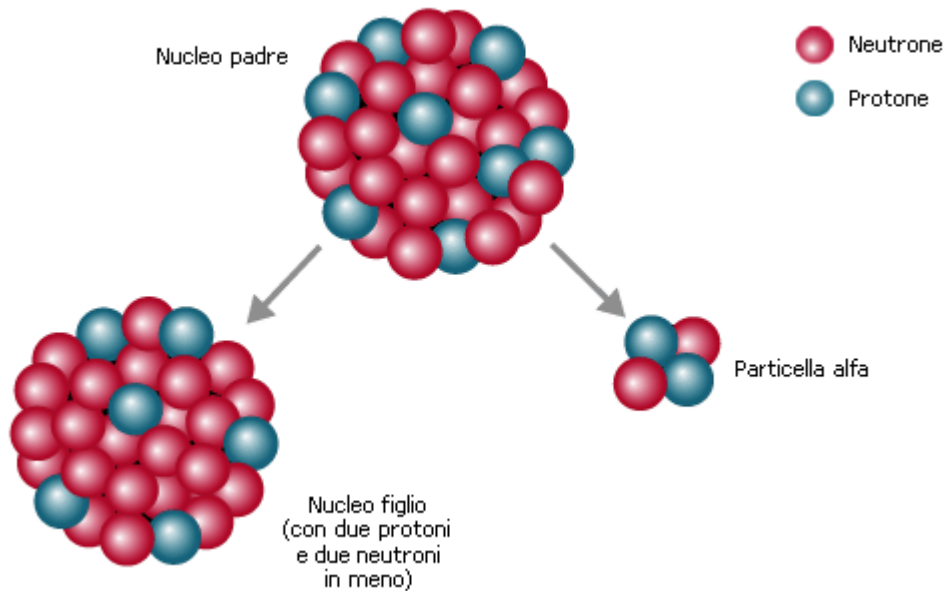


Fig. 4.1 – Decadimento alfa

4.2. Decadimento beta

Il decadimento beta esiste in due versioni distinte, dette rispettivamente beta meno e beta più. La prima comporta la trasformazione di un neutrone del nucleo instabile in un protone, con emissione di una particella beta (un elettrone) e di un'altra particella estremamente leggera e sfuggente, chiamata antineutrino elettronico; in sostanza, questo tipo di decadimento trasforma il nucleo instabile di partenza in un nucleo dell'elemento successivo della tavola periodica (quello con il numero Z maggiore di un'unità). Il decadimento beta più, invece, consiste nella trasformazione del nucleo instabile in un nucleo dell'elemento precedente della tavola periodica (quello con Z minore di un'unità): fisicamente, un protone si trasforma in un neutrone, emettendo un positrone (un elettrone positivo) e un neutrino elettronico.

Il torio 234, ad esempio, decade beta meno; poiché la massa dell'elettrone è trascurabile rispetto a quella di un nucleone, il nucleo figlio ha lo stesso numero di massa – 234 – e numero atomico Z pari a 91; è pertanto un isotopo del protoattinio.

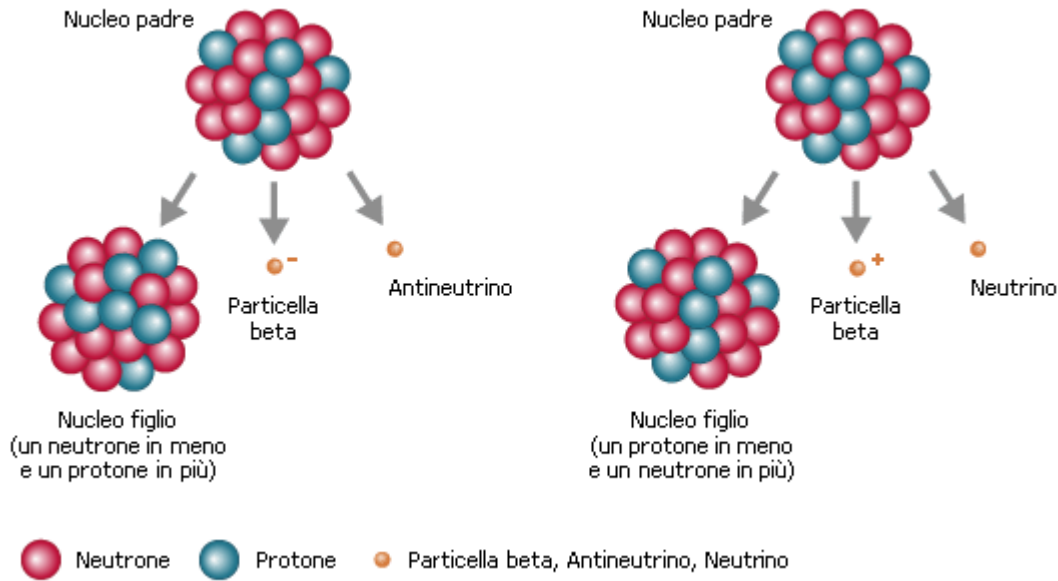


Fig. 4.2 Decadimento beta

4.3. Decadimento gamma

Il decadimento gamma consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica ad alta frequenza. Si può verificare quando un isotopo esiste in due diverse forme, chiamate isomeri nucleari, che hanno numero atomico e numero di massa identici, ma differente energia. L'emissione di raggi gamma accompagna la transizione dell'isomero di alta energia a quello di energia minore. Un emettitore gamma, ad esempio, è il protattinio 234.

In alternativa, il decadimento gamma si può verificare in combinazione con un decadimento alfa o beta, per consentire la diseccitazione del nucleo figlio.

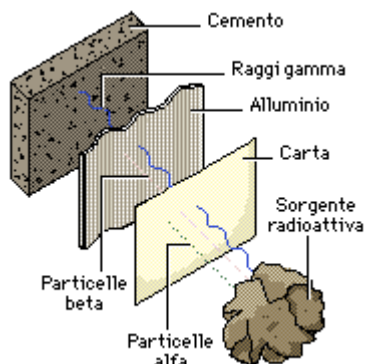


Fig. 4.3 Potere di penetrazione delle radiazioni

4.4. Cattura elettronica

Questo tipo di decadimento consiste nella cattura, da parte del nucleo instabile, di uno degli elettroni più interni degli orbitali atomici; l'assorbimento di un elettrone da parte del nucleo produce la trasformazione di un protone in un neutrone, con il risultato che il numero atomico Z , come nel decadimento beta più, diminuisce di un'unità. L'avvenuto decadimento di un nuclide per cattura elettronica si può rilevare osservando i raggi X emessi a seguito della rimozione dell'elettrone dalla sua orbita; in alternativa, possono essere rilevati elettroni Auger, o ancora, radiazione gamma di diseccitazione. Questo tipo di decadimento è responsabile della trasformazione del potassio 40 in argo, fenomeno che spiega l'abbondanza di quest'ultimo elemento nell'atmosfera terrestre, superiore a quella di tutti gli altri gas nobili.

4.5. Fissione spontanea

La fissione spontanea interessa nuclidi molto pesanti, vale a dire, l'uranio e gli elementi transuranici; consiste nella scissione del nucleo padre in due frammenti di peso leggermente diverso l'uno dall'altro, con produzione di un'enorme quantità di energia. I due frammenti, a loro volta, sono nuclei altamente instabili, che in genere, prima di raggiungere la stabilità, vanno incontro a una lunga serie di decadimenti beta e gamma.

4.6. Decadimento esotico

Il carattere di questo tipo di decadimento spiega il motivo del nome: si tratta di una forma di radioattività piuttosto insolita, scoperta solo nel 1984, che consiste nell'emissione da parte di tipici emettitori alfa di altre particelle, più pesanti: un nucleo di carbonio, di ossigeno o di neon. Alcuni dei radionuclidi che decadono in modo esotico sono il radio 222, il radio 223 e il radio 224.

5. **Potere di penetrazione**

L'energia cinetica delle particelle alfa e beta emesse durante un decadimento varia in genere a seconda dell'isotopo da cui vengono emesse. Così, le particelle alfa prodotte dal decadimento del polonio 210 hanno energia sufficiente a compiere nell'aria un percorso di circa 4 cm prima di arrestarsi, mentre quelle del polonio 212, nelle medesime condizioni,

viaggiano per oltre 8 cm. La misura della distanza percorsa dalle particelle alfa permette dunque di identificare gli isotopi emittenti.

Le particelle beta, di gran lunga più leggere delle particelle alfa, vengono emesse a velocità molto elevate dai nuclei padri, e quindi percorrono nella materia distanze maggiori.

I raggi gamma sono dotati di un elevato potere di penetrazione: in alcuni casi possono attraversare parecchi centimetri di piombo prima di subire un sensibile rallentamento.

6. Unità di misura

La prima unità di misura introdotta per esprimere l'attività di una sostanza radioattiva fu il curie (Ci): corrisponde all'attività di circa 1 g di radio, e vale 37.000 miliardi di disintegrazioni al secondo. Nel Sistema Internazionale, in luogo del curie si adotta il più pratico bequerel (Bq), che corrisponde a 1 disintegrazione al secondo.

Per quantificare la dose di radiazioni necessaria a produrre effetti visibili sulla materia, si misura l'energia assorbita per unità di massa; l'unità di misura del Sistema Internazionale di questa grandezza è il gray (Gr), definito come l'energia di 1 joule assorbito da 1 kg di massa: $1 \text{ Gr} = 1 \text{ J/kg}$; in alternativa, si usa il rad, definito come la radiazione che trasferisce un'energia di 100 erg in 1 g di materia.

Nel caso specifico della dose di radiazione necessaria per produrre effetti biologici significativi si usa invece il sievert (Sv), dato dalla dose in gray moltiplicata per un opportuno fattore di qualità. Infine, un'altra unità di misura comunemente utilizzata nel campo della protezione da radiazioni è il rem, (roentgen equivalente uomo), definito come la quantità di radiazione espressa in rad, moltiplicata per un fattore di qualità specifico di ogni tipo di radiazione.

7. Effetti della radiazione sulla materia

Quando la radiazione colpisce la materia, interagisce con gli atomi provocandone la ionizzazione; da qui il nome di radiazioni ionizzanti con cui vengono definite normalmente le emissioni da radionuclidi. Il fenomeno è estremamente accentuato per le particelle alfa,

meno per le beta e ancora meno per le gamma. In un centimetro di percorso in aria, i raggi beta producono da t a z della ionizzazione prodotta dalle particelle alfa, mentre per i raggi gamma questo valore è ridotto ancora di cento volte.

Sull'effetto ionizzante della radiazione si basa il principio di funzionamento di molti strumenti, come il contatore di Geiger-Müller e altre camere a ionizzazione (vedi Rivelatori di particelle), che vengono usati per misurare le intensità delle singole radiazioni e le velocità di decadimento delle sostanze radioattive.

7.1. Effetti biologici delle radiazioni

Gli effetti delle radiazioni sulla materia vivente sono prodotti attraverso lo stesso meccanismo della ionizzazione descritto per la materia inanimata. I danni più gravi si hanno quando le radiazioni ionizzanti colpiscono la molecola di DNA, presente nel nucleo di ogni cellula.

L'entità dei danni dipende in primo luogo dalla dose di radiazione; in secondo luogo, dall'organo colpito, che può essere vitale o non vitale; infine, dal tipo di danno cellulare: una cellula colpita può essere distrutta completamente, oppure può essere alterata senza essere distrutta; in quest'ultimo caso, c'è la possibilità che si attivi il processo di proliferazione anomala che sta all'origine della carcinogenesi (vedi Cancro).

Il ritardo con cui si manifestano gli effetti nell'organismo rispetto al momento dell'esposizione alle radiazioni, unito al fatto che il meccanismo di induzione di un tumore è una combinazione di eventi casuali non prevedibili (la penetrazione della radiazione nel nucleo della cellula, la lesione di un sito specifico della molecola di DNA, l'inadeguatezza della risposta dell'organismo al danno subito), fanno sì che sia difficile correlare l'insorgenza di un tumore con un'eventuale dose di radiazione assorbita. I risultati più attendibili si possono ottenere quindi da studi statistici, che analizzino intere popolazioni esposte a radiazioni.

8. Radioattività artificiale

Nel 1919 Rutherford realizzò la prima reazione nucleare indotta, bombardando azoto ordinario gassoso (azoto 14) con particelle alfa: trovò che i nuclei di azoto catturano le

particelle alfa ed emettono un protone ad altissima velocità, trasformandosi infine nell'isotopo stabile dell'ossigeno di numero di massa 17.

Solo nel 1933 fu dimostrato che tali reazioni nucleari possono condurre alla formazione di nuclidi radioattivi. Fu in quell'anno che i chimici francesi Irène e Frédéric Joliot-Curie prepararono la prima sostanza radioattiva artificiale bombardando l'alluminio con particelle alfa. Il nucleo dell'alluminio cattura la particella alfa ed emette un neutrone, trasformandosi in un isotopo del fosforo, che in un intervallo di tempo relativamente breve decade con emissione di positroni. I due scienziati produssero inoltre un isotopo dell'azoto a partire dal boro e un isotopo dell'alluminio partendo dal magnesio.

Da allora sono stati condotti innumerevoli esperimenti di radioattività artificiale, mediante il bombardamento di tutti i nuclidi della tavola periodica con particelle alfa, protoni, neutroni e deutoni (nuclei di deuterio, l'isotopo dell'idrogeno di massa 2). Il risultato di questa intensa attività di ricerca è l'attuale conoscenza di oltre 400 sostanze radioattive artificiali. Un notevole impulso a questi studi è venuto dall'uso degli acceleratori di particelle, gigantesche macchine capaci di portare le particelle a velocità enormi, aumentando la probabilità di scontro e interazione.

9. Applicazioni

Innumerevoli sono i campi di applicazione della radioattività, naturale e artificiale. Uno dei più importanti è quello medico: le radiazioni prodotte da sorgenti artificiali opportune vengono ampiamente utilizzate in diagnostica (vedi Radiologia) e nella radioterapia del tumore. In campo scientifico sono impiegate per svariati usi: per la datazione di reperti archeologici, di siti geologici, o come traccianti per lo studio di processi biochimici.

In fisica fondamentale si impiegano comunemente per la ricerca nel campo delle particelle elementari; nell'industria, per il controllo di qualità attraverso le tecniche radiografiche e in dispositivi particolari come le sorgenti di luce fosforescente. Vengono inoltre impiegate in tecniche di analisi in traccia; ad esempio, nell'analisi per attivazione neutronica, in cui il campione viene reso radioattivo mediante bombardamento con neutroni: le impurità (tracce) della sostanza in esame, non rivelabili con altri mezzi, vengono individuate analizzando i radioisotopi prodotti nel processo.

L'applicazione più recente, ancora in fase di sperimentazione, vede la radioattività fornire energia a lungo termine all'interno di microscopiche batterie. Il modello oggi più attendibile, messo a punto presso i laboratori della Cornell University, funzionerebbe con il nichel 63 che, decadendo, produrrebbe la polarizzazione della pila e il movimento di una parte mobile del congegno; tale movimento potrebbe essere sfruttato direttamente per il funzionamento di determinati dispositivi o, in alternativa, potrebbe fornire energia da immagazzinare in forma magnetica. Le applicazioni più interessanti del dispositivo riguarderebbero la microelettronica e i dispositivi medici impiantabili.

10. Radioattività ambientale e dose annua assorbita

Nell'ambiente esiste un fondo di radioattività naturale generato dai raggi cosmici e dagli elementi radioattivi naturali presenti nelle rocce e nella biosfera. Il contributo più importante, pari a circa il 52%, a questo fondo di radioattività dell'ambiente si deve all'uranio 238 e ai suoi discendenti della serie radioattiva di cui è capostipite, in particolare il radon. Il 16,6% circa è ascrivibile invece al torio 232 e ai suoi discendenti; il 15% a isotopi quali il potassio 40 e il rubidio 87, e un altro 15% ai raggi cosmici, che, benché schermati dagli strati alti dell'atmosfera, penetrano in minima percentuale fino alla biosfera. Il totale corrisponde a una dose di circa 130 mRem all'anno.

Se si vuole calcolare la dose a cui un essere umano è normalmente soggetto, tuttavia, si deve aggiungere una componente dovuta alle eventuali esposizioni a radiazioni artificiali: quelle provenienti da radioterapie e analisi radiologiche (circa 46 mRem all'anno), quelle immesse nell'ambiente dai test nucleari (circa 2 mRem all'anno), quelle riconducibili all'attività delle centrali nucleari (circa 0,2 mRem all'anno). Questi contributi portano la dose annua assorbita a circa 200 mRem all'anno. Per avere un'idea degli effetti che queste dosi possono sortire sull'organismo, si consideri che una quantità di radiazioni compresa tra 0 e 25 Rem (1 Rem = 1000 mRem) non produce in genere alcun effetto osservabile; tra 25 e 100 Rem si osservano piccole variazioni nella composizione del sangue; tra 100 e 200 Rem si avverte nausea e affaticamento, oltre a sostanziali variazioni della composizione del sangue e, in pochissimi casi, la morte; si ha invece alta possibilità di morte per dosi superiori ai 200 Rem.