

Radioattività

Disintegrazione spontanea di nuclei atomici con emissione di particelle subatomiche e di onde elettromagnetiche. Il fenomeno fu scoperto nel 1896 dal fisico francese **Antoine-Henri Becquerel**, il quale osservò che l'**uranio** emetteva delle radiazioni capaci di impressionare una lastra fotografica protetta da uno schermo opaco ai raggi luminosi. Le ricerche iniziate da Becquerel vennero riprese dagli scienziati francesi **Marie e Pierre Curie** i quali nel 1898 scoprirono che la proprietà di emettere radiazioni penetranti era comune all'uranio e a molti dei suoi composti e diedero al fenomeno il nome di radioattività. Analizzando l'intensità della radiazione emessa per mezzo di una camera di ionizzazione, essi riconobbero che i minerali dell'uranio, in modo particolare la **pechblenda**, avevano un'attività radioattiva maggiore rispetto ai sali usati da Becquerel. Poiché non esistevano elementi noti sufficientemente radioattivi da giustificare le radiazioni osservate, essi dedussero che i minerali analizzati fossero composti da sostanze ignote estremamente instabili. Dopo una serie di esperimenti chimici sulla pechblenda scoprirono due nuovi elementi radioattivi: il **polonio** e il **radio**. La radioattività del **torio**, dell'**attinio** e del **rado** venne osservata in un secondo tempo. Si comprese subito che la radioattività era la sorgente di energia più concentrata fino ad allora conosciuta. I Curie misurarono il calore associato al decadimento del radio e stabilirono che 1 g di radio produce circa 420 J di energia all'ora e che questo effetto termico continua ora dopo ora e anno dopo anno. A seguito di questi risultati la radioattività attirò l'attenzione degli scienziati di tutto il mondo e nei decenni successivi furono ampiamente studiati molti aspetti del fenomeno.

Tipi di radiazioni

Ernest Rutherford scoprì che vi sono almeno due componenti nelle emissioni radioattive: le **particelle alfa**, che penetrano solo per alcuni millesimi di centimetro nell'alluminio, e le **particelle beta**, caratterizzate da un potere penetrante 100 volte maggiore. Esperimenti successivi, in cui la radiazione venne sottoposta a campi elettrici e magnetici, rivelarono la presenza di una terza componente ad alta energia, i raggi gamma. In un campo elettrico le particelle beta vengono fortemente deflesse verso il polo positivo, quelle alfa sono deflesse in misura minore verso il polo negativo, mentre la traiettoria dei raggi gamma non risente dell'effetto del campo. Ne deriva che le particelle beta sono dotate di carica negativa, le particelle alfa trasportano cariche positive (e hanno massa maggiore delle particelle beta) e i raggi gamma sono elettricamente neutri.

La scoperta che il radio decade producendo radon fu la prova conclusiva che il decadimento radioattivo è accompagnato da una trasformazione chimica dell'elemento instabile. Gli esperimenti sulla deflessione dei raggi alfa in un campo elettrico permisero di stimare il valore del rapporto tra carica e massa delle particelle alfa che risultò circa la metà di quello dello ione idrogeno. Da ciò si dedusse che queste particelle sono composte da atomi di elio ionizzati (privati di due **elettroni**). Lo ione elio, infatti, ha massa quadrupla rispetto allo ione idrogeno e, quindi, il rapporto carica/massa è circa metà di quello dello ione idrogeno. La validità di questa ipotesi fu confermata da Rutherford. Egli fece decadere una sorgente alfa vicino a un vaso di vetro sottile in cui era stato praticato il vuoto; le particelle alfa potevano attraversare il vetro e quindi rimanevano intrappolate nel vaso, nel quale dopo pochi giorni si rivelava la presenza di elio. In seguito si dimostrò che le particelle beta sono elettroni e che i raggi gamma sono radiazioni elettromagnetiche ad alta energia.

L'ipotesi nucleare

La scoperta della radioattività segnò l'inizio di una serie di sistematiche ricerche sulla natura dei costituenti della materia. Nel 1911, a seguito degli esperimenti di diffusione di particelle alfa da parte di lamine metalliche, Rutherford ipotizzò che l'atomo fosse

composto da un **nucleo** centrale nel quale era concentrata la maggior parte della massa e da un determinato numero di elettroni che orbitavano nello spazio pressoché vuoto intorno al nucleo stesso. L'ipotesi nucleare da allora si è sviluppata in una teoria complessa della struttura atomica che spiega in modo soddisfacente l'intero fenomeno della radioattività: si è trovato che l'atomo è costituito da un denso nucleo centrale circondato da una nuvola di elettroni; a sua volta il nucleo è composto da **protoni**, in numero uguale agli elettroni (in modo da bilanciare la carica negativa), e da **neutroni**, che sono particelle neutre aventi approssimativamente la stessa massa dei protoni.

Una particella alfa è composta da due neutroni e due protoni e pertanto può essere emessa solo dal nucleo di un atomo. Quando un nucleo decade perdendo una particella alfa si forma un nuovo nucleo, più leggero del precedente. Un **isotopo** dell'uranio con numero di massa 238, ad esempio, si trasforma nell'atomo dell'elemento con numero di massa 234, avente due protoni e due neutroni in meno, ovvero in un isotopo del torio. Il torio 234 è a sua volta un elemento instabile e decade con emissione di particelle beta. L'emissione è dovuta alla trasformazione di un neutrone in un protone, per cui comporta un aumento della carica nucleare (o equivalentemente numero atomico) di un'unità. Poiché la massa dell'elettrone è trascurabile rispetto a quella dei nucleoni, l'isotopo che proviene dal decadimento del torio 234 ha numero di massa 234 e numero atomico 91 ed è pertanto un isotopo del **protattinio**.

Radiazione alfa, beta e gamma

Nei decadimenti alfa e beta vengono di solito emessi quasi simultaneamente anche raggi gamma. Questi ultimi non posseggono né carica né massa, quindi la loro emissione non comporta un cambiamento delle proprietà chimiche dell'atomo, ma solo la perdita di una determinata quantità di energia sotto forma di radiazione. L'emissione di raggi gamma è la compensazione allo stato instabile cui perviene il nucleo con l'emissione di particelle alfa e beta.

Alcuni isotopi decadono con pura emissione gamma. Questa situazione si verifica 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 è dovuta alla transizione dell'isomero ad alta energia a quello a energia minore. L'isotopo protattinio 234, ad esempio, esiste in due distinti stati energetici e l'emissione di raggi gamma segnala la transizione da uno stato all'altro.

La velocità delle particelle alfa e beta emesse durante un decadimento è estremamente alta. In particolare, a un determinato isotopo di un elemento chimico corrisponde una certa velocità delle particelle emesse: così, le particelle alfa prodotte dal decadimento del polonio 210 compiono nell'aria un percorso di circa 4 cm prima di arrestarsi, mentre quelle del polonio 212 viaggiano per 8,5 cm nelle stesse condizioni. La misurazione della distanza percorsa dalle particelle alfa permette allora di identificare gli isotopi emittenti. Le particelle beta vengono espulse a velocità molto elevate e quindi percorrono nella materia distanze maggiori, anche se il meccanismo che ne determina l'arresto è sostanzialmente simile. Tuttavia, a differenza delle particelle alfa, le beta sono emesse entro un intervallo piuttosto ampio di velocità e i nuclidi emittenti vengono riconosciuti dal valore medio delle velocità. La distribuzione delle energie delle particelle beta è spiegabile con l'ipotesi dell'esistenza di una particella chiamata **neutrino**, che accompagna ogni decadimento beta.

I raggi gamma sono dotati di un elevato potere penetrante e in alcuni casi possono attraversare parecchi centimetri di piombo prima di subire un sensibile rallentamento. La radiazione alfa, beta e gamma interagisce profondamente con la materia, provocando una intensa ionizzazione. Questo fenomeno, estremamente accentuato per le particelle alfa, meno per le beta e ancora meno per le gamma, è particolarmente evidente nei gas.

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.

La velocità di disintegrazione di un elemento instabile viene misurata in Curie, dove 1 Curie è uguale al numero di disintegrazioni primarie cui dà luogo un grammo di radio nell'intervallo di tempo di un secondo. Il valore di questa unità venne determinato sperimentalmente e risultò uguale a $3,71 \cdot 10^{10}$; venne quindi arrotondato a $3,7 \cdot 10^{10}$ e reso indipendente da ogni successiva misura.

Particolari tipi di decadimento

Vi sono modalità di decadimento radioattivo diverse da quelle accennate sopra. Alcuni isotopi emettono **positroni**, cioè particelle identiche agli elettroni ma di carica opposta. Questa emissione viene comunemente considerata decadimento beta e chiamata emissione "beta più" per distinguerla da quella più comune di elettroni negativi. Si pensa che l'emissione di positroni sia dovuta alla conversione, nel nucleo, di un protone in un neutrone determinando la diminuzione di un'unità del numero atomico.

Un'altra modalità di decadimento, nota come **cattura k**, consiste nella cattura di un elettrone che orbita attorno al nucleo da parte del nucleo stesso, seguita dalla trasformazione di un protone in un neutrone: il risultato è ancora la diminuzione di un'unità del numero atomico. Il processo è osservabile solo perché la rimozione dell'elettrone dalla sua orbita determina l'emissione di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Questo tipo di decadimento è responsabile della trasformazione del **potassio 40 in argo** e ciò spiega perché quest'ultimo elemento sia più abbondante nell'atmosfera terrestre rispetto agli altri gas nobili.

L'uranio 235 e altri isotopi degli **elementi transuranici** artificiali decadono secondo un processo di fissione spontanea, nel quale il nucleo si scinde in due frammenti con conseguente emissione di un'enorme quantità di energia.

A metà degli anni Ottanta è stato osservato un modo singolare di decadimento, in cui gli isotopi del radio di massa 222, 223 e 224 emettono un nucleo di carbonio 14 piuttosto che decadere nel modo consueto con emissione di radiazione alfa.

Periodo di dimezzamento

Il decadimento di alcune sostanze, come l'uranio 238 e il torio 232, sembra continuare indefinitamente senza una sensibile diminuzione del numero di disintegrazioni al secondo. Altre sostanze radioattive mostrano invece una decisa riduzione dell'attività di decadimento col passare del tempo; tra queste vi è l'isotopo torio 234 (originariamente chiamato uranio X), la cui velocità di disintegrazione si dimezza in 25 giorni. Questo intervallo di tempo, caratteristico di ogni specie radioattiva, viene detto "periodo di dimezzamento" o "periodo di semitrasformazione" ed esprime precisamente il periodo necessario perché una determinata quantità di un elemento instabile si riduca alla metà del valore originario. A volte il tempo di dimezzamento è talmente lungo da non poter essere misurato con precisione con gli attuali metodi conosciuti: il torio 232, ad esempio, ha un periodo di semitrasformazione di circa 14 miliardi di anni.

Serie radioattive

Quando l'uranio 238 decade emettendo una particella alfa, si forma il torio 234 che a sua volta decade con emissione di una particella beta, e forma protattinio 234. Il protattinio 234 emette una particella beta e si trasforma in un nuovo isotopo dell'uranio, con numero di massa 234. Quest'ultimo decade per emissione alfa e forma il torio 230, che a sua volta decade per emissione alfa formando il radio 226.

Questa serie radioattiva, chiamata serie dell'uranio, prosegue in modo analogo e attraverso ulteriori cinque emissioni alfa e quattro emissioni beta arriva al prodotto finale, un isotopo non radioattivo (stabile) del piombo con numero atomico 82 e numero di massa 206. Ogni elemento della **tavola periodica** tra l'uranio e il piombo è rappresentato in questa serie e ogni nuclide è distinguibile per il suo caratteristico periodo di dimezzamento. I membri della serie hanno tutti una caratteristica comune: i loro numeri di massa possono essere espressi dalla semplice formula $4n + 2$, dove n è un numero intero. Un'altra serie naturale è quella del torio, detta serie $4n$ perché i numeri di massa di tutti i suoi membri sono esattamente divisibili per 4; vi è poi quella dell'attinio, o serie $4n + 3$. Il capostipite della serie del torio è l'isotopo torio 232 e il suo elemento finale è l'isotopo stabile piombo 208. La serie dell'attinio comincia invece con l'uranio 235 (chiamato attinurano dai primi ricercatori) e si conclude col piombo 207. Una quarta serie, la serie $4n + 1$, nella quale tutti i membri sono radioisotopi artificiali, è stata scoperta in anni recenti; il termine iniziale è l'isotopo **curio** 241 e l'elemento finale è il bismuto 209.

Datazioni

Il fenomeno della radioattività naturale, ovvero del decadimento di specie atomiche instabili esistenti in natura, permette di stabilire l'età del nostro pianeta.

Un **metodo di datazione** delle rocce si basa sul decadimento dell'uranio e del torio; il processo di disintegrazione di questi due elementi è iniziato fin dalla formazione dei loro minerali e ha prodotto particelle alfa che sono rimaste intrappolate (come atomi di elio) all'interno delle rocce stesse. Determinando accuratamente le quantità relative di elio, uranio e torio contenute in una roccia è possibile calcolare da quanto tempo è in atto il processo di decadimento, e quindi l'età della roccia.

Un altro metodo è basato sulla determinazione dei rapporti tra le concentrazioni degli elementi iniziali e finali delle serie radioattive; in particolare si misura il rapporto tra uranio 238 e piombo 206 o tra torio 232 e piombo 208 presenti nella roccia.

Questi e altri metodi forniscono per l'età della Terra un valore di circa 4,65 miliardi di anni, che viene confermato anche dall'analisi delle **meteoriti** cadute sulla superficie terrestre e dei campioni di rocce lunari prelevate dall'*Apollo 11*, durante l'allunaggio del luglio 1969.

Radioattività artificiale

Nel 1919 Rutherford scoprì che alcuni isotopi naturali stabili potevano essere trasformati in specie isotopiche instabili per mezzo di reazioni nucleari provocate. Bombardando azoto ordinario gassoso (azoto 14) con particelle alfa, egli realizzò la prima reazione nucleare indotta artificialmente e 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. Il processo può essere descritto mediante una reazione dove i nuclidi si fondono con le particelle alfa, per dare Ossigeno e protoni (nuclei di idrogeno). Nel 1933 fu dimostrato che alcune reazioni nucleari possono condurre alla formazione di nuclidi radioattivi. In quell'anno i chimici francesi **Irène** e **Frédéric Joliot-Curie** prepararono la prima sostanza radioattiva artificiale bombardando l'alluminio con particelle alfa. I nuclei di alluminio catturano le particelle alfa ed emettono neutroni trasformandosi in un isotopo del fosforo, che in un intervallo di tempo relativamente breve decade con emissione di positroni.

Da allora sono state scoperte molte reazioni nucleari e tutti gli elementi della tavola periodica sono stati bombardati con diverse particelle. Il risultato di questa intensa attività di ricerca è l'attuale conoscenza di oltre 400 nuclidi radioattivi artificiali. Un notevole impulso a questi studi venne dalla costruzione degli **acceleratori di particelle**, che

accelerano le particelle proiettile a velocità enormi, aumentando così la probabilità della loro cattura da parte dei nuclei bersaglio.

Applicazioni

Lo studio delle reazioni nucleari e le ricerche sulla radioattività artificiale hanno trovato applicazioni nel settore scientifico, industriale e militare. Sono stati scoperti elementi chimici che non esistono in natura e sono stati prodotti radioisotopi di quasi tutti gli elementi della tavola periodica; questi isotopi sono utilizzati principalmente come sorgenti di radiazione e come traccianti.

Particolarmente importante tra gli isotopi radioattivi artificiali è il carbonio 14, che ha periodo di dimezzamento di circa 5750 anni. La disponibilità di questa sostanza ha permesso lo studio di numerosi aspetti dei processi biologici, come la **fotosintesi**. Inoltre, una piccola quantità di carbonio 14 è presente nell'atmosfera terrestre e tutti gli organismi viventi ne assorbono tracce durante la loro vita. Dopo la morte questo assorbimento cessa e la concentrazione del carbonio radioattivo diminuisce rispetto ai valori iniziali. Stime dell'età dei reperti archeologici, come ossa e mummie, sono state possibili mediante misurazioni della concentrazione del carbonio 14 in essi contenuta.

Nell'analisi per attivazione con neutroni, un campione è reso radioattivo mediante bombardamento con neutroni: le impurità della sostanza in esame, che non possono essere rivelate con altri mezzi, vengono trovate analizzando il tipo particolare dei radioisotopi prodotti nel processo. Altre applicazioni degli isotopi radioattivi si hanno nella terapia medica, nella radiografia industriale e in dispositivi particolari come le sorgenti di luce fosforescente, gli eliminatori statici, i misuratori di spessore e le batterie nucleari. Le reazioni di fusione e fissione nucleare vengono sfruttate nella costruzione delle armi nucleari. Notevolmente dibattuto, poi, è l'utilizzo delle reazioni di fissione controllate nella produzione di **energia nucleare**.

Per chi vuole più dettagli

Decadimento Beta: Una particella beta è un elettrone ad alta velocità che fuoriesce da un nucleo in disintegrazione. Tale particella può avere carica negativa unitaria (β^- , decadimento beta negativo), o carica positiva unitaria (β^+ , decadimento beta positivo). In ogni caso la massa è identica a quella dell'elettrone.

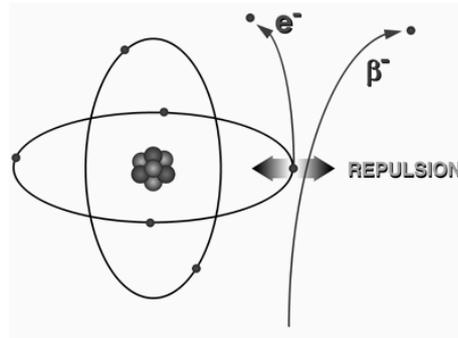
Decadimento Beta negativo

Quando il nucleo è instabile per eccesso di neutroni, un neutrone in eccesso si trasforma in protone secondo la formula: $n^{\circ} = p^{+} + \beta^{-} + \text{antineutrino}$

Il decadimento beta negativo provoca una **transizione isobarica**: il numero **Z** aumenta di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a destra nella tavola di Mendelejev mentre resta invariato il numero **A**. L'energia liberata dalla trasformazione del neutrone in protone diviene energia cinetica dell'elettrone (β^{-}) e dell'antineutrino (particella priva di massa) che vengono espulsi dal nucleo e, ad eccezione dei β emittenti puri, rimane in parte nel nucleo provocandone l'eccitazione e la conseguente diseccitazione con emissione di un fotone gamma. L'energia della particella β^{-} e dell'antineutrino è imprevedibile e si distribuisce in uno spettro continuo di valori secondo una modalità probabilistica, mentre quella del fotone gamma è caratteristica per ogni radionuclide e può assumere solo livelli discreti di energia.

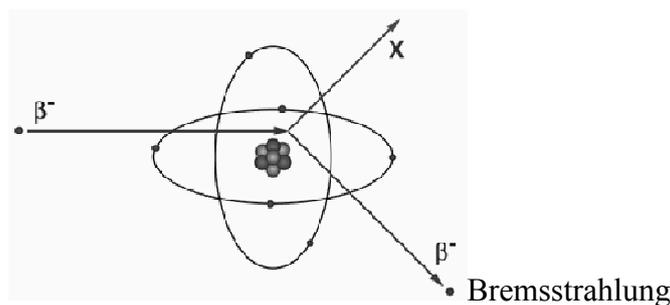
Interazioni con la materia Le particelle β^{-} possono **ionizzare** il mezzo attraversato provocando l'allontanamento di elettroni dalla sfera di influenza nucleare per **repulsione** elettrostatica, a spese della loro energia cinetica (in media 34 eV per ogni evento di ionizzazione in aria). Essendo molto più piccole e elettricamente meno cariche delle particelle alfa, hanno una più bassa densità di ionizzazione e potere penetrante circa 1000 volte quello di una particella alfa di pari energia. Il **range** medio di una particella β^{-} può arrivare fino ad **alcuni metri** in **aria** e fino ad **alcuni millimetri**

nei **tessuti molli**. La **Ionizzazione Specifica in aria** è pari a **42 ionizzazioni / cm** (per una radiazione di 1 MeV).



Ionizzazione da beta meno

Le particelle β^- possono, inoltre, interagire con i campi elettrici nucleari, subendo una deviazione della traiettoria e una riduzione dell'energia cinetica, con la contemporanea produzione di un fotone "X" di **Bremsstrahlung** (frenamento). L'energia dei fotoni di Bremsstrahlung corrisponde alla perdita di energia cinetica della particella β^- e si distribuisce in uno spettro continuo esteso tra 0 e l'energia della radiazione β^- incidente. La produzione di radiazioni X di Bremsstrahlung è maggiore se le radiazioni β^- attraversano materiali con alta densità. Per questo motivo, per la schermatura di radioemittitori β^- emittenti vengono utilizzati materiali plastici con **basso Z**, nei quali non si producono fotoni X di Bremsstrahlung che, essendo molto più penetranti, sarebbero di più difficile schermatura.



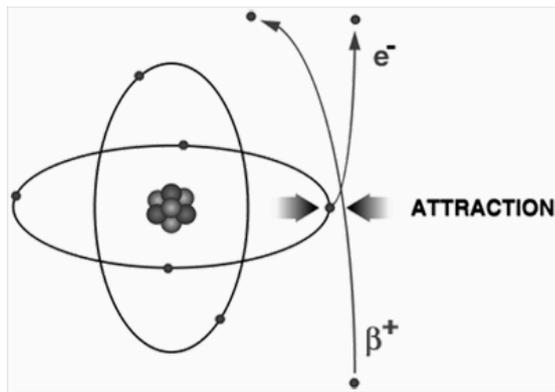
Decadimento Beta positivo

Quando il nucleo è instabile per difetto di neutroni, un protone in eccesso emette una particella β^+ , chiamata positrone, e si trasforma in neutrone secondo la formula: $p^+ = n^0 + \beta^+ + \text{neutrino}$. Il decadimento β^+ è più probabile rispetto alla cattura elettronica per gli elementi con basso numero atomico.

Il decadimento β^+ provoca una transizione isobarica: il numero Z si riduce di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a sinistra nella tavola di Mendelejev mentre resta invariato A.

Interazioni con la materia

Le particelle β^+ possono ionizzare il mezzo attraversato provocando l'allontanamento di elettroni dalla sfera di influenza nucleare per attrazione elettrostatica, a spese della loro energia cinetica (in media 34 eV per ogni evento di ionizzazione in aria). Il potere penetrante è uguale a quello delle particelle β^- . Le particelle β^+ dopo circa $10E-9$ secondi vanno incontro ad **ANNICHILAZIONE**, interagendo con un elettrone. Le due particelle scompaiono e la loro massa è trasformata in 2 fotoni gamma di 0.511 MeV, emessi in direzioni contrapposte.

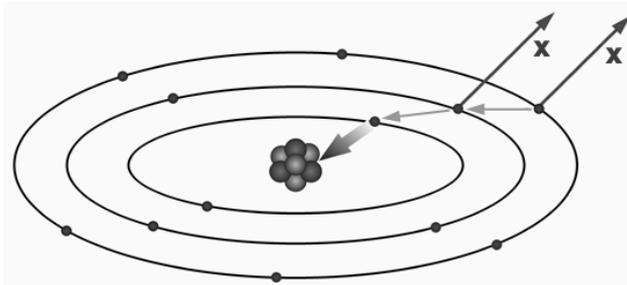


Ionizzazione da beta più

I radionuclidi che decadono per emissione β^+ sono usati in medicina nucleare per la **Tomografia ad Emissione di Positroni (PET)**.

Cattura elettronica

Quando il nucleo è instabile per difetto di neutroni, un elettrone degli orbitali più interni può essere catturato dal nucleo dove un protone si trasformerà in neutrone secondo la formula: $p^+ + e^- = n^0 + \text{neutrino}$. La cattura elettronica è più probabile rispetto al decadimento β^+ per gli elementi con alto numero atomico. La cattura elettronica provoca una transizione isobarica identica a quella causata dal decadimento β^+ : il numero Z si riduce di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a sinistra nella tavola di Mendelejev mentre resta invariato A. La risistemazione degli elettroni orbitali, che si spostano verso l'orbitale più interno rimasto privo dell'elettrone e quindi verso orbite a minore contenuto di energia, provoca la liberazione dell'energia in eccesso sotto forma di radiazioni X "caratteristiche".



Transizione Isomerica

È il passaggio di un isomero, in stato metastabile, alla sua forma più stabile, con liberazione dell'energia nucleare in eccesso mediante l'emissione di un fotone gamma. Rappresenta un cambiamento nello stato energetico del nucleo, senza una modificazione dei componenti dello stesso. Si può considerare come la conclusione, leggermente ritardata nel tempo, di un processo di decadimento che abbia lasciato il nucleo in condizione di **eccesso di energia**. L'ampio uso di radionuclidi metastabili in medicina nucleare è motivato dalla quasi totale assenza di radiazione corpuscolata associata al loro decadimento e dalla loro emivita relativamente breve. Queste caratteristiche sono radiobiologicamente favorevoli e permettono somministrazioni di quantità relativamente elevate con basse dosi di esposizione.

Esempio di transizione isomerica è il decadimento del **^{99m}Tc (Technetium-99m)**, il **radionuclide attualmente più usato in medicina nucleare**. Il ^{99m}Tc deriva dal ^{99}Mo che decade a ^{99m}Tc per emissione β , con tempo di dimezzamento di 2.7 giorni. Il ^{99m}Tc decade a sua volta, per transizione isomerica, a ^{99}Tc , con un'emivita di 6 ore. Sono disponibili in commercio piccoli **generatori $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$** che ne permettono l'impiego in tutti i centri di medicina nucleare.

FOTONI E RAGGI GAMMA

Derivano dalla diseccitazione energetica di nuclei instabili che liberano l'energia in eccesso sotto forma di radiazioni gamma. I fotoni gamma come i fotoni X sono radiazioni elettromagnetiche: non hanno massa né carica e viaggiano alla velocità della luce (300000 km/sec). L'unica differenza tra i

fotoni gamma e i fotoni X è la loro origine: i gamma sono prodotti a seguito di riequilibri energetici del nucleo, mentre gli X originano da riequilibri energetici del mantello elettronico dell'atomo. I fotoni X e gamma trasferiscono la loro energia alla materia che attraversano, per mezzo di complesse interazioni con i nuclei e gli elettroni atomici. Alcune di queste interazioni provocano la fuoriuscita di un elettrone orbitale da un atomo, con conseguente ionizzazione, o la creazione di una coppia elettrone-positrone. A loro volta, questi elettroni producono ionizzazione del mezzo. Il fenomeno della ionizzazione è alla base del meccanismo per il quale le radiazioni ionizzanti producono effetti radiobiologici e possono essere rivelate. Tra le varie possibili interazioni dei fotoni gamma con la materia vi sono: Effetto Fotoelettrico, Effetto Compton, Produzione di coppie, Conversione Interna, Produzione di elettroni Auger

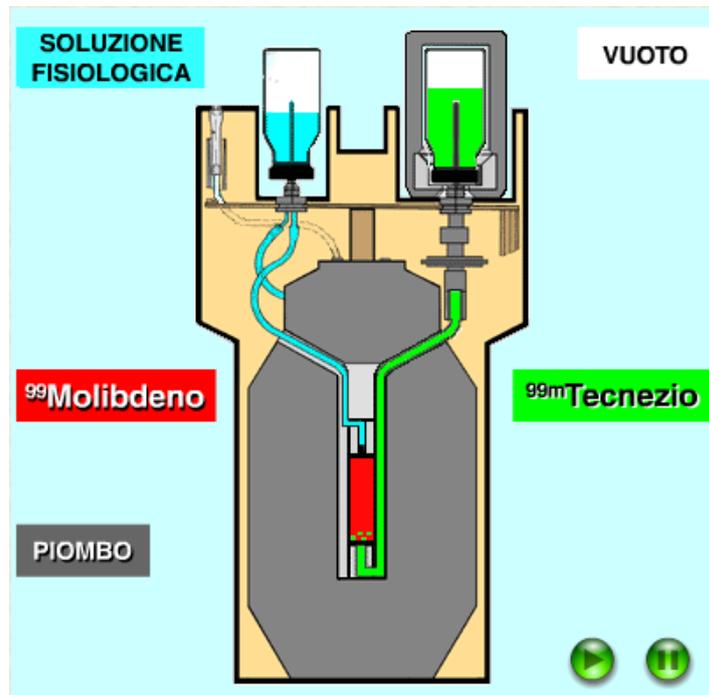
RADIOFARMACI, tratto dal testo di Franco Bui e Diego Cecchin, Dip. Scienze Medico Diagnostiche e Terapie Speciali - Medicina Nucleare, PADOVA

Con il termine "radiofarmaci" si definiscono i preparati "**radioattivi**" con caratteristiche chimico-fisico-biologiche che rispettano tutte le normative della farmacopea ufficiale per la somministrazione nell'uomo. Il loro impiego diagnostico o terapeutico deve quindi essere preventivamente autorizzato, per ogni indicazione e modalità di somministrazione, dalle Autorità Sanitarie, come qualunque altro farmaco. Il primo radiofarmaco introdotto nella pratica clinica è stato lo Iodio-131 (^{131}I), utilizzato nello studio delle patologie tiroidee. Sono stati poi progressivamente sviluppati altri radiofarmaci che, come il ^{131}I , avevano però caratteristiche fisiche e radio-biologiche non ottimali. Questo obbligava ad impiegarne quantitativi molto piccoli, che permettevano di ottenere solo immagini di qualità scadente, o precludevano del tutto la possibilità di ottenerle. L'impulso decisivo alla crescita della medicina nucleare è venuto dalla ideazione del primo generatore di **$^{99\text{m}}\text{Tecnezio}$** , costruito al Brookhaven Lab di New York nel 1958 e introdotto nell'uso clinico nel 1963. Il tecnezio rappresenta più del 90% dei radionuclidi impiegati in diagnostica. Come mai? Per rispondere a questa domanda bisogna ricordare che prima che esso fosse disponibile, tutti i radionuclidi utilizzati venivano prodotti solo in alcuni grandi centri nucleari, prevalentemente negli Stati Uniti e in Canada, da cui venivano spediti per via aerea ai singoli laboratori che li richiedevano caso per caso. Inoltre, i vecchi radionuclidi emettevano, assieme alle radiazioni gamma necessarie per ottenere le immagini, anche radiazioni beta che non servono ai fini diagnostici e sono molto più radiotossiche per i tessuti.

Il Tecnezio emette solo radiazioni gamma, di energia adatta per ottenere immagini, e non contamina l'ambiente perché ha una emivita, cioè il tempo in cui dimezza spontaneamente la sua radioattività, di sole 6 ore: qualunque quantitativo di radioattività dovesse sfuggire nell'ambiente si auto-esaurirebbe in un paio di giorni.

IL GENERATORE $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$

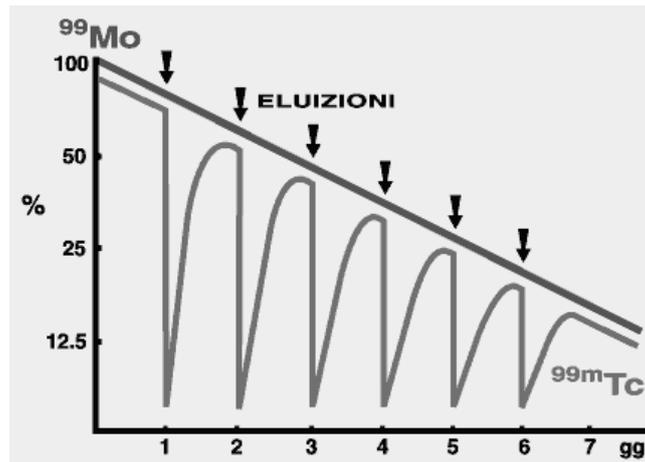
E' qui riportato lo schema della sezione di un tipico generatore di $^{99\text{m}}\text{Tc}$, le cui dimensioni reali sono $\approx 30 \times 15 \times 15$ cm.



Il meccanismo di funzionamento è relativamente semplice. Il Molibdeno (numero atomico 32) e il Tecnezio (numero atomico 43) sono due elementi chimicamente differenti; è quindi possibile identificare una resina "a scambio ionico" con caratteristiche tali da legare in modo indissolubile il Molibdeno, lasciando invece completamente libero il Tecnezio. Una colonnina sterile di tale resina è il "cuore" del generatore $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$; essa, dopo che è stato adsorbito il $^{99\text{m}}\text{Mo}$, viene introdotta in un contenitore di piombo (in grigio nel disegno) di spessore adeguato (alcuni cm) per frenare le radiazioni gamma emesse dal ^{99}Mo , che sono di energia elevata (fino a 1 MeV). Il ^{99}Mo decade, con una emivita di 67.7 ore, a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ che a sua volta decade a $^{99\text{Tc}}$ (cessando di essere radioattivo) con un'emivita di 6 ore. Sulla colonnina, in mancanza di interventi esterni, sono quindi presenti, in equilibrio fra loro, sia il ^{99}Mo (in rosso nel disegno) sia il $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (in verde nel disegno).

La colonnina è collegata all'esterno da due tubicini che, partendo dalle due estremità della stessa, finiscono in altrettanti aghi fissati in due cavità poste sulla parte superiore del generatore. Per eluire il $^{99\text{m}}\text{Tc}$ è sufficiente infilare, in uno dei 2 aghi, un flaconcino in vetro con tappo in gomma perforabile, contenente semplice soluzione fisiologica sterile (in azzurro nel disegno); si infila quindi nel secondo ago un altro flaconcino, simile al primo, ma "vuoto d'aria" (in bianco nel disegno), inserito in un contenitore schermato (piombo o tungsteno). La depressione creata dal vuoto provoca lo svuotamento del flaconcino contenente la soluzione fisiologica che "lava" la colonnina di resina, asportandone il $^{99\text{Tc}}$ che, al termine dell'eluizione, è tutto contenuto nel secondo flaconcino, pronto per essere utilizzato per marcare i vari radiofarmaci.

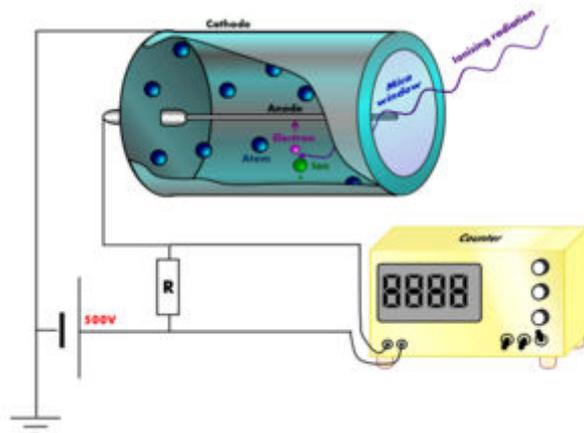
Subito dopo l'eluizione, la colonnina contiene quindi solo ^{99}Mo , ma, poiché il decadimento $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$ continua, incomincia subito a formarsi nuovo $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Il processo di rigenerazione procede con andamento esponenziale e, in circa una emivita (6 ore), si rigenera il 50% del $^{99\text{m}}\text{Tc}$, dopo 12 ore il 75% circa e dopo 18 ore il 90% circa. Dopo 4 emivite (24 ore) ^{99}Mo e $^{99\text{m}}\text{Tc}$ raggiungono nuovamente l'equilibrio e il generatore è pronto per essere nuovamente eluito. Ovviamente, poiché nel frattempo il ^{99}Mo è decaduto, non si otterrà più la stessa quantità di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ del giorno prima, bensì circa il 70%. Il grafico seguente evidenzia l'andamento della concentrazione di ^{99}Mo e $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in un generatore, procedendo ad una eluizione al giorno, per una settimana.



Contatore Geiger

Il **contatore Geiger**, inventato nel 1913 in Inghilterra da [Hans Wilhelm Geiger](#) (1882 - 1945), è uno strumento utile per misurare radiazioni di tipo ionizzante. In particolare può essere usato per misurare le radiazioni provenienti da decadimenti radioattivi. Il cuore del contatore Geiger è costituito da un tubo contenente un gas a bassa pressione (per esempio, una miscela di argon e vapore di alcool alla pressione di 0,1 atmosfere). Lungo l'asse del tubo è teso un filo metallico, isolato dal tubo stesso. Tra il filo e il tubo si stabilisce una differenza di potenziale (sui 1000 volt), attraverso una resistenza dell'ordine del miliardo di ohm.

Funzionamento



Schema di un contatore Geiger

Il contatore Geiger è una **camera a deriva** utilizzata nel limite in cui la tensione satura (ovvero in modo che la tensione prodotta dal passaggio della particella ionizzante non dipenda dall'energia rilasciata da questa - e quindi dal numero delle coppie ione-ione prodotte -). Infatti, quando una radiazione attraversa il tubo e colpisce una delle molecole del gas, la ionizza, creando una coppia ione-elettrone. In questi dispositivi la carica raccolta è indipendente dalla ionizzazione primaria. Infatti oltre alla ionizzazione, si hanno nella camera altri fenomeni quali l'eccitazione seguita da emissione di luce visibile e ultravioletta. Una piccola parte di tali fotoni dà luogo a emissione di fotoelettroni che generano nuova ionizzazione, tramite il processo della moltiplicazione a valanga. L'impulso elettrico risultante sarà testimone dell'avvenuto contatto con una radiazione ionizzante, e sarà contato da un circuito elettronico (i famosi "click" che si sentono). A seconda del numero di conteggi fatti in un'unità di tempo, riusciamo a capire se siamo in presenza di una sorgente radioattiva, e la sua pericolosità. Si ricorda che il contatore Geiger si limita a mettere in relazione il numero di conteggi con la grandezza dosimetrica. Per questo la sensibilità dello strumento varia

significativamente al variare dell'energia della radiazione incidente. L'effetto negativo del tempo morto può essere corretto compensando la risposta via software. È possibile fare ciò solo se è nota la larghezza d'impulso del segnale. Viste le sue ridotte dimensioni, può essere usato anche per dosimetria personale.

La dinamica di questi rivelatori è abbastanza ridotta, a causa del tempo morto durante il quale avviene un conteggio (ordine del millisecondi).

In assenza di una specifica sorgente radioattiva il tubo di Geiger-Müller registra i conteggi dovuti alla radioattività dell'ambiente in cui esso si trova. Si parla del *fondo* di conteggi ambientale. In presenza di una sorgente, il contatore è soggetto a quella parte di radiazione che, emessa dalla sorgente, attraversa il volume del tubo. Quando utilizzato per la misura della radioattività di una sorgente il rivelatore misura, ovviamente, sia la radiazione emessa dalla sorgente sia la radiazione di fondo che non può essere in alcun modo eliminata. Per potere valutare il conteggio netto dovuto alla radioattività della sorgente è necessario effettuare due misure: una in assenza della sorgente (misura di fondo) ed una in presenza della sorgente (misura di sorgente). Il conteggio netto dovuto alla sorgente è ottenuto per sottrazione tra le due misure (ovviamente le due misure devono essere fatte nello stesso luogo poiché la radioattività di fondo cambia da ambiente ad ambiente). La posizione reciproca di sorgente e rivelatore determina la percentuale di radiazione che, emessa dalla sorgente, va a colpire il rivelatore (ed è da esso registrata). **Per questo motivo nel corso di una misura sorgente e rivelatore non devono essere mai spostati.**

Il tubo di Geiger-Müller non registra tutta la radiazione che lo colpisce ma solo quella che ha una certa energia minima (energia minima che è differente a seconda del tipo di radiazione). Per questo motivo non è possibile risalire in modo diretto dal numero di conteggi di sorgente per unità di tempo registrati dal rivelatore al numero di decadimenti per unità di tempo della sorgente (*attività* della sorgente). Il parametro di conversione che consente di passare dall'uno all'altro è detto *efficienza* del rivelatore e deve essere determinato mediante apposite misure con sorgenti calibrate (sorgenti di cui sia nota l'attività). Questo problema non viene in genere affrontato. Tuttavia per poter confrontare i conteggi di due o più rivelatori è necessario conoscere almeno il rapporto tra le loro efficienze.

UNA POSSIBILE PROCEDURA SPERIMENTALE

Scopo di questa esperienza è di studiare quale è la distribuzione statistica che descrive il fenomeno del decadimento radioattivo. Preliminarmente, si richiede anche di verificare che diversi strumenti siano in grado di rilevare numeri compatibili di conteggi. Si misura con i contatore di Geiger-Müller la radioattività di fondo (radioattività ambientale) e la radioattività di una sorgente (potassio) procedendo nel seguente modo.

Verifica e calibrazione dell'apparato sperimentale: poiché in linea di principio diversi rivelatori possono avere efficienze diverse, è necessario confrontare i conteggi registrati dagli strumenti nella stessa posizione. Sfruttando il fatto che il fondo radioattivo è un **fenomeno casuale**, e quindi non ci si aspettano direzioni o posizioni del rivelatore per cui i decadimenti possano essere diversi dalla media, possiamo svolgere delle misure simultanee in posizioni vicine.

Si posizionano diversi contatori in punti vicini. Nel provare il funzionamento dello strumento, si esegue una breve serie di misure di 30 s che fornisca un'idea approssimata del numero di conteggi. In base a questo numero si programma una serie più lunga, costituita da un numero sufficiente di misure di 30 secondi affinché l'errore statistico sia dell'ordine del 1%. Al termine di questa serie si possono confrontare i valori medi μ ottenuti con i vari strumenti e verificare la reciproca compatibilità. Qualora tale compatibilità non sia piena, si può fare l'ipotesi che i contatori abbiano efficienze leggermente diverse. Di conseguenza si possono calcolare i fattori di conversione ϵ tali per cui, moltiplicando ϵ per μ si ottengono tre valori compatibili.

Misura del fondo ambientale eseguita con diversi contatori: in questo secondo punto si studiano con precisione le caratteristiche della distribuzione statistica dei decadimenti. Si posizionano i vari contatori in punti diversi della stanza e li si programmano per effettuare un gruppo di misure. Si registrano per ~ 100 volte il numero di conteggi misurati dal contatore in un intervallo di tempo di 30

s. Alla fine si effettuano le seguenti analisi: (a) per ciascun contatore per ciascuna serie, si determina se le misure obbediscono ad una distribuzione di Poisson, estraendo quindi valori di $\mu(30s)$. (b) Si stabilisce se i valori di μ determinati dai diversi contatori sono compatibili.

Misura di sorgente: se almeno due contatori misurano il fondo ambientale in maniera compatibile, è possibile utilizzarli per la misura con la sorgente. Si lascia uno dei due contatori nella posizione in cui si trovava. Si posiziona la sorgente vicino all'altro contatore. Si impostano i due in maniera tale che registrino, nell'intervallo fra due turni di laboratorio in due giorni consecutivi, per ~1000 volte il numero di conteggi misurati in un intervallo di tempo di 1 min (**durante la misura, ovviamente, sorgente e rivelatore non devono essere mai spostati**). Quindi si confrontano i risultati ottenuti con i due contatori.