

RADIOCHIMICA

a. Struttura e proprietà degli atomi

- Modello atomico, nomenclatura

Gli elementi di cui è formata la terra (e presenti in tutto l'universo) sono costituiti da un nucleo, che contiene un certo numero di neutroni e di protoni condensati in un piccolo spazio, e che determina praticamente l'intera massa dell'elemento, ed un numero di elettroni, uguale al numero di protoni, i quali stanno sotto l'influenza del nucleo e determinano oltre che il volume di ingombro dell'elemento, le proprietà chimiche.

L'equivalenza tra protoni ed elettroni è determinata dalla necessità del bilanciamento tra cariche positive (protoni) e cariche negative (elettroni) che fa sì che la materia in condizioni normali sia elettricamente neutra.

In generale questo sistema di particelle si chiama atomo.

1. Costituenti dell'atomo

Protone	carica	+1
	massa	1.007277 u.m.a.

numero di protoni nel nucleo dell'elemento = n. atomico (**Z**)

Unità di massa atomica (u.m.a.)

u.m.a. = 1/12 della massa del ^{12}C

$$1/12 \times 12/N(\text{numero di Avogadro}) = 1.66 \times 10^{-24} \text{ grammi}$$

Neutrone	carica	0
	massa	1.008665 u.m.a.

numero di neutroni nel nucleo dell'elemento = n.isotopico(**N**)

Z + N = A (numero di massa)

UN NUCLIDE E' DEFINITO DA **Z**, **A** ed ENERGIA NUCLEARE

Elettrone	carica	-1
	massa	0.000549 u.m.a.

Gli elementi chimici si differenziano tra di loro perché i loro atomi contengono un **definito** numero di protoni.

Dal punto di vista macroscopico ogni elemento si differenzia da un altro per il suo comportamento chimico, infatti non ci sono due elementi diversi che abbiano tutte le proprietà chimiche uguali. Ciò significa che le proprietà chimiche sono in diretta relazione con il numero di protoni contenuti nel nucleo di un elemento. Essendo comunque le proprietà chimiche legate al numero ed alla posizione intorno al nucleo degli elettroni, la relazione tra numero di protoni e proprietà chimiche passa attraverso l'uguaglianza tra il numero di protoni e il numero di elettroni.

Ogni elemento è definito pertanto dal numero di protoni e questo viene chiamato **numero atomico (Z)**. Ogni elemento potrebbe essere quindi chiamato con il valore del suo numero atomico.

- *Isotopi degli elementi.*

Buona parte degli elementi sono presenti in natura con vari isotopi, e la loro abbondanza naturale è la stessa su tutta la terra. Per questo motivo le masse atomiche degli elementi sono determinate tenendo conto di questo fatto, permettendo così di trovare una corrispondenza tra la massa sperimentale e quella determinata dalla somma delle masse dei vari isotopi ponderate in base all'abbondanza naturale.

Per gli elementi artificiali $M = P.A.$

- Nuclidi e Radionuclidi, Carta dei nuclidi

Rivolgiamo ora la nostra attenzione sul rapporto neutroni/protoni che esistono nei nuclei dei vari elementi che si trovano in natura.

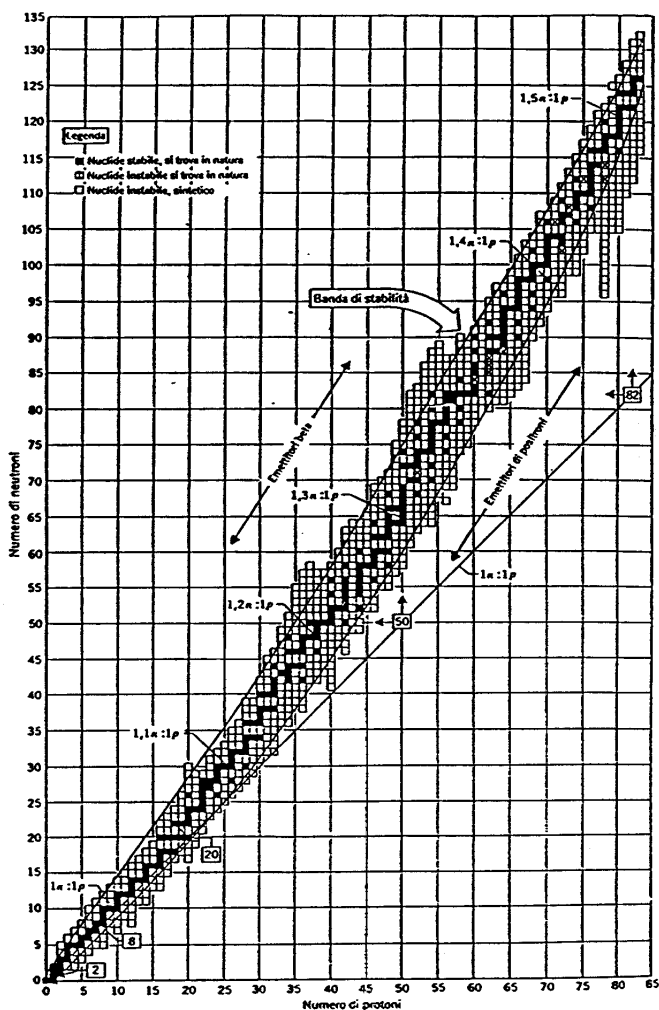
Indicando in un grafico quali sono questi rapporti nei nuclei di cui è stata osservata l'esistenza, si ha l'andamento in Figura 1.

Anche se per ogni numero atomico si osserva l'esistenza di più isotopi, non esistono nuclei con rapporti n/p al di fuori della banda indicata in figura.

Ciò sta a significare che la stabilizzazione energetica che si ha nella formazione dei nuclei necessita sia dei protoni che dei neutroni, che solo alcuni rapporti n/p per ogni numero di protoni consentono la formazione dei nuclei, e che tra questi rapporti ne esistono solo alcuni in cui la stabilizzazione è massima. I nuclei stabili sono confinati al centro della fascia, indicando che il rapporto n/p è più preciso per il raggiungimento della stabilità di un certo elemento, ovvero per un certo valore di Z .

Come per gli elettroni, esistono dei numeri particolari per cui essi formano gusci completi che conferiscono maggior stabilità chimica all'atomo, così esistono numeri di nucleoni particolari che conferiscono maggior stabilità al nucleo: essi sono 2, 8, 20, 28, 50, 82 etc.. I nuclei stabili sono in numero di 274 e la maggior parte di essi (165) hanno un contenuto costituito da un numero pari di protoni e neutroni.

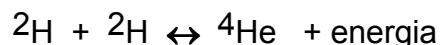
Figura 1. Carta dei nuclidi esistenti (naturali ed artificiali).



- La Formazione degli Elementi

Durante la formazione della terra si sono formati tutti gli elementi naturali. Parecchi di loro si sono prodotti per condensazione spontanea di neutroni e protoni, reazione che svolge energia; altri si sono formati con consumo di parte dell'energia fornita dalle condensazioni spontanee.

La formazione di elementi sempre più pesanti è infatti la causa o l'effetto del raffreddamento delle stelle. L'emissione di energia, ad esempio, da parte del sole, è il risultato della fusione nucleare di due nuclei di idrogeno (deuterio o trizio) in uno di elio.



All'interno del sole questa reazione è in equilibrio con la reazione opposta di scissione dell'elio. Però, la quantità di energia che viene emessa dal sole fa sì che una parte di elio non ritorni ad idrogeno. Il sole, e così tutte le stelle, si raffreddano in concomitanza con la formazione di elio. Quando l'elio è in grande quantità esiste la possibilità che un nucleo di elio condensi con un nucleo di idrogeno con formazione di litio, con svolgimento di energia. Anche questa è una reazione di equilibrio e quindi, la formazione di litio aumenta solo se si ha perdita di energia da parte della stella. Questi processi avvengono con una velocità che ad un certo punto aumenta esponenzialmente fino alla formazione di tutti gli elementi. E' da considerare che quando si formano gli elementi più pesanti, l'energia della stella viene consumata anche in seguito alla loro formazione (vedi il diagramma a pag.13 relativo all'energia legante nucleare in funzione del numero di massa). Ad un certo punto quindi il raffreddamento aumenta molto velocemente, a volte con collassamento della stella stessa (esplosione delle stelle supernove). A questo punto non esistono più le condizioni di fusione nucleare e le parti della stella contenenti gli elementi chimici, sono fredde (pianeti, asteroidi etc.).

- L'Energia Nucleare

L'energia derivante dalla fusione nucleare è legata alla positiva interazione tra le particelle nucleari (nucleoni) nel momento in cui si ha formazione del "legame" tra di esse.

Questa energia viene recuperata direttamente dalla massa dei nucleoni attraverso una trasformazione di massa in energia.

Esempio.

Differenza tra massa di un isotopo e quella ricavata dalla somma dei suoi componenti.

Es. elio-4 ${}^4_2\text{He}$ massa sperimentale 4.002603 u.m.a.
 Massa del nucleo di elio $\rightarrow 4.002603 - 0.001037 = 4.001566 \text{ u.m.a.}$

2 protoni +	2 x 1.007277 = 2.014554 +
2 neutroni =	2 x 1.008665 = 2.017330 =
massa del nucleo di elio	4.031884 u.m.a.
DIFFERENZA	4.031884 -
	4.001566 =
	0.030318 u.m.a.

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

$$\frac{0.030318 \cdot 1.6606 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{-3}}{\Delta m} \cdot \left(300 \cdot 10^8 \right)^2 = 4.54 \cdot 10^{-12} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Joule

Dividendo per quattro si ha l'energia per nucleone: $1.14 \cdot 10^{-12} \text{ J per nucleone}$

e moltiplichiamo per il numero di Avogadro si ha, per l'elio, :

$$2.73 \cdot 10^{+12} \text{ J di energia per mole}$$

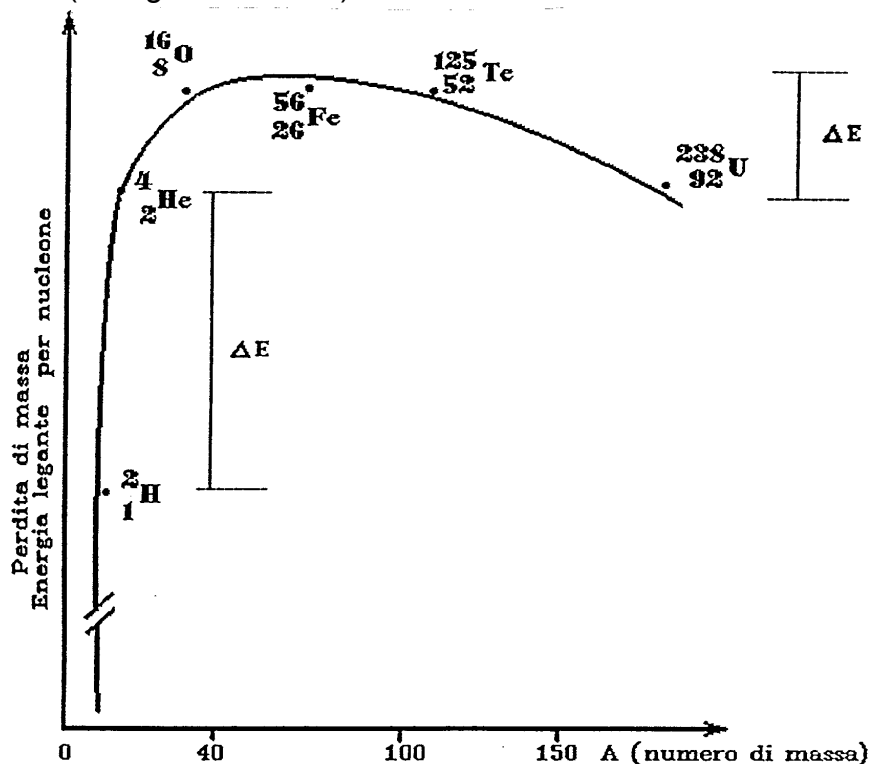
La quantità di energia coinvolta nei legami nucleari è misurabile dalla diminuzione della loro massa al momento della condensazione per mezzo della relazione di Einstein $E = mc^2$.

Si osserva che l'energia nei "legami" tra nucleoni non è la stessa per tutti i nuclei, ma è dipendente dal numero atomico e, per lo stesso numero di protoni, dal numero di neutroni mescolati ad essi; in altre parole la quantità di energia nucleare è legata al numero di nucleoni ed al rapporto n/p nei nuclei.

Nel diagramma energia per nucleone in funzione del numero di massa si osserva che essa aumenta fino a numeri di massa intorno al 56 e poi diminuisce per atomi più pesanti.

Ciò vuol dire che, se nucleoni si uniscono ad elementi a piccolo numero atomico, la diminuzione di massa è molto alta e si ha svolgimento di una grande quantità di energia (energia di fusione), quando nucleoni si uniscono a nuclei ad alto numero atomico, perché si formi un nuovo nucleo è richiesta energia.

Questa energia è evidenziata e recuperata dall'esterno attraverso scissione dei nuclei più pesanti (Energia di fissione).



I reattori nucleari per produzione di energia elettrica possono, in linea teorica, utilizzare entrambe le 'reazioni nucleari', però la reazione di fusione è tuttora difficile da produrre in maniera controllata.

- Isotopi Radioattivi

Quando il rapporto neutroni/protoni è tale da consentire l'esistenza di un elemento, è possibile che l'energia di stabilizzazione dei legami nucleari non sia molto alta. In questo caso il nucleo si può trasformare nella direzione di una maggior stabilizzazione, con l'emissione di massa e/o energia.

Al tempo della formazione della terra molti elementi possedevano nuclei instabili; ai nostri giorni la maggior parte di essi si è trasformata in elementi a nuclei stabili. Sono rimasti solamente gli isotopi degli elementi pesanti Uranio e Torio e tutti gli altri che derivano dalle trasformazioni dei loro prodotti primari.

L'emissione nucleare dei nuclei instabili può essere solo energetica (raggi γ) oppure può essere dovuta a decomposizione nucleare con emissione di particelle con una certa massa ed una definita energia. Di solito l'emissione nucleare da un nucleo instabile non è unica o di un solo tipo, e soprattutto quando vengono emesse particelle (α , β^+ o β^-); per il bilanciamento della massa a volte il nucleo libera piccole particelle dette neutrini.

Le trasformazioni nucleari dei nuclei instabili hanno evidenziato che la suddivisione della massa nucleare in neutroni e protoni è del tutto schematica. Il nucleo è da considerarsi un insieme di un numero considerevole di particelle (quark), che vengono evidenziate e liberate nelle sue trasformazioni e che possono essere considerate presenti al suo interno. Ogni nucleo quindi è un insieme di queste particelle che sono presenti in numero diverso per ogni nucleo, e possono essere liberate spontaneamente in funzione del raggiungimento di una migliore stabilità energetica.

E' anche possibile bombardare i nuclei con una o più di queste particelle che entrano a far parte dei nuclei e vengono a costituire dei nuovi nuclei con specifiche proprietà nucleari, caratteristiche della nuova composizione di particelle nucleari.

Sino ad ora sono stati scoperti circa 3000 nuclidi, e la maggior parte di essi è instabile.

Gli isotopi di elementi con nucleo instabile vengono chiamati radioisotopi o **radionuclidi**. Le trasformazioni nucleari vengono chiamate **decadimenti radioattivi** e le emissioni nucleari sono dette **radiazioni**.

b. Le Radiazioni

Atomi con nuclei instabili emettono radiazioni per passare in una condizione di maggior stabilità. Tutti i decadimenti radioattivi sono quindi spontanei ed infatti avvengono con emissione di energia.

Le emissioni nucleari possono essere di diversi tipi.

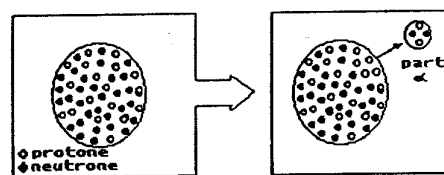
- Radiazioni Alfa (α)

Le radiazioni α sono particelle costituite da due protoni e da due neutroni. Esse non sono altro che atomi di elio privati dei loro elettroni: ${}^4\text{H}$. Portano quindi due cariche positive.

Le caratteristiche principali di queste radiazioni sono l'alta massa e la bassa energia. Da ciò deriva che hanno un percorso breve (nell'aria è di qualche centimetro) ed un alto impatto con la materia. Ciò significa anche che cedono tutta la loro energia alla materia che incontrano, portando alla distruzione di parti delle molecole che la costituiscono. Sono quindi le radiazioni più dannose dal punto di vista biologico.

L'uscita di una radiazione α dal nucleo porta ad una grande modificazione, per cui di solito l'emissione α è seguita da altre emissioni di assestamento con riarrangiamenti successivi dei "legami" nucleari. Particelle α sono inoltre eliminate da nuclei pesanti che raggiungono una maggior stabilizzazione per l'uscita di due neutroni e due protoni.

Emissione α da un nucleo

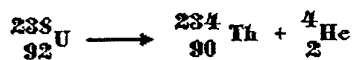


È la particella che pesa di più

Ha velocità 1/10 di quella della luce

Interagisce molto con la materia: ha breve percorso in aria (qualche cm)

Per la perdita di una particella il nucleo dell'atomo emittente diminuisce di quattro il numero atomico diventando un elemento di due posti più basso nella tavola periodica.

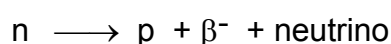


Le radiazioni α hanno tutte energie caratteristiche del decadimento radioattivo da cui sono originate.

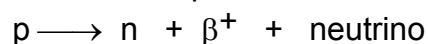
- Radiazioni Beta (β)

Le radiazioni β sono particelle che hanno la massa dell'elettrone e la carica positiva o negativa. Le particelle β possono infatti essere β^+ o β^- . Esse infatti possono essere originate da due processi distinti:

Le β^- derivano dalla trasformazione nucleare neutrone-protone



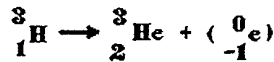
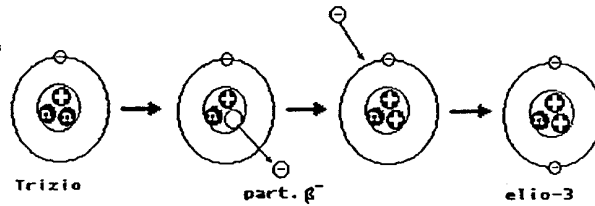
Le β^+ derivano dalla trasformazione protone-neutrone



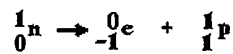
Radiazione β^-

È un elettrone quindi c'è carica 1^-

Emissione di una particella beta



L'emissione di una particella β^- comporta, a livello nucleare, la trasformazione di un neutrone in un protone



Si ha quindi trasformazione di un elemento in un altro che occupa un posto più avanti nella tabella periodica ma che ha lo stesso numero di massa (A)

- Interagisce con la materia meno della particella alfa. Percorre circa 300 cm in aria. L'energia delle particelle β^- non è ben definita: si distinguono per la loro energia massima.

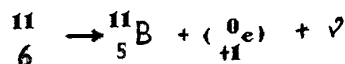
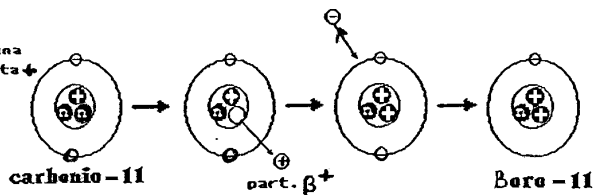
Le particelle β^+ hanno la proprietà di produrre annichilazione. Questo processo consiste nella completa trasformazione della massa di due elettroni in energia. Quando infatti la particella β^+ esce dal nucleo incontra subito un mare di elettroni, e pertanto, possedendo uguale massa e carica opposta di un elettrone, avviene un'attrazione reciproca che porta alla produzione di due radiazioni γ una in opposizione all'altra, con energia pari a 0.511 MeV corrispondente alla massa di un elettrone, secondo la relazione di Einstein $E = mc^2$.

L'annichilazione avviene nel momento in cui il positrone ha ceduto la propria energia alla materia circostante, pertanto il punto di partenza delle due emissioni γ non è il nucleo radioattivo ma esso si troverà intorno al nucleo in una sfera di raggio sempre più grande, maggiore è l'energia del positrone emesso dal nucleo.

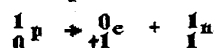
Radiazione β^+

È un elettrone con carica 1^+

Emissione di una particella beta+



L'emissione di una particella β^+ comporta, a livello nucleare, la trasformazione di un protone in un neutrone.

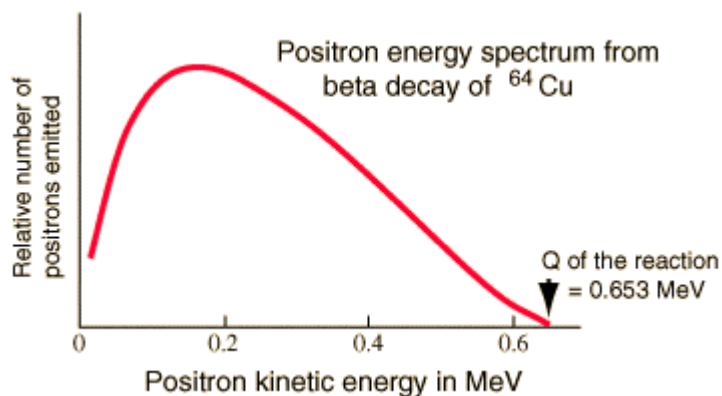


Si ha quindi trasformazione di un elemento in un altro che occupa un posto indietro nella tabella periodica ma che ha lo stesso numero di massa (A)

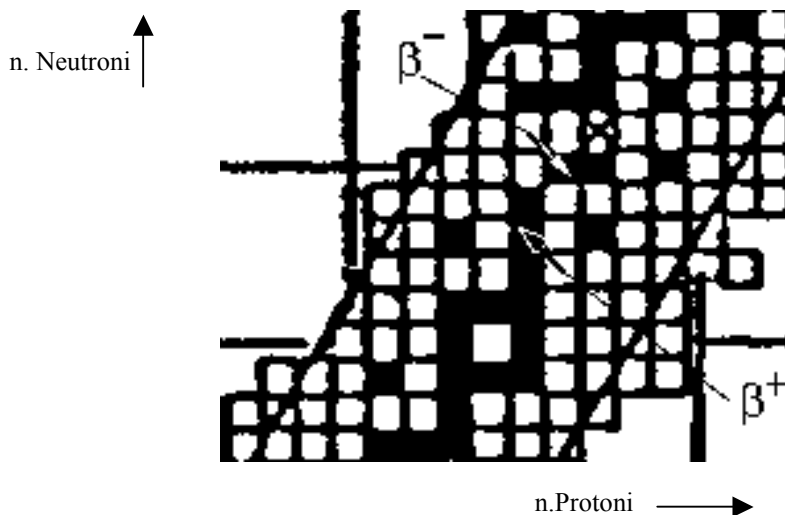
Il positrone è stato la prima dimostrazione dell'esistenza dell'antimateria. Infatti ha la massa uguale all'elettrone ma carica opposta. Quando la materia incontra l'antimateria si ottiene la trasformazione della massa in energia, teorizzata da Einstein nella legge $E = mc^2$.

Le radiazioni β hanno la caratteristica di essere emesse dai nuclei con spettri continui di energia. Lo spettro di energie è di tipo gaussiano, ovvero esisterà un maggior numero di particelle che possiede un'energia media, e non ci sarà nessuna emissione con un'energia superiore ad una energia massima. Tale valore sarà caratteristico di ogni specifica emissione, ovvero di ogni specifico radionuclide emettitore di particelle β .

Anche le emissioni β sono di solito accompagnate da altri riarrangiamenti energetici, in particolare le emissioni β portano anche all'emissione di un neutrino che consente il



riequilibrio della massa nucleare.



I nuclei degli atomi emettono radiazioni per raggiungere la stabilità energetica. Ciò significa che nella banda di stabilità (Figura 1), i nuclei con rapporti neutrone/protone indicati con il quadrato bianco tenderanno a passare a nuclei con rapporti neutrone/protone indicati con un quadrato nero. Pertanto i radionuclidi emettitori di β^- si troveranno a destra nella banda di stabilità e quelli emettitori di β^+ si troveranno a sinistra. Le emissioni β^- infatti portano ad un aumento di una unità dei protoni ed una diminuzione di un'unità dei neutroni (freccia bianca), mentre le emissioni β^+ portano ad un aumento di un'unità dei neutroni ed una diminuzione di un'unità dei protoni (freccia nera).

- *Cattura elettronica (EC)*

Quando un nucleo ha un basso rapporto N/Z rispetto al nucleo stabile, come alternativa all'emissione β^+ , può decadere attraverso la così detta cattura elettronica (EC). L'EC consiste nella cattura da parte del nucleo di un elettrone del guscio più interno dell'atomo con trasformazione di un protone in un neutrone ed emissione di un neutrino. Perchè questo processo avvenga, la differenza di energia nucleare da dopo a prima della trasformazione non deve superare 1.02 MeV, per energie superiori di solito avviene un'emissione β^+ . La differenza di energia apparirà all'esterno del nucleo come raggi X.

- Radiazioni Gamma (γ)

Le radiazioni γ sono onde elettromagnetiche e come tali trasportano energia secondo l'equazione di Plank, $E = h\nu$. Essi sono quindi fotoni, privi di massa e non provocano nel nucleo variazioni di Z o di A ma solo di contenuto energetico. Normalmente sono emissioni successive a trasformazioni nucleari con emissioni di particelle α o β che lasciano il nucleo energeticamente eccitato.

Lo stato eccitato si può rilassare sino al suo stato fondamentale, per transizione isomerica (IT) emettendo l'energia acquistata sotto forma di radiazione γ . Quando lo stato eccitato vive abbastanza a lungo, esso è facilmente evidenziato e si può chiamare stato metastabile (es ^{99m}Tc) dove m sta per metastabile.

Tutte le radiazioni, oltre che per il tipo si distinguono le une dalle altre per la loro energia di emissione. All'energia delle radiazioni γ è associata un'onda elettromagnetica ad una ben precisa lunghezza d'onda e frequenza.

Es. Qual'è la lunghezza d'onda della radiazione γ di energia 0.048 MeV?

$$E = 0.048 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \times 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J} / 1 \text{ eV} = 0.077 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

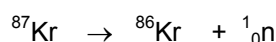
$$\lambda = hc/E = 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ J sec} \times 3.00 \cdot 10^8 \text{ m sec}^{-1} / 0.077 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 0.26 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\lambda = 0.26 \text{ Å}$$

- Altre emissioni radioattive

Neutroni

Raramente dei nuclei emettono neutroni. Un esempio è dato dal Krypton-87 che libera neutroni per dare Krypton-86. Anche l'Uranio-235 libera neutroni provocando fissione nucleare!



Raggi X

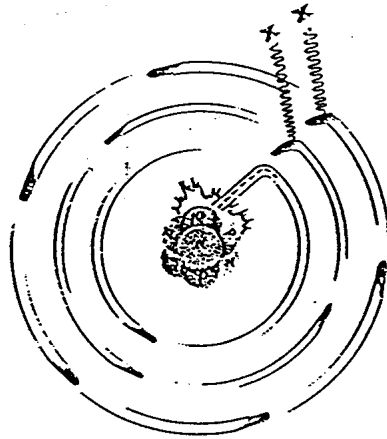
Alcuni nuclei si possono stabilizzare per 'cattura elettronica' o 'cattura K'. Essa consiste nella cattura da parte del nucleo di un elettrone interno del suo atomo con produzione di raggi X.



I raggi X sono onde elettromagnetiche come le radiazioni γ , ma, mentre le radiazioni γ vengono emesse per diseccitazione nucleare, i raggi X sono prodotti da diseccitazione elettronica.

Elettroni Auger

Non sono elettroni emessi dal nucleo (β^-) ma dall'atomo per effetto della emissione di raggi γ o X. Tali onde elettromagnetiche, quando hanno energia sufficiente, provocano l'espulsione di un elettrone. Se l'espulsione è provocata da una emissione γ dovuta a transizione isomerica, il risultato non è una emissione γ ma l'emissione di un elettrone a bassa energia. La reazione nucleare si chiama conversione interna (IC). La conversione interna si ha con fotoni a bassa energia e con i raggi X. Gli elettroni che vengono espulsi per effetto dei raggi X sono chiamati elettroni Auger, dal suo scopritore. Se questi elettroni sono espulsi da gusci interni, la loro espulsione è accompagnata da emissione di raggi X.



- Cattura elettronica. Il nucleo attrae un elettrone orbitale, il quale si combina con un protone per formare un neutrone. Il processo successivo di occupazione del posto orbitale risultante vacante determina la emissione di una radiazione X caratteristica.

c. Il Decadimento Radioattivo

L'espulsione di energia da parte dei nuclei instabili, sotto forma di particelle o di fotoni, segue le leggi probabilistiche. Ogni radionuclide decade con una velocità caratteristica ed, ancor più, ogni emissione radionuclidica segue la propria velocità di trasformazione. Per una singola trasformazione nucleare che considera una certa quantità di radionuclidi, alcuni di essi emetteranno la radiazione subito, altri dopo un certo tempo seguendo la legge di decomposizione delle sostanze chimiche. La velocità di decadimento si potrà misurare sperimentalmente se uno strumento di misura riuscirà a determinare la quantità di isotopo radioattivo ancora presente con il passare del tempo.

- Legge di decadimento radioattivo

E' stato dimostrato che ogni decadimento radioattivo segue la legge:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

Infatti considerando la decomposizione: $A \rightarrow B + \text{Radiazione}$ si avrà che, per una reazione che segue la legge cinetica del 1° ordine, $v = K[A]$. Ponendo, per le decomposizioni radioattive, $K = \lambda$ e $[A] = N$ si ha

$$v = -dN/dt = \lambda N_t$$

integrando l'equazione : $+ dN/dt = - \lambda N_t$ da 0 a t

$$\int (dN/dt) = - \int \lambda N_t \quad \text{si avrà} \quad \ln N_t = - \lambda t + A$$

al tempo zero ($t = 0$) $\ln N_t = \ln N_0 - \lambda t$ con N_0 = numero di nuclei
al tempo 0

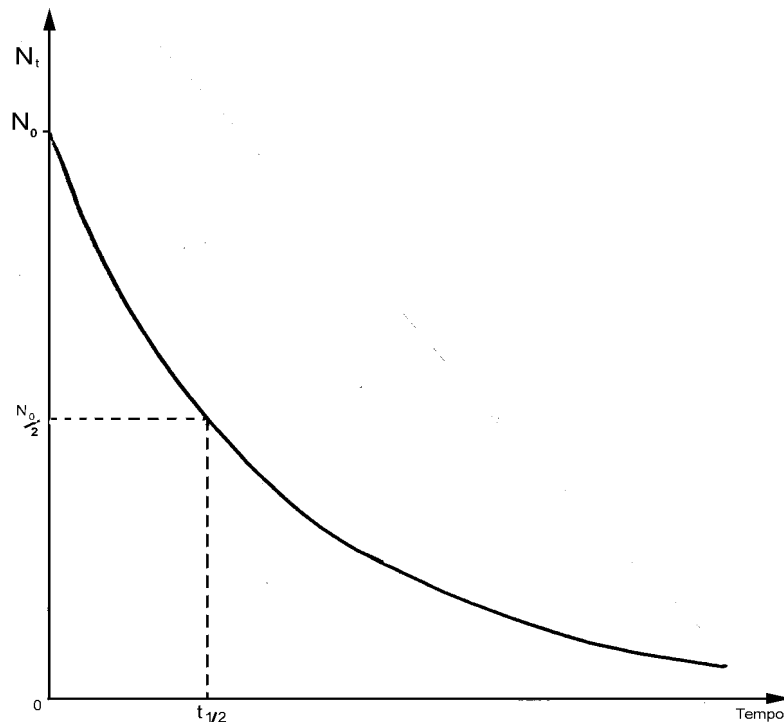
$$\ln (N_t / N_0) = - \lambda t$$

e quindi :

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

Questa è la **LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO** che segue ogni decomposizione radioattiva.

Diagramma della legge di decadimento



Si può osservare che ogni radionuclide mostra, nella trasformazione nucleare, delle grandezze che lo caratterizzano:

1. Il tipo di radiazione che emette (α , β , γ etc.).
2. Una definita energia della radiazione emessa ($E_{\max}$ per β^- o β^+).
3. Un valore caratteristico della costante di decadimento (λ).

- $t_{1/2}$ = *Tempo di dimezzamento*.

Il tempo di dimezzamento, di semitrasformazione o di emivita, è il tempo richiesto affinché metà degli atomi presenti inizialmente decada o liberi radiazioni. Il $t_{1/2}$ si può osservare facilmente nel diagramma della legge di decadimento, da cui si può anche vedere che il suo valore è dipendente dal valore della costante di decadimento (λ).

Relazione tra λ e $t_{1/2}$: da $\ln (N_t/ N_0) = - \lambda t$

$$- \ln 1/2 = \lambda t_{1/2}$$

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

$$0,693 = \lambda t_{1/2} \quad \text{ovvero} \quad T_{1/2} = 0,693/ \lambda$$

da cui si osserva che λ è inversamente proporzionale a $t_{1/2}$.

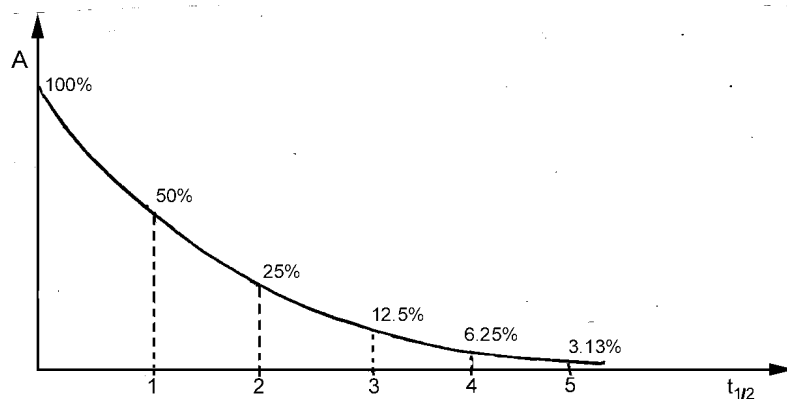


Diagramma che mostra come cala l'attività dopo alcuni tempi di dimezzamento.

Il $t_{1/2}$ è un altro parametro che assieme all'attività specifica è importante perché ci dà un'indicazione della dose di attività che una persona assorbe quando è esposta ad una sostanza radioattiva.

- *Vita media effettiva.*

Per verificare la dose assorbita per contaminazione radioattiva non è solo necessario conoscere il tempo di emivita fisico (t_f) ma bisogna introdurre anche un altro parametro importante, il tempo di emivita biologico (t_b).

Il tempo di Emivita Biologico (t_b). è il tempo necessario per eliminare dal corpo il 50%, ovvero metà, dell'attività assunta al tempo zero.

Per sapere dopo quanto tempo l'attività entro il corpo è metà rispetto a quella assunta al tempo zero si deve calcolare il tempo di emivita effettivo (t_e).

Il tempo di Emivita Effettivo (t_e) è il tempo necessario perché l'attività del radioisotopo nell'organismo si riduca al 50% della dose iniziale.

$$t_e = (t_f * t_b) / (t_f + t_b)$$

Il tempo di emivita fisico di un certo radionuclide è noto; il tempo di emivita effettivo è misurabile con uno strumento che misura l'attività nel corpo nel tempo, e quindi si può ricavare il tempo di emivita biologico.

$$t_b = (t_f * t_e) / (t_f - t_e)$$

Esso si può anche ricavare per organo se viene misurata la variazione dell'attività nell'organo nel tempo. In questo caso il tempo di emivita effettivo dà un'indicazione della clearance dell'attività nell'organo.

Uno dei radionuclidi più pericolosi è il **plutonio** perché esso possiede un t_f molto grande, si fissa sulle ossa (t_b molto lungo) ed, in più, è un emettitore α (il rischio di generare un cancro alle ossa è elevatissimo). Il plutonio è pertanto pericoloso, nonostante la bassa solubilità in acqua delle specie presenti in natura, perché, se arriva nella catena alimentare umana, viene accumulato nel corpo indefinitamente depositando al suo interno tutta l'energia delle particelle α che emette.

- *Attività*

$$A_t = C(dN/dt) = C\lambda N_t$$

L'Attività è quindi definita come il numero di disintegrazioni nell'unità di tempo.

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad \lambda = 0.693 / t_{1/2} \quad A_t = A_0 e^{-0.693t/t_{1/2}}$$

Questa relazione consente di ricavare, noto il $t_{1/2}$, l'attività di una certa quantità di radionuclide in ogni momento se viene misurata la sua attività in un certo momento (t_0).

Esempio: Un campione di ^{131}I ha un'attività di 10 mCi il 14 gennaio alle ore 12. Quale sarà l'attività il 16 gennaio alle ore 14? ($t = 50$ h, $t_{1/2} = 194$ h)

$$A_t = 10 \cdot e^{-0.693 \times 50/194} = 8.4 \text{ mCi}$$

Unità di Misura dell'Attività:

Curie (Ci) = $3.7 \cdot 10^{10}$ decomposizioni per secondo (dps). Ovvero la radioattività di un grammo di Radio misurati dai coniugi Curie.

Sottomultipli : mCi = $3.7 \cdot 10^7$ dps (Bq) $\mu\text{Ci} = 3.7 \cdot 10^4$ dps (Bq) **1mCi = 37MBq**

Bequerel (Bq) = 1 dps. Unità di misura del Sistema di Misura Internazionale

Multipli : KBq = 10^3 dps MBq = 10^6 dps **1Bq = $27 \cdot 10^{-12}$ Ci**
1MBq = 27 μ Ci

- Attività Specifica (α)

Rappresenta le disintegrazioni in una quantità unitaria di radionuclide.

Es. Bq/g ; KBq/mole ; mCi/m.mole ; Ci/g

Può essere intesa per unità di radionuclide e quindi è in relazione con il suo $t_{1/2}$ (inversamente proporzionale), oppure per unità di elemento, se l'isotopo attivo dell'elemento è presente insieme ad altri isotopi non attivi, oppure ancora per unità di composto, se l'elemento è un componente di una molecola contenente altri elementi.

Nel caso che l'attività specifica sia intesa per grammo di sostanza, nota l'attività specifica di una certa sostanza, si può sapere l'attività di un campione di essa con una semplice pesata.

Esempio. Si determina (con uno strumento che misura l'attività) l'attività specifica (α) della cloromerodrina- ^{197}Hg il lunedì mattina alle ore 8.00 che risulta essere 200 $\mu\text{Ci/mg}$. Il $t_{1/2}$ del ^{197}Hg = 48 h.

Se si devono fare iniezioni di 2 mCi quanta sostanza si deve pesare?

La risposta è: Il Lunedì mattina 10 mg. Il Mercoledì alle ore 8.00 è passato un tempo di emivita per cui l'attività specifica sarà dimezzata (100 $\mu\text{Ci/mg}$) e quindi per iniettare 2 mCi saranno necessari 20 mg. Così, il Venerdì alle ore 8.00 per iniettare 2 mCi saranno necessari 40 mg. Perché $\alpha = 50 \mu\text{Ci/mg}$., etc.

Calcolo della Massa, nota l'Attività

Per calcolare la massa di una radionuclide associata alla sua Attività ad un certo tempo t , si deve conoscere la sua costante di decadimento oppure il tempo di emivita.

Se si vuole calcolare la massa associata ad 1 mCi di ^3H , ^{14}C , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{131}I si deve determinare il numero di nuclei radioattivi dei vari radionuclidi che corrispondono all'attività di 1 mCi.

$$A = \lambda N_t \quad N_t = A / \lambda \quad \lambda = 0.693/t_{1/2}$$

$$N_t = A t_{1/2} / 0.693$$

La formula da applicare per un attività di 1 mCi sarà:

$$N_t = (3.7 \cdot 10^7 \text{ dps})(t_{1/2} \cdot 3.14 \cdot 10^7 \text{ sec}) / 0.693$$

se $t_{1/2}$ di ^3H = 12.26 y, $t_{1/2}$ di ^{14}C = 5730 y, $t_{1/2}$ di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ = 6.02 h, $t_{1/2}$ di ^{131}I = 8.05 d, e $t_{1/2}$ di ^{99}Tc = 2×10^5 anni :

$$\begin{array}{lcl} \text{si avrà} & N_t = & \\ & 2.06 \cdot 10^{16} & \text{per } ^3\text{H} \\ & 9.6 \cdot 10^{18} & \text{per } ^{14}\text{C} \\ & 1.25 \cdot 10^{12} & \text{per } ^{99\text{m}}\text{Tc} \\ & 3.71 \cdot 10^{13} & \text{per } ^{131}\text{I} \\ & 3.52 \cdot 10^{20} & \text{per } ^{99}\text{Tc} \end{array}$$

essendo massa = $N_t \cdot MA \cdot 1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$

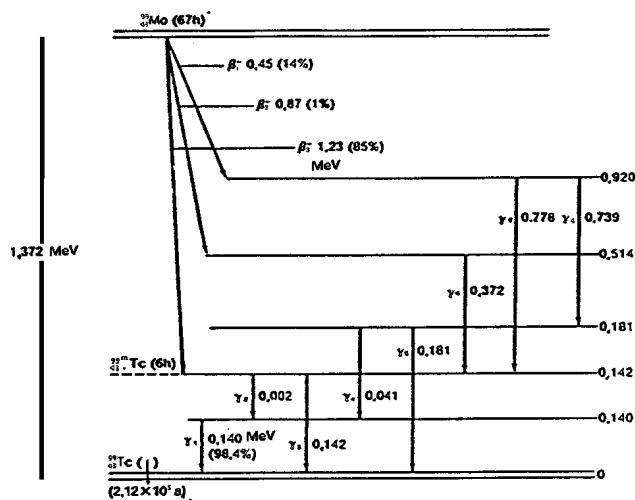
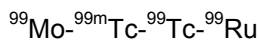
si avrà che ad 1 mCi di attività corrisponderanno :

0.1 μg di ^3H
22 mg di ^{14}C
0.20 ng di $^{99\text{m}}\text{Tc}$
8.1 ng di ^{131}I
57.85 mg di ^{99}Tc

- Decadimenti sequenziali

La maggior parte dei radionuclidi nella loro trasformazione nucleare producono un altro nuclide radioattivo prima di raggiungere la stabilità nucleare. In altre parole, si osserva comunemente che il decadimento radioattivo dei radionuclidi è complesso, e consta di varie trasformazioni che possono essere riassunte in uno schema di decadimento radioattivo.

Esempio:



Ogni trasformazione è caratteristica del radionuclide in oggetto e seguirà la legge di decadimento con una caratteristica λ .

Se si considera uno schema di decadimento costituito da due trasformazioni definite da λ_1 e λ_2 si avrà:



$$A_1 = -dN_1/dt = \lambda_1 N_1 \quad N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad [1]$$

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$N_2 = (\lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2)) N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad [2]$$

$$= 0 \quad \text{se } \lambda_1 > \lambda_2$$

$$= 0 \quad \text{se } \lambda_1 < \lambda_2$$

$$= 0 \quad \text{se } N_2^0 = 0 \quad \text{ovvero quando} \quad \text{a } t=0 \text{ si ha solo A}$$

se $\lambda_1 < \lambda_2$ si ha l'**equilibrio transitorio** $A_1/A_2 = 1 - \lambda_1/\lambda_2$

se $\lambda_1 > \lambda_2$ si ha il **non equilibrio**

se $\lambda_2/\lambda_1 \geq 10^4$ si ha l'**equilibrio secolare** $A_1/A_2 = 1$

Se si considera una coppia di radionuclidi (padre-figlio) è possibile ricavare il rapporto fra il numero di atomi del padre e del figlio al tempo t in base alle equazioni [1] e [2] e :

$$N_1/N_2 = (\lambda_2 - \lambda_1/\lambda_1) (1/1 - e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t})$$

Esempio: $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc} + ^{99}\text{Tc}$

$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ $\lambda_1 < \lambda_2$ equilibrio transitorio

$^{99}\text{Mo}/^{99}\text{Tc}$ $\lambda_1 > \lambda_2$ non equilibrio

$^{99\text{m}}\text{Tc}/^{99}\text{Tc}$ $\lambda_1 > \lambda_2$ non equilibrio

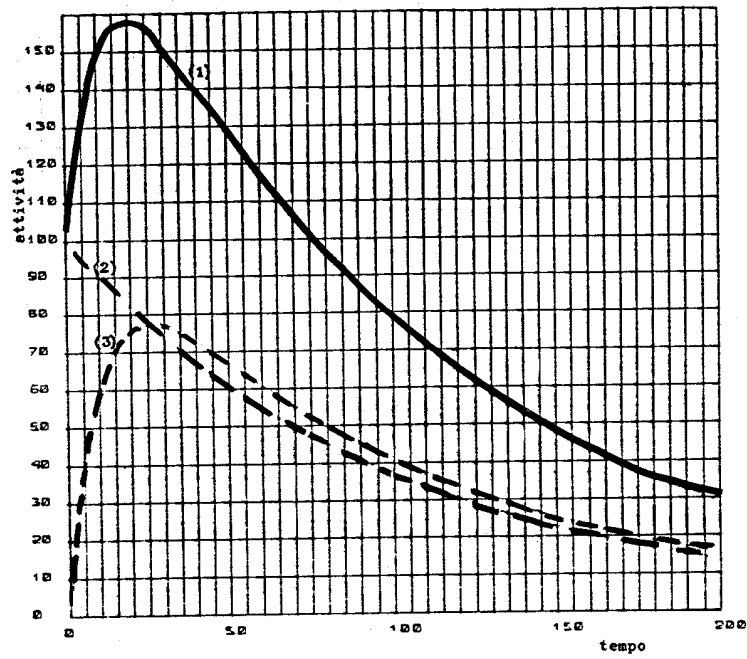


Figura 1. (1) Curva di attività totale, (2) curva di attività del radionuclide-padre, (3) curva del radionuclide-figlio per $N_1^0=100$ e $N_2^0=0$. Il grafico si riferisce ad una coppia per cui $\lambda_1/\lambda_2 = 0.1$. Stato di equilibrio transitorio

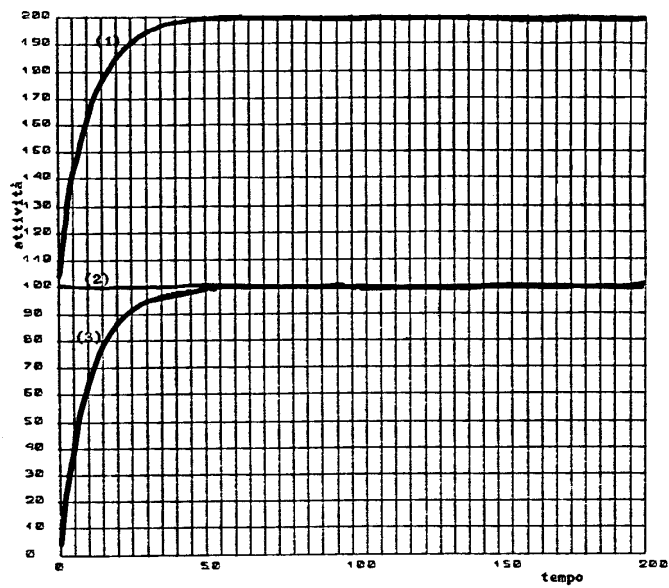


Figura 2. (1) Curva di attività totale, (2) curva di attività del radionuclide padre, (3) curva di attività del radionuclide figlio per $N_1^0 = 100$ e $N_2^0 = 0$. Il grafico vale per il rapporto $\lambda_1/\lambda_2 = 10^{-5}$. Stato di equilibrio secolare

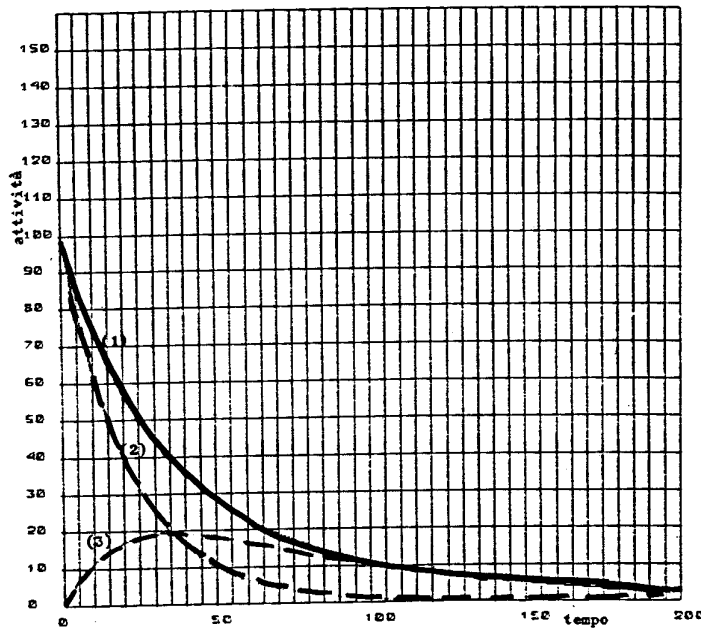


Figura 3. (1) Curva di attività totale, (2) curva di attività del radionuclide padre, (3) curva di attività del radionuclide figlio per $N_1^0 = 100$ e $N_2^0 = 0$. Il grafico vale per il rapporto $\lambda_1/\lambda_2 = 3$. Stato di non equilibrio

d. Interazione delle radiazioni ionizzanti con la materia

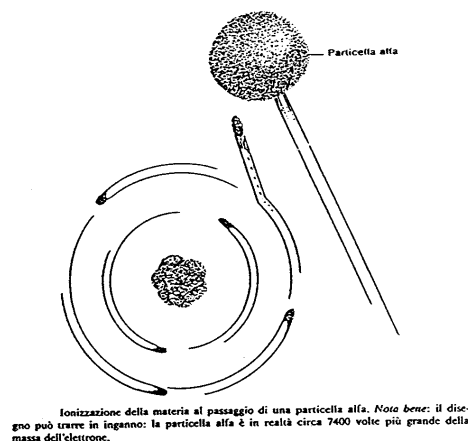
Le radiazioni che vengono emesse in seguito ad una trasformazione (disintegrazione) nucleare incontrano gli atomi della materia circostante interagendo con essi in diversi modi in dipendenza dal tipo di radiazioni emesse e dalla loro energia. Ogni interazione produce comunque ionizzazione dell'atomo per cui tali radiazioni vengono chiamate **Radiazioni Ionizzanti**.

Le interazioni con la materia sono la causa degli effetti nocivi delle radiazioni ionizzanti sugli esseri viventi, ma sono anche utilizzate per la radioterapia dei tumori e sono alla base della loro rilevabilità tramite strumentazioni appropriate.

- Interazione con gli atomi

Particelle α

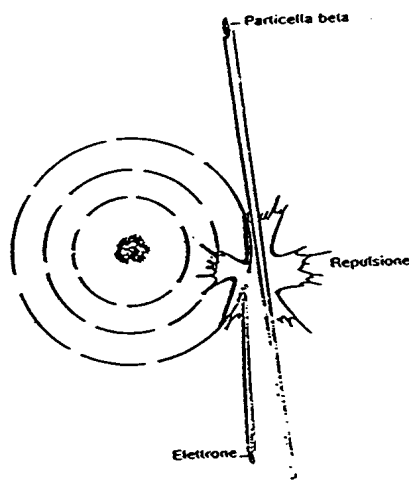
Le particelle α sono grosse e lente per cui hanno un impatto notevole con la materia alla quale cedono subito tutta la loro energia. Essendo costituite da due neutroni e due



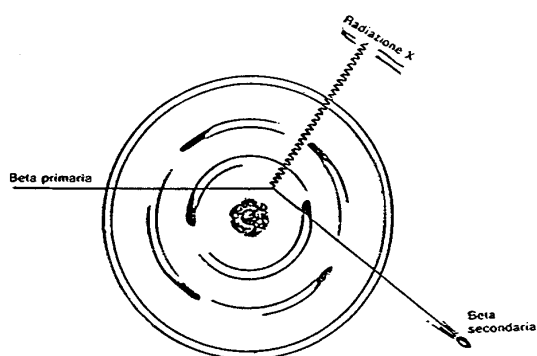
protoni, sono cariche positivamente e, quando avranno ceduto la loro energia, tenderanno ad acquistare due elettroni per diventare un atomo di elio. In questo modo esse provocheranno molecole costituite da ioni positivi.

Particelle β^-

Le particelle β^- sono elettroni che escono dal nucleo con energia variabile ed incontrano la materia con espulsione di elettroni in seguito a repulsione degli elettroni più esterni degli atomi.



Le particelle β^- ad alta energia che incontrano atomi di elementi pesanti provocano anche un altro effetto sulla materia, l'effetto **Bremßstrahlung**, ovvero di rinculo. Tale effetto consiste nella emissione di raggi X dovuti all'espulsione da parte della radiazione β^- di un elettrone interno. La ionizzazione provoca uno successivo spostamento di un elettrone esterno nel posto occupato dall'elettrone espulso con liberazione di energia sotto forma di onde elettromagnetiche nella regione di energia dei raggi X.



Bremsstrahlung. Una particella beta passa vicino al nucleo di un atomo e ne è attratta e rallentata. Ne consegue una perdita di energia ed un cambiamento di direzione. Questa perdita di energia è espressa come radiazione X o radiazione di Bremsstrahlung.

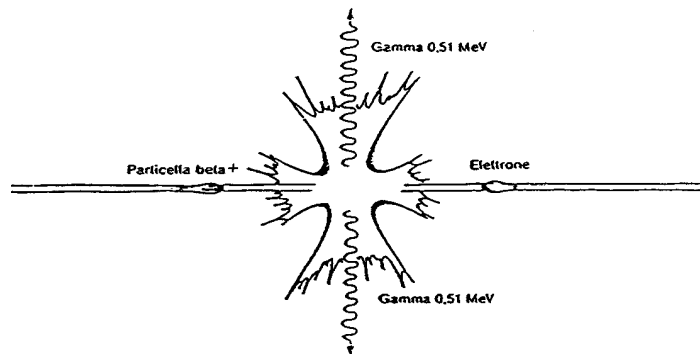
Tale effetto si evidenzia nel piombo quando questo è utilizzato come schermatura per la protezione dalle radiazioni. Quando si manipolano radionuclidi emettitori di β^- la protezione con schermi di piombo è quindi controproducente perché le β^- vengono schermate ma dallo schermo di piombo vengono emessi raggi X! Si ovvia all'inconveniente usando per la schermatura lamine di boro o di plastica, che, essendo costituite di elementi a basso peso atomico, non producono effetto Bremßstrahlung.

Le particelle β^- interagiscono in maniera significativa con la materia essendo radiazioni corpuscolari.

Particelle β^+ (positroni)

Le particelle β^+ hanno la stessa massa degli elettroni ma carica opposta (negativa). Quando vengono emesse dal nucleo le radiazioni β^+ entrano subito in un mare di elettroni e, dopo un percorso che è direttamente proporzionale all'energia della radiazione emessa, collidono con gli elettroni per dare il così detto processo di **Annicillazione**.

L'effetto dell'annicillazione consiste nella produzione di due radiazioni γ , emesse



Reazione di annicillazione. Un positrone entra in collisione con un elettrone. Entrambe le particelle sono annullate e convertite in energia (due fotoni gamma, ciascuno con una energia di 0,511 MeV).

Un elettrone che si stacca dalla sua orbita. Ne deriva una radiazione gamma secondaria di minore energia. Dal successivo fenomeno di occupazione del posto orbitale vacante deriva una radiazione X caratteristica.

contemporaneamente in direzione opposta l'una all'altra, di energia pari a 0.511 MeV, esattamente corrispondenti alla trasformazione in energia della massa di un elettrone. Il calcolo si esegue applicando la relazione di Einstein $E = mc^2$. I due fotoni di energia 0.511 MeV si dipartono dal punto di annicillazione con un angolo di 180° perché il positrone e l'elettrone hanno geometria sferica e quindi la liberazione dei due fotoni non può avere direzioni casuali.

L'emissione di β^+ da parte di un radionuclide è pertanto determinata indirettamente dalla determinazione delle due γ in coincidenza alla precisa energia di 0.511 MeV.

I radionuclidi emettitori di positroni sono utilizzati nella tecnica PET (vedi avanti).

Radiazioni γ

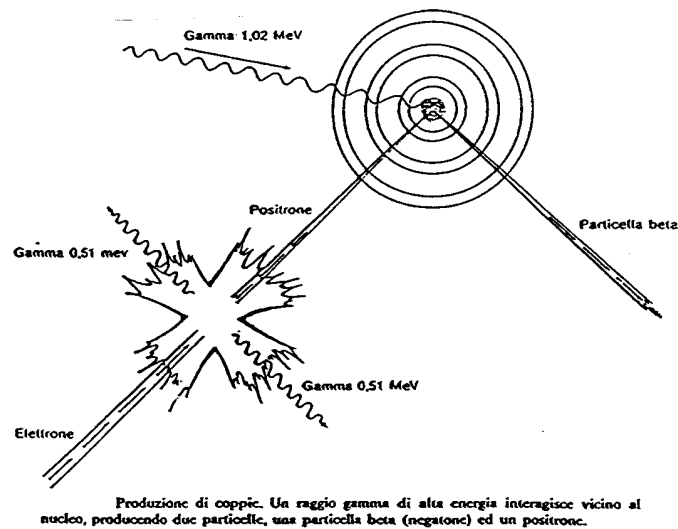
Le radiazioni gamma non sono di natura corpuscolare ma veri e propri fotoni e quindi considerate onde elettromagnetiche.

Le onde elettromagnetiche interagiscono con la materia in vari modi in funzione della loro energia.

Le radiazioni γ interagiscono con gli elettroni intorno agli atomi perché anch'essi hanno comportamento ondulatorio.

Effetto Compton. Se la radiazione ha energia bassa colpisce la nube elettronica esterna con espulsione di un elettrone e conseguente ionizzazione. L'energia della radiazione però non viene assorbita completamente e un fotone ad energia inferiore a quello che arriva continua il suo percorso fino ad una nuova interazione. Questo è il così detto effetto Compton. L'effetto Compton origina pertanto una serie diffusa di radiazioni γ a bassa energia emesse dalla materia irraggiata da radiazioni γ .

2. Effetto fotoelettrico Se la radiazione ha energia elevata riesce a superare la nube elettronica esterna all'atomo. La ionizzazione deriva pertanto dall'espulsione di un elettrone interno. L'energia viene assorbita completamente e, per il passaggio di un elettrone esterno nel vuoto lasciato dall'elettrone espulso, l'atomo emette raggi X. E' questo l'effetto fotoelettrico, che viene evidenziato se la materia è posta in campo elettrico.



3. Produzione di coppie. Se le radiazioni γ riescono a raggiungere il nucleo dell'atomo che colpiscono si ha una vera e propria reazione nucleare con produzione di una radiazione β^+ ed una β^- . Di solito il nucleo diventa instabile con trasformazioni dipendenti dal radionuclide prodotto. Tale effetto è evidenziato indirettamente dalla rilevazione delle particelle β che vengono emesse.

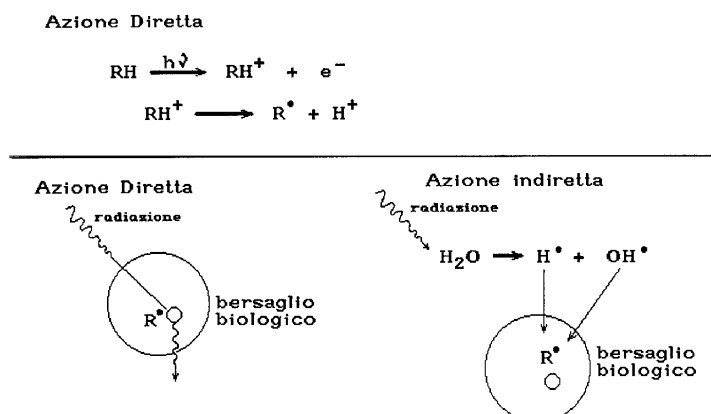
La determinazione dell'interazione delle varie radiazioni con la materia è alla base della costruzione della strumentazione per la rilevazione delle diverse radiazioni, e per la loro determinazione qualitativa e quantitativa. La strumentazione per la determinazione delle radiazioni verrà trattata più avanti.

- Interazione con la materia vivente

Le radiazioni emesse dai nuclei radioattivi sono tutte ionizzanti. Ciò significa che esse hanno la capacità di strappare un elettrone da un atomo o da una molecola. Questo vale anche per le sostanze organiche, ovvero per le sostanze che costituiscono la materia vivente. La sostanza che viene colpita produce un ione positivo, per emissione di un elettrone, e quindi viene destabilizzata, provocando una trasformazione chimica per interazione con un'altra sostanza o per decomposizione (rottura di un legame) (**Azione diretta**).

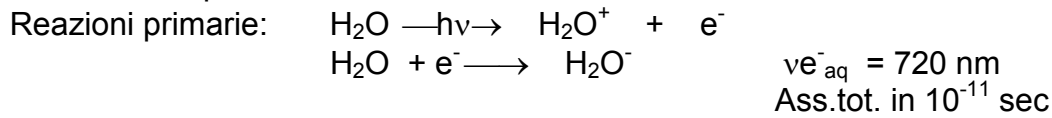
Essendo le molecole organiche costituite da molti legami C-H, O-H, N-H, S-H ecc., normalmente la produzione di un catione porta all'eliminazione della carica positiva come H^+ , che modifica il pH dell'ambiente biologico in cui avviene l'ionizzazione.

La radiazione però all'interno di un essere vivente ha grande probabilità di incontrare

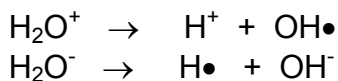


una molecola di acqua (**Azione indiretta**). In questo caso vengono prodotti direttamente radicali $H\cdot$ e $OH\cdot$ che in un secondo tempo interagiscono con le molecole biologiche. In entrambe i casi si forma un radicale che provoca, a seconda della posizione nella molecola, indebolimento o rottura di legami o di forze intermolecolari che possono portare a danni cellulari o mutazioni.

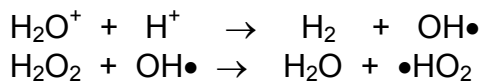
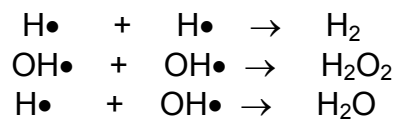
L'azione indiretta sull'acqua è abbastanza complessa e mette in evidenza la possibilità di avere diversi tipi di radicali.



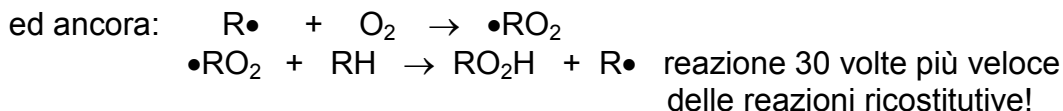
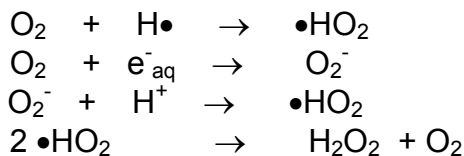
Reazioni derivate:



Reazioni di ricombinazione



L'azione indiretta può essere anche a carico dell'ossigeno, presente nei polmoni, o nel sangue. I radicali a carico dell'ossigeno sono ancor più pericolosi.

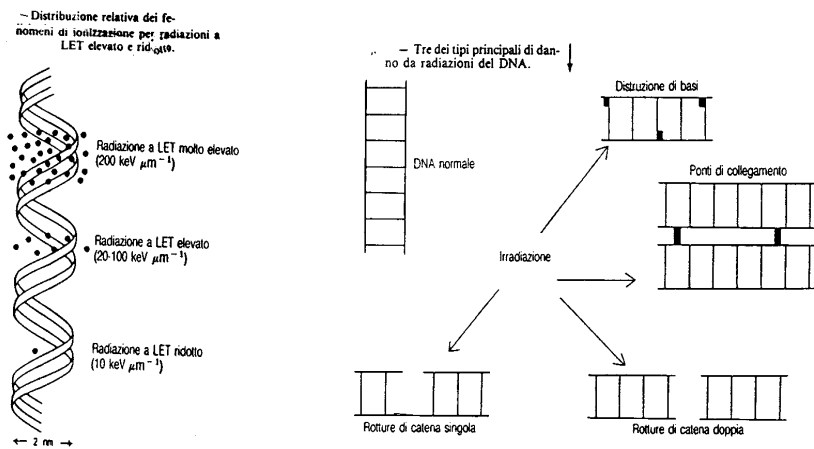


La pericolosità del radicale, ovvero la capacità di reagire con la materia vivente, è dipendente dal suo tempo di vita. Maggiore è la reattività del radicale, minore è il suo tempo di vita. Poiché all'interno delle cellule esistono dei processi ricostitutivi che tendono a ridurre il danno prodotto dai radicali ricostruendo le molecole naturali, il danno cellulare risulta permanente se la velocità della reazione radicalica è maggiore di quella della reazione ricostitutiva. Infatti, se la molecola modificata è prodotta velocemente dal radicale essa partecipa come tale al processo riproduttivo della cellula, prima che il danno possa essere riparato dagli enzimi ricostruttori.

Es. $OH\cdot$ realizza rottura di tratti di DNA, aberrazioni cromosomiche, distruzione di cellule di batteri e mammiferi.

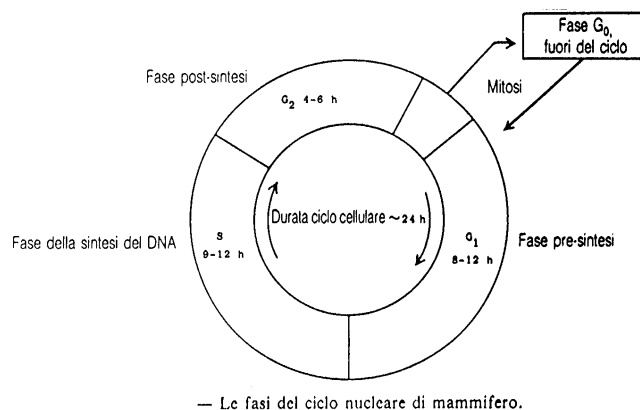
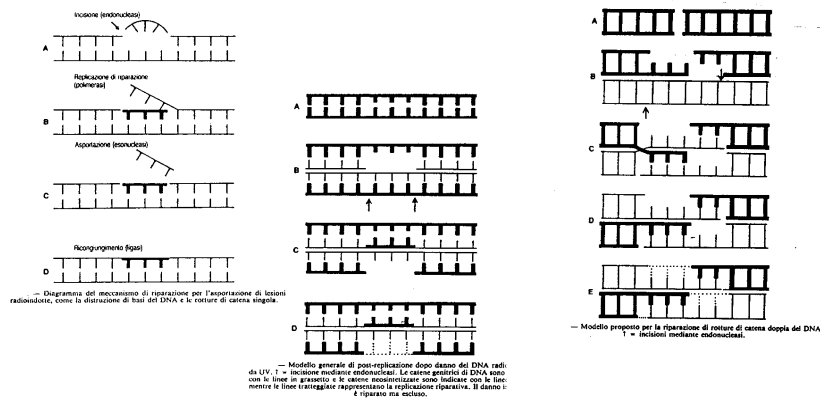
Danni al DNA

I danni delle radiazioni al DNA sono molto importanti perché possono portare a mutazioni con produzione di cellule tumorali.



Nelle figure seguenti sono visualizzati i possibili danni alle catene del DNA e come questi possono essere posti in relazione con la quantità di radiazioni assorbite. La grandezza LET (Energia depositata per unità di volume) è dipendente dal tipo, dall'energia della radiazione ed anche dalla densità della radiazione. Maggiore è il LET più è probabile il danno irreparabile (rottura della catena di DNA). A parità di LET la rottura del DNA è più probabile quando la cellula sta per riprodursi, ovvero al momento della mitosi. Infatti in questo momento l'elica è singola e quindi non è possibile la riparazione sulla matrice dell'altra elica.

La distruzione del DNA porta generalmente alla morte cellulare. E' però



probabilisticamente possibile che la rottura del DNA porti a ricostruzione anomala dello stesso e sopravvivenza della cellula con aberrazioni cromosomiche e con mutazioni che a volte portano a formazione di cellule cancerogene.

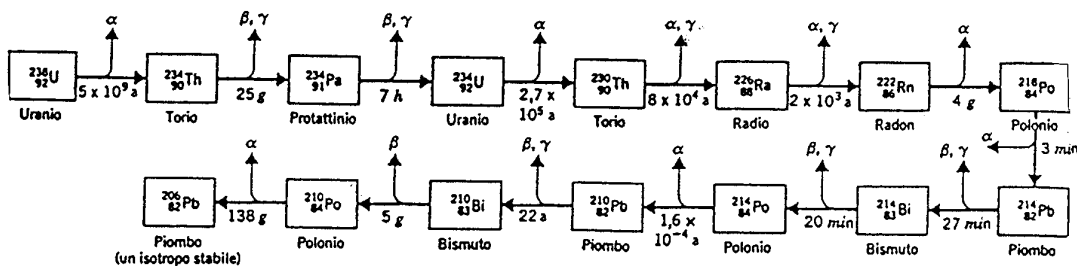
La più probabile distruzione del DNA al momento della mitosi è indicato anche dalla constatazione che il danno da radiazioni è molto alto per tessuti ad alta riproduzione come il midollo osseo, la milza, le gonadi, etc.. Questo fenomeno è alla base dell'utilizzo delle radiazioni ionizzanti per la terapia dei tumori. I tumori infatti sono costituiti da cellule ad alta velocità di proliferazione.

e. Produzione di Radionuclidi

La produzione di radionuclidi è riferita a quelli non naturali.

Quelli naturali vengono recuperati da giacimenti in cui essi si trovano insieme a minerali non radioattivi ed ad altri radioelementi o isotopi derivanti dal loro decadimento. La composizione isotopica di un campione di materiale radioattivo è fondamentale per conoscere la storia radioattiva di un elemento. La composizione isotopica degli elementi stabili è invece definita dall'abbondanza naturale dei suoi isotopi ed è indipendente dal campione raccolto e dal luogo di raccolta.

Per elementi radioattivi con lunghi tempi di emivita, ad esempio ^{238}U , è possibile determinare, dalla presenza di altri elementi nello stesso campione e dalla loro quantità, la famiglia radioattiva da esso generata



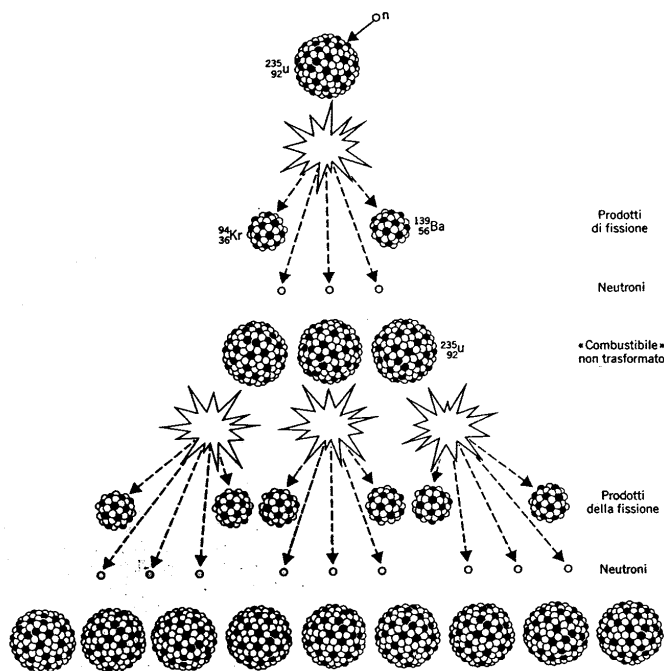
- Reattore Nucleare di Fissione

Una delle maggiori sorgenti di radionuclidi è il reattore nucleare di fissione.

In questi reattori un elemento ad alto numero atomico, es. Uranio o Plutonio, divide il suo nucleo per bombardamento neutronico, producendo diversi tipi di nuclei con rapporti n/p che stanno nella banda di stabilità, ognuno dei quali, se instabile, è definibile sulla base del suo schema di decadimento radioattivo.

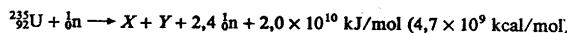
Ogni radionuclide, qualunque sia il modo con il quale è prodotto, è caratterizzato dallo stesso schema di decadimento. Nel reattore nucleare vengono anche prodotti radionuclidi già esistenti in natura quali derivati da famiglie radioattive naturali.

Questa equazione è soltanto una delle tante possibili per la fissione dell'uranio-235.



Reazione nucleare a catena. Se la concentrazione di un isotopo fissile è abbastanza alta (alla, o vicino alla, massa critica), i neutroni emessi da una fissione possono essere catturati dai nuclei ancora non trasformati causando più di una fissione aggiuntiva. Nei reattori nucleari di tipo civile, l'isotopo fissile è così diluito da non creare situazioni non controllabili. In aggiunta, le barre di materiale non fissile che sono capaci di catturare l'eccesso di neutroni possono essere inserite o tolte in modo da essere sicuri che il calore prodotto può essere allontanato appena si forma.

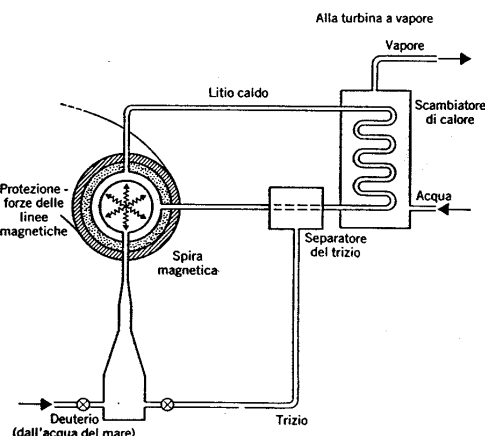
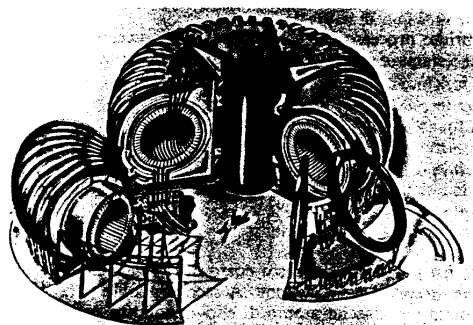
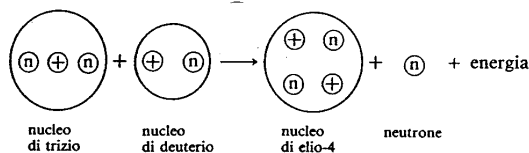
Equazione Generale



L'energia che si ricava è quella che è stata necessaria per la formazione del nucleo pesante di uranio.

L'energia nucleare può anche essere recuperata in una reazione di fusione di due nuclei di piccola massa. Vedi figura pag. 13. La reazione nucleare in questo caso ha bisogno di condizioni estremamente drastiche per essere innescata, I nuclei devono essere spogliati degli elettroni ed avvicinati in un 'plasma' che riproduce le condizioni che esistono nelle stelle. L'energia che si recupera però, quando avviene la fusione, ripaga

Fusione per azione magnetica. (a) Sezione di un reattore quasi completamente assemblato. In primo piano vi sono due settori parzialmente assemblati. (b) Schema di funzionamento del reattore. (Il litio viene usato nel ciclo nucleare che sintetizza il trizio necessario per la fusione).



Possono avvenire cinque tipi di reazioni nucleari che sono così schematizzate: reazione (n,γ) , reazione (n,γ) seguita da veloce decadimento, reazione (n,p) , reazione (n,α) e la reazione generale $(n,\text{fissione})$.

$$A = 0.602 \Phi \sigma (1 - e^{-0.693t/t_{1/2}})/M$$
 Φ = flusso di neutroni per cm^2 per secondo

σ = sezione efficace in barn (barn = 10^{-24} cm²).

t = durata dell'irraggiamento

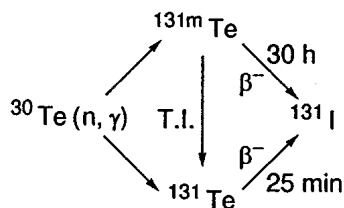
$t_{1/2}$ = tempo di emivita del radionuclide formato

M = Massa atomica del nuclide irradiato.

Si producono in questo modo:

^{131}I : $t_{1/2} = 8.02 \text{ d}$ con emissioni principali: $\gamma(364\text{keV})$ e $\beta^- (606\text{keV})$

reazione di formazione:



^{186}Re con emissioni principali γ (137keV) e β^- (939 e 1076keV) ($t_{1/2} = 3.7 \text{ d}$)
 reazione di formazione : $^{185}\text{Re}(n,\gamma) ^{186}\text{Re}$.

^{153}Sm con emissioni principali γ (103keV) e β^- (640 e 720keV) ($t_{1/2} = 47 \text{ ore}$)
 reazione di formazione : $^{152}\text{Sm}(n,\gamma) ^{153}\text{Sm}$.

^{188}W reazione di formazione : $^{186}\text{W}(n,\gamma) ^{187}\text{W}(n,\gamma) ^{188}\text{W}$ Deve essere eseguito un doppio irraggiamento. L'irraggiamento deve essere di circa 21 giorni con un flusso di $2 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$, l'attività specifica è di circa 3.5 mCi/mg.

- Prodotti di Fissione

L'uranio naturale è costituito dalla miscela di tre isotopi di massa 234, 235 e 238 con abbondanze rispettivamente di 0.006 %, 0.7 % e 99.28 %.

L'uranio-238 se bombardato con neutroni produce reazioni nucleari che portano alla formazione di plutonio-239 ($t_{1/2} = 2.4 \cdot 10^4 \text{ anni}$).

L'uranio-235 bombardato da neutroni produce un 15% di ^{236}U ($t_{1/2} = 2.4 \cdot 10^7 \text{ anni}$) mentre il resto produce reazione di fissione con produzione di frammenti e neutroni. La reazione è scritta $^{235}\text{U}(n,f)$ ed in numero di neutroni per fissione è circa 2,46. I frammenti formati sono radioattivi e tenderanno a spostarsi nella banda di stabilità sino a diventare stabili.

Il rendimento in prodotti di fissione è mediamente come riportato in Figura.

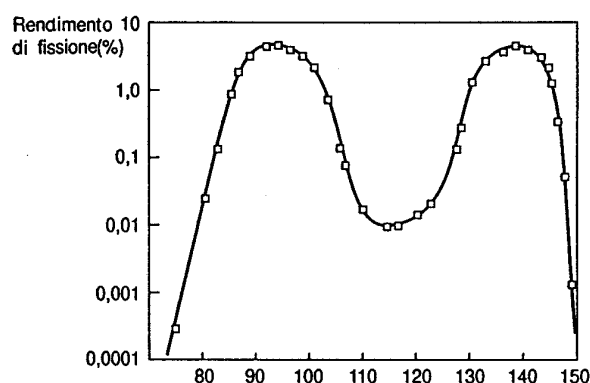


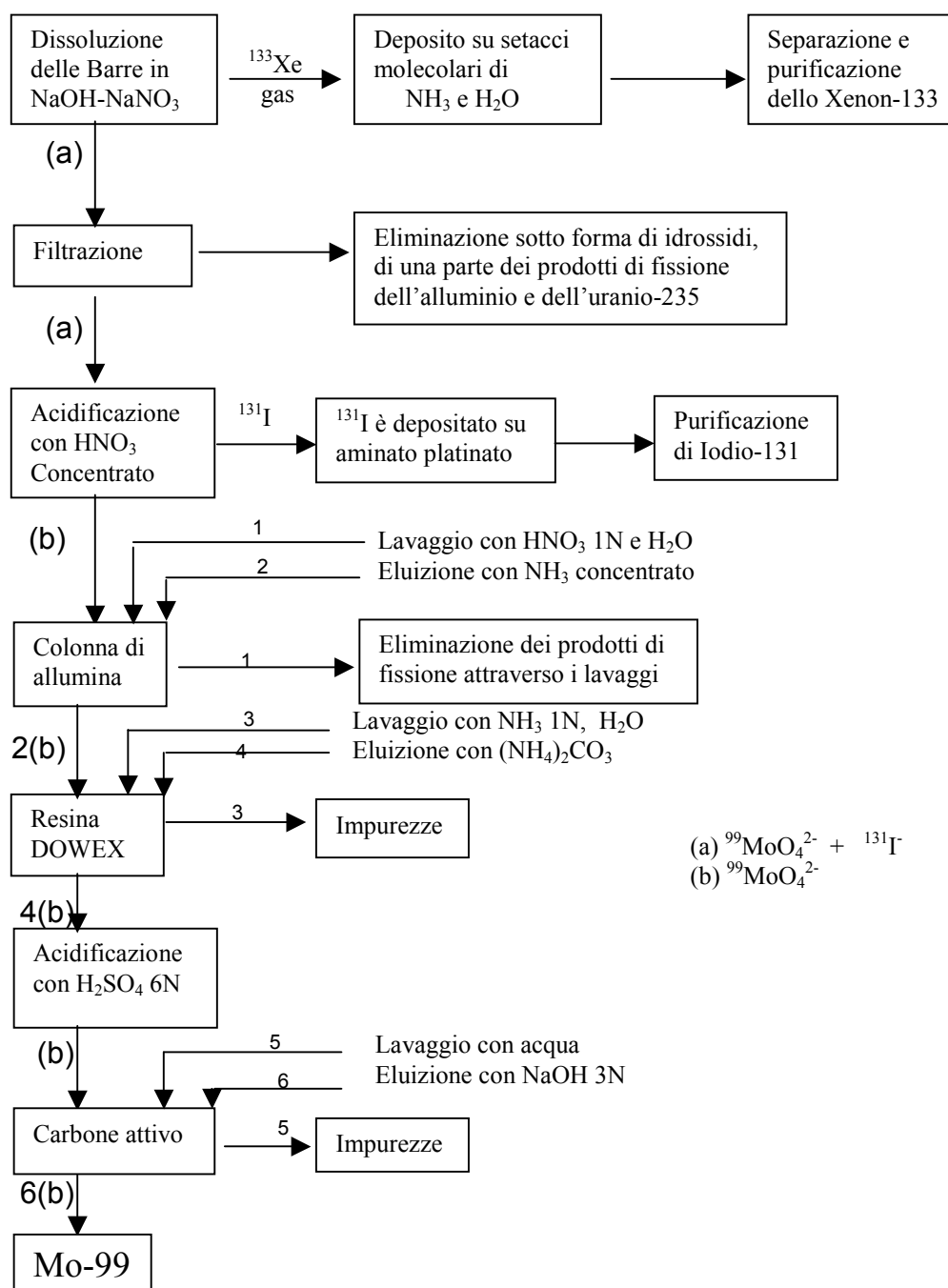
Figura. Probabilità di produzione di prodotti di fissione dell'uranio-235.

Produzione del Molibdeno-99.

Il Molibdeno-99 può essere prodotto per reazione (n,γ) a partire dal $^{98}\text{Mo}_2\text{O}_3$, ma attualmente è recuperato per riprocessamento delle barre di combustibile fissile. Con tale tecnica l'attività specifica del ^{99}Mo è 10^5 volte maggiore rispetto alla produzione per bombardamento neutronico.

Qui di seguito è riportato il trattamento delle barre di combustibile nucleare per il recupero del molibdeno.

Il molibdeno ottenuto è impuro di altri isotopi di molibdeno (la maggior parte stabili).



- Produzione di radionuclidi per bombardamento con particelle cariche.

Nuclidi artificiali possono essere prodotti anche per bombardamento di elementi naturali con fasci di particelle cariche.

Sono stati costruiti degli acceleratori di particelle cariche quali protoni, elettroni, deuteroni, positroni, elioni, etc., che possono produrre dei fasci di particelle a energia variabile. Alcuni sono lineari altri circolari (ciclotroni). L'impatto di uno di questi fasci sui nuclei di un elemento porta a reazioni nucleari con formazione di nuclidi, in genere radioattivi, che non esistono in natura, e che non possono essere derivati da decadimenti di altri radionuclidi prodotti per fissione o di origine naturale. Anche l'energia del fascio di particelle condiziona il tipo o almeno l'efficienza della reazione

nucleare che si verifica per l'impatto della particella con un ben preciso nuclide. Esiste una energia minima necessaria per superare la barriera coulombiana, perché le particelle cariche riescano a bombardare i nuclei. Tale energia è caratteristica per ogni elemento e normalmente aumenta all'aumentare del numero atomico.

Esempi.

^{18}F . Emissione β^+ con energia 0.635 MeV ($t_{1/2} = 110$ min)

E' prodotto per reazione $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ che ha il vantaggio di un buon rendimento, facile separazione dall' H_2^{18}O e ottenibile con alta attività specifica.

^{201}Tl . Emissioni γ 135keV e 167keV, e X da 69 a 83 keV. ($t_{1/2} = 73$ h).

E' prodotto dalla reazione $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb} \xrightarrow{\beta^+} ^{201}\text{Tl}$

E' ottenuto come cloruro ed utilizzato in cardiologia.

^{123}I emissione principale γ a 159 keV, X a 27 keV ($t_{1/2} = 13.2$ h)

E' prodotto per reazione $^{124}\text{Xe}(p,n)^{123}\text{Cs} \xrightarrow{\beta^+} ^{123}\text{Xe} \xrightarrow{\beta^+} ^{123}\text{I}$

Sotto forma di ioduro di sodio viene utilizzato per le patologie tiroidee o per produrre molecole bioattive marcate.

^{111}In . Emissioni principali γ 171 keV e 245 keV e X = 13 keV ($t_{1/2} = 2.8$ g)

E' prodotto dalla reazione: $^{112}\text{Cd}(p, 2n)^{111}\text{In}$.

- *Generatori*

L'ottenimento dei radionuclidi per l'uso immediato può anche seguire una via particolare, predisposta ad hoc, con l'impiego dei generatori.

In questi casi il radionuclide deve essere prodotto per decadimento radioattivo di un altro radionuclide (padre), dal quale esso (figlio) può essere adeguatamente separato.

E' pertanto importante avere a disposizione il radionuclide padre.

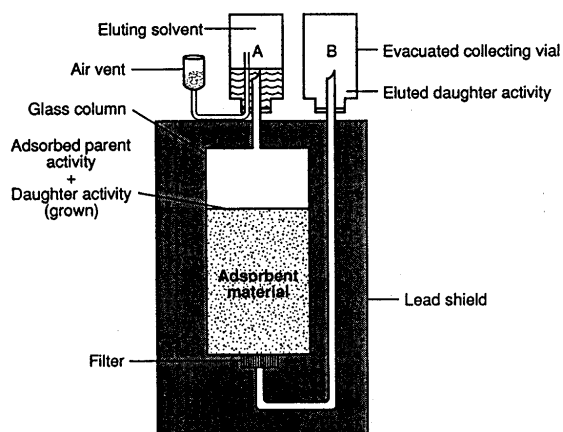
Questo radionuclide è in genere ottenuto con uno dei metodi sopra riportati.

Tabella delle coppie padre-figlio utilizzate nei generatori per la produzione di radionuclidi di impiego medico.

Isotopo figlio	T _{1/2}	Disintegrazione (%)	Fotone MeV (%)	Isotopo padre	T _{1/2}	Disintegrazione (%)	Fotone MeV (%)	Produzione
^{52m} Mn	21,1 min	β ⁺ (98) γ (2)	0,511 (196) 1,43 (100)	⁵² Fe	8,2 h	β ⁺ (56) CE (44)	0,165 (100) 0,511 (112)	⁵⁰ Cr (⁴ He, 2n)
⁶² Cu	9,8 min	β ⁺ (97)	0,511 (194)	⁶² Zn	9,1 h	β ⁺ (18) CE (82)	0,042 (20) 0,51 (47) 0,59 (22)	⁶³ Cu (p, 2n)
⁶⁸ Ga	68,3 min	β ⁺ (88) CE (12)	0,511 (176) 1,08 (3,5)	⁶⁸ Ge	275 g	CE (100)	-	⁶⁹ Ga (p, 2n)
⁸² Rb	1,3 min	β ⁺ (96) CE (4)	0,511 (192) 0,777 (9)	⁸² Sr	25 g	CE (100)	-	⁸⁵ Rb (p, 4n)
⁹⁰ Y	2,7 g	β ⁻ (99,9)	2,284	⁹⁰ Sr	28 a	β ⁻ (100)	0,54	Fission
^{99m} Tc	6,0 h	γ (100)	0,140 (91)	⁹⁹ Mo	2,78 g	β ⁻ (100)	0,181 (7) 0,740 (12)	Fission ⁹⁸ Mo (n, γ)
^{131m} I	100 min	γ (65) CE (30)	0,392	¹³¹ Sb	115 g	γ (1,2) γ (2) CE (98)	0,084 0,255	¹³² Sb (n, γ)
¹⁸⁸ Re	17 h	β ⁻ (25) β ⁻ (75) γ (15)	1,692 2,118 0,155	¹⁸⁸ W	65 g	CE (100)	-	¹⁸⁶ W (n, γ) ¹⁸⁷ W ¹⁸⁷ W (n, γ) ¹⁸⁸ W

Il Generatore ⁹⁹Mo/^{99m}Tc

Il generatore di tecnezio-99m è costituito da una colonnina di allumina dimensionata in funzione della quantità di ⁹⁹Mo che si deposita su di essa, posta in un involucro di piombo con un'entrata costituita da due aghi forati, uno collegato alla colonna e l'altro all'esterno attraverso un filtrino che filtra l'aria entrante, ed un'uscita costituita da un ago forato collegato alla colonnina (v. figura).



Il molibdato $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ viene fissato alla colonna di allumina in ambiente acido per forte interazione con l'allumina stessa. La colonnina viene assemblata nel generatore e lavata con soluzione fisiologica.

Il pertecnetato $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ non ha una forte interazione con l'allumina (ha una sola carica negativa) e quindi può essere eluito dalla colonna con una piccola quantità di soluzione fisiologica (0.9 % di NaCl). Usualmente si introduce una fiala contenente soluzione fisiologica all'entrata del generatore e nell'ago di uscita si inserisce una fiala leggermente sotto vuoto. Tale fiala aspira la soluzione fisiologica che passando dalla colonnina porta via tutto il pertecnetato-99m prodotto dopo l'ultima eluizione e lo raccoglie pronto per la produzione del radiofarmaco.

La soluzione viene aspirata completamente lasciando la colonnina a secco. Tale operazione viene eseguita per eliminare il più possibile le reazioni di radiolisi a carico dell'acqua, che riducono la resa in pertecnetato in seguito alla produzione di specie ridotte che non vengono eluite.

Calcolo dell'attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ nell'eluato da generatore.

Nota la quantità di ^{99}Mo depositata sulla colonnina ad una precisa data, si può risalire alla quantità di tecnezio-99m eluibile in un certo momento, ed inoltre la quantità eluibile ad un certo momento dopo la precedente eluizione. E' anche possibile calcolare la quantità di tecnezio-99 e quindi la quantità totale di tecnezio presente nella soluzione eluita in un certo momento.

Se il generatore $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ è tarato in ^{99}Mo , cioè con l'indicazione del numero di mCi di ^{99}Mo presenti in colonna ad un ora ben definita di un certo giorno, è possibile ricavare l'attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eluibile al tempo t. Per far questo occorre calcolare, tramite la legge di decadimento, l'attività di ^{99}Mo al momento dell'ultima eluizione e l'attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ prodotta al tempo t dal momento dell'ultima eluizione.

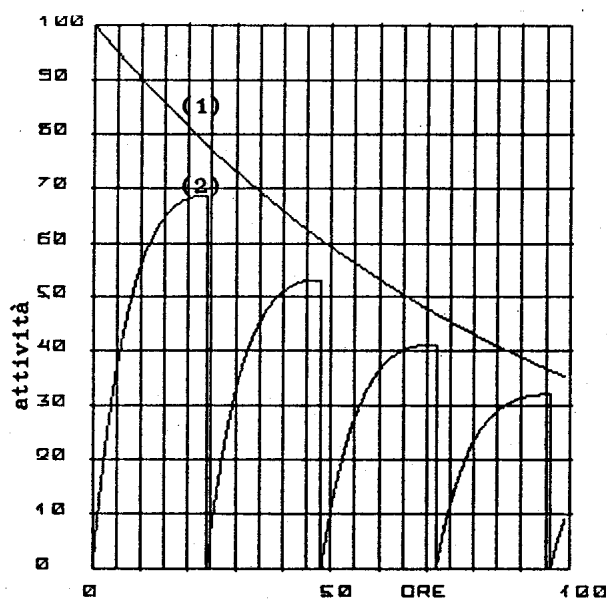
Per esempio, se il valore della taratura in ^{99}Mo è 150 mCi e l'ultima eluizione è stata fatta a 70 ore dopo la data di taratura, l'attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ottenibile 14 ore dopo l'ultima eluizione è :

$$150 \times 47.95/100 \times 63.5/100 = 45.74 \text{ mCi}$$

Il valore 47,95 e la percentuale di attività del ^{99}Mo dopo 70 ore dal tempo di taratura (Tabella 1a), ed il valore 63,6 è ricavato dalla tabella 1b, essendo questo valore la percentuale di attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dopo 14 ore dal tempo di inizio della produzione nel generatore ovvero quando l'attività del molibdeno si è ridotta del 47.95%. Questo calcolo approssima l'attività del molibdeno a quella del tecnezio perchè sono passate più di 24 ore dal t_0 .

Tabella 1a. Percentuale di attività di ^{99}Mo nel tempo

T (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	98.96	97.92	96.9	95.89	94.89	93.89	92.91	91.94	90.98
10	90.03	89.03	88.16	87.24	86.33	85.43	84.54	83.65	82.78	81.92
20	81.06	80.21	79.38	78.55	77.73	76.91	76.11	75.32	74.53	73.75
30	72.98	72.22	71.46	70.72	69.98	69.25	68.53	67.81	67.1	66.4
40	65.71	65.02	64.34	63.67	63.01	62.35	61.7	61.05	60.41	59.78
50	59.16	58.54	57.93	57.32	56.73	56.13	55.55	54.97	54.39	53.82
60	53.26	52.71	52.16	51.61	51.07	50.54	50.01	49.49	48.97	48.46
70	47.95	47.45	46.96	46.47	45.98	45.5	45.03	44.56	44.09	43.63
80	43.17	42.72	42.28	41.84	41.4	40.97	40.54	40.12	39.7	39.28
90	38.87	38.47	38.06	37.67	37.27	36.88	36.5	36.12	35.74	35.37
100	35	34.63	34.27	33.91	33.56	33.21	32.86	32.52	32.18	31.84
110	31.51	31.18	30.85	30.53	30.21	29.9	29.59	29.28	28.97	28.67
120	28.37	28.07	27.79	27.49	27.2	26.92	26.64	26.36	26.08	25.81
130	25.54	25.27	25.01	24.75	24.49	24.24	23.98	23.73	23.48	23.24
140	23	22.76	22.52	22.28	22.05	21.82	21.59	21.37	21.14	20.92
150	20.7	20.49	20.27	20.06	19.85	19.65	19.44	19.24	19.04	18.84
160	18.64	18.45	18.25	18.06	17.87	17.69	17.5	17.32	17.14	16.96
170	16.78	16.61	16.43	16.26	16.09	15.92	15.76	15.59	15.43	15.27
180	15.11	14.95	14.8	14.64	14.49	14.34	14.19	14.04	13.89	13.75
190	13.6	13.46	13.32	13.18	13.04	12.91	12.77	12.64	12.51	12.38



- La curva (1) mostra la variazione di attività di ^{99}Mo ; la curva (2) mostra l'accumulo di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in colonna per intervalli di eluizione di 24 ore.

In figura sono riportate le quantità di attività (1) di ^{99}Mo nel tempo, e (2) di $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Tabella 1 - Attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$

t (ore)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	9.43	17.73	25.04	31.45	37.06	41.97	46.25	49.97	53.2
10	55.98	58.37	60.41	62.14	63.6	64.81	65.8	66.6	67.23	67.71
20	68.06	68.29	68.41	68.44	68.39	68.27	68.08	67.84	67.55	67.22
30	66.85	66.44	66.01	65.56	65.08	64.59	64.08	63.56	63.03	62.49
40	61.94	61.39	60.83	60.27	59.7	59.14	58.57	58.01	57.45	56.88
50	56.32	55.76	55.21	54.65	54.1	53.56	53.01	52.47	51.94	51.41
60	50.88	50.36	49.84	49.33	48.82	48.32	47.82	47.32	46.83	46.35
70	45.87	45.39	44.92	44.45	43.99	43.53	43.08	42.63	42.19	41.75
80	41.31	40.88	40.46	40.03	39.62	39.2	38.79	38.39	37.99	37.59
90	37.2	36.81	36.43	36.05	35.67	35.3	34.93	34.57	34.21	33.85
100	33.49	33.15	32.8	32.46	32.12	31.78	31.45	31.12	30.8	30.48
110	30.16	29.84	29.53	29.22	28.92	28.61	28.32	28.02	27.73	27.44
120	27.15	26.87	26.59	26.31	26.04	25.76	25.49	25.23	24.96	24.7
130	24.45	24.19	23.94	23.69	23.44	23.2	22.95	22.71	22.48	22.24
140	22.01	21.78	21.55	21.33	21.1	20.88	20.67	20.45	20.24	20.02
150	19.82	19.61	19.4	19.2	19	18.8	18.61	18.41	18.22	18.03
160	17.84	17.65	17.47	17.29	17.11	16.93	16.75	16.58	16.4	16.23
170	16.06	15.89	15.73	15.56	15.4	15.24	15.08	14.92	14.77	14.61
180	14.46	14.31	14.16	14.01	13.87	13.72	13.58	13.44	13.3	13.16
190	13.02	12.88	12.75	12.62	12.48	12.35	12.23	12.1	11.97	11.85

con eluizioni dopo 24 ore l'una dall'altra.

Attualmente la maggior parte dei generatori $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ viene fornita agli utilizzatori con la taratura in $^{99\text{m}}\text{Tc}$, cioè con l'indicazione del numero di mCi di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ presenti in colonna ad un'ora definita di un certo giorno.

E' allora possibile calcolare l'attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eluibile dalla colonna (3) dal momento dell'eluizione precedente (2), se si conosce l'attività presente all'eluizione che precede la precedente (1) ed i tempi tra le due eluizioni.

Se si parte da un'attività di 100 mCi si può calcolare la percentuale di attività di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dalla formula ricavabile dalle equazioni generali del decadimento successivo di due radionuclidi padre e figlio con λ_1

$$Q = \frac{100}{1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)T}} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

t = tempo intercorso dall'ultima eluizione

T° = tempo intercorso tra la penultima e l'ultima eluizione.

La tabella 2 è stata calcolata per T° = 24 ore.

Tabella 2 - Attività di ^{99m}Tc disponibile al tempo t espressa come percentuale della sua attività al momento della eluizione (t = 0) se questa è avvenuta T° = 24 ore dopo la precedente

t (ore)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	10.72	20.16	28.46	35.74	42.12	47.7	52.57	56.8	60.46
10	63.62	66.34	68.66	70.63	72.28	73.66	74.79	75.7	76.41	76.96
20	77.35	77.61	77.75	77.78	77.73	77.59	77.38	77.1	76.77	76.39
30	75.97	75.52	75.03	74.51	73.97	73.41	72.83	72.24	71.63	71.02
40	70.4	69.77	69.13	68.5	67.86	67.21	66.57	65.93	65.29	64.65
50	64.01	63.38	62.74	62.12	61.49	60.87	60.25	59.64	59.03	58.43
60	57.83	57.24	56.65	56.06	55.49	54.91	54.35	53.78	53.23	52.68
70	52.13	51.59	51.05	50.52	50	49.48	48.96	48.45	47.95	47.45
80	46.95	46.46	45.98	45.5	45.03	44.56	44.09	43.63	43.18	42.73
90	42.28	41.84	41.4	40.97	40.54	40.12	39.7	39.29	38.88	38.47
100	38.07	37.67	37.28	36.89	36.5	36.12	35.74	35.37	35	34.64
110	34.27	33.92	33.56	33.21	32.87	32.52	32.18	31.85	31.51	31.18
120	30.86	30.54	30.22	29.9	29.59	29.28	28.97	28.67	28.37	28.08
130	27.78	27.49	27.21	26.92	26.64	26.36	26.09	25.81	25.54	25.28
140	25.01	24.75	24.49	24.24	23.99	23.73	23.49	23.24	23	22.76
150	22.52	22.29	22.05	21.82	21.59	21.37	21.15	20.93	20.71	20.49
160	20.28	20.06	19.86	19.65	19.44	19.24	19.04	18.84	18.64	18.45

I valori della tabella 2. possono essere adattati per T° diversi se si applicano le correzioni moltiplicando i valori per il fattore H°.

$$H = \frac{1}{1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)T^\circ}} \quad \text{che tende a 1 per } T^\circ \text{ molto grande (24 ore)}$$

$$H^\circ = \frac{H(T^\circ)}{H(T^\circ = 24 \text{ ore})} \quad \text{In tab. 3 e 4 sono riportati i valori di } H^\circ \text{ e } T^\circ.$$

Tabella 3 - Valore del fattore H

To (ore)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		10.04	5.284	3.704	2.918	2.45	2.141	1.923	1.761	1.637
10	1.539	1.461	1.397	1.344	1.299	1.262	1.23	1.202	1.178	1.158
20	1.14	1.124	1.111	1.098	1.088	1.078	1.07	1.063	1.056	1.05
30	1.045	1.04	1.036	1.032	1.029	1.026	1.023	1.021	1.019	1.017
40	1.015	1.014	1.012	1.011	1.01	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006
50	1.005	1.005	1.004	1.004	1.003	1.003	1.003	1.003	1.002	1.002
60	1.002	1.002	1.002	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001

Tabella 4 - Valore del fattore T°

To (ore)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		9.233	4.858	3.405	2.683	2.253	1.968	1.768	1.619	1.505
10	1.415	1.343	1.284	1.235	1.194	1.16	1.13	1.105	1.083	1.064
20	1.048	1.034	1.021	1.01	1	.991	.984	.977	.971	.965
30	.961	.956	.953	.949	.946	.943	.941	.939	.937	.935
40	.933	.932	.931	.93	.929	.928	.927	.926	.925	.925
50	.924	.924	.923	.923	.923	.922	.922	.922	.921	.921
60	.921	.921	.921	.921	.92	.92	.92	.92	.92	.92

Esempi:

- a) Nota l'attività della penultima eluizione (120 mCi), e noto che l'eluizione precedente era stata eseguita 24 ore prima (T° = 24h) e che anche t = 24h l'attività nell'ultima eluizione sarà:

$$120 \times 77.73/100 \times 1 = 93.3 \text{ mCi.}$$

b) Se ora viene eseguita un'altra eluizione dopo 6 ore ($t = 6\text{ h}$, $T^\circ = 24\text{ h}$), si avrà:
 $93.3 \times 47,7/100 \times 1 = 44.5\text{ mCi}$.

c) Se viene eseguita una nuova eluizione dopo 18 ore ($t = 18\text{ h}$, $T^\circ = 6\text{ h}$) si avrà:
 $44.5 \times 76.41/100 \times 1.968 = 66.9\text{ mCi}$.

Altri esempi di eluizioni parziali:

- si effettua una eluizione alle otto del mattino (la precedente eluizione è stata eseguita 24 ore prima) ottenendo 100 mCi di ^{99m}Tc . Una seconda eluizione viene effettuata alle ore 12 ($t = 4\text{ h}$ $T^\circ = 24\text{ h}$) con attività :

$$100 \times 35.74/100 \times 1 = 35.74\text{ mCi}.$$

-Una terza eluizione viene eseguita 6 ore più tardi (alle ore 18). Si avrà ($t = 6\text{ h}$, $T^\circ = 4\text{ h}$):

$$35.74 \times 47.7/100 \times 2.683 = 45.74\text{ mCi}$$

- una quarta eluizione viene eseguita 14 ore più tardi (alle ore 8 del mattino successivo). Si avrà ($t = 14\text{ h}$ e $T^\circ = 6\text{ h}$):

$$45.74 \times 72.28/100 \times 1.968 = 65.06\text{ mCi}.$$

L'attività totale eluita nelle 24 ore è stata:

$$35.74 + 45.74 + 65.06 = 146.54\text{ mCi}$$

Se si fosse eseguita una sola eluizione dopo 24 ore ($t = 24\text{ h}$, $T^\circ = 24\text{ h}$) si sarebbe ottenuto:

$$100 \times 77.73/100 \times 1 = 77.73\text{ mCi}.$$

L'attività è più alta di ogni precedente eluizione ma la quantità totale di ^{99m}Tc utilizzata è stata maggiore con le eluizioni parziali.

Peso ed attività di ^{99}Tc nell'eluato da generatore.

Il ^{99}Mo decade a ^{99m}Tc (87%) ed a ^{99}Tc (13%) inoltre con un $t_{1/2}$ di 6.0072 h il ^{99m}Tc decade a ^{99}Tc . Nell'eluato esiste quindi anche il carrier ^{99}Tc .

Il peso in μg di carrier viene così calcolato :

$$P(\mu\text{g}) = \frac{\text{Attività di Tc-99m nell'eluato} \times K}{F}$$

$K = 1.90 \times 10^{-4} \mu\text{g/mCi}$ peso di 1 mCi di ^{99m}Tc (si ricava da $N = A \times t_{1/2}/0.693$)

F = rapporto tra il numero di nuclei di ^{99m}Tc (N_{99m}) ed il numero di nuclei di ^{99}Tc (N_{99}) calcolato nel tempo dall'ultima eluizione (Tabella 23).

Esempi:

a) Si eluisce il ^{99m}Tc da una colonna caricata con ^{99}Mo da fissione e l'attività misurata è pari a 100 mCi in 5 mL; l'eluizione precedente risale a 27 h prima. Il peso di Tc = $P(\mu\text{g}) = 100 \times 1.90 \times 10^{-4} / 0.333 = 0.057 \mu\text{g}$

a) Da una colonna come la precedente si esegue una eluizione dopo quattro giorni dalla preparazione (deposito di ^{99}Mo). Se vengono eluiti 5 mL e l'attività di ^{99m}Tc è 100 mCi, la quantità di ^{99}Tc sarà:

$$P(\mu\text{g}) = 100 \times 1.90 \times 10^{-4} / 0.053 = 0.358 \mu\text{g} \quad \text{ovvero } 0.072 \mu\text{g/mL}$$

In questo secondo caso, la quantità di ^{99}Tc presente è sei volte più grande di quella del caso (a), mentre il peso di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($0.019\text{ }\mu\text{g}$) resta invariato. Rispetto a $^{99\text{m}}\text{Tc}$, il peso del carrier risulta tre volte nel caso (a) e ben 19 volte nel caso (b), aumentando così in misura non trascurabile il rapporto Tc/legante che, se la velocità di una reazione indesiderata è dipendente dalla concentrazione del tecnezio, può portare in quella direzione la formazione del prodotto di marcatura.

L'attività del ^{99}Tc presente nell'eluato è molto più bassa di quella del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ visto il suo $t_{1/2}$ molto più lungo ($t_{1/2} = 2.145 \cdot 10^5$ anni).

1 Ci di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ corrisponde a $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ }\mu\text{Ci}$ di ^{99}Tc . I calcoli si eseguono applicando la formula $N = A \times t_{1/2} / 0.693$ (A in Bq).

- Generatore di tungsteno-188/renio-188

Il generatore W-188/Re-188, che fornisce Re-188 libero da carrier ($t_{1/2}=17.0$ ore) nella forma dello ione perrenato (ReO_4^-) è diventato uno dei generatori di radioisotopi più attrattivi per fornire utili quantità di radionuclidi nel campo della medicina nucleare terapeutica. Analogamente al generatore Mo-99/Tc-99m usato per la medicina nucleare diagnostica, il sistema del generatore W-188/Re-188 su base di allumina presenta molti vantaggi, fra cui il basso costo e la lunga durata di non-utilizzo che è di parecchi mesi. Le particelle β^- ad elevata energia ($E_{\beta \text{ max}} = 2.12 \text{ MeV}$; energia media di 764 MeV) rendono il Re-188 un radionuclide attrattivo per le applicazioni terapeutiche. Per di più, il raggio gamma principale di 155 KeV (15.8%) è adatto a creare immagini con una camera Anger.

Altri sistemi prototipi del generatore usato per produrre il Re-188 includono l'eluizione del perrenato dalla colonna di allumina con etilmetilchetone (MEK), ed eluizione salina del generatore di tipo "gel" basato su ossido di zirconio. Nel caso di sistemi salino-eluiti, è necessaria una gran quantità di eluente salino per eluire il Re-188, con il risultato di attività specifiche basse (mCi/mL) di Re-188.

C'è bisogno di una gran quantità di soluzione salina perché con il metodo della cattura del doppio neutrone da parte del target di W-186, il W-188 può essere prodotto solo a bassa attività specifica ($3\text{-}6 \text{ mCi/mg}$). Quindi, devono essere usate grandi colonne di allumina per assorbire la maggior quantità della massa di tungsteno allo scopo di produrre generatori clinicamente utili. Per quanto dal punto di vista tecnico la produzione di generatori di meno di 200 mCi non costituisca un problema, la quantità dell'eluente salino può essere troppo grande per pratiche manipolazioni radiochimiche.

Per affrontare il problema di soluzioni di Re-188 a volume specifico basso, sono state messe a punto due versioni del nuovo sistema a tandem generatore/scambio del catione comporta l'adsorbimento di $\text{WO}_4\text{-}188$ su una colonna di allumina ad una colonna a scambio cationico attraverso la quale l'eluente salino della colonna di allumina passa per trasformare il perrenato di sodio in acido perrenico Re-188.

A seconda delle necessità del successivo procedimento di marcatura, il Re-188 può essere ottenuto da questo generatore tandem nella forma o di acido perrenico o di perrenato di sodio. Il sistema tandem generatore/scambio anionico per separare il "prodotto di decadimento" del Re-188 dal progenitore nucleare W-188 si basa sulla colonna di allumina utilizzando come eluente una soluzione di nitrato di ammonio (0.155 M). Il perrenato di ammonio viene successivamente passato su una colonna tandem a scambio anionico. Il Re-188 nella forma acido perrenico viene poi eluito dalla colonna con acido nitrico $6\text{-}8 \text{ M}$. Nella figura 1 viene mostrato in maniera schematica il sistema tandem generatore/scambio ionico, che può essere utilizzato per scambi anionici o cationici usando il corretto materiale della colonna.

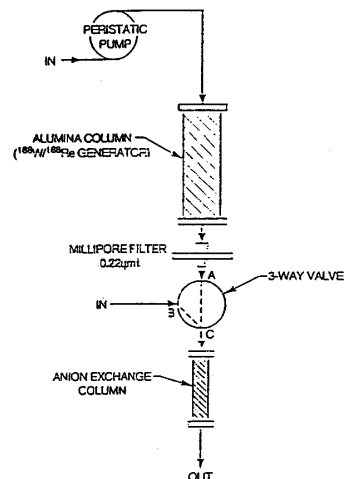
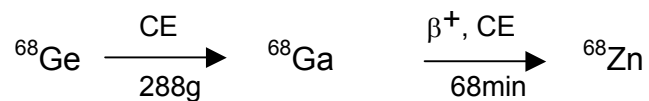


Figura 1. Generatore Tandem

E' in studio un generatore W-188/Re-188 a bassa attività che mima il generatore Mo-99/Tc-99m, senza sistema tandem, e molto utile per la ricerca.

- Generatore di Germanio-68/Gallio-68

Il generatore di Germanio-68/Gallio-68 è un generatore di lunga durata che utilizza la seguente successione di reazioni:



Il Gallio-68 possiede una elevata emissione β^+ (89%).

Il Germanio-68 è prodotto dalla reazione ${}^{69}\text{Ga}(p,2n){}^{68}\text{Ge}$.

Il ${}^{68}\text{Ge}$ è fissato su una colonna di allumina ed il ${}^{68}\text{Ga}$ formatosi viene eluito sotto forma di cloruro di gallio con una soluzione acida di acido cloridrico 0.3M.

f. Strumenti per la misura della Radioattività

Le radiazioni emesse da nuclei instabili vengono rilevate dagli appositi strumenti, utilizzando la loro proprietà di interagire con la materia nei modi che sono stati precedentemente esposti.

Tutte le radiazioni hanno la proprietà di ionizzare gli atomi o le molecole producendo particelle cariche che possono essere rilevate da particolari circuiti elettrici. Utilizzano tale proprietà le camere ad ionizzazione, le camere a flusso, i contatori proporzionali ed i contatori Geiger-Muller.

- Camere a ionizzazione

Come si osserva nell'esempio in Figura 2., questi strumenti sono tutti costituiti da una camera in cui si trova più o meno rarefatta una sostanza in fase gassosa posta tra due elettrodi a cui è applicata una certa differenza di potenziale.

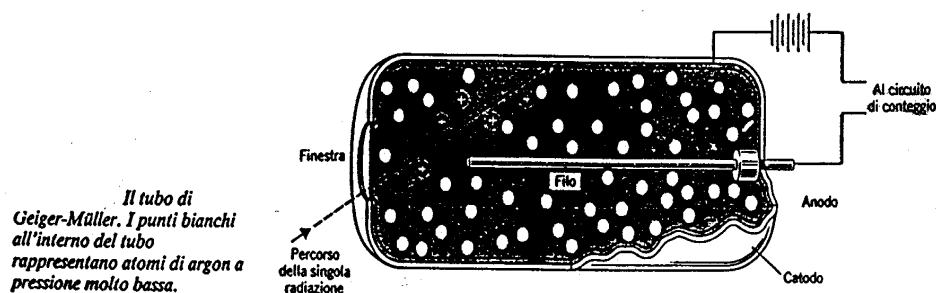


Figura 2.

Un elettrodo (catodo) costituisce la parete della camera e l'altro (anodo) è invece costituito da un filamento metallico centrale alla camera stessa. La camera infine presenta una finestra adeguata all'entrata delle radiazioni. I diversi tipi di strumentazione sono caratterizzati dal tipo di gas utilizzato (più o meno facilmente ionizzabile), dalla possibilità di rinnovo del gas (camere a flusso), dal particolare tipo di finestra (es. a solfuro di cadmio per rilevare le particelle α che non passano dalla parete della finestra), ma ciò che caratterizza il tipo di strumento in base al suo impiego e ancor più in base alla sua sensibilità è la differenza di potenziale applicata ai due elettrodi.

In Figura 3. è riportato il diagramma della corrente che passa nel circuito in funzione della differenza di potenziale applicata agli elettrodi.

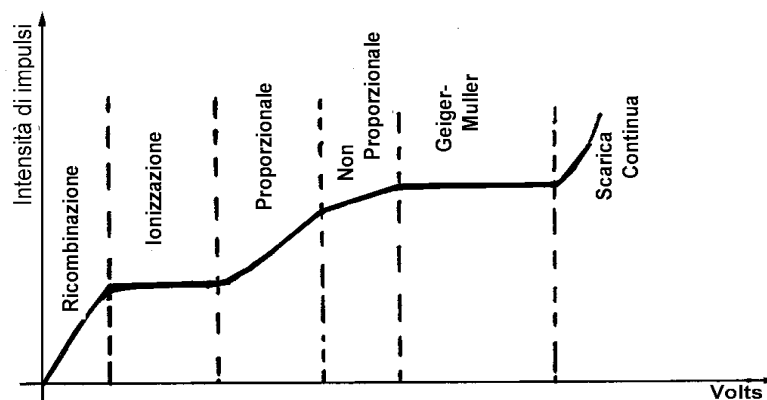


Figura 3.

Se la ddp applicata è molto bassa, non tutti gli ioni prodotti dalle radiazioni che colpiscono il gas (es. metanolo) raggiungono gli elettrodi. Solo quando la ddp è

sufficiente per far scaricare tutti gli ioni prodotti si può avere una misura diretta delle radiazioni arrivate al contatore in funzione della corrente che passa nel circuito. Questi strumenti si chiamano camere ad ionizzazione. Essi, se costruiti con materiali liberi da radioelementi e protetti dalle radiazioni naturali, sono molto precisi e riescono a misurare alcuni cps (colpi per secondo) e quindi quasi ad una ad una le radiazioni emesse dal materiale radioattivo. La sensibilità viene aumentata se si aumenta la ddp applicata agli elettrodi rimanendo nella zona dei contatori proporzionali. In questo caso gli ioni prodotti dalle radiazioni producono a loro volta ioni per interazione con le particelle del gas rendendo la corrente che passa maggiore di quella che ci sarebbe se fosse provocata una sola ionizzazione per radiazione. Rimane però la proporzionalità che deve essere preventivamente standardizzata (camere a flusso).

Se la differenza di potenziale è molto grande poche radiazioni producono la ionizzazione di tutto il gas contenuto nella camera provocando la scarica immediata. Questo è ciò che succede nei contatori Geiger-Muller. La scarica continua a ripetersi con una frequenza dipendente dal numero di radiazioni che colpiscono il gas. Il Geiger Muller è quindi uno strumento molto sensibile ma con una scarsa precisione e non misura alte attività (ad attività alte la scarica risulta continua).

Un particolare strumento basato sul principio della camera a ionizzazione è il così detto calibratore di dose. Esso è utilizzato per determinare l'attività presente in un campione di un radionuclide noto. E' costituito da una camera di forma cilindrica incavata al suo interno, sigillata e riempita con argon e tracce di alogeno ad alta pressione. La ddp di utilizzo è di 150V.

In Figura 4. è riportata la fotografia di uno di questi calibratori di dose.

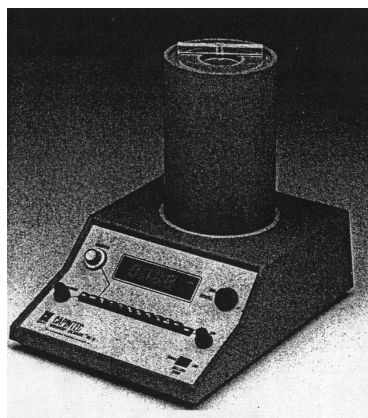


Figura 4.

Poiché diversi tipi ed energie delle radiazioni producono quantità diversa di ionizzazione questi calibratori di dose vengono calibrati per diversi radionuclidi e per ognuno di essi la corrente che passa viene moltiplicata per un fattore correttivo in modo che la lettura in mCi o in MBq corrisponda alla stessa attività emessa da ogni tipo di radionuclide.

Impostato quindi il radionuclide da misurare, la quantità di attività misurata in un campione incognito di quel radionuclide è l'attività effettivamente corrispondente al numero di atomi radioattivi presenti nel campione (misura quantitativa)

- Strumenti a scintillazione.

Gli strumenti a scintillazione utilizzano la proprietà delle radiazioni di interagire con alcune specie chimiche provocando l'emissione di onde elettromagnetiche nella regione del visibile o ultravioletto. L'interazione quindi non provoca ionizzazione ma

eccitazione di elettroni di legame che poi ritornano allo stato fondamentale emettendo fluorescenza (scintillazione).

Esistono scintillatori solidi, ad esempio costituiti da cristalli di ioduro di sodio drogati con tallio (NaI(Tl)) o di germanio drogato con litio (Ge(Li)), e scintillatori liquidi quali sostanze organiche contenenti anelli aromatici (naftalene, antracene). La scelta di NaI(Tl) è dovuta all'alta densità dei cristalli (3.67 g/cm^3) che producono, per interazione con radiazioni γ fotoni luminosi ($E = 30 \text{ eV}$) con alta efficienza in presenza di tracce di tallio (0.1-0.4 % in mole).

Altri cristalli utilizzati per la scintillazione solida sono a base di ioduro di cesio (CsI(Tl)), germanato di bismuto (GBO), o fluoruro di bario (BaF_2).

Gli scintillatori liquidi vengono utilizzati per la rilevazione di radionuclidi emettitori β^- , i quali vengono mescolati con il liquido scintillante aumentando l'efficacia della scintillazione e la sensibilità della misura.

Gli scintillatori solidi sono invece utilizzati per la possibilità di dimensionarli a piacere. Se si eseguono dei fori nei cristalli si possono inserire i campioni ed aumentare l'efficienza della scintillazione e la sensibilità della misura. Sono utilizzati nei rivelatori radioattivi collegati all'HPLC per la possibilità di far passare il capillare all'interno del cristallo e rilevare l'attività che passa all'uscita della colonna di separazione.

Le Anger-Camere, che sono le γ -camere utilizzate per raccogliere immagini (scintigrafiche) della posizione delle radiazioni su una superficie bidimensionale, sono costituite da insiemi di rivelatori a scintillazione solidi, disposti su una superficie uno accanto all'altro di modo che sia determinata, per ogni rivelatore, la sua posizione. Nelle Anger-camere le dimensioni del cristallo sono di diametro dai 25 ai 45 cm e di spessore da 0.64 a 1.27 cm. Ogni rivelatore deve essere costituito da un collimatore, un rivelatore a sodioioduro, un tubo fotomoltiplicatore, un preamplificatore ed un amplificatore lineare, un analizzatore di impulsi, ed un registratore.

Il collimatore è appoggiato sul cristallo di NaI per limitare il campo visivo in modo che tutte le radiazioni fuori dal campo visivo siano bloccate e non raggiungano il rivelatore. I collimatori sono costituiti da fogli di piombo con moltissimi fori che possono avere varie forme e dimensioni.

Nelle γ camere o Anger-camere, quando il numero di fori nel collimatore aumentano, aumenta la sensibilità del rivelatore, però c'è anche una paragonabile perdita di spessore tra i fori con un aumento della penetrazione di radiazioni γ da direzioni indesiderate. Si può aumentare la risoluzione o la nitidezza dell'immagine diminuendo la dimensione dei fori o aumentando lo spessore del collimatore. Ciò però porta ad una evidente diminuzione della sensibilità (cioè dell'efficienza nella rilevazione dei raggi γ) del rivelatore.

Il rivelatore è diretto verso il fototubo e collegato ad esso con materiale riflettente quale l'ossido di magnesio. Il sodio ioduro è igroscopico, e l'assorbimento di acqua può causare cambiamenti di colore che distorcono la luce trasmessa al fototubo. Quindi i cristalli sono ermeticamente sigillati in contenitori di alluminio. I cristalli devono essere mantenuti a temperatura costante per evitare incrinazioni o rotture: Essi inoltre sono molto fragili per cui devono essere maneggiati con cura ed attenzione.

Il fotomoltiplicatore consiste in un fotocatodo sensibile alla luce, una serie di elettrodi metallici noti come dinodi nel mezzo ed in un anodo, il tutto racchiuso in un tubo di vetro sotto vuoto. Il fototubo è collegato al cristallo di NaI con uno speciale grasso ottico. Il numero di fototubi va da 19 a 91 disposti in una superficie esagonale.

Maggiore è il numero di fototubi più grande è la risoluzione prodotta dalla γ -camera. Il voltaggio è di circa 1000 Volts in salti di 100 V per dinodo. Quando i fotoni raggiungono il fotocatodo producono fotoelettroni che vengono accelerati producendo a

loro volta ionizzazione e quindi nuovi elettroni che vengono a loro volta accelerati. Vengono prodotti impulsi di 10^5 - 10^8 elettroni che arrivano all'anodo e quindi passano al preamplificatore ed all'amplificatore lineare. L'amplificazione dell'impulso va da 0 a 10V.

Il rivelatore raccoglie i segnali dall'amplificatore e ne registra il valore. Se i fotomoltiplicatori e gli amplificatori collegati sono disposti sul monocristallo nella Anger-camera, un rivelatore computerizzato costruirà una immagine tomografica evidenziando nella posizione del fototubo l'attività che lo stesso raccoglie ed amplifica.

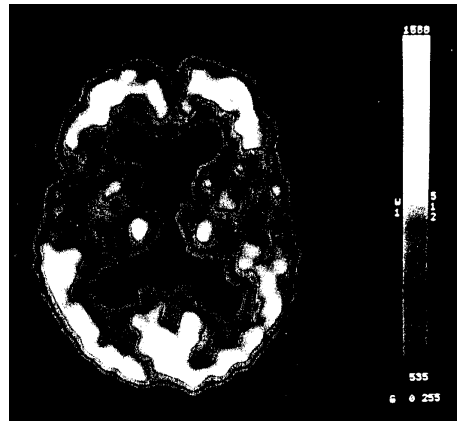


Figura 5. Esempio di immagine scintigrafica

- Strumenti a semiconduttore (S.C.)

Quando una radiazione raggiunge un semiconduttore, può cedere la sua energia ad un elettrone e farlo passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

Si crea così nel semiconduttore una coppia buca positiva-elettrone, che, una volta applicata una ddp ai capi del cristallo, segnala un impulso di corrente.

Poiché gli elettroni passano nella banda di conduzione anche per eccitazione termica, per ridurre il rumore di fondo, ed aumentare quindi la sensibilità dello strumento di misura dell'attività, si dovrebbe mantenere il semiconduttore a bassa temperatura. I semiconduttori a silicio possono essere usati anche a temperatura ambiente. I semiconduttori sono di tipo P (se drogati con As, P, o Sb) se la conducibilità è dovuta a cariche positive (lacune) o di tipo N (se drogati con Al, Ga o Y) se la conducibilità è dovuta alle cariche negative. I rivelatori a S.C. presentano una struttura a Diodi PIN in cui un semiconduttore di tipo P è affacciato ad uno di tipo N e gli elettroni passano da N a P fino ad arrivare ad una posizione di equilibrio. Si crea così una ddp tra N e P che passa attraverso una zona di contatto neutra. All'arrivo della radiazione, si crea uno squilibrio nella regione di contatto e quindi un segnale elettrico. La ddp in questi casi è troppo bassa per essere rilevata. Negli strumenti più efficienti si crea invece una ddp (polarizzazione) inversa, cosicché gli elettroni passano da N a P e la radiazione, interagendo nella regione di contatto PN, porta ad una maggior variazione di ddp ed una maggior sensibilità.

L'efficienza di conteggio resta comunque maggiore per i rivelatori a scintillazione. I rivelatori a semiconduttore sono invece preferibili quando è importante la risoluzione in energia delle radiazioni emesse da un radionuclide.

- Analizzatore di altezza degli impulsi

Tale strumento, abbinato allo scintillatore, fotomoltiplicatore ed amplificatore, seleziona gli impulsi in funzione dell'energia delle radiazioni raccolte dallo scintillatore. L'analizzatore dell'altezza degli impulsi è uno strumento che conta solamente quegli impulsi che ricadono entro intervalli di pre-selezionate ampiezze di voltaggio(canali) e rigetta le altre.

E' possibile utilizzare il conteggio differenziale in cui sono contati solo gli impulsi derivati da γ ad energie preselezionate. Se devono essere contate tutte le radiazioni γ al di sopra di una energia selezionata allora si utilizza il così detto conteggio integrale, in cui è operativo solo il livello di selezione più basso.

Un analizzatore di altezza degli impulsi di solito seleziona solo un intervallo di impulsi e si chiama analizzatore monocanale. L'analizzatore multicanale invece può simultaneamente registrare impulsi in un certo numero di canali predeterminati. In questi casi l'analizzatore multicanale fornisce lo spettro delle radiazioni γ di varie energie emesse da una sorgente radioattiva. Esso allora può individuare il radionuclide, o la miscela di radionuclidi presenti nella sorgente (Spettrometro multicanale).

Nel caso delle Anger-camere l'analizzatore di altezza degli impulsi può essere tarato automaticamente per la maggior efficienza nella rilevazione delle γ provenienti da ^{131}I , o da $^{99\text{m}}\text{Tc}$, oppure può essere tarato per la raccolta di entrambe le γ del decadimento di ^{111}I o del ^{67}Ga .

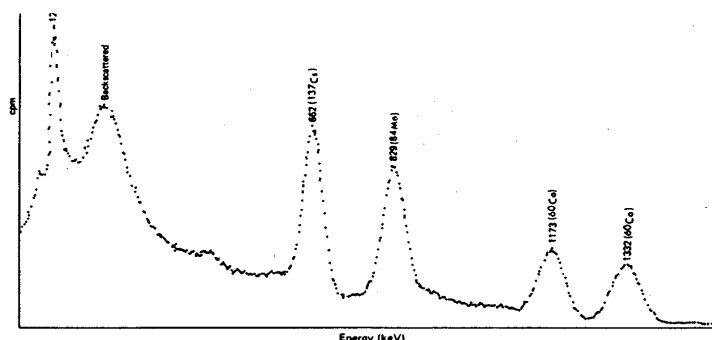


Figura 6. Spettrometria multicanale

- Immagini tomografiche Computerizzate.

SPECT

Le γ -camere hanno l'inconveniente di fornire immagini di distribuzione dell'attività su tre dimensioni schiacciate in due dimensioni. Si può ridurre l'inconveniente scegliendo la disposizione della γ -camera sull'asse che consente il maggior numero di informazioni.

Esiste però anche la possibilità di eseguire una vera immagine tridimensionale se si fa ruotare la γ -camera intorno alla regione di interesse e si raccolgono serie di immagini ad angoli ben precisi con incrementi di angolo da 3° a 10° tra 0 e 180° . Il computer assembla le immagini in una immagine tridimensionale.

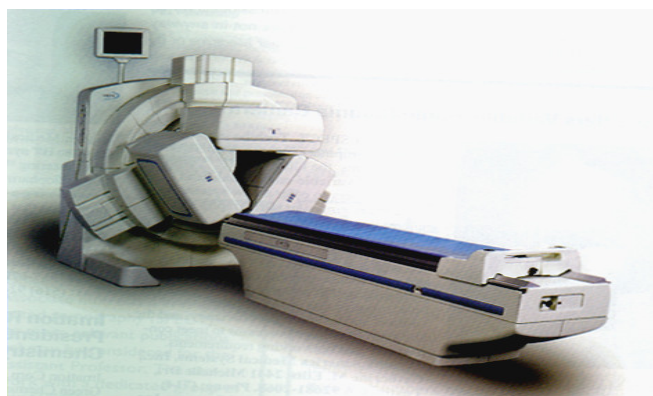


Figura 7. Camera SPECT a tre teste.

Sono in commercio Strumenti SPECT da due o tre teste (γ -camere) che consentono la raccolta di due o tre immagini contemporaneamente da angoli diversi così da ridurre della metà o di due terzi il tempo di raccolta dell'immagine tridimensionale.

PET

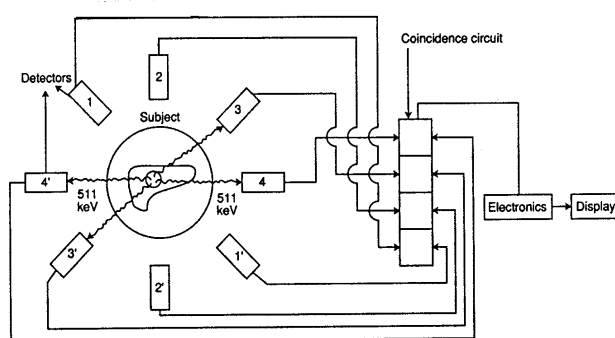
La strumentazione PET utilizza un principio del tutto diverso di raccolta delle immagini.

Anche se i rivelatori sono dello stesso tipo di quelli che raccolgono le radiazioni γ , essi non necessitano dei collimatori e devono essere tarati per consentire la maggior efficienza nella rilevazione di radiazioni γ di 511 KeV.

Le radiazioni γ rilevate dalla PET sono infatti derivate da annichilazione, perché i radionuclidi utilizzati per l'ottenimento delle immagini sono emettitori di positroni.

La tecnologia per la raccolta delle immagini utilizzata dalla PET è legata alle caratteristiche del fenomeno dell'annichilazione ovvero all'emissione contemporanea di due radiazioni γ con direzioni opposte (180°).

In figura è riportato uno schema della strumentazione PET.



Schematic diagram of a PET system using four pairs of detectors.

Figura 8.

Lo strumento raccoglie solamente i segnali che arrivano in contemporanea da due rivelatori tra quelli disposti ad anello intorno alla sorgente.

Questo fatto consente una alta precisione nell'evidenziare il punto dove avviene l'annichilazione, e consente così di non utilizzare i collimatori e quindi aumentare l'efficienza nella rilevazione dell'attività.

La risoluzione ha delle limitazioni intrinseche che sono dovute all'energia dei positroni che annichilano in una sfera di azione dipendente dall'energia delle β^+ , e dal fatto che l'angolo di emissione contemporanea delle due radiazioni γ non è sempre esattamente di 180° .

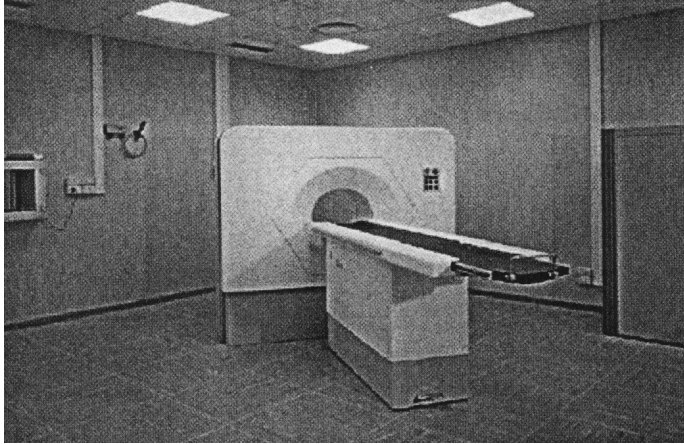


Figura 9. Camera PET

La strumentazione PET verrà più ampiamente presentata nel capitolo relativo all'impiego dei radiofarmaci marcati con emettitori di positroni.