INDICE

Paragrafo 1 Il nucleo

1.1 Struttura del nucleo
1.2 Isotopi
1.3 Isobari
1.4 Dimensione del nucleo
1.5 Modelli
1.6 Forze di coesione nucleare

Paragrafo 2 Emissioni nucleari

2.1 Emissione α
2.2 Emissione β^-
2.3 Emissione β^+
2.4 Cattura elettronica
2.5 Radiazione γ

Paragrafo 3 Penetrazione nella materia

3.1 Emissione α
3.2 Emissione β
3.3 Radiazione γ
3.4 Radiazione di neutroni
3.5 Ionizzazione nella materia

Paragrafo 4 Attività

4.1 Decadimento radioattivo
4.2 Attività di un radioisotopo
4.3 Tempo di dimezzamento
4.4 Famiglie radioattive
4.5 Produzione di radioisotopi artificiali
4.6 Traccianti radioattivi
4.7 Analisi di diluizione
4.8 Applicazioni dei radiotraccianti

Paragrafo 1

IL NUCLEO

La scoperta del neutrone (1932, Chadwick: bombardamento dei cristalli di Berillio con nuclei di elio e rilevamento di una particella neutra di massa pari a quella del protone) ha permesso di spiegare l'esistenza di elementi di massa diversa ma con le stesse proprietà chimiche (isotopi) e di formulare un modello del nucleo.

1.1 Struttura del nucleo

Il nucleo è costituito da due tipi di particelle: i *protoni*, di carica positiva, e i *neutroni*, particelle elettricamente neutre. La carica elettrica del nucleo è dovuta alla carica totale dei protoni. Il numero di protoni presenti nel nucleo è il numero atomico **Z**.
Il numero **N** di neutroni presenti nel nucleo si ottiene dal numero di massa **A**: **N = A – Z**

1.2 Isotopi

Per un dato nucleo di numero atomico **Z** possono esistere specie con numeri diversi di neutroni: tali elementi sono detti isotopi del nucleo di numero atomico **Z**.
Un esempio è l'idrogeno che in natura presenta due isotopi:

DEUTERIO	**Z = 1**	**N = 1**
TRIZIO	**Z = 1**	**N = 2**

1.2 Isobari

Gli isobari sono elementi aventi lo stesso numero di massa **A** ma diverso numero atomico **Z**; sono quindi specie chimicamente distinguibili.

1.3 Dimensione del nucleo

Esperimenti di diffusione di particelle a (nuclei di elio) o di neutroni veloci da parte dei nuclei hanno mostrato l'esistenza di una forza attrattiva che ad una certa distanza si trasforma in una forza altamente repulsiva. Questa distanza viene assunta come raggio del nucleo ed è dell'ordine dei 10^{-13} cm ed aumenta con il numero dei nucleoni secondo la legge: $R = R_0 A^{1/3}$ dove R_0 vale $1.41 * 10^{-13}$.
La densità nucleare risulta costante per tutti gli elementi.

1.5 Modelli

Modello a shell: tale modello proposto negli anni ’50 da una rappresentazione del nucleo del tutto simile a quella dell’atomo. I neutroni e i protoni sono disposti su orbite permesse (shell) ad ognuna delle quali viene associato un dato livello energetico. Per la differenza di massa tra protoni e neutroni le corrispondenti orbite hanno energie leggermente diverse.

Modello a goccia: tale modello fu proposto nel 1936 da Bohr per spiegare un particolare tipo di fenomeno di risonanza che si verifica nelle reazioni nucleari. Se si immagina di colpire il nucleo bersaglio con un proiettile si ottiene un nucleo composto eccitato, mentre l’energia del proiettile si distribuisce probabilisticamente fra tutti i nucleoni. In una fase successiva una particella potrebbe assumere la maggior parte dell’energia disponibile ed essere espulsa dal nucleo (esempio: fissione nucleare).

1.6 Forze di coesione nucleare

Per spiegare la stabilità del nucleo, tenendo conto delle elevate forze di repulsione elettrostatica tra i protoni e dell’enorme energia di legame che mantiene uniti i nucleoni (40 volte l’energia elettrostatica, 1037 volte l’energia gravitazionale), è stata definita un nuovo tipo di forza: la forza nucleare.
Sperimentalmente, bombardando con particelle ad alta energia nuclei quali il deuterio, ad esempio, e producendone la disintegrazione, è stato possibile individuare le proprietà fisiche di questo tipo di forze.

Raggio d’azione: è valutatodell’ordine di 1 femi (10^{-13}cm); ad una distanza pari a circa 4 fermi le forze nucleari eguagliano le forze elettrostatiche, a distanze

superiori le forze nucleari sono attrattive, a valori inferiori sono fortemente repulsive.

Carica le forze nucleari sono indipendenti dalla carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni.

Scambio di carica: nell'interazione nucleare il neutrone ed il protone risultano essere due stati di una stessa particella detta nucleone.

Teoria di Yukawa: l'interazione tra nucleoni avviene attraverso lo scambio di una particella che trasmette nel processo di emissione e assorbimento la forza nucleare. Tale particella è nota come mesone p.

$$\mathbf{n \rightarrow p + \pi^-} \qquad \mathbf{p \rightarrow n + \pi^+}$$
$$\mathbf{n \rightarrow n + \pi^0} \qquad \mathbf{p \rightarrow p + \pi^0}$$

Energia di legame: il nucleo come insieme possiede una certa energia di legame che impedisce ai nucleoni di fuoriuscire. L'energia di legame complessiva dipende direttamente dal numero di massa A. Invece l'energia di legame per singolo nucleone cresce rapidamente con il numero di massa fino al fluoro (A=19) per poi mantenersi costante, diminuendo lentamente fino all'Uranio (A=238).

Difetto di massa: Si verifica come la massa del nucleo di un elemento (Z,A) risulta sempre inferiore alla somma delle masse dei nucleoni di cui è composto:

$$\mathbf{M_{Z,N} < M_Z + M_N}$$

La differenza delle masse $\Delta\mathbf{M}$ viene convertita in energia in base alla legge di equivalenza stabilita dalla dinamica relativistica: $\mathbf{c^2\,\Delta M = E}$

La quantità, definita come ***difetto di massa***, è allora l'equivalente in massa dell'energia di legame necessaria a tenere insieme i vari costituenti del nucleo, secondo la relazione:

$$\mathbf{\Delta M = \frac{E_{legame}}{c^2} = Z\,M_p + (A\text{-}Z)\,M_n - M}$$

ad eccezione dei nuclei molto leggeri, l’energia di legame per nucleone può ritenersi in media pari a 8-9 MeV.

Paragrafo 2

EMISSIONI NUCLEARI

2.1 Emissione α

Una particella α è identica al nucleo di elio o ad una atomo di elio doppiamente ionizzato (He^{++}) e consiste di due protoni e di due neutroni. La sua carica è pari a +2e, la sua massa a riposo è circa $7x10^{-27}$ kg.

Il decadimento con emissione α avviene principalmente tra i nuclei (Z,A) più pesanti con un numero atomico maggiore di 82 (pari a quello del piombo) e da luogo ad un elemento di numero atomico (Z-2) e numero di massa (A-4).

Un esempio di emissione α è il decadimento del Radio in Radon:

$$^{226}Ra_{68} \rightarrow {}^{222}Rn_{86} + {}^{4}\alpha \qquad \text{con } T^{1/2} \text{ paria 1620 anni}$$

2.2 Emissione β^-

Una particella β- è un elettrone veloce emesso dal nucleo durante un decadimento. In un radioisotopo con un numero alto di neutroni si ha una alta probabilità che neutroni si trasformino in protoni secondo il processo:

$$^{1}n \rightarrow {}^{1}p + e^{-} + \nu$$

Durante il decadimento β^-, il radioisotopo (Z,A) mantiene lo stesso numero di massa mentre aumenta di una unità il numero atomico.

Un esempio di decadimento β- è quello del Fosforo in Zolfo:

$$^{32}P_{68} \rightarrow {}^{32}Sn_{86} + e^{-} + \nu \qquad \text{con } T^{1/2} \text{ paria 14.3 giorni}$$

2.3 Emissione β^+

Una particella β+ è un positrone veloce emesso dal nucleo durante un decadimento. Questo tipo di decadimento avviene solo per elementi artificiali.

In un radioisotopo carente di neutroni si ha una alta probabilità che protoni si trasformino in neutroni secondo il processo:

$$^{1}p \rightarrow {}^{1}n + e^{+} + \nu$$

Durante il decadimento β^+, il radioisotopo (Z,A) mantiene lo stesso numero di massa mentre decresce di una unità il numero atomico.

Un esempio di decadimento β+ è quello del Sodio in Neon:

$$^{22}Na_{11} \rightarrow {}^{22}Sn_{10} + e^{+} + \nu \quad \text{con } T^{1/2} \text{ pari a giorni}$$

2.4 Cattura elettronica o cattura K

Un protone del nucleo può catturare un elettrone delle orbite atomiche più interne, andando a formare un neutrone secondo la relazione:

$$^{1}p + e^{-} \rightarrow {}^{1}n + \nu$$

Questo processo trasforma il radioisotopo (Z,A) in un nuovo elemento di numero di massa identico, ma con un numero Z diminuito di una unità.
Un esempio di decadimento per cattura K è quello del Cromio in Vanadio:

$$^{51}Cr + e^{-} \rightarrow {}^{51}V + \nu$$

2.5 Emissione γ

La radiazione γ viene emessa da un nucleo durante una transizione tra uno stato eccitato del nucleo ed uno stato a più bassa energia. Spesso tale emissione è successiva ad un altro decadimento, quale l'emissione α o β^- che lascia il ***nucleo "figlio"*** in uno stato eccitato. Generalmente l'emissione γ viene emessa frazioni di μsecondo dopo il decadimento primario; tuttavia può succedere che l'emissione abbia un ritardo ed allora si dice che il nucleo figlio è in uno stato ***metastabile***.
Un esempio utilizzato in medicina nucleare è il Tecnezio 99m (^{99m}Tc), prodotto dal decadimento β^- del Molibdeno, con un tempo caratteristico di decadimento pari a 67 ore:

$$^{99}Mo \rightarrow {}^{99m}Tc + e^{-} + \nu$$

e che decade successivamente con una emissione γ in un tempo di dimezzamento di 6 ore:

$$^{99m}Tc \rightarrow {}^{99}Tc + \gamma$$

Una vita così breve implica che tale elemento deve essere prodotto nel momento del suo utilizzo. Generalmente il nucleo "padre", il Molibdeno è contenuto in una colonna di alluminio e continua a decadere nel nucleo metastabile. Quando è necessaria una certa quantità di tecnezio, il nucleo "padre" viene risciacquato con una soluzione salina che porta via il nucleo "figlio" ad alta concentrazione senza rimuovere il nucleo "padre".

Paragrafo 3

PENETRAZIONE NELLA MATERIA

3.1 Radiazione α

Le particelle α producono un'alta densità di ionizzazione perdendo presto tutta la loro energia, quindi la profondità di penetrazione (il loro *cammino medio*) risulta piccola, dell'ordine dei cm.
Inoltre, poiché per una data reazione nucleare viene prodotto un fascio monoenergetico di particelle α con una traiettoria rettilinea, tutte le particelle perderanno la loro energia cinetica alla stessa profondità in un dato mezzo. Ad esempio in aria le particelle α di 5 e 10 MeV hanno un cammino medio di 35 e 100 mm, mentre nell'allumino il cammino diminuisce a circa 0.01 mm.

3.2 Particelle β

Le particelle β hanno un tipico spettro energetico continuo e la loro traiettoria non è assolutamente rettilinea: durante il loro cammino urtano continuamente con la materia (atomi, elettroni e nucleo) ed essendo particelle "leggere" vengono deviate fortemente. Risulta perciò difficile definire un raggio per un dato mezzo ed una data energia. Tuttavia si può definire come "range" lo spessore massimo di penetrazione raggiunto dalle particelle. Ad esempio per particelle β^- di 0.015, 3.0 e 5.0 MeV il range massimo in aria è rispettivamente 1mm, 1m e 10 m; mentre particelle β^- di energia 1, 5 e 10 MeV nell'allumino hanno un range pari a 1.5mm, 10mm e 20mm.

3.3 Radiazione γ

I fasci di radiazione γ sono molto penetranti e quando penetrano nella materia hanno un tipico assorbimento di tipo esponenziale (identico a quello studiato per la radiazione X). Non esiste un range massimo di penetrazione, tuttavia per poter confrontare il potere di penetrazione della radiazione γ con quello dei diversi tipi di radiazione si prende in

considerazione il valore dello spessore necessario a ridurre a un decimo il valore iniziale dell'intensità del fascio.
Per fasci di radiazione γ di 0.01 MeV, 1 MeV e 10 MeV lo spessore richiesto vale:
in aria: 4m, 300m, e 1000m
in tessuto molle: 0.5 cm, 30cm, 100 cm;
in alluminio: 0.04 cm, 14 cm, 37 cm;
Per fasci di radiazione γ di 1MeV e 10 MeV lo spessore richiesto vale:
in piombo: 3 cm e 4 cm
in cemento armato: 15 cm, 41 cm;

3.4 Radiazione di neutroni

Essendo elettricamente neutri, i neutroni possono penetrare in profondità interagendo direttamente con i nuclei atomici. I neutroni veloci vengono rallentati dalle collisioni con i nuclei deviando dalla loro traiettoria e producendo tracce di ionizzazione molto densa. Alla fine i neutroni lenti o "termici" vengono catturati dai nuclei atomici, producendo elementi instabili che emettono radiazione γ.
I neutroni hanno approssimativamente una curva di trasmissione di tipo esponenziale e risultano particolarmente distruttivi per il tessuto biologico. Infatti essi sono ben assorbiti dai materiali contenenti particelle di dimensione simile a quella dei neutroni, come nel caso degli atomi di idrogeno dell'acqua.

3.5 Ionizzazione nella materia

La radiazione ionizzante ha la capacità di rimuovere gli elettroni atomici dalle loro orbite producendo un certo numero di coppie di ioni lungo il suo cammino.
Le ***particelle direttamente ionizzanti*** sono le particelle elettricamente cariche (elettroni, protoni, particelle α …) aventi sufficiente energia cinetica per ionizzare nella collisione.
Le particelle non cariche elettricamente (radiazione x e γ, neutroni) producono particelle ionizzanti e si dicono perciò ***radiazione indirettamente ionizzante.***
Essendo il valore medio della energia di ionizzazione in aria pari a 34 eV e l'energia sviluppata nelle reazioni nucleari pari a qualche MeV, il numero di coppie di ioni prodotti è enorme, dell'ordine di 10^6.

Proprietà delle reazioni nucleari

Le emissioni α e γ avvengono per valori discreti di energia, valori determinati dal tipo di emettitore e di decadimento.

L'emissione β^- è caratterizzata da uno spettro continuo da un valore 0 di energia ad valore massimo che dipende dal tipo di radioisotopo. Si ricorda come in tale decadimento l'energia in gioco è distribuita tra la particella β^- e il neutrino ν.

La seguente figura mostra lo spettro energetico delle diverse emissioni.

Paragrafo 4

ATTIVITA'

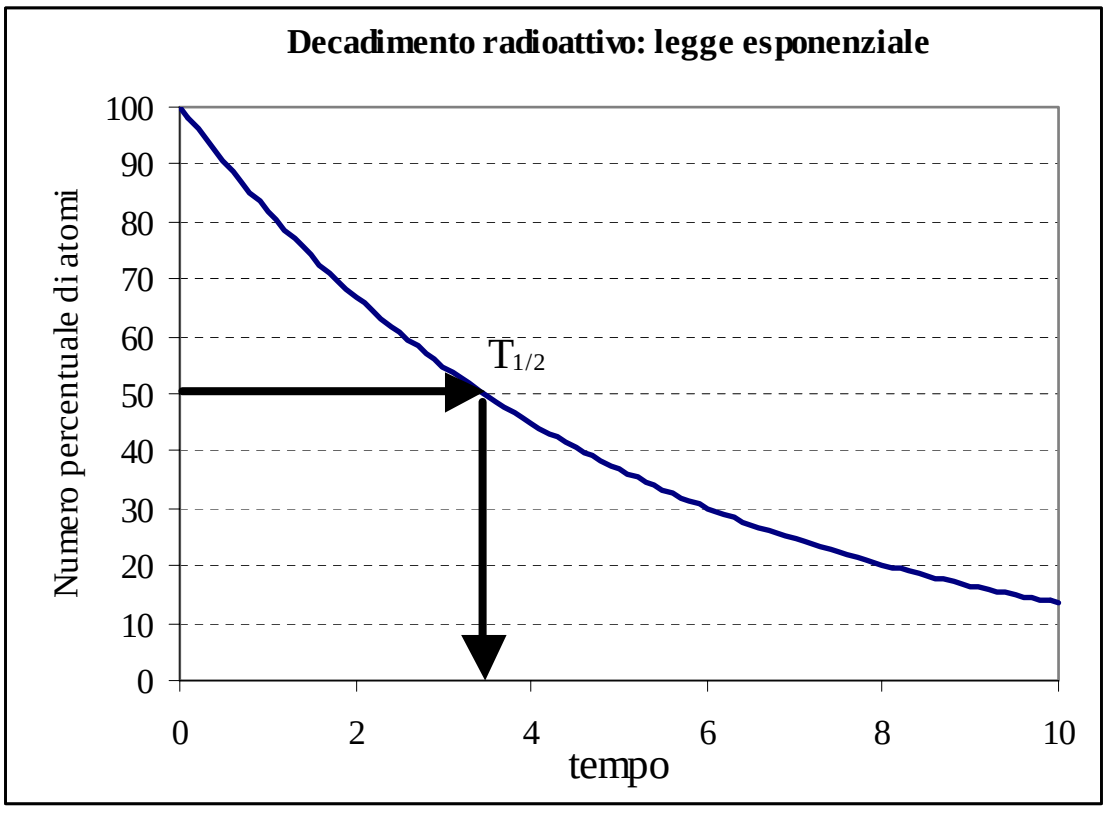
4.1 Decadimento radiattivo

Alcuni elementi possiedono in natura degli isotopi instabili (***radioisotopi***). Essi decadono spontaneamente (*emissione* o *disintegrazione*) emettendo particelle e fotoni per raggiungere lo stato energetico fondamentale. Questo tipo di fenomeno può essere indotto anche artificialmente, bombardando nuclei pesanti stabili ad esempio con neutroni.
La legge statistica che regola l'andamento nel tempo del decadimento radioattivo è di tipo esponenziale. In un campione di un particolare radioisotopo, il numero di atomi che si disintegrano nell'unità di tempo è direttamente proporzionale al numero di atomi radioattivi presenti nel campione in quell'istante:

$$-\frac{dN}{dt} \propto N \quad \Rightarrow \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

dove **N** è il numero di atomi rimasti e λ è la costante di decadimento, caratteristica del radioisotopo considerato. Integrando queste relazioni e definendo N_0 il numero iniziale di atomi, in un qualsiasi istante t il numero di atomi sarà:

$$N_t = N_0 \exp(-\lambda t)$$



4.2 Attività

Si definisce come attività di una data quantità di radionuclide il rateo di disintegrazione del radionuclide.
Se dN è il numero di trasformazioni nucleari che avvengono spontaneamente in un intervallo di tempo dt, allora l'attività a è definita come:

$$\mathbf{a} = -\frac{\mathbf{dN}}{\mathbf{dt}}$$

L'unità di misura per l'attività è il secondo-1, definito come Becquerel (Bq), pari ad una disintegrazione al secondo.
Tenendo conto della legge di decadimento ne segue che:

$$\mathbf{a_t = a_0 \exp(-\lambda t)}$$

4.3 Tempo di dimezzamento

Si definisce come tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ il tempo necessario affinché l'attività del radionuclide si riduce a metà del valore iniziale:

$$\mathbf{T_{1/2}} = \frac{\mathbf{0.693}}{\lambda}$$

$T_{1/2}$ descrive quanto velocemente il materiale si disintegra ed il suo valore è strettamente legato alla attività del radioisotopo:

$$\mathbf{a} = \mathbf{N}\ \frac{\mathbf{0.693}}{\mathbf{T}_{1/2}}$$

Essendo il numero di atomi radioattivi presenti in kg di materiale, pari a $6.02 * 10^{26} /A$, essendo A il numero di massa del radionuclide.

4.4 Famiglie radioattive

In genere dalla disintegrazione di un elemento non stabile viene generato un nuovo elemento ancora non stabile che successivamente decadrà in un altro elemento, trasformandosi continuamente fino al raggiungimento di uno stato stabile. La serie di tutti gli elementi che, a partire da un progenito, si sono originati l'uno dall'altro, prende il nome di famiglia radioattiva. In natura esistono tre famiglie radioattive: l'elemento padre ha una vita lunghissima, mentre l'ultimo elemento è stabile:

Famiglia dell' Uranio $^{238}U_{92}$: l'uranio ha un tempo di dimezzamento di $4.5 * 10^{9}$ anni, l'isotopo stabile finale è il piombo $^{206}Pb_{82}$.

Famiglia dell' Attinio $^{235}U_{92}$: l'attinio ha un tempo di dimezzamento di $7.1 * 10^{8}$ anni, l'isotopo stabile finale è il piombo $^{207}Pb_{82}$.

Famiglia del Torio $^{232}Th_{90}$: il torio ha un tempo di dimezzamento di $1.4 * 10^{10}$ anni, l'isotopo stabile finale è il piombo $^{208}Pb_{82}$.

In tutte e tre le catene, fra i vari elementi prodotti, è sempre presente un isotopo del radio. Si osserva come dalla valutazione della quantità di piombo presente nei minerali di uranio e di torio è possibile stabilire l'età dei minerali e di conseguenza l'età della terra.

4.5 Produzione di radioisotopi artificiali

Il metodo più diffuso di produzione di radioisotopi artificiali è il bombardamento di alcuni nuclei stabili con particelle ad alta energia quali i neutroni, i protoni, il deuterio e le particelle α.
Le reazioni nucleari risultanti portano alla formazione di radioisotopi utili.

4.5.1 Metodi di produzione nei reattori nucleari

Un reattore per fissione dell'uranio naturale consiste di un reticolo di barre di uranio immerse in un materiale frenante. Quando le barre di uranio vengono irradiate con neutroni, gli atomi di $^{235}U_{92}$ catturano i neutroni per formare il nucleo instabile $^{236}U_{92}$ che successivamente si disintegra in due frammenti pesanti di dimensioni paragonabili (*processo di fissione*):

$$^{235}\mathbf{U_{92}} + \mathbf{1n} \Rightarrow {}^{236}\mathbf{U_{92}}$$

Un gran numero di radioisotopi utili si possono ottenere come prootti della fissione e possono essere chimicamente separati dalle barre di uranio.
Fra i più utili ricordiamo:

$^{90}\mathbf{Sr_{38}}$(Stronzio) $^{131}\mathbf{Ir_{53}}$(Iodio) $^{137}\mathbf{Cs_{55}}$(Cesio) $^{85}\mathbf{Kr_{36}}$(Kripton) $^{133}\mathbf{Xe_{54}}$(Xenon)

Nella fissione viene emessa molta energia e neutroni rallentati dal materiale moderatore (tipicamente carbonio-graffite). I neutroni lenti successivamente possono essere catturati dai nuclei di uranio naturale dando inizio di nuovo alla catena di fissione con emissione di grandi quantità di energia e di neutroni. Tali quantità sono in eccesso per l'autosostentamento della catena di fissione, possono perciò venir utilizzate per irradiare altri target stabili e produrre altri radioisotopi.

4.6 Traccianti radioattivi

I traccianti radioattivi introdotti nel corpo umano possono dare utili informazioni su alcune parti del corpo, quali il sangue, l'urina o organi particolari.
La quantità del tracciante deve essere piccola in modo da non cambiare il sistema sotto esame, quindi il tracciante deve avere un alto valore di ***attività specifica.***
L tracciante deve comportarsi come la sostanza investigata.

Il tracciante deve essere rivelato facilmente ed accuratamente: per questo motivo vengono usati preferibilmente i γ **emettitori** (per i quali si utilizzano i rivelatori con contatori a scintillazione).

Il radionuclide più usato è il ^{99m}**Tc**, soprattutto in medicina nucleare.
I vantaggi del sono i seguenti:

1) il ^{99m}**Tc** decade con un tempo di dimezzamento breve pari a circa ore;
2) il ^{99m}**Tc** emette solo radiazione γ;
3) la radiazione emessa, ad energia pari a 140 keV, è facilmente rivelata da un sistema detto camera;
4) il ^{99m}**Tc** si attacca facilmente a diversi composti chimici;
5) il ^{99m}**Tc** si produce facilmente.

4.7 Analisi di diluizione

In uno studio con tracciante dei fluidi in un corpo, si introduce una piccola quantità di tracciante che si mescolerà con il volume del fluido di interesse.
Se l'attività del tracciante è nota, **x(Bq),** ed il tracciante si mescola completamente con il volume **V(m^3),** la concentrazione dell'attività (ovvero *attività per volume*) prodotta nella miscela è:

$$\mathbf{c = x \cdot V^{-1}} \qquad \mathbf{(Bq\ m^{-3})}$$

Se il tracciante è aggiunto come piccolo volume **v** di soluzione di alta concentrazione di attività **c'** :

$$\mathbf{x = c' \cdot v} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{V = c' \cdot v \cdot c^{-1}}$$

Possono esserci due possibili cause di errore:

a) la miscela di tracciante e traccia può non avvenire completamente;
b) ci possono essere delle perdite della traccia da qualche parte del sistema.

4.8 Esempi di diluizione

Misura della quantità totale di acqua contenuta nel corpo (si usa come radiotracciante il Trizio ^{3}H , caratterizzato da un tempo di dimezzamento pari a 12.2 anni ed emettitore β, di energia massima pari a 18 keV).

Misura del volume di plasma (le proteine del plasma si legano facilmente, e quindi sono facilmente contrassegnabili, con lo iodio radioattivo ^{125}I, ^{131}I e ^{132}I e le loro proprietà biologiche non ne risultano influenzate).

STUDIO	TRACCIANTE	DESCRIZIONE
Tiroide	$^{123}\mathbf{I}$ $^{125}\mathbf{I}$ $^{131}\mathbf{I}$ $^{132}\mathbf{I}$ $^{99m}\mathbf{Tc}$	Valutazione delle funzionalità della Tiroide; Lo $^{132}\mathbf{I}$ è usato più nei bambini per il suo basso dosaggio.
Cuore e polmoni	$^{131}\mathbf{I}$ $^{133}\mathbf{Xe}$ $^{99m}\mathbf{Tc}$	Flusso cardiaco, volume sanguigno, frequenza della circolazione.
Tumori – metastasi	$^{32}\mathbf{P}$ $^{131}\mathbf{I}$ $^{99m}\mathbf{Tc}$	Rivelazione, localizzazione e diagnosi differenziata.
Terapia	$^{32}\mathbf{Cs}$ $^{131}\mathbf{I}$ $^{32}\mathbf{P}$ $^{192}\mathbf{Ir}$	Lo $^{125}\mathbf{I}$ viene usato per trattamenti della tiroide; Il viene usato per problemi ematologici; Il $^{32}\mathbf{Cs}$ e l' $^{192}\mathbf{Ir}$ viene usato per trattamenti ginecologici, su prostata, esofago, bronchi (*brachiterapia*)