

Introduzione

Questo è un articolo divulgativo sugli effetti biologici dovuti all'assorbimento di radiazioni ionizzanti. In questi giorni in cui si parla sempre più insistentemente di "Navi dei Veleni", con conseguenti logiche e giustificate preoccupazioni da parte della popolazione civile interessata, è quanto mai necessario fornire informazioni scientifiche riguardo quelle che possono essere le problematiche potenzialmente associate al cattivo trattamento di materiale radioattivo.

Purtroppo l'ignoranza in questa materia in Italia è pressoché totale, visto che l'argomento "nucleare" è stato cancellato all'indomani del referendum del novembre 1986, che ha sancito la chiusura dei nostri cinque impianti per la generazione di energia elettrica da fissione nucleare.

Uno dei prezzi pagati è stato proprio quello che oggi possiamo definire "l'altro lato della medaglia", ossia la già citata ignoranza in materia.

Si rischia pertanto un poco giustificabile allarmismo che rischia di far più male delle radiazioni stesse!

Inizierò l'articolo con dei brevi cenni sulla natura delle radiazioni e sul loro potere penetrante per poi concludere con gli effetti biologici dovuti alle radiazioni.

Identificazione delle radiazioni

In natura esistono diverse tipologie di atomi, sotto forma di isotopi, alcuni dei quali risultano essere instabili, ossia hanno uno sbilanciamento per quello che concerne il numero totale di neutroni e protoni all'interno del nucleo. La **radioattività** è un processo naturale che riguarda i nuclei degli isotopi. Per questo motivo si preferisce usare il termine "nucleare" piuttosto che "atomico".

Un isotopo instabile cerca la propria stabilità sprigionando energia attraverso l'emissione di radiazioni che possono essere di tre tipi: particelle *alfa*, particelle *beta* e radiazioni *gamma*.

A seconda del tipo di emissione, alcuni isotopi sono detti *alfa-emittenti* o *beta-emittenti* mentre, almeno in linea teorica, tutti possono emettere radiazione gamma.

La particella alfa (α , ${}^4_2\alpha$, ${}^4_2\text{He}$) è un nucleo di elio costituito da due protoni e due neutroni. Essa è priva di elettroni orbitali. È solitamente liberata dai nuclei di atomi più pesanti, come ad esempio il radon-226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$).

In quanto caricata positivamente la particella alfa, attraversando la materia, esercita una forza di attrazione sugli elettroni degli atomi circostanti. Il risultato è che la particella alfa "strappa" elettroni dagli strati atomici più esterni (dove l'energia di legame è quasi nulla) di questi atomi circostanti. A seconda dell'energia loro impressa, gli elettroni strappati potranno a loro volta ionizzare altri atomi circostanti, combinarsi con ioni positivi o divenire elettroni liberi della materia (ricordo che il termine *ionizzazione* descrive il processo di rimozione di uno o più elettroni da un atomo).

Una particella alfa, nell'aria, è in grado di percorrere una distanza pari a circa 2 cm; in un materiale più denso, la distanza percorsa dipende dalla sua energia (minore energia comporta minore penetrazione).

La particella beta (β) è un elettrone espulso, ad elevata velocità, nel processo di disintegrazione di un nucleo. Questo elettrone viene liberato dall'interno del nucleo, non si tratta quindi di un processo che riguarda gli elettroni orbitali di un atomo. Tale elettrone può essere negativo (*negatone β^-*) oppure positivo (*positrone β^+*). Entrambe le particelle hanno la stessa massa, malgrado abbiano cariche di segno opposto.

Come è possibile espellere dal nucleo una particella beta (elettrone) se in esso ci sono solo protoni e neutroni? Nella realtà un neutrone decadendo si scinde in tre particelle: 1 neutrone = 1 protone + 1 elettrone + 1 neutrino energetico. Elettrone e neutrino sono espulsi dal nucleo, mentre il protone rimane.

Esempi di beta-emittenti sono il fosforo-32 (${}^{32}_{15}\text{P}$), il carbonio-14 (${}^{14}_6\text{C}$), il cesio-137 (${}^{137}_{55}\text{Cs}$), lo stronzio-90 (${}^{90}_{38}\text{Sr}$), il mercurio-203 (${}^{203}_{80}\text{Hg}$), l'oro-198 (${}^{198}_{79}\text{Au}$), il ferro-59 (${}^{59}_{26}\text{Fe}$), il molibdeno-99 (${}^{99}_{42}\text{Mo}$) e il sodio-24 (${}^{24}_{11}\text{Na}$).

Le particelle beta posseggono anch'esse la capacità di eccitare e/o ionizzare gli altri atomi. Tuttavia, a differenza della particella alfa, che crea una coppia di ioni attirando un elettrone orbitale, la particella beta respinge l'elettrone orbitale sbalzandolo dalla sua orbita e creando così ugualmente una coppia di ioni. Una particella beta mediamente dà luogo a circa 100000 ionizzazioni prima di dissipare totalmente la sua energia (*deionizzazione*). La penetrazione della particella beta è nettamente differente da quella alfa. Essa ha una capacità di penetrazione di circa 100 volte superiore a quella della particella alfa. Le particelle alfa sono completamente assorbite da un sottile foglio di carta, mentre per fermare una particella beta occorre uno spessore di 25 mm di legno o circa 1 mm di alluminio. Nei tessuti corporei, le particelle beta di 1MeV (leggi *mega-elettronvolt*) hanno un range di 0.42 cm (ma non sono comunque in grado di superare la barriera epidermica umana). I beta-emittenti, come il fosforo-32 già citato, vengono usati come mezzi terapeutici per leucemia e policitemia. La barriera epidermica (pelle) viene superata somministrando il nuclide per iniezione o per bocca.

Emissione gamma (γ). Nei modi di decadimento radioattivo fin qui considerati (emissione alfa e beta) abitualmente una parte dell'energia liberata nel processo rimane nel nucleo, il quale viene a trovarsi in uno stato eccitato (nucleo *metastabile*). Nessun nucleo tuttavia può mantenere questo eccesso di energia e pertanto esso deve istantaneamente cedere tale energia per ritornare al suo stato fondamentale di minima energia, vale a dire al livello energetico più basso possibile.

L'energia in eccesso è liberata sotto forma di radiazione gamma, e questa ha una energia pari alla variazione dello stato energetico del nucleo (principio di conservazione dell'energia).

Anche i raggi gamma sono in grado di produrre ionizzazione. Essi sono in grado di colpire elettroni orbitali, strappandoli dalle loro orbite ad elevata velocità. Questi elettroni secondari (colpiti) in rapido movimento possono ionizzare gli atomi del mezzo circostante. Lo stesso avviene per i raggi X (che però sono di origine atomica e non nucleare – non provengono dal nucleo ma dalle transizioni energetiche degli elettroni orbitali).

Il grado di penetrazione dei raggi gamma non è nemmeno lontanamente paragonabile a quello delle particelle alfa e beta. In teoria nessuna schermatura è in grado di bloccare completamente la radiazione gamma. Anche con 1 km di piombo potrebbe esserci qualche raggio gamma che riuscirebbe ad attraversarne intatto l'intero spessore.

Emivita e attività nucleare

La *emivita* (detta anche *tempo di dimezzamento*) si indica con il simbolo $T_{1/2}$ ed è il tempo necessario affinché la metà degli atomi presenti ad un certo momento in un certo campione radioattivo venga disintegrata. La riduzione del numero degli atomi nel campione, per disintegrazione del loro nucleo, costituisce il fenomeno del *decadimento radioattivo* ed è pertanto caratteristica di ogni materiale radioattivo.

La radioattività diminuisce naturalmente col tempo, poiché, a mano a mano che atomi decadono, il numero di quelli che restano intatti diviene sempre minore.

Il decadimento radioattivo segue una legge di decrescita esponenziale e ad essa è legata l'*attività nucleare* specifica di ogni atomo radioattivo. Anch'essa segue una legge di caduta esponenziale, pur essendo legata all'emivita dell'isotopo considerato. L'attività nucleare ad un certo tempo infatti è maggiore per un isotopo che ha emivita minore rispetto ad un altro che possiede emivita maggiore. Per questo motivo isotopi con emivita molto grande (miliardi di anni) sono da considerarsi a tutti gli effetti stabili, mentre isotopi ad emivita brevissima (si parla anche di frazioni di secondo) hanno attività molto elevata (elevata radioattività). Questo è un punto critico che distrugge le diverse credenze popolari secondo cui isotopi ad emivita elevata siano maggiormente radioattivi. La verità, come si è visto, è che è vero il contrario di quanto tuttavia si crede!

L'emivita di un isotopo può essere più o meno facilmente determinata, ma ciò che risulta assolutamente casuale e non predicibile è il tempo che passa tra una disintegrazione e la successiva. L'unica certezza è che il numero di decadimenti in un tempo fissato segue una distribuzione di probabilità poissoniana, tipica degli eventi discreti stocastici.

Non è noto il principio secondo cui alcuni isotopi decadono emettendo particelle alfa e altri emettendo particelle beta. Dall'analisi delle tabelle di decadimento di alcuni isotopi radioattivi mi sono accorto che lo schema di decadimento sembra essere dettato da una tendenza "naturale" di ogni isotopo radioattivo a raggiungere l'isotopo stabile ad esso più vicino (la via più breve).

Dose massima ammissibile

L'uomo è sottoposto continuamente alle radiazioni. Esiste infatti la cosiddetta radiazione naturale ad opera dei raggi cosmici provenienti dalle zone alte dell'atmosfera. L'uomo nel suo lento processo evolutivo ha imparato a sopportare tali radiazioni.

L'unità di misura della dose biologica riferita all'uomo per via dell'esposizione a qualsiasi radiazione è il *rem*, oggi sostituito dal *sievert* (1 Sv = 100 rem). Il sievert misura la dose equivalente di una qualsiasi radiazione di origine nucleare. Essa si riferisce direttamente agli effetti biologici che le radiazioni hanno sull'uomo. Ogni uomo assorbe una dose pari a 2.4 mSv (*milli-sievert*) l'anno per effetto della radiazione naturale.

I limiti di esposizione alla radioattività sono regolamentati dal DL 230 del 1995 e integrati dal DL 241 del 2000.

Nella seguente tabella sono presenti alcuni effetti da radiazione oltre i limiti:

<i>Tessuto ed effetto</i>	<i>Soglia di dose</i>	
	<i>Equivalente di dose totale ricevuto in una singola breve esposizione(mSv)</i>	<i>Equivalente di dose totale ricevuto per esposizioni fortemente frazionate o protratte (mSv)</i>
Testicoli Sterilità temporanea Sterilità permanente	150 3500	Non Applicabile Non Applicabile
Ovaie Sterilità	2500 ÷ 6000	6000
Cristallino Opacità osservabili Deficit visivo	500 ÷ 2000 5000	5000 > 8000
Midollo osseo Depressione dell'emopoiesi Aplasia mortale	500 1500	Non Applicabile Non Applicabile

La legge impone che non si possa superare in nessun caso il limite di 1 mSv l'anno oltre la radiazione naturale per la popolazione non addetta a servizi di contatto diretto con materiale radioattivo (medici, operatori di centrali, ecc...).

Per personale a contatto con sostanze radioattive il limite di esposizione è fissato a 15 mSv l'anno.

Effetti biologici

Gli effetti che di seguito verranno descritti sono riferiti a dosi di radiazione che ne giustificano gli effetti (esposizione diretta e adeguata quantificazione della dose). Ogni danno da radiazione va rapportato quindi ad una corrispondente dose irradiata al tessuto in questione in modo diretto. La maggior parte degli effetti di seguito descritti fa riferimento, per esempio, ad introduzione diretta nel corpo di sostanze radioattive, presenti ad esempio in un alimento o in un gas inalato (fumo di tabacco trattato con materiale radioattivo o trovatosi a contatto con esso; inalazione di particolari polveri sottili; ecc...). Come detto in precedenza, le particelle alfa e beta non riescono a penetrare il tessuto epidermico umano, ma il loro danno è evidente se esse si trovano all'interno del corpo.

Non esistono cellule viventi che siano completamente resistenti alle radiazioni, tuttavia il danno cellulare si può manifestare in molte maniere differenti. Il danno può variare dalla alterazione di una singola molecola, che può essere immediatamente riparata, fino alla morte cellulare.

Uno degli effetti più significativi della irradiazione cellulare è l'arresto della crescita. Altri effetti delle radiazioni sulle cellule sono la riduzione della motilità, la inattivazione di enzimi e la alterazione delle secrezioni nelle cellule ghiandolari.

Un altro tipico effetto cellulare delle radiazioni è l'alterazione del patrimonio cromosomico. Dopo l'irradiazione si hanno modificazioni dei cromosomi caratterizzate da aumento di "appiccicosità", fusione in una massa nucleare ed infine rottura. La rottura cromosomica introduce una nuova ragione di mortalità nelle cellule pesantemente irradiate (questo è uno dei motivi per cui spesso, nella cura dei tumori, radioterapia e chemioterapia generano più danni del tumore stesso).

Uno degli effetti più evidenti della irradiazione cellulare è la formazione di cellule giganti: questo tipo di cellule si ha frequentemente dopo irradiazione terapeutica dei tumori, come detto sopra. Una cellula irradiata può non essere più capace di divisione mitotica, ma può ancora conservare la sua attività metabolica e perciò diviene sempre più grande. Tuttavia la cellula è destinata a morire non potendosi più suddividere.

Fattori ambientali possono giocare un ruolo non trascurabile. Il contenuto di ossigeno, la temperatura e la pressione possono aumentare o diminuire la radiosensibilità.

Tessuti biologici radiosensibili

I luoghi di produzione delle cellule ematiche, midollo osseo, milza, linfonodi, sono estremamente radiosensibili, così come, se pure in grado minore, le cellule mature del sangue circolante.

Le gonadi (le ovaie nella femmina ed i testicoli nel maschio) sono alquanto radiosensibili: mutazioni ed alterazioni cromosomiche si verificano sia nelle cellule uovo che nelle cellule spermatiche dopo irradiazione e si può avere sterilità, che può essere, a sua volta, transitoria o permanente. Sia l'una che l'altra si verificano nella femmina per dosaggi di radiazioni inferiori che per il maschio.

Milza, linfonodi e timo, centri principali del sistema linfatico, mostrano un elevato grado di radiosensibilità. Nella milza dopo meno di un'ora da una irradiazione di media entità si manifesta l'arresto delle mitosi, seguito rapidamente da un grave danneggiamento dei linfociti. Un altro effetto delle radiazioni sulla milza è la diminuzione del suo peso. Un danno ulteriore è rappresentato dall'arresto della produzione dei globuli rossi e dei globuli bianchi del sangue, dovuta alla completa atrofia degli elementi cellulari precursori.

L'epitelio della mucosa dell'apparato gastroenterico è assai radiosensibile, benché in grado minore rispetto all'apparato ematopoietico ed alle gonadi. Il primo effetto delle radiazioni è la cessazione delle mitosi, seguita da edema, degenerazione, e necrosi delle cellule mucosali. Queste alterazioni, assai precoci, sono responsabili dei sintomi gastrointestinali della malattia tipica da radiazioni: questi si manifestano come

anoressia, nausea, vomito e diarrea. Un altro sintomo abbastanza comune è la secchezza della bocca causata dalla ridotta secrezione salivare.

La radiosensibilità della pelle è pressappoco dello stesso ordine di grandezza di quella dell'apparato gastroenterico. L'effetto delle radiazioni sulla pelle si manifesta abitualmente come arrossamento (eritema) e alterazioni delle appendici cutanee (capelli ed unghie). Caduta dei capelli, ed in genere depilazione, può aversi anche per esposizione a dosi piuttosto basse. Con dosi più alte si può avere depigmentazione, dermatite ed ulcerazioni.

La parte dell'occhio più radiosensibile è il cristallino, ove possono formarsi opacità (cataratta) a seguito di esposizione a radiazioni ionizzanti. Per azione delle radiazioni possono anche aversi, a carico dell'occhio, flogosi della cornea, fotofobia, dolore ed iperemia congiuntivale.

Il sistema nervoso centrale è il sistema biologico più radio resistente. Il cervello è relativamente più sensibile del midollo spinale, tuttavia questa radiosensibilità si manifesta solamente per esposizioni dell'ordine di decine di sievert. Infatti alterazioni da radiazioni del sistema nervoso centrale si manifestano in genere solamente per irradiazione localizzata, quale si verifica in radioterapia, piuttosto che per esposizione del corpo intero. Esposizioni dell'ordine di parecchie decine di sievert possono anche distruggere cellule nervose dell'encefalo, causando l'alterato funzionamento di centri nervosi vitali.

Altri organi, come il cuore, il rene, il fegato ed il pancreas sono assai resistenti alle radiazioni. Dosi elevate possono provocare alterazioni, quali edema, emorragia, infarto e necrosi.

Gli effetti complessivi da radiazione sono l'accorciamento della durata della vita, l'invecchiamento precoce, la leucemia, la cancerogenesi.

Effetti genetici

Qualsiasi dose di radiazione può produrre mutazioni: non esiste, in linea teorica, un livello di soglia minimo. Il numero delle mutazioni è proporzionale alla dose ricevuta. Ad oggi non esiste alcuna possibilità di recupero del gene quando la mutazione è avvenuta. A differenza del danno somatico, il danno al materiale genetico è cumulativo. A parità di dose, l'esposizione protratta ad una irradiazione di bassa intensità produce lo stesso danno genetico di una irradiazione breve di elevata intensità. Le radiazioni aumentano la frequenza ma non variano il substrato chimico delle mutazioni genetiche.

Questi effetti sono stati testati su organismi viventi ma non è attualmente possibile effettuare una completa estrapolazione all'uomo. Lo studio accurato di superstiti di disastri nucleari (vedi Nagasaki, Hiroshima e Chernobyl) ha rivelato alla prima generazione assai poche alterazioni riferibili a mutazioni, d'altra parte non distinguibili dalle mutazioni risalenti alla eredità precedente.

Bibliografia

- P. J. Early, M. A. Razzak, D. B. Sodee – *Medicina nucleare*. Casa Editrice Ambrosiana Milano, 1978
- Wikipedia – *Enciclopedia libera del web*
- Zona Nucleare – sito web <http://www.zonanucleare.com>
- Appunti e studi personali