Versione 1 14/1/2002
e-mail marchetto@to.infn.it
telefono 011 6707338

Introduzione alle Radiazioni Ionizzanti

1.Introduzione

Accade abbastanza di frequente sentire parlare di *radiazioni* alla TV o di leggere sul giornale notizie relative agli effetti delle radiazioni ionizzanti. In questa nota si introducono le nozioni essenziali per capire in maggior dettaglio le caratteristiche, l'uso e i metodi per la misura dell'intensita' della radiazione.
Innanzitutto, per non fare troppa confusione, si dira' che l'argomento ha poco a che vedere con le cosidette *radiazioni non ionizzanti.* Quest'ultime sono altrettanto popolari e specie negli ultimi anni se ne e'discusso molto. Per inquadrare meglio le cose diremo che le radiazioni vengono divise in ionizzanti e non. Le *radiazioni non ionizzanti,* a cui per completezza si vuole fare un breve cenno, sono causate da campi elettrici e magnetici dovuti a:

- elettrodotti per la distribuzione della potenza elettrica. La frequenza di questo tipo di radiazioni e' 50 Hz e per questa ragione e' detta di Bassa Frequenza.
- antenne e telefonini. Queste radiazioni hanno una frequenza molto piu' elevata e pari a circa 1.8 GHz (1GHz = 10^9 Hz).

La pericolosita'delle radiazioni non ionizzanti e'stata investigata mediante molti esperimenti ma al momento non e'mai stata dimostrata. Quindi il modo piu'corretto per inquadrarle, dal punto di vista della loro incidenza come agenti cancerogeni, sta nel dire che: " e'possibile che siano deboli agenti cancerogeni, ma anche una debole attivita' in quella direzione non e' mai stata provata".

Rivolgiamo quindi l'attenzione alle *radiazioni ionizzanti.*
Si comincera', nel capitolo 2, a descrivere e a catalogare le radiazioni ionizzanti. Nel capitolo 3 si introducono e analizzano le sorgenti di radiazioni ionizzanti. Successivamente, nel capitolo 4, si definiscono le grandezze che si usano per misurarne l'attivita'. Finalmente, nel capitolo 5, si descrivera' una strumentazione adatta per la misura dell'intensita' concludendo con una misura dell'attivita' ambientale, che sara' descritta nel capitolo 6.
Approfondimenti sono introdotti (in *corsivo*) per completare alcuni argomenti. Infine al termine di ciascun capitolo si trova un breve riassunto con le relazioni fondamentali.

2.Proprieta' delle radiazioni ionizzanti

Con la denominazione *radiazioni ionizzanti* si identifica il passaggio nella materia di particelle (corpuscoli) o fotoni con conseguente ionizzazione della stessa. Il processo di ionizzazione e'dovuto alla cessione di energia da parte della radiazione alla materia mentre la attraversa.
La particella-proiettile con energia E urta uno degli elettroni atomici e gli cede una parte dell'energia, δE, strappandolo dall'atomo (vedere la schematizzazione in Figura 1). La particella incidente riemerge con energia $E - \delta E$, mentre l'elettrone atomico acquisisce energia pari circa a δE.
A partire dall'atomo complessivamente neutro si vengono ad avere quindi due particelle cariche (a prescindere dalla particella-proiettile che rapidamente si allontanera'): l'elettrone con carica –1, e lo ione con carica +1.

Con il termine ionizzazione si intende quindi la separazione di un elettrone dall'atomo a cui appartiene. In alcuni casi questo processo puo'innescare la rottura dei legami fra atomi che sono normalmente legati nella stessa molecola.

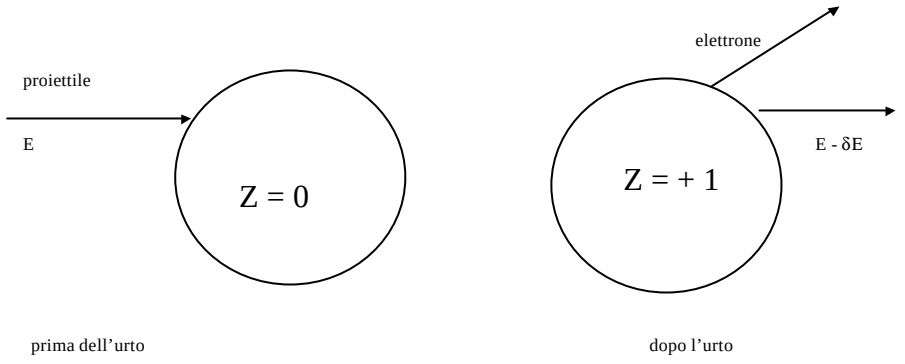

Figura 1. *Schematizzazione di un urto: una particella urta un elettrone atomico e lo strappa dall'atomo creando una coppia elettrone-ione.*

Si puo' allora intuire come le radiazioni ionizzanti possano essere pericolose alle cellule di esseri viventi : infatti se l'energia ceduta da una particella mentre attraversa una cellula rompe il legame molecolare di una delle catene del DNA, la cellula puo' morire oppure autonomamente ripararsi. In questa operazione puo' anche accadere che il codice genetico venga re-interpretato in modo sbagliato innescando un processo pericoloso. Entrambi i processi, morte della cellula e auto-riparazione, avvengono continuamente nella materia vivente e la probabilita' di una mutazione e'estremamente piccola.
Seguono due approfondimenti: il primo affronta in modo piu'dettagliato i meccanismi con cui i vari tipi di proiettile interagiscono con la materia.
Un secondo approfondimento tratta i processi radiobiologici innescati dalla ionizzazione della materia cellulare.

Approfondimento

Passaggio di particelle attraverso la materia
In questo approfondimento si esaminano in maggior dettaglio i meccanismi di perdita di energia di diversi tipi di particelle nell'attraversare la materia.

- *Particelle cariche pesanti (protoni, muoni, etc...) nell'attraversare la materia cedono la loro energia per lo piu' mediante urti elastici con gli elettroni atomici. Quindi la perdita di energia e' caratterizzata da una innumerevole quantita' di urti, ciascuno dei quali coinvolge tipicamente una frazione molto piccola dell'energia del proiettile. A loro volta gli elettroni colpiti (detti anche raggi* ***d)*** *acquistano energia che perdono poi urtando altri elettroni atomici. Occasionalmente, con probabilita' molto minore, il proiettile puo' urtare il nucleo di un atomo (collisione nucleare) provocandone la rottura e perdendo una frazione consistente di energia. Se si considerano particelle pesanti molto energetiche esse perdono mediamente 2 MeV*[1] *per ogni centimetro percorso in acqua.*

[1] 1 MeV = 10^6 eV, 1keV = 10^3 eV, 1 GeV = 10^9 eV. Lo eV e'una conveniente unita'di misura dell'energia e corrisponde all'energia acquistata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt.

Inoltre la perdita di energia e' linearmente proporzionale alla densita' della materia attraversata.
Il meccanismo stesso con cui perdono energia, caratterizzato da numerosissimi urti di cui ciascuno porta via una parte molto piccola della energia a disposizione, fa si' che la lunghezza del percorso nella materia sia quasi la stessa per ogni particella di data energia.

- *Particelle neutre (neutroni) perdono la loro energia mediante collisioni con i nuclei atomici. I nuclei possono essere debolmente accelerati oppure essere frantumati. I frammenti (che sono oggetti carichi, essendo costituiti da protoni e neutroni) perdono energia in modo analogo alle particelle descritte nel paragrafo precedente.*
- *Elettroni e positroni nell'attraversare la materia cedono la loro energia mediante urti con gli elettroni atomici in modo del tutto analogo alle particelle pesanti. In questo caso il percorso e' meno predicibile in quanto per ogni urto l'energia ceduta all'elettrone atomico puo' arrivare fino al 50% dell'energia del proiettile. Un secondo importante meccanismo di perdita di energia di elettroni e positroni e' dovuta all'interazione con il campo elettrico nucleare. In altri termini, elettroni e positroni oltre che a perdere energia cedendola agli elettroni atomici possono perdere energia frenati dall'effetto del campo elettrico dovuto al nucleo. Questo meccanismo e'detto di frenamento (bremsstrahlung). La grandezza di rilievo per comprendere l'evoluzione della perdita di energia in un dato mezzo e' la lunghezza di radiazione del mezzo stesso , L_{rad} , che e' la distanza per la quale l'energia dell'elettrone si riduce di un fattore pari a* **e** *(= 2.71...).*
- *Fotoni (nome piu' generale per raggi X e raggi* **g***) rilasciano energia nell'attraversare la materia per lo piu' mediante i seguenti tre meccanismi:*
    1. *Effetto fotoelettrico: il fotone viene assorbito da elettrone atomico, il quale acquista energia sufficiente per sfuggire al legame atomico.*
    2. *Urto Compton: il fotone urta un elettrone atomico e lo stacca dall'atomo avra' una direzione ed energia diversa dall'incidente.*
    3. *Creazione di coppie: mentre i due precedenti processi possono essere compresi in termini quasi balistici, quest'ultimo tipo di fenomeno e' complesso poiche' implica la trasformazione del fotone in una coppia elettrone-positrone. La creazione della coppia da parte del fotone avviene in presenza del campo elettrico del nucleo.*

  In tutti i tre casi come risultato del processo di interazione si ha almeno una particella carica. Si puo' quindi intuire che man mano che si penetra nel materiale la perdita di energia dovuta ai fotoni assomigliano sempre piu' a quella degli elettroni.

Danno biologico della radiazione.

In questo approfondimento si esaminano i meccanismi per cui la radiazione ionizzante puo' danneggiare le cellule.
I principali processi di danno cellulare sono di due tipi:

1. *danno diretto al DNA mediante la rottura di legami molecolari dovuti alla ionizzazione.*
2. *ionizzazione di una molecola di H_2O, di cui il corpo umano e'ricco, e conseguente produzione di radicali liberi che vanno ad attaccare le molecole della cellula.*

Esaminiamo brevemente i due casi.
Del danno diretto al DNA attraverso la ionizzazione di atomi che appartengono alla struttura stessa del DNA si e'detto sopra e non c'e' molto da aggiungere se non che la doppia rottura dell'elica (Double Strand Breaking) appare essere la piu' difficile da riparare. Qualitativamente questo induce a pensare che processi di ionizzazione molto concentrati, per esempio dovuti a particelle pesanti e lente, hanno maggior probabilita' di spezzare entrambi le eliche del DNA.

A parita' di dose (vedere la definizione nei prossimi capitoli), la radiazione dovuta a fotoni e elettroni presenta tipicamente una minore aggressivita' e pericolosita'.
La ionizzazione di una molecola di H_2O da' luogo a uno ione positivo H_2O^+ e $\boldsymbol{e}^-$. In tempi molto brevi si ha che lo ione H_2O^+ si separa in $H^+ + OH$, mentre invece lo $\boldsymbol{e}^-$ si attacca ad una molecola di H_2O dando luogo a $H + OH^-$. Le molecole di OH (dette radicali) si muovono abbastanza liberamente e possono attaccare il DNA.
In entrambi i casi, danno diretto dovuto a rottura di legami molecolari o indirettamente attraverso la produzione di radicali liberi, il DNA puo' auto-ripararsi, e in questo caso non ci saranno effetti, oppure puo' riportare un danno di tipo permanente. Questa seconda possibilita' e' molto poco probabile per cui la tipica radioattivita' naturale introduce un fattore di rischio praticamente nullo.

Sommario. Il passaggio di particelle attraverso la materia provoca la ionizzazione di atomi rompendo cioe' legami elettrone-atomo. I processi di ionizzazione dipendono dal tipo di particella proiettile. Il risultato netto e'comunque che il numero di ionizzazioni dipende dall'energia depositata. Nella materia vivente le ionizzazioni possono provocare un danno alla catena del DNA. Il danno puo' essere autonomamente riparato ovvero, con probabilita' trascurabile, puo' portare a un difetto biologico permanente.

3.Sorgenti di radiazioni ionizzanti

Si passa ora ad elencare e discutere le sorgenti di radiazioni ionizzanti. Si possono dividere in naturali e artificiali cioe' prodotte da attivita'umana.

Radioattivita' naturale

Le radiazioni ionizzanti naturali sono dovute a raggi cosmici oppure a decadimenti di elementi radioattivi naturali.

- Con il termine *raggi cosmici* si intendono particelle cariche di alta energia che arrivano dallo spazio. All'ingresso dell'atmosfera i raggi cosmici sono costituiti per lo piu' da protoni (86 %) e da nuclei di elio (13%). A livello del mare i raggi cosmici sono principalmente costituiti da muoni, μ. Hanno uno spettro energetico che, sempre a livello del mare, e' centrato attorno a 2 GeV e possono arrivare fino a 10^{20} eV. Il numero approssimativo di raggi cosmici che arrivano al suolo e'di circa 1 particella/(cm^2 x min). Quindi una persona, che possiamo stimare abbia una sezione quando visto dall'alto di (20x60) cm^2 sara'attraversata da ~1200 particelle/minuto [2].
- I decadimenti spontanei di elementi radioattivi che si trovano comunemente in natura costituiscono una preponderante frazione della radioattivita'naturale a cui si e' soggetti. L'elemento piu'comune e'il radon, che e'un gas che si trova anche nel cemento. Questo fa si' che nelle case normalmente ci sia un livello di radiottivita' naturale piu'altra che all'aperto. Inoltre i valori cambiano molto da regione a regione della Terra e anche spostandoci di pochi chilometri si possono misurare variazioni notevoli. Si vedranno in seguito i livelli di radioattivita' ambientale nelle diverse zone terrestri.

Ricordiamo che storicamente le radiazioni da decadimenti di elementi radioattivi erano note come α, β, e γ.

[2] Questo e'un conto del tutto approssimato e in verita'per difetto. Soltanto se i raggi cosmici fossero accuratamente verticali il numero trovato sarebbe corretto. In effetti i raggi cosmici arrivano da tutte le direzioni anche se sono preponderanti le direzioni verticali.

- Le radiazioni α sono costituite da quattro nucleoni, due neutroni e due protoni. Vengono emesse principalmente da Uranio e Radio con energie basse tali per cui possono percorrere soltanto pochi decimi di millimetri in acqua. Sono pericolose soltanto se ingerite poiche'altrimenti verrebbero fermate da vestiti etc...
- Le radiazioni β sono elettroni emessi per lo piu'da Trizio. Mediamente possono attraversare alcuni centimetri prima di essere fermate.
- Le radiazioni γ sono fotoni emessi da molti tipi decadimenti. Possono penetrare per molti centimetri.

Radioattivita' artificiale

Intendiamo con il termine radioattivita'artificiale tutte le radiazioni ionizzanti da addebitarsi all'attivita' umana. L'elenco potrebbe essere molto lungo, ma si riportano soltanto le sorgenti piu'rilevanti:

- radiodiagnostica ovvero raggi X, TAC
- radioterapia ovvero cura di tumori mediante radiazioni ionizzanti
- rilascio di radioattivita'dovuta a centrali nucleari.

Anche per questo tipo di radioattivita' si vedranno in seguito i livelli e si compareranno a quelli dovuti alla radioattivita'naturale.

Sommario. La radioattivita' puo' essere sia dovuta a fenomeni naturali, raggi cosmici e decadimenti di elementi radioattivi, sia alle attivita' umane. In quest'ultimo caso sono preponderanti la radiodiagnostica e la radioterapia.

4.Unita' di misura dosimetriche

L'unita' di misura piu'importante e' la **dose** con la quale si indica la quantita'di radiazione ricevuta da un oggetto relativamente alla massa dell'oggetto. La dose e' definita come l'energia depositata in una massa per effetto di radiazioni ionizzanti divisa per il valore della massa. In termini piu' rigorosi la dose **D** e'data da $\Delta E/\Delta m$, ove che con ΔE si intende la energia depositata nella massa Δm. Nel Sistema Internazionale (SI), l'unita'di misura e' il **Gray (Gy)** che e' pari all'energia di un Joule depositata nella massa di 1 kg.
E' ancora in uso, come unita' di misura, il **rad**: 100 rad = 1 Gy.

Approfondimento

Nell'eseguire la misura della dose e quindi nell'applicare la formula della dose occorre fare una certa attenzione, specie se si vuole eseguire una misura di precisione. Per esempio se per calcolare la dose che si deposita quando si irraggia una mano (si stanno facendo i raggi X) si divide per l'intera massa della persona si farebbe un errore (evidente). Si potrebbe erroneamente affermare che e' stata somministrata una dose (bassa) a tutto il corpo e che la mano e il piede sono stati irradiati con la stessa dose. Invece l'affermazione corretta e': la mano ha assorbito una dose di rilievo mentre ogni altra parte del corpo non e'stata irraggiata. Quindi uno dei problemi di metodo sta nell'individuare zone di irraggiamento omogeneo. La cosa

diventa piu' facile se si divide l'intero volume in sottovolumi e si fa tendere a valori molto piccoli il volume considerato.
Un altro problema puo' nascere dal fatto che se il volume (piccolo) considerato e' circondato da parti non omogenee (densita' che cambia molto) la misura dell'energia risulta disturbata.
In ultima analisi si ha interesse a misurare la dose nel corpo umano, per questo motivo le misure si fanno in fantoccio di acqua o plexiglass. Il fantoccio e' semplicemente un oggetto di dimensioni simili a quelle del corpo umano. Il fantoccio d'acqua e' una vasca piena d'acqua, mentre il fantoccio di plexiglass e' costituito da lastre di plexiglass con dei fori entro i quali si pongono i rivelatori.
Per quel che riguarda il rivelatore, che non e' normalmente fatto di acqua e/o plexiglass, costituisce una disomogeneita'. Per effettuare misure di precisione, il rivelatore deve essere un oggetto molto piccolo per non disturbare troppo la deposizione di energia. Per dirla in modo piu' tecnico la dose in un punto del volume del fantoccio, D(x,y,z), e' data da dE / dm ove con dE e dm si intendeno rispettivamente la quantita'di energia, dE, depositata in un volume il piu' piccolo possibile di massa dm. Infine il materiale del rivelatore deve essere il piu' possibile simile al corpo umano. La grandezza rilevante e' il rapporto Z_{eff} / A_{eff} dove con Z_{eff} e A_{eff} si indicano rispettivamente il numero atomico efficace e il numero di massa efficace. Nel caso dell'acqua stanno nel rapporto 10 / 18, essendo A_{eff} dell'acqua pari a $16 \times 1 + 1 \times 2 = 18$ e $Z_{eff} = 8 \times 1 + 1 \times 2 = 10$. I valori efficaci di una molecola si calcolano sommando il numero di massa o atomico, rispettivamente, su tutti gli atomi che costituiscono la molecola.

Un'altra grandezza di rilievo e' la dose equivalente o efficace (detta anche RBE da Relative Biological Effectiveness). Questa rappresenta la dose misurata non in termini di pure grandezze fisiche (energia e massa) ma in termini di efficacita' biologica.
La dose efficace, D_e , e' legata alla dose D da un fattore detto fattore di qualita', Q, che dipende dal tipo di radiazione (fotoni, elettroni, protoni, neutroni, alfa, etc...) e dall'energia della particella incidente, $D_e = Q \times D$. La seguente tabella da i valori di Q per varie particelle.
L'unita'di misura della dose equivalente e'il **Sievert (Sv)** = Q x Gray.
E'ancora usato, come unita' di misura, il **rem** : 100 rem = 1 Sv.

	fotoni	elettroni	protoni	α	neutroni
Fattore di qualita'	1	1	10	20	3

A questo punto si possono indicare i valori delle dosi a cui si e'soggetti suddividendole secondo le sorgenti di radioattivita'che sono state precedentemente elencate: naturali e artificiali.
L'unita'di misura e' il mSievert/anno

Sorgenti naturali

Raggi cosmici	0.3 mSv/anno
Radioattivita'naturale dovuta all'ambiente	0.3 mSv/anno
Sorgenti presenti nel corpo (^{40}K, ^{12}C)	0.3 mSv/anno

Totale	1 mSv/anno

E'importante rilevare che la dose dovuta ai raggi cosmici cambia in funzione dell'altezza a cui ci si trova e la dose quotata (0.3 mSv/anno) e' relativa al livello del mare. Invece a 2000 metri la dose raddoppia.

La radioattivita' dovuta all'ambiente dipende molto dal luogo in cui si misura e le variazioni sono piuttosto ampie. Gli elementi che possono influire sono i minerali presenti nel terreno e la struttura stessa del terreno. Si riportano nella seguente tabella a titolo di esempio i valori di radioattivita'naturale espresso in mSv / anno misurati in alcune citta' italiane.

Ancona	0.85	Napoli	2.13
Aosta	0.49	Palermo	0.90
Bari	0.83	Perugia	0.86
Bologna	0.80	Potenza	1.31
Cagliari	0.86	Reggio Cal.	1.28
Campobasso	0.69	Roma	1.58
Firenze	0.77	Torino	0.86
Genova	0.75	Trento	0.84
L'Aquila	0.82	Trieste	0.76
Milano	0.82	Venezia	0.77

Come si puo' rilevare le differenze fra citta' e citta' sono piuttosto notevoli. Si e' pero' ben al di sotto delle soglie di rischio.

Radioattivita' artificiale

Esame raggi-X	1 mSv
TAC	10 mSv

Come si puo' notare un tipico esame con raggi-X e' equivalente a un anno di radioattivita' dovuta a sorgenti naturali. Un esame TAC invece corrisponde a circa 10 anni. Occorre rilevare che in questo caso soltanto la parte del corpo esaminata e'sottoposta ad irraggiamento mentre nel caso delle sorgenti naturali interessano tutto il corpo.

Sommario. La grandezza con cui si misura la radiazione e' la **dose** che e' definita come l'energia rilasciata, ΔE, divisa per la massa Δm, ove la massa da considerare e' quella in cui l'energia e' stata depositata. L'unita' di misura e' il Gray (Gy): 1 Gy = 1 Joule/kg. La dose equivalente, la cui unita'e'il Sievert (Sv), misura la efficacita' biologica della dose fisica, cioe' il danno biologico. Si ottiene moltiplicando la dose fisica per un coefficiente di qualita' dipendente dal tipo di perticella-proiettile.

Le sorgenti di radioattivita' si suddividono in naturali e artificiali.
La radioattivita' naturale a sua volta e' dovuta a raggi cosmici, attivita' ambientale, e elemeni radioattivi presenti nel corpo. Ciascuna causa contribuisce per circa un terzo del totale, che si somma a circa 1 mSv/anno.

La radioattivita' artificiale e' dovuta principalmente a esami di radiodiagnostica (raggi X, TAC) e trattamenti radioterapeutici nella cura del cancro. La dose, in questi casi, varia da caso a caso dipendendo dal tipo e numero di esami.